



指导性文件  
GUIDANCE NOTES  
GD25-2017

中国船级社

**船体结构疲劳强度指南**  
**GUIDELINES FOR FATIGUE**  
**STRENGTH OF SHIP STRUCTURE**  
(2018)

生效日期：2018年1月1日

北京

## 目录

第 1 章 通则.....	4
1.1 一般规定.....	4
1.2 符号规定.....	4
1.3 疲劳评估术语的定义.....	6
1.4 疲劳损伤及失效模式.....	7
1.5 疲劳评估方法.....	9
1.6 腐蚀修正.....	11
1.7 疲劳评估装载工况.....	11
1.8 计算工况.....	16
第 2 章 疲劳载荷.....	16
2.1 一般要求.....	16
2.2 参数定义.....	17
2.3 船舶运动和加速度.....	18
2.4 船体梁载荷.....	22
2.5 载荷工况.....	24
2.6 外部压力.....	26
2.7 干散货引起的内部压力.....	32
2.8 液体引起的内部压力.....	36
2.9 集装箱货物引起的载荷.....	37
第 3 章 疲劳评估.....	38
3.1 一般要求.....	38
3.2 船体结构节点的设计指导.....	39
3.3 设计应力范围.....	39
3.4 设计 S-N 曲线的选取.....	41
3.5 疲劳累积损伤计算.....	42
3.6 疲劳寿命计算.....	43
第 4 章 简化应力分析.....	43
4.1 一般要求.....	43
4.2 基于简化分析的热点应力范围与热点平均应力.....	43
4.3 名义应力分量计算.....	44
4.4 热点应力计算.....	47
4.5 应力集中系数.....	47
第 5 章 有限元应力分析.....	54
5.1 一般要求.....	54
5.2 结构模型化.....	55
5.3 有限元分析工况.....	55
5.4 边界条件.....	56
5.5 基于有限元分析的热点应力范围与热点平均应力.....	59
5.6 典型节点的有限元细化要求.....	63
第 6 章 泵塔疲劳强度.....	71
6.1 一般规定.....	71
6.2 装载工况和装载水平.....	72
6.3 全船耐波性分析.....	72

6.4 晃荡工况.....	73
6.5 泵塔结构有限元分析.....	73
6.6 疲劳分析.....	75
附录 散货船、油船和集装箱船的船体结构节点.....	78

# 第 1 章 通则

## 1.1 一般规定

1.1.1 本指南适用于钢质海上航行船舶货舱区域的船体结构强度评估，包括以下船型：

- (1) 船长 150m 及以上的非 CSR 散货船；
- (2) 船长 150m 及以上的非 CSR 油船；
- (3) 船长 150m 及以上的集装箱船；
- (4) 薄膜型液化天然气运输船（以下简称 Mem-LNG 船）及其泵塔、独立液货舱型液化气体运输船及 A/B（棱柱型）独立液货舱；
- (5) 专门设计和制造用于运输轮式商品车辆的钢质海上航行的汽车运输船；
- (6) 船长 150m 及以上的矿砂船。

1.1.2 其他船舶也可参照本指南，对其船体结构进行疲劳强度评估。

1.1.3 按本指南进行疲劳强度评估的船舶，其结构设计、建造工艺和建造质量应满足 CCS《钢质海船入级规范》、《国内航行海船建造规范》或 CCS 接受的其他有关标准的要求。

1.1.4 对于独立液货舱型液化气体运输船，其船体结构及 A/B 型（棱柱型）独立液货舱应按本指南进行常规疲劳强度评估（即基于 S-N 曲线的 P-M 线性累积损伤方法），且 B 型独立液货舱还应按 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》中的有关要求进行了断裂力学方法的疲劳强度评估，C 型独立液货舱应按 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》中的有关要求进行了疲劳强度评估（如适用）。

## 1.2 符号规定

1.2.1 **船长 L (m)**：沿夏季载重水线，由首柱前缘量至舵柱后缘的长度；对无舵柱的船舶，由首柱前缘量至舵杆中心线的长度；但均不应小于夏季载重水线总长的 96%，且不必大于 97%。

对于箱形船体，L 为沿夏季载重线自船首端壁前缘量至船尾端壁后缘的长度。

对于无舵杆的船舶（如设有全回转推进器的船舶），L 为夏季载重水线总长的 97%。

1.2.2 **船宽 B (m)**：在船舶的最宽处，由一舷的肋骨外缘量至另一舷的肋骨外缘之间的水平距离。

1.2.3 **型深 D (m)**：在船长中点处，沿船舷由平板龙骨上缘量至上层连续甲板横梁上缘的垂直距离；对甲板转角为圆弧形的船舶，则由平板龙骨上缘量至横梁上缘延伸线与肋骨外

缘延伸线的交点。

1.2.4 吃水  $d$  (m): 在船长中点处, 由平板龙骨上缘量至夏季载重线的垂直距离。

1.2.5 吃水  $d_{LC}$  (m): 在船长中点处, 由平板龙骨上缘量至相应装载工况下水线的垂直距离。

1.2.6 方形系数  $C_b$ : 方形系数  $C_b$  由下式确定:

$$C_b = \frac{\nabla}{LBd}$$

式中:  $\nabla$ ——相应于夏季载重线吃水时的型排水体积,  $m^3$ ;

$L$ ——船长,  $m$ ;

$B$ ——船宽,  $m$ ;

$d$ ——吃水,  $m$ 。

1.2.7 最大服务航速  $V$ : 船舶在最深航行吃水、螺旋桨最大转速 (RPM) 和主机的相应最大持续功率 (MCR) 所保持的最大航速。

1.2.8 主应力及方位角:

(1) 主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  按下列公式确定:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{N/mm}^2$$
$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{N/mm}^2$$

式中:  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ ——正应力,  $\text{N/mm}^2$ ;

$\tau_{xy}$ ——剪应力,  $\text{N/mm}^2$ 。

(2) 主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  成  $90^\circ$  夹角, 主应力  $\sigma_1$  与  $x$  轴的夹角  $\theta$  按下式确定:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_x}{\tau_{xy}}\right) \quad \text{rad}$$

式中:  $\sigma_x$ 、 $\sigma_1$  和  $\tau_{xy}$  见本条 (1)。

1.2.9 坐标系和应力符号:

(1) 船舶的几何尺寸根据下列右手坐标系 (见本章图 1.2.9) 定义:

原点: 船舶对称纵剖面、船长  $L$  尾端和基线的相交处;

$X$  轴: 纵向轴, 向前为正;

$Y$  轴: 横向轴, 向左为正;

$Z$  轴: 垂向轴, 向上为正。

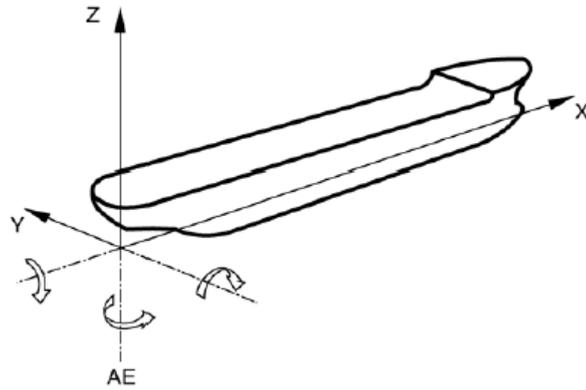


图 1.2.9 参考坐标系

(2) 船体运动及加速度的正负号定义：

纵荡以沿 X 轴正向为正；

横荡以沿 Y 轴正向为正；

垂荡以沿 Z 轴正向为正；

横摇以右手螺旋法则绕 X 轴为正；

纵摇以右手螺旋法则绕 Y 轴为正；

艏摇以右手螺旋法则绕 Z 轴为正；

船上任一点的纵向线加速度以沿 X 轴正向为正；

船上任一点的横向线加速度以沿 Y 轴正向为正；

船上任一点的垂向线加速度以沿 Z 轴正向为正。

(3) 应力符号定义：拉伸应力为正，压缩应力为负。

### 1.3 疲劳评估术语的定义

1.3.1 **热点**：热点是结构中疲劳裂纹初始产生处，一般位于焊趾、部分焊透的焊根或角焊缝、板材的自由边。

1.3.2 **名义应力 $\sigma_n$  (N/mm<sup>2</sup>)**：名义应力是仅考虑结构几何形状影响的在结构构件中的应力，但不考虑由于结构不连续和焊缝存在引起的应力集中。名义应力可采用梁理论或细网格有限元方法求得。

1.3.3 **热点应力 $\sigma_h$  (N/mm<sup>2</sup>)**：热点应力是热点处的应力，考虑由于结构不连续和焊接件的存在引起的应力集中，但不考虑焊趾处切口导致的非线性应力。热点应力可采用名义应力乘以应力集中系数获得，或者采用精细网格有限元分析直接求得。

1.3.4 应力集中系数  $K_g$  : 热点应力与名义应力的比值, 按下式计算:

$$K_g = \frac{\sigma_h}{\sigma_n}$$

式中:  $\sigma_h$ ——热点应力,  $\text{N/mm}^2$ ;

$\sigma_n$ ——名义应力,  $\text{N/mm}^2$ 。

1.3.5 热点应力范围  $S_h$  ( $\text{N/mm}^2$ ): 引起结构疲劳的交变热点应力的应力范围, 按下式计算:

$$S_h = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}| \quad \text{N/mm}^2$$

式中:  $\sigma_{\max}$ ——热点应力循环的最大值,  $\text{N/mm}^2$ ;

$\sigma_{\min}$ ——热点应力循环的最小值,  $\text{N/mm}^2$ 。

1.3.6 平均热点应力  $\sigma_m$  ( $\text{N/mm}^2$ ): 引起结构疲劳的交变热点应力的平均值, 按下式计算:

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad \text{N/mm}^2$$

式中:  $\sigma_{\max}$ ——热点应力循环的最大值,  $\text{N/mm}^2$ ;

$\sigma_{\min}$ ——热点应力循环的最小值,  $\text{N/mm}^2$ 。

1.3.7 设计应力范围  $S_D$  ( $\text{N/mm}^2$ ): 用于疲劳评估的应力范围, 为热点应力范围经板厚修正和平均热点应力修正求得。

1.3.8 关键位置: 由于应力集中、构件对中、结构非连续以及腐蚀在船舶寿命中的失效概率高于周围相邻结构的区域内, 易于疲劳损坏而需提供设计改进的特定位置。

## 1.4 疲劳损伤及失效模式

1.4.1 船舶在海上航行时, 船体结构一直受到波浪力及船舶运动产生惯性力的作用。而波浪力和惯性力都是不断变化的动载荷, 他们在船体结构内部引起交变应力, 造成结构的疲劳损伤。

1.4.2 疲劳破坏是船舶结构的主要破坏形式之一。特别对于大型船舶和使用高强度钢的船舶, 疲劳问题显得尤为突出。

1.4.3 疲劳控制的目标是保证遭受疲劳载荷的船体结构有足够的疲劳寿命。疲劳寿命的计算、分析相关疲劳损坏数据可以给出结构设计的基础(钢材的选择、构件尺度和局部

节点细则)。进一步, 它们可以形成船体结构在制造和全运营寿命期内的有效检查程序。

#### 1.4.4 疲劳裂纹的失效模式主要有以下四种:

##### (1) 疲劳裂纹从焊趾扩展进母材 (见本章图1.4.4 (1)):

在船体焊接结构中, 疲劳裂纹从焊趾扩展进母材是一种常见的失效模式。疲劳裂纹起始于在焊趾处小的缺陷或咬边。

为防止该失效模式, 本指南给出了结构焊接节点的疲劳评估方法。

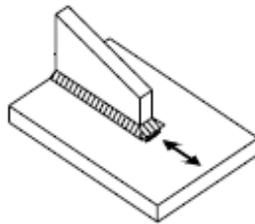


图1.4.4 (1)

##### (2) 疲劳裂纹从焊缝根部扩展贯通角焊缝 (见本章图1.4.4 (2)):

从角焊缝的焊缝根部扩展贯通角焊缝的疲劳裂纹是一种能导致重大后果的失效模式。

为防止该失效模式, 按本指南附录中给出的关键位置处结构焊接节点的焊接要求。

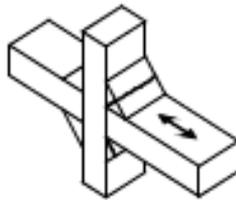


图1.4.4 (2)

##### (3) 疲劳裂纹从焊缝根部进入焊接下的剖面 (见本章图1.4.4 (3)):

疲劳裂纹从焊缝根部进入焊接下的剖面在结构的运营寿命期内、在实验室疲劳试验中都可观察到。在一些易产生该类型裂纹的临界位置可采用全焊透焊缝以避免该失效模式。

为防止该失效模式, 按本指南附录中给出的关键位置处结构焊接节点的焊接要求。

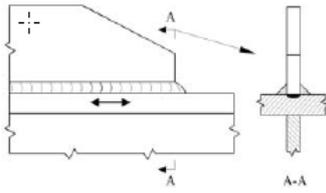


图1.4.4 (3)

(4) 疲劳裂纹起始于非焊接节点的自由边（见本章图1.4.4 (4)）：

在母材中的疲劳裂纹是一种具有高应力循环次数构件的失效模式。然而，该疲劳裂纹常常开始于构件中的切口和沟槽或小的表面缺陷/不平整。

为防止该失效模式，本指南给出了非焊接结构节点的疲劳评估方法。

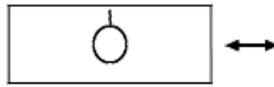


图 1.4.4 (4)

## 1.5 疲劳评估方法

1.5.1 疲劳评估是基于线性累积损伤模型（Palmgren- Miner 的规则）进行。累积损伤度  $D$  应按下式计算：

$$D = N_T \int_0^{\infty} \frac{f(S)}{N(S)} dS$$

式中： $N_T$ ——结构在其设计寿命期间的应力循环总次数；

$S$ ——设计应力范围；

$f(S)$  ——设计应力范围长期分布的概率密度函数；

$N(S)$  ——与设计应力范围  $S$  相对应的结构疲劳失效时的应力循环次数。

1.5.2 船体结构的疲劳评估可采用简化分析法和谱分析法。本指南的疲劳评估方法是基于简化分析法。

1.5.3 疲劳简化分析法主要包括下述步骤：

- (1) 疲劳载荷计算；
- (2) 热点应力范围计算；
- (3) 选择设计 S-N 曲线；

(5) 累积损伤度的计算及衡准。

应用本指南进行船体结构疲劳强度评估的流程见本章图 1.5.3。

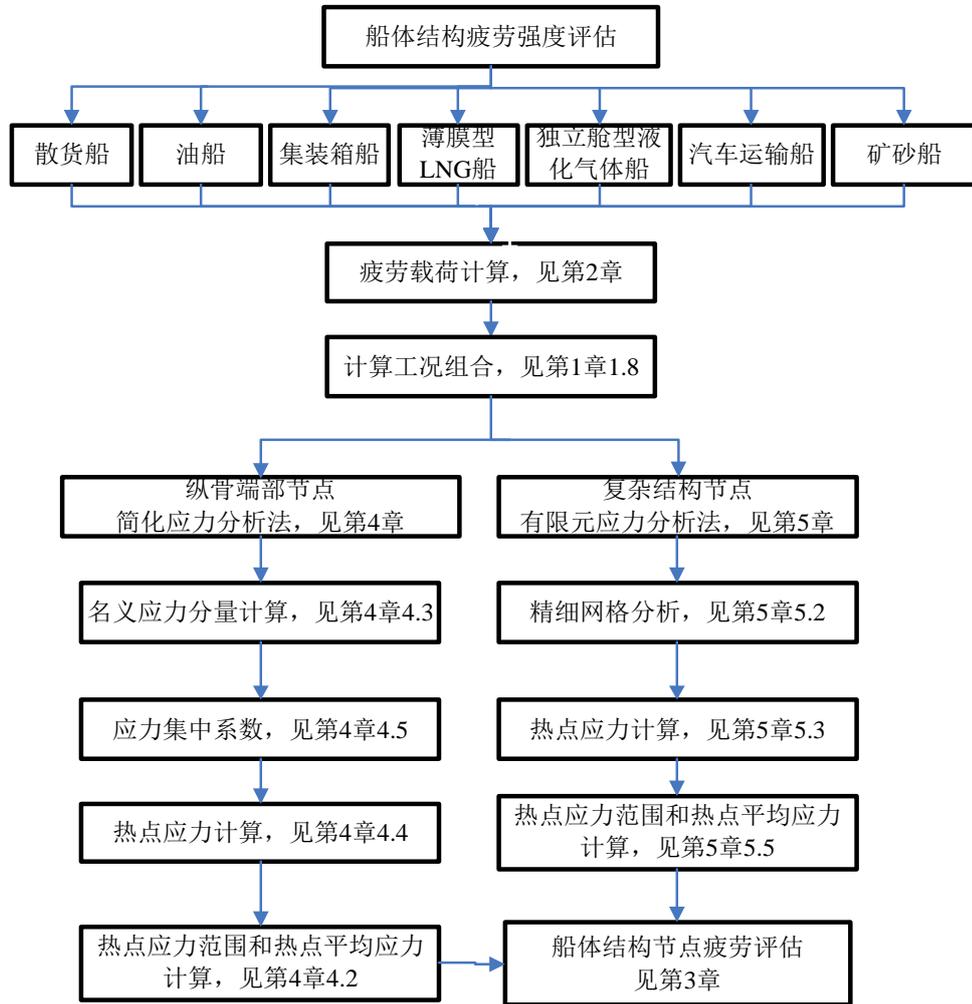


图 1.5.3

1.5.4 S-N 曲线采用英国能源部经修正的非管节点的基本 S-N 曲线(见本章图 1.5.4), 由 B、C、D、E、F、F<sub>2</sub>、G、W 八根曲线组成, 每根曲线表示一类结构节点所受的交变应力范围值与应力循环次数的关系。这些曲线适用于最小屈服应力小于 400N/mm<sup>2</sup> 的钢材, 其对应的存活概率为 97.6%。

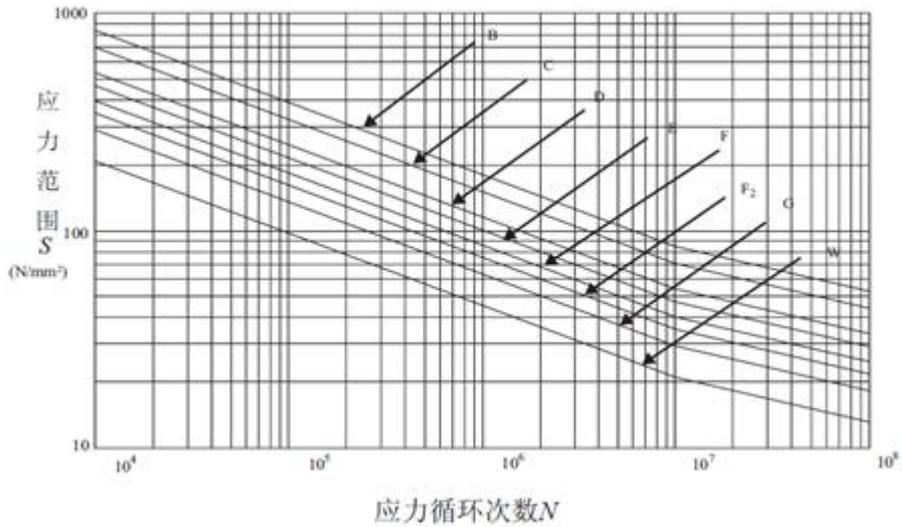


图 1.5.4

## 1.6 腐蚀修正

1.6.1 疲劳评估应考虑船体结构正常腐蚀磨损的影响。本指南在应力计算时采用建造构件尺寸，但在计算热点应力时应乘以下述要求的腐蚀修正系数：

(1) 对于简化应力分析时船体梁弯曲正应力和有限元应力分析时总体载荷工况下的热点应力，腐蚀修正系数  $f_{ch} = 1.05$ ；

(2) 对于简化应力分析时侧向载荷作用下的弯曲正应力和有限元应力分析时局部载荷工况下的热点应力，腐蚀修正系数  $f_{cl} = 1.1$ 。

## 1.7 疲劳评估装载工况

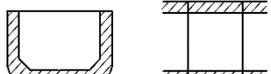
1.7.1 船体上的波浪载荷随吃水和载荷分布而变化，因此在疲劳评估中需要考虑超过 1 个的装载工况。装载工况的确定取决于船舶类型，通常选取 2~3 个最常用的装载和压载工况作为用于疲劳评估的装载工况。

1.7.2 油船的疲劳评估装载工况为均匀满载工况和正常压载工况，具体要求见本章表 1.7.2。

油船疲劳评估装载工况要求

表 1.7.2

疲劳评估装载工况	装载模式	吃水	静水弯矩修正系数	时间分配系数 $\alpha$

			$C_{SW}$	
均匀满载		满载吃水	0.6 (中垂)	0.425
正常压载		压载吃水	0.8 (中拱)	0.425

1.7.3 散货船的疲劳评估装载工况为均匀满载工况、隔舱满载工况和正常压载工况，具体要求见本章表 1.7.3。有关参数定义如下：

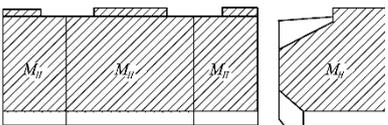
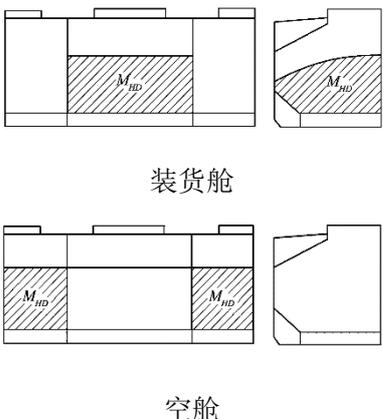
$M_H$ ：吃水  $d$  时，均匀装载工况下（所有货舱装货且装载比值相同，所有压载舱为空舱），货舱中的实际载货量。

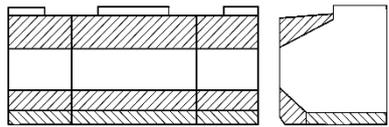
$M_{HD}$ ：吃水  $d$  时，隔舱装载工况下（所有装货舱的货物密度相同，且装载比值相同，所有压载舱为空船），货舱的最大允许载货量。

$V_{FULL}$ ：货舱容积，包括货舱舱口围板包围的容积。

散货船疲劳评估装载工况要求

表 1.7.3

疲劳评估 装载工况	装载模式	吃水	静水弯 矩修正 系数 $C_{SW}$	货舱载 荷量 $M$ (t)	干散货密度 $\rho_C$ (t/m <sup>3</sup> )	时间分配系数 $\alpha$	
						无隔舱 装载	具有隔舱 装载
均匀满载		满载吃水	0.4 (中垂)	$M_H$	$\frac{M_H}{V_{FULL}}$	0.5	0.25
隔舱满载		满载吃水	0.75 (中拱)	$M_{HD}$	设计允许的 最大货物密 度，如无规定 应取 3.0	-----	0.25

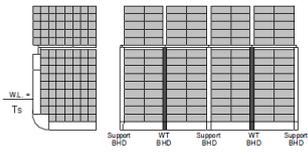
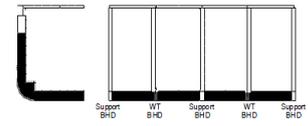
正常压载		压载吃水	0.8 (中拱)	-----	-----	0.35	0.35
------	---	------	-------------	-------	-------	------	------

1.7.4 集装箱船的疲劳评估装载工况为满载工况和正常压载工况，具体要求见本章表

1.7.4。

集装箱船疲劳评估装载工况要求

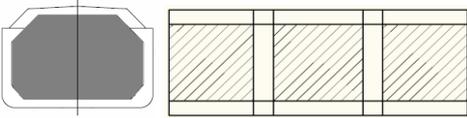
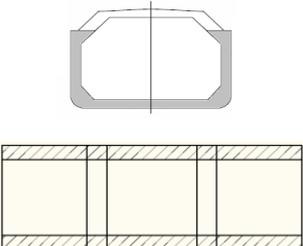
表 1.7.4

疲劳评估 装载工况	装载模式	吃水	静水弯矩修正系 数 $C_{sw}$	时间分配 系数 $\alpha$
满载		满载吃水	0.9 (中拱)	0.65
正常压载		压载吃水	0.8 (中拱)	0.2

1.7.5 Mem-LNG 船和独立舱型液化气体船的疲劳评估装载工况为均匀满载工况和正常压载工况，具体要求见本章表 1.7.5(1)~(4)。

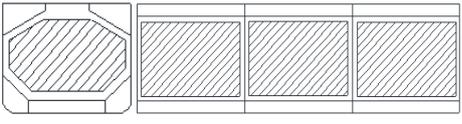
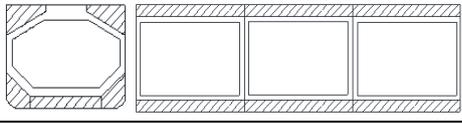
Mem-LNG 船疲劳评估装载工况要求

表 1.7.5 (1)

疲劳评 估装载 工况	装载模式	吃水	静水弯矩修 正系数 $C_{sw}$	时间 分配 系数 $\alpha$
均匀满 载		满载吃水	0.7 (中垂)	0.45
正常压 载		压载吃水	0.8 (中拱)	0.4

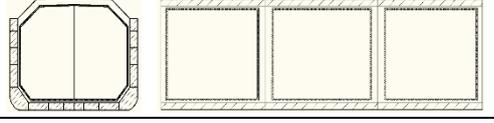
**A 型独立舱液化气船疲劳评估装载工况要求**

表 1.7.5 (2)

疲劳评估装载工况	装载模式	吃水	静水弯矩修正系数 $C_{sw}$	时间分配系数 $\alpha$
均匀满载		满载吃水	0.4 (中拱)	0.45
正常压载		压载吃水	0.9 (中拱)	0.4

**B 型独立舱液化气船疲劳评估装载工况要求**

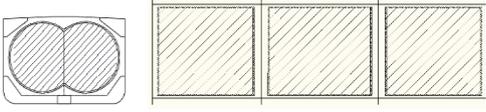
表 1.7.5 (3)

疲劳评估装载工况	装载模式	吃水	静水弯矩修正系数 $C_{sw}$	时间分配系数 $\alpha$
均匀满载		满载吃水	0.4 (中拱)	0.45
正常压载		压载吃水	0.9 (中拱)	0.4

**C 型独立舱液化气船疲劳评估装载工况要求**

表 1.7.5 (4)

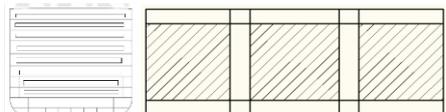
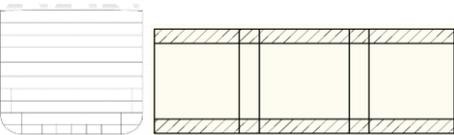
疲劳评估装载工况	装载模式	吃水	静水弯矩修正系数 $C_{sw}$	时间分配系数 $\alpha$

均匀满载		满载吃水	0.6 (中拱)	0.45
正常压载		压载吃水	0.8 (中拱)	0.4

1.7.6 汽车运输船的疲劳评估装载工况为均匀满载工况和正常压载工况，具体要求见本章表 1.7.6。

汽车运输船疲劳评估装载工况要求

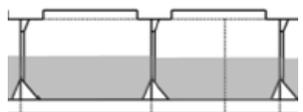
表 1.7.6

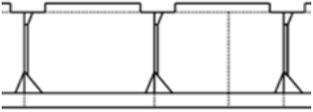
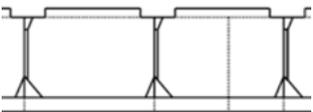
疲劳评估装载工况	装载模式	吃水	静水弯矩修正系数 $C_{sw}$	时间分配系数 $\alpha$
均匀满载		满载吃水	0.85 (中拱)	0.65
正常压载		压载吃水	0.85 (中拱)	0.2

1.7.7 矿砂船的疲劳评估装载工况为均匀满载工况、正常压载工况及最大压载工况(如有时)，具体要求见表 1.7.7。

矿砂船疲劳评估装载工况要求

表 1.7.7

疲劳评估装载工况	装载模式	吃水	静水弯矩修正系数 $CSW$	货舱载重量 $M$ (t)	干散货密 $\rho_c$ (t/m <sup>3</sup> )	时间分配系数 $\alpha$
均匀满载		满载吃水	0.8 (中垂)	MH	设计允许的最大货物密度	0.5

						
正常压载	 	轻压载吃水	0.6 (中拱)	—	—	0.35, 如无确切的数据, 正常压载和最大压载各占 0.175
最大压载 (如有时)	 	压载工况的最大吃水	0.65 (中垂)	—	—	

## 1.8 计算工况

1.8.1 计算工况由各疲劳评估装载工况及其对应的载荷工况组合而成。

1.8.2 对于每一疲劳评估装载工况, 应计及用于疲劳评估的产生动载荷组合的所有疲劳载荷工况。

1.8.3 对于每一疲劳评估装载工况的主导载荷工况定义为在热点处设计应力范围在所有载荷工况中最大的载荷工况。

# 第 2 章 疲劳载荷

## 2.1 一般要求

2.1.1 本章规定了适用于船体结构疲劳评估的载荷。

2.1.2 本章给出的载荷类型包括静水中和波浪中的船体梁载荷及与板的侧向载荷。

2.1.3 静水中的船体梁载荷包括垂向静水弯矩; 波浪中的船体梁载荷包括垂向波浪弯矩和水平波浪弯矩。

2.1.4 静水中的侧向载荷包括外部静水压力和货物及压载水引起的内部静压力; 波浪中

的侧向载荷包括外部水动压力和货物及压载水引起的内部惯性压力。

2.1.5 设计载荷采用等效设计波法确定，对每一等效设计波给出一组载荷组合因子。波浪中的侧向载荷和波浪中的船体梁载荷需根据载荷组合因子进行组合。

2.1.6 疲劳载荷的超越概率水平为  $10^{-2}$ 。

## 2.2 参数定义

2.2.1 用于本章的航区系数  $f_r$  定义如下：

$$f_r = 1.00, \text{ 无限航区/远海航区}$$

$$f_r = 0.90, \text{ 1类航区/近海航区}$$

$$f_r = 0.85, \text{ 2类航区/沿海航区}$$

$$f_r = 0.80, \text{ 3类航区/遮蔽航区}$$

2.2.2 用于本章的概率水平系数  $f_p$  定义如下：

$$f_p = 0.25^{\frac{1}{\xi_1}}$$

式中：  $\xi_1$  ——参数，根据不同的载荷类型按本章表 2.2.2 选取。

参数  $\xi_1$

表 2.2.2

船舶运动和加速度	$\xi_1 = 1.50 - 0.036\sqrt{L}$
波浪中的船体梁载荷	$\xi_1 = 1.45 - 0.036\sqrt{L}$
外部水动压力	$\xi_1 = 1.45 - 0.036f\sqrt{L}$
<p>表中： <math>L</math>——船长， m；  <math>f</math>——系数， 应按下列各式计算：</p> $f = 1 - \frac{0.08z}{d_{LCi}} \quad \text{当 } z \leq d_{LCi} \text{ 时}$ $f = 0.92 + \frac{0.08(z - d_{LCi})}{D - d_{LCi}} \quad \text{当 } z > d_{LCi} \text{ 时}$ <p>其中： <math>z</math>——计算点的 <math>Z</math> 坐标， m；  <math>d_{LCi}</math>——相应装载工况下所考虑船体横剖面处的吃水， 有限元应力分析时取相应装载工况下舱段模型长度中点处的吃水， m；  <math>D</math>——型深， 对于汽车运输船， 取干舷甲板高度， m。</p>	

2.2.3 波浪系数  $C$  应按下列各式计算：

$$C = 10.75 - \left[ \frac{(300 - L)}{100} \right]^{1.5} \quad \text{当 } 90\text{m} \leq L \leq 300\text{m} \text{ 时};$$

$$C = 10.75 \quad \text{当 } 300\text{m} < L < 350\text{m} \text{ 时};$$

$$C = 10.75 - \left[ \frac{(L - 350)}{150} \right]^{1.5} \quad \text{当 } 350\text{m} \leq L \leq 500\text{m} \text{ 时}。$$

式中：L——船长，m。

## 2.3 船舶运动和加速度

2.3.1 船舶单自由度运动应按下述要求计算。

(1) 对于油船、散货船、Mem-LNG 船、独立舱型液化气体船和矿砂船，横摇遭遇周期  $T_E$  应按下式计算：

$$T_E = \frac{2.3k_r}{\sqrt{GM}} \quad \text{s}$$

式中： $k_r$ ——所考虑装载工况的横摇转动半径，m。没有确切数值时，可按本章表 2.3.1 (1)

估算；

$GM$ ——所考虑装载工况的初稳性高度，m。没有确切数值时，可按本章表 2.3.1 (1)

估算。

油船、Mem-LNG 船、独立舱型液化气体船、散货船和矿砂船的  $k_r$  和  $GM$  表 2.3.1 (1)

疲劳评估装载工况	$k_r$	$GM$
满载工况（隔舱或均匀装载）	0.35 B	0.12 B
正常压载工况	0.45 B	0.33 B
最大压载工况（仅矿砂船）	0.40B	0.25 B

(2) 对于集装箱船，汽车运输船横摇遭遇周期  $T_E$  应按下列各式计算：

$$T_E = 0.5 \left( T_R + \sqrt{T_R^2 - \frac{2\pi}{g} V T_R} \right) \quad \text{当 } T_R > \frac{2\pi}{g} V \text{ 时}$$

$$T_E = T_R \quad \text{当 } T_R \leq \frac{2\pi}{g} V \text{ 时}$$

式中： $T_R$ ——横摇周期，s，应按下式计算：

$$T_R = \frac{2.2k_r}{\sqrt{GM}}$$

其中： $k_r$ ——所考虑装载工况的横摇转动半径，m。没有确切数值时，可按本章表

2.3.1 (2) 估算；

$GM$ ——所考虑装载工况的初稳性高度，m。没有确切数值时，可按本章表 2.3.1

(2) 估算。

$V$ ——最大服务航速，Kn。

集装箱船、汽车运输船的  $k_r$  和  $GM$

表 2.3.1 (2)

疲劳评估装载工况	$k_r$	$GM$
满载工况	0.35 $B$	0.07 $B$
正常压载工况	0.45 $B$	0.20 $B$

(3) 最大横摇角  $\theta$  应按下式计算，但不必大于  $0.523 f_p$  rad:

$$\theta = \frac{(62.5 - 1.25T_E) f_r f_p k_b}{B + 75} \quad \text{rad}$$

式中： $f_r$ ——航区系数，见本章 2.2.1；

$f_p$ ——概率水平系数，见本章 2.2.2；

$k_b$ ——系数，应按下列各式取值：

$$k_b = 1.2, \text{ 对于无舦龙骨的船舶}$$

$$k_b = 1.0, \text{ 对于有舦龙骨的船舶}$$

$$k_b = 0.8, \text{ 对于有主动式减摇装置的船舶}$$

$B$ ——船宽，m。

(4) 纵摇周期  $T_p$  和最大纵摇角  $\Phi$  应按下列各式计算，其中最大纵摇角  $\Phi$  不必大于 0.14

$f_p$  rad:

$$T_p = 1.80 \sqrt{L/10} \quad \text{s}$$

$$\Phi = 0.25 a_0 / C_b \quad \text{rad}$$

式中： $L$ ——船长，m；

$C_b$ ——方形系数；

$a_0$ ——加速度系数，应按下式计算：

$$a_0 = f_r f_p \left( 3 \frac{C}{L} + C_V \frac{V}{\sqrt{L}} \right)$$

其中：  $f_r$  ——航区系数，见本章 2.2.1；

$f_p$  ——概率水平系数，见本章 2.2.2；

$C_V = \sqrt{L}/50$ ，取不大于 0.2；

$L$  ——船长，m；

$V$  ——最大服务航速，Kn；

$C$  ——波浪系数，见本章 2.2.3。

2.3.2 船舶运动加速度应按下述要求计算。

(1) 横摇引起的角加速度  $a_{roll}$  应按下列式计算：

$$a_{roll} = \theta \left( \frac{2\pi}{T_E} \right)^2 \quad \text{rad/s}^2$$

式中：  $\theta$  ——最大横摇角，rad，见本章 2.3.1 (3)；

$T_E$  ——横摇遭遇周期，s，见本章 2.3.1 (1) 或 2.3.1 (2)。

(2) 纵摇引起的角加速度应按下列式计算：

$$a_{pitch} = \Phi \left( \frac{2\pi}{T_P} \right)^2 \quad \text{rad/s}^2$$

式中：  $\Phi$  ——最大纵摇角，rad，见本章 2.3.1 (4)；

$T_P$  ——纵摇周期，s，见本章 2.3.1 (4)。

(3) 垂荡引起的垂向加速度  $a_{heave}$  应按下列式计算：

$$a_{heave} = 7a_0 / \sqrt{C_b} \quad \text{m/s}^2$$

式中：  $a_0$  ——加速度系数，按本章 2.3.1 (4) 计算；

$C_b$  ——方形系数。

(4) 横荡引起的横向加速度  $a_{sway}$  应按下列式计算：

$$a_{sway} = 3a_0 \quad \text{m/s}^2$$

式中：  $a_0$  ——加速度系数，按本章 2.3.1 (4) 计算。

(5) 纵荡引起的纵向加速度  $a_{surge}$  应按下式计算:

$$a_{surge} = 2a_0\sqrt{C_b} \quad \text{m/s}^2$$

式中:  $a_0$ ——加速度系数, 按本章 2.3.1 (4) 计算;

$C_b$ ——方形系数。

2.3.3 船舶任何一点的纵向、横向和垂向加速度参考值应按下列各式计算:

(1) 纵向:

$$a_x = -C_{XG}g\sin\Phi + C_{XS}a_{surge} + C_{XP}a_{pitch-x} \quad \text{m/s}^2$$

(2) 横向:

$$a_y = C_{YG}g\sin\theta + C_{YS}a_{sway} - C_{YR}a_{roll-y} \quad \text{m/s}^2$$

(3) 垂向:

$$a_z = C_{ZH}a_{heave} + C_{ZR}a_{roll-z} - C_{ZP}a_{pitch-z} \quad \text{m/s}^2$$

式中:  $C_{XG}, C_{XS}, C_{XP}, C_{YG}, C_{YS}, C_{YR}, C_{ZH}, C_{ZR}, C_{ZP}$ ——本章 2.5.3 定义的载荷组合因子;

$a_{heave}$ 、 $a_{sway}$ 、 $a_{surge}$ ——见本章 2.3.2;

$\Phi$ ——最大纵摇角, rad, 见本章 2.3.1 (4);

$\theta$ ——最大横摇角, rad, 见本章 2.3.1 (3);

$a_{pitch-x}$ ——纵摇引起的纵向加速度,  $\text{m/s}^2$ , 应按下式计算:

$$a_{pitch-x} = a_{pitch}R \quad \text{m/s}^2$$

$a_{roll-y}$ ——横摇引起的横向加速度,  $\text{m/s}^2$ , 应按下式计算:

$$a_{roll-y} = a_{roll}R \quad \text{m/s}^2$$

$a_{roll-z}$ ——横摇引起的垂向加速度,  $\text{m/s}^2$ , 应按下式计算:

$$a_{roll-z} = a_{roll}y \quad \text{m/s}^2$$

$a_{pitch-z}$ ——纵摇引起的垂向加速度,  $\text{m/s}^2$ , 应按下式计算:

$$a_{pitch-z} = a_{pitch}(x - 0.45L) \quad \text{m/s}^2$$

其中： $a_{roll}$ 、 $a_{pitch}$ ——见本章 2.3.2；

$$R = z - \min\left(\frac{D}{4} + \frac{d_{LC}}{2}, \frac{D}{2}\right);$$

$d_{LC}$ ——相应装载工况下的船中吃水，m；

$D$ ——型深，m；

$L$ ——船长，m；

$x, y, z$ ——计算点的纵向、横向和垂向坐标，m。

## 2.4 船体梁载荷

2.4.1 本条给出的波浪垂向弯矩和波浪水平弯矩为绝对值。波浪弯矩的符号应根据本章表 2.5.3 中的载荷组合因子组合后考虑。船舶任一横剖面处的静水垂向弯矩、波浪垂向弯矩和水平弯矩的符号规则见本章图 2.4.1 所示：

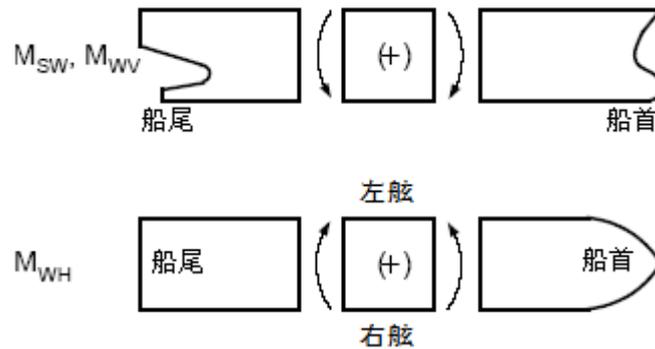


图 2.4.1 弯矩  $M_{SW}$ 、 $M_{WV}$ 、 $M_{WH}$  的符号规则

2.4.2 用于疲劳分析的船体梁静水弯矩  $M_{SW}$  应按下列式计算：

$$M_{SW} = C_{SW} \overline{M}_s \quad \text{kN} \cdot \text{m}$$

式中： $C_{SW}$ ——相应装载工况下的静水弯矩修正系数，见第 1 章 1.7；

$\overline{M}_s$ ——船体梁中拱或中垂许用水弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

2.4.3 船体任一横剖面的垂向波浪弯矩应按下列各式计算：

(1) 中拱：

$$M_{WV,H} = 190 F_M f_r f_p f_e C L^2 B C_b 10^{-3} \quad \text{kN} \cdot \text{m}$$

(2) 中垂:

$$M_{WV,S} = 110F_M f_r f_p f_e CL^2 B(C_b + 0.7)10^{-3} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

式中:  $F_M$ ——本章表 2.4.3 所定义分布系数;

$f_r$ ——航区系数, 见本章 2.2.1;

$f_p$ ——概率水平系数, 见本章 2.2.2;

$f_e$ ——系数, 按下列情况确定:

$$f_e = f_{es} \quad \text{当考虑线性波激振动影响时}$$

$$f_e = f_{ews} \quad \text{当考虑非线性砰击颤振和波激振动影响时}$$

其中:  $f_{es}$ , 线性波激振动影响系数, 见 CCS《波激振动和砰击颤振对船体结构疲劳强度影响计算指南》6.1.1;

$f_{ews}$ , 非线性砰击颤振和波激振动影响系数, 见 CCS《波激振动和砰击颤振对船体结构疲劳强度影响计算指南》6.2.1;

$C$ ——波浪系数, 见本章 2.2.3;

$L$ ——船长, m;

$B$ ——船宽, m;

$C_b$ ——方形系数。

分布系数  $F_M$

表 2.4.3

船体横剖面位置	分布系数 $F_M$
$0 \leq x < 0.4L$	$2.5 \frac{x}{L}$
$0.4L \leq x \leq 0.65L$	1.0
$0.65L < x \leq L$	$2.86(1 - \frac{x}{L})$

2.4.4 船体任一横剖面的水平波浪弯矩应按下列式计算:

$$M_{WH} = (0.3 + \frac{L}{2000})F_M f_r f_p CL^2 d_{LC} C_b \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

式中:  $F_M$ ——分布系数, 见本章 2.4.3;

$f_r$ ——航区系数, 见本章 2.2.1;

$f_p$ ——概率水平系数, 见本章 2.2.2;

$C$ ——波浪系数, 见本章 2.2.3;

$L$ ——船长, m;

$B$ ——船宽, m;

$d_{LC}$ ——相应装载工况下的船中吃水，m；

$C_b$ ——方形系数。

## 2.5 载荷工况

2.5.1 载荷工况由以下规则波组成：

- (1) 迎浪，垂向波浪弯矩达到最大时的规则波（“H”）；
- (2) 随浪，垂向波浪弯矩达到最大时的规则波（“F”）；
- (3) 横摇运动达到最大时的规则波（“R”）；
- (4) 水线处水动压力达到最大时的规则波（“P”）。

2.5.2 与等效设计波对应的载荷工况定义见本章表 2.5.2。

载荷工况定义

表 2.5.2

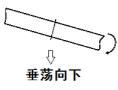
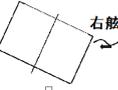
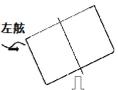
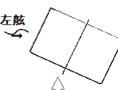
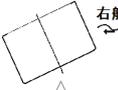
载荷工况	H1	H2	F1	F2	R1P	R2P
EDW	“H”		“F”		“R”	
浪向	迎浪		随浪		横浪	
上风舷	-		-		左舷	
结果	最大弯矩		最大弯矩		最大横摇	
	中垂	中拱	中垂	中拱	(+)	(-)
运动定义			-	-		

表 2.5.2 (续)

载荷工况	R1S	R2S	P1P	P2P	P1S	P2S
EDW	“R”		“p”		“p”	
浪向	横浪		横浪		横浪	
上风舷	右舷		左舷		右舷	
结果	最大横摇		最大外部压力		最大外部压力	
	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)
运动定义						

2.5.3 各载荷工况中的船体梁载荷和加速度分量，应用每一分量的参考值乘以本章表 2.5.3 所定义的相应载荷组合因子 LCF 得出。

载荷组合因子 LCF

表 2.5.3

	LCF	H1	H2	F1	F2	R1P	R2P
$M_{WV}$	$C_{WV}$	-1	1	$-0.75-0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.75+0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.1-0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.2 \frac{d_{LC}}{d} -0.1$
$M_{WH}$	$C_{WH}$	0	0	0	0	$1.1- \frac{d_{LC}}{d}$	$\frac{d_{LC}}{d} -1.1$
$a_{surge}$	$C_{XS}$	$0.3-0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.2 \frac{d_{LC}}{d} -0.3$	$-0.4 \frac{d_{LC}}{d} +0.2$	$0.4 \frac{d_{LC}}{d} -0.2$	0	0

$a_{pitch\_x}$	$C_{XP}$	-0.9	0.9	0.1	-0.1	0	0
$gsin\Phi$	$C_{XG}$	$0.4 \frac{d_{LC}}{d} + 0.4$	$-0.4 \frac{d_{LC}}{d} - 0.4$	-0.15	0.15	0	0
$a_{sway}$	$C_{YS}$	0	0	0	0	$0.2-0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.2 \frac{d_{LC}}{d} - 0.2$
$a_{roll\_y}$	$C_{YR}$	0	0	0	0	1	-1
$gsin\theta$	$C_{YG}$	0	0	0	0	-1	1
$a_{heave}$	$C_{ZH}$	$0.8 \frac{d_{LC}}{d} - 0.15$	$0.15-0.8 \frac{d_{LC}}{d}$	0	0	$C_{ZHR}$	$-C_{ZHR}$
$a_{roll\_z}$	$C_{ZR}$	0	0	0	0	1	-1
$a_{pitch\_z}$	$C_{ZP}$	-0.9	0.9	0.1	-0.1	0	0

表 2.5.3 (续)

	LCF	R1S	R2S	P1P	P2P	P1S	P2S
$M_{WV}$	$C_{WV}$	$0.1-0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.2 \frac{d_{LC}}{d} - 0.1$	$0.3-0.8 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.8 \frac{d_{LC}}{d} - 0.3$	$0.3-0.8 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.8 \frac{d_{LC}}{d} - 0.3$
$M_{WH}$	$C_{WH}$	$\frac{d_{LC}}{d} - 1.1$	$1.1 - \frac{d_{LC}}{d}$	$0.6-0.6 \frac{d_{LC}}{d}$	$0.6 \frac{d_{LC}}{d} - 0.6$	$0.6 \frac{d_{LC}}{d} - 0.6$	$0.6-0.6 \frac{d_{LC}}{d}$
$a_{surge}$	$C_{XS}$	0	0	0	0	0	0
$a_{pitch\_x}$	$C_{XP}$	0	0	0	0	0	0
$gsin\Phi$	$C_{XG}$	0	0	0	0	0	0
$a_{sway}$	$C_{YS}$	$0.2 \frac{d_{LC}}{d} - 0.2$	$0.2-0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	-0.95	0.95	0.95	-0.95
$a_{roll\_y}$	$C_{YR}$	-1	1	0.3	-0.3	-0.3	0.3
$gsin\theta$	$C_{YG}$	1	-1	-0.2	0.2	0.2	-0.2
$a_{heave}$	$C_{ZH}$	$C_{ZHR}$	$-C_{ZHR}$	1	-1	1	-1
$a_{roll\_z}$	$C_{ZR}$	-1	1	0.3	-0.3	-0.3	0.3
$a_{pitch\_z}$	$C_{ZP}$	0	0	0	0	0	0

表中： $C_{ZHR}$ ——由船型决定的系数，按下列各式计算：

$$C_{ZHR} = 0.7 - 0.4 \frac{d_{LC}}{d}, \text{ 对于油船、Mem-LNG 船、独立舱型液化气体船、散货船和矿砂船}$$

$$C_{ZHR} = 0.7 - 0.6 \frac{d_{LC}}{d}, \text{ 对于集装箱船和汽车运输船}$$

其中： $L$ ——船长，m；

$d_{LC}$ ——相应装载工况下的船中吃水，m；

$d$ ——吃水，m。

2.5.4 总船体梁载荷，应以垂向船体梁静水载荷，分别加上乘以载荷组合因子后的相对应的船体梁波浪载荷得到。

2.5.5 总内部载荷（包括甲板载荷），应以载重量引起的静压力或静力，加上由乘以载荷组合因子后的加速度引起的惯性压力或惯性力得到。

## 2.6 外部压力

2.6.1 船体外板上任何一点的海水总压力  $p_{SW}$  由下式得出，且不应为负值：

$$p_{SW} = p_S + p_W \quad \text{kN/m}^2$$

式中： $p_S$ ——静水压力， $\text{kN/m}^2$ ，见本章 2.6.2；

$p_W$ ——视载荷工况而定的水动压力， $\text{kN/m}^2$ ，与本章 2.6.3，2.6.4 或 2.6.5 所定义的水动压力相等的波浪压力，并按本章 2.6.6 修正。

2.6.2 外板上任何一点的静水压力  $p_S$  见本章表 2.6.2。

静水压力  $p_S$

表 2.6.2

位置	静水压力 $p_S$ ( $\text{kN/m}^2$ )
水线处及以下的点 ( $z \leq d_{LCi}$ )	$\rho g(d_{LCi} - z)$
水线以上的点 ( $z > d_{LCi}$ )	0

式中： $d_{LCi}$ ——相应装载工况下所考虑船体横剖面处的吃水，有限元应力分析时取相应装载工况下舱段模型长度中点处的吃水，m；

$z$ ——载荷点的垂向坐标，m。

2.6.3 对于载荷工况 H1、H2、F1 和 F2，水线以下外板上任何一点的水动压力  $p_H$  和  $p_F$  见本章表 2.6.3 (1)。压力  $p_{F2}$  的分布见本章图 2.6.3。

载荷工况 H1、H2、F1 和 F2 的水动压力

表 2.6.3 (1)

载荷工况	水动压力 ( $\text{kN/m}^2$ )
H1	$p_{H1} = -k_{aH}k_{pH}p_{HF}$
H2	$p_{H2} = k_{aH}k_{pH}p_{HF}$
F1	$p_{F1} = -k_{aF}k_{pF}p_{HF}$
F2	$p_{F2} = k_{aF}k_{pF}p_{HF}$

注：表中  $p_{HF}$  应按下式计算：

$$p_{HF} = f_h f_r f_p C \sqrt{\frac{L + \lambda - 125}{L}} \left( \frac{z}{d_{LCi}} + \frac{|2y|}{B_i} + 1 \right); \quad \text{且 } \frac{2y}{B_i} \leq 1.0, \quad z \text{ 应取不大于 } d_{LCi}$$

式中：

$f_h$ ——系数，应按下式计算：

$$f_h = 1.5 \quad \text{对于载荷工况 H1、H2}$$

$$f_h = 2.6 \quad \text{对于载荷工况 F1、F2}$$

$k_{aH}$ ——H1、H2 载荷工况沿船舶纵向的幅值系数，应按下列各式计算：

$$k_{aH} = 1 + \frac{12}{C_b} \left(1 - \sqrt{\frac{|2y|}{B_i}} \left| \frac{x}{L} - 0.5 \right| \right)^3, \quad \text{当 } 0.0 \leq x/L \leq 0.5 \text{ 时}$$

$$k_{aH} = 1 + \frac{6}{C_b} \left(3 - \frac{|4y|}{B_i} \left| \frac{x}{L} - 0.5 \right| \right)^3, \quad \text{当 } 0.5 \leq x/L \leq 1.0 \text{ 时}$$

$k_{aF}$ ——F1、F2 载荷工况沿船舶纵向的幅值系数，应按下列各式计算：

$$k_{aF} = 1 + (3.5 - 2 \frac{d_{LC}}{d}) \left(1 - \frac{|2y|}{B_i}\right) \left(1 - 5 \frac{x}{L}\right),$$

当  $0.0 \leq x/L < 0.2$  时

$$k_{aF} = 1.0, \quad \text{当 } 0.2 \leq x/L < 0.9 \text{ 时}$$

$$k_{aF} = 1 + 15 \left(1 - \frac{|2y|}{B_i}\right) \left(\frac{x}{L} - 0.9\right), \quad \text{当 } 0.9 \leq x/L \leq 1.0 \text{ 时}$$

$k_{pH}$ ——H1、H2 载荷工况沿船舶纵向的相位系数，应按表 2.6.3 (2) 取值，中间值按插值计算：

$k_{pH}$  的取值 表 2.6.3 (2)

$x/L$	$k_{pH}$
0	$(1.0 - \frac{d_{LC}}{d}) + (0.5 - \frac{d_{LC}}{d}) \frac{ 2y }{B_i}$
$0.3 - 0.1 \frac{d_{LC}}{d}$	-1.0
$0.5 - 0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	1.0
$0.9 - 0.4 \frac{d_{LC}}{d}$	1.0
$0.9 - 0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	-1.0
1.0	-1.0

$k_{pF}$ ——F1、F2 载荷工况沿船舶纵向的相位系数，应按表 2.6.3 (3) 取值，中间值按插值计算：

$k_{pF}$  的取值 表 2.6.3 (3)

$x / L$	$k_{pF}$
0	$-0.75-0.25 \frac{ 2y }{B_i}$
$0.35-0.1 \frac{d_{LC}}{d}$	-1.0
$0.5-0.2 \frac{d_{LC}}{d}$	1.0
0.75	1.0
$0.9-0.1 \frac{d_{LC}}{d}$	-1.0
1.0	$-0.5-0.5 \frac{ 2y }{B_i}$

$\lambda$  ——波长, m, 应按下列各式计算:

$$\lambda = C_{L1} \left(1 + \frac{d_{LC}}{d}\right) L, \text{ 对于载荷工况 H1 和 H2}$$

$$\lambda = C_{L1} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{d_{LC}}{d}\right) L, \text{ 对于载荷工况 F1 和 F2}$$

其中:  $L$  ——船长, m;

$f_r$  ——航区系数, 见本章 2.2.1;

$f_p$  ——概率水平系数, 见本章 2.2.2, 计算时  $z$  应取不大于  $d_{LCi}$ ;

$C$  ——波浪系数, 见本章 2.2.3;

$d_{LCi}$  ——相应装载工况下所考虑船体横剖面处的吃水, 有限元应力分析时取相应装载工况下舱段模型长度中点处的吃水, m;

$B_i$  ——所考虑横剖面在水线处的船宽, 有限元应力分析时取相应装载工况下舱段模型长度中点处的船宽, m;

$x, y, z$  ——载荷点的纵向、横向和垂向坐标, m;

$C_{L1}$  ——系数, 应按下列各式计算:

$C_{L1} = 0.6$ , 对于油船、Mem-LNG 船、独立舱型液化气体船、散货船和矿砂船

$C_{L1} = 0.5$ , 对于集装箱船、汽车运输船

$d_{LC}$ ——相应装载工况下的船中吃水，m；

$d$ ——吃水，m。

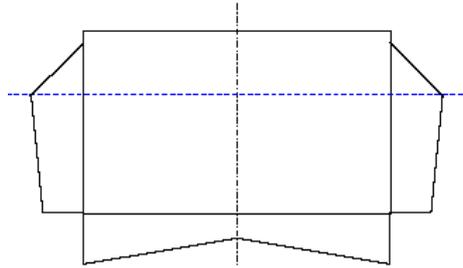


图 2.6.3 船中处水动压力  $p_{F2}$  的分布

2.6.4 对于载荷工况 R1P、R2P、R1S 和 R2S，水线以下外板上任何一点的水动压力  $p_R$  应按本章表 2.6.4 计算。压力分布见本章图 2.6.4。

载荷工况 R1P、R2P、R1S 和 R2S 的水动压力 表 2.6.4

载荷工况	水动压力 (kN/m <sup>2</sup> )
R1P	$p_{R1P} = p_{RP}$
R2P	$p_{R2P} = -p_{RP}$
R1S	$p_{R1S} = p_{RS}$
R2S	$p_{R2S} = -p_{RS}$

表中：

$$p_{RP} = 10y \sin \theta + 0.88 f_r f_p C \sqrt{\frac{L + \lambda - 125}{L}} \left( \frac{|2y|}{B} + 1 \right)$$

$$p_{RS} = -10y \sin \theta + 0.88 f_r f_p C \sqrt{\frac{L + \lambda - 125}{L}} \left( \frac{|2y|}{B} + 1 \right)$$

式中： $\theta$ ——最大横摇角，deg，见本章 2.3.1 (3)；

$f_r$ ——航区系数，见本章 2.2.1；

$f_p$ ——概率水平系数，见本章 2.2.2；

$C$ ——波浪系数，见本章 2.2.3；

$\lambda$ ——波长，m，应按下式计算：

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T_E^2$$

$y$ ——载荷点的横向坐标，m，左舷取为正值；

$B$ ——船宽，m。

其中： $T_E$ ——横摇遭遇周期，s，见本章 2.3.1。

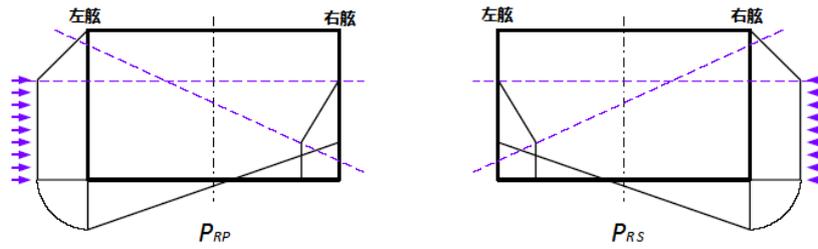


图 2.6.4 船中处  $p_{RP}$  和  $p_{RS}$  的分布

2.6.5 对于载荷工况 P1P、P2P、P1S 和 P2S，水线以下外板上任何一点的水动压力  $p_p$  见本章表 2.6.5。压力  $p_{p1}$  的分布见本章图 2.6.5。

载荷工况 P1P、P2P、P1S 和 P2S 的水动压力

表 2.6.5

载荷工况	水动压力 (kN/m <sup>2</sup> )
P1P	$p_{P1P} = p_{PP}$
P2P	$p_{P2P} = -p_{PP}$
P1S	$p_{P1S} = p_{PS}$
P2S	$p_{P2S} = -p_{PS}$

$$\text{表中: } p_{PP} = 4.5 f_r f_p C \sqrt{\frac{L + \lambda - 125}{L}} \left( 2 \frac{|z|}{d_{LCi}} + 3 \frac{|2y|}{B} \right) \quad \text{当 } y \geq 0$$

$$= 1.5 f_r f_p C \sqrt{\frac{L + \lambda - 125}{L}} \left( 2 \frac{|z|}{d_{LCi}} + 3 \frac{|2y|}{B} \right) \quad \text{当 } y < 0$$

$$p_{PS} = 1.5 f_r f_p C \sqrt{\frac{L + \lambda - 125}{L}} \left( 2 \frac{|z|}{d_{LCi}} + 3 \frac{|2y|}{B} \right) \quad \text{当 } y \geq 0$$

$$= 4.5 f_r f_p C \sqrt{\frac{L + \lambda - 125}{L}} \left( 2 \frac{|z|}{d_{LCi}} + 3 \frac{|2y|}{B} \right) \quad \text{当 } y < 0$$

式中:  $\lambda$  ——波长, m, 应按下列各式计算:

$$\lambda = (0.2 + C_{L2} \frac{d_{LC}}{d}) L \quad \text{m}$$

$y$  ——载荷点的横向坐标, m。

$f_r$  ——航区系数, 见本章 2.2.1;

$f_p$  ——概率水平系数, 见本章 2.2.2;

$C$  ——波浪系数, 见本章 2.2.3;

$C_{L2}$  ——系数, 按下列各式计算:

$C_{L2} = 0.4$ , 对于油船、Mem-LNG 船、独立舱型液化气体船、散货船和矿砂船

$C_{L2} = 0.15$ , 对于集装箱船、汽车运输船

$d_{LC}$ ——相应装载工况下的船中吃水，m；

$d$ ——吃水，m；

$L$ ——船长，m。

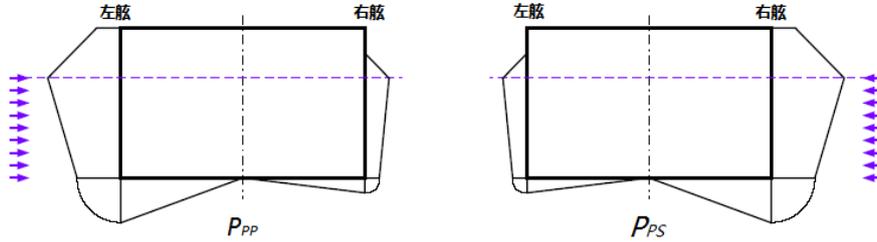


图 2.6.5 船中处  $p_{PP}$  和  $p_{PS}$  的分布

2.6.6 对于各载荷工况，水动压力应按下述要求修正：

(1) 如水线处水动压力为正，舷侧处水线以上的水动压力  $p_{W,C}$  应按下列各式计算（见本章图 2.6.6）：

$$p_{W,C} = p_{W,WL} + \rho g(d_{LCi} - z) \quad \text{kN/m}^2 \quad , \text{ 当 } d_{LCi} \leq z \leq h_W + d_{LCi} \text{ 时}$$

$$p_{W,C} = 0 \quad \text{kN/m}^2 \quad , \text{ 当 } z \geq h_W + d_{LCi} \text{ 时}$$

式中： $p_{W,WL}$ ——所考虑载荷工况下水线处的正水动压力；

$d_{LCi}$ ——相应装载工况下所考虑船体横剖面处的吃水，有限元应力分析时取相应装载工况下舱段模型长度中点处的吃水，m；

$z$ ——载荷点的垂向坐标，m；

$$h_W = \frac{p_{W,WL}}{\rho g} \quad , \text{ m；}$$

其中： $\rho$ ——海水密度，取  $1.025\text{t/m}^3$ 。

(2) 如水线处的水动压力为负，水线以下的水动压力  $p_{W,C}$  应按下式计算（见本章图 2.6.6）：

$$p_{W,C} = \max[p_W, \rho g(z - d_{LCi})] \quad \text{kN/m}^2$$

式中： $p_W$ ——所考虑载荷工况下在水线以下的负水动压力；

$d_{LCi}$ ——相应装载工况下所考虑船体横剖面处的吃水，有限元应力分析时取相应装载工况下舱段模型长度中点处的吃水，m；

$z$ ——载荷点的垂向坐标，m。

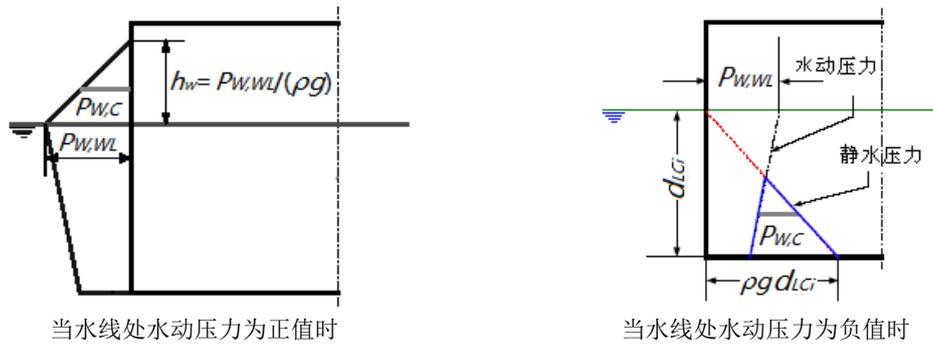


图 2.6.6 水动压力的修正

## 2.7 干散货引起的内部压力

### 2.7.1 干散货上表面应按下述要求确定：

(1) 货舱装载至舱口围板顶部时，干散货上表面应按货舱范围内相同货物体积等效确定（有关参数定义见本章图 2.7.1 (1)）。

干散货的等效水平表面在内底以上  $h_C$  处， $h_C$  应按下式计算：

$$h_C = h_{HPU} + h_0 \quad \text{m}$$

式中： $h_0 = \frac{S_A}{B_H} \quad \text{m}$

$$S_A = S_0 + \frac{V_{HC}}{l_H} \quad \text{m}$$

其中： $h_{HPU}$  ——从内底至顶边舱与舷侧外板或内壳下交点的垂直距离，m；当无顶边舱时，

从内底至上甲板与舷侧外板或内壳交点的垂直距离，m；

$S_0$  ——从顶边舱与舷侧外板或内壳下交点至甲板水平面的阴影面积， $\text{m}^2$ ，见本章

图 2.7.2 (1)；当无顶边舱时，从上甲板与舷侧外板或内壳交点至甲板水平面的阴影面积， $\text{m}^2$ ；

$V_{HC}$  ——舱口围板由上甲板至围板顶部范围内所包围的容积， $\text{m}^3$ ；

$l_H$  ——货舱长度，m；当设置槽型横舱壁时，从槽型深度中点处计量；

$B_H$  ——货舱长度中点处的货舱宽度，m。

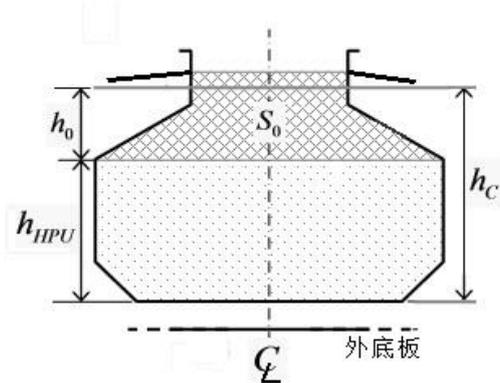


图 2.7.1 (1)  $h_C$ 、 $h_0$ 、 $h_{HPU}$  和  $S_0$  的定义

(2) 货舱未装载至上甲板时，干散货上表面沿船体横向为抛物面（有关参数定义见本章图 2.7.1 (2)）。上表面位置根据货舱内的货物体积（取  $M/\rho_C$ ）确定。

干散货的表面在内底以上  $h_C$  处， $h_C$  应按下列各式计算：

$$\begin{aligned}
 h_C &= h_y + h_2 + h_{HPI} \quad \text{m} && \text{当 } h_2 \geq 0 \text{ 时} \\
 h_C &= h_y + h_{22} \quad \text{m} && \text{当 } |y| \leq \frac{B_2}{2} \text{ 且 } h_2 < 0 \text{ 时} \\
 h_C &= 0 \quad \text{m} && \text{当 } |y| > \frac{B_2}{2} \text{ 且 } h_2 < 0 \text{ 时}
 \end{aligned}$$

式中： $h_2$ ——距离，m，应按下列各式计算：

$$h_2 = \frac{M}{\rho_C B_H l_H} - \frac{B_H + b_{IB}}{2B_H} h_{HPL} - \frac{B_H}{6} \tan \delta + \frac{V_{TS}}{B_H \cdot l_H} \quad \text{m}$$

$h_y$ ——距离，m，应按下列各式计算：

$$\begin{aligned}
 h_y &= h_1 \left(1 - \frac{4y^2}{B_H^2}\right) \quad \text{m}, && \text{当 } h_2 \geq 0 \text{ 时} \\
 h_y &= h_1 \left(1 - \frac{4y^2}{B_2^2}\right) \quad \text{m}, && \text{当 } h_2 < 0 \text{ 时}
 \end{aligned}$$

$B_2$ ——当  $h_2 < 0$  时的干散货表面宽度，m，应按下列各式计算：

$$B_2 = \sqrt{\frac{\frac{6}{l_H} \left(\frac{M}{\rho_C} + V_{TS}\right) + \frac{3B_{IB}^2}{B_H - B_{IB}} h_{HPL}}{\tan \delta + \frac{3h_{HPL}}{B_H - B_{IB}}}} \quad \text{m}$$

$h_{22}$ ——当  $h_2 < 0$  时的距离，m，应按下列各式计算：

$$h_{22} = h_{HPL} \left( \frac{B_2 - B_{IB}}{B_H - B_{IB}} \right) \quad \text{m}$$

$h_{HPL}$  ——从内底至底边舱与舷侧外板或内壳上交点的垂直距离，m。如无底边舱， $h_{HPL}$  取为0。

其中： $h_1$  ——距离，m，应按下列各式计算：

$$h_1 = \frac{B_H}{4} \tan \delta \quad \text{m, 当 } h_2 \geq 0 \text{ 时}$$

$$h_1 = \frac{B_2}{4} \tan \delta \quad \text{m, 当 } h_2 < 0 \text{ 时}$$

$M$  ——货舱载货量，t；

$V_{TS}$  ——在货舱长度  $l_H$  范围内，横舱壁底墩的总体积， $\text{m}^3$ 。该体积不包括底边舱穿过横舱壁的部分；

$\rho_C$  ——干散货密度， $\text{t}/\text{m}^3$ ，见第1章 1.7.3；

$B_H$  ——货舱长度中点处的货舱宽度，m；

$l_H$  ——货舱的长度，m；当设置槽型横舱壁时，从槽型深度中点处计量；

$B_{IB}$  ——货舱长度中点处的内底的宽度，m；

$\delta$  ——货物的休止角，取为  $35^\circ$ ；

$y$  ——载荷点的横向坐标，在上风舷取为正值。

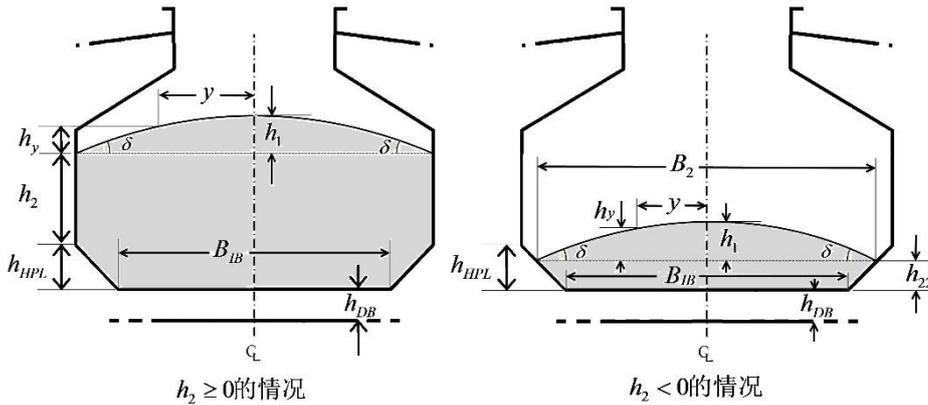


图 2.7.1 (2)  $h_y$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_{22}$  和  $h_{HPL}$  的定义

2.7.2 静水中的干散货压力  $p_{CS}$  应按下列各式计算：

$$p_{CS} = \rho_C g K_C z_c \quad \text{kN}/\text{m}^2, \text{ 当 } z_c \geq 0 \text{ 时}$$

$$p_{CS} = 0 \quad \text{kN}/\text{m}^2, \text{ 当 } z_c < 0 \text{ 时}$$

式中： $\rho_C$ ——干散货密度， $t/m^3$ ，见第 1 章 1.7.3；

$K_C$ ——系数，应按下列各式计算：

$K_C = \cos^2 \alpha + \tan^2(45^\circ - 0.5\delta)\sin^2 \alpha$ ，对于内底、底边舱、横舱壁和纵舱壁、底凳、垂直顶凳、内壳和舷侧板；

$K_C = 0$ ，对于顶边舱，上甲板和倾斜顶凳；

其中： $\alpha$ ——所考虑板与水平面之间的夹角，deg；

$\delta$ ——货物的休止角，deg，见本章 2.7.1 (2)。

$z_C$ ——干散货表面至载荷点的垂直距离，m，按下式计算：

$$z_C = h_C + h_{DB} - z \quad m$$

其中： $h_C$ ——干散货表面至内底的垂直距离，m，见本章 2.7.1；

$h_{DB}$ ——双层底高度，m；

$z$ ——载荷点的垂向坐标，m。

2.7.3 干散货引起的惯性压力  $p_{CW}$  应按下列各式计算：

$$p_{CW} = \rho_C [0.25a_x(x_G - x) + 0.25a_y(y_G - y) + 0.5K_C a_z z_C] \quad \text{kN/m}^2, \text{ 当 } z_C \geq 0 \text{ 时}$$

$$p_{CW} = 0, \text{ 当 } z_C < 0 \text{ 时}$$

式中： $\rho_C$ 、 $K_C$ ——见本章 2.7.1 (2)；

$a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$ ——分别为所考虑货舱形心的纵向、横向、垂向加速度， $m/s^2$ ，见本章

2.3.3；

$x_G$ 、 $y_G$ ——所考虑货舱形心的纵向和横向坐标，m；

$z_C$ ——见本章 2.7.2。

$x$ 、 $y$ 、 $z$ ——载荷点的纵向、横向和垂向坐标，m。

2.7.4 干散货引起的总压力  $p_C$  应按下列各式计算，取不小于零：

$$p_C = p_{CS} + p_{CW} \quad \text{kN/m}^2$$

式中： $p_{CS}$ ——静水中的干散货压力， $kN/m^2$ ，按 2.7.2 计算；

$p_{CW}$ ——干散货引起的惯性压力,  $\text{kN/m}^2$ , 按 2.7.3 计算。

## 2.8 液体引起的内部压力

2.8.1 液体引起的静压力  $p_{LS}$  应按下列各式计算, 且取不小于零:

$$p_{LS} = \rho_L g (z_{TOP} - z) \quad \text{kN/m}^2$$

式中:  $\rho_L$ ——内部液体的密度,  $\text{t/m}^3$ , 按下述要求确定:

$\rho_L = 0.9$ , 对于货油

$\rho_L = 1.025$ , 对于压载水

$\rho_L = 0.5$ , 对于 LNG

对于其他液化气体, 取满舱时的最大货物密度;

$z_{TOP}$ ——船舶正浮状态下, 液舱顶的垂向坐标,  $\text{m}$ ;

$z$ ——载荷点的垂向坐标,  $\text{m}$ 。

2.8.2 液体引起的惯性压力  $p_{LW}$  应按下列各式计算:

$$p_{LW} = \rho_L [a_z (z_B - z) + f_{ull-y} a_y (y_B - y) + f_{ull-x} a_x (x_B - x)] \quad \text{kN/m}^2$$

式中:  $\rho_L$ ——内部液体的密度,  $\text{t/m}^3$ , 见 2.8.1;

$x_B$ ——参考点的 X 坐标,  $\text{m}$ ;

$y_B$ ——参考点的 Y 坐标,  $\text{m}$ ;

$z_B$ ——参考点的 Z 坐标,  $\text{m}$ ;

参考点取为液舱上边界上使  $V_j$  值为最大的点:

$$V_j = (a_z + g) (z_j - z_G) + a_y (y_j - y_G) + a_x (x_j - x_G)$$

其中:  $x_j$ 、 $y_j$ 、 $z_j$ ——分别为液舱上边界上点的 X、Y、Z 坐标,  $\text{m}$ ;

$x_G$ 、 $y_G$ 、 $z_G$ ——分别为液舱形心的 X、Y、Z 坐标,  $\text{m}$ ;

$f_{ull-x}$ ——纵向充装系数, 应按下列各式计算, 取不小于 0 且不大于 1:

$$f_{ull-x} = 0.5 + \frac{|z_B - z|}{l_{fs} \Phi} \quad \text{对于装满液货的货舱}$$

$$= 1.0 \quad \text{对于其他情况}$$

$f_{ull-y}$ ——横向充装系数, 应按下列各式计算, 取不小于 0 且不大于 1:

$$f_{ull-y} = 0.5 + \frac{|z_B - z|}{b_{top}\theta} \quad \text{对于装满液货的货舱}$$

$$= 1.0 \quad \text{对于其他情况}$$

$a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$ ——分别为所考虑货舱形心的纵向、横向、垂向加速度， $m/s^2$ ，见本章 2.3.3；

$x$ 、 $y$ 、 $z$ ——载荷点的纵向、横向和垂向坐标， $m$ 。

其中： $l_{fs}$ ——舱室顶部的长度， $m$ ；

$b_{top}$ ——舱室顶部的宽度， $m$ ；

$\Phi$ ——最大纵摇角， $rad$ ，见本章 2.3.1 (4)；

$\theta$ ——最大横摇角， $rad$ ，见本章 2.3.1 (3)。

2.8.3 液体引起的总压力  $p_L$  应按下式计算，取不小于零：

$$p_L = p_{LS} + p_{LW} \quad kN/m^2$$

式中： $p_{LS}$ ——液体引起的静压力， $kN/m^2$ ，按 2.8.1 计算；

$p_{LW}$ ——液体引起的惯性压力， $kN/m^2$ ，按 2.8.2 计算。

## 2.9 集装箱货物引起的载荷

2.9.1 假定货舱内装载若干标准集装箱堆垛，该标准堆垛一般由 20 尺集装箱组成，集装箱重量取装载手册中满载工况下的最大箱重，堆垛重心高度取堆垛高度的 1/2。

2.9.2 假定舱口盖上相应货舱范围内的所有集装箱为一个整体质量块，该质量块的重量取装载手册满载工况下该范围内最大货物重量，重心高度取最大货物重量对应的最大堆装高度的 1/2。

2.9.3 集装箱货物引起的载荷应按下列各式进行计算：

$$X \text{ 方向: } W_{CX} = -m_C a_x \quad kN$$

$$Y \text{ 方向: } W_{CY} = -m_C a_y \quad kN$$

$$Z \text{ 方向: } W_{CZ} = -f_z m_C g - m_C a_z \quad kN$$

式中： $m_C$ ——货舱内标准堆垛的重量或舱口盖上集装箱总重， $t$ ；

$a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$ ——货舱内标准堆垛重心处的加速度或舱口盖上集装箱货物重心处的加速度， $m/s^2$ ，见本章 2.3.3；

$f_z$  ——集装箱货物垂向静载荷系数，应按下列各式计算：

$$f_z = \cos \theta, \text{ 对于 R1P、R1S、R2P、R2S 工况} \\ = 1, \text{ 对于其他工况}$$

其中： $\theta$  ——最大横摇角，见本章 2.3.1；

X 方向载荷以向前为正，Y 方向载荷以左舷为正，Z 方向载荷以向上为正。

2.9.4 集装箱货物引起的载荷应施加在集装箱箱脚位置处。

## 2.10 汽车运输船载荷

作用在车辆甲板上的载荷应按下列各式进行计算

$$\text{X 方向: } P_X = -Pa_X \quad \text{kN/m}^2$$

$$\text{Y 方向: } P_Y = -Pa_Y \quad \text{kN/m}^2$$

$$\text{Z 方向: } P_C = -f_z P_g - Pa_Z \quad \text{kN/m}^2$$

式中： $P$  ——车辆甲板的实际装载载荷， $\text{t/m}^2$

$a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$  ——货舱内车辆重心的加速度

$f_z$  ——车辆甲板的垂向静载荷系数，应按下列各式计算：

$$f_z = \cos \theta, \text{ 对于 R1P、R1S、R2P、R2S 工况} \\ = 1, \text{ 对于其他工况}$$

其中： $\theta$  ——最大横摇角，见本章 2.3.1；

2.11 独立舱型液化气体船应计及重力的影响。

# 第 3 章 疲劳评估

## 3.1 一般要求

3.1.1 一般选择货舱区域关键位置的船体结构节点进行疲劳强度评估。对于油船、散货船、集装箱船、矿砂船和汽车运输船，其校核部位至少应满足《钢质海船入级规范》/《国内航行海船建造规范》第 2 篇的有关要求；对于 Mem-LNG 船，其校核部位至少应满足《钢质海船入级规范》第 2 篇第 20 章的有关要求；双壳独立舱型液化气体船的船体结构，单舷侧独立舱型液化气体船的船体结构其校核部位至少应满足《散装液化气体船舶构造与设备规范》

的有关要求。

3.1.2 结构在设计寿命期间的总累积损伤度  $D$  应满足下式要求：

$$\text{总累积损伤度 } D \leq \frac{20}{T_D}$$

式中： $T_D$ ——设计疲劳寿命，年。

3.1.3 船体结构的设计疲劳寿命应不低于 20 年。对于散货船、油船和集装箱船的设计疲劳寿命一般为 20 年。

### 3.2 船体结构节点的设计指导

3.2.1 本指南附录提供了散货船、油船和集装箱船的船体结构节点设计，旨在为设计者对关键位置改进结构节点设计提供技术指导（非强制性要求），以提高结构的疲劳寿命。

### 3.3 设计应力范围

3.3.1 装载工况“(k)”的设计应力范围  $S_{D(k)}$  应按下式计算：

$$S_{D(k)} = \max(f_{m,i(k)} f_t S_{h,i(k)}) \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $S_{h,i(k)}$ ——装载工况“(k)”中载荷工况“i”下的热点应力范围， $\text{N/mm}^2$ ，见第 4 章或第 5 章；

$f_{m,i(k)}$ ——装载工况“(k)”中载荷工况“i”下的热点平均应力修正系数，见本章 3.3.2；

$f_t$ ——板厚修正系数，见本章 3.3.3；

3.3.2 装载工况“(k)”的热点平均应力修正系数  $f_{m(k)}$  应按下述要求确定：

(1) 对于焊接节点

$$f_{m,i(k)} = \min \left[ 1.0, 0.85 + 0.3 \frac{\sigma_{m,i(k)}}{C_s S_{h,i(k)}} \right] \quad \text{当 } \sigma_{m,i(k)} \geq 0 \text{ 时}$$

$$f_{m,i(k)} = \max \left[ 0.7, 0.85 + 0.3 \frac{\sigma_{m,i(k)}}{C_s S_{h,i(k)}} \right] \quad \text{当 } \sigma_{m,i(k)} < 0 \text{ 时}$$

(2) 对于母材自由边

$$f_{m,i(k)} = \min \left[ 1.0, 0.8 + 0.4 \frac{\sigma_{m,i(k)}}{C_s S_{h,i(k)}} \right] \quad \text{当 } \sigma_{m,i(k)} \geq 0 \text{ 时}$$

$$f_{m,i(k)} = \max \left[ 0.6, 0.8 + 0.4 \frac{\sigma_{m,i(k)}}{C_s S_{h,i(k)}} \right] \quad \text{当 } \sigma_{m,i(k)} < 0 \text{ 时}$$

式中：  $\sigma_{m,i(k)}$  —— 装载工况“(k)”中载荷工况“i”下的热点平均应力，N/mm<sup>2</sup>；

$S_{h,i(k)}$  —— 装载工况“(k)”中载荷工况“i”下的热点应力范围，N/mm<sup>2</sup>；

$C_s$  —— 系数，下式计算：

$$C_s = 1.6 + 0.0025L$$

其中 L 为船长，m。

3.3.3 板厚修正系数  $f_t$  应按下列各式计算：

$$f_t = 1.0 \quad \text{当 } t \leq 22 \text{ 时；}$$

$$f_t = \left( \frac{t}{22} \right)^n \quad \text{当 } t > 22 \text{ 时；}$$

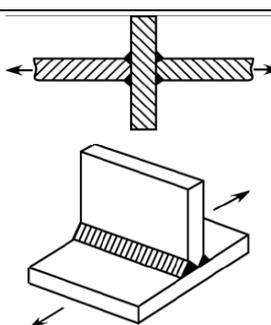
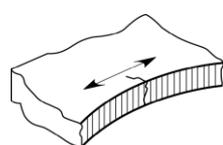
式中：  $n$  —— 系数，见本章表 3.3.3；

$t$  —— 热点处的板厚，mm，按下述要求确定：

对于简化应力分析，扁钢和球扁钢不作板厚修正，角钢和 T 型材取面板厚度。

对于有限元应力分析，应取为裂纹容易产生和扩展处结构的板厚。

表 3.3.3

结构节点	示意图	系数 n
十字接头或 T 型接头，载荷方向与焊缝方向垂直		0.25
对接接头，载荷方向与焊缝方向垂直		0.2
程序控制的机器或者火焰切割的板边缘，载荷方向与板		0.1

边缘平行		
切割后机械打磨光滑或其他方式打磨光滑的板边缘		0
对接焊缝，板边的焊接件，焊缝方向与载荷方向平行		0.1
有焊接件的扁钢或球扁钢，载荷方向与焊缝方向平行		0
板材上焊有肘板，载荷方向与焊缝方向平行；搭接板		0.2
焊有肘板或搭接板的T型材面板，载荷方向与焊缝方向平行		0.1

### 3.4 设计 S-N 曲线的选取

3.4.1 对于焊接节点，疲劳强度评估采用 D 曲线。

3.4.2 对于母材自由边，疲劳强度评估采用 C 曲线。

### 3.5 疲劳累积损伤计算

3.5.1 结构节点在装载工况“(k)”时的累积损伤度  $D_k$  应按下式计算:

$$D_k = \frac{N_D \alpha_k}{K} \frac{S_{D(k)}^m}{(\ln N_L)^{m/\xi_k}} \mu_k \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi_k}\right)$$

式中:  $N_D$  —— 船舶在 20 年营运期间的载荷循环总次数, 通常取  $0.65 \times 10^8$ ;

$N_L$  —— 载荷谱回复周期的循环次数, 取为  $10^2$ ;

$\alpha_k$  —— 装载工况“(k)”的时间分配系数, 见本指南第 1 章 1.7;

$K$  —— S-N 曲线参数, 见本章表 3.5.1; ;

$S_{D(k)}$  —— 装载工况“(k)”的设计应力范围, N/mm<sup>2</sup>;

$\xi_k$  —— 装载工况“(k)”的 Weibull 形状参数, 取为 1;

$$\mu_k = 1.0 - \frac{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi_k}, \nu_k\right) - \nu_k^{-\frac{\nabla m}{\xi_k}} \gamma\left(1 + \frac{m + \nabla m}{\xi_k}, \nu_k\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi_k}\right)}$$

$$\nu_k = \left(\frac{S_q}{S_{D(k)}}\right)^{\xi_k} \ln N_L$$

$m$  —— S-N 曲线反斜率, 取为 3;

$\nabla m$  —— S-N 曲线两段反斜率差, 取为 2;

$\gamma(x, \nu)$  —— 不完全 GAMMA 函数值, 应按下式计算:

$$\gamma(x, \nu) = \int_0^{\nu} u^{x-1} e^{-u} du$$

$\Gamma$  —— 完全 GAMMA 函数值, 应按下式计算:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} u^{x-1} e^{-u} du$$

$S_q$  —— S-N 曲线二线段的交点处的应力幅值, 见本章表 3.5.1;

表 3.5.1

S-N 曲线	K	$S_q$
--------	---	-------

C	$3.464 \times 10^{12}$	70.2305
D	$1.520 \times 10^{12}$	53.3680

3.5.2 结构节点的总累积损伤度应按下列式计算:

$$D = \sum D_k$$

式中:  $D_k$ ——结构节点在各装载工况下的累积损伤度, 见本章 3.5.1。

### 3.6 疲劳寿命计算

3.6.1 结构疲劳寿命应按下列式计算:

$$T_F = \frac{20}{D}$$

式中:  $D$ ——结构节点的总累积损伤度, 见本章 3.5.2。

## 第 4 章 简化应力分析

### 4.1 一般要求

4.1.1 简化应力分析方法适用于纵骨端部连接节点的疲劳强度评估, 热点在纵骨端部连接节点的焊趾处。

4.1.2 应根据纵骨端部连接型式和位置, 基于第 1 章 1.7 的装载工况, 考虑不同端部连接型式的应力集中系数, 对纵骨的热点应力范围和热点平均应力进行计算。

4.1.3 简化应力分析时考虑下述名义应力分量:

- (1) 船体梁弯曲正应力;
- (2) 纵骨在侧向载荷作用下的弯曲正应力。

### 4.2 基于简化分析的热点应力范围与热点平均应力

4.2.1 装载工况“(k)”中载荷工况“p”下, 热点应力范围  $S_{h,i(k)}$  应按下列式计算:

$$S_{h,i(k)} = \left| \sigma_{h,i1(k)} - \sigma_{h,i2(k)} \right| \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_{h,i1(k)}$ 、 $\sigma_{h,i2(k)}$ ——装载工况“(k)”中载荷工况“i”下的热点应力，N/mm<sup>2</sup>，见本章 4.4.1。

4.2.2 装载工况“(k)”中载荷工况“i”下，热点平均应力应按下式计算：

$$\sigma_{m,i(k)} = \frac{\sigma_{h,i1(k)} + \sigma_{h,i2(k)}}{2} \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_{h,i1(k)}$ 、 $\sigma_{h,i2(k)}$ ——装载工况“(k)”中载荷工况“i”下的热点应力，N/mm<sup>2</sup>，见本章 4.4.1。

### 4.3 名义应力分量计算

4.3.1 装载工况“(k)”中载荷工况“ij”下，船体梁载荷引起的名义应力分量 $\sigma_{nh,ij(k)}$ ，应按下式计算：

$$\sigma_{nh,ij(k)} = \sigma_{SW,(k)} + C_{WV,ij}\sigma_{WV,ij} + C_{WH,ij}\sigma_{WH,(k)} \quad (j=1,2) \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_{SW,(k)}$ ——静水弯矩引起的船体梁弯曲正应力，N/mm<sup>2</sup>；应按下式计算：

$$\sigma_{SW,(k)} = \frac{M_{SW,(k)}(z - z_{NA})}{I_Y} \times 10^{-3} \quad \text{N/mm}^2$$

$\sigma_{WV,ij}$ ——垂向波浪弯矩引起的船体梁弯曲正应力，N/mm<sup>2</sup>；

$$\sigma_{WV,i1} = \frac{M_{WV,S}(z - z_{NA})}{I_Y} \times 10^{-3} \quad \text{对中垂工况；}$$

$$\sigma_{WV,i2} = \frac{M_{WV,H}(z - z_{NA})}{I_Y} \times 10^{-3} \quad \text{对中拱工况；}$$

$\sigma_{WH,(k)}$ ——水平波浪弯矩引起的船体梁弯曲正应力，N/mm<sup>2</sup>；

$$\sigma_{WH,(k)} = \frac{M_{WH}y}{I_Z} \times 10^{-3}$$

$C_{WV,ij}$ 、 $C_{WH,ij}$ ——船体梁垂向波浪弯矩和水平波浪弯矩的载荷组合因子，见本指南第 2 章表 2.5.3；

$M_{SW,(k)}$ ——相应装载工况下的静水弯矩，kN·m；

$M_{WV,S}$ 、 $M_{WV,H}$ ——中垂、中拱垂向波浪弯矩，kN·m；

$M_{WH,(k)}$ ——水平波浪弯矩，kN·m；

$y$ 、 $z$ ——计算点的横向坐标与垂向坐标，m；

$z_{NA}$ ——中和轴的垂向坐标，m；

$I_y$ 、 $I_z$ ——船体横剖面分别对横向和垂向中和轴的惯性矩， $m^4$ ；

4.3.2 装载工况“(k)”中载荷工况“ij”下，侧向载荷引起的名义应力分量  $\sigma_{nl,ij(k)}$ ，应按下列

计算：

$$\sigma_{nl,ij(k)} = \frac{C_d (\eta_{SW} P_{SW,ij(k)} + \eta_L P_{L,ij(k)} + \eta_C P_{C,ij(k)}) s l^2 \left( 6 \left( \frac{x}{l} \right)^2 - 6 \left( \frac{x}{l} \right) + 1 \right) \times 10^3}{12 W_s} \quad (j=1,2) \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $s$ ——纵骨间距，m；

$l$ ——纵骨跨距，m，见本章图 4.3.2；

$x$ ——纵骨跨距端部至热点的距离，m，见本章图 4.3.2；

$W_s$ ——纵骨连同带板的剖面模数， $cm^3$ ；

$C_d$ ——相对位移修正系数，按下述要求确定：

$C_d = 1.3$ ，货舱横舱壁处的船底（内底）纵骨端部节点

$C_d = 1.2$ ，货舱横舱壁处的舷侧（内壳）纵骨端部节点

$C_d = 1.15$ ，货舱横舱壁处的甲板纵骨端部节点

$C_d = 1.0$ ，其他

相对位移修正系数也可由直接计算法确定。

$P_{SW,ij(k)}$ 、 $P_{L,ij(k)}$ 、 $P_{C,ij(k)}$ ——纵骨跨距中点处的海水压力、液体压力或干散货压力， $kN/m^2$ ；

$\eta_{SW}$ 、 $\eta_L$ 、 $\eta_C$ ——侧向载荷压力方向系数；当压力作用在纵骨一侧时，取 1；当压力作用在纵骨相反一侧时，取 -1。

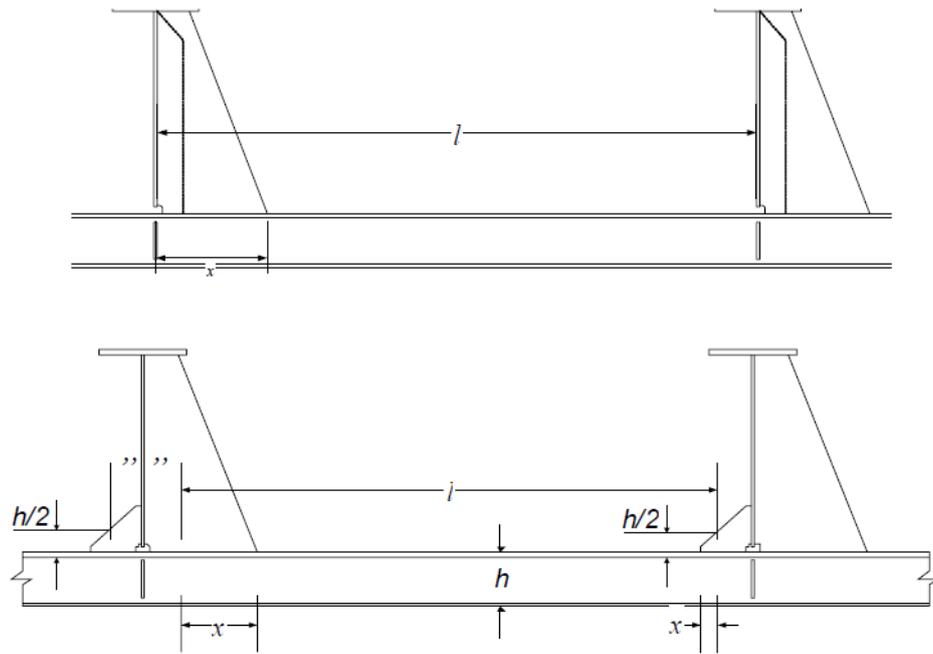


图 4.3.2 (1) 单壳构造

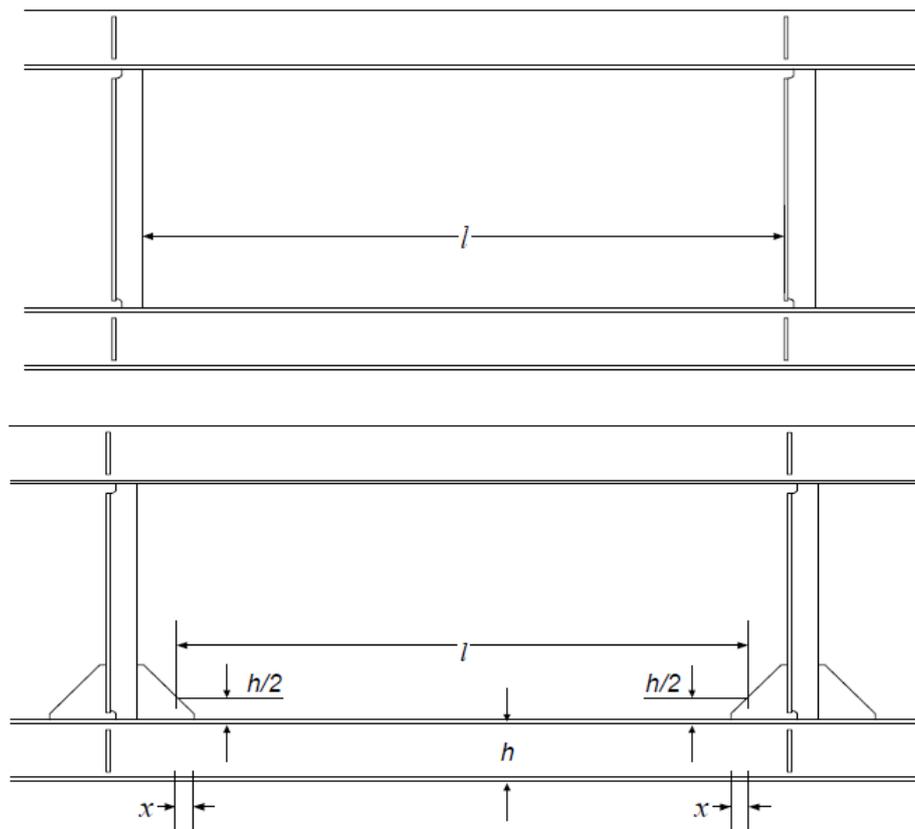


图 4.3.2 (2) 双壳构造

#### 4.4 热点应力计算

4.4.1 装载工况“(k)”中载荷工况“r”下的热点应力应按下列各式计算：

$$\sigma_{h,ij(k)} = C_g f_{ch} K_{gh} \sigma_{nh,ij(k)} + f_{cl} K_{gl} K_n \sigma_{nl,ij(k)} \quad (j = 1, 2) \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_{nh,ij(k)}$ ——船体梁弯矩引起的名义应力分量， $\text{N/mm}^2$ ，见本章 4.3.1；

$\sigma_{nl,ij(k)}$ ——侧向载荷引起的名义应力分量， $\text{N/mm}^2$ ，见本章 4.3.2；

$K_n$ ——非对称纵骨应力集中系数，见本章 4.5.2；

$K_{gh}$ ——纵骨轴向载荷应力集中系数，见本章表 4.5.1；

$K_{gl}$ ——纵骨侧向载荷应力集中系数，见本章表 4.5.1；

$f_{ch}$ 、 $f_{cl}$ ——腐蚀修正系数，见第 1 章 1.6.1；

$C_g$ ——板架弯曲修正系数，应按下述要求确定：

$C_g = 1.1$ ，船底（内底）纵骨端部节点

$C_g = 1.05$ ，舷侧（内壳）纵骨端部节点

$C_g = 1.0$ ，甲板纵骨端部节点

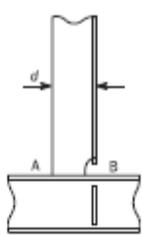
板架弯曲修正系数也可由直接计算法确定。

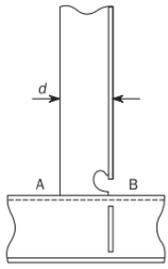
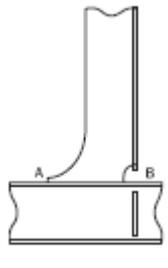
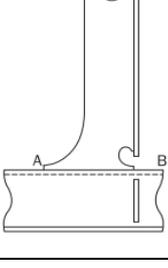
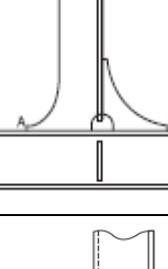
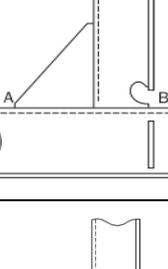
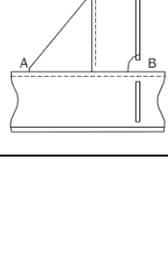
#### 4.5 应力集中系数

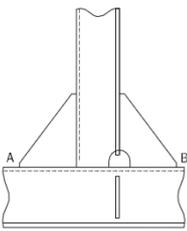
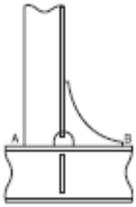
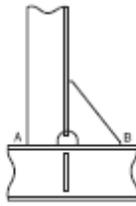
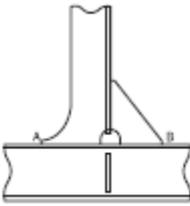
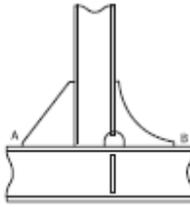
4.5.1 纵向对称扶强材端部连接的轴向载荷与侧向载荷的应力集中系数如表 4.5.1 所示，也可按本节 4.5.3 用直接计算法确定。

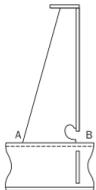
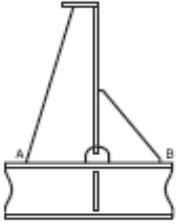
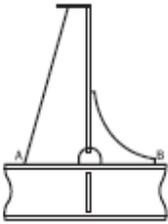
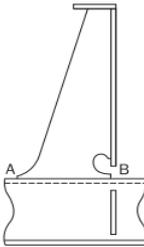
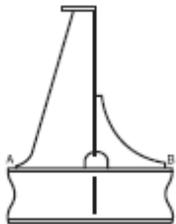
应力集中系数

表 4.5.1

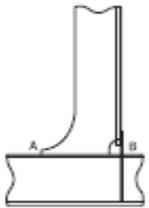
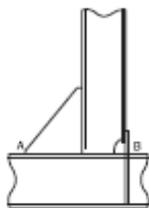
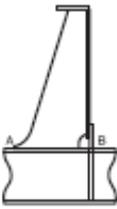
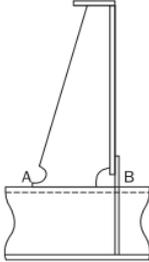
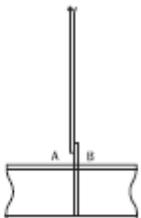
序号	节点形式	A 点		B 点	
		$K_{gh}$	$K_{gl}$	$K_{gh}$	$K_{gl}$
1		1.28	1.40	1.28	1.6
		( $d \leq 150$ )	( $d \leq 150$ )	( $d \leq 150$ )	
		1.36	1.50	1.36	
		( $150 < d \leq 250$ )	( $150 < d \leq 250$ )	( $150 < d \leq 250$ )	
		1.45	1.60	1.45	
		( $d > 250$ )	( $d > 250$ )	( $d > 250$ )	

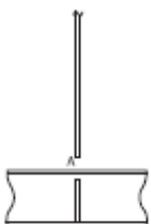
序号	节点形式	A 点		B 点	
		$K_{gh}$	$K_{gl}$	$K_{gh}$	$K_{gl}$
2		1.28 ( $d \leq 150$ ) 1.36 ( $150 < d \leq 250$ ) 1.45 ( $d > 250$ )	1.40 ( $d \leq 150$ ) 1.50 ( $150 < d \leq 250$ ) 1.60 ( $d > 250$ )	1.14 ( $d \leq 150$ ) 1.24 ( $150 < d \leq 250$ ) 1.34 ( $d > 250$ )	1.27
3		1.28	1.34	1.52	1.67
4		1.28	1.34	1.34	1.34
5		1.28	1.34	1.28	1.34
6		1.52	1.67	1.34	1.34
7		1.52	1.67	1.52	1.67

序号	节点形式	A 点		B 点	
		$K_{gh}$	$K_{gl}$	$K_{gh}$	$K_{gl}$
8		1.52	1.67	1.52	1.67
9		1.52	1.67	1.28	1.34
10		1.52	1.67	1.52	1.67
11		1.28	1.34	1.52	1.67
12		1.52	1.67	1.28	1.34
13		1.52	1.67	1.52	1.67

序号	节点形式	A 点		B 点	
		$K_{gh}$	$K_{gl}$	$K_{gh}$	$K_{gl}$
14		1.52	1.67	1.34	1.34
15		1.52	1.67	1.52	1.67
16		1.52	1.67	1.28	1.34
17		1.34	1.34	1.52	1.67
18		1.34	1.34	1.34	1.34
19		1.34	1.34	1.28	1.34

序号	节点形式	A 点		B 点	
		$K_{gh}$	$K_{gl}$	$K_{gh}$	$K_{gl}$
20		1.34	1.34	1.52	1.67
21		1.34	1.34	1.52	1.67
22		1.34	1.34	1.34	1.34
23		1.34	1.34	1.28	1.34
24		1.34	1.34	1.52	1.67
25		1.28 ( $d \leq 150$ ) 1.36 ( $150 < d \leq 250$ ) 1.45 ( $d > 250$ )	1.40 ( $d \leq 150$ ) 1.50 ( $150 < d \leq 250$ ) 1.60 ( $d > 250$ )	1.14 ( $d \leq 150$ ) 1.24 ( $150 < d \leq 250$ ) 1.34 ( $d > 250$ )	1.25 ( $d \leq 150$ ) 1.36 ( $150 < d \leq 250$ ) 1.47 ( $d > 250$ )

序号	节点形式	A 点		B 点	
		$K_{gh}$	$K_{gl}$	$K_{gh}$	$K_{gl}$
26		1.28	1.34	1.34	1.47
27		1.52	1.67	1.34	1.47
28		1.52	1.67	1.34	1.47
29		1.34	1.34	1.34	1.47
30		1.34	1.34	1.34	1.47
31		1.34	1.47	1.34	1.47

序号	节点形式	A 点		B 点	
		$K_{gh}$	$K_{gl}$	$K_{gh}$	$K_{gl}$
32		1.1	1.14	N/A	N/A

4.5.2 非对称扶强材的几何形状应力集中系数  $K_n$  应按下列公式计算:

$$K_n = 1.03 \quad , \text{ 对于球扁钢}$$

$$K_n = \frac{1 + \lambda\beta^2}{1 + \lambda\beta^2\psi_z} \quad , \text{ 其他}$$

式中:  $\beta$ ——系数; 取  $1 - 2b_g/b_f$ ;

$b_g$ ——从腹板中心线至翼板的宽度, mm, 见图 4.5.2;

$b_f$ ——翼板宽度, mm;

$t_f$ ——翼板厚度, mm;

$h_{st}$ ——腹板高度, mm;

$t_w$ ——腹板厚度, mm;

$t_p$ ——带板厚度, mm;

$Z$ ——扶强材剖面模数,  $\text{cm}^3$ ;

$$\lambda \text{——系数, 取 } \frac{3\left(1 + \frac{\eta}{280}\right)}{1 + \frac{\eta}{40}};$$

$$\psi \text{——系数, 取 } \frac{h_{st}^2 t_w}{4Z \times 10^3};$$

$$\eta \text{——系数, 取 } \frac{l^4}{b_f^3 t_f h_{st}^2 \left( \frac{4h_{st}}{t_w^3} + \frac{s}{t_p^3} \right)} \times 10^{12}.$$



## 5.2 结构模型化

5.2.1 除本指南另有规定外，舱段有限元结构模型化应符合 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 14 节的相关要求。

5.2.2 模型范围应符合下述要求：

- (1) 纵向范围一般应至少覆盖船中货舱区的 1/2 个货舱+1 个货舱+1/2 个货舱长度。
- (2) 考虑横向波浪载荷的不对称性，应采用全宽模型。
- (3) 垂向范围应取主船体范围内的所有构件，包括主甲板上的所有主要构件。

5.2.3 对于局部精细网格模型，应避免位移边界条件和力边界条件对细化区域热点应力的影响；细化区域边缘应有主要支撑构件，如货舱区域的纵桁、水平桁和肋板等。

5.2.4 热点附近的有限元网格应足够精细，以便反映应力梯度的变化，网格大小应不大于热点处受力构件厚度  $t$ 。精细网格区域应保证从热点位置向外所有方向延伸不小于  $10t$ ，精细网格与粗网格之间的细化网格区域的网格密度的过渡应保持平稳。

5.2.5 精细网格区域内应使用具有弯曲和膜元特性的 4 节点单元，壳单元应表示板材的中面和板弯曲特性。应尽可能避免使用三角形单元，避免使用角度小于  $60^\circ$  或大于  $120^\circ$  的畸变单元。细化区域内的骨材，应以板单元模拟；细化区域外的骨材可采用梁单元模拟。不考虑焊缝的几何形状和结构的对中。

5.2.6 如果在自由边（如骨材穿过强框架的开孔、板材边缘和舱口角隅）进行应力评估时，应使用高度与板材厚度相同，单位宽度近似忽略的梁单元来得到局部的应力值。

5.2.7 对于独立舱型液化气体船有限元建模，应能模拟支撑独立舱的垫块及限位的楔块的受力状态，可采用迭代分析、非线性杆单元或接触单元的建模方法，具体可参考 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》有关章节。

## 5.3 有限元分析工况

5.3.1 在有限元应力分析时，每一计算工况分为总体载荷工况与局部载荷工况，热点应力应由总体载荷工况与局部载荷工况的应力合成得到，应按下式计算：

$$\sigma_c = f_{ch}\sigma_{HG} + C_{VT}f_{cl}\sigma_L \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_{HG}$ ——总体载荷工况下的热点应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\sigma_L$ ——局部载荷工况下的热点应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$f_{ch}$ 、 $f_{cl}$ ——腐蚀修正系数，见第 1 章 1.6.1；

$C_{VT}$ ——船型修正系数，按下述要求确定：

$C_{VT}=0.75$ ，对于集装箱船

$C_{VT}=0.85$ ，对于汽车运输船

$C_{VT}=0.80$ ，对于油船

$C_{VT}=0.9$ ，对于散货船

$C_{VT}=0.95$ ，对于 Mem-LNG 船

$C_{VT}=0.6$ ，对于矿砂船内底板与底凳连接处的热点、独立舱型液化气体船

$C_{VT}=0.9$ ，对于矿砂船的其他热点。

## 5.4 边界条件

5.4.1 舱段有限元模型的边界条件应符合下述要求：

(1) 总体载荷工况边界条件（见本章表 5.4.1 (1)）

(a) 前后端面各纵向构件节点自由度  $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_z$  应与中纵剖面上中和轴处的独立点采用 MPC 方式关联；在独立点上施加垂向弯矩与水平弯矩，各载荷工况的载荷组合因子见本指南第 2 章表 2.5.3。

(b) 前后端面内独立点的横向线位移、垂向线位移、绕纵向轴的角位移约束，即：

$\delta_y = \delta_z = \theta_x = 0$ ；前端面内独立点纵向线位移约束，即  $\delta_x = 0$ 。

总体载荷边界条件

表 5.4.1 (1)

位置	线位移约束			角位移约束		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
前后端面所有纵向构件	相关	相关	相关	-	-	-
前端面独立点	固定	固定	固定	固定	弯矩	弯矩
后端面独立点	-	固定	固定	固定	弯矩	弯矩

(2) 油船、散货船、集装箱船、Mem-LNG、独立舱型液化气体船和矿砂船的局部载荷

工况边界条件（载荷对称，见表 5.4.1（2））

（a）前后端面施加对称面边界条件，端面内节点的纵向线位移、绕端面内两个坐标轴的角位移约束，即： $\delta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ ；

（b）舷侧外板、内壳板、纵舱壁与中部货舱前后舱壁交线上应设置垂向弹簧单元，弹簧单元弹性系数均匀分布，弹性系数按下式计算：

$$K = \frac{5GA}{6l_H n}$$

式中： $G$ ——材料的剪切弹性模量；对于钢材， $G=0.792 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ；

$A$ ——前后舱壁处舷侧外板、内壳板或纵舱壁板的剪切面积， $\text{mm}^2$ ；

$l_H$ ——中部货舱长度， $\text{mm}$ ；

$n$ ——舷侧外板、内壳板或纵舱壁板上垂向交线节点数量。

局部载荷边界条件（载荷对称） 表 5.4.1（2）

位置	线位移约束			角位移约束		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
前后端面	固定	-	-	-	固定	固定
前后横舱壁处纵中剖面与船底交点	-	固定	-	-	-	-
舷侧外板、内壳板、纵舱壁板与前后横舱壁垂直交线节点	-	-	垂向弹簧	-	-	-

（3）油船、散货船、集装箱船、Mem-LNG、独立舱型液化气体船和矿砂船的局部载荷工况边界条件（载荷非对称，见表 5.4.1（3））

（a）前后端面施加对称面边界条件，端面内节点的纵向线位移、绕端面内两个坐标轴的角位移约束，即： $\delta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ ；

（b）上甲板、船底板、内底板与前后横舱壁交线上节点应设置横向弹簧单元，弹簧单元弹性系数均匀分布，弹性系数按下式计算：

$$K = \frac{5GA}{6l_H n}$$

式中： $G$ ——材料的剪切弹性模量；对于钢材， $G=0.792 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ；

$A$ ——前后舱壁处船底板、内底板的剪切面积， $\text{mm}^2$ ；

$l_H$ ——中部货舱长度，mm；

$n$ ——船底板、内底板上水平交线节点数量。

(c) 舷侧外板、内壳板、纵舱壁板与前后横舱壁交线上节点应设置垂向弹簧单元，弹簧单元弹性系数均匀分布，弹性系数见本章 5.4.1 (2) (b)。

局部载荷边界条件（载荷非对称） 表 5.4.1 (3)

位置	线位移约束			角位移约束		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
前后端面	固定	-	-	-	固定	固定
上甲板、船底板、内底板与前后横舱壁水平交线	-	横向弹簧	-	-	-	-
舷侧外板、内壳板、纵舱壁板与前后横舱壁垂直交线	-	-	垂向弹簧	-	-	-

(4) 汽车运输船的局部载荷边界条件

(a) 各工况采用相同的边界条件，用以约束刚体位移，并约束载荷产生的不平衡力。

具体的位置见表 5.4.1 (4) 和图 5.4.1。

(b) 为了约束模型的纵向位移，在内底板的一端约束  $x$  方向的位移。

(c) 为了约束模型的横向位移，在内底的一舷的边线处约束  $y$  方向的位移。

(d) 为了约束模型的垂向位移，在舷侧的两端约束其  $z$  方向的位移。通过上述位移约束，可以控制模型的转动刚体位移。

(e) 为了模拟与模型相邻构件的约束，在船底和甲板纵桁前后端处，约束其绕  $y$  轴的转动。

各工况下的边界条件 表 5.4.1 (4)

约束	$\delta_x = 0$	$\delta_y = 0$	$\delta_z = 0$	$\theta_y = 0$
作用区域	线 AD	线 AB	线 AA', BB', CC', DD'	各纵桁两端

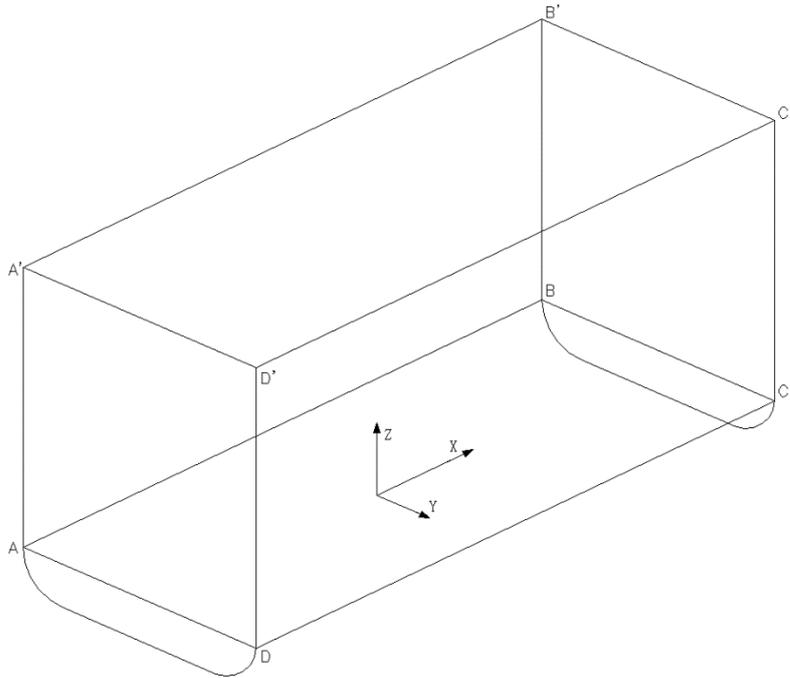


图 5.4.1 施加边界条件的位置

5.4.2 当采用局部细化有限元模型时，应将由舱段模型获得的节点力或节点位移施加到子模型上。

## 5.5 基于有限元分析的热点应力范围与热点平均应力

### 5.5.1 热点应力范围与平均应力

(1) 装载工况“(k)”中载荷工况“r”下，热点应力范围  $S_{h,i(k)}$  应为垂直于焊趾方向左右  $45^\circ$  范围内的热点主应力，根据各载荷工况  $i_1$  和载荷工况  $i_2$  下热点应力分量的差值确定。

(2) 装载工况“(k)”中载荷工况“r”下，热点平均应力应根据各载荷工况  $i_1$  和载荷工况  $i_2$  下热点应力分量的平均确定。

### 5.5.2 焊接型节点热点应力计算

(1) 对于一般焊接型节点（如肘板趾端等），装载工况“(k)”中载荷工况“j”下，热点应力  $\sigma_{ij(k)}$ （见本章图 5.5.2 (1)）应按下式计算：

$$\sigma_{ij(k)} = \frac{3\sigma_{ij(k),t/2} - \sigma_{ij(k),3t/2}}{2} \quad (j=1,2) \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_{ij(k),t/2}$ 、 $\sigma_{ij(k),3t/2}$ ——装载工况“(k)”中载荷工况“j”下，距焊趾  $t/2$  和  $3t/2$  的应力读取点处应力， $\text{N/mm}^2$ ；其中  $t$  为热点处的板厚， $\text{mm}$ 。

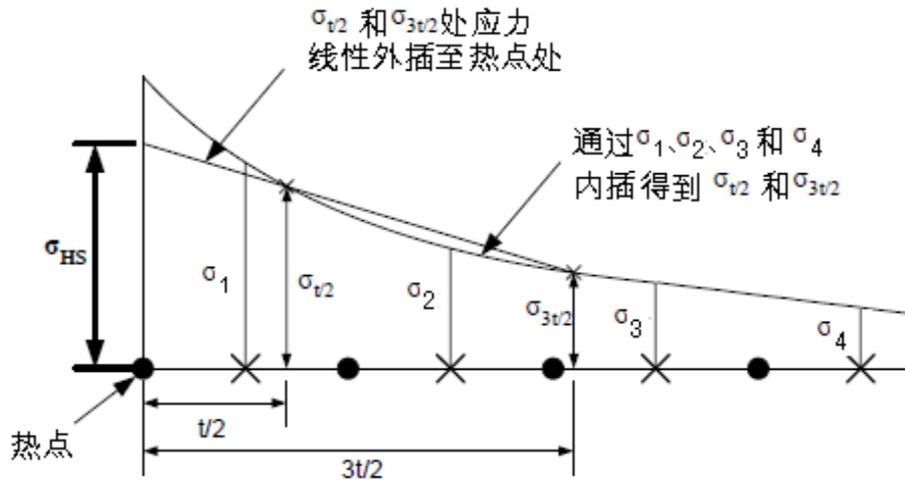


图 5.5.2 (1) 一般焊接型节点热点应力插值

(2) 在热点附近受力构件的表面上选取 4 个插值点，应力读取点应位于 4 个插值点之间，插值点的应力应由  $A-A$  线的左侧与右侧单元中心点的应力平均得到，如图 5.5.2 (2)。距焊趾  $t/2$  和  $3t/2$  处应力读取点的应力  $\sigma$  应根据所选插值点处的应力用拉格朗日插值法按下式计算：

$$\sigma = C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2 + C_3\sigma_3 + C_4\sigma_4 \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_1$ ——插值点 1 处的应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\sigma_2$ ——插值点 2 处的应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\sigma_3$ ——插值点 3 处的应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\sigma_4$ ——插值点 4 处的应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  应按下列各式计算：

$$C_1 = \frac{(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)}$$

$$C_2 = \frac{(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)}$$

$$C_3 = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)}$$

$$C_4 = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)}$$

式中：  $x$  ——应力读取点距焊趾的距离， mm；

$x_1$  ——插值点 1 距焊趾的距离， mm；

$x_2$  ——插值点 2 距焊趾的距离， mm；

$x_3$  ——插值点 3 距焊趾的距离， mm；

$x_4$  ——插值点 4 距焊趾的距离， mm。

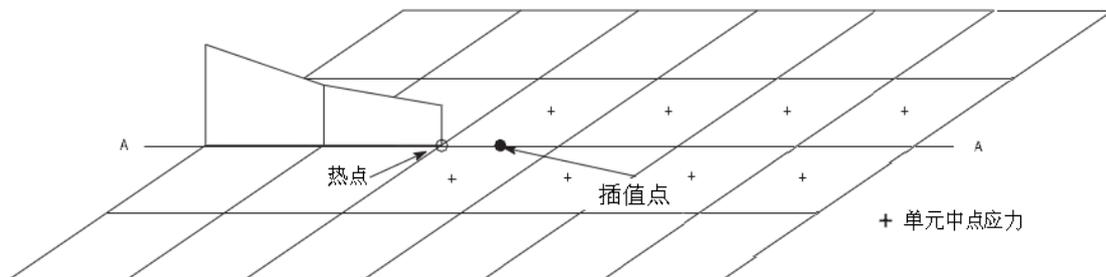


图5.5.2 (2) 插值点应力获取方法

### 5.5.3 十字焊接型节点热点应力计算

(1) 对于十字焊接型节点(如焊接型底边舱折角、水平桁根部、底凳与内底折角处等)，如图5.5.3 (1)，装载工况“(k)”中载荷工况“ij”下，热点处应力  $\sigma_{ij(k)}$  应为距离单元交线  $x_{shift}$  处的应力，通过交线上相邻插值点的应力线性插值得到，如图5.5.3 (2)。

应力读取位置  $x_{shift}$ ，应按下式计算：

$$x_{shift} = \frac{t}{2} + x_{wt} \quad \text{mm}$$

式中：  $t$  ——热点处的板厚， mm；

$x_{wt}$  ——焊脚长度， mm， 不大于  $\frac{t}{2}$ 。

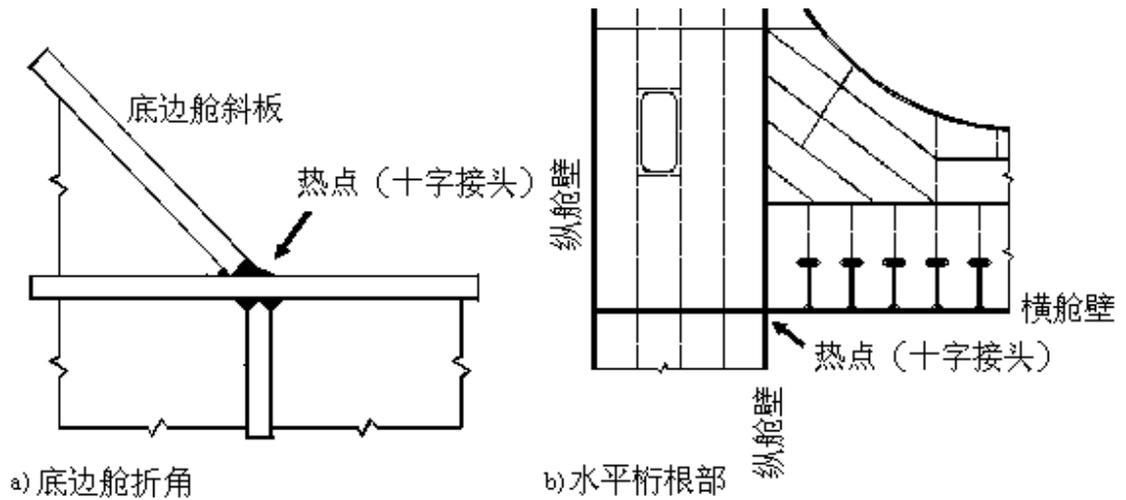


图5.5.3 (1) 十字焊接型节点

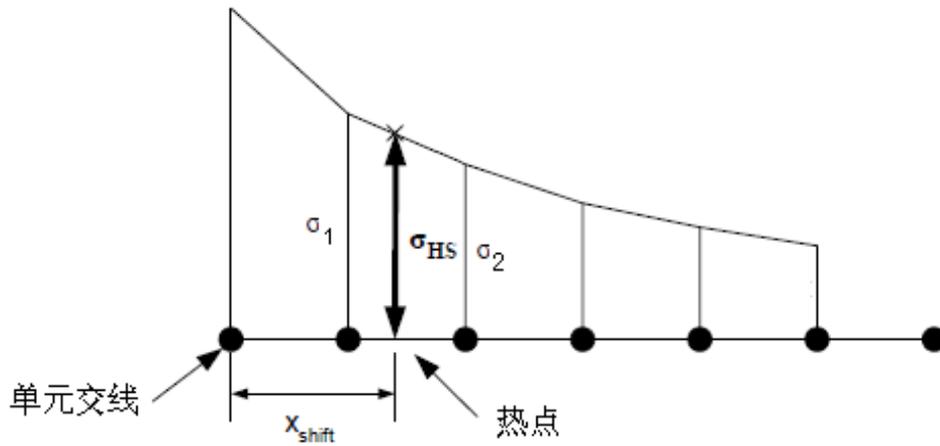


图5.5.3 (2) 十字焊接型热点应力插值

(2) 相邻插值点应力应由  $A-A$  线的左侧与右侧单元中心点的应力平均得到。单元中心点应力按下式计算：

$$\sigma_{ij(k)}(x) = (\sigma_{ij(k),membrane}(x) + 0.6f_{ld}\sigma_{ij(k),bending}(x)) \times \beta \quad (j = 1,2) \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_{ij(k),bending}(x)$ ——弯曲应力， $\text{N/mm}^2$ ，按下式计算：

$$\sigma_{ij(k),bending}(x) = \sigma_{ij(k),surface}(x) - \sigma_{ij(k),membrane}(x) \quad (j = 1,2) \quad \text{N/mm}^2$$

$\sigma_{ij(k),surface}(x)$ ——垂直于焊趾方向左右  $45^\circ$  范围内的表面应力，包括中面应力和弯曲应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\sigma_{ij(k),membrane}(x)$ ——中面应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$f_{ld}$ ——系数，按下述要求确定：

$f_{ld}=1$ ，对于承受局部侧向载荷的板格；

$f_{ld}=0$ ，对于不承受局部侧向载荷的板格。

$\beta$ ——相交板角度修正系数，应按下列各式计算：

$$\beta = 1.07 - 0.15 \frac{x_{wt}}{t} + 0.22 \left( \frac{x_{wt}}{t} \right)^2, \text{ 对于 } \alpha = 135^\circ$$

$$\beta = 1.09 - 0.16 \frac{x_{wt}}{t} + 0.36 \left( \frac{x_{wt}}{t} \right)^2, \text{ 对于 } \alpha = 120^\circ$$

$$\beta = 1.09 + 0.036 \frac{x_{wt}}{t} + 0.27 \left( \frac{x_{wt}}{t} \right)^2, \text{ 对于 } \alpha = 90^\circ$$

其他角度的相交板角度修正系数应通过线性插值法确定。

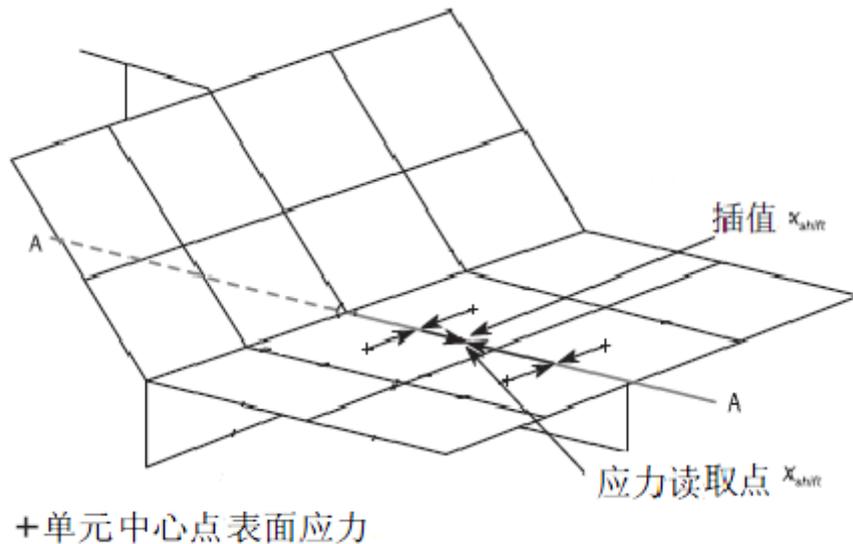


图5.5.3 (2) 插值点应力获取方法

5.5.4 对于板材自由边的疲劳评估，需使用梁单元来获取疲劳应力范围，应力范围考虑梁单元的轴向力和弯曲应力，梁单元的高度与所考虑板材的厚度相同，宽度方向近似忽略。

## 5.6 典型节点的有限元细化要求

### 5.6.1 底边舱折角连接

- (1) 本小节的建模要求适用于焊接式底边舱结构的上折角和下折角。
- (2) 如使用独立的局部有限元模型，局部模型的最小范围如下：

①沿纵向，模型应覆盖两个强框架间距（即被校核的横框架向前后各延伸一个强框架间距）。位于局部模型端部位置的强框架可不必建模。

②沿垂向，模型应从基线至双壳压载舱的最下一根水平桁（对于油船和双壳散货船），对于单壳的散货船，模型应从基线至底边舱的顶点。当底边舱的上折角需进行疲劳评估时，模型应向上延伸至双壳压载舱的最下一根水平桁以上4个纵骨的间距。

③沿横向，模型应从舷侧至双层底最外侧纵桁向内4个纵骨的间距。

(3) 任何强框架上毗连内底板的嵌连肘板、从折角起第一根纵骨、临近横框架的第一个短梁和肘板，都应使用壳单元精确建模。远离折角的纵骨可使用梁单元建模。纵桁外侧的内底板突出部分应使用壳单元建模至嵌接肘板。嵌接肘板以外的内底板延伸部分可使用等效面积的线单元建模。距离折角一个骨材间距区域内的任何开孔，比如电缆、管路和通道开孔，都应精确建模。

(4) 底边舱折角接头的典型局部有限元模型和细化网格见图5.6.1 (1) ~ (5)。

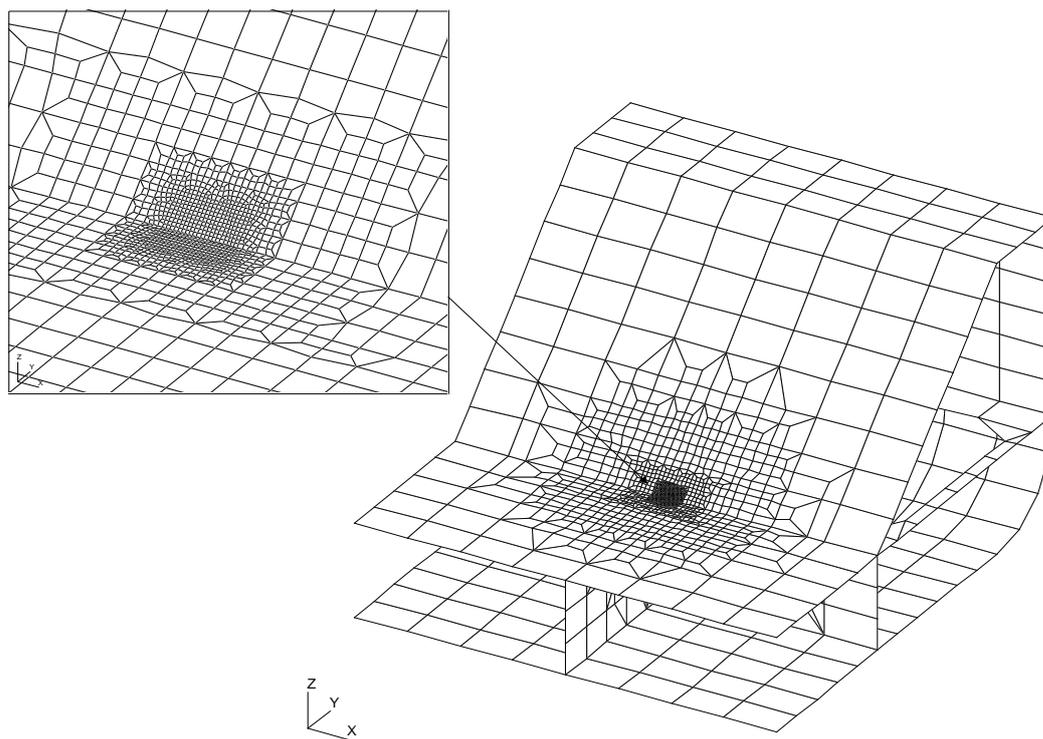


图5.6.1 (1) 底边舱折角细化有限元网格模型

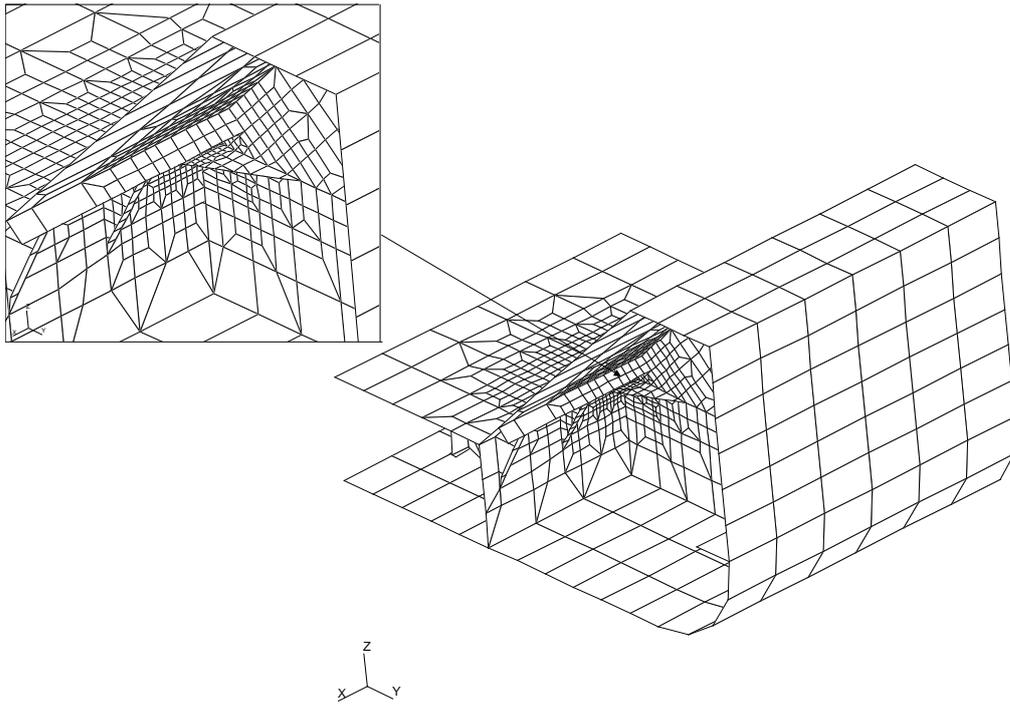


图5.6.1 (2) 底边舱折角细化有限元网格模型

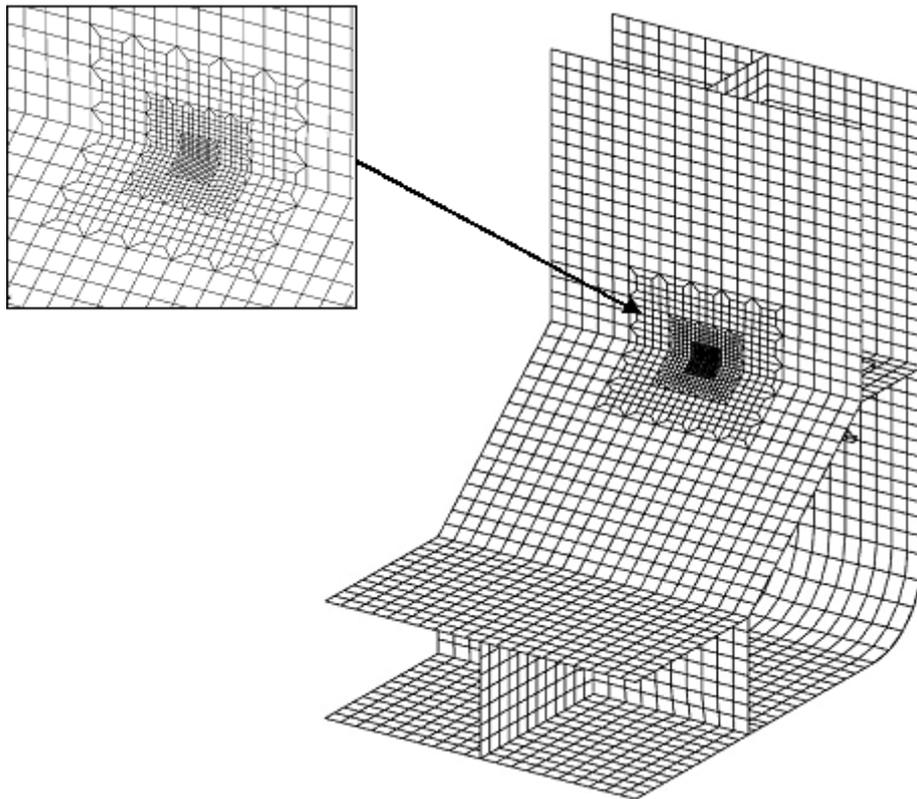


图5.6.1 (3) 底边舱折角细化有限元网格模型

### 5.6.2 底墩与内底的连接

(1) 本小节的建模要求适用于底墩与内底的折角连接部位。

(2) 如使用独立的局部有限元模型，局部模型的最小范围如下：

①沿垂向，模型应从船底向上至内底以上2 米与槽型舱壁和底凳卸货板相交处中两者的大者。

②沿横向，模型应延伸至左右两端最近的底凳隔板，模型端部的底凳隔板不必建模。

③沿纵向，模型向前应覆盖底凳前斜板向前一个实肋板间距，向后应覆盖底凳后斜板向后一个实肋板间距。

(3) 底凳内部的隔板、肘板、扶强材应按照实际位置建模，隔板、肘板以及从热点起第一根纵骨（纵向、垂向、水平）都应使用壳单元精确建模，其余纵骨可使用梁单元建模。

底凳与内底折角连接处的典型局部有限元模型见图5.6.2。

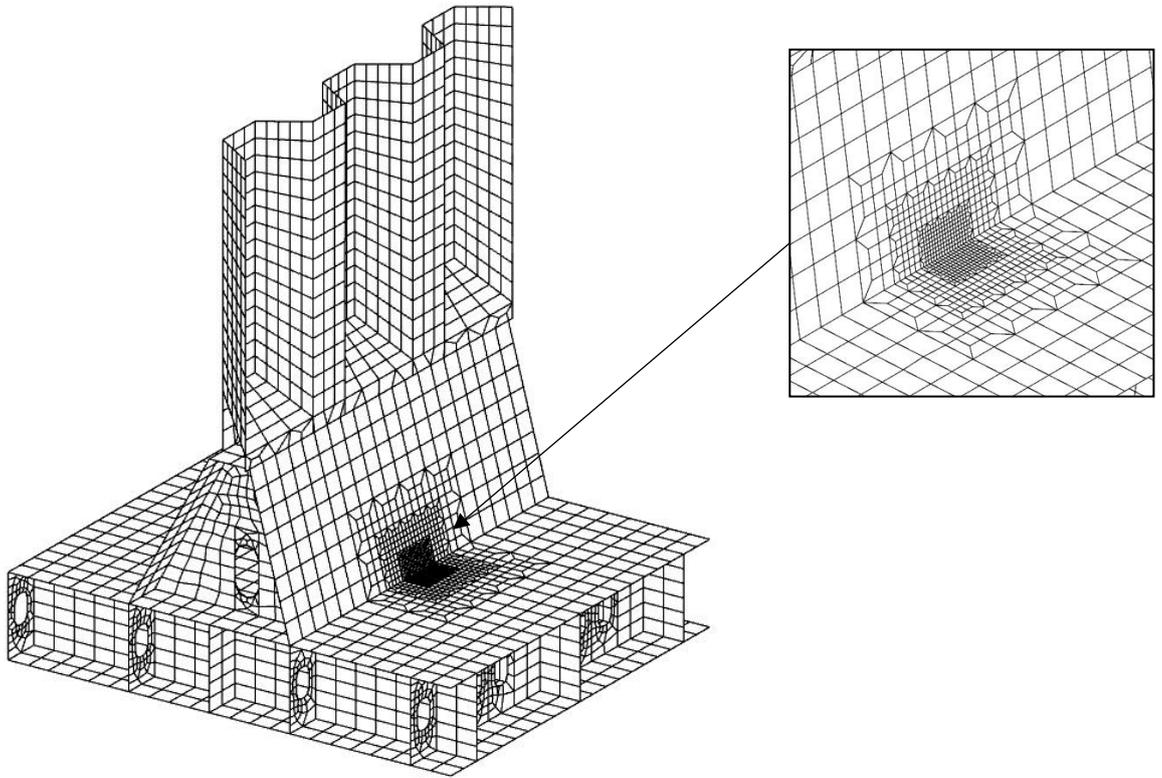


图5.6.2 内底与底凳侧板的连接处

### 5.6.3 槽型舱壁与底凳的连接

(1) 本小节的建模要求适用于槽型舱壁与底凳折角连接部位。

(2) 如使用独立的局部有限元模型，局部模型的最小范围如下：

①沿垂向，模型应覆盖从底凳底部至底凳卸货板以上2米的范围。

②沿横向，模型应延伸至左右两端最近的底凳隔板，模型端部的底凳隔板不必建模。

③沿纵向，模型向前应覆盖底凳前斜板向前一个实肋板间距，向后应覆盖底凳后斜板向

后一个实肋板间距。

(3) 底凳内部的隔板、肘板、扶强材应按照实际位置建模，隔板、肘板以及从热点起第一根纵骨（纵向、垂向、水平）都应使用壳单元精确建模，其余纵骨可使用梁单元建模。底凳与内底折角连接处的典型局部有限元模型见图5.5.3。

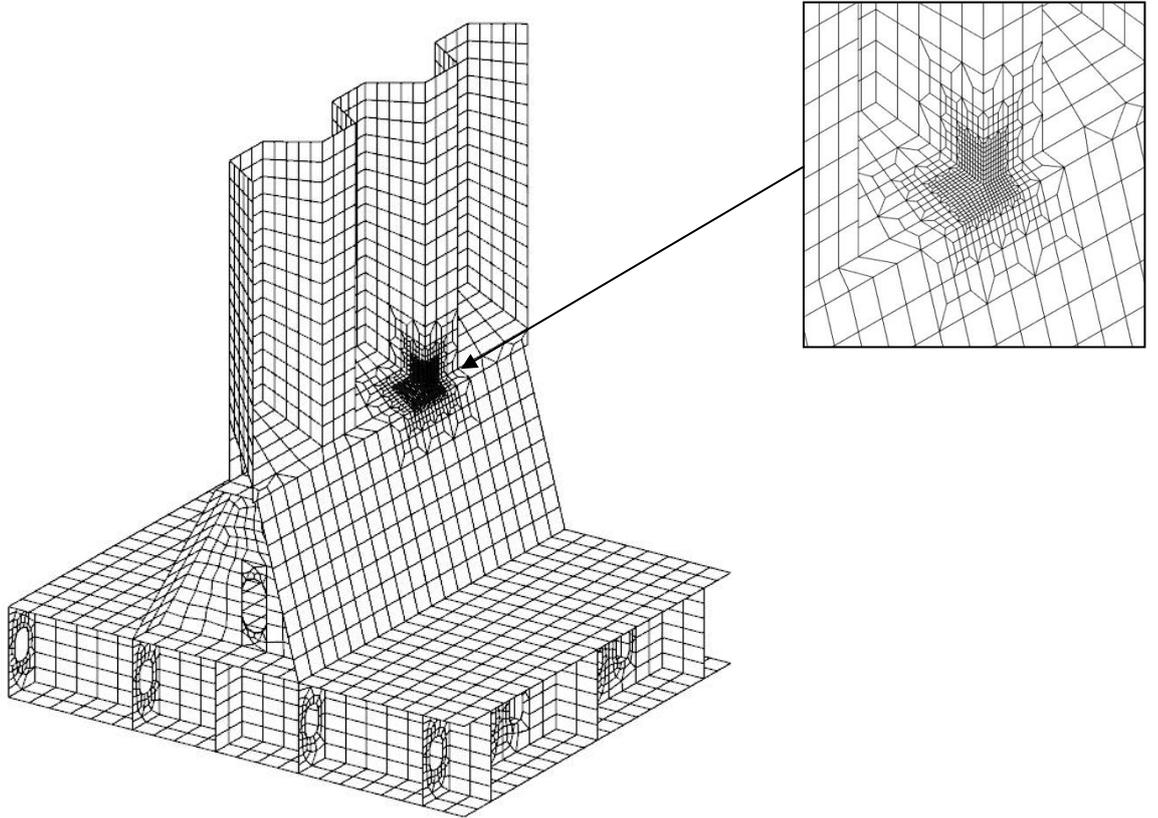


图5.6.3 槽型舱壁与底凳的连接

#### 5.6.4 舷侧肋骨肘板与底边舱斜板的连接

(1) 本小节的建模要求适用于舷侧肋骨肘板与底边舱斜板的连接。

(2) 底边舱斜板、舷侧肋骨肘板、临近骨材应使用壳单元精确建模。舷侧肋骨肘板与底边舱斜板的连接处的典型局部有限元模型见图5.6.4。

(3) 如使用独立的局部有限元模型，局部模型的最小范围如下：

- ①沿纵向，模型应覆盖两个强框架间距（即被校核的热点部位向前后各延伸一个强框架间距）。位于局部模型端部位置的强框架可不必建模。
- ②沿垂向，模型应从基线至顶边舱斜板的底部。
- ③沿横向，模型应从舷侧至临近的双层底纵桁。

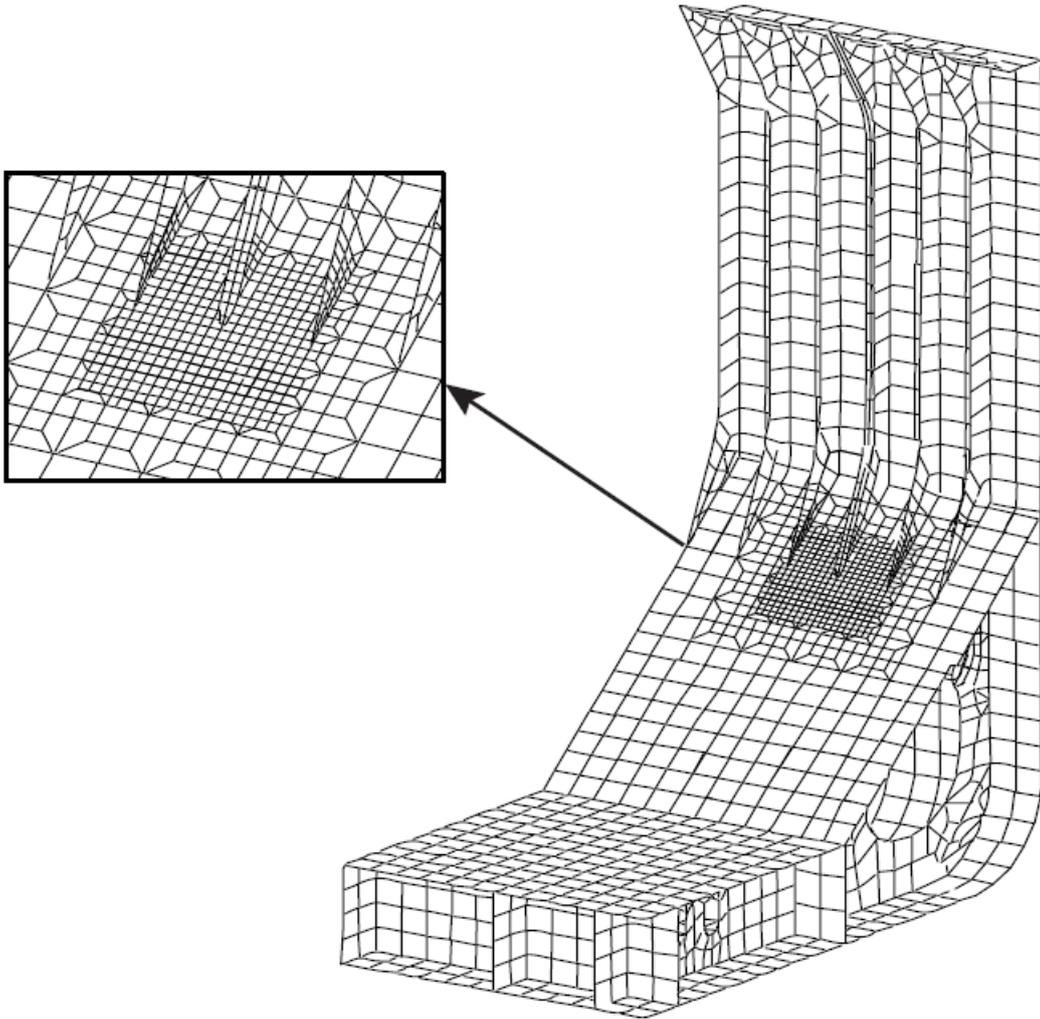


图5.6.4 舷侧肋骨肘板与底边舱斜板的连接

#### 5.6.5 舷侧肋骨肘板与顶边舱斜板/平底板的连接

- (1) 本小节的建模要求适用于舷侧肋骨肘板与顶边舱斜板/平底板的连接。
- (2) 顶边舱斜板、顶边舱平底板、舷侧肋骨肘板、临近骨材应使用壳单元精确建模。

舷侧肋骨趾端与底边舱斜板的连接处的典型局部有限元模型见图5.6.5。

- (3) 如使用独立的局部有限元模型，局部模型的最小范围如下：

- ①沿纵向，模型应覆盖两个强框架间距（即被校核的热点部位向前后各延伸一个强框架间距）。位于局部模型端部位置的强框架可不必建模。
- ②沿垂向，模型应从甲板至底边舱斜板的顶部。
- ③沿横向，模型应从舷侧至顶边舱对应的舱口围板处。

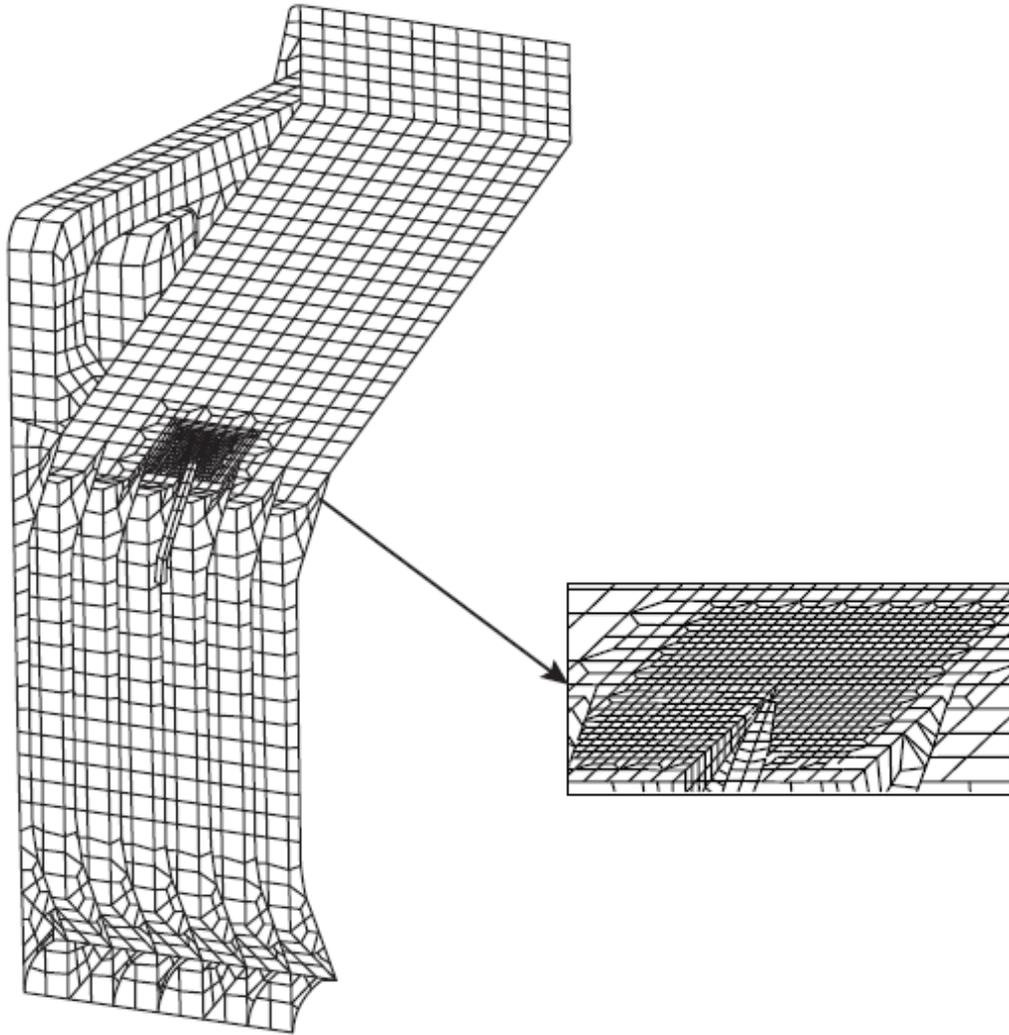


图5.6.5 舷侧肋骨肘板与顶边舱斜板/平底板的连接

#### 5.6.6 舱口围板肘板与甲板的连接处

(1) 本小节的建模要求适用于舱口围板肘板与甲板的连接处。

(2) 如使用独立的局部有限元模型，局部模型的最小范围如下：

- ①沿横向，模型应覆盖半个船宽以上。
- ②沿纵向，模型应从舱室的中心延伸至临近的货舱，应包含全宽范围内的舱口间甲板。
- ③沿垂向，模型应从围板顶端延伸至顶板舱斜板与外壳或内壳的相交处。

(3) 主要支撑构件及舱口围板撑柱应使用壳单元精确建模。舱口围板的肘板趾端与甲板的连接处典型局部有限元模型见图5.6.6。

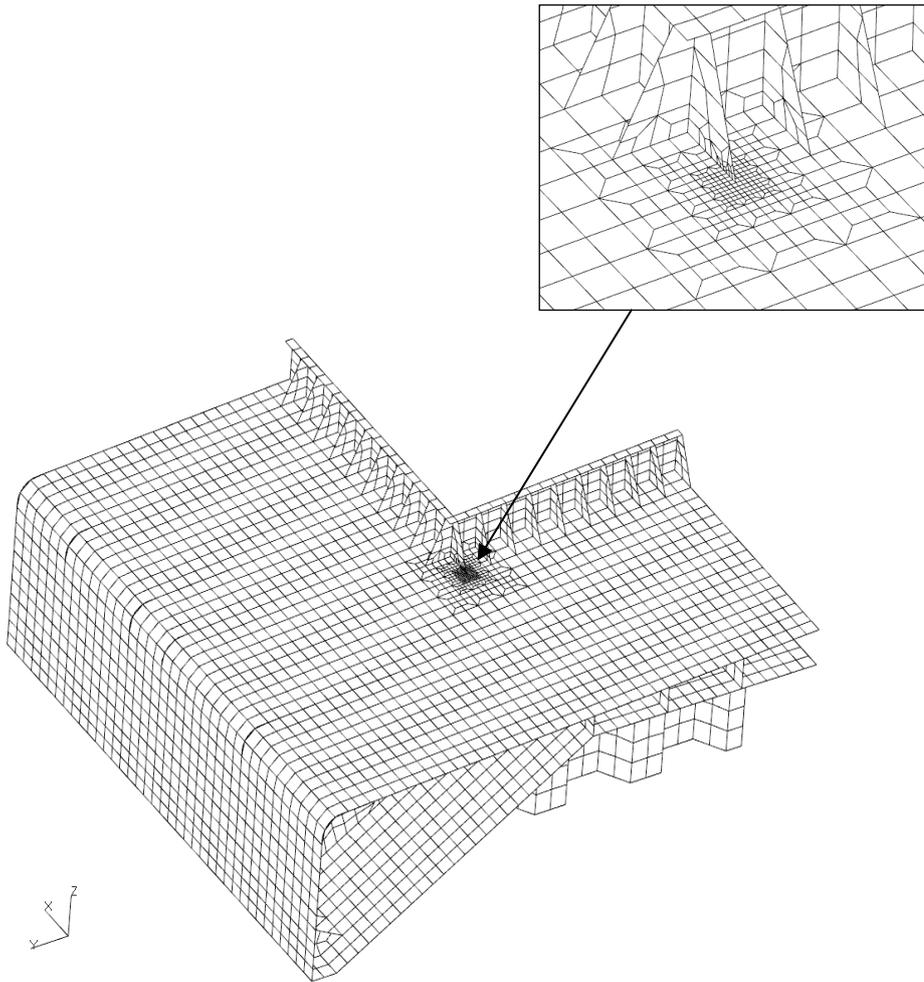


图5.6.6 舱口围板肘板与甲板的连接处细化模型

### 5.6.7 汽车运输船车辆舱内支柱与甲板/甲板强横梁/甲板纵桁的连接

- (1) 本小节的建模要求适用于车辆舱支柱与甲板/甲板强横梁/甲板纵桁的连接。
- (2) 临近连接处的车辆甲板、支柱、甲板强横梁、车辆甲板纵桁应使用壳单元精确建模。车辆甲板支柱与甲板/甲板强横梁甲板纵桁的连接图 5.6.7。
- (3) 如使用独立的局部有限元模型，局部模型的最小范围如下：
  - ①沿横向，模型应取全宽。
  - ②沿纵向，模型应从分析区域强横梁向前后各延伸一个强横梁间距。
  - ③沿垂向，模型应从分析区域向上下各延伸一个车辆甲板高度。

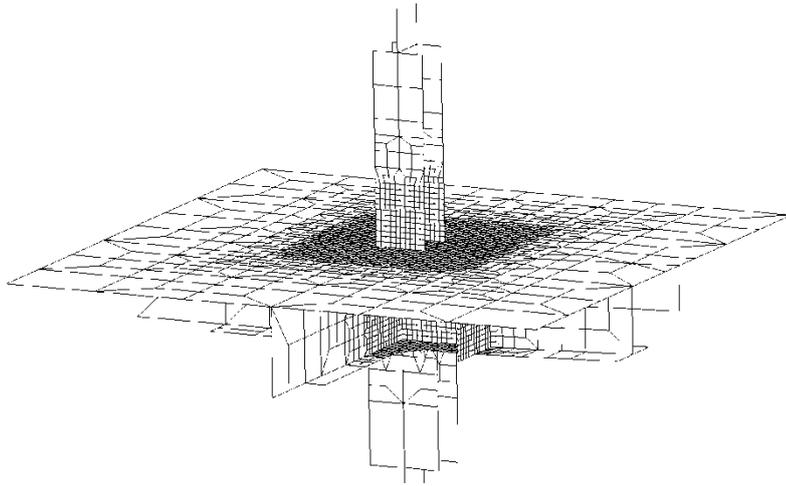


图 5.6.7 汽车运输船车辆舱内支柱与甲板/甲板强横梁/甲板纵桁的连接处细化模型

## 第 6 章 泵塔疲劳强度

### 6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于薄膜型液化天然气运输船的泵塔结构疲劳强度评估。

6.1.2 本章未作规定者应满足 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 20 章的相关要求。

6.1.3 泵塔结构疲劳强度评估一般应取货舱区靠船首的第 2 货舱作为目标舱进行晃荡载荷计算。

6.1.4 泵塔结构疲劳强度评估的流程如本章图 6.1.4 所示。

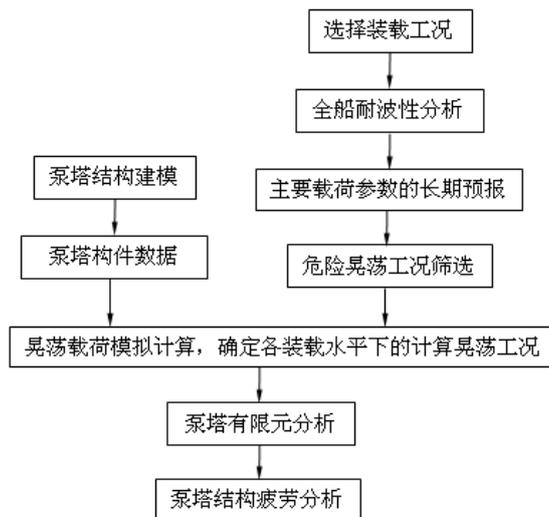


图 6.1.4 泵塔疲劳分析流程

## 6.2 装载工况和装载水平

6.2.1 应选取本章表 6.2.1 设定的两种装载工况作为用于全船耐波性分析的计算工况。对于满载工况，应用于本章 6.2.2 中大于或等于  $50\%h$  的装载水平；对于压载工况，应用于本章 6.2.2 中小于  $50\%h$  的装载水平。

耐波性分析的装载工况

表 6.2.1

序号	装载工况	吃水
1	满载工况	夏季载重线吃水
2	压载工况	压载到港吃水

6.2.2 除装载手册中所有装载水平外，还应选取  $5\%h$ ， $10\%h$ ， $70\%h$ ， $95\%h$  作为标准的计算装载水平，如有额外附加的装载水平要求，应由设计方提供详细的装载数据，并提供各装载水平下的营运时间比例。

6.2.3 若设计方未提供各装载水平下的营运时间比例，可假定为等比例分布。

## 6.3 全船耐波性分析

6.3.1 基于等效设计波法的全船耐波性分析主要用于：

- (1) 计算得到各主要载荷参数的响应放大因子 (RAO)，以确定危险晃荡工况；
- (2) 计算得到各主要载荷参数的 Weibull 形状参数，以确定疲劳应力长期分布；
- (3) 确定主要载荷参数的长期预报值，用于计算晃荡载荷。

6.3.2 等效设计波法

(1) 对于无限航区，根据现有的海浪统计资料，由短期预报组合成长期预报，计算波浪载荷的长期分布规律，从中截取一定超越概率水平的极值。

(2) 对于特定航区，可采用短期预报极值的方法，即在给定的概率水平下，取得相对应波高最高的海况，从而求得短期预报极值。

(3) 对于疲劳分析而言，波浪长期预报极值的概率水平为  $10^{-4}$ 。

6.3.3 主要载荷参数

- (1) 对于横向运动，取横摇运动（即横摇角）和横向加速度；
- (2) 对于纵向运动，取纵摇运动（即纵摇角）和纵向加速度。

6.3.4 环境数据

(1) 对于无限航区，采用的北大西洋波浪数据是 IACS Rec.No34 的波浪散布图，推荐采用两参数的 Bretschneider 谱函数；

(2) 对于特定航行，一般采用该航海区域的特定波浪散布图，波浪谱采用 JONSWAP 谱函数。

## 6.4 晃荡工况

### 6.4.1 一般规定

晃荡工况基于不同的浪向角和波浪遭遇频率，每个装载水平都包括一组危险晃荡工况，并可刷选出该装载水平下的最危险晃荡工况。

### 6.4.2 危险晃荡工况的确定

(1) 确定危险晃荡工况时，应满足以下三个原则：

- ①保证 RAO 处于最大值附近；
- ②晃荡运动周期和波浪遭遇周期一致；
- ③浪向角处于影响最大的范围。

(2) 根据以上原则，危险晃荡工况需要满足的条件见本章表 6.4.2 所示。

确定危险晃荡工况的条件

表 6.4.2

运动	条件表达式	说明
横向运动	$ T_y - T_e  < 0.3T_y$	$T_y$ 和 $T_e$ 分别为液舱横向运动固有周期和波浪遭遇周期
	$RAO(\beta, \omega) > 0.7 \max [RAO(\beta, \omega)]$	RAO 与主载荷参数相对应
	$60^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$	考虑前正横浪
纵向运动	$ T_x - T_e  < 0.3T_x$	$T_x$ 和 $T_e$ 分别为液舱纵向运动固有周期和波浪遭遇周期
	$RAO(\beta, \omega) > 0.7 \max [RAO(\beta, \omega)]$	RAO 与主载荷参数相对应
	$0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$	考虑迎浪

### 6.4.3 计算晃荡工况

(1) 根据各装载水平的晃荡运动时间历程，分别以泵塔总合力在正向最大和反向最大时刻为选取条件，得到各装载水平下的最危险晃荡工况。

(2) 泵塔疲劳分析的计算工况应基于各装载水平下的最危险晃荡工况。

## 6.5 泵塔结构有限元分析

### 6.5.1 结构建模

泵塔结构有限元结构模型及边界条件应按《钢质海船入级规范》第 2 篇第 20 章附录 2，

5.5 的相关要求进行。

### 6.5.2 疲劳载荷

#### (1) 晃荡载荷

泵塔中心处随垂直方向变化的流体运动速度和加速度采用晃荡运动直接计算得到, 流体

晃荡运动产生对泵塔的作用力, 即 Morison 力  $\vec{F}_M$  计算如下:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2} \rho C_d \vec{U}(z) \left| \vec{U}(z) \right| D + \frac{\pi}{4} \rho C_m \vec{a}(z) D^2 \quad \text{N/m}$$

式中:  $\rho$ ——流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$U(z)$ ——垂向高度有关的在泵塔管中心线上的法向流体速度,  $\text{m/s}$ ;

$a(z)$ ——与垂向高度有关的在泵塔管中心线上的流体加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$D$ ——泵塔构件横向剖面直径,  $\text{m}$ ;

$C_d$ ——Morison 拖曳力系数, 一般取为 1.2;

$C_m$ ——Morison 的惯性系数, 一般取为 2.0。

在加载时, 考虑到 Morison 力沿构件长度方向和垂直方向的变化, 作用在泵塔某一长度

为  $l$  的结构构件上 Morison 合力  $\vec{F}_l$  计算如下:

$$\vec{F}_l = \int_0^l \left[ \frac{1}{2} \rho C_d \vec{U}(z) \left| \vec{U}(z) \right| D + \frac{\pi}{4} \rho C_m \vec{a}(z) D^2 \right] dl \quad \text{N}$$

#### (2) 惯性力

在有限元模型中应考虑船舶运动和重力作用的影响, 泵塔的惯性加速度为:

$$\begin{cases} a_x = \ddot{\xi}_1 - (y_C - y_G) \ddot{\theta}_3 + (z_C - z_G) \ddot{\theta}_2 - g \theta_2 \\ a_y = \ddot{\xi}_2 + (x_C - x_G) \ddot{\theta}_3 - (z_C - z_G) \ddot{\theta}_1 + g \theta_1 \\ a_z = \ddot{\xi}_3 - (x_C - x_G) \ddot{\theta}_2 + (y_C - y_G) \ddot{\theta}_1 - g \end{cases}$$

式中:  $a_x$ 、 $a_y$  和  $a_z$ ——泵塔在 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向的惯性加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$x_C$ 、 $y_C$  和  $z_C$ ——计算点的三维坐标,  $\text{m}$ ;

$x_G$ 、 $y_G$  和  $z_G$ ——船舶重心的三维坐标,  $\text{m}$ 。

### 6.5.3 有限元分析

每个计算晃荡工况对应正向和反向两组晃荡载荷, 将两组载荷分别加载在泵塔结构有限元模型上, 同时叠加同方向的惯性载荷作用, 通过静力分析计算可获取泵塔管节点各杆件截面上的名义应力。

## 6.6 疲劳分析

6.6.1 薄膜型液化天然气运输船的泵塔设计疲劳寿命应不低于 20 年。

6.6.2 需校核泵塔结构中各类管节点（或管接头）的疲劳强度。典型管接头包括粗管和细管，其中粗管为主管或弦杆（Chord），细管为撑杆（Brace，包括水平撑杆和斜撑杆）。

### 6.6.3 管节点热点应力

求出名义应力后，可根据应力集中系数计算管节点的热点应力。对于每一个校核截面，选择 8 个位置进行热点应力计算，如本章图 6.6.3 所示。

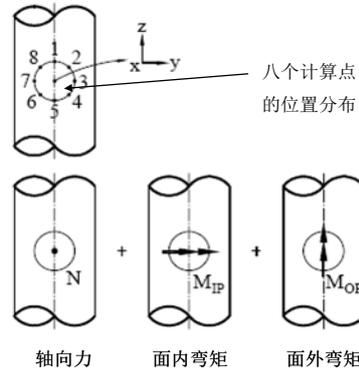


图 6.6.3 热点应力计算点分布

上述 8 个计算点的热点应力合成可由下列各式计算得到：

$$\sigma_1 = SCF_A \sigma_x - SCF_I \sigma_{my}$$

$$\sigma_2 = SCF_A \sigma_x - \frac{1}{2} \sqrt{2} SCF_I \sigma_{my} + \frac{1}{2} \sqrt{2} SCF_O \sigma_{mz}$$

$$\sigma_3 = SCF_A \sigma_x + SCF_O \sigma_{mz}$$

$$\sigma_4 = SCF_A \sigma_x + \frac{1}{2} \sqrt{2} SCF_I \sigma_{my} + \frac{1}{2} \sqrt{2} SCF_O \sigma_{mz}$$

$$\sigma_5 = SCF_A \sigma_x + SCF_I \sigma_{my}$$

$$\sigma_6 = SCF_A \sigma_x + \frac{1}{2} \sqrt{2} SCF_I \sigma_{my} - \frac{1}{2} \sqrt{2} SCF_O \sigma_{mz}$$

$$\sigma_7 = SCF_A \sigma_x - SCF_O \sigma_{mz}$$

$$\sigma_8 = SCF_A \sigma_x - \frac{1}{2} \sqrt{2} SCF_I \sigma_{my} - \frac{1}{2} \sqrt{2} SCF_O \sigma_{mz}$$

式中： $SCF_A$ 、 $SCF_I$ 、 $SCF_O$ ——管节点应力集中系数，按本章表 6.6.5 选取；

$\sigma_x$ 、 $\sigma_{my}$ 、 $\sigma_{mz}$ ——各圆管单元上的名义轴向应力、名义面内弯曲应力、名义面外弯曲应力， $N/mm^2$ 。

### 6.6.4 设计应力范围

(1) 管节点热点应力范围应按下列式计算：

$$S_{h,i(k)} = \left| \sigma_{i(k)} - \sigma'_{i(k)} \right| \quad \text{N/mm}^2$$

式中： $\sigma_{i(k)}$ ——计算晃荡工况“(k)”下正向晃荡载荷作用下第  $i$  点的热点应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\sigma'_{i(k)}$ ——计算晃荡工况“(k)”下反向晃荡载荷作用下第  $i$  点的热点应力， $\text{N/mm}^2$ 。

(2) 计算晃荡工况“(k)”下的设计应力范围  $S_{D(k)}$  应按下列式计算：

$$S_{D(k)} = \max(S_{h,i(k)}) \quad \text{N/mm}^2$$

### 6.6.5 管节点应力集中系数

采用本章表 6.6.5 所示的参数方程计算管节点的应力集中系数  $SCF$ 。

管节点应力集中系数公式

表 6.6.5

管节点形式		$\alpha$	轴向载荷 $SCF_A$	面内弯矩 $SCF_t$	面外弯矩 $SCF_o$
主管或弦杆 $SCF_{\text{chord}}$	K	1.0	$\alpha A$	2/3A	3/2A
	T&Y	1.7			
撑杆 $SCF_{\text{brace}}$			$1.0 + 0.375(1 + \sqrt{\eta/\mu} \cdot SCF_{\text{chord}}) \geq 1.8$		

表中： $A = 1.8\sqrt{\gamma\eta} \sin\theta$ 。

### 6.6.6 泵塔管节点疲劳损伤度

(1) 泵塔管节点在计算晃荡工况“(k)”下的累积损伤度应按下列式计算：

$$D_k = \frac{N_D \alpha_k}{K} \frac{S_{D(k)}^m}{(\ln N_L)^{m/\xi_k}} \mu_k \Gamma \left( 1 + \frac{m}{\xi_k} \right)$$

式中： $\alpha_k$ ——装载工况“(k)”的时间分配系数，见本章 6.2.2 及 6.2.3；

$S_{D(k)}$ ——设计应力范围，见 6.6.4 (2)；

$N_L$ ——载荷谱回复周期的循环次数，取为  $10^4$ ；

$K$ ——S-N 曲线参数，取为  $10^{12.146}$ ；

$\xi_k$ ——计算晃荡工况“(k)”的 Weibull 形状参数，由本章 6.3 计算得到；

$$\mu_k = 1.0 - \frac{\gamma \left( 1 + \frac{m}{\xi_k}, \nu_k \right) - \nu_k^{-\frac{\nabla m}{\xi_k}} \gamma \left( 1 + \frac{m + \nabla m}{\xi_k}, \nu_k \right)}{\Gamma \left( 1 + \frac{m}{\xi_k} \right)}$$

$$v_k = \left( \frac{S_q}{S_{D(k)}} \right)^{\xi_k} \ln N_L$$

$S_q$ ——S-N 曲线二线段的交点处的应力幅值,  $S_q = 52.63$  MPa, 当板厚大于 25mm 时,

需对  $S_q$  进行修正:

$$S_q = 52.63 / \left( \frac{t}{25} \right)^n \text{ MPa}$$

$n$ ——修正系数, 当  $SCF \leq 10$  时,  $n = 0.25$ ; 当  $SCF > 10$  时,  $n = 0.3$ ;  
其他符号见本指南第 3 章 3.5.1。

(2) 泵塔管节点的总累积损伤度应按下列式计算:

$$D = \sum D_k$$

式中:  $D_k$ ——泵塔管节点在各计算晃荡工况下的累积损伤度, 见 (1)。

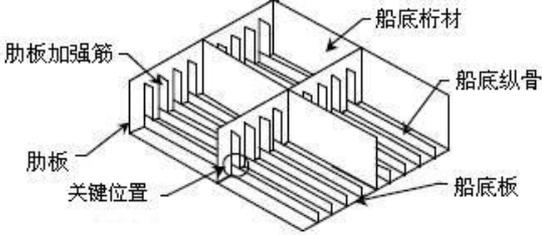
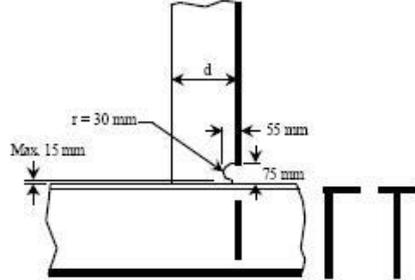
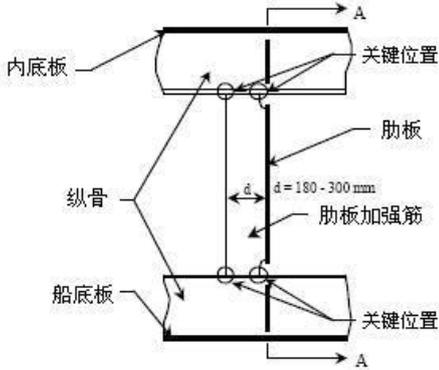
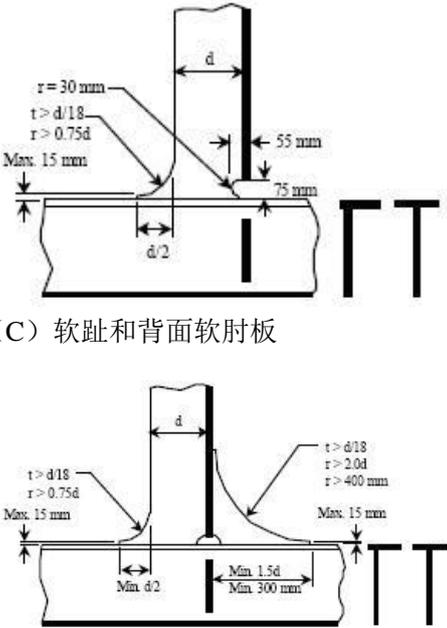
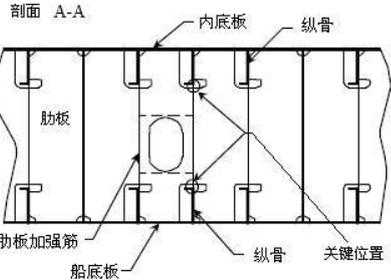
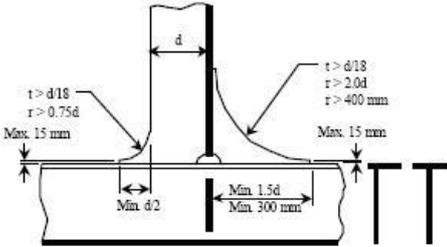
#### 6.6.7 疲劳寿命计算

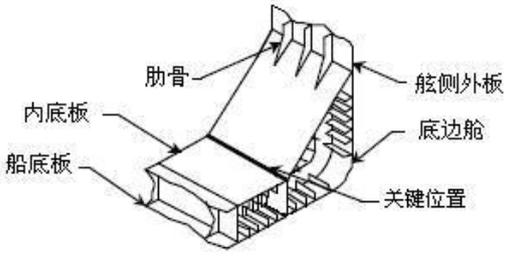
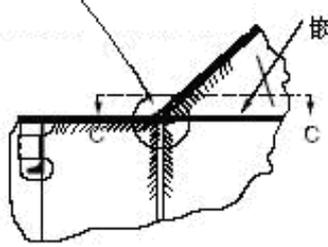
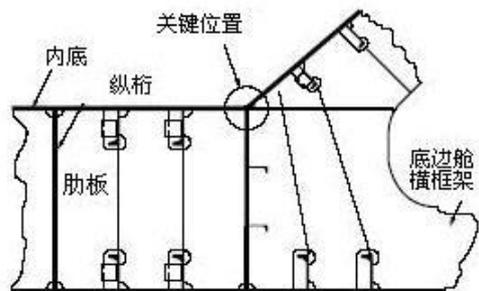
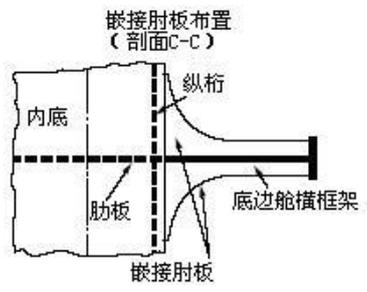
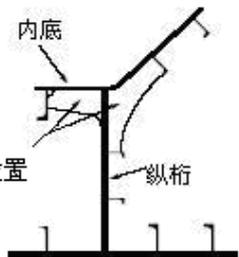
泵塔管节点疲劳寿命应按下列式计算:

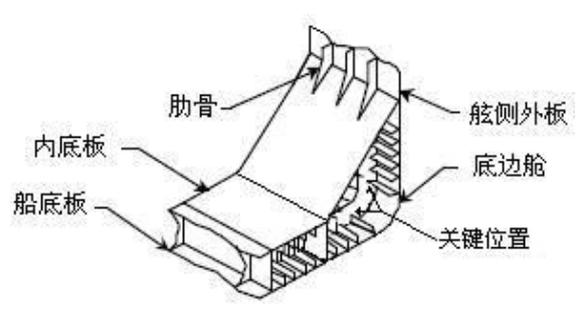
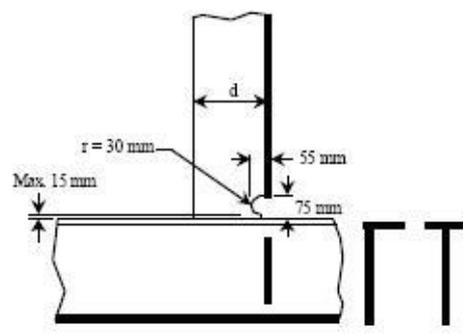
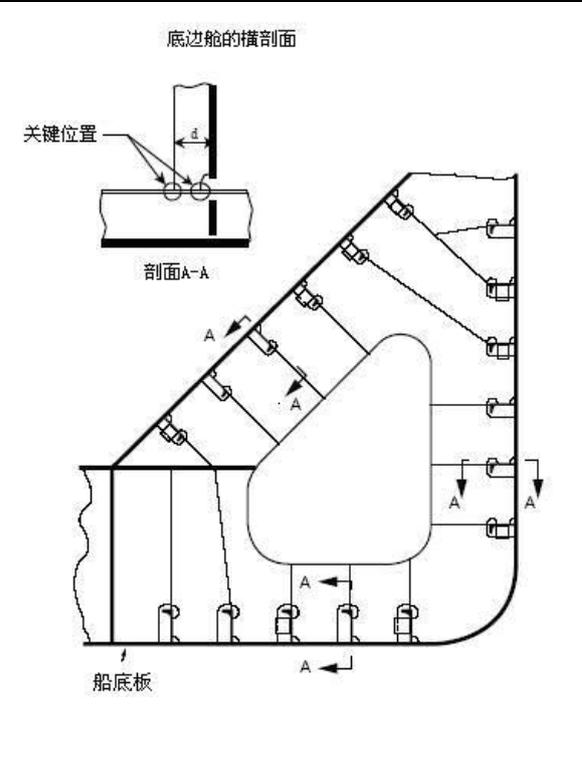
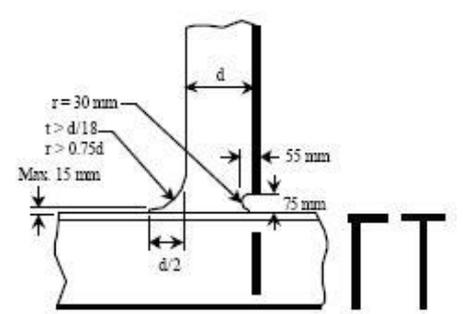
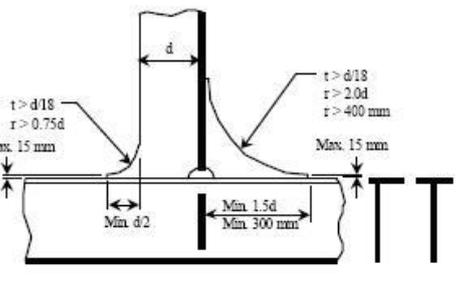
$$T_F = \frac{20}{D}$$

式中:  $D$ ——泵塔管节点的总累积损伤度, 见本章 6.6.6 (2)。

# 附录 散货船、油船和集装箱船的船体结构节点

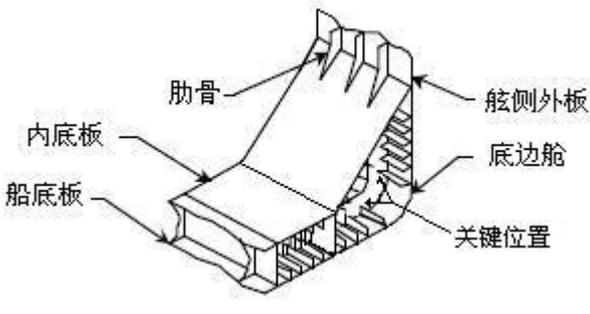
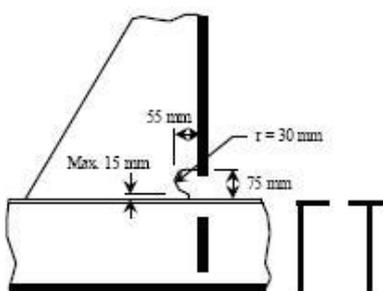
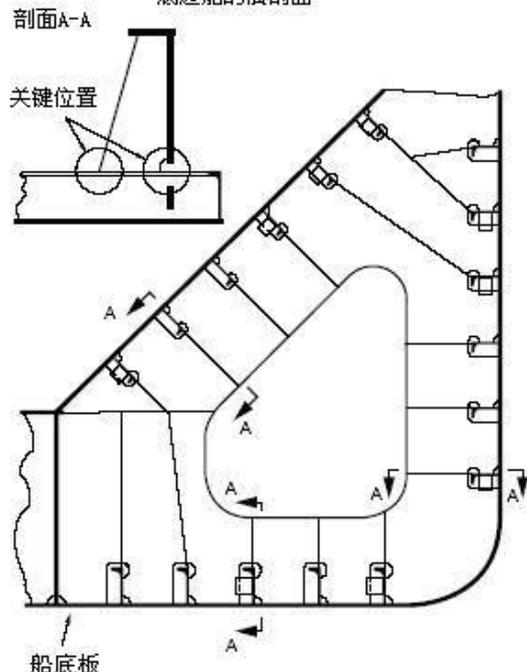
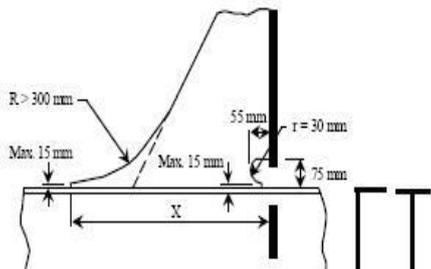
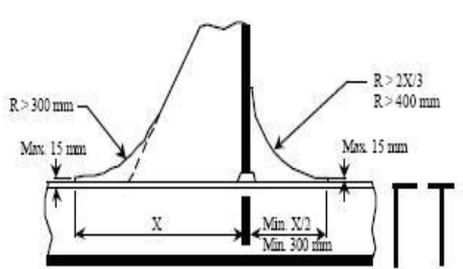
散货船结构节点		表 1
区域：双层底 关键位置：内底和船底纵骨与肋板垂直加强筋的连接		
关键区域		结构节点
		(A) 软踵 
关键位置		
		(B) 软趾和软踵 
		(C) 软趾和背面软肘板 
结构节点	适用结构	说明
	与顶边舱相互连通的双层底内的非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	与顶边舱相互连通的双层底内的对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	不与顶边舱相互连通的双层底内的非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
不与顶边舱相互连通的双层底内的对称纵骨。	所有纵骨应设有 (A) 软踵。	
建造公差	确保纵骨腹板与肋板加强筋以及背面软肘板（如设有）之间的良好对中。见《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离加强筋和背面软肘板的踵部和趾端； 加强筋以及背面软肘板的踵部和趾端与纵骨连接处应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

散货船结构节点		表 2
区域：底边舱 关键位置：底边舱斜板与内底板折角处的连接		
关键区域	结构节点	
	无扇形孔，全焊透焊缝，不小于1个骨材间距 	
关键位置		
	 	
结构节点	适用结构	说明
	压载舱	深熔焊缝：没有扇形孔或具有补板的封闭扇形孔；嵌接肘板；底边舱、顶边舱、桁材的连接焊缝。 全焊透焊缝：肋板/底边舱横向强框架和内底板/斜板/桁材之间的焊缝。 中间肘板：肋板间距大于 2.5m 时，设置中间肘板。
	干舱	深熔焊缝：封闭扇形孔或嵌接肘板；底边舱、顶边舱、桁材的连接焊缝。 全焊透焊缝：肋板/底边舱横向强框架和内底板/斜板/桁材之间的焊缝。
	肋板间距大于 3.0m	应进行热点应力疲劳评估。
建造公差	确保双层底肋板和底边舱横框架之间以及底边舱斜板和旁桁材之间的良好对中。最大偏差应不大于 $t/3$ ，式中 $t$ 为对中板的薄者，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接顺序要避免层状撕裂的产生；压载舱两侧完工焊缝应平顺过渡到内底板；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

散货船结构节点		表 3
区域：底边舱 关键位置：横框架上的加强筋与底边舱斜板纵骨、船底纵骨和舷侧纵骨的连接		
关键区域	结构节点	
	(A) 软踵 	
关键位置		
	(B) 软趾和软踵 	
	(C) 软趾和背面软肘板 	
结构节点	适用结构	说明
	与顶边舱相互连通的双层底内的非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	与顶边舱相互连通的双层底内的对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	不与顶边舱相互连通的双层底内的非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	不与顶边舱相互连通的双层底内的对称纵骨。	所有纵骨应设有 (A) 软踵。
建造公差	确保纵骨腹板和横框架加强筋以及背面肘板 (如设有) 之间的良好对中。可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离踵部和趾端；加强筋以及背面肘板的踵部和趾端与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	
散货船结构节点		表 4

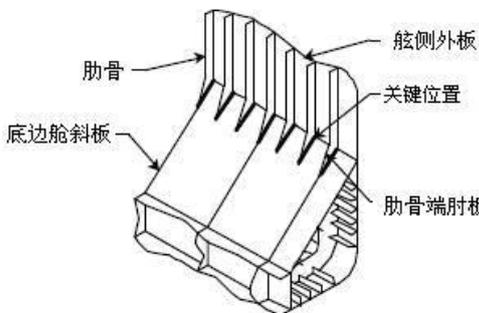
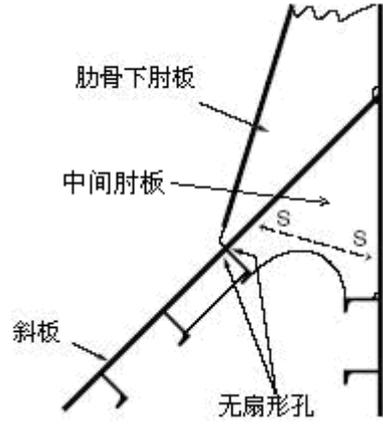
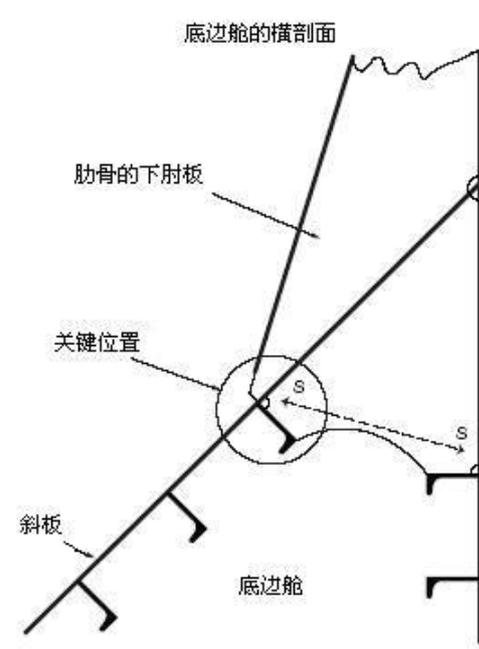
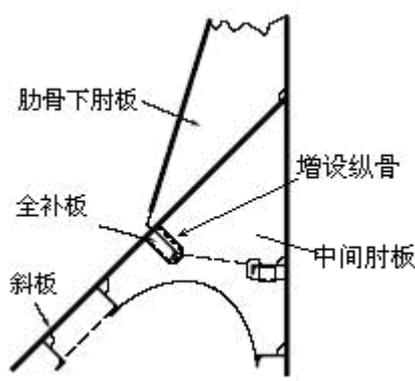
区域：底边舱

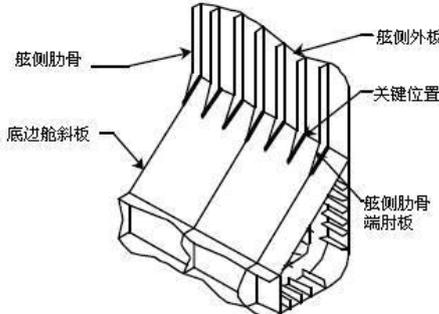
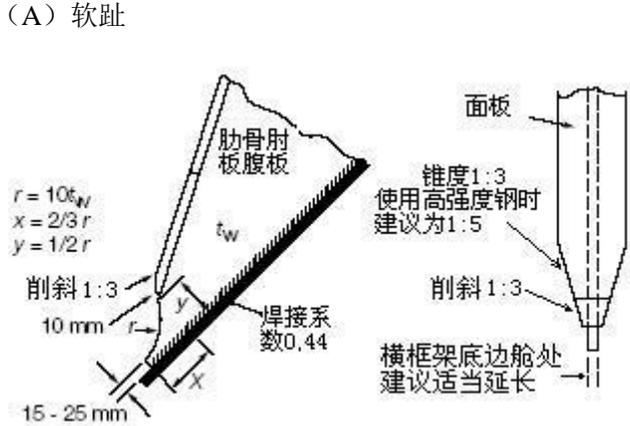
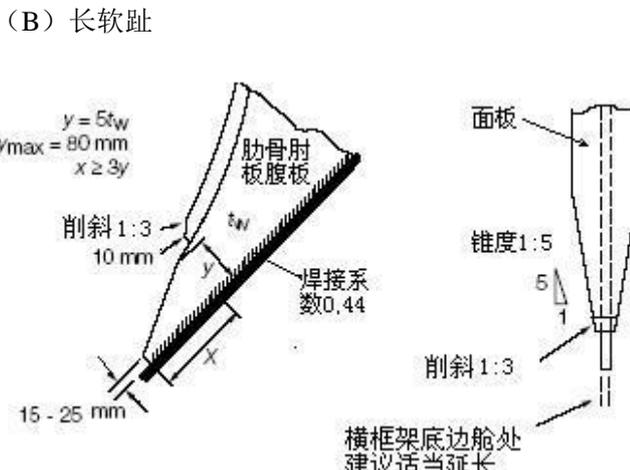
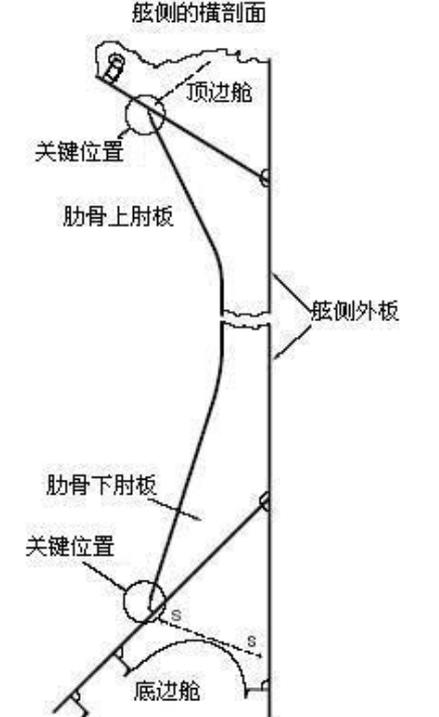
关键位置：横框架上的防倾肘板与底边舱斜板纵骨、船底纵骨和舷侧纵骨的连接

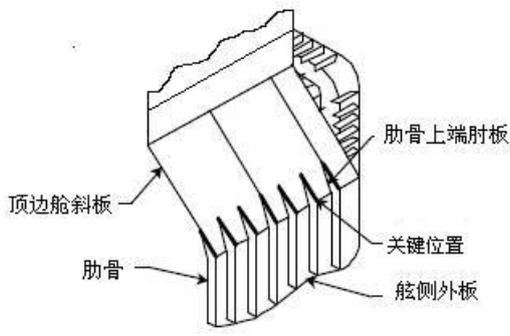
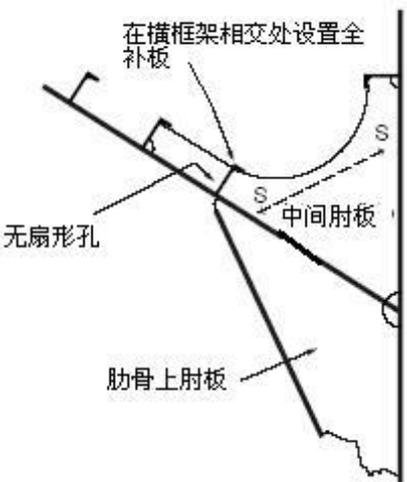
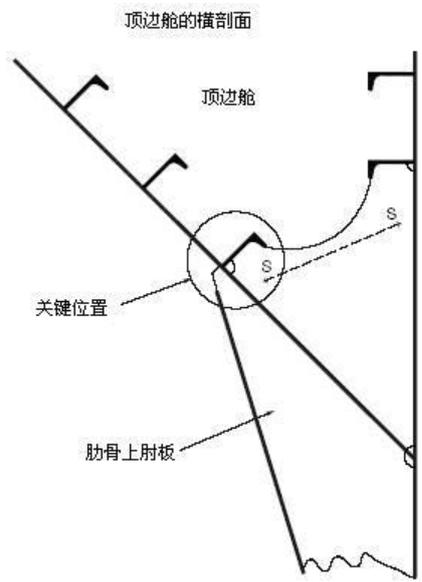
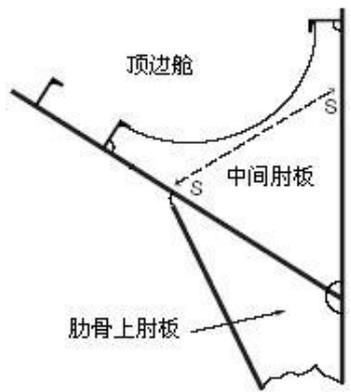
关键区域		结构节点
 <p>肋骨 内底板 船底板 舷侧外板 底边舱 关键位置</p>		<p>(A) 软踵</p> 
关键位置		
<p>底边舱的横剖面</p> <p>剖面A-A</p> <p>关键位置</p>  <p>船底板</p>		<p>(B) 软趾和软踵</p>  <p>(C) 软趾和背面软肘板</p> 
结构节点	适用结构	说明
	与顶边舱相互连通的双层底内的非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	与顶边舱相互连通的双层底内的对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	不与顶边舱相互连通的双层底内的非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	不与顶边舱相互连通的双层底内的对称纵骨。	所有纵骨应设有 (A) 软踵。
建造公差	确保纵骨腹板和横框架防倾肘板以及背面肘板（如设有）之间的好对中。可参照《钢质海船入级规范》第9篇第12章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离踵部和趾端；防倾肘板以及背面肘板的踵部和趾端与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。	

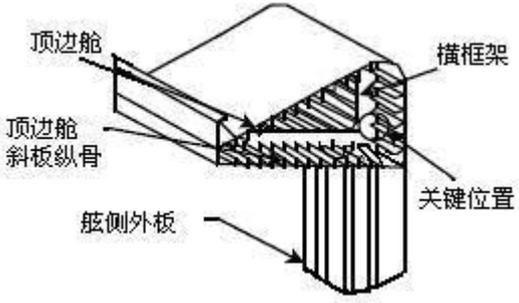
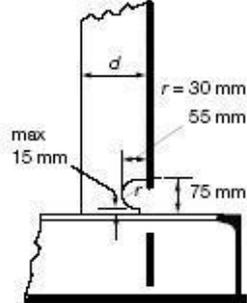
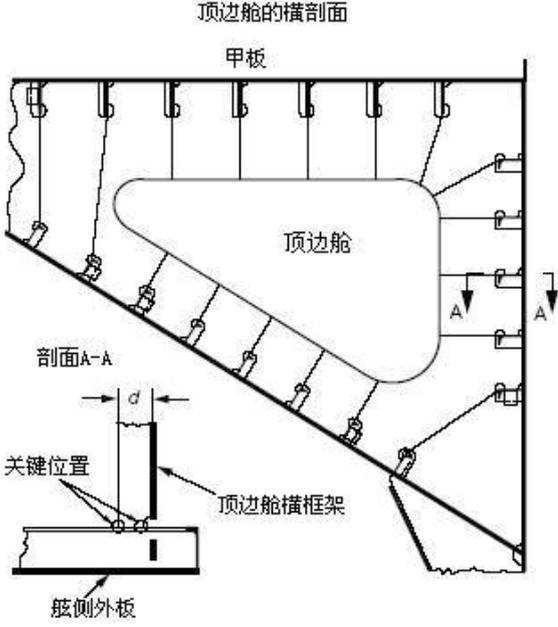
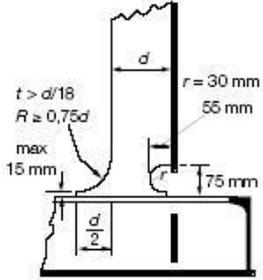
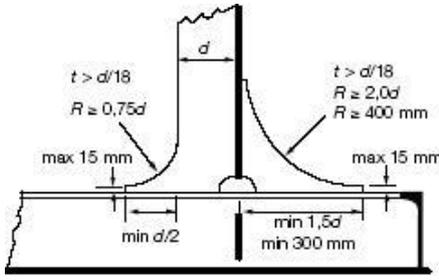
区域：底边舱

关键位置：货舱舷侧肋骨下肘板之下的底边舱内上部中间肘板

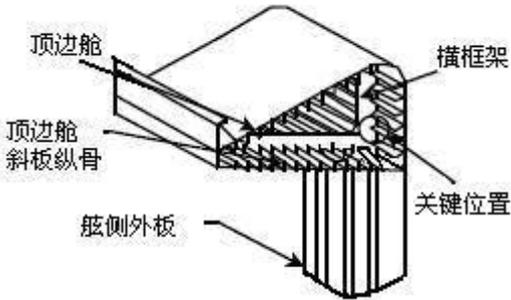
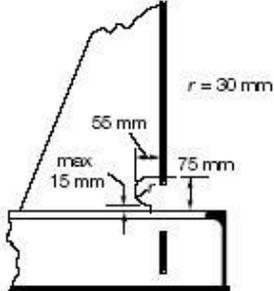
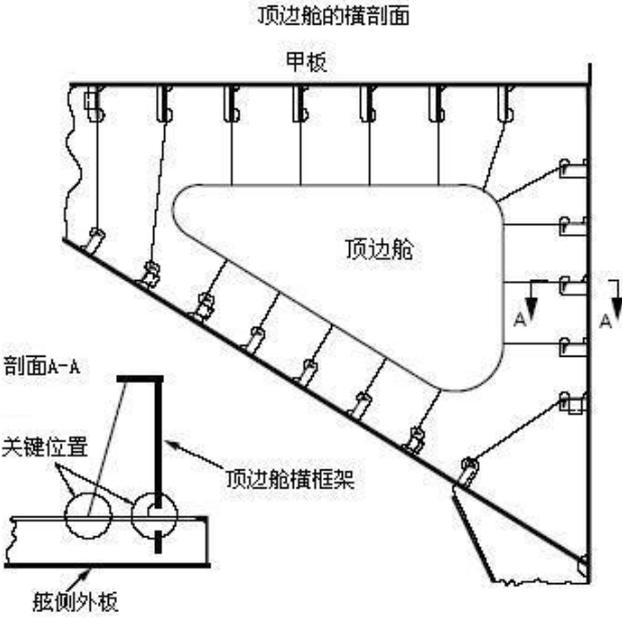
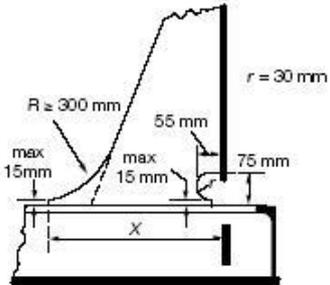
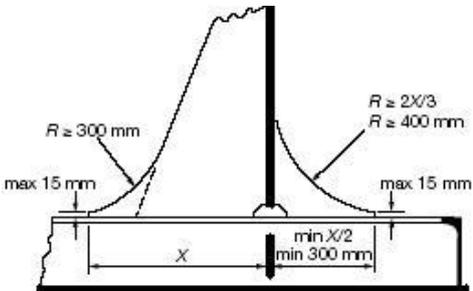
关键区域		结构节点
 <p>肋骨 舷侧外板 关键位置 底边舱斜板 肋骨端肘板</p>		<p>(A) 肋骨下肘板趾端设有纵骨</p>  <p>肋骨下肘板 中间肘板 斜板 无扇形孔</p>
<p>关键位置</p> <p>底边舱的横剖面</p>  <p>肋骨的下肘板 关键位置 斜板 底边舱</p>		<p>(B) 肋骨下肘板趾端不设纵骨</p>  <p>肋骨下肘板 全补板 斜板 增设纵骨 中间肘板</p>
结构节点	适用结构	说明
	舷侧肋骨下肘板之下底边舱斜板上部的中间肘板的连接。	如果肋骨下肘板不在底边舱横框架正上方，应设置支撑作用的中部肘板。如果底边舱斜板纵骨位于肋骨下肘板趾端部之下，设计中应保证避免开口或采用全补板封闭。
建造公差	确保肋骨下肘板和中间肘板之间的良好对中。最大偏差应不大于 $t/3$ ，式中 $t$ 为对中板的薄者，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	<p>焊接的引弧点和熄弧点要远离支撑肘板内没有支持的边缘角隅；</p> <p>肋骨下肘板的端部要进行填角包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>最后使用相同材料和相同厚度的全补板进行全熔透焊接来封闭纵骨过焊孔；</p> <p>其它要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

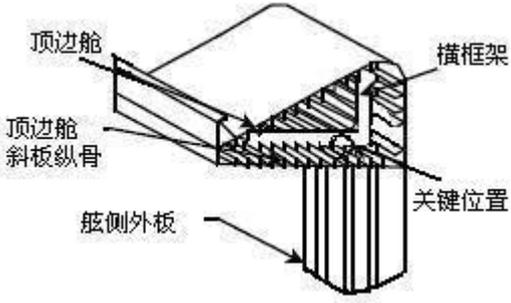
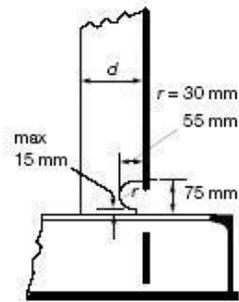
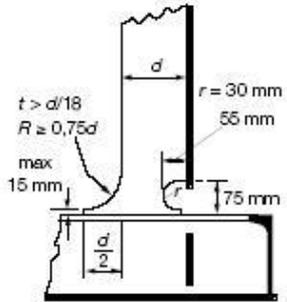
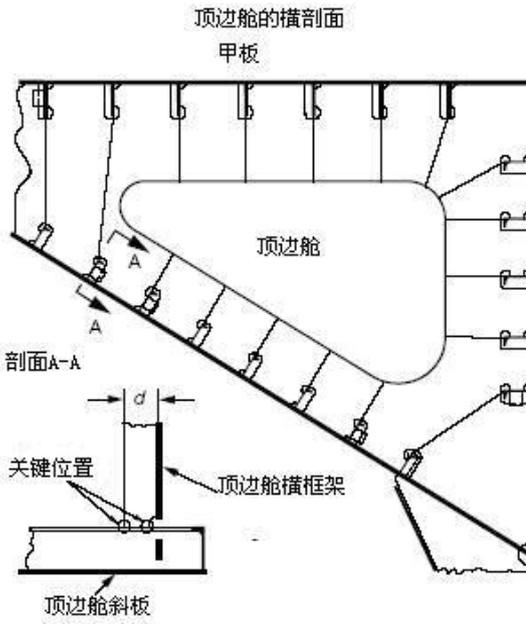
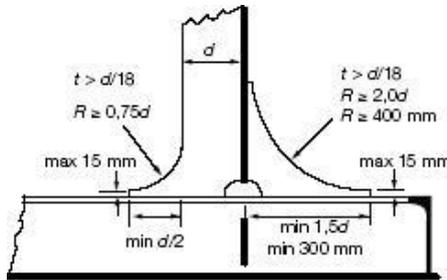
散货船结构节点		表 6
区域：货舱肋骨 关键位置：舷侧肋骨与底边舱、顶边舱斜板的连接		
关键区域	结构节点	
	(A) 软趾 	
关键位置	(B) 长软趾 	
	注： 对于面板厚度小于 25mm 的情况，可适当增加锥度。	
结构节点	适用结构	说明
	舷侧肋骨下端肘板与底边舱斜板连接的趾端。 舷侧肋骨上端肘板与顶边舱斜板连接的趾端。	应设有软趾或长软趾，并保证使用足够长的焊脚长度，以允许充分削斜到肋骨端肘板的趾端。
建造公差	确保舷侧肋骨上下肘板和横框架或中间肘板之间的良好对中。最大偏差应不大于 $t/3$ ，式中 $t$ 为对中板的薄者，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	肋骨和肘板用连续填角焊缝与舷侧板，底边舱、顶边舱斜板连接，其中焊喉厚度为： 在 a 区为 $0.44t$ 在 b 区为 $0.40t$ 其中 $t$ 为两个连接构件中的最小厚度； 焊接的引弧点和熄弧点要远离肋骨肘板趾端；端肘板趾端与斜板连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷。	

散货船结构节点		表 7
区域： 顶边舱 关键位置： 顶边舱内下部中间肘板		
关键区域		结构节点
		(A) 舷侧肋骨肘板趾端设有纵骨 
关键位置		
		(B) 舷侧肋骨肘板趾端不设纵骨 
结构节点	适用结构	说明
	货舱舷侧肋骨上肘板之上的顶边舱内下部中间肘板。	如果肋骨上肘板不在顶边舱框架正下方，应设置支撑作用的中间肘板。如果顶边舱斜板纵骨位于舷侧肋骨上肘板端部正上方，应避免开口或使用全补板封闭。
建造公差	确保舷侧肋骨上肘板和中间肘板之间的良好对中。最大偏差应不大于 $t/3$ ，式中 $t$ 为对中板的薄者，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离中间肘板内没有支持的边缘角隅； 肋骨上肘板的端部要进行填角包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 最后使用相同材料和相同厚度的补板进行全熔透焊接来封闭开孔（如有）； 其它要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

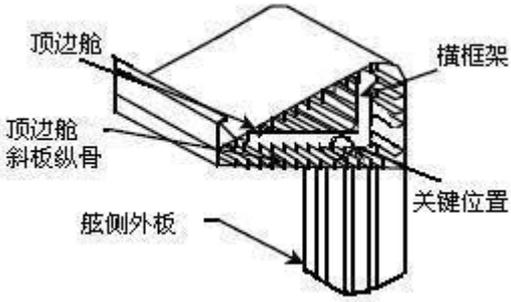
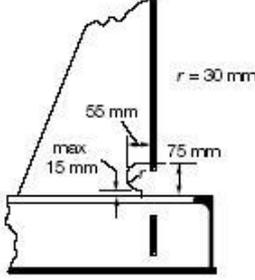
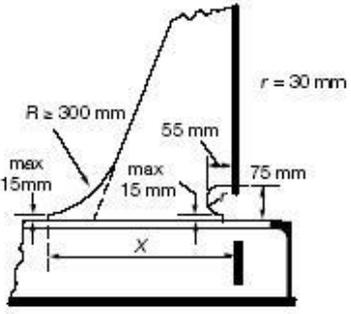
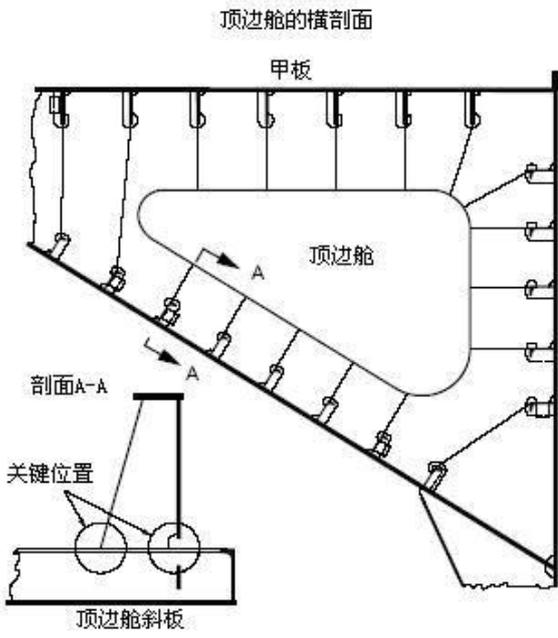
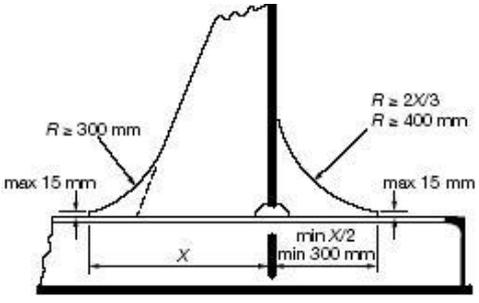
散货船结构节点		表 8
区域：顶边舱 关键位置：横框架上加强筋与舷侧纵骨的连接		
关键区域		结构节点
		(A) 软踵 
关键位置		
		(B) 软趾和软踵 
		(C) 软趾和背面软肘板 
结构节点	适用结构	说明
	对于高强度钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	对于高强度钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	对于普通钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	对于普通钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (A) 软踵。
建造公差	确保纵骨腹板和顶边框架加强筋以及背面肘板（如设有）之间的良好对中。可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离踵部和趾端； 扶强材以及背面软肘板的趾端和踵部与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

区域：顶边舱  
 关键位置：横框架上防倾肘板与舷侧纵骨的连接

关键区域	结构节点	
	<p>(A) 软踵</p> 	
<p>关键位置</p>		
	<p>(B) 软趾和软踵</p>  <p>(C) 软趾和背面软肘板</p> 	
<p>结构节点</p>	<p>适用结构</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>对于高强度钢非对称纵骨。</li> <li>对于高强度钢对称纵骨。</li> <li>对于普通钢非对称纵骨。</li> <li>对于普通钢对称纵骨。</li> </ul>	<p>说明</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。</li> <li>所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。</li> <li>所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。</li> <li>所有纵骨应设有 (A) 软踵。</li> </ul>
<p>建造公差</p>	<p>确保纵骨腹板和顶边横框架防倾肘板以及背面软肘板（如设有）之间的良好对中。可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。</p>	
<p>焊接要求</p>	<p>焊接的起弧点和熄弧点要远离踵部和趾端；防倾肘板和背面软肘板的趾端和踵部与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

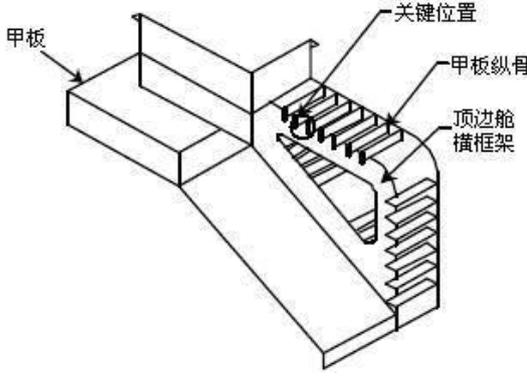
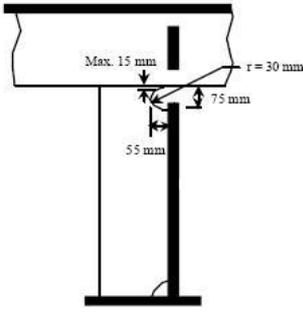
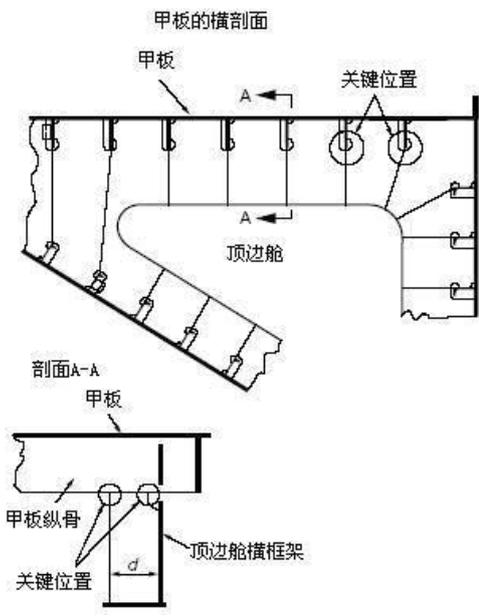
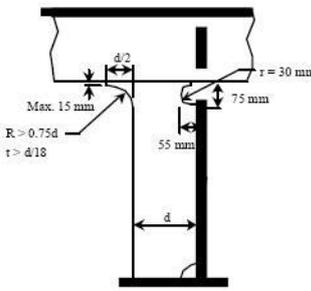
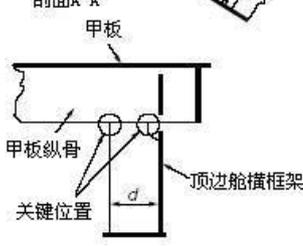
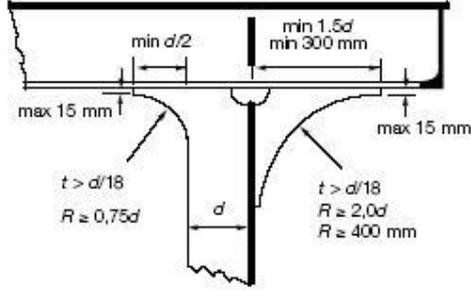
散货船结构节点		表 10
区域： 顶边舱 关键位置： 横框架上加强筋与顶边舱斜板纵骨的连接		
关键区域		结构节点
		(A) 软踵 
关键位置		(B) 软趾和软踵 
		(C) 软趾和背面软肘板 
结构节点	适用结构	说明
	对于高强度钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	对于高强度钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	对于普通钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
建造公差	对于普通钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (A) 软踵。
	确保纵骨腹板和顶边框架加强筋以及背面软肘板（如设有）之间的良好对中。可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离踵部和趾端；加强筋以及背面软肘板的趾端和踵部与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

散货船结构节点	表 11
---------	------

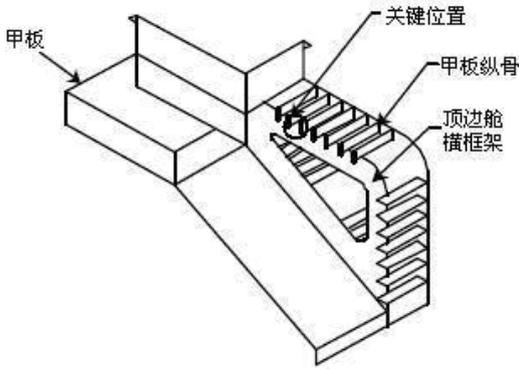
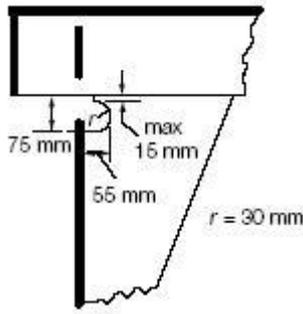
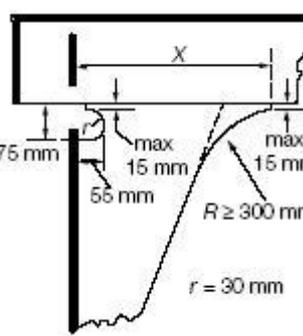
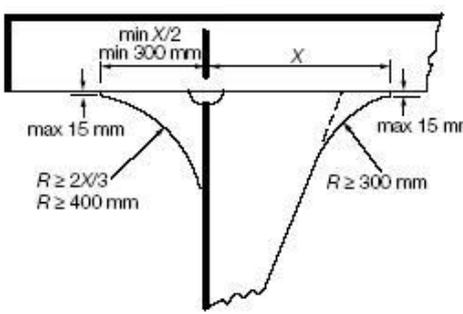
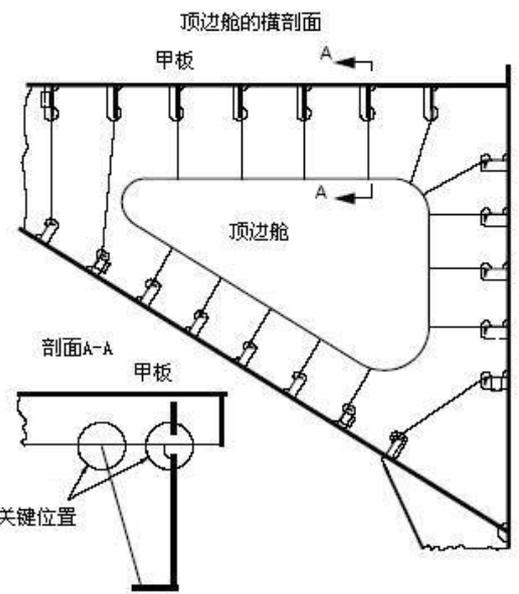
区域： 顶边舱		关键位置： 横框架上防倾肘板与顶边舱斜板纵骨的连接	
关键区域		结构节点	
		<p>(A) 软踵</p> 	
关键位置		<p>(B) 软趾和软踵</p> 	
		<p>(C) 软趾和背面软肘板</p> 	
结构节点	适用结构	说明	
	对于高强度钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。	
	对于高强度钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。	
	对于普通钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。	
	对于普通钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (A) 软踵。	
建造公差	确保纵骨腹板和顶边横框架防倾肘板以及背面软肘板（如设有）之间的良好对中。可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。		
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离踵部和趾端； 防倾肘板以及背面软肘板的趾端和踵部与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。		

区域：开口线外的甲板

关键位置：甲板横梁上加强筋与甲板纵骨的连接

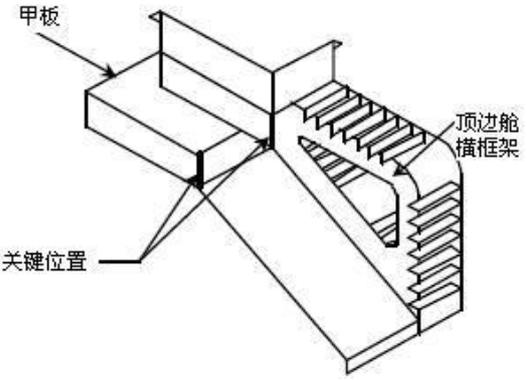
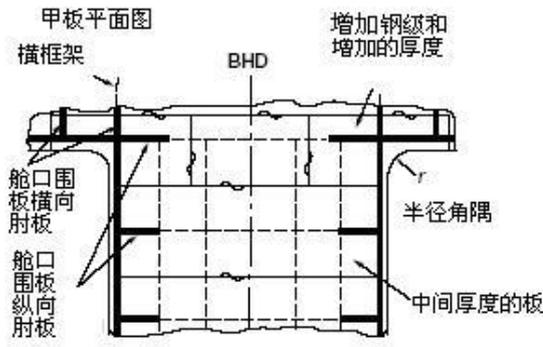
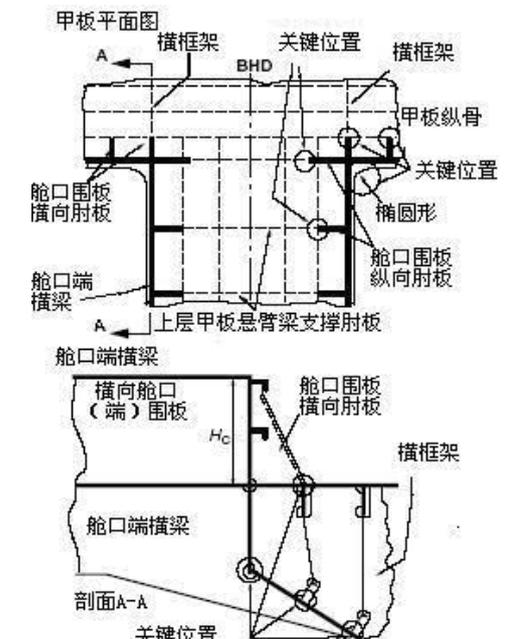
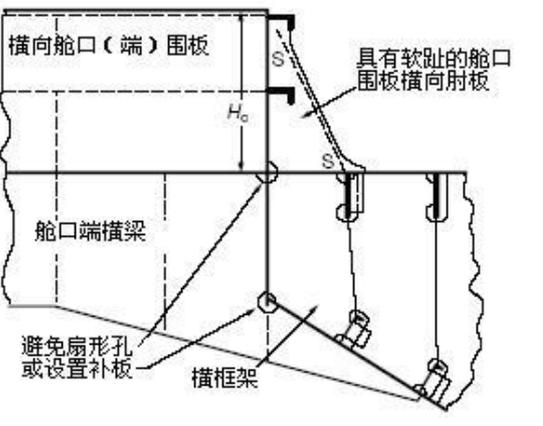
关键区域		结构节点
		<p>(A) 软踵</p> 
<p>关键位置</p> 		<p>(B) 软趾和软踵</p> 
<p>剖面A-A</p> 		<p>(C) 软趾和背面软肘板</p> 
结构节点	适用结构	说明
	对于高强度钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	对于高强度钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	对于普通钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
建造公差	确保纵骨腹板和顶边横框架加强筋以及背面软肘板之间的良好对中。可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离踵部和趾端； 扶强材的趾端和踵部与纵骨的连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

区域：开口线外的甲板  
 关键位置：甲板横梁上防倾肘板与甲板纵骨的连接

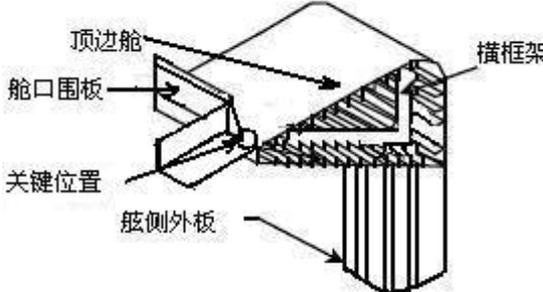
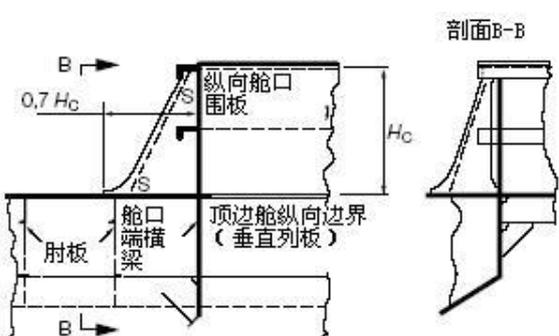
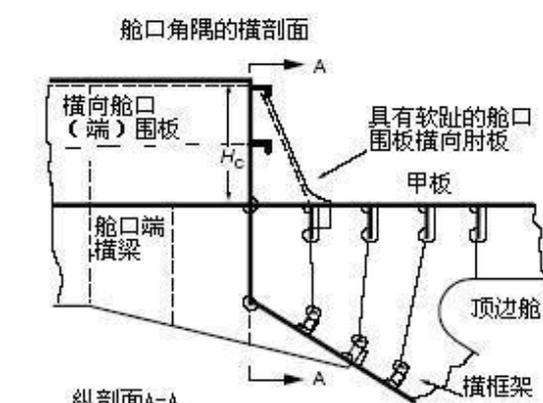
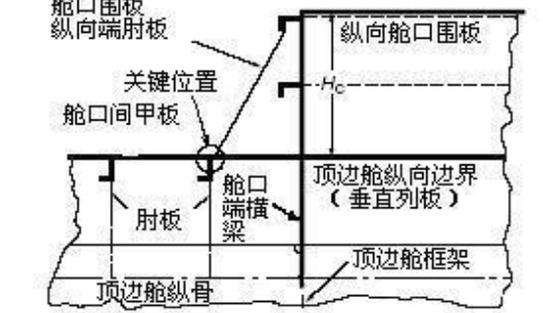
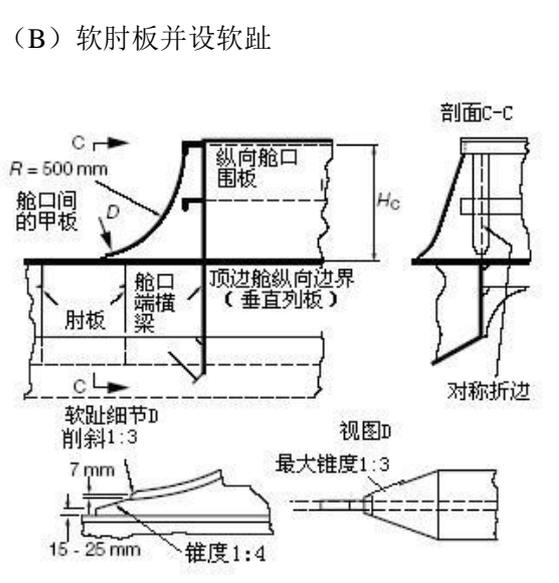
关键区域		结构节点
		<p>(A) 软踵</p>  <p>(B) 软趾和软踵</p>  <p>(C) 软趾和软背面软肘板</p> 
关键位置		
		
结构节点	适用结构	说明
	对于高强度钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	对于高强度钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	对于普通钢非对称纵骨。	所有纵骨应设有 (B) 软趾和软踵。
	对于普通钢对称纵骨。	所有纵骨应设有 (A) 软踵。
建造公差	确保纵骨腹板和顶边横框架防倾肘板和背面肘板（如设有）之间的好对中。可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离踵部和趾端； 防倾肘板以及肘板的趾端和踵部与纵骨的连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光顺，不应有脱焊、未填满的弧坑等焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

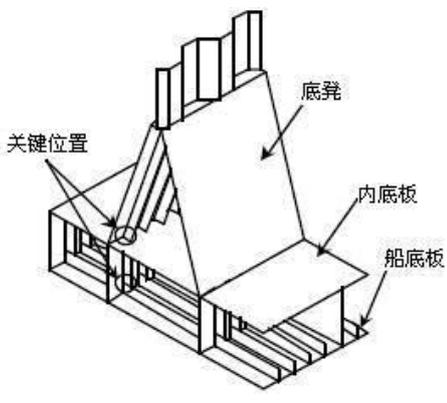
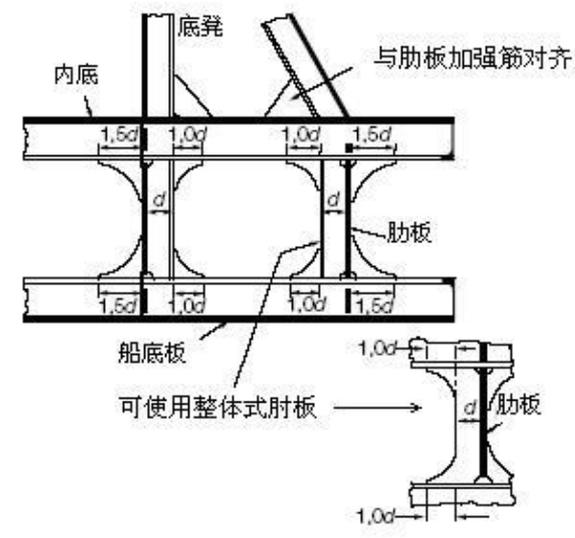
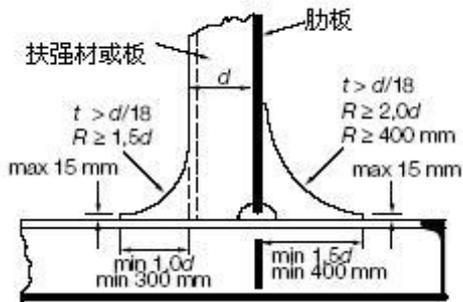
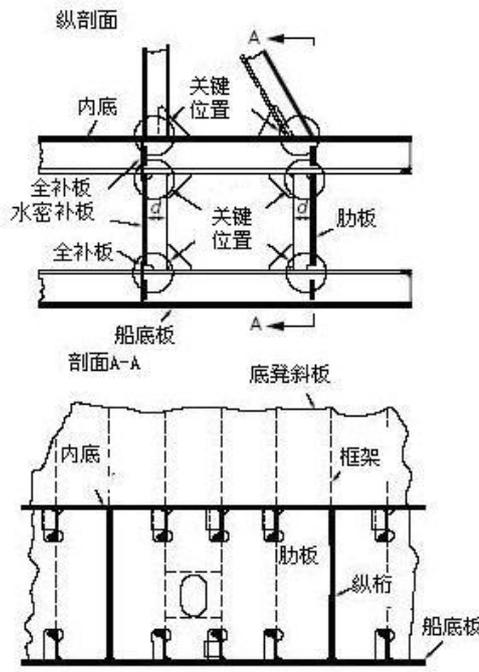
区域： 舱口间甲板

关键位置： 舱口角隅和舱口端横梁与顶边舱横框架的连接

关键区域	结构节点
	
<p style="text-align: center;">关键位置</p> 	<p style="text-align: center;">舱口端横梁</p> 
<p style="text-align: center;">适用结构</p> <p>结构节点</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>舱口角隅处的甲板板。</li> <li>舱口端横梁与顶边舱横框架的连接。</li> <li>舱口角隅处的围板横向肘板。</li> </ul> <p>建造公差</p> <p>焊接要求</p>	<p style="text-align: center;">说明</p> <p>按《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章和第 2 章有关要求设置半圆舱口角隅嵌板并增加钢级和厚度。焊接任何构件应保持远离舱口角隅处的甲板板，角隅自由边缘应打磨平滑。</p> <p>确保舱口端横梁在顶边横框架平面内，避免扇形孔和设置补板。</p> <p>设置具有软趾的肘板。</p> <p>确保舱口端横梁和顶边舱内支撑构件之间的良好对中。最大偏差应不大于 <math>t/3</math>，式中 <math>t</math> 为对中板的薄者，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。</p> <p>焊接的引弧点和熄弧点要远离肘板趾端或角隅；肘板的趾端与上甲板连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

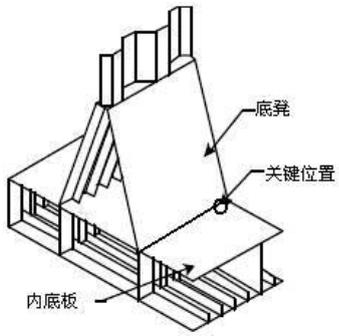
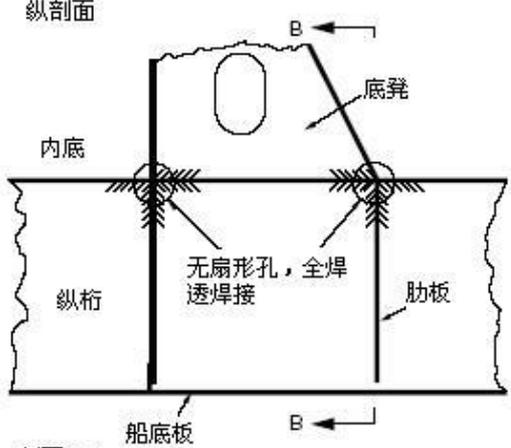
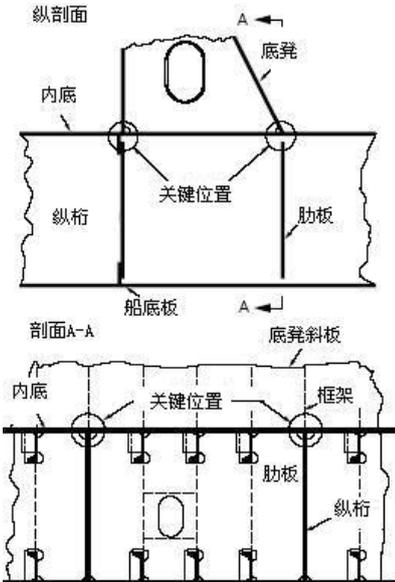
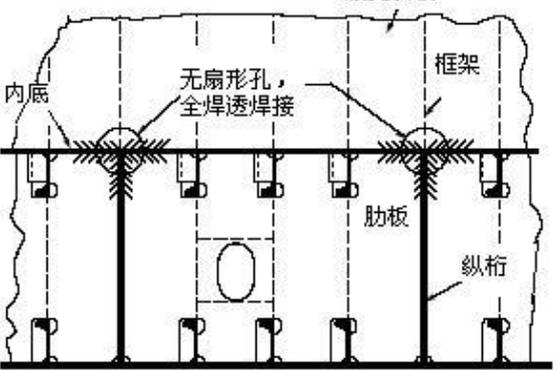
区域： 舱口间甲板  
 关键位置： 舱口围板纵向端肘板

关键区域	结构节点	
	<p>(A) 设软趾</p> 	
关键位置		
<p>舱口角隅的横剖面</p>  <p>纵剖面A-A</p> 	<p>(B) 软肘板并设软趾</p> 	
结构节点	适用结构	说明
	纵向舱口围板的纵向端肘板与甲板板的趾端连接。	作为最低要求，应按 (A) 设置软趾。
	纵向舱口围板的纵向端肘板。	为使甲板的应力平滑过渡，按 (B) 采用软肘板，并设软趾。端肘板应尽可能避免任何管系开孔，如有，应设置合适加强。
建造公差	确保舱口围板端肘板和支持结构之间的良好对中。最大偏差应不大于 $t/3$ ，式中 $t$ 为对中板的薄者，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	自肘板趾端起 $0.15H_c$ 距离使用全焊透接； 焊接的引弧点和熄弧点要远离肘板趾端； 肘板趾端与甲板板的连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

散货船结构节点		表 16
区域： 横舱壁（压载舱） 关键位置： 底凳之下船底纵骨和内底纵骨的连接		
关键区域		结构节点
		对称软趾和软背面肘板  
关键位置		
		
结构节点	适用结构	说明
	肋板垂直扶强材与底凳之下船底纵骨和内底纵骨连接。 底凳与内底板连接。	设置对称软趾和背面软肘板。 与肋板加强筋对齐，设置肘板。
建造公差	确保肘板和腹板之间的良好对中。最大偏差应不大于 $t/3$ ，式中 $t$ 为对中板的薄者，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	内底和肋板之间使用焊接系数为 0.44 的填角焊接； 焊接的引弧点和熄弧点要远离肋板趾端或角隅； 扶强材以及背面肘板的趾端与纵骨连接处应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

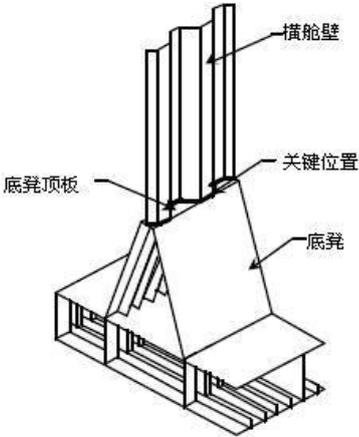
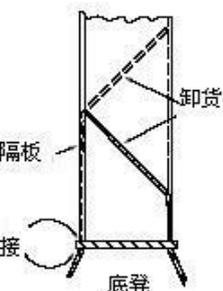
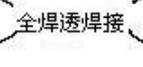
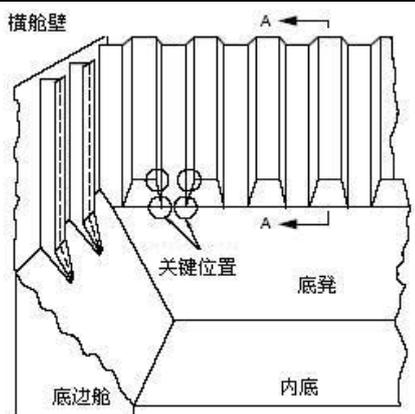
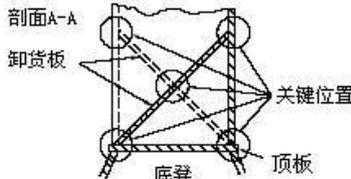
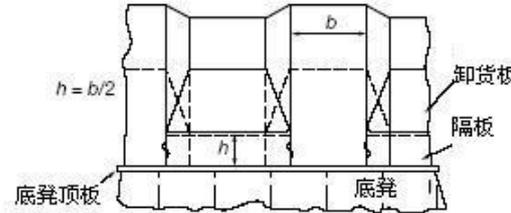
区域：横舱壁（压载舱）

关键位置：底凳与双层底纵桁处内底的连接

关键区域	结构节点
	
<p data-bbox="483 779 596 815">关键位置</p> 	
结构节点	<p data-bbox="576 1451 676 1487">适用结构</p> <p data-bbox="336 1592 715 1628">底凳与双层底纵桁处内底板的连接。</p> <p data-bbox="1139 1451 1193 1487">说明</p> <p data-bbox="868 1496 1465 1727">肋板和底凳内框架与内底相交附近处应避免开扇形孔。靠近底凳连接处，尽可能减少人孔的数目和尺寸。底凳板平面内肋板上扶强材切口应避免开扇形孔并且应设置补板。双层底纵桁附近的肋板上应避免设置出入口。应特别注意内底板上污水阱和吸入口的设计和定位。</p>
建造公差	<p data-bbox="336 1742 1465 1809">尽可能确保双层底纵桁和底凳板之间以及肋板和凳板之间的良好对中，可参照《钢质海船入级规范》第9篇第12章的相关要求。</p>
焊接要求	<p data-bbox="336 1825 1465 1980">对于压载舱，内底板和凳板之间，以及主要构件、肋板、桁材和底凳腹板的角隅相交附近使用全焊透焊接（见上图）；对于干货舱，在内底板和凳板之间以及内底板和肋板之间应使用深熔焊；焊接的引弧点和熄弧点要远离角隅；焊接顺序应避免层状撕裂的产生，完工焊缝要光顺地过渡到内底板；其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。</p>

区域： 横舱壁（压载舱）

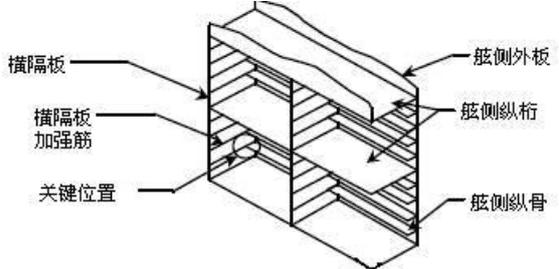
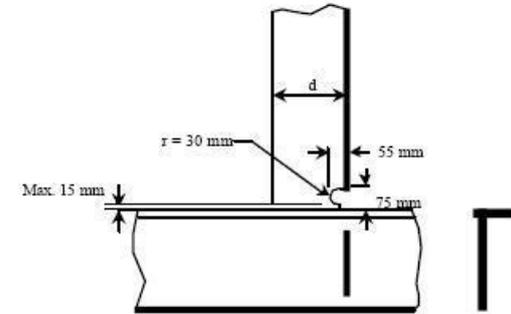
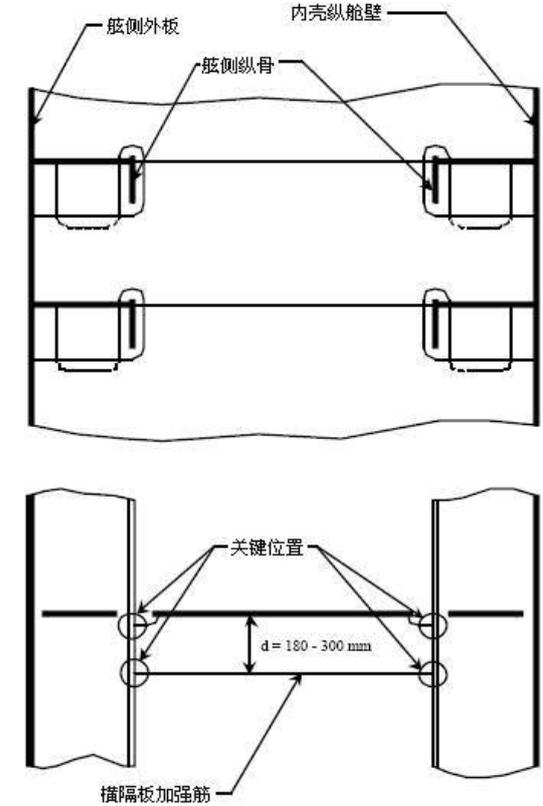
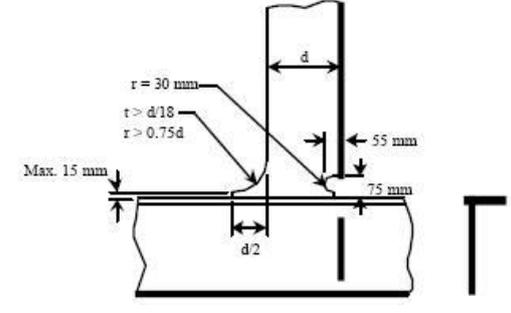
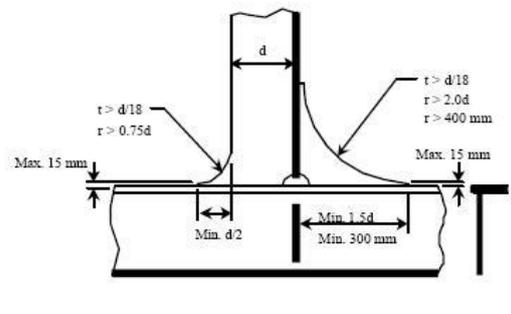
关键位置： 底凳顶板处的连接

关键区域	结构节点
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="845 537 1053 896"> <p>卸货板相交布置</p>  </div> <div data-bbox="1165 537 1404 896"> <p>避免卸货板相交布置</p>  </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>全焊透焊接</p>  </div>
<p style="text-align: center;">关键位置</p>  <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>剖面A-A</p>  </div>	<p style="text-align: center;">剖面A-A</p> 
<p style="text-align: center;">适用结构</p>	<p style="text-align: center;">说明</p>
<p>结构节点</p>	<p>底凳顶板与底凳和槽形横舱壁的连接以及卸货板与槽形横舱壁的连接。</p>
<p>建造公差</p>	<p>尽可能确保底凳斜板和槽形平面之间的良好对中，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>槽形舱壁板、隔板和凳斜板与底凳顶板连接处使用全焊透焊接；卸货板与槽型舱壁板和隔板的连接用单面焊透或其它相当的方法；要采用避免层状撕裂的焊接规程；焊接的引弧点和熄弧点要远离舱壁板槽条角隅；完工焊缝要光滑过渡到槽形舱壁板、底凳顶板和凳侧板；底凳顶板推荐选用 Z 级钢。</p>

散货船结构节点		表 19
区域： 横舱壁（压载舱） 关键位置： 槽型舱壁上边界处的连接		
关键区域		结构节点
<p>甲板 顶边舱 横舱壁 关键位置</p>		<p>横舱壁处的横剖面 甲板 顶边舱 顶边舱面板 隔板 舱壁槽条平面‘b’内的水密分隔或框架</p>
关键位置		<p>横舱壁处的横剖面 甲板 顶边舱 顶边舱面板 隔板 水密分隔 关键位置</p>
<p>进一步改进 顶边舱 顶边舱面板 隔板 舱壁槽条平面‘b’内的水密分隔或框架 全补板或衬板</p>		
结构节点	适用结构	说明
	槽形横舱壁与顶边舱斜板和顶边舱的连接。	槽条之间设置隔板，以增加横舱壁的附连面积。
建造公差	确保横框架与槽条面板之间的良好对中。最大偏差应不大于 $t/3$ ，式中 $t$ 为对中板的薄者，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	横舱壁与顶边舱和顶边舱面板的连接使用焊接系数为 0.44 的填角焊接； 焊接的引弧点和熄弧点要远离关键角隅； T 型接头的间隙降到最小； 焊接顺序应使拘束度最小。	

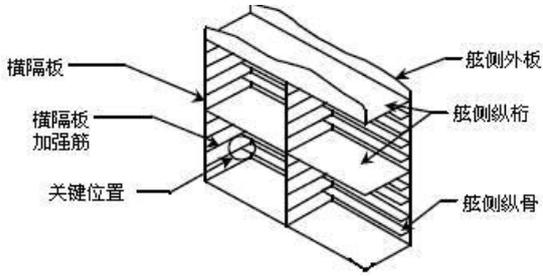
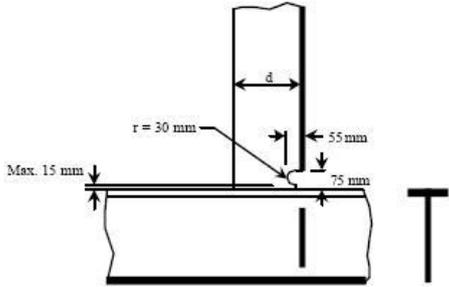
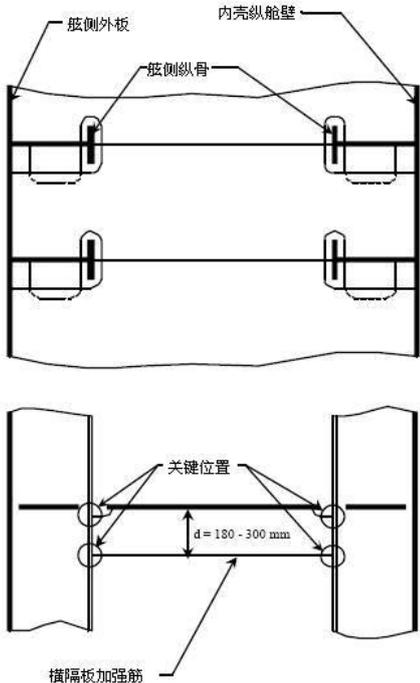
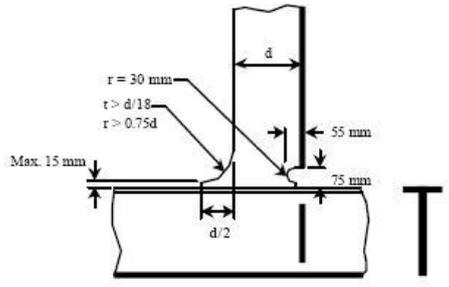
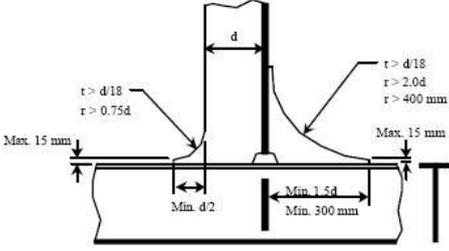
区域：双壳

关键位置：非对称高强度钢舷侧纵骨与横隔板加强筋的连接（基线与基线以上 0.8D 之间）

关键区域	结构节点
	<p>(A) 软踵</p> 
关键位置	
	<p>(B) 软趾和软踵</p>  <p>(C) 软趾和背面软肘板</p> 
结构节点	适用结构
<p>非对称舷侧纵骨与横隔板加强筋的连接处。</p>	<p>说明</p> <p>应设有 (C) 软趾和背面软肘板。</p>
建造公差	<p>确保舷侧纵骨腹板与横隔板加强筋以及背面软肘板之间的良好对中。</p>
焊接要求	<p>舷侧纵骨面板与横隔板加强筋以及背面软肘板的填角焊接，最小焊接系数为 0.44；</p> <p>加强筋以及背面软肘板的踵部和趾端与纵骨连接处应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

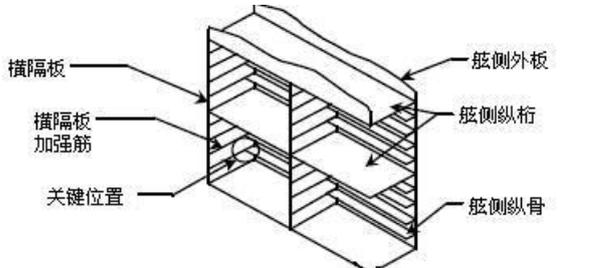
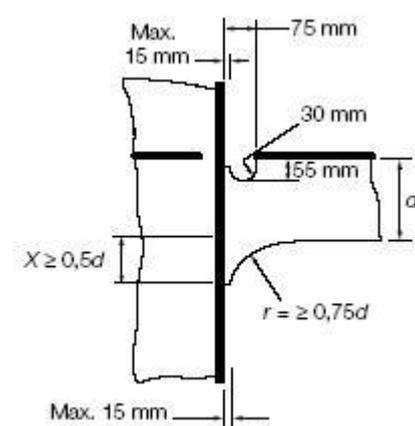
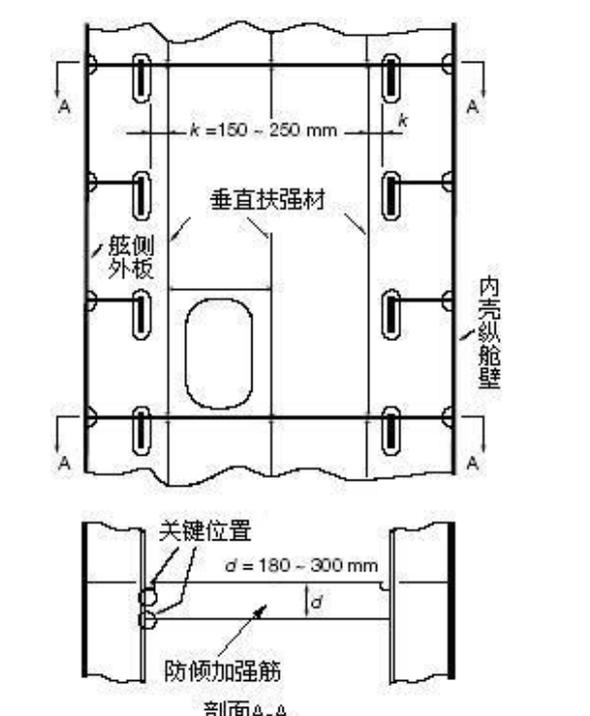
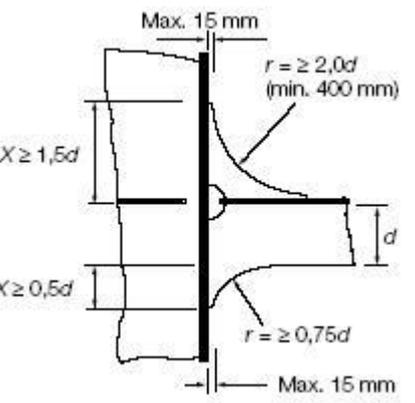
区域：双壳

关键位置：对称高强度钢舷侧纵骨与横隔板加强筋的连接（基线与基线以上 0.8D 之间）

关键区域	结构节点	
	<p>(A) 软踵</p> 	
<p>关键位置</p> 	<p>(B) 软趾和软踵</p>  <p>(C) 软趾和背面软肘板</p> 	
结构节点	适用结构	说明
	装载水线以上的两根纵骨和以下的四根纵骨与横隔板加强筋的连接处。	应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	压载水线以上的四根纵骨和以下的四根纵骨与横隔板加强筋的连接处。	应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
其他所有纵骨与横隔板加强筋的连接处	应设有 (B) 软趾和软踵。	
建造公差	确保舷侧纵骨腹板与横隔板加强筋之间的良好对中。	
焊接要求	舷侧纵骨面板与横隔板加强筋的填角焊接，最小焊接系数为 0.44；焊接的引弧点和熄弧点要远离加强筋和背面软肘板的踵部和趾端；加强筋以及背面软肘板的踵部和趾端与纵骨连接处应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

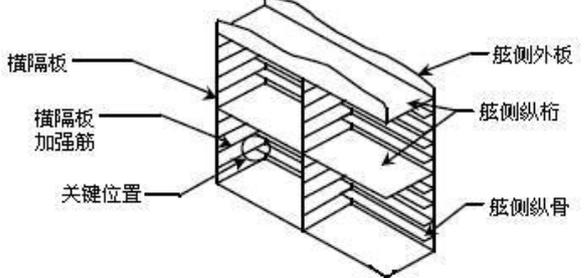
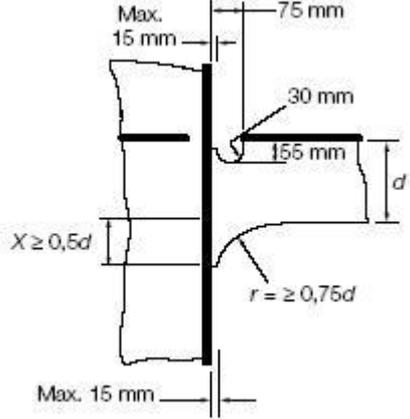
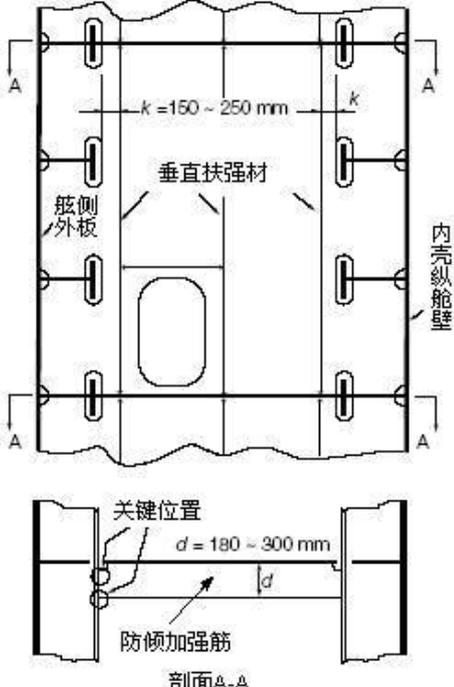
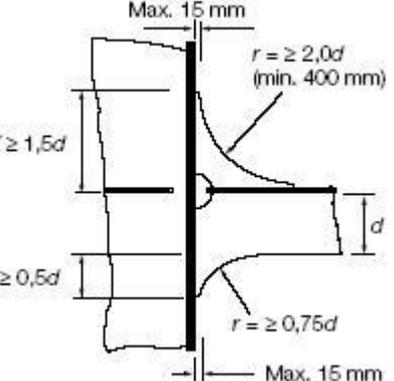
区域：双壳

关键位置：非对称高强度钢舷侧纵骨与具有垂直扶强材的横隔板防倾加强筋的连接（基线与基线以上 0.8D 之间）

关键区域	结构节点
 <p>横隔板 横隔板加强筋 关键位置 舷侧外板 舷侧纵骨 舷侧纵骨</p>	<p>(A) 软趾和软踵</p> 
<p>关键位置</p>  <p>垂直扶强材 舷侧外板 内壳纵舱壁 关键位置 <math>d = 180 - 300 \text{ mm}</math> 防倾加强筋 剖面A-A</p>	<p>(B) 软趾和背面软肘板</p>  <p>注：肘板厚度 = 扁钢厚度 = <math>d/18</math>（最小厚度 = 12.0mm）</p>
<p>结构节点</p> <p>适用结构</p> <p>非对称舷侧纵骨与横隔板防倾加强筋的连接处。</p>	<p>说明</p> <p>应设有 (B) 软趾和背面软肘板。</p>
<p>建造公差</p> <p>确保舷侧纵骨腹板与防倾加强筋以及背面软肘板之间的良好对中。</p>	
<p>焊接要求</p> <p>舷侧纵骨面板与防倾加强筋以及背面软肘板的填角焊接，最小焊接系数为 0.44； 焊接的引弧点和熄弧点要远离加强筋和背面软肘板的踵部和趾端； 防倾加强筋以及背面软肘板的踵部和趾端与纵骨连接处的包角焊应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

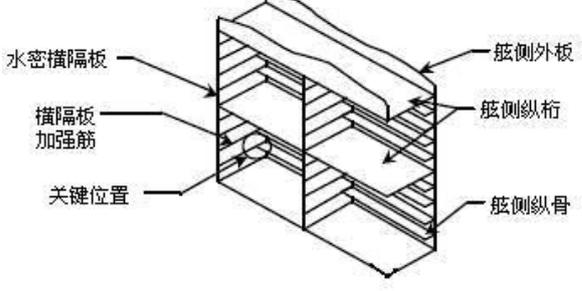
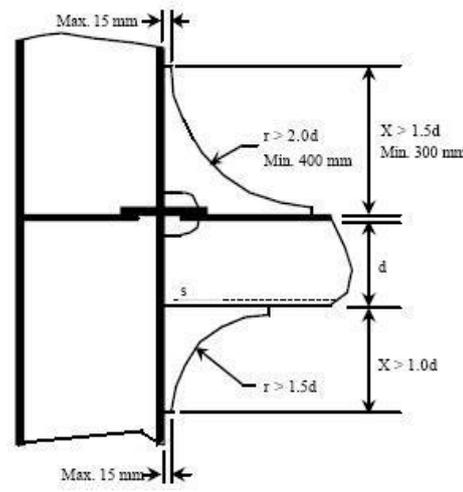
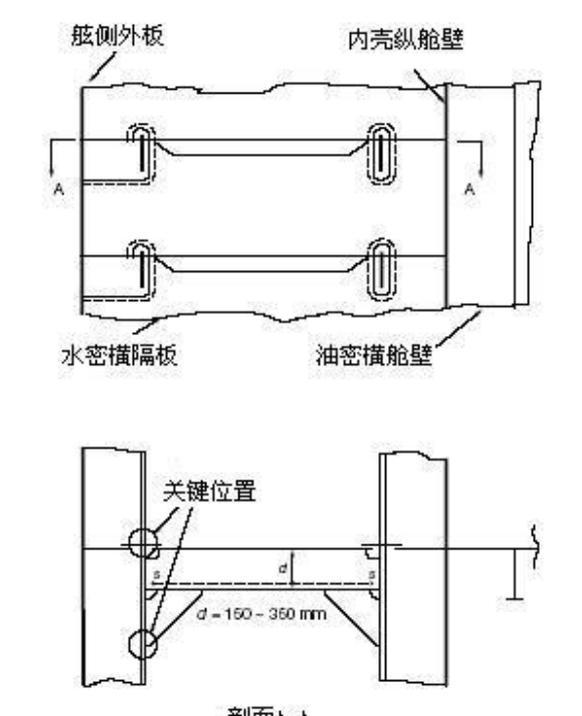
区域：双壳

关键位置：对称高强度钢舷侧纵骨与具有垂直扶强材的横隔板防倾加强筋的连接（基线与基线以上 0.8D 之间）

关键区域	结构节点
	<p>(A) 软趾和软踵</p> 
<p>关键位置</p> 	<p>(B) 软趾和背面软肘板</p>  <p>注：肘板厚度 = 扁钢厚度 = <math>d/18</math> (最小厚度 = 12.0mm)</p>
<p>结构节点</p> <p>适用结构</p> <p>对称舷侧纵骨与横隔板防倾加强筋的连接处。</p>	<p>说明</p> <p>应设有 (A) 软趾和软踵。</p>
<p>建造公差</p> <p>确保舷侧纵骨腹板与防倾加强筋之间的良好对中。</p>	
<p>焊接要求</p> <p>舷侧纵骨面板与防倾加强筋的填角焊接，最小焊接系数为 0.44；</p> <p>焊接的引弧点和熄弧点要远离加强筋和背面软肘板的踵部和趾端；</p> <p>防倾加强筋以及背面软肘板的踵部和趾端与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

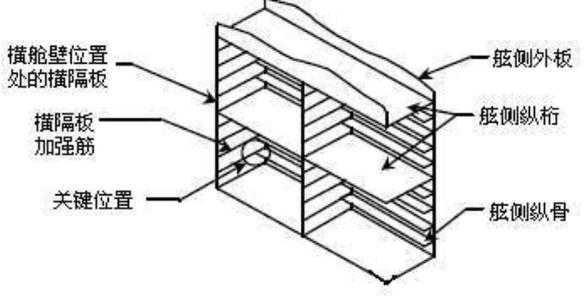
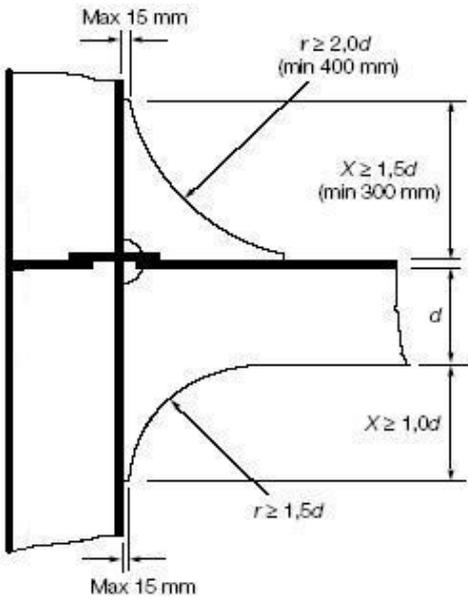
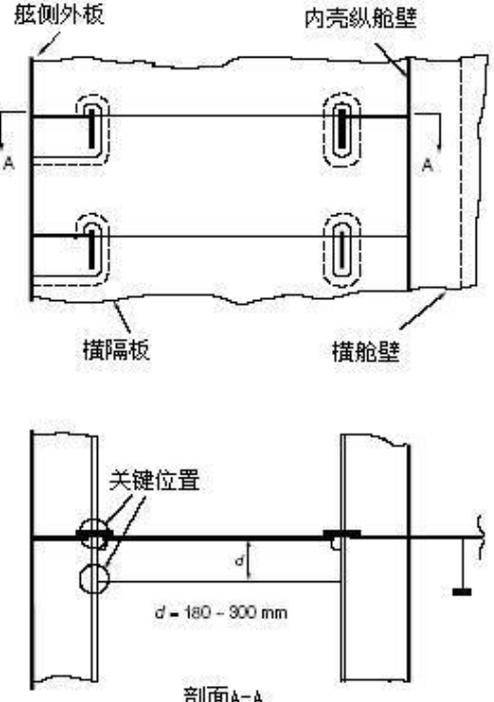
区域：双壳

关键位置：高强度钢舷侧纵骨与双壳内压载舱的水密横隔板水平加强筋的连接（舳部圆弧板上缘与基线以上 0.8D 之间）

关键区域	结构节点
	<p>软趾和背面软肘板</p> 
<p>关键位置</p>  <p>剖面A-A</p>	<p>注：肘板应采用高强度钢，肘板厚度 = <math>d/22</math>（最小厚度 = 12.0mm）</p>
<p>结构节点</p>	<p>适用结构</p>
<p>建造公差</p>	<p>说明</p>
<p>焊接要求</p>	<p>应设有软趾和背面软肘板。</p>
<p>建造公差</p>	<p>确保舷侧纵骨腹板与舱壁水平加强筋腹板以及背面软肘板之间的良好对中。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>软趾肘板与舷侧纵骨面板以及水平加强筋腹板的填角焊接，最小焊接系数为 0.34；                  焊接的引弧点和熄弧点要远离加强筋和背面软肘板的踵部和趾端；                  加强筋的踵部和肘板的趾端与纵骨的连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；                  其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

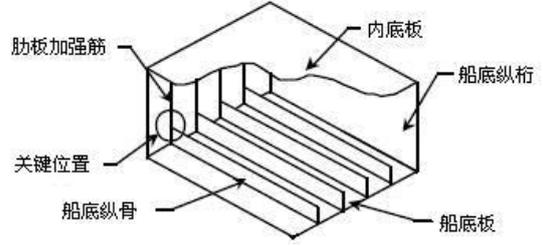
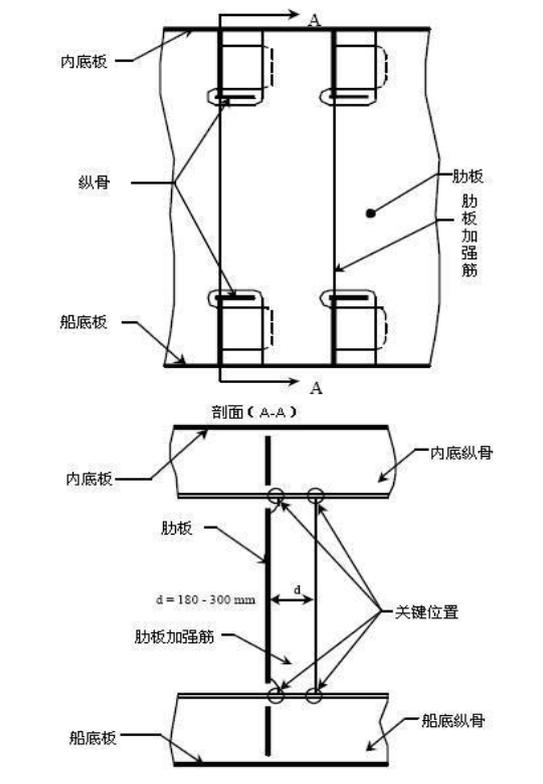
区域：双壳

关键位置：高强度钢舷侧纵骨与双壳内横舱壁位置处的横隔板加强筋的连接（舳部圆弧板上缘与基线以上 0.8D 之间）

关键区域	结构节点
	<p>软趾和背面软肘板</p> 
<p>关键位置</p>  <p>剖面A-A</p>	<p>注：肘板应采用高强度钢，肘板厚度 = 扁钢厚度 = <math>d/18</math>（最小厚度 = 12.0mm）</p>
<p>结构节点</p>	<p>适用结构</p>
<p>舷侧纵骨与双壳内横舱壁位置处的横隔板加强筋的连接处。</p>	<p>说明</p> <p>应设有软趾和背面软肘板。</p>
<p>建造公差</p>	<p>确保舷侧纵骨腹板与加强筋以及背面软肘板之间的良好对中。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>舷侧纵骨面板与横隔板加强筋以及软趾肘板的填角焊接，最小焊接系数为 0.44； 焊接的引弧点和熄弧点要远离加强筋和背面软肘板的踵部和趾端； 横隔板加强筋以及肘板的踵部和趾端与舷侧纵骨面板连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

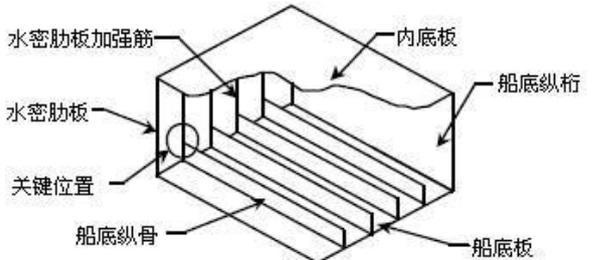
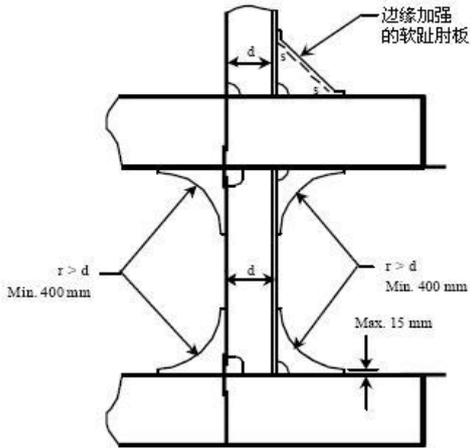
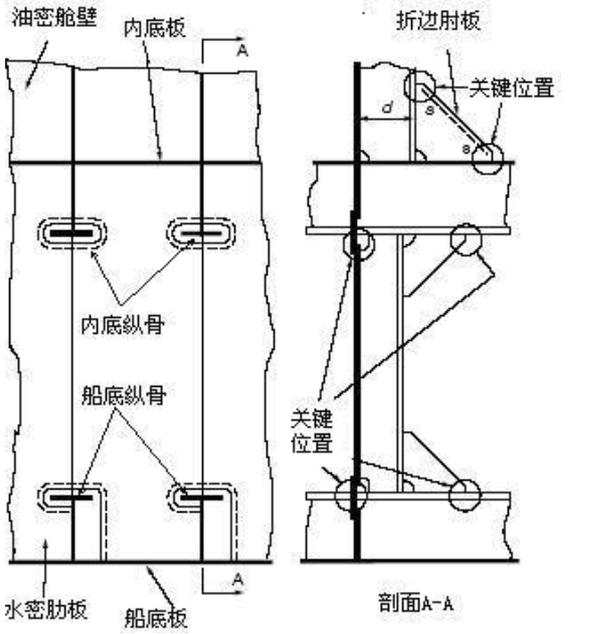
区域：双层底

关键位置：非对称高强度钢船底纵骨与肋板加强筋的连接

关键区域		结构节点
		(A) 软踵
		(B) 软趾和软踵
		(C) 软趾和背面软肘板
结构节点	适用结构	说明
	双层底内非对称船底纵骨与肋板加强筋的连接处。	应设有 (B) 软趾和软踵。
	底边舱内非对称船底纵骨与肋板加强筋的连接处。	应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
建造公差	确保船底纵骨腹板与肋板加强筋以及背面软肘板之间的良好对中。	
焊接要求	船底纵骨面板与肋板加强筋以及背面软肘板的填角焊接，最小焊接系数为 0.44；肋板加强筋以及背面软肘板的踵部和趾端与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

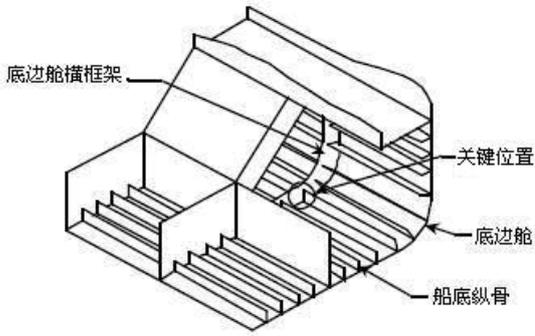
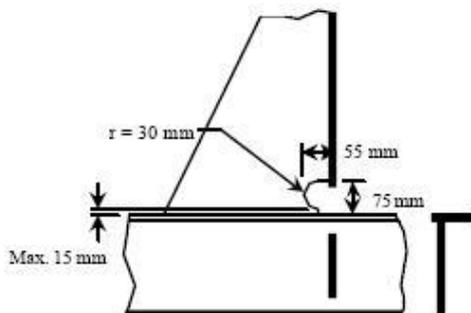
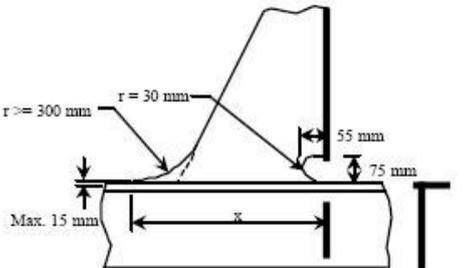
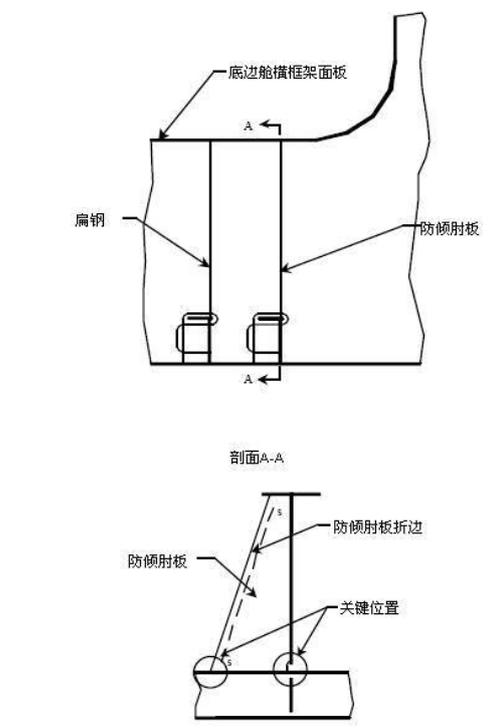
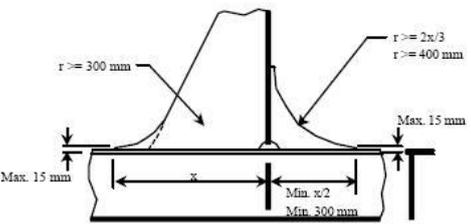
区域：双层底

关键位置：高强度钢船底纵骨和内底纵骨与平面油密横舱壁下水密肋板加强筋的踵部以及其端肘板的趾端的连接

关键区域	结构节点
 <p>水密肋板加强筋 水密肋板 关键位置 船底纵骨 内底板 船底纵桁 船底板</p>	<p>宽度增加的肋板加强筋和对称软趾肘板</p> 
<p>关键位置</p>  <p>油密舱壁 内底板 折边肘板 关键位置 内底纵骨 船底纵骨 水密肋板 船底板 剖面A-A</p>	<p>注：肘板应采用高强度钢，肘板厚度 = <math>d/50</math>（最小厚度 = 12.0mm）</p>
<p>适用结构</p>	<p>说明</p>
<p>结构节点</p> <p>船底纵骨、内底纵骨与平面油密横舱壁下水密肋板加强筋的踵部以及其端肘板的趾端的连接处。</p>	<p>应设有宽度增加的肋板加强筋(增加至油密舱壁垂直扶强材的宽度)和对称软趾肘板。</p>
<p>建造公差</p>	<p>确保纵骨腹板与肋板加强筋以及软趾肘板之间的良好对中。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>软趾肘板与纵骨面板以及水密肋板加强筋面板的填角焊接，最小焊接系数为 0.34； 水密加强筋的踵部与内外底纵骨，折边肘板的趾端与内底板和加强筋的连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

区域：底边舱

关键位置：高强度钢舷侧纵骨和非对称船底纵骨与底边舱横框架上的防倾肘板的连接

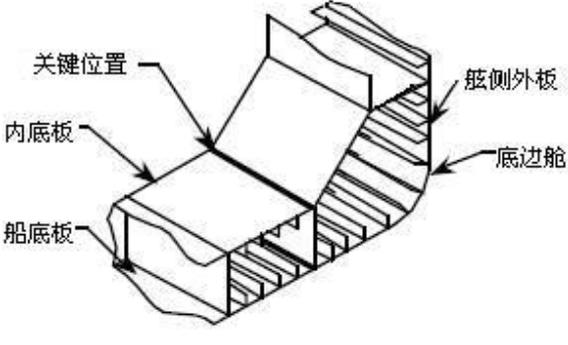
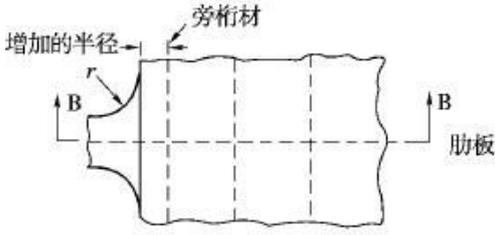
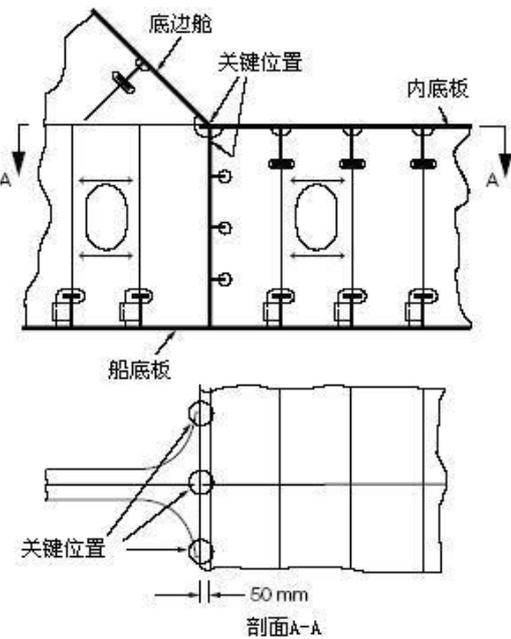
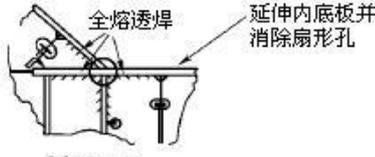
关键区域	结构节点	
 <p>底边舱横框架</p> <p>关键位置</p> <p>底边舱</p> <p>船底纵骨</p>	<p>(A) 软踵</p> 	
关键位置	<p>(B) 软趾和软踵</p> 	
 <p>底边舱横框架面板</p> <p>A</p> <p>扁钢</p> <p>防倾肘板</p> <p>A</p> <p>剖面A-A</p> <p>防倾肘板折边</p> <p>防倾肘板</p> <p>关键位置</p>	<p>(C) 软趾和背面软肘板</p>  <p>注：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 如果防倾肘板自由边长度大于肘板厚度的40倍时，自由边应设面板，以确保足够稳定性。</li> <li>2. 面板削斜端距邻接构件约为50mm。</li> </ol>	
结构节点	适用结构	说明
	舷侧纵骨与底边舱横框架上的防倾肘板的连接处。	应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
	非对称船底纵骨与底边舱横框架上的防倾肘板的连接处。	应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
建造公差	确保纵骨腹板与防倾肘板以及背面软肘板之间的良好对中。	
焊接要求	<p>纵骨面板与防倾肘板以及背面软肘板的填角焊接，最小焊接系数为 0.3；</p> <p>肘板踵部和趾端与纵骨面板连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

油船结构节点

表 10

区域：底边舱

关键位置：双层底肋板、内底板与底边舱斜板的连接以及肋板与内底板、旁桁材的连接（内底板和底边舱斜板折角采用焊接连接）

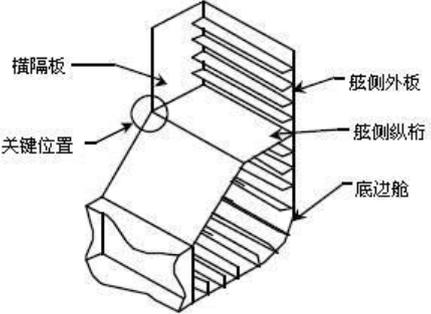
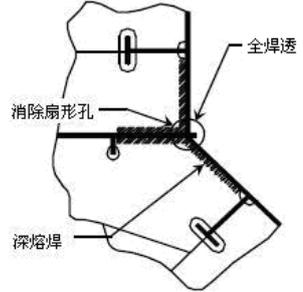
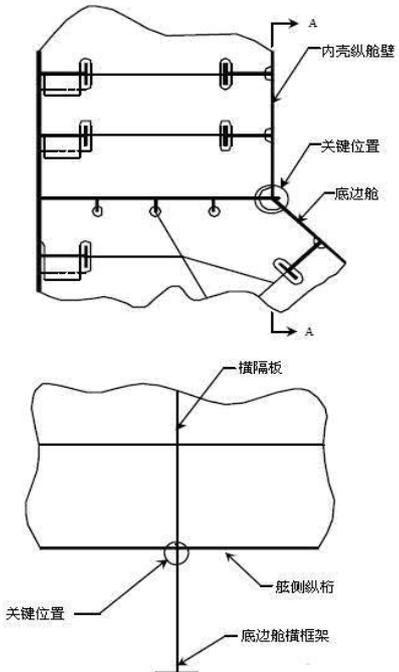
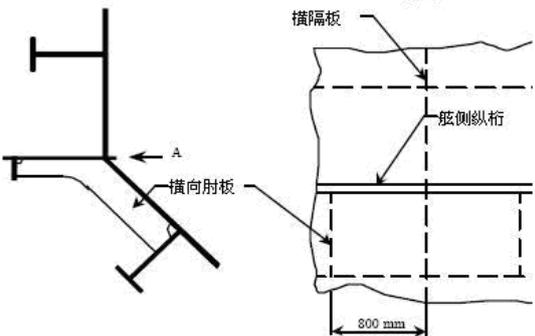
关键区域		结构节点								
		<p>延伸内底板并消除扇形孔</p> 								
<p>关键位置</p>  <p>剖面A-A</p>		 <p>剖面B-B</p> <p>底边舱斜板和内底板间的焊接应打磨光滑并消除可见凹陷</p> <p>在肋板两边打磨范围</p> <table border="1"> <tr> <td>VLCC</td> <td>250mm</td> </tr> <tr> <td>Suezmax</td> <td>200mm</td> </tr> <tr> <td>Aframax</td> <td>150mm</td> </tr> <tr> <td>Product</td> <td>100mm</td> </tr> </table> <p>注：由于形状原因而使肋板跨距减小的1号货舱内折角点以及横舱壁位置处或与横舱壁相邻的肋板处的折角点不必进行打磨。</p>	VLCC	250mm	Suezmax	200mm	Aframax	150mm	Product	100mm
VLCC	250mm									
Suezmax	200mm									
Aframax	150mm									
Product	100mm									
结构节点	适用结构	说明								
	双层底肋板、内底板与底边舱斜板的连接以及肋板与内底板、旁桁材的连接处。	应延伸内底板并消除扇形孔。								
建造公差	对接构件的厚度中心之间的名义距离应不超过构件厚度的 1/3。									
焊接要求	<p>全焊透和焊缝修整（底边舱斜板与内底板的连接）；</p> <p>全焊透：底边舱角隅处肋板与内底板和旁桁材的连接</p> <p>底边舱横框架与底边舱斜板和内底板的连接</p> <p>底边舱横框架与底边舱斜板、内底板和旁桁材的连接；</p> <p>焊接顺序要避免层状撕裂的产生；斜底板与内底板的角接缝应均匀过渡到内底板上；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。</p>									

油船结构节点

表 11

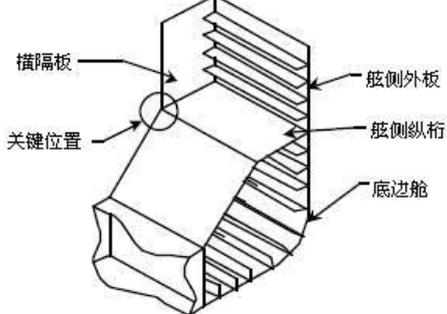
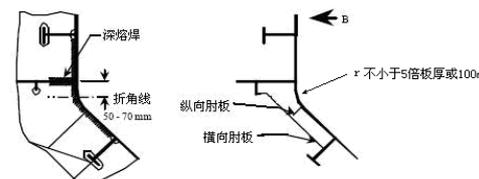
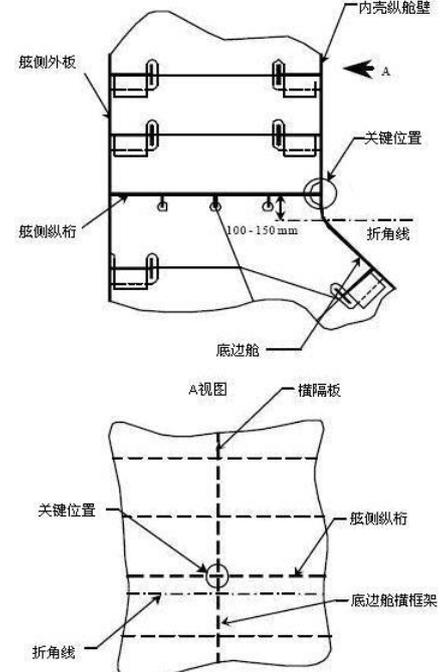
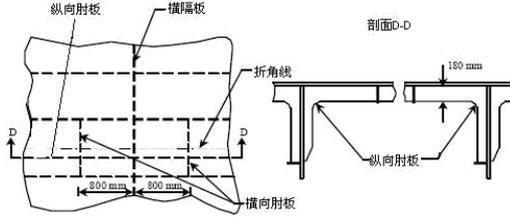
区域：底边舱

关键位置：焊接型底边舱折角位置横隔板处内壳纵舱壁与舷侧纵桁的连接以及横隔板与内壳纵舱壁、舷侧纵桁的连接

关键区域	结构节点
 <p>横隔板 关键位置 舷侧外板 舷侧纵桁 底边舱</p>	<p>消除扇形孔，并增设横向肘板</p>  <p>全焊透 消除扇形孔 深熔焊</p>
<p>关键位置</p>  <p>内壳纵舱壁 关键位置 底边舱 横隔板 舷侧纵桁 底边舱横框架</p>	 <p>A视图 横隔板 舷侧纵桁 横向肘板 800 mm</p>
<p>适用结构</p>	<p>说明</p>
<p>结构节点</p>	<p>焊接型底边舱角隅位置横隔板处内壳纵舱壁与舷侧纵桁的连接以及横隔板与内壳纵舱壁、舷侧纵桁的连接处。</p> <p>应消除扇形孔，并增设横向肘板。</p>
<p>建造公差</p>	<p>对接构件的厚度中心之间的名义距离应不超过构件厚度的 1/3。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>底边舱斜板与内壳纵舱用全焊透与舷侧纵桁壁连接；底边舱角隅处横隔板与内壳板以及舷侧纵桁的连接、底边舱角隅处底边舱横框架与底边舱斜板、内壳纵舱壁和舷侧纵桁的连接应使用全焊透焊接；如果舷侧纵桁板不采用 Z 向材料，则建议焊接顺序能避免层状撕裂的产生；在去除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔，在完成底边舱斜板和舷侧纵桁与内壳纵舱壁的连接后应予以焊接封闭；完工焊缝要平顺地过渡到舷侧纵桁板；其它要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

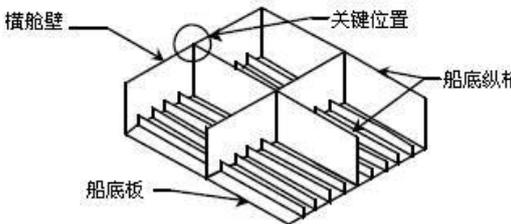
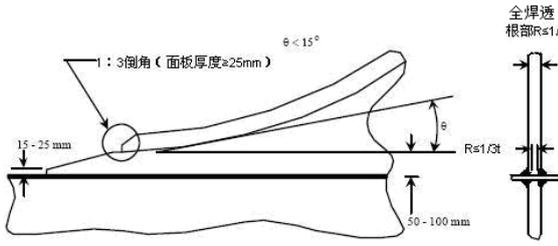
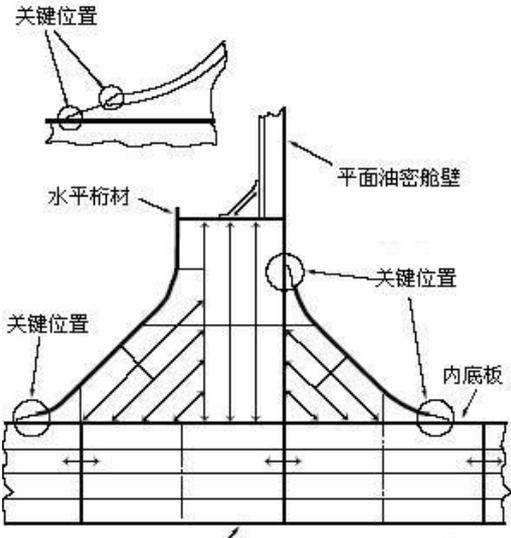
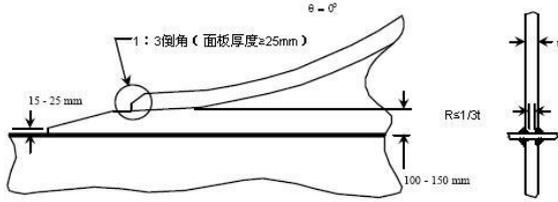
区域：底边舱

关键位置：折角型底边舱角隅位置横隔板处内壳纵舱壁与舷侧纵桁的连接以及横隔板与内壳纵舱壁、舷侧纵桁的连接

关键区域	结构节点
 <p>横隔板 关键位置 舷侧外板 舷侧纵桁 底边舱</p>	<p>缩短折角与舷侧纵桁以及附加纵向/横向肘板的间距，并消除扇形孔</p>  <p>深熔焊 折角线 50-70 mm r 不小于5倍板厚或100mm 纵向肘板 横向肘板</p>
<p>关键位置</p>  <p>内壳纵舱壁 舷侧外板 舷侧纵桁 100-150 mm 折角线 底边舱 A视图 横隔板 关键位置 舷侧纵桁 底边舱横框架 折角线</p>	 <p>纵向肘板 横隔板 折角线 180 mm 纵向肘板 横向肘板 剖面D-D 300 mm 300 mm</p>
<p>结构节点</p> <p>适用结构</p> <p>折角型底边舱角隅位置横隔板处内壳纵舱壁与舷侧纵桁的连接以及横隔板与内壳纵舱壁、舷侧纵桁的连接处。</p>	<p>说明</p> <p>应缩短折角与舷侧纵桁以及附加纵向/横向肘板的间距，并消除扇形孔。</p>
<p>建造公差</p> <p>对接构件的厚度中心之间的名义距离应不超过构件厚度的 1/3。</p>	
<p>焊接要求</p> <p>舷侧纵桁与内壳纵舱壁的连接、横隔板与内壳纵舱壁以及舷侧纵桁的连接、底边舱角隅处底边舱横框架与内壳斜板以及舷侧纵桁的连接应使用深熔焊焊接；</p> <p>在去除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔，在完成舷侧纵桁与内壳纵舱壁的连接后应予以焊接封闭；</p> <p>完工焊缝要平顺地过渡到舷侧纵桁板；</p> <p>其它要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

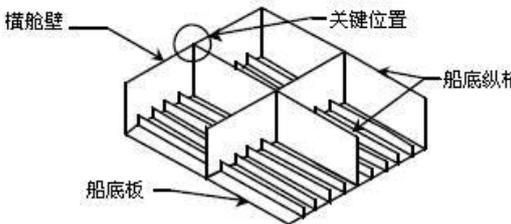
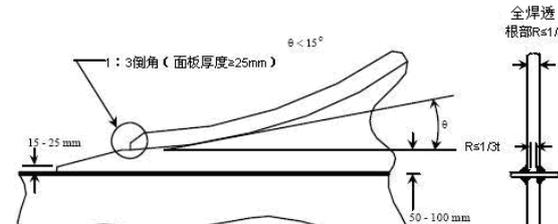
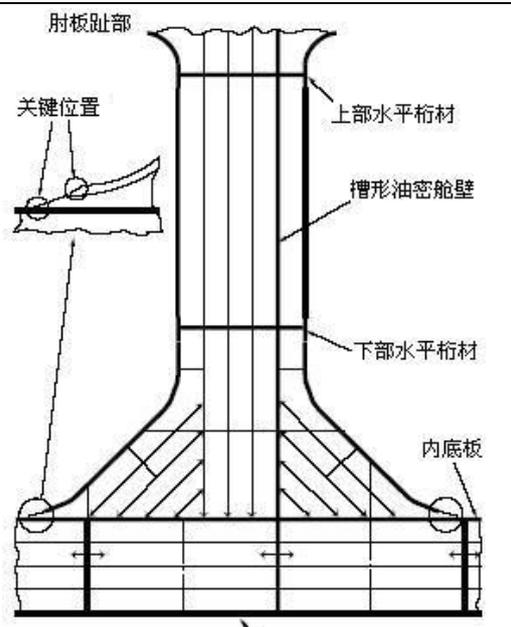
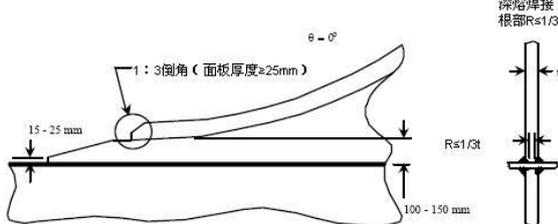
区域：横舱壁

关键位置：平面油密横舱壁上的垂直肘板趾端与双层底纵桁的连接

关键区域	结构节点
	<p>(A) 全焊透的软趾节点</p> 
<p>关键位置</p> 	<p>(B) 深熔焊的平行趾端节点</p> 
<p>适用结构</p>	<p>说明</p>
<p>结构节点</p>	<p>平面油密横舱壁上的垂直肘板趾端与双层底纵桁的连接处。</p> <p>应设有 (A) 全焊透的软趾节点,或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。</p>
<p>建造公差</p>	<p>肘板趾端厚度中心与双层底纵桁腹板厚度中心之间的名义距离应不超过内底板厚度的 1/3。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>深熔焊 (肘板趾端与内底板的连接);</p> <p>深熔焊或最小焊接系数为 0.44 的填角焊 (肘板趾端处双层底纵桁与内底板的连接);</p> <p>全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行, 或者按照图纸审批验船师所同意的;</p> <p>肘板趾端与内底板的连接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑, 不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷;</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

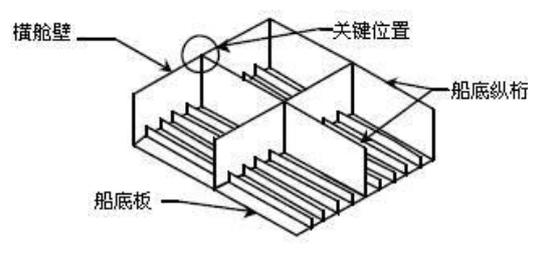
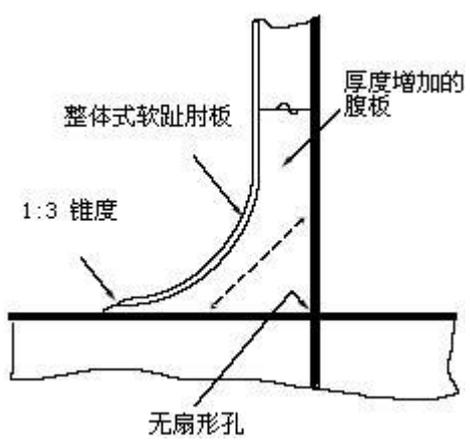
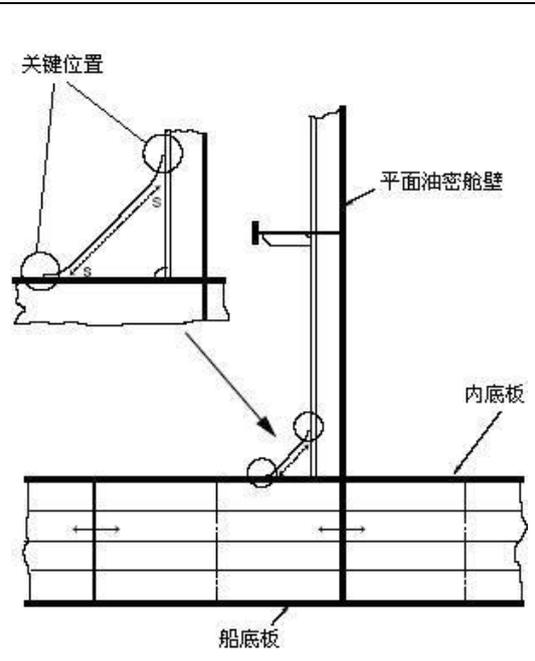
区域：横舱壁

关键位置：槽形油密横舱壁上的垂直桁材端肘板趾端与双层底纵桁的连接

关键区域	结构节点
 <p>横舱壁 关键位置 船底纵桁 船底板</p>	<p>(A) 全焊透的软趾节点</p>  <p>全焊透 根部<math>R \leq 1/3t</math></p>
<p>关键位置</p>  <p>肘板趾部 关键位置 上部水平桁材 槽形油密舱壁 下部水平桁材 内底板 船底板</p>	<p>(B) 深熔焊的平行趾端节点</p>  <p>深熔焊接， 根部<math>R \leq 1/3t</math></p>
<p>适用结构</p>	<p>说明</p>
<p>结构节点</p>	<p>槽形油密横舱壁上的垂直桁材端肘板趾端与双层底纵桁的连接处。</p> <p>应设有 (A) 全焊透的软趾节点,或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。</p>
<p>建造公差</p>	<p>肘板趾端厚度中心与双层底纵桁腹板厚度中心之间的名义距离应不超过内底板厚度的 1/3。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>深熔焊 (肘板趾端与内底板的连接); 深熔焊或最小焊接系数为 0.44 的填角焊 (肘板趾端处双层底纵桁与内底板的连接); 全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行, 或者按照图纸审批验船师所同意的; 肘板趾端与内底板的连接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑, 不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷; 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

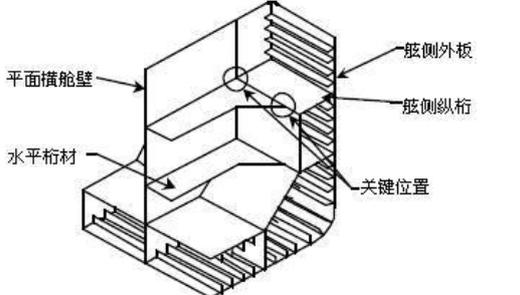
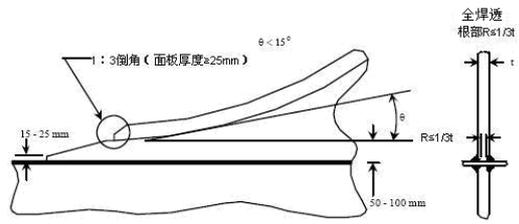
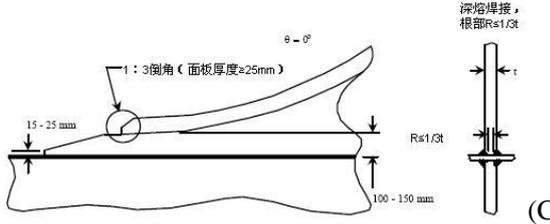
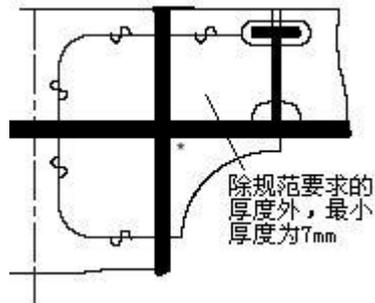
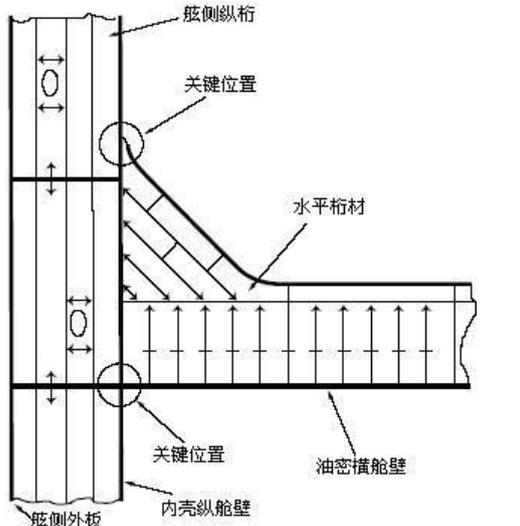
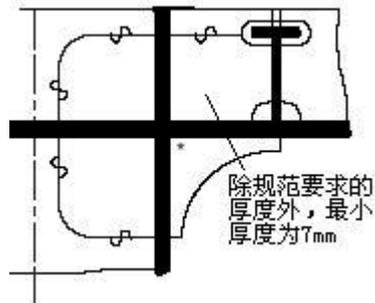
区域：横舱壁

关键位置：平面油密横舱壁上的垂直扶强材端肘板趾端与双层底纵桁以及垂直扶强材的连接

关键区域		结构节点
		整体式软趾肘板
关键位置		
		
	适用结构	说明
结构节点	平面油密横舱壁上的垂直扶强材端肘板趾端与双层底纵桁以及垂直扶强材的连接处。	应设有整体式软趾肘板。
建造公差	肘板趾端厚度中心与双层底纵桁腹板厚度中心之间的名义距离应不超过内底板厚度的 1/3。	
焊接要求	填角焊，最小焊接系数为 0.44（端肘板与内底板的连接）； 肘板趾端与内底板和垂直扶强材的连接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 在消除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔，在舱壁连续焊接完成后应予以焊接封闭； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

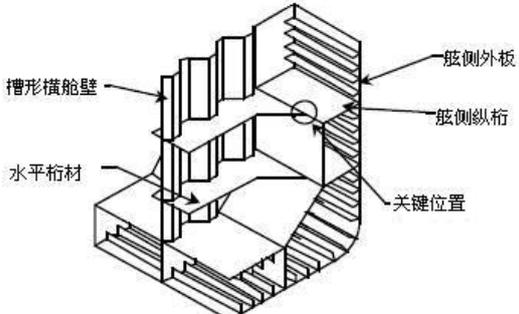
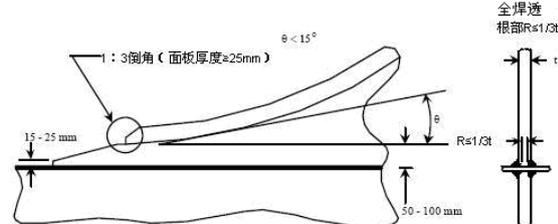
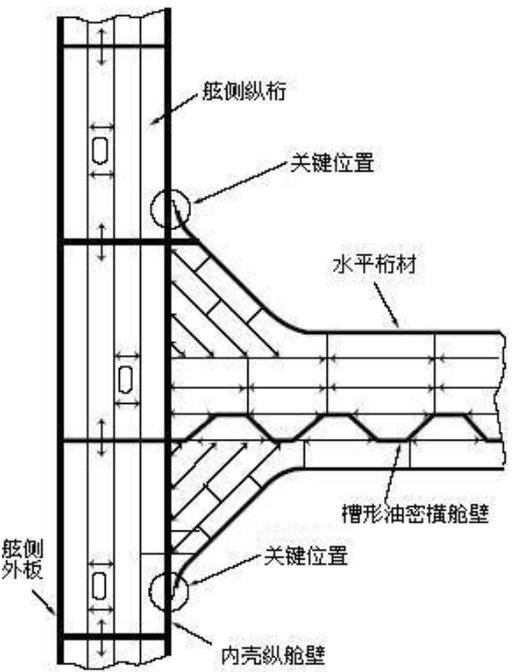
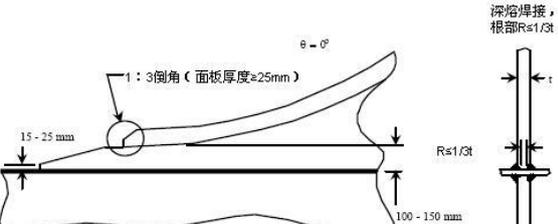
区域：横舱壁

关键位置：平面油密横舱壁上的水平桁材端肘板趾端与舷侧纵桁的连接以及水平桁材腹板与舷侧纵桁相交形成的方形角隅处

关键区域	结构节点
	<p>(A) 全焊透的软趾节点</p>  <p>(B) 深熔焊的平行趾端节点</p>  <p>去除扇形孔，设置局部的 D 级钢嵌板</p> 
<p>关键位置</p> 	<p>(C)</p> 
<p>结构节点</p> <p>适用结构</p> <p>平面油密横舱壁上的水平桁材端肘板趾端与舷侧纵桁的连接处。</p> <p>水平桁材腹板与舷侧纵桁相交形成的方形角隅处。</p>	<p>说明</p> <p>应设有 (A) 全焊透的软趾节点,或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。</p> <p>应设有(C) 去除扇形孔，设置局部的 D 级钢嵌板。</p>
<p>建造公差</p>	<p>对接构件厚度中心之间的名义距离应不超过厚度的 1/3。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>深熔焊（肘板趾端与舷侧纵桁的连接）；</p> <p>最小焊接系数为 0.44 的填角焊（肘板趾端处的舷侧纵桁和方形角隅处）；</p> <p>全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行，或者按照图纸审批验船师所同意的；</p> <p>水平桁材端肘板趾端与内壳纵舱壁的焊接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>在消除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔，在舱壁连续焊接完成后应予以焊接封闭；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

区域：横舱壁

关键位置：槽形油密横舱壁上的水平桁材端肘板趾端与舷侧纵桁的连接

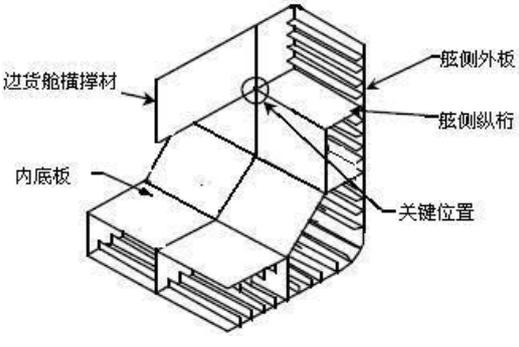
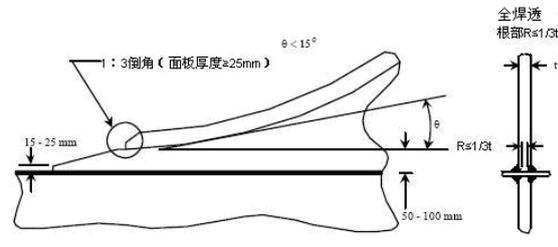
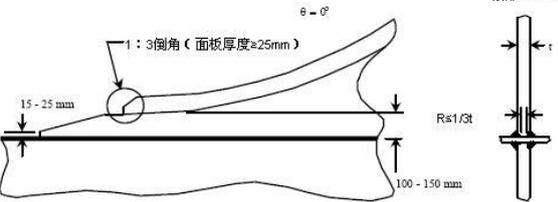
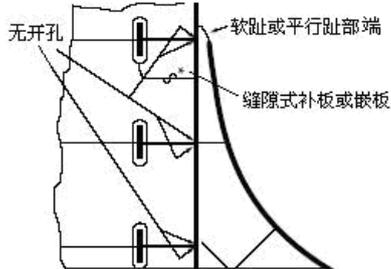
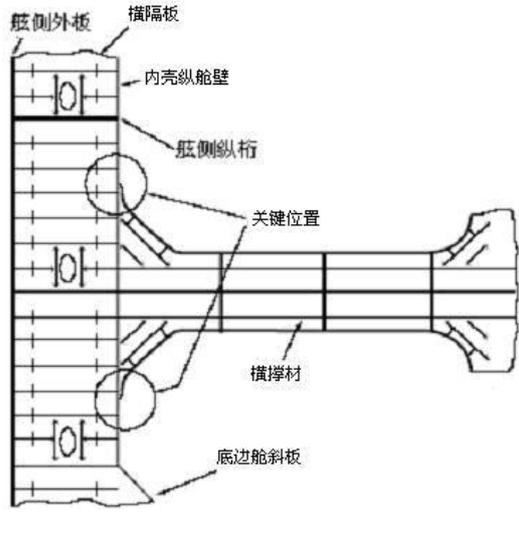
关键区域	结构节点
	<p>(A) 全焊透的软趾节点</p> 
<p>关键位置</p> 	<p>(B) 深熔焊的平行趾端节点</p> 
<p>结构节点</p> <p>适用结构</p> <p>槽形油密横舱壁上的水平桁材端肘板趾端与舷侧纵桁的连接处。</p>	<p>说明</p> <p>应设有 (A) 全焊透的软趾节点,或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。</p>
<p>建造公差</p>	<p>肘板趾端厚度中心与舷侧纵桁腹板厚度中心之间的名义距离应不超过内壳纵舱壁厚度的 1/3。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>深熔焊 (肘板趾端与内壳纵舱壁的连接);</p> <p>最小焊接系数为 0.44 的填角焊 (肘板趾端处舷侧纵桁腹板与内壳纵舱壁的连接);</p> <p>全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行, 或者按照图纸审批验船师所同意的范围;</p> <p>水平桁材端肘板趾端与内壳纵舱壁的焊接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑, 不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷;</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

油船结构节点

表 18

区域：边货舱

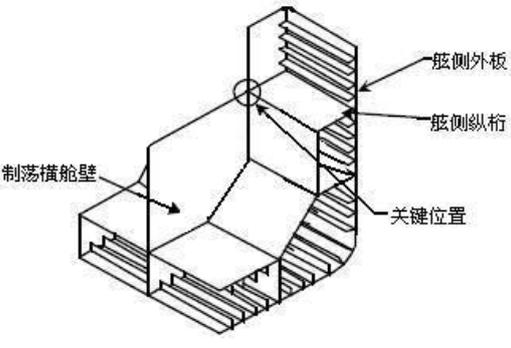
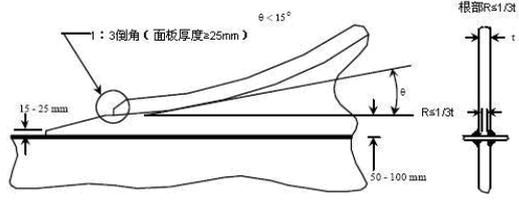
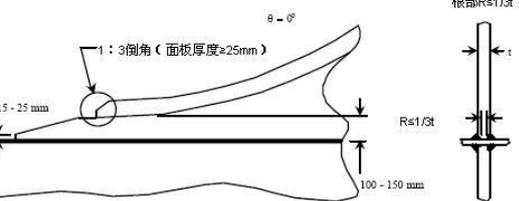
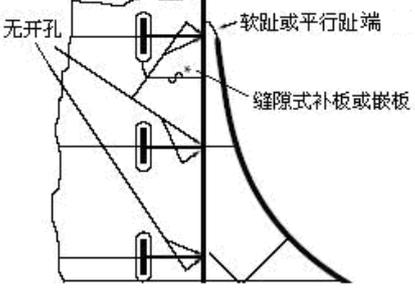
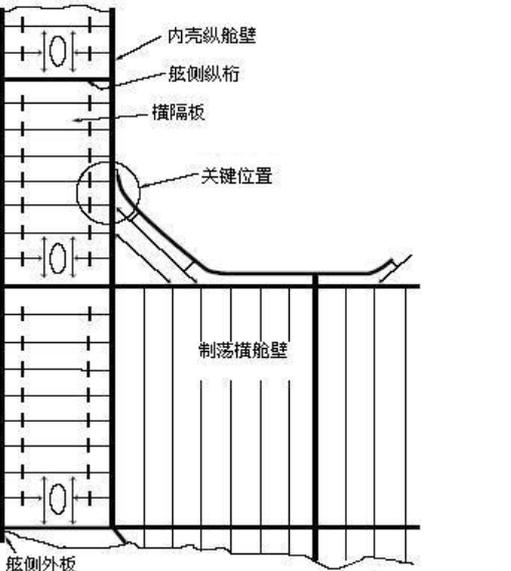
关键位置：边货舱横撑材端肘板趾端与双壳内横隔板的连接（边货舱设置横撑材）

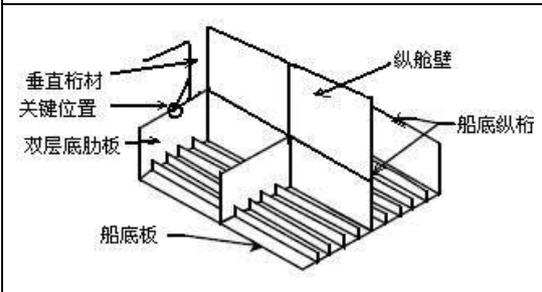
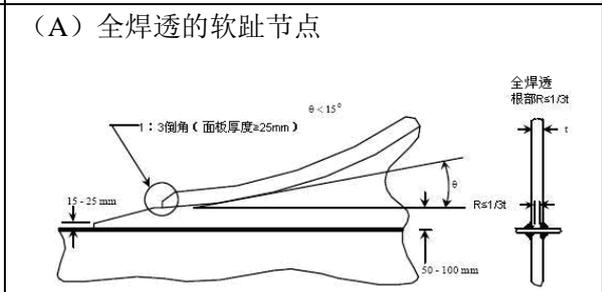
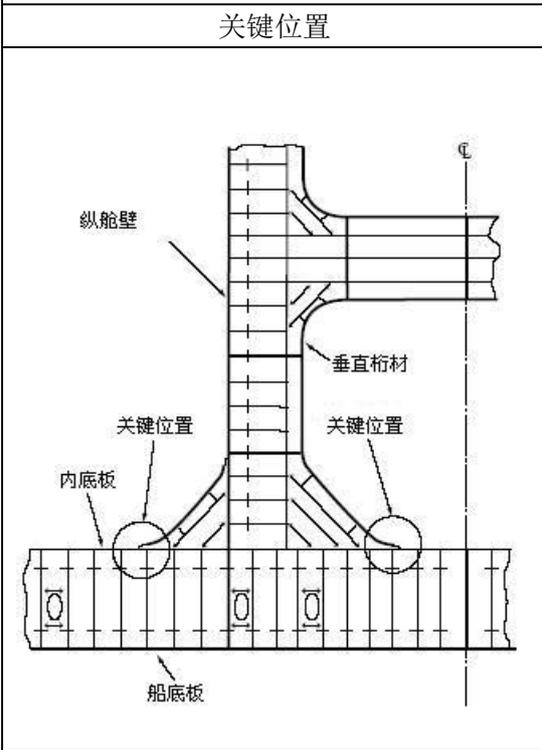
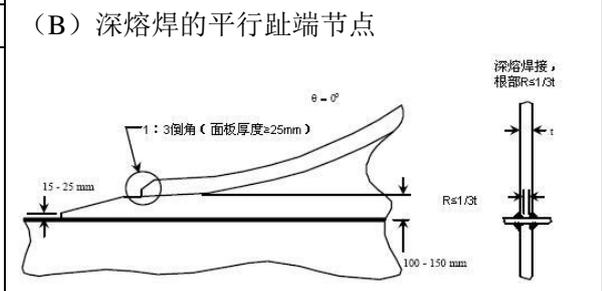
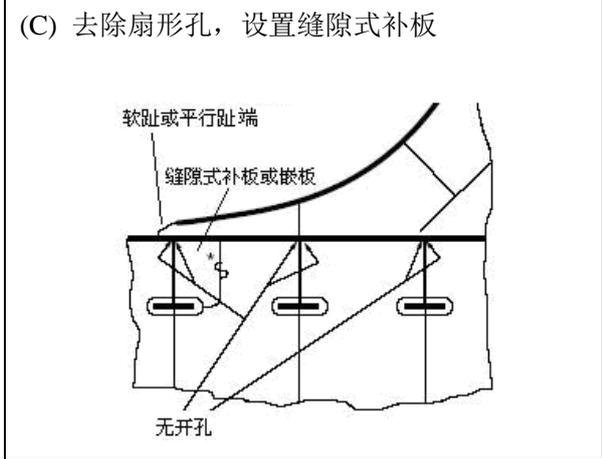
关键区域		结构节点
		<p>(A) 全焊透的软趾节点</p>  <p>(B) 深熔焊的平行趾端节点</p>  <p>(C) 去除扇形孔，设置缝隙式补板</p> 
关键位置		
		
结构节点	适用结构	说明
	边货舱横撑材端肘板趾端与双壳内横隔板的连接处。	应设有 (A) 全焊透的软趾节点, 或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。(C) 去除扇形孔, 设置缝隙式补板。
建造公差	肘板趾端厚度和横隔板厚度中心之间的名义距离应不超过内壳纵舱壁厚度的 1/3。	
焊接要求	<p>深熔焊（肘板趾端与内壳纵舱壁的连接）；最小焊接系数为 0.44 的填角焊（肘板趾端处横隔板与内壳纵舱壁的连接）；全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行，或者按照图纸审批验船师所同意的范围；</p> <p>横撑材端肘板趾端与内壳纵舱壁的焊接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>在去除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔，在完成内壳纵舱壁纵骨与内壳纵舱壁的连接焊接后应予以焊接封闭，用相同材质、相同厚度的缝隙式补板或嵌板对图示 * 处进行全熔透焊接来代替原采用搭接补板的角接；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	



区域：边货舱

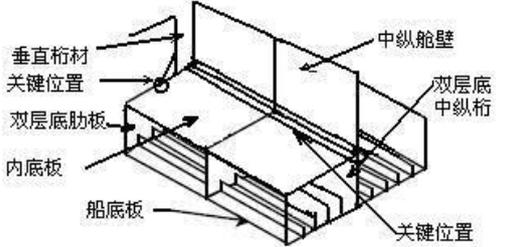
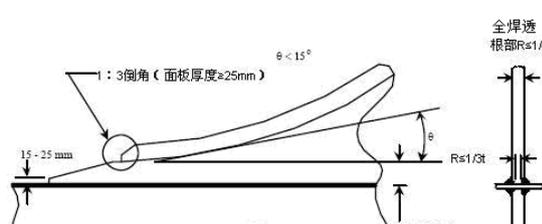
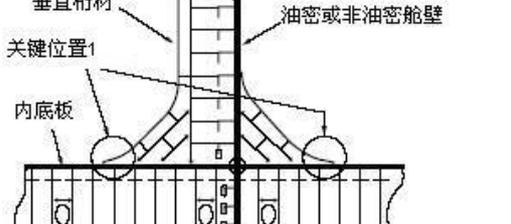
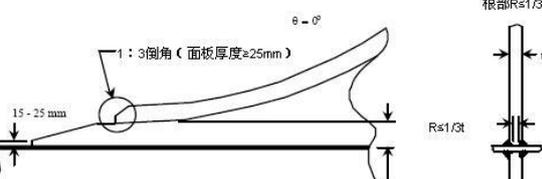
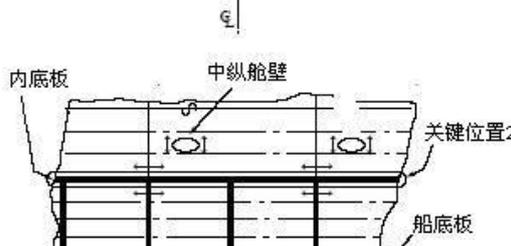
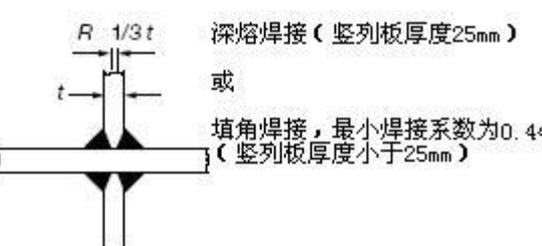
关键位置：边货舱制荡横舱壁端肘板趾端与双壳内横隔板的连接（中间货舱设置横撑材）

关键区域		结构节点
 <p>制荡横舱壁</p> <p>舷侧外板</p> <p>舷侧纵桁</p> <p>关键位置</p>		<p>(A) 全焊透的软趾节点</p>  <p>(B) 深熔焊的平行趾端节点</p>  <p>(C) 去除扇形孔，设置缝隙式补板</p>  <p>全焊透 根部<math>R \leq 1/3t</math></p> <p>深熔焊接， 根部<math>R \leq 1/3t</math></p> <p>无开孔</p> <p>软趾或平行趾端</p> <p>缝隙式补板或嵌板</p>
<p>关键位置</p>  <p>内壳纵舱壁</p> <p>舷侧纵桁</p> <p>横隔板</p> <p>关键位置</p> <p>制荡横舱壁</p> <p>舷侧外板</p>		<p>说明</p> <p>应设有 (A) 全焊透的软趾节点,或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。(C) 去除扇形孔，设置缝隙式补板。</p>
结构节点	<p>适用结构</p> <p>边货舱制荡横舱壁端肘板趾端与双壳内横隔板的连接处。</p>	
	<p>建造公差</p> <p>肘板趾端厚度中心和横隔板厚度中心之间的名义距离应不超过内壳纵舱壁厚度的 1/3。</p>	
<p>焊接要求</p> <p>深熔焊（肘板趾端与内壳纵舱壁的连接）；最小焊接系数为 0.44 的填角焊（肘板趾端处横隔板与内壳纵舱壁的连接）；全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行，或者按照图纸审批验船师所同意的范围；</p> <p>制荡横舱壁端肘板趾端与内壳纵舱壁的焊接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>在去除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔，在完成内壳纵舱壁纵骨与内壳纵舱壁的连接焊接后应予以焊接封闭，用相同材质、相同厚度的缝隙式补板或嵌板对图示 * 处进行全熔透焊接来代替原采用搭接补板的角接；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>		

区域：纵舱壁 关键位置：纵舱壁上的垂直桁材端肘板趾端与双层底肋板的连接		
关键区域 	结构节点 (A) 全焊透的软趾节点 	
关键位置 	(B) 深熔焊的平行趾端节点 	
	(C) 去除扇形孔，设置缝隙式补板 	
结构节点	适用结构 纵舱壁上的垂直桁材端肘板趾端与双层底肋板的连接处。	说明 应设有 (A) 全焊透的软趾节点,或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。(C) 去除扇形孔，设置缝隙式补板。
建造公差	肘板趾端厚度和肋板厚度中心之间的名义距离应不超过内底板厚度的 1/3。	
焊接要求	深熔焊（肘板趾端与内底板的连接）；最小焊接系数为 0.44 的填角焊（肘板趾端处肋板与内底板的连接）；全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行，或者按照图纸审批验船师所同意的范围；垂直桁材端肘板趾端与内底板的焊接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；在去除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔，在完成内底纵骨与内底板的连续焊接后应予以焊接封闭，用相同材质、相同厚度的缝隙式补板或嵌板对图示 * 处进行全熔透焊接来代替原采用搭接补板的角接；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

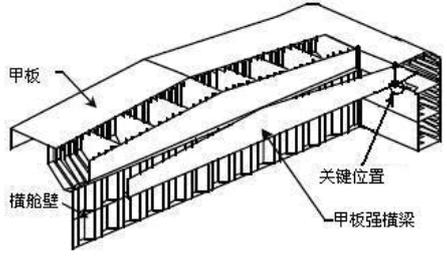
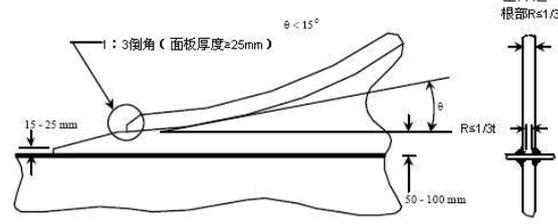
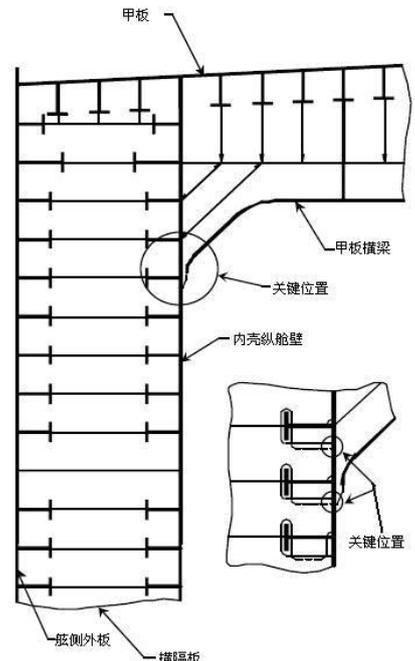
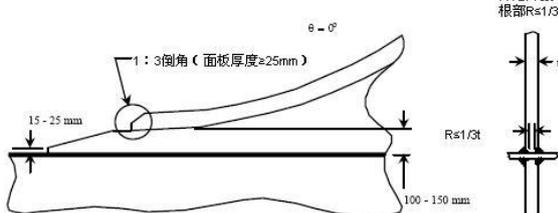
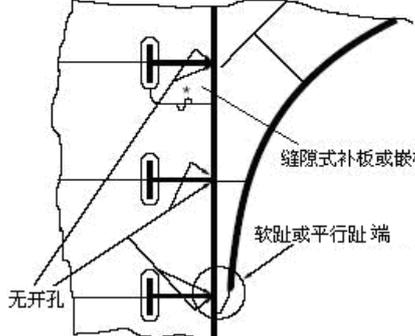
区域：纵舱壁

关键位置：中纵舱壁上的垂直桁材端肘板趾端与双层底肋板的连接；中纵舱壁下列板及其下方对应的双层底中纵桁与内底板的连接

关键区域	结构节点
	<p>(A) 全焊透的软趾节点</p> 
<p>关键位置</p>	
	<p>(B) 深熔焊的平行趾端节点</p> 
	<p>(C) 深熔焊接或填角焊接</p> 
<p>适用结构</p>	<p>说明</p>
<p>中纵舱壁上的垂直桁材端肘板趾端与双层底肋板的连接处 (位置 1)。</p>	<p>应设有 (A) 全焊透的软趾节点,或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。</p>
<p>中纵舱壁下列板及其下方对应的双层底中纵桁与内底板的连接处 (位置 2)。</p>	<p>应设有(C) 深熔焊接或填角焊接。</p>
<p>建造公差</p>	<p>对接构件厚度中心之间的名义距离应不超过构件厚度的 1/3 (位置 1 和位置 2)。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>深熔焊 (位置 1 处肘板趾端的连接和邻接构件厚度<math>\geq 25\text{mm}</math> 的地方); 最小焊接系数为 0.44 的填角焊 (位置 1 肘板趾端处肋板的连接和位置 2 处邻接构件厚度<math>&lt; 25\text{mm}</math> 的地方); 全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行, 或者按照图纸审批验船师所同意的范围; 垂直桁材端肘板趾端与内底板的焊接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑, 不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷; 在去除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔, 在完成内底纵骨与内底板的连续焊接后应予以焊接封闭, 用相同材质、相同厚度的缝隙式补板或嵌板全熔透焊接来代替原采用搭接补板的角接; 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

区域：甲板

关键位置：甲板强横梁端肘板趾端与双壳内横隔板的连接（中间货舱或边货舱设置横撑材）

关键区域		结构节点
 <p>甲板 横舱壁 关键位置 甲板强横梁</p>		<p>(A) 全焊透的软趾节点</p>  <p>全焊透 根部<math>R \approx 1/3t</math></p>
<p>关键位置</p>  <p>甲板 甲板横梁 关键位置 内壳纵舱壁 舷侧外板 横隔板</p>		<p>(B) 深熔焊的平行趾端节点</p>  <p>深熔焊接， 根部<math>R \approx 1/3t</math></p>
		<p>(C) 去除扇形孔，设置缝隙式补板</p>  <p>无开孔 缝隙式补板或嵌板 软趾或平行趾端</p>
结构节点	适用结构	说明
	甲板强横梁端肘板趾端与双壳内横隔板的连接处。	应设有 (A) 全焊透的软趾节点,或者 (B) 深熔焊的平行趾端节点。(C) 去除扇形孔，设置缝隙式补板。
建造公差	肘板趾端厚度和横隔板厚度中心之间的名义距离应不超过内壳纵舱壁厚度的 1/3。	
焊接要求	<p>深熔焊（肘板趾端与内壳纵舱壁的连接）；最小焊接系数为 0.44 的填角焊（肘板趾端处横隔板与内壳纵舱壁的连接）；全熔透的程度应按照设计师要求的范围进行，或者按照图纸审批验船师所同意的范围；</p> <p>强横梁端肘板趾端与双壳内横隔板的焊接应进行包角焊。包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>在去除开孔的地方设置一合适形状的小扇形孔，在完成内壳纵舱壁纵骨与内壳纵舱壁的连接焊接后应予以焊接封闭，用相同材质、相同厚度的缝隙式补板或嵌板对图示 * 处进行全熔透焊接来代替原采用搭接补板的角接；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

集装箱船结构节点

表 1

区域：双层底

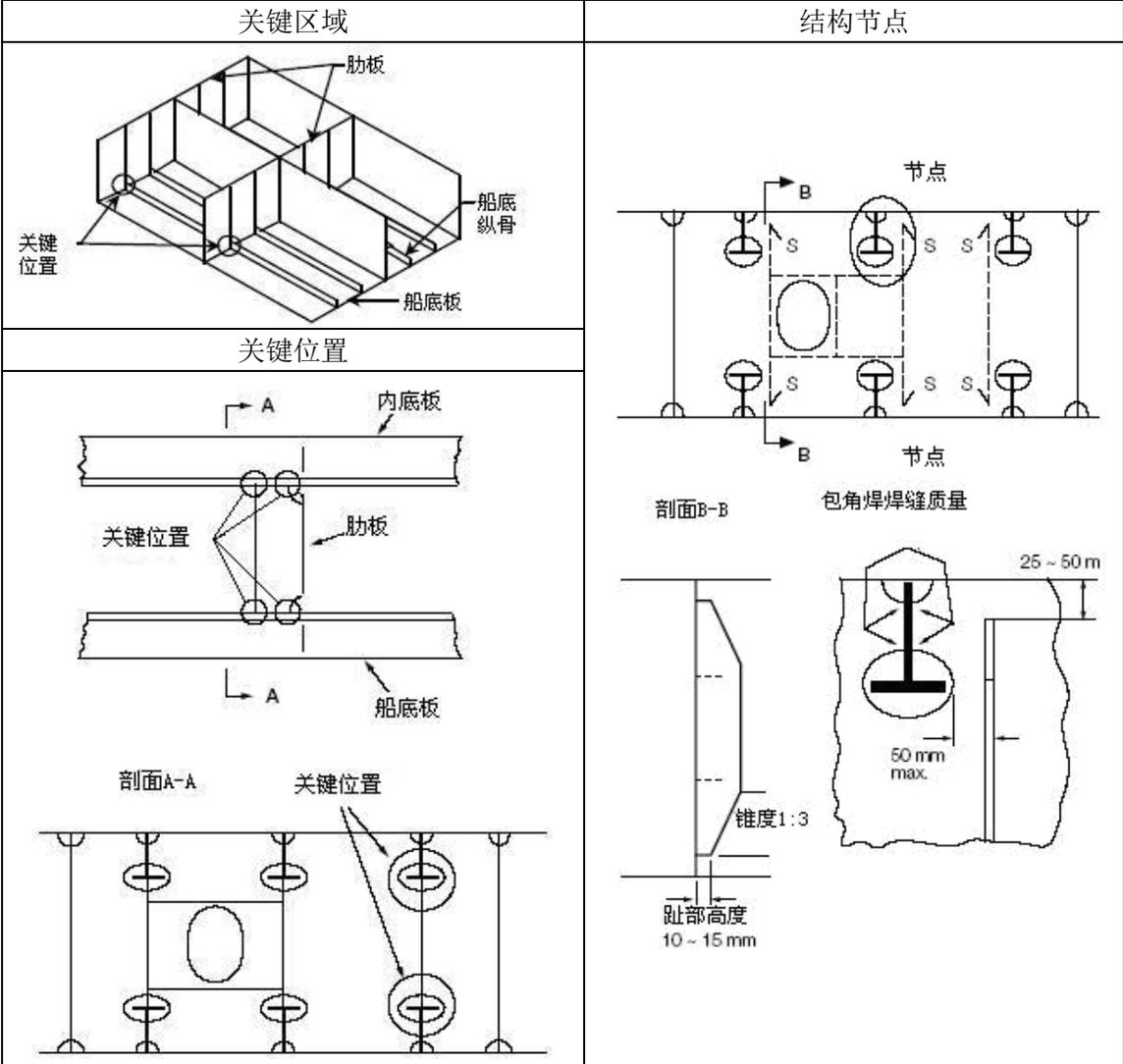
关键位置：船底纵骨、内底纵骨与肋板垂直加强筋的连接

关键区域		结构节点
		<p>(A) 软踵</p>
<p>关键位置</p>		<p>(B) 软趾和软踵</p>
		<p>(C) 软趾和背面软肘板</p>
结构节点	适用结构	说明
	船底纵骨、内底纵骨与肋板垂直加强筋的连接处。	应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
建造公差	确保纵骨腹板和肋板加强筋以及背肘板（如有时）之间良好的对中。对结构节点 (B) 和 (C) 加强筋和肋板对中，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。如果使用软踵，加强筋最小宽度处的剩余横剖面面积应按照国家规范要求核算。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离加强筋/肋板踵部和趾端； 加强筋以及背面软肘板的踵部、趾端与纵骨连接处应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；	

其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。

集装箱船结构节点 表 2

区域：双层底  
 关键位置：船底纵骨、内底纵骨与肋板(含有偏移加强筋) 加强筋的连接



结构节点	适用结构	说明
	船底纵骨、内底纵骨与肋板加强筋的连接处。	偏移加强筋可消除纵骨与肋板加强筋之间连接而产生的应力集中。采用 45° 的切割角且有足够间隙进行焊接封闭，这样可避免扇形孔。偏移加强筋也可用于其他双壳结构，如边舱结构。若存在集中载荷，应予以特别考虑。

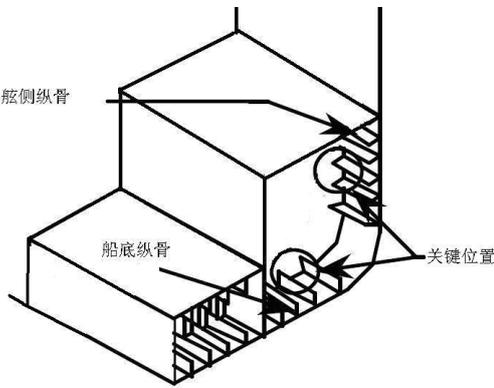
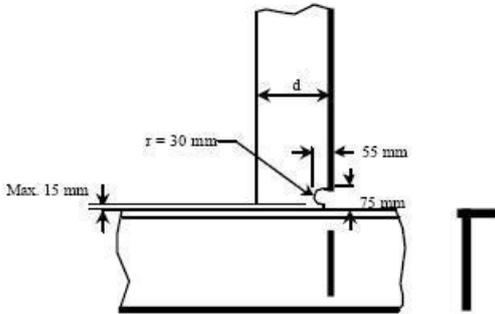
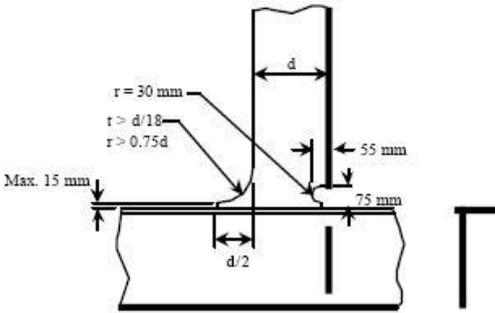
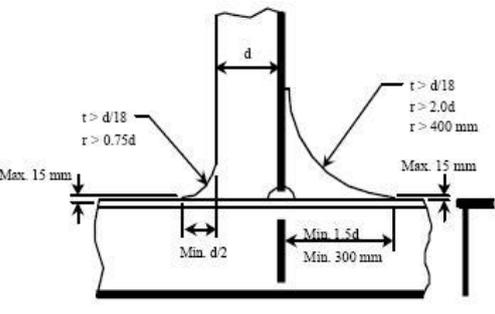
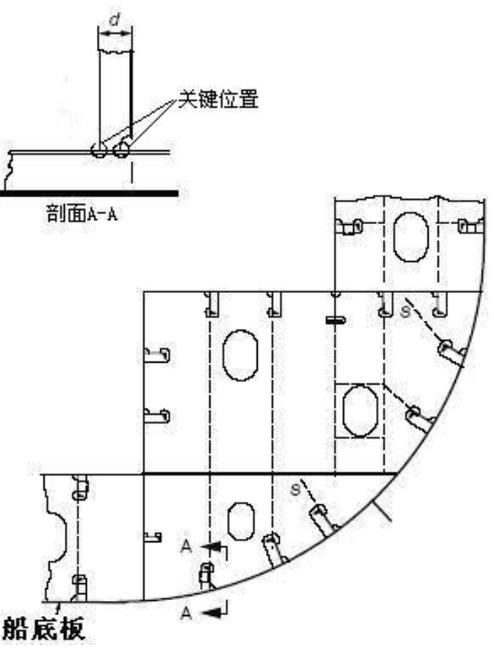
建造公差	偏移加强筋与纵向构件开孔之间的距离不小于 50mm。
------	----------------------------

焊接要求	应注意偏移加强筋端部和腹板/肋板连接处的焊缝质量；端部包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。
------	---



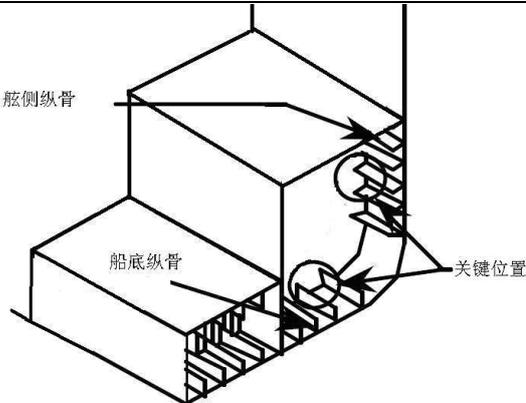
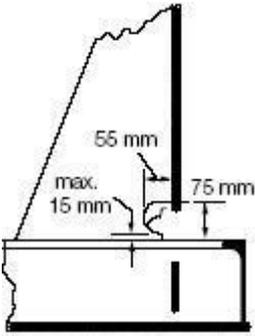
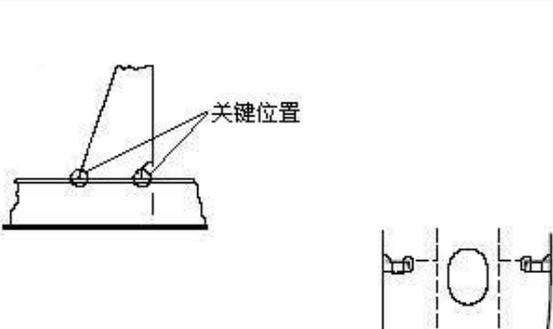
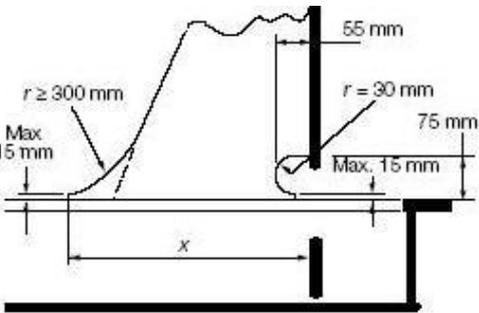
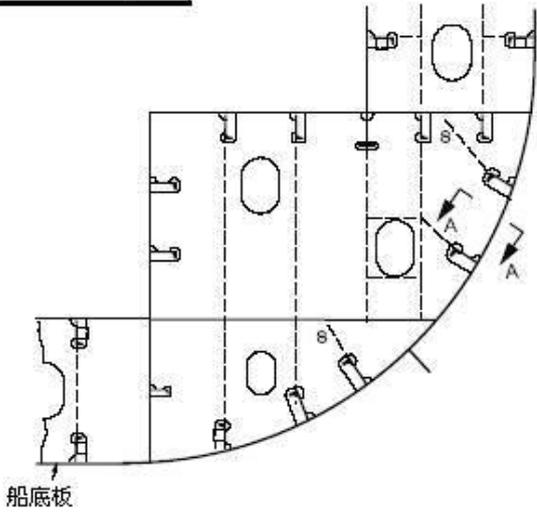
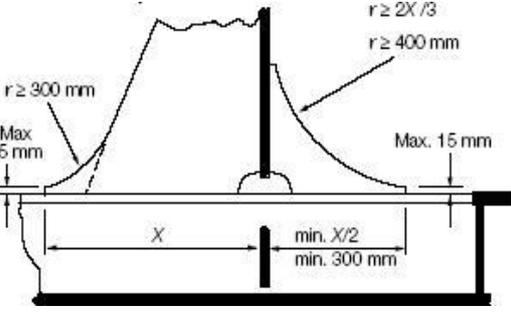
区域：底边舱

关键位置：底边舱横隔板加强筋与船底纵骨、舭部纵骨以及舷侧纵骨的连接

关键区域		结构节点
		<p>(A) 软踵</p>  <p>(B) 软趾和软踵</p>  <p>(C) 软趾和背面软肘板</p> 
关键位置		
		
结构节点	适用结构	说明
	底边舱横隔板加强筋与船底纵骨、舭部纵骨以及舷侧纵骨的连接处。	应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
建造公差	确保纵骨腹板、横隔板加强筋和背面肘板（如设有）之间的良好对中。对结构节点 (B) 和 (C) 加强筋和肘板对中，可参照《钢质海船入级规范》第 9 篇第 12 章的相关要求。如果使用软踵，加强筋最小宽度处的剩余横剖面面积应按照规范要求进行核算。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离踵部和趾端； 加强筋以及肘板的踵部和趾端与纵骨连接处应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

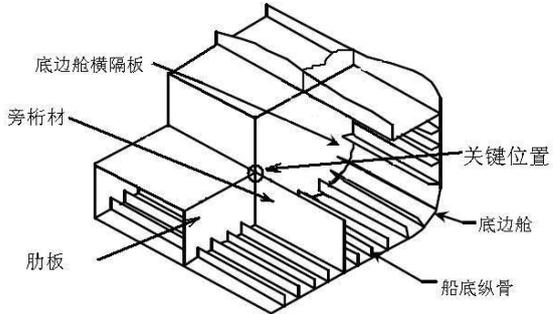
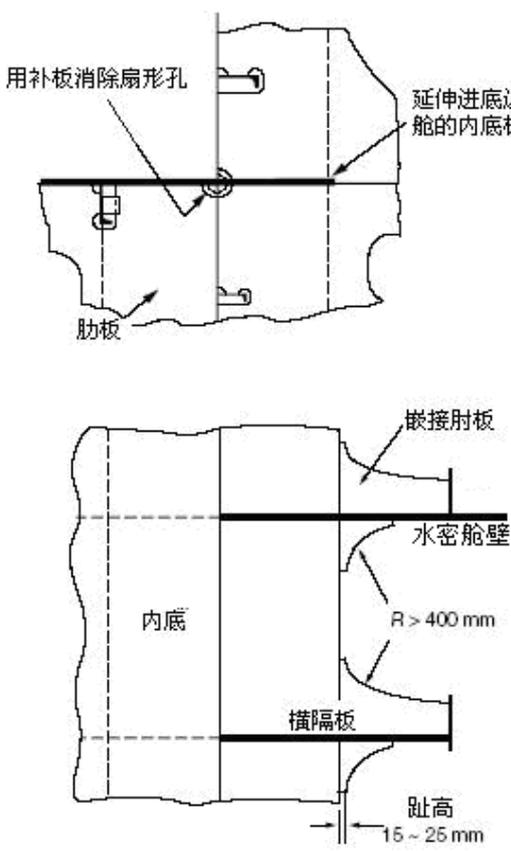
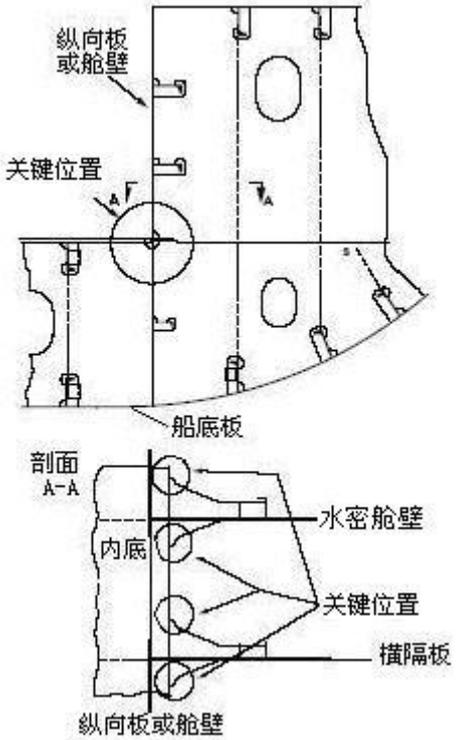
区域：底边舱

关键位置：底边舱横隔板防倾肘板与船底纵骨、舳部纵骨以及舷侧纵骨的连接

关键区域		结构节点
		(A) 软踵 
<p>关键位置</p> 		(B) 软趾和软踵 
 <p>船底板</p>		(C) 软趾和背面软肘板 
结构节点	适用结构	说明
	底边舱横隔板防倾肘板与船底纵骨、舳部纵骨以及舷侧纵骨的连接处。	应设有 (C) 软趾和背面软肘板。
建造公差	确保纵向强腹板、横隔板防倾肘板和背面肘板（如设有）之间的良好对中。对于推荐的扶强材和肘板对中，参加第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点尽可能远离踵部和趾端； 横隔板防倾肘板以及背面软肘板的踵部和趾端与纵骨的连接应进行包角焊接，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

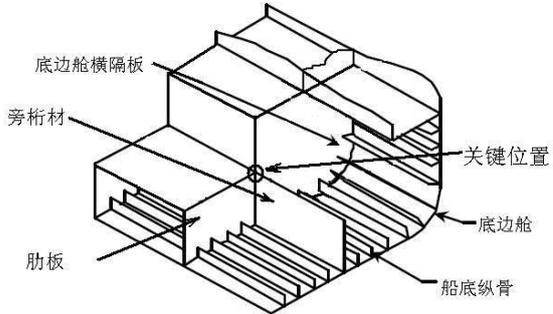
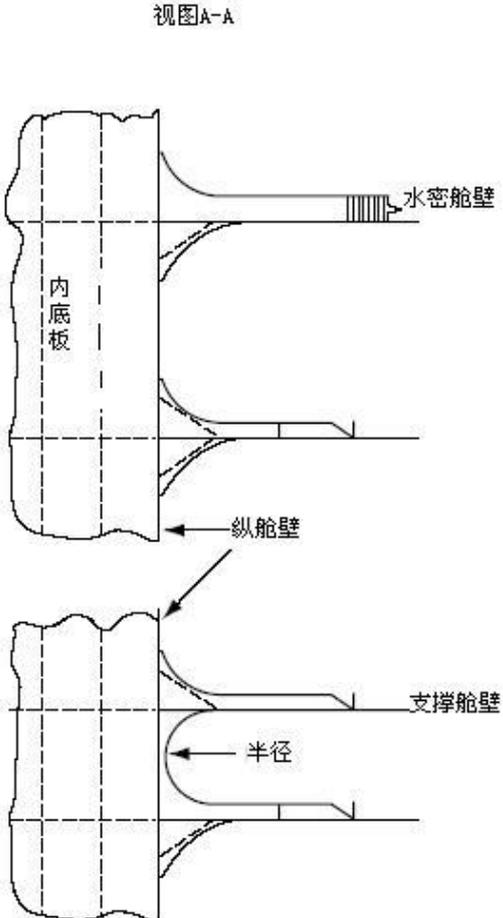
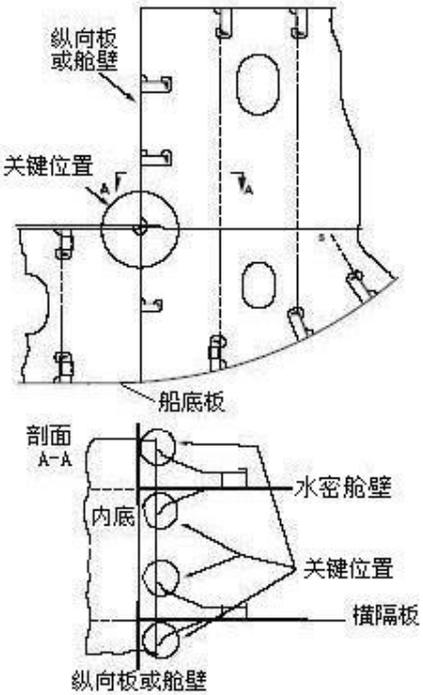
区域：底边舱

关键位置：肋板处旁桁材与内底板的连接

关键区域		结构节点
		
关键位置		
		
结构节点	适用结构	说明
	肋板处旁桁材与内底板的连接处。	去除与内底延伸同一直线的底边舱折角嵌接肘板处的扇形孔，以减小疲劳热点应力。
建造公差	确保内底板和背肘板间良好的对中。	
焊接要求	旁桁材与内底板、肋板与旁桁材、艏部横隔板与旁桁材之间进行填角焊接，填角焊使用的焊接系数为 0.44； 完成旁桁材与内底板的连续焊接后，使用相同材料和相同厚度的水密补板进行全熔透焊接来封闭扇形孔； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

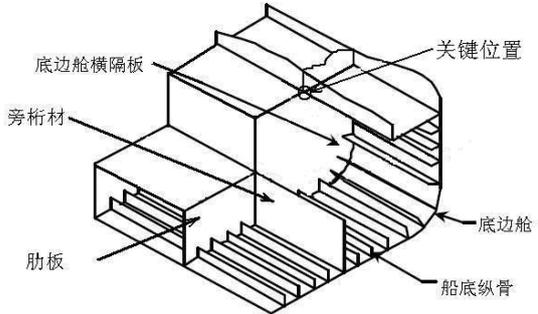
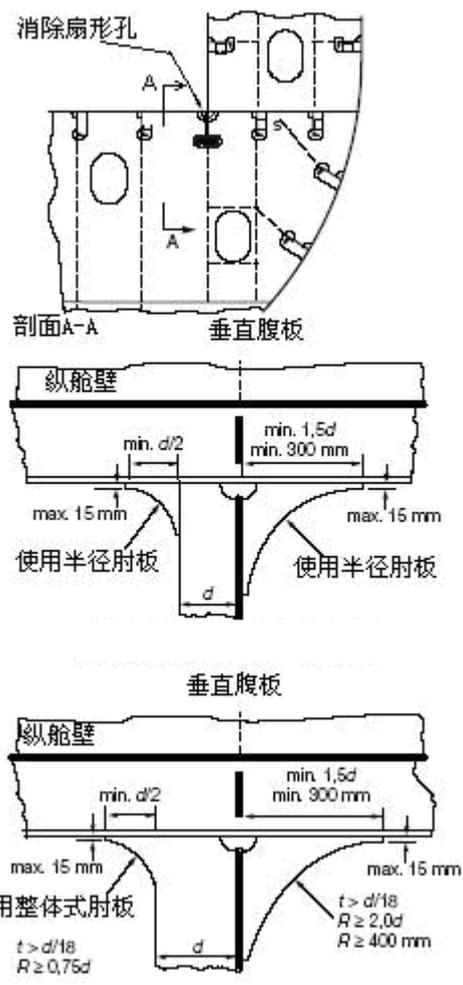
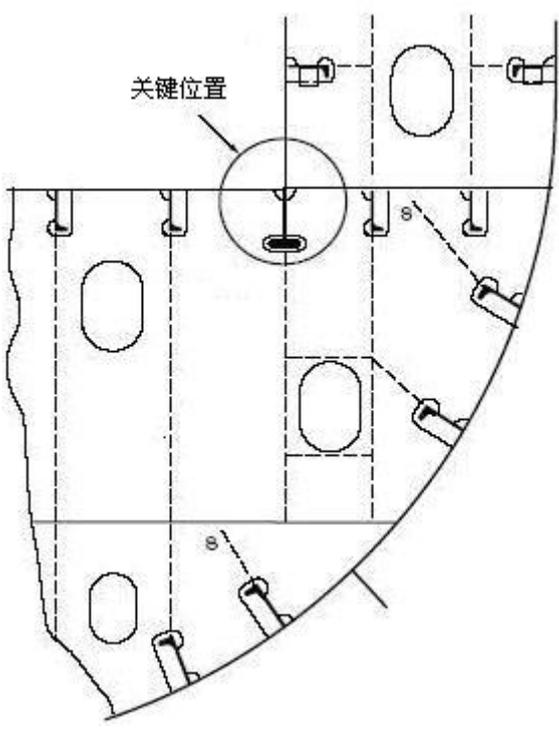
区域：底边舱

关键位置：肋板处旁桁材与内底板的连接

关键区域		结构节点
		<p>视图A-A</p> 
关键位置		
		
结构节点	适用结构	说明
	肋板处旁桁材与内底板的连接处。	去除与内底延伸同一直线的底边舱角隅嵌接肘板处的扇形孔，以减小疲劳热点应力。
建造公差	确保内底板和背肘板间良好的对中。	
焊接要求	旁桁材与内底板、肋板与旁桁材、舭部横隔板与旁桁材之间进行填角焊接，填角焊使用的焊接系数取为 0.44； 完成旁桁材与内底板的连续焊接后，使用相同材料和相同厚度的水密补板进行全熔透焊接来封闭小扇形孔； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

区域：底边舱

关键位置：内壳纵舱壁与底边舱顶板以及折角处横隔板的连接

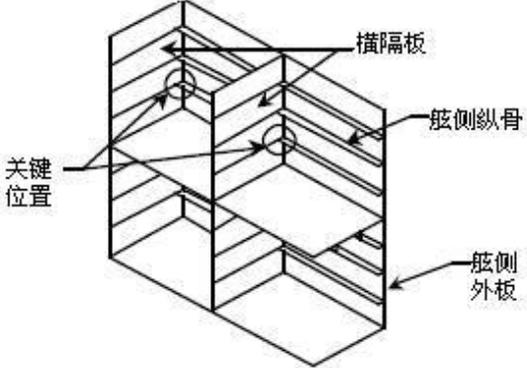
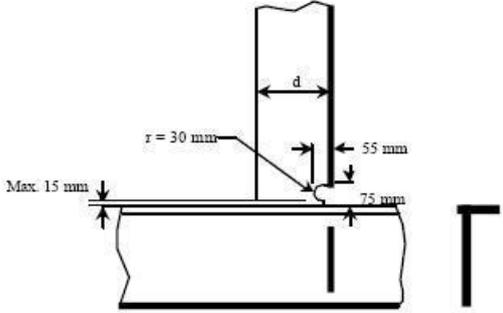
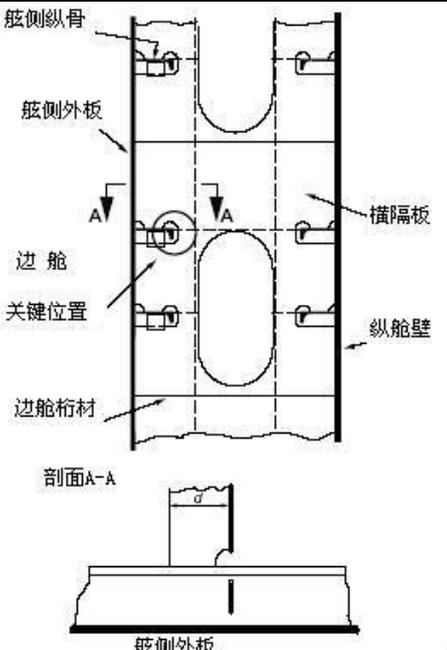
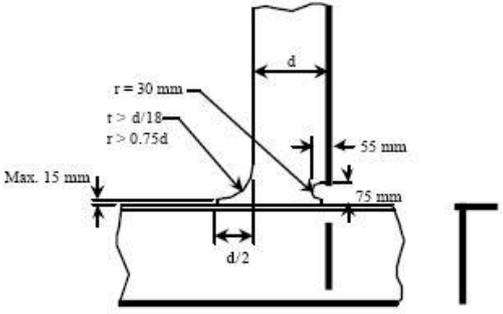
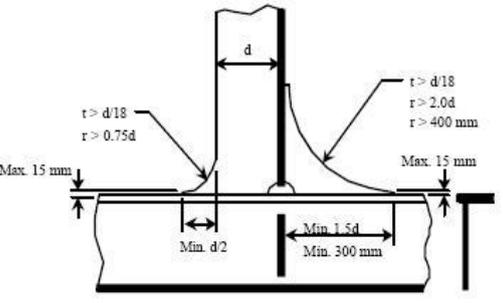
关键区域		结构节点
		
<p>关键位置</p> 		
结构节点	适用结构	说明
	内壳纵舱壁与底边舱顶板以及折角处横隔板的连接处。	消除折角处的扇形孔，通过增加下面的加强筋和支撑肘板对舷侧纵舱壁以下加强支持，以减少外部循环水动压力、货物惯性载荷和船体梁整体装载引起的应力峰值和范围。
建造公差	确保纵舱壁和背面肘板之间的良好对中。如果使用了软踵，加强筋最小宽度的剩余横剖面应按照规定要求进行验证。	
焊接要求	纵舱壁和背面肘板到底边舱顶板的连接采用填角焊，填角焊使用的焊接系数取为 0.44；完成折角附近板材的焊接后，用焊接将小切口封闭；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

区域：底边舱

关键位置：内壳纵舱壁与底边舱顶板以及折角处横隔板的连接

关键区域		结构节点
		<p>设有纵向加强筋</p> <p>无纵向加强筋</p>
关键位置		
结构节点	适用结构	说明
	内壳纵舱壁与底边舱顶板以及折角处横隔板的连接处。	去除折角处的扇形孔，增大纵舱壁下加强筋的尺寸，增设支撑肘板，减小关键位置处的热点应力。
建造公差	确保纵舱壁和背面肘板之间的对中。如果使用了软踵，穿过强腹板最小宽度的剩余横剖面应按照规定要求进行验证。	
焊接要求	纵舱壁到底边舱顶板的连接采用填角焊，填角焊的焊接系数为 0.44； 折角附近板材焊接完成后，用焊接将小切口封闭； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

区域：边舱/甲板下通道  
 关键位置：横隔板上水平扁钢加强筋与边舱内舷侧纵骨的踵部和趾端连接（基线到装载水线略上的区域）

关键区域	结构节点	
	<p>(A) 软踵</p> 	
<p>关键位置</p> 	<p>(B) 软趾和软踵</p>  <p>(C) 软趾和背面软肘板</p> 	
<p>结构节点</p>	<p>适用结构</p> <p>横隔板上水平扁钢加强筋与边舱内舷侧纵骨的踵部和趾端连接处。</p>	<p>说明</p> <p>软踵或软趾和软踵节点或具有软背面肘板可减少关键位置的疲劳热点应力。</p>
<p>建造公差</p>	<p>确保纵骨腹板、横隔板加强筋和背面肘板（如设有）之间的良好对中。加强筋和肘板对标准可参见第 9 篇第 12 章的相关要求。如果使用了软踵，穿过强腹板最小宽度的剩余横剖面应按照规范要求进行验证。</p>	
<p>焊接要求</p>	<p>焊接的引弧点和熄弧点要远离加强筋以及背面软肘板踵部和趾端；              水平扁钢加强筋以及背面软肘板的踵部和趾端与纵骨的连接应进行包角焊接，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；              其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

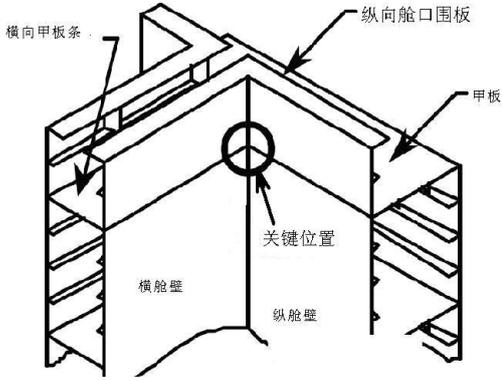
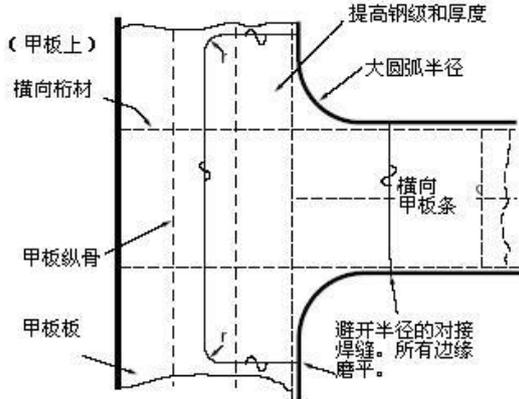
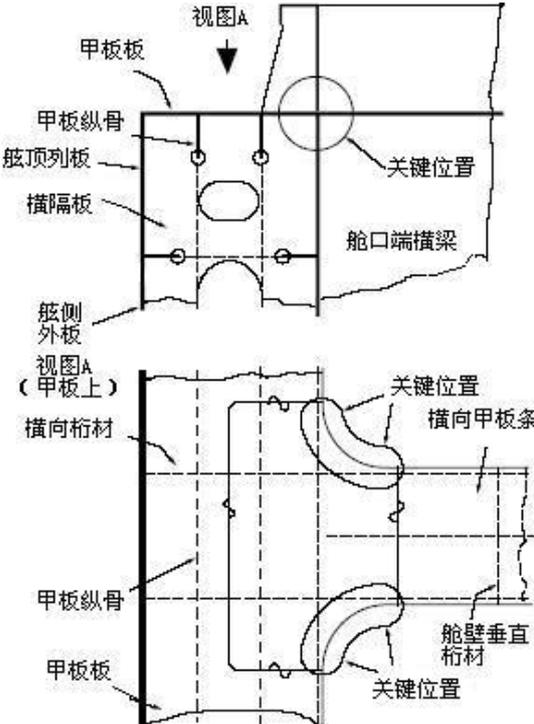
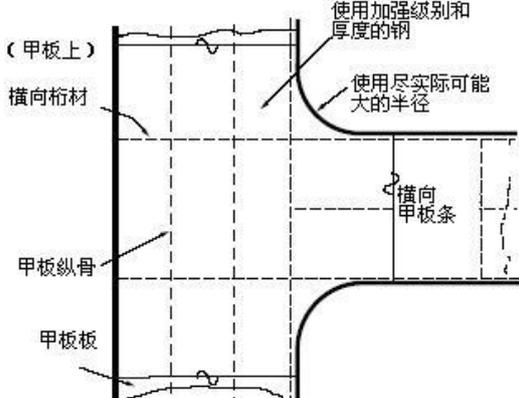
区域：边舱/甲板下通道  
 关键位置：横隔板上水平防倾肘板与舷侧纵骨的踵部和趾端连接（基线到装载水准线以上的连接）

关键区域		结构节点
		<p>(A) 软踵</p>
<p>关键位置</p>		<p>(B) 软趾和软踵</p>
		<p>(C) 软趾和背面软肘板</p>
结构节点	适用结构	说明
	横隔板上水平防倾肘板与舷侧纵骨的踵部和趾端连接处。	软踵或软趾和软踵节点或具有软背面肘板的对称软趾能用于减少外部循环水动压力和船体梁装载引起的应力峰值和范围。
建造公差	确保防倾肘板、背面肘板和旁桁材腹板之间良好对中。参见第 9 篇第 12 章的相关要求。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离防倾肘板和背面肘板的踵部和趾端； 加强筋、背肘板踵部和趾端与纵骨的连接应进行包角焊接。包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；	

其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。

集装箱船结构节点 表 11

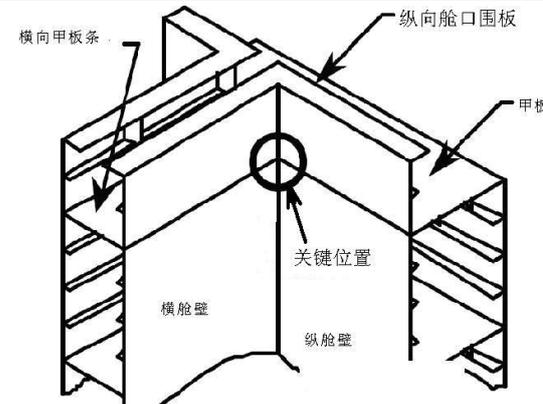
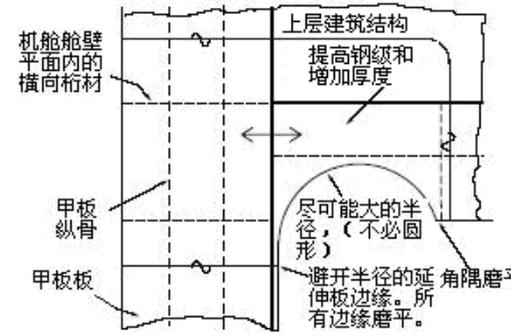
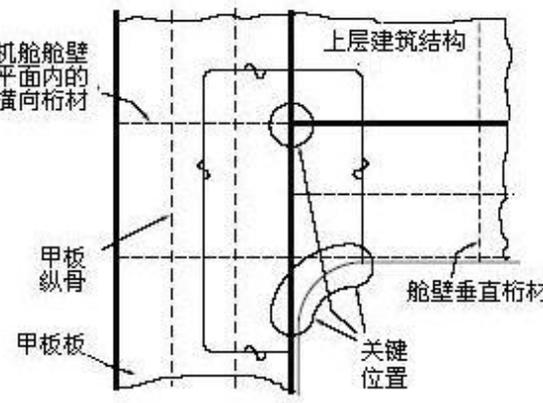
区域：甲板、舱口角隅和舱口间  
 关键位置：货舱区域舱口角隅处的甲板板

关键区域	结构节点						
	<p>(A) 采用大半径甲板角隅嵌板</p> 						
<p>关键位置</p> 	<p>(B) 延伸嵌板</p> 						
<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="225 1653 312 1832">结构节点</th> <th data-bbox="312 1653 815 1697">适用结构</th> <th data-bbox="815 1653 1369 1697">说明</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="225 1697 312 1832"></td> <td data-bbox="312 1697 815 1832">货舱区域舱口角隅处的甲板板。</td> <td data-bbox="815 1697 1369 1832">使用加强钢级和厚度的嵌板。应注意不同厚度板间的过渡。见《钢质海船入级规范》第2篇第2章舱口角要求。</td> </tr> </tbody> </table>	结构节点	适用结构	说明		货舱区域舱口角隅处的甲板板。	使用加强钢级和厚度的嵌板。应注意不同厚度板间的过渡。见《钢质海船入级规范》第2篇第2章舱口角要求。	<p>建造公差 保证舱口端横梁和顶边舱内支持之间的良好对中。应注意嵌板的削斜节点。通过改变角隅节点来减少应力集中和使用 EH 钢级可避免嵌板。</p> <p>焊接要求 焊接的引弧点和熄弧点要远离嵌板角隅；角隅嵌板与上甲板板的焊接缝过渡应均匀、光滑，并注意对角隅的保护；</p>
结构节点	适用结构	说明					
	货舱区域舱口角隅处的甲板板。	使用加强钢级和厚度的嵌板。应注意不同厚度板间的过渡。见《钢质海船入级规范》第2篇第2章舱口角要求。					

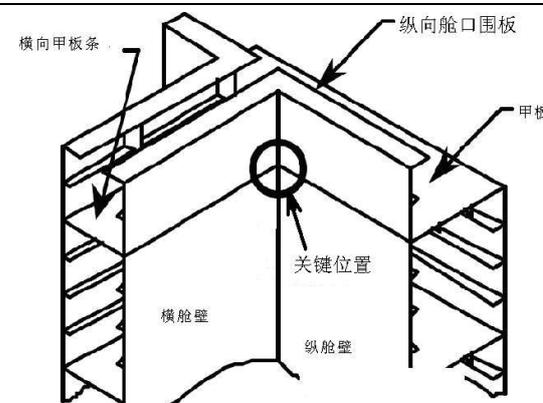
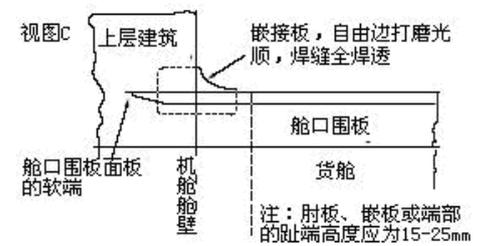
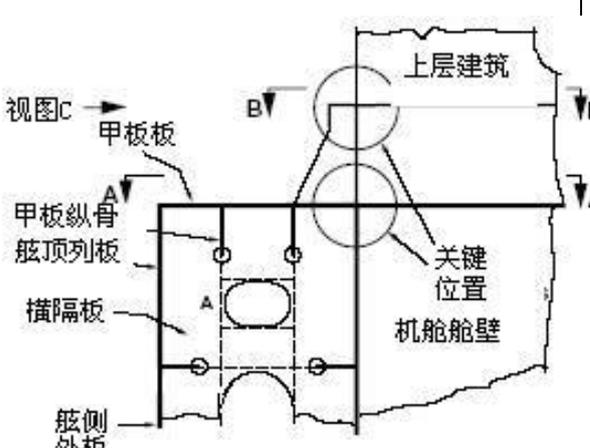
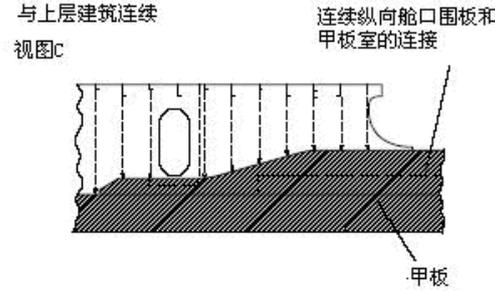
	嵌接板自由边和焊缝打磨光滑，无切口； 其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。
--	--

集装箱船结构节点 表 12

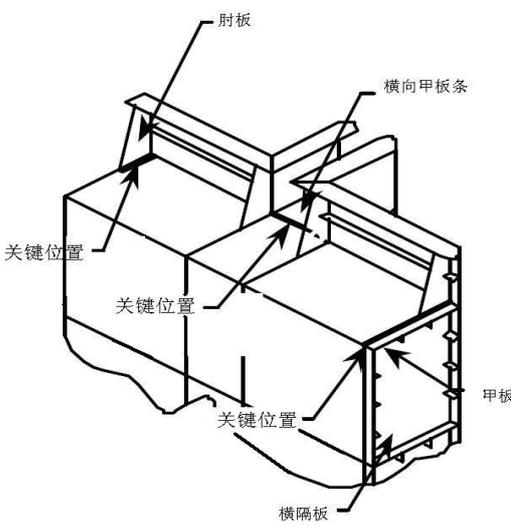
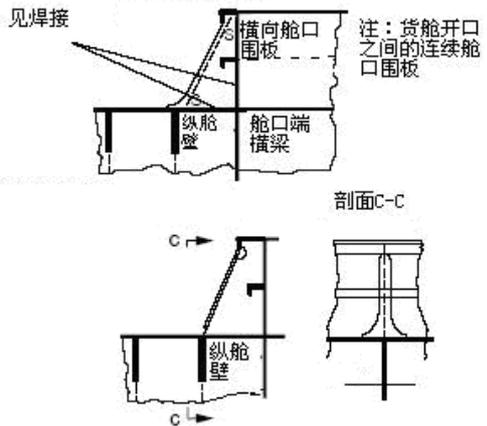
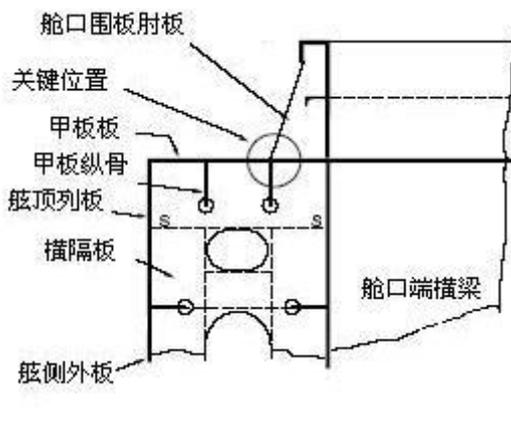
区域：甲板、舱口角隅和舱口间  
关键位置：靠近上层建筑的舱口角隅处的甲板板以及舱口围板与上层建筑的交点

	关键区域	结构节点
		<p>延伸甲板角隅嵌板到舷侧外板，和/或采用大半径角隅</p> 
	<p style="text-align: center;">关键位置</p> 	
结构节点	适用结构	说明
	靠近上层建筑的舱口角隅处的甲板板以及舱口围板与上层建筑的交点处。	提高钢级和厚度增加的嵌入板。应设置半径角隅减少应力集中。应注意不同厚度板间的过渡。见《钢质海船入级规范》第2篇第2章舱口角要求。与上层建筑连接肘板的边缘要打磨光滑，连接处上层建筑侧壁提高钢级并增大厚度。
建造公差	确保附近主结构支持件之间的良好对中。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离肘板趾端或角隅；肘板的趾端与上甲板的连接处应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。	

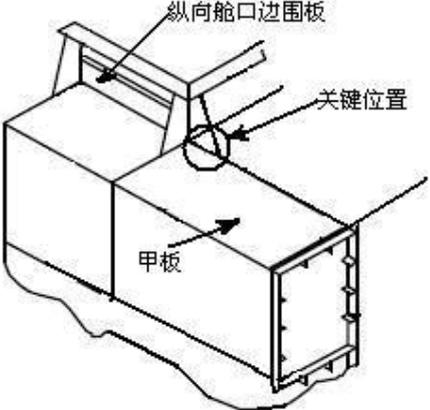
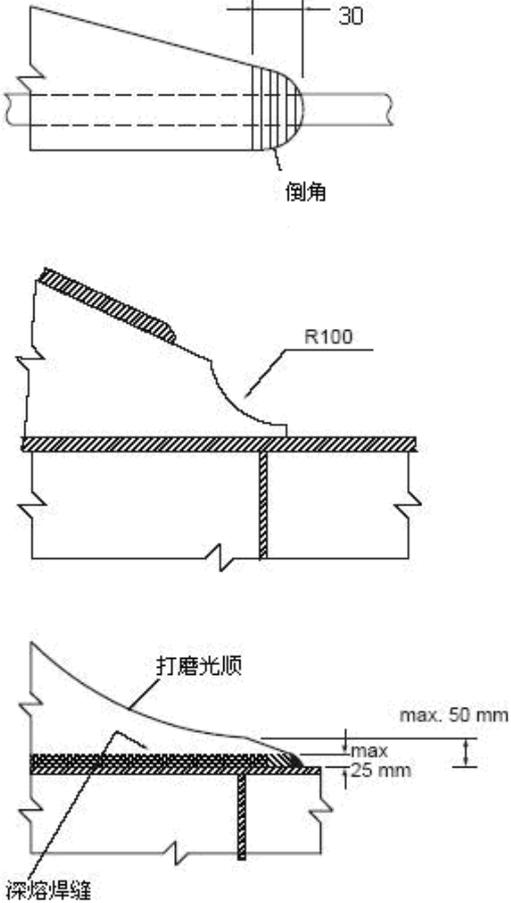
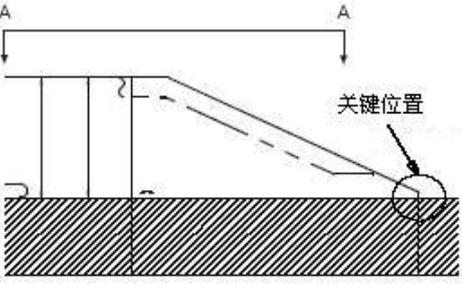
区域：甲板、舱口角隅和舱口间  
 关键位置：靠近上层建筑的舱口角隅处的甲板板以及舱口围板与上层建筑的连接点

关键区域		结构节点
		
<p>关键位置</p> 		
结构节点	适用结构	说明
	靠近上层建筑的舱口角隅处的甲板板以及舱口围板与上层建筑的连接处。	使用提高钢级和增大厚度的嵌接板。应设置半径角隅减少应力集中。保证尽可能逐渐过渡或削斜到较薄板。见《钢质海船入级规范》第2篇第2章舱口角要求。与上层建筑连接的肘板边缘要打磨光滑，上层建筑舷侧使用加强的钢级和厚度。
建造公差	确保附近主结构支持件之间的良好对中。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离肘板趾端或角隅； 肘板的趾端与上甲板的连接处、镶嵌板趾端与上层建筑的连接处应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第2篇第1章第4节的要求。	

区域：甲板、舱口角隅和舱口间  
 关键位置：连续围板支撑肘板与甲板板的趾端连接

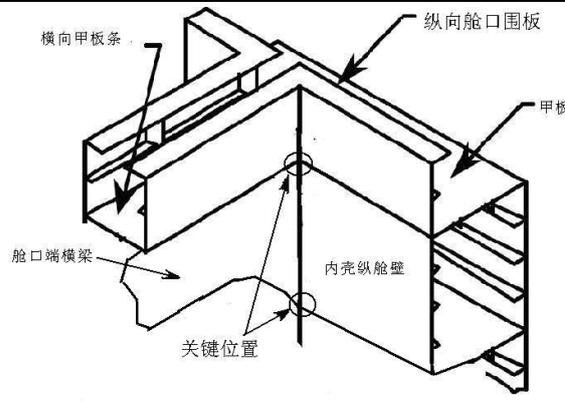
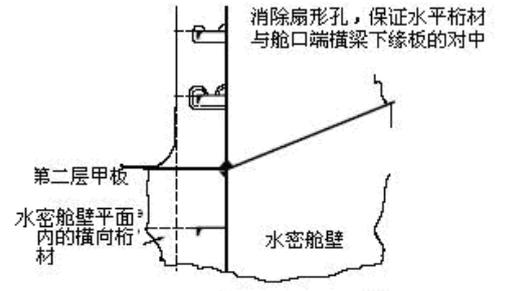
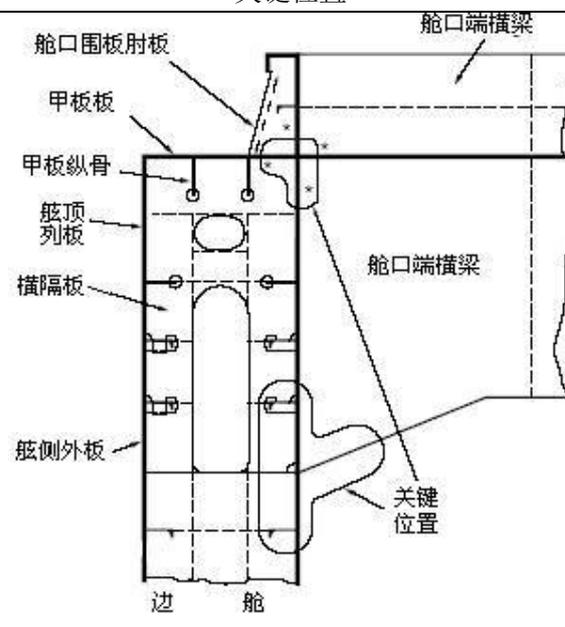
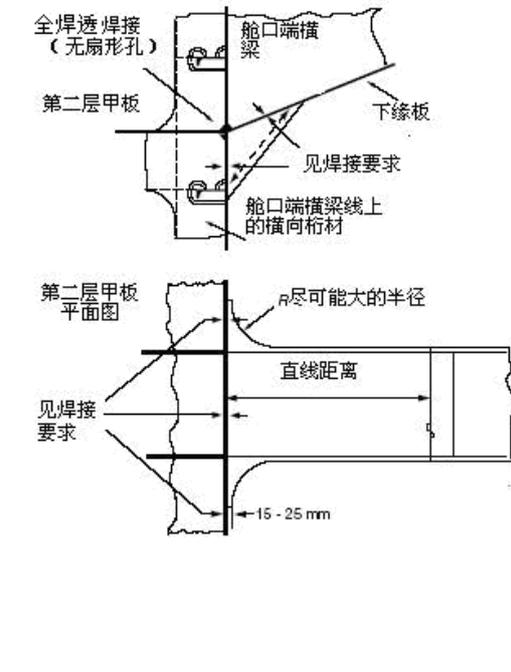
关键区域		结构节点
		
关键位置		
		
	适用结构	说明
结构节点	连续舱口围板支撑肘板与甲板板的趾端连接处。	延伸舱口围板的横向肘板，提供整体式软趾，使应力平滑过渡到甲板。
建造公差	确保支撑肘板和支持结构之间的良好对中，对中偏差不应超过 1/3 较薄板的板厚(从板厚中心量取)。	
焊接要求	焊接的引弧点和熄弧点要远离肘板趾端或角隅；支撑肘板趾端与甲板板的连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷。同时应注意位于横舱壁位置的舱口围板支撑肘板与舱口围板的焊接应采用深熔或全焊透角焊；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

区域：舱口围板  
 关键位置：纵向舱口围板的端部连接

关键区域	结构节点	
 <p>纵向舱口边围板                  关键位置                  甲板</p>	 <p>30                  倒角                  R100                  打磨光滑                  max. 50 mm                  max 25 mm                  深熔焊缝</p>	
<p>关键位置</p>		
 <p>视图A-A</p>		
<p>结构节点</p>	<p>适用结构</p> <p>纵向舱口边围板前后端的肘板趾端连接处。</p>	<p>说明</p> <p>延伸舱口围板并采用具有圆弧形倒角的趾端，以减少热点处的应力集中。</p>
<p>建造公差</p>	<p>确保围板端肘板与甲板下纵向构件（舱壁或桁材或纵骨）的良好对中。</p>	
<p>焊接要求</p>	<p>焊接的引弧点和熄弧点要远离趾端；                  纵向舱口边围板前后端的趾端与甲板的连接应进行包角焊包。角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易引起应力集中的焊接缺陷。且趾端处 300mm 范围内应深熔焊或全焊透。全焊透焊缝表面和围板端部的自由边应打磨光滑；                  其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

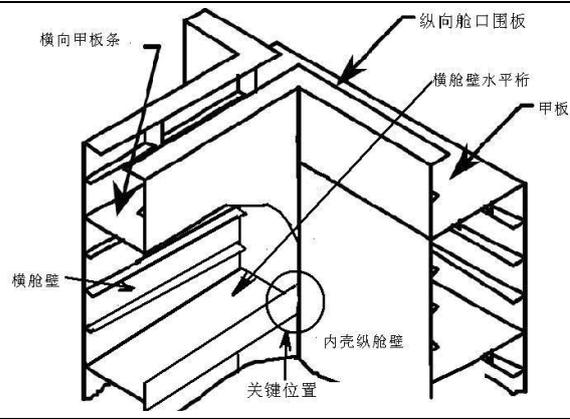
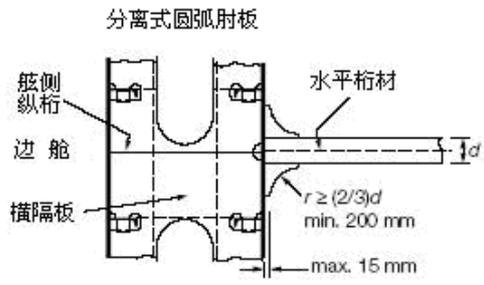
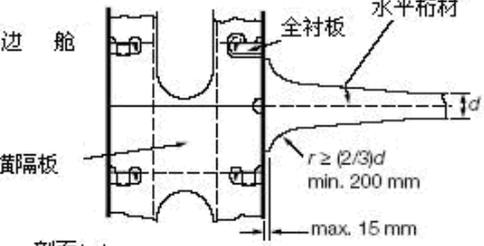
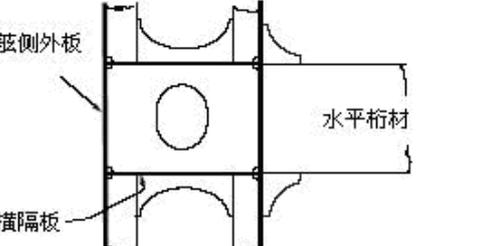
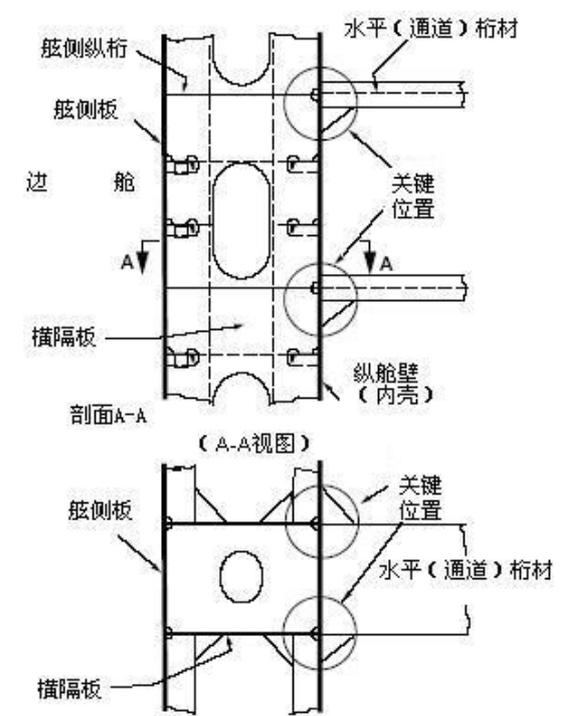
区域：水密和非水密舱壁

关键位置：舱口端横梁与内壳（纵舱壁）连接端部(包括第 2 甲板横向走道的连接)

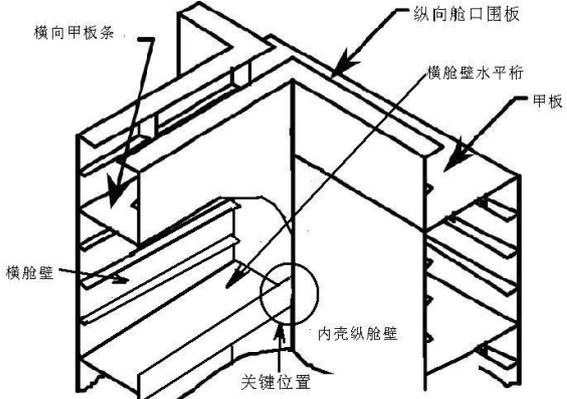
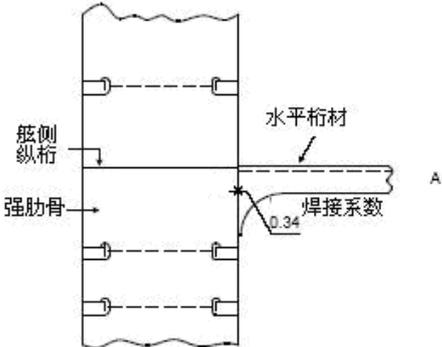
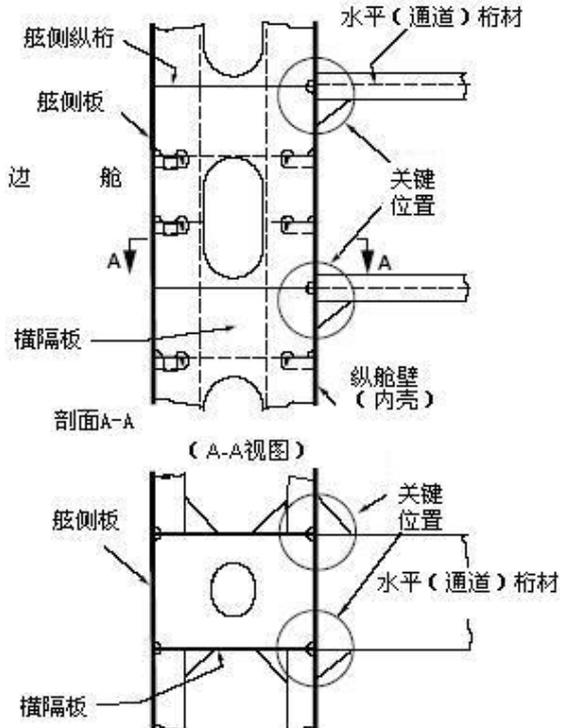
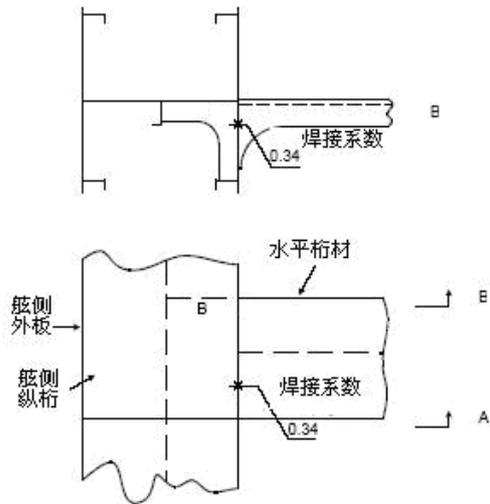
关键区域		结构节点
		
<p>关键位置</p> 		
结构节点	适用结构	说明
	舱口端横梁与内壳（纵舱壁）连接端部。	用领板去除扇形孔，增加舱口端横梁和舱口端横梁对齐位置处横隔板的厚度。
建造公差	应注意舱口端横梁和舷侧结构之间的对中。	
焊接要求	舱口端横梁处的横向桁材和下边板到舷侧纵舱壁的连接采用填角焊，填角焊使用的最小焊接系数应为 0.44； 完成舱口端角隅附近的连续焊接后应封闭角部过焊孔； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

区域：水密和非水密舱壁

关键位置：横舱壁水平桁面板与纵舱壁的连接

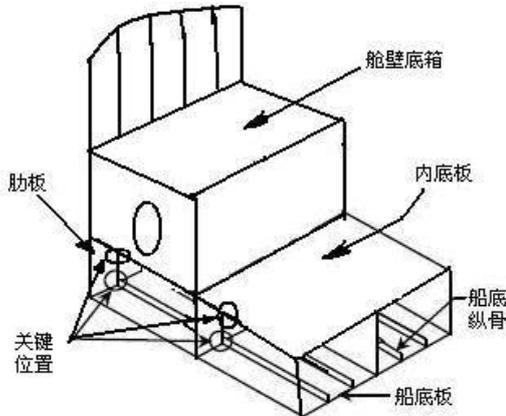
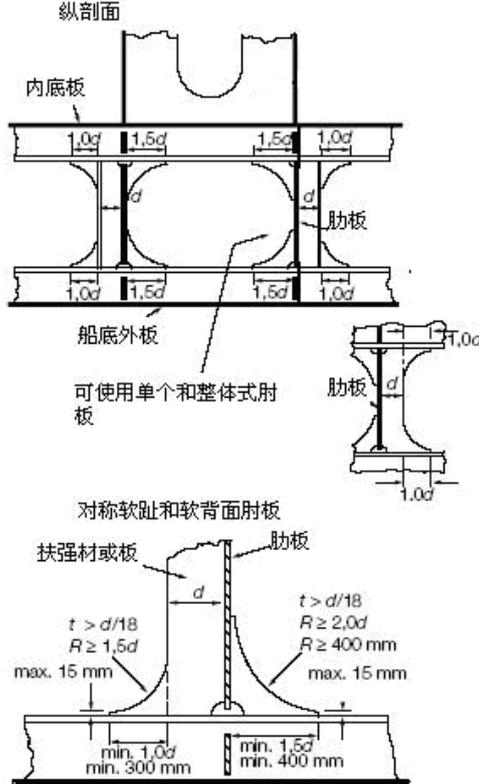
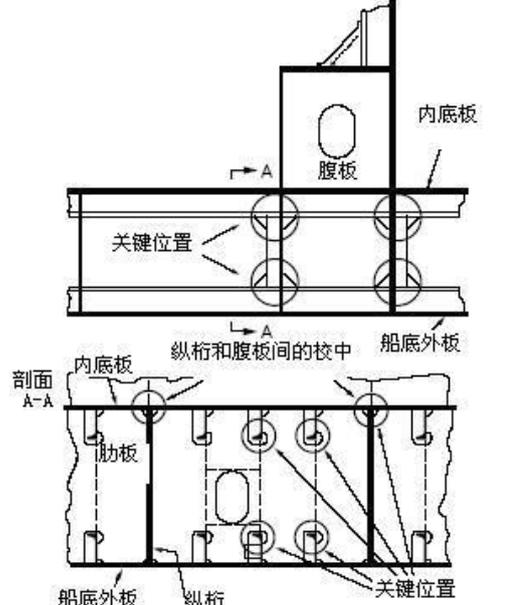
关键区域		结构节点
		<p>分离式圆弧肘板</p>  <p>整体式圆弧肘板</p>  <p>剖面A-A (俯视图)</p> 
<p>关键位置</p> 		
结构节点	适用结构	说明
	横舱壁水平桁面板与纵舱壁的连接。	采用对称的圆弧形肘板或整体式圆弧形肘板以减少应力集中。与面板趾端靠近的纵向扶强材所经过的开口应用全衬板补平。且舱壁平面的外壳和内壳纵骨应设肘板。
建造公差	确保横舱壁桁材面板与舷侧横隔板以及双壳间平台与舱壁水平桁材的良好对中。	
焊接要求	<p>软趾肘板到桁材面板和到纵舱壁的连接采用填角焊，填角焊的最小焊接系数为 0.34；</p> <p>肘板趾端应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等易造成应力集中的焊接缺陷；</p> <p>最后用水密补板进行全熔透焊接来封闭与面板趾端靠近的内壳纵骨穿越孔；</p> <p>其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>	

区域：水密和非水密舱壁  
 关键位置：横舱壁水平桁面板与纵舱壁的连接

关键区域	结构节点
	
关键位置	
	
<p>结构节点</p>	<p>适用结构</p>
<p>横舱壁水平桁面板与纵舱壁的连接。</p>	<p>说明</p> <p>采用对称的圆弧肘板或整体式圆弧肘板以减少应力集中因子。与面板趾端靠近的纵向扶强材所经过的开口应用全补板补平。且舱壁平面的外壳和内壳纵骨应设肘板。</p>
<p>建造公差</p>	<p>确保桁材面板与舷侧横隔板以及双壳间平台与舱壁水平桁的良好对中。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>软趾肘板与桁材面板和与纵舱壁的连接采用填角焊，填角焊的最小焊接系数为 0.34；肘板趾端应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等焊接缺陷；其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

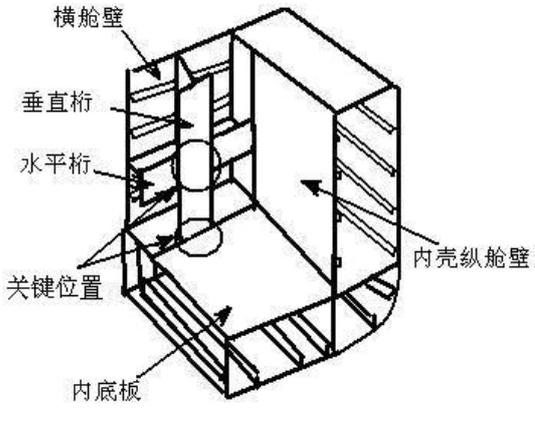
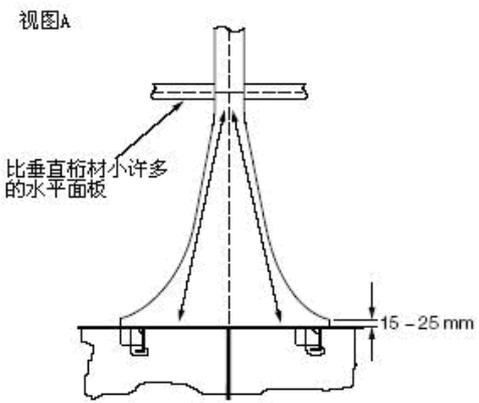
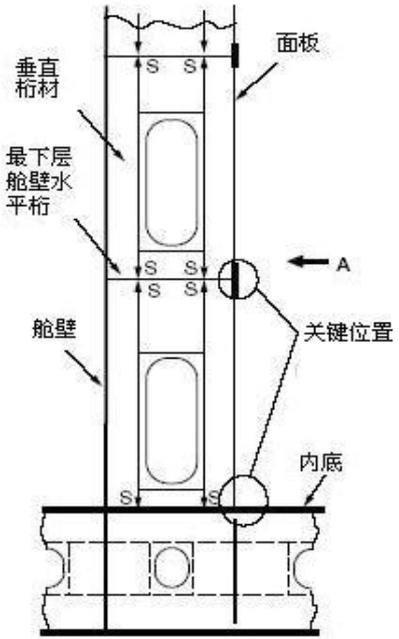
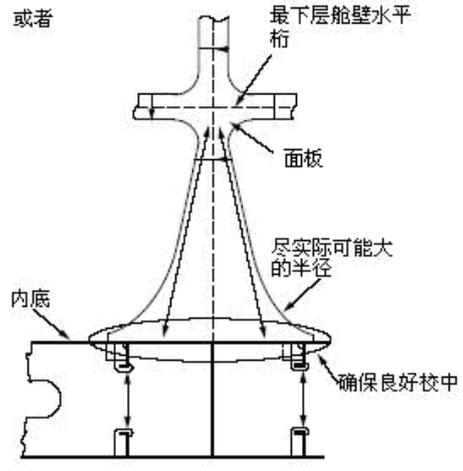
区域：水密和非水密舱壁

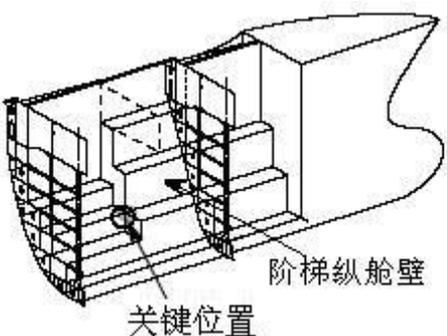
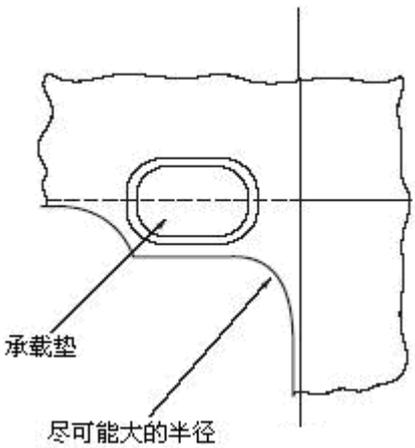
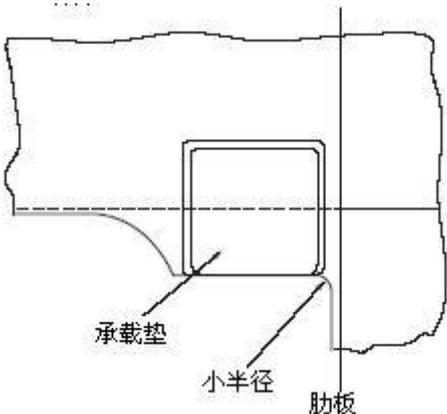
关键位置：肋板垂直扶强材与舱壁下船底纵骨和内底纵骨的连接

关键区域	结构节点
	 <p>纵剖面</p> <p>内底板</p> <p>肋板</p> <p>船底外板</p> <p>可使用单个和整体式肘板</p> <p>肋板</p> <p>对称软趾和软背面肘板</p> <p>扶强材或板</p> <p>肋板</p> <p><math>t &gt; d/18</math> <math>R \geq 1.5d</math> max. 15 mm</p> <p><math>t &gt; d/18</math> <math>R \geq 2.0d</math> <math>R \geq 400 \text{ mm}</math> max. 15 mm</p> <p>min. 1.0d min. 300 mm</p> <p>min. 1.5d min. 400 mm</p>
<p>关键位置</p> 	
<p>结构节点</p> <p>适用结构</p> <p>肋板垂直扶强材与舱壁下船底纵骨和内底纵骨的连接处。</p>	<p>说明</p> <p>设置软肘板，减少肋板扶强材与船底和内底纵骨连接处以及底箱与内底板的应力集中系数。</p>
<p>建造公差</p>	<p>确保肘板与加强筋腹板之间的良好对中。如果使用了软踵，扶强材腹板最小宽度处的剩余横剖面应 按照规范要求进行检查。</p>
<p>焊接要求</p>	<p>内底和肋板之间填角焊的焊接系数取为 0.44； 焊接的引弧点和熄弧点要远离肘板趾端或角隅； 扶强材和背肘板的趾端与纵骨连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。</p>

区域：水密和非水密舱壁

关键位置：舱壁垂直桁面板与内底结构和最下层水平桁的连接

关键区域		结构节点
		 <p>视图A</p> <p>比垂直桁材小许多的水平面板</p> <p>15-25mm</p>
		 <p>或者</p> <p>最下层舱壁水平桁</p> <p>面板</p> <p>尽可能大的半径</p> <p>内底</p> <p>确保良好校中</p>
结构节点	适用结构	说明
	舱壁垂直桁面板与内底结构和最下层水平桁的连接处。	垂直桁的面板趾端不直接终止于支撑扶强材上方。水平桁和垂直桁的连接处应设置面板。
建造公差	确保面板和腹板与肋板或舱壁以下结构的良好对中。	
焊接要求	舱壁垂直桁与内底填角焊的最小焊接系数为 0.34，垂直桁面板与内底填角焊的最小焊接系数为 0.44； 所有圆弧形边缘应无切口； 面板趾端与内底板的连接应进行包角焊，包角焊缝应过渡光滑，不应有咬边、切口等焊接缺陷； 其余要求见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 4 节的要求。	

集装箱船结构节点		表 21
区域：首部货舱内的中间甲板 关键位置：阶梯纵舱壁与中间甲板连接处的角隅		
关键区域		结构节点
 <p>阶梯纵舱壁 关键位置</p>		 <p>承载垫 尽可能大的半径</p>
关键位置  <p>承载垫 小半径 肋板</p>		
结构节点	适用结构	说明
	阶梯纵舱壁与中间甲板连接处的角隅位置。	该处角隅的结构节点因船而变，一般，角隅的半径应尽可能大。除此以外，为谨慎起见，可设置厚度大于周围板材 50%或使用材料级别高的嵌入板，见《钢规》第 2 篇要求。
建造公差	无。	
焊接要求	圆弧部分应避免焊接。	