

3 万吨极地多用途船结构设计简述

刘灿波, 葛沛, 徐宏伟, 丁佐鹏

南通中远海运川崎船舶工程有限公司 技术本部, 江苏 南通 226005

摘要: 极地环境多变恶劣, 运输船舶的结构设计是重要课题。本文针对某 3 万吨 PC6 冰级极地多用途船, 参考 IACS 船级规范和极地规则 (POLAR CODE), 分析了极地运输船结构设计特点。研究发现: 极地运输船舶的舷侧采用横骨架式能减少钢材重量, 本船的肋骨间距取 0.45m 较为合适, 不仅有利于减小外板厚度, 也方便施工。为使本船广泛适应各种航线, 船体梁总纵强度设计时考虑了常规水域和极地冰区双环境, 常规水域航行时船体梁载荷可以由静水载荷和波浪载荷叠加得到, 而极地冰区航行时需要考虑静水载荷和冰载荷的叠加。将波浪载荷和冰载荷进行对比, 发现冰载荷相比波浪载荷要小很多, 但是首部剪力许用值确定时需要考虑冰载荷的影响。通过本文的研究, 对极地运输船舶的结构开发提供借鉴。

关键词: 极地船; 结构设计; 冰区加强

海冰对北极航道通航环境影响很大, 极地航行船舶遭遇各种海冰工况, 因此其结构设计是重要课题。许多国家对海冰进行了深入研究, 包括冰的生成、力学特性、破坏方式以及各种类型的冰对船舶等结构的冲击和作用等等。目前, 研究热点是海冰与结构物相互作用引发的激振力问题, 以及相互作用过程中海冰载荷的确定问题。由于实际问题的复杂性, 关于冰载荷的预测及冰激振力的机理认识, 未形成公认的能够描述冰与结构相互作用的力学机制, 冰载荷的确定还是依靠船级社的规范。本文针对某 3 万吨极地多用途船, 参考 IACS 船级规范和极地规则 (POLAR CODE), 分析了极地运输船结构设计特点。

1 冰级加强范围

IACS UR I2 极地船规范将船体区域划分为四个区域: 首部区、首部过渡区、船艙区和尾部区^[1]。各区域除艙部以外, 按照水线高度的不同又分为冰带区域、冰带以下区域以及底部区域, 如图 1。规范针对每个区域分别规定了相应的冰载荷, 从艙部区域往尾部区域, 以及从冰带区域往底部区域, 强度要求逐渐减弱。船艙区、艙部过渡区和尾部区的冰载荷主要与船舶排水量、冰级有关。本船冰级按照 IACS UR I1 的分类属于 PC6 级, 夏秋季节航行于北极东北航道, 其它季节航行于普通水域。

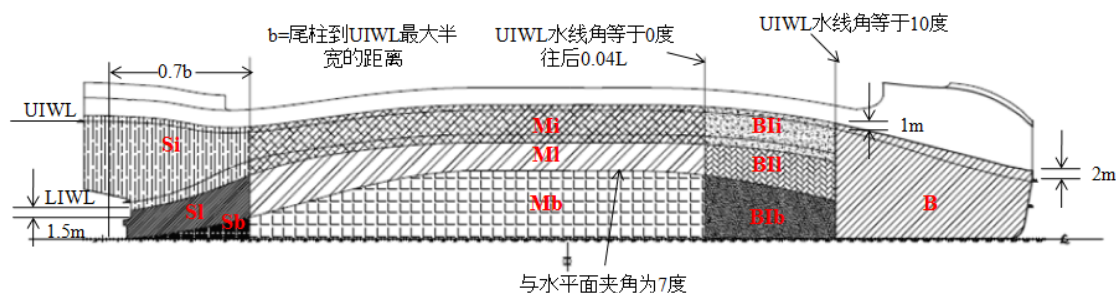


图 1 极地船冰区加强范围

2 冰载荷规范计算

极地船结构设计分为两部分, 一部分为考虑局部结构承受冰载荷作用时的结构强度, 另一部分为考虑冰载荷时船体梁的总纵强度校核。局部强度与局部冰载荷密切相关, 确定不同区域的设计冰载荷, 然后结合具体的结构型式对外板和骨材进行设计。设计冰载荷是

由均匀分布在一长方形载荷作用板（高度 b 和宽度 w ）上的平均压力表征，即设计载荷板。
艏部区域和艏部过渡区冰带范围内的设计载荷板参数计算如下^[2]：

$$w = F / Q \quad (1)$$

$$b = Q / P \quad (2)$$

其中 F 、 Q 、 P 分别表示冰载荷[MN]、线载荷[MN/m]和平均冰压值[MPa]。

对于船体其他部分，载荷参数中宽度 w 的计算方法保持不变，高度 b 采用式（3）进行折减。

$$b = w / 3.6 \quad (3)$$

对于划分的每个区域，平均冰压力为冰载荷与设计载荷板面积的比值，计算公式如下。

$$P_{avg} = F / (b \cdot w) \quad (4)$$

3 骨架形式选择

常规海船首部及舷侧一般采用纵骨架式，而极地船冰区加强范围内船体结构通常采用横骨架式。本节对不同骨架形式对外板厚度的影响进行了研究。极地规范中影响横骨架式外板板厚的主要因素是肋骨间距和设计载荷板高度，而影响纵骨架式外板板厚的主要因素是纵骨间距和强框间距。极地船级规范给出了不同骨架型式下外板净厚度的计算公式^[1]。
横骨架式外板净厚计算如下：

$$t_{net} = 500 \cdot s \cdot \sqrt{AF \cdot PPF_p \cdot P_{avg} / \sigma_F} \cdot \frac{1}{1 + s / (2b)} \quad (5)$$

对于纵骨架式板， $\Omega \leq 70 \text{ deg}$ 、 $b \geq s$ 时，外板净厚计算公式为：

$$t_{net} = 500 \cdot s \cdot \sqrt{AF \cdot PPF_p \cdot P_{avg} / \sigma_F} \cdot \frac{1}{1 + s / (2l)} \quad (6)$$

当 $b < s$ 时，纵骨架式外板净厚计算公式如下：

$$t_{net} = 500s \cdot \sqrt{AF \cdot PPF_p \cdot P_{avg} / \sigma_F} \cdot \frac{1}{1 + s / (2l)} \cdot \sqrt{2 \cdot b / s - (b / s)^2} \quad (7)$$

其中： Ω 为骨材相对水线的夹角[deg]， s 为骨材间距[m]， AF 为外板系数，与外板的冰区加强要求有关。 PPF_p 为峰压系数， P_{avg} 为外板平均压力[MPa]， σ_F 为钢材的屈服应力[N/mm²]， b 为压头高度[m]， l 为骨材跨距[m]。

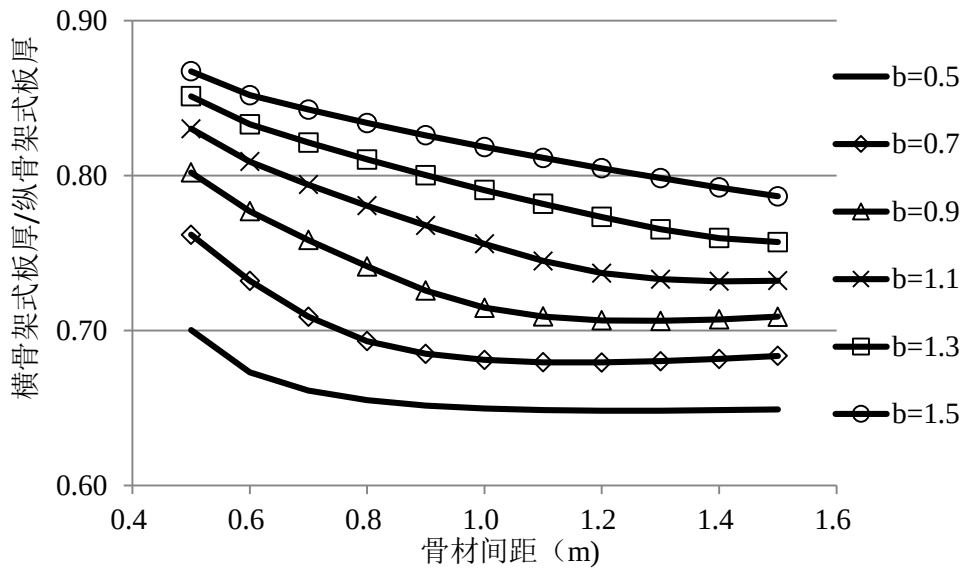


图 2 横骨架式和纵骨架式外板净厚比较

根据公式 (5) 和 (6)，不同骨材间距下的外板净厚度如图 2 所示，横坐标是骨材间距，纵坐标是横骨架式与纵骨架式对应的外板净厚度的比值。从图中可知，在相同的骨材间距和压头高度下，横骨架式所需的板厚均小于纵骨架式所需的板厚（即比值小于 1）。当设计压头 b 为 0.9m、骨材间距为 0.5m 时，横骨架式外板净厚度比纵骨架式外板净厚度小 20% 左右。因此采用横骨架式对减轻空船重量，对于增加船舶载重量和提高航运的经济性有利。且横骨架式比纵骨架式减小了分段合拢时的纵骨对接，对施工工艺性有利。

对横骨架式结构而言，横骨间距也是关键参数。通常布置密集的骨材有利于减小外板板厚，但是在骨材间距降低到一定程度后，由于骨材重量的上升反而会抵消板厚减小的影响，从而导致空船重量增加。另外骨材太密还会增加焊接施工量，为此需要确定最合适的骨材间距。

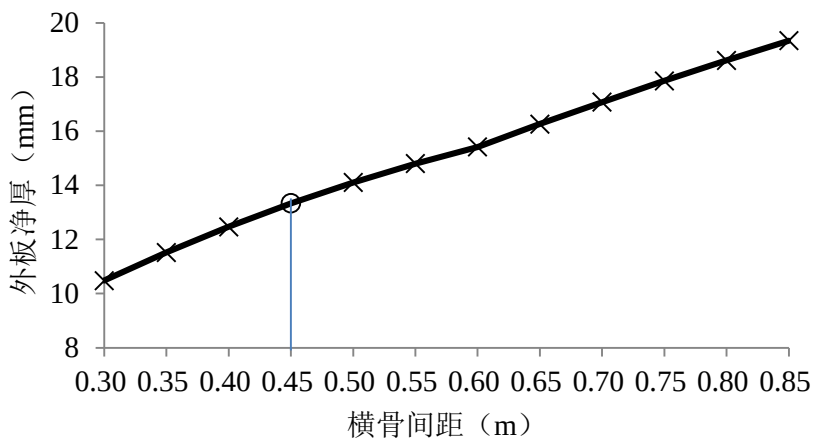


图 3 横骨间距对外板净厚的影响

根据船级公式 (5) 计算得到的外板净厚与横向骨材间距的关系如图 3 所示。从图 3 可以发现，本船以横骨间距 0.45m 为分界点，当横骨间距小于 0.45m 时，横骨间距每增加 0.05m，板厚增加约 1mm。当横骨间距大于 0.45m 时，板厚增加的趋势明显变缓，因此该极地多用途船项目选取 0.45m 临

界点为横骨间距对船舶建造最为有利。而在艏部和尾部区域，由于底部布置的是横骨架式实肋板，为了兼顾施工便利性，可以适当增加横骨的间距。

3 骨架系统设计

极地多用途船舷侧双壳及双壳内的平台、双层底纵桁以及布置在双壳上的纵向骨材，将参与船舶总纵强度，因此设计这些构件的尺寸时需要考虑作用在船体梁上的总纵弯矩和剪力。

极地运输船舶分析船体梁总纵强度时需要考虑两种工况即常规水域和极地冰区。常规水域航行时船体梁载荷可以由静水载荷和波浪载荷叠加得到，而冰区航行时需要考虑静水载荷和冰载荷的叠加。两种工况下静水载荷相同，因此有必要先对波浪载荷和冰载荷进行对比，找出两种情况下最严厉的工况，得到弯矩和剪力分布图用于船体梁总纵强度的校核。

首先利用极地规范公式计算冰载荷的弯矩和剪力，计算冰载荷前需要确定艏部垂向设计冰压力，按下式计算^[1]：

$$F_{IB} = \min imum(F_{IB,1}; F_{IB,2})[MN] \quad (8)$$

式中： $F_{IB,1} = 0.534 \cdot K_I^{0.15} \cdot \sin^{0.2}(\gamma_{stem}) \cdot (\Delta_{kt} \cdot K_h)^{0.5} \cdot CF_L [MN]$, $K_I = K_f / K_h$

$$F_{IB,2} = 1.2 \cdot CF_F [MN]$$

$$a) \text{ 对肥大型船首: } K_f = [2CB^{1-e_b} / (1+e_b)]^{0.9} \tan(\gamma_{stem})^{-0.9(1+e_b)}$$

$$b) \text{ 对尖瘦型船首 } (\alpha_{stem} < 80^\circ), e_b = 1 \text{ 及以上, 则可简化为:}$$

$$K_f = \left\{ \tan(\alpha_{stem}) / [\tan(\gamma_{stem})]^2 \right\}^{0.9}$$

$$K_h = 0.01A_{wp} \quad [MN/m]$$

其中 CF_L 为总纵强度船级因子， e_b 为最佳描述水线面其中的艏部形状指数， γ_{stem} 为首柱角，

α_{stem} 为冰区高位水线角。

$$C = 1/[2(L_B / B)^{e_b}]$$

式中 B 为型宽， L_B 为首部长度，D 为船舶排水量， A_{wp} 为船舶水线面积， CF_F 为弯曲失效船级因子。

确定艏部垂向设计冰压力之后，船体梁冰载荷对应的剪力和弯矩公式如下：

$$F_I = C_f \cdot F_{IB} [MN] \quad (9)$$

$$M_I = 0.1 \cdot C_m \cdot L \cdot \sin^{-0.2}(\gamma_{stem}) \cdot F_{IB} [MNm] \quad (10)$$

其中 C_f 和 C_m 分别为剪力和弯矩沿船长的分布因子。

图 4-5 给出了冰载荷计算结果。如果航行在非冰区航道，需要与常规船型一样考虑波浪载荷，波浪载荷计算结果如图 6-7 所示。从图中可知冰正向剪力从船体平行中体往船尾方向为 0。冰载荷弯矩（冰载荷剪力）相比波浪弯矩（波浪剪力）小很多。但是在船首区域，冰剪力要大于波浪剪力，因此首部结构设计时要考虑冰剪力的影响。

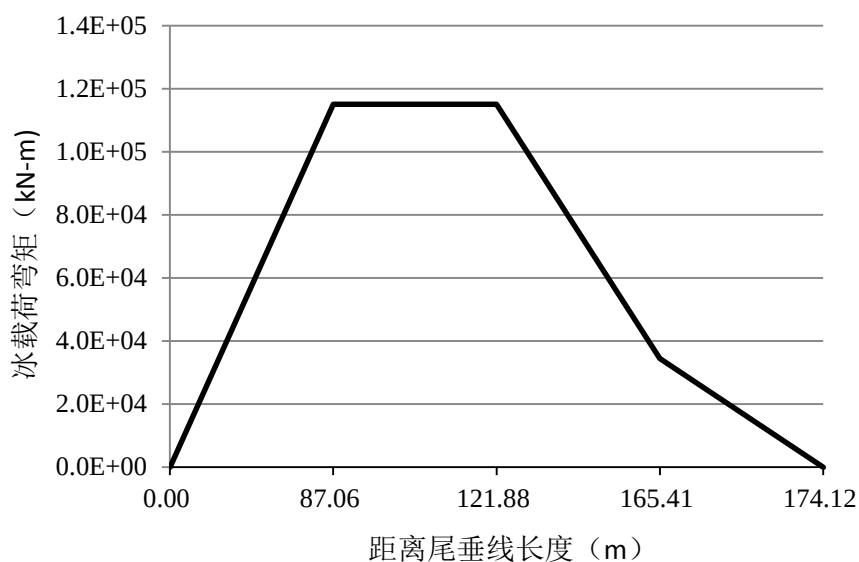


图 4 冰区弯矩沿船长分布

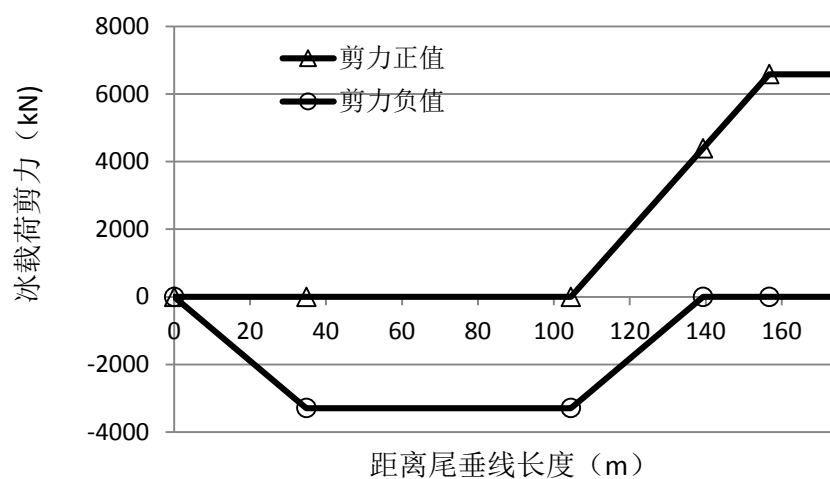


图 5 冰区剪力沿船长分布

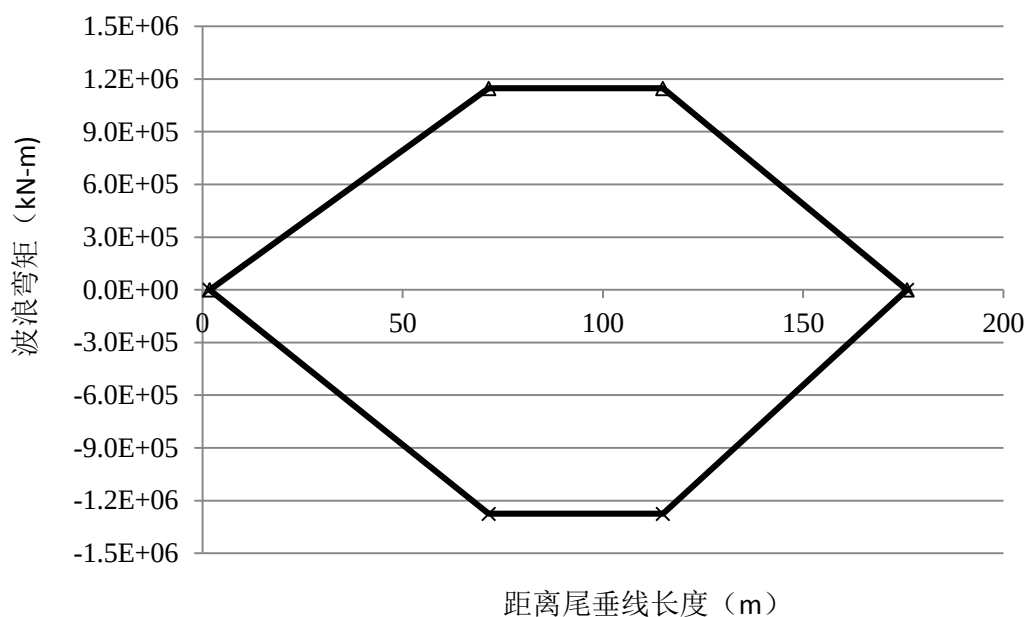


图 6 波浪弯矩沿船长分布（常规水域）

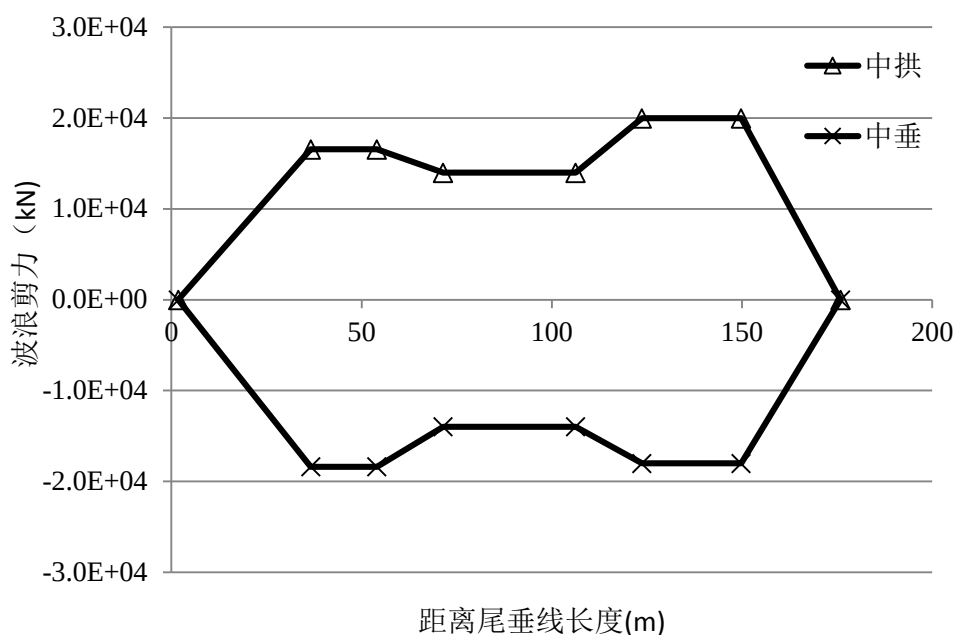
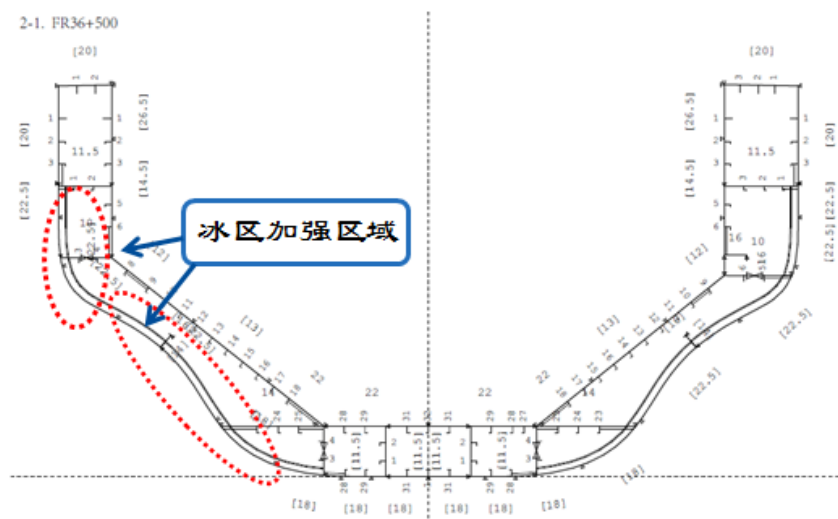


图 7 波浪剪力沿船长分布（常规水域）

本船船体梁的总纵强度校核采用 DNV 船级社的 Nauticus Hull 规范计算软件。一般船体梁分段缝附近构件尺寸沿船长方向有明显变化，剪力在分段缝处有突变，因此有可能出现强度不满足的情况，需要重点关注。如图 8 所示，分别建立分段缝前后的截面模型，输入板厚、材料、加强筋、弯矩及剪力等信息，对横剖面的局部强度、剪切强度和剖面模数进行校核。极地多用途船开发设计中沿船长方向一共选取了 17 个剖面进行校核，发现船体梁强度满足规范要求。



4 结论

基于 IACS 极地船规范, 本文以某 3 万吨级极地多用途船型为对象, 讨论了冰区加强范围确定、骨架型式选择和骨架系统的设计, 得出以下结论:

(1) 在相同的骨材间距和压头高度下, 舷侧采用横骨架式所需的外板厚度要小于纵骨架式所需的板厚, 因此采用横骨架式对减轻空船重量, 增加船舶装载量和提高航运的经济性有利。

(2) 对于横骨间距进行了优化研究, 结果表明本船横骨间距 0.45m 较为合适, 横骨架式外板净厚度比纵骨架式外板净厚度小 20% 左右, 对于船舶施工建造也有利。

(3) 船体梁总纵强度设计时需要考虑常规水域和极地冰区双环境, 常规水域航行时船体梁载荷可以由静水载荷和波浪载荷叠加得到, 而极地冰区航行时需要考虑静水载荷和冰载荷的叠加。计算发现冰载荷相比波浪弯矩要小很多, 但是首部剪力需要考虑冰载荷的影响。

参考文献:

- [1] IACS. Requirements Concerning Polar Class [S] .2010.
- [2] DNV-GL. DNV GL rules for classification: Ships [S] .2015.
- [3] IMO. International Code for Ships Operating in Polar Waters.2014

仅供交流



江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统