**矫正内应力对耐压结构承载能力的影响分析**

**陈沙古1,2，谢晓忠1,2，冯令良1,2，吴智睿1,2**

（1.中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082

2.船舶结构安全全国重点实验室，江苏 无锡 214082）

**摘 要：**耐压结构超差矫正引起的结构内应力，及其对耐压结构承载能力的影响是大型耐压结构安全评估的重要依据。论文以某舱段结构为计算模型，首先通过有限元方法计算分析了矫正载荷引起的内应力分布规律。然后，基于共模设想提出一种计及矫正应力影响的耐压结构承载能力仿真计算方法。采用该方法对不同应力场下的结构承载能力进行系列计算，研究分析矫正应力对结构承载能力的影响规律。计算结果表明，超差矫正内应力对耐压结构的承载能力有不利影响，应力越高、不利影响越大，当矫正引起的内应力水平达到材料的屈服强度时，耐压结构的极限承载能力降低约15%，会严重影响耐压结构的安全储备。

**关键词：**耐压结构；有限元方法；矫正应力；承载能力；安全评估

**中图分类号**： U663 **文献标识码**：A

**Analysis on the Influence of Correction Stress to the Ultimate Bearing Capacity of Pressure Structures**

CHEN Shagu1,2，XIE xiaozhong1,2，FENG Lingliang1,2，WU Zhirui1,2

(1.China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082；2.National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Wuxi 214082)

**ABSTRACT:** The internal stress caused by the deviation correction of pressure structures and its impact on the ultimate bearing capacity of pressure structures are important basis for the safety assessment of large pressure structures. The paper takes a certain cabin structure as the calculation model, and first uses finite element method to calculate and analyze the distribution law of internal stress caused by corrective loads. Then, a simulation calculation method for the ultimate bearing capacity of pressure structures considering the influence of corrected stress is proposed based on the common mode. Using this method, a series of calculations were conducted on the bearing capacity of structures under different stress fields, and the influence of corrected stress on the bearing capacity of structures was studied and analyzed. The calculation results show that correcting the internal stress beyond the tolerance has an adverse effect on the bearing capacity of the pressure structure. The higher the stress, the greater the adverse effect. When the level of internal stress caused by correction reaches the yield strength of the material, the ultimate bearing capacity of the pressure structure decreases by about 15%, which will seriously affect the safety reserve of the pressure structure.

**KEY WORDS:** pressure structure; finite element method; correction stress; ultimate bearing capacity; safety assessment

**1 引言**

潜艇等大型耐压结构建造过程涉及大量的卷制、焊接等工艺，形状控制难度大，工程建造时难免出现形状超差问题。耐压结构壳圈的形状直接影响结构的强度和承载能力，壳圈超差后，由于成本和时间等原因一般不可能简单报废处理，往往采用一定的工艺措施来进行矫正。矫正势必会引起结构内应力场，量化矫正应力及其对结构承载能力的的影响是工程超差评估时面临的难题。

当前围绕潜艇壳圈和肋骨形状超差加强的研究较多，对于结构内应力场的影响则以焊接残余应力研究为主，关于超差矫正与评估的研究报道较少。本文以某舱段结构为研究对象，采用有限元仿真方法计算分析矫正载荷引起的结构内应力分布情况，并探究内应力对耐压结构承载能力的影响规律，以期为大型耐压结构超差矫正安全性评估提供技术支撑。

**2 研究对象**

以某大型环肋圆锥壳舱段结构为例，对舱段结构对接环焊缝处的板壁差超差矫正进行研究分析。该舱段结构示意图如图1所示，由舱段1和舱段2两部分组成，采用外置T形肋骨加强，锥壳大、小端的内半径分别为、，舱段1壳板厚度为、肋骨间距为，舱段2壳板厚度为、肋骨间距为，该舱段的结构特征参数为：，，，。

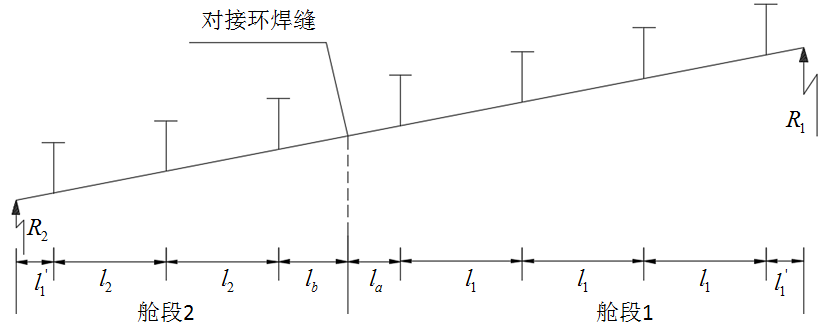
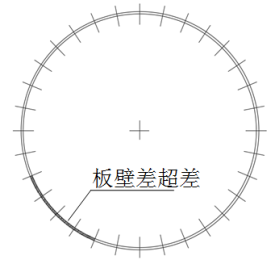
 

图1 环肋圆锥壳舱段结构简图

Fig.1 Structural diagram of ring-stiffened conical shell

**3 计算方法与思路**

舱段结构在对接环焊缝处的局部板壁差超差，采用有限元仿真方法进行超差矫正引起的结构内应力计算，并将内应力作为初始应力对结构承载能力进行仿真计算，以此研究分析内应力对结构承载能力的影响。

由于在板壁差矫正时，环焊缝的局部位置是处于未焊接状态的，即两端壳板是自由状态；而结构承载能力计算时对应的是焊接后的完整结构。因此，为计算矫正内应力对结构承载能力的影响，需解决内应力计算和承载能力计算的共同模型问题。为此，本文将局部区域的环焊缝等效为一种柔性-刚性连接结构状态，通过调整模型局部结构的材料属性来分别进行结构内应力和承载能力仿真计算。矫正内应力计算时，将局部区域的材料弹性模量专门设置为1.0E-6（近似为0）；承载能力计算时，导入初应力后，将局部区域的材料弹性模量再调整过来，其流程示意图如图2所示。



图2 基于共模策略的仿真计算流程示意图

Fig.2 Simulation calculation process diagram based on common model

有限元模型单元类型选用shell壳单元，其中超差区域的形状通过舱段结构设计尺寸和板壁差实测数据换算得到，假设矫正区域设置矫正点个，每个矫正点在矫正前、后的板壁差分别为、，则矫正区域相对外凸、内凹部位的壳板节点径向坐标可分别表示为、，式中，矫正区域宽度为焊缝宽度，舱段结构有限元模型如图3所示。

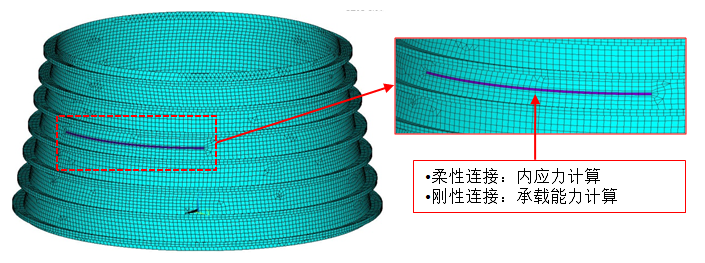


图3 环肋圆锥壳舱段结构有限元模型

Fig.3 Finite element model of ring-stiffened conical shell

**4 矫正内应力计算分析**

根据矫正力测量结果，在相应的节点上施加矫正力载荷进行结构强度计算，模型一段施加UX、UY、UZ位移约束，另一端施加UX、UY位移约束，如图4所示，材料弹性模量196000MPa，泊松比0.3。

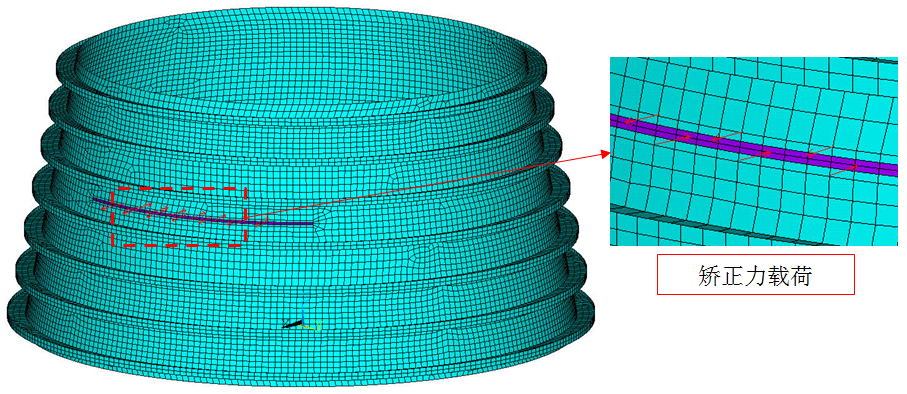
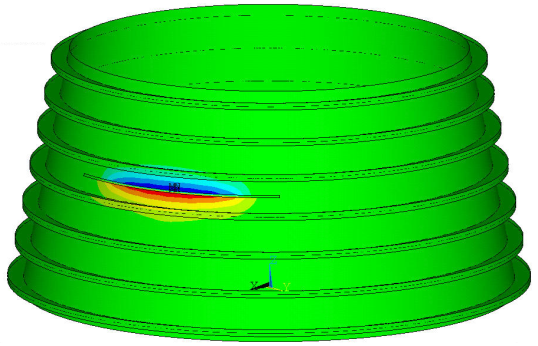
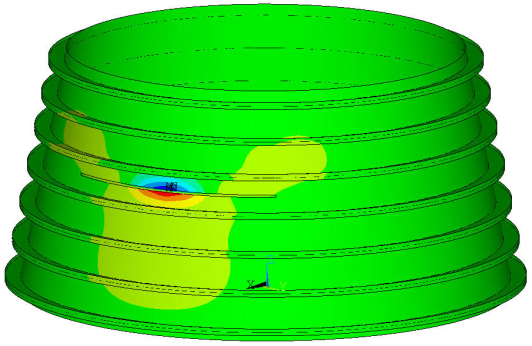


图4 模型载荷边界条件

Fig.4 Simulation calculation of connection stress

计算结果表明，在矫正力载荷作用下，超差区域焊缝两侧壳板分别出现内凹、外凸的径向变形，表明矫正载荷起到了矫形的预期效果，且在总载荷一致的情况，均布载荷与非均布载荷引起的径向变形存在明显差异，如图5所示，说明设置多个矫正工装更利于结构变形控制。

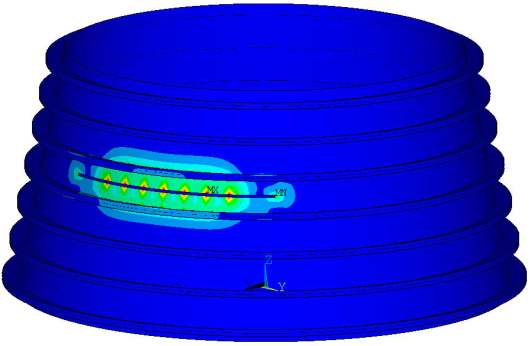
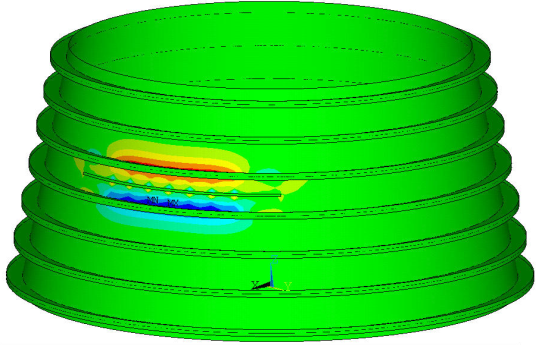
 

（a）均布载荷下的变形（UX） （b）非均布载荷下的变形（UX）

图5 矫正引起的结构变形云图

Fig.5 Structural deformation caused by correction

矫正引起的结构内应力场如图6所示，结果表明，除了在焊缝两侧引起较大的壳板应力外，该应力场区域会明显扩散至临近肋骨，并在两侧的肋骨根部分别形成较大的纵向拉应力和压应力。

**** 

（a）合成应力（SEQV） （b）纵向应力（SZ）

图6 矫正引起的结构应力云图

Fig.6 Structural stress caused by correction

**5 结构承载能力计算分析**

舱段结构模型弹性屈曲计算结果表明，模型在舱段对接环焊缝对应的肋间发生轴对称屈曲，如图7所示。因无缺陷模型的失稳破坏位置本身就发生在该矫正区域对应肋位，可通过比较舱段结构无缺陷模型、含矫正内应力模型的结构承载能力来定量分析矫正内应力对结构承载能力的影响趋势。

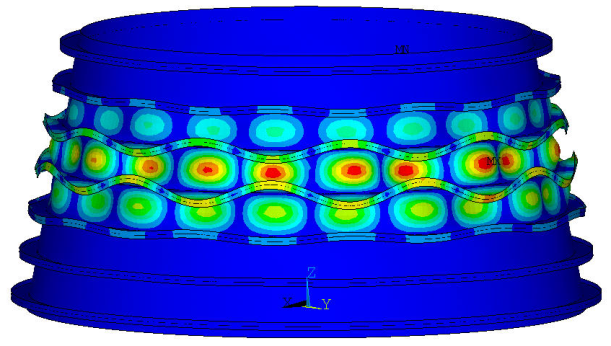
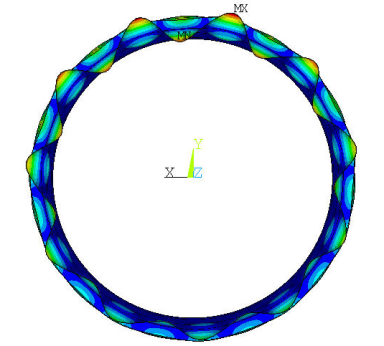
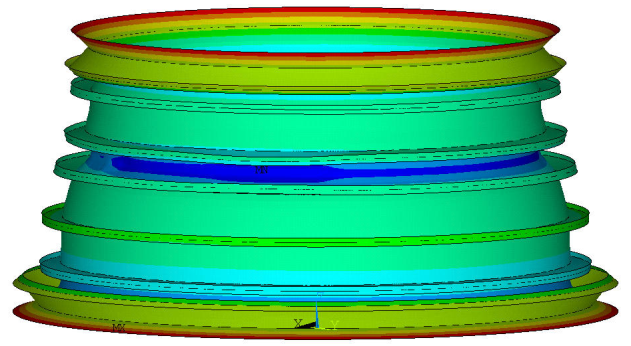
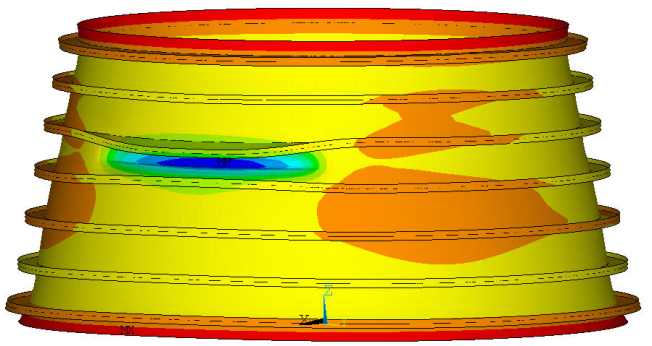
 

图7 模型弹性屈曲模态

Fig.7 Model elastic buckling mode

无缺陷模型、含矫正内应力模型的弹塑性失稳形态如图8所示，计算结果表明，无缺陷模型对应的极限承载能力为10.01MPa。计算结果显示，随着矫正内应力水平的不断提高，模型失稳破坏位置明显向超差的局部区域聚焦，模型失稳压力也逐渐降低，矫正内应力对结构承载能力造成了明显不利影响。

（a）无缺陷模型弹塑性失稳形态 （b）含矫正内应力模型弹塑性失稳形态

图8 舱段模型弹塑性失稳形态

Fig.8 Elastoplastic instability morphology of cabin model

表3列出了不同矫正力载荷工况下的舱段结构极限承载能力仿真计算结果，表中内应力水平为无量纲化数据（）。计算结果表明，随着矫正内应力逐渐增大、结构承载能力逐渐降低，如图9所示，当内应力水平达到材料的屈服强度时，舱段结构的承载能力降低约15%，会严重影响结构承载安全性。

表3 不同矫正力载荷工况下的结构承载能力仿真计算结果

Table.3 Calculation results of the ultimate bearing capacity at different connection force

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 矫正力载荷 | 矫正内应力 | | | 极限承载能力（MPa） |
| 周向应力SY | 纵向应力SZ | 合成应力SEQV |
| 工况一 | -0.04 | -0.02 | 0.04 | 9.97 |
| 工况二 | -0.19 | -0.08 | 0.18 | 9.78 |
| 工况三 | -0.37 | -0.15 | 0.35 | 9.42 |
| 工况四 | -0.74 | -0.30 | 0.71 | 8.83 |
| 工况五 | -1.11 | -0.46 | 1.06 | 8.51 |

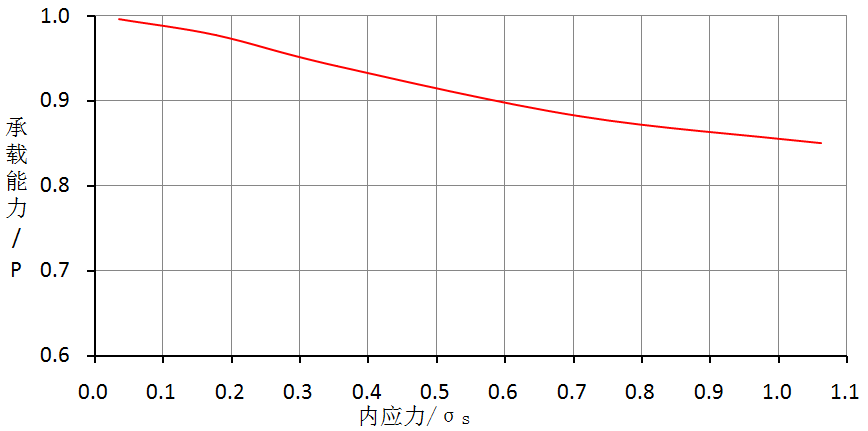


图9 矫正内应力对结构承载能力的影响曲线

Fig.9 The curve of connection stress on structural ultimate bearing capacity

**6 结论**

本文以环肋圆锥壳舱段结构板壁差超差为研究对象，主要工作和结论如下：

（1）将模型局部区域的环焊缝等效为柔性-刚性连接状态，提出一种结构内应力与承载能力仿真计算的共同模型。

（2）内应力计算表明，在总矫正载荷一致的情况下，设置多个矫正点更又有利于结构变形控制，超差矫正不仅会引起焊缝两侧壳板应力，该应力场还会扩散至临近肋骨，在两侧的肋骨根部分别形成较大的纵向拉应力和压应力。

（3）结构承载能力计算表明，矫正内应力对耐压结构承载能力有不利影响，应力越高、不利影响越大，当矫正内应力水平达到材料的屈服强度时，会严重影响耐压结构的安全储备。

**参 考 文 献：**

[1]李明.潜艇肋骨初挠度计算研究[J].船海工程,2012,41(2):40-46.

[2]陈爱志.耐压船体的不圆度对其强度和稳定性影响的研究[D].哈尔滨工程大学,2007.

[3]邱昌贤,黄进浩,秦天,等.壳板径向初挠度对内外环肋圆柱壳结构强度的影响分析[J].中国造船,2017,58(4):66-75.

[4]申超男.加筋圆柱壳结构的焊接变形预测与残余应力评估[D].华中科技大学,2022.

[5]李良碧,万正权,王自力,等.环肋圆柱壳结构焊接残余应力和变形的数值模拟[J].焊接技术,2011,40(3):9-13.

[6]田旭军,肖伟,黄国兵.环肋圆柱壳结构的肋骨径向初挠度超差加强研究[J].舰船科学技术,2018,40(12):1-5.

[7]宗培,曾宏军,彭飞.焊接过程对焊接残余应力及残余变形的影响[J].海军工程大学学报,2002,14(4):77-80.

[8] 李良碧,万正权.焊接残余变形对深海耐压环肋圆柱壳稳定性的影响[J].船舶力学,2016,20(1-2):120-126.

**作者简介：**

陈沙古，男，中国船舶科学研究中心，高级工程师，主要从事水下工程结构理论设计与试验技术研究，13812540425。

谢晓忠，男，中国船舶科学研究中心，高级工程师，主要从事水下工程结构理论设计与试验技术研究，18888046723。

冯令良，男，中国船舶科学研究中心，工程师，主要从事水下工程结构测试技术与信息化研究,1881125019。

吴智睿，男，中国船舶科学研究中心，工程师，主要从事水下工程结构理论设计与试验技术研究,18852464432。