

文章编号: 1007-7294(2007)04-0594-06

潜艇端部舱壁结构分析

范名琦¹, 王永军², 刘 鑫¹

(1 渤海造船厂军代室, 辽宁 葫芦岛 125004; 2 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 端部舱壁结构是潜艇耐压壳体的重要组成部分。该文利用 APDL 参数化语言编程对影响潜艇端部球面舱壁强度的主要参数进行了讨论和分析。结果表明过渡环两端均采用相切联接时的端部球面舱壁结构的应力水平最低, 分析结果同时也证明在进行舱壁结构分析计算时可以忽略梁柱效应的影响。文中的研究结果对潜艇端部舱壁设计具有重要指导作用。

关键词: 有限元; 潜艇结构; 端部舱壁; 强度

中图分类号: U661.4 **文献标识码:** A

Analysis of dome for submarine structure

FAN Ming-qi¹, WANG Yong-jun², LIU Xin¹

(1 Navy Representative to Bohai Shipyard, Huludao 125004, China;

2 China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: The dome structure is an important part of submarine shell. The main factors to the strength of submarine dome is analyzed and discussed by using APDL language in this paper. Some useful results for the structural design are obtained. The stress level is lowest when the transitional annulus' shell is tangential to each other at both sides. And the girder-column effect can be neglected in the strength analysis to dome structure of submarine. The conclusion would play an important role in the design of dome structure.

Key words: FEA; structure of submarine; dome; strength

1 引言

端部舱壁结构是潜艇耐压壳体的重要组成部分, 从结构上讲潜艇端部舱壁主要分为平面与球面两种形式。本文将利用 ANSYS 通用有限元程序对潜艇球面形端部舱壁典型结构进行分析, 确定对强度影响的主要因素。

球面形端部舱壁结构一般由球面壳、过渡短环壳、圆锥壳三个部分组成, 称之为三心球面舱壁或环球形舱壁, 见图 1。

2 计算与分析

2.1 过渡短环壳连接形式对舱壁结构的强度分布的影响

利用有限单元法分别计算① A、B 两点相切短环壳; ② A 点相切短环壳; ③ 过渡短锥壳三种形式,

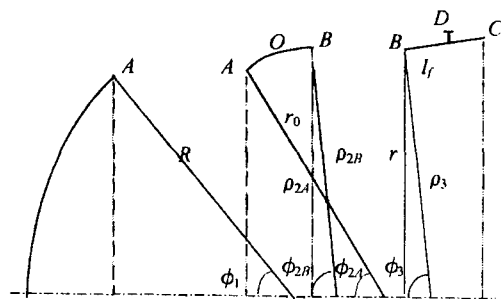


图 1 端部球面舱壁结构简图

Fig.1 The sketch map of cone structure

收稿日期: 2007-02-07

作者简介: 范名琦(1979-), 男, 渤海造船厂军代表。

其结构典型位置网格划分和变形分布见图 2-5。对应这三种情况,过渡短环壳母线半径 r_0 分别为 1 164mm, 1 240mm, ∞ , 其它尺寸如下:

耐压球面壳半径 R	4 665mm
与隔壁联接处耐压船体半径 r	4 000mm
耐压球面壳厚度 t_1	47.5mm
过渡短环壳壳板厚度 t_2	47.5mm
耐压船体壳板厚度 t_3	40.0mm
球面壳端点处母线法线与旋转轴夹角 ϕ_1	54.1°
耐压船体锥壳端点处母线法线与旋转轴夹角 ϕ_3	90.0°

采用相同的单元类型,相同的节点数,相同的工况,对三种结构形式进行计算,利用对称性周向取 1/4 建立有限元模型,BC 段长度取为 3 000mm, 在 C 处采用对称约束结合来模拟相邻的耐压船体,不考虑耐压船体环向加强筋的影响。有限元计算采用 4 节点壳单元,共 5 899 个单元,5 760 个节点。单元网格图及相应的变形图分别见图 2-4,计算结果见表 1-3,对其进行分析表明:在①结构形式下,结构的应力水平最低,最大值在过渡环壳中点内表面处,为-519MPa;在②结构形式下,结构的应力水平较大,最大值在与过渡环相联的耐压船体内表面,为-712MPa;在结构形式③下,结构的应力水平较大,最大值在与过渡环相联的耐压船体内表面,为-844MPa,已超过了一般材料屈服限。这三种不同的设计,结构的主尺度没有明显区别,但结构的应力水平显然有很大差异,显然两点相切设计下结构应力水平最低。

表 1 A、B 两边相切时,结构的变形与应力值(单位:MPa)

Tab.1 The deformation and stress when the structure tangent at two sides

①	位移	转角	内表面应力		外表面应力	
			纵向	纬向	纵向	纬向
A球	2.74	0.015 9	-288	70	-109	101
A环	2.74	0.015 9	-288	70	-109	101
O点	5.06	-0.002 5	-519	100	149	302
B环	0.35	-0.020 3	-259	-61	99	-12
B锥	0.35	-0.020 3	-300	-73	125	-20

表 2 A 边相切时,结构的变形与应力值(单位:MPa)

Tab.2 The deformation and stress when the structure tangent at A side

②	位移	转角	内表面应力		外表面应力	
			纵向	纬向	纵向	纬向
A球	2.60	0.016 4	-258	70	-141	81
A环	2.60	0.016 4	-258	73	-141	81
O点	5.33	0.004 3	-499	124	123	307
B环	3.69	-0.015 6	-561	13	198	247
B锥	3.69	-0.015 6	-712	-29	287	270

表 3 采用过渡短锥壳时,结构的变形与应力值(单位:MPa)

Tab.3 The deformation and stress when the transitional shell is a conical shell

③	位移	转角	内表面应力		外表面应力	
			纵向	纬向	纵向	纬向
A球	2.77	0.005 4	-528	-38	141	154
A环	2.77	0.005 4	-501	-38	130	157
O点	2.18	0.004 4	-69	127	-303	52
B环	1.48	-0.003 9	-784	-52	426	315
B锥	1.48	-0.003 9	-844	-125	520	367

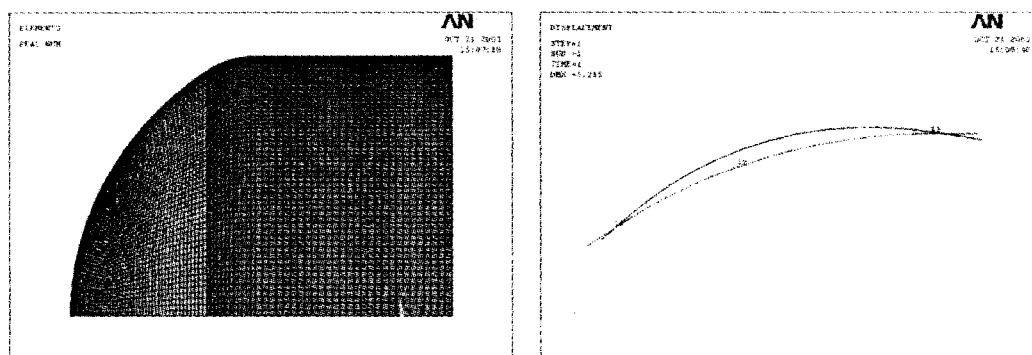


图 2 两边相切时的结构变形图

Fig.2 The deformation map when the structure tangent at two sides

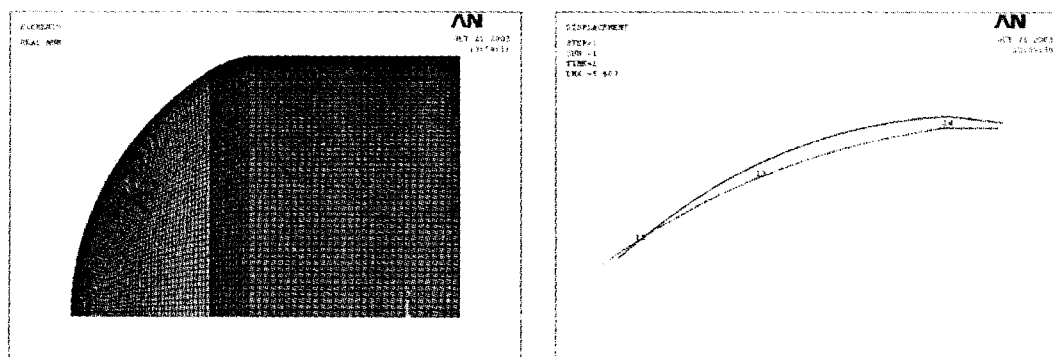


图 3 一边相切时的结构变形图

Fig.3 The deformation map when the structure tangent at A side

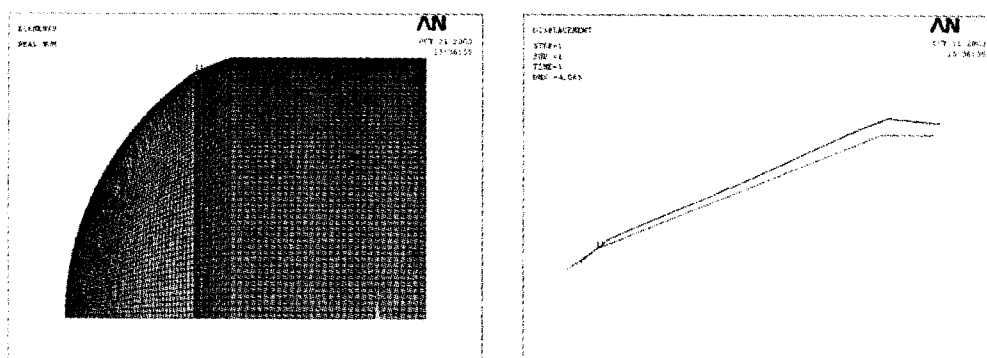


图 4 采用过渡短锥壳时的结构变形图

Fig.4 The deformation map when the transitional shell is a conical shell

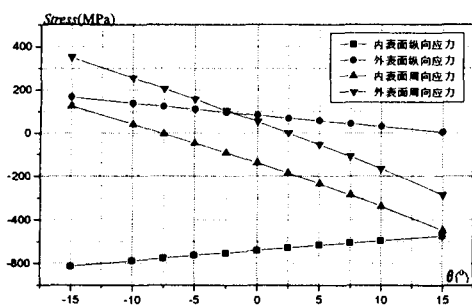
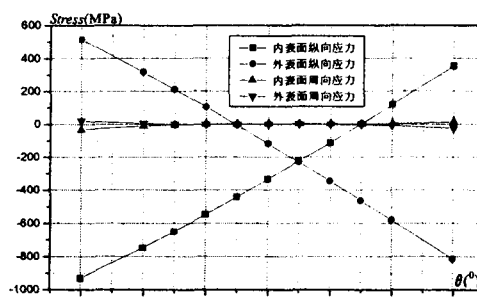
2.2 B 点连接角度对舱壁结构的强度分布的影响

过渡环壳与船体连接处 B 点过渡折角 $\theta = \varphi_3 - \varphi_{2B}$, 反映 B 点两侧壳板连接的光滑程度。为分析折角 θ 对舱壁结构强度的影响, 这里设计一端部球面舱壁模型, 主尺度如下:

耐压球面壳半径 R	4 500mm
与隔壁联接处耐压船体半径 r	4 047mm
过渡短环壳母线半径 r_0	1 500mm
耐压球面壳厚度 t_1	40.0mm

过渡短环壳板厚度 t_2	40.0mm
耐压船体壳板厚度 t_3	40.0mm
球面壳端点处母线法线与旋转轴夹角 ϕ_1	60°
过渡环壳端点 A 处母线法线与旋转轴夹角 ϕ_{2A}	60°
过渡环壳端点 B 处母线法线与旋转轴夹角 ϕ_{2B}	75°

夹角 θ 分别取为 15°、10°、7.5°、5°、2.5°、0°、-2.5°、-5°、-7.5°、-10°、-15°。分别计算这几个角度下,结构的典型位置应力分布。根据前一节的分析,结构的最大应力产生在过渡环中点 O 或 B 点处,绘制这两点内、外表面纵向应力与周向应力随夹角 θ 的变化曲线见图 5、6。由这两张曲线可以看出,这些应力值基本随 θ 线性变化, θ 对结构应力水平的影响很显著,综合分析 θ 角为 0 时,结构的整体应力水平最佳。

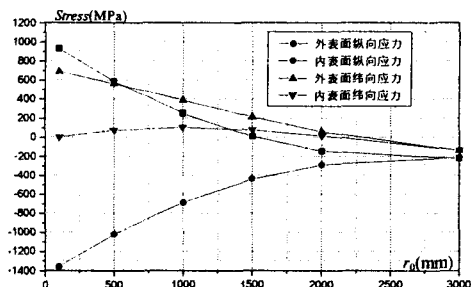
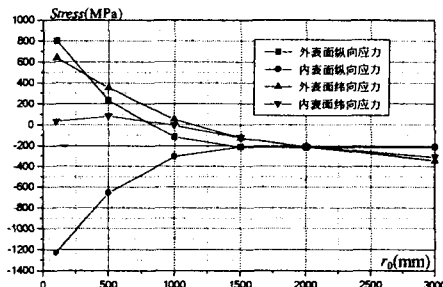
图5 过渡环中点应力随 θ 的变化曲线Fig.5 The stress at the middle of transitional annulus along θ 图6 相邻船体壳板 B 点应力随 θ 的变化曲线Fig.6 The stress at B side along θ

2.3 过渡短环壳母线半径对舱壁结构的强度分布的影响

前两节我们分析了过渡短环壳的形式及夹角 θ 对结构强度的影响,这一节我们利用有限元方法分析过渡短环壳母线半径 r_0 对舱壁结构的强度分布的影响。设计一舱壁模型,主尺度如下:

耐压球面壳半径 R	4 500mm
与隔壁联接处耐压船体半径 r	4 000mm
耐压球面壳厚度 t_1	40.0mm
过渡短环壳板厚度 t_2	40.0mm
耐压船体壳板厚度 t_3	40.0mm
耐压船体锥壳端点处母线法线与旋转轴夹角 ϕ_3	90.0°

分别取 $r_0=0, 100, 500, 1\,000, 1\,500, 2\,000$ mm 进行系列计算。绘制 O、B 两点内、外表面纵向应力与周向应力随 r_0 的变化曲线见图 7、8。分析这两组曲线,可出如下结论:对应特定的设计,有一应力水平最佳的过渡环母线半径。对于本例最佳的 r_0 值约为 2 000mm。

图7 过渡环中点应力随 r_0 的变化曲线Fig.7 The stress at the middle of transitional annulus along r_0 图8 相邻船体壳板 B 点应力随 r_0 的变化曲线Fig.8 The stress at B side along r_0

2.4 加强筋对舱壁结构强度的影响

此处的加强筋不是端部球面舱壁本身的结构,而是相邻耐压壳体上的环向加强筋。采用 2②相同结构形式,在与舱壁邻近的船体壳板上距 B 点 300mm 处布置一截面积为 $6\,217\text{mm}^2$ 的环向加强筋。加筋后的球面舱壁典型位置应力见表 4。比较表 2 与表 4 可见,加强筋对舱壁典型位置的应力计算结果影响不很显著。

表 4 A 边相切时,结构的变形与应力值(单位:MPa)

Tab.4 The deformation and stress when the structure tangent at A side

2②加筋	位移	转角	内表面应力		外表面应力	
			纵向	纬向	纵向	纬向
A球	2.60	0.016 5	-253	74	-146	80
A环	2.60	0.016 5	-253	74	-146	80
O点	5.40	0.004 8	-489	131	113	307
B环	4.0	-0.014 5	-554	30	192	283
B锥	4.0	-0.014 5	-702	-11	277	260

2.5 壳板厚度比对舱壁结构强度的影响

对 3 节 θ 为 0° 的模型即 $\phi_3 = \phi_{2B} = 75^\circ$, 保持其它参数不变, 调整板厚 t_3 , 分别为 25mm、30mm、35mm、40mm、45mm、50mm。分别对上述各个厚度下的模型进行计算, 绘制曲线见图 9, 比较 t_3/l_3 对舱壁典型位置应力的影响。可见, t_3/l_3 对 B 点纵向应力影响较大, 对环壳中点影响较小。

2.6 梁柱效应对计算精度的影响

下面我们讨论梁柱效应对计算结果的影响。在均匀水压作用下, 端部球面舱壁不仅受侧向压力, 还有膜压力的作用。在上面的分析计算中, 均采用小挠度假设, 认为侧向压力与膜压力分别独立作用, 互不影响, 因而可能引起一定的误差。这里我们采用大挠度假设对 2②结构形式重新计算, 并对结果进行比较, 见表 5, 括号里为不考虑梁柱效应引起的相对误差值。可见不考虑梁柱效应对结构的径向位移计算结果几乎没有影响, 转角计算有一定的偏差; 对我们最为关心的纵向应力最大误差小于 5%; 纬向应力虽然有一定的相对误差, 但绝对误差很小。因此可以认为小挠度解满足工程需求, 因为它需要很少的计算机时。

表 5 梁柱效应对计算结果的影响

Tab.5 The effect of girder-column affection on results

2②大挠度解	位移	转角	内表面应力		外表面应力	
			纵向	纬向	纵向	纬向
A球	2.59(0.4%)	0.018 7(13%)	-263(-2%)	71(2%)	-138(-2%)	83(-2.5%)
A环	2.59(0.4%)	0.018 7(13%)	-263(-2%)	71(2%)	-138(-2%)	83(-2.5%)
O点	5.32(-0.2%)	0.004 8(10%)	-508(-2%)	123(1%)	122(1%)	306(0.5%)
B环	3.68(0.3%)	-0.017 9(-13%)	-571(2%)	12(8%)	192(3%)	245(1%)
B锥	3.68(0.3%)	-0.017 9(-13%)	-749(-5%)	-39(25%)	301(5%)	280(4%)

3 结 论

本文利用 ANSYS 通用有限元程序对影响端部球面舱壁强度的几个主要参数进行了系列计算, 并

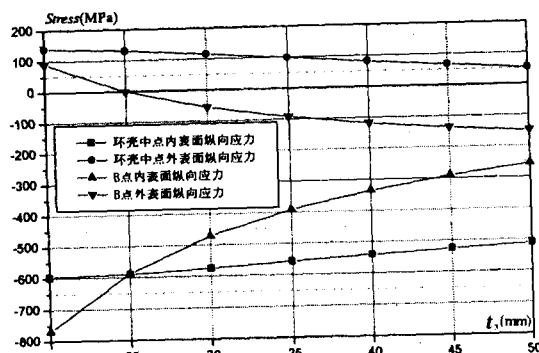


图 9 厚度对环壳中点及 B 点纵向应力的影响

Fig.9 The longitude stress at the middle of transitional annulus and B side along t_3

与其它理论方法进行了比较,证明本方法对边界和载荷条件的处理是合理可行的,见表6。经过上面的分析和讨论可得出如下主要结论:

(1) 过渡环两端均采用相切联接时的端部球面舱壁结构的应力水平最低。

(2) B点过渡折角 θ 在比较小的范围内对舱壁结构强度的影响基本成线性,过渡环中点纵向、纬向内处表面的应力均随 θ 增加而减小;与船体连接处的内表面纵向应力随 θ 增加而增大,外表面纵向应力随 θ 增加而增大, θ 角对该处纬向应力的影响不很显著。

(3) 对一特定的端部球面舱壁设计,都有一对应最小应力分布的最佳过渡短环壳母线半径。

(4) 舱壁与船体的壳板厚度比值 t_3/t_2 对船体连接处纵向应力影响较大,对环壳中点影响较小。

(5) 在进行舱壁结构分析计算时,可忽略梁柱效应的影响。

在本文分析的基础上,结合弹性壳体理论,可以得出简化的理论计算方法,便于工程使用。

表6 三种不同计算方法的结果比较(单位:MPa)

Tab.6 The result comparison by different methods

位 置	数值方法	理论方法 1 ^[2]	理论方法 2 ^[2]
O点内表面经向应力	-508	-500	-493
O点外表面经向应力	122	120	125
B锥内表面经向应力	-749	-767	-703
B锥外表面经向应力	301	341	278

参 考 文 献:

- [1] 许辑平. 潜艇强度[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- [2] 朱邦俊,王永军. 潜艇端部球面舱壁应力计算的一种近似方法[R]. 中国船舶科学研究中心科技报告,2003.
- [3] ANSYS 使用手册[CP]. 美国 ANSYS 公司印制,2000.
- [4] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.