

引用格式: 黄加强. 加肋锥—环—柱结合壳初始几何缺陷形态分析[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(3): 51–56.

HUANG Jiaqiang. Shape analysis of ring-stiffened cone-toroid-cylinder combined shells' initial geometrical imperfection[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(3): 51–56.

加肋锥—环—柱结合壳初始几何缺陷形态分析

黄加强

海军驻武汉第二船舶设计研究所军事代表室, 湖北 武汉 430205

摘要: 根据加肋锥—环—柱结合壳加工建造过程, 分析其中可能产生初始几何缺陷的环节和关键因素。同时参考现行规范, 根据大量环肋薄壳结构的建造经验, 分别对肋骨与壳板初始几何缺陷的形态进行分析, 并与已建模型存在的初始几何缺陷测量值进行对比, 进一步验证建造经验的可靠性。结果表明: 锥—环—柱结合壳初始几何缺陷主要因肋骨与壳板的角焊缝及壳板之间的环焊缝产生; 具有不同半波数的肋骨初挠度以及壳板凹凸度等为典型的初始几何缺陷形态。所得结果可为后续探寻初始几何缺陷对锥—环—柱结合壳力学性能的影响提供参考。

关键词: 锥—环—柱结合壳; 初始几何缺陷; 形态分析; 耐压壳; 加工建造

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2015.03.009

Shape analysis of ring-stiffened cone-toroid-cylinder combined shells' initial geometrical imperfection

HUANG Jiaqiang

Naval Military Representative Office in Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China

Abstract: According to the fabrication and construction process of cone-toroid-cylinders combined with pressure hulls, this paper analyzes the cause and location of initial geometrical imperfection and points out that the welding joint is the major cause behind imperfection. Then, based on the existing rules and experience of building ring stiffened thin shells, this paper studies the shape imperfection of ribs and shells, which is further validated after a comparison with the measurement result of current existing models. The article also reveals the rib's imperfection under various half waves and shell's imperfection with convex-concave as typical geometrical imperfection. In brief, this research provides a reference to analyze the effect of geometric imperfection on cone-toroid-cylinder combined shells.

Key words: cone-toroid-cylinder combined shell; initial geometrical imperfection; shape analysis; pressure shell; fabrication and construction

0 引言

在锥壳与柱壳之间嵌入一段环壳块, 取环壳块子午线所对的圆心角等于锥壳半锥角, 并使环壳块的两侧分别与锥壳、柱壳形成光滑连接, 这种锥—柱结合部的新型连接形式称为“加肋锥—环—柱结合壳”(以下简称“锥—环—柱结合壳”)。

理论分析和系列模型试验^[1-7]证明: 锥—环—柱结合壳可以很好地解决由于锥—柱结合处两侧壳母线斜率不连续而造成该区域较高应力集中的问题, 是一种优越的锥—柱结合壳连接结构形式; 然而锥—环—柱结合壳结构在加工建造过程中不可避免地会出现初始几何缺陷。要研究初始几何缺陷对锥—环—柱结合壳力学性能的影响, 首先需

要研究初始几何缺陷的部位及形态。目前有学者^[8-11]针对球壳、圆柱壳等结构的不圆度、肋间壳板凹凸度等初始几何缺陷形式,分析了初始几何缺陷对结构力学性能的影响;但对于锥—环—柱结合壳结构初始几何缺陷的产生原因及形态分析还未见报道。为此,本文拟从锥—环—柱结合壳的实际加工建造过程出发,分析初始几何缺陷出现的原因及部位,并对初始几何缺陷的形态进行总结,以利于分析初始几何缺陷对锥—环—柱结合壳力学性能的影响。

1 锥—环—柱结合壳加工过程

锥—环—柱结合壳加工过程为:环壳块及其延伸段采用数控机床车削加工;在环壳块壳两端分别通过角焊焊接1,2号肋骨(图1)形成环壳段;再通过环焊与艇体圆柱壳段、圆锥壳段对接,形成含锥—环—柱结合壳的舱段结构。其中,肋骨焊接方式以及壳板对接方式与普通环肋圆柱壳的加工建造相似,在此不再赘述,重点介绍环壳块的机加工过程。

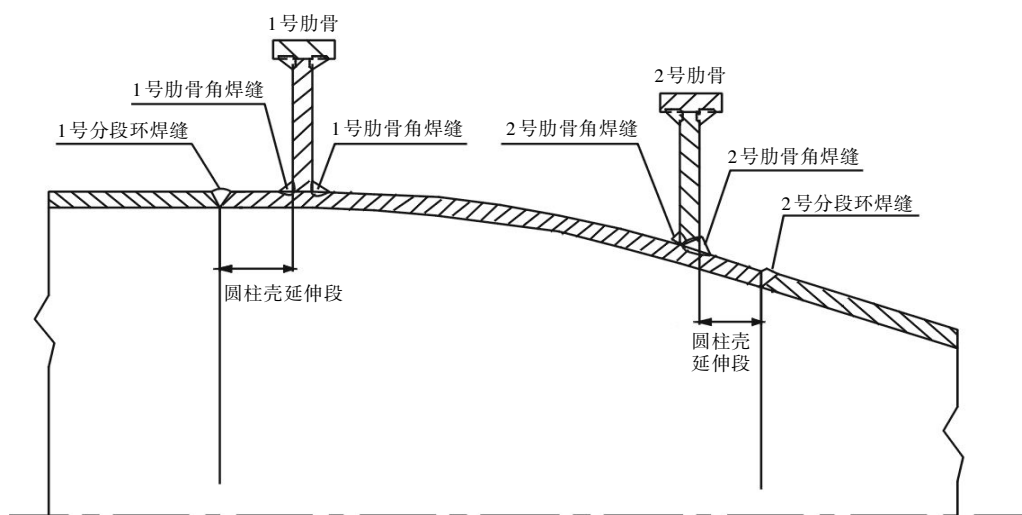


图1 锥—环—柱结合壳焊缝示意图

Fig.1 Welding line of cone-toroid-cylinder combined shell

锥—环—柱结合壳加工工艺流程图如图2所示。

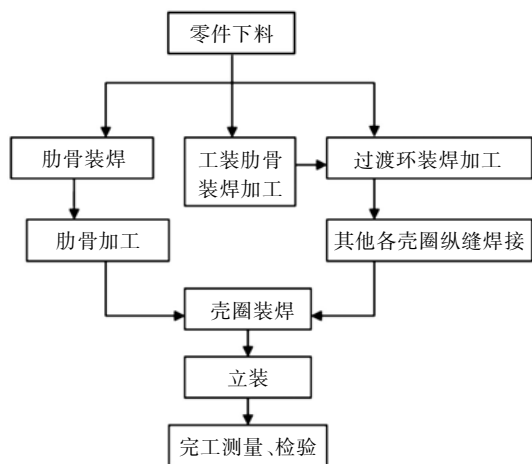


图2 锥—环—柱结合壳模型加工工艺流程图

Fig.2 Processing flow chart of cone-toroid-cylinder combined shell model

环壳段的加工分为毛坯加工与车削加工2部分。

1) 环壳段毛坯加工。

选取圆柱壳用于环壳段的毛坯(图3)加工,用刨边机加工坡口。

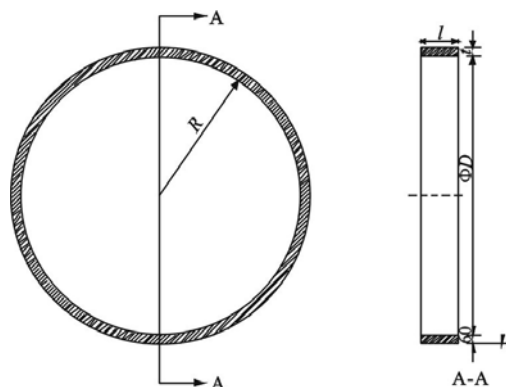


图3 用于加工环壳段的圆柱形毛坯

Fig.3 Cylindrical roughcast for toroid processing

2) 环壳段车削加工。

(1) 选用单柱移动数控立式车床,将环壳段吊上立车回转平台,使环壳段中心线与回转平台中心线对齐,偏差不大于1 mm。

(2) 调整环壳段的状态,将环壳段点焊在一块圆形钢板上,并用专用夹具将钢板固定牢固。

(3) 根据环壳段机加工技术要求,确定需车削的余量,编写车削程序。

(4) 车削加工时,根据立车的加工能力并结

合环壳段的余量值,合理确定进刀量。当车削加工进行到最后一刀之前,根据需要停车检查环壳段剩下的余量值,确定进刀量后再进行最后一刀的车削加工。

(5) 环壳段车削加工时,先加工两端面,再加工环壳段内表面,接下来是环壳段外表面,最后加工坡口。

图4所示为一加工成型的锥—环—柱结合壳模型。



图4 锥—环—柱结合壳模型示意图

Fig.4 Cone-toroid-cylinder combined shell model

2 锥—环—柱结合壳初始几何缺陷出现原因及部位分析

从第1节分析可知,锥—环—柱结合壳的加工建造过程主要包括环壳段的车削加工,以及肋骨、相邻锥柱壳的装配与焊接等,现从以上3个方面分析各主要过程可能出现的初始几何缺陷。

1) 环壳段车削加工所采用的单柱移动数控立式车床,车削精度一般可达0.1 mm,精度较高。与环肋圆柱壳焊接加工相比,可能产生的初始几何缺陷幅值量级较小,可视为无初始几何缺陷。

2) 肋骨的装配与焊接主要包括1,2号肋骨之间的装配与焊接。由第1节的分析可知,此处采用角焊,产生1,2号角焊缝,如图1所示。肋骨与环壳段壳板的装配与角焊引起1,2号肋骨的初始几何缺陷。

3) 壳板的装配与焊接主要为圆柱壳延伸段和圆锥壳延伸段通过对接焊焊接到相邻的圆柱壳与圆锥壳,形成1,2号环焊缝。该环焊缝引起壳板的初始几何缺陷。

3 锥—环—柱结合壳初始几何缺陷形态分析

初始几何缺陷对薄壳结构的影响,可以在壳体的非线性几何方程中得到体现^[12]。忽略初始几何缺陷引起的残余应力,则初始几何缺陷的分布与形态直接决定几何方程的修正方式。环肋锥—环—柱结合壳的初始几何缺陷分为肋骨初始几何缺陷以及壳板初始几何缺陷2部分,其具体的分布情况如第2节所述。现参考现行规范^[13],分别分析肋骨初始几何缺陷与壳板初始几何缺陷的形态。

3.1 肋骨初始几何缺陷形态分析

肋骨初始几何缺陷的表现形式主要有以下3种:肋骨垂直度偏差、肋骨波纹度偏差以及肋骨初挠度。其中,肋骨垂直度偏差与肋骨波纹度偏差容易修正,而肋骨径向初挠度则不易修正。由第2节的分析可知,锥—环—柱结合壳肋骨初始几何缺陷的产生起因于1,2号角焊缝。肋骨焊接缺陷统计分析表明:角焊缝引起的肋骨垂直度偏差与波纹度偏差幅值较小,易于修正,对锥—环—柱结合壳力学性能的影响较小;而角焊缝引起的初挠度幅值相对较大,不易修正,对锥—环—柱结合壳的力学性能影响较大。图4所示模型产品质量测量记录显示:肋骨垂直度偏差测量40个点,所测最大值为规范允许值($0.3h$,其中 h 为肋骨高度)的50.5%;肋骨波纹度偏差测量104个点,所测最大值为规范允许值($0.3h$,其中 h 为肋骨高度)的40.4%。垂直度偏差与波纹度偏差值均较小,且易于修正。

肋骨初挠度测量32个点,1,2号肋骨根部各16个测点。其中,1~16号测点布置在1号肋骨,17~32号测点布置在2号肋骨。表1和图5所示为肋骨初挠度测量结果。

表1 初挠度测量结果

Tab.1 The measuring results of initial deflection

测点	初挠度/ mm	测点	初挠度/ mm	测点	初挠度/ mm	测点	初挠度/ mm
1	2.1	9	2.1	17	0.0	25	0.1
2	1.5	10	1.4	18	1.3	26	1.1
3	0.1	11	0.0	19	0.0	27	0.0
4	-1.4	12	-1.5	20	-1.2	28	-1.1
5	-2.0	13	-2.1	21	-0.1	29	0.0
6	-1.5	14	-1.4	22	1.2	30	1.2
7	0.0	15	0.0	23	0.4	31	0.1
8	1.6	16	1.5	24	-1.1	32	-1.2

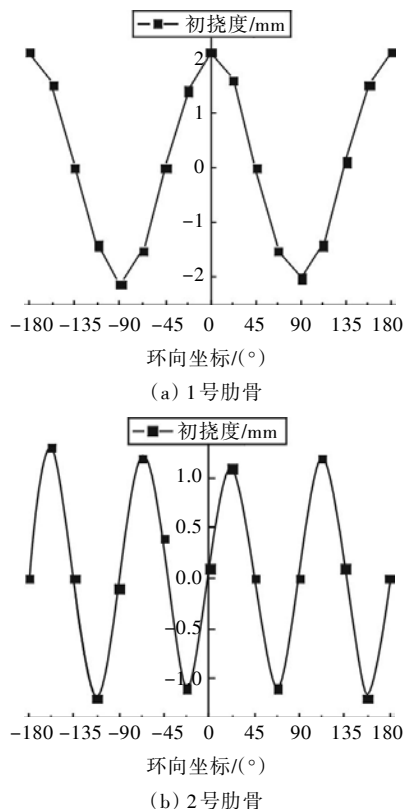


图5 肋骨初挠度沿环向坐标变化情况
Fig.5 Variation of rib's initial deflection with respect to ring coordinates

从图5中可以看出,1号肋骨初挠度沿环向呈4个半波,2号肋骨初挠度沿环向呈8个半波。根据大量环肋薄壳结构的建造经验,初挠度沿环向的形态主要有4个半波、6个半波、8个半波或其它组合波形等。图5所示模型初挠度测量结果符合环肋薄壳结构的建造规律。图6所示为肋骨初挠度典型周向波形示意图。

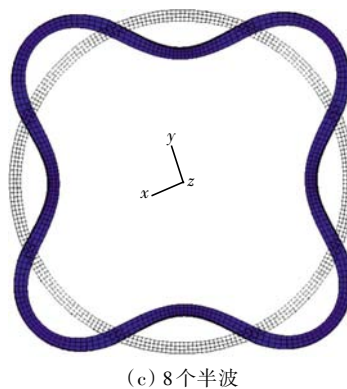
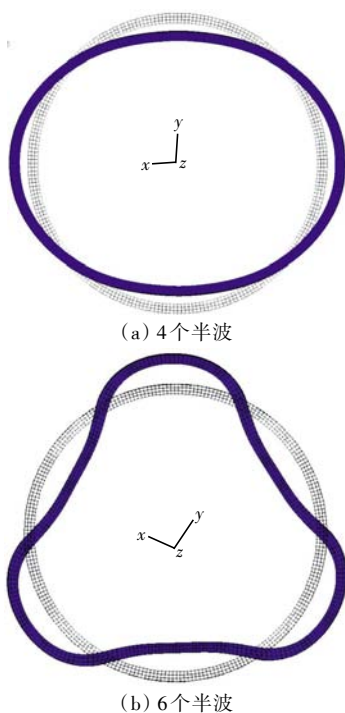


图6 肋骨初始几何缺陷示意图
Fig.6 Initial deflection of ribs

现行规范规定:圆柱壳、圆锥壳肋骨初挠度幅值不得大于 $0.0025R$ (R 为耐压壳壳板半径);与相邻圆柱壳、圆锥壳的要求一样,锥—环—柱结合壳肋骨初挠度幅值也不得大于 $0.0025R$,其幅值变化范围为 $0\sim 0.0025R$ 。

3.2 壳板初始几何缺陷形态分析

壳板的初始几何缺陷主要为由1,2号环焊缝引起的壳板局部凹凸度(图7),集中在圆柱壳段和圆锥壳段的肋间壳板上。

现行规范规定:圆柱壳、圆锥壳壳板凹凸度的幅值不得超过 $0.2t$ (t 为壳板厚度);与相邻圆柱壳、圆锥壳要求一样,锥—环—柱结合壳壳板凹凸度的幅值不得超过 $0.2t$,其幅值变化范围为 $0\sim 0.2t$ 。图4所示模型的测量结果显示,其壳板局部凹凸度最大幅值为规范允许幅值的44.1%,所测32个点全部在允许范围之内,具体数值见表2。

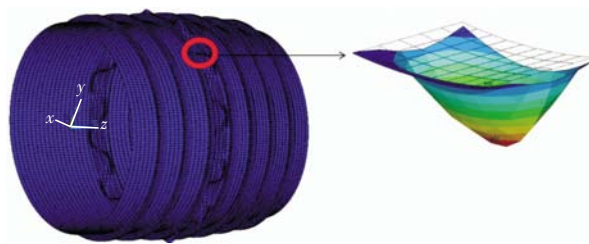


图7 圆柱壳段壳板凹凸度示意图
Fig.7 Convex-concave of cylinder's shell

表2 壳板凹凸度测量情况

Tab.2 The measuring results of initial convex-concave

测点	凹凸度/ mm	测点	凹凸度/ mm	测点	凹凸度/ mm	测点	凹凸度/ mm
1	0.1	9	-0.3	17	0.0	25	0.5
2	0.6	10	-0.1	18	-0.3	26	0.6
3	-0.6	11	-0.2	19	0.5	27	0.5
4	-0.3	12	-0.2	20	0.5	28	0.5
5	-0.3	13	-0.2	21	0.3	29	0.3
6	-0.1	14	-0.3	22	0.0	30	0.3
7	-0.1	15	-0.3	23	0.4	31	0.5
8	-0.2	16	0.6	24	0.6	32	0.2

图8所示为根据上述测量结果绘制的壳板凹凸度随环向坐标变化情况。

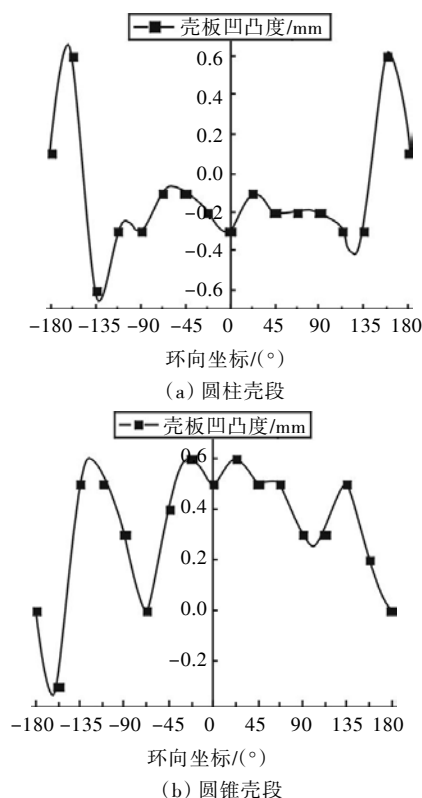


图8 壳板凹凸度随环向坐标变化情况

Fig.8 Variation of shell's convex-concave with respect to ring coordinates

从图8中可以看出,壳板凹凸度基本上呈波形变化,出现的位置及幅值大小具有随机性。然而壳板凹凸度的随机性不利于进一步分析。因此在进行理论分析时,不妨选取与含锥—环—柱结合壳舱段的一阶屈曲失稳模态中圆柱壳段、圆锥壳段壳板变形相同的壳板凹凸度作为分析对象,虽偏于安全,但易于得到经验类结论,以指导锥—环—柱结合壳的应用。

4 结 论

锥—环—柱结合壳是一种优秀的锥—柱连接结构,具有很高的应用价值。研究锥—环—柱结合壳初始几何缺陷,可以更精确地分析锥—环—柱结合壳的力学状态,指导其应用。本文从锥—环—柱结合壳的加工过程出发,分析锥—环—柱结合壳在加工建造过程中初始几何缺陷可能产生的原因及部位,并对初始几何缺陷形态进行分析,得到如下结论:

1) 锥—环—柱结合壳初始几何缺陷主要因肋骨与壳板的角焊缝及壳板之间的环焊缝产生;

2) 锥—环—柱结合壳初始几何缺陷主要为肋骨初挠度以及壳板凹凸度,其中肋骨初挠度集

中在环壳段两端的1,2号肋骨,壳板凹凸度集中在圆柱壳段、圆锥壳段的肋间壳板上;

3) 肋骨初挠度形态主要为4,6,8个半波或其他组合波形,壳板凹凸度可取舱段一阶失稳时对应的肋间壳板屈曲形态。

本文论述了锥—环—柱结合壳初始几何缺陷的主要部位及形态,可为后续分析初始几何缺陷对锥—环—柱结合壳力学性能的影响提供基础,并对实艇锥—环—柱结合壳加工建造阶段控制加工精度有指导作用。

参考文献:

- [1] 黄加强,郭日修.加肋锥—环—柱组合壳强度及稳定性模型实验研究[J].中国造船,1998(4):57-65.
HUANG Jiaqiang, GUO Rixiu. Model experimental research on stresses and stability of ring-stiffened cone-toroid-cylinder combined shell [J]. Ship Building of China, 1998(4):57-65.
- [2] 陈志坚,郭日修.加肋轴对称旋转壳非线性稳定性分析[J].中国造船,2004,45(1):54-60.
CHEN Zhijian, GUO Rixiu. Nonlinear stability analysis of ring-stiffened axial symmetrical shell of revolution [J]. Ship Building of China, 2004, 45(1):54-60.
- [3] 白雪飞,陈昕,丁锦超,等.凹型加肋锥—环—柱结合壳强度的模型试验研究[J].船舶力学,2006,10(2):65-72.
BAI Xuefei, CHEN Xin, DING Jinchao, et al. Experimental research of the strength of ring-stiffened concave cone-toroid-cylinder combined shell [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(2):65-72.
- [4] 白雪飞,任文敏,郭日修.组合加肋旋转壳应力和稳定性分析的Riccati传递矩阵法[J].工程力学,2008,25(3):18-25.
BAI Xuefei, REN Wenmin, GUO Rixiu. Stress and stability analysis of ring-stiffened joined revolutionary shell using Riccati transfer matrix method [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3):18-25.
- [5] 郭日修,吕岩松,黄加强,等.加肋锥—环—柱结合壳试验研究[J].船舶力学,2008,12(2):252-257.
GUO Rixiu, LV Yansong, HUANG Jiaqiang, et al. Experimental research on the ring-stiffened cone-toroid-cylinder combination shell [J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(2):252-257.
- [6] 郭日修,吕岩松.凹型加肋锥—环—柱结合壳局部加强方式的研究[J].哈尔滨工程大学学报,2010,31(2):170-176.
GUO Rixiu, LV Yansong. Research on local strengthening modes for ring-stiffened concave cone-to-

