DOI: 10.3901/JME.2020.07.164

纵向波纹柱形耐压壳屈曲数值分析与试验研究*

唐文献^{1,2} 李胜秋¹ 张 建^{1,2} 王月阳¹ 王为民¹ 张 山¹

(1. 江苏科技大学机械工程学院 镇江 212003;

2. 江苏科技大学江苏省船海机械先进制造及工艺重点实验室 镇江 212003)

摘要: 采用周向或轴向波纹, 增强圆柱形耐压壳(简称圆柱壳)的承载能力已备受关注。采用数值与试验结合的方法, 研究等容积圆柱壳和纵向波纹柱形耐压壳(简称波纹柱壳)的屈曲特性。首先, 建立波纹柱壳的几何模型和数值模型, 分析均布外压作用下, 波纹参数变化对波纹柱壳屈曲特性的影响规律; 其次, 依据承载能力进行波纹参数优化设计, 并制造两组等壁厚和等容积的圆柱壳和波纹柱壳实物模型; 再次, 测量两种模型的实际几何数据, 分别建立其数值模型, 并进行屈曲特性分析; 最后, 对圆柱壳和波纹柱壳的实物模型进行静水压力试验, 与数值结果作对比分析。结果表明: 均布外压下, 等容积纵向波纹柱壳的屈曲性能优于柱形壳, 其平均屈曲载荷提高了 56.8%, 纵向波纹改善了圆柱壳的承载能力。

关键词: 均布外压; 柱形耐压壳; 纵向波纹; 屈曲特性

中图分类号: U661

Numerical and Experimental Study on Buckling of Longitudinal Corrugated Cylindrical Pressure Shell

TANG Wenxian^{1,2} LI Shengqiu¹ ZHANG Jian^{1,2}

WANG Yueyang¹ WANG Weimin¹ ZHANG Shan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Manufacture and Process for Marine Mechanical Equipment, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003)

Abstract: Strengthening the carrying capacity of cylindrical pressure-resistant shells by adding circumferential or axial corrugations has received considerable research attention. The buckling behaviors of cylindrical shell and longitudinal corrugated cylindrical shell with equal volume are studied using numerical and experimental methods. Firstly, the geometric and numerical models of the corrugated cylinder shell are established, and the influence of the corrugation parameters on the buckling of the corrugated cylinder shell under uniform external pressure is analyzed. Secondly, two sets of cylindrical and corrugated cylindrical shells with equal wall thickness and volume are designed and manufactured after the parameter optimization of corrugation. Then, the outer surfaces of these fabricated shells are scanned and transformed into numerical models to investigate their buckling characteristics. Finally, each model is slowly loaded to collapse under quasistatic pressure in a cylindrical pressure vessel and the relationship of collapse loads and numerical buckling loads is analyzed. The results show that the buckling performance of the longitudinal corrugated cylinder shell is better than that of the cylindrical shell, and the magnitude of the average buckling loads has a 56.8% increase. The buckling capacity of cylindrical shell can be significantly improved by addition of longitudinal corrugated stiffener.

Key word: uniform external pressure; cylindrical shell; longitudinally corrugated stiffener; buckling

0 前言

目前各种水下压力容器诸如潜地弹道导弹的弹身、潜艇、潜水器以及鱼雷等的耐压壳体有球形、圆柱形等, 圆柱形耐压壳因其良好的承载能力和结

构强度, 一直备受关注^[1]。但是, 这种柱形壳易受几何构型、壳体壁厚、材料属性以及几何缺陷的影响而产生弹性或弹塑性屈曲^[2]。

增加柱形耐压壳抗屈曲能力的方式有两种。一种方式是改变壳体横向或纵向的曲率。因此, 对于具有正高斯曲率的柱形壳体在均布外压下的屈曲性能已经进行了广泛的研究。BLACHUT 等^[3-5]对桶形壳的弹塑性屈曲进行了试验和数值研究, 结果表明

* 国家自然科学基金(51709132)、江苏省自然科学基金项目(BK20150469)资助项目。20190419 收到初稿, 20190919 收到修改稿

相对于等效柱壳, 其屈曲承载能力显著增强, 且对缺陷敏感性更低。此外, JASION 等^[6-7]对各种双曲率壳体的弹性屈曲进行了数值分析, 提出了卡西尼卵形线以及闭合式球形壳体结构, 并证明了其承载能力的优越性。张建等^[8-11]创新地提出一种仿生蛋形壳体, 并对一系列蛋形壳的屈曲进行了分析、试验和数值研究。

另一种增强其抗屈曲能力的方式是通过增加周向、轴向的肋条或波纹来加强圆柱壳体^[12-14]。在这些加强方式中, 波纹加强被证明是最有效且最具潜力的方法, 而且不需要增设额外的加强肋。GHANBARI 等^[13-14]对周向波纹圆柱壳的非线性屈曲进行了试验和数值研究, 并提出了简单的设计图表, 可以通过半经验的方法预测壳体屈曲载荷。

但对于波纹柱壳的研究大多关注于周向波纹, 而对纵向波纹的研究较少。GHANBARI 等^[15]虽然研究了不同波纹数对波纹柱壳屈曲性能的影响, 却没有探讨不同波纹形状的影响。因此, 本文探讨了不同波纹形状参数对纵向波纹柱形耐压壳屈曲性能的影响规律, 以获得抗压性能良好的纵向波纹参数。经过参数优选, 分别采用数值法和实验法, 进行等效柱壳的屈曲特性比较研究。研究结果对提高圆柱壳的承载能力具有重大理论意义和应用价值。

1 波纹参数对屈曲特性的影响规律

1.1 波纹柱壳几何模型及数值模型

波纹柱壳是利用波纹将其基柱(圆柱壳, 其截面为基圆)在周向分割为若干段, 并通过波纹连接而获得的一种耐压壳体, 如图 1 所示, 其基圆半径为 R 。为便于研究, 将波纹定义为由两段与基圆相切、半径为 r 的圆弧与一段基圆弧构成, 其圆心角为 β , 其中基圆弧对应的圆心角为 α 。参考文献 15, 波纹形状参数可用波纹深度 d 和波纹宽度 w 来表征。

图 1 波纹柱壳局部截面形状及参数

由图 1 波纹与基圆的几何关系, 可得出

$$w = 2R \sin \frac{\beta - \alpha}{2} \quad (1)$$

经推导, 波纹半径 r 为

$$r = \frac{2R(R-d) \cos \frac{\beta - \alpha}{2} - (R-d)^2 - R^2}{2 \left[(R-d) \cos \frac{\beta - \alpha}{2} - R \right]} \quad (2)$$

据此, 可建立波纹柱壳的数值模型。波纹柱壳上, 相邻波纹的连接有两种状态, 即相切和相交, 如图 2 所示。对于确定的 α 、 β , 改变波纹深度 d 会改变波纹的连接状态。定义相切时的波纹深度 d 为临界值 d_0 , 则当 $d < d_0$ 时, 在深度 d 的范围内, 波纹相交于一点, 如图 2b 所示; 当 $d > d_0$ 时, 波纹相交于两点, 如图 2c 所示, 建模时需舍弃此种状态。

图 2 波纹连接状态

参考 GHANBARI 等^[15]的研究结果, 选择波纹柱壳基本参数为: 截面基圆直径 D 取为 150 mm, 高度 H 为 220 mm, 壁厚 0.2 mm, 波纹数 $n=12$ 。通过改变 α/β 和 d 的数值, 可以建立具有不同波纹形状参数的波纹柱壳几何模型。 α/β 取值范围为 0~4/5, d 的取值范围为 2~20 mm, 各参数取值详见表 1。

表 1 不同波纹参数的波纹柱壳临界屈曲压力

α/β	临界屈曲压力 P_{nib}/kPa						
	$d=2\text{ mm}$	$d=4\text{ mm}$	$d=6\text{ mm}$	$d=8\text{ mm}$	$d=10\text{ mm}$	$d=15\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$
0	22.684	56.806	70.369	84.172	91.684	95.428	97.25
1/4	19.24	62.734	66.598	68.474	75.91	93.43	—
1/3	50.299	62.971	63.228	67.614	75.646	—	—
1/2	30.972	58.167	58.225	58.245	51.315	—	—
2/3	26.563	48.876	50.413	—	—	—	—
3/4	24.537	42.170	—	—	—	—	—
4/5	23.824	38.014	—	—	—	—	—

注：表中空缺处为图 2c 中所示情况。

根据几何模型，可以在有限元软件 ABAQUS 中，建立其数值模型，如图 3 所示。选择不锈钢材料，其性能参数为：弹性模量 $E=210\text{ MPa}$ ，泊松比 $\mu=0.3$ ，屈服强度 $[\sigma]=385\text{ MPa}$ 。壳体外表面施加初始均布压力 $P_0=1\text{ MPa}$ 。约束定义：底部边界所有节点限制 x 、 y 、 z 方向自由度，即 $U_x=U_y=U_z=0$ ，顶部圆周所有节点限制平面 x 、 y 方向自由度，保留轴向自由度，即 $U_x=U_y=0$ 。

图 3 数值计算边界条件

1.2 数值计算结果分析与波纹参数优选

采用有限元分析软件 ABAQUS 的弧长法^[16]，对不同波纹形状的波纹柱壳进行非线性屈曲分析，得到各壳体临界屈曲载荷 P_{nib} ，列于表 1。

由表 1 可以看出以下几点。

(1) 横向比较，对于确定的 α/β ，波纹深度越大，屈曲载荷越大，特别地，当 $\alpha/\beta=0$ ，即 $\alpha=0$ 时，波纹的形状是圆弧，这表明波纹的形状是圆弧形最优(抗屈曲能力强)。

(2) 纵向比较，对于确定的波纹深度，随 α/β 增大，总体趋势是屈曲载荷减小。但当波纹深度在 2-4 mm 区间， $\alpha/\beta<1/2$ 时，屈曲载荷发生波动，表明扁平波纹发生屈曲失效的概率较大。

基于以上分析，并结合表 1 中的屈曲载荷数据，可以得出，当 $\alpha/\beta=0$ ， $d=20\text{ mm}$ 时，壳体屈曲载荷值最大。因此，选择此波纹参数设计后续试验模型。根据式 1 和式 2 可以计算出此时波纹为一段半径 $r=15.57\text{ mm}$ 的圆弧，如图 4 所示。

图 4 $\alpha/\beta=0$ ， $d=20\text{ mm}$ 时的波纹结构示意图

2 等效柱壳屈曲特性数值分析

2.1 等效柱壳设计及模型制作

根据上述分析、选择的优化模型，按照等容积原则，即壳体内部空腔体积相等，构建圆柱壳和波纹柱壳结构模型(称为等效柱壳)，其参数如表 2 所示。表中 H 为壳壁高度， t 为壁厚， a 、 b 分别为两端凸缘的高和宽。 D_1 为圆柱壳内壁直径， D_2 为波纹柱壳内壁基圆直径， r 为波纹半径， D_2 与 r 取值均为前节所得波纹壳参数。

表 2 等效柱壳结构参数

	D/mm	r	H/mm	t/mm	a/mm	b/mm
圆柱壳	D_1	—	220	2	7	10
波纹柱壳	D_2	15.57				

据此，设计两种等容积柱壳模型，如图 5 所示。由于两种耐压壳容积相等，可以根据几何关系列出

$$\pi R^2 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) + (R-r)(R-d) \sin \frac{\pi}{12} = \pi R_1^2 \quad (3)$$

式中， $d=20\text{ mm}$ ， $\frac{R-d}{\sin \theta} = \frac{r}{\sin(\pi/12)}$ 。由式(3)可

得等体积圆柱壳内壁直径 $R_1=59.27$ mm, 则 $D_1=118.54$ mm。

图 5 两种壳体设计结构

考虑模型制作的便捷性, 采用 3D 打印技术分别加工两组柱形壳和波纹柱壳试验模型, 并分别命名为 SD1、SD2、SD3、SD4, 如图 6 所示。模型材料选用光敏性好、固化程度高以及湿态强度高的光敏树脂, 其性能参数如下: 弹性模量 $E=2510$ MPa, 泊松比 $\mu=0.41$, 最大抗拉强度为 $[\sigma]=20$ MPa。同时, 使用硅橡胶将厚度 $c=5$ mm 的 304 不锈钢板胶粘于样品两端, 以使模型受压试验过程中, 保持密封状态。

图 6 壳体试验模型

2.2 等效柱壳试验模型几何测量

等效柱壳试验模型的参数包括壁厚和轮廓等形状尺寸。使用测厚仪对 4 个试验模型的壳壁分别进行厚度测试, 如图 7a 所示, 沿模型周向均分 12 组, 每组沿轴向测 20 个点位, 共计测 240 个点位的厚度, 测试结果如表 3 所示。

表 3 厚度测量结果

模型	最小厚度 $t_{\min}/\text{mm}$	最大厚度 $t_{\max}/\text{mm}$	平均厚度 t_{av}/mm	标准差 t_{std}/mm
SD1	1.835	1.991	1.894	0.031
SD2	1.845	1.976	1.919	0.030
SD3	1.831	1.975	1.930	0.029
SD4	1.845	1.971	1.898	0.029

使用 3D 扫描仪对每个试验模型进行外部轮廓扫描, 以获取其真实轮廓模型, 扫描设备选用 Open Technology 公司的 Cronos 3D 扫描仪, 如图 7b 所示。由三维扫描获得的壳体轮廓参数建立相应数值模型, 具有由加工制造产生的初始缺陷。

图 7 模型参数测量

2.3 基于试验模型的等效柱壳数值分析

为验证第 1 节中所述的数值计算方法, 对 4 个扫描获得的等效柱壳数值模型进行几何非线性屈曲分析。采用与第 1 节相同的边界条件、初始载荷及计算方法。每个数值模型的壳体厚度定义为测试所得平均厚度 t_{av} , 列于表 3。由于扫描模型是由不同角度扫描的多个片体自动拼接而成, 且 4 个壳体均属于薄壳结构的范畴^[17], 因此选择四边形壳单元 S4 作为主要网格类型, 少量三角形壳单元 S3, 每个壳体网格划分的细节列于表 4。

表 4 数值模型网格数及数值计算结果

模型	网格数		$P_{\text{scan}}/\text{kPa}$
	S3	S4	
SD1	188	26904	99.019
SD2	108	26734	100.354
SD3	258	32497	165.081
SD4	104	31205	162.801

弧长法计算可以得到各壳体模型屈曲过程的平衡路径, 而平衡路径曲线中极值点所对应的载荷即为临界屈曲载荷 P_{scan} , 列于表 4。从表 4 中可以看出, 对于 2 个圆柱壳, 临界屈曲载荷分别为 99.019 kPa、100.354 kPa, 2 个波纹柱壳的临界屈曲载荷为 162.801 kPa、165.081 kPa。纵向波纹柱壳平均临界屈曲载荷约为等效圆柱壳的 1.6 倍。

以模型 SD1 的平衡路径(图 8)为例, 在其屈曲过程中, 实际载荷首先单调增加, 在到达峰值点后,

出现平缓下降。4 个模型峰值点的屈曲模式如图 9 所示,在壳体中间部位出现向内凹陷变形。平衡路径末端的后屈曲模式则是中间部位的局部塌陷。

图 8 模型 SD1 的平衡路径

图 9 临界屈曲点处屈曲模式

3. 等效柱壳屈曲特性试验研究

3.1 等效柱壳试验模型误差检测

使用三维检测软件 GOM Inspect 对三维扫描结果进行误差检测。软件自动将扫描点云数据转换为三维网格数据,通过比较扫描数据和标称 CAD 数据以及分析假色图进行相关检测。误差检测结果如图 10 所示。

图 10 轮廓误差检测结果

如图 10 所示,右侧数值带数据表示误差大小范围,曲线则表示误差频数分布。由图可知,每个模型的误差频数分布相差不大,表明模型生产过程一致性较高,且误差范围均为 $-0.8 \sim 0.8$ mm,大部分误差仅为 $-0.6 \sim 0.4$ mm,不及壁厚的 0.4 倍。

表 3 列出模型壁厚测量结果,可以看出,模型壁厚值为 $1.831 \sim 1.991$ mm 不等,略小于设计标称值 2 mm,测试厚度与标称厚度存在最大 0.2 mm 左右的误差,且其标准偏差均较小。由此可以认为 4 个试验模型与设计模型具有基本一致。

3.2 静水均布外压试验

试验采用自主研发的深海高压模拟实验舱(图 11),用以模拟水下高压环境。为保证试验的准确性,需要先对压力舱进行空压操作,即将舱内注满水后对其进行加压操作,以测试设备是否正常工作。将模型放入压力舱中,向舱内注满水以排出空气,封闭压力舱。通过手动试压泵向舱内缓慢注水加压,,待听到因模型发生破坏所发出爆裂声后,停止加压并记录试验数据。舱内卸压后,打开舱盖,取出模型。试验测得各模型破坏压力 P_{test} 列于表 5。

表 5 静水压力试验破坏载荷

模型	SD1	SD2	SD3	SD4
$P_{\text{test}}/\text{kPa}$	93.125	102.125	157	155.75
$P_{\text{scan}}/P_{\text{test}}$	1.063	0.983	1.051	1.045

图 11 高压模拟实验舱

从图 12 的压力-时间曲线可以看出,试验中,模型实际承受载荷总体上单调增加,直至发生破坏为临界点,之后压力曲线急剧下降。增压过程中,曲线斜率的变化归因于手动试压泵不同的加载速率,以及模型在此过程中发生的不同变形情况。由表 5 中所列破坏载荷可以看出,2 个圆柱壳,破坏压力值范围为 $99.019 \sim 100.354$ kPa,2 个波纹柱壳的破坏压力值范围为 $155.75 \sim 157$ kPa。波纹柱壳的平均破坏载荷比圆柱壳高出约 56.8%,这说明了纵向波纹加强是提高柱形壳体屈曲能力的有效方法。

由于光敏树脂材料在室温下的脆性, 所有试验模型最终破坏形式均为一侧被压裂成碎片, 如图 13 所示, 试验模型的破坏位置基本上均位于壳体的中间区域。且波纹柱壳破裂面积较圆柱壳小, 归因于波纹柱壳每段波纹的局部曲率高于圆柱壳体曲率^[17]。

图 12 压力-时间曲线

图 13 试验模型破坏形式

3.3 对比分析

对扫描模型进行数值分析所得临界屈曲压力为 P_{scan} , 对应于试验破坏载荷 P_{test} 。从表 5 可以看出, 圆柱形壳体 SD1 和 SD2 的临界屈曲压力 P_{scan} 为相应试验破坏压力 P_{test} 的 0.983~1.063 倍, 波纹柱壳 SD3 和 SD4 的临界屈曲压力 P_{scan} 是对应试验破坏压力 P_{test} 的 1.045~1.051 倍。对比表 4 与表 5, 各模型数值计算所得临界屈曲压力 P_{scan} , 相对于试验破坏压力 P_{test} 的误差仅分别为 6.33%、1.73%、5.15%、4.53%, 数值计算与试验结果误差较小, 属于正常范围内。对比模型试验破坏形式(图 12)与数值分析临界屈曲模式(图 9)及后屈曲模式(图 8), 其破坏位置基本一致, 均位于壳体中间部位。总体上, 试验与扫描模型数值计算结果基本一致。结果表明, 在容积等效的原则下, 波纹柱壳抗屈曲能力较圆柱壳有显著提高。

4 结论

(1) 通过探讨不同波纹形状参数对波纹柱壳屈

曲载荷的影响规律, 得出当波纹深度较小时, 壳体屈曲载荷会随着波纹宽度的变化发生波动。但总体趋势为波纹深度越大, 波纹宽度越大, 其屈曲载荷也愈高。

(2) 数值计算结果与相应试验结果吻合良好。等效柱壳数值分析结果显示, 纵向波纹柱壳平均临界屈曲载荷约为等效圆柱壳的 1.6 倍; 压力试验证明纵向波纹柱壳的平均破坏压力比圆柱壳高 56.8%。由此可确定纵向波纹柱壳比常用的圆柱壳拥有更高的抗屈曲性能, 纵向波纹加强结构显著增强了圆柱壳体承载外压的能力。

(3) 为考虑模型制作的便捷性, 采用树脂材料制作试验模型, 初步验证了纵向波纹柱壳的良好的抗压性能, 但与工程应用中金属成型的耐压壳体相比存在差别, 所以接下来的研究工作将通过对金属模型进行试验研究, 以进一步验证纵向波纹柱壳抗压能力的优越性。

参 考 文 献

- [1] ROSS C T F. A conceptual design of an underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(16): 2087-2104.
- [2] BLACHUT J. Experimental perspective on the buckling of pressure vessel components[J]. Applied Mechanics Reviews, American Society of Mechanical Engineers, 2014, 66(1): 10803.
- [3] BLACHUT J, WANG P. Buckling of barreled shells subjected to external hydrostatic pressure[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2001, 123(2): 232-239.
- [4] BLACHUT J. Buckling of externally pressurised barrelled shells: A comparison of experiment and theory[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Elsevier, 2002, 79(7): 507-517.
- [5] BLACHUT J. Optimal barreling of steel shells via simulated annealing algorithm[J]. Computers and Structures, 2003, 81(18-19): 1941-1956.
- [6] JASION P, MAGNUCKI K. Elastic buckling of Cassini ovaloidal shells under external pressure - Theoretical study[J]. Archives of Mechanics, 2015, 67(2): 179-192.
- [7] JASION P, MAGNUCKI K. Elastic buckling of clothoidal-spherical shells under external pressure - Theoretical study[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 86: 18-23.
- [8] 张建, 朱俊臣, 王明禄, 等. 蛋形耐压壳设计与分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 155-161.
ZHANG Jian, ZHU Junchen, WANG Minglu, et al. Design and analysis of egg-shaped pressure hulls[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 155-161.
- [9] ZHANG Jian, WANG Minglu, WANG Weibo, et al.

- Buckling of egg-shaped shells subjected to external pressure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 113: 122-128.
- [10] ZHANG Jian, WANG Minglu, WANG Weibo, et al. Investigation on egg-shaped pressure hulls[J]. *Marine Structures*, 2017, 52: 50-66.
- [11] ZHANG Jian, ZHU Benyi, WANG Fang, et al. Buckling of prolate egg-shaped domes under hydrostatic external pressure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119: 296-303.
- [12] FORYŚ P. Optimization of cylindrical shells stiffened by rings under external pressure including their post-buckling behaviour[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 95: 231-243.
- [13] GHANBARI G T, JIAO H, HOLLOWAY D. An experimental study on externally pressurized stiffened and thickened cylindrical shells[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 85: 359-366.
- [14] ROSS C T F, WADDINGTON A, PUNJAU D, et al. Geometrical and material non-linear analyses of corrugated circular cylinders suffering buckling under external hydrostatic pressure[C]// *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Civil*, 2013, Cagliari, Sardinia, Italy. Stirlingshire, Scotland: Civil-Comp Press, 2013: 1-22.
- [15] GHANBARI G T, JIAO H, HOLLOWAY D. Longitudinally stiffened corrugated cylindrical shells under uniform external pressure[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 2015, 110: 191-199.
- [16] 中国船级社. 潜水系统和潜水器建造入级造规范[R]. 北京, 2013.
- China Classification Society (CCS). Rules for the classification and construction of diving systems and submersibles[R]. Beijing, 2013.
- [17] ZHANG Jian, ZHANG Meng, TANG Wenxian, et al. Buckling of spherical shells subjected to external pressure: A comparison of experimental and theoretical data[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 111: 58-64.
-
- 作者简介: 唐文献, 1962 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为复杂产品数字化设计制造, 海洋工程装备设计理论与方法。
E-mail: tangwenxian@163.com
- 李胜秋(通信作者), 男, 1995 年出生。主要研究方向为耐压壳屈曲理论研究与应用。
E-mail: tanteskid@hotmail.com