

基于响应面法的柱形壳内高压胀形工艺优化

孙志莹, 施正贤, 申明廷

(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对柱形壳在制造过程中的厚度均匀性和成形性能差等问题, 提出采用橡胶内高压胀形工艺进行柱形壳的成形, 并通过优化肩部传力区域的工艺参数来提高柱形壳的成形性能。基于响应面法中的 Box-Behnken Design 进行试验方案的设计, 建立并优化了以模具结构中肩部传力区域的内圆角半径、外圆角半径、斜边角度和摩擦因数为设计变量, 以最大减薄率为响应值的响应面模型, 并通过对响应面模型进行方差分析和相关性分析, 确定了柱形壳内高压胀形的最佳工艺参数组合为: 内圆角半径为 9.89 mm, 外圆角半径为 1 mm, 斜边角度为 10.13°, 摩擦因数为 0.104。采用最佳的工艺参数进行柱形壳内高压胀形模拟分析和试验, 验证了响应面模型优化的可靠性和模拟分析的准确性。

关键词: 柱形壳; 内高压胀形; 响应面法; 模具结构; 厚度分布; 最大减薄率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.014

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 10-0095-07

Optimization on internal high-pressure bulging process for cylindrical shell based on response surface method

Sun Zhiying, Shi Zhengxian, Shen Mingting

(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: For the problems of non-uniform thickness distribution and poor formability of cylindrical shells in the manufacturing process, the rubber internal high-pressure bulging process was proposed to form cylindrical shells, and the formability of cylindrical shell was improved by optimizing the process parameters of shoulder force transmission area. Then, the test scheme was designed based on Box Behnken Design in the response surface method, and taking the inner fillet radius, outer fillet radius, bevel angle and friction factor of the shoulder force transmission area in the die structure as the design variables and the maximum thinning rate as the response value, the response surface model was established and optimized. Furthermore, the variance analysis and correlation analysis were conducted by the response surface model, and the optimal combination of process parameters for the internal high-pressure bulging of cylindrical shell was determined as the inner fillet radius of 9.89 mm, the outer fillet radius of 1 mm, the bevel angle of 10.13° and the friction factor of 0.104. Thus, the simulation analysis and test of internal high-pressure bulging in the cylindrical shell were carried out with the optimal process parameters to verify the reliability of the response surface model optimization and the accuracy of the simulation analysis.

Key words: cylindrical shell; internal high-pressure bulging; response surface method; die structure; thickness distribution; maximum thinning rate

近年来, 随着国家海洋强国战略的不断推进和深海勘测要求的提高, 潜水器的性能要求也越来越高, 作为深海潜水器的重要组成部分, 耐压壳起着承载外部压力、提供浮力以及保护内部器件等作用。在诸多耐压壳形状中, 柱形壳由于具有高效的承载作用和空间利用率, 被广泛应用于水下装备。柱形壳是一种柱

形结构的薄壁件, 柱形结构主要包括圆柱形、椭圆柱形等曲线截面构型, 以及方柱形和异形柱等非曲线截面构型^[1]。由于薄壁柱形壳结构独特的几何形状特征、较低的制造难度和高效的承载作用, 因而被广泛应用于工程实践中, 尤其是圆柱形壳体, 被广泛用于深海潜水器耐压壳、钢筒仓、储油罐和核反应堆等^[2-4]。管材内高压胀形作为一种近净成形的现代塑性加工技术, 是以管材作为坯料, 通过向管材内部施加超高压介质和轴向加力补料, 将管坯成形为所需形状的先进制造技术^[5-7]。使用内高压胀形技术制造柱形壳能有效节约材料、减少管坯和模具数量, 同时能提高强度、刚度和加工质量, 降低生产成本^[8-10]。但

收稿日期: 2023-02-01; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52205372); 张家港市产学研预研资金项目 (ZKCY2131); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX22_1924)

作者简介: 孙志莹 (1984-), 女, 博士, 讲师

E-mail: szy611@just.edu.cn

是在成形过程中，模具型腔肩部传力区域的内、外圆角半径、过渡区域的斜边角度以及橡胶与管间的摩擦因数直接决定着柱形壳的加工质量和精度，尤其当胀形深度较大时，这些因素直接决定着薄壁柱形壳的生产合格率。因此，研究模具型腔的内、外圆角半径、斜边角度以及摩擦因数对柱形壳加工精度的影响规律具有十分重要的意义。

本文基于 Box-Behnken Design 设计试验，并利用数值分析软件模拟相同胀形深度，不同内、外圆角半径、斜边角度和摩擦因数组合条件下柱形壳的成形性能，为管坯成形性能的评价提供数值依据，并采用响应面法对不同内、外圆角半径、斜边角度和摩擦因数组合条件下得到的数值进行优化，确定最优的内、外圆角半径、斜边角度和摩擦因数。最后，根据最优的优化方案进行柱形壳内高压胀形数值分析，并通过试验进行验证。

1 工艺分析及数值模型建立

1.1 柱形壳内高压胀形工艺分析

柱形壳内高压胀形是指利用橡胶作为柔性传力介质，通过向橡胶施加压力使橡胶产生轴向补料，进而使管坯发生塑性形变，被压入模具型腔内，直至管坯贴模，最终得到柱形壳^[11]。柱形壳内高压胀形工艺装备包括模具和橡胶，模具分为前模和后模，

模具中间段的直径为 $\Phi 76$ mm、长度为 130 mm。柱形壳内高压胀形工艺分为 3 个阶段，分别是初始阶段、胀形阶段和贴模阶段，如图 1 所示。在初始阶段，将管坯放入模具，后放入长度为 250 mm、直径为 $\Phi 65$ mm 的圆柱状橡胶，最后使用紧固螺栓连接前模和后模，使模具闭合。在胀形阶段，橡胶受到单向加载的压力发生轴向压缩膨胀，使管坯产生轴向补料和塑性形变。在贴模阶段，管坯在橡胶压缩膨胀而产生的厚向力的作用下形变，直至管坯与模具型腔完全贴合，完成薄壁柱形壳的成形。进行柱形壳成形所用的管坯外径为 $\Phi 70$ mm，厚度为 1 mm，长度为 200 mm，材料为 304 不锈钢。表 1 为 304 不锈钢的材料性能参数。

1.2 柱形壳内高压胀形数值模型

基于数值分析建立柱形壳内高压胀形的数值模型。模具设置为离散刚体，在不影响计算精度的前提下可有效减小计算量，并在关键部位进行网格加密处理，网格单元类型为 R3D4。管坯采用壳单元，网格单元类型为缩减积分 S4R 拉格朗日单元，全局尺寸为 1。橡胶材料采用 Mooney-Rivlin 本构模型，使用非协调模式提高计算精度，网格单元类型为 C3D8I，全局尺寸为 2。管坯与模具、橡胶间均采用硬接触，“罚”摩擦公式下管坯与模具间的摩擦因数始终为 0.1。通过控制柱形壳肩部的变形行为完成柱形壳的内高压胀形。

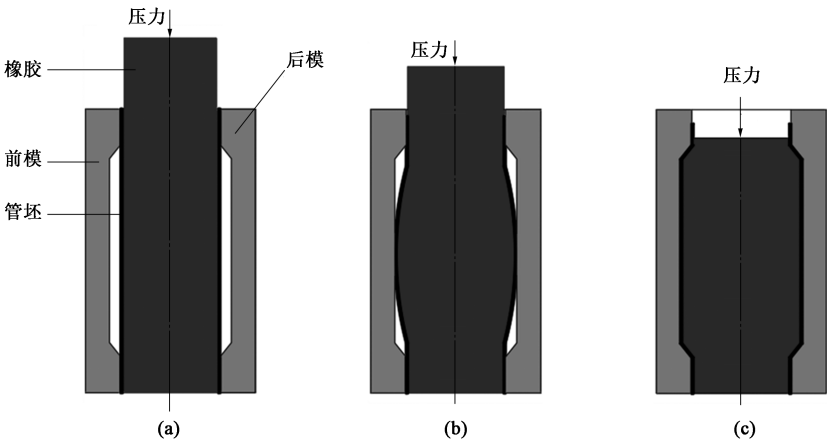


图 1 柱形壳内高压胀形工艺示意图

(a) 初始阶段 (b) 胀形阶段 (c) 贴模阶段

Fig. 1 Schematic diagrams of internal high-pressure bulging process for cylindrical shell

(a) Initial stage (b) Bulging stage (c) Die fitting stage

表 1 SUS304 不锈钢材料性能参数

Table 1 Material property parameters of SUS304 stainless steel

参数	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率
数值	205	255	1014	55%

2 响应面法的设计与分析

2.1 试验方案设计

响应面法 (Response Surface Method, RSM) 是

对设计变量和优化目标采取合理的试验方案获得试验数据，通过对数据进行回归分析处理，构建二阶多项式数学模型来描述设计变量与响应值间的关系，并基于对回归方程的分析获得最优设计变量的一种方法^[12]。在柱形壳内高压胀形工艺中，模具中间段的直径和长度保持不变，模具肩部传力区域的设计变量如图 2 所示。其中，内圆角半径为 A 、外圆角半径为 B 、斜边角度为 C ，橡胶与管坯间的摩擦因数为 D 。在 Design-Expert 软件中使用 Box-Behnken Design 进行试验方案的设计，以内圆角半径 A 、外圆角半径 B 、斜边角度 C 和摩擦因数 D 作为优化变量，以柱形壳的最大减薄率 Y 作为优化目标，建立 4 因素 3 水平的试验方案。试验因素和水平如表 2 所示。通过数值分析得到各设计变量不同组合条件下柱形壳的最大减薄率，试验设计方案如表 3 所示。

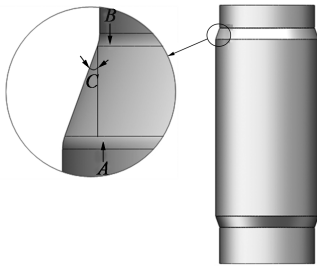


图 2 肩部传力区域的设计变量示意图
Fig. 2 Schematic diagram of designed variables in shoulder force transmission area

表 2 柱形壳内高压胀形的因素水平表

Table 2 Factors and levels of cylindrical shell in internal high-pressure bulging				
水平	内圆角半径 A/mm	外圆角半径 B/mm	斜边角度 $C/(\text{^\circ})$	摩擦因数 D
-1	1.0	1.0	10	0.050
0	5.5	5.5	20	0.125
1	10.0	10.0	30	0.200

2.2 响应面模型的建立

根据表 3 中的试验数据，利用最小二乘法，拟合出能反映内圆角半径 A 、外圆角半径 B 、斜边角度 C 和摩擦因数 D 之间关系的二阶响应面数学模型，得到的响应面数学模型为：

$$Y = 5.498 + 0.054A - 0.027B + 0.204C - 30.748D + 0.023AB + 5 \times 10^{-4}AC - 0.570AD + 5.611 \times 10^{-3}BC - 0.296BD + 0.653CD - 9.823 \times 10^{-3}A^2 - 9.391 \times 10^{-3}B^2 - 3.764 \times 10^{-3}C^2 + 138.193D^2 \quad (1)$$

表 3 Box-Behnken 试验设计方案与结果

Table 3 Design schemes and results of Box-Behnken experiment

方案	内圆角半 径 A/mm	外圆角半 径 B/mm	斜边角度 $C/(\text{^\circ})$	摩擦因数 D	最大减薄 率 $Y/\%$
1	1.0	1.0	20	0.125	7.90
2	10.0	1.0	20	0.125	7.29
3	1.0	10.0	20	0.125	7.49
4	10.0	10.0	20	0.125	8.72
5	5.5	5.5	10	0.050	6.49
6	5.5	5.5	30	0.050	8.92
7	5.5	5.5	10	0.200	7.38
8	5.5	5.5	30	0.200	11.77
9	1.0	5.5	20	0.050	7.90
10	10.0	5.5	20	0.050	8.36
11	1.0	5.5	20	0.200	9.92
12	10.0	5.5	20	0.200	9.61
13	5.5	1.0	10	0.125	6.17
14	5.5	10.0	10	0.125	6.26
15	5.5	1.0	30	0.125	8.84
16	5.5	10.0	30	0.125	9.94
17	1.0	5.5	10	0.125	6.19
18	10.0	5.5	10	0.125	6.03
19	1.0	5.5	30	0.125	9.67
20	10.0	5.5	30	0.125	9.60
21	5.5	1.0	20	0.050	7.57
22	5.5	10.0	20	0.050	8.56
23	5.5	1.0	20	0.200	9.71
24	5.5	10.0	20	0.200	10.3
25	5.5	5.5	20	0.125	8.32
26	5.5	5.5	20	0.125	8.23
27	5.5	5.5	20	0.125	8.45
28	5.5	5.5	20	0.125	8.47
29	5.5	5.5	20	0.125	8.29

对柱形壳的最大减薄率进行方差分析，分析响应面回归模型的有效性，并对各因素及交互项的显著性进行评判。柱形壳的最大减薄率方差分析结果如表 4 所示。其中， F 值表示方差齐性检验值，用来判断该响应面模型或因素的有效性， F 值越大，则该因素或模型更显著； P 值表示因素或响应面模型的显著性程度， P 值越小，则该因素或模型的显著性更高。当某一因素的 P 值小于 0.0500 时，表示该因素对响应值的影响是显著的；当某一因素的 P 值小于 0.0001 时，表示该因素对响应值的影响是

表 4 柱形壳的最大减薄率方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of maximum thinning rate for cylindrical shell

方差类型	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	54.000	14	3.860	115.47	<0.0001
A	0.024	1	0.024	0.73	0.4081
B	1.200	1	1.200	35.83	<0.0001
C	34.070	1	34.070	1019.96	<0.0001
D	9.880	1	9.880	295.85	<0.0001
AB	0.850	1	0.850	25.34	0.0002
AC	2.025×10^{-3}	1	2.025×10^{-3}	0.061	0.8091
AD	0.150	1	0.150	4.44	0.0537
BC	0.260	1	0.260	7.63	0.0152
BD	0.040	1	0.040	1.20	0.2923
CD	0.960	1	0.960	28.75	0.0001
A ²	0.260	1	0.260	7.68	0.0150
B ²	0.230	1	0.230	7.02	0.0190
C ²	0.920	1	0.920	27.51	0.0001
D ²	3.920	1	3.920	117.33	<0.0001
残差	0.470	14	0.033	—	—
失拟项	0.420	10	0.042	3.92	0.0999
纯误差	0.043	4	0.011	—	—
总值	54.470	28	—	—	—

极显著的；当某一因素的 P 值大于 0.0500 时，表示该因素对响应值的影响是不显著的。由表 4 可知，该响应模型的 P 值小于 0.0001，因此该模型显著。虽然内圆角半径 A 的 P 值大于 0.0500，是不显著的，但外圆角半径 B 、斜边角度 C 和摩擦因数 D 的 P 值均小于 0.0001，对最大减薄率的影响显著。交互项 AB 、 BC 、 BD 的 P 值均小于 0.0500，均是显著的，二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 也均显著。根据 F 值可以判断出各因素对最大减薄率的影响大小依次为：斜边角度>摩擦因数>外圆角半径>内圆角半径。

在初步建立的响应面模型中，非显著项对模型的准确性有一定的影响，因此，可以通过去除非显著项来进一步提高模型的准确性。表 4 中，虽然内圆角半径 A 不显著，但是内圆角半径 A 与外圆角半径 B 的交互项是显著的，因此无需去除内圆角半径 A 。去除非显著项后的方差分析结果如表 5 所示。由表 5 可知，该模型仍是极显著的，优化后的响应面数学模型为：

$$Y = 6.039 - 6.885 \times 10^{-3}A - 0.064B + 0.207C - 35.515D + 0.023AB + 5.611 \times 10^{-3}BC + 0.653CD - 9.823 \times 10^{-3}A^2 - 9.391 \times 10^{-3}B^2 - 3.764 \times 10^{-3} \times C^2 + 138.193D^2 \quad (2)$$

表 5 去掉非显著项后的方差分析结果

Table 5 Variance analysis results after removing non-significant terms

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	53.81	11	4.890	126.40	<0.0001
A	0.024	1	0.024	0.63	0.4390
B	1.20	1	1.200	30.93	<0.0001
C	34.07	1	34.070	880.37	<0.0001
D	9.88	1	9.880	255.36	<0.0001
AB	0.85	1	0.850	21.87	0.0002
BC	0.26	1	0.260	6.59	0.0200
CD	0.96	1	0.960	24.82	0.0001
A ²	0.26	1	0.260	6.63	0.0197
B ²	0.23	1	0.230	6.06	0.0248
C ²	0.92	1	0.920	23.75	0.0001
D ²	3.92	1	3.920	101.28	<0.0001
残差	0.66	17	0.039	—	—
失拟项	0.61	13	0.047	4.37	0.0827
纯误差	0.043	4	0.011	—	—
总值	54.47	28	—	—	—

最大减薄率 Y 在回归模型中的预测值与实际值如图 3 所示，回归模型的相关性分析结果如表 6 所示。从图 3 和表 6 可以看出，回归模型的决定系数 R^2 为

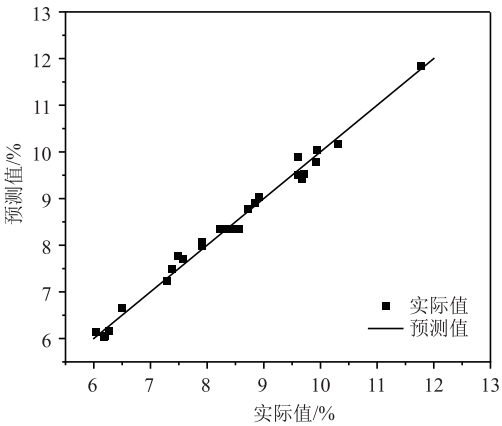


图 3 预测值与实际值对比图

Fig. 3 Comparison diagram between predicted and actual values

表 6 相关性分析结果

Table 6 Results of correlation analysis

参数	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	Adeq Precision
数值	0.9879	0.9801	0.9589	45.820

0.9879，接近于 1，说明最大减薄率的预测值与实际值高度相关。模型的有效信号与噪音的比值 *Adeq Precision* 值为 45.82，大于 4，说明该模型是合理的。实际的校正决定系数 *Adjusted R²* 和预定决定系数 *Predicted R²* 分别为 0.9801 和 0.9589，两者间的差值小于 0.2，且均接近于 1，说明该二阶响应面模型的拟合程

度较好，对最大减薄率的预测精度较高，能有效且准确地预测不同因素组合情况下的柱形壳的最大减薄率。

2.3 响应面模型的分析与优化

根据二阶响应面模型绘制内圆角半径、外圆角半径、斜边角度和摩擦因数的交互项对最大减薄率的响应曲面与等高线图，如图 4 所示。从图 4a 可以看出，内圆角半径较大时，随着外圆角半径的减小，最大减薄率逐渐减小。由图 4b 和图 4c 可知，相较于外圆角半径和摩擦因数，最大减薄率受斜边角度的影响较大。

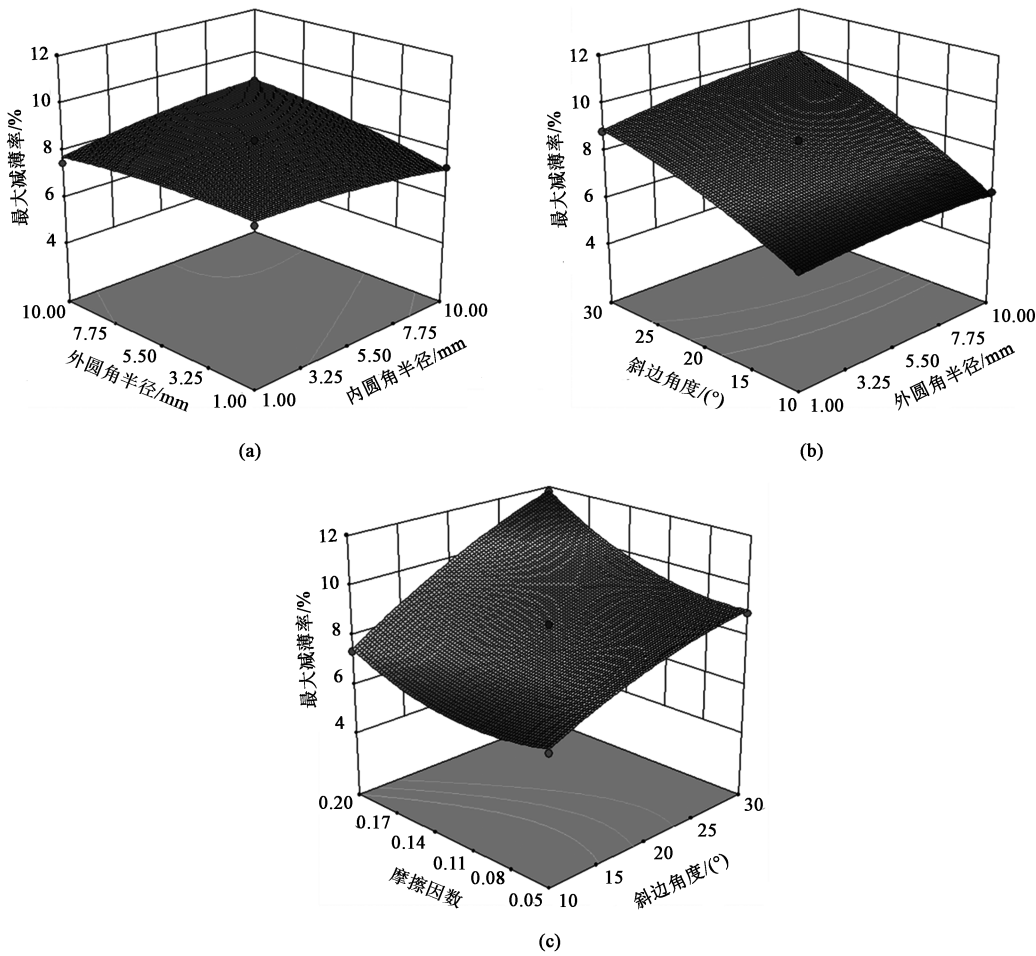


图 4 最大减薄率的响应曲面及等高线图

- (a) 内圆角半径和外圆角半径对最大减薄率的影响 (b) 外圆角半径和斜边角度对最大减薄率的影响
(c) 斜边角度和摩擦因数对最大减薄率的影响

Fig. 4 Response surfaces and contour line diagrams of maximum thinning rate

- (a) Influence of inner corner radius and outer corner radius on maximum thinning rate
(b) Influence of outer corner radius and angle of beveled edge on maximum thinning rate
(c) Influence of angle of beveled edge and friction factor on maximum thinning rate

在对柱形壳最大减薄率的响应面模型进行分析后，需要对该响应面模型进行优化。对试验中各因素及交互项对响应值的影响进行分析，通过设定各

试验因素的约束条件，利用软件的优化功能可得到各试验因素的最优值。优化响应面模型的目标和约束条件如表 7 所示。该模型以柱形壳壁厚的最大减

薄率最小为优化目标，利用软件求解得到该响应面模型的因素优化方案和预测的最优响应值，如表 8 所示。

表 7 优化模型的目标及约束条件

Table 7 Objectives and constraint conditions of optimization model

参数	内圆角半 径 A/mm	外圆角半 径 B/mm	斜边角度 C/(°)	摩擦因数 D	最大减薄率 Y/%
数值	1~10	1~10	10~30	0.05~0.20	最小

表 8 优化方案及预测值

Table 8 Optimized scheme and predicted values

参数	内圆角半 径 A/mm	外圆角半 径 B/mm	斜边角度 C/(°)	摩擦因数 D	最大减薄率 Y/%
最优值	9.89	1	10.13	0.104	5.368

3 柱形壳内高压胀形模拟分析

根据响应面模型优化方案的最佳工艺参数组合，利用数值分析软件对优化前后的柱形壳进行模拟分析，得到优化前后柱形壳的厚度分布如图 5 所示。优化前的工艺参数为：内、外圆角半径均为 0 mm、斜边角度为 16.7°、橡胶与管坯间的摩擦因数为 0.15。优化前的柱形壳在上方过渡区域的厚度减薄率较大，厚度变化明显，而下方的厚度减薄率相对较小，柱形壳的整体厚度分布不均匀，最小厚度达到 0.923 mm，柱形壳的最大减薄率为 7.68%，成形性能较差。优化后柱形壳在上、下两个过渡区域的厚度分布差距较小，整体厚度分布均匀，最小厚度为 0.942 mm，柱形壳的最大减薄率从 7.68%降低至

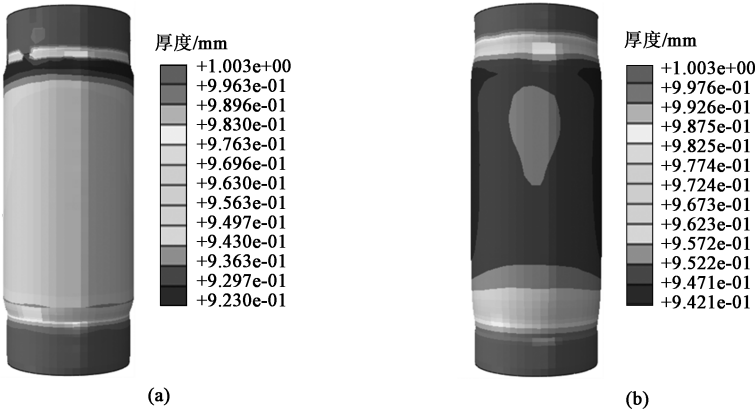


图 5 优化前 (a) 和优化后 (b) 的柱形壳厚度分布图

Fig. 5 Thickness distribution diagrams of cylindrical shells before (a) and after (b) optimization

5.79%，成形性能较好。优化后柱形壳的最大减薄率为 5.79%，与最大减薄率的优化预测值 5.368% 的误差为 7.87%，误差较小，表明该响应面数学模型的预测及优化是可靠的。

4 柱形壳内高压胀形试验验证

为了进一步验证该响应面模型优化参数的可靠性，使用优化后的模具肩部传力区域的工艺参数和摩擦因数，在超高压液式压力机上完成柱形壳内高压胀形试验，并沿柱形壳轴向等距取 10 个测厚点，使用高精度超声波无损测厚仪 PX7 测量这 10 个测厚点的壁厚值。在优化后的柱形壳数值分析结果中沿轴向取相同的 10 个位置进行厚度数据提取，并与试验结果进行对比，模拟与试验壁厚的对比如图 6

所示。结果表明，模拟分析与试验结果误差不超过 4%，可以认为模拟分析的结果较为准确。同时，试验壁厚的最大减薄率为 5.6%，与优化方案预测的最大减薄率 5.368% 的误差仅为 4.14%，因此，柱形壳的优化方案可行，并且预测较为准确。

5 结论

(1) 基于 Box-Behnken Design 进行响应面模型的试验方案设计，根据试验结果建立和优化响应面模型，对优化后的响应面模型进行了方差分析和相关性分析，分析了模具肩部传力区域内圆角半径、外圆角半径、斜边角度和摩擦因数对柱形壳最大减薄率的影响，并对工艺参数进行优化。确定的最佳工艺参数组合为：内圆角半径为 9.89 mm、外圆角

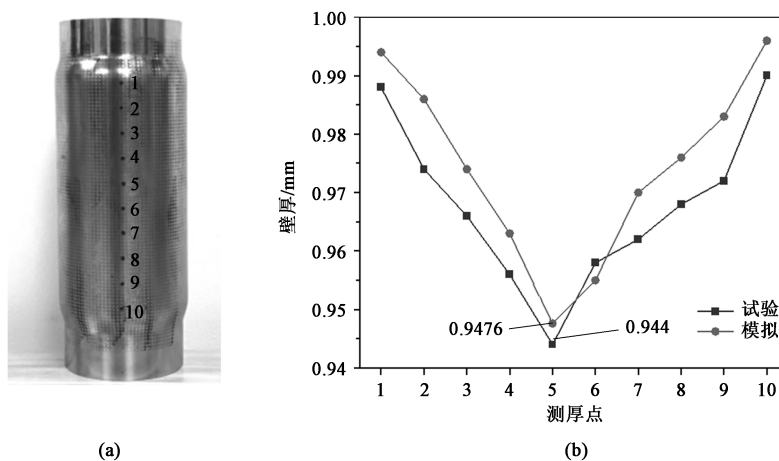


图 6 柱形壳的模拟和试验壁厚对比图

(a) 测厚点位置 (b) 模拟与试验壁厚对比曲线

Fig. 6 Comparison diagrams of simulated and experimental wall thicknesses for cylindrical shell

(a) Locations of thickness measurement points

(b) Comparison curves between simulated and experimental wall thicknesses

半径为 1 mm、斜边角度为 10.13° 、摩擦因数为 0.104，最大减薄率的最优预测值为 5.368%。

(2) 采用最优的肩部传力区域工艺参数组合进行柱形壳内高压胀形模拟分析和试验，模拟分析的最大减薄率为 5.79%，与最优的预测值的误差较小，并且模拟分析与试验的厚度结果较为吻合，验证了响应面模型优化的可靠性和模拟分析的准确性。

参考文献：

- [1] 李胜秋. 纵向波纹柱形耐压壳屈曲特性分析及试验研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
Li S Q. Buckling Analysis and Experimental Study on Longitudinal Corrugated Cylindrical Pressure Shell [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [2] Fan H G, Chen Z P, Cheng J, et al. Analytical research on dynamic buckling of thin cylindrical shells with thickness variation under axial pressure [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 101: 213–221.
- [3] Fan H G, Chen Z P, Feng W Z, et al. Dynamic buckling of cylindrical shells with arbitrary axisymmetric thickness variation under time dependent external pressure [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015, 15 (3): 1450053.
- [4] Aghajari S, Abedi K, Showkati H. Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44 (8): 904–909.
- [5] 冯莹莹, 刘照松, 张宏阁, 等. X 形管内高压成形过程的加载路径优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 121–127.
Feng Y Y, Liu Z S, Zhang H G, et al. Optimization on loading path in hydroforming process for X-type tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 121–127.
- [6] 苑世剑, 何祝斌, 刘钢, 等. 内高压成形理论与技术的新进展 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (10): 2523–2533.
Yuan S J, He Z B, Liu G, et al. New developments in theory and processes of internal high pressure forming [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21 (10): 2523–2533.
- [7] 石朋飞, 张海丹, 滕松, 等. 内高压成形研究与应用 [J]. 模具制造, 2016, 16 (2): 10–12.
Shi P F, Zhang H D, Teng S, et al. The research and application of internal high pressure forming [J]. Die & Mould Manufacture, 2016, 16 (2): 10–12.
- [8] 付舒. 常见内高压成形工艺过程及特点 [J]. 价值工程, 2011, 30 (19): 53.
Fu S. The processes and advantages of internal high pressure forming [J]. Value Engineering, 2011, 30 (19): 53.
- [9] Liu Y, Xu F, Wang B D. Analysis and calculation of the art of internal high pressure forming [J]. Advanced Materials Research, 2013, 2550 (746–746): 374–379.
- [10] Jiang S F, Zhu H D, Gao F S. Study on loading path optimization of internal high pressure forming process [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 242 (1): 012052.
- [11] Nosrati H G, Gerdooei M. Feasibility study of cam-shaped tube production using elastomeric tool versus fluid forming method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95 (5): 3029–3036.
- [12] 吴磊, 冯玮. 基于响应面法的带交叉筋筒形零件热摆辗成形质量分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 118–125.
Wu L, Feng W. Quality analysis on hot orbital forming for cylindrical parts with cross ribs based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 118–125.