

基于有限元法的螺旋定子外高压胀形优化

王树强¹, 陈昊雷¹, 乔金梦², 陈 钊¹, 周 游¹

(1. 沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142; 2. 蓝星(北京)化工机械有限公司, 北京 100176)

摘要: 为了解决螺旋定子类零件在外高压胀形工序中易出现的破裂、起皱等问题, 结合此类零件具有的连续光滑、截面等面积的特点, 提出了针对螺旋定子外高压胀形中的工艺参数的优化方法。建立了以最大减薄率为优化目标, 胀形压力、螺旋导程、摩擦因数为优化因素的响应面模型, 并通过响应面分析结合有限元仿真的方法获得了外高压胀形螺旋定子的最优交互优化参数组合: 胀形压力为 193.121 MPa、螺旋导程为 810 mm、摩擦因数为 0.149。使用优化的工艺参数进行胀形实验, 获得了壁厚均匀、最大减薄率较小的螺旋定子零件, 通过超声波测厚仪对所得零件进行壁厚测量, 得到壁厚实验值与仿真值的误差均小于 2%, 验证了该优化方法的可行性。

关键词: 分步胀形; 螺旋定子; 外高压胀形; 响应面模型; 减薄率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.015

中图分类号: TG394 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 08-0095-07

Optimization on external high-pressure bulging of spiral stator based on finite element method

Wang Shuqiang¹, Chen Haolei¹, Qiao Jinmeng², Chen Zhao¹, Zhou You¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2. Bluestar (Beijing) Chemical Machinery Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: Spiral stator parts are prone to cracking and wrinkling during the external high-pressure bulging process, and such parts have the characteristics of continuous smoothness and equal cross section area. Therefore, a optimization method of the process parameters in the external high-pressure bulging of spiral stator was proposed, and a response surface model was established with the maximum thinning rate as the optimization target and bulging pressure, spiral lead and friction factor as the optimization factors. Then, the optimal interactive optimization parameters combination of external high-pressure bulging for spiral stator was obtained with the bulging pressure of 193.121 MPa, the spiral lead of 810 mm, and the friction factor of 0.149 by the response surface analysis combined with finite element simulation. Furthermore, the bulging experiment was carried out by using the optimized process parameters, and the spiral stator parts with uniform wall thickness and small maximum thinning rate were obtained. The results of wall thickness measurement for the obtained parts by means of an ultrasonic thickness gauge show that the errors between experiment and simulation values are less than 2%, which verifies the feasibility of the optimization method.

Key words: step-bulging; spiral stator; external high-pressure bulging; response surface model; thinning rate

等壁厚螺旋定子螺杆钻具因具有较长的工作寿命、优秀的散热性能, 被广泛应用于石油工业^[1-5]。传统螺旋定子与等壁厚螺旋定子的对比如图 1 所示, 传统螺旋定子由固化成形的不等厚橡胶与金属外壳贴合而成, 橡胶层壁厚变化大、钻具散热不均匀; 而等壁厚螺旋定子的金属外壳与橡胶外廓紧密贴合,

散热效果优异。等壁厚螺旋定子的成形方式主要有挤压成形^[6]、内高压成形^[7]、分步成形等^[8-10], 其中分步成形的方法具有零件内表面质量好、大幅减少系统胀形压力等特点^[11], 因此针对分步胀形的研究对于流体介质成形工艺的发展具有深远意义。但分步胀形中外高压胀形工艺参数匹配不当将导致螺旋定子的成形精度降低, 造成胀形成品出现起皱、破裂等缺陷, 使零件报废。因此, 研究外高压胀形各工艺参数的协同作用, 实现胀形参数优化, 对于采用分步胀形成形螺旋定子的进一步研究十分必要。

国内外学者对于分步胀形的研究起步较晚。刘利军等^[12]介绍了外高压成形的基本原理、优点以及

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2021-11-05

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目 (20170540722)

作者简介: 王树强 (1978-), 男, 博士, 副教授

E-mail: wsqwsq_2004@126.com

通信作者: 陈昊雷 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 15905275133@163.com

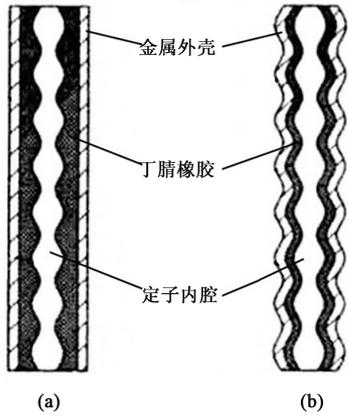


图 1 螺旋定子对比图

(a) 传统螺旋定子 (b) 等壁厚螺旋定子

Fig. 1 Comparison diagram of spiral stators

(a) Traditional spiral stator (b) Spiral stator with constant wall thickness

应用前景；邓娟等^[13]建立了大长径比螺旋曲面金属定子衬套外高压数值模型；崔晓磊等^[14]通过理论推导得到了内外压复合作用下管材的应力-应变曲线；Siegert K 等^[15]对外高压成形进行了计算机模拟和实验，得出外高压成形压力大幅低于内高压成形压力的结论。本文利用有限元模拟结合响应面优化的方法，对等壁厚螺旋定子分步胀形中的外高压胀形工艺参数进行优化，通过对外高压胀形进行单因素有限元仿真，并以成品的壁厚最大减薄率为目标，以胀形时的胀形压力、螺旋导程、摩擦因数为优化因素，得到最佳的外高压胀形参数，并进行实验验证，为等壁厚螺旋定子的精确成形奠定了基础。

1 外高压胀形工艺分析及有限元分析前处理

螺旋定子外高压胀形的原理图如图 2 所示，胀形内模具 3 固定于固定冲头 5 上，由于外高压胀形的工艺难度及特殊性，移动冲头 1 仅提供移动冲头与管材间达到锥面密封所需的轴向压力，而在胀形过程中不进行轴向进给补料。胀形外模具 4 与移动冲头 1、固定冲头 5 间采用聚氨酯密封圈进行密封，油液通过移动冲头 1 内部孔道进入胀形内模具 3 与胀形外模具 4 之间实现胀形。胀形所用内模具的外径为 $\Phi 126$ mm，内径为 $\Phi 110$ mm，长度为 110 mm，螺旋槽的深度为 8 mm。螺旋导程为 1000 mm，螺旋定子的螺旋导程即定子端面上任一点 O 沿螺旋槽线旋转一周所移动的轴向距离，如图 3a 中点 O 至点 O' 的距离。管件材料为 304 不锈钢，内径为 $\Phi 126$ mm，壁厚

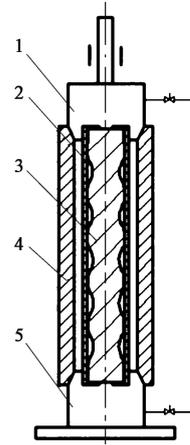


图 2 外高压胀形原理图

1. 移动冲头 2. 管件 3. 胀形内模具 4. 胀形外模具 5. 固定冲头

Fig. 2 Principle diagram of external high-pressure bulging

为 5 mm，长度为 100 mm，管件的力学性能如表 1 所示。基于 ABAQUS 有限元分析软件，建立等壁厚螺旋定子外高压胀形的有限元模型，管件采用 Hollomon 应变硬化准则。使用全局布种方式对模具及管件进行网格划分，模具的全局尺寸为 4、管件的全局尺寸为 2，最大曲率偏差为 0.1，最小全局尺寸为 0.1，划分结果如图 3b 所示。

表 1 304 不锈钢力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of 304 stainless steel

参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa
数值	7930	194020	0.285	205

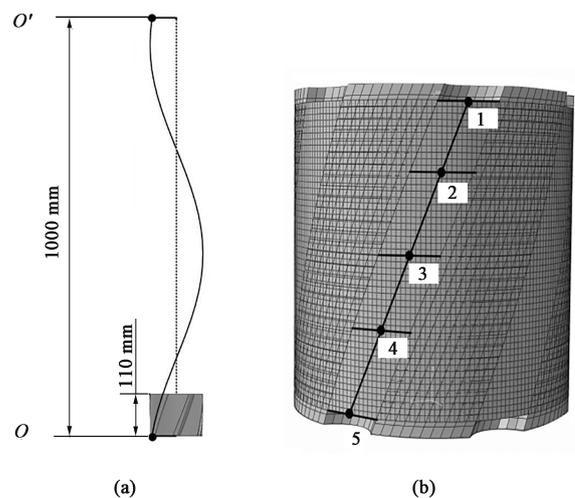


图 3 等壁厚螺旋定子数学模型

(a) 螺旋导程 (b) 外高压胀形有限元模型

Fig. 3 Mathematical model of spiral stator with constant wall thickness

(a) Helical lead

(b) Finite element model of external high-pressure bulging

2 实验设计

2.1 单因素仿真设计

经过多次有限元分析，确定胀形时的胀形压力、螺旋导程、摩擦因数为影响等壁厚螺旋定子形成的主要因素。为得到理想的等壁厚螺旋定子，需要对螺旋定子的外高压胀形参数进行优化。根据螺旋定子的工作压力要求，以壁厚最大减薄率不超过 30% 为目标，进行单因素初选仿真，仿真方案如表 2 所示，仿真过程中采用如图 4 所示的线性加载路径。

表 2 单因素仿真方案
Table 2 Single factor simulation schemes

组号	胀形压力/MPa	摩擦因数	螺旋导程/mm
1	100	0.125	1000
	150		
	200		
	250		
	300		
2	优选值	0.075	1000
		0.100	
		0.125	
		0.150	
		0.175	
3	优选值	优选值	600
			800
			1000
			1200
			1400

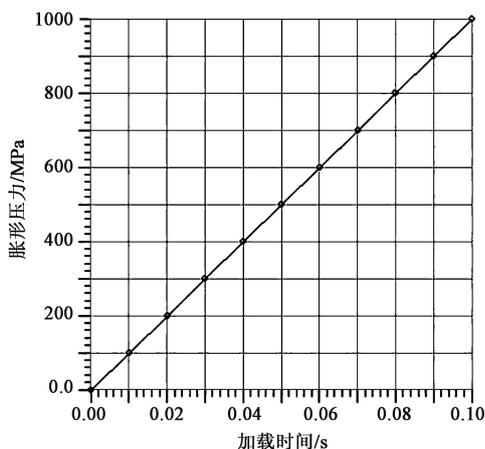


图 4 仿真加载路径

Fig. 4 Simulation loading path

2.2 正交旋转多因素仿真设计

在单因素仿真设计中已经对胀形压力、螺旋导程、胀形摩擦因数进行了初步优选，但是并未得到外高压胀形的壁厚最大减薄率的最优值。因此利用响应面优化软件，针对初步优选值的周边范围值，设计多因素正交旋转组合仿真实验，因素与水平如表 3 所示。建立外高压胀形的壁厚最大减薄率回归模型，对外高压胀形参数的最优组合进行求解。

表 3 外高压胀形正交实验因素及水平表
Table 3 Factors and levels of external high-pressure bulging orthogonal experiment

水平	因素		
	螺旋导程/mm	胀形压力/MPa	摩擦因数
-1	800	190	0.100
0	1000	200	0.125
1	1200	210	0.150

3 结果与分析

3.1 单因素仿真结果

当螺旋导程为 1000 mm、胀形压力为 200 MPa 时，由图 5a 可知，外高压胀形的壁厚最大减薄率随着摩擦因数的增大而减小，但对应的有限元模型显示，摩擦因数超过 0.175 时，管件的壁厚最大减薄率虽符合要求但贴模情况不理想，不符合成形要求，而在实际生产过程中难以达到摩擦因数小于 0.100 的条件，故选择初始摩擦因数为 0.125 来进行后续实验；当螺旋导程为 1000 mm、胀形摩擦因数为 0.125 时，由图 5b 可知，胀形压力对壁厚最大减薄率有较大影响，当胀形压力小于 150 MPa 时壁厚最大减薄率符合要求，但结合对应有限元仿真结果可知，管材并未完全贴模，故初步选择胀形压力为 200 MPa；当管材胀形压力为 200 MPa、摩擦因数为 0.125 时，由图 5c 可知，在螺旋导程大于 800 mm 时壁厚最大减薄率的变化较小，原因为：定子螺旋导程在 800 mm 时管件已完全贴模，此时导程对管件壁厚的最大减薄率几乎没有影响。故选取螺旋导程为 800 mm、胀形压力为 200 MPa、摩擦因数为 0.125 作为外高压胀形参数的初步优选值。

3.2 多因素仿真结果

通过正交旋转实验进行有限元仿真，以外高压胀形的壁厚最大减薄率作为评价指标，仿真结果如表 4 所示。

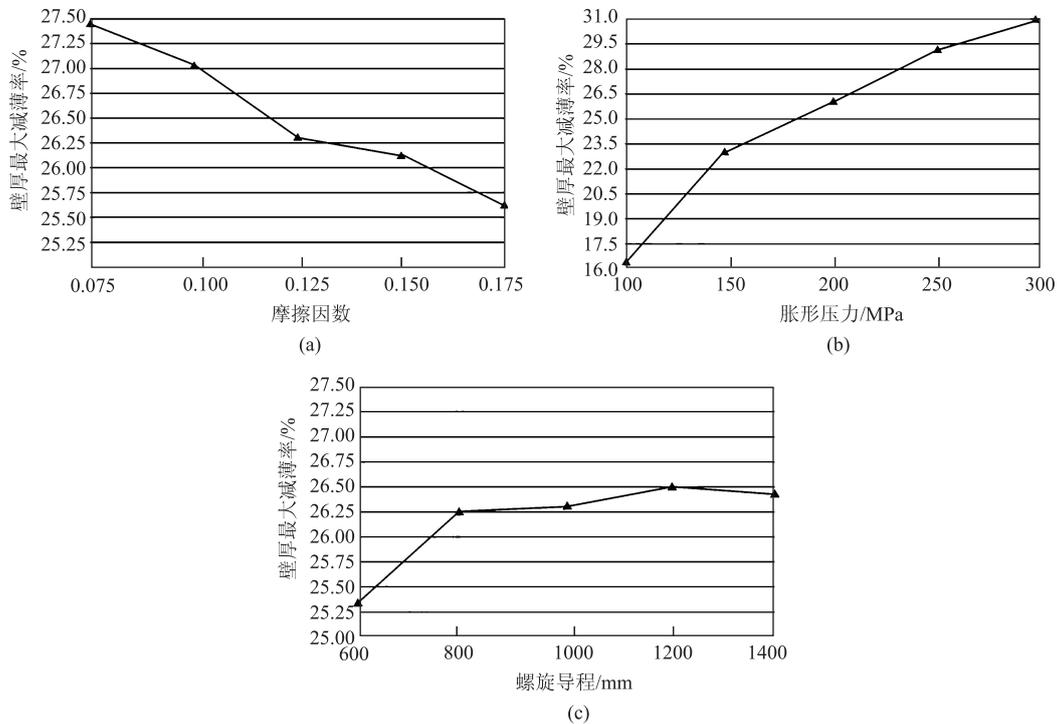


图 5 不同因素下螺旋定子外高压胀形下的壁厚最大减薄率
(a) 摩擦因数 (b) 胀形压力 (c) 螺旋导程

Fig. 5 Maximum wall thickness thinning rates of spiral stator in external high-pressure bulging under different factors
(a) Friction factor (b) Bulging pressure (c) Helical lead

表 4 外高压胀形正交实验结果

Table 4 Orthogonal experiment results of external high-pressure bulging

组数	螺旋导程 A/ mm	胀形压力 B/ MPa	摩擦因数 C	壁厚最大 减薄率/%
1	1000	190	0.100	26.2
2	1200	200	0.150	25.8
3	1000	190	0.150	25.5
4	800	200	0.150	25.0
5	1200	210	0.125	27.2
6	1200	200	0.100	26.6
7	800	210	0.125	26.4
8	1000	210	0.150	26.6
9	1000	200	0.125	26.3
10	1000	210	0.100	27.6
11	800	190	0.125	24.9
12	1000	200	0.125	26.3
13	1000	200	0.125	26.3
14	1000	200	0.125	26.3
15	1000	200	0.125	26.3
16	1200	190	0.125	26.0
17	800	200	0.100	26.0

根据表 4 的样本，利用 Design-Expert 软件得到壁厚最大减薄率 H 与各设计变量的响应面函数为：

$$H = 26.3 + 0.41A + 0.65B - 0.44C - 0.075AB + 0.05AC - 0.075BC - 0.4A^2 + 0.22B^2 - 0.05C^2 \quad (1)$$

由表 5 可知，回归模型中螺旋导程、胀形压力、摩擦因数的 P 值均小于 0.0001，表明 3 个因素对等

表 5 螺旋定子壁厚最大减薄率方差分析结果

Table 5 Variance analysis results of maximum wall thickness thinning rates of spiral stator

方差来源	平方和	自由度	均方值	P 值	显著性
模型	7.190	9	0.800	<0.0001	显著
A	1.360	1	1.360	<0.0001	显著
B	3.380	1	3.380	<0.0001	显著
C	1.530	1	1.530	<0.0001	显著
AB	0.022	1	0.022	4.2000	
AC	1.000×10^{-2}	1	1.000×10^{-2}	<0.001	显著
BC	0.022	1	0.022	4.2000	
A^2	0.670	1	0.670	125.7500	
B^2	0.210	1	0.210	<0.001	显著
C^2	0.011	1	0.011	1.9600	
残差	0.037	7	5.357×10^{-3}		
失拟项	0.037	3	0.012		
总和	7.230	16			

壁厚螺旋定子外高压胀形的壁厚最大减薄率均有显著的影响。回归模型中 AC 、 B^2 的 P 值均小于 0.0010，表明螺旋导程与摩擦因数在回归模型中的二阶交互影响显著，胀形压力对壁厚最大减薄率的影响最为显著。

根据回归模型，利用响应面分析软件绘制各因素交互影响的 3D 响应面。当摩擦因数为 0.113514 时，螺旋导程与胀形压力对壁厚最大减薄率的响应曲面如图 6a 所示，胀形压力从 210 MPa 降至 190 MPa 的过程中，螺旋导程越小，等壁厚螺旋定子外高压胀形的

壁厚最大减薄率越小；当胀形压力为 200.541 MPa 时，螺旋导程与摩擦因数对壁厚最大减薄率的 3D 响应面如图 6b 所示，摩擦因数由 0.15 减小至 0.10 的过程中，螺旋导程越大，等壁厚螺旋定子外高压胀形的壁厚最大减薄率越大；当螺旋导程为 908.108 mm 时，胀形压力与摩擦因数对壁厚最大减薄率的 3D 响应面如图 6c 所示，胀形压力由 190 MPa 增加至 210 MPa 的过程中，摩擦因数越小，外高压胀形的壁厚最大减薄率越大。

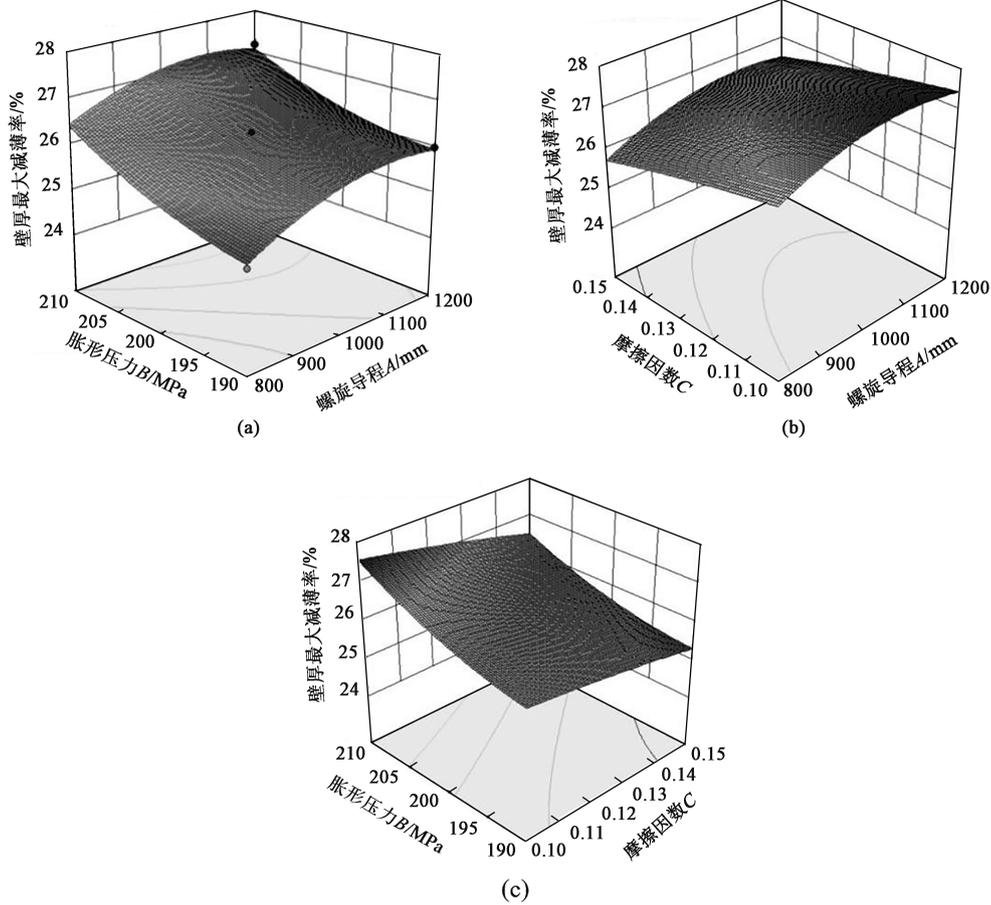


图 6 各因素对螺旋定子壁厚最大减薄率的交互相应面

(a) 螺旋导程-胀形压力 (b) 螺旋导程-摩擦因数 (c) 胀形压力-摩擦因数

Fig. 6 Interactive response surfaces for various factors on maximum wall thickness thinning rates of spiral stator

(a) Helical lead-bulging pressure (b) Helical lead-friction factor (c) Bulging pressure-friction factor

4 参数优化与实验验证

针对外高压胀形的回归模型，以壁厚最大减薄率最小为条件，利用响应面软件的优化模块进行求解，求解所得到的最优参数为：胀形压力为 193.121 MPa、螺旋导程为 810 mm、摩擦因数为 0.149，对应的螺旋定子壁厚分布云图如图 7 所示，螺旋槽减薄均匀，符合优化预期。

为了验证优化参数的可靠性，利用优化参数进行液压胀形实验。设计了专门的液压实验装置，采用 Smacq 数据采集卡对加载的液压力进行数据采集以控制加载路径线性，同时利用 YD-28 型动态电阻应变仪对胀形过程中的拉深力、切向力、正压力和位移进行采集并计算、输出摩擦因数。为方便对比，选取定子螺旋槽中的一条中心线并标记，再将管材沿轴向平均分割为 4 份，与螺旋槽中心线的交点即为测量点，所取 5 个测量点如图 3b 所示，使用

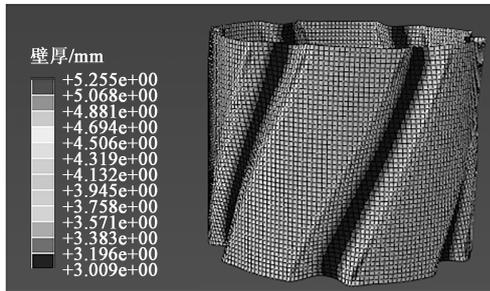


图7 参数优化后的螺旋定子壁厚分布云图

Fig. 7 Cloud diagram of wall thickness distribution for spiral stator after parameter optimization

SCH-890 超声波测厚仪测取胀形前后对应测量点的壁厚。各测量点的最大减薄率的仿真值与实验值和误差率如表 6 所示, 实验装置与实验结果如图 8 和图 9 所示。

表 6 参数优化后壁厚最大减薄率的仿真值与实验值对比
Table 6 Comparison between simulation and experiment values of maximum wall thickness thinning rates after parameter optimization

测量点	壁厚最大减薄率/%		误差率/%
	仿真值	实验值	
1	24.82	25.12	1.21
2	24.79	25.23	1.77
3	24.78	25.16	1.53
4	24.83	25.32	1.97
5	24.92	25.37	1.81



图8 外高压胀形实验设备

Fig. 8 Experiment equipment of external high-pressure bulging

5 结语

利用响应面优化方法中的 Box-Behnken 方法对螺旋定子的外高压胀形进行响应面实验设计, 得到了壁厚最大减薄率与定子螺旋导程、外高压胀形压

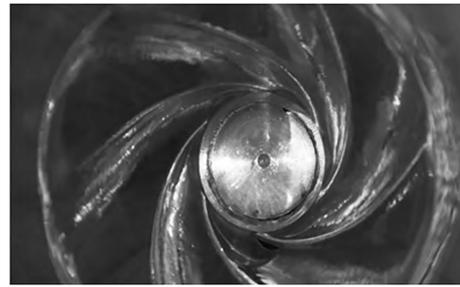


图9 螺旋定子外高压胀形结果

Fig. 9 Results of external high-pressure bulging for spiral stator

力、摩擦因数的回归方程, 并以壁厚最大减薄率为目标进行了优化, 得到的优化参数满足实际胀形要求且得到了壁厚均匀的定子零件。

对比使用优化参数得到的螺旋定子壁厚最大减薄率仿真值与实验值发现: 实验值大于对应点的优化仿真值, 所有测量点误差率均小于 2.00%, 且壁厚最大减薄率均小于 25.50%, 所获得的螺旋定子零件满足胀形工艺要求。

参考文献:

- [1] 石昌帅, 祝效华, 邓娟. 不锈钢金属定子衬套液压成形回弹特性 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (2): 69-74.
Shi C S, Zhu X H, Deng J. Springback characteristics of stainless steel metal stator screw lining in hydroforming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (2): 69-74.
- [2] 何艳, 秦佳, 朱雪芹, 等. 等壁厚定子螺杆泵的有限元分析 [J]. 石油机械, 2006, 34 (6): 53-55.
He Y, Qin J, Zhu X Q, et al. Finite element analysis of screw pump with constant wall thickness stator [J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34 (6): 53-55.
- [3] 何艳, 姜海峰, 孙延安. 等壁厚定子螺杆泵研究及应用前景探讨 [J]. 石油机械, 2003, 31 (2): 4-5, 59.
He Y, Jiang H F, Sun Y A. Application prospect of progressive cavity pump with uniform-thickness elastomer stator [J]. China Petroleum Machinery, 2003, 31 (2): 4-5, 59.
- [4] Zhu X H, Lin D, Li J N. Failure analysis and structure optimization of the connecting thread of driving shaft in positive displacement motor [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8 (6): 1-11.
- [5] Liu H S, Ma T S, Chen P, et al. Mechanical behaviors of bottom hole assembly with bent-housing positive displacement motor under rotary drilling [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44 (6): 6209-6043.
- [6] 王可, 郭明性, 孙兴伟. 等壁厚螺杆钻具定子管挤压成形的有限元分析 [J]. 机械工程与自动化, 2013, (3): 17-19.
Wang K, Guo M X, Sun X W. Finite element analysis of rolling forming of uniform wall thickness PDM's stator pipes [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013, (3): 17-19.
- [7] 邓娟, 王澳, 李金平, 等. 微小尺寸等壁厚不锈钢螺旋管充液

- 压制成形方法研究 [J/OL]. 机械科学与技术: 1-14 [2021-10-21]. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200572.
- Deng J, Wang A, Li J P, et al. Study the small size and equal wall thickness stainless steel spiral pipe shaped of hydraulic pressure [J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering: 1-14 [2021-10-21]. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200572.
- [8] 邱亚玲, 杨德胜, 韩传军, 等. 等壁厚螺杆钻具定子螺旋槽拉刀设计 [J]. 石油矿场机械, 2008, (5): 56-58.
- Qiu Y L, Yang D S, Han C J, et al. Designs for broach on spiral groove of stator of uniform wall thick PDM [J]. Oil Field Equipment, 2008, (5): 56-58.
- [9] 张亮. 等壁厚螺杆泵定子应力应变的有限元分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- Zhang L. FEM Analysis of Stress and Strain of the ISO-wall Thickness Stator [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [10] 纪文. 等壁厚螺杆钻具定子滚压成形方法研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- Ji W. Research on Stator Roll Forming Method of Equal Wall Thickness Screw Drill [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [11] 刘钢, 阴雪莲, 苑世剑. 管件外压成形的数值模拟及屈曲特征分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, (2): 188-190, 318.
- Liu G, Yin X L, Yuan S J. Numerical simulation and buckling analysis of tube external pressure forming [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, (2): 188-190, 318.
- [12] 刘利军, 徐俊光, 刘钢, 等. 管材外高压成型工艺研究现状及应用 [J]. 机床与液压, 2007, (4): 98-99, 80.
- Liu L J, Xu J G, Liu G, et al. Progress in research and application of tube external high pressure hydroforming [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, (4): 98-99, 80.
- [13] 邓娟, 石昌帅. 大长径比不锈钢定子衬套液压成形方法研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (17): 146-150, 154.
- Deng J, Shi C S. Study on hydroforming method of stainless steel stator lining with large length-diameter ratio [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (17): 146-150, 154.
- [14] 崔晓磊, 王小松, 苑世剑. 内外压复合作用下 5A02 铝合金管材的硬化行为 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (7): 1790-1797.
- Cui X L, Wang X S, Yuan S J. Hardening behavior of 5A02 aluminum alloy pipe under the combined action of internal and external pressure [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25 (7): 1790-1797.
- [15] Siegert K, Häussermann M, Lösch B, et al. Recent developments in hydroforming technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98 (2): 251-258.

《锻压技术》杂志征稿简则

1 征稿范围

《锻压技术》(月刊)于 1958 年创刊,由北京机电研究所和中国机械工程学会塑性工程分会共同主办,是学会会刊。《锻压技术》是全国中文核心期刊,被以下检索系统收录:中文核心期刊要目总览(北京大学)、中国科学引文数据库(核心版, CSCD)、中国科技期刊引证报告(核心版, CJKR)、中国学术期刊文摘数据库(核心版, CSAD-C)、中国学术期刊文摘数据库(英文版)、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)、中国知网、万方数字化期刊群、RCCSE 中国核心学术期刊、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国化学文摘(CA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、俄罗斯文摘杂志(AJ)等。

《锻压技术》主要报道金属塑性成形理论、工艺与装备,模具设计与制造技术、材料与成形性能、工业加热技术及设备、摩擦与润滑、测试技术、计算机应用、标准等方面的科研成果、实验研究、现场经验、技术革新等,同时,还辟有综合评述、专题讲座及行业信息等栏目。

2 来稿格式及要求

(1) 摘要选用小 5 号字,正文选用 5 号字,单倍行距;页面设置选用 A4 纸,上下左右页边距均选用 2 cm。

(2) 格式(按下列顺序排列,要求内容齐全)

● 论文的中文题目(不超过 30 字)、作者姓名、单位的全称(应包括院、系、科室等二级单位)、省名、城市名、邮政编码。

● 中文摘要:约 300 字,主要表达文章中有创新意义的内容,应含有研究目的、过程和方法、结果、结论 4 个层次;摘要中不要重复题目中已经表述过的信息,也不使用评论性语言。

● 中文关键词(5 个以上),中图分类号 1-2 个(参见《中国图书馆分类法(第四版)》一书)。

● 论文的英文题目、作者姓名(如 Zhang Yahong)、单位的全称(不得用缩写,应包括院、系、科室等二级单位)、城市名、邮政编码、国家名。

● 英文摘要:务必与中文摘要完全对应;摘要中涉及文章研究、阐述、设计、试验等内容时宜选用过去时、被动语态撰写(例如: A die was designed),结果、结论宜选用一般现在时撰写(例如: The results show that),不要使用“ The paper studies ”或“ The author studies ”这类语句。

● 英文关键词(5 个以上),要求与中文关键词完全对应。

● 首页页脚需注明以下内容:

收稿日期:年-月-日(例如: 2007-01-01);修订日期:此项可空缺,由编辑部填写

基金项目:省部以上基金资助项目及批准号(此项非常重要,请勿遗漏)

作者简介:第一作者姓名(出生年—),性别,学位,职称

E-mail: xx@xx

通讯作者:姓名(出生年—),性别,学位,职称(第一作者不是通讯作者时,请增加此项。)

E-mail: xx@xx

● 正文的“引言”部分不编号,亦不列出“引言”二字,直接陈述即可;一级标题用“1, 2, ”排序;二级标题用“1.1, 1.2, , 2.1, 2.2, ”排序;三级标题用“1.1.1, 1.1.2, ”排序。

● 图片、表格、公式、定理等的序号均要按其在正文中引用、的顺序,分别用阿拉伯数字顺序编码,例如:图 1、图 2, 表 1、表 2。

(下转第 170 页)