

# 某大曲率薄壁件成形参数优化

李晔<sup>1</sup>, 周沛丽<sup>2</sup>, 李艳芹<sup>3</sup>, 张德海<sup>3</sup>

(1.黄河交通学院 机电工程学院, 河南 焦作 454950; 2.广东省机械技师学院 汽车工程与技术服  
务系, 广州 510450; 3.郑州轻工业大学 机电工程学院, 郑州 450002)

**摘要:** 目的 根据某大曲率薄壁件形状需求, 以最大减薄率为优化目标, 采用数值模拟与响应面相结合的方法对其成形的工艺参数进行优化, 以得到合格的零件产品。方法 首先, 研究压边力、拉延筋阻力、摩擦因数、冲压速度等单因素参数对最大减薄率的影响规律。根据规律变化确定正交试验的参数范围, 并对正交试验结果进行极差分析, 确定本次板料冲压成形有限元分析的工艺参数对最大减薄率影响大小的排序为: 摩擦因数>压边力>拉延筋阻力百分比>冲压速度; 根据极差分析结果, 选定对最大减薄率影响较小的冲压速度为3 000 mm/s、其他3个工艺参数为变量进行再次优化, 以摩擦因数、压边力、拉延筋阻力为优化对象建立响应面。结果 通过响应面预测结果可知, 摩擦因数为0.09、压边力为409.730 kN、拉延筋阻力为32.384%时, 最大减薄率得到最小值7.926%。将该组工艺参数进行模拟, 得到最大减薄率为9.40%, 与响应面预测值仅相差1.474%, 相对误差率为15.68%。结论 经过试验验证, 试验和优化的数值分析结果吻合较好, 最大减薄率仅相差0.60%, 证明了该方法的可行性。

**关键词:** 大曲率薄壁件; 冲压速度; 摩擦因数; 正交试验; 响应面试验

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.04.025

**中图分类号:** TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)04-0237-11

## Optimization of Forming Parameters for a Large Curvature Thin-walled Part

LI Ye<sup>1</sup>, ZHOU Pei-li<sup>2</sup>, LI Yan-qin<sup>3</sup>, ZHANG De-hai<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Huanghe Jiaotong University, Henan Jiaozuo 454950, China; 2. Department of Automobile Engineering & Technical Service, Guangdong Machinery Technician College, Guangzhou 510450, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**ABSTRACT:** The work aims to optimize the forming process parameters of a large curvature thin-walled part by combining numerical simulation with response surface method according to the shape requirement with the maximum thinning rate as the optimization objective, so as to obtain qualified parts. Firstly, the effect of single-factor parameters such as edge pressing force, rib resistance, friction coefficient and stamping speed on the maximum thinning rate was studied. According to the change law,

收稿日期: 2022-07-30

Received: 2022-07-30

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102210340)

Fund: Henan Province Science and Technology Research Project(212102210340)

作者简介: 李晔(1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为先进制造技术。

Biography: LI Ye(1978-), Male, Senior engineer, Research focus: advanced manufacturing technology.

通讯作者: 张德海(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为先进材料成形技术。

Corresponding author: ZHANG De-hai(1973-), Male, Doctor, Professor, Research focus: advanced material forming technology.

引文格式: 李晔, 周沛丽, 李艳芹, 等. 某大曲率薄壁件成形参数优化[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4): 237-246.

LI Ye, ZHOU Pei-li, LI Yan-qin, et al. Optimization of Forming Parameters for a Large Curvature Thin-walled Part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 237-246.

the parameter range of the orthogonal experiment was determined and the range analysis was carried out to the orthogonal experiment results. Then, the sequence of the effect of the process parameters on the maximum thinning rate in the finite element analysis of sheet metal stamping was determined as follows: friction coefficient>pressing force>percentage of rib resistance>stamping speed. According to the results of range analysis, the stamping speed with little effect on the maximum thinning rate was selected as 3 000 mm/s, and the other three process parameters were selected as variables for re-optimization. Next, the friction coefficient, edge pressing force and rib resistance were used as the optimization object to establish the response surface. After predicted by the response surface, the minimum value of the maximum thinning rate was 7.926% when the friction coefficient was 0.09, the edge pressing force was 409.730 kN, and the rib resistance was 32.384%. After simulated by this set of process parameters, the maximum thinning rate was 9.40%, which was only 1.474% different from the predicted value of the response surface, and the relative error rate was 15.68%. After experimental verification, the experimental results are in good agreement with the optimized numerical analysis results, and the maximum thinning rate is only 0.60%, which proves the feasibility of the proposed method.

**KEY WORDS:** large curvature thin-walled part; stamping speed; friction coefficient; orthogonal experiment; response surface test

某大曲率薄壁件采用曲率半径为 5 000 mm 的 PCM 板料,其中基材厚度为 0.5 mm,覆膜厚度为 0.1 mm。冲压时将板材放于模具之内,促使其在型腔约束下发生塑性流动,获得所要求的形状与性能。板料通过冲压模具成形的过程中,局部减薄、回弹等缺陷是不可避免出现的问题,尤其局部变薄导致的 PCM 破损和脱落产生的废品率居高不下是严重影响企业正常生产和提高一次校验率的因素。

在此背景下,开展工件塑性成形过程的精确控制研究,通过构建精确的流动模型、组织性能预测模型与表征方法<sup>[1-3]</sup>,并精确调控成形工艺参数,优化模具结构与型面设计,实现高材料利用率、高性能制造,发展新的塑性成形理论和工艺方法具有重要的社会经济价值和学术意义<sup>[4-6]</sup>。Gau 等<sup>[7]</sup>在回弹试验中考虑到包辛格效应,探究了该效应对板料回弹的影响。Inamdar 等<sup>[8]</sup>在交互作用中采用单因素试验方法测试了板料回弹量的材料参数、几何参数等。Thomson 等<sup>[9]</sup>对镀铝锌钢材、镀锌钢材、普通钢材制作的 U 形弯曲件的回弹量进行了对比研究,解决了直臂扭曲的问题。Livatyali 等<sup>[10]</sup>和赵玉霞等<sup>[11]</sup>参考近百篇文献分析了零件回弹规律,发现在通常情况下,最关键的是路径被卸载状态下的模拟数据,但是 Karafillis 等<sup>[12]</sup>却并不认同,其认为一个形状复杂的零件只有圆角处的小区域会反向加载并软化。Finn 等<sup>[13]</sup>提出了卸载并模拟各种薄料回弹的计算公式,发现此方法适用于零件回弹量较小时的范围。赵彦启等<sup>[14]</sup>研究了直角形的弯曲回弹并得到了弯曲与回弹量的计算公式;后续学者以此为基础,通过推导回弹量的近似公式,获得了影响回弹角和回弹半径的因素<sup>[15-18]</sup>。魏波等<sup>[19]</sup>为解决马鞍形板成形困难、成形效率和成形精度低的问题,通过理论分析和仿真方法对马鞍形板成形过程中的加载路径和回弹情况进行了研究,发现渐进弯曲成形

方法能提高马鞍形板的成形效率和成形精度。夏琴香等<sup>[20]</sup>为探明镁合金带内筋筒形件热强旋成形质量影响因素间的相互作用,设计了 5 因素 3 水平正交试验方案,开展了灰色关联度分析及极差分析,研究了内筋数量及工艺参数对旋压件直线度、圆度、筋背凹陷率、内筋饱和度、筋高不均匀度等成形质量指标影响的主次顺序,获得了最优的参数组合,并制备出了质量合格的镁合金带内筋筒形件。章顺虎等<sup>[21]</sup>为提高热轧薄板力学性能的预测精度,采用大数据与卷积神经网络相结合的方式建立了高精度的预测模型,进一步采用贡献权重法对输入参数进行筛选,最终建立了热轧薄板力学性能预测模型,该模型对屈服强度的预测误差基本保持在-7%~8.5%,对抗拉强度的预测误差基本保持在-5%~6%。上述研究没有涉及大曲率薄壁件钢板的减薄率设计,因此,对大曲率薄壁件的成形工艺进行参数优化的研究显得尤为重要<sup>[22-25]</sup>。

文中针对某企业提出的某大曲率薄壁件表面覆膜破损,不能满足实际出厂质量要求的问题,根据其外壳形状要求,对其成形工艺参数进行优化设计。通过建立有限元模型、正交试验和响应面试验相结合的方法求出最优解,再将最优解的工艺参数代入有限元软件进行数值模拟,最终获得该大曲率薄壁件成形的最优工艺参数,并制造出合格的零件。

## 1 有限元模型的建立

以某大曲率薄壁件零件作为研究对象,进行数值模拟前需根据实际零件的材料、板料厚度及零件三维模型(图 1)来设计。模拟成形得到的精度和质量与软件中凸模、凹模及网格划分有很大关系。本文采用 Mindlin 理论划分网格并设置模型的形状和尺寸,选

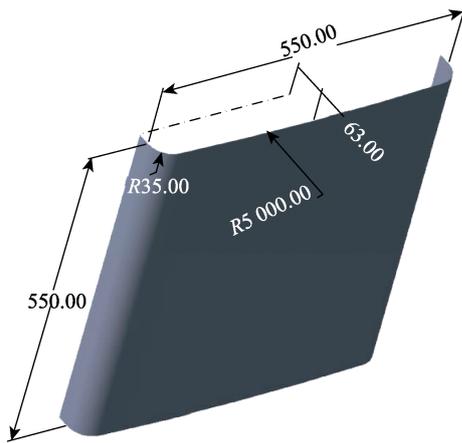


图 1 大曲率薄壁件三维模型 (单位: mm)  
Fig.1 3D model of large curvature thin-walled part (unit: mm)

取网格尺寸为 8 mm×8 mm。冲压类型为单动拉伸。

材料选择 SPHC, 材料密度为 7.85 g/cm<sup>3</sup>, 弹性模量为 207 GPa, 加工硬化指数为 0.18, 抗拉强度为 350 MPa, 屈服强度为 300 MPa, 泊松比为 0.28。

如图 2 所示, 建立板料的有限元模型定位, 定义凹模、凸模、压边圈的摩擦因数为 0.14。进行有限元模拟时, 初次设置的工艺参数为: 冲压速度 3 000 mm/s、压边力 390 kN、摩擦因数 0.14、板料厚度 1 mm。

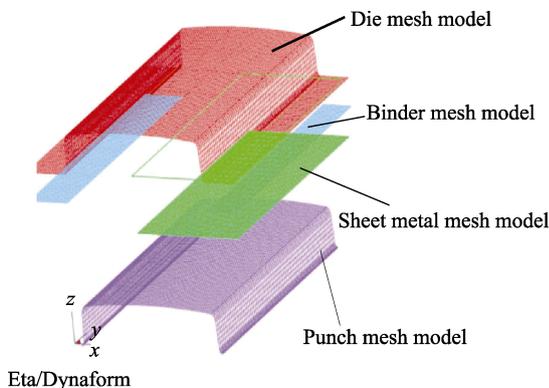


图 2 有限元模型定位  
Fig.2 Positioning of finite element model

模拟时采用单动拉伸成形方式, 因大曲率薄壁件尺寸大, 在合模后的拉伸成形过程中存在拉伸不充分的问题, 为解决该问题, 采用设置一条直线拉伸筋的方式来调节阻力分布, 预设拉伸筋阻力为 35%, 即阻力值大小为 213.205 kN, 法向力为 55.840 7 kN。在单动拉伸成形时, 模具采用倒装方式, 即凹模在上, 凸模在下, 合模时板料静止, 凹模速度设置为 2 000 mm/s, 拉伸时凹模速度设置为 3 000 mm/s。

将工艺参数输入到 Dynaform 中求解, 打开后处理软件 Eta Post Processor 2.0, 读取 d3plot 仿真成形

结果, 分析获得大曲率薄壁件成形后的数据云图, 如成形极限图、厚度的变化云图、应力应变的成形变化云图。

由图 3 可以看出, 经过冲压工序之后, 大曲率薄壁件板料局部区域厚度由 1 mm 变成 0.838 mm, 即最小厚度为 0.838 mm, 根据式 (1) 可以算出大曲率薄壁件的最大减薄率为 16.2%。

$$\alpha_1 = \frac{\tau_0 - \tau_{\min}}{\tau_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\alpha_1$  为最大减薄率, %;  $\tau_0$  为板料原始厚度, mm;  $\tau_{\min}$  为板料变形最严重区域的板料厚度, mm。

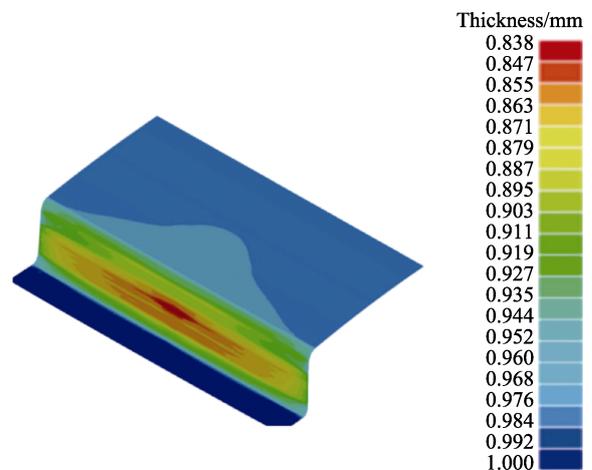


图 3 大曲率薄壁件厚度变化云图  
Fig.3 Cloud diagram of thickness change of large curvature thin-walled part

企业实践使用的大曲率薄壁件基材厚度为 0.5 mm, 覆膜厚度为 0.1 mm, 总厚度为 0.6 mm, 因此, 计算出允许的最大减薄率, 见式 (2)。

$$\alpha_{bc} = \frac{0.1}{0.6} = 16.67\% \quad (2)$$

式中:  $\alpha_{bc}$  为允许的最大减薄率。模拟获得的减薄率小于此数值即满足要求。

## 2 单因素分析下数值模拟的工艺参数

### 2.1 压边力变化对板料的影响

采用单因素分析法, 将拉伸筋阻力设置为 35%、摩擦因数为 0.14、冲压速度为 3 000 mm/s, 只改变压边力大小, 将压边力范围设置为 350~430 kN, 将各个参数逐一输入 Dynaform 求解, 具体参数设置如表 1 所示。

由表 1 可知, 随着压边力的逐渐增大, 板料受到拉伸之后的厚度不断减小, 最大减薄率逐渐变大。尤其在压边力为 430 kN 时, 局部最薄处为 0.037 mm, 此时最大减薄率达到 96.3%。

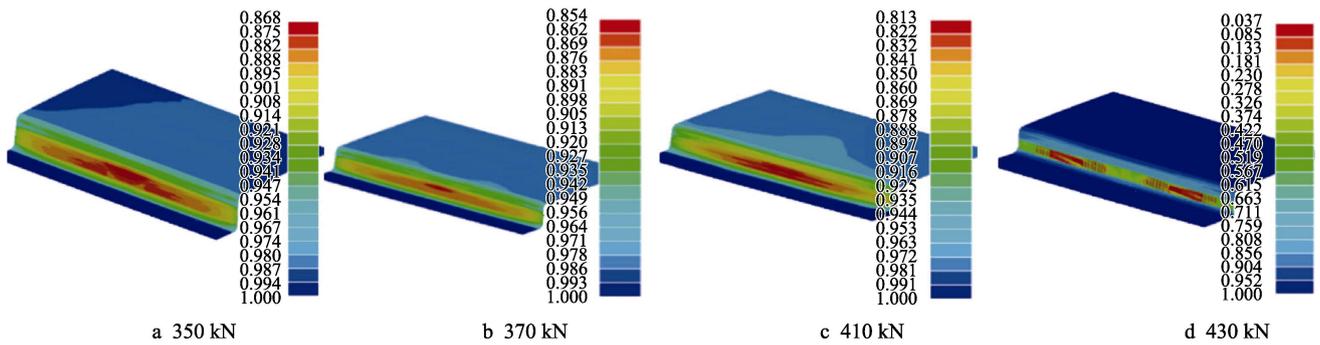


图4 不同压边力下板料的成形极限和厚度

Fig.4 Forming limit and thickness of sheet under different edge pressing force

表1 不同压边力作用下板料厚度的变化

Tab.1 Change of sheet thickness under different edge pressing force

Edge pressing force/kN	Minimum thickness/mm	Maximum down-gauging rate/%
350	13.2	0.868
370	14.6	0.854
410	18.7	0.813
430	96.3	0.037

从图4可以看出,当压边力为350 kN时,出现局部区域拉伸不充分,没有得到充分拉伸。压边力为370、410 kN时,拉伸都比较充分,成形效果很好,而且没有拉裂和起皱现象发生。当压边力增大到430 kN时,破裂现象大面积出现。

### 2.2 摩擦因数变化对板料的影响

在冲压成形有限元模拟仿真中,将摩擦因数作为变量,其他3个因素,即冲压速度、压边力、拉伸筋阻力设置为常量。摩擦因数设置的取值区间为0.1~0.17,模拟成形方案见表2。确认方案之后,将各工艺参数设置在有限元软件中并进行模拟,模拟结果如表3所示。从表3可以看出,随着摩擦因数的增大,摩擦力逐渐增大,使得最大减薄率逐渐增大,最终导致板料拉裂。

从图5可看出,当摩擦因数为0.1时,零件拉伸

表2 摩擦因数参数设置模拟方案

Tab.2 Simulation scheme for parameter setting of friction coefficient

Friction factor	Edge pressing force/kN	Pulling bead resistance/%	Stamping speed/(mm·s <sup>-1</sup> )
0.1	390	35	3 000
0.13	390	35	3 000
0.14	390	35	3 000
0.15	390	35	3 000
0.17	390	35	3 000

表3 不同摩擦因数下板料厚度的变化

Tab.3 Change of sheet thickness under different friction coefficients

Friction factor	Minimum thickness/mm	Maximum down-gauging rate/%
0.1	0.899	10.1
0.13	0.865	13.5
0.15	0.431	56.9
0.17	0.024	97.6

不充分,成形效果不好,工件质量差。摩擦因数为0.13时,零件拉伸充分,成形工件质量好。而拉伸不充分的原因是摩擦力过低,板料流动性不好,导致大部分区域都没有拉伸成功。当摩擦因数为0.15时,板料的侧边区域出现了破裂及拉伸时拉裂的情况。当摩擦因数为0.17时,拉裂面积变大。

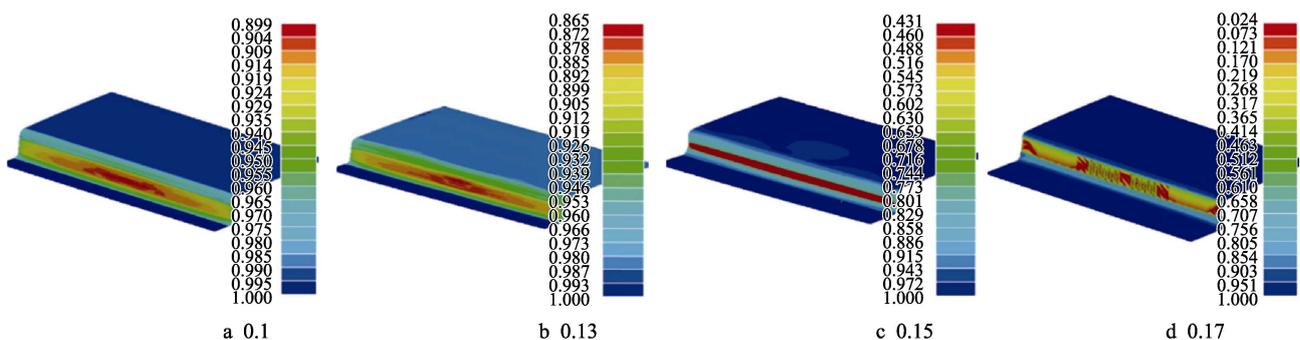


图5 不同摩擦因数下板料的成形极限和厚度变化

Fig.5 Forming limit and thickness change of sheet under different friction coefficients

### 2.3 拉延筋阻力变化对板料的影响

冲压成形模拟时,拉延筋阻力为变量,其他 3 个因素设为常量,即冲压速度、板料与模具间的摩擦因数及板料压边力。拉延筋阻力的取值范围为 27%~42%,拟定方案如表 4 所示。确认方案之后,将各工艺参数设置在有限元软件中并进行模拟,结果如表 5 所示。

表 4 拉延筋阻力参数设置模拟方案  
Tab.4 Simulation scheme for parameter setting of rib resistance

Pulling bead resistance/%	Friction coefficient	Edge pressing force/kN	Stamping speed/(mm·s <sup>-1</sup> )
27	0.14	390	3 000
31	0.14	390	3 000
35	0.14	390	3 000
39	0.14	390	3 000
42	0.14	390	3 000

表 5 不同拉延筋阻力下板料厚度的变化  
Tab.5 Change of sheet thickness under different rib resistance

Pulling bead resistance/%	Minimum thickness/mm	Maximum down-gauging rate/%
27	0.867	13.3
31	0.853	14.7
35	0.838	16.2
39	0.823	17.7
42	0.491	50.9

由表 5 可以看出,当拉延筋阻力增大时,板料在模具内的流动性减小,从而使得最大减薄率逐渐增大。当拉延筋阻力百分比为 42%时,板料最小厚度达到 0.491 mm,板料发生破裂的风险增大。由图 6 可知,当拉延筋阻力为 27%时,板料拉延不充分,有部分区域没有涉及拉延,拉延筋施加于板料上的作用力不足。当拉延筋阻力为 31%时,可以看到,板料的成

形效果逐渐变好,拉延区域较充分。拉延筋阻力为 39%时,板料整体状态基本满足工业要求。当拉延筋阻力达到 42%时,板料开始出现小面积、局部范围内的破裂及减薄。

### 2.4 冲压速度变化对板料的影响

冲压速度对板料也有一定的影响,因此,冲压速度的设置模拟也是不可或缺的一部分,其影响板料的摩擦和成形质量,设置方案如表 6 所示。将各工艺参数设置在有限元软件中并进行模拟,结果如表 7 所示。根据表 7 可知,冲压速度从 1 000 mm/s 增大到 2 000 mm/s 时,板料最大减薄率略微提升了 0.4%,但冲压速度增大到 3 000 mm/s 时,板料的最大减薄率又降低了 0.5%。从图 7 可以看出,冲压速度对板料成形的影响较小。

表 6 冲压速度参数设置模拟方案  
Tab.6 Simulation scheme for parameter setting of stamping speed

Stamping speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	Friction coefficient	Edge pressing force/kN	Pulling bead resistance/%
1 000	0.14	390	35
2 000	0.14	390	35
3 000	0.14	390	35
4 000	0.14	390	35
5 000	0.14	390	35

表 7 不同冲压速度下板料的厚度变化  
Tab.7 Change of sheet thickness under different stamping speed

Stamping speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	Minimum thickness/mm	Maximum down-gauging rate/%
1 000	0.847	15.3
2 000	0.843	15.7
3 000	0.838	16.2
4 000	0.843	15.7
5 000	0.845	15.5

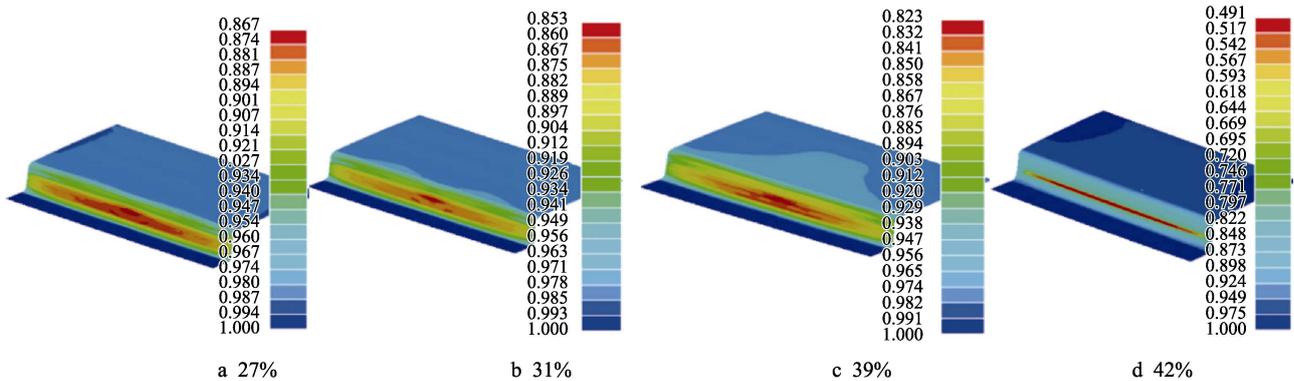


图 6 不同拉延筋阻力下板料的成形极限和厚度变化

Fig.6 Forming limit and thickness change of sheet under different rib resistance

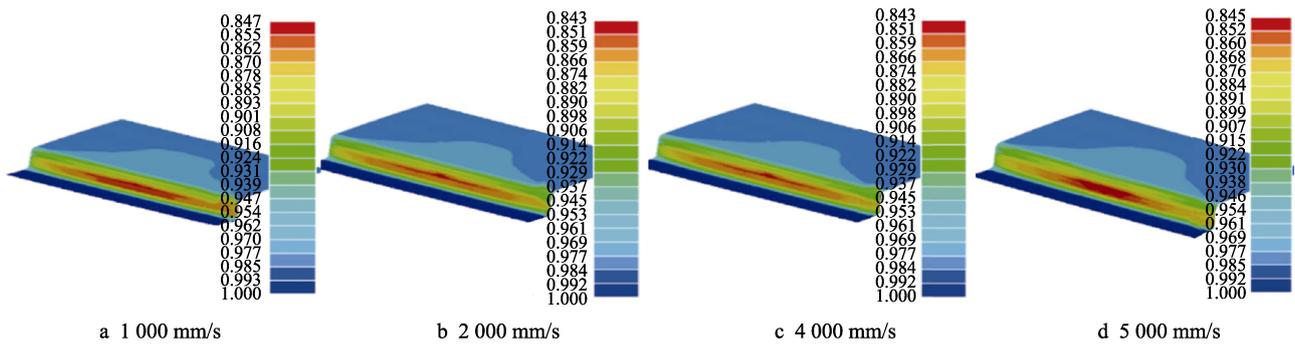


图7 不同速度下板料的成形极限和厚度变化

Fig.7 Forming limit and thickness change of sheet under different speed

### 3 正交试验下的数值模拟

结合工程实践,选用减薄率作为指标对数值模拟结果进行评价。

#### 3.1 大曲率薄壁件冲压工艺参数优化

##### 3.1.1 正交试验设计

压边力选择 350、373、396、413 kN;摩擦因数选择 0.09、0.108、0.126、0.144;冲压速度选 2 000、3 000、4 000、5 000 mm/s;拉伸筋阻力选 27%、31%、36%、40%。该模拟涉及 4 个因素,使用  $L_{16}(4^4)$  正交表分析,使各因素水平均衡。正交试验设计如表 8 所示。

##### 3.1.2 正交试验结果

根据正交试验表计算求解 16 组仿真试验数据,

计算结果如表 9 所示。

##### 3.1.3 正交试验结果分析

从表 9 中分析不同工艺参数设置,得出板料最大减薄率为 7%~15%。找出各个工艺参数对最大减薄率的影响,按大小排序,并研究水平组合最优的工艺参数。为此,对数据进行极差分析,结果如表 10 所示。其中,  $k_{j1}$ 、 $k_{j2}$ 、 $k_{j3}$ 、 $k_{j4}$  为各参数 1、2、3、4 的水平;  $R_j$  为极差。

由表 10 可知,大曲率薄壁件冲压成形之后的工件最大减薄率受各因素影响的排序为:摩擦因数 > 压边力 > 拉伸筋阻力 > 冲压速度。

极差分析结果还可以用来指导正交试验,探究每个工艺参数对板料成形单独作用的影响规律,并得到各工艺参数的较优水平。最大减薄率和试验因素之间的关系如图 8 所示。

表 8 正交试验  
Tab.8 Orthogonal experiment

Serial number	Edge pressing force/kN	Friction coefficient	Pulling bead resistance/%	Stamping speed/(mm·s <sup>-1</sup> )
1	350	0.09	27	2 000
2	373	0.09	31	3 000
3	396	0.09	36	4 000
4	413	0.09	40	5 000
5	373	0.108	27	4 000
6	350	0.108	31	5 000
7	413	0.108	36	2 000
8	396	0.108	40	3 000
9	396	0.126	27	5 000
10	413	0.126	31	4 000
11	350	0.126	36	3 000
12	373	0.126	40	2 000
13	413	0.144	27	3 000
14	396	0.144	31	2 000
15	373	0.144	36	5 000
16	350	0.144	40	4 000

表 9 正交试验数据整合  
Tab.9 Data consolidation of orthogonal experiment

Serial number	Edge pressing force/kN	Friction coefficient	Pulling bead resistance/%	Stamping speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	Minimum thickness/mm	Maximum down-gauging rate/%
1	350	0.09	27	2 000	0.929	7.1
2	373	0.09	31	3 000	0.919	8.1
3	396	0.09	36	4 000	0.909	9.1
4	413	0.09	40	5 000	0.898	10.2
5	373	0.108	27	4 000	0.908	9.2
6	350	0.108	31	5 000	0.91	9
7	413	0.108	36	2 000	0.887	11.3
8	396	0.108	40	3 000	0.886	11.4
9	396	0.126	27	5 000	0.879	12.1
10	413	0.126	31	4 000	0.866	13.4
11	350	0.126	36	3 000	0.884	11.6
12	373	0.126	40	2 000	0.877	12.3
13	413	0.144	27	3 000	0.835	16.5
14	396	0.144	31	2 000	0.841	15.9
15	373	0.144	36	5 000	0.845	15.5
16	350	0.144	40	4 000	0.848	15.7

表 10 分析极差数据统计  
Tab.10 Statistics of analysis range data

Factor level	Maximum downgauging rate%			
	Friction coefficient	Pulling bead resistance	Edge pressing force	Stamping speed
$k_{j1}$	8.625	11.225	10.85	11.65
$k_{j2}$	10.225	11.6	11.275	11.9
$k_{j3}$	12.35	11.875	12.125	11.85
$k_{j4}$	15.9	12.4	12.85	11.7
$R_j$	7.275	1.175	2	0.25
Sort	1	3	2	4

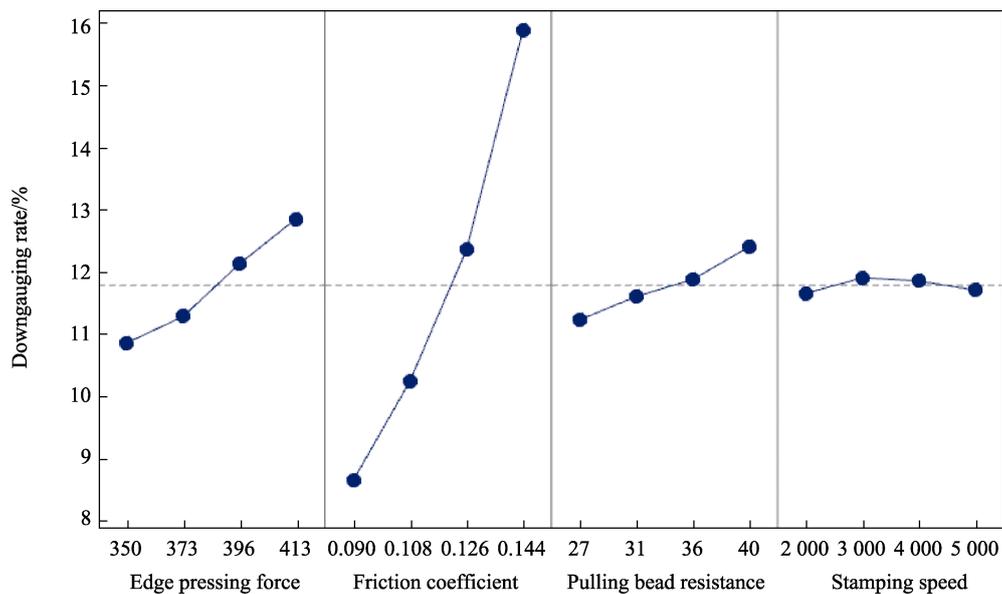


图 8 最大减薄率和试验因子的关系

Fig.8 Relationship between maximum thinning rate and test factors

由图8可看出各因子变化对减薄率的影响规律。当摩擦因数从0.09逐渐增大到0.144时,减薄率增长较快;拉伸筋阻力从27%增大到40%时,减薄率也在小幅度提升;随着压边力的增大,减薄率增大;冲压速度的增大对减薄率变化的影响不明显。压边力和板料的摩擦因数对成形过程中减薄率的提升影响较大,而冲压速度和拉伸筋阻力影响则较小,因此,优化重点在于摩擦因数。

### 3.2 响应面工艺分析

根据正交试验结果,将压边力和摩擦因数作为变

量进行优化设计,将最大减薄率作为优化目标,寻找最优的组合方案,应用Design-Expert软件里自带的BBD设计法,设计试验见表11,等值线图见图9,三维响应曲面图见图10。

从响应面BBD设计及三维响应面曲面图中预测值可知:当摩擦因数为0.09、压边力为409.730 kN、拉伸筋阻力为总阻力的32.384%时,最大减薄率达到最优值,为7.926%。

在Dynaform中输入优化之后的工艺参数,进行验证求解计算,得到优化后该零件的最薄处厚度为0.906 mm,最大减薄率为9.40%,大曲率薄壁件的厚

表11 BBD设计  
Tab.11 BBD design

Serial number	Friction coefficient	Edge pressing force/kN	Pulling bead resistance/%	Minimum thickness/mm	Maximum downgauging rate/%
1	0.117	381.5	33.5	0.887	11.3
2	0.09	413	33.5	0.912	8.8
3	0.144	381.5	27	0.860	14
4	0.117	381.5	33.5	0.887	11.3
5	0.09	350	33.5	0.919	8.1
6	0.117	413	40	0.862	13.8
7	0.144	350	33.5	0.862	13.8
8	0.117	350	27	0.908	9.2
9	0.117	381.5	33.5	0.887	11.3
10	0.09	381.5	27	0.919	8.1
11	0.09	381.5	40	0.906	9.4
12	0.144	381.5	40	0.791	20.9
13	0.117	381.5	33.5	0.887	11.3
14	0.117	381.5	33.5	0.887	11.3
15	0.144	413	33.5	0.452	54.8
16	0.117	413	27	0.882	11.8
17	0.117	350	40	0.880	12

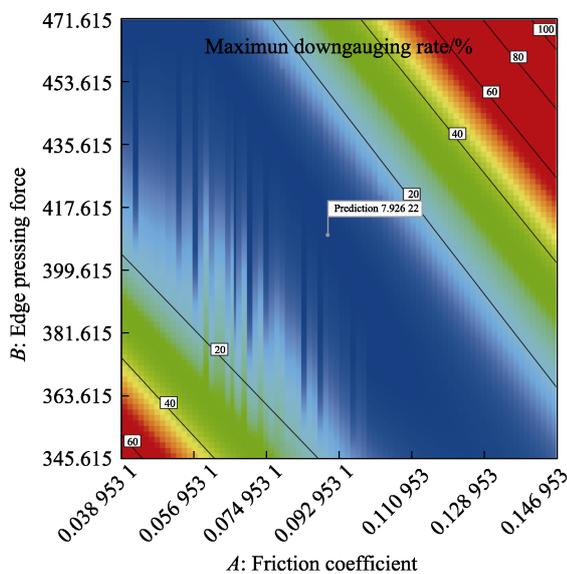


图9 等值线  
Fig.9 Contour map

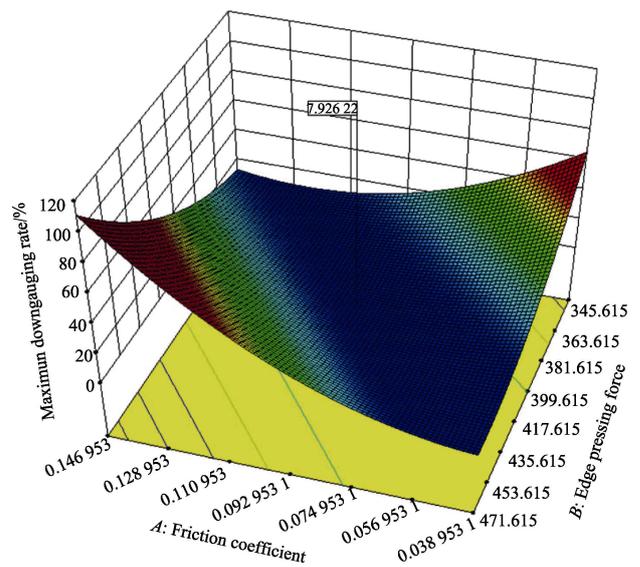


图10 三维响应面曲面图  
Fig.10 Three dimensional response surface diagram

度变化云图如图 11 所示。

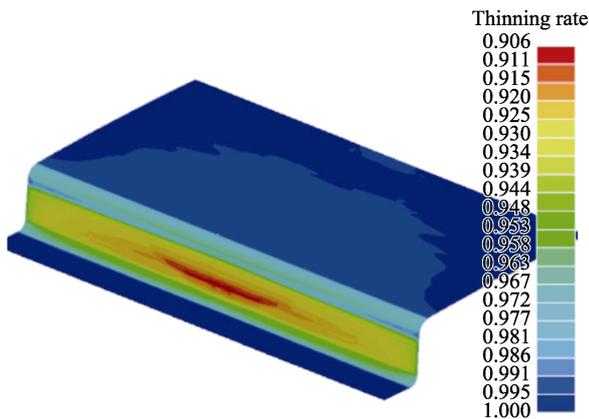


图 11 优化后的减薄率云图

Fig.11 Cloud diagram of optimized thinning rate

将响应面预测数据与仿真数据进行对比, 计算得到的预测值与仿真结果相差 1.474%, 由式 (3) 可计算出相对误差率为 15.68%, 在允许的误差范围内。

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $\delta$  为仿真结果的相对误差率;  $\Delta$  为预测值与仿真结果的差值;  $L$  为仿真值。

## 4 试验验证

利用数值模拟优化后的工艺参数在某公司进行大曲率薄壁件成形试模, 图 12 是一次试模成功的大曲率薄壁件。由图 12 可知, 零件成形效果良好, 表面外观区域减薄均匀, 没有破损、漏底色等成形缺陷, 零件最大减薄率为 10.00%, 与优化后的仿真结果 9.40% 接近, 符合成形质量要求。



图 12 实际生产的合格零件

Fig.12 Qualified part in actual production

## 5 结论

1) 采用正交试验法设置了试验方案, 对大曲率

薄壁件成形加工中的冲压参数进行了优化, 得到了较优的工艺参数组合, 即压边力 409.730 kN、摩擦因数 0.09、拉伸筋阻力设置为阻力大小的 32.384%、冲压速度 3 300 mm/s。

2) 对试验得到的数据进行整合, 并求解各个工艺参数的算数平均值, 进行极差和方差分析, 列出各因素对大曲率薄壁件的影响顺序: 摩擦因数 > 压边力 > 拉伸筋阻力 > 冲压速度。

3) 选择影响作用较大的因素设计响应面, 借助 Design-Expert 软件建立响应面模型, 采用 BBD 设计方案, 求出最优的大曲率薄壁件最大减薄率为 9.40%, 与响应面预测值仅相差 1.474%, 相对误差率为 15.68%, 满足企业实际要求。

## 参考文献:

- [1] 姜中涛, 汪鑫, 周志明, 等. 7050 铝合金锻件固溶处理工艺优化研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 112-116.  
JIANG Zhong-tao, WANG Xin, ZHOU Zhi-ming, et al. Optimization of Solution Treatment Process for 7050 Aluminum Alloy Forgings[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(6): 112-116.
- [2] 邱超斌, 张猛, 郎利辉, 等. 基于神经网络遗传算法的深腔型零件拉深工艺参数优化[J]. 精密成形工程, 2021, 13(5): 173-179.  
QIU Chao-bin, ZHANG Meng, LANG Li-hui, et al. Parameter Optimization of Deep Drawing Process for Deep Cavity Parts Based on Neural Network Genetic Algorithm[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(5): 173-179.
- [3] 黄超群, 肖贵乾. 热处理工艺参数对超高强度钢性能的影响[J]. 精密成形工程, 2021, 13(4): 127-132.  
HUANG Chao-qun, XIAO Gui-qian. Effect of Heat Treatment Parameters on the Properties of Ultra-High-Strength Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(4): 127-132.
- [4] 赖亮庆, 陈高升, 冯林兆, 等. 高精度 17-4PH 不锈钢隔碗拉深液压胀形复合成形工艺参数优化[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 104-111.  
LAI Liang-qing, CHEN Gao-sheng, FENG Lin-zhao, et al. Processing Parameters Optimization of Drawing-Hydraulic-Bulging Forming of High-Precision 17-4PH Stainless Steel Spacer[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(3): 104-111.
- [5] 翟江波. 基于目标应变分布的 TC17 合金双性能盘预成形形状优化设计[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 118-124.  
ZHAI Jiang-bo. Preform Shape Optimization Design for Acquiring Desired Strain Distribution during Forging of TC17 Alloy Dual-Microstructure Disks[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(3): 118-124.
- [6] 丁立波, 梁田, 李明杰, 等. 工艺参数对防护梁绕弯成形的壁厚影响研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(2): 105-110.

- DING Li-bo, LIANG Tian, LI Ming-jie, et al. Research on the Influence of Process Parameters on the Wall Thickness of the Protective Beam after Rotary Draw Bending[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(2): 105-110.
- [7] GAU J T, KINZEL G L. An Experimental Investigation of the Influence of the Bauschinger Effect on Springback Predictions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 108(3): 369-375.
- [8] INAMDAR M V, DATE P P, SABNIS S V. On the Effects of Geometric Parameters on Springback in Sheets of Five Materials Subjected to Air Vee Bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(3): 459-463.
- [9] THOMSON P F, KIM J K. Springback and Side-Wall Curl of Galvanized and Galvalume Steel Sheet[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1989, 19(2): 223-238.
- [10] LIVATYALI H, WU H C, ALTAN T. Prediction and Elimination of Springback in Straight Flanging Using Computer-Aided Design Methods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1/2/3): 348-354.
- [11] 赵玉霞, 孙华雨, 方雷. 汽车轮毂旋压成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(7): 124-129.  
ZHAO Yu-xia, SUN Hua-yu, FANG Lei. Spinning Forming Technology of Automobile Wheel Hub[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(7): 124-129.
- [12] KARAFILLIS A P, BOYCE M C. Tooling Design in Sheet Metal Forming Using Springback Calculations[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1992, 34(2): 113-131.
- [13] FINN M J, GALBRAITH H P C, WU L, et al. Use of a Coupled Explicit—Implicit Solver for Calculating Spring-back in Automotive Body Panels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 50(1-4): 395-409.
- [14] 赵彦启, 闵乃燕, 杨青春. 直角形弯曲的变形分析与回弹计算[J]. 塑性工程学报, 1996, 3(1): 38-43.  
ZHAO Yan-qi, MIN Nai-yan, YANG Qing-chun. Research on Deformation and Springback of Sheet under Rectangular Bending[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1996, 3(1): 38-43.
- [15] 孙占坤, 李涛. 中厚板 U 形冲压成形有限元模拟分析及回弹预测[J]. 锻压技术, 2022, 47(5): 81-88.  
SUN Zhan-kun, LI Tao. Simulation Analysis and Springback Prediction on U-Shaped Stamping of Medium-Thickness Plate Based on Finite Element Simulation[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(5): 81-88.
- [16] 孙刚, 徐建军, 白朋鹏, 等. 汽车发罩外板冲压回弹补偿研究[J]. 锻压技术, 2021, 46(5): 64-71.  
SUN Gang, XU Jian-jun, BAI Peng-peng, et al. Springback Compensation Research of Stamping for Automobile Hood Outer Plate[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(5): 64-71.
- [17] 胡志超, 王云超, 林荣川, 等. 一种旋转折弯成形的数值模拟方法及实验验证[J]. 锻压技术, 2021, 46(3): 70-74.  
HU Zhi-chao, WANG Yun-chao, LIN Rong-chuan, et al. A Numerical Simulation Method and Experimental Verification for Rotary Bending[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(3): 70-74.
- [18] 赵月伟, 帅美荣, 楚志兵, 等. 焊管冷弯回弹曲线方程构建及工艺优化[J]. 精密成形工程, 2022, 14(7): 98-105.  
ZHAO Yue-wei, SHUAI Mei-rong, CHU Zhi-bing, et al. Construction of Springback Curve Equation and Process Optimization of Welded Pipe during Cold Bending[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(7): 98-105.
- [19] 魏波, 何浩然, 丘永亮, 等. 基于渐进弯曲成形双曲马鞍形金属板工艺研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(7): 116-123.  
WEI Bo, HE Hao-ran, QIU Yong-liang, et al. Forming Complex Curved Saddle Shaped Plate Based on Incremental Bending[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(7): 116-123.
- [20] 夏琴香, 江鹏, 肖刚锋, 等. 镁合金带内筋筒形件热强旋成形质量及参数优化[J]. 精密成形工程, 2022, 14(5): 1-7.  
XIA Qin-xiang, JIANG Peng, XIAO Gang-feng, et al. Forming Quality and Parameters Optimization for Hot Power Spinning of Magnesium Alloy Cylindrical Parts with Inner Ribs[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(5): 1-7.
- [21] 章顺虎, 车立志, 田文皓, 等. 基于卷积神经网络的热轧薄板力学性能建模[J]. 精密成形工程, 2022, 14(3): 1-7.  
ZHANG Shun-hu, CHE Li-zhi, TIAN Wen-hao, et al. Modeling of Mechanical Properties of Hot Rolled Sheet Based on Convolutional Neural Network[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(3): 1-7.
- [22] 王勇, 张鹏, 张晔, 等. 基于响应面法的花键套振动冷挤压参数多目标优化[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(4): 7-13.  
WANG Yong, ZHANG Peng, ZHANG Ye, et al. Multi-Objective Optimization of Spline Sleeve Vibration Cold Extrusion Parameters Based on Response Surface Method[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(4): 7-13.
- [23] ZHANG De-hai, LI Yan-qin, XIE Gui-zhong, et al. Digital Image Correlation Method for Measuring Deformations of Vinyl Chloride-Coated Metal Multilayer Sheets[J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(5): 1950050.
- [24] 夏琴香, 江鹏, 龙锦川, 等. 内筋参数对镁合金带内筋筒形件热强旋成形材料流动的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(2): 1-7.  
XIA Qin-xiang, JIANG Peng, LONG Jin-chuan, et al. Influence of Inner-Rib Parameters on Material Flow of Magnesium Alloy Cylindrical Parts with Inner Ribs during Hot Power Spinning[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(2): 1-7.
- [25] LI Y, ZHANG D H. Local Stress Distributions in Fiber-Reinforced Composites with Consideration of Thermal Stresses during the Curing Process[J]. Mechanics of Composite Materials, 2021, 57(5): 675-686.