

特种成形

## 基于响应面法的带交叉筋筒形零件热摆辗成形质量分析

吴磊<sup>1</sup>, 冯玮<sup>1,2,3</sup>

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心, 湖北 武汉 430070;  
3. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为了研究铝合金带交叉筋筒形零件热摆辗成形过程中交叉筋的几何参数对筋部充填不满、折叠等成形质量问题的影响规律, 以交叉筋的宽度和高度为变量, 采用 Box-Behnke 设计 (BBD) 方法进行了试验设计, 利用有限元方法模拟了具有不同筋高和筋宽的筒形零件的热摆辗成形过程, 计算了成形结束时不同筋高和筋宽时筋部的充填质量和折叠率, 建立了以交叉筋的宽度和高度为设计变量, 以筋部的充填质量和折叠率目标的二次多项式响应面模型。结合响应面模型和有限元方法, 得到了不同筋宽和筋高下零件的成形质量, 预测了成形质量最佳时交叉筋的高度和宽度, 利用有限元对预测结果进行了模拟和验证。结果表明: 当高筋的高宽比小于6时, 筋部的充填质量较好; 随着筋宽的增加, 折叠率逐渐减小; 优化后零件的筋部充填完整, 折叠缺陷极少, 模拟结果与预测结果一致, 验证了响应面模型的准确性。

**关键词:** 铝合金; 交叉筋筒形零件; 热摆辗成形; 响应面模型; 充填质量; 折叠率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.018

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0118-08

## Quality analysis on hot orbital forming for cylindrical parts with cross ribs based on response surface method

Wu Lei<sup>1</sup>, Feng Wei<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
2. Hubei Material Green Precision Forming Engineering Technology Research Center, Wuhan 430070, China;  
3. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to study the influence laws of geometric parameters for cross ribs on the forming quality problems of rib insufficient filling, folding and so on during the hot orbital forming process of aluminum alloy cylindrical part with cross ribs, taking the width and height of cross ribs as variables, the experimental design was carried out by Box-Behnke designing (BBD) method, and the hot orbital forming process of cylindrical parts with different rib widths and rib heights was simulated by the finite element method. Then, the filling quality and folding rate of ribs with different rib widths and rib heights at the end of forming were calculated, and taking the width and height of cross ribs as the design variables and the filling quality and folding rate of ribs as the objectives, a quadratic polynomial response surface model (RSM) was established. Furthermore, the forming quality of part with different rib width and rib heights was obtained by combining response surface model and finite element method, and the height and width of cross rib when the forming quality was the best were predicted, which were simulated and verified by finite element. The results show that the filling quality of ribs is better when the height-width ratio of high ribs is less than six, and the folding rate decreases gradually with the increasing of the rib width. After optimization, the ribs of part are filled fully, the fold defects are few, and the simulation results are consistent with the prediction results to verify the accuracy of the response surface model.

**Key words:** aluminum alloy; cylindrical part with cross ribs; hot orbital forming; response surface model; filling quality; folding rate

铝合金具有良好的流动性能, 且强度高、耐腐

蚀强、导热性能好, 是理想的轻量化材料, 现已被广泛应用于航空航天、汽车制造、家用电器等领域<sup>[1]</sup>。为了提高零件轻度和实现轻量化, 很多铝合金零件通常设计为薄腹或薄壁, 并带有交叉筋或凸台结构, 这类零件目前主要采用的加工方法有铸造、焊接、切削等, 具有效率低、成本高、材料浪费大, 而且零件性能差等缺点, 难以适应我国工业的高速发展<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期: 2021-08-23; 修订日期: 2021-11-30

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助项目 (B17034);

教育部创新团队发展计划项目 (IRT\_17R83)

作者简介: 吴磊 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: leiwu@whut.edu.cn

通信作者: 冯玮 (1973-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师

E-mail: fw7757@sina.com

近几年, 为了提高带筋构件的性能及生产效率, 武汉理工大学韩星会团队<sup>[4-5]</sup>对带筋件的摆辗成形技术做了大量的研究。摆辗是一种连续的局部塑性成形技术, 能够显著降低成形载荷, 提高材料的流动性, 但是由于筋的存在, 材料的流动行为复杂, 容易出现筋部充填不满、材料折叠等缺陷<sup>[6-7]</sup>。此外, 不同构件的筋高、筋宽等几何参数不一样, 构件的成形质量不一样, 因此, 如果能够预测不同筋高、筋宽参数下零件的成形质量, 将对带筋件的结构设计提供指导。

为了降低试验成本, 许多学者将有限元模拟技术与响应面法相结合以实现多因素影响条件下多目标的优化。刘俊英<sup>[8]</sup>将有限元模拟和正交试验相结合, 研究了车用螺母冷镦成形过程中, 冲压速度及模具硬度等工艺参数对模具磨损及成形载荷的影响, 确定了最佳的工艺参数, 大幅降低了成形载荷, 有效地提升了模具寿命。高冲等<sup>[9]</sup>以铝合金连杆为对象, 将有限元模拟与响应面法相结合, 以减少锻件裂纹为目标, 优化了锻造铝合金连杆的工艺参数。Ali A N 等<sup>[10]</sup>将响应面法应用于等径角挤压 AZ61 镁合金韧性断裂 GTN 模型中损伤参数的确定。Chen S W 等<sup>[11]</sup>利用响应面法评估了材料参数对法兰旋压起皱预测模型的影响程度。Balaji U 等<sup>[12]</sup>通过响应面法分析了不同参数等对钛的阳极氧化膜的厚度及颜色的影响, 获得了不同氧化膜颜色对应的工艺窗口。Wei K 等<sup>[13]</sup>研究了大型钛合金筋板件等温局部加载成形过程, 以不等厚坯料的尺寸为变量, 以不同加载阶段的充填体积为指标, 利用响应面法预测了筋部的充填质量, 得到了充填完整、无折叠缺陷的锻件。王钊等<sup>[14]</sup>将有限元模拟和响应面法相结合, 成功地优化了拉延成形汽车中立柱内板零件的工艺参数, 控制了最大减薄率和最大增厚率, 有效地提升了零件的成形质量。Guo L G 等<sup>[15]</sup>利用有限元模拟研究了 Inconel 625 合金大型厚壁管的挤压成形工艺, 建立了坯料温升和峰值温度与工艺参数之间的响应面模型, 确定了不同挤压比下的关键参数组合。Zhu X L 等<sup>[16]</sup>在 Inconel 718 合金径向-轴向环轧工艺中运用响应面法优化了加载参数, 成形后的工件的应变和温度分布更均匀。Chu Q 等<sup>[17]</sup>使用响应面法研究了搅拌摩擦焊接铝锂合金过程中转速等条件对接头的拉伸/剪切强度的影响, 准确预测了最佳的焊接参数。

本文针对带交叉筋筒形零件的热摆辗成形工艺, 以交叉筋矮筋宽度、矮筋高度、高筋宽度、高筋高

度为变量, 以筋部的充填质量和折叠率为优化目标, 在参数水平范围内, 设计了 Box-Behnken 试验, 建立了二次多项式响应面模型, 实现了对不同结构零件成形质量的预测。

## 1 有限元模型及优化目标

### 1.1 有限元模型的建立

本文研究的带交叉筋筒形零件的模型如图 1 所示, 材料为 7075 铝合金。该零件可分为筒底、筒壁和交叉筋 3 个部分, 圆筒外径为  $\Phi 66$  mm, 筒壁厚度为 3 mm, 筒底厚度为 4 mm, 侧壁高度为 42 mm。交叉筋由两条互相垂直的纵横内筋组成, 其高度和宽度的设计范围为:  $2 \text{ mm} < \text{矮筋宽度 } w < 6 \text{ mm}$ ,  $12 \text{ mm} < \text{矮筋高度 } h < 24 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ mm} < \text{高筋宽度 } W < 6 \text{ mm}$ ,  $24 \text{ mm} < \text{高筋高度 } H < 40 \text{ mm}$ 。为了避免坯料在成形初始阶段受摆头剪切摩擦作用而发生位置偏移, 选择坯料直径尺寸与下模内径相近的圆饼状坯料。选取坯料直径为  $\Phi 64$  mm, 根据体积不变原理可计算出具有不同筋结构尺寸的坯料厚度。

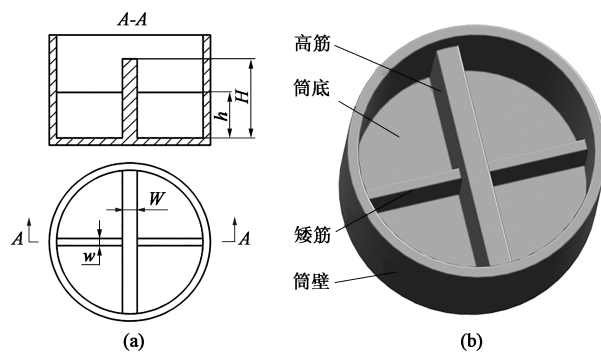


图 1 带交叉筋筒形零件的几何尺寸 (a) 和模型 (b)

Fig. 1 Geometric dimension (a) and model (b) of cylindrical part with cross ribs

设置筋槽型腔的摆头、下模及坯料的三维 CAD 模型并保存为 .Stl 格式, 导入 DEFORM-3D 软件中建立带交叉筋筒形零件热摆辗成形有限元模型, 如图 2 所示。其中, 模具材料为 H13 钢, 将模具视为刚体, 坯料材料为 Al7075 铝合金, 将坯料视为刚塑性体, 坯料共划分 80000 个四面体网格, 并在交叉筋对应的坯料处对网格进行局部细化, 最小单元网格尺寸为 0.34 mm, 摆头和下模均划分 100000 个四面体网格, 进行变形-传热耦合分析。

根据材料特性及热摆辗成形特点, 将工艺参数设为: 坯料温度为  $425^{\circ}\text{C}$ , 模具温度为  $250^{\circ}\text{C}$ , 模具与

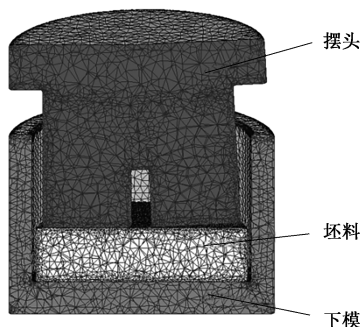


图2 带交叉筋筒形零件热摆辗成形有限元模型

Fig. 2 Finite element model of hot orbital forming for cylindrical parts with cross ribs

坯料之间的传热系数设置为  $11 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ，与环境之间的辐射换热系数为  $0.02 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ，摩擦因数为 0.2，摆头摆角为  $1.5^\circ$ ，摆头转速为  $240 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。为了保证零件的成形质量，摆头摆辗时的相对进给量  $Q$  应满足以下关系<sup>[18]</sup>：

$$Q = \frac{S}{2Rt\alpha\gamma} \leq 0.3 \quad (1)$$

式中： $S$  为摆头每转一周对应的下模进给量； $R$  为工件半径； $\gamma$  为摆头摆角。

根据摆头转速可得下模进给速度  $v = 4S < 2.074 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，为了减少坯料的温度损失，下模进给速度应取较大值，确定  $v = 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。摆辗成形带交叉筋筒形零件时，摆头以圆形轨迹进行摆动，下模带动坯料向上进给，摆头与坯料局部接触后，坯料受摆头与下模作用而发生塑性变形，下模进给至设定位移后停止进给，摆头继续旋转 1 s 后精整工件，完成零件的成形过程。

## 1.2 优化目标的确定

在热摆辗成形带交叉筋筒形零件过程中，不同时刻摆头与坯料的接触位置不同，坯料各部位的流动方向也不尽相同，坯料的流动行为极其复杂。但总体而言，靠近摆头中心处的坯料的轴向流动速度慢，而远离摆头中心处的坯料的轴向流动速度快，筋的两端优先充填完整，充填完整后两端的坯料受到摆头型腔的阻碍作用，无法继续轴向流动，而是沿径向分别向筋的中心及筒壁流动，同时，坯料沿周向流动，流动方向基本与摆头的旋转方向一致，筋部两端的坯料与筒壁处坯料的流动方向相反，在筋部靠近摆头旋转方向的一侧金属发生汇流而出现折叠现象，成形结束时，零件交叉筋的中心处易充填不足，如图3所示。为了分析交叉筋的几何参数对筒形件成形质量的影响，采用筋部充填质量和折

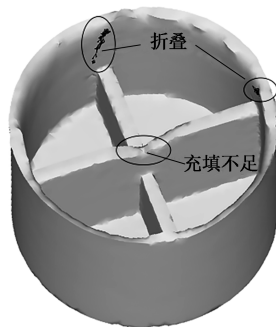


图3 带交叉筋筒形零件热摆辗成形结束时锻件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of forgings at end of hot orbital forming for cylindrical parts with cross ribs

叠率两个目标来描述零件的成形质量。

### 1.2.1 筋部充填质量

在高筋、矮筋交叉中心处会出现充填不足的缺陷，本文采用高筋和矮筋充填的面积来反映成形结束时零件筋部的充填质量  $\eta_1$ ，由式(2)定义：

$$\eta_1 = \frac{S_{\text{高}}}{S_1} \times \frac{S_{\text{矮}}}{S_2} \quad (2)$$

式中： $\eta_1$  为筋部充填质量； $S_{\text{高}}$  为已成形的高筋面积； $S_{\text{矮}}$  为已成形的矮筋面积； $S_1$  为待成形的高筋面积； $S_2$  为待成形的矮筋面积。

$\eta_1$  越大，表示筋部的充填情况越好，反之则筋部充填不足、缺陷越严重，当  $\eta_1 = 1$  时，表示筋部充填完整。

### 1.2.2 折叠率

在交叉筋和筒壁连接处的坯料发生汇流而产生折叠缺陷，本文采用折叠率  $\eta_2$  来反映零件成形过程中发生折叠区域的数量，由式(3)定义：

$$\eta_2 = \frac{N_{\text{fold}}}{N_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $\eta_2$  为折叠率； $N_{\text{fold}}$  为零件发生折叠的表面多面体数量； $N_0$  为零件总的表面多面体数量。

$N_{\text{fold}}$  和  $N_0$  可分别通过读取 DEFORM-3D 模拟软件的后处理结果的单元数来确定。 $\eta_2$  越小，表示发生折叠的区域数量越少，反之则发生折叠的区域数量越多，当  $\eta_2 = 0$  时，表示未出现折叠缺陷。

## 2 响应面模型

响应面法 (Response Surface Method, RSM) 利用合理的试验设计方法并通过试验得到一定数据，采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系，其作为一种优化设计方法而被广泛应用



于各个领域<sup>[8]</sup>。为了研究交叉筋的几何参数对筒形件成形质量的影响，本文将矮筋宽度  $w$ 、矮筋高度  $h$ 、高筋宽度  $W$ 、高筋高度  $H$  作为设计变量，各设计变量的取值如表 1 所示，并将成形结束时筋部的充填质量  $\eta_1$  和折叠率  $\eta_2$  作为响应变量，采用响应面法来预测分析交叉筋的几何参数与筒形件的成形质量的关系。

表 1 设计变量取值 (mm)  
Table 1 Values of designed variables (mm)

设计变量	水平下限	水平上限
矮筋宽度 $w$	2	6
矮筋高度 $h$	12	24
高筋宽度 $W$	2	6
高筋高度 $H$	24	40

2.1 基于响应面法的试验设计

本文采用 Box-Behnke 设计 (BBD) 方法来设计试验并建立响应面模型。Box-Behnken 方法是一种由  $2^k$  析因设计 ( $k$  为因子个数) 和不完全区组设计组合而成的拟合响应曲面的 3 水平设计方法。该方法有利于减少试验次数，适用于大量组合试验分析和因素的非线性影响研究。在变量范围内，通过 Design-Expert 10 软件的响应面模块进行 BBD 试验，根据响应面设计原理，得到 29 组不同的设计变量组合，分别建立有限元模型并进行仿真模拟，统计出不同结构零件成形结束时的筋部充填质量和折叠率，结果如表 2 所示。

2.2 建立响应面模型

基于表 2 所示的模拟结果，建立筋部充填质量  $\eta_1$ 、折叠率  $\eta_2$  与变量矮筋宽度  $w$ 、矮筋高度  $h$ 、高筋宽度  $W$  以及高筋高度  $H$  之间的回归模型，筋部充填质量与折叠率的方差分析结果如表 3~表 6 所示。

在表 3 和表 4 中， $F$  值表示  $F$  检验的统计量值，失拟项  $P$  值表示因素的显著性程度。由表 3 可知，筋部充填质量响应面模型的  $F$  值为 49.878，模型显著；高筋宽度  $W$  和高筋高度  $H$  对筋部充填质量的影响极其显著 ( $P<0.0001$ )， $W^2$ 、 $WH$ 、 $w^2h$  的  $P$  值均小于 0.0500，为较显著因素，其余项均不显著。筋部充填质量  $\eta_1$  的响应面模型为：

$$\eta_1 = 1.0511 + 0.0266W - 7.3666 \times 10^{-3}H +$$
$$9.6041 \times 10^{-4}WH - 4.7010 \times 10^{-4}W^2 +$$
$$9.1841 \times 10^{-6}w^2h \tag{4}$$

表 2 响应面法的试验方案及结果  
Table 2 Experiment schemes and results of response surface method

试验方案	$w/mm$	$h/mm$	$W/mm$	$H/mm$	$\eta_1$	$\eta_2/\%$
1	2	24	4	32	0.9855	2.4727
2	2	18	2	32	0.8974	3.4409
3	2	12	4	32	0.9780	2.2665
4	2	18	6	32	0.9752	1.4671
5	2	18	4	40	0.9247	2.2936
6	2	18	4	24	1.0000	1.6660
7	4	18	2	40	0.8912	2.8055
8	4	12	4	24	0.9997	1.4454
9	4	18	6	24	1.0000	0.9613
10	4	12	4	40	0.9431	2.0285
11	4	18	4	32	0.9697	1.9842
12	4	24	4	24	1.0000	1.4354
13	4	24	6	32	1.0000	0.8801
14	4	12	6	32	1.0000	1.0969
15	4	18	4	32	0.9716	2.0788
16	4	18	4	32	0.9813	1.8788
17	4	18	4	32	0.9688	2.1088
18	4	24	4	40	0.9475	1.5771
19	4	12	2	32	0.9179	2.7464
20	4	18	6	40	0.9811	1.3228
21	4	24	2	32	0.9012	2.4036
22	4	18	4	32	0.9833	1.8529
23	4	18	2	24	0.9716	2.4453
24	6	18	2	32	0.9045	2.7105
25	6	18	6	32	0.9999	0.9735
26	6	18	4	24	0.9995	1.3857
27	6	18	4	40	0.9448	1.4669
28	6	24	4	32	0.9894	1.0066
29	6	12	4	32	0.9409	1.3912

表 3 筋部充填质量回归模型显著程度  
Table 3 Significance of regression model for filling quality of ribs

来源	平方和	自由度	均方差	$F$ 值	$P$ 值	显著程度
模型	0.032	7	$6.475 \times 10^{-3}$	49.878	<0.0001	显著
$W$	0.019	1	0.019	143.212	<0.0001	
$H$	$9.543 \times 10^{-3}$	1	$9.543 \times 10^{-3}$	73.508	<0.0001	
$WH$	$9.445 \times 10^{-4}$	1	$9.445 \times 10^{-4}$	7.276	0.0129	
$W^2$	$2.511 \times 10^{-3}$	1	$2.511 \times 10^{-3}$	19.345	0.0002	
$w^2h$	$7.852 \times 10^{-4}$	1	$7.852 \times 10^{-4}$	6.048	0.0219	
残差	$2.986 \times 10^{-3}$	21	$1.298 \times 10^{-4}$			
失拟项	$2.799 \times 10^{-3}$	17	$1.473 \times 10^{-4}$	3.156	0.1368	不显著
净误差	$1.867 \times 10^{-4}$	4	$4.667 \times 10^{-5}$			

表 4 筋部充填质量方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of filling quality for ribs

相关系数 $R^2$	修正决定系数 $R_a^2$	模型预测 $R_p^2$	信噪比
0.915	0.897	0.820	26.072

表 5 折叠率回归模型显著程度

Table 5 Significance of regression model for folding rate

来源	平方和	自由度	均方差	$F$ 值	$P$ 值	显著程度
模型	11.566	11	1.051	77.812	<0.0001	显著
$w$	0.679	1	0.679	50.262	<0.0001	
$h$	0.120	1	0.120	8.872	0.0084	
$W$	4.712	1	4.712	348.724	<0.0001	
$H$	0.387	1	0.387	28.644	<0.0001	
$wh$	0.087	1	0.087	6.460	0.0211	
$wH$	0.075	1	0.075	5.523	0.0311	
$h^2$	0.320	1	0.320	23.715	0.0001	
$W^2$	0.060	1	0.060	4.463	0.0497	
$H^2$	0.291	1	0.291	21.513	0.0002	
$w^2W$	0.068	1	0.068	5.068	0.0379	
$wh^2$	0.230	1	0.230	17.056	0.0007	
残差	0.230	17	0.014			
失拟项	0.177	13	0.014	1.032	0.5428	不显著
净误差	0.053	4	0.013			

表 6 折叠率方差分析结果

Table 6 Variance analysis results of folding rate

相关系数 $R^2$	修正决定系数 $R_a^2$	模型预测 $R_p^2$	信噪比
0.981	0.968	0.938	32.607

由表 4 可知, 折叠率响应面模型的  $F$  值为 77.812, 模型显著; 矮筋宽度  $w$ 、高筋宽度  $W$  和高筋高度  $H$  对折叠率的影响极其显著 ( $P < 0.0001$ ), 矮筋高度  $h$  对折叠率的影响较为显著 ( $P < 0.0500$ ),  $wh$ 、 $wH$ 、 $h^2$ 、 $W^2$ 、 $H^2$ 、 $w^2W$ 、 $wh^2$  对折叠率的影响较为显著, 其余项均不显著。

折叠率  $\eta_2$  的响应面模型为:

$$\begin{aligned} \eta_2 = & 2.3654 - 1.0001w - 0.3396h - 0.6190W + \\ & 0.2620H + 0.1347wh - 8.5373 \times 10^{-3}wH + \\ & 0.0103h^2 + 0.0243W^2 - 3.2092 \times 10^{-3}H^2 + \\ & 8.2200 \times 10^{-4}w^2W - 4.0831 \times 10^{-3}wh^2 \quad (5) \end{aligned}$$

图 4 为响应面模型预测值与有限元模拟试验值的对比。从图 4 中可以发现试验值与预测值的相关性较高, 这说明式 (4)~式 (5) 能够准确地预测带交叉筋筒形零件热摆辗成形过程中响应变量的值。

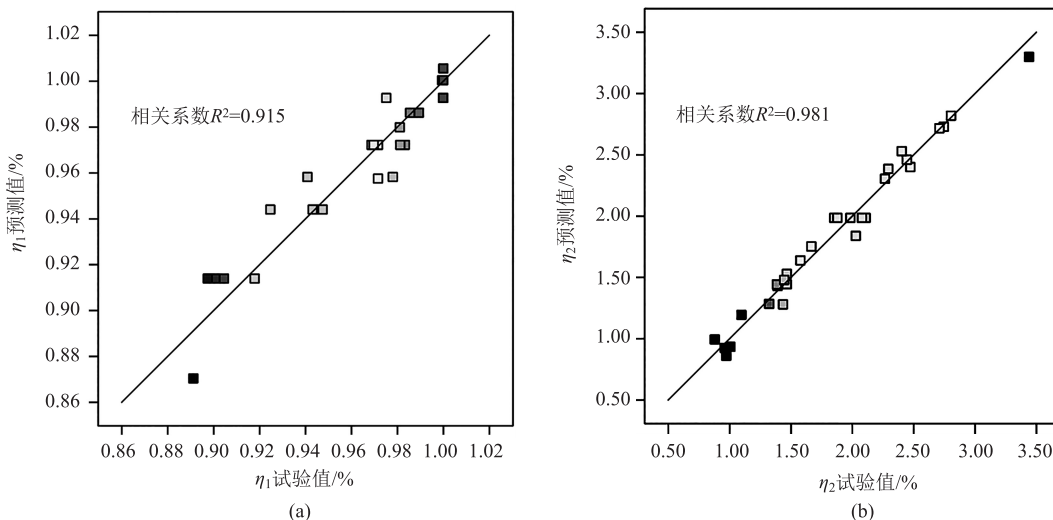


图 4 响应面模型预测值与有限元模拟试验值对比  
(a) 筋部充填质量 (b) 折叠率

Fig. 4 Comparison between predicted values of response surface model and experimental values of finite element simulation  
(a) Filling quality of ribs (b) Folding rate

为了直观地分析带交叉筋筒形零件热摆辗成形过程中设计变量对各响应变量的影响, 利用三维响应曲面图描述了部分设计变量与响应变量之间的关系, 响应曲面越陡峭, 说明设计变量对响应变量的影响程度越大, 响应曲面越平缓, 则说明设计变量

对响应变量的影响程度越小。图 5 为设计变量与筋部充填质量的三维响应曲面图, 从图 5a 可知, 矮筋高度和宽度对筋部充填质量的影响较小, 筋部充填质量最大值对应的矮筋高度和宽度分别为  $w = 6 \text{ mm}$ 、 $h = 24 \text{ mm}$  和  $w = 2 \text{ mm}$ 、 $h = 24 \text{ mm}$ ; 从图 5b 可知,

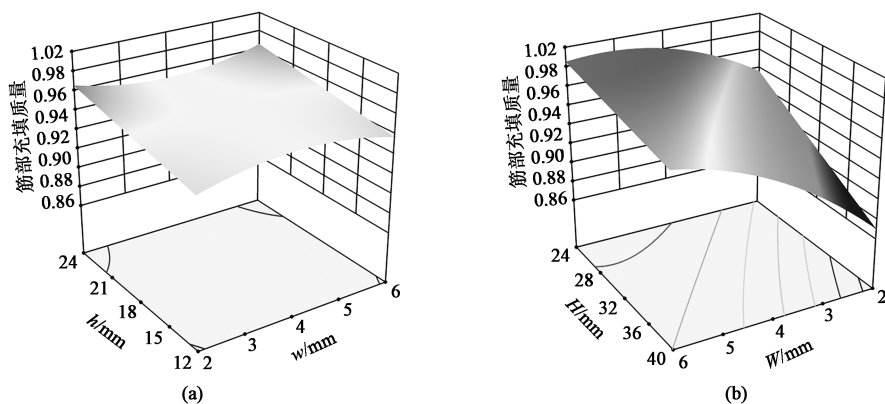


图5 筋部充填质量响应面图

(a) 筋部充填质量与矮筋宽度和矮筋高度的关系 (b) 筋部充填质量与高筋宽度和高筋高度的关系

Fig. 5 Response surface diagrams of filling quality for ribs

(a) Relationship between filling quality of ribs and width and height of short rib

(b) Relationship between filling quality of ribs and width and height of high rib

当高筋宽度较大, 即  $W=5\sim 6\text{ mm}$  时, 高筋高度在水平范围内对筋部充填质量的影响较小, 筋部的充填质量较好; 而当高筋宽度较小, 即  $W=2\sim 5\text{ mm}$  时, 随着高筋宽度的减小或高筋高度的增加, 筋部的充填质量显著下降, 筋部的充填质量最大值对应的高筋高度和宽度分别为  $W=6\text{ mm}$ 、 $H=24\text{ mm}$ 。图6为29组试验中不同筋结构零件的高筋高宽比对筋部充填质量及折叠率的影响关系图, 从图6可知, 当高筋高宽比小于6时, 筒形件的筋部基本充填完整, 筋部的充填质量较好, 且折叠率较小; 当高筋高宽比为6~8时, 筒形件筋部仅局部未充填完整, 折叠率有所增大; 随着高筋高宽比的增大, 筋部的充填质量逐渐下降, 折叠率增大, 零件的整体成形质量显著降低。图7为设计变量与折叠率的三维响应曲面图, 从图7a可知, 折叠率最小值对应的矮筋

高度和宽度为  $w=6\text{ mm}$ 、 $h=24\text{ mm}$ ; 从图7b可知, 高筋和矮筋的宽度对折叠率的影响较大, 随着宽度的增加, 折叠率逐渐减小, 折叠率最小值对应的高筋宽度  $W=6\text{ mm}$ ; 从图7c可知, 折叠率最小值对应的高筋高度  $H=24\text{ mm}$ 。

### 2.3 响应面模型预测与验证

由上述分析可知, 各设计变量对筋部充填质量和折叠率有不同的影响, 为了预测成形质量最佳的零件结构, 需要对各设计变量进行优化, 利用数学表达式将优化问题描述为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{优化变量: } w, h, W, H \\ \text{优化目标: } \begin{cases} \eta_{1\max} \\ \eta_{2\min} \end{cases} \\ \text{变量范围: } \begin{cases} 2\text{ mm} \leq w \leq 6\text{ mm} \\ 12\text{ mm} \leq h \leq 24\text{ mm} \\ 2\text{ mm} \leq W \leq 6\text{ mm} \\ 24\text{ mm} \leq H \leq 40\text{ mm} \end{cases} \end{array} \right. \quad (6)$$

式中:  $\eta_{1\max}$  为最大的筋部充填质量;  $\eta_{2\min}$  为最小的折叠率。

利用 Design-Expert 10 软件, 对式(6)所示的优化问题进行求解, 预测整体成形质量最优的零件结构为:  $w=6\text{ mm}$ 、 $h=24\text{ mm}$ 、 $W=6\text{ mm}$ 、 $H=24\text{ mm}$ , 即交叉筋的高度和宽度相同且筋部高宽比较小时, 带交叉筋筒形零件热摆辗成形的质量最好。为了验证预测模型的准确性, 对预测成形质量最优的交叉筋筒形件及交叉筋的几何参数与预测结构相近的筒形件分别建立了热摆辗有限元模型并进行模拟, 模拟成形结果如图8所示, 不同结构零件的响

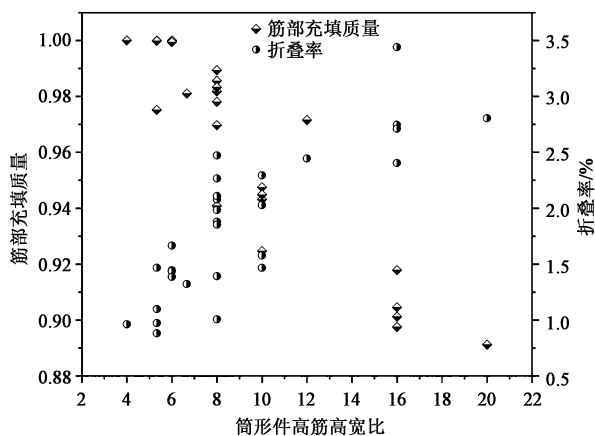


图6 高筋高宽比对筋部充填质量及折叠率的影响

Fig. 6 Effect of height-width ratio for high rib on filling quality and folding rate of rib

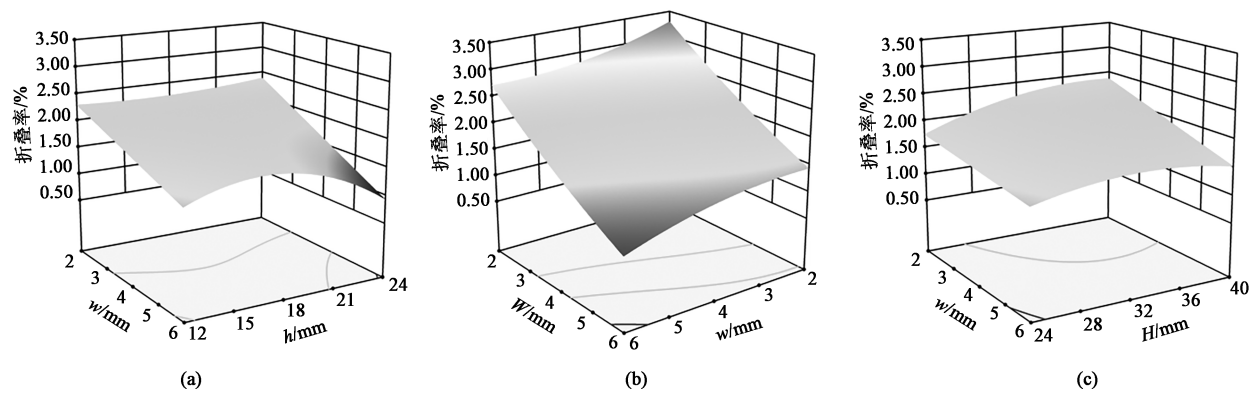


图 7 折叠率响应面图

(a) 折叠率与矮筋宽度和矮筋高度的关系 (b) 折叠率与矮筋宽度和高筋宽度的关系 (c) 折叠率与矮筋宽度和高筋高度的关系

Fig. 7 Response surface diagrams of folding rate

(a) Relationship between folding rate and width and height of short rib (b) Relationship between folding rate and width of short rib and width of high rib (c) Relationship between folding rate and width of short rib and height of high rib

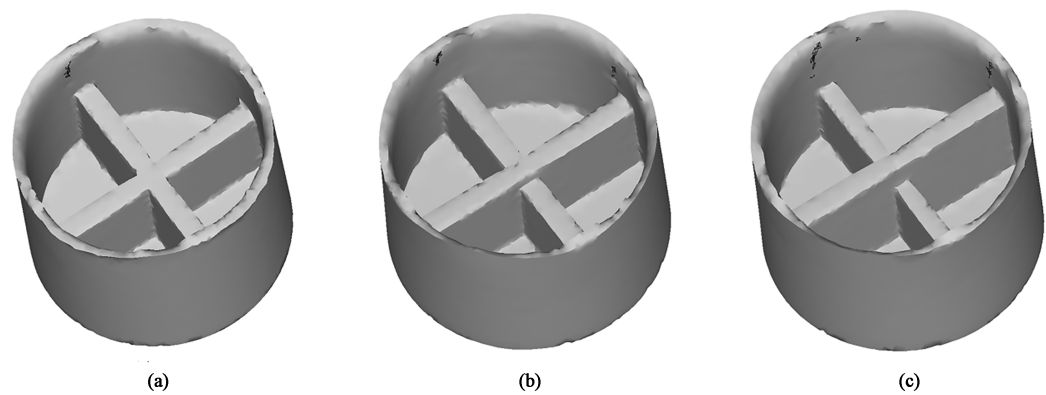


图 8 不同结构筒形件热摆辗成形结束时锻件示意图

(a)  $w=6\text{ mm}$ ,  $h=24\text{ mm}$ ,  $W=6\text{ mm}$ ,  $H=24\text{ mm}$  (b)  $w=6\text{ mm}$ ,  $h=21\text{ mm}$ ,  $W=6\text{ mm}$ ,  $H=24\text{ mm}$

(c)  $w=5\text{ mm}$ ,  $h=21\text{ mm}$ ,  $W=6\text{ mm}$ ,  $H=28\text{ mm}$

Fig. 8 Schematic diagrams of forgings at end of hot orbital forming for cylindrical parts with different structures

应面模型预测值与有限元模拟值对比如表 7 所示。

从表 7 可知, 响应面模型对筋部充填成形质量的预测值与模拟值吻合较好, 而折叠率的预测值与模拟值存在一定误差, 1 号~7 号方案对应筒形件的交叉筋几何参数相近, 筋部宽度较大而高度较小、高筋的高宽比均小于 6, 成形结束时筒形件的筋部均能充填完整。其中, 响应面法优化得到的带交叉筋筒形零件, 即 1 号方案对应的筒形件, 其折叠率小于其他对应的筒形件, 整体的成形质量最好, 其成形结果如图 8a 所示; 当交叉筋几何参数与预测结构相近, 即高筋与矮筋的高度、宽度不完全相同时, 如 2 号、3 号、5 号方案对应的筒形件, 成形结束时折叠率有所增加, 整体成形质量略微下降, 3 号方案对应的筒形件的成形结果如图 8b 所示; 当交叉筋

表 7 不同结构筒形件的响应面模型预测值与有限元模拟值对比

Table 7 Comparison between predicted values of response surface model and simulation values of finite element for cylindrical parts with different structures

序号	$w/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$W/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$\eta_1$ 预测值	$\eta_1$ 模拟值	$\eta_2$ 预测值/%	$\eta_2$ 模拟值/%
1	6	24	6	24	1.0106	1.0000	-0.0004	0.460
2	5	24	6	24	1.0082	1.0000	0.2699	0.557
3	6	21	6	24	1.0096	1.0000	0.5057	0.608
4	5	21	6	24	1.0075	1.0000	0.6289	0.873
5	6	24	6	28	1.0042	1.0000	0.1751	0.573
6	6	21	6	28	1.0032	1.0000	0.6813	0.799
7	5	21	6	28	1.0011	1.0000	0.8385	1.121



几何参数与预测结构差值增大时, 如4号、6号、7号方案对应的筒形件, 成形结束时折叠率更大, 整体的成形质量下降, 其成形质量较差, 7号方案对应的筒形件的成形结果如图8c所示。响应面模型预测值与有限元模拟值均显示通过响应面法预测得到的筋结构零件的成形质量优于其他筋结构零件, 即当 $w=6\text{ mm}$ 、 $h=24\text{ mm}$ 、 $W=6\text{ mm}$ 、 $H=24\text{ mm}$ 时, 零件的整体成形质量更好。

### 3 结论

(1) 筋部能否充填完整取决于高筋的宽度和高度, 先充填完整的矮筋对交叉筋中心处坯料的轴向流动的影响较小。当高筋的高宽比小于6时, 筋部的充填质量较好; 交叉内筋的宽度是影响折叠率的主要因素, 随着宽度的增加, 折叠率逐渐减小。

(2) 响应面法预测成形质量最优的交叉筋几何参数为:  $w=6\text{ mm}$ 、 $h=24\text{ mm}$ 、 $W=6\text{ mm}$ 、 $H=24\text{ mm}$ , 即对于筒形交叉内筋零件, 高宽比较小, 同时矮筋与高筋的高度和宽度趋于相同时, 整体的成形质量更好; 当交叉筋的尺寸相近时, 筒形件基本充填完整, 折叠率略微增多, 但变化较小, 成形质量仍较好; 而交叉筋的尺寸相差较大时, 受高筋与矮筋尺寸的综合影响, 筒形件产生充填不足缺陷, 且折叠率显著增加。

#### 参考文献:

- [1] 王自启, 杨艳, 张杰, 等. 铝合金精密锻造技术研究及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15): 18-21.  
Wang Z Q, Yang Y, Zhang J, et al. Research and development trend of precision forging technology for aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(15): 18-21.
- [2] 李飞, 孔振, 杨力祥, 等. 镁合金电子舱体浇注系统设计与快速熔模铸造[J]. 航天制造技术, 2018, (2): 6-10.  
Li F, Kong Z, Yang L X, et al. Rapid investment casting process for electronic cabin of magnesium alloy based on 3D printing technology [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2018, (2): 6-10.
- [3] 邵青, 何宇廷, 张腾, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接加筋板剪切稳定性研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 93-99.  
Shao Q, He Y T, Zhang T, et al. Study on stability performance of friction stir welded aluminum alloy stiffened panel under shear load [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 93-99.
- [4] 冯驰骋. 薄壁网格筋构件摆辗成形工艺与机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.  
Feng C C. Research on Technology and Mechanism of Rotary Forging for Components with Cross Ribs and Thin Webs [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [5] Zhuang W H, Han X H, Hua L, et al. Influences of key forging parameters on cold orbital forging of thin parts with high circular ribs [J]. Forming the Future, 2021, 1099-1105.
- [6] Han X H, Hua L, Peng L, et al. An innovative radial envelope forming method for manufacturing thin-walled cylindrical ring with inner web ribs [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 286: 116836.
- [7] 张侠, 成国发, 钱进浩. 汽车轮毂轴承单元摆辗铆接技术及有限元模拟分析[J]. 锻压技术, 2021, 46(5): 151-157.  
Zhang X, Cheng G F, Qian J H. Orbital riveting technology and finite element analysis of automotive hub bearing units [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(5): 151-157.
- [8] 刘俊英. 基于正交试验的车用螺母成形分析及模具磨损优化[J]. 锻压技术, 2020, 45(2): 182-187.  
Liu J Y. Forming analysis and mould wear optimization on nuts for vehicle based on orthogonal test [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(2): 182-187.
- [9] 高冲, 刘淑梅, 霍文军. 基于响应面法的铝合金连杆锻造工艺优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(11): 97-100.  
Gao C, Liu S M, Huo W J. Optimization of forging process for aluminum alloy connecting rods based on response surface method [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(11): 97-100.
- [10] Ali A N, Huang S J. Ductile fracture behavior of ECAP deformed AZ61 magnesium alloy based on response surface methodology and finite element simulation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 746: 197-210.
- [11] Chen S W, Zhan M, Gao P F, et al. A new robust theoretical prediction model for flange wrinkling in conventional spinning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 228: 1-12.
- [12] Balaji U, Pradhan S K. Titanium anodisation designed for surface colouration-systemisation of parametric interaction using response surface methodology [J]. Materials & Design, 2018, 139: 409-418.
- [13] Wei K, Zhan M, Fan X G, et al. Unequal-thickness billet optimization in transitional region during isothermal local loading forming of Ti-alloy rib-web component using response surface method [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 3(14): 845-859.
- [14] 王钊, 魏鑫, 黄瑶, 等. 基于响应面的汽车中立柱内板影响因素多目标优化[J]. 锻压技术, 2020, 45(7): 46-50.  
Wang Z, Wei X, Huang Y, et al. Multi-objective optimization on influencing factors for central pillar inner plate of automobile based on response surface [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(7): 46-50.
- [15] Guo L G, Dang L, Yang H, et al. Identification of processing window for extrusion of large thick-walled Inconel 625 alloy pipes using response surface methodology [J]. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1902-1911.
- [16] Zhu X L, Liu D Y, Yang Y H, et al. Optimization on cooperative feed strategy for radial-axial ring rolling process of Inco718 alloy by RSM and FEM [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(3): 831-842.
- [17] Chu Q, Li W Y, Yang X W, et al. Microstructure and mechanical optimization of probeless friction stir spot welded joint of an Al-Li alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(10): 1739-1746.
- [18] 张猛, 胡亚民. 摆辗技术[M]. 1版. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
Zhang M, Hu Y M. Orbital Forging Technology [M]. 1st Edition. Beijing: China Machine Press, 1998.