

特种成形

## 基于正交试验的单层实心球铰滚压成形工艺优化

王凯旋<sup>1</sup>, 王送来<sup>1</sup>, 曾先会<sup>2</sup>, 沈意平<sup>1</sup>, 吴启舟<sup>1</sup>, 王金辉<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 株洲时代瑞唯减振装备有限公司, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为研究单层实心球铰滚压成形工艺, 建立了球铰滚压成形三维有限元模型, 采用正交试验法对球铰滚压成形工艺参数进行分析, 获得了影响球铰加工压力、圆度的因素的主次顺序, 得到了不同滚压参数对球铰加工质量的影响规律。结果表明, 球铰滚压成形过程中, 影响球铰加工压力和球铰圆度的主要因素为进给量, 次要因素为滚轮转速和滚压时间。球铰滚压成形过程中应选取合适的滚轮转速和进给量, 在缩短滚压时间的同时, 保障加工质量、提高加工效率。适宜的工艺参数为: 滚轮转速为  $4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , 进给量为  $1 \text{ mm}$ , 滚压时间为  $15 \text{ s}$ 。研究为单层实心球铰滚压成形的工艺参数设计和滚压成形装备研发提供了理论支持和现实意义。

**关键词:** 单层实心球铰; 滚压成形; 成形质量; 加工压力; 圆度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.01.019

**中图分类号:** TG301

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 01-0148-08

## Optimization of roll forming process for single-layer solid spherical hinge based on orthogonal test

Wang Kaixuan<sup>1</sup>, Wang Songlai<sup>1</sup>, Zeng Xianhui<sup>2</sup>, Shen Yiping<sup>1</sup>, Wu Qizhou<sup>1</sup>, Wang Jinhui<sup>2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Zhuzhou Times Ruiwei Vibration Reduction Equipment Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** In order to study the roll forming of single-layer solid spherical hinges, its 3D finite element model was established. The process parameters of spherical hinge roll forming were analyzed by the orthogonal test method, the primary and secondary factors affecting the processing pressure and roundness of spherical hinge were obtained, and the influence laws of different roll forming parameters on the processing quality of spherical hinges were obtained. The results show that in the process of spherical hinge roll forming, the primary factor affecting the processing pressure and roundness of spherical hinge is the feeding amount, the secondary factors are the roller rotate speed and roll forming time. Thus, in order to ensure the processing quality and improve efficiency, appropriate roller rotate speed and feeding amount during spherical hinge roll forming process should be selected to shorten the roll forming time. The optimal process parameters are the roller rotate speed of  $4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , the feeding amount of  $1 \text{ mm}$ , and the roll forming time of  $15 \text{ s}$ . This research provides theoretical support and practical significance for the design of process parameters and the development of roll forming equipment for single-layer solid spherical hinges.

**Key words:** single-layer solid spherical hinge; roll forming; forming quality; processing pressure; roundness

单层实心球铰是车辆的重要部件, 用于传递牵引力和制动力, 可承受各向载荷和瞬时冲击, 广泛应用于轨道交通、机车和汽车等领域, 能够提高行驶的平稳性和安全性<sup>[1]</sup>。单层实心球铰具有优良的

减振和降噪性能, 可以提供各个方向上的旋转和移动, 适用于各种恶劣工况, 具有良好的耐磨性和耐久性。单层实心球铰在装配时通常采用挤压工序来确保球铰成形后处于受压状态。针对球铰的不同尺寸、预压量, 需设计制造不同的工装, 工装投入大; 挤压后, 球铰外径尺寸不稳定、外表面质量较差, 需再进行精加工, 成本较高。理论上, 滚压成形工艺可通过滚压力实现外轮廓矫形, 可以满足一套设备加工不同尺寸球铰, 便于控制球铰成形后的外径尺寸, 显著提高生产效率。但是, 单层实心球铰在滚压成形过程中受到工艺因素和设备的影响, 特别是滚轮转速、缩径尺寸和进给时间的参数设计问题

**收稿日期:** 2024-06-17; **修订日期:** 2024-09-26

**基金项目:** 湖南省重点研发计划项目 (2023GK2026); 湖南省自然科学基金资助项目 (2022JJ30260); 湖南省教育厅科学研究项目 (22C0256)

**作者简介:** 王凯旋 (1999-), 男, 硕士研究生

**E-mail:** 22010301010@mail.hnust.edu.cn

**通信作者:** 王送来 (1979-), 男, 博士, 副教授

**E-mail:** qingfeng0259@163.com

一直是一个难题。因此，研究单层实心球铰滚压成形过程中工艺参数对加工成形质量的影响，对于实现其高质量精确成形具有重要意义。

目前，国内外学者对滚压成形进行了大量研究。Darki Saeed 等<sup>[2]</sup>通过有限元软件仿真，研究了坯料转速、进给速度、模具几何参数对滚压成形质量的影响。王排岗等<sup>[3]</sup>通过单因素试验法分析了工艺参数对 42CrMo 钢滚压加工硬度的影响，确定了最优的工艺参数组合。李元辉等<sup>[4]</sup>采用有限元-光滑粒子流体动力学法（Finite Element-Smooth Particle Hydrodynamic，FEM-SPH）研究铝合金薄板含胶滚压成形工艺，确定了滚压成形质量与工艺参数的关系。Lu K L 等<sup>[5]</sup>研究了超合金复杂截面薄壁环件的多道次轧制成形，分析了其变形行为、应力、缺陷行为，并进行工艺优化。Cui Y 等<sup>[6]</sup>研究了变壁厚合金特种板件的滚压成形工艺参数优化，采用洛伦兹曲线和基尼系数优化变形程度，该方法有效提高了变形均匀性和微观结构控制。肖大志等<sup>[7]</sup>通过有限元模拟及成形试验分析了薄壁环形零件滚压成形的力学特征、主要成形缺陷和成形极限。李留柱等<sup>[8]</sup>分析了滚压成形过程中薄壁环件壁厚沿周向、轴向的变化情况，以及工艺参数对环件壁厚变化的影响规律。

综上，现有针对滚压成形的研究多集中于板状<sup>[4]</sup>和环状<sup>[7-8]</sup>等薄壁零件方面，少了对单层实心球铰滚压成形方面的探讨。此外，对于单层实心球铰的研究多以球铰疲劳寿命分析<sup>[9]</sup>、球铰力学优化<sup>[10-13]</sup>、球铰橡胶性能<sup>[14-15]</sup>和球铰加工<sup>[16-17]</sup>等方面出发，故已有研究未能解决单层实心球铰滚压成形的参数设计问题。

鉴于此，通过对球铰滚压成形过程的仿真，研究滚轮转速、进给量、滚压时间这 3 个工艺参数对滚压过程中所需的加工压力以及滚压后球铰圆度的影响。本文的研究意义在于以下 3 点：（1）在理论层面上补充了单层实心球铰滚压成形过程中工艺参数与加工成形质量关系的研究；（2）为改善单层实心球铰的加工质量提供了理论基础；（3）为减少单层实心球铰加工生产成本提供试验依据。研究为单层实心球铰滚压成形工艺参数设计和滚压成形装备研发提供了理论支持和现实意义。

## 1 球铰结构与有限元模型

### 1.1 球铰结构与材料

研究对象为单层实心球铰，通常由芯轴、橡胶球和外套构成，其结构如图 1 所示。橡胶球部分通常由高弹性的橡胶材料制成，具有良好的抗压性和

耐磨性，能够承受机械运动时的压力和冲击。芯轴则用于固定橡胶球在机械结构中的位置，并提供连接点以便于装配。外套常用外径为  $\Phi 80 \sim \Phi 130$  mm，挤压力（直径）为  $\Phi 1.6 \sim \Phi 4.0$  mm，尺寸公差小于 0.05 mm。材料参数如表 1 所示。

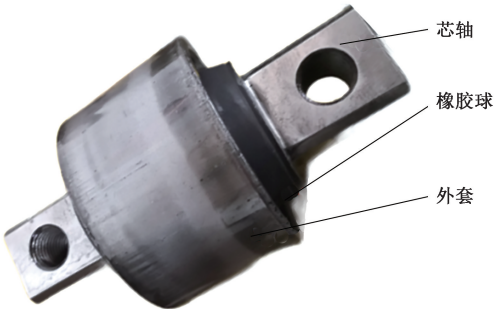


图 1 单层实心球铰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-layer solid spherical hinge

表 1 单层实心球铰材料参数

Table 1 Material parameters of single-layer solid spherical hinge

零部件名称	常用材料
芯轴	40Cr 钢、42CrMo 钢、Q345 钢
橡胶球	天然橡胶
外套	20 钢、45 钢、Q345 钢等

### 1.2 仿真模型的建立

球铰组装完成后整体进行滚压成形加工，本文使用 ABAQUS 有限元分析软件仿真模拟单层实心球铰的滚压成形过程。由于此实心球铰内外层之间为天然橡胶<sup>[14]</sup>，其弹性相比于内外层金属要大得多，外套形变后与天然橡胶产生挤压，但不会使芯轴发生形变。所以在建立有限元仿真模型时可以将上述球铰简化为一个外套金属筒，如图 2 所示。外套坯料的几何尺寸为  $\Phi 103$  mm $\times$ 60 mm，材料为 20 钢，抗拉强度  $R_m$  为 410 MPa，屈服强度  $R_{eL}$  为 245 MPa，弹性模量  $E$  为 213 GPa，泊松比  $\nu$  为 0.3。

基于 ABAQUS/Explicit 平台建立的滚压成形有限元模型如图 3 所示。模型由 1 号驱动滚轮、2 号限位滚轮、3 号限位滚轮和外套金属筒组成。其中外套金属筒设置为变形体，并对其赋予材料属性，其余部件均设置为解析刚体，同时采用壳体单元进行简化处理，以提高模拟计算效率。与外套金属筒接触部分均设置摩擦，摩擦因数均设为 0.2。滚压成形过程中，1 号驱动滚轮设置“位移/角速度”边界条件，2 号限位滚轮、3 号限位滚轮设置“角速度”边界条件，外套金属筒依靠与驱动滚轮和限位滚轮间的摩擦力转动。变形体网格采用八节点六面体线性缩减积分单元（C3D8R）<sup>[8]</sup>，单元总数为 24320 个。

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

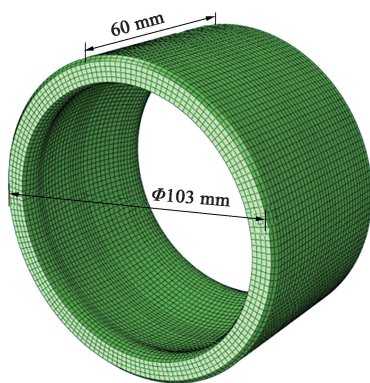


图 2 球铰简化模型

Fig. 2 Simplified model of spherical hinge

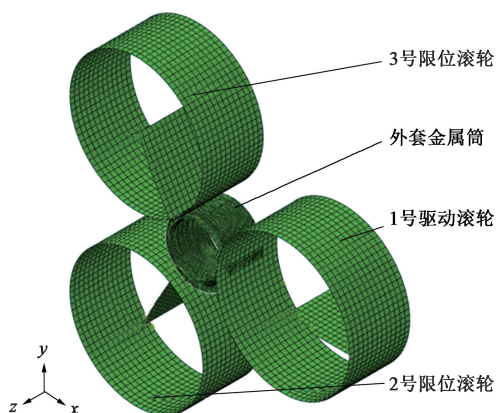


图 3 滚压成形的有限元仿真模型

Fig. 3 Finite element simulation model for roll forming

### 1.3 模型准确性验证

当滚轮进给速度大于  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 球铰短时间内变形大, 呈椭圆状; 当滚轮进给速度小于

$0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 滚压用时 20 s, 球铰变形小, 呈圆形, 仿真结果如图 4 所示。

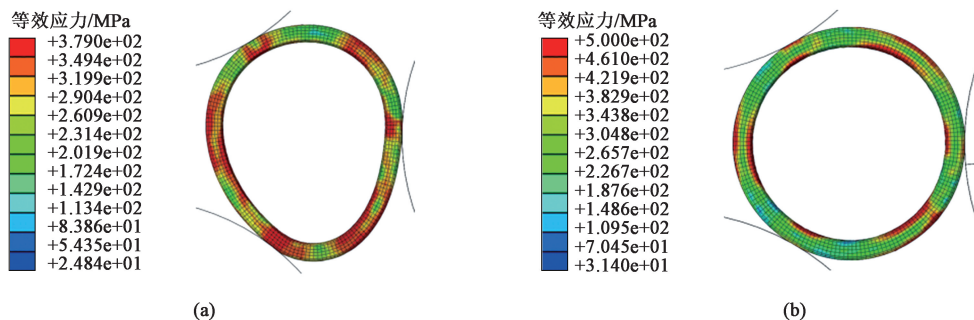


图 4 不同滚轮进给速度下的球铰的仿真结果

(a)  $> 0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (b)  $< 0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 4 Simulation results of spherical hinge under different roller feeding speeds

现场试验有两种结果, 如图 5 所示。图 5a 所示的球铰形变严重, 这是由于滚压成形时的进给速度较大, 变形速度快, 短时间内产生大变形; 图 5b 所示的球铰略微变形, 直径缩小不明显, 这是由于滚压成形时的进给速度较小, 材料未发生明显形变。

对比球铰滚压仿真结果 (图 4) 和滚压试验的

轮廓 (图 5), 可以看出, 滚压成形结束后, 试验与仿真的圆形密封结构外轮廓与截面形状基本一致, 两者结果吻合良好, 验证了仿真模型的准确性。

## 2 正交试验设计

为了考虑各个因素之间的相互作用, 全面评估



图 5 球铰的试验现场图

(a) 形变严重 (b) 略微变形

Fig. 5 Test site diagrams of spherical hinges

(a) Severe deformation (b) Slight deformation



各个因素对结果的影响，找到最优的参数，在满足球铰变形较小的条件下，采用正交试验探究滚轮转速、进给量和滚压时间对滚压过程中球铰加工压力、滚压后球铰圆度的影响。

(1) 滚轮转速

滚轮自身旋转带动外套金属筒旋转，使外套金属筒逐渐产生形变，最终达到压缩外套金属筒直径的效果。本研究共设置 3 种不同的滚轮转速来探究滚轮转速对滚压成形后产品质量的影响。转速分别为： $\omega_1 = 3.0910 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\omega_2 = 4.0202 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\omega_3 = 4.9293 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 进给量

驱动滚轮沿  $x$  轴负方向的位移为驱动滚轮的进给量，进给量的不同既会影响产品加工效率，又会影响到产品的表面质量。本研究共设置 3 种不同的进给量，分别为： $X_1 = 1 \text{ mm}$ 、 $X_2 = 2 \text{ mm}$ 、 $X_3 = 3 \text{ mm}$ 。

(3) 滚压时间

在外套金属筒直径与压缩量一定的情况下，滚压时间越短，生产效率越高。为确保滚轮进给速度不超过  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，本研究共设置 3 种不同的滚压

时间，分别为： $t_1 = 10 \text{ s}$ 、 $t_2 = 15 \text{ s}$ 、 $t_3 = 20 \text{ s}$ 。

根据正交试验设计方法<sup>[4]</sup>，开展了如表 2 所示的 9 组试验。

表 2 正交试验设计

Table 2 Orthogonal test design			
试验号	滚轮转速/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	进给量/mm	滚压时间/s
No. 1	3.0910	1	10
No. 2	4.0202	1	15
No. 3	4.9293	1	20
No. 4	3.0910	2	10
No. 5	4.0202	2	15
No. 6	4.9293	2	20
No. 7	3.0910	3	10
No. 8	4.0202	3	15
No. 9	4.9293	3	20

3 结果与分析

3.1 正交试验数据结果处理

通过对以上 9 组试验进行有限元仿真，得到的加工压力云图如图 6 所示。

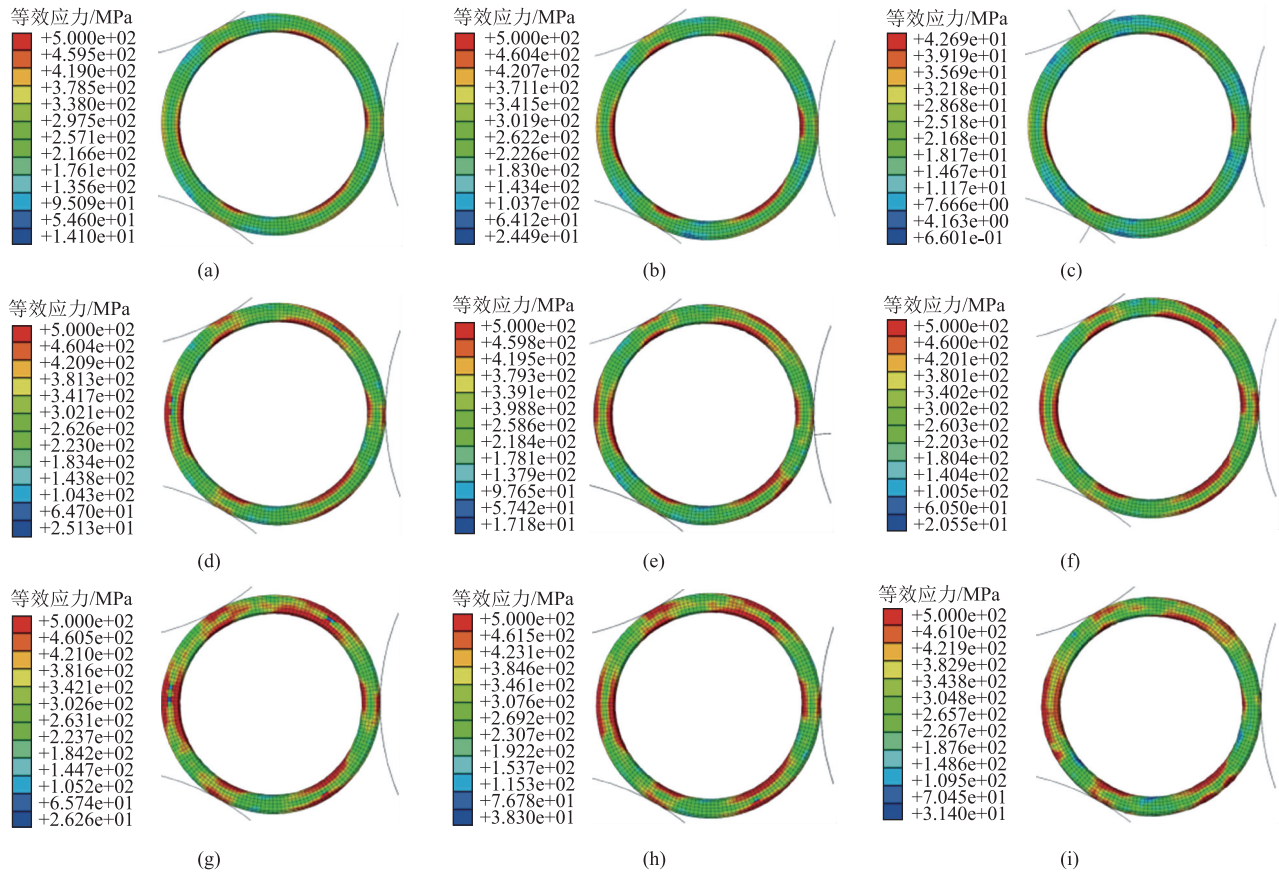


图 6 各组试验球铰滚压成形的加工压力云图

(a) No. 1 (b) No. 2 (c) No. 3 (d) No. 4 (e) No. 5 (f) No. 6 (g) No. 7 (h) No. 8 (i) No. 9

Fig. 6 Processing pressure nephograms of spherical hinges roll forming for each group of test

提取 1 号驱动滚轮在  $x$  轴方向的表面正压力, 使用 Matlab 软件对压力曲线进行拟合得到一条光滑

的曲线, 得到的曲线的最高点即为滚压工艺过程中的最大加工压力, 如图 7 所示。

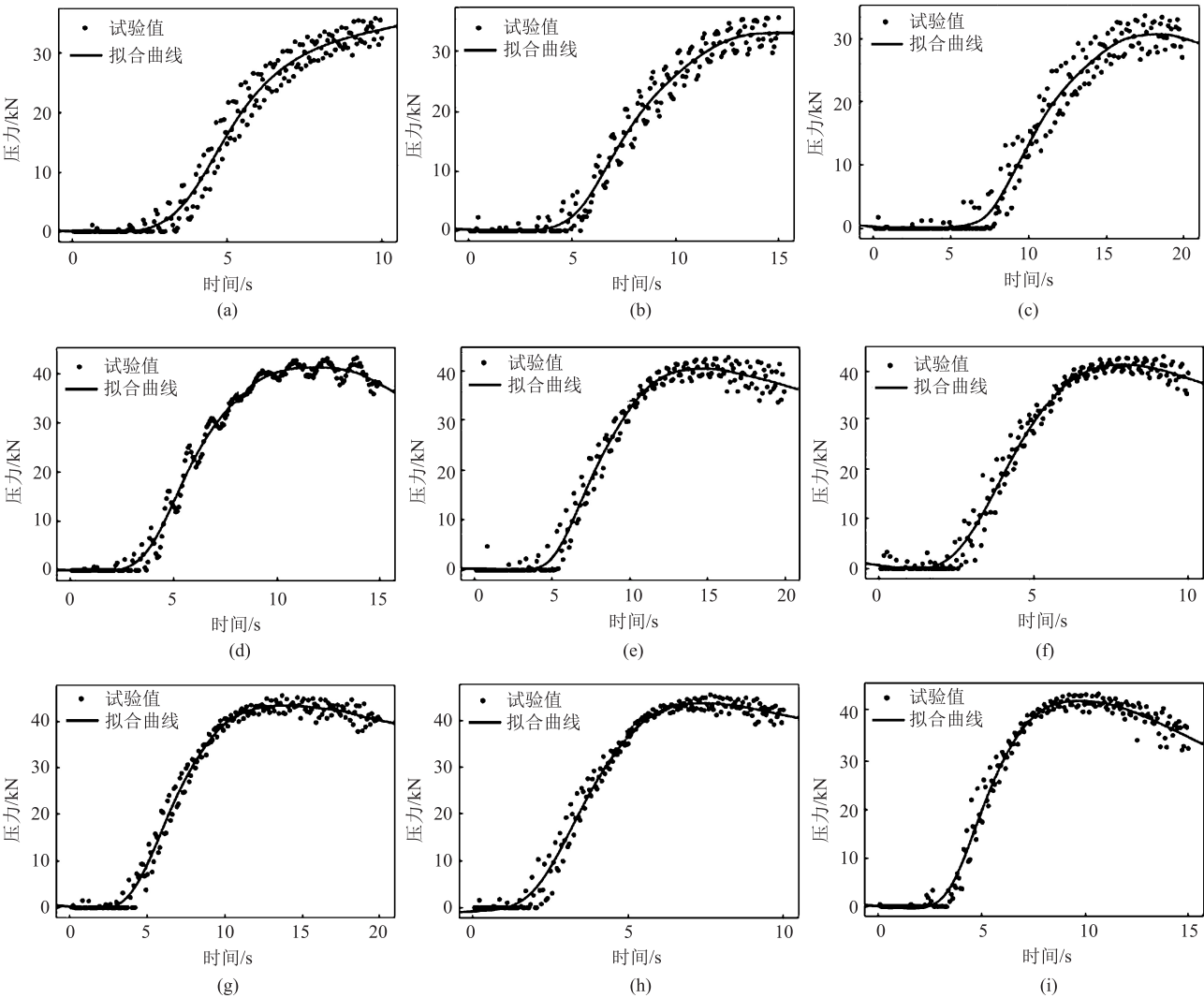


图 7 各组试验中 1 号驱动滚轮的表面正压力  
(a) No. 1 (b) No. 2 (c) No. 3 (d) No. 4 (e) No. 5 (f) No. 6 (g) No. 7 (h) No. 8 (i) No. 9

Fig. 7 Positive pressures on surface of drive roller 1 for each group of test

取竖直方向 ( $y$  轴) 为  $0^\circ$ , 每隔  $30^\circ$  测量滚压成形后的球铰直径, 然后统计出球铰的最大直径和最小直径。根据圆度 = (最大直径 - 最小直径) / 最大直径, 求出 9 组试验下的球铰圆度 (表 3)。

为了确定哪个因素对最大加工压力和圆度的影响最为显著, 使用 3 因素方差分析 (Analysis of Variance, ANOVA) 研究滚轮转速、进给量和滚压时间这 3 个因素对最大加工压力和圆度的影响。分析结果如表 4 所示, 其中,  $p < 0.05$  即呈现出显著性, “\*” 表示  $p < 0.01$  (非常显著), “\*” 表示  $p < 0.05$  (显著)。

3.2 工艺参数对最大加工压力的影响规律

通过对比表 4 最大加工压力各因素显著性  $p$  值

表 3 球铰的最大加工压力和圆度统计结果

Table 3 Statistical results of maximum processing pressure and roundness for spherical hinges

试验号	最大加工压力/kN	圆度/( $\times 10^{-3}$ )
No. 1	33.42	0.79
No. 2	33.65	1.12
No. 3	30.95	0.84
No. 4	41.25	1.82
No. 5	40.35	3.60
No. 6	40.79	1.64
No. 7	43.21	8.71
No. 8	43.58	3.87
No. 9	42.21	12.06

表 4 3 种因素的方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of three factors

参数		滚轮转速	进给量	滚压时间
最大加工压力	$F$ 统计量	0.053	90.385	0.053
	$p$ 值	0.949	0.000**	0.949
圆度	$F$ 统计量	0.148	7.405	0.148
	$p$ 值	0.866	0.024*	0.866

可知，影响单层实心球铰滚压成形最大加工压力

最主要的因素为进给量。各因素对单层实心球铰滚压成形最大加工压力的影响效应关系图如图 8 所示。

(1) 滚轮转速：由图 8a 可知，随着滚轮转速的增加，球铰加工时的最大加工压力减小。这是由于高转速导致球铰外套的变形性增加，材料的流动性<sup>[7]</sup>增加，在较低的加工压力下也能实现相同的形变，因此，不需要施加过大的加工压力。滚轮转速优选  $4.8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

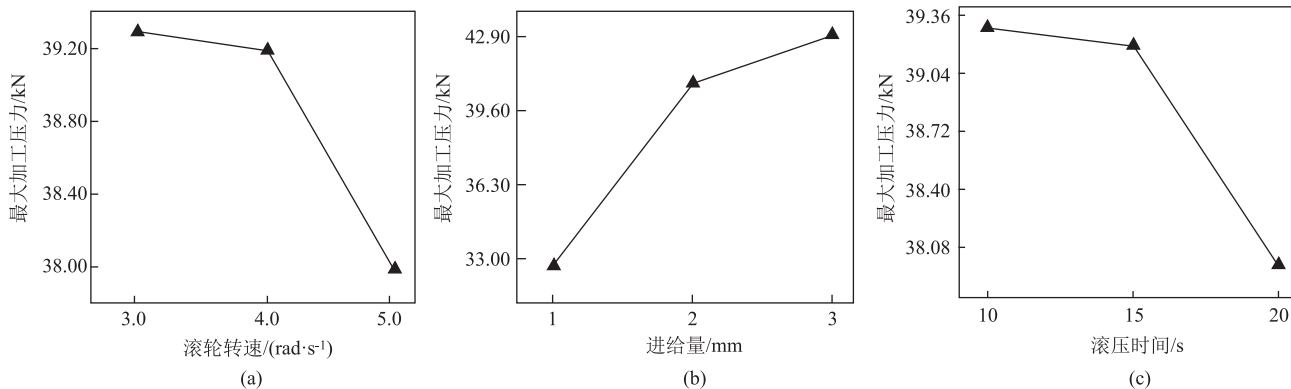


图 8 各因素对最大加工压力的影响规律

(a) 滚轮转速 (b) 进给量 (c) 滚压时间

Fig. 8 Influence laws of various factor on maximum machining pressure

(a) Roller rotate speed (b) Feeding amount (c) Roll forming time

(2) 进给量：由图 8b 可知，随着进给量的增加，球铰最大加工压力增加。原因是当压缩量增加时，工件加工需要更大的形变，随着形变的增加，材料的流动性会变差，使得在相同形变条件下需要施加更大的压力来实现形状变化。并且随着形变量的增加，工件的硬度增加，为了实现相同的形变，需要施加更大的压力。进给量优选 1 mm。

(3) 滚压时间：由图 8c 可知，随着滚压时间的增加，球铰的最大加工压力减小。其原因是随着滚压时间的增加，工件材料经历的形变量逐渐减小，并会逐渐适应滚轮的形状，因此需要施加的压力会逐渐减小。滚压时间优选 20 s。

### 3.3 工艺参数对圆度的影响规律

通过对比表 4 圆度各因素显著性  $p$  值可知，影响单层实心球铰滚压成形圆度最主要的因素为进给量。各因素对单层实心球铰滚压成形圆度的影响效应关系图如图 9 所示。

(1) 滚轮转速：由图 9a 可知，随着滚轮转速的增加，球铰圆度先减小后增大。这是由于随着滚轮转速的增加，工件表面材料的软化，从而改善了球铰的圆度。然而，当滚轮转速继续增加时，会

导致材料流动性过度增加，造成球铰形状不稳定。因此，加工过程中应对滚轮转速、加工压力等参数进行适当控制和调整，以确保最终产品达到所需的圆度要求。滚轮转速优选  $4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 进给量：由图 9b 可知，随着进给量的增加，球铰圆度增大。这是由于当进给量增加时，滚轮进给速度也会增加，过快的加工速度会导致加工过程集中于局部区域，造成工件表面的过度变形，从而影响了球铰的圆度。因此需要合理控制进给量，确保加工过程中的速度、压力和形变均匀。进给量优选 1 mm。

(3) 滚压时间：由图 9c 可知，随着滚压时间的增加，球铰圆度先减小后增大。其原因是在加工初期阶段，由于材料的塑性变形以及加工压力的作用，球铰的圆度减小。随着滚压时间的增加，球铰的形状过度修正，导致圆度增加。滚压时间优选 15 s。

所以，为了保证球铰滚压成形的加工质量，结合滚压成形因素对加工过程中最大加工压力和圆度的影响，适宜的工艺参数为：滚轮转速为  $4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ，进给量为 1 mm，滚压时间为 15 s。

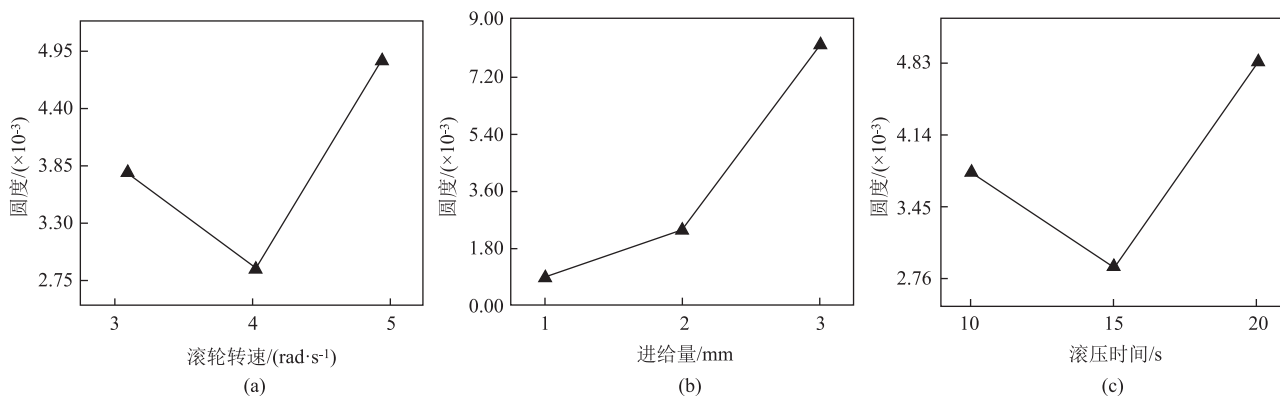


图 9 各因素对圆度的影响规律

(a) 滚轮转速 (b) 进给量 (c) 滚压时间

Fig. 9 Influence laws of various factor on roundness

(a) Roller rotate speed (b) Feeding amount (c) Roll forming time

## 4 结论

(1) 球铰滚压成形过程中, 影响球铰圆度的最主要因素为进给量。进给量增加, 球铰的圆度增大, 球铰滚压成形质量难以保证。

(2) 针对单层实心球铰不同的加工要求, 需在加工时选取合适的加工压力, 缩短加工时间, 提高球铰滚压成形加工效率, 获得较高的产品加工质量。

(3) 球铰滚压成形在满足圆度的加工要求下, 选取合适的滚轮转速和进给量, 以及较短的滚压时间, 可以保障加工质量, 同时提高加工效率。适宜的工艺参数为: 滚轮转速为  $4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , 进给量为  $1 \text{ mm}$ , 滚压时间为  $15 \text{ s}$ 。

### 参考文献:

[1] 刘旺欢. 金属橡胶球铰结构的优化设计与疲劳寿命分析 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.  
Liu W H. Optimization Design and Fatigue Life Analysis of Rubber-metal Spherical Hinge Structure [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.

[2] Darki S, Raskatov E Y. Analysis of the hot radial forging process according to the finite element method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110 (3-4): 1061-1070.

[3] 王排岗, 王晓强, 王浩杰, 等. 42CrMo 钢超声滚挤压表面硬度有限元分析及参数优化 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (3): 152-158.  
Wang P G, Wang X Q, Wang H J, et al. Finite element analysis and parameter optimization on surface hardness of ultrasonic rolling for 42CrMo steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48

(3): 152-158.

[4] 李元辉, 李建军, 王顺超, 等. 铝合金薄板含胶滚压成形工艺建模及实验 [J]. 上海交通大学学报, 2022, 56 (4): 532-542.  
Li Y H, Li J J, Wang S C, et al. Modeling and experiment on roll-hemming forming process of aluminum alloy sheet with adhesive [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56 (4): 532-542.

[5] Lu K L, Zhao G Y, Guo Z H, et al. Review on multi-pass rolling forming of thin-walled ring with complex section [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2706 (1): 12-33.

[6] Cui Y, Xu W L, Yu J M, et al. Multi-objective optimization strategy for plastic forming parameters of variable wall thickness special-shaped plate members [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44 (7): 273-284.

[7] 肖大志, 樊泽兴, 杨成林. 薄壁环形零件滚压成形研究 [J]. 材料科学与工艺, 2006 (1): 75-77.  
Xiao D Z, Fan Z X, Yang C L. Research on roll forming of annular thin-walled parts [J]. Materials Science & Technology, 2006 (1): 75-77.

[8] 李留柱, 李智军, 李宏伟, 等. 高温合金薄壁 W 截面密封环滚压成形壁厚变化研究 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (5): 43-49.  
Li L Z, Li Z J, Li H W, et al. Wall thickness variation of a super-alloy thin-walled W-section seal ring during roll forming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11 (5): 43-49.

[9] 葛琪, 黄友剑, 邓娇, 等. 有限元仿真在高速动车组橡胶牵引球铰结构优化中的应用 [J]. 特种橡胶制品, 2021, 42 (4): 43-48.  
Ge Q, Huang Y J, Deng J, et al. Application of FEA simulation to structural optimization of traction bushing used for high-speed EMU [J]. Special Purpose Rubber Products, 2021, 42 (4): 43-48.



- [10] 刘化民, 杨舒涵, 李义, 等. 推力杆球铰仿生表面改进及有限元分析 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 54 (9): 2733-2740.
- Liu H M, Yang S H, Li Y, et al. Thrust rod ball hinge bionic surface improvement and finite element analysis [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 54 (9): 2733-2740.
- [11] 康蔚. 运用载荷作用下转向架橡胶球铰力学分析及疲劳优化 [D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- Kang W. Mechanical Analysis and Fatigue Optimization of Bogie Rubber Ball Hinge Under Operation Load [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [12] 荣继刚, 黄友剑, 唐先贺, 等. 预压量对橡胶球铰综合性能的影响 [J]. 特种橡胶制品, 2006 (2): 36-39.
- Rong J G, Huang Y J, Tang X H, et al. Effect of preload on comprehensive properties of rubber ball joints [J]. Special Purpose Rubber Products, 2006 (2): 36-39.
- [13] 陈悦. 橡胶球铰参数化有限元法优化设计研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.
- Chen Y. Research on Optimization of Rubber Bushing with Parametric Finite Element Method [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2018.
- [14] Kar K K, Sharma S D, Kumar P, et al. Analysis of rubber pressure molding technique to fabricate fiber reinforced plastic components [J]. Polymer Composites, 2007, 28 (5): 637-649.
- [15] Le T H, Chan T, Kurokawa Y, et al. Numerical simulation of deformation-induced temperature variations of a rubber ball under cyclic compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 248: 111664.
- [16] 夏红勇. 牵引电机弹性球铰压装工艺 [J]. 电机技术, 2017 (3): 63-65.
- Xia H Y. Technology of pressing assembly of the elastic ball-hinge of traction motors [J]. Electrical Machinery Technology, 2017 (3): 63-65.
- [17] 刘建林, 罗承俊, 廖勇, 等. 基于 Abaqus 的某球铰翻边工艺仿真 [J]. 科学技术创新, 2021 (12): 13-14.
- Liu J L, Luo C J, Liao Y, et al. Simulation of a certain ball joint flanging process based on Abaqus [J]. Science and Technology Innovation, 2021 (12): 13-14.

## (上接第121页)

● 照片或灰度图反差适当, 鲜明可见; 金相照片放大倍数均用比例尺表示, 如  $5\mu\text{m}$ 。

● 双栏排图片的宽度应控制在 7.8 cm 左右; 通栏排图片宽度应控制在 16 cm 左右。

● 表格使用三线表, 必要时可加横线, 但一般不得有竖线; 表格的宽度最好设计成 25 个汉字 (相当于 48 个字符) 以内; 表中所有文字一律左齐。

● 公式后应当注明公式中各符号的含义。

● 计量单位一律采用法定计量单位 (国际单位制)。

● 参考文献应按其在正文中被引用的顺序依次列出 (在正文中引用处务必用“[序号]”标注); 列出的参考文献应是重要的、近期的、已正式发表的文献资料, 每篇论文应列出 12 篇以上参考文献; 作者不多于 3 个的姓名全部写出, 多于 3 个的, 余者用“等 (, et al)”表示; 无论中外署名, 一律姓 (首字大写) 先后 (例如: Zhang Y H)。

原文为非英文的参考文献, 需要同时用英文著录。

格式如下:

[1] 期刊 文章作者. 论文题目 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 起页码-终页码。

[2] 专著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 版本. 出版地: 出版社, 出版年。

[3] 译著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 译者, 译. 版本. 出版地: 出版社, 出版年。

[4] 论文集 论文作者. 论文题目 [A]. 论文集编者. 论文集名 (英文实词首字大写) [C]. 出版地: 出版者, 出版年。

[5] 技术报告 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [R]. 地名: 责任单位, 出版年。

[6] 学位论文 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [D].

所在城市: 保存单位, 年份。

[7] 专利文献 专利申请者或所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 公告日期或公开日期 (如, 2008-02-03)。

[8] 技术标准 标准号, 标准名称 [S].

[9] 在线文献 作者. 论文题目 [EB/OL]. 获取和访问路径: http://..., 发表或更新日期 (如, 2008-02-03)。

[10] 光盘文献 (数据库) 作者. 论文题目 [DB/CD]. 出版地: 出版者, 出版年。

原文为非英文的参考文献著录举例:

[1] 王博, 张凯锋, 赖小明, 等.  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$  复合材料板材脉冲电流辅助拉深成形 [J]. 锻压技术, 2012, 37 (5): 22-26.

Wang B, Zhang K F, Lai X M, et al. Pulse current auxiliary deep drawing of  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$  composites sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37 (5): 22-26.

## 3 投稿方式及要求

(1) 请通过本刊网站的“作者投稿”系统投稿。

(2) 来稿文责自负, 请勿抄袭他人论文, 请勿一稿多投。对抄袭者和一稿多投者, 一经发现, 本刊将无条件退稿, 并作不良作者记录; 同时, 本刊将保留追索抄袭者浪费本刊资源和其他纷争的权利。

(3) 编辑部对来稿拥有修改权, 遇重大删改时将与作者协商; 排版后的清样将通过 E-mail 发给作者进行核对。

## 4 编辑部联系方式

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部

邮编: 100083 电话: 010-62920652, 010-82415085

E-mail: fst@263.net

网址: http://www.fstjournal.net/

《锻压技术》编辑部