

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2022.1122

GH4169 高温合金锥形机匣旋压轮廓精度控制与研究

张 君¹, 丁 玲^{2,3}, 李立波¹, 徐海洁^{2,3}, 沈威威¹, 高贤深^{2,3}, 束学道^{2,3*}, 孙宝寿^{2,3}

(1.健康智慧厨房浙江省工程研究中心, 浙江 宁波 315204; 2.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

3.宁波大学 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 零件轮廓精度是旋压件成形质量评判标准之一. 在 Simufact 有限元软件中进行 GH4169 高温合金锥形机匣的普通旋压仿真试验, 观察到影响旋压件轮廓精度的常见缺陷: 底部隆起、底部减薄、回弹. 通过对照法对底部隆起进行顶端块控制. 采用单因素试验法探究成形过程中主要工艺参数(旋轮进给比、芯模转速、道次间距)对底部减薄和工件回弹量的影响规律, 以最大底部减薄量和平均回弹角度为评价指标. 结果表明: 进给比对底部减薄影响最大, 道次间距对回弹影响最大. 综合对底部减薄和回弹的控制, 针对试验件工艺参数应选择较大道次间距 $p=20\text{ mm}$, 较小旋轮进给比 $f=0.8\text{ mm}\cdot\text{r}^{-1}$ 或较大旋轮进给比 $f=1.6\text{ mm}\cdot\text{r}^{-1}$, 较大的芯模转速 $n=500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.

关键词: 高温合金; 锥形机匣; 旋压; 轮廓精度; 缺陷控制

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 04-0019-06

旋压作为一种连续局部塑性成形的加工工艺方法, 具有成形力小、成形精度高、模具设备简单、材料利用率高的综合优点^[1]. 近年来, 随着制造业的快速发展, 对于旋压零件的缺陷控制和质量提出了更高的要求. 但是在旋压成形过程中, 由于材料难变形、加工硬化严重和弹塑性变形等因素的存在, 导致零件产生起皱、破裂、壁厚不均匀、底部隆起、底部减薄和回弹角度大等缺陷, 难以满足对旋压零件高精度质量的要求^[2-3]. 因此, 研究旋压成形过程中的缺陷控制和工艺参数探究对旋压件成形质量的影响规律尤为重要.

目前, 国内外不少学者对旋压成形过程缺陷产生的控制和优化展开了一系列研究. 仲昕岳等^[4]分析了旋压过程中常见缺陷的产生机理, 提出选取合理的工艺参数和采取卷边等工艺处理进行优化, 最后总结了实际操作中起皱、破裂等缺陷控制方法. 樊文欣等^[5]采用单因素方法, 获得了强力旋压下工艺参数对旋压件回弹量的轴向分布, 提出选择较小减薄率和适中进给比来控制回弹对旋压

件成形质量的影响. 杨锋等^[6]基于 Vague 集正交试验来分析工艺参数对旋压件成形质量的影响规律. 凌泽宇^[7]基于有限元模拟和旋压试验对 Haynes230 镍基合金锥筒形件拉深旋压变形规律、典型缺陷控制及失稳起皱判据进行了系统研究. 束学道等^[8]分析了不同进给比对回弹偏转角的影响, 拟合得到回弹模型表达式, 并对回弹角进行补偿. Shu 等^[9]也研究了旋压成形过程中金属流动规律和工艺参数对成形载荷的影响.

上述研究对提高旋压件的成形质量和缺陷控制在理论层面和实际生产中均起到了一定的促进作用, 但多集中于壁厚不均匀、回弹角度大等缺陷的研究, 并且对旋压件轮廓精度产生影响的底部隆起、底部减薄鲜有研究. 因此, 本文以 GH4169 高温合金锥形机匣作为研究对象, 针对旋压过程中产生的明显缺陷(底部隆起、底部减薄和回弹角度大)进行成形机理分析, 并以底部最大的减薄量和回弹角度为评价指标, 探究工艺参数对机匣成形质量的影响规律, 为提高机匣的轮廓精度和服

收稿日期: 2022-11-21.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51975301); 宁波市“科技创新 2025”重大专项(2022Z002).

第一作者: 张君(1983-), 男, 浙江嘉兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 材料成形. E-mail: zhangjund@fotile.com

*通信作者: 束学道(1968-), 男, 安徽舒城人, 教授, 主要研究方向: 塑性加工工艺与设备. E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

役寿命提供生产理论技术支持。

1 有限元建模

在 Solidworks 软件中建立装配模型, 并将其 stl 格式导入到 Simufact 有限元软件中, 建立 GH4169 高温合金锥形机匣旋压仿真模型, 如图 1 所示, 包括尾顶块、坯料、芯模、旋轮 1 和旋轮 2。其中, 坯料选为可变实体, 尾顶块、芯模和旋轮选用解析刚体, 坯料与尾顶块和芯模间设置为黏结状态。圆形坯料尺寸为直径 250 mm, 厚度 2.5 mm。

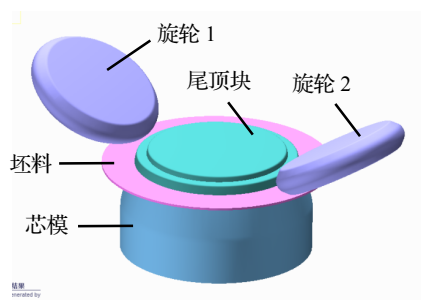


图 1 锥形机匣旋压模型

坯料材料选取 GH4169 高温镍基合金, 采用 J-C 本构模型, 其本构方程如下^[10]:

$$\sigma_e = (650 + 809.16 \varepsilon_e^{0.2754}) (1 + (-0.0667 + 6.35 \times 10^{-6} \dot{\varepsilon}_p) \ln \dot{\varepsilon}_e^*) (1 - T^{*1.534}), \quad (1)$$

式中: σ_e 为等效流变应力; ε_e 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变速率; $\dot{\varepsilon}_e^*$ 为无量纲应变速率; T^* 为无量纲温度。GH4169 材料性能参数见表 1。

表 1 GH4169 材料性能参数

参数	数值
杨氏模量 E/GPa	200
泊松比 μ	0.29
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8.19
热膨胀系数 α/K^{-1}	1.3×10^{-5}
比热容 $C/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	440

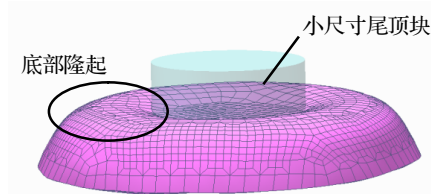
坯料网格选择 sheetmesh 类型进行划分, 网格单元边长设置为 4 mm, 网格划分为 7 128 个单元。采用多道次冷旋成型的方法成形此零件。

2 缺陷分析及控制

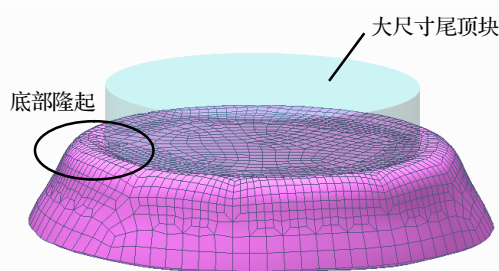
通过观察有限元仿真结果, 发现存在底部隆起、底部减薄、回弹等缺陷, 因此需分别对此 3 种现象进行分析。

2.1 底部隆起

如图 2(a)所示, 在多道次普通旋压过程中, 旋轮向前做进给运动, 当材料在向前流动中遇阻时, 根据最小阻力定律, 材料会倾向于往阻力更小的底部方向流动, 从而产生底部隆起现象^[11]。通过更换与旋压件底部尺寸相近的尾顶块, 底部隆起现象可以起到明显的改善作用, 如图 2(b)所示。



(a) 小尺寸尾顶块底部隆起



(b) 大尺寸尾顶块底部隆起

图 2 尾顶块底部隆起

2.2 底部减薄

如图 3 所示, 将旋压结束后的零件进行剖切, 发现其底部边缘位置有一定的减薄。在对底部进行应力应变分析后, 发现坯料底部中间位置应力应变始终为 0, 但在旋压后面几道次时, 边缘位置出现一定的应力集中及较小的应变, 如图 4(a)、4(b)所示。这是因为尾顶块对板料有固定作用, 旋压中后期底部边缘位置也参与到了成形扭矩的传递。

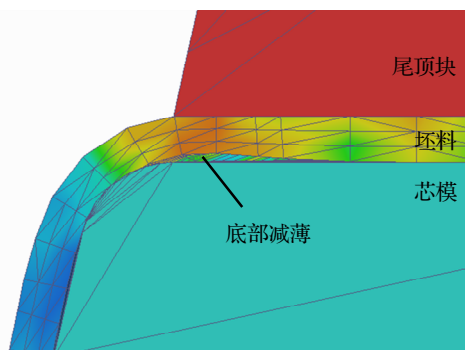


图 3 底部减薄

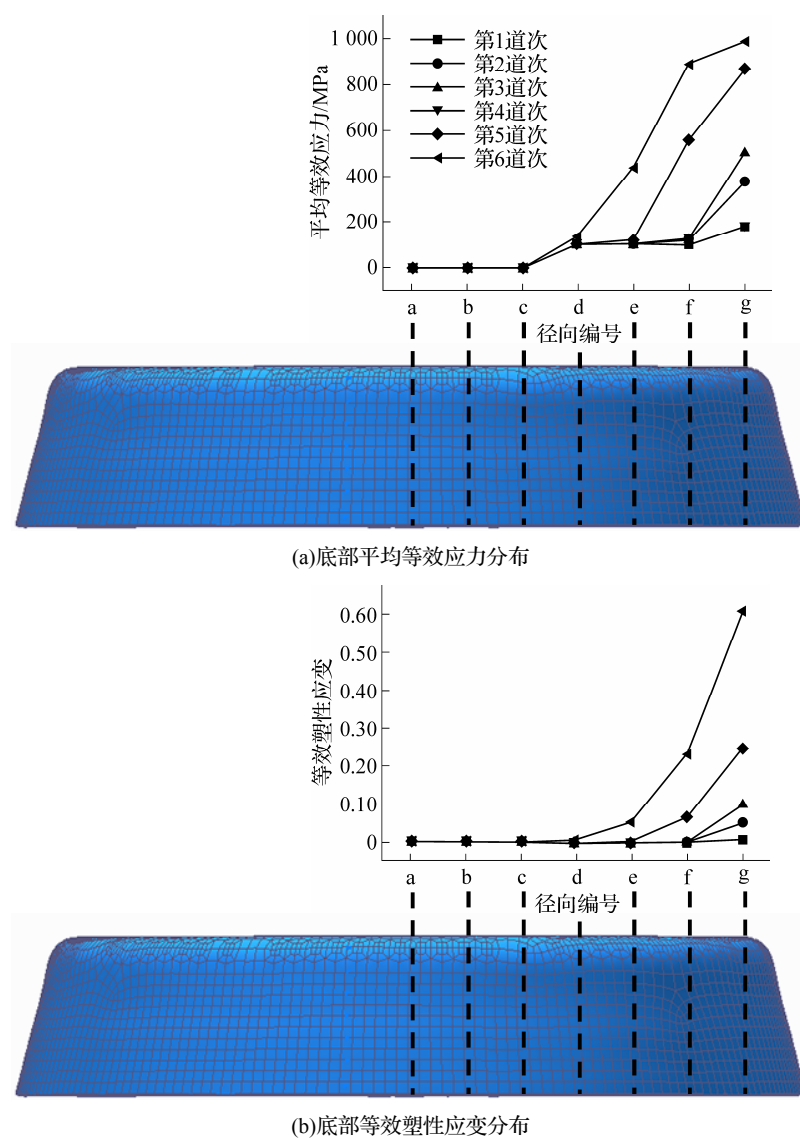


图4 底部平均等效应力、等效塑性应变分布

2.3 回弹

当旋轮加压于坯料时,使坯料在外力作用下发生塑性变形和弹性变形,然而在卸载后,旋压件的弹性变形部分得到了恢复,此为回弹现象。回弹

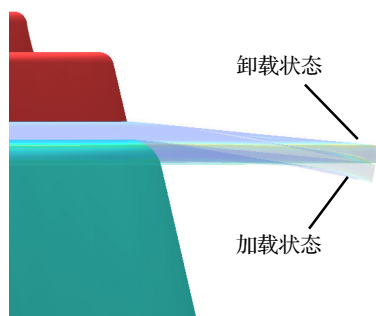


图5 回弹现象

将会导致旋压件的实际尺寸与理论所需尺寸产生偏差,降低其轮廓精度。而多道次普通旋压是不断负载和卸载的重复过程,即通过多道次普旋成形的旋压件回弹是一个反复变形积累的过程(图5)。当总的变形量增大时,塑性变形与弹性变形相应增大,回弹增大;但塑性变形增大到一定值时,回弹将受到塑性变形的抑制而减小。

3 单因素试验设计

本文选取了对于锥形件多道次旋压成形底部减薄和回弹影响比较显著的3个工艺参数:道次间距 p 、旋轮进给比 f 、芯模转速 n 。并且底部减薄和回弹分别以最大底部减薄量 y 和平均回弹角度 $\Delta\theta$

作为评价指标, 来研究该 3 个工艺参数对底部减薄和回弹的影响规律, 并根据表 2 设计单因素试验.

表 2 单因素试验工艺参数表

试验号	芯模转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	进给比 $f/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	道次间距 p/mm
1	300	1.2	14
2	400	1.2	14
3	500	1.2	14
4	300	0.8	14
5	300	1.6	14
6	300	1.2	8
7	300	1.2	20

最大底部减薄量 y 是从旋压成形完成的零件平底区均匀选取 8 个轴向截面进行剖切(图 6), 并且在 8 个轴向截面中分别量取最大值的底部减薄量, 其具体量取方式如图 7 所示.

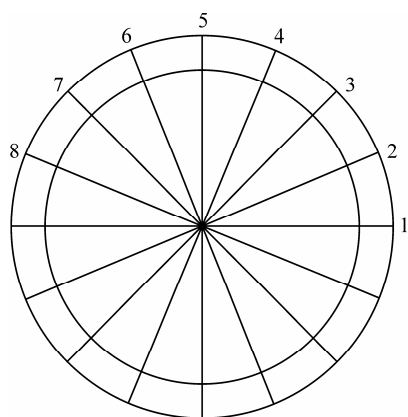


图 6 轴向截面选取示意图

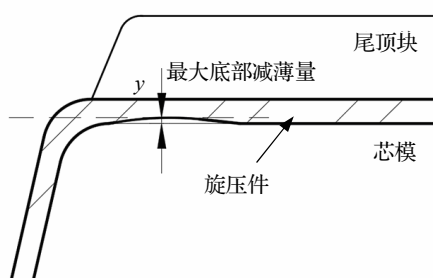


图 7 轴向截面最大的底部减薄量量取示意图

平均回弹角度 $\Delta\theta$ 是在旋压成形后的零件内表面选取 16 条锥母线(图 8), 并通过仿真软件分别测得每条锥母线所对应的实际偏转角 θ'_k , 同时计算出每条锥母线相对应的理论偏转角 θ_k , 则实际偏转角与理论偏转角之差即为回弹角度 $\Delta\theta_k$ (图 9),

即可取得 16 个回弹角度平均值. 平均回弹角度计算公式如下:

$$\Delta\theta_k = |\theta_k - \theta'_k|, (k | k \in Z, 1 \leq k \leq 16), \quad (2)$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{16} \sum_{k=1}^{16} \Delta\theta_k. \quad (3)$$

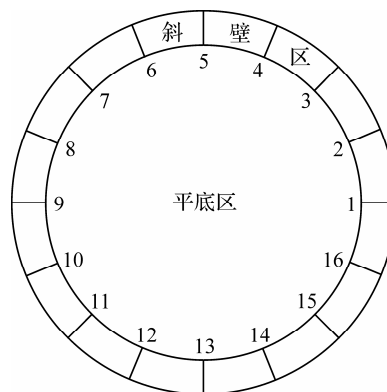


图 8 锥母线选取示意图

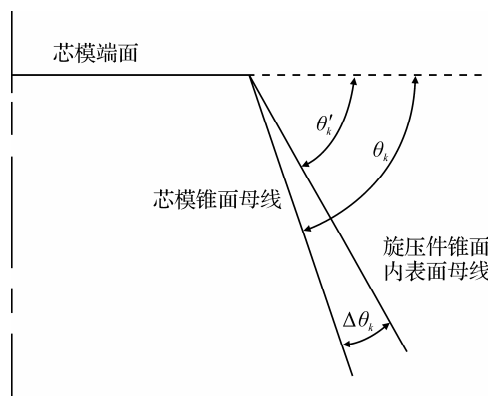


图 9 回弹角度示意图

4 工艺参数对轮廓精度的影响

观察成形结果, 旋压件出现底部减薄和回弹缺陷, 因此采用单因素试验法探究工艺参数(道次间距 p 、旋轮进给比 f 、芯模转速 n)对最大底部减薄量和回弹量的影响规律, 并以折线图来表示旋压工艺各因素对最大底部减薄量和回弹量的影响.

4.1 工艺参数对最大底部减薄量的影响

从图 10 可见, 最大底部减薄量 y 随道次间距增大呈先增大后减小现象, 这是由于随着道次数的增加, 底部区边缘最大等效塑性应变增加, 但同时每道次变形量减少. 从图 11 可以看出, 最大底部减薄量 y 随进给比的增大呈先增大后减小的变化. 从图 12 可以看出, 最大底部减薄量 y 随芯模转速的增加呈现减小趋势. 由此可以得出, 进给比对最

大底部减薄量的影响最大, 如果达到最小值, 意味着工件成形轮廓精度高.

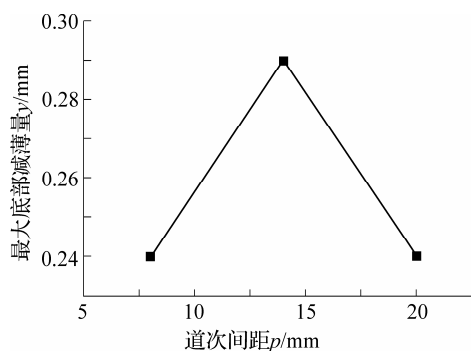


图10 道次间距对最大底部减薄量影响

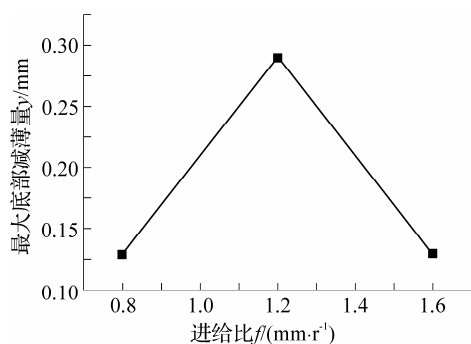


图11 旋轮进给比对最大底部减薄量影响

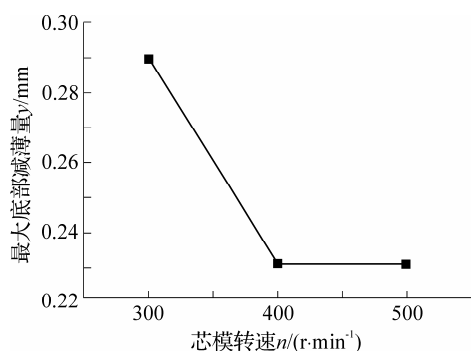


图12 芯模转速对最大底部减薄量影响

4.2 工艺参数对平均回弹角度的影响

从图13可见, 道次间距取较大值时, 平均回弹角有很明显减小, 这是因为随着道次间距的增大, 道次数减小, 回弹累积误差减小. 从图14可见, 平均回弹角度随进给比的增大呈先增大后减小变化, 这是由于进给速度增大, 使得金属流动增加, 旋压件塑性应变增加, 回弹角度呈增大趋势, 但当塑性应变继续增大时, 回弹将受到塑性变形部分的抑制而减少. 由图15可见, 回弹角度随着芯模转速的增大呈现逐渐减小的趋势, 因为芯模转速增加, 单位时间内坯料环形变形面积较大, 金属变

形连续, 材料变形均匀, 回弹减小.

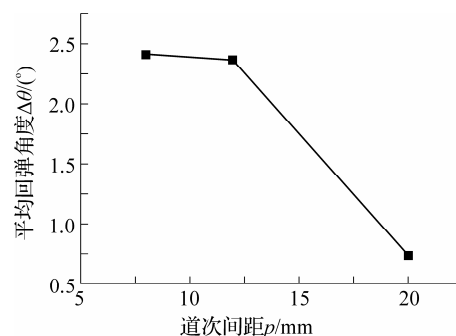


图13 道次间距对平均回弹角度影响

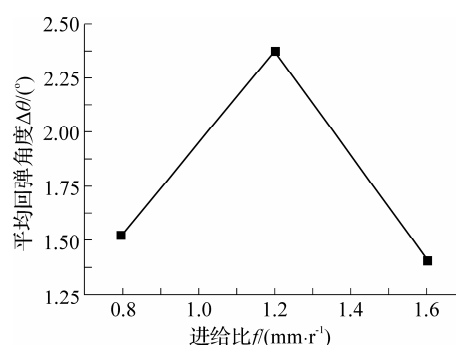


图14 旋轮进给比对平均回弹角度影响

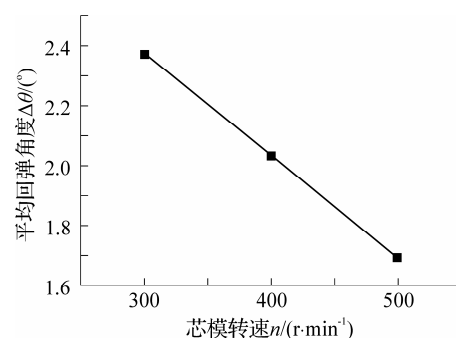


图15 芯模转速对平均回弹角度影响

5 结论

(1)对于底部隆起缺陷, 可以通过选择与旋压件底部尺寸相合适的尾顶块予以控制.

(2)单因素试验结果分析表明, 最大底部减薄量随道次间距和进给比的增大呈现先增大后减小的变化, 随芯模转速的增加呈现减小趋势, 影响底部减薄的最大因素是进给比. 平均回弹角度随道次间距增加和芯模转速增加呈现减小趋势, 而随进给比的增大呈先增大后减小的变化, 并且影响回弹的最大因素是道次间距.

(3)通过对底部减薄和回弹的综合控制, 工艺参数应选择较大道次间距 $p=20\text{ mm}$, 较小旋轮进

给比 $f=0.8 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 或较大旋轮进给比 $f=1.6 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$, 较大的芯模转速 $n=500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.

参考文献:

- [1] 夏琴香, 周立奎, 肖刚锋, 等. 工艺参数对高强钢锥形件剪切旋压成形质量的影响[J]. 锻压技术, 2017, 42(2): 77-81.
- [2] Xia Q X, Huang Y, Cheng X Q, et al. Development of constitutive model of Haynes230 at high temperature based on Johnson-Cook model[C]//Proceeding of the 34th International Deep Drawing Research Group (IDDRG 2015), Shanghai, 2015.
- [3] 肖刚锋, 夏琴香, 张义龙, 等. 镍基高温合金旋压成形技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2020, 63(21):46-53.
- [4] 仲昕岳, 杜尚军, 李志远, 等. 旋压成形过程缺陷控制方法及应用[J]. 精密成形工程, 2020, 12(6):169-174.
- [5] 樊文欣, 席奇豪, 吕伟, 等. 筒形件强力旋压工艺参数对回弹量的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(17):119-122.
- [6] 杨锋, 朱小兵, 钟茵, 等. 基于 Vague 集的强力旋压工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2021, 46(1):110-115.
- [7] 凌泽宇. 镍基合金锥筒形件拉深旋压工艺及质量控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [8] 束学道, 夏迎香, 叶博海, 等. 渐变壁厚钣金机匣旋压成形回弹及其回弹补偿研究[J]. 应用科技, 2022, 49(1): 115-121.
- [9] Shu X D, Zhang S, Ehmann K F, et al. Forming and uniformity of shaft parts without a stub bar by axial closed-open-type cross-wedge rolling[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(9):1054-1063.
- [10] 刘晓, 闫欢松, 孔祖开, 等. GH4169 高温合金的动态力学行为及其本构关系[J]. 机械工程材料, 2019, 43(1): 75-81.
- [11] 黄成龙. 普通旋压成形质量分析及控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

Control and research on spinning profile precision of GH4169 superalloy conical casing

ZHANG Jun¹, DING Ling^{2,3}, LI Libo¹, XU Haijie^{2,3}, SHEN Weiwei¹, GAO Xianshen^{2,3},
SHU Xuedao^{2,3*}, SUN Baoshou^{2,3}

(1.Healthy Smart Kitchen and Zhejiang Engineering Research Center, Ningbo 315204, China;

2.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

3.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Parts Rolling Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Part contour accuracy is one of the criteria for judging the forming quality of spinning parts. Through the general spinning simulation test of GH4169 superalloy conical casing with Simufact finite element software, the common defects affecting the profile accuracy of the spinning parts were observed, including bottom bulge, bottom thinning, and springback. The bottom bulge could be controlled by the tail top block with a comparison method. The single factor test method was used to explore the influences of the main process parameters, including feed ratio, core mold speed, and pass spacing, on the bottom thinning and workpiece springback during the forming process, for which the maximum bottom thinning and average springback angle were taken as evaluation indexes. The results show that the feed ratio has the greatest influence on the bottom thinning, and the pass spacing has the greatest influence on the springback. Aiming at comprehensive control of bottom thinning and workpiece springback, the process parameters for the conical casing studied should be the following: the larger pass interval $p=20 \text{ mm}$, the feed ratio of smaller spinning roller $f=0.8 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ or the feed ratio of larger rotary wheel $f=1.6 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$, and the larger mandrel rotational speed $n=500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.

Key words: high temperature alloy; conical casing; flow forming; contour accuracy; defect control

(责任编辑 章践立)