

GH4169 高温合金锥形机匣冷旋成形规律

丁 玲^{1,2}, 高贤深^{1,2}, 卢信学^{1,2}, 孙宝寿^{1,2}, 束学道^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 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: 针对高温合金因室温加工硬化现象严重而导致旋压成形时易产生的破裂、表面波纹等缺陷, 以锥形机匣构件为研究对象, 探究其冷旋成形规律。基于 Simufact 平台建立了有限元模型, 采用模拟与实验相结合的研究方法, 模拟分析了多道次旋压过程中机匣构件等效应力和等效塑性应变的变化规律、壁厚的分布特征及工艺参数 (道次间距 p 、旋轮进给比 f 、芯模转速 n) 对旋压件壁厚的影响, 揭示了其成形规律。结果表明: 工件顶部平板区 I 区的等效应力、等效塑性应变沿径向突变, 且边缘在中后期出现一定的应力集中和变形; 斜壁区 V 区的等效应力、等效塑性应变沿轴向分层分布, 沿周向分布均匀, 且随着旋轮的进给和道次的增加而逐渐增大, 最大值均位于工件端部 IV 区。斜壁区 V 区的壁厚总体呈先减小后增大的趋势, 中部过度减薄, 工件端部 IV 区壁厚达到最大值; 壁厚均匀性随旋轮进给比和道次间距的增大呈上升趋势, 芯模转速对壁厚影响不显著。实验结果与模拟分析一致, 验证了模拟研究的可靠性。

关键词: 镍基高温合金; 锥形机匣; 冷旋成形; 等效应力; 等效塑性应变; 壁厚

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.017

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 02-0135-08

Cold spinning law on superalloy GH4169 conical casing

Ding Ling^{1,2}, Gao Xianshen^{1,2}, Lu Xinxue^{1,2}, Sun Baoshou^{1,2}, Shu Xuedao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Parts Roll Forming Technology Research, Ningbo 315211, China)

Abstract: Aiming at the defects such as cracks and surface ripples during the spinning process due to serious work hardening phenomenon at room temperature of superalloys, for the conical casing component, the law of cold spinning was studied. Then, based on the Simufact platform, a finite element model was established, and the change laws of equivalent stress and equivalent plastic strain, the distribution characteristics of wall thickness and the influences of process parameters (pass spacing p , rotary wheel feeding ratio f , mandrel rotate speed n) on the wall thickness of spinning parts for casting component during the multi-pass spinning process were simulated and analyzed by combining simulation and experiment. Furthermore, the forming laws were revealed. The results show that the equivalent stress and equivalent plastic strain in zone I of the top plate zone of workpiece suddenly change along the radial direction, and a certain stress concentration and deformation appear in the middle and late stages of edge. The equivalent stress and equivalent plastic strain in the zone V of inclined wall area are distributed in layers along the axial direction and evenly distributed along the circumferential direction, and gradually increase with the increasing of rotary wheel feeding and number of passes, and the maximum value is located in the zone IV at the end of workpiece. The wall thickness in the zone V of inclined wall area generally shows a trend of decreasing first and then increasing, and the middle part is excessively thinned, and the wall thickness in the zone IV at the end of workpiece reaches the maximum value. The uniformity of wall thickness shows an upward trend with the increasing of rotary wheel feeding ratio and pass spacing, and the mandrel rotate speed has no significant effect on the wall thickness. The experimental results are consistent with the simulation analysis, which verifies the reliability of the simulation research.

Key words: nickel-based superalloy; conical casing; cold spinning; equivalent stress; equivalent plastic strain; wall thickness

GH4169 高温合金具有良好的抗疲劳、热冲击性

能、加工性能, 以及高强度等优异的综合性能, 主要用于制造涡轮机匣、转子封严环和蜂窝环等高温关键零部件^[1-2]。锥形机匣是航空发动机的核心零件之一, 在航空航天高端装备中应用广泛, 是整个发动机上的主要承力部位^[3]。该类零件目前主要采用多道次冲压和旋压方法成形, 相比冲压成形, 旋压成形工艺具有制品性能优、尺寸公差小、成本低、材料利用率高优势, 被广泛应用于国防建设领域^[4]。高温合金

收稿日期: 2022-03-23; 修订日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975301); 浙江省自然科学基金重点项目 (LZ22E050002); 宁波市重大科技专项 (2022Z002)

作者简介: 丁 玲 (1997-), 女, 硕士研究生

E-mail: 513562849@qq.com

通信作者: 孙宝寿 (1960-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: sunbaoshou@nbu.edu.cn

材料合金化程度高,加工硬化现象严重,易产生起皱、破裂和压痕等典型缺陷和壁厚不均匀的现象,难以达到零件的成形质量和力学性能要求^[5]。

目前,部分学者对高温合金零件旋压成形工艺技术做了不少研究。王兴坤^[6]采用实验对比法,研究了温度变化对 Haynes230 镍基合金旋压件热强旋的影响,结果表明,当加热温度高于 1100 ℃ 后,旋压件外层材料发生了动态再结晶,成形良好、无裂纹缺陷。肖刚锋等^[7]基于 Abaqus 软件建立了锥筒形件拉深旋压有限元模型,探究了旋轮进给比和圆角半径等工艺参数对成形质量的影响,结果表明,旋轮进给比和圆角半径对旋压件的最大壁厚减薄率、圆度及平均回弹角有显著的影响。由于高温合金在常温 and 高温下的可塑性有很大差别,现阶段对高温合金的旋压的研究主要集中在热强力旋压技术上,近年来也有部分学者对常温旋压进行了研究。王雨等^[8]以壁厚标准差为评价指标,采用均匀设计方法,对旋压工艺参数进行回归分析,得到了回归方程并对工艺参数进行了优化。Li Z X 等^[9]研究了旋轮轨迹对成形质量的影响,结果表明,螺旋线形的旋轮轨迹可以有效地提高材料的成形性能,并得出了 GH3030 高温合金零件常温多道次拉深旋压成形规律。束学道等^[10]分析了 GH3030 高温合金壁厚渐变锥形件旋压过程中沿轴向、周向的应力场和应变场的分布规律,对 GH3030 高温合金壁厚渐变锥形回转件强力旋压的成形机理进行了研究。詹梅等^[11]研究了多道次旋压过程中摩擦因数和旋轮进给比对壁厚均匀性的影响。

综上所述, GH4169 镍基高温合金属于难变形材料,国内外学者对高温合金的研究主要集中在热旋压工艺技术上,而对于高温合金机匣零件的冷旋成形的研究较少。为了减少高温合金因室温加工硬化现象严重而导致的旋压成形时产生的缺陷,提高其成形质量,本文分析了成形过程中等效应力、等效塑性应变的变化规律及壁厚分布特征,对 GH4169 高温合金锥形机匣冷旋成形规律进行了研究,为提高冷旋成形产品品质提供了可靠依据和有效方法。

1 锥形机匣旋压工艺设计

1.1 有限元建模

图 1 为锥形机匣零件。该零件结构呈锥形,锥角为 103°,锥体壁厚为 2.2 mm。高温合金常温下的硬化速度较快,且锥形倾斜程度大,单道次剪切旋压无法实现。因此,本文采用多道次旋压成形的方

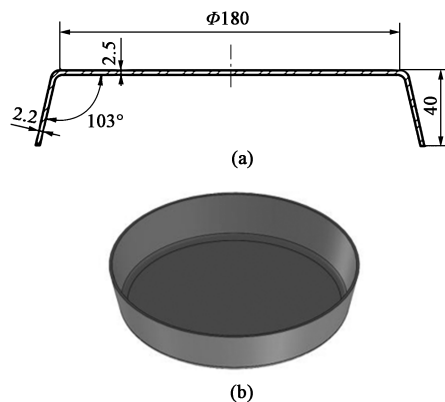


图 1 GH4169 高温合金锥形机匣零件图

(a) 结构尺寸图 (b) 三维模型图

Fig. 1 Part diagrams of superalloy GH4169 conical casing

(a) Structural dimension diagram (b) 3D model diagram

法成形此零件,图 2 为贴模推进的凹曲线圆弧形多道次旋压轨迹。

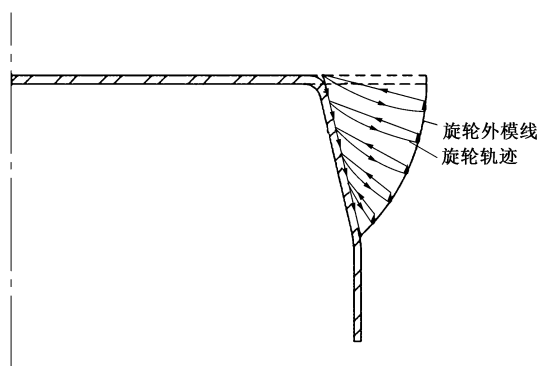


图 2 多道次旋压轨迹

Fig. 2 Multi-pass spinning trajectory

坯料材料为 GH4169 镍基高温合金,采用 J-C 本构模型,其本构方程如下^[12]:

$$\sigma_e = [650 + 809.16 \varepsilon_e^{0.2754}] \times [1 + (-0.0067 + 6.35 \times 10^{-6} \dot{\varepsilon}_p) \ln \dot{\varepsilon}_e^*] \times (1 - T^{*1.534}) \quad (1)$$

式中: σ_e 为等效应力; 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 高温合金的材料性能参数见表 1。

表 1 GH4169 高温合金的材料性能参数

Table 1 Material performance parameters of superalloy GH4169

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

基于 Simufact 平台,建立了锥形机匣旋压有限元模型,如图 3 所示。旋压模型由坯料、芯模、旋轮和尾顶块 4 部分组成,由于旋轮、芯模和尾顶块不发生变形,故选用解析刚体。

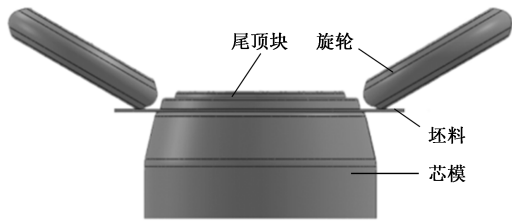


图 3 锥形机匣旋压有限元模型
Fig. 3 Finite element model of conical casing spinning

坯料网格采用 Sheetmesh 网格进行划分,网格尺寸设置为 4 mm,网格划分为 11076 个单元。摩擦关系使用结合摩擦模型定义,其中,坯料与芯模、旋轮之间的库伦摩擦和剪切摩擦因数均为 0.2。

1.2 旋压工艺参数

旋轮进给比为旋压的重要影响因素。对于面心晶格的金属材料,旋轮进给比可取 0.3~3.0 mm·r⁻¹,对于体心晶格的金属材料,旋轮进给比可取 0.1~1.5 mm·r⁻¹[13]。GH4169 高温合金是以体心四方的 γ'相和面心立方的 γ相沉淀强化的一种难变形金属材料,综合考虑旋压力以及生产效率等因素,旋轮进给比不易取过大或过小,因此,旋轮进给比取 1.2 mm·r⁻¹。

模拟参数芯模转速 n 为 300 r·min⁻¹,旋轮进给比 f 为 1.2 mm·r⁻¹,旋轮圆角半径 R_n 为 12 mm,旋轮安装角通常取 45°。锥形机匣工艺参数如表 2 所示。

表 2 锥形机匣旋压工艺参数

Table 2 Spining process parameters of conical casing

参数	数值
芯模转速/(r·min ⁻¹)	300
旋轮进给比/(mm·r ⁻¹)	1.2
旋轮圆角半径/mm	12
旋轮直径/mm	Φ150
旋轮安装角/(°)	45

2 等效应力、等效塑性应变及壁厚分布规律

为便于后续分析,将该工件分为 4 个区域,如图 4 所示,Ⅰ区为工件顶部平板区,Ⅱ区为过渡圆角区,Ⅲ区为锥形区,Ⅳ区为工件端部区。其中Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区统称为斜壁区Ⅴ区。

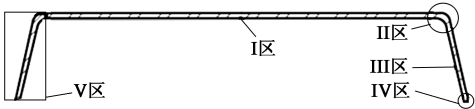


图 4 工件分区示意图
Fig. 4 Schematic diagram of workpiece partition

在工件顶部平板区Ⅰ区和斜壁区Ⅴ区中分别沿径向、轴向选取采样点,方案如下:在工件顶部平板区Ⅰ区等距选取 6 个同心圆,从圆心等角度的引出 8 条线段与同心圆相交,每个圆上的 8 个交点作为采样点,加上Ⅰ区中心 a 点共计 49 个采样点,分别计算每个圆上 8 个采样点的平均值并标记,如图 5a 所示。在斜壁区Ⅴ区沿轴向等距指定 7 个垂直于工件轴向的截面,每个截面与工件的外壁相交于一

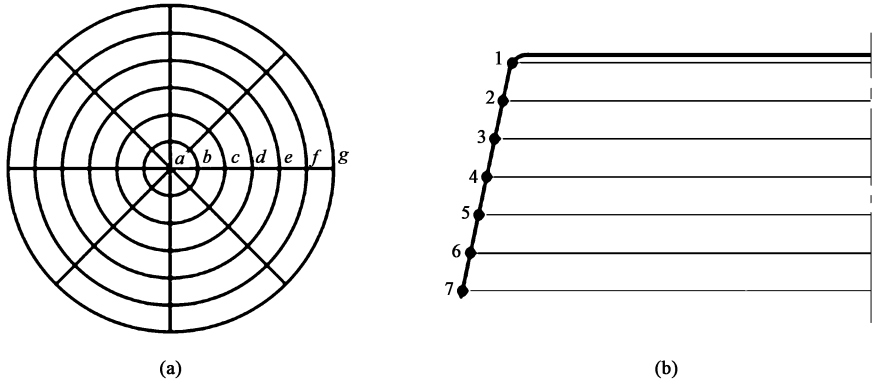


图 5 采样点的选取图
(a) 径向 (b) 轴向
Fig. 5 Selection diagrams of sampling points
(a) Radial direction (b) Axial direction

圆,称为外壁圆。在每个外壁圆上分别均匀选取 8 个采样点,共计 56 个采样点,分别计算每个外壁圆上 8 个采样点的平均值并标记,如图 5b 所示。

根据采样点选取方案,在软件中选取追踪点,并导出每个追踪点的等效应力、等效塑性应变数据,分析每个区域在不同成形阶段(成形初期阶段、成形中期阶段、成形精旋阶段)和不同道次下的等效应力、等效塑性应变分布规律。

2.1 等效应力分析

图 6 为各成形阶段工件的等效应力分布,可以看出,等效应力最小值为 0,在工件顶部平板区 I 区。等效应力最大值主要集中在旋轮直接接触区及旋轮接触附近区域,随着旋轮的进给与移动,等效应力不断增大,应力集中区向工件端部区 IV 区移动,这是因为机匣与旋轮接触区受到挤压和拉伸的共同作用。

图 7a 为不同道次下工件顶部平板区 I 区的平均等效应力分布图。工件顶部平板区 I 区中间位置始终为 0,中后期工件顶部平板区 I 区边缘位置出现了一定的应力集中,这是因为尾顶块对板料有固定作用,中后期边缘位置也参与到了成形扭矩的传递。

图 7b 为不同道次下斜壁区 V 区的平均等效应力沿轴向分布图。总体平均等效应力呈先减小后增大趋势,工件端部区 IV 区的平均等效应力值最大,这是因为等效应力主要分布在旋轮与坯料接触区及其附近区域,距离坯料口部变形区越远,平均等效应力值越小。过渡圆角区 II 区的平均等效应力处于较大水平,呈逐渐减小趋势,因为过渡圆角区 II 区靠近尾顶块远离旋轮,因此,尾顶块对它的影响是主要的。随着成形的进行,平均等效应力

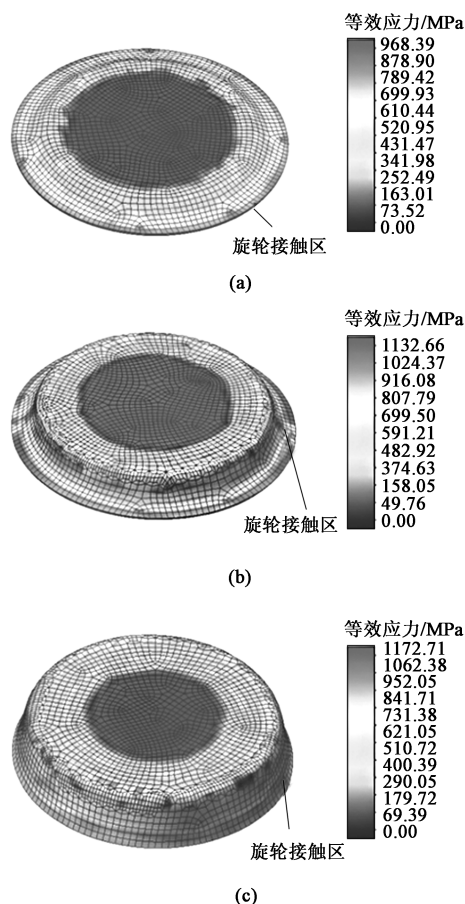


图 6 各成形阶段工件等效应力分布图
(a) 成形初期阶段 (b) 成形中期阶段 (c) 成形精旋阶段
Fig. 6 Equivalent stress distribution diagrams of workpiece at each forming stage
(a) Initial stage of forming (b) Middle stage of forming
(c) Fine spinning stage of forming

逐渐增大,这是受到了变形量增大和受到多道次加工硬化的影响。

2.2 等效塑性应变分析

图 8 为各成形阶段工件的等效塑性应变分布,

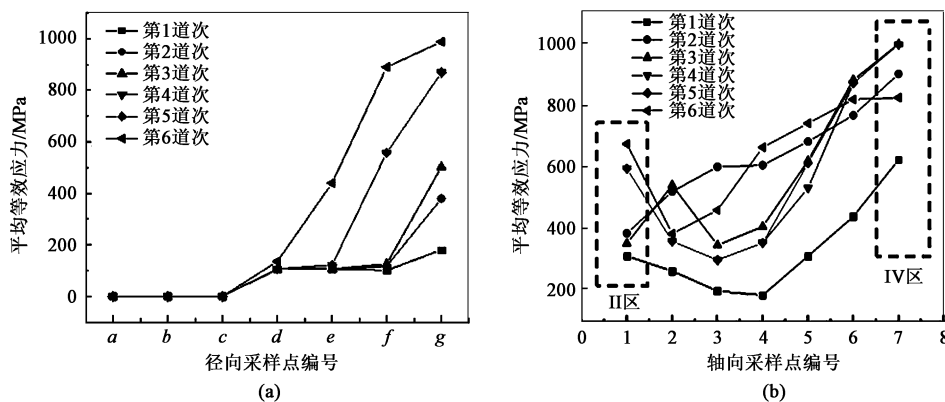


图 7 不同道次下径向 (a) 和轴向 (b) 的平均等效应力

Fig. 7 Average equivalent stresses in radial direction (a) and axial direction (b) under different passes

由图8可知, 等效塑性应变最小值位于工件顶部平板区I区, 等效塑性应变最大值位于工件端部IV区。

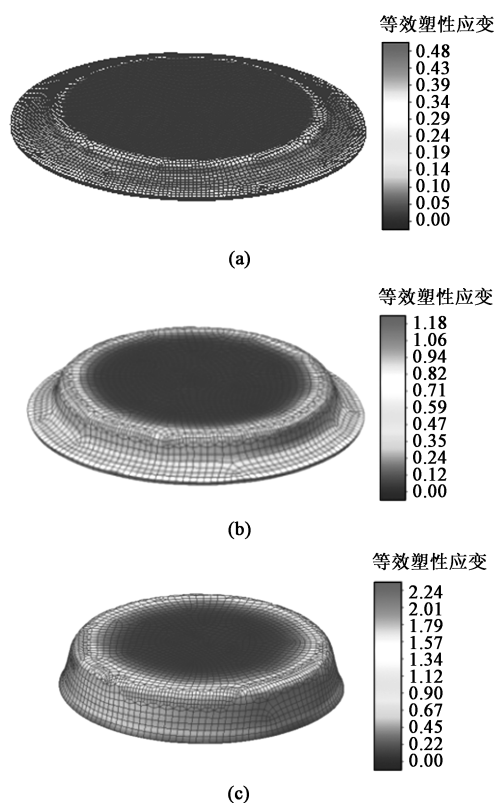


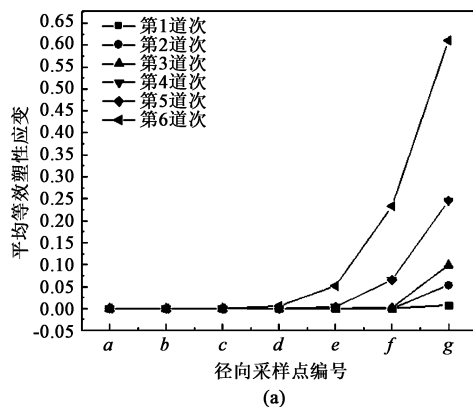
图8 各成形阶段工件等效塑性应变分布图

(a) 成形初期阶段 (b) 成形中期阶段 (c) 成形精旋阶段

Fig. 8 Equivalent plastic strain distribution diagrams of workpiece at each forming stage

(a) Initial stage of forming (b) Middle stage of forming
(c) Fine spinning stage of forming

图9a为工件顶部平板区I区不同道次的平均等效塑性应变变化图, 平均等效塑性应变最小值为0, 边缘处平均等效塑性应变值也处于较低水平, 说明多道次旋压过程对尾顶块平均等效塑性应变基本无



(a)

影响。

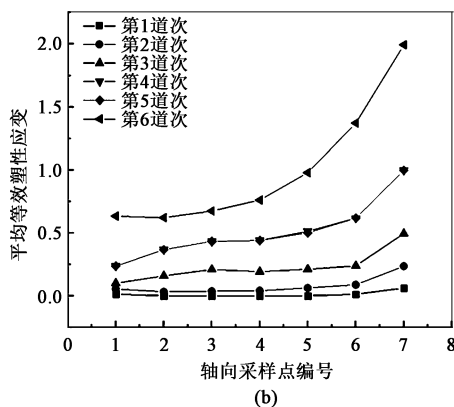
图9b为不同道次工件沿轴向平均等效塑性应变变化图, 随着旋压过程的进行, 平均等效塑性应变的极值逐渐增大。这主要是因为随着旋压过程的进行, 坯料的变形量越来越大, 平均等效塑性应变的极值也不断增大。每道次平均等效塑性应变沿轴向递增, 这是因为工件端部区IV区处于最外端, 其变形量最大, 且一端处于自由端, 受到的约束相对其他区域较少, 有利于材料的塑性流动。

2.3 壁厚分布规律

锥形机匣的旋压过程遵循体积不变原则, 坯料随着旋轮的进给发生流动, 成形件的壁厚会产生减薄现象, 对旋压件的壁厚进行分析, 得到旋压件壁厚分布规律, 如图10所示, 可以直观地了解到壁厚减薄和增厚情况。从图10a可知, 旋压件工件顶部平板区I区未与旋轮发生接触, 边缘处出现壁厚减薄情况, 因为该区域材料受拉应力作用沿径向延伸, 随着道次的增加减薄现象更加明显。从图10b可知, 整体壁厚呈现先减小后增大趋势, 最大值出现在工件端部IV区, 这是因为材料沿母线流动而且经过多道次的旋压, 材料加工硬化需要更大的旋压力, 工件端部IV区处于自由端, 对旋轮起到约束作用的材料较少, 受到的轴向压力较小, 因此, 引起工件端部IV区出现壁厚增厚的现象, 壁厚增大, 不易变形, 导致靠近工件端部IV区部位壁厚减薄剧烈, 工件端部IV区过度减薄将会增加破裂的倾向。

3 工艺参数对旋压件壁厚的影响

观察成形结果, 旋压件出现壁厚不均匀的现象, 探究工艺参数 (道次间距 p 、旋轮进给比 f 、芯模转



(b)

图9 不同道次下径向 (a) 和轴向 (b) 的平均等效塑性应变

Fig. 9 Average equivalent plastic strains in radial direction (a) and axial direction (b) under different passes

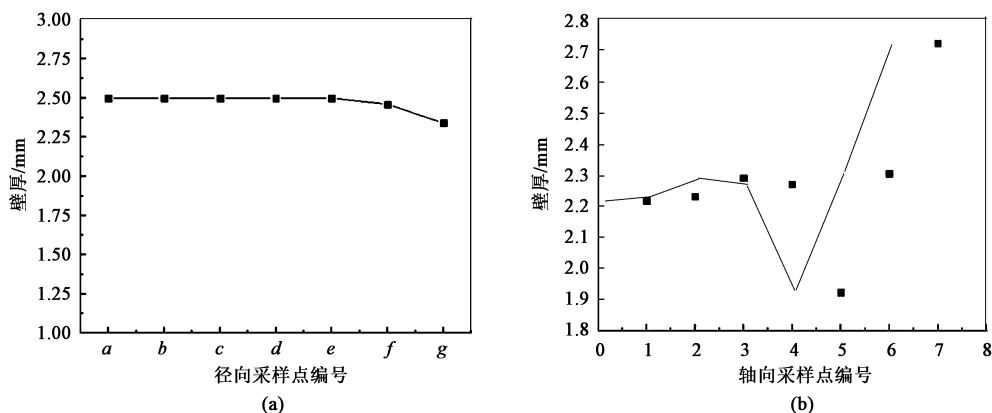


图 10 旋压件壁厚分布图

(a) 径向 (b) 轴向

Fig. 10 Wall thickness distribution diagrams of spinning parts

(a) Radial direction (b) Axial direction

速 n) 对旋压件壁厚的影响。

3.1 道次间距对旋压件壁厚的影响

图 11 展示了道次间距对旋压件壁厚的影响, 由图 11 可知, 在一定范围内, 道次间距取较大值时, 壁厚较为均匀, 由第 2 节得出随着旋轮的进给和道次的增加, 等效应力、等效塑性应变值逐渐增大, 道次间距越小, 道次数越多, 导致坯料在最后几道次加工硬化现象严重, 所需要的旋压力增大, 壁厚均匀性变差, 且等效应力和等效塑性应变最大值均位于工件端部 IV 区, 此处产生破裂风险增大。

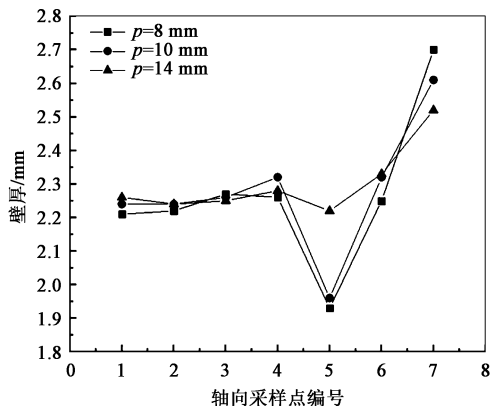


图 11 道次间距对旋压件壁厚的影响

Fig. 11 Effect of pass spacing on wall thickness of spinning part

3.2 旋轮进给比对旋压件壁厚的影响

图 12 展示了旋轮进给比对旋压件壁厚的影响, 从图 12 中可以看出, 旋轮进给比对壁厚均匀性影响显著, 壁厚均匀性随着旋轮进给比的增大而增大, 因为旋轮进给比较小时, 旋轮对坯料同一处的碾压次数增加, 坯料的加工硬化效应严重, 且较大的旋轮进给比趋向于两点拉伸, 限制材料的周向流动,

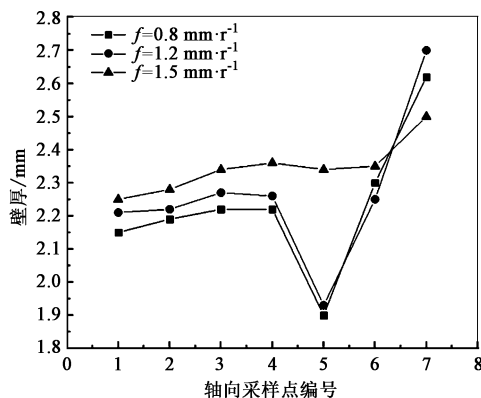


图 12 旋轮进给比对旋压件壁厚的影响

Fig. 12 Effect of rotary wheel feeding ratio on wall thickness of spinning part

壁厚均匀性好。但旋轮进给比较大时, 壁厚精度低, 且会导致塑性变形不充分, 产生严重的回弹现象进而影响旋压件的尺寸精度, 因此, 旋轮进给比参数选取要合理。

3.3 芯模转速对旋压件壁厚的影响

图 13 展示了芯模转速对旋压件壁厚的影响, 由图 13 可知, 芯模转速对壁厚影响整体趋势一致, 在所选参数内, 取较大芯模转速 ($n = 500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 时壁厚比较均匀, 因为单位时间内坯料环形变形面积较大, 金属变形连续, 壁厚均匀性比较好。

4 旋压实验

采用卧式旋压机床, 在常温下对直径为 $\Phi 250 \text{ mm}$ 、厚度为 2.5 mm 的 GH4169 高温合金板料进行旋压成形。图 14 为旋压过程。

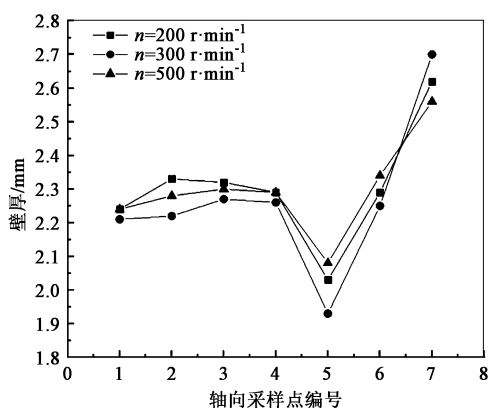


图13 芯模转速对旋压件壁厚的影响

Fig. 13 Effect of mandrel rotate speed on wall thickness of spinning part

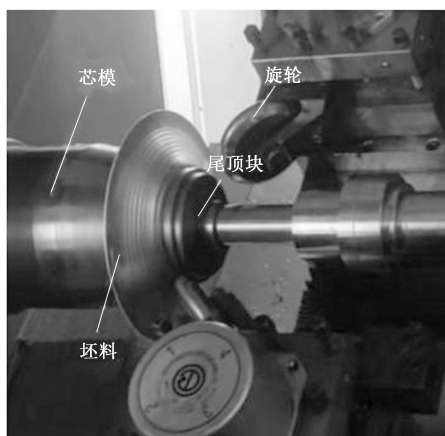


图14 旋压过程

Fig. 14 Spinning process

多道次旋压采用与模拟相同的工艺参数, 芯模转速 n 为 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 旋轮进给比 f 为 $1.2 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$, 旋轮圆角半径 R_n 为 12 mm , 旋轮安装角取 45° 。图15为GH4169高温镍基合金坯料经旋压成形后的旋压件。由图15可知, 所得旋压件成形质量完好, 未出现起皱、破裂等缺陷。



图15 旋压实验零件图

Fig. 15 Part diagram of spinning experiment

图16为零件壁厚模拟值和实验值对比情况, 由

图16可知, 壁厚模拟值和实验值沿轴向距离分布趋势相似, 最大误差为9.1%, 表明有限元模型的模拟结果是可靠的。

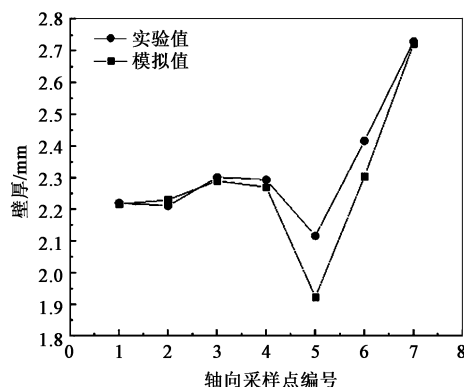


图16 零件壁厚的模拟值与实验值对比

Fig. 16 Comparison of wall thickness between simulated and experimental values for part

5 总结

(1) 随着旋轮的进给和道次的增加, 等效应力和等效塑性应变逐渐增大, 最大值位于工件端部IV区, 该区域将增大产生破裂的倾向。

(2) 旋压件壁厚沿轴向不均匀, 斜壁区V区壁厚呈先减小后增大的趋势, 中部过度减薄, 壁厚最大值出现在工件端部IV区, 壁厚实验值与仿真结果趋势一致, 最大误差为9.1%, 验证了模型的可靠性。

(3) 工艺参数影响壁厚均匀性的顺序为: 旋轮进给比 f > 道次间距 p > 芯模转速 n 。在一定参数范围内, 随着旋轮进给比和道次间距的增大, 壁厚均匀性呈现良好趋势。

参考文献:

- [1] 王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2011, 25 (S2): 482-486.
Wang H Y, An Y Q, Li C Y, et al. Research progress of nickel-based superalloys [J]. Materials Reports, 2011, 25 (S2): 482-486.
- [2] 陈予恕, 张华彪. 航空发动机整机动力学研究进展与展望 [J]. 航空学报, 2011, 32 (8): 1371-1391.
Chen Y S, Zhang H B. Review and prospect on the research of dynamics of complete aero-engine systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32 (8): 1371-1391.
- [3] 刘建南. 航空发动机机匣类零件的变形控制研究 [J]. 中国新技术新产品, 2017, (12): 46-47.

(下转第179页)