

• 机械工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202201017



本刊网刊

工艺参数对机匣冷态强力旋压力学行为影响规律研究

束学道^{1,2}, 郑家斌^{1,2}, 刘艳丽^{1,2}, 徐海洁^{1,2}, 谢超^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 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: 针对航空钣金机匣材料难于成形, 且成形后的产品精度难以控制等问题, 本文以高温合金GH3030为材料, 在阐明钣金机匣冷态强旋成形回弹理论与载荷作用机制基础上, 使用SIMUFACT.FORMING有限元软件, 导入实验室之前所得到的GH3030的本构方程, 在软件中建立了航空机匣锥形件冷态强旋的仿真模型, 分析了旋轮间隙、旋轮进给比、芯模半锥角等旋压参数对钣金机匣冷态强旋成形回弹与载荷的影响规律; 采用正交实验得到了各工艺参数对回弹角度影响的主次规律, 并在此基础之上得到最优工艺参数组合; 采用BBD(Box-Behnken design)响应曲面设计实验方法, 得到旋压过程中最大成形力与旋压参数的量化回归模型, 并对回归方程进行方差分析, 计算回归方程的多元相关系数、可信度以及精确度。最终结果表明: 所得到的模型的可信度和精确度较高; 在最终实验结果与仿真结果中取点验证, 发现误差在10%以内, 因此, 回归模型较为精准。最后, 进行了旋压实验, 对比分析了仿真结果与旋压实验实测结果的回弹角度, 其平均误差在6.2%以内, 验证了仿真结果及回归模型的可靠性。研究表明: 仿真分析的回弹角度与实验测得回弹角度变化趋势几乎相同, 并且误差较小, 控制在12%以内, 表明仿真分析的结果能够较准确地展现旋压件的回弹规律。本文的研究结果为实现高温合金钣金机匣锥形件冷强旋的精确成形提供了理论指导和技术支持。

关键词: 钣金机匣; 高温合金GH3030; 冷强旋; 回弹; 成形力

中图分类号: TG132.3; TG306

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)04-0229-09

旋压成形是一种金属塑性成形技术, 拥有非常显著的优势^[1], 它综合了金属加工中的拉深、冲压等工艺, 具有旋后产品力学性能高、旋压制品成形质量高、材料利用率高、产品成本低的优点^[2-4], 因而被广泛应用于航空航天、兵器、民用工业等领域。而航空钣金机匣是航空发动机的“外壳”, 大多采用旋压成形的的方法成形。但是其结构逐渐向薄壁与高强度发展, 而且材料大多为高温合金, 导致成形后内部存在不同程度的残余应力, 致使最后的产品精度难以控制。因此, 通过系统地开展钣金机匣旋压成形关键技术研究, 解决其在旋压成形中的精度控制问题是十分必要的。

航空机匣大多采用旋压成形, 主要分为热旋和冷旋两类。而对于旋压成形高温合金机匣的研究大多集中于热旋。Niklasson^[5]针对高温合金748航空发

动机机匣的制造进行了强力旋压热处理工艺相关研究, 发现了完全再结晶的热处理工艺。岑泽伟^[6]和Liu^[7]等针对GH4169壁厚渐变锥形回转件的热强旋成形展开研究, 详细阐明了工艺参数对工件表面直线度的影响。朱宁远^[8]、王兴坤^[9]、Xiao^[10]等针对难变形金属Haynes230筒形钣金机匣运用宏观与微观相结合的方法, 展开了热加工图的形性一体控制研究。

冷旋成形具有旋压后工件表面质量高、微观组织稳定、不需要加热等优点。但是在旋压过程中, 工件容易开裂, 对设备的要求较高。近年来也有部分学者开展了高温合金冷旋成形的研究。Li等^[11]通过将微观组织与残余应力相结合详细阐明了高温合金旋压成形的缺陷产生机制。凌泽宇等^[12]针对镍基高温合金因加工硬化严重成形时极易产生破裂和起皱等

收稿日期:2022-09-19 修回日期:2022-12-20 网络出版日期:2023-12-04

基金项目:浙江省基金重点项目(LZ22E050002); 国家自然科学基金项目(52375346); 宁波市重大科技攻关项目(2022Z002)

作者简介:束学道(1968—), 男, 教授。研究方向: 塑性成形工艺与设备。E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

典型缺陷的问题,以锥筒形壳体类零件为对象,对其成形机理进行了研究。Guo等^[13]针对Inconel 625高温合金管进行了缩颈研究,发现轴向进给速度对成形质量影响最大。

在针对回弹的研究中,Kang^[14]、康达冒^[15]等最早指出卸载后的板料会产生回弹而使零件出现形状误差。Kawai等^[16]通过实验研究了锥形件及半球形件无芯模旋压件的失效与回弹,并指出进给率越大回弹越大。束学道等^[17]选取GH4169高温合金渐变壁厚钣金机匣作为研究对象,引入进给比影响系数,将理论偏转角、进给比与偏转角回弹拟合得到偏转角回弹模型和回弹补偿公式。

综上所述,现有研究对于高温合金旋压技术研究的主流为热旋压成形,对于高温合金GH3030冷旋的研究内容较少,对于机匣旋压过程中的回弹角度大多还集中于单因素的研究。在旋压过程中,各个旋压参数存在着复杂的交互作用,其对最后的旋压件的表面质量的影响错综复杂。而在冷旋成形高温合金钣金机匣中,设备承担着巨大的旋压力,针对不同设备的性能要求,对工件的最大成形力也有所限制。目前,对旋压过程中成形载荷影响的研究还较少。因此,本文以高温合金GH3030为材料。首先,针对不同旋压工艺参数对钣金机匣冷态强旋成形的回弹角和载荷作用机制的影响规律进行了研究,采用正交实验得到了各工艺参数对回弹角影响的主次规律和最优工艺参数组合;然后,采用BBD(Box-Behnken design)响应曲面设计实验方法,得到旋压最大成形力与旋压参数的量化回归模型;最后,开展冷态强旋的旋压实验,对比分析了有限元仿真模拟结果与旋压实验实测结果,验证了仿真分析结果的可靠性。

1 钣金机匣冷态强旋成形回弹理论与载荷作用机制

1.1 冷态强旋成形回弹理论

板料旋压回弹主要是指成形结束时工件偏离预期尺寸的形状回弹,本文所研究的钣金机匣为薄壁锥形回转件,回弹主要发生在锥筒区。图1为回弹角表达示意图。图1中:实线部分为成形件内表面轮廓; θ 为芯模端面与芯模锥面母线的夹角,为理论偏转角; θ' 为工件旋压成形结束后芯模尾顶与工件内表面锥母线的夹角,称为实际偏转角; $\Delta\theta$ 为理论偏转角与实际偏转角之差,即回弹角。

图2为回弹角取点图。图2中,区域1为工件的端面,区域2为工件的锥筒区。为了使测得的回弹角更加准确,在旋压成形后的零件内表面选取16条锥母

线,测得第 k 条锥母线所对应的实际偏转角 θ'_k ,同时计算出第 k 条锥母线相对应的理论偏转角 θ_k ,使用式(1)、(2)进行平均回弹角的计算:

$$\Delta\theta_k = |\theta_k - \theta'_k| \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{16} \sum_{k=1}^{16} \Delta\theta_k \quad (2)$$

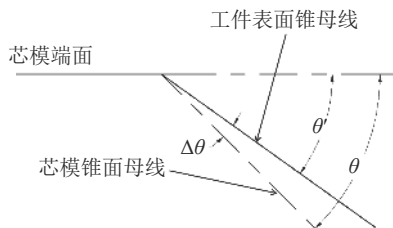


图1 回弹角表达示意图

Fig. 1 Springback diagram

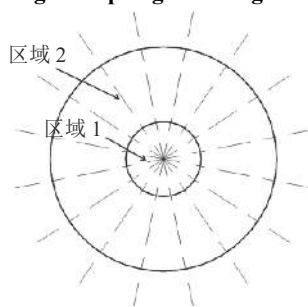


图2 回弹角取点图

Fig. 2 Springback angle point diagram

1.2 载荷作用机制

旋压过程中的成形载荷即变形力,是指旋轮直接施加在毛坯上的作用力。旋压力过大、旋压设备刚度和强度不足,将对零件的成形质量产生非常大的影响,同时也会损坏旋压设备使其使用寿命下降,因此,通过优化工艺参数等方法尽可能减小旋压力对成形质量以及设备维护都很有必要。图3为瞬时变形区的应力状态与旋压力。图3中, P_r 为坯料所受径向力, P_t 为坯料所受切向力, P_z 为坯料所受轴向力, P 为旋压合力。对图3中GH3030高温合金钣金机匣冷旋变形过程中旋压力进行分析,设置如下:芯模半锥角 45° 、旋轮间隙率20%、进给比0.6 mm/r。

图4为旋压成形时旋压力的变化规律。图4中,1、2、3、4分别为旋压过程中的初始阶段、中间阶段、最后阶段和脱离阶段。由图4的旋压合力 P 的曲线可以看出,旋轮进给的初始阶段,由于板料的弯曲变形及减薄,金属材料塑性变形迅速增加,旋轮受到较大冲击,旋压合力呈直线迅速增大。但是随着芯模直径的增加,旋轮前角参与变形的金属变少,金属流动更加平稳,旋压力略有减小。当坯料成形进入最后阶段,旋轮逐渐减小与工件的接触面积,坯料堆料现象逐

渐消失,为了达到相同的加工厚度要求,旋轮力迅速增加,旋轮合力达到了最大值13.9 kN。随后旋轮渐渐脱离工件,旋压力也迅速下降。

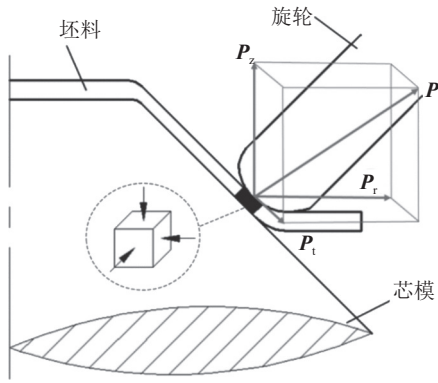


图3 瞬时变形区的应力状态与旋压力

Fig. 3 Stress state and spin pressure in instantaneous deformation zone

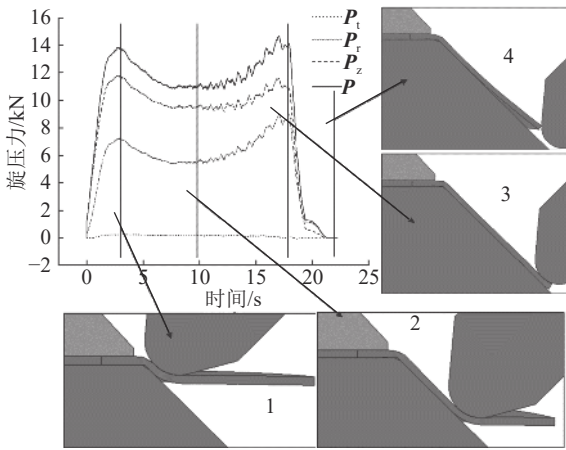


图4 旋压成形时旋压力的变化规律

Fig. 4 Variation rule of spinning pressure in spinning forming

2 旋压模型的建立

2.1 GH3030材料模型建立

GH3030高温合金是一种镍基高温合金,在800 °C以下具有较高的强度与塑性,抗疲劳及焊接性能优异,金相组织稳定,常应用于对材料性能要求较高的航空航天等行业。故本文使用GH3030进行钣金机匣的相关研究。

本文使用的GH3030材料本构模型为宁波大学零件轧制成形课题组通过拉伸实验获得的常温本构模型^[18],其材料应力范围在400~1 200 MPa,应变范围在0~0.4,符合本文要求,其本构方程如下所示:

$$\sigma = 1\,863.133\,4(0.066\,5 + \varepsilon)^{0.569\,8} \quad (3)$$

式中: σ 为单向拉伸时真实应力,单位为MPa; ε 为单向拉伸时真实应变。

2.2 旋压有限元模型的建立

坯料选取直径为120 mm的圆形平板,厚度为2 mm。**图5**为其芯模和旋轮的主要参数。**图5**中, R_2 为芯模顶部圆角半径, R_8 为旋轮R角。**图6**为具体仿真模型装配模型。

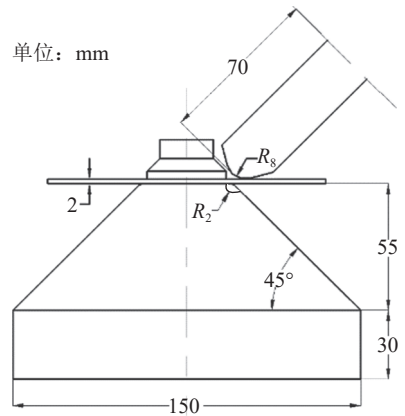


图5 模型主要参数

Fig. 5 Main parameters of model

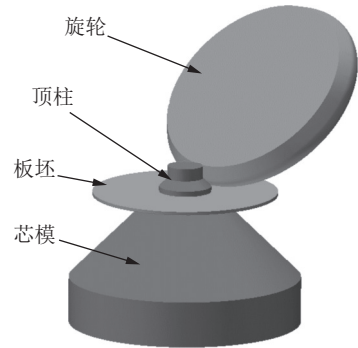


图6 装配模型

Fig. 6 Assembly model

主要的旋压工艺参数有壁厚减薄率、旋轮进给比、旋轮与芯模间隙等,他们的作用和影响存在着交互作用。以上内容本文并不一一研究,仅研究芯模半锥角、旋轮进给比和旋轮间隙率这几个工艺参数对锥形钣金件冷旋回弹与力能参数的交互影响关系。

3 工艺参数对钣金机匣冷态强旋成形回弹与载荷影响规律

由于机床等旋压设备等因素已经固定,接下来将对一些对回弹有较大影响又可实现的工艺等因素进行具体的研究。**表1**为实验中的旋压参数设置。

表1 实验中的旋压参数设置

Tab. 1 Spinning parameter settings

实验组号	旋轮间隙率 <i>G</i> /%	旋轮进给比 <i>f</i> /(mm·r ⁻¹)	芯模半锥角 <i>α</i> /(°)
1	10	0.4	35
2	15	0.5	40
3	20	0.6	45
4	25	0.7	50
5	30	0.8	55

图7、8分别为5组实验中,回弹角与旋压参数、旋压力与旋压参数的关系。

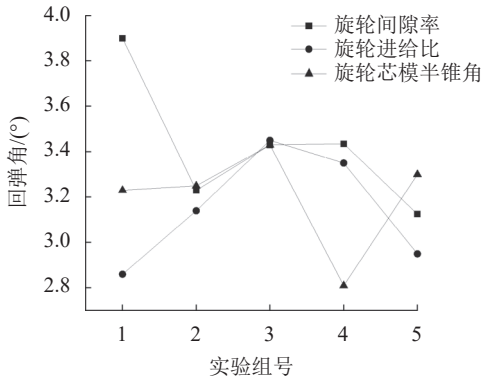


图7 回弹角与旋压参数关系

Fig. 7 Relationship between springback angle and spinning parameters

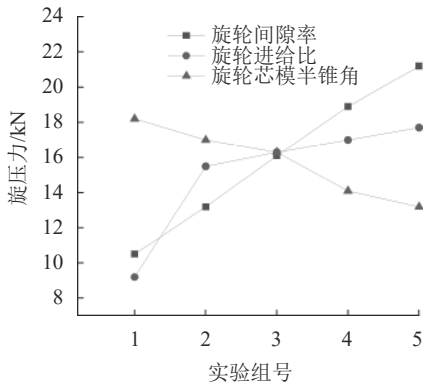


图8 旋压力与旋压参数关系

Fig. 8 Relationship between spinning pressure and spinning parameters

结合表1和图7、8分析可得如下结论:

1) 旋轮间隙率从10%增大到30%时,工件的回弹角呈现先减小后增大再减小的趋势;当旋轮间隙率为10%时,坯料减薄非常小,发生的塑性应变也相对较小,回弹角相对较大。间隙率由15%至25%阶段,旋轮与芯模间隙继续减小,回弹角呈增大趋势,这是由于随着间隙率继续增加,坯料减薄率继续增加,金属塑性流动加剧,金属塑性应变增加,相对应的回弹角也在增加,但是由于塑性应变对回弹的抑制作用大于弹性应变的增长,导致回弹的削弱。对于旋压力而言,由于芯模间隙率的增大,导致了塑性变形的增大,相应的,旋压力也随之增大。

2) 对于进给比而言,在旋轮进给比由0.4 mm/r增大到0.8 mm/r的过程中,回弹角度随着进给比的增大呈现先增大后减小的趋势;当进给比为0.4 mm/r时,进给量相对较小,旋轮进给时重复成形区域较大,重复成形区域中金属材料的变形充分,回弹较小;随着进给比的进一步增加,成形区域旋轮重复成形部分逐渐减小,工件整体成形区域的金属变形没有进给比较小时充分,但是如图8所示,旋压力随着进给比

增大逐渐增大,导致最终的回弹角将会减小,所以进给比由0.6 mm/r增大到0.8 mm/r时,回弹角随着进给比的增大而减小。

3) 当芯模半锥角35°增加至55°,回弹角呈先增大再减小后增大的趋势。芯模半锥角为芯模锥母线与芯模轴线的夹角,芯模半锥角越大,理论偏转角越小。当芯模半锥角处于35°至45°时,回弹角逐渐增大;当半锥角为45°时的回弹角最大,说明在45°半锥角成形时金属流动较为均匀,塑性变形也较大;当芯模半锥角达到50°时,金属塑性变形减小,工件的回弹减小,并达到最小值;当芯模半锥角继续增大到55°时,回弹角又有所增加,这是因为随着芯模半锥角的增大,旋压力也随着下降,旋压力也随着来到了一个较小的程度,因此回弹角也随着上升。

4 工艺参数的优化

4.1 正交实验方法优化回弹

工艺参数对钣金机匣强力旋压件的回弹具有显著影响,单因素影响分析只能定性地分析某工艺参数对旋压相关成形指标的影响,本文将对锥形钣金机匣的成形过程进行量化研究。在一定工艺参数取值范围内,得到旋轮间隙率、进给比以及芯模半锥角的最优工艺组合。

4.1.1 正交实验方案设计

根据3因素3水平的工艺参数,选择表号L9(3⁴)的正交表头^[19],为避免重复实验,正交表中设置了一系列空列,本文不再展示。表号中的各数字表示此正交设计表有3个水平4列9次实验,G在水平1、2、3下分别为10%、20%、30%;f在水平1、2、3下分别为0.4 mm/r、0.6 mm/r、0.8 mm/r;α在水平1、2、3下分别为35°、45°、55°。根据实验表对应的工艺参数组合在SIMU-FACT软件中进行有限元分析,以回弹角度为评价指标,按图1、式(1)、(2)的方法得到回弹角的具体数值。正交实验方案与实验结果见表2。

表2 正交实验方案与结果

Tab. 2 Orthogonal experiment schemes and results				
实验组号	旋轮间隙率G/%	旋轮进给比f/(mm·r ⁻¹)	芯模半锥角α/(°)	旋轮回弹角度/(°)
1	10	0.4	35	3.582 6
2	10	0.6	45	3.391 4
3	10	0.8	55	2.776 8
4	20	0.4	45	2.873 2
5	20	0.6	55	3.303 8
6	20	0.8	35	3.104 7
7	30	0.4	55	2.466 2
8	30	0.6	35	2.731 7
9	30	0.8	45	2.347 2

4.1.2 极差分析

表3为正交实验方案(表2)中回弹角度的极差分析结果。

表3 回弹角度极差分析

Tab. 3 Springback angle range analysis

因素	水平	回弹角/(°)	最优水平	R
G	1	9.75	3	2.210
	2	9.28		
	3	7.54		
f	1	8.92	3	1.200
	2	9.43		
	3	8.23		
α	1	9.42	3	0.872
	2	8.61		
	3	8.55		

表3中,回弹角越小,成形精度高。由表3可知,当G在水平3时的回弹角小于其在水平1、2时的回弹角,因此,水平3为最优选项,相同的方法可以判断出,同处在水平3的G、f、 α 为最优工艺组合,即在旋轮间隙率30%、旋轮进给比0.8 mm/r、芯模半锥角55°时,锥形旋压件回弹量最小,旋压成形精度最好。R为极差,表明因子对结果的影响幅度,R值越大说明它对所在因素的影响越大,各因素对应的R值排序为 $R_G > R_f > R_\alpha$,即旋轮间隙率对回弹角度的影响最大,旋轮进给比次之,芯模半锥角对锥形旋压件的回弹影响最小。

4.1.3 优化效果对比

对最优工艺组合的仿真结果进行分析,优化方案如表4所示。图9为优化后回弹角度与原实验方案中的结果。图9中,1~9号实验的方案见表2,10号实验的方案见表4。

表4 工艺参数优化方案

Tab. 4 Optimization scheme of process parameters

实验组号	旋轮间隙率G/%	旋轮进给比f/(mm·r ⁻¹)	芯模半锥角 α /(°)
10	30	0.8	55

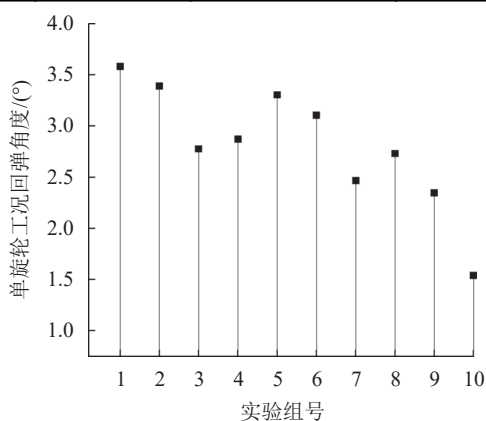


图9 优化效果对比

Fig. 9 Comparison of optimization effect

由图9可知,和之前方案的结果进行比较,进行工艺优化方案得到的锥形钣金旋压成形件的回弹角度最小,证明使用正交实验方法对旋压成形件回弹角度的工艺参数优化效果较理想,得到的最优工艺参数组合能够用于指导回弹优化分析。

4.2 BBD实验方法优化载荷

BBD方法是一种3水平响应曲面设计,属于球面设计方法,所有的参与设计的点都均匀分布在球的半径上,该方法不会出现立方体顶点上的设计点,并且可以通过选择特殊的实验点提高2阶模型各系数的精度^[20-21]。

4.2.1 基于BBD的薄壁锥形件旋压成形实验方案设计

本文通过BBD方法以旋轮间隙率G、旋轮进给比f、芯模半锥角 α 作为因素变量,选取最大成形力 R_1 (kN)作为响应,得到3因素3水平1响应的BBD实验设计方案共17组,方案及结果见表5。

表5 BBD实验设计方案及结果

Tab. 5 Experiment schemes and results for BBD

实验组号	G/%	f/(mm·r ⁻¹)	α /(°)	R_1 /kN
1	10	0.4	45	10.229 7
2	20	0.6	45	16.346 8
3	30	0.6	55	25.263 1
4	10	0.6	55	8.007 6
5	20	0.4	35	16.081 3
6	20	0.6	45	16.346 8
7	20	0.4	55	12.349 7
8	20	0.6	45	16.346 8
9	20	0.8	55	14.667 1
10	20	0.6	45	16.346 8
11	30	0.8	45	23.857 0
12	30	0.6	35	20.881 1
13	20	0.6	45	16.346 8
14	30	0.4	45	18.342 4
15	10	0.8	45	11.167 0
16	10	0.6	35	13.695 8
17	20	0.8	35	20.009 1

4.2.2 最大成形力的工艺参数影响规律分析

根据表5中的结果,进行响应与因素的拟合分析,对于最大旋轮力响应 R_1 ,采用2FI模型进行拟合,得到回归方程如下:

$$R_1 = 30.1075 - 0.9107G + 5.5506f - 0.512\alpha + 0.5722Gf + 0.0252G\alpha - 0.2013f\alpha \quad (4)$$

对式(4)中的最大成形力进行方差分析,结果如表6所示。表6中,P值表明该模型的显著程度。由表6中的结果可知,该模型高度显著($P < 0.05$),旋轮间隙率、旋轮进给比、芯模半锥角对最大成形力影响显

著(P 值 <0.05),这也证明了对旋压成形工艺参数研究的必要性。

表 6 R_1 回归方程的方差分析

类型	SS	F值	P值	显著性
本文模型	320.73	42.21	<0.001	显著
G	255.87	202.06	<0.001	显著
f	20.15	15.91	0.003	显著
α	13.47	10.64	0.009	显著
Gf	5.24	4.14	0.069	不显著
$G\alpha$	25.35	20.02	0.001	显著
$f\alpha$	0.65	0.51	0.490	不显著

注:SS为变差平方和, P 值为无显著性影响的概率, F 值为方差分析中组间均方与组内均方的比值。

对回归方程进行方差分析,计算它的多元相关系数、可信度、精确度等,结果见表7。表7中,多元相关系数值越大,说明相关性越好。调整 R^2 和预测 R^2 这两个值越高且越接近,则说明回归模型中的工艺过程对响应的影响越大;如果两个值不高则说明可能有其他会产生显著影响的因素。可信度小于10%则说明实验的可信度较高,精度也较高。精密度是有效信号与噪声的比值,大于4则表明它是在正常范围内^[22]。由表7可知:响应的多元相关系数值达到0.962,模型的相关性非常好;调整 R^2 值达到0.939,预测 R^2 值为0.805,两者数值都较高,说明旋轮间隙率、进给比、芯模半锥角对最大成形力的影响较大;可信度为6.92,精密度为24.73,都说明了实验的可信度和精确度较高,较为合理。

表 7 对 R_1 进行回归方程误差统计分析

统计项目	值
标准差	1.13
平均值	16.25
可信度/%	6.92
多元相关系数	0.962
调整 R^2	0.939
预测 R^2	0.805
精密度	24.73
预测残差平方和	64.88

图10、11分别为回归模型的残差正态概率分布、预测值与实际值分布情况,通过这两张图可以判断回归模型的准确性、适应性。如果残差正态概率均匀分布于一条直线附近则说明回归模型的适应性好,残差实际值与预测值也应尽量分布在一条直线附近。

由图10可知,残差的概率分布都较好地分布在所拟合结果直线的附近,说明该回归模型的适应性好,针对旋压成形的最大成形力的响应拟合结果精度较高,图11中的结果也证实了这点。

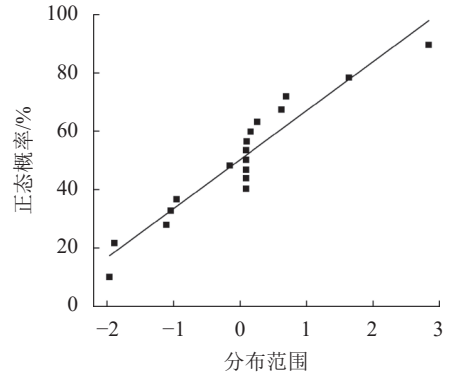


图 10 残差的正态概率

Fig. 10 Normal probability distribution of residuals

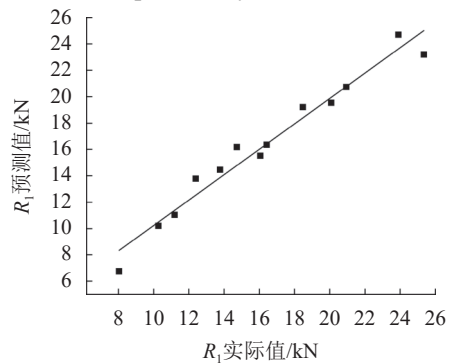


图 11 预测值与实际值的分布情况

Fig. 11 Distribution of predicted values and actual values

4.2.3 模型的仿真验证

为了验证拟合方程的准确性,增加了4组不同工艺参数的仿真结果进行对比验证,仿真结果与模型预测值的对比数据见表8。由表8可知,最大成形力响应 R_1 仿真结果值与模型预测值的误差在0.07%~9.61%,模型精度较高,可作为旋压成形力的预测模型使用。

表 8 实验数据与模型预测值的比较

Tab. 8 Comparison between experimental data and the predicted values of the model

序号	$G/\%$	$f/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\alpha/(\text{^\circ})$	模型预测值/kN	仿真实验值/kN	误差/%
1	20	0.5	40	16.007	16.069	0.39
2	20	0.7	40	17.795	17.784	0.07
3	20	0.5	50	14.911	13.603	9.61
4	20	0.7	50	16.297	14.991	8.71

5 实验验证

以上的研究内容都是基于SIMUFACT. FORMING有限元仿真软件对GH3030高温合金薄壁锥形件

的冷强旋过程进行的相关分析,仿真分析过程中的一些参数与设置都是经过简化且为理想化模型,在实际旋压成形过程中,会存在各种误差因素,其中,最大的误差就是与旋压设备的刚度与精度息息相关的加工误差,这将导致仿真分析结果与旋压实验实际加工出的旋压件结果产生一定偏差。为了验证仿真结果的可靠性,有必要使用相同的材料在相同的条件下进行冷强旋的实验验证,图12、13分别为实验中的坯料装配图和坯料旋压图。

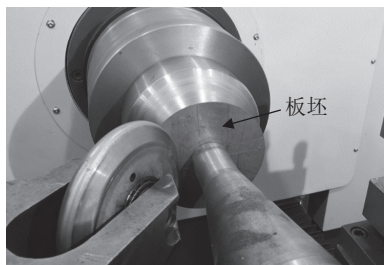


图12 坯料装配图
Fig. 12 Blank assembly drawing

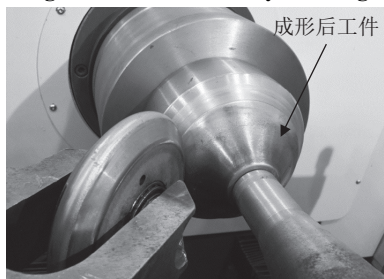


图13 坯料旋压图
Fig. 13 Spinning diagram of blank

5.1 旋压实验

表9为旋压实验采用的实验方案,一共为9组。

表9 旋压实验方案

Tab. 9 Spinning experiment scheme

实验组号	旋轮间隙率 <i>G</i> /%	旋轮进给比 <i>f</i> /(mm·r ⁻¹)	芯模半锥角 <i>α</i> /°
1	10	0.4	45
2	10	0.6	45
3	10	0.8	45
4	15	0.4	45
5	15	0.6	45
6	15	0.8	45
7	20	0.4	45
8	20	0.6	45
9	20	0.8	45

图14为高温合金GH3030薄壁锥形钣金旋压件。从图14中可以看出,锥形钣金件冷强旋的成形质量非常好,由于进给比在合理范围内,9个实验件的表面质量良好,表面光滑且无螺旋纹等缺陷。



图14 GH3030 高温合金薄壁锥形钣金旋压件
Fig. 14 Thin wall conical spinning parts of GH3030 superalloy

5.2 旋压实验结果分析

根据之前采样方法对锥形钣金旋压件进行数据分析,得到成形件的回弹角度实验真实值,表10为回弹角实验结果、仿真结果及两者误差。

表10 单旋轮单因素旋压实验的回弹角

Tab. 10 Springback angle of single roller single factor spinning experiment

实验组号	实验结果/°	仿真结果/°	误差/%
1	2.718	3.064	11.3
2	3.253	3.391	4.1
3	2.915	3.241	10.1
4	3.016	3.167	4.8
5	3.150	3.245	2.9
6	3.050	3.228	5.5
7	2.537	2.873	11.7
8	3.454	3.438	0.5
9	3.114	2.973	4.7

由表10可知,在设计的9个实验中,锥形钣金件回弹角度的实验实测值与仿真结果的误差,最小为8号,只有0.5%,最大为7号,误差为11.7%,总体来看,仿真分析结果较为可靠,以有限元软件为基础的仿真模拟结果可以作为实际旋压生产的指导。

图15为旋压实验仿真与实验结果对比。图15中,旋压实验回弹角度的实测值普遍要低于仿真实验的值,这是因为当机床主轴与旋轮进给系统的刚性不足时,会出现跳动及退刀,这将使旋轮进给与坯料的成形轨迹偏离预期,旋轮间隙率达不到设计值,坯料的变形小于预设变形量。从纵向来看,回弹角度仿真值与实验值变化趋势几乎相同,平均误差在6.2%,显著低于束学道等^[17]的研究结果水平(拟合所得偏转角回弹方程和壁厚回弹方程的最大误差分别为12.27%和15.0%);其针对实验结果的有限元仿真对比分析结果的误差也小于岑泽伟等^[23]针对凸缘的误差分析结果(有限元分析结果与实验结果误差在19%以内)和凌泽宇等^[12]针对壁厚分析的误差结果(壁厚仿

真结果与实验样件结果误差在9.5%)。这说明本文的仿真分析的结果能够较准确地展现旋压件的回弹规律。

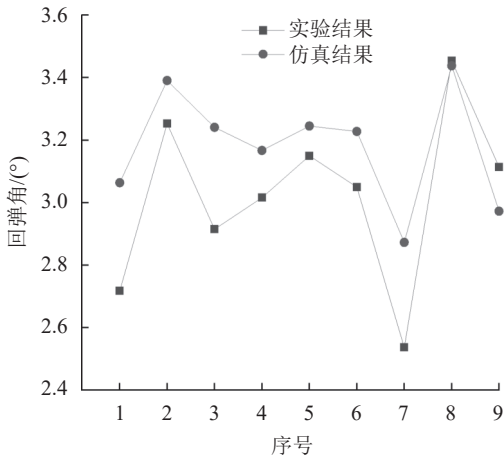


图 15 仿真与实验结果对比

Fig. 15 Comparison of simulation and experimental results

6 结论

1) 旋压力与旋轮间隙率、进给比和芯模半锥角之间存在着明显的线性规律。

2) 通过正交实验法, 确定了在一定范围内的最佳工艺参数组合, 即当旋轮间隙率为30%、旋轮进给比为0.8 mm/r、芯模半锥角为55°时, 锥形旋压件回弹量最小, 旋压成形精度最好; 各工艺参数对回弹角度的影响程度的主次关系为旋轮间隙率对回弹角度的影响最大, 旋轮进给比次之, 芯模半锥角对单旋轮锥形旋压件的回弹影响最小。

3) 通过BBD设计方法, 得到了各旋压参数对最大旋压力的回归方程, 并对其进行验证, 表明回归方程可靠性较高, 对实际生产具有参考意义。

4) 实验的结果表明: 仿真分析的回弹角度与实验测得回弹角度变化趋势几乎相同, 并且误差不大, 控制在12%以内, 说明仿真分析的结果能够较准确地展现旋压件的回弹规律。

参考文献:

[1] Xu Hengqiu, Fan Guisen, Zhang Rui, et al. The application and development of spinning equipment and technology[J]. *New Technology & New Process*, 2007(2):6-8. [徐恒秋, 樊桂森, 张锐, 等. 旋压设备及工艺技术的应用与发展[J]. *新技术新工艺*, 2007(2):6-8.]

[2] Huang Liang, Zeng Rong, Zhang Xiaoting, et al. Study on plastic deformation behavior of hot splitting spinning of TA15 titanium alloy[J]. *Materials & Design*, 2014, 58:465-474.

[3] Zhang Cheng, Yang Haicheng, Han Dong, et al. Applications and development of titanium alloys spinning technology in

domestic aerospace field[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, 36(1):127-132. [张成, 杨海成, 韩冬, 等. 钛合金旋压技术在国内航天领域的应用及发展[J]. *固体火箭技术*, 2013, 36(1):127-132.]

- [4] Fan Shuqin, Hua Yi, Zhao Shengdun, et al. Electromechanical Co-simulation of the double-roller clamping spinning device driven by multiple AC servo motor[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(22):140-144. [范淑琴, 华毅, 赵升吨, 等. 多电机驱动的双辊夹持旋压成形装置的机电联合仿真[J]. *机床与液压*, 2019, 47(22):140-144.]
- [5] Niklasson F. Shear spinning of nickelbased super-alloy 718 [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018:769-778.
- [6] Cen Zewei, Shu Xuedao, Ye Bohai, et al. Effects of process parameters on wall thickness uniformity of GH4169 tapered rotary parts with wall thickness gradient in hot power spinning process[J]. *Journal of Ningbo University*, 2021, 34(1):33-38. [岑泽伟, 束学道, 叶博海, 徐振威. 工艺参数对GH4169壁厚渐变锥形回转件热强旋成形壁厚均匀性的影响[J]. *宁波大学学报*, 2021, 34(1):33-38.]
- [7] Liu Yanli, Shu Xuedao, Cen Zewei, et al. Effects of process parameters on surface straightness of variable-section conical parts during hot power spinning[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(17):8187.
- [8] Zhu Ningyuan. Study on shape/property integrated control of difficult-to-deform metal cylindrical parts during thermal strong spinning process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. [朱宁远. 难变形金属筒形件热强旋过程形/性一体化控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.]
- [9] Wang Xingkun. Forming mechanism and process parameter optimization of hard-to-deform metal cylindrical parts by hot strong spinning[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. [王兴坤. 难变形金属筒形件热强旋成形机理及工艺参数优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.]
- [10] Xiao Gangfeng, Zhu Ningyuan, Long Jinchuan, et al. Research on precise control of microstructure and mechanical properties of Ni-based superalloy cylindrical parts during hot backward flow spinning[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34:140-147.
- [11] Li Zixuan, Shu Xuedao. Residual stress analysis of multi-pass cold spinning process[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(3):259-271.
- [12] Ling Zeyu, Xiao Gangfeng, Xia Qinxiang, et al. Research on deep drawing spinning forming mechanism of conical-cylindrical part of Ni-based superalloy[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45(2):100-105. [凌泽宇, 肖刚锋, 夏琴香, 等. 镍基高温合金锥筒形件拉深旋压成形机理研究[J]. *锻压技术*, 2020, 45(2):100-105.]
- [13] Guo Xunzhong, Li Bo, Jin Kai, et al. A simulation and experiment study on paraxial spinning of Ni-based superalloy tube [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(9):4399-4407.
- [14] Kang Dachang, Gao Xicheng, Meng Xiaofeng, et al. Study on the deformation mode of conventional spinning of plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 91(1/2/3):

226–230.

- [15] Kang Dachang, Gao Xicheng, Meng Xiaofeng, et al. Study on deformation mode of conventional spinning of plates[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 1998, 5(4): 102–106. [康达昌, 高西成, 孟晓峰, 等. 平板毛坯普旋变形方式的研究[J]. *塑性工程学报*, 1998, 5(4): 102–106.]
- [16] Kawai K, Yang L N, Kudo H. flexible shear spinning of axisymmetrical shells with a general-purpose mandrel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192/193: 13–17.
- [17] Shu Xuedao, Xia Yingxiang, Ye Bohai, et al. Research on springback and springback compensation in spinning forming of sheet metal casing with gradual thickness variation[J]. *Applied Science and Technology*, 2022, 49(1): 115–121. [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.]
- [18] Wang Yu. Study on forming quality of GH3030 superalloy conical rotary parts with gradually changing wall thickness by power spinning[D]. Ningbo: Ningbo University, 2018. [王雨. GH3030高温合金壁厚渐变锥形回转件强力旋压成形质量研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2018.]
- [19] 王岩, 隋思涟. 试验设计与MATLAB数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [20] Montgomery D C. Design and analysis of experiments[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1991.
- [21] Mason R L, Gunst R F, Hess J L. Statistical design and analysis of experiments: With applications to engineering and science[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2003.
- [22] Kunert J, Ewers R, Kleiner M, et al. Optimisation of the shear forming process by means of multivariate statistical methods[R]. Dortmund: Dortmund University of Technology, 2005.
- [23] Shu Xuedao, Cen Zewei, Wang Yu, et al. Exploring strong spinning formation mechanisms of GH3030 superalloy tapered rotary part with wall thickness gradient[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2019, 37(4): 785–793. [束学道, 岑泽伟, 王雨, 等. GH3030高温合金壁厚渐变锥形回转件强力旋压成形仿真及机理分析[J]. *西北工业大学学报*, 2019, 37(4): 785–793.]

Study on Influence of Process Parameters on Mechanical Behavior of Casing Cold Power Spinning

SHU Xuedao^{1,2}, ZHENG Jiabin^{1,2}, LIU Yanli^{1,2}, XU Haijie^{1,2}, XIE Chao^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Eng. & Mechanics, Ningbo Univ., Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Provincial Key Lab. of Part Rolling Technol., Ningbo Univ., Ningbo 315211, China)

Abstract: It is difficult to form aviation sheet-metal casing materials, and the precision of the formed products is also difficult to control; considering these problems, in this work, the superalloy GH3030 was considered as a material. On the basis of clarifying the springback theory and the load mechanism of cold strong spinning forming of sheet-metal casings, the Simufact Forming finite-element software package was used to import the constitutive equation of GH3030 obtained prior to the laboratory experiments, and a simulation model of cold strong spinning of aviation-casing conical parts was established. The influences of spinning parameters such as the roller gap, roller feed ratio, and mandrel half-cone angle on the springback and load were analyzed. The primary and secondary rules of the influence of each process parameter on the springback angle were obtained by orthogonal testing, and an optimal combination of process parameters was obtained on this basis. The Box–Behnken design response surface test method was used to obtain a quantitative regression model for the maximum forming force and spinning parameters, and variance analysis of the regression equation was carried out to calculate its multivariate correlation coefficient, reliability, and accuracy. The final results show that the reliability and accuracy of the obtained model are high, and the error is less than 10% when the final experimental and simulation results are compared. Therefore, the regression model is very accurate. Finally, spinning experiments were carried out, and the springback angles of the simulation results and the measured results from these experiments were compared and analyzed. The average error was within 6.2%, and this verifies the reliability of the simulation results and the regression model. This work shows that the trend in the springback angle obtained from the simulation analysis is almost the same as that measured in experiments, and the error is controlled within 12%, indicating that the results of the simulation analysis can accurately represent the springback law of the spinning parts. As such, this paper provides theoretical guidance and technical support for the accurate forming of conical parts from cold strong rotation of high-temperature alloy sheet-metal casings.

Key words: sheet metal casing; high temperature alloy GH3030; cold strong spin; springback; forming force

(编辑 吴芝明)

引用格式: Shu Xuedao, Zheng Jiabin, Liu Yanli, et al. Study on influence of process parameters on mechanical behavior of casing cold power spinning[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(4): 229–237. [束学道, 郑家斌, 刘艳丽, 等. 工艺参数对机匣冷态强力旋压力学行为影响规律研究[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(4): 229–237.]