

工艺参数对 5CrNiMo18 变截面锥形薄壁回转件 强力旋压成形壁厚均匀性影响

束学道^{1,2}, 朱 颖^{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: 锥形薄壁回转件大量应用于航空航天领域, 变截面锥形回转件是其中难以成形的零件之一。本文基于 Simufact.Forming 仿真软件, 对 5CrNiMo18 不锈钢材料强力旋压成变截面锥形薄壁回转件的过程进行仿真模拟, 分析芯模转速、旋轮进给比、摩擦系数 3 个主要工艺参数对锥形件的壁厚均匀性的影响。使用正交试验方法设置参数组合, 用极差法分析试验数据, 得出影响因素的主次及较优参数组合。研究表明: 当芯模转速 $1200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 旋轮进给比 $1 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$, 摩擦系数 0.15 时, 壁厚极差最小。旋轮进给比对壁厚极差影响最大, 随着旋轮进给比增大, 壁厚极差先增大后减小; 芯模转速对壁厚极差影响次之, 随着芯模转速增大, 壁厚极差先减小后增大。研究结果为提高旋压成形航空机匣质量提供了理论基础。

关键词: 锥形回转件; 强力旋压; 壁厚均匀性; 变截面

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 01-0008-05

随着航空航天事业的发展, 以旋压工艺生产航空航天领域薄壁锥形件变得日益普遍。以航空发动机钣金机匣、罩壳等零件为代表, 使用旋压工艺对其成形, 可得到精度更高, 材料利用率更高的零件。传统的薄壁回转件的加工多采用冲压、液压胀形等方式, 多工步的加工耗时, 耗费巨大。与这些传统加工方式相比, 强力旋压具有金属变形条件好; 材料利用率高; 与板料接触面积小, 成形力低; 成品表面粗糙度低; 加工设备简便等优点, 较适用于薄壁锥形回转件的成形。而阶梯状变截面的锥形薄壁回转件在满足承受载荷的同时, 可以减小零件的重量, 减少材料消耗, 对其研究具有实用意义。在塑性加工工艺中, 多采用冲压等方式, 多工步成形的情况下, 不仅零件的成形精度不高, 而且模具的制造、维护费用巨大。针对阶梯状变截面的锥形回转件的薄壁、高精度的特性, 强力旋压具有较好的实施性。

夏琴香等^[1]基于 ABAQUS/Explicit 平台建立了

锥形回转件强力旋压的有限元模型, 研究了旋轮进给比、旋轮与芯模之间的间隙偏离率 2 个工艺参数对旋压件壁厚偏差和圆度的影响规律。结果表明: 随着旋轮进给比和间隙偏离率的增加, 锥形回转件的壁厚偏差和圆度都是先减小后增大。王雨等^[2]建立有限元模型, 使用 Simufact.Forming 有限元软件分析了旋轮圆角半径、旋轮进给比、旋轮安装角及芯模转速等因素对薄壁锥形回转件强力旋压成形中凸缘平直度的影响规律。结果表明: 随着旋轮进给比的增加, 凸缘平直度呈现降低趋势; 随着芯模转速提高, 凸缘平直度增大后趋于平稳。周强等^[3]主要研究了带加强筋的变截面锥形回转件的成形, 基于 ABAQUS/Explicit 平台建立了锥形回转件强力旋压的有限元模型, 分析坯料半锥角、旋轮进给比及旋轮圆角半径等工艺参数对内筋成形质量的影响规律、金属流动规律。结果表明: 随着旋轮圆角半径的增加, 应变值增加, 更有利于锥形回转件内筋的成形; 较大的初始半锥角、较小的进

收稿日期: 2017-11-07.

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

基金项目: 国家自然科学基金(51475247); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ17E050001); 浙江省科技计划项目(2016C31018)。

第一作者: 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

给比对锥形回转件的成形也是有利的. 徐银丽等^[4]基于 ABAQUS/Explicit 平台建立了有限元模型, 研究了旋轮圆角半径、旋轮安装角、旋轮进给比及摩擦系数等旋压成形主要参数对 1Cr18Ni9Ti 材料的异型薄壳体强力旋压成形效果的影响规律. 结果表明: 较大的摩擦系数和旋轮安装角, 较小的旋轮圆角半径和旋轮进给比更有利于 1Cr18Ni9Ti 材料的塑性成形, 可得到更均匀分布的壁厚. Chen 等^[5]直接进行旋压成形试验, 研究 1100-0 铝合金材料的锥形件剪切旋压成形, 得出了工艺参数对旋压力和锥形件表面粗糙度的影响. 刘伟军等^[6]针对 Mg-13Gd4Y2Zn0.6Zr 镁合金材料, 研究了锥形回转件内环筋的挤压成形, 选择成形温度、挤压速度以及分瓣凸膜圆角半径作为影响因子, 进行了 Deform 仿真模拟, 研究了各因素对成形载荷及平均应变影响的先后顺序, 得出了最优因素组合, 最后进行了实验验证. 结果表明: 针对成形载荷, 变形温度影响最大; 针对应变速率, 凸模圆角半径影响最大. Kalpakcioglu^[7]曾使用试验的方式探寻强力旋压成形中材料的变形机理, 为强力旋压的发展提供理论依据.

目前, 关于变截面锥形回转件的强力旋压成形的研究主要集中在钛合金、铝合金等材料的均匀壁厚变形领域, 并形成了大量的理论, 有利于生产实践的实施. 但是, 关于 5CrNiMo18 不锈钢材料的强力旋压成形, 尤其是对阶梯状变截面的壁厚分布的研究, 未见报道.

本文在正交试验的前提下, 以极差分析得到的壁厚差为评价指标, 衡量壁厚均匀性的优劣. 以 5CrNiMo18 不锈钢圆形板料为坯料, 对芯模旋转速度、旋轮进给比、剪切摩擦系数 3 个工艺参数在阶梯状变截面的锥形回转件的强力旋压成形过程中对壁厚均匀性的影响进行较系统研究, 并获得影响因素主次排序^[8]. 研究结果为提高旋压成形航空机匣质量提供理论基础.

1 有限元模型建立及方案确定

图 1 所示为目标成形的锥形回转件, 顶部壁厚 2 mm, 锥形薄壁部分壁厚分别是 1 mm 的一段、由 1.7 mm 均匀变化至 2 mm 的一段. 采用强力旋压方式一道次旋压成形.

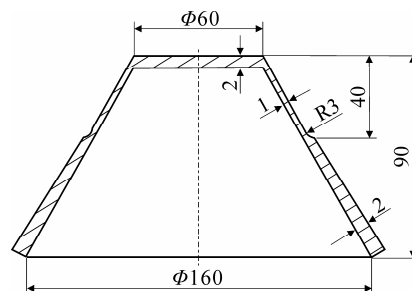


图 1 目标成形的变截面锥形薄壁回转件结构

1.1 毛坯计算

在实际生产中, 采用板坯强力旋压成锥形回转件时, 板坯外形可采用方形或圆形, 甚至是多边形, 可根据锥形回转件的截面形状自行定义. 其中, 圆形板坯更适用于变截面的锥形回转件的成形.

锥形回转件的强力旋压成形过程中, 工件的壁厚减薄率遵循正弦律, 即

$$t = t_0 \sin \alpha, \quad (1)$$

式中, t 为目标成形的锥形回转件壁厚; t_0 为坯料厚度; α 为芯模半锥角.

当芯模的半锥角 α 不变时, 锥形回转件的厚度 t 随着坯料的厚度 t_0 均匀变化. 坯料的尺寸计算完成后, 应增加适当的加工余量. 圆形坯料的直径 D_0 可根据下式计算:

$$D_0 = D_1 + \Delta, \quad (2)$$

式中, D_1 为锥形回转件坯料的理论计算值, mm; Δ 为加工余量, mm. 加工余量 Δ 计算公式:

$$\Delta = 2 \sum_{i=1}^n \delta_i \frac{t_{i-1}}{t}, \quad (3)$$

式中, n 为强力旋压的次数; i 为第 i 次强力旋压; δ_i 为第 i 次强力旋压留的加工余量, mm; t_i 为第 i 次强力旋压完成后的锥形件壁厚, mm.

对于需要多道次旋压成形的锥形回转件, 坯料加工余量应适当地留大一些; 对于仅需单道次旋压成形的锥形回转件, 加工余量应少一些. 在实际生产中, 每道次加工余量一般是 15~20 mm.

综上, 选择的坯料是 t_0 为 2 mm, D_0 直径为 200 mm 的圆形板料.

1.2 三维建模

图 2 所示为强力旋压成形的结构. 坯料在顶块的作用下固定在芯模顶部, 芯模以固定转速旋转, 同时带动坯料旋转. 旋轮按照预设定的轨迹运动, 对板料施加压力, 同时在坯料的带动下被动旋转.

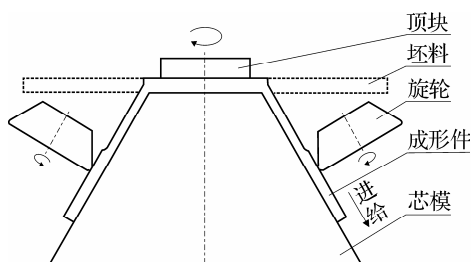


图2 锥形件强力旋压结构简图

1.3 试验方案确定及结果分析

为研究芯模旋转速度、旋轮进给比、摩擦系数对壁厚为 1mm 部分的壁厚均匀性影响,使用正交试验的方法,制定无交互作用的 3 因素 3 水平的正交试验表,并使用极差分析法分析结果^[9]。试验设计方案如表 1 所示。

表1 壁厚均匀性试验方案与结果分析

因素	芯模转速 $\omega/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	旋轮进给比 $f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	摩擦系数 μ	壁厚极差/%
1	360	0.5	0.05	2.67
2	360	0.7	0.15	3.70
3	360	1.0	0.30	3.07
4	600	0.5	0.15	3.70
5	600	0.7	0.30	3.87
6	600	1.0	0.05	4.23
7	1 200	0.5	0.30	2.69
8	1 200	0.7	0.05	4.58
9	1 200	1.0	0.15	1.65
T_1	9.44	9.06	11.40	
T_2	11.80	12.15	9.05	
T_3	8.92	8.95	9.63	
优水平	3	3	2	
R	2.88	3.20	2.43	
主次顺序	$R_f=3.2>R_\omega=2.88>R_\mu=2.43$			

注: T 代表所有指标值的和, 即 $T = \sum x_i$, 得出 $T=30.16$; T_i 为任意列上水平号为 $i=1,2,3$ 时对应的试验指标和; R 为极差。

2 工艺参数影响分析

2.1 正交试验结果分析

极差分析法又称为 R 法, 它具有计算快捷、直观易懂等优点, 是分析正交试验结果最常用的方法之一。

根据 T_i 值判断各因素的优水平, 对于壁厚均匀性, 壁厚极差越小越好, 所以选择 T_i 值最小时对

应的水平, 因此可以判断出芯模转速的优水平是 3, 旋轮进给比的优水平是 3, 摩擦系数的优水平是 2。R 值反映了各因素的水平变动时, 试验指标的变动幅度。R 值越大, 该因素的变化对试验指标的影响越大。因此, 依据极差 R 的大小, 可以判断各因素的主次。根据表 1 中的 R 值判断, 各因素的影响顺序为: 旋轮进给比 f 、芯模转速 ω 、摩擦系数 μ 。

当工艺参数组合是芯模转速 $1200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、旋轮进给比 $1 \text{ mm}\cdot\text{r}^{-1}$ 、摩擦系数 0.15 时, 壁厚均匀性最好。在较优组合的成形条件下, 旋轮沿坯料轴线方向运动时间和旋压力的关系如图 3 所示; 旋压进程完成后, 锥形件各部分的屈服应力如图 4 所示。

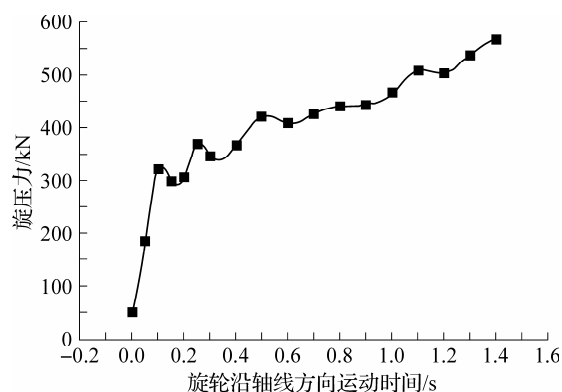


图3 旋轮沿轴线方向运动时间和旋压力的关系

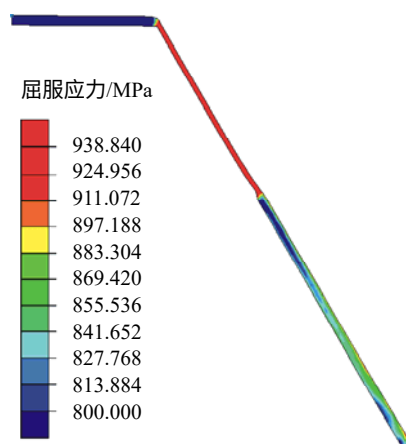


图4 锥形件各部分的屈服应力

由图 3 可以看出, 在壁厚减薄区域旋压力急剧增大, 这是因为 5CrNiMo18 不锈钢材料在成形过程中产生加工硬化。同理, 各部分屈服应力增大。

2.2 旋轮进给比

旋轮进给比和壁厚极差的关系如图 5 所示。分析不同芯模转速的情况下, 旋轮进给比和壁厚极

差的关系. 由图 5 可以看出, 在芯模转速固定的情况下, 随着旋轮进给比的增大, 壁厚极差的整体变化趋势是先增大后减小, 较小的旋轮进给比对应更小的壁厚极差, 锥形回转件成形精度更高.

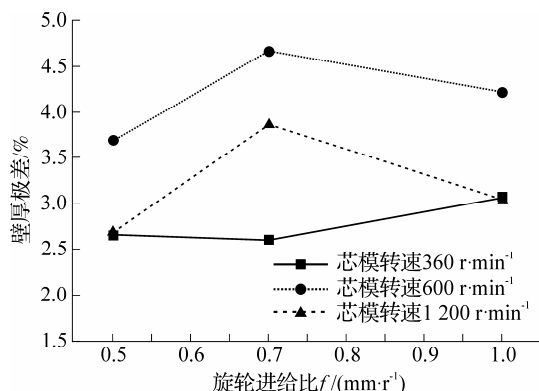


图5 旋轮进给比和壁厚极差的关系

旋轮进给比的大小对旋压变形有明显的影响. 在锥形件的强力旋压成形中, 选择较小的旋轮进给比成形, 坯料变形的进程较慢, 单位时间内与旋轮接触的金属较少, 因而金属的轴向流动较慢, 壁厚分布更均匀, 成形效果更好^[10]. 旋轮进给比较大时, 单位时间内流过旋轮的金属更多, 接触不均匀, 因而壁厚差更大. 壁厚极差的增大, 说明锥形回转件的强力旋压过程中, 坯料的变形越来越不均匀.

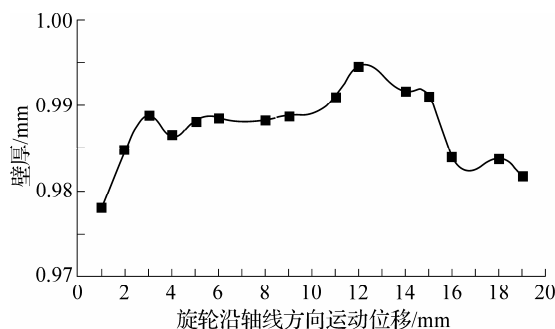


图6 旋轮沿轴线方向的运动位移和壁厚的关系

在壁厚极差最小的较优组合的加工条件下, 分析轴向距离和壁厚极差的关系. 从图 6 中可以看出, 随着旋轮轴向移动, 锥形回转件的厚度也逐渐增大, 这一方面是因为 5CrNiMo18 不锈钢板在成形初期就会产生严重的硬化, 金属开始出现堆积. 随着旋轮进给比的增加, 金属堆积也越来越严重, 而且, 金属堆积使得实际的壁厚减薄率增加^[11].

2.3 芯模转速

因为旋轮进给比对壁厚极差影响最大, 因而

分析不同旋轮进给比的情况下, 芯模转速和壁厚极差的关系(如图 7 所示).

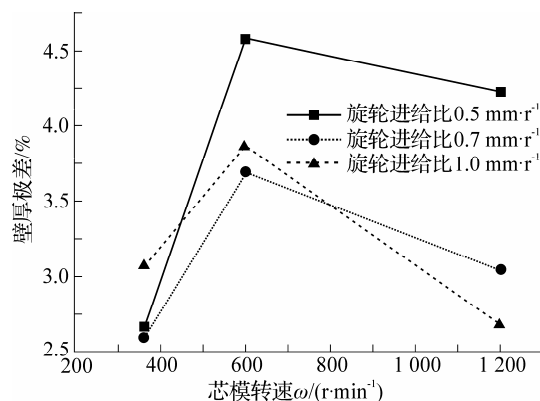


图7 芯模转速和壁厚极差的关系

芯模转速虽然与旋压设备和生产率有直接关系, 但是转速的变化对强力旋压变形的成形质量影响并不显著. 在一定范围内, 芯模转速的提高可以降低锥形回转件表面的粗糙度, 提高生产效率. 从图 7 中可以看出, 在一定的进给比的成形条件下, 锥形回转件的壁厚极差随着芯模转速的提高, 整体趋势是先增大后减小. 较小的芯模转速和旋轮进给比、较大的芯模转速和旋轮进给比搭配, 锥形件的成形壁厚差较小, 成形精度更高.

2.4 摩擦系数

分析不同芯模转速的情况下, 摩擦系数和壁厚极差的关系(如图 8 所示).

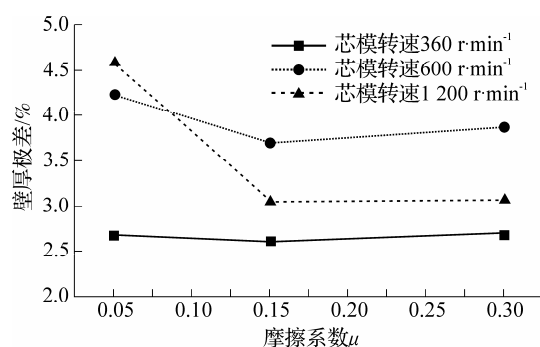


图8 摩擦系数和壁厚极差的关系

当芯模转速一定时, 随着摩擦系数的增大, 壁厚极差总体趋势是减小. 因为, 在坯料的减薄方向上, 旋轮做主动运动, 在摩擦力的作用下坯料沿着切向变形, 摩擦力越大, 则变形越大. 摩擦力是摩擦系数与变形力共同作用的结果. 所以, 摩擦系数比较大时, 壁厚极差反而小^[12].

3 结论

(1)对正交试验的结果进行极差分析得出,对于锥形回转件的强力旋压成形,旋轮进给比影响最大,芯模转速次之,摩擦系数影响最小。

(2)随着旋轮进给比的增大,壁厚极差先增大后减小;随着芯模转速的提高,壁厚极差先增大后减小;随着摩擦系数的增大,壁厚极差减小。

(3)在参数较优组合:芯模转速 $1\ 200\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,旋轮进给比 $1\ \text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$,摩擦系数 0.15 的成形条件下,锥形回转件壁厚极差最小,壁厚均匀性最好。研究结果为提高旋压成形航空机匣质量提供理论基础。

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] 王雨,束学道,田端阳,等.工艺参数对薄壁锥形旋压件凸缘平直度的影响[J].机械科学与技术,2017,36(7):1068-1072.
- [3] 周强.突变壁厚锥形件强力旋压成形有限元模拟和试验研究[D].西安:西北工业大学,2007.
- [4] 徐银丽,詹梅,杨合,等.锥形件变薄旋压回弹的三维有限元分析[J].材料科学与工艺,2008,16(2):167-171.
- [5] Chen M D, Hsu R Q, Fuh K H. Forecast of shear spinning force and surface roughness of spun cones by employing regression analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(12):1721-1734.
- [6] 刘伟军,吴耀金,薛勇,等.AZ80 镁合金锥形件内环筋挤压成形工艺参数研究[J].热加工工艺,2015,44(3):119-122.
- [7] Kalpakcioglu S. An experimental study of plastic deformation in power spinning[J]. CIRP Annals, 1961, 1: 58.
- [8] 位杰,束学道,何杰.工艺参数对高铁轴承外圈端面成形质量的影响[J].宁波大学学报(理工版),2016,29(3):103-106.
- [9] 束学道,田端阳,王雨,等.浮压法压实斜轧钢球内部空洞的条件[J].宁波大学学报(理工版),2017,30(1):1-6.
- [10] 王岩,隋思涟.试验设计与 MATLAB 数据分析[M].2 版.北京:清华大学出版社,2013:65-88.
- [11] 日本塑性加工学会.旋压成形技术[M].北京:机械工业出版社,1988:144-146.
- [12] 王成和,刘克璋,周路.旋压技术[M].福州:福建科学技术出版社,2017:710-721.

Influence of process parameters on the wall thickness precision by power spinning of thin-walled conical part of 5CrNiMo18 with discontinuous wall thickness

SHU Xue-dao, ZHU Ying

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: Conical parts with thin wall have been largely applied in the aerospace fields, and the discontinuous wall thickness conical part is one of them, which is difficult in spinning. Based on the Simufact-Forming software, the finite element model of the conical part with the thin wall of 5CrNiMo18 stainless steel is established. The influence of process parameters, including mandrel rotary velocity, feed rate of roller and friction coefficient between roller and blank, on the wall thickness deviation is analyzed. The process parameters are designed by means of the orthogonal tests, and then the data of the wall thickness deviation is analyzed. The results indicate that the optimum forming quality can be obtained under the mandrel rotary velocity being $1\ 200\ \text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, the feed rate being $1\ \text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$, and the coefficient of friction being 0.15. It is found that the feed rate is the best impact factor for the thickness reduction ratio as it increases firstly followed by decreasing. Also noted is that the mandrel rotary velocity is influenced by the wall thickness, as the increasing of mandrel rotary velocity, the wall thickness decreases firstly and then increases. The findings set up a theoretical basis for the spinning of case that is applicable in aerospace industry.

Key words: conical part; power spinning; wall thickness deviation; discontinuous wall thickness

(责任编辑 韩 超)