18

工艺参数对薄壁件多道次旋压变形均匀性的影响

缪伟亮,刘大海,邵雪明

(南昌航空大学航空制造工程学院,南昌 330063)

摘要:目的研究成形工艺参数对薄壁件多道次旋压变形均匀性的影响。方法 采用试验的方法,研究了双轮数控旋压成形铝合金薄壁件过程中,旋压间隙 &、进给率 f 和旋轮圆角半径 R 等关键工艺参数,对制件表面质量和壁厚均匀性的影响。结果 3 个工艺参数都对制件表面质量和壁 厚均匀性有影响。结论 减小旋压间隙 &、采用较大的主轴转速 S 和较小的进给率 f 可提高零件的 表面质量和尺寸精度。改善零件壁厚分布的均匀化程度,适当提高旋轮圆角半径 R,也能使变形的 均匀化程度提高。

关键词:铝合金;薄壁件;多道次旋压

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.02.004 中图分类号: TG306 文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)02-0018-06

Effects of Forming Parameters on Deformation Uniformity of Thin–walled Parts during Multi–pass Spinning

MIAO Wei-liang, LIU Da-hai, SHAO Xue-ming

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the effects of forming parameters on the macro deformation uniformity of the thin-walled aluminum parts during multi-pass spinning process. **Methods** The influences of spinning gap δ , feed rate f, and spin roller fillet radius R on the quality of the part surface and the uniformity of wall thickness were experimentally investigated in the formation process of thin-walled aluminum parts using double wheeled spinning machine. **Results** All thress forming parameters had influence on the quality of the part surface and the uniformity of wall thickness. **Conclusion** The results showed that the surface quality, size precision and thickness uniformity of the parts were improved by decreasing the spinning gap δ , or using a higher spindle speed S with a lower feed rate f. And a bigger spin roller fillet radius also resulted in much more uniform deformation.

KEY WORDS: aluminum alloy; thin-walled parts; multi-pass spinning

为减轻质量和提高整体性能,航空航天等先进 制造领域迫切需要大量采用结构效益显著的大型整 体复杂薄壁壳体零件^[1]。受这类零件大型整体化、 薄壁轻量化和形状复杂化等特点的影响,由于其材料成形困难,传统整体成形技术的应用受到限制,多 道次旋压成形技术为解决这类零件的成形问题提供

收稿日期: 2013-10-14;修订日期: 2014-02-16

作者简介:缪伟亮(1990—),男,江西上饶人,主要研究方向为轻合金板材精密塑性成形。

了有效途径,成为精密塑性成形的一个重要发展方向^[2-4]。

然而, 薄壁曲面壳体旋压成形是一个多道次、多 参数耦合下的复杂非线性过程,材料需要经历多次 局部加载与卸载和不均匀变形,具有体积成形和板 料成形的综合特征,工艺过程较为复杂,成形工艺条 件难以确定,工艺参数选取是否合理直接影响旋压 件成形质量和尺寸精度[5-8]。为此,国内外研究者 针对旋压成形质量问题开展了系列研究^[8-14]。文 献[9-11]分析了变薄旋压和筒形件旋压常见的一 些成形质量问题,并分析了一些典型缺陷的形成原 因和控制方法。文献[12]研究了旋轮压下量和工 艺参数对锥形件旋压表面粗糙度的影响。文献 [13]研究了工艺参数对锥形件旋压力和剪旋壁厚 差的影响规律。文献[14]通过试验研究了材料塑 性、工艺参数和壁厚减薄率对小锥形件成形质量的 影响。上述研究对象主要为简形件和锥形件,对于 大型复杂薄壁壳体零件,则主要集中于研究筋部的 充填质量[7],而针对其他成形质量问题,如薄壁特 征变形均匀性的研究较少,且受到薄壁壳体三次曲 母线特征结构的影响,其旋压变形和材料流动的不 均匀特性显著[4-5]。揭示该过程中板坯的变形规 律,阐明其工艺参数对变形均匀性的影响机制,对提 高其旋压成形极限和实现变形控制具有重要意义。 为此,选用典型薄壁结构特征件,开展旋压成形工艺 实验,以期阐明关键工艺参数(旋压间隙、进给率、 旋轮圆角半径等)对旋压变形均匀性的影响,为其 工程应用提供借鉴。



图 1 成形薄壁件尺寸 Fig. 1 Thin-walled parts

1.2 实验设备及过程

旋压成形工艺实验在 PS-CNCSXY750AS 双旋 轮数控金属旋压机上进行,该旋压机可成形厚度为 0.5~4 mm 的铝板。为获得良好的零件轮廓,采用 多道次旋压成形,保持旋轮工作角为 30°,控制双旋 轮刀路如图 2 所示。由于数控旋压成形过程中,旋 压件变形过程受到诸多工艺参数的影响,其中旋压 间隙、进给率、旋轮圆角半径为其主要工艺参 数^[6,9-10]。实验中,通过固定其他参数,研究单一参 数对制件变形特征的影响,具体参数:旋压间隙 δ 取 0.4,0.6,0.75,0.90,1.0,1.5;主轴转速 *S* 分别取 300,500,700,800 r/min;进给速度 v 分别取 200, 400,700,800 mm/min;进给率f 分别取 2.67,1.6, 1.14,1.0,0.5,0.25,0.125;旋轮圆角半径 r 分别取 4,6,8,12 mm;初始旋轮圆角半径 R 选定为 6 mm。



Fig. 2 Road map of spin rollers

2 结果与讨论

2.1 旋压间隙的影响

旋轮与芯模之间的间隙即旋压间隙δ是决定旋

1 实验

1.1 材料

实验选用1.2 mm 厚 1060 铝合金板材,其化学成分见表1。薄壁旋压制件如图1 所示,由直径为160 mm 的圆形毛坯变薄旋压而成。

表 1 1060 铝合金板材化学成分(质量分数,%) Table 1 Chemical composition of 1060 aluminum alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.20	0.25	0.04	0.03	0.03	0.07	0.03	余量

压件变形和影响其成形质量的主要因素。当旋轮参数、进给率一定时,旋压间隙决定了旋轮道次下压量 和道次减薄率。小的旋压间隙(即较大的道次减薄 率)可以减少旋压道次提高旋压效率,但间隙过小 引起旋压阻力增大,致使材料流动困难产生堆积或 局部剧烈减薄,使旋压无法进行。如图3所示,试验 时由于间隙过小(δ<0.4 mm),变形主要发生在靠近 零件尾顶一侧的局部区域(图3),材料堆积折叠,旋 压无法继续进行。而当旋压间隙较大时,材料流动 的不均匀程度加剧,且变形量较小,零件变形不足, 使成形件的各向异性程度加剧,如图4所示。过大 的旋压间隙(δ=1.5 mm),零件局部作用力较小,且 由于周向约束较小,零件的边缘成形力不足,会加剧 变形的不均匀程度,造成边缘严重折叠或失稳起 皱^[10],如图4d所示。



图 3 旋压间隙 δ 为 0.4 mm 时的旋压件 Fig. 3 Deformed parts with a spinning gap of 0.4 mm



 $\delta = 0.75 \text{ mm}$



b $\delta = 0.90 \text{ mm}$



c δ=1.0 mm d δ=1.5 mm 图 4 不同旋压间隙δ下的旋压件 Fig. 4 Formed parts with different spinning gaps

图 5 所示为不同旋压间隙下旋压件壁厚沿母线 方向的分布情况。靠近零件顶点区域为尾顶作用区 域,为不变形区或小变形区,目靠近该区域材料同时 受到进刀起始作用和回刀终了作用(如图2),材料 流动复杂,零件壁厚略有变化。尾顶作用以外区域, 工件壁厚的减薄主要经历2个阶段,首先是旋轮的 直接作用使其剪切变薄,其次是旋轮作用区对靠近 其已成形区材料的拉薄作用。与尾顶作用区相邻的 区域主要承受旋轮的剪切变薄作用,零件壁厚减薄 梯度较大。而距零件顶点 20~80 mm 的大部分区 域为零件的主要变形区。该区域板坯同时经历旋轮 的前进和反向压力作用,母线上同一位置同时经历 沿其切线方向上的正反两向的材料流动趋势,该部 分区域壁厚变化相对平缓[5,10,13];且随着旋压间隙 的减小,该部分区域壁厚分布更趋均匀,旋压变形的 均匀性增加。



图 5 不同旋压间隙下零件的壁厚分布情况 Fig. 5 Wall thickness variations with different spinning gaps

2.2 进给率的影响

进给率f反映了芯模每转一圈旋轮沿工件母线的进给量的大小。文中,选定旋压间隙 δ 为0.60 mm,控制芯轴的转速S和旋轮的进给速度v实现进给率的控制。图6和图7分别为旋轮进给速度(v = 800 mm/min)和芯轴转速(S = 800 r/min)一定时,不同进给率下旋压件的成形情况,对应零件壁厚分布情况如图8和图9所示。

由图 6 可知,进给率变化时,零件的表面质量差 别较为明显,且进给率对零件表面尺寸精度的影响 较大。当旋轮的进给速度一定时,较大的进给率下 (较小的主轴转速),零件表面出现明显的旋压纹路 (如图 6a),且零件的壁厚分布不均匀程度较大(图

20







c f = 1.14 mm/r

d f = 1.0 mm/r

图 6 进给速度 v 一定时不同进给率 f 下的旋压件 Fig. 6 Parts deformed with different feed ratios under a constant feet rate



f = 0.125 mm/r





8)。因为此时主轴转速偏低,进给率偏大,单位时 间内变形区的面积较小,变形区依然接近于点接触, 金属变形不连续,旋压力较小。变形区内的应力状 态为三向应力状态:轴向受拉、周向与径向受压。转 速降低时,轴向拉力减小,周向压力增大,材料沿周 向流动加剧,沿轴向流动减缓[6,10,13],使得在旋轮处



- 图 8 进给速度 v 一定时不同进给率 f 下的旋压件壁厚分 布情况
- Fig. 8 Wall thickness distributions with different feed ratios under a constant feet rate



- 主轴转速 S 一定时不同进给率 f 下的旋压件壁厚分 图 9 布情况
- Fig. 9 Wall thickness distributions with different feed ratios under a constant spindle speed

有较多的金属堆积,在制件的外表面产生粗大旋压 纹。这种材料的堆积同时使得零件壁厚分布呈现不 均匀梯度分布,零件的贴模性也较差。随着芯模主 轴速度的提高,即随着进给率的降低,零件表面质量 进一步改善,尺寸精度提高,壁厚分布相对均匀。当 主轴速度提高时,相当于参与工件成形的旋轮数量 增加,变形区由点接触变为近似环形接触,即在旋压 变形时环形变形区在工件圆柱面上沿螺旋线纵向前 进,有效限制了变形时材料的周向流动,工件变形条 件得到改善,减小了扩径现象,工件贴模性好,内径 精度得到提高,保证了工件有较高的尺寸精度和表 面质量[6,10]。受设备芯模主轴转速的限制,进一步 采用改变进给速度的方式改变进给率。研究表明, 随着进给率的进一步减小,零件的表面质量进一步

提高,壁厚分布和尺寸精度得到改善,如图7和图9 所示。但过小的进给率下,由于材料的周向流动加 剧,工件局部过分减薄,使壁厚分布不均并产生材料 剥离或起皮等缺陷,如图7所示。

2.3 旋轮圆角半径的影响

图 10 和 11 为旋压间隙为 0.6 mm, 进给比为 1.0 mm/r 时, 采用不同旋轮圆角半径 R 旋轮成形的 旋压件及其壁厚分布情况。研究表明, 随着旋轮圆 角半径 R 的增加, 工件表面质量逐渐改善, 表面粗 糙度呈减小趋势, 旋压件的表面质量和尺寸精度提 高, 壁厚分布的均匀化程度也有所提高(图 11)。当





c r = 8 mm

d r = 12 mm

图 10 不同旋轮半径下的旋压件

Fig. 10 Parts formed under different spin roller fillet radii



图 11 不同旋轮圆角半径下成形件的壁厚分布情况



旋轮圆角半径 R 为 8 mm 时,零件表面质量和变形 的均匀化程度最好。如果旋轮圆角半径 R 继续增 大,旋轮与工件接触面积增大,旋压力和工件扩径 量增大,表面质量反而降低。这表明对于薄壁体 旋压而言,较大的旋轮半径 R 有利于改善旋压变 形的均匀化程度,但旋轮圆角半径 R 并非越大越 好,而是存在一定使用范围,使得旋压变形稳定性 较好。

3 结论

 1)随着旋压间隙的减小,零件的表面质量和尺 寸精度提高,壁厚均匀性改善。但间隙过小时,金属 流动不均匀,制件容易产生局部折叠或拉裂缺陷;间 隙值过大时,成形件易变形不足,且边缘不均匀变形 程度加剧,易起皱。

2)减小旋压进给率,薄壁件的表面质量及尺 寸精度提高,变形的均匀化程度提高。提高主轴 转速,减小进给率,可有效地限制材料的周向流 动,提高壁厚的均匀化程度;但过低的进给率会使 得工件局部变形加剧,壁厚分布不均而产生材料 剥离等缺陷。

 3) 增大工作旋轮圆角半径,有利于改善旋压件 的表面质量和尺寸精度,并有利于旋压变形的均匀 化程度的提高。

参考文献:

 [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部.机械工 程学科发展战略报告(2011—2020)[M].北京:科学 出版社,2010:189.

Engineering and Materials Science Department of the National Natural Science Foundation Committee. Development Strategy Report of the Mechanical Engineering Disciplines (2011—2020) [M]. Beijing: Science Press, 2010;189.

[2] 宋玉泉.连续局部塑性成形的发展前景[J].中国机械 工程,2000(1/2):65—67.

> SONG Yu-quan. The Prospect of Successive Partial Plastic Forming[J]. China Mechanical Engineering, 2000(1/ 2):65-67.

22

23

- [3] MA F, YANG H, ZHAN M. Plastic Deformation Behaviors and Their Application in Power Spinning Process of Conical Parts with Transverse Inner Rib [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (1): 180— 189.
- [4] MUSIC O, ALLWOOD J M, KAWAI K. A Review of the Mechanics of Metal Spinning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1):3–23.
- [5] 杨合,詹梅,李甜,等. 铝合金大型复杂薄壁壳体旋压研究进展[J]. 中国有色金属学报,2011,21(10): 2534—2550.

YANG He,ZHAN Mei,LI Tian, et al. Advances in Spinning of Aluminum Alloy Large-sized Complicated Thinwalled Shells[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2011,21(10): 2534-2550.

 [6] 吴统超,詹梅,古创国,等.大型复杂薄壁壳体第一道 次旋压成形质量分析[J].材料科学与工艺,2011,19 (1):121—126.

> WU Tong - chao, ZHAN Mei, GU Chuang - guo, et al. Forming Quality of the First Pass Spinning of Large-sized Complicated Thin-walled Shell[J]. Materials Science & Technology,2011,19(1): 121-126.

 [7] 宋晓飞,詹梅,蒋华兵,等. 铝合金大型复杂薄壁壳体 多道次旋压缺陷形成机理[J]. 塑性工程学报,2013, 20(1):31—36.

> SONG Xiao – fei, ZHAN Mei, JIANG Hua – bing, et al. Forming Mechanism of Defects in Spinning of Large Complicated Thin–wall Aluminum Alloy Shells[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(1):31—36.

- [8] WONG C C, DEAN T A, LIN J. A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43: 1419—1435.
- [9] 李启军,范开春,王琪,等.大尺寸薄壁钛合金筒体旋

压成形质量影响因素[J]. 宇航材料工艺,2012(1): 86—88.

LI Qi-jun, FAN Kai-chun, WANG Qi, et al. Factors Influencing Spinforming of Large – diameter Thin – walled TC4 Alloy Tube[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012(1):86—88.

- [10] 赵云豪,李彦利.旋压技术与应用[M].北京:机械工业 出版社,2007:95.
 ZHAO Yun-hao,LI Yan-li. Spinning Technology and Application[M]. Beijing:China Machine Press,2007:95.
- [11] 张雷,姜春茂,刘有江,等. 铝合金筒形件强力旋压成 形件的疵病分析[J]. 精密成形工程, 2012,4(5):55— 57.

ZHANG Lei, JIANG Chun-mao, LIU You-jiang, et al. Defects Analysis of Aluminum Alloy Cylinder Power Spinning[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(5):55-57.

- [12] CHEN M D, HSU R Q, FUH K H. Effects of Over-roll Thickness on Cone Surface Roughness in Shear Spinning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159:1-8.
- [13] 张晋辉,詹梅,杨合,等. 工艺参数对剪切旋压旋压力 和壁厚差的影响[J]. 材料科学与工艺,2007,15(2): 182—185.

ZHANG Jin-hui, ZHAN Mei, YANG He, et al. Influence of Process Parameters on Spinning Force and Wall Thickness Difference of Shear Spinning [J]. Materials Science & Technology, 2007,15(2):182–185.

[14] 徐文臣,单德彬,吕炎,等.小锥度零件多道次剪旋试 验研究[J].材料科学与工艺,2001,12(1):33-40. XU Wen-chen,SHAN De-bin,LYU Yan, et al. Research on the Multi-pass Shear Spinning Technology of Smallangle Conical Workpieces[J]. Materials Science & Technology,2001,12(1):33—40.