

1060 铝板两道次渐进成形外缘翻边路径优化

刘金杰¹, 高锦张¹, 金志浩¹, 郑璐恺²

(1. 东南大学 材料科学与工程学院 江苏省先进金属材料高技术研究重点实验室, 江苏 南京 211189;

2. 南京工程学院 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 运用数值模拟与实体实验相结合的研究方法, 设计并优化出一种两道次渐进成形外缘翻边路径, 相较于单道次成形, 该路径适用的加工范围更广。研究表明, 使用圆弧直线两道次渐进成形外缘翻边路径, 可以加工单道次无法成形的毛坯直径较大的翻边制件, 提升制件的壁厚分布状态, 在将第1道次的加工直径设置为 $d_m + (D - d_m)/4$ 时制件的成形质量最好。根据有限元模拟实验, 分析制件的壁厚分布曲线和平均壁厚值, 拟合出扩孔两道次渐进成形圆孔翻边高度的表达式, 并通过实体实验验证, 实现了对两道次渐进成形外缘翻边高度的预测。

关键词: 渐进成形; 外缘翻边; 成形路径; 翻边高度; 壁厚分布

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.011

中图分类号: TG379.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0080-08

Optimization on outer edge flanging path for 1060 aluminum sheet in two-pass incremental forming

Liu Jinjie¹, Gao Jinzhang¹, Jin Zhihao¹, Zheng Lukai²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Metallic Materials, School of Materials Science and Engineering,

Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. College of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211189, China)

Abstract: A two-pass incremental forming outer edge flanging path was designed and optimized by using the research method combining numerical simulation and physical experiment, and compared with the single-pass forming, it was applicable to a wider processing range. The research results show that the use of the outer edge flanging path with circular arc and straight line in two-pass incremental forming can process the flanging parts with larger blank diameters that cannot be formed in a single pass and improve the wall thickness distribution of workpiece, and the forming quality is the best when the processing diameter of the first pass is set to $d_m + (D - d_m)/4$. According to the finite element simulation experiment, the wall thickness distribution curve and the average wall thickness value of workpiece were analyzed, and the expression of the round hole flanging height for the two-pass incremental forming of reaming was fitted. Through the verification of physical experiments, the prediction of the outer edge flanging height in the two-pass incremental forming is realized.

Key words: incremental forming; outer edge flanging; forming path; flanging height; wall thickness distribution

数控渐进成形技术基于“分层制造”, 将复杂的三维模型沿竖直方向进行层级离散, 利用工具头进行逐层逐点加工^[1-2]。与传统的冲压工艺进行比较, 渐进成形工艺无需模具设计, 加工成本低、周

期短、灵活性高, 具有很广阔的应用前景^[3-4]。

目前, 国内外对于板料渐进成形翻边工艺已经进行了较为深入的研究。Voswinkel H 等^[5]研究了工艺参数、制件尺寸和成形路径对渐进成形翻边制件精度的影响。Montanari L 等^[6]基于圆网格分析, 探究了渐进成形翻边工艺的变形机理, 研究以破裂状态为主的失效机制, 得出制件孔口附近的材料为双向拉伸状态, 而另一侧材料处于平面应变状态。杨大强等^[7]发现渐进成形扩孔工艺是剪切和弯曲的综合变形, 相较于传统冲压扩孔, 渐进成形扩孔率有大幅提高。以上研究多是

收稿日期: 2022-05-04; 修订日期: 2022-08-11

基金项目: 先进数控技术江苏省高校重点建设实验室开放基金项目 (KXJ05017)

作者简介: 刘金杰 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 220181931@seu.edu.cn

通信作者: 高锦张 (1963-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: drd.0412@aliyun.com

对内缘翻边工艺进行工艺参数和机理的分析,而对外缘翻边过程的成形规律的研究甚少。因此,本文建立了外缘翻边有限元模型,运用数值模拟与实体实验相结合的研究方法,设计并优化出一种两道次渐进成形外缘翻边路径^[8-10],扩大了渐进成形外缘翻边的成形范围,保证了制件最终的成形效果,具有较为重要的研究意义。

翻边工艺作为板料成形领域的重要分支,根据变形特点分为伸长类翻边和压缩类翻边,本文主要对外缘压缩类翻边进行研究,其成形过程如图1所示。圆形金属毛坯由上、下两块压板夹紧固定,将既定的螺旋线成形路径录入数控渐进成形机床,驱使成形工具头对金属毛坯进行逐层加工,完成渐进成形翻边,最终得到圆周部分竖起成直壁的目标制件^[11-13]。

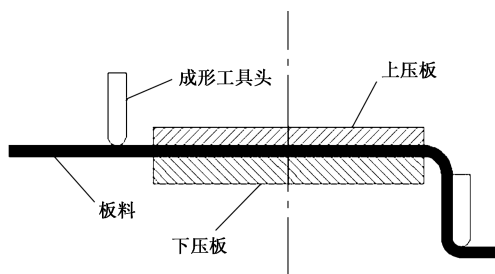


图1 渐进成形外缘翻边工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of outer edge flanging process in incremental forming

1 有限元模型的建立

利用 DYNIFORM 有限元模拟软件建立 1060 铝板渐进成形外缘翻边模型,如图2所示。该模型主要由成形工具头、上压板、板料和下压板4部分构成^[14-15]。在模拟过程中,保证上压板和凸模的位移和旋转全部约束,并对上压板施加压边力,使毛坯板料被上压板覆盖的部分尽量不发生变形。

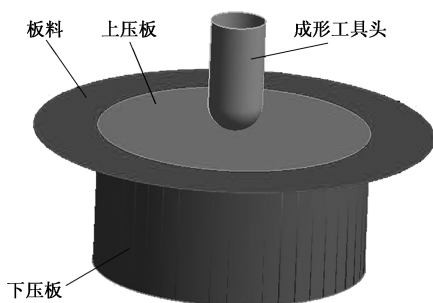


图2 外缘翻边有限元分析模型

Fig.2 Finite element analysis model of outer edge flanging

2 渐进成形外缘翻边工艺参数的确定

数控渐进成形外缘翻边工艺主要依靠成形工具头对毛坯板料施加压力,使金属板料发生塑性变形从而成形出预定形状尺寸的零件。本研究所选用的研究对象为板料厚度为 1.06 mm、H14 状态下的 1060 铝金属板料,考虑到研究中的翻边尺寸较为适中、形状较为规则,加工过程中使用直径为 $\Phi 14$ mm 的球形工具头,加工轨迹为轴向进给量为每层 0.5 mm 的螺旋线刀轨,进给速度在 $1500 \sim 2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围内。

如图3所示,预制的圆形金属毛坯直径为 D ,在加工过程中被翻制为翻边直径为 d_m 、高度为 H 的目标制件,板料的初始厚度为 t_0 ,压板长度为 d_0 。

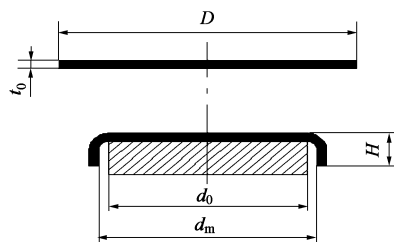


图3 外缘翻边成形前后尺寸示意图

Fig.3 Schematic diagram of dimensions before and after outer edge flanging forming

3 模拟实验

3.1 单道次路径成形范围

在渐进成形外缘翻边过程中,当毛坯金属板料直径较小时,变形区域也较小,板料在受力过程中承受载荷的能力较强,不容易发生起皱或破裂等成形缺陷,这种情况下仅采用单道次成形方法便可加工出壁厚分布较为均匀的翻边制件。但随着毛坯直径的不断增大,金属毛坯在切向压应力的作用下,产生较大的压缩变形,超出板料承受载荷的极限翻边直径 $d_{m\text{极限}}$,容易发生起皱甚至破裂等缺陷。

表1给出了 1060 铝板单道次渐进成形外缘翻边的极限范围,在此直径范围内的毛坯制件仅需 1 次成形便可获得符合成形质量要求的目标外缘工件,而对于直径超出该范围的毛坯板料,则需要增加成形道次数,从而改善工件的成形质量。

3.2 两道次成形路径设计

当毛坯直径 D 超过单道次渐进成形外缘翻边的

表 1 不同翻边直径下的临界翻边直径 (mm)

Table 1 Critical flanging diameters under different flanging diameters (mm)

d_m	$\Phi 64$	$\Phi 74$	$\Phi 84$	$\Phi 94$	$\Phi 104$
$d_{m\text{极限}}$	$\Phi 88$	$\Phi 110$	$\Phi 110$	$\Phi 120$	$\Phi 130$

加工范围时,需要采用两道次成形路径对工件进行加工,此时必须对每一道次的加工路径进行设计。

本文设计了一种直线和圆弧轨迹相结合的两道次渐进成形外缘翻边路径,如图 4 所示,其中 d_1 为第 1 道次翻边制件的直径。

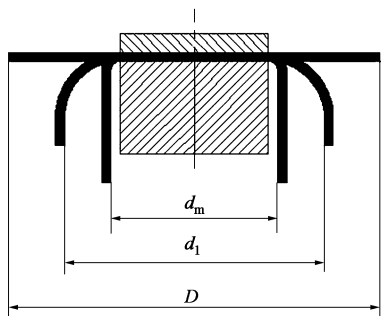


图 4 圆弧直线两道次渐进成形外缘翻边示意图

Fig. 4 Schematic diagram of outer edge flanging in two-pass incremental forming with circular arc and straight line

为了加工出翻边直径为 d_m 的外缘翻边制件,将直径为 D 的金属毛坯板料固定在上压板与凸模之间。在进行第 1 道次渐进成形外缘翻边加工时,预设的成形轨迹为圆弧与直线的组合路径,其中上半部分为 $1/4$ 圆,下半部分为一段直线,两者相切。第 1 道次先翻制出直径为 d_1 的翻边制件,再通过第 2 道次成形出直径为 d_m 的最终翻边直壁件。

当直接采用自上而下的加工路径时,会导致板料的实际变形与预设的变形轨迹有所偏差,成形工具头与板料接触部分周围的板料受到较大的压应力而又缺少支撑,从而导致该区域发生明显的下沉,无法成形出理想的 90° 直壁。因此,直接将变形轨迹的上半部分设计为圆弧,这样在加工过程中金属板料发生的变形与成形工具头的运动轨迹基本吻合,使得变形过程更加清晰可控。

为了获得最佳的成形效果,需要对第 1 道次的变形量进行确定。根据已有的研究经验,在两道次渐进成形外缘翻边过程中,第 1 道次的变形量应大于第 2 道次,因此,将第 1 道次的直径分别设置为 $d_m + (D - d_m)/3$ 、 $d_m + (D - d_m)/4$ 和 $d_m + (D - d_m)/5$,如图 5 所示。

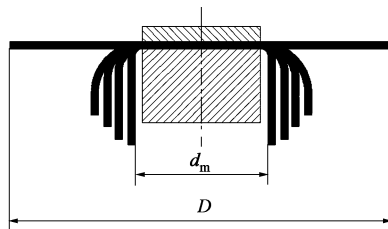


图 5 第 1 道次加工位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the first processing position

使用 DYNIFORM 有限元分析软件,对板料初始厚度 $t_0 = 1.06$ mm、翻边直径 $d_m = \Phi 84$ mm 的翻边尺寸进行不同第 1 道次位置的成形结果比较,对于 3 种不同直径的 1060 铝金属板料 ($\Phi 112$ 、 $\Phi 114$ 和 $\Phi 116$ mm),分别将第 1 道次的直径设置为 $d_m + (D - d_m)/3$ 、 $d_m + (D - d_m)/4$ 和 $d_m + (D - d_m)/5$,使用 ETA/POST 后处理软件对翻边制件的壁厚进行整理,得到如图 6 所示的翻边结果。

通过图 6 可以发现,对于相同尺寸的金属板料,采用不同的第 1 道次加工直径,制件最终的壁厚分布有明显的差异。对于 3 种不同的翻边直径,将第 1 道次设置在 $1/4$ 位置时,成形后制件的平均壁厚明显较厚,不会产生中部减薄带。同时,得到制件的平均壁厚如表 2 所示,由表 2 可知,将第 1 道次设置在 $1/4$ 位置时,成形后制件的平均壁厚值是最大的,其壁厚分布状态显著高于其他情况。

分析可得:当第 1 道次的翻边直径过大时,金属板料承受载荷的能力较差,板料受到成形工具头的压力,在发生塑性变形的过程中很不稳定,导致成形效果不佳;当第 1 道次的翻边直径过小时,则板料在第 1 道次变形中产生的变形量过大,超出毛坯所能承受的极限范围,对后续的第 2 道次加工产生很大的负面影响,使得最终的翻边零件出现明显的起皱现象。

在确定了第 1 道次加工直径为 $d_m + (D - d_m)/4$ 后,即加工路径的上半部分为 $1/4$ 圆、半径为 $(D - d_m)/8$,下半部分为直线,与圆弧相切。继续对板料初始厚度 $t_0 = 1.06$ mm、翻边直径 $d_m = \Phi 84$ mm 以外的其他翻边直径 ($\Phi 64$ 和 $\Phi 104$ mm) 的制件进行单道次与两道次加工路径下成形结果的比较。该过程采用数值模拟的研究方法,模拟实验方案如表 3 所示。

3.3 模拟实验结果

3.3.1 壁厚分布状态

制件外缘翻边直径 d_m 分别为 $\Phi 64$ 、 $\Phi 84$ 和 $\Phi 104$ mm,采用不同毛坯直径 D 对这 3 种制件进行单道次和两道次渐进成形外缘翻边模拟实验,获得

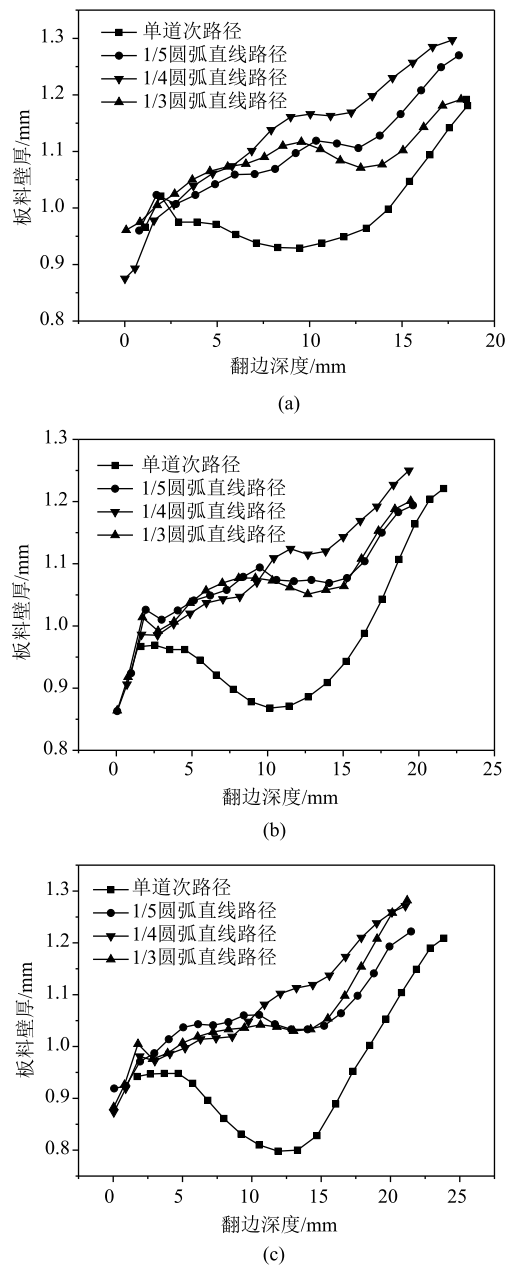


图 6 不同的第 1 道次翻边位置成形结果比较

(a) $D=\Phi 112\text{ mm}$ (b) $D=\Phi 114\text{ mm}$ (c) $D=\Phi 116\text{ mm}$

Fig. 6 Comparison of forming results for different flanging positions in the first pass

的平均壁厚值如表 4 所示。

表 4 说明对于不同翻边直径 ($d_m = \Phi 64$ 、 $\Phi 84$ 和 $\Phi 104\text{ mm}$) 的外缘翻边制件, 使用圆弧直线两道次渐进成形加工路径时, 其平均壁厚值明显大于单道次成形的平均壁厚值, 提升了壁厚分布状态。

通过有限元后处理软件对板料初始厚度 $t_0 = 1.06\text{ mm}$ 、翻边直径 $d_m = \Phi 84\text{ mm}$ 、毛坯直径 $D = \Phi 112$ 、 $\Phi 114$ 和 $\Phi 116\text{ mm}$ 的壁厚分布曲线以及壁厚云图进行分析, 如图 7 和图 8 所示。

表 2 不同加工路径下成形制件的平均壁厚 (mm)

Table 2 Average wall thicknesses of formed workpiece by different processing paths (mm)

毛坯直径 D	加工路径	平均壁厚 \bar{t}
$\Phi 112$	单道次路径	1.01
	1/5 圆弧直线路径	1.10
	1/4 圆弧直线路径	1.12
	1/3 圆弧直线路径	1.08
$\Phi 114$	单道次路径	0.98
	1/5 圆弧直线路径	1.06
	1/4 圆弧直线路径	1.09
	1/3 圆弧直线路径	1.06
$\Phi 116$	单道次路径	0.95
	1/5 圆弧直线路径	1.05
	1/4 圆弧直线路径	1.08
	1/3 圆弧直线路径	1.05

表 3 模拟实验方案 (mm)

Table 3 Simulation experiment schemes (mm)

翻边直径 d_m	毛坯直径 D	第 1 道次翻边直径 d_1
$\Phi 64$	$\Phi 90$	$\Phi 70.5$
	$\Phi 92$	$\Phi 71.0$
	$\Phi 94$	$\Phi 71.5$
$\Phi 84$	$\Phi 112$	$\Phi 91.0$
	$\Phi 114$	$\Phi 91.5$
	$\Phi 116$	$\Phi 92.0$
$\Phi 104$	$\Phi 132$	$\Phi 111.0$
	$\Phi 134$	$\Phi 111.5$
	$\Phi 136$	$\Phi 112.0$

表 4 平均壁厚模拟结果 (mm)

Table 4 Simulation results of average wall thickness (mm)

翻边直径 d_m	毛坯直径 D	单道次壁厚	两道次壁厚
$\Phi 64$	$\Phi 90$	1.05	1.20
	$\Phi 92$	0.99	1.14
	$\Phi 94$	0.95	1.12
$\Phi 84$	$\Phi 112$	1.01	1.17
	$\Phi 114$	0.99	1.07
	$\Phi 116$	0.95	1.05
$\Phi 104$	$\Phi 132$	1.03	1.10
	$\Phi 134$	1.02	1.08
	$\Phi 136$	0.98	1.06

通过对不同毛坯尺寸下单道次渐进与两道次渐进成形路径的壁厚曲线进行比较可以发现, 使用单

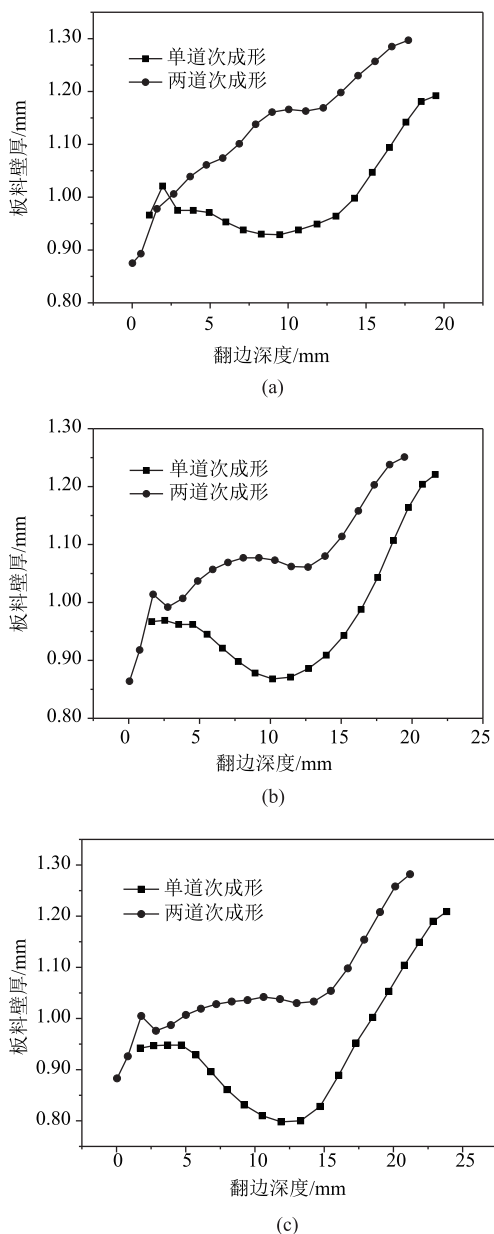


图 7 单道次与两道次渐进成形壁厚比较

(a) $D=\Phi 112 \text{ mm}$ (b) $D=\Phi 114 \text{ mm}$ (c) $D=\Phi 116 \text{ mm}$

Fig. 7 Comparison of wall thickness between single-pass and two-pass incremental forming

道次成形时, 制件成形后的壁厚明显的减薄。而使用两道次成形路径进行加工时厚分布很不均匀, 出现明, 制件成形后的壁厚基本呈现上升趋势, 不会出现明显减薄, 平均壁厚显著大于单道次成形零件。通过观察两种成形条件下的壁厚云图, 也能够发现单道次成形后的制件中部出现明显的减薄带, 而采用圆弧直线相结合的两道次加工路径后, 制件的壁厚分布更加均匀。因此, 可以说明本文设计出的圆弧直线两道次渐进成形外缘翻边路径可以提升制件的壁厚分布状态, 使制件获得更好的成形质量。

3.3.2 翻边高度

翻边高度即工件在加工结束后, 顶部至翻边底部的竖直距离。假设金属毛坯在单道次渐进成形外缘翻边过程中径向无伸长, 采用弯曲件塑性成形中性层长度不变原则对变形区做近似计算, 如图 9 所示。

外缘翻边的变形区域主要包括圆弧区和直壁区两部分, 为了防止成形工具头与模具碰撞而预留的单边间隙值 s 决定了圆弧区的长度, 可将顶部圆弧半径近似看作等于间隙值 s , 基于以上假设可得:

$$\frac{D - d_m}{2} = \frac{\pi}{2}s + h \quad (1)$$

式中: $d_m = d_0 + 2s$; h 为直壁区高度, $h = H - s - \frac{t_0}{2}$ 。

单道次渐进成形的理论翻边高度 H 的计算公式为:

$$H = \frac{D - d_m}{2} + 0.43s + 0.5t_0 \quad (2)$$

将不同翻边直径下 ($d_m = \Phi 64$ 、 $\Phi 84$ 和 $\Phi 104 \text{ mm}$) 各毛坯直径所对应的两道次翻边高度的模拟值与理论翻边高度进行比较, 得到表 5。从表 5 中可以发现, 两道次渐进成形外缘翻边过程中, 模拟翻边高度与理论翻边高度有较大偏差, 模拟翻边高度数值明显大于理论值。原因在于两道次渐进成形过程中, 毛坯板料外围变形区域较大, 因此翻边高度较大, 板料的径向伸长此时无法忽略, 金属在两次塑性变形过程中的流动较为剧烈, 翻边直壁部分的长度明显增加。

在单道次理论翻边高度无法对两道次渐进成形外缘翻边高度进行预测的情况下, 需要新的翻边高度计算公式对其进行预测。分析式 (2), $(0.43s + 0.5t_0)$ 为翻边间隙和板料厚度对翻边结果的影响, 其数值较小, 且在整个公式中为定值。因此, 在对修正公式进行拟合时, 先将该部分减去, 即:

$$H' = H - 0.43s - 0.5t_0 \quad (3)$$

式中: H' 为不考虑翻边间隙和板料厚度影响的翻边高度值。

根据单道次理论翻边高度计算公式, 以翻边变形区域长度 ($D - d_m$) 为横坐标、以翻边高度为纵坐标, 使用一次函数对两道次渐进成形外缘翻边高度进行拟合, 得到:

$$H' = 0.278(D - d_m) + 16.139 \quad (4)$$

在式 (4) 两侧加上 $(0.43s + 0.5t_0)$, 得到预测

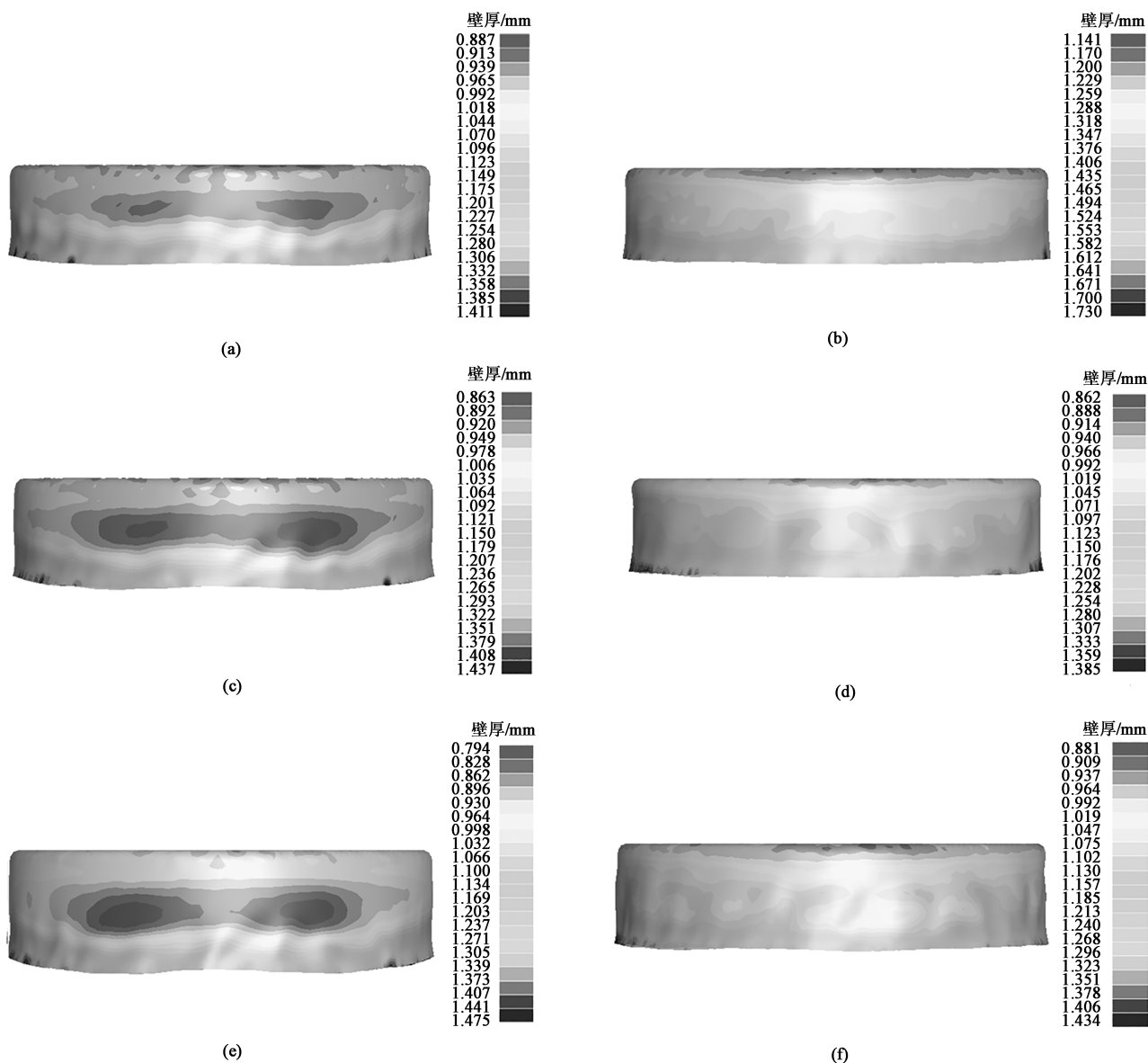


图8 单道次与两道次渐进成形的壁厚云图比较

- (a) $D=\Phi 112$ mm, 单道次成形 (b) $D=\Phi 112$ mm, 两道次成形 (c) $D=\Phi 114$ mm, 单道次成形
(d) $D=\Phi 114$ mm, 两道次成形 (e) $D=\Phi 116$ mm, 单道次成形 (f) $D=\Phi 116$ mm, 两道次成形

Fig. 8 Comparison of wall thickness cloud maps between single-pass and two-pass incremental forming

- (a) $D=\Phi 112$ mm, single-pass forming (b) $D=\Phi 112$ mm, two-pass forming (c) $D=\Phi 114$ mm, single-pass forming
(d) $D=\Phi 114$ mm, two-pass forming (e) $D=\Phi 116$ mm, single-pass forming (f) $D=\Phi 116$ mm, two-pass forming

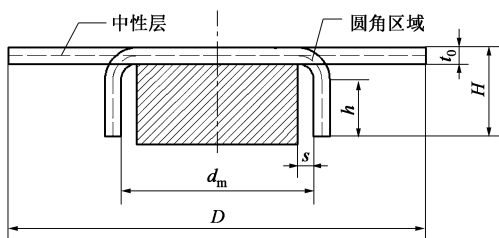


图9 外缘翻边高度示意图

Fig. 9 Schematic diagram of outer edge flanging height

翻边高度的计算公式为:

$$H = 0.278(D - d_m) + 0.43s + 0.5t_0 + 16.139 \quad (5)$$

4 实验验证

在数控渐进成形机床上进行实体实验,与有限元模拟结果进行比较和分析,为了便于毛坯板料的装夹,预先在板料的中部打出4个圆孔,使用螺钉将上

压板、板料和凸模进行固定,避免毛坯在加工过程中发生任何方向上的位移,实验装置如图 10 所示。

表 5 模拟翻边高度与理论翻边高度比较 (mm)

Table 5 Comparison of simulated and theoretical flanging heights (mm)

翻边直径 d_m	毛坯直径 D	两道次理论翻边高度	两道次模拟翻边高度
$\Phi 64$	$\Phi 90$	14.39	16.53
	$\Phi 92$	15.39	18.28
	$\Phi 94$	16.39	19.94
$\Phi 84$	$\Phi 112$	15.39	17.72
	$\Phi 114$	16.39	19.47
	$\Phi 116$	17.39	21.26
$\Phi 104$	$\Phi 132$	15.39	17.66
	$\Phi 134$	16.39	18.95
	$\Phi 136$	17.39	20.45



图 10 外缘翻边实验装置

Fig. 10 Experimental device of outer edge flanging

为了验证不同尺寸 1060 铝板料在两道次渐进成形外缘翻边后的壁厚分布状态,对板料初始厚度 $t_0 = 1.06 \text{ mm}$ 、不同尺寸的翻边制件进行渐进成形加工,成形件如图 11 所示。翻边制件尺寸分别为:翻边直径 $d_m = \Phi 64 \text{ mm}$,毛坯直径 $D = \Phi 92 \text{ mm}$;翻边直径 $d_m = \Phi 84 \text{ mm}$,毛坯直径 $D = \Phi 114 \text{ mm}$;翻边直径 $d_m = \Phi 104 \text{ mm}$,毛坯直径 $D = \Phi 134 \text{ mm}$ 。

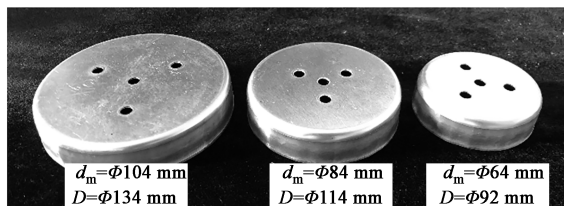
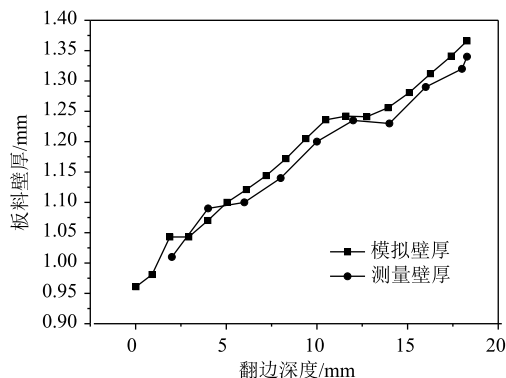


图 11 翻边制件图

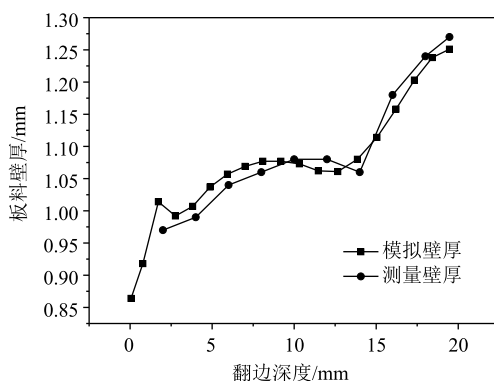
Fig. 11 Drawing of flanging parts

对 3 种制件的壁厚进行测量,并与模拟结果进

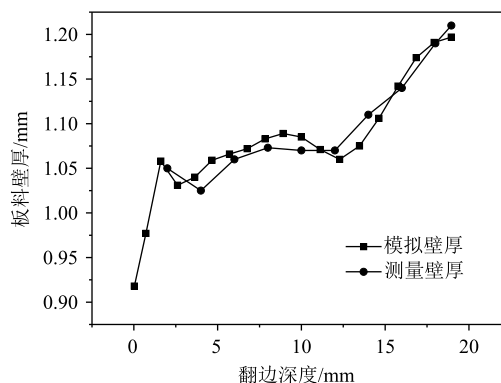
行比较,得到图 12。可以发现,实验结果与模拟结果基本一致,两者的壁厚变化分布曲线大致吻合,说明模拟结果具有比较高的可信性。



(a)



(b)



(c)

图 12 模拟与实验壁厚比较

(a) $d_m = \Phi 64 \text{ mm}$, $D = \Phi 92 \text{ mm}$ (b) $d_m = \Phi 84 \text{ mm}$, $D = \Phi 114 \text{ mm}$

(c) $d_m = \Phi 104 \text{ mm}$, $D = \Phi 134 \text{ mm}$

Fig. 12 Comparison of simulated and experimental wall thicknesses

5 结论

(1) 采用圆弧直线两道次渐进成形外缘翻边路径的成形结果相较于单道次成形有明显提升。

(2) 在两道次渐进成形外缘翻边过程中, 将第1道次翻边直径设置为 $d_m + (D - d_m)/4$ 的成形结果较优。

(3) 圆弧直线两道次渐进成形翻边高度较理论翻边高度较大, 制件翻边高度可用 $H = 0.278 (D - d_m) + 0.43s + 0.5t_0 + 16.139$ 进行预测。

参考文献:

- [1] 高锦张. 板料数控渐进成形技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Gao J Z. NC Incremental Sheet Forming Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [2] 卜小芬. 圆孔翻边渐进成形的模拟研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
Pu X F. Simulation Study on Hole-flanging in Incremental Forming [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [3] 蔡圣, 刘欣梅, 陈军. 薄板渐进成形数值仿真研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 1-12.
Cai S, Liu X M, Chen J. Research progress on numerical simulation of incremental sheet forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 1-12.
- [4] Mojtaba Esmailian, Khalil Khalili. Two-point incremental forming of metal-polymer three-layer sheets [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2021, 45 (1): 181-196.
- [5] Voswinckel H, Bambach M, Hirt G. Improving geometrical accuracy for flanging by incremental sheet metal forming [J]. International Journal of Material Forming, 2015, 8 (3): 391-399.
- [6] Montanari L, Cristino V A, Silva M B, et al. A new approach for deformation history of material elements in hole-flanging produced by single point incremental forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 54 (1): 56-63.
- [7] 杨大强, 陆彬, 徐栋恺, 等. 板料冲压模具扩孔和渐进成形扩孔的对比分析 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 48 (3): 394-398, 411.
Yang D Q, Lu B, Xu D K, et al. Comparative study on conical hole flanging of sheet metal by conventional die and incremental forming process [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48 (3): 394-398, 411.
- [8] 高锦张, 曹宇, 贾俐俐. 单道次圆孔翻边的数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (3): 79-85, 97.
Gao J Z, Cao Y, Jia L L. Numerical simulation for hole flanging by singlestage incremental forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (3): 79-85, 97.
- [9] 曹宇. 数控渐进成形翻边技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
Cao Y. Research on CNC Incremental Hole-flanging Technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [10] 光凯惠, 姚运飞, 吴田莉, 等. 钢板电磁感应加热辅助渐进成形成形极限研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (5): 120-125.
Guang K H, Yao Y F, Wu T L, et al. Forming limit of steel plate electromagnetic induction heating assisted incremental forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (5): 120-125.
- [11] 朱上, 李志辉, 闫丽珍, 等. 预时效对汽车用新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金烘烤硬化性的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (3): 281-288.
Zhu S, Li Z H, Yan L Z, et al. Bake-hardening response in a novel Al-Mg-Si-Cu-Zn alloy with pre-aging [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (3): 281-288.
- [12] 刘文伟, 王耀奇, 韩玉杰, 等. 二级时效对热冲压固溶 7B04 铝合金组织与性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (9): 1146-1152.
Liu W Y, Wang Y Q, Han Y J, et al. Microstructure and properties of hot stamping solution state 7B04 aluminum alloy with two-step aging treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (9): 1146-1152.
- [13] Li Y L, William J. T. Daniel, Paul A. Meehan. Deformation analysis in single-point incremental forming through finite element simulation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88 (1-4): 255-267.
- [14] 江中海. 铝合金板料成形极限预测及数值模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Jiang Z H. Prediction of Aluminum Alloy Sheet Forming Limit and Numerical Simulation [D]. Changchun: Jinlin University, 2015.
- [15] 蒋磊. 金属板料单点渐进成形轨迹优化及数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
Jiang L. Trajectory Optimization and Numerical Simulation on Metal Sheet Single Point Incremental Forming [D]. Jinan: Shandong University, 2014.

