

预成型型面对二道次渐进成形板厚分布的影响^{*}

李军超[†], 杨世涛, 龚鹏程, 杨芬芬

(重庆大学 材料成型及控制工程系, 重庆 400044)

摘要:为了研究预成型型面对金属板材二道次渐进成形板材厚度分布的影响,以直壁件两道次渐进成形为研究对象,首先制定了三种不同的预成型型面设计方案(型面轮廓线分别为圆弧和直线段),而后基于有限元模型分析了不同预成型型面条件下的板厚和等效塑性应变分布,并进行了实验验证。研究表明:半径为80 mm的圆弧状预成型型面侧面轮廓线可获得更均匀的板材厚度分布、更大的最小板材厚度、更小的等效塑性应变;二道次最小厚度分布并不取决于整个塑性变形区的大小,而决定于第二道次实际参与的变形区域大小,而该区域的大小决定于预成型型面的设计;最终板厚分布和预成型型面曲率并不存在线性关系,当切线夹角为 40° 左右时,板厚分布最均匀。

关键词:二道次渐进成形;预成型型面;成形质量;板厚

中图分类号:TG386

文献标志码:A

Influence of Preformed Shapes on Thickness Distribution of Double-pass Incremental Forming

LI Junchao[†], YANG Shitao, GONG Pengcheng, YANG Fengfeng

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the influence of preformed shapes on the thickness distribution of double-pass incremental forming, based on the double-pass incremental forming of straight-wall part, three double-pass strategies with arc and straight line profile preformed shapes were designed. A finite element method (FEM) model of double-pass incremental forming was then established and experimentally verified. It is found that the double-pass strategy with a curved profile of curvature radius of 80 mm is expected to achieve less thickness reduction, equivalent plastic strain and larger minimum thickness. Additionally, the increased plastic deformation region does not always lead to larger thickness, and the final thickness is mostly related to the actual deformation area during the second pass that depends on the specific design of the preformed shape. Finally, a linear relationship between the curvature radius of the preformed shape and the final thickness distribution is not observed. When the tangential angle(θ) is around 40° , it has the most uniform thickness distribution.

Key words: double-pass incremental forming; preformed shape; formability; thickness

^{*} 收稿日期:2017-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575066), National Natural Science Foundation of China (51575066);“控制科学与工程”浙江省重中之重学科开放基金

作者简介:李军超(1979-),河南平顶山人,重庆大学博士,副教授

[†] 通讯联系人, E-mail:ljchust@163.com

传统的金属板冲压成形需要特制的模具,成本较高且生产周期长,仅适用于大批量产品的生产.为了满足小批量、个性化产品的生产要求,一些新型的无模具成形技术应运而生^[1].其中,金属板料数控渐进成形技术,基于快速原型技术中“分层制造”的思想,通过一台数控铣床可以实现对产品的加工^[2].其加工过程如图1所示,工具头根据控制系统的指令,按照各层截面轮廓的要求逐层碾压板材,直至加工完成^[3].

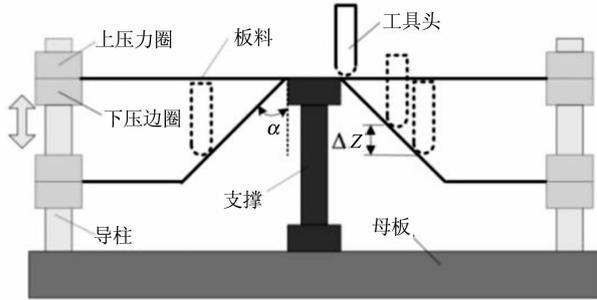


图1 板材渐进成形原理图

Fig. 1 The principle of incremental forming

根据成形道次的不同,渐进成形技术可分为单道次渐进成形和多道次渐进成形.多道次渐进成形技术通常用于成形形状复杂、半锥角较大的制件,但成形效率低,二道次渐进成形技术无疑是一种折衷的解决方法. Kim 和 Yang 利用一种两道次渐进成形方法改善了板厚和应变的分布^[4]. Young 和 Jeswiet 也采用两道次渐进成形技术提高了直壁件的最终厚度,证明了两道次渐进成形技术适合于成形单道次未能成形的产品^[5].目前学者们普遍认为第一道次的设计对二道次的成形质量有重要影响^[6-7].然而,目前的研究基本上针对确定道次间隔角度且预成型型面的轮廓线为直线段,而轮廓线为曲线的相关研究少见报道.因此,本文以直壁件为研究对象,基于有限元分析和实验验证,深入分析了三种不同的预成型型面对二道次渐进成形板厚分布的影响.

1 实验

1.1 两道次渐进成形

对于单道次成形,变形区域主要受剪切机制的影响.根据正弦定理^[5],板料成形后的厚度为 $t = t_0 \sin \alpha$,其中 α 为成形半锥角, t_0 为板材初始厚度.对于直壁件($\alpha = 0^\circ$),由正弦定律可得最终板厚为 0,因此单道次渐进成形不能直接成形直壁件.解决该问题的方案是采用两道次以上的多道次成形方案.两道次渐进成形原理如图2所示^[8-9].在成形最终零

件型面之前,先进行预成形.由图2可以看出,当预成型型面轮廓线为直线时,成形角固定不变,而预成型型面轮廓线为曲线时,成形角不断变化,根据正弦定理其厚度分布应与预成型型面轮廓线为直线的情况不同^[10],因此,有必要研究不同的预成型型面轮廓条件下的板材厚度分布.

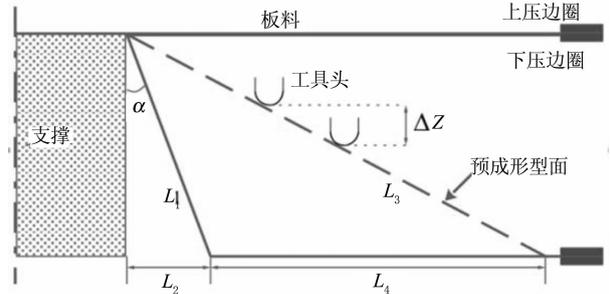


图2 两道次渐进成形示意图

Fig. 2 Sketch of double-pass incremental forming

1.2 预成型型面研究方案

本文研究的直壁件几何形状如图3所示,顶部直径 40 mm,成形高度 12 mm,圆角半径为 5 mm.本文设计了三种预成型型面方案,方案1的侧壁轮廓线为从 B 点到 D 点的半径为 80 mm 的圆弧,方案2为通常的两道次渐进成型预成型型面设计方案^[11-12],其轮廓线为从 B 到 D 的直线段($\alpha = 45^\circ$),方案3为以 BD 和 DE 为切线的半径为 54.6 mm 的圆弧.基于上述三种预成型型面,通过数值模拟和实验进行分析.

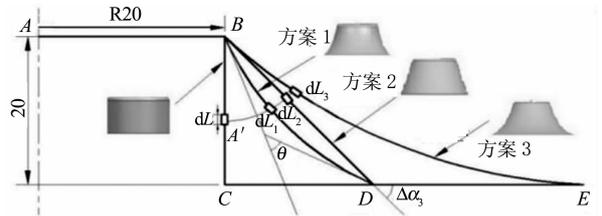


图3 两道次渐进成形预成型型面

Fig. 3 Research strategies of double-pass incremental forming

1.3 材料和工艺参数

本文选用厚度为 0.8 mm,长×宽为 150 mm×150 mm 的 DC56 钢板,为确保数值模拟的真实性与精确度,针对实验所用的金属板材做拉伸试验,以获得其塑性参数,进而直接导入数值模拟的软件中,相关参数如表1所示.

表1 DC56的力学性能
Tab. 1 Material parameters of DC56

弹性模量 /GPa	屈服强度 /MPa	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	应变硬化指数	泊松比
207	135.3	7 850	0.23	0.28

影响两道次板材渐进成形性能的因素除了预成型型面,又包括工具头直径 D 、层间距 Δz 、成形角 α 等工艺参数^[13]. 为主要研究预成型型面对两道次渐进成形性能的影响,实验中工艺参数除了成形角之外均保持不变($D=10\text{ mm}$, $\Delta z=0.3\text{ mm}$).

1.4 有限元模型

基于 Abaqus 建立了两道次渐进成形模型,如图 4 所示. 工具头、支撑和压边圈设置为刚体; 板料假定为各向同性材料, 网格类型采用壳单元 S4R; 此外, 板材与工具头之间的摩擦因数为 0.05, 板材和支撑、上下压边圈的摩擦因数是 0.25, 采用主从接触算法; 仿真过程中工具头的轨迹和实验验证过程

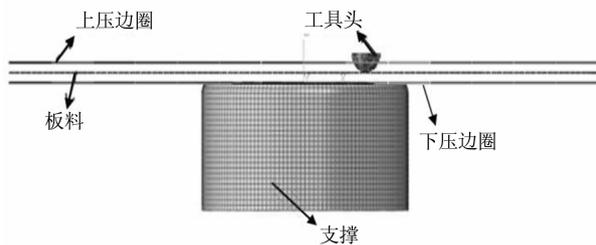


图 4 渐进成形模拟模型
Fig. 4 FEM model of ISF

中的轨迹保持一致. 为了使第二道次模拟开始前能够继承第一道次成形后的变形网格和应力状态, 通过设定预定义场实现^[14-15].

2 结果与讨论

2.1 第一道次成形后结果分析

第一道次成形后的板厚分布如图 5 所示. 从方案 1 到方案 3, 板材厚度分布更加均匀, 最小厚度依次增加, 分别为 0.44 mm、0.48 mm 和 0.57 mm. 不管预成型型面如何, 初始道次都可以看做单道次渐进成形过程. 由正弦定理, 方案 2 的成形角保持 45° 不变, 方案 1 和 3 由于预成型型面轮廓为曲线, 其成形角是不断变化的. 曲线上每一点的成形角是该点切线与垂线间的夹角. 由于方案 3 所有点的成形角都大于 45° , 根据正弦定理其厚度值最大; 相反, 方案 1 的厚度值最小. 由以上结果可以看出, 预成型型面不同, 对第一道次成形后板材厚度分布的影响也不同, 原因是预成型型面与侧壁轮廓线有关, 而侧壁轮廓线的改变使成形半锥角发生变化, 造成板厚分布的差异.

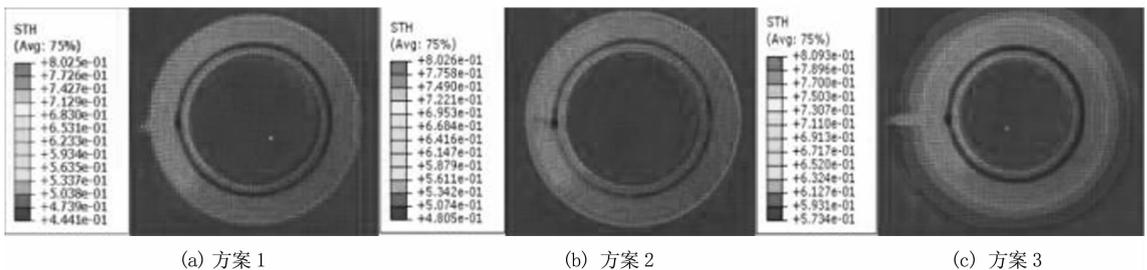


图 5 第一道次成形板厚分布
Fig. 5 Thickness distribution after the initial-stage forming

2.2 二道次成形后结果分析

2.2.1 板材厚度分析

在继承第一道次的材料属性和变形情况后, 进行二道次模拟, 二道次成形后制件沿径向板厚分布图如图 6 所示. 三种方案的两道次成形后的板厚分布与第一道次成形后的板厚分布有很大的不同, 从方案 1 到方案 3 的最大减薄率依次为 28.4%、39.9% 和 44.5%, 由此可得从方案 3 到方案 1, 厚度分布更加均匀, 最小板厚值依次增加; 方案 1 的预成型型面设计最为理想, 能得到成形效果更好的直壁件, 证明预成型型面对二道次渐进成形制件厚度有较大影响.

以往的研究认为多道次渐进成形改善板材减薄是因为塑性变形区域的增加^[15]. 然而, 在本实验中并非如此. 由图 6 可以看出, 方案 3 的变形区域最大但所得最终厚度值却最小. 这说明对于多道次成形

而言, 仅仅增加塑性变形区并不一定能提高最终的制件质量. 方案 3 在第一道次成形后厚度值最大, 但在第二道次成形过程中实际参与变形的区域大幅降低, 造成最终的减薄率增加; 而方案 1 所采用的预成型型面轮廓线为与直壁件两端相切的曲线, 此时厚度减薄率更低. 因此, 预成型型面对最终板材厚度分布有着重要的影响, 可以提出一种基于预成型型面轮廓线的方法来代替正弦定律预测最终板材厚度的分布规律.

2.2.2 等效塑性应变分布

选取距离制件顶部 10 mm 的 A 点, 如图 7 所示, 分别得到 A 点在一道次和二道次成形过程中的等效塑性应变变化曲线. 由图 7 可以看出, 在一道次渐进成形过程中, 三种方案的预成型型面不同, 对应 A 点的等效塑性应变也不同; 从方案 1 到方案 3, 塑

性应变逐渐减少;方案1和方案2的塑性应变相近,且与方案3的应变相差很大,这种变化趋势与一道次成形后的厚度分布规律一致.从图7中也可以看出,第一道次成形后与两道次成形后的等效塑性应变变化情况有很大的差别.等效塑性应变变化情况基本上与板厚变化规律一致.

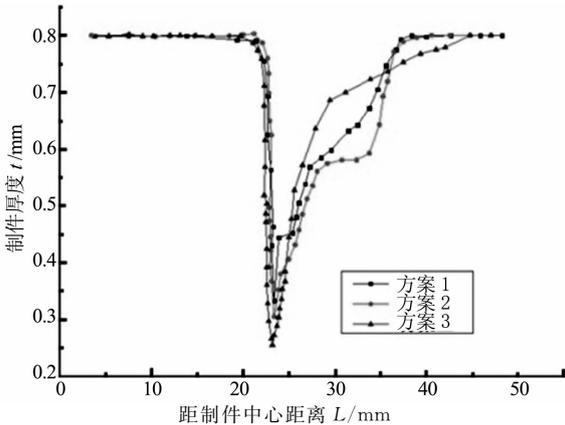


图6 二道次成形后板厚分布图

Fig. 6 Thickness distribution after the final pass

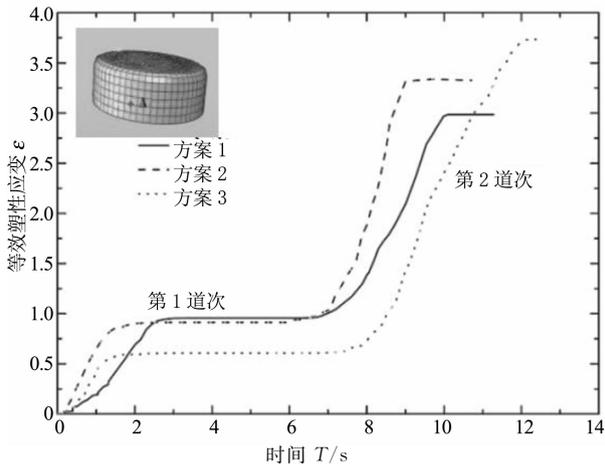


图7 二道次成形后A点等效塑性应变历史曲线

Fig. 7 The equivalent plastic strain distribution of point A of the final pass

3 实验验证

为了验证模拟结果的有效性,将上述三种方案在数控渐进成形机 NH3525 进行实验验证.在多道次渐进成形实际加工中,每道次的基准必须保持一致以使工具头定位准确,为了满足这一点的要求,本文所设计的两道次方案中支撑模型都选用圆柱直壁支撑模型,材料为代木,如图8(a)所示.同时加工时的工艺参数要和模拟时保持一致,工具头直径10 mm,进给速度设置为2 200 mm/min.此外,工具头与板料接触的部分保持润滑油润滑以减小摩擦.



(a) 木支撑模型

(b) 渐进成形机床 NH3525

图8 实验验证

Fig. 8 Experimental verification

将三种方案所得制件沿径向剖切,沿剖切线分别取15个点用千分尺分别测量板厚值,得到图9所示的板厚分布图.从方案3到方案1,厚度分布更加均匀,最小厚度值逐渐增加,其值依次为0.217 mm、0.30 mm和0.357 mm.实验结果与模拟结果基本相符,但试验所得的最小厚度值比模拟值略小,可能是由于模拟方案中的摩擦条件与实际有所差别.由此证明,方案1的预成型面设计最理想,能得到成形效果更好的二道次直壁件;方案3的成形质量最差,原因在于各区域成形角度差别过大,其厚度分布更加不均匀.

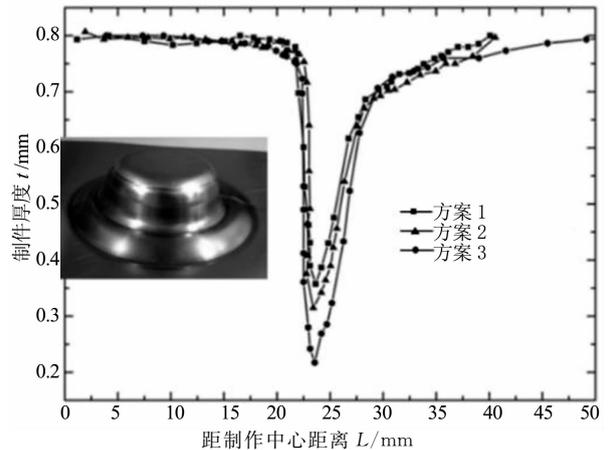


图9 径向板厚分布曲线

Fig. 9 Thickness distribution curve with different forming programs

4 最佳曲率半径

方案1被证实为三种方案中的最佳方案,但方案1中型面轨迹线的曲率半径是固定的,曲率半径的变化对厚度分布的影响值得进一步研究.因此,设计了9种不同预成型型面轨迹线圆弧,圆弧端点处切线夹角 θ (图3所示)从 10° 增大到 90° (增量 10°).为了准确评估不同预成型面对渐进成形最大减薄率的影响,本文引入了厚度分布均匀性作为评价原则,其定义为

$$F = \left[\sum_{i=1}^n (h^i - h^0)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (1)$$

式中: h^0 是初始厚度值, h^i 是最终厚度值, n 是单元总数, p 是加强因子, 通常取 2. 通常来说最小厚度越大, F 值就越小, 板材厚度均匀性就越好^[16].

图 10 为切线夹角不同时对应的最小厚度值及厚度均匀性曲线. 当夹角 θ 为 40° 时, 最小厚度值最大(0.337 7 mm), 最大减薄率和厚度均匀性 F 最小, 分别为 57.79% 和 0.735 3. 总的来说, 曲率半径和厚度之间并不存在线性关系, 随着 θ 的增加, 最小厚度值先增加后减小, 最大减薄率和厚度均匀性 F 先减小后增加.

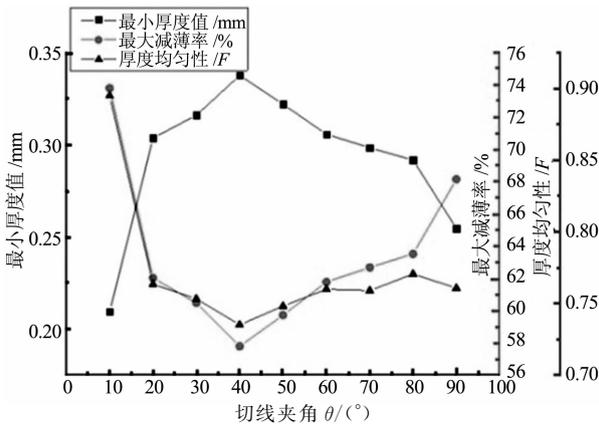


图 10 切线夹角 θ 对最小厚度、最大厚度减薄率、厚度均匀性的影响

Fig. 10 Evaluation of tangential angle(θ)

5 结论

本文以直壁件二道次渐进成形为研究对象, 设计了三种不同的预成型型面方案, 基于有限元分析和实验验证分析了三种方案对板厚分布的影响规律, 得到如下结论.

1) 预成型型面的不同会导致最终成形制件结果的不同. 方案 1 的预成型型面设计最为理想, 能得到成形效果较好的直壁件, 其厚度分布更加均匀, 最小板厚值最大, 等效应变相对较小.

2) 对于二道次渐进成形, 整个塑性变形区域的增加不一定会导致最小厚度增大, 最小厚度值决定于第二道次中实际参与塑性成形的区域面积大小, 而该区域大小与预成型型面设计关系密切.

3) 曲率半径和最终板材厚度之间并不存在线性关系. 当圆弧端点切线夹角为 40° 左右时, 可得到最佳的板厚分布.

参考文献

[1] 周六如, 莫建华, 肖祥芷. 板料零件数控渐进成形工艺研究[J].

塑性工程学报, 2003, 10(4): 27-29.

ZHOU L R, MO J H, XIAO X Z. Research on numerical control incremental forming process of sheet metal part [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10(4): 27-29. (In Chinese)

[2] 莫建华, 陈正迪. 金属板料数控渐进成形技术[J]. 航空制造技术, 2002, 12: 25-28.

MO J H, CHEN Z D. Numerical control incremental forming technology of sheet metal [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2002, 12: 25-28. (In Chinese)

[3] FILICE L, FRATINI L, MICARI F. Analysis of material formability in incremental forming[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2002, 151(1): 199-202.

[4] KIM T J, YANG D Y. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(7): 1271-1286.

[5] YOUNG D, JESWIET J. Wall thickness variations in single-point incremental forming[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218(11): 1453-1459.

[6] LI J B, YANG F F, ZHOU Z Q. Thickness distribution of multi-stage incremental forming with different forming stages and angle intervals[J]. Journal of Central South University of Technology, 2015, 22(3): 842-848.

[7] LIU Z B, LI Y L, PAUL A, et al. Tool path strategies and deformation analysis in multi-pass incremental sheet forming process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1/4): 395-409.

[8] MALHOTRA R, BHATTACHARYA A, KUMMAR A, et al. A new methodology for multi-pass single point incremental forming with fixed toolpaths[J]. Cirp Annals Manufacturing Technology, 2014, 60(1): 323-326.

[9] HIRT G, AMES J, BAMBACH M. Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 203-206.

[10] JACKSON K, ALLWOOD J. The mechanics of incremental sheet forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1158-1174.

[11] KIM T J, YANG D Y. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 42(7): 1271-1286.

[12] ISEKI H, NAGANAWA T. Vertical wall surface forming of rectangular shell using multi-stage incremental forming with spherical and cylindrical rollers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130131(02): 675-679.

[13] 周杰, 胡建标, 张旭, 等. 二道次板料渐进成形过程仿真与实验验证[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(7): 46-50.

ZHOU J, HU J B, ZHANG X, et al. Simulation and experimental verification of two pass sheet metal incremental forming process [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(7): 46-50. (In Chinese)

[14] LI J C, HU J B, PAN J J, et al. Thickness distribution and design of a multi-stage process for sheet metal incremental forming[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(9/12): 981-988.

[15] LIU Z B, LI Y L, PAUL A, et al. Tool path strategies and deformation analysis in multi-pass incremental sheet forming process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1/4): 395-409.

[16] SUN G Y, LI G Y, ZHANG Y. Research on quality evaluation criteria of sheet metal drawing forming based on finite element analysis and optimization of process parameters[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2009, 30(1): 70-76.