

# 波长对板料锤击式渐进成形性能的影响

王小连, 王进, 周鹏, 柳琪

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** **目的** 研究不同波长对板料锤击式渐进成形性能的影响规律。**方法** 以波长为单一因素, 将波长值从 0.5~5 mm 进行多次重复性实验, 分别与普通渐进成形实验结果进行对比。**结果** 波长对材料的成形性有显著影响, 锤击式渐进成形波长值在 0.5~5 mm 时, 板料的成形性能均高于普通渐进成形, 随着波长的增加, 板料的成形性能降低, 成形时间减少。**结论** 锤击式渐进成形相对于普通渐进成形在成形性能方面具有优越性, 综合考虑成形性能、加工时间和表面质量等因素, 板料锤击式渐进成形波长为 0.5 mm 时, 成形性能最好。

**关键词:** 渐进成形; 正弦刀路轨迹; 波长; 表面粗糙度

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.019

**中图分类号:** TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0098-04

## Effects of Wavelength on Incremental Pressing Forming of Sheet Metal

WANG Xiao-lian, WANG Jin, ZHOU Peng, LIU Qi

(College of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study effects of different wavelength on the incremental forming process of sheet metal. With the wavelength as a single factor, the wavelength tested was repeated from 0.5~5 mm to be compared with experimental results of ordinary incremental forming. The wavelength had significant effects on the formability of material. When the wavelength of the hammer type incremental forming was 0.5~5 mm, the forming performance of sheet metal was higher than ordinary incremental forming; with the increase of the wavelength, the formability was reduced, and the forming time was also reduced. The hammer type compared to ordinary incremental forming has superiority in forming performance of incremental forming. Considering the forming performance, machining time and surface quality, the forming performance is the best when the wavelength of the hammer type incremental forming of sheet metal is 0.5 mm.

**KEY WORDS:** incremental forming; sinusoidal tool path; wavelength; surface roughness

传统板料塑性成形采用模具冲压成形, 是利用安装在压力机上的模具对板料施加压力, 使其产生分离或塑性变形, 从而获得所需零件的一种加工方法<sup>[1]</sup>。板料数控渐进成形的原型是工匠利用锤子不断敲击板料至相应的成形形状。和传统板料冲压成形相比, 渐进成形不需要模具或只需要凸模, 借助工件 CAD 模型能够快速完成板料制件的成形, 特别适合新产品开发以及单件或小批量钣金件的生产, 可作为冲压企业柔性制造环节, 是对传统冲压成形的有利补充<sup>[2-5]</sup>。

近年来, 为了使渐进成形技术提高加工柔性化, 满足人们对个性化的追求, 已有学者采用机器人辅助渐进成形加工, 机器人手臂灵活性较好, 自由度较高, 具有较高的工业应用价值<sup>[6-9]</sup>。也有一些学者在不加入机械手臂的条件下, 通过改造数控机床的结构, 从而实现锤击式渐进成形。如 LUO 等<sup>[10-11]</sup>开发了一种新的渐进成形机器, 机器的成形装置垂直于金属板料, 可自由滑动, 滑块由高速液压缸驱动, 产生对板料的连续冲击以实现锤击式渐进成形。实验结果表明, 锤

收稿日期: 2017-04-07

作者简介: 王小连 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属板料的渐进成形。

通讯作者: 王进 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为板料渐进成形理论与工艺。

击式渐进成形是一种有效的无模具金属板料成形技术。王进等<sup>[12]</sup>提出了一种新的锤击式渐进成形工艺, 在普通数控机床或专用板料成形机上, 在不增加任何附加装置的情况下, 进行锤击式渐进成形工艺, 通过修改 CAD/CAM 软件生成的刀具轨迹, 将二维等高线上的点利用插值的方法离散成为正弦曲线上的点, 生成新的正弦刀路轨迹, 利用计算机辅助设计软件生成的刀具路径, 实现了对每一层刀具的周期性冲击。实验结果表明, 该方法能够实现网孔板和无孔板的成形, 此外, 波长对材料的成形性和端面质量有显著影响。

## 1 实验

锤击式渐进成形时工具头与板料接触的次数受工具头运动轨迹的波长和振幅参数影响。成形过程中, 当改变波长和振幅时, 板料的成形性能会发生改变。文中在波长基础上扩大了研究范围, 研究锤击式渐进成形时波长对板料成形性能的影响规律, 得到最优化的工艺参数和成形轨迹, 从而提升板料的成形性能。

采用锤击式渐进成形工艺加工变角度圆锥杯, 根据 HUSSAI G 等<sup>[13-14]</sup>提出的渐进成形测试方法, 通过实验获得 1060 工业纯铝板料不同波长单因素影响下的工件, 计算板料的成形极限角, 得出不同波长对板料成形性能的不同结果。通过对比, 确定出成形性能较好的波长范围。

### 1.1 设备及材料

实验设备选用 NHJ-1A 数控渐进成形机床, 采用 1060 工业纯铝板料<sup>[15-16]</sup>, 依据 GB/T 3190—1996, 1060 工业纯铝含有质量分数为 0.35% 的 Fe, 0.03% 的 Mn, 0.03% 的 Mg, 0.25% 的 Si, 0.05% 的 Zn, 0.03% 的 Ti, 0.05% 的 Cu, 不小于 99.6% 的 Al。规格为 150 mm×150 mm×1 mm, 实验润滑方式为 46 号机油润滑。

### 1.2 三维模型

实验的三维模型在 UG-NX8.0 中建立, 变角度锥杯的角度变化范围为 45°~90°。变角度锥杯见图 1, 圆弧  $P_1P_2$  为变角度锥杯模型回转用的母线, 成形破

裂角  $\theta_{\max}$  是板料成形不发生破裂的最大成形角。在实验模型中, 从母线起点  $P_1(x_1, z_1)$  到母线终点  $P_2(x_2, z_2)$ , 制件成形角逐渐增大, 板料破裂将出现在  $P_1P_2$  两端点之间的某个地方  $D(x_d, z_d)$ , 破裂处的成形角可作为板料的成形破裂角。成形破裂角计算见式(1)<sup>[17]</sup>。

$$\theta_{\max} = \theta_D = \arccos[(Z_2 - Z_D) / R] \quad (1)$$

式中:  $R$  为母线  $P_1P_2$  的半径,  $R=63.64$  mm;  $Z_D$  是试验工件破裂处点  $D(x_d, z_d)$  处的成形深度;  $Z_2$  为锥杯总深度,  $Z_2=45$  mm。

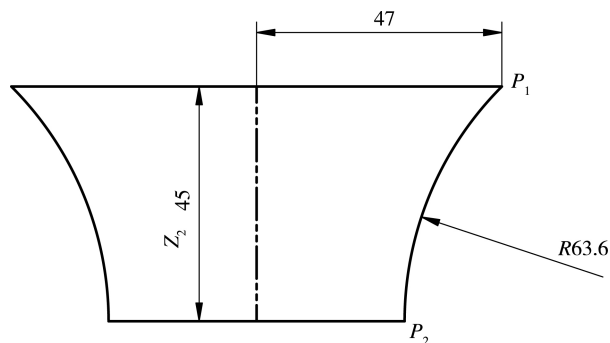


图1 变角度锥杯简化

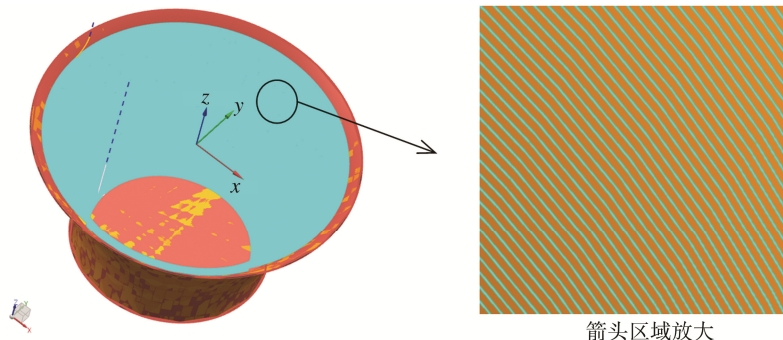
Fig.1 Simplified diagram of tapered cup

### 1.3 实验参数选定

为了研究锤击式渐进成形过程中波长这一工艺参数对成形性能的影响规律, 得出成形较好的波长范围, 实验中除波长外的其他工艺参数都设定为不变的值, 工具头直径为 10 mm,  $z$  轴层进给量为 0.2 mm, 进给速度为 500 mm/min, 振幅为 0.6 mm, 润滑方式采用 46 号机油。实验中波长分别取 5 个不同值, 分别与普通渐进成形实验结果进行对比, 将普通渐进成形方案记为试验 A, 普通渐进成形无波长。实验 B—F 均采用锤击式渐进成形, 其波长分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 mm。

### 1.4 实验方案

首先用 UG-NX8.0 软件建模, 绘制变角度为 45°~90°的变角度锥杯的三维模型, 直径为 94 mm。在 UG 加工模块下设置加工参数 (如层进给深度、加工方式、工具头半径等), 生成工具头加工轨迹 (见图 2) 及加工刀路文件。将生成的刀路文件数据改为



箭头区域放大

图2 工具头加工轨迹

Fig.2 Tool path

$x$ - $y$ - $z$  轴坐标上的矩阵, 加工三轴刀路。

通过数学计算软件 Matlab 编写程序, 将坐标矩阵转

化为直观的图像形式 (见图 3), 得到工具头运动轨迹以及通过程序插值变换的锤击式渐进成形的刀路新轨迹。

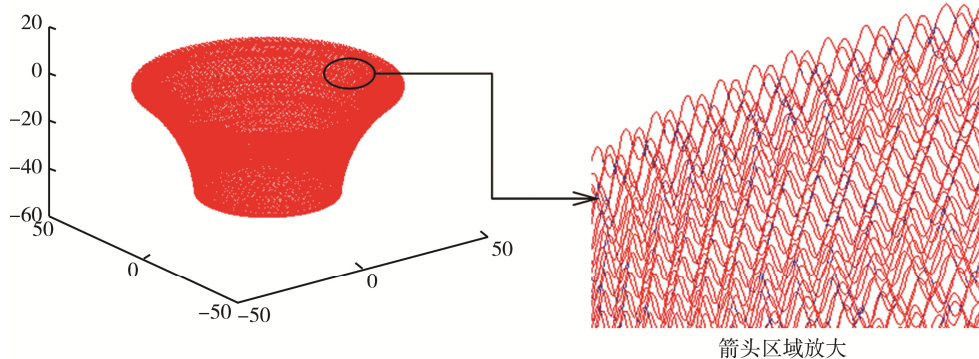


图 3 正弦形式轨迹

Fig.3 Diagram of sine form

通过夹板将板料四周固定, 将提前编好的锤击式渐进成形加工程序代码导入数控机床中进行加工, 转速设置为 500 r/min, 加工过程中不断使用润滑油进行润滑降温, 保持实验其他因素一致。逐点分层对板料进行加工, 直至工件出现破裂或者完成, 实际加工过程见图 4。

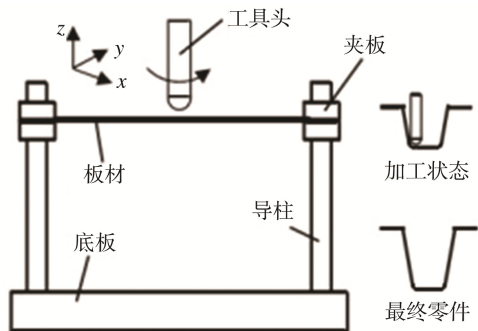


图 4 实验加工

Fig.4 Schematic diagram of experiment

## 2 结果及分析

实验锥杯的照片见图 5, 用高度游标卡尺测量出材料成形的深度, 将测量结果带入到式(1)中, 计算各个波长的成形破裂角, 发现试验 A—F 的断裂处高度分别为 32.32, 36.86, 36.60, 36.40, 35.78, 32.40 mm, 成形最大角度分别为 78.51°, 82.65°, 82.42°, 82.23°, 81.67°, 78.58°。将数据处理, 不同波长与成形破裂高度的关系见图 6。

根据所得实验数据可以看出, 在其他因素一定的情况下, 波长从 0.5 mm 增加到 2 mm 时, 板料的成形破裂角逐渐减小, 成形性能降低且下降较快; 波长在 2~5 mm 时, 成形破裂角依旧会减小, 此时成形性能降低相对变得平缓。

由此可得, 随着波长值变大, 板料的成形极限角减小, 即板料的成形性能降低, 较小的波长有更好的成形性能。原因是锤击式渐进成形中, 沿着刀具进给

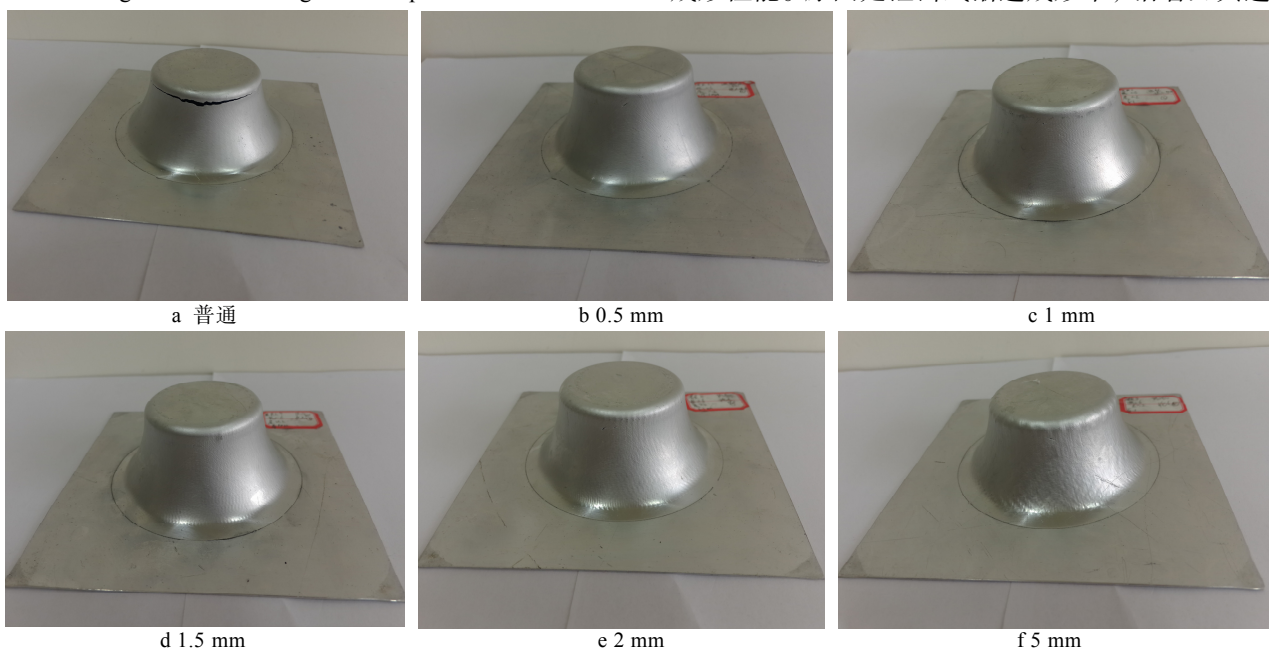


图 5 不同波长下的实验锥杯

Fig.5 Experimental cone cup at different wavelengths

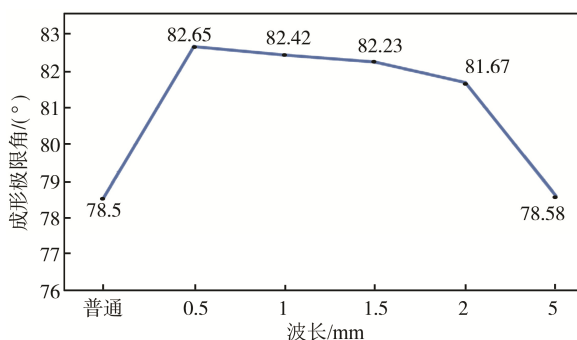


图6 不同波长下的成形极限角

Fig.6 Polygonal line of forming limit angle at different wavelengths

方向的水平方向上的摩擦力, 小于普通渐进成形中的水平方向上的摩擦力, 并且间歇性地冲击工具引起的板料振动, 可能会增加锤击式渐进成形的材料成形性, 水平方向上的摩擦力随着锤击式渐进成形波长的增加而增加, 导致板料成形性能随着波长的增加而降低。与普通渐进成形对比, 5 种不同波长参数的锤击式渐进成形极限角均大于普通渐进成形, 所以波长值大小在 0.5 ~ 5 mm 内的锤击式渐进成形的成形性能高于普通渐进成形。

在锤击式渐进成形的实验过程中发现, 不同的波长会影响成形时间和表面质量。随着波长减小, 工具头运动轨迹插值点的数量不断增加, 刀路过长, 导致实际加工时间太长, 影响加工效率。随着波长的增大, 波长值较大时, 零件表面会出现波浪纹, 大大降低实际加工中板料的表面质量。所以在锤击式渐进成形时, 在获得较好成形性能的同时, 需要考虑成形时间和表面质量等影响, 综合衡量之后确定合理的工艺参数。

### 3 结论

1) 在一定条件下, 锤击式渐进成形的成形性能要高于普通渐进成形。

2) 锤击式渐进成形时, 随着波长值的增大, 板料成形性能降低。

3) 综合考虑成形性能、加工时间和表面质量等因素, 在一定条件下板料锤击式渐进成形时波长为 0.5 mm 时, 成形性能最好。

#### 参考文献:

- [1] 肖景容, 姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
XIAO Jing-rong, JIANG Kui-hua. Stamping Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [2] 莫健华, 韩飞. 金属板材数字化渐进成形技术研究现状[J]. 中国机械工程, 2008, 19(4): 491—497.  
MO Jian-hua, HAN Fei. State of the Arts and Latest Research on Incremental Sheet NC Forming Technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 19(4): 491—497.
- [3] LIU J, MO J H, HUANG S H. Sheet Metal Die-less Forming and Its Tool Path Generation Based on STL Files[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(9/10): 696—699.
- [4] 肖冰, 曹红锦, 张志明, 等. 国外金属板材单点渐进成形技术研究的新进展[J]. 精密成形工程, 2010, 2(5): 38—40.  
XIAO Bing, CAO Hong-jin, ZHANG Zhi-ming, et al. New Development of Foreign Single-point Incremental Metal Sheet Forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(5): 38—40.
- [5] 李燕乐, 陈晓晓, 李方义, 等. 金属板材数控渐进成形工艺的研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(1): 1—9.  
LI Yan-le, CHEN Xiao-xiao, LI Fang-yi, et al. Research Development on Incremental Sheet Metal Forming Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(1): 1—9.
- [6] MEIER H, ZHU J, BUFF B. CAX Process Chain for TWO Robots Based Incremental Sheet Metal Forming[J]. Procedia Cirp, 2012, 3: 37—42.
- [7] BELCHIOR J, LEOTOING L. A Process/Machine Coupling Approach: Application to Robotized Incremental Sheet Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 1605—1616.
- [8] CALLEGARI M, ANDREA G. Incremental Forming of Sheet Metal by Means of Parallel Kinematics Machines[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130(054501): 1—5.
- [9] LAMMINEN L. Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot-forming Limits and Their Effect on Component Design[J]. Advanced Materials Research, 2005, 6/7/8: 457—464.
- [10] LUO Yuan-xin, HE Kai, DU Ru-xu. A New Sheet Metal Forming System Based on the Incremental Punching, Part 1 Modeling and Simulation[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2010, 51: 481—491.
- [11] LUO Yuan-xin, HE Kai, DU Ru-xu. Investigations on the Formability of Incremental Punching Process[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2011, 5(4): 227—239.
- [12] WANG Jin, LI Li-hua, JIANG Hu-sen, et al. Incremental Sheet Punching on the Base of Sinusoidal Tool Path[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 1—4.
- [13] HUSSAIN G, GAO L. A Novel Method to Test the Thinning Limits of Sheet Metals in Negative Incremental Forming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47: 419—425.
- [14] HUSSAIN G, GAO L, DAR N U. An Experimental Study on some Formability Testing Method in Incremental Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186: 45—53.
- [15] 张志刚, 王进, 李丽华. 点压渐进成形工艺的数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2016, 41(3): 134—139.  
ZHANG Zhi-gang, WANG Jin, LI Li-hua. Research on Numerical Simulation of the Incrementally Pressing Forming Process[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(3): 134—139.
- [16] 周六如. 板料数控渐进成形中变形力的研究[J]. 精密成形工程, 2010, 2(1): 10—14.  
ZHOU Liu-ru. A Study of NC Incremental Sheet Metal Forming Force[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(1): 10—14.
- [17] 张志刚, 王进, 李丽华, 等. 点压渐进成形工具头运动轨迹形成方法研究[J]. 锻压技术, 2015, 40(3): 70—73.  
ZHANG Zhi-gang, WANG Jin, LI Li-hua, et al. Research on the Method of Motion Trajectory of Tool-head in Incrementally Pressing Forming[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(3): 70—73.