DOI:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2018. 04. 005

圆锥形单点增量成形件轴向精度研究

张敬冲,李 言,吴学亮,杨明顺,袁启龙

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,陕西 西安 710048)

摘要:金属板料单点增量成形件精度不足是制约该技术发展的一项重要因素,轴向精度是成形件 精度的重要组成部分。首先,以1060 铝板圆锥台件为成形对象,对单点增量成形过程中造成轴向 误差的原因进行分析。然后,对成形过程建立有限元模型,通过数值模拟的方式探讨成形件轴向误 差在不同工艺参数下的变化规律,选取的工艺参数有成形角、层间距、板料厚度、进给速度以及工具 头直径。接着,根据相应的实验验证数值模拟的结果。最后给出提高轴向精度的方法。结果表明: 轴向误差值随着工具头直径、层间距、进给速度、成形角度和板料厚度的增大而增加,而采用高度补 偿和提高工具头转速可以有效降低轴向误差,提高成形件精度。

关键词: 单点增量成形; 轴向精度; 影响因素; 改善措施

中图分类号: TG386 文献标志码: A 文章编号: 1006-4710(2018)04-0407-08

Research on axial accuracy of cone type single point incremental forming parts

ZHANG Jingchong, LI Yan, WU Xueliang, YANG Mingshun, YUAN Qilong (School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China) **Abstract**: Accuracy deficiency of the sheet metal single point incremental forming (SPIF) is an important factor restricting the development of this technology, with axial accuracy being the key part of the accuracy of workpieces. Firstly, the cause of axial error in the process of SPIF is analyzed based on 1060 Aluminum sheet conical parts. Then, the finite element model is established, with the variation of the axial error under different process parameters discussed by numerical simulation. The selected process parameters include forming angle, layer spacing, sheet thickness, feed rate and diameter of tool head. Subsequently, the results of the numerical simulation are verified according to the corresponding experiments. Finally, the methods for improving the axial accuracy are presented. The results show that the axial error increases with the increase of tool head diameter, layer spacing, feed rate, forming angle and sheet thickness; the method for using height compensation and improving the tool rotation speed can effectively reduce the axial error and improve the accuracy of the parts.

Key words: single point incremental forming; axial accuracy; influence factor; improvement measure

金属板料单点增量成形技术是一种新型塑性成 形技术,具有成本低、周期短、数字化程度高等特点, 已在航空航天、汽车、医疗、艺术品和日常生活等领 域有所应用^[1]。其成形过程是一个复杂的变形累积 过程,涉及工艺参数繁多,存在很多难以预测和控制 的成形缺陷,尺寸精度不高已成为制约该技术推广 的重要因素。近年来,大量学者对成形机理^[2]、成形 过程中工艺参数对成形性能的影响^[3]、成形工具头 的路径优化^[4-5]、成形过程的数值模拟^[6-7]及非常温 成形^[8-9]等方面进行了研究。Radu^[10]等通过使用响 应曲面法和神经网络算法有效地提高了成形件的精 度。Guzmán等^[11]研究了成形力与成形精度之间的 关系,提出了减小成形载荷、提高成形精度的方法。 Husain等^[12]提出应力比的概念,改变与应力比相 关的参数来控制成形件的缺陷。高霖等^[13]分析了 层间距、成形角、板料厚度和工具头直径等因素对于

收稿日期: 2017-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475366,51475146);陕西省科技计划资助项目(2016JM5074)

作者简介:张敬冲,男,硕士生,研究方向为先进制造技术。E-mail:15667096303@163.com

通讯作者:李言,男,教授,博导,博士,研究方向为先进制造与现代加工技术。E-mail:Jyxy-ly@xaut.edu.cn

方锥台件鼓包和材料堆挤等缺陷的影响,通过合理 选择工艺参数较好地控制了上述缺陷。韩飞等^[14] 采用遗传神经网络算法对板料成形过程中的回弹量 进行了建模,为金属板料数字化渐进成形回弹量预 测开辟了一条新途径。甘文星^[15]提出通过使用背 压板以及增大成形角度的方法以达到抑制或减小回 弹的目的。

综上所述,国内外的科研工作者对成形件精度 的研究主要集中在误差产生机理、路径优化、回弹建 模等方面,取得了一定的成果。然而,以轴向误差作 为研究对象来衡量精度的研究还比较少。为此,本 文由成形件轴向误差产生机理作为研究切入点,通 过 ABAQUS 仿真模拟轴向误差在不同工艺参数下 的变化规律,然后通过相应实验对其规律进行验证 分析,最终实现对轴向误差的预测和控制。

1 轴向误差产生原理

1.1 单点增量成形原理

单点增量成形技术是一种新型的板料柔性塑性 成形技术,成形原理类似于 3D 打印的"分层制造"。 首先,根据目标制件的几何形貌,离散生成一系列沿 高度方向的等高轮廓层;然后,定制的工具头在机床 的控制下沿等高轮廓层逐层挤压板料;最后,被挤压 的板料在局部变形的累积作用下,形成了与目标制 件形貌一致的成形件,见图 1。图 1 中 D 是工具头 直径,α是成形角,t 是板料初始厚度,Z 为层间距。 本文选择圆锥台作为最终的成形件形状,将圆锥台 功能表面轴向高度的实际值与理论值之间求差,即 为轴向误差,见图 2。



Fig. 1 Principle diagram of SPIF



1.2 板料回弹造成的轴向误差

单点增量成形过程完成时,由于工具头与板料 之间不再有接触,作用在板料上的轴向力会消失,残 余应力会使板料沿轴向发生回弹;而将成形件从夹 具中取下时,夹具对板料边缘的夹持力突然消失,板 料亦会在残余应力作用下发生回弹现象。当回弹量 超过一定值时会影响成形件精度,造成几何缺陷,见 图 3。



1.3 板料弯曲造成的轴向误差

单点增量成形件的轴向高度是以功能表面的起 始处到结束处的垂直距离,其成形过程是以 NC 程 序控制机床进行。程序默认的工件轴向高度起始于 板料的上端面,但由于未成形区域会发生不可逆的 塑性弯曲变形,故实际的工件功能表面并未起始于 板料的上端面平面,在板料弯曲变形处有部分轴向 高度损失,如图 4 所示。



图 4 板料弯曲变形示意图 Fig. 4 Sketch of springback of sheet metal

2 有限元建模

2.1 几何模型

几何模型形状选择典型的圆锥台,圆锥台深度 24 mm,顶圆半径 45 mm;待成形板料尺寸为 140 mm× 140 mm 的方板;工具头选用球头工具;夹具采用环 形夹具,外环半径 70 mm,内环半径 55 mm。工具 头直径、板料厚度、成形角度及底圆半径根据实验条 件决定,建立的几何模型见图 5,其中板料选用 1060 铝板,其材料性能见表 1,应力应变属性见表 2。根 据仿真算法特性和成形过程特性,对成形过程采用 动力显式算法(Explicit),对成形后夹具卸载过程采 用静力隐式算法(Standard)进行模拟。成形过程中 的接触方式设为面-面接触,接触算法设为罚函数, 摩擦类型设为 Coulomb 摩擦。对板料进行网格划

分,网格属性设为壳单元 S4R,边长是1 mm。



图 5 仿真模型 Fig. 5 Simulation model

表 1 1060 铝材料性能

Tab. 1 1060 aluminum material properties

计划力的	密度 p/	弹性模量	泊松比	屈服强度
材料名称	(g/mm^3)	$E/{ m GPa}$	γ	$\delta_{\rm s}/{ m MPa}$
1060 铝	2.71	70	0.3	30

	表 2	1060 铝	应力应	变关系		
Tab. 2	1060 al	uminum	stress-s	strain	relationsh	ip
1/		6.4		07	0.0	

MPa	21	45	64	76	87	92	98
应变	0.002	0.017	0.051	0.084	0.120	0.136	0.167

2.2 动态轨迹加载

应ナ

为提高仿真效率和精度,以实验所用的 NC 程 序代替传统建模的分析步设置。首先,在 Excel 中 将每行 NC 代码修改为(*X*、*Y*、*Z*)的坐标格式,并以 文档格式另存;然后,通过 Matlab 对将(*X*、*Y*、*Z*)坐 标与时间进行——对应;最后,将对应关系(*X*,*T*)、 (*Y*,*T*)、(*Z*,*T*)导入到 ABAQUS 中,实现仿真与实 验的统一。

在仿真中将单点增量成形的空间轨迹分解成 X、Y、Z方向的分运动,利用平滑分析步进行加载,将 Matlab提取出的(X,T)、(Y,T)、(Z,T)数据对应到X、 Y、Z三个方向运动的幅值中,三个方向的运动在分析 步时间内合成即得到成形过程的空间轨迹。

根据上述过程,最终建立的有限元模型见图 6, 仿真完成后等效应力云图见图 7。

3 仿真结果与分析

3.1 模拟仿真方案

单点增量成形过程中工艺参数较多,其对轴向 精度影响规律和影响程度各不相同,为研究工具头 直径、层间距、进给速度、成形角度、板料厚度等工艺 参数对轴向误差的影响,设计正交实验,见表 3。







图 7 仿真完成后等效应力云图 Fig. 7 Stress cloud after simulation

表 3 实验参数 Tab. 3 Experimental parameters

编号	工具头直径 D/mm	层间距 Z/mm	进给速度 v/(mm/min)	成形角度 α/(°)	板料厚度 t/mm
L_1	6	0.6	100	45	0.6
L_2	6	0.8	200	53	0.8
L_3	6	1	300	60	1
L_4	10	0.6	100	53	0.8
L_5	10	0.8	200	60	1
L_6	10	1	300	45	0.6
L_7	14	0.6	200	45	1
L_8	14	0.8	300	53	0.6
L_9	14	1	100	60	0.8
L_{10}	6	0.6	300	60	0.8
L_{11}	6	0.8	100	45	1
L_{12}	6	1	200	53	0.6
L_{13}	10	0.6	200	60	0.6
L_{14}	10	0.8	300	45	0.8
L_{15}	10	1	100	53	1
L_{16}	14	0.6	300	53	1
L_{17}	14	0.8	100	60	0.6
L_{18}	14	1	200	45	0.8

当正交实验进行完毕后,会得出各工艺参数对 成形精度的影响规律和影响权重,为验证这些结论 的正确性,设计单一实验进行验证。然后观察这个 实验变量对实验结果的影响。对照正交实验,设计 单一实验,见表4。

	表 4 单一实验参数	
Tab. 4	Single experimental parameters	s

编号	工具头直径	层间距	进给速度	成形角度	板料厚度
	D/mm	Z/mm	v/(mm/min)	$\alpha/(^{\circ})$	t/mm
A_1	6	1	200	45	1
A_2	10	1	200	45	1
A_3	14	1	200	45	1
B_1	10	0.6	200	45	1
B_2	10	0.8	200	45	1
B_3	10	1	200	45	1
C_1	10	1	100	45	1
C_2	10	1	200	45	1
C_3	10	1	300	45	1
D_1	10	1	200	45	1
D_2	10	1	200	53	1
D_3	10	1	200	60	1
E_1	10	1	200	45	0.6
E_2	10	1	200	45	0.8
E_3	10	1	200	45	1

图 8 为成形件的半剖图,图中的结点 1~2 相处 同一高度,两节点的距离为制件在此高度处的直径, 这条直径线与圆锥台底圆的距离是实际轴向高度, 此高度与理论高度值的偏差即是成形件的轴向误差。





3.2 仿真结果

对模拟结果进行处理,分别求取表 3 中不同编 号实验时成形件轴向误差值 ΔH (单位:mm),得出 的数据见表 5。

	表 5	仿真时不	同工艺	参数对轴向	误差	差的景	彡响	
Tab. 5	Effects of	different p	process	parameters	on	axial	error	simulation

试验号	工具头直径 D/mm	层间距 Z/mm	进给速度 v/(mm/min)	成形角度 α/(°)	板料厚度 t/mm	轴向误差 $\Delta H/{ m mm}$
L_1	6	0.6	100	45	0.6	3.7587
L_2	6	0.8	200	53	0.8	4.282 9
L_3	6	1	300	60	1	4.988 9
L_4	10	0.6	100	53	0.8	4.778 8
L_5	10	0.8	200	60	1	4.648 6
L_6	10	1	300	45	0.6	4.472 1
L_7	14	0.6	200	45	1	4.676 6
L_8	14	0.8	300	53	0.6	4.691 8
L ₉	14	1	100	60	0.8	4.770 5
L_{10}	6	0.6	300	60	0.8	4.652 4
L_{11}	6	0.8	100	45	1	4.698 0
L_{12}	6	1	200	53	0.6	4.479 0
L ₁₃	10	0.6	200	60	0.6	4.642 5
L_{14}	10	0.8	300	45	0.8	4.219 5
L_{15}	10	1	100	53	1	4.614 0
L_{16}	14	0.6	300	53	1	4.597 1
L ₁₇	14	0.8	100	60	0.6	4.891 0
L_{18}	14	1	200	45	0.8	4.834 4
K_1	26.860 2	27.106 2	27.511 2	26.659 2	26.935 2	
K_2	27.375 6	27.432 0	27.564 0	27.443 4	27.538 8	
K_3	28.461 6	28.159 2	27.621 6	28.594 2	28.223 4	
k_1	4.476 7	4.517 7	4.585 2	4.343 2	4.489 2	
k_2	4.562 6	4.572 0	4.594 0	4.507 3	4.589 8	
k_3	4.743 6	4.693 2	4.603 6	4.742 3	4.703 9	
极差 D _i	1.601 4	1.053 0	0.110 4	1.935 0	1.288 2	
影响程度			$\alpha > D > t >$	Z > F		

极差(D_i)是将各种因素在每种水平下的模拟 结果求和(用 K_i 表示),用和的最大值减去最小值 所得。极差数值越大代表该因素在模拟的水平范围 内对结果在数值上影响越大,极差值最大的因素,即 为对模拟结果影响最重要的因素。在对轴向误差的 模拟中,极差值的大小顺序为: $\alpha > D > t > Z > F$,故 各因素对轴向误差的影响程度从大到小依次为:成 形角度 (α) 、工具头直径(D)、板料厚度(t)、层间距 (Z)、进给速度(F)。 k_i 为K,的平均值($k_i = K_i/n$), 可用来表示每种因素在不同水平下模拟结果的变化 规律,即各种工艺参数对成形精度变化规律的影响。

正交实验和单一实验下不同工艺参数对轴向精 度的影响规律和影响程度对比见图 9。

由图 9 可以看出,在单一实验和正交实验中,各 因素对轴向误差值的影响规律一致。验证了正交实 验模拟得出规律的正确性。轴向误差值随工具头直 径、层间距、成形角度和板料厚度的增大而增大,进 给速度对轴向误差值影响较小。

3.3 成形精度的经验公式拟合

单点增量成形是一个几何非线性和位移非线性 的复杂成形过程,成形机理复杂且涉及的工艺参数 繁多,要通过定性的分析得出准确的成形误差表达 式比较困难。正交实验统计了大量实际可用的数 据,故可利用计算机模拟将实验进行数学模型化,通 过回归模拟拟合出相应的数学模型,即可得出较为 可靠的经验公式。

正交实验的回归方式中应用较广的是线性回归和 二次多项式回归两种,二次多项式回归又可分为纯二 次多项式回归、交叉二次多项式回归。对于轴向误差 进行回归分析,得出经验公式和对应剩余标准差如下。

1) 线性回归公式:

- $v_1 = 2.3362 + 0.0334x_1 + 0.4387x_2 + 0.0001x_3 +$ $0.0214x_4 + 0.5367x_5$ (1)
- 剩余标准差为 $S_E = 0.0811$ 。
 - 2) 纯二次多项式回归公式:

$$y_2 = 5.\ 2157 - 0.\ 0260x_1 - 0.\ 8993x_2 + 0.\ 0001x_3 - 0.\ 0558x_4 + 0.\ 2657x_5 + 0.\ 0030x_1^2$$

剩余标准差为 $S_E = 0.290 8$ 。

$$y_3 = -2.6181 + 0.1625x_1 + 5.8889x_2 - 0.0182x_3 + 0.0599x_4 + 7.5926x_5 - 0.0744x_1x_2 - 0.0182x_3 + 0.0599x_4 + 7.5926x_5 - 0.0744x_1x_2 - 0.0182x_3 + 0.0599x_4 + 0.0599x_5 + 0.0599x_5 + 0.0599x_5 + 0.0599x_5 + 0.0599x_5 + 0.0598x_5 + 0.058x_5 + 0.058x_$$

$$0.0004x_1x_3 + 0.0018x_1x_4 - 0.0579x_1x_5 +$$

$$0.0083x_2x_3 - 0.0849x_2x_4 - 2.2154x_2x_5 +$$

$$0.0004x_3x_4 = 0.0031x_3x_5 = 0.0768x_4x_5$$
 (3)
剩余标准差为 $S_F = 0.1461_{\circ}$

可看出线性回归公式的剩余标准差最低,显著 性最好,为最优回归经验公式。故轴向误差最优求 解经验公式为:



Fig. 9 single experiment results

$$0001F + 0.0214\alpha + 0.5367t \qquad (4)$$

4 实验验证

4.1 轴向精度的测量

成形件的实际高度测量方法见图 10,将数控铣 床刀具用直径为 2 mm 的探针替代,以成形件内表 面底部为参考面,记录该参考面 z 方向坐标,手动控 制主轴将探针精确定位在起始功能表面处,记录下 该平面 z 方向坐标,通过对两平面 z 方向坐标值求 差即可得到成形件的实际轴向高度。



图 10 三坐标测量示意图 Fig. 10 Sketch map of three-coordinate measurement

4.2 实验结果分析

采用表 4 中的实验参数并适当增加实验次数进 行成形,求取成形件轴向误差,其变化规律见图 11。

工具头直径由 6 mm 增大到 14 mm 时,轴向误 差由 16.92%增大到 21.42%,变化显著;当层间距 由 0.6 mm 增大到 1.0 mm 时,轴向误差由 18%增大 到 20.50%,变化明显;当进给速度由 100 mm/min 增 大到 300 mm/min 时,轴向误差由 20.17%增大到 21%,变化不明显;当成形角度由 45°增大到 60°时, 轴向误差由 20.50%增大到 24.42%,变化显著,成 形角度是造成轴向误差的最重要因素;当板料厚度 由 0.6 mm 增大到 1.0 mm 时,轴向误差由 19.42% 增大到 21.96%,变化不大。

4.3 回归公式的验证

式(4)基于仿真的结果,其正确性和实用性还需 进一步经实验结果验证。将表4中各工艺参数分别 代入成形精度所对应的三种不同的回归经验公式, 把计算出的结果与实验结果对比见图12。

从图 12 可以直观看出,对于轴向误差,实验结 果与各种回归公式所求解出的结果不仅分布规律相 同,而且偏差量比较接近。

通过对数据分析可得出线性回归公式所求得结 果与实验相差 7.06%,纯二次回归公式所得结果与 实验相差 8.73%,交叉二次回归公式所得与实验相 差 6.4%,与实验所得结果均比较接近。其中交叉 二次多项式回归公式最接近实验值,但其剩余标准 差为 0.146 1,大于线性回归公式的 0.081 1,显著性 较差,综合显著性和偏差量选取线性回归公式作为 最优经验公式。即:



 $\epsilon_{7} = 2.3362 \pm 0.0334D \pm 0.4387Z \pm$

图 11 工艺参数对轴向精度的影响 Fig. 11 Influence of process parameters on the axial accuracy



图 12 轴向误差回归公式与实验结果对比示意图 Fig. 12 Axial error regression formula and experimental results contrast diagram

5 控制轴向精度的方法

由仿真和实验结果均可看出,单点增量成形过 程中轴向误差在15%以上,已经严重影响成形件精 度,故必须提出能减小轴向误差的方法。通过以上 分析可得出采用合理的工艺参数可以在一定程度上 控制轴向误差,但提高的程度有限,还不能达到要求 的精度。故提出以下两种提高轴向精度的方法。

 误差补偿。见图 13,将高度补偿区域设定在 板料的弯曲变形区域,以理想工件上端面为参考面 向上补偿,每向上补偿 1 mm,顶圆直径增加 2 mm, 将通过补偿的成形件沿理想成形件的上端面切割即 可得到轴向精度较高的工件。补偿高度与轴向精度 的关系见图 14(Δh 为补偿量)。



图 13 轴向几何误差补偿 Fig. 13 Geometric compensation for axial error



图 14 轴向误差与补偿高度关系示意图 Fig. 14 Diagram of relationship between axial error and compensation height

由图 14 可以看出,轴向误差与补偿高度基本成 线性关系,当补偿高度由 0 增加到 5 mm 时,轴向误

差由 4.920 mm 减小到 1.632 mm,轴向精度提高了 13.71%,轴向精度得到了较大程度上的提高。故增 加补偿高度可得到轴向精度较高的成形件。

2) 工具头自转生热。单点增量成形所采用的 成形工具头多为球头形刀具,在成形过程中对工具 头施加一定转速可使成形区域局部温升,使板料的 屈服强度下降,从而提高板料的塑性,减小成形力, 达到提高成形精度的目的。在 0~2 000 r/min 范围 内每隔 250 r/min 进行一次成形实验,测量实验后 成形件的轴向误差值,得出转速与轴向误差的关系 见图 15。



图 15 工具头转速与轴向误差的关系 Fig. 15 Relationship between speed of the tool and axial error

由图 15 可以看出,当自转转速在 0~750 r/min 的范围内,轴向误差随工具头的转速的增大而减小, 超过 750 r/min 的范围轴向精度随着转速的提高基 本不变,考虑到高转速对机床主轴造成伤害,实际成 形过程中选取转速 750 r/min,在获得具有较高轴向 精度的成形件的同时还可以减小对机床主轴的 伤害。

6 结 论

 1)建立了以圆锥台件作为研究对象的仿真模型,并利用此模型研究了层间距、成形角、进给速度、 板料厚度以及工具头直径等工艺参数对轴向误差的 影响规律,并通过实验对其结果进行了验证。

 2)轴向误差值随着层间距、成形角、进给速度、 板料厚度以及工具头直径的增大而增加,成形角度
 是造成轴向误差的最重要因素。

 3)通过单一实验验证了线性回归公式,可以较 好地预测成形件的轴向精度。

 4)采用高度补偿和工具头自转生热的方法可 有效减小轴向误差。

参考文献:

[1] 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 Jianhua, HAN Fei. State of the arts and latest research on incremental sheet NC forming technology [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(4): 491-497.

- [2] JACKSON K, ALLWOOD J. The mechanics of incremental sheet forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1158-1174.
- [3] KIM Y H, PARK J J. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131: 42-46.
- [4] BEHERA A K, LAUWERS B, DUFLOU J R. Advanced feature detection algorithms for incrementally formed sheet metal parts [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S2): 315-322.
- [5] AZAOUZI M, LEBAAL N. Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2012, 24: 49-58.
- [6] LI Junchao, LI Chong, ZHOU Tonggui. Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S1): 54-60.
- [7] HAN Fei, MO Jianhua. Numerical simulation and experimental investigation of incremental sheet forming process [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(5): 581-587.
- [8] JI Y H, PARK J J. Incremental forming of free surface with magnesium alloy AZ31 sheet at warm temperatures [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(S1): 165-169.
- [9] AMBROGIO G, FILICE L, GAGLIARDI F. Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming [J]. Materials & Design, 2012, 34: 501-508.

- [10] RADU C, CRISTEA I, HERGHELEGIU E, et al. Improving the accuracy of parts manufactured by single point incremental forming [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 332: 443-448.
- [11] GUZMÁN C F, GU Jun, DUFLOU J, et al. Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(25): 3594-3604.
- [12] HUSSAIN G, AL-GHAMDI K A, KHALATBARI H, et al. Forming parameters and forming defects in incremental forming process: Part B [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(4): 454-460.
- [13] MICARI F, AMBROGIO G, FILICE L. Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1/3): 390-395.
- [14] 韩飞,莫健华,龚攀. 基于遗传神经网络的数字化渐进成形回弹预测 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(1):121-124.
 HAN Fei, MO Jianhua, GONG Pan. Incremental sheet NC forming springback prediction using genetic neural network [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2008, 36(1): 121-124.
- [15] 甘文星,莫健华.金属板材数控单点渐进成形回弹的 实验研究 [J]. 机械科学与技术,2004,23(6):739 -741.

GAN Wenxing, MO Jianhua. Investigation on springback of sheet metal numerical control incremental forming [J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(6): 739-741.

(责任编辑 王绪迪)