2024 铝合金异形孔渐进成形工艺研究

李娟[1]，陈东升[2]，王辉[1]，姚运飞[1]，光凯惠[1]
（1. 南京航空航天大学 机电学院，南京 210016；2. 首都航天机械公司，北京 100076）

摘要：目的 研究材料的渐进成形翻边性能。**方法** 使用一种硬铝合金 AA2024-O，进行渐进成形圆孔翻边实验和异形孔翻边实验，并且研究了不同成形路径的多道次渐进成形对异形孔翻边零件的影响。**结果** AA2024-O 渐进成形翻边的极限翻边系数是 0.89，材料渐进成形的翻边成形性能高于冲压翻边成形性能；异形孔翻边零件各段的高度和减薄率存在差异。**结论** 压缩类翻边区域和直线段翻边区域的翻边高度较高，减薄率较小，不易发生破裂；而内曲圆弧部分属于伸长类翻边，在厚度方向减薄严重，容易破裂；内曲圆弧半径越小，变形越大，越容易破裂；成形角改变的多道次异形孔翻边件破裂严重，而成形深度改变的多道次异形孔翻边件质量比单道次翻边的翻边件质量要好。

关键词：渐进成形；翻边；极限翻边系数；多道次
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.008
中图分类号：TG386 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2018)04-0055-06

Research on Incremental Forming Process of 2024 Aluminum Alloy with Special Shaped Hole

LI Juan[1], *CHEN Dong-sheng*[2], *WANG Hui*[1], *YAO Yun-fei*[1], *GUANG Kai-hui*[1]
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Capital Aerospace Machinery Corporation, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The paper aims to study incremental forming and flanging properties of material. A kind of hard aluminum alloy, named AA2024-O, was used to carry out incremental forming experiment about round hole flanging and irregular hole flanging and research effects of multi-pass incremental forming on irregular hole flanging parts with different forming paths. The limit flanging coefficient of AA2024-O when formed by incremental forming was 0.89. The flanging forming performance of the incremental forming was higher than that of the stamping flanging, and the height and thinning rate of the parts of the irregular hole flanging parts were different. The flanging area of the compressed edge area and the straight line section is high; the thinning rate is small, and it is not easy to break; but the inner curved arc part belongs to the elongated flanging, it is thinner in the thickness direction and is easy to break. The smaller the radius of the inner curved arc is, the more the deformation is, the more easy to break. The multi-pass irregular hole flanging parts with the change of forming angle breaks seriously, and the quality of the multi-pass irregular hole flanging parts with varied forming depth is better than that of the flanging parts with single flanging.
KEY WORDS: incremental forming; flanging; limit flanging coefficient; multi-pass

翻边是将毛坯的外边缘或孔边缘沿一定的轨迹翻成竖立边缘的冲压方法。可以加工外形复杂、刚度良好的制件，同时翻边还有很大的作用，可以改善材料塑性流动来避免产生破裂和起皱，用这种方法可以代替一些复杂零件的拉深工序。翻边成形作为制造业中不可或缺的加工技术，在各行各业都有着十分广泛

收稿日期：2018-06-09
作者简介：李娟（1993—），女，硕士研究生，主要研究方向为金属板料数控渐进成形。
通讯作者：王辉（1978—），男，博士，讲师，主要研究方向为钣金成形及工艺装备设计。

的应用[1—3]。

传统的板材翻边成形是指用冲压的方法将孔或部分孔型翻出竖立边的成形工序[4]。传统的冲压制造工艺通常需要借助模具来实现，但由于模具设计制造的周期长、费用高，对于单件小批量生产来说很不划算[5]。在 1994 年日本学者松原茂夫经过大量研究后提出了金属板料渐进成形技术，这个技术是在当今市场个性化、多元化的前提下产生的。数控渐进成形技术以“分层制造”为加工理念，把加工件沿 z 轴方向分解成一系列等高线层，每个等高线层面上都会生成相应的加工轨迹，成形工具在数控设备的控制下沿着每个等高线层上的加工轨迹移动，对板料进行渐进成形加工[6—10]。自从数控渐进成形概念被提出后，各个领域有关渐进成形的研究越来越多，渐进翻边的研究还比较少见[11]。Centeno 等[12]研究了使用渐进成形进行圆孔翻边的技术，通过研究翻边时圆孔边缘的应力应变状态，分析开裂、屈曲等失效的原因，得到了工艺参数和预制孔大小对成形性的影响。Bambach 等[13]提出了一种新的渐进翻孔工艺流程，有效减少了加工时间，提高了几何精度。Teramae 等[14]发展了一种不使用模具加工三通管的渐进成形技术，在管壁上预制经过精确计算尺寸的椭圆形孔，使用复杂的路径实现三通管的制造。

目前国内外研究人员对渐进成形圆孔翻边工艺的研究还处于基础研究阶段，在成形机理、成形规律等方面进行了一定的探索研究，但是对渐进成形圆孔翻边的应用研究还比较少见[15]。要使渐进成形翻边能广泛应用还需进行更多的研究，文中对渐进成形翻边具有一定的意义。

1 渐进成形圆孔翻边原理

渐进成形圆孔翻边的实验原理见图 1。成形前先在板料上加工出符合要求的预制孔，再利用上下压板将板料压紧。成形工具头在数控设备控制下沿着预先生成好的加工路径，在第一层等高线层上移动，在移动的过程中工具头与板料相接触，这个过程中板料会渐渐成形。加工完第 1 层后，增加一个下压量，使用同样的方法对第 2 层等高线层进行加工[16]，如此反复加工直到圆孔周围的材料翻成竖直边。

翻边的变形程度用翻边系数 m 表示，$m=d/D$。其中为 d 毛坯上圆孔的初始孔径，D 为翻边后竖边的中径，表示翻边成形极限的参数是极限翻边系数。极限翻边系数是指翻边后，翻边孔不会产生破裂或微小裂纹时，可以达到的最小翻边系数，用 $m_{\min}$ 表示[17]。

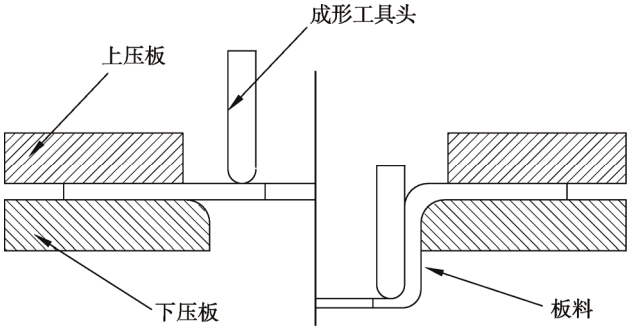


图 1 渐进成形圆孔翻边原理

Fig.1 Principle diagram of incremental forming about round hole flanging

2 实验

2.1 设备及材料

实验在南京航空航天大学自主研发生产的数控渐进成形机床 NH-SK1060 上完成。实验开始之前需要在毛坯上印制网格，以便后续测量翻边零件的应变。网格印制设备见图 2。

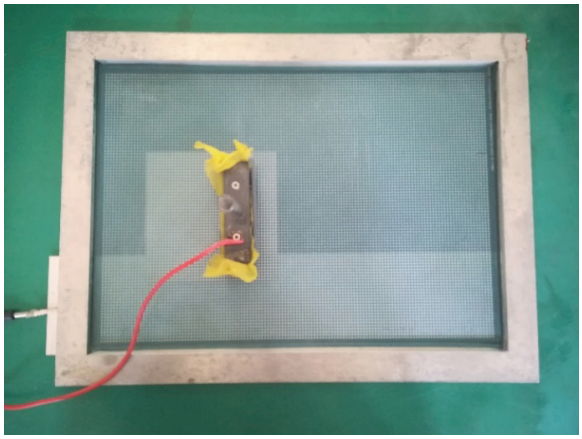


图 2 网格印制设备

Fig.2 Grid printed equipment

实验所用材料为 AA2024-O，厚度为 1.5 mm。这种退火态的硬铝合金相比较其他热处理状态的硬铝合金，如 AA2024-T4，其在室温下的屈强比更小，塑性变形能力更好，因此选用退火态的 AA2024 来进行实验，其化学成分见表 1。渐进成形翻边实验开始之前先进行单向拉伸试验，得到 AA2024-O 的力学性能见表 2。

表 1 AA2024-O 的化学成分（质量分数）

Tab.1 Chemical composition of AA2024-O (mass fraction) %

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	其他	Al
0.50	0.50	3.8~4.9	0.30~0.90	1.20~1.80	0.10	0.25	0.15	余量

表 2　AA2024-O 的力学性能
Tab.2 Mechanical property of AA2024-O

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	均匀伸长率/%	极限伸长率/%
AA2024-O	85.913	174.542	15.895	16.936

2.2　方法

根据《冲压工艺学》[17]中所提供的硬铝合金极限翻边系数(0.89)，可将翻边初始高度定为 4 mm，随后一直增加翻边高度，当翻边直壁出现破裂时停止实验。实验分为圆孔翻边实验和异形孔翻边实验。圆孔翻边试样尺寸为 135 mm×135 mm，板料中心预制孔直径分别为 86, 84, 82, 80, 78, 76, 75 mm，翻边后孔径为 94 mm。异形孔翻边试样尺寸为 120 mm×150 mm，翻边高度分别有 5, 6, 8, 10 mm，异形孔翻边后的尺寸形状见图 3，形状左右对称。上下两个圆孔作为定位孔，在加工时起到定位的作用。异形孔翻边包括了 3 类翻边：A 段是压缩类翻边；B 段、C 段、D 段是伸长类翻边；E 段是直线段，属于一种特殊的翻边，弯曲变形。在翻边成形中预制孔的表面质量对样板的成形性能影响很大，所以实验开始前需要使用砂纸打磨预制孔边缘，以免毛刺影响实验结果。

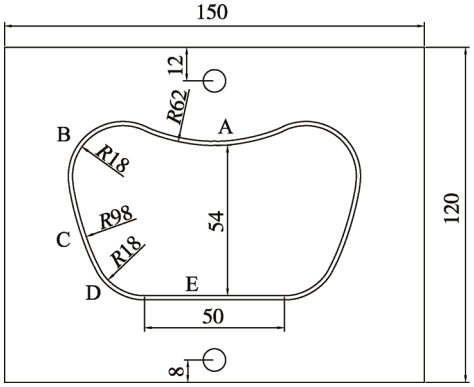


图 3　试样翻边后的尺寸
Fig.3 Size of the sample after flanging

针对异形孔翻边出现破裂的零件，增加了多道次成形的方法，以研究渐进成形翻边路径对翻边结果的影响。实验采用两种不同的刀轨路径，第 1 种刀轨路径见图 4，分为三道次进行加工，每个道次的成形角不同，第 1 道次、第 2 道次、第 3 道次的成形角分别为 30°, 60°, 90°。第 2 种刀轨路径见图 5，同样分为三道次进行加工，每个道次成形深度不同，第 1 道次、第 2 道次、第 3 道次的成形深度分别为 4, 7, 10 mm。所有实验中，工具头进给速度均为 1200 mm/min，层下压量为 0.2 mm。

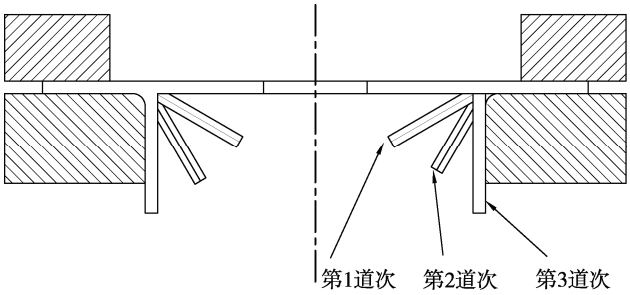


图 4　成形角度改变的三道次翻边路径
Fig.4 Three path flanging path of forming angle change

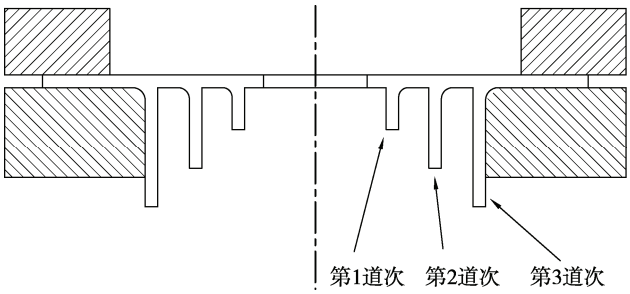


图 5　成形深度改变的三道次翻边路径
Fig.5 Three path flanging path of forming depth change

3　实验结果

3.1　圆孔翻边实验

圆孔翻边实验结果见表 3。其中预制孔径为 75 mm 的翻边件直壁孔缘处出现破裂的情况，如图 6 所示。如果不允许直壁上有微裂纹的话，则根据实验结果可以认为极限翻边系数为 0.8，相比于传统冲压的硬铝合金的极限翻边系数，渐进成形翻边的极限翻边系数确实更小，通过这个实验可以证明渐进成形工艺的成形能力比传统冲压工艺的成形能力要好。

表 3　圆孔翻边实验结果
Tab.3 Experimental results of round hole flanging

预制孔径d/mm	86	84	82	80	78	76	75
翻边系数	0.91	0.89	0.87	0.85	0.82	0.80	0.79
备注	无裂纹	无裂纹	无裂纹	无裂纹	无裂纹	无裂纹	微裂纹

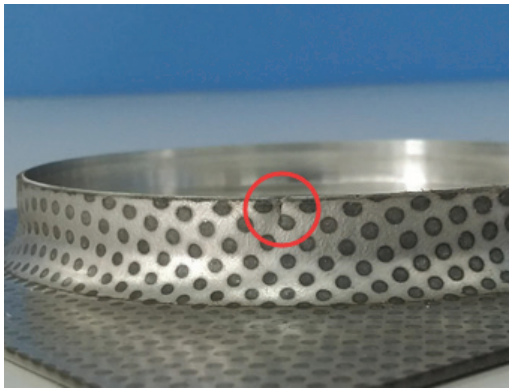


图 6 预制孔径为 75 mm 的翻边件直壁孔缘处出现微裂纹
Fig.6 Micro cracks appear on straight wall edge of flanged parts with a precast aperture of 75 mm

3.2 异形孔翻边实验结果

3.2.1 高度

当所有翻边件加工完后，用高度计测量各翻边件 A, B, C, D, E 中间段的高度，结果见表 4 和图 7。其中翻边高度为 10 mm 的异形孔翻边件的 B 段处边缘出现了破裂的情况。

表 4 翻边零件各段的高度
Tab.4 Height for each section of flanged parts

理论翻边高度/mm	A段高度/mm	B段高度/mm	C段高度/mm	D段高度/mm	E段高度/mm
5	8.70	7.70	8.20	7.70	8.70
6	9.48	8.48	8.10	8.70	9.50
8	11.76	9.68	10.36	10.46	11.64
10	14.42	13.20	13.22	13.10	14.10

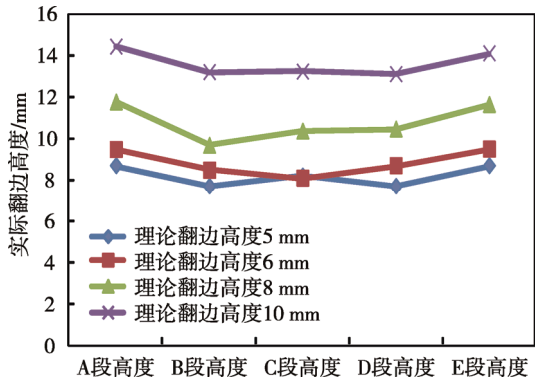


图 7 翻边零件各段的高度
Fig.7 Height of for each section of flanged parts

由表 4 和图 7 所示，在不同的变形区域，出现了翻边件各段直壁高度不相同的情况。其中 A, E 段的高度比其他段的高度都要高，这是因为 A 段变形属于压缩类翻边，有更多的材料会在径向流动，所以这一段直壁高度会更高。而 E 段属于弯曲变形，在周向不发生伸长变形，所以材料不用补充周向变形，在径向上 E 段的高度就会比 B, C, D 段的要高。对比 B, C, D 段的高度发现，对于外凸圆弧来说，外凸圆弧的半径越小，对应段成形直壁高度就越小，这同样是由周向变形引起的。外凸圆弧的半径越小，意味着其周向变形量就越大，径向的材料就会补充周向的变形，这就导致 B, D 段的高度要低于 C 段的高度。

3.2.2 减薄率

用厚度仪测量各翻边件 A, B, C, D, E 中间段预制孔缘处厚度，已知材料初始厚度为 1.5 mm，经过数据处理，得到翻边零件各段的减薄率，见表 5 和图 8。

表 5 翻边零件各段的减薄率
Tab.5 Thinning rate for each section of flanged parts

翻边高度/mm	A段减薄率/%	B段减薄率/%	C段减薄率/%	D段减薄率/%	E段减薄率/%
5	6.67	26.67	20	20	6.67
6	8	28	21.33	26.67	8
8	9.33	33.33	22.67	26.67	14.67
10	13.33	40	26.67	33.33	21.33

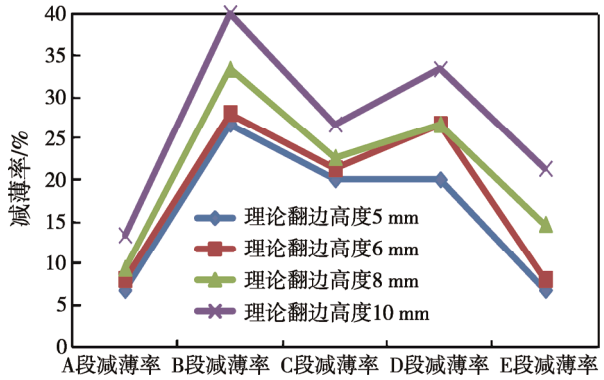


图 8 翻边零件各段的减薄率
Fig.8 Thinning rate for each section of flanged parts

由表 5 和图 8 所示，不同变形区的厚度变化不同，可以看出 A, E 减薄较小而 B, C, D 段减薄严重，B, D 段减薄比 C 段严重，由此可见 B, C, D 段为最容易发生破裂的区域，并且外凸圆弧的半径越小则板料减薄的情况就会越严重。翻边高度为 10mm 的翻边件在 B 段外凸圆弧处发生了破裂的情况。破裂是由于材料的变形量过大、减薄严重而导致的，由于内曲圆弧部分属于伸长类翻边，这部分在周向和径向都处于拉应力状态，板料在这两个方向均产生正应变，在厚度方向的应变为负应变，这直接导致了外凸圆弧部分减薄严重，半径越小意味着周向应变越大。根据体积不变条件，如果周向、径向的应变越大，那么厚度方向的负应变就越大，即减薄越严重，所以破裂会在内曲圆弧半径最小的 B, D 处先产生。

3.2.3 应变

由于在每个翻边件在实验之前都已印制好圆点，所以可以方便地在变形区中选取合适的圆点进行测

量，得出其在径向、周向的应变。结果见图 9。

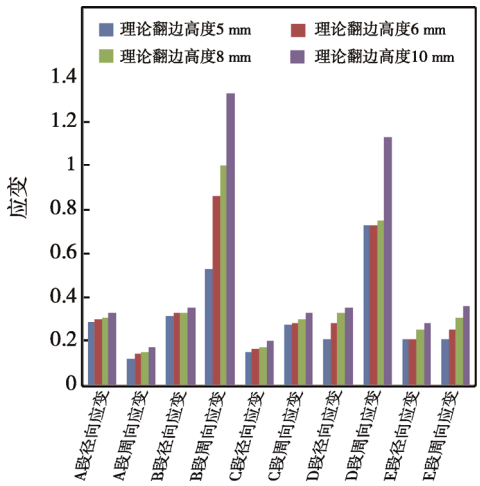


图 9　翻边零件各段的应变

Fig.9 Strain state for each section of flanged parts

由图 9 可发现，随着异形孔理论翻边高度的增加，各段的径向应变、周向应变也随之增长。其中 B, D 段的应变最大，所以在 B, D 的变形最大，破裂通常会在这两段先产生。A, E 段较其他段的应变明显要小，所以这两段通常不会出现破裂的情况。

3.2.4　多道次成形结果

针对理论翻边高度为 10 mm 的异形孔翻边零件，进行了多道次翻边实验的研究，翻边高度同样为 10 mm。多道次异形孔翻边实验结果见表 6 和表 7。两种不同刀轨路径加工出的异形孔翻边件都出现破裂的现象，两个翻边件破裂程度不同，可将单道次翻边高度为 10 mm 的异形孔翻边件与这两种方法加工出的异形孔翻边件进行比较，如图 10 所示，其中图 10a 为单道次翻边高度为 10 mm 的异形孔翻边件，图 10b 为成形角改变的多道次异形孔翻边件，图 10c 为成形深度为改变的多道次异形孔翻边件。

从图 10 可以看出，成形角改变的多道次异形孔翻边件破裂严重，成形后零件各段的减薄率也更大；

表 6　成形角度改变的多道次异形孔翻边实验结果

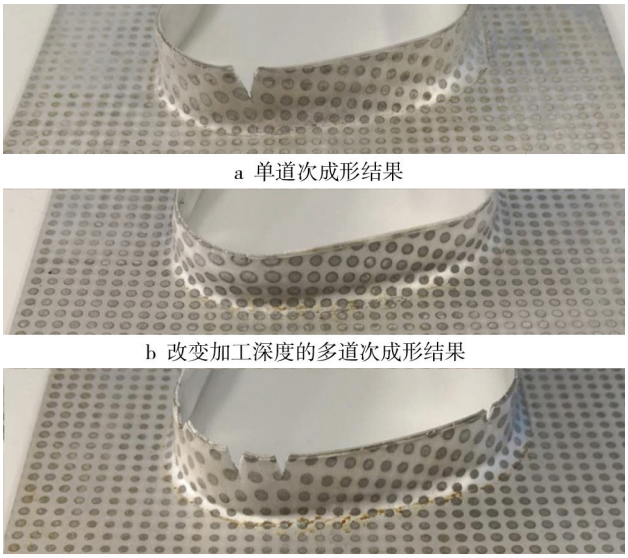
Tab.6 Experimental results of multi pass irregular hole flanging with forming angle change

	A段	B段	C段	D段	E段
实际翻边高度/mm	15.32	13.60	12.90	13.60	14.10
减薄率/%	20	40	25.3	40	20

表 7　成形深度改变的多道次异形孔翻边实验结果

Tab.7 Experimental results of multi pass irregular hole flanging with varying forming depth

	A段	B段	C段	D段	E段
实际翻边高度/mm	14.18	11.20	12.42	11.24	13.20
减薄率/%	14.67	34.67	20	33.33	14.67



a 单道次成形结果

b 改变加工深度的多道次成形结果

c 改变成形角度的多道次成形结果

图 10　翻边件对比

Fig.10 Comparison of flanges

而成形深度改变的多道次异形孔翻边件只出现了细微裂痕，成形深度改变的多道次异形孔翻边件质量比单道次翻边高度为 10 mm 的翻边件质量要好。在改变成形深度的路径中，受加工路径影响，工具球头很长一段时间都以球头侧壁对翻边件进行加工，相对于改变成形深度的路径而言，材料的径向流动较小，所以其实际翻边高度比改变成形角的路径加工出的翻边件的实际高度要低，因而厚度减薄率比改变成形深度的路径加工出的翻边零件要小，成形质量较好。

4　结论

1) AA2024-O 渐进成形翻边的极限翻边系数是 0.89，材料渐进成形的翻边成形性能高于冲压翻边成形性能。

2) 异形孔翻边零件各段的高度和减薄率存在差异。压缩类翻边区域和直线段翻边区域的翻边高度较高，减薄率较小，不易发生破裂；而内曲圆弧部分属于伸长类翻边，在厚度方向减薄严重，容易破裂。

3) 内曲圆弧半径越小，变形越大，越容易破裂。

4) 成形角改变的多道次异形孔翻边件破裂严重，而成形深度改变的多道次异形孔翻边件质量比单道次翻边的翻边件质量要好。

参考文献：

[1]　洪慎章. 冲压成形设计数据速查手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
HONG Shen-zhang. Quick Check Manual for Stamping Design Data[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.

[2]　鄂大辛. 成形工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出

版社, 2014.
E Da-xin. Forming Process and Die Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.

[3] 张其龙. 局部自阻电加热数控渐进成形翻边技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
ZHANG Qi-long. Research on Electric Hot Incremental Flanging Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[4] 梁炳文. 冷冲压工艺手册[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
LIANG Bing-wen. Cold Stamping Process Manual[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004.

[5] 韦红余. 金属板料渐进成形质量控制关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
WEI Hong-yu. Research on Quality Control Key Technical of Sheet Metal Incremental Forming[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[6] 方景春, 莫建华, 赵忠, 等. 金属板材数控渐进成形加工轨迹交互修改及优化[J]. 锻压装备与制造技术, 2006, 41(3): 88—91.
FANG Jing-chun, MO Jian-hua, ZHAO Zhong, et al. Study of Reducing Ratio of Wall Thickness of Cylinder-type Pipe in Bending[J]. China Metal Forming Equipment and Manufacturing Technology, 2006, 41(3): 88—91.

[7] 莫建华, 丁勇, 黄树槐. 金属板材数控单点渐进成形加工轨迹优化研究[J]. 中国机械工程, 2004, 14(24): 2138—2140.
MO Jian-hua, DING Yong, HUANG Shu-huai. Research on Tool-path Optimization of Sheet Metal Numerical Control Single Point Incremental Forming[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(24): 2138—2140.

[8] 周鹏, 王进, 王小连, 等. 3D 打印双点渐进成形支撑模具的可行性[J]. 精密成形工程, 2017, 9(3): 102—106.
ZHOU Peng, WANG Jin, WANG Xiao-lian, et al. Feasibility of Two-Point Incremental Forming Mould in 3D Printing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(3): 102—106.

[9] 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.

[10] 崔振. 基于并联运动机床的金属板料渐进成形技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
CUI Zhen. Fundamental Studies on Sheet Metal Incremental Forming Based on Parallel Machine Tools[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[11] 张硕. 板料多向无模渐进翻边成形研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016
ZHNAG Shuo. Multi-Directional Dieless Incremental Flanging of Sheet Metals[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[12] CENTENO G, SILVA M, CRISTINO V, et al. Hole-Flanging by Incremental Sheet Forming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 59: 46—54.

[13] BAMBACH M, VOSWINCKEL H, HIRT G. A New Process Design for Performing Hole-Flanging Operations by Incremental Sheet Forming[J]. Procedia Engineering. 2014, 81: 2305—2310.

[14] TERAMAE T, MANABE K, UENO K, et al. Effect of Material Properties on Deformation Behavior in Incremental Tube-Burring Process Using a Bar Tool[J]. Materials Process Technology, 2007, 191: 24—29.

[15] 卜小芬. 圆孔翻边渐进成形的模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
BU Xiao-fen. Simulation Study on Hole-Flanging in incremental Forming[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[16] 史晓帆. 金属板料渐进成形精度控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
SHI Xiao-fan. Research on Accuracy Control Technology in Incremental Sheet Metal Forming[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[17] 肖景荣, 姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
XIAO Jing-rong, JIANG Kui-hua. Stamping Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.