

文章编号:1006-2467(2014)03-0394-05+0411

板料冲压模具扩孔和渐进成形扩孔的对比分析

杨大强, 陆 彬, 徐栋恺, 陈 军

(上海交通大学 模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200030)

摘 要: 分别采用传统的锥形凸模和渐进成形工艺对板料的扩孔特性进行试验, 其中渐进成形扩孔的工具轨迹根据传统冲压的锥形凸模的形状设计. 探讨了工具轨迹对渐进成形扩孔特性的影响. 结果表明: 与传统冲压扩孔件相比, 渐进成形扩孔件的厚度最薄处位于孔口向外偏置一定距离的圆周上, 而不在孔口边缘; 渐进成形扩孔件的变形模式为剪切变形和弯曲变形综合作用, 扩孔件沿直径的厚度分布与初始板厚不满足正弦定理; 与传统的模具冲压扩孔相比, 渐进成形的扩孔率提高了 24.4%.

关键词: 传统冲压; 板料渐进成形; 厚度分布; 变形模式

中图分类号: TG 386

文献标志码: A

Comparative Study on Conical Hole-Flanging of Sheet Metal by Conventional Die and Incremental Forming Process

YANG Da-qiang, LU Bin, XU Dong-kai, CHEN Jun

(National Engineering Research Center of Die and Mold CAD, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to compare deformation characteristics between conventional die and incremental forming in hole-flanging process, experimental studies were performed based on a conical shaped punch and generated toolpath in incremental sheet forming. In addition, material formability in incremental forming was analyzed by using different toolpath strategies. The results indicate that conical hole-flanging component by incremental forming has a thinnest place in the intermediate stage rather than the edge of the hole, compared with the conical hole-flanging component by conventional die, and the deformation of conical hole-flanging the component by incremental sheet forming is a combination of in-plane shearing with bending around the perimeter of the flange. Therefore, the sine law cannot be used to estimate the final thickness of the component. In comparison to conventional die, the hole expanding rate increases by 24.4% in incremental forming.

Key words: conventional die; incremental forming; thickness distribution; deformation mode

20 世纪 90 年代初, 松原茂夫^[1]提出了一种新型的金属板料成形工艺——金属板料渐进成形技

术. 板料渐进成形是一种柔性无模加工工艺, 该工艺与数字控制设备结合, 采用形状简单且通用的成形

收稿日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075269)

作者简介: 杨大强 (1989-), 男, 山东省肥城市人, 硕士生, 主要从事板料渐进成形工艺研究.

陈 军 (联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话 (Tel.): 021-62813432; E-mail: jun_chen@sjtu.edu.cn.

工具(工具端部一般为半球形),利用预先生成的轨迹控制成形工具的运动,对板料进行局部成形,最终获得所需零件.利用渐进成形工艺进行孔翻边不需要模具,对不同要求的翻边件只需设计相应的垫板和夹具,大大降低了小批量零件翻边的成本.

对于传统的扩孔冲压工艺,Johnson等^[2]采用锥形凸模进行扩孔,研究了孔边缘裂纹的形成情况,提出预制孔的尺寸和材料的性能参数(如各向异性)是影响孔边缘裂纹形成的主要因素. Leu等^[3]指出板料上预制孔的直径与扩孔成形完成后竖边的直径最大值成线性关系. Yamada等^[4]采用塑性增量理论研究了屈服应力和应变硬化对扩孔件应变和应力分布的影响. Wang等^[5]基于刚塑性全应变理论,认为扩孔直壁部分的主应力是单向拉应力,建立了以预制孔直径和扩孔件尺寸为自变量的关于主应变的隐函数表达式.

对于扩孔渐进成形工艺,崔震等^[6]研究了扩孔过程中成形力与零件壁厚的变化,分析了成形工艺参数(成形工具头直径、每层进给量和零件的最终孔径)对板料扩孔成形过程的影响规律. Centeno等^[7]通过测量应变并绘制材料成形极限图,得出在渐进成形扩孔过程中,材料的变形是拉伸和弯曲综合作用的结果,渐进成形扩孔件材料的失效不是由材料局部颈缩引起,而是由径向的拉伸应力过大导致材料拉裂引起,即扩孔过程中材料的失效取决于断裂成形极限 FFL.

本文以铝合金 AA1100,厚度 1.0mm 板扩孔为例,分别采用传统冲压工艺和板料渐进成形工艺进行扩孔,通过研究扩孔件的扩孔率和壁厚分布情况,分析比较 2 种成形工艺的变形特点和扩孔成形性,更深入理解 2 种成形工艺的特点.

1 成形原理

扩孔试验装置如图 1 所示. 主要由锥形凸模、凹模、压边圈组成. 金属薄板中心带有预制孔 d_0 , 周边被压边圈和凹模压紧. 凸模将带有预制孔的金属薄板压入凹模,致使薄板中心孔扩大,直至孔口产生贯穿性裂纹,此时孔口直径为 d .

渐进成形工艺进行扩孔试验如图 2 所示. 主要由成形工具、压板、垫板、支架组成. 金属薄板中心带有预制孔 d_0 , 试验时薄板四周由压板夹紧,成形工具按预先生成的轨迹实现分层加工,成形工具头首先下压一层增量步长,并沿第一层截面轮廓的加工轨迹,以走等高线的方式对板料进行加工,产生局部塑性变形,在形成设定的第 1 层轮廓后,成形工具下

压增量步长,再按第 2 层截面轮廓加工,如此重复直到整个程序走完,得到的最终扩孔件直径 d .

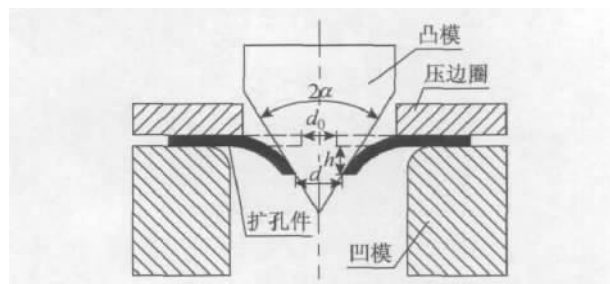


图 1 冲压工艺扩孔原理

Fig. 1 Principle of conical hole-flanging by conventional die

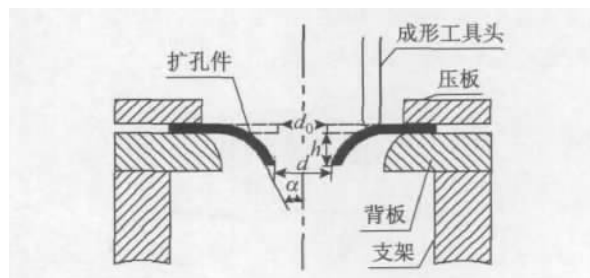


图 2 渐进成形工艺扩孔原理

Fig. 2 Incremental forming in conical hole-flanging

根据材料体积不变原理,渐进成形中,成形零件板料厚度与原始板料厚度近似遵循正弦定理^[8]:

$$t = t_0 \sin \alpha \quad (1)$$

式中: t_0 为成形前板料厚度; t 为成形后板料厚度; α 为成形面与竖直方向的夹角.

与传统扩孔相比,渐进成形扩孔由于成形工具的直径远远小于板料尺寸,所以板料每次发生的变形仅发生在成形工具头的周围,靠成形的累积产生整体的变形.

2 试验设备与试验方案

2.1 试验设备

图 3 所示为本试验采用的渐进成形扩孔工作台和普通三轴加工中心. 渐进成形扩孔工作台置于加工中心工作台上并与其固定,保证其 X、Y 方向与加工中心的 X、Y 方向平行^[9]. 试验中采用的加工工具为直径 5 mm 的硬质合金球头工具,垫板的内径为 $\varnothing 44$ mm.

2.2 试验方案

为了研究冲压扩孔与板料数控渐进成形扩孔的变形规律和成形性,分别在不同成形装置下扩孔. 板料数控渐进成形扩孔的成形路径^[10]影响扩孔件的成形极限和表面质量,本文对 2 种成形工艺进行对比研究,按照锥形凸模的形状设计渐进成形的工具轨迹进行成形试验. 渐进成形扩孔的工具轨迹如图



图3 三轴数控加工中心与渐进成形扩孔工作台

Fig. 3 CNC milling center and hole-flanging set-up

4所示. 其中, 工具起始轨迹的直径 d_{i0} 等于凸模的直径 d_p , 工具轨迹的角度 α_i 等于凸模的锥形角 α_p , 垫板的直径 d_b 等于凹模的直径 d_d .

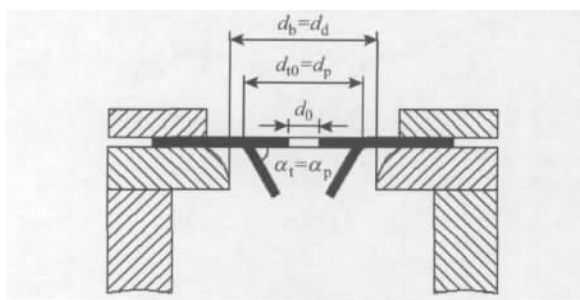


图4 渐进成形扩孔工具轨迹

Fig. 4 Tool path used in conical hole-flanging

通过改变渐进成形扩孔的工具轨迹, 探究渐进成形扩孔的成形性, 工具轨迹如图5所示. 图中 d_{ti} 表示工具轨迹直径.

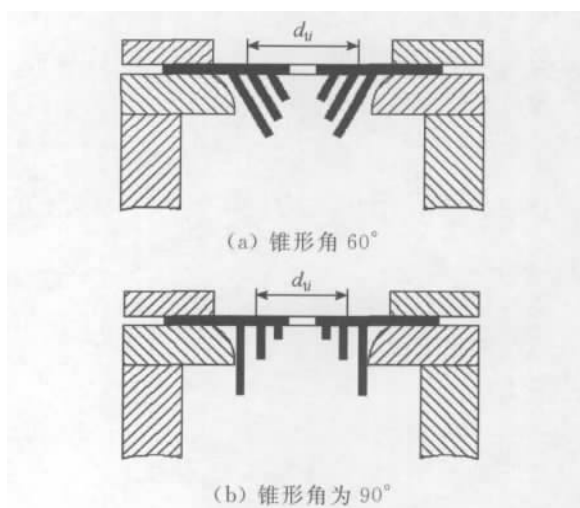


图5 渐进成形扩孔工具轨迹

Fig. 5 Tool paths used in conical hole-flanging

3 结果与讨论

3.1 变形特点

图6所示为传统冲压和渐进成形的扩孔件实物图. 图6(a)为传统冲压扩孔件, 凹模行程13mm, 孔

口产生贯穿性裂纹. 试验时, 凹模下行, 固定不动的凸模将试样压入下行的凹模腔中, 迫使预制圆孔直径不断胀大, 直至圆孔孔缘发生开裂, 此时试验机上凹模停止下行, 成形方式为整体成形. 渐进成形扩孔时, 成形工具按锥形凸模的形状实现分层加工, 靠局部成形的累积实现整体的成形, 成形方式为逐步局部成形, 轨迹加工完成后, 扩孔件孔口未产生裂纹, 如图6(b)所示.

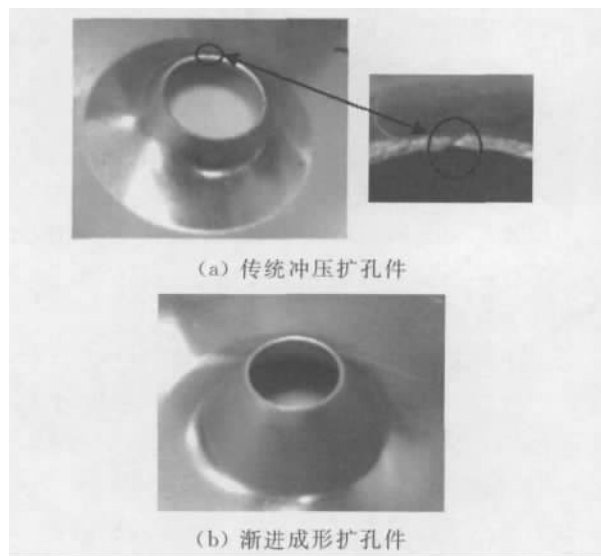


图6 传统冲压和渐进成形成形的扩孔件

Fig. 6 Conical hole-flanging components by conventional die and incremental forming

将成形后的零件从工作台上取下, 激光扫描成形部分内表面轮廓, 导入 origin 中生成表面的轮廓扫描图. 对比2种表面轮廓扫描图发现, 在扩孔部分外围边缘区域, 传统冲压扩孔件由于变形过程为整体一次成形, 凸模和凹模间隙部分弯曲变形比较大, 如图7中AC段所示, 而渐进成形扩孔件由于变形过程为逐步局部变形, 变形局限于成形工具与板料接触的区域, 靠近垫板部分弯曲变形较小, 弯曲变形

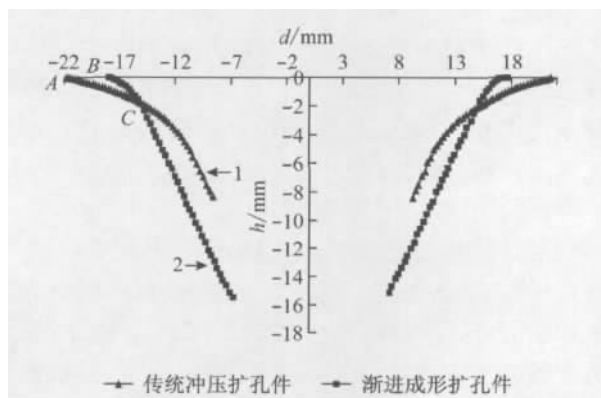


图7 扩孔件表面轮廓扫描图

Fig. 7 Comparison of surface profile for conical hole-flanging components

仅局限于图中 BC 段. 传统冲压和渐进成形扩孔件表面轮廓曲线的直线段部分 1 和 2 斜率相同, 均为锥形凸模母线的斜率.

扩孔件的孔径和高度尺寸如图 8 所示. 由图可见, 传统冲压扩孔件孔径大于渐进成形扩孔件, 而高度明显小于渐进成形扩孔件的高度.

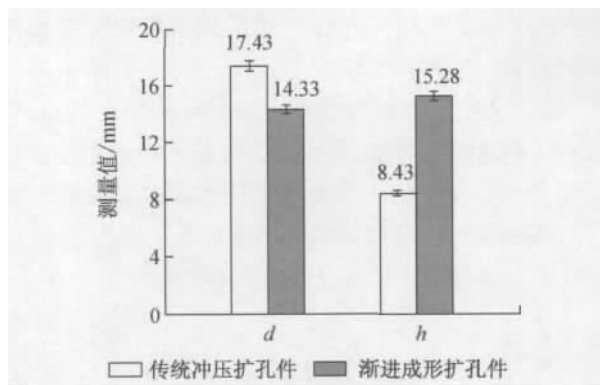


图 8 扩孔件的孔径和高度(mm)

Fig. 8 Comparison of hole diameter and height for conical hole-flanging components(mm)

3.2 厚度分布

变形区应力状态的不同导致传统冲压和渐进成形的扩孔件厚度分布的差异, 图 9 所示为传统冲压和渐进成形的扩孔件厚度随扩孔件高度的分布图.

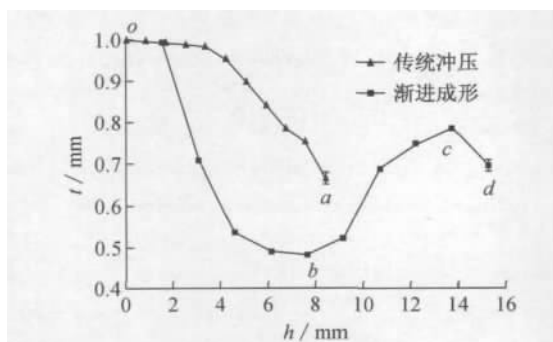


图 9 扩孔件的厚度随扩孔件的高度分布图

Fig. 9 Comparison of variation of wall thickness with height for conical hole-flanging components

对于传统冲压扩孔件, 锥形凸模底部的材料为主要变形区, 变形区材料处于切向和径向受拉的应力状态, 并且孔边缘处材料所承受切向拉应力和拉应变的作用最大, 材料厚度的减薄最为严重, 故孔口处的厚度最小, 正如曲线 oa 段从扩孔件外围边缘(凹模圆角区)到孔口区域, 扩孔件的厚度随着扩孔件的高度的增加而下降, 扩孔件的高度与扩孔件的厚度关系曲线呈下降趋势.

对于渐进成形扩孔件, 渐进成形扩孔的变形区域局限于成形工具头与板料接触的区域, 在曲线 ob 段, 变形区的材料主要以剪切变形为主, 变形区材料

受径向拉应力作用, 随着高度的增加, 径向拉应力增大, 径向拉应变提高, 厚度逐渐下降, 如图 10(a) 中 ob 段所示. 在曲线 bc 段, 靠近扩孔件孔口的区域, 材料主要以弯曲变形为主, 导致径向拉应力降低, 径向拉应变减小, 避免了材料继续减薄, 扩孔件的厚度反而增加, 如图 10(b) 中 bc 段所示. 在曲线 cd 段(见图 9), 孔口处的材料处于切向受拉的应力状态, 导致孔口处材料厚度减薄.

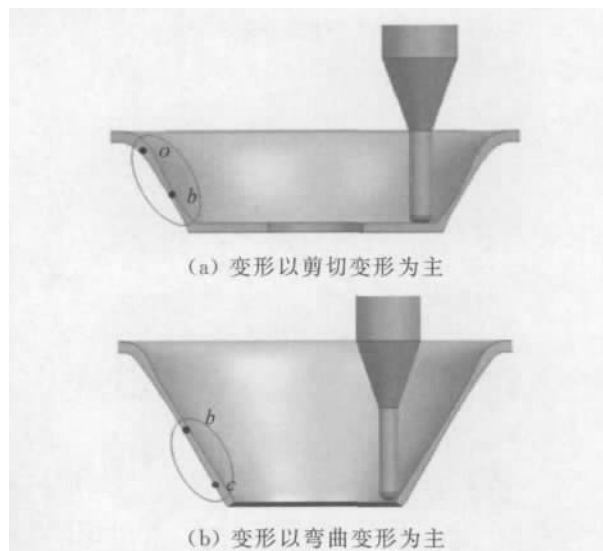


图 10 渐进成形扩孔变形过程示意图

Fig. 10 Modes of deformation of conical hole-flanging component by incremental forming

一般渐进成形过程是对板料进行渐进变薄拉伸过程, 成形零件板料厚度与原始板料厚度近似遵循正弦定理, 如图 9 中曲线 ob 段所示:

$$t = t_0 \sin \alpha = 1.0 \times \sin 30^\circ \text{ mm} = 0.5 \text{ mm}$$

与一般渐进成形过程不同, 由于预制孔的存在, 在靠近扩孔件孔口区域, 变形区应力状态发生变化, 变形区材料主要以弯曲变形为主, 扩孔件厚度与初始板厚不满足正弦定理, 如图 9 中曲线 bc 段所示.

图 9 中, a 点为传统冲压扩孔件厚度最薄处即孔口边缘处, b 点为渐进成形扩孔件厚度最薄处, c 点为渐进成形扩孔件孔口边缘. 由 a 、 b 两点可以看出, 渐进成形扩孔件的减薄率更高, 渐进成形扩孔件比传统冲压扩孔件具有更好的抗颈缩能力. 与传统冲压扩孔件不同, 渐进成形扩孔件材料厚度的最薄处位于孔轮廓向外偏置某一距离的直径处, 而不在孔口边缘上.

3.3 成形极限

由图 8 可知, 传统冲压扩孔的扩孔率为

$$K_1 = \frac{d - d_0}{d_0} \times 100\% = \frac{17.43 - 10.00}{10.00} \times 100\% = 74.3\%$$

与传统冲压扩孔不同,渐进成形扩孔件在完成根据锥形凸模形状设计的工具轨迹后孔口无裂纹产生.为了分析对比2种成形工艺的扩孔成形性,改变渐进成形扩孔的工具轨迹(见图5),对应实验结果如图11所示.图11(a)为保持锥形角 60° 不变,增大锥形凸模直径设计的工具轨迹进行渐进成形扩孔,发现锥形凸模直径增大,孔径无明显变化.图11(b)为保持锥形角 90° 不变,增大直径设计的工具轨迹进行渐进成形扩孔,得到扩孔率:

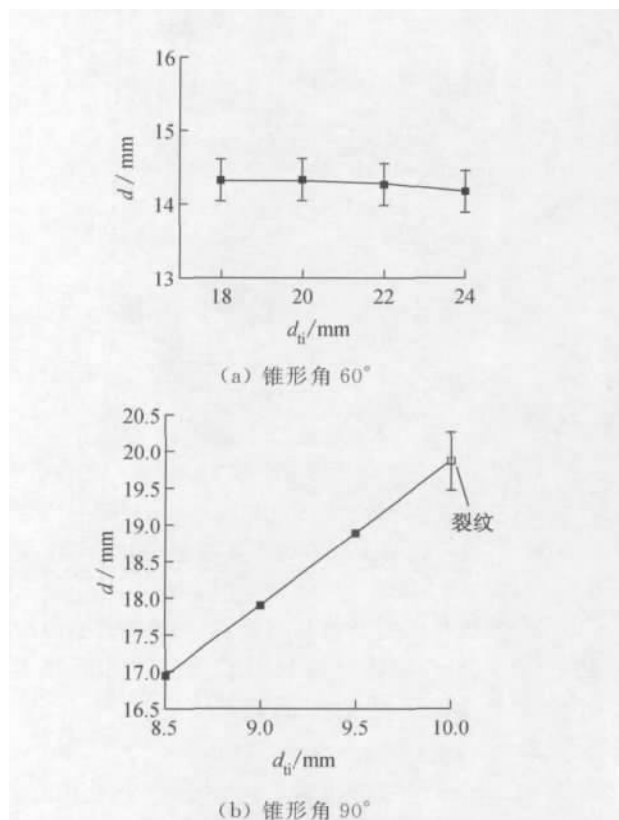


图11 工具轨迹与扩孔直径的关系曲线

Fig. 11 Relationship between tool path and final radius of inner hole of conical hole-flanging component

$$K_2 = \frac{d - d_0}{d_0} \times 100\% = \frac{19.87 - 10.00}{10.00} \times 100\% = 98.7\%$$

与传统冲压扩孔件相比,渐进成形扩孔件扩孔率平均提高了24.4%,可以得出渐进成形比传统冲压扩孔成形极限大.

4 结 论

(1) 利用锥形凸模形状设计的工具轨迹进行渐进成形扩孔,扩孔件孔口未产生裂纹;与传统冲压扩孔件相比,渐进成形扩孔件孔径小于传统冲压扩孔件孔径,而高度明显大于传统冲压扩孔件高度.因

此,设计渐进成形工具轨迹时,需要充分考虑材料延伸率;厚度最薄处位于扩孔件孔径向外偏置某一距离的直径上,而不在孔口边缘上.

(2) 保持锥形角不变,增大锥形凸模的直径设计的工具轨迹进行渐进成形扩孔,锥形凸模直径增大,渐进成形扩孔件孔径基本不变.

(3) 渐进成形扩孔件变形模式为剪切变形和弯曲变形,扩孔件厚度与初始板厚之间的关系不再满足正弦定理.为了控制或者减少扩孔件的减薄率,双头对压渐进成形和拉深预成形与渐进成形相结合的复合成形技术进行扩孔需要做进一步的研究.

(4) 与传统冲压扩孔件相比,渐进成形扩孔件扩孔率提高了24.4%.

参考文献:

- [1] 松原茂夫. 板材の逐次逆張出し・絞り成形[C]//平成7年度塑性加工春季講演会论文集. 日本:日本塑性加工学会, 1995:209-210.
- [2] Johnson W, Chitkara N, Minh H. Deformation mode and lip fracture during hole-flanging of circular plates of anisotropic material [J]. *American Society of Mechanical Engineers*, 1977, 99(3): 738-748.
- [3] Leu D K, Chen T C, Huang Y M. Influence of punch shapes on the collar-drawing process of sheet steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 88(1-3): 134-146.
- [4] Yamada Y, Koide M. Analysis of the bore-expanding test by the incremental theory of plasticity[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1968, 10(1): 1-14.
- [5] Wang N M, Wenner M L. An analytical and experimental study of stretch flanging [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1974, 16(2): 135-143.
- [6] 崔震, 高霖, 陆启建. 数控渐进成型技术在圆孔翻边中的应用[J]. *机械工程材料*, 2008, 32(7): 5-8.
CUI Zhen, GAO Lin, LU Qi-jian. Application of CNC incremental forming in hole-flanging process [J]. *Chinese Journal of Materials for Mechanical*, 2008, 32(7): 5-8.
- [7] Centeno G, Silva M.-B, Cristino V, et al. Hole-flanging by incremental sheet forming [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 59, 46-54.
- [8] 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(3-4): 419-435.

(下转第411页)

参考文献:

- [1] 王利, 杨雄飞, 陆匠心. 汽车轻量化用高强度钢板的发展[J]. 钢铁, 2006, 41(9): 1-8.
WANG Li, YANG Xiong-fei, LU Jiang-xin. Development of high strength steel sheets for lightweight automobile[J]. *Iron & Steel*, 2006, 41(9): 1-8.
- [2] 牛建辉, 朱平, 郭永进. 热镀锌双相钢 DP590 力学特性及其本构模型[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(10): 1382-1387.
NIU Jian-hui, ZHU Ping, GUO Yong-jin. Mechanical properties of hot-dip galvanized dual phase steel DP590 and its constitutive model[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(10): 1382-1387.
- [3] Wu X, Bahmanpour H, Schmid K. Characterization of mechanically sheared edges of dual phase steels[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(6): 1209-1224.
- [4] Sartkulvanich P, Kroenauer B, Golle R, *et al.* Finite element analysis of the effect of blanked edge quality upon stretch flanging of AHSS[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 279-282.
- [5] Sartkulvanich P, Al-Zkeri I, Yen Y C, *et al.* Investigation of the effect of tool edge geometry upon cutting variables, tool wear and burr formation using finite element simulation: A progress report[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 712(1): 1347-1352.
- [6] Adamczyk R D, Michal G M. Sheared edge extension of high-strength cold-rolled steels[J]. *Journal of Applied Metalworking*, 1986, 4(2): 157-163.
- [7] Konieczny A, Henderson T. On formability limitations in stamping involving sheared edge stretching[J]. *SAE Paper*, 2007(01): 0340.
- [8] Shi M, Chen X. Prediction of stretch flange ability limits of advanced high strength steels using the hole expansion test[J]. *SAE Paper*, 2007(01): 1693.
- [9] Golovashchenko S F. Quality of trimming and its effect on stretch flanging of automotive panels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(6): 316-325.
- [10] 郭必檬, 王武荣, 韦习成, 等. 试样标距对 800 MPa 级 DP 钢准静态拉伸变形行为的影响[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(1): 91-95.
GUO Bi-meng, WANG Wu-rong, WEI Xi-cheng, *et al.* The effect of gauge length on quasi-static tensile behavior of 800 MPa DP steel[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2011, 18(1): 91-95.
-
- (上接第 398 页)
- [9] 宋修成, 陆彬, 陈军, 等. 基于预拉伸与数控渐进成形复合的轿车翼子板样件制造技术[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(5): 754-758.
SONG Xiu-cheng, LU Bin, CHEN Jun, *et al.* Investigation on automotive fender fabrication combining stretch forming and incremental forming[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013, 47(5): 754-758.
- [10] 徐岩, 何思阳, 高霖, 等. 复杂钣金零件渐进成形表面质量影响因素[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5): 559-563.
XU Yan, HE Si-yang, GAO Lin, *et al.* Influencing factors of surface quality for complicated sheet parts by incremental forming method[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(5): 559-563.
-
- (上接第 404 页)
- [11] 邵勇, 陆彬, 陈军, 等. 基于双向渐进结构优化的叶片锻件预成形设计[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(6): 108-114.
SHAO Yong, LU Bin, CHEN Jun, *et al.* Optimal design of preform of blade forging based on Bi-directional evolutionary structural optimization[J]. *Materials Science and Technology*, 2012, 20(6): 108-114.
- [12] Lu B, Ou H, Armstrong C G, *et al.* 3D die shape optimisation for net-shape forging of aerofoil blades[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(7): 2490-2500.
- [13] Huang X, Xie Y M. Evolutionary topology optimization of continuum structures: Methods and applications[M]. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.