

## Q345 中厚板 V 形折弯应力应变分析

刘雨生<sup>1</sup>, 孔炎<sup>2</sup>, 宋健<sup>1</sup>, 马俊林<sup>1</sup>, 李萍<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;

2. 湖北航天技术研究院特种车辆技术中心, 武汉 430040)

**摘要:** **目的** 研究 Q345 中厚板在 V 形折弯时的应力应变中性层内移规律。**方法** 通过对中厚板 135°折弯过程进行数值模拟, 分析了板料在成形过程中的等效应力应变及其中性层内移现象, 测得了应变中性层与几何中间层之间的距离变化。在此基础上, 采用厚度为 16 mm 的 Q345 板料进行物理实验, 并与模拟结果进行了对比分析。**结果** 在成形过程中, 等效应力应变中性层均产生了内移现象, 且应力中性层的内移量明显大于应变中性层的内移量; 成形结束之后, 应变中性层与几何中间层的距离为 3.3 mm; 实验结果显示, 应变中性层的内移量为 3.1 mm 左右, 与模拟值较为一致。**结论** 数值模拟方法可以为应力应变中性层计算提供指导。对于中厚板折弯, 采用几何中间层展开求得的坯料尺寸并不准确。

**关键词:** 中厚板; 中性层; 折弯; 数值模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.05.015

**中图分类号:** TG386.3<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2014)05-0085-06

## Stress and Strain Analysis of Q345 Plate V-Shaped Bending

LIU Yu-sheng<sup>1</sup>, KONG Yan<sup>2</sup>, SONG Jian<sup>1</sup>, MA Jun-lin<sup>1</sup>, LI Ping<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Hubei Space Technology Academe Special Vehicle Technology Center, Wuhan 430040, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the internal shift law of the stress and strain in neutral layer of Q345 plate V-shaped bending. **Methods** By simulating the 135° bending process of the plate, equivalent stress and equivalent strain as well as their internal shift phenomenon of the neutral layers were analyzed. Meanwhile, the distance between the strain neutral layer and the geometric neutral layer was measured. On this basis, the physical test was carried out using a Q345 sheet with a thickness of 16 mm, then the results were compared and analyzed with the simulation result. **Results** During the forming process, stress neutral layer as well as strain neutral layer both showed the internal shift phenomenon, and the displacement of the stress neutral layer was greater than that of the strain neutral layer. After forming, the distance between the strain neutral layer and the geometric middle layer was 3.3 mm. The test result showed that the displacement of the strain neutral layer was about 3.1 mm, which had a better agreement with the simulation result. **Conclusion** Numerical simulation could provide guidance for the calculation of the stress neutral layer and the strain neutral layer. For plate bending, the blank size obtained using expanded geometric middle layer was not accurate.

**KEY WORDS:** plate; neutral layer; bending; numerical simulation

金属板材折弯成形技术作为塑性加工的基本方法之一,具有生产率高、成本低、轻量化等特点,在国民经济中有着十分广泛的应用,几乎应用于所有的板料成形工序中<sup>[1]</sup>,因此,对于金属板材折弯成形工艺的研究深度将决定着板材塑性成形工艺的发展。伴随着科技的发展和设备复杂程度的增加,成形工艺将会更加复杂,且对于高效率、低成本和高精度的要求也会更加严格<sup>[2-3]</sup>。高强度钢板具有优化生产工艺、降低零件重量、提高机械设备的安全性和抗腐蚀能力等优点,近几年在汽车机车和工程机械领域上的用量日益增多<sup>[4-5]</sup>。高强度钢是指屈服强度在 300 MPa 以上的钢材,目前国外已形成了低合金高强度工程机械用钢系列产品,如美国 A514(T-1)系列钢、日本 Wehen 系列高强度钢、德国的 Ste460 和 Ste690 等<sup>[6-10]</sup>。

近年来,板料成形性研究有了很大的发展<sup>[11-12]</sup>,对于薄板成形中的开裂、起皱和回弹等主要缺陷研究较多,但厚度在 4 mm 以上的中厚板折弯工艺理论研究鲜见报道。中厚板在折弯过程中的应力应变变化、中性层移动现象及其弯曲坯料展开尺寸确定等问题,仍有待进一步研究和解决。文中以 Q345 中厚板的 V 形折弯为例,采用数值模拟的方法分析其在成形过程中的应力应变分布和中性层移动规律,并进行了物理实验,模拟结果与实验结果较为吻合。

## 1 有限元模型建立

中厚板 V 形折弯的有限元模型如图 1 所示。其中,凸模和凹模定义为解析刚体,不进行网格划分,凸模圆角半径为 16 mm;板料厚度为 16 mm,宽度为 60 mm,长度为 500 mm,采用 6 面体单元进行网格划分,单元大小为 4 mm×4 mm×4 mm,共划分 7500 个网格单元。采用动力显示算法对折弯过程

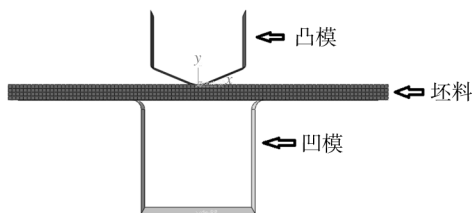


图 1 有限元模型

Fig. 1 FE model

进行定义,摩擦因数为 0.12,冲压速度为 2.5 mm/s,成形时间为 10 s。凸模下行使板料发生折弯变形,折弯角为 135°。板料的材料为 Q345,其力学性能参数:密度  $\rho=7860 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E=203 \text{ GPa}$ ,屈服强度  $\sigma_s=345 \text{ MPa}$ ,抗拉强度  $\sigma_b=750 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu=0.285$ ,延伸率  $\geq 16\%$ 。

## 2 折弯过程中的等效应力应变分析

### 2.1 等效应力分析

图 2 所示为在折弯过程中不同变形程度下的板料等效应力分布云图。从图 2 可以看出,在成形初始阶段,与凸模接触的板料及其外侧部分的应力值较大,发生了塑性变形,其他区域的等效应力较小,未发生变形或只存在弹性变形。当板料的变形程度为 50% 时,由于凸模的下行,使得板料的弯曲程度变大,与凸模接触的板料受到凸模的压力作用和两侧未变形区的挤压作用,同时其外侧板料受到较大的拉应力作用。因此,以上 2 个区域的等效应力值较大,最大等效应力为 543.2 MPa,且板料整体的应力分布表现为从中间向两侧逐渐降低。随着凸模的继续下行,变形区的塑性变形区域逐渐扩大,板料的

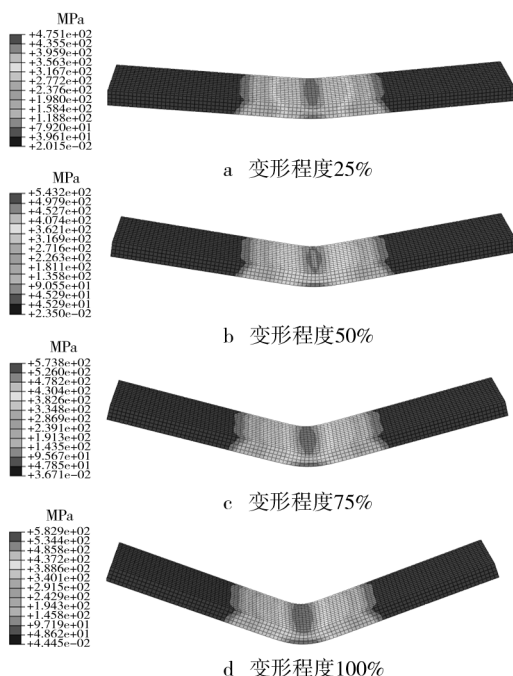


图 2 不同变形阶段的等效应力分布云图

Fig. 2 Stress distribution nephogram of different stages

等效应力值也逐渐增大。当板料的变形程度为100%时,变形区的内侧和外侧板料的等效应力最大,最大等效应力值达到582.9 MPa。

如图3所示,在板料的变形区内,分别在上表面、下表面和几何中间层选取位置不同的3个节点。在后处理中提取节点在不同时刻下的等效应力值,所绘制的等效应力变化曲线如图4所示。

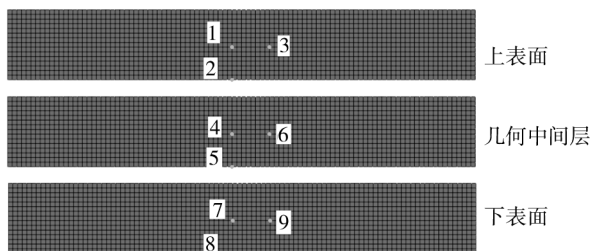


图3 节点选取示意图

Fig. 3 Nodes selected

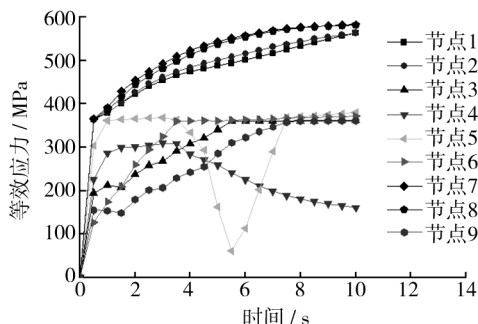


图4 选取节点的等效应力变化曲线

Fig. 4 Equivalent stress variation of the nodes

节点1和节点2显示的为板料上表面中间节点等效应力的变化曲线,随着凸模的下行,节点1和节点2在开始阶段等效应力较小,处于弹性变形阶段。当等效应力达到345 MPa后,进入塑性变形阶段,随着弯曲过程的进行,应力值逐渐增大。节点3显示的为板料变形区上表面塑性变形区与弹性变形区交界处节点等效应力的变化曲线。从图4可以看出,板料刚开始发生弹性变形,等效应力值缓慢上升,在成形后期,等效应力值基本稳定在360 MPa。节点7,8展示的是板料下表面中间节点等效应力的变化曲线。从图4中可以看出,板料由弹性变形转为塑性变形后,其等效应力值逐渐增加,且由于板料下表面变形程度最大,因此其等效应力值比上表面大。从节点9的等效应力变化曲线可以看出,应力值较

小,在成形过程中只发生弹性变形。节点4,5,6为板料几何中间层不同区域的等效应力值变化曲线。板料受到凸模的挤压,几何中间层板料切向受到相邻板料的挤压,表现为切向压应力;随着折弯的进行,板料的变形程度增大,几何中间层由于径向受压导致切向拉长,开始逐渐抵消相邻板料的挤压力。因此,随着变形的进行,节点4和节点5的曲线开始下降。而节点5的曲线显示等效应力在下降一段之后又逐渐回升,这是因为中厚板在折弯后期,变形区内层的板料宽度会不断增加,而外层宽度减小,因此边缘节点5会受到边缘处的内层金属和外层金属的拉应力作用,导致应力值增大。节点6基本处于弹性变形阶段,是导致板料最终产生回弹的重要原因。

## 2.2 等效应变分析

图5所示为在折弯过程中不同变形程度下的板料等效应变分布云图。从图5可以看出,板料等效应变分布的变化趋势与等效应力相对应,只是分布区域比等效应力小,这是因为在远离折弯带的区域只产生弹性变形,无塑性变形产生。在成形初始阶段,等效应变的较大值主要分布在上下表面的变形

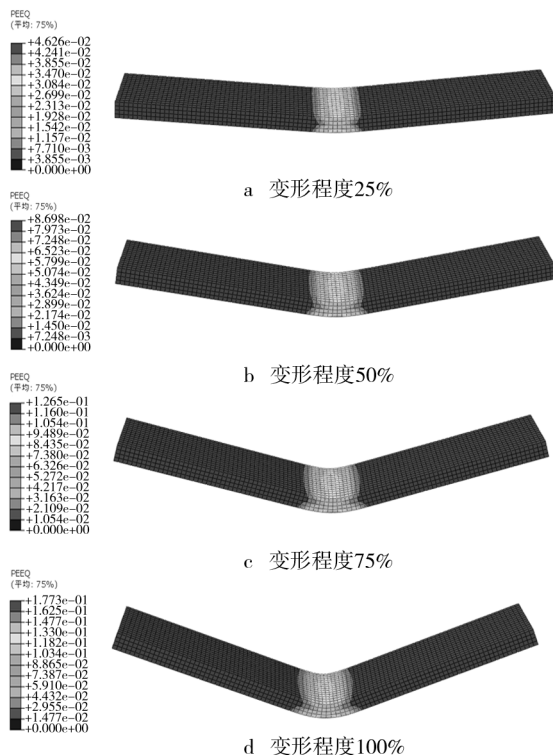


图5 不同变形阶段的应变分布云图

Fig. 5 Strain distribution nephogram of different stages

区,上表面为压应变,下表面为拉应变,几何中间层的板料应变值较小。随着凸模的下行,等效应变分布区分别向变形区两侧和板料的中间层扩展。成形结束时,板料上下表面的等效应变最大,且下表面的应变值比上表面略大,最大值为0.1773。

如图6所示,在板料变形区中间部分,从上到下取5个节点。在后处理中提取节点在不同时刻下的等效应力值,所绘制的等效应力变化曲线如图7所示。从图7可以看出,5个节点的等效应变值均随着折弯变形的进行而增大。内层板料受压缩,产生压应变,其等效应变值最大;外层板料受拉伸,产生拉应变,其等效应变值比内层板料等效应变值略小。由于中间层板料处于拉应变和压应变的过渡区域,故板料中间层节点3的等效应变值最小。

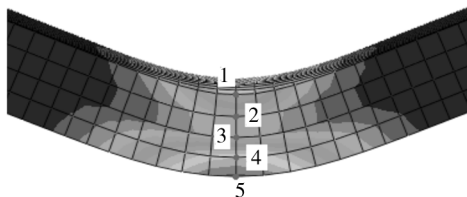


图6 节点选取示意图

Fig. 6 Nodes selected

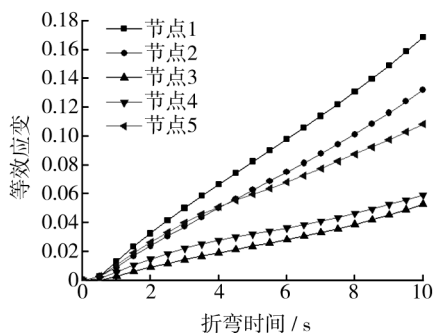


图7 选取节点的等效应变变化曲线

Fig. 7 Equivalent strain variation of the nodes

### 2.3 应力应变中性层内移

在板材的弯曲过程中,其应力中性层和应变中性层发生内移,且应力中性层的内移量大于应变中性层的内移量。关于中性层内移的方式有3种不同说法。第1种,板料在由弹性弯曲阶段进入塑性弯曲阶段后,并非完全的塑性弯曲,还存在着弹性弯曲,并伴随存在一个弹性应力应变中性层,因此,在大曲率弯曲时,塑性应力应变中性层与弹性应力应

变中性层均向内移动<sup>[13]</sup>。第2种,板料由弹性弯曲进入塑性弯曲之后,只产生塑性弯曲变形。板料在弹性弯曲阶段,其几何中间层的应力应变为0,故应力中性层和应变中性层重合并通过板料几何中间层。板料在塑性弯曲阶段,随着弯曲过程的进行,应力应变中性层作为一条连续的曲线产生向内侧均匀移动的现象,塑性变形量越大,内移量越大<sup>[14]</sup>。第3种,板料在弯曲变形中分为3个区域,即变形区、过渡区和非变形区。应力应变中性层是连续的,在不同区域内移量不同,非变形区中性层为几何中心,变形区中性层内移量最大<sup>[15]</sup>。如图8所示为板料在成形过程中X方向的应力应变云图,图8中曲线为根据应力应变值画出的应力应变中性层。

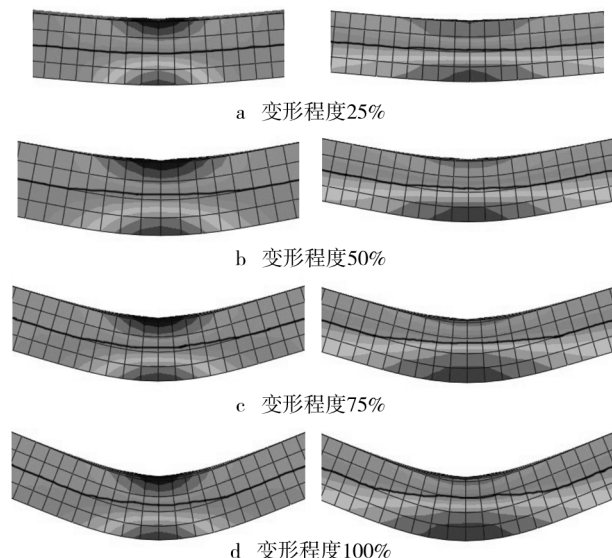


图8 折弯过程中应力应变中性层分布

Fig. 8 The stress and the strain neutral layer distribution during bending process

通过图8中折弯不同阶段板材应力中性层和应变中性层的对比可以看出:变形量为5%时,板料应力应变较大值主要分布在上下表面,应力中性层和应变中性层的位置重合,位于板料的几何中间层;随着折弯过程的继续,板料的应力分布区增大,其应力中性层开始出现内移趋势,由于板料的变形量不大,其应变中性层依然位于几何中间层;当变形量达到50%时,板料的塑性变形增大,其应变中性层逐渐内移,应力中性层随着板料变形继续向内侧移动;当折弯过程进行到75%时,板料受到切向拉应力的区域越来越大,其应力中性层内移量增大,应变中性层随

着变形也继续向内侧移动;当折弯过程结束时,可以看出,板料的应力中性层和应变中性层明显向内侧移动,而且应力中性层的内移量明显大于应变中性层的内移量。

图 9 所示为折弯过程中应变中性层与几何中间层的最大距离变化曲线。从图 9 中可以看出,随着折弯过程的进行,应变中性层与几何中间层之间的距离越来越大。折弯进行到 50% 之前,由于板料以弹性变形为主,应变中性层与几何中间层的距离在 0.4 mm 以内。当板料进入到塑性变形阶段,应变中性层内移量大幅增大,其与几何中间层的距离增大幅度增加。成形结束之后,应变中性层与几何中间层的距离为 3.3 mm。通过与图 7 进行对比可知,对于厚板折弯,仅依靠几何中间层展开所得到的板料尺寸并不准确。

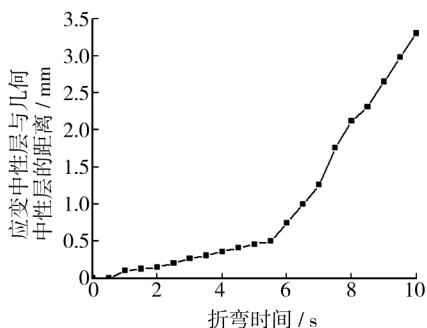


图 9 折弯过程中应变中性层与几何中间层的距离

Fig. 9 Distance between the strain neutral layer and the geometric neutral layer during the bending process

### 3 实验研究

采用与数值模拟相同的板料尺寸和工艺参数进行厚板折弯实验,实验开始前在板料变形区附近画出 4 mm×4 mm 的网格,板料网格划分和折弯后的网格变形情况如图 10 所示。由图 10 和图 2、图 5 对比可知,实验结果与模拟结果较为吻合。板料的弯曲变形主要体现在内外层纤维的缩短与伸长,板料上表面切向受压,下表面切向受拉。同时,由图 10b 和 d 可知,在成形之后,变形区内层的板料宽度增加,而外层宽度减小。如图 10f 所示为厚度方向的网格变化,变形后网格均呈扇形,且外层网格扇形高度减小,内层网格扇形高度增加。实验结果与模拟结果一致,这表明数值模拟可以真实地反映板料的

变形情况。

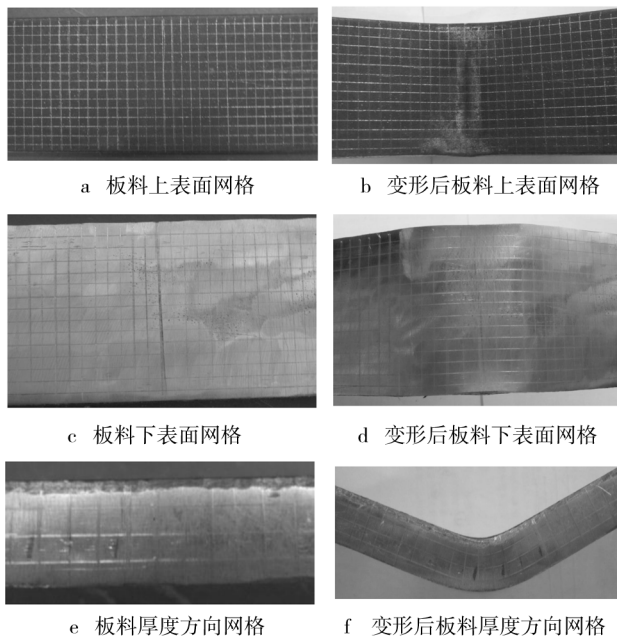


图 10 折弯前后板料网格的变化

Fig. 10 Mesh changes before and after bending

在成形过程中,板料的应变中性层会产生内移现象,如图 11 所示的曲线为所测得的成形件应变中性层。根据板料的变形情况,将成形板料分为 3 个区域,即未变形区、变形区和过渡区(如图 11 中所示)。从图 11 中可以看出:未变形区板料在折弯成形过程中,应变中性层的位置不发生变化,与其几何中间层位置重合;变形区板料应变中性层向折弯曲率中心方向移动,内移量较大,最大内移量约为 3.1 mm,与模拟值较为接近;过渡区板料应变中性层也向内侧移动,且内移量从变形区到未变形区逐渐减小。应变中性层是一个连续的线状几何纤维层,未变形区的应变中性层为直线,在变形区和过渡区内的应变中性层是一条光滑连续的圆弧形曲线,曲率半径比弯曲半径略大,且其圆心位置与弯曲中心角中心不重合,同样向内侧移动。

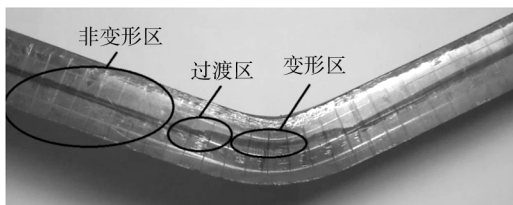


图 11 成形件应变中性层

Fig. 11 Strain neutral layer of forming part

## 4 结语

1) 板料折弯过程的数值模拟结果显示:随着折弯过程的进行,板料逐渐由弹性弯曲转为塑性弯曲,等效应力分布区域随之扩大;板料等效应变分布区小于等效应力分布区,内层主要为压应变,外层为拉应变,等效应变值大小依次为内层板料、外层板料、几何中间层板料。在成形过程中等效应力应变中性层均产生了内移现象,且应力中性层的内移量明显大于应变中性层的内移量。成形结束后,应变中性层与几何中间层的距离为 3.3 mm。

2) 采用厚度为 16 mm 的 Q345 板料进行物理实验。坯料的变形情况与模拟结果较为一致,应变中性层的内移量为 3.1 mm 左右,与模拟结果基本吻合,误差仅为 6.5%。

3) 对于中厚板折弯,中性层内移现象明显,采用几何中间层展开求得的坯料尺寸并不准确。数值模拟可以为应力应变中性层计算提供指导。

## 参考文献:

- [1] 肖景窖,姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,2006.  
XIAO Jing-yao, JIANG Kui-hua. Stamping Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [2] JAMLI M R, ARIFFIN A K, WAHAB D A. Integration of Feedforward Neural Network and Finite Element in the Draw-Bend Springback Prediction [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(8): 3662—3670.
- [3] 程军政. 大型高精度赋形雷达天线制造技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.  
CHEN Jun-zheng. The Manufacturing Technology Research on Large Precision Shaped Radar Antenna [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [4] 张凤泉,陈贵江,康永林,等. 汽车用低合金钢的现状与发展[J]. 特殊钢,2003,24(4):1—4.  
ZHANG Feng-quan, CHEN Gui-jiang, KANG Yong-lin, et al. Present Situation and Development of Low Alloy Steel for Automobile [J]. Special Steel, 2003, 24(4): 1—4.
- [5] ZANG S, LEE M, HOON K J. Evaluating the Significance of Hardening Behavior and Unloading Modulus under Strain Reversal in Sheet Springback Prediction [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 77: 194—204.
- [6] WANG S W, SUN S J, WEN A L, et al. Research of Fatigue Limit and Stress Concentration on Structural Steel With Double-Notches [J]. Key Engineering Materials, 2010, 419: 849—852.
- [7] GHARAHBAGH E A, QIU T, ROSTAMI J. Evaluation of Granular Soil Abrasivity for Wear on Cutting Tools in Excavation and Tunneling Equipment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(10): 1718—1726.
- [8] LEFEVRE J, HAYRYNEN K L. Austempered Materials for Powertrain Applications [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(7): 1914—1922.
- [9] NASTICH S Y, MOROZOV Y D, MARCHENKO V N, et al. Development and Commercial Use of Weldable High-Strength Cold-Resistant Steel for Load-Bearing Structures in Transportation Engineering [J]. Metallurgist, 2005, 49(5-6): 189—194.
- [10] KLINGELNBERG D. High-tech Mechanical Engineering Solutions Need High-Tech Steels [J]. Stahl und Eisen, 2003, 123(2): 25—28.
- [11] HUO Q, YANG X, SUN H, et al. Enhancement of Tensile Ductility And Stretch Formability of AZ31 Magnesium Alloy Sheet Processed by Cross-Wavy Bending [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 581: 230—235.
- [12] 朱阳春,吴向东,万敏,等. 超高强钢板 V 形弯曲回弹影响因素有限元分析[J]. 锻压技术,2012,37(5): 31—34.  
ZHU Yang-chun, WU Xiang-dong, WAN Min, et al. Simulation Research of V-Bending Springback for Ultra-High-Strength Steel Sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(5): 31—34.
- [13] 官英平,赵军. 板料弹塑性弯曲应力应变中性层位置关系探讨[J]. 塑性工程学报,2002,9(2): 39—41.  
GUAN Ying-ping, ZHAO Jun. Research on Place of Stress and Strain Neutral Layer in Elastic Plastic Bending of Plate [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 9(2): 39—41.
- [14] 湖南省机械工程学会锻压分会编. 冲压工艺[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1984.  
Forging Branch of Hunan Mechanical Engineering Institute. Stamping Technology [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1984.
- [15] 王成璞. 弯曲件的弯曲变形分析及中性层位移[J]. 模具技术,2002,2(102): 43—44.  
WANG Chen-pu. Deformation Analysis and Internal Shift of the Bending Part [J]. Die and Mould Technology, 2002, 2(102): 43—44.