第47卷 第4期 吉林大学学报(工学版) Vol.47 No.4
2017年7月 Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) July 2017

宽翼边U型截面不锈钢型材拉弯成形缺陷控制

谷诤巍,张文学,吕萌萌,王 伟,徐 虹,李 欣

(吉林大学 材料科学与工程学院,长春 130022)

摘 要:对一种新型宽翼边U型截面不锈钢型材的拉弯成形过程进行了模拟分析,研究了此类构件拉弯成形主要缺陷的成因及控制方法,并进行了试验验证。结果表明:宽翼边U型截面不锈钢型材拉弯成形主要缺陷为截面畸变和轮廓精度差,其中截面畸变缺陷包括底面翘起、立边弯曲、翼边翘曲和截面扩口或缩口;窄翼边一侧截面畸变程度较宽翼边一侧更严重;截面畸变缺陷主要因拉弯过程中立边的收缩引起,对立边高度进行合理补偿能够有效消除截面畸变缺陷;轮廓精度差主要因回弹量大引起;调整拉伸量等工艺参数一定程度上能够减小回弹,提高轮廓精度,而基于回弹对模具型面进行修正能够明显提高轮廓精度。最后,利用本文缺陷控制方法,开展了某轨道车辆宽翼边U型截面不锈钢立柱构件的拉弯成形试验,获得了合格的拉弯件,证明了本文方法的正确性。

关键词:材料合成与加工工艺;宽翼边;U型截面;不锈钢;型材拉弯;缺陷控制
中图分类号:TG306 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2017)04-1165-06
DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201704022

Stretch bending defect control of U-section stainless steel profile with wide flange

GU Zheng-wei, ZHANG Wen-xue, LYU Meng-meng, WANG Wei, XU Hong, LI Xin
(*College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China*)

Abstract: The stretch bending process of a new U-section stainless steel profile with wide flange was investigated by simulation. The causes and corresponding control methods of the main forming defects were studied, and the conclusions were verified by tests. Results show that the main forming defects are the section distortions and low contour accuracy. The section distortions include bottom surface upwarping, sidewall bending, flange warping and section expanding or contracting. The section distortions in the narrow flange side are more serious than that in the wide flange side. The section distortions are mainly caused by the shrinkage of the sidewall during stretch bending, which can be eliminated effectively by reasonable compensation of the profile sidewall height. The low contour accuracy is mainly due to springback, which can be improved to certain extent by adjusting the process parameters, while to modify the die surface based the springback can obviously improve the contour accuracy. Based on the above analyses, defect control methods were proposed and stretch bending tests of a U-section stainless steel pillar with wide flange on a rail vehicle were conducted. Qualified

收稿日期:2016-06-28.
基金项目:国家自然科学基金项目(51301074);吉林省科技发展计划项目(20130102021JC).
作者简介:谷诤巍(1970-),男,教授,博士生导师.研究方向:金属塑性成形技术.E-mail:gzweii@163.com

stretch bent parts were achieved, which verify proposed control methods.

Key words: materials synthesis and processing technology; wide flange; U-section; stainless steel; profile stretch bending; defect control

0 引 言

轨道车辆运输运载量大、效率高,且节能环保,是解决城市交通问题的一种重要途径,近年来受到越来越多的关注[1,2]。不锈钢型材质量轻、刚度大,常用来制造轨道车辆车体结构件[3]。轨道车辆车体构件尺寸大、截面复杂、精度要求高,常用拉弯工艺进行成形。拉弯工艺可在型材弯曲的同时对型材施加切向拉力,改善弯曲件截面应力状态,从而减小回弹,提高轮廓精度[4]。

针对型材拉弯成形工艺,已有学者开展了多方面的研究。谷诤巍等[5]利用摄动算法对型材的拉弯成形过程进行了理论分析。刁可山、周贤宾和高宏志等[6-8]通过对封闭截面型材的拉弯成形过程进行研究,提出了封闭截面型材拉弯成形性的概念,并构建了型材拉弯成形性评估专家系统。杜颂[9,10]分别对宽板和窄板拉弯成形的回弹过程进行了解析计算。刁可山等[11]和金朝海等[12,13]分别对铝合金矩形和复杂截面型材的拉弯成形过程进行了模拟分析,给出了工艺及结构参数对型材拉弯成形常见缺陷的影响规律。以上研究大多针对铝合金型材的拉弯成形,对不锈钢型材的拉弯成形研究相对较少。

随着轨道车辆车身设计概念的更新,出现了一种新的宽翼边 U 型截面不锈钢型材构件。生产发现,该类构件拉弯过程中容易出现截面畸变和轮廓精度差的问题,而目前尚缺乏该类构件的系统性研究资料。因此,本文以某轨道车辆车身立柱构件为例,对宽翼边 U 型截面不锈钢型材的拉弯成形进行了系统研究,分析了该类构件拉弯成形主要缺陷的成因,提出了相应缺陷控制方法,并通过试验进行了验证。

1 拉弯成形有限元模型

1.1 零件特征

某轨道车辆车身立柱构件如图 1 所示,材料为 SUS301L-HT 不锈钢,厚度为 1.5 mm。可以看出,该构件尺寸大,截面呈 U 型,且一侧翼边宽度明显大于另一侧。生产中发现该类构件经常出现截面畸变缺陷(见图 2),且轮廓精度差,导致车身装配精度难以保证。

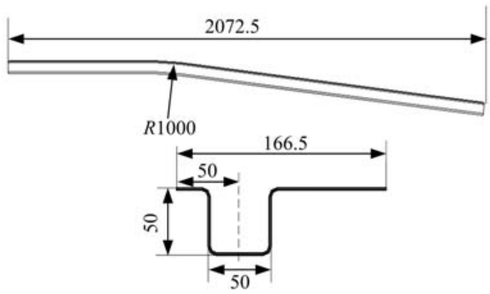


图 1 宽翼边 U 型截面不锈钢型材构件几何特征

Fig. 1 Geometry structure of the U-section stainless steel profile part with wide flange

(a) 翼边翘曲 (b) 截面扩口

图 2 宽翼边 U 型截面不锈钢构件常见截面畸变缺陷

Fig. 2 Common section distortion defects of U-section stainless steel parts with wide flange

1.2 有限元模型

基于零件特征,构建如图 3 所示的不锈钢型材拉弯成形有限元模型。模型包括拉弯模具、夹钳和型材几部分。其中,型材为可变形壳体,采用 S4R 网格类型进行划分,全局网格尺寸为 15 mm,局部采用 1 mm 网格进行细化;夹钳和拉弯模具为不可变形刚体,采用 H3D4 网格类型进行划分,全局网格尺寸为 25 mm,局部采用 1 mm 网格进行细化。材料模型选取 Krupkowsky 准则,屈服准则为 Mises 准则。摩擦模型选取 Coulomb 模型,摩擦因数设置为 0.1。材料性能数据如下:密度 ρ 为 7850 kg/m^3;弹性模量 E 为 188.8 GPa;泊松比 ν 为 0.33;屈服强度 σ_s 为 781.5 MPa;硬化系数 K 为 1.504 GPa;应变强化系数 n 为 0.1743。模型中夹钳简化为平面,型材端部与夹钳绑定。拉弯过程中,拉弯模具固定不动,夹钳的转动和移动带动型材包绕拉弯模具完成成形。型材初始立边高度取理论件立边高度,拉伸量取 10% 型材长度。

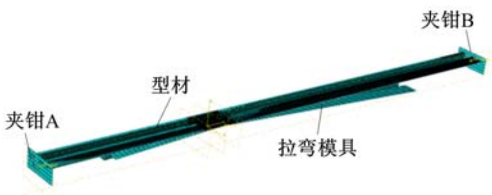


图 3　不锈钢型材拉弯成形有限元模型

Fig. 3　Simulation model for stretch bending of stainless steel profile

1.3　夹钳轨迹

拉弯过程中，型材依靠夹钳的运动包绕拉弯模具弯曲成形。因此，夹钳的运动轨迹是拉弯成形数值模拟的关键。假设弯曲过程中型材内侧与拉弯模具型面充分接触，则接触点亦是拉弯模具型面曲线的切点，于是可基于拉弯模型几何特征构建拉弯过程中夹钳轨迹，计算公式如下：

$$\begin{cases} X_{\mathrm{J}} = 1000\sin\theta + (L + \Delta l - 1000\theta)\cos\theta \\ Y_{\mathrm{J}} = 1000(1 - \cos\theta) + (L + \Delta l - 1000\theta)\sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

式中：$(X_{\mathrm{J}}, Y_{\mathrm{J}})$ 为夹钳坐标；L 为型材长度；Δl 和 θ 分别为型材弯曲过程中的伸长量和转角。

当型材拉伸量为 10% 型材长度时，夹钳的运动轨迹如图 4 所示。图 4 中，实线表示夹钳拉弯过程中实际运动轨迹，虚线表示型材纯弯曲条件下的轨迹，实线与虚线之前的间隙则为型材的伸长量。此外，需注意的是，该夹钳轨迹为图 3 中夹钳 B 的轨迹。由于夹钳 A 侧的型材只伸长不弯曲，故夹钳 A 仅横向移动，不转动。

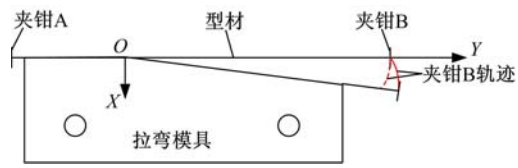


图 4　夹钳轨迹

Fig. 4　Jig trajectory

2　拉弯成形分析与讨论

2.1　成形缺陷分析

初始模型模拟结果如图 5 所示。可以看出，拉弯件立边弯曲，翼边翘曲，截面缩口，发生了明显的截面畸变，且窄翼边一侧畸变程度明显大于宽翼边一侧。拉弯过程中，型材轴向伸长。根据体积不变准则，型材截面收缩。其中，型材立边的收缩使型材立边高度小于拉弯胎翼边高度，导致立边弯曲、翼边翘曲，而立边的向内弯曲导致截面缩口。宽翼边一侧相对窄翼边一侧与模具接触更充分，由于摩擦力等外力作用更不易变形，故截面畸变程度相对较小。此外，拉弯件回弹显著，最大回弹量达到 17.38 mm（要求 1 mm 以内），轮廓精度超差。

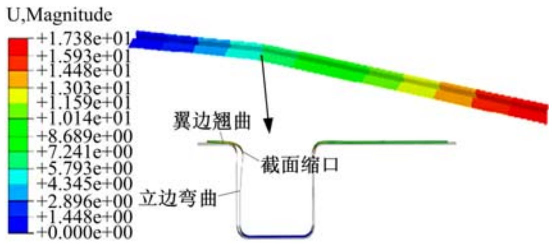
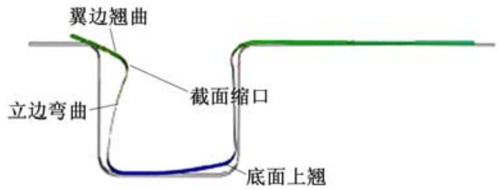


图 5　拉弯成形模拟结果

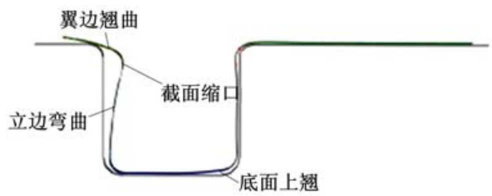
Fig. 5　Simulation results of stretch bending

2.2　截面畸变缺陷控制

由上述分析可知，型材立边高度是影响型材拉弯成形截面变形的重要因素。因此，本文通过补偿型材立边高度的方法对拉弯成形截面畸变缺陷进行控制。拉伸量为 10% 时，不同型材立边高度条件下拉弯件的截面变形情况如图 6 所示，其中 H 为理论件立边高度。由图 6(a)(b)可知，当型材立边高度小于理论件立边高度时，拉弯件翼边翘曲和截面缩口程度更大，且出现了底面上翘缺陷，截面畸变更严重。由图 6(d)(e)可知，随着立边高度补偿量的增加，截面畸变程度逐渐缩小；当型材立边高度为 $(H+2)$ mm 时，拉弯件截面变形情况良好，无畸变。然而，当立边高度补偿量



(a) 翼立边高度为(H-5) mm



(b) 翼立边高度为(H-2) mm

(c) 翼立边高度为H mm

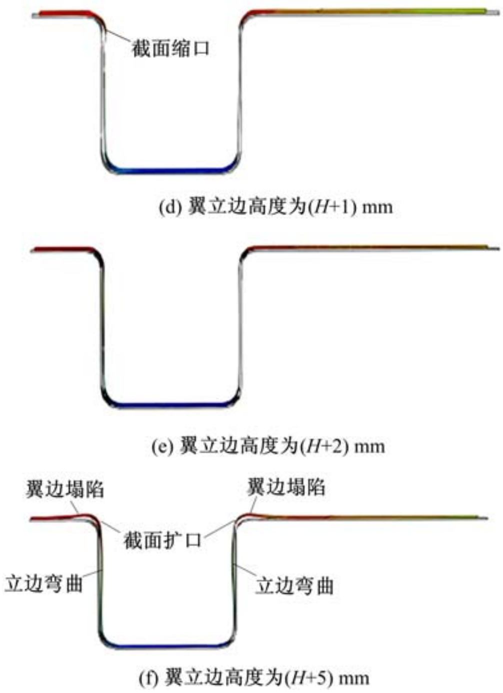


图 6　不同立边高度时拉弯件截面变形情况

Fig. 6　Section deformation of bent parts for different profile sidewall heights

过大时，会出现翼边塌陷和截面扩口等新的截面畸变缺陷（见图 6(f)）。因此，当拉伸量为 10％型材长度时，合理的型材立边高度补偿量为 2 mm。

2.3　轮廓精度控制

通常采取改善工艺参数或对模具型面进行回弹补偿的方法控制弯曲件的轮廓精度。本文利用数值模拟技术，对增大拉伸量和基于回弹对模具型面进行修正两种轮廓精度控制方法的效果分别进行分析，结果如图 7 和图 8 所示。可以看出，一定范围内，随着拉伸量的增大，拉弯件回弹量有所减小，轮廓精度有所提高，但仍然超差；当拉伸量增大至 20％以上时，继续增大拉伸量轮廓精度改

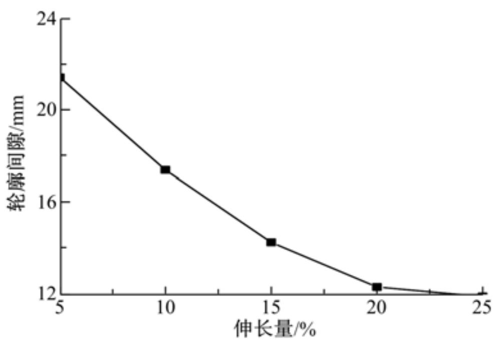


图 7　轮廓精度随拉伸量的变化

Fig. 7　Variation of contour accuracy with elongations

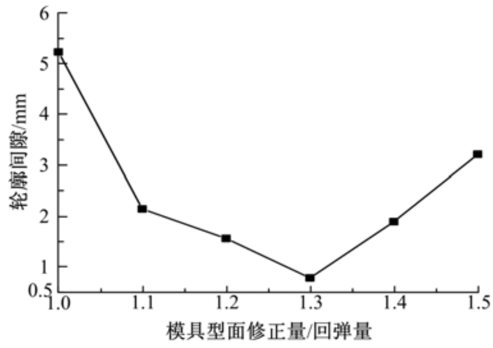


图 8　轮廓精度随模具型面修正量的变化

Fig. 8　Variation of contour accuracy with die surface modification amounts

善效果不显著。此外，增大拉伸量会使型材截面收缩更严重，截面变形情况更加难以控制。基于回弹修正模具型面对轮廓精度的控制效果显著；当模具型面修正量为 1.3 倍回弹量时，拉弯件轮廓精度良好，但修正量过大同样会导致成形件轮廓精度超差。因此，建议使用模具型面修正的方法进行轮廓精度的控制。对本文构件而言，拉伸量为 10％时，合理的模具型面修正量为 1.3 倍回弹量。

3　拉弯成形试验

为了验证本文缺陷控制方法的正确性，开展了拉弯成形试验，如图 9 所示。为方便模具型面的调整，本文开发了一种新型成形型面可调的拉弯模具，如图 10 所示。该模具的弯曲段由多个独立的高度可调的基本块构成；通过调整各基本块的高度，可实现模具型面的调整；为防止划伤型材且保证型面连续，基本块尖角位置均做圆滑处理，且基本块上方设置了一层垫板。该模具避免了模具调修过程中对模具的再加工，降低了成本，提高了生产效率。基于本文缺陷控制措施，设置拉伸

图 9　拉弯成形试验

Fig. 9　Stretch bending tests

量为 10％型材长度，型材立边高度补偿 2 mm，并利用所开发拉弯模具进行拉弯试验，获得了合格的拉弯件。拉弯件精度测量如图 11 所示。可以看出，拉弯件翼面平直，截面无畸变，且拉弯件与轮廓精度测量样板贴合良好，证明了本文缺陷控制方法的有效性。

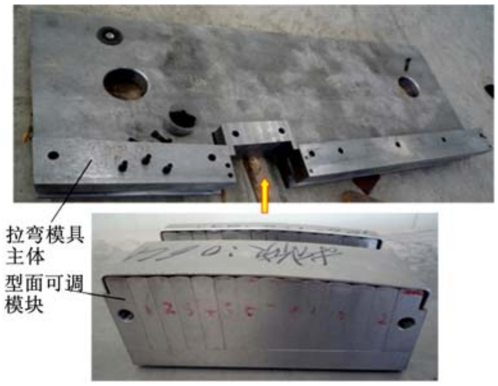


图 10　型面可调拉弯模具

Fig. 10　Stretch bending die with adjustable bending surfaces

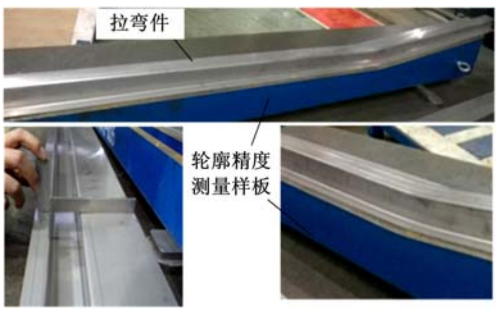


图 11　合格拉弯件

Fig. 11　Qualified stretch bent part

4　结　论

（1）宽翼边 U 型截面不锈钢型材拉弯成形主要缺陷为截面畸变和轮廓精度差，其中截面畸变缺陷包括底面翘起、立边弯曲、翼边翘曲和截面扩口或缩口，且窄翼边一侧截面畸变程度较宽翼边一侧更严重。

（2）截面畸变缺陷主要因拉弯过程中立边的收缩引起，对立边高度进行合理补偿能够有效消除截面畸变缺陷。

（3）轮廓精度差主要因回弹量大引起。调整拉伸量等工艺参数能够在一定程度上减小回弹，提高轮廓精度，而基于回弹对模具型面进行修正能够明显提高轮廓精度。

（4）对本文所研究构件而言，当拉伸量为 10％型材长度时，合理的型材立边高度补偿量为 2 mm，模具型面修正量为 1.3 倍回弹量。

参考文献：

[1] Wang Kai-yun, Liu Peng-fei, Zhai Wan-ming, et al. Wheel/rail dynamic interaction due to excitation of rail corrugation in high-speed railway[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(2): 226-235.

[2] Ling Liang, Xiao Xin-biao, Jin Xue-song. Development of a simulation model for dynamic derailment analysis of high-speed trains[J]. Acta Mechanica Sinica, 2014, 30(6): 860-875.

[3] 王胜满. 用于地铁车辆的不锈钢型材拉弯成形缺陷[J]. 吉林大学学报：工学版，2013，43(6)：1546-1550.

Wang Sheng-man. Stretch bend forming defects of stainless steel profiles of metro vehicles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(6): 1546-1550.

[4] 谷诤巍，蔡中义，徐虹. 拉弯成形的数值分析与工艺优化[J]. 吉林大学学报：工学版，2009，39(5)：1167-1171.

Gu Zheng-wei, Cai Zhong-yi, Xu Hong. Numerical analysis and optimization of stretch-bending process [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(5): 1167-1171.

[5] 谷诤巍，蔡中义，徐虹. 基于摄动法的拉弯成形工艺分析[J]. 清华大学学报：自然科学版，2009，49(5)：29-33.

Gu Zheng-wei, Cai Zhong-yi, Xu Hong. Analysis of stretch-bending forming process using the perturbance method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology Edition), 2009, 49(5): 29-33.

[6] 刁可山，周贤宾，李晓星，等. 矩形截面型材拉弯成形[J]. 北京航空航天大学学报，2005，31(2)：134-137.

Diao Ke-shan, Zhou Xian-bin, Li Xiao-xing, et al. Stretch bending of aluminum extrusion[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(2): 134-137.

[7] 周贤宾，刁可山，李晓星，等. 闭截面型材的拉弯成形性[J]. 北京航空航天大学学报，2006，32(10)：1168-1173.

Zhou Xian-bin, Diao Ke-shan, Li Xiao-xing, et al. Stretch bending formability of profile[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1168-1173.

[8] 高宏志,周贤宾,李晓星,等. 型材拉弯成形性评估专家系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(11):1411-1416.
Gao Hong-zhi, Zhou Xian-bin, Li Xiao-xing, et al. An expert system for stretch-bending formability evaluation of profiles[J]. Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics,2008,20(11):1411-1416.

[9] 杜颂. 宽板拉弯的数值分析与回弹计算[J]. 锻压技术,2004,29(5):19-22.
Du Song. Numerical calculation and analysis on spring back of sheet metal stretch bending[J]. Forging and Stamping Technology,2004,29(5):19-22.

[10] 杜颂. 窄板拉弯成形的数值分析与回弹计算[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(9):863-867.
Du Song. Numerical calculation of stretch bending of narrow strip and analysis on spring back[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2004,30(9):863-867.

[11] 刁可山,周贤宾,金朝海,等. 复杂截面型材力控制拉弯成形数值模拟分析[J]. 材料科学与工艺,2004,12(4):413-416.
Diao Ke-shan, Zhou Xian-bin, Jin Chao-hai, et al. A numerical study on the force-controlled stretch bending of aluminum extrusion with complex cross section[J]. Materials Science and Technology,2004,12(4):413-416.

[12] 金朝海,周贤宾,刁可山,等. 铝合金矩形管拉弯成形过程的数值模拟[J]. 材料科学与工艺,2004,12(6):572-575.
Jin Chao-hai, Zhou Xian-bin, Diao Ke-shan, et al. Numerical simulation of a stretch bending process for extruded aluminum rectangular tubes[J]. Materials Science & Technology,2004,12(6):572-575.

[13] 金朝海,周贤宾,刁可山,等. 铝合金型材拉弯成形回弹的有限元模拟[J]. 材料科学与工艺,2004,12(4):394-397.
Jin Chao-hai, Zhou Xian-bin, Diao Ke-shan, et al. Springback analysis for stretch bending of aluminum profile[J]. Materials Science & Technology,2004,12(4):394-397.