

材料性能波动对板材折弯回弹的影响规律研究*

张学广¹, 卢锴钧², 何广忠¹, 陈伟业², 罗健玺², 邹天下², 李大永²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062;

2. 上海交通大学机械工程与动力学院, 上海 200240)

[摘要] 为研究高强钢板材料性能波动对折弯回弹的影响, 采用正交试验方案对高强钢板取样并进行单拉试验, 通过分析单拉试验数据发现材料力学性能波动很大。参照实际折弯机工况建立了折弯工艺的有限元模型, 与折弯试验数据对比验证了有限元模型的准确性。最后将所有单拉数据分别输入有限元模型中进行计算, 结果表明材料力学性能的波动对高强钢板的折弯回弹幅度影响较大, 其中材料厚度对折弯回弹幅度影响达到了 2.12° , 材料方向对其影响达到了 0.21° 。

关键词: 高强钢; 材料性能; 折弯; 回弹; 有限元模型

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.18.048



张学广

博士研究生、高级工程师, 主要从事轨道车辆车体制造工艺以及数字化制造技术相关研究。

在航空工业中, 钣金零件构成飞机机体框架和气动外形, 是现代飞机机体的主要部分。钣金零件约占整架飞机零件总数量的 50%, 且种类多、形状复杂、质量要求高, 加工难度大^[1]。钣金零件制造技术是航空制造极为重要的组成部分, 直接决定了钣金零件的成形质量^[2]。钣金折弯成形作为钣金零件的重要柔性加工工艺之一, 大量应用于航空、汽车和家电等制造领域^[3]。回弹是钣金折弯成形中板料在卸载阶段发生的反向弹性变形, 直接影响折弯件的尺寸精度。

目前, 高强钢板由于成形时回弹幅度大, 在折弯成形时均过弯处理^[4-6]。在大批量生产工件时, 由于板料厚度、批次、位置以及加工方向不同, 材料的力学性能波动大, 应用一套折弯成形工艺参数生产零件时, 部分零件的折弯回弹后角度精度无法达到要求, 产品合格率大大

降低。因此, 研究高强钢板的折弯回弹工艺以及材料性能波动对折弯回弹的影响, 有着重要的工程意义。

近年来, 有多位学者对高强钢材料的回弹特性进行了深入研究。邓锐等应用 ABAQUS 软件, 研究了高强度钢板的屈服强度、摩擦系数、进给速度及侧向力波动对汽车轮辋零件滚压回弹影响规律, 提出了工艺参数优化选取原则^[2]。王明伟等利用 DYNIFORM 软件建立了高强钢汽车加强板冲压成形过程有限元模型, 并通过正交试验分析了模具间隙、冲压速度、压边力以及摩擦系数对回弹的影响规律, 得到了优化的成形工艺参数^[3]。胡志超等结合回弹算法和稳健设计理论, 开发了基于 Dynain 文件的回弹补偿系统 springbackcom, 满足了冲压模具设计中回弹补偿的需求, 有效提升了实际生产的成品质量^[5]。

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51705315)。

本文采用正交试验方案对高强钢板取料,并进行了单拉试验,进一步对材料单拉数据分析获得了材料性能波动的主要因素,之后建立了折弯工艺的有限元模型并验证了仿真模型的准确性,通过对仿真回弹结果分析发现材料性能的波动对折弯回弹幅度有很大影响,为进一步优化折弯成形工艺参数提供了理论支持。

高强钢板材料参数 波动试验

试验材料为 SUS301L-HT 不锈钢板材,试样尺寸如图 1 所示。为探究不同厚度、批次、位置和方向的材料力学性能波动,所有试验样本按照表 1 所示的 5 因素 3 水平表设计正交试验方案,进行试验取样,具体的取样位置与取样方向如图 2 所示。按照国标 GB/T 228—2002,利用 MTS-E45-50KN 拉伸试验机与 Epsilon-3542025M-100-ST 引伸计,对上述所取试样进行单向拉伸试验。

单拉试验获得的材料应力-应变曲线如图 3 所示。在弹性段,各应力-应变曲线相差较小,波动较小;塑性段中,曲线波动较大。为进一步衡量应力-应变曲线在塑性强化阶段的波动情况,选取特定的参数表征强化区域,将材料应力-应变曲线按固定应变间隔切片,将切片上数据进行统计分析,结果如图 4 所示。进一步地,可获得材料的力学参数波动的统计结果,如表 2 所示。在塑性强化阶段,标准差均大于 20MPa,极差均大于 60MPa。应力-应变曲线波动幅度在应变 0.05 附近达到峰值,标准差约 35MPa,极差约 120MPa。弹性模量、屈服强度、强化应力、塑性应变比、抗拉强度以及延伸率的标准差均较大,其中弹性模量标准差达到 3.3GPa。在有限元仿真和实际生产中,材料力学性能在塑性强化段的剧烈波动将严重影响到仿真和实际生产的零件的回弹幅度。

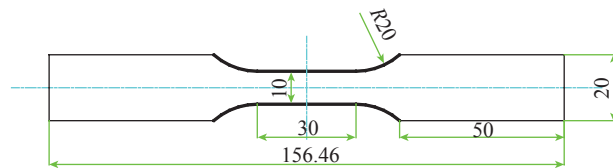


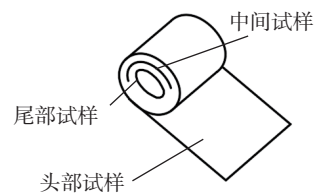
图1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Tensile sample size

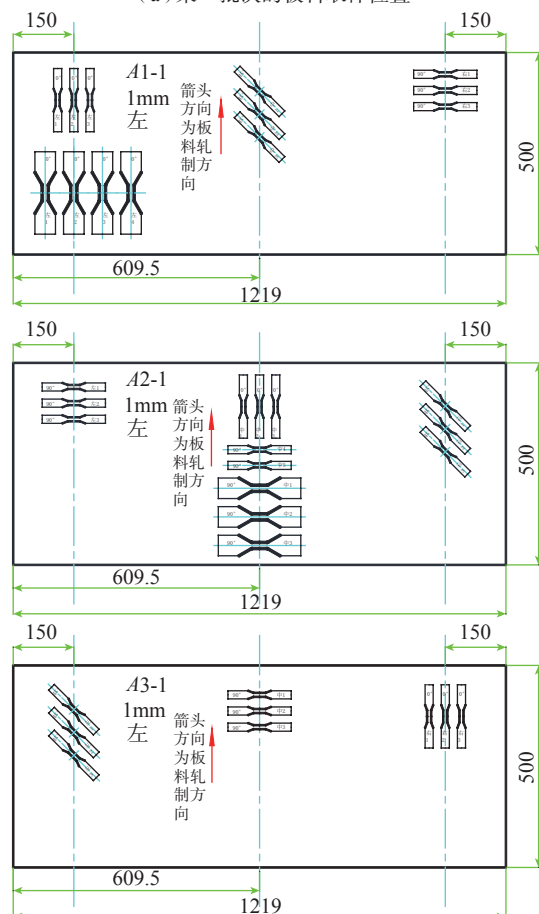
表1 因素水平表

Table 1 Factor level table

水平	厚度 / mm	批次	纵向位置	横向位置	材料方向 / (°)
1	1	A	头	左	0
2	1.5	B	中	中	45
3	—	—	尾	右	90



(a) 某一批次的板料取样位置



(b) 板料取样的位置及方向

图2 钢板取样方案

Fig.2 Steel plate sampling scheme

为确定不同影响因素对材料波动的贡献大小,选取应变为 0.05 处的应力作为强化阶段的特征参数,应用方差分析方法分析各种因素对特征指标影响的显著性,如表 3 所示。其中的显著性假设检验值(p 值)越小,说明该因素越显著,当 $p < 0.01$ 时判断为显著^[6-7]。结果显示,材料方向与钢板厚度对材料力学性能影响较为显著,其他因素影响较小。

有限元数值模拟

1 几何模型

在横梁和立柱的成形过程中,一张平板经过 4 道次折弯成形工艺成形为如图 5 所示的帽形件,再经过拉弯、端部冲压等工艺成形为横梁或立柱等零件。在前 4 道次的折弯成形中,每次的最终成形角均为 90° ,本文着重研究 90° 折弯成形过程。

根据型号为 LVD75 折弯机床的实际工作情况,应用 ABAQUS 软件建立的有限元模型,如图 6 所示。模型由上模、板料及下模组成,在成形过程中,下模固定不动,上模垂直向下移动一段距离,板料受到上模和下模的作用,产生弯曲变形,卸载后板料有一定程度的回弹。

2 材料模型

考虑到高强钢加工过程中的硬化特点,在 Mises 屈服准则的基础上,利用 Chaboche^[9-10] 非线性混合硬化模型研究高强钢在折弯过程中的硬化规律。同时考虑材料等向硬化和移动硬化的 Mises 屈服函数可由下式表示^[8-10]:

$$f_y = \|\sigma - \chi\| - \eta = 0$$

$$\sqrt{\frac{3}{2}(\sigma' - \chi') : (\sigma' - \chi')} - \eta = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \chi = \sum_{k=1}^{N_b} \chi_k \\ \dot{\chi}_k = \frac{2}{3} C_k \dot{\varepsilon}_p - \gamma_k \chi_k \dot{p} \end{cases} \quad (2)$$

$$\chi_k = \mu \frac{C_k}{\gamma_k} + \left(\chi_{k0} - \mu \frac{C_k}{\gamma_k} \right) \exp(-\gamma_k |\varepsilon_p - \varepsilon_{p0}|) \quad (3)$$

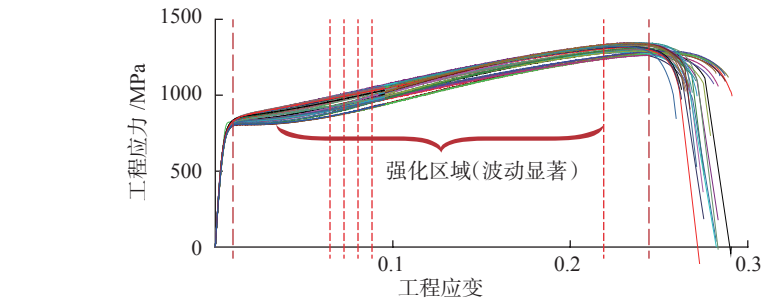


图3 材料应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of material

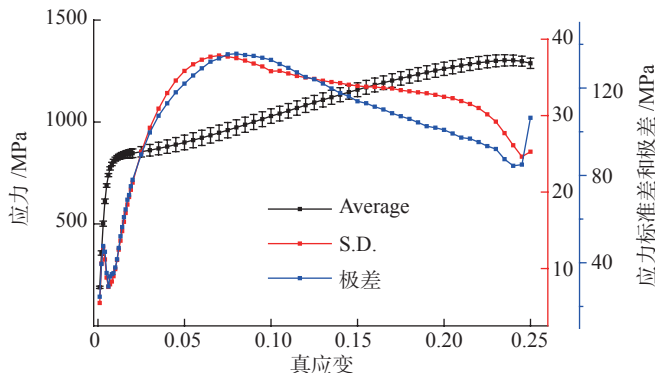


图4 应力-应变曲线切片结果统计

Fig.4 Statistical analysis of stress-strain curves

表2 材料力学性能参数统计结果

Table 2 Statistical results of mechanical properties of materials

指标	弹性模量 E/MPa	屈服强度 σ_s/MPa	强化应力 $\sigma_{0.05}/\text{MPa}$	塑性 应变比 r	抗拉强度 σ_b/MPa	延伸率 $\delta_{25}/\%$
平均值	155828	839.5	901.3	0.766	1293.7	20.8
标准差	3336.5	19.9	37.8	0.147	32.8	11.3

表3 材料影响因素方差分析

Table 3 Variance analysis of material influence factors

影响因素	p 值						
	实际厚度	E	σ_s	$\sigma_{0.05}$	σ_b	δ_{25}	r
纵向	0.910	0.820	0.267	0.390	0.284	0.903	0.348
横向	0.000	0.389	0.504	0.928	0.214	0.921	0.640
材料方向	0.412	0	0	0	0.008	0.378	0
名义厚度	0	0.950	0.093	0	0	0	0.298
批次	0.040	0.402	0.381	0.422	0.708	0.672	0.260

式中, $\eta = \sigma_0 + \phi$, 表示应力空间上的屈服面的大小(在单轴条件下等于弹性区域长度的一半); σ_0 为初始屈服应力; ϕ 为等向硬化变量; χ 为移动硬化变量, 又叫做背应力; σ' 和 χ' 为应力 (σ) 和背应力 (χ) 的偏量; k 为背应力指

标; N_b 为背应力的个数; $\dot{\chi}$ 为背应力率; C 和 γ 为移动硬化参数; ε_p 为塑性应变率; \dot{p} 为等效塑性应变率, ε_{p0} 和 χ_{k0} 为在某一次加载时的塑性应变 (ε_p) 和背应力分量 (χ_k) 的初值, $\mu = \pm 1$ 表示加载方向。

在原有大量单拉试验的基础上补充循环拉压试验,通过程序翻转、拟合曲线计算获得参数。

3 仿真结果分析

图7为折弯角度 90° 的折弯仿真结果,其中材料选择为厚度1mm、材料方向 0° 、批次A、纵向位置中、横向位置中的单拉数据,此试样为基准试样。从仿真结果可以看出,上模下压量为7.62mm时,弯曲角度达到最大值 76.4° ,此时板料的最大减薄率为3.7%,板料发生起皱或开裂等缺陷的可能性很小^[11]。撤掉上模下模后,板料有一定程度的回弹,最终的回弹角度为 90° 。

为验证有限元仿真结果的准确性,将厚度为1mm的板料在折弯机进行多次不同角度的折弯试验,所获得的回弹后板料如图8所示。

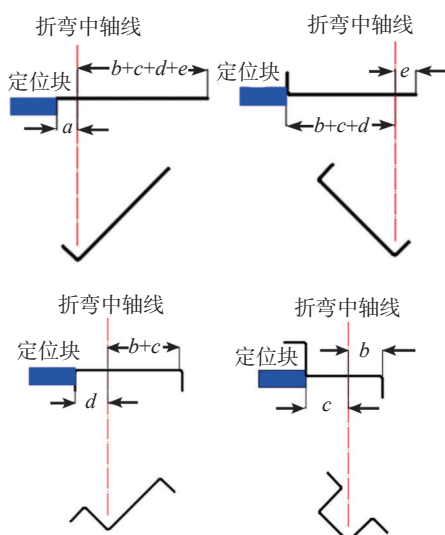


图5 横梁和立柱零件的折弯工艺
Fig.5 Bending process of beam parts

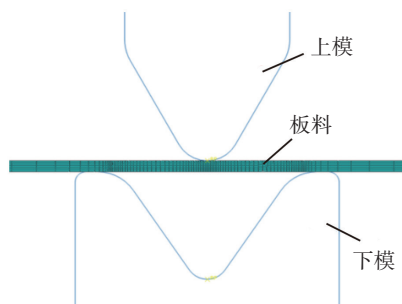


图6 有限元模型
Fig.6 Finite element model

板料从左至右共6个折弯角度,对应的上模下压量分别为3.28mm、4.07mm、4.80mm、5.55mm、6.32mm、7.13mm,可换算为回弹前折弯角度分别为 76.39° 、 85.33° 、 95.94° 、 106.38° 、 116.91° 、 127.25° 。测量回弹后板料的弯曲角度,如表4所示。有限元仿真试验中,按照实际折弯试验数据,分别建立模型进行计算,获得的回弹结果如表4所示。结果显示,6次的仿真回弹结果误差均在 0.6° 以内,且误差正负分布均匀,有限元仿真结果准确性非常高。

各项材料影响因数对折弯回弹的影响

为探讨所有因素对成形结果的影响,首先固定材料力学性能不变,单独探讨几何尺寸对试样角度的影响,结果如表5所示,实际板料厚度

波动小于0.015mm,因此造成的角度偏差小于 0.15° ,基本可以忽略。

随后着重关注材料力学性能影响因素对最终折弯成形中零件回弹幅度的影响,将所有试样的单拉数据作为有限元仿真的材料数据,其他所有的工艺参数(如板料厚度等几何尺寸)均与上述有限元模型相同。

经过计算,得到的仿真结果相对于基准试样的角度误差如图9所示,最终的统计结果如表5所示。

从图9中可以看出,所有试样的弯曲角度误差均小于 3° ,其中厚度为1.5mm试样误差均大于 1.5° 。仿真结果和实际生产中误差统计结果大体相同,进一步说明了仿真结果的准确性。然而,此量级的误差在零件装配时会造成极大的装配应力,导致部件整体质量较差。为进一步分析各个材料影响因素对零件回弹角度的影响,根据控制变量法进行统

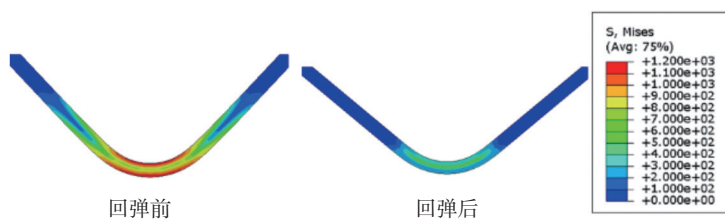


图7 折弯有限元仿真结果

Fig.7 Simulation results of bending finite element

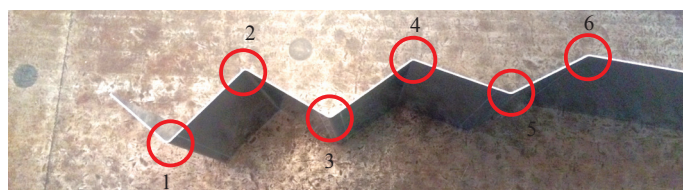


图8 6次折弯回弹后的板料

Fig.8 Sheet material of 6 bending after springback

表4 仿真与试验结果对比

Table 4 Comparison between simulation and test results ($^\circ$)

试验次数	仿真结果	实际结果	差值
1	90	89.7	-0.3
2	100	100.6	0.6
3	110	110.5	0.5
4	120	119.7	-0.3
5	130	130.3	0.3
6	140	139.6	-0.4

计,不同影响因素条件下单个影响因素的变化引起角度变化的最大值结果如表6所示。其他影响因素相同情况下,厚度改变后同一牌号材料差别最大,对折弯回弹的影响也最大,材料方向对回弹的影响也较大,其他影响因素则影响较小^[12]。其中,不同因素条件下,厚度变化引起的角度变化最大值达到2.12°,而材料方向变化引起的角度变化最大值达到了0.21°。因此,在实际生产过程中,为保证零件折弯后的角度精度,不同厚度、不同的材料方向的板料应视作不同材料,采用不同的折弯工艺参数进行加工成形。

结论

(1) 针对各项材料性能影响因素,按照正交试验方案设计单拉试验,获得了单拉试验数据。通过分析单拉试验数据,发现材料力学性能波

动较大,其中材料方向与厚度对材料力学性能有显著影响。

(2) 建立了高强钢折弯成形过程的仿真模型,仿真结果与试验结果吻合,说明有限元结果准确度较高。

(3) 材料力学性能的波动对折弯回弹幅度有很大影响。其中,材料的厚度和方向对折弯回弹的幅度影响较大,厚度变化引起的折弯回弹幅度变化最大值达到2.12°。

参考文献

[1] 韩秀全. 典型先进航空钣金制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2013, 56(18): 70-73.
 HAN Xiuquan. Development of advanced manufacturing technology for aeronautic sheet forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(18): 70-73.
 [2] 金卯, 晓立. 航空钣金成形设备应用调查报告[J]. 航空制造技术, 2009, 52(2):

58-59.

JIN Mao, XIAO Li. Survey report of aviation sheet metal forming equipment application [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(2): 58-59.

[3] 王飞, 游有鹏. 钣金V形折弯回弹影响因素的有限元分析[J]. 沈阳工业大学, 2012, 34(5): 526-529, 535.

WANG Fei, YOU Youpeng. Finite element analysis on influencing factors of springback in sheet metal V-bending[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34(5): 526-529, 535.

[4] ZOU T X, LI D Y, WU G H, et al. Yield strength development from high strength steel plate to UOE pipe[J]. Materials & Design, 2016, 89: 1107-1122.

[5] 胡志超, 李延平, 常勇, 等. 基于Dynaform的回弹补偿算法与系统[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(4): 5-9.

HU Zhichao, LI Yanping, CHANG Yong, et al. The compensation algorithm and system for springback in sheet metal forming based on Dynaform[J]. Journal of Machine Design and Research, 2012, 28(4): 5-9.

[6] 王武荣, 游洁, 张新鹏, 等. 基于材料性能波动统计学分析的特征件冲压成形稳健设计[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(1): 1-5.

WANG Wurong, YOU Jie, ZHANG Xinpeng, et al. Robust design for characteristic part stamping based on statistic analysis of variation of material's property[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(1): 1-5.

[7] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.

LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.

[8] CHABOCHE J L. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5: 247-302.

表5 几何尺寸对试样角度的影响

Table 5 Effect of geometry size on the angle of sample

部件	几何参数	几何参数变化1mm对成形角的影响/(°)
上模	上模高度	1
	圆角半径	1
下模	下模高度	1
	开口宽度	0.5
工件	圆角半径	0.1
	板料厚度	1

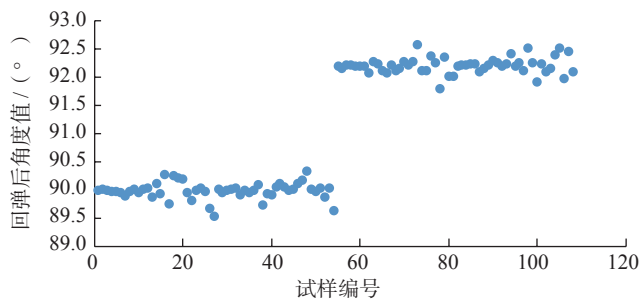


图9 仿真结果相对于基准试样的角度误差

Fig.9 Angle deviation between the simulation results and the reference sample

表6 基于影响因素的试样角度误差最大值

Table 6 Maximum angle deviation of sample based on influence factors (°)

厚度	批次	材料方向	横向位置	纵向位置
2.12	0.02	0.21	0.05	0.04

(下转第66页)

[ABSTRACT] With the rapid development of our country's aerospace industry, precision sheet metal parts are more increasingly used. According to different design and application requirements, aviation pipe parts have also been improved from the original free bulging process to various controllable bulging processes, which have greatly broaden the application range. One of the metal molding processes is internal high pressure bulging process, which is widely applied in aviation manufacturing fields. The difficulty form, multiple influencing factors and the complex process are always hard to resolve. In this study, an example of the aviation clamp part is investigated. Axial material compensation amounts, internal pressure and loading paths have been discussed. Through the numerical simulation analysis, the process parameters can be optimized, a simple high-pressure tube bulging process method has been successfully applied, which is beneficial to shorten production cycle and save production costs.

Keywords: Aviation; Clamp; Internal high pressure; Axial pressure; Numerical analysis

(责编 大漠)

(上接第52页)

[9] CHABOCHE J L. On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratchetting effects[J]. International Journal of Plasticity, 1991, 7(7): 661-678.

[10] CHABOCHE J L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(10): 1642-1693.

[11] 姜志远, 刘郁丽, 杨合, 等.

B550CL 高强度钢轮辐反拉深-翻边复合成形损伤开裂研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(3): 71-75.

JIANG Zhiyuan, LIU Yuli, YANG He, et al. Research about flange cracking in the high-strength steel spokes forming process[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(3): 71-75.

[12] 孔炎, 薛克敏, 李萍, 等. 基于正交试验和灰色系统理论的高强度钢厚板折弯优化成形模拟及实验[J]. 塑性工程学报, 2014,

21(5): 11-14, 40.

KONG Yan, XUE Kemin, LI Ping, et al. Optimized simulation and experiment on high-strength thick steel plate bending based on orthogonal test and grey system theory[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(5): 11-14, 40.

通讯作者: 张学广, E-mail: zhang-xueguang@cccar.com.cn.

Material Properties Fluctuation Effects on Bending Springback of High Strength Steel

ZHANG Xueguang¹, LU Kaijun², HE Guangzhong¹, CHEN Weiye², LUO Jianxi², ZOU Tianxia², LI Dayong²

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] This paper has studied how material properties fluctuation effects on bending spring back of the high strength steel, through uniaxial tensile tests by sampling based on the orthogonal test, and found out the material mechanical properties have great fluctuation by analyzing the uniaxial tensile test data. Then FE model is established according to working condition of the actual bending machine, and the model is proved to be accurate by comparing the simulated result with the bending experimental result. At last all the uniaxial tensile data are input into the FE model respectively and the result shows that the fluctuation of the material properties has a great influence on the bending springback of the high strength steel, among which the influence of material thickness on the bending springback has reached to 2.12° and material orientation to 0.21°.

Keywords: High strength steel; Material property; Bending process; Springback; FEM (Finite Element Model)

(责编 大漠)