

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.047

# 基于硬度梯度的热成形高强钢弯曲性能研究\*

申国哲<sup>1</sup> 李效文<sup>1</sup> 盈亮<sup>1</sup> 史栋勇<sup>2</sup> 郭润清<sup>1</sup> 孟召焕<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学汽车工程学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学工程力学系, 大连 116024)

**摘要:** 采用热成形高强度钢设计了不同厚度板料的三点弯曲试验, 得到了相关弯曲力学性能参数。实验表明: 热成形高强度钢的弯曲力学性能随厚度的增加而增强, 在厚度方向上硬度分布呈中间高、两侧低的梯度分布规律, 形成了具有连续梯度分布的多层金属复合材料。基于厚度方向硬度梯度分布规律及硬度-强度对应关系, 建立了一种多层金属复合材料的三点弯曲数值仿真模型, 研究了热成形板材在变梯度弯曲模型下更合理的数值模拟方法。

**关键词:** 热成形 高强钢 三点弯曲 梯度模型 数值模拟

**中图分类号:** TG331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0261-06

## Bending Behavior Based on Hardness Gradient for Hot Forming High Strength Steel

Shen Guozhe<sup>1</sup> Li Xiaowen<sup>1</sup> Ying Liang<sup>1</sup> Shi Dongyong<sup>2</sup> Guo Runqing<sup>1</sup> Meng Zhaohuan<sup>1</sup>

(1. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A three-point bending test of hot forming high strength steel specimens with different thickness was designed. The related mechanical parameters were obtained. The results indicated that the bending mechanical properties of hot forming specimens were strengthened with the increase of the thickness. The specimens which were based on different thickness had higher center hardness and lower surface hardness. Meanwhile, a multi-layer composite material was proposed with hardness gradient distribution in the direction of the thickness. Based on the hardness gradient and the hardness-strength corresponding to the relationship, a multi-layer gradient numerical simulation model of three-point bending was established, explored that the gradient material model was more rational for numerical simulation.

**Key words:** Hot forming High strength steel Three-point bending Gradient model Numerical simulation

### 引言

采用高强度钢板热成形技术制造汽车结构件, 既可以减轻车体质量, 又能提高碰撞安全性, 被国内外汽车界公认为是同时实现车身轻量化和提高碰撞安全性的最佳途径<sup>[1-3]</sup>。弯曲工况是车身常见的工作工况, 车身结构件的抗弯性能直接决定车身的耐撞性。由于热成形高强度钢越来越广泛地应用于车身承载件, 研究其弯曲力学性能和相关机理具有重

要的现实意义。

目前, 国内外很多学者已对热成形高强度钢在不同温度下的材料流动行为、高温下材料的成形性评估和高速钢复合梯度材料等进行了研究<sup>[4-8]</sup>。然而, 对热成形高强度钢沿厚度方向材料分布特性的研究并不多见。本文基于热成形高强度钢三点弯曲试验, 进行抗弯力学性能及抗弯机理分析, 获得热成形高强度板材沿厚度方向硬度-强度分布特性, 建立基于硬度梯度的多层复合材料数值仿真模型。通过

收稿日期: 2012-01-04 修回日期: 2012-02-13

\* 国家自然科学基金重点资助项目(10932003、11272075)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100041120017)和国家工信部04重大专项基金联合资助项目(2011ZX04001-021)

作者简介: 申国哲, 副教授, 主要从事高强度钢板热冲压工艺与数值模拟技术研究, E-mail: sgz@dlut.edu.cn

该模型进行三点弯曲工况准确性仿真分析评估,以期证明建立的材料属性梯度变化模型更符合实际弯曲工况下热成形板材仿真应用。

## 1 基础力学试验

### 1.1 材料成分

试验采用热成形 22MnB5 高强度钢板。该类硼

表 1 22MnB5 钢板各元素质量分数

Tab.1 Chemical composition analysis of 22MnB5 steel

元素	C	Mn	Cr	Si	B	P	S	Al
质量分数	0.221 0	0.987 2	0.138 0	0.254 7	0.004 4	0.011 9	0.002 8	0.611 0

### 1.2 机械性能

将板料加热至 900℃ 并保温适当时间使之完全奥氏体化,然后将红热的板料送入带冷却水道的模具内,合模并保压淬火获得热成形毛坯,按照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》进行单向拉伸试验获取材料基础力学性能,如表 2 所示;图 1 给出了该钢板在不同状态下的工程应力-应变曲线。

表 2 高强度钢板热成形前后基本力学性能参数

Tab.2 Mechanical properties of hot forming high strength steel

板料状态	屈服强度	抗拉强度	延伸率
	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%
原始	300	490	26
热成形	1 030	1 550	5.5

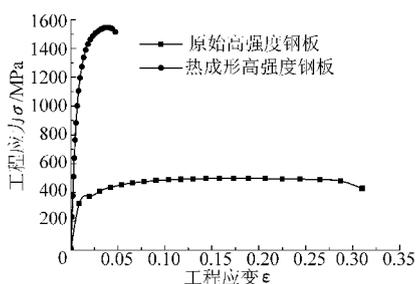


图 1 典型热成形高强度钢板工程应力-应变曲线

Fig.1 Engineering stress - strain curves of typical hot forming high strength steel

从图 1 和表 2 可以看出,本试验所用热成形高强度钢板的屈服强度和抗拉强度分别为 1 030 MPa 和 1 550 MPa,延伸率为 5.5%;而原始高强度钢板屈服强度和抗拉强度分别为 300 MPa 和 490 MPa,延伸率为 26%。热成形高强度钢板抗拉强度在得到很大程度提升的同时,延伸率明显降低,这是高强度钢板经过热成形工艺后的典型特征。

车身结构件和承载处的抗弯性能直接决定车身的耐撞性能。弯曲试验所选用的钢板厚度分别为

钢的成分特点是在 C - Mn 钢的基础上添加一定质量分数的硼元素,固溶的硼偏析在奥氏体晶粒边界,延迟了铁素体和贝氏体的形核,进而增加了钢的强度。通过 LAB CENTER XRF - 1800 扫描型 X 射线荧光光谱仪测定该种硼钢中各元素质量分数如表 1 所示。

1.0、1.2、1.6、2.0 mm 4 种。按照 YB/T 5349—2006《金属弯曲力学性能试验方法》进行三点弯曲试验,试验结果如图 2 所示。

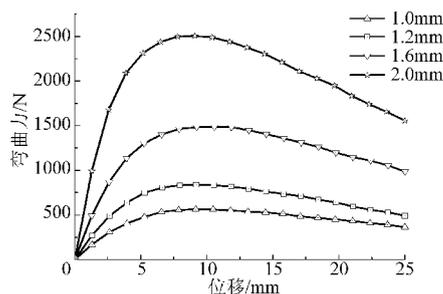


图 2 不同厚度热成形高强度钢板弯曲力-位移曲线

Fig.2 Bending force - displacement curves of hot forming high strength steel with different thicknesses

由图 2 可知,随着热成形高强度钢板厚度的增加,钢板的承载能力有很大的提升,虽然钢板厚度不同,但压头力和位移曲线都呈现出相同的变化趋势,即先升高后降低。从图 3 可以看出,热成形高强度钢板的最大弯曲力和最大吸能值均随厚度的增加而增大;同时,钢板最大弯曲力和最大吸能值的相对增加量都随厚度的增加而增大。

## 2 热成形高强度钢板分层模型建立

### 2.1 硬度分析

基于不同厚度热成形板材弯曲试样,对试样沿截面厚度方向进行维氏硬度分布试验测定,试样选取点位置如图 4a 所示。图 4b 给出了热成形高强度钢板沿截面厚度方向的硬度分布曲线。从图 4 可以看出,热成形高强度钢板沿截面厚度方向的硬度分布并不均匀,而是呈现出中间硬度较高,两侧硬度偏低的现象,出现这种现象的原因主要是高强度钢板在进行淬火处理时,钢板表层发生氧化脱碳,致使表层的淬透性下降,从而导致表层的硬度偏低<sup>[9]</sup>。根据硬度与强度及材料塑性之间的关系<sup>[10]</sup>可知,此类热成形高强度钢复合材料的强度分布与硬度分布趋

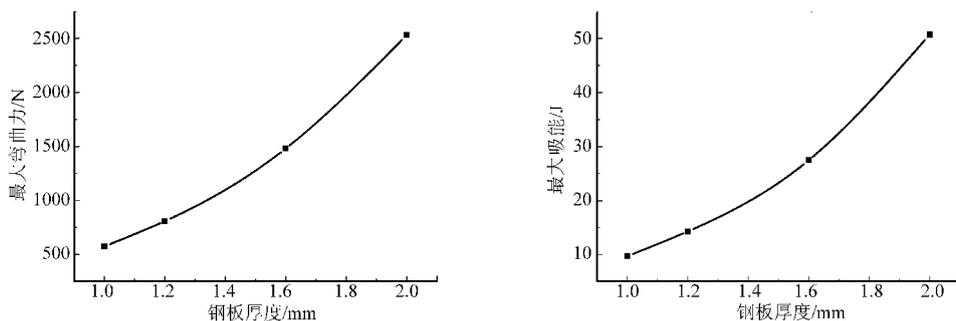


图 3 热成形高强度钢板抗弯力学性能参数对比

Fig. 3 Comparison on bending parameters of hot forming high strength steel

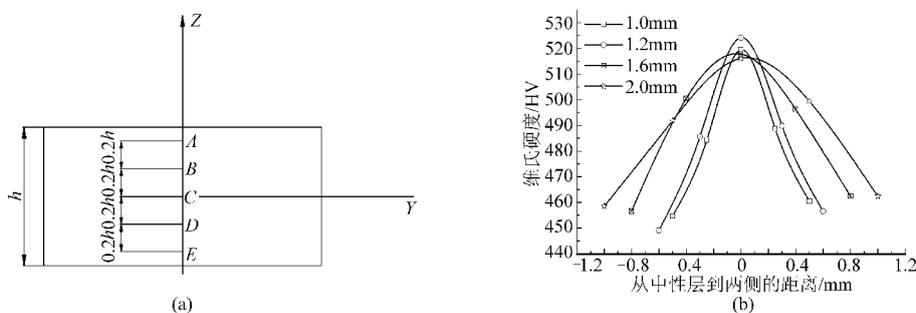


图 4 不同厚度板料硬度选取点及硬度分布曲线

Fig. 4 Typical points of hardness and hardness distribution curves of specimens with different thicknesses

势相同,而材料塑性性能的分布与硬度的分布趋势恰恰相反。由于材料在厚度方向上呈连续梯度分布,因此可根据其硬度分布特性将其视为一种呈连续梯度分布的多层金属复合材料模型。

### 2.2 硬度梯度分层模型建立

根据以上热成形高强度钢板在厚度方向上呈现出中间高两侧低的属性,对热成形高强度钢板通过不同分层处理建立仿真模型。采用层合板理论<sup>[11]</sup>模拟金属复合材料在厚度上的分布,将 1.6 mm 钢板沿厚度方向分别划分为 3 层、5 层和 7 层,通过不断细化分层区域实现精确分层,从而达到精确仿真的目的。对板料进行分层时,按照从中性层向两侧进行相等硬度差值划分,按照每层对应相等的硬度差值(本层最大硬度值与最小硬度的差值)进行分层区域的划分,并通过选取每层中最大硬度与最小硬度的平均值来表征本层硬度。从 3 层、5 层到最后的 7 层,通过划分层数的增多,减小每层的硬度差

值以达到合理精确的仿真目的。如图 5 所示,从中性层到两侧的厚度方向上,材料的屈服强度和抗拉强度依次降低,但材料的延展性和塑性依次增加。材料参数根据拉伸试验及热成形高强度钢的硬度-强度对应关系取得。

### 3 基于硬度梯度三点弯曲试验仿真验证

#### 3.1 试验及仿真对比

基于上述三点弯曲试验及讨论,进行有限元仿真分析,有限元模型如图 6 所示。数值模型是依据三点弯曲装置而建立,采用 UG 软件进行建模,数值模拟采用的是 LS\_dyna 软件。在三点弯曲数值模型中,板料采用六面体实体单元,压头和支座均采用刚体单元;板料自由放在 2 个支座上,2 个支座的自由度被全部约束。在数值模拟过程中,模型采用位移加载方式,速度设为 0.083 mm/s,板料与压头、支座间的摩擦因数均设为 0.1。试验及仿真模型如图 6

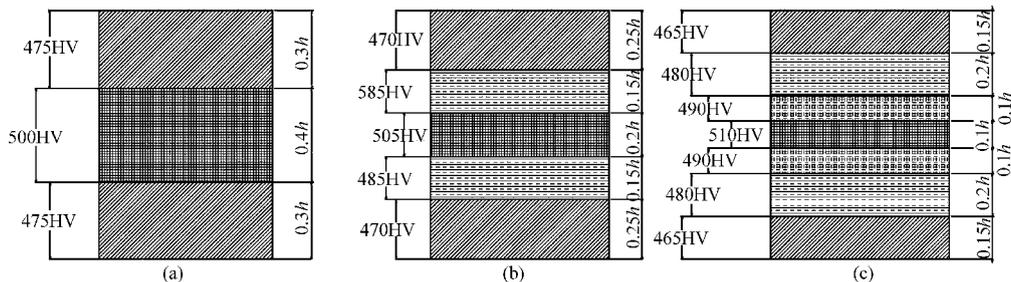


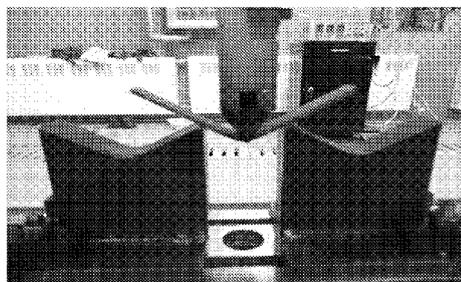
图 5 热成形高强度钢板沿截面厚度方向的硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution along section thickness direction of hot forming high strength steel

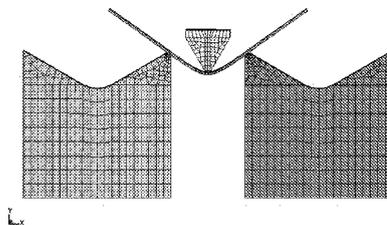
(a) 3 层 (b) 5 层 (c) 7 层

所示。

图7给出了1.6 mm高强度钢板的三点弯曲试验和数值模拟对比曲线。从试验结果看来,原始高强度钢的吸能为8.54 J,而热成形高强度钢的吸能



(a)

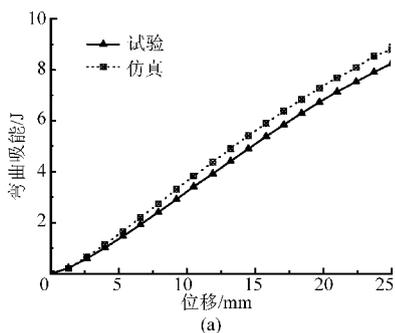


(b)

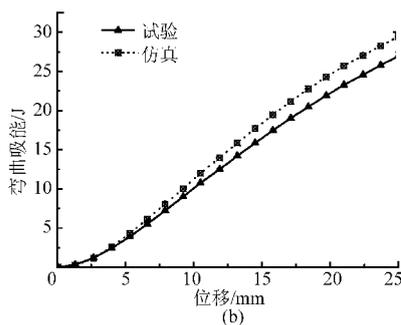
图6 三点弯曲试验及有限元模型对比

Fig.6 Physical picture and finite element model on three-point bending

(a) 试验模型 (b) 仿真模型



(a)



(b)

图7 热成形高强度钢板吸能-位移曲线

Fig.7 Energy absorption-displacement curves of high strength steel

(a) 原始高强度钢 (b) 热成形高强度钢

### 3.2 分层模型仿真应变对比

基于上述数值模拟方法的可行性,以对1.6 mm热成形高强度钢板不同的分层处理,将热成形高强度钢复合材料在相同工况下进行数值模拟。通过在厚度方向划分相同数量的网格,然后对每一层网格赋予不同的材料属性,最后将节点耦合起来进行不同材料属性分层条件下的仿真分析。对于数值模拟过程中采用的应力-应变曲线,本文在试验测得的应力-应变曲线基础上,依据强度和硬度对应关系换算而得到并应用于仿真中。

从图8中可以看出,两侧应变明显大于中间处应变;对于不同分层条件下的板料最大应变值,差别并不大,都基本保持在14.5%左右。

### 3.3 弯曲角 $\alpha$ 试验与仿真对比

图9所示为三点弯曲最终轮廓弯曲角 $\alpha$ 测量的示意图。在三点弯曲试验过程中,由于板料两侧变形最小,因此在板料两侧(外侧)分别选取50 mm作为两条边界线,并测量出弯曲角 $\alpha$ 。

通过表3试验试测数据和仿真数据的弯曲角可以看出,从3层、5层到7层,仿真结果与试验结果逐渐接近;当划分为7层时,仿真结果与试验结果的

达到27.48 J,热成形高强度的吸能值超出原始板材的吸能3倍多,说明热成形工艺大大提高了结构的抗弯曲能力。由于试验结果和数值模拟结果吻合较好,说明所采用的数值模拟方法和材料模型是合理的。

弯曲角度误差最小(达到1.29%),达到了不同硬度梯度分层条件下精确仿真的目的。

### 3.4 吸能值误差分析

图10给出了1.6 mm热成形高强度钢板在不同分层条件下的三点弯曲吸能-位移曲线。从图中可以看出,随着弯曲位移的增加,吸能曲线呈现出线性增长的趋势。由于对热成形高强度钢板划分层数的不同,数值模拟的结果也不相同;随着划分层数的增多,数值模拟结果越精确,越接近于试验值。

表4给出了1.6 mm热成形高强度钢复合材料模型在不同层数条件下吸能值的仿真结果与试验结果误差对比,从对比结果可以看出,随着钢板所划层数增多,仿真结果与试验结果的误差减小。在未分层的情况下,仿真结果与试验结果相差最大,两者误差达9.1%;在不同层数情况下,随着划分层数的增加,仿真结果越来越接近试验结果。因此认为,对于热成形高强度钢复合材料而言,具体划分几层进行仿真要考虑研究工作的需要,如计算效率和精度等,以更好地完成研究工作。

综上所述,热成形高强度钢复合材料沿厚度方向所分层数越多,仿真结果与试验结果越接近,说明

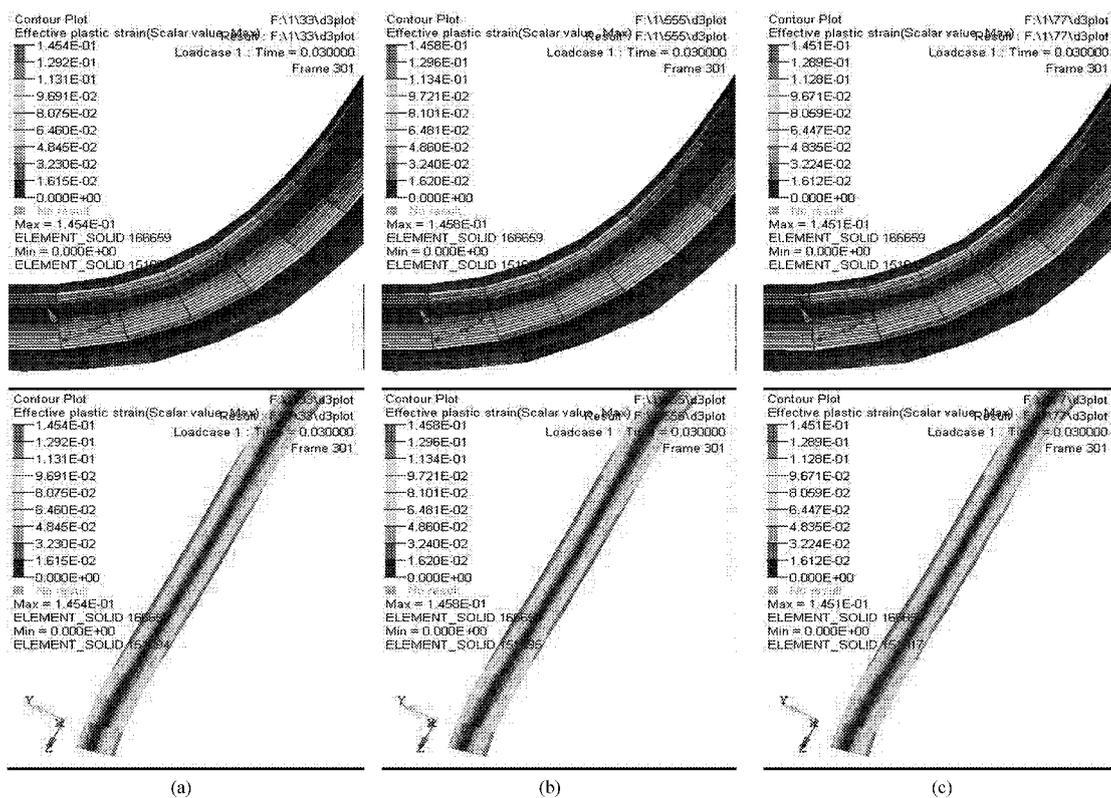


图 8 不同分层条件下的应变云图及板料受力点截面应变云图

Fig. 8 Strain picture and strain picture of loading point section under different stratified conditions  
(a) 3层 (b) 5层 (c) 7层

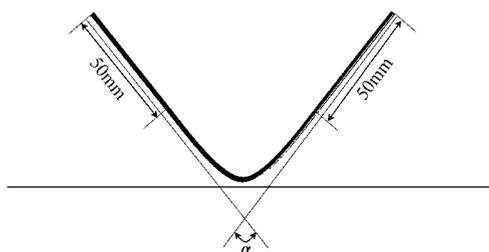


图 9 试验与仿真弯曲角  $\alpha$  测量示意图

Fig. 9 Diagram with bending angle  $\alpha$  between experiment results and simulation results

表 3 三点弯曲试验与仿真弯曲角  $\alpha$  对比

Tab. 3 Bending angle  $\alpha$  comparison between experiment results and simulation results

试样类别	下压位移 $S/\text{mm}$	弯曲角 $\alpha/(\text{°})$
实际测量试验结果	25	75.00
3 层仿真结果	25	76.94
5 层仿真结果	25	76.89
7 层仿真结果	25	75.97

采用这种材料属性梯度变化模型进行数值模拟更具有合理性。

### 4 结论

(1) 热成形高强度钢板三点弯曲试验的最大弯曲力和最大吸能值均随厚度的增加而增大;并且,钢板最大弯曲力和最大吸能值的相对增加量都随着厚

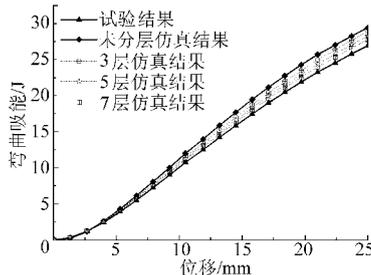


图 10 热成形高强度钢板在不同分层条件下的吸能-位移曲线

Fig. 10 Energy absorption - displacement curves of hot forming high strength steel under different stratified conditions

表 4 不同层数条件下的仿真结果与试验结果误差对比

Tab. 4 Error comparison between simulation results and experiment results under different stratified conditions

状态	未分层仿真	3 层仿真	5 层仿真	7 层仿真
误差(与试验结果对比)/%	9.1	7.3	4.9	3.1

度增加而增大。

(2) 热成形高强度钢板沿厚度方向的硬度分布并不均匀,呈现出中间硬度偏高,两侧硬度偏低的现象,材料性质在厚度方向上呈连续梯度分布。

(3) 在进行热成形高强度钢板三点弯曲数值模拟时,板料沿厚度方向层数划分越多,仿真结果与试验结果越接近,采用这种材料属性梯度变化模型进行数值模拟更加合理。

## 参 考 文 献

- 1 马宁,胡平,闫康康,等. 高强度硼钢热成形技术研究及其应用[J]. 机械工程学报,2010,46(14):68~72.  
Ma Ning, Hu Ping, Yan Kangkang, et al. Research on boron steel for hot forming and its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14):68~72. (in Chinese)
- 2 孙宏图,申国哲,胡平,等. 考虑碰撞安全性的汽车车身轻量化设计[J]. 机械科学与技术,2010,29(3):380~386.  
Sun Hongtu, Shen Guozhe, Hu Ping, et al. Lightweight design of an auto body considering its crash performance[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2010,29(3):380~386. (in Chinese)
- 3 刘瑞军,褚亚旭,闫康康. 不同压边工况下汽车用高强度钢板拉伸性能研究[J]. 农业机械学报,2011,42(10):230~233.  
Liu Ruijun, Chu Yaxu, Yan Kangkang. Deep drawability of high strength steel sheet under different blank holder force conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):230~233. (in Chinese)
- 4 Merklein M, Lechler J, Geiger M. Characterisation of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5 [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2006,55(1):229~232.
- 5 Turetta A, Bruschi S, Ghiotti A. Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations [J]. Journal of Materials Processing Technology,2006,177(3):396~400.
- 6 Ruiz-Navas E M, García R, Gordo E, et al. Development and characterisation of high-speed steel matrix composites gradient materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143~144: 769~775.
- 7 Ju Chen, Ben Young. Design of high strength steel columns at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research,2008,64(6):689~703.
- 8 Yu Wei, Qian Yajun, Wu Huibin, et al. Effect of heat treatment process on properties of 1000 MPa ultra-high strength steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011,18(2):64~69.
- 9 蒋涛,雷新荣,吴红丹,等. 热处理工艺对碳钢硬度的影响[J]. 材料热处理技术,2011,40(4):167~171.  
Jiang Tao, Lei Xinrong, Wu Hongdan, et al. Effects of heat treatment process on hardness of carbon steel [J]. Hot Working Technology,2011,40(4):167~171. (in Chinese)
- 10 Cheng Y T, Cheng C M. Scaling approach to conical indentation in elastic-plastic solids with work hardening [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(3):1284~1289.
- 11 Yang J, Chen H S. Dynamic response of initially stressed functionally graded rectangular thin plates [J]. Composite Structures, 2001,54(4):497~508.

~~~~~  
(上接第 237 页)

- 12 Vasques C M A, Rodrigues J D. Active vibration control of smart piezoelectric beams: comparison of classical and optimal feedback control strategies[J]. Computers and Structures, 2006, 84(22~23):1402~1414.
- 13 Shin Ho-cheol, Choi Seung-Bok. Position control of a two-link flexible manipulator featuring piezoelectric actuators and sensors [J]. Mechatronics, 2001, 11(6):707~729.
- 14 Khulief Y A. Vibration suppression in rotating beams using active modal control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 242(4):681~699.
- 15 Zhang Xuping, Wang Xiaoyun, Mills J K, et al. Dynamic modeling and active vibration control of a 3-PRR flexible parallel manipulator with PZT transducers[C]//the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, 2008:461~466.
- 16 Zhang Xuping, Wang Xiaoyun, Mills J K, et al. Experimental implementation on vibration mode control of a moving 3-PRR flexible parallel manipulator with multiple PZT transducers[J]. Journal of Vibration and Control, 2010, 16(13):2035~2054.
- 17 Zhang Xuping, Mills J K, Cleghorn W L. Flexible linkage structural vibration control on a 3-PRR planar parallel manipulator: experimental results[J]. Part I: J. Systems and Control Engineering, 2009, 223(1):71~84.
- 18 Zhang Xuping, Mills J K, Cleghorn W L. Multi-mode vibration control and position error analysis of parallel manipulator with multiple flexible links[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2010, 34(2):197~213.
- 19 胡俊峰,张宪民,朱大昌,等. 柔性并联机器人动力学建模[J]. 农业机械学报,2011,42(11):208~213.  
Hu Junfeng, Zhang Xianmin, Zhu Dachang, et al. Dynamic modeling of flexible parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11):208~213. (in Chinese)
- 20 高明旺,张宪民. 平面宏动并联机器人动态模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(8):205~209.  
Gao Mingwang, Zhang Xianmin. Dynamic modeling of planar macro-driven parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8):205~209. (in Chinese)