

高强钢激光热应力成形的试验研究

伍 强¹ 徐兰英¹ 杨永强² 孔春玉¹

¹广东技术师范学院汽车学院, 广东 广州 510635

²华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

摘要 利用 CO₂ 激光器对汽车用高强钢板作了大量的热应力成形试验, 并对材料进行了相关的微观组织分析。在深入研究试件弯曲角变化规律的基础上, 对激光热应力成形的工艺参数进行了合理优化, 即在激光功率为 1.5 kW、扫描次数为 6 次、扫描速度为 1.2 m/min 以及激光光斑直径为 3.5 mm、面能量在 20~45 J/mm² 范围之间变化时热应力成形效果最好, 提出了避免工件表面出现烧蚀现象的条件。试验结果表明, 在试验参数的有效范围内激光扫描次数、扫描速度和材料宽度对试件弯曲角的影响趋于正比关系; 光斑直径在较大或较小时呈现类线性关系; 激光功率的影响呈明显的非线性特点, 但在较小的情况下与弯曲角接近线性关系; 接近材料表面区域的微观晶粒细小, 而距离越远碳化物析出越少。

关键词 激光技术; 高强钢板; 激光成形; 热应力

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s114008

Experimental Study on Laser Thermal Stress Forming of High Strength Steel

Wu Qiang¹ Xu Lanying¹ Yang Yongqiang² Kong Chunyu¹

¹ School of Automotive Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510635, China

² School of Mechanical Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract Many laser thermal stress forming experiments of high strength steel plate used automobile are done by CO₂ laser and the material relevant microstructures are analyzed. Based on the deep study of the changing law on the specimen bending angle, the process parameters are reasonably optimized about laser thermal stress forming. Namely the effect of thermal stress forming is the best when the laser power is 1.5 kW, scanning times are 6, the scanning speed is 1.5m/min and the diameter of laser spot is 3.5 mm and the surface energy changes between 20~45 J/mm². The conditions are proposed to avoid the ablation phenomenon on the work piece surface. The test results show that the bending angle tends to the direct proportion relationship with laser scanning times, scanning velocity and material width in the effective range of the test parameters. That is a linear relationship when the spot diameter is the less or the more. The effect of the laser power is nonlinear obviously, but the bending angle tends to the direct proportion relationship with the laser power when the laser power is less. The microcosmic grain is smaller near the material surface and the carbide precipitation is less farther the surface.

Key words laser technique; high strength steel; laser forming; thermal stress

OCIS codes 140.3390; 140.3470; 350.4600

收稿日期: 2015-01-21; **收到修改稿日期:** 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51375101)、广东省自然科学基金(2014A030313638)、广东省科技计划项目资助(2014A010104014)

作者简介: 伍 强(1967—),男,博士,副教授,主要从事先进制造技术方面的研究。E-mail: 510635wuqiang@163.com

* **通信联系人.** E-mail: xulanying2012@126.com

1 引言

人们对安全性和轻量化的不懈追求,推动了高强钢板在汽车车身上的广泛应用^[1-2]。传统的板料加工方法主要是冲压成形,可以满足大批量生产的需要,其特点是生产效率高,制造成本较低^[3-5]。但在市场经济的条件下,工业生产常常呈现出多品种小批量的特点,如汽车车身的试制或小批量生产、报废零部件回收利用的绿色再制造以及维修企业对损坏件的修复等,经常面对高强钢板复杂形状的局部成形问题。

为此,基于热累积非接触成形机理的激光热应力成形成为一项新兴的板料成形技术,其特点是因无模具开发而明显提高了加工制造过程的柔性、降低制造成本、缩短制造周期以及满足激光加工工序的同工位复合化的需要^[6-8]。加工过程中通过高能激光对工件待加工表面进行扫描,促使工件内部形成非均匀的热应力来实现材料的塑性变形,从而获得回弹小、成形精度高的工件局部形状^[9-11]。目前的文献以研究不锈钢、普通钢板等材料的激光热应力成形为主,涉及高强钢板的成形以及微观组织分析的内容较少。而与不锈钢、普通钢板的激光热应力成形相比,通过添加合金,成分优化和特殊的冶炼加工而成的高强钢板,具有不同的成形特点。因此,有必要研究工艺参数、工件尺寸等因素对高强钢激光热应力成形的影响规律。现以高强钢试件的弯曲角为研究对象,分析它的变化规律以及板料成形后的微观组织,进一步促进激光热应力成形技术在汽车车身高强度板料成形工程的应用。

2 试验条件及方法

试验材料是汽车用 DOGAL800DP 高强钢板,化学成分(质量分数)如表 1 所示。

表 1 试验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of tested materials

C/%	Si/%	Mn/%	P/%	S/%	Others/%
≤0.18	≤0.5	≤2.0	≤0.025	≤0.015	≥0.015

材料的显微组织如图 1 所示,母材区的金相组织是铁素体和珠光体,珠光体分散于钢的基体中起强化作用;晶粒尺寸的平均值为 $3.0\ \mu\text{m}$ 。在负载 400 g,保持载荷时间 5 s 的条件下,利用 MM-6 卧式金相显微镜测得材料的平均显微硬度为 270 HV。

用线切割加工的方法得到规格 $150\ \text{mm}\times 70\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$ 的材料作为试件;在研究试件宽度对弯曲角的影响时,为便于分析比较,补充加工规格为 $150\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$ 、 $150\ \text{mm}\times 90\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$ 、 $150\ \text{mm}\times 110\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$ 和 $150\ \text{mm}\times 130\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$ 的试件。为了减少干扰,试验前用丙酮清洗试件表面。

激光热应力成形的试验布置如图 2 所示。试验采用 3.5 kW 快轴流 CO_2 激光器对试件进行扫描,氮气作为辅助气体,激光束在试件表面沿扫描路径连续往复扫描,空气冷却方式。为了确保材料自由变形,使用自制夹具仅将试件的一端固定。试件的表面涂黑色涂料来提高材料的吸收率,扫描时间间隔为 70 s。试验后用万能角尺测量弯曲变形角,然后沿扫描中心线取样,制备金相试样以分析金相组织。

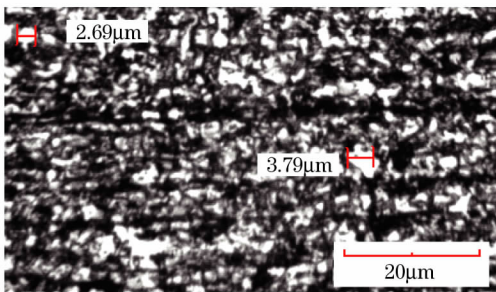


图 1 材料的原始组织

Fig. 1 Microstructure of the material

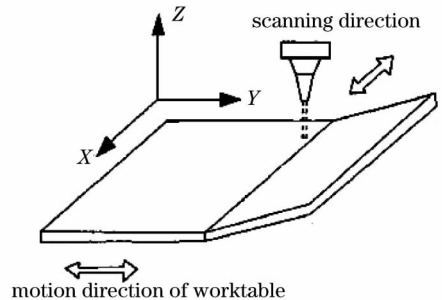


图 2 试验布置图

Fig. 2 Experimental setup

3 试验结果与分析

激光热应力成形时,高能激光照射在试件的待加工表面,由于温度场不均匀而在工件内部形成应力场。

激光通过板料的穿透梯度,使金属的加热表面在激光作用下延展、收缩,工件局部应力超过材料的屈服极限,引起工件的弯曲变形。翘曲部分的材料被激光照射时,其温度升高,降低了材料的屈服应力,使翘曲区中心的材料产生塑性变形,而翘曲区两侧和扫描轨迹上的其他区域保持弹性变形。当激光扫描过后,由于相邻材料的约束降低,翘曲区两侧的弹性反向约束减小。

激光扫描后,试件的弹性应变被释放,产生的塑性应变使材料弯曲,根据翘曲机理,材料产生的弯曲角为^[12]:

$$\alpha_B = \left(\frac{36\alpha_{th}k_f(T)AP}{\rho c_p E v S_0^2} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

式中 α_B 为弯曲角, α_{th} 为材料的线膨胀系数, A —吸收率, P —入射功率, $k_f(T)$ —材料在温度为 T 时的流变应力, ρ —材料密度, v —扫描速度, c_p —材料的比容热, S_0 —箱型断面的壁厚, E —材料的弹性模量。

由(1)式可知,激光功率、扫描速度等参数影响试件的弯曲角。

3.1 激光功率对试件弯曲角的影响

在激光扫描速度为 1.2 m/min、光斑直径为 3.5 mm、扫描次数为 6 次的条件下改变激光功率,对试件进行激光热应力成形试验,试件的弯曲角与激光功率的变化关系如图 3 所示。显然在其他参数不变,激光功率增加时,试件的弯曲角成非线性增加;激光功率较低时接近线性关系,但激光功率较大时,曲线趋于平坦,弯曲角的增长率减小。当激光功率小于 0.9 kW 时,激光热应力成形过程中试件的厚度方向产生的温度梯度较小,产生应力较小,试件没有发生弯曲变形。随着激光功率增加,辐照到材料表面的能量加大,试件的温度梯度变大,导致试件的弯曲角明显加大。然而激光功率进一步增加时,试件的弯曲角增加缓慢,曲线趋于水平。当激光功率增大到 2.1 kW 时,试件表面出现烧蚀缺陷。试验选取激光功率为 1.5 kW 为宜。

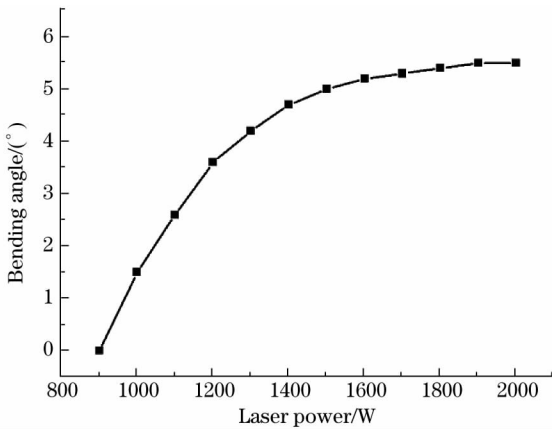


图 3 激光功率对弯曲角的影响

Fig. 3 Effect of laser power on the bending angle

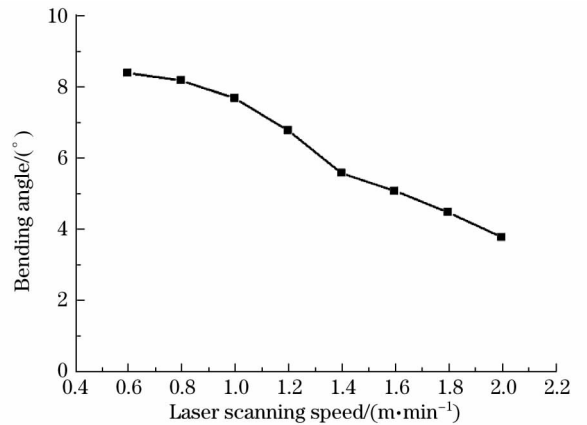


图 4 扫描速度对弯曲角的影响

Fig. 4 Effect of scanning speed on the bending angle

3.2 扫描速度对试件弯曲角的影响

在激光功率为 1.5 kW、激光光斑直径为 3.5 mm、扫描次数为 6 次条件下,改变扫描速度对试件进行激光热应力成形试验。试件的弯曲角与激光扫描速度的变化关系如图 4 所示。由图可知,在其他条件相同的条件下,随着扫描速度的增加,激光热应力引起材料的弯曲角逐渐下降,在速度较高的区域趋于类线性关系。分析认为增加激光扫描速度将引起板料表面吸收的能量降低,在试件厚度方向的温度梯度必然减小,致使材料产生的热应力减小,因此试件的弯曲角减小。试验发现激光扫描速度低于 0.5 m/min 时,试件表面将会出现烧蚀现象,选取激光扫描速度 1.2 m/min 为宜。

3.3 激光扫描次数对试件弯曲角的影响

在激光功率为 1500 W、光斑直径为 3.5 mm、扫描速度为 1.2 m/min 的条件下,改变扫描次数,研究对试件进行激光热应力成形试验。试件的弯曲角与激光扫描次数的变化关系如图 5 所示。

可以看出,当其他条件不变时,试件弯曲角与激光扫描次数趋于线性关系。激光热应力成形过程中试件产生的热应力与材料厚度方向的温度梯度成正比。热应力成形过程中由于非弯曲变形区的金属流动,使当

前的扫描区域材料变少。但当激光扫描次数增加到 25 次时,试件弯曲角的增长率增大,试件表面出现轻微的烧蚀现象。试验选取激光扫描次数 6 次为宜。

3.4 光斑直径对试件弯曲角的影响

在激光功率为 1.5 kW、扫描次数为 6 次、扫描速度为 1.2 m/min 的条件下,改变光斑直径对试件进行激光热应力成形试验。试件的弯曲角与激光光斑直径的变化关系如图 6 所示。显然在其他条件不变,激光光斑直径的增大时,试件的弯曲角下降,光斑直径较大或较小时接近呈线性关系。分析发现光斑直径较小时,则试件的表面吸收较大的能量,在材料厚度的方向上形成较大的温度梯度,产生较大的热应力,因此试件的弯曲角比较大,但光斑直径小于 1.6 mm 时试件的表面出现明显烧蚀现象;随着光斑直径进一步增大,激光的功率密度减小,试件表面吸收的能量减少而使材料厚度方向的温度梯度变小,致使材料的热应力减小,导致试件的弯曲角逐渐减小而趋于线性关系。因此,优化激光束工艺参数时,需确定合理的光斑直径以达到较好的成形效果。试验选取光斑直径为 3.5 mm 为宜。

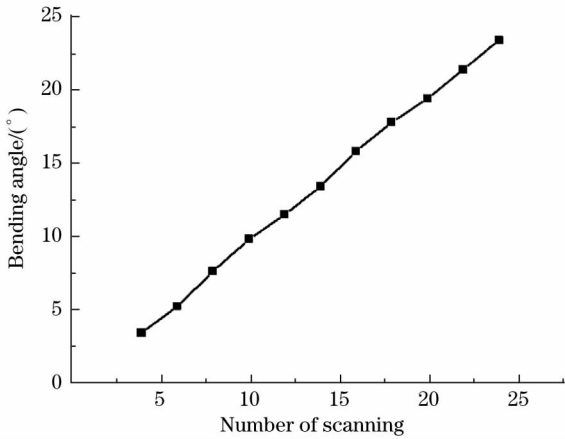


图 5 扫描次数对弯曲角的影响

Fig. 5 Effect of number of scanning on the bending angle

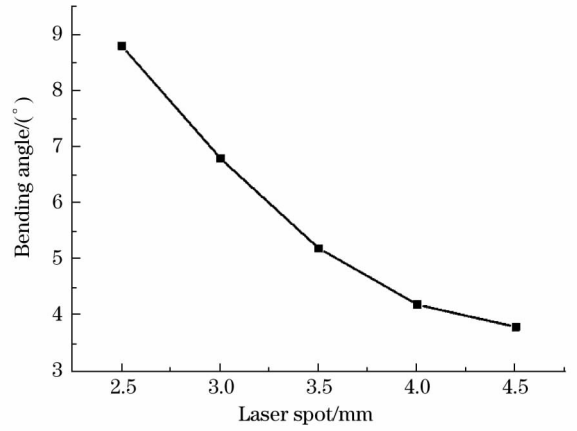


图 6 光斑直径对弯曲角的影响

Fig. 6 Effect of laser spot on the bending angle

3.5 试件宽度对试件弯曲角的影响

在激光功率为 1.5 kW、扫描次数为 6 次、扫描速度为 1.2 m/min 以及激光光斑直径为 3.5 mm 的条件下,改变试件宽度进行激光热应力成形试验。试件的弯曲角与试件宽度的变化关系如图 7 所示。

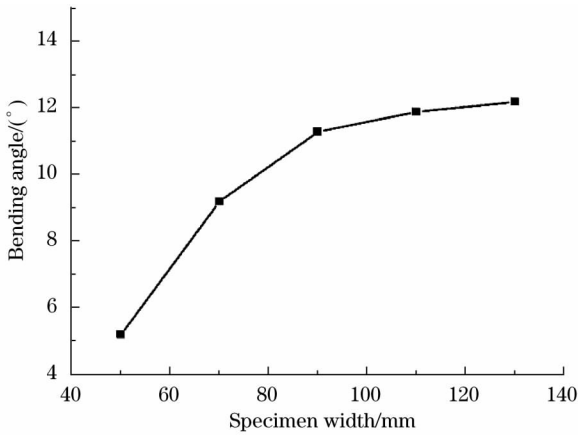


图 7 试件宽度对弯曲角的影响

Fig. 7 Effect of specimen width on the bending angle

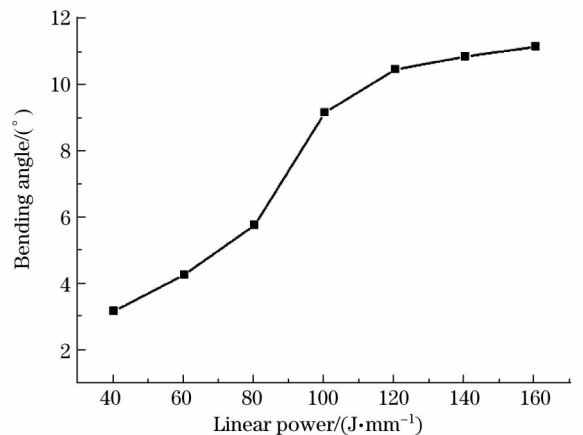


图 8 线能量对弯曲角的影响

Fig. 8 Effect of linear power on the bending angle

由图可知,在其他条件一定,试件的宽度增加时,材料的弯曲角呈增长的趋势;当试件的宽度较小时,弯曲角的增长率比较高;在试件的宽度增加较大的范围后,材料的弯曲角的增长率减小而趋于平缓。分析认为试件在激光热应力成形过程中,温度较低的材料对温度较高的变形区域的材料施加约束作用,显然刚性约束作用越大,则热应力越大,从而产生的塑性变形越大,导致试件的弯曲角越大;板料宽度增加,则温度较低的材料增加,

使温度较高的材料受到的约束作用相对较大,致使试件的弯曲角增大。试验表明,当试件的宽度增大 150 mm 时,这种约束作用趋于稳定,因而试件的弯曲角的变化较小。试验选取试件宽度为 70 mm 为宜。

3.6 激光能量对试件弯曲角的影响

试件的弯曲角与激光能量的变化关系如图 8 和图 9 所示。显然在其他条件不变时,线能量增加则试件的弯曲变形角增大。

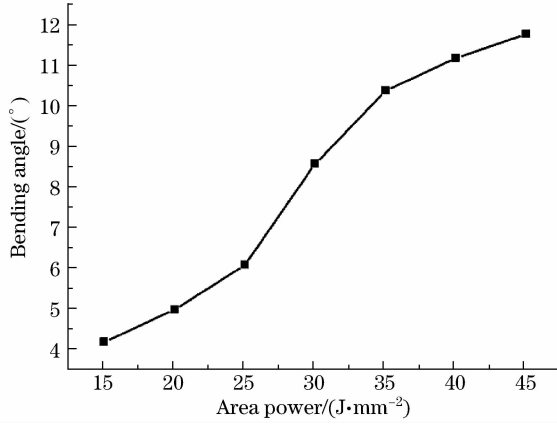


图 9 面能量对弯曲角的影响

Fig. 9 Relationship between the bending angle and the laser area power

在线能量较低时,线能量与试件的弯曲角趋于线性关系,此时在试件的厚度方向产生了很大的温度梯度;但当激光的线能量继续增大时,试件的弯曲角的增长率减小而趋于平坦。当线能量达到 170 J/mm 时,试件表面出现烧蚀现象,继续增大线能量则烧蚀越严重。在其他条件不变时,增大面能量,则试件厚度方向的温度梯度增加,材料产生的热应力增大,致使工件的弯曲角增大。如图 9 所示,面能量在 15~45 J/mm² 范围内,试件的弯曲角随面能量的增加而快速增长。显然面能量过大时,试件表面将出现烧蚀现象。

3.7 微观组织分析

激光热应力形成的基本要求是试件的变形量应达到工程技术的设计要求,材料在激光的热作用下得到理想的微观金相组织,同时材料的表面没有出现烧蚀现象。要实现这一目标,必须优化试验的工艺参数,而能量法就能较好的反应各参数的综合作用。为便于分析,在激光功率为 1.5 kW,扫描速度为 0.6 m/min、光斑直径为 3.5 mm,扫描次数为 6 次的条件下进行激光热应力成形试验,此时面能量为 42.9 J/mm²。在 MM-6 卧式金相显微镜上观测得到加热区中心部位厚度方向的显微组织,如图 10 所示。

从图中可以看出试件经过激光扫描后,接近材料表面区域的微观组织未发生明显变化,晶粒细小,但有少量的碳化物组织析出;远离材料表面的区域,靠近底部微观组织中析出的碳化物很少,与原始组织类似。分析后认为,材料的微观组织中出现碳化物析出的原因是激光热应力成形中材料经历了加热冷却热循环过程,相当于对试件作了一次热处理,改变了母材原始的微观组织,因而在金相组织中出现了碳化物析出的现象。同时,在激光热应力成形中接近材料表面区域的微观组织中没有明显的熔化凝固区及固液界面,说明试件表面没有出现烧蚀现象,可以达到工程实际对激光热应力成形的要求。

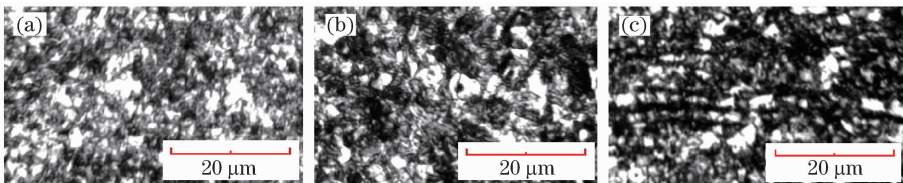


图 10 试件厚度方向的微观金相组织。(a)靠近表面区域;(b)中心区域;(c)底部

Fig. 10 Microscopic metallographic of the specimen along thickness.

(a)Near the surface; (b) regional center; (c)bottom area

4 结 论

1) 对 1.5 mm 厚汽车用 DOGAL800DP 高强度钢板进行了大量的热应力成形研究。试验结果表明在激光功率为 1.5 kW、扫描次数为 6 次、扫描速度为 1.5 m/min 以及激光光斑直径为 3.5 mm 的条件下,试件的成形效果较好;面能量在 20~45 J/mm² 范围之内变化时热应力成形效果最好,低于这个范围则成形效率较低,而高于这个范围则工件表面会出现烧伤现象。

2) 试件经过激光热应力成形后,接近材料表面区域的组织没有发生明显变化,晶粒细小,有少量的碳化物析出;在远离试件表面的残余应力基本没产生变化,靠近底部微观组织中析出的碳化物很少,接近材料原始组织。

参 考 文 献

- Zhang Yi, Tan Lipeng, Zhang Chenglei. Research on gap margin in laser butt welding of high-strength automobile steel with hot wire filler [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0703003.
张 屹,谭力鹏,张成磊. 车用高强度钢激光填充热丝对接焊间隙裕度研究[J]. 中国激光,2013, 40(7): 0703003.
- Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui, *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8):1134-1138.
伍 强,陈根余,王 贵,等. 高强度镀锌钢的 CO₂激光焊接[J]. 中国激光,2006, 33(8):1134-1138.
- Yang Gen, Xia Qinxiang, Qiu Zunwen, *et al.*. Applications of high strength steel in automobile and the research status of stamping forming properties[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012, 7:138-143.
杨 亘,夏琴香,邱遵文,等. 高强度钢板在汽车上的应用及冲压成形性能研究现状[J]. 现代制造工程,2012, 7:138-143.
- Jiang Chao, Li Chao, Tao Yourui. An inverse technique for determining the material property parameters of sheet metal after stamping[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(4):373-378.
姜 潮,李 超,陶友瑞. 冲压成型板材特性参数的反求方法[J]. 汽车工程,2012, 34(4):373-378.
- Xiao Yexing, Ma Tiejun. FEM simulation of sheet metal stamping[J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(1):165-168.
肖业兴,马铁军. 金属薄板冲压成形的有限元模拟研究[J]. 锻压技术,2012, 37(1):165-168.
- Duan Yuanpei, Zhang Haitao, Yu Xiaolu, *et al.*. Study on laser forming of AISI 304-sheet metal by thermal stress[J]. Applied Laser, 2012, 32(5): 403-407.
段园培,张海涛,余小鲁,等. 304 不锈钢板料激光热应力成形试验研究[J]. 应用激光,2012, 32(5):403-407.
- Zhou Yijun, Zhang Yongkang, You Wenming, *et al.*. Forming of brittle nodular cast iron plate by laser thermal stress[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6):937-942.
周益军,张永康,游文明,等. 脆性球铁板料激光热应力成形[J]. 中国激光,2008, 35(6):937-942.
- Zhou Yijun, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, *et al.*. Development of sheet metal forming with thermal stress induced by laser[J]. Laser Technology, 2006, 30(4):425-428.
周益军,张永康,周建忠,等. 激光诱发板材热应力成形技术及其研究现状[J]. 激光技术,2006, 30(4):425-428.
- Kong Yuan, Liu Weijun, Wang Yuechao, *et al.*. Effect of scanning methods on residual stress distribution and thermal-stress couple field during direct laser metal deposition shaping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5):051405.
孔 源,刘伟军,王越超,等. 扫描方式对激光直接成形过程中热力耦合场与残余应力分布的影响[J]. 激光与光电子学进展,2012, 49(5): 051405.
- Geiger M, Merklein M, Pitz M. Laser and forming technology-an idea and the way of implementation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1):3-11.
- Majumdar J D, Nath A K, Manna I. Studies on laser bending of stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 385(1):113-122.
- Zhou Yijun. A Fundamental Study on Laser Forming of Sheet Metal Without Mould Based on Thermal Stress [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007:20-22.
周益军. 基于激光热应力的金属薄板无模成形的基础研究[D]. 镇江:江苏大学, 2007: 20-22.

栏目编辑: 刘丰瑞