

文章编号: 0258-7025(2008)06-0937-06

脆性球铁板料激光热应力成形

周益军^{1,2} 张永康¹ 游文明² 尹 晨²

(¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 扬州职业大学机械工程系, 江苏 扬州 225009)

摘要 通过改变工艺参数,用 2.5 kW RS2000SM 快轴流 CO₂ 激光器的激光束对球墨铸铁板条进行扫描;并以 X-350A 型 X 射线应力测定仪, HVS-1000 显微硬度测试仪及扫描电镜(SEM)等为工具,研究了脆性材料激光热应力成形的规律。结果表明,激光束能量较高、扫描速度较低、扫描次数较多和板材厚度较小时都有利于显著增加弯曲变形。成形后的试样在变形区表层有铁素体、渗碳体产生,试样内部表层的石墨团数量减少,试样上表层的最大残余拉应力在 250 MPa 左右,试样下表层的残余应力值接近零。试样断面硬度在 700~200HV 之间变化,上表层硬度最高。激光束能量较大时,变形区内部产生了微裂纹。

关键词 激光技术;激光应用;激光成形;热应力;脆性材料

中图分类号 TN 249;TG 156.99 **文献标识码** A

Forming of Brittle Nodular Cast Iron Plate by Laser Thermal Stress

Zhou Yijun^{1,2} Zhang Yongkang¹ You Wenming² Yin Chen²

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

² Department of Mechanical Engineering, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract Using RS2000SM CO₂ laser of 2.5 kW to irradiate the nodular cast iron (QT-450) plate, and altering the process parameters during laser forming, and analyzing test samples with the X-ray stress analysis instrument (type: X-350A), digital microhardness tester HVS-1000 and scanning electric microscope (SEM) respectively, laser forming regularity of brittle material is studied. The results show that increasing the laser power and the feed number of the beam, decreasing the scanning speed, and the thickness of the test sample eventually result in the increase of the bending angle. There are ferrite and cementite in the surface layer of the test sample after laser forming. The number of ball graphite in the surface layer decreases; The maximum tensile stress of the upper surface in test sample is about 250 MPa, the residual stress value of the lower surface in test sample is about zero. The hardness of the test sample in cross section varies between 700HV and 200HV, the hardness near the upper surface is the greatest. The microcrack inside the deforming area appears when the energy of laser beam is quite strong.

Key words laser technique; laser application; laser forming; thermal stress; brittle material

1 引 言

激光诱发热应力成形技术是一种柔性成形新技术,是在不加外力的条件下,利用激光扫描金属薄板时,在热作用区域内产生的强烈温度梯度而诱发的热应力,使板料实现塑性变形的新工艺^[1,2]。激光诱发热应力成形起源于火焰诱发热应力成形。由于激光光源的能量易于精确控制,使激光诱发热应力成形不受加工环境、工件几何形状的限制,通过优化

工艺参数、精确控制加工工艺参数,实现对诱发热应力成形的精确控制^[3]。经过 20 多年的研究,激光热应力成形技术^[4~11]已取得了巨大的成就。在激光热应力过程中,一方面,激光诱导的温度场分布决定热应力的大小和其分布情况,从而决定板料的变形大小以及板料表面、内部的残余应力分布状况;另一方面,由于温度场的作用使加工板料在受激光作用的局部区域塑性提高,使脆性金属材料热应力成形

收稿日期:2007-06-19;收到修改稿日期:2007-10-29

基金项目:国家自然科学基金(50275068)和扬州市职业大学科研资金(06k03)资助项目。

作者简介:周益军(1966—),男,江苏人,副教授,博士,主要从事激光应用技术方面的研究。

E-mail: carlzhouyijun@163.com 或 carlzyj@yahoo.com.cn

成为可能。在工业上一些重要的金属和无机材料的成形,用传统的机械方法加工很困难,尤其是硬脆材料的成形。本文研究脆性球墨铸铁激光热应力形成的基本规律。

2 实验条件与方案

实验材料采用球墨铸铁 QT-450,借助机械加工的铣削和线切割将试样加工为 $100\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$, $100\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$, $100\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。图1为激光热应力成形实验装置示意图。用2.5 kW SM2000 快轴流 CO₂ 激光器对球墨铸铁 QT-450 板料进行扫描,试件在空气中冷却,工件平放在图1中的平板上,水平夹紧试样一端。激光束功率为0.6~1.0 kW,光斑直径为 $\phi 2\sim 4\text{ mm}$ 。采用正交实验法安排实验参数,改变激光束的功率、光斑直径、扫描速度、扫描次数和板料的厚度。扫描方式为沿扫描路径往复连续扫描,实验中

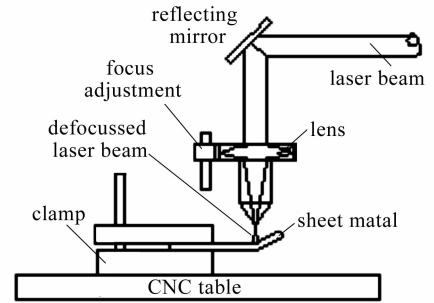


图1 激光热应力成形实验装置

采用数控程序控制往复连续扫描动作和每两次扫描之间的时间间隔。

实验中将激光束能量、光斑直径、扫描速度、扫描次数、板材厚度作为影响因素,采用 L8(2⁷) 正交实验法对上述参数进行优化,得到最佳的工艺参数组合。其正交实验因素水平如表1所示。为提高实验数据的可靠性,每组实验均重复3次。以弯曲变形量作为考核指标。

表1 正交实验因素水平表

Table 1 Influence factors and their levels of orthotropic experiment

Levels	Influencing factors				
	A Power /W	B Laser spot /mm	C Feed number /time	D Scanning speed /(mm/min)	E Thickness /mm
1	600	2	5	1200	1.5
2	1000	4	10	2400	2.0

表2 正交实验计划及结果分析

Table 2 Program of orthotropic experiment and its result

No.	Test program					Result	
	Power /W	Laser spot /mm	Feed number /time	Scanning speed /(mm/min)	Thickness /mm	Bending angle /(°)	Grade
	A	B	C	D	E		
1	1	1	1	2	2	0.50	5
2	2	1	2	2	1	3.43	34.3
3	1	2	2	2	2	0.67	6.7
4	2	2	1	2	1	3.80	38
5	1	1	2	1	2	2.47	24.7
6	2	1	1	1	1	4.77	47.7
7	1	2	1	1	1	3.70	37
8	2	2	2	1	2	7.20	72
I	73.4	111.7	127.7	181.4	157		
II	192	153.7	137.7	84	108.4	I + II = 265.4	
R	118.6	42	10	97.4	48.6		
Principle order				A>D>E>B>C			

3 实验结果计算与分析

从正交实验计算结果(表2)看,8个试样中,第8号件最好,其位级配合是 A₂B₂C₂D₁E₂;第6号试

样位居第二,其位级配合是 A₂B₁C₁D₁E₁;……第1号试样位居末位,其位级配合是 A₁B₁C₁D₂E₂。只考虑变形量,极差计算分析产生的最大弯曲变形条

件是 $A_2B_2C_2D_1E_1$, 是 8 次实验中未做过的条件; 采用上述条件 ($P=1000\text{ W}$, $D=2\text{ mm}$, $n=10$, $v=1200\text{ mm/min}$, $h=1.5\text{ mm}$) 进行验证, 发现 $\alpha=10.28^\circ$ 。但试样表面重熔现象严重。

实验中, 四个因素的主次顺序是 $A>D>E>B>C$ 。其中, 因素 A 和 D 对弯曲角度的影响最大, 由于只做了 2 个水平的正交实验, 结果存在误差。从表 2 可见, 激光束能量较高、扫描速度较低、扫描次数较多和板材厚度较小时有利于增加弯曲变形。

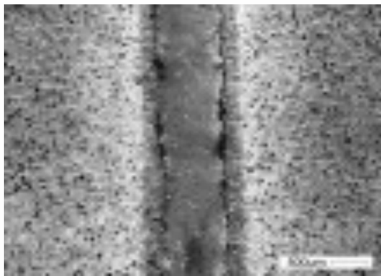
利用正交实验法可对球墨铸铁热应力弯曲成形的工艺参数进行综合评估, 克服了单因素方法的片面性; 形成了对工艺参数之间的耦合作用的新认识; 得出了激光弯曲成形的关键因素。其中, 激光束能量、扫描速度和板材厚度是关键因素, 这三个因素对成形时板内的温度梯度影响较大。

4 典型试样残余应力分布

图 2 为典型试样表面微观形貌, 从图中可见成形区组织产生了变化, 有一定大小的热影响区。试样变形区表面残余应力发生了变化。测量残余应力时, 以 X-350A 型 X 射线应力测定仪为工具, 在试样变形区的正反表面分别取一些特征点进行测量。为了能反映变形区的残余应力分布情况, 按一定规律在变形区附近取点。测量时将板平放, 测量点的位置如图 3(a) 所示, 测量原理是基于 X 射线衍射理论。当一束具有一定波长 λ 的 X 射线照射到多晶体上时, 会在一定的角度 2θ 上接收到反射的 X 射线强度极大值 (即所谓衍射峰), 这便是 X 射线衍射现象。X 射线的波长 λ , 衍射晶面间距 d 和衍射角 2θ 之间遵守布拉格定律

$$2d\sin\theta = n\lambda. \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

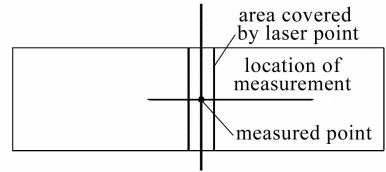
在已知 X 射线波长 λ 的条件下, 布拉格定律把



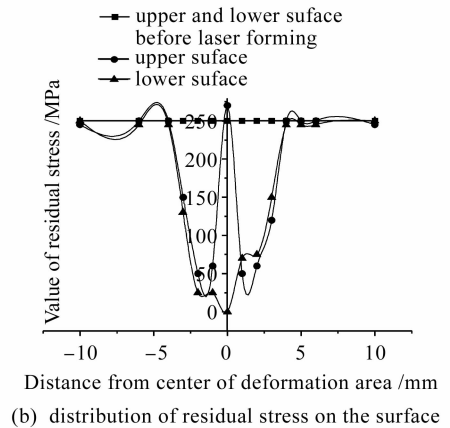
$P=1000\text{ W}$, $D=2\text{ mm}$, $n=10$,
 $v=2400\text{ mm/min}$, $h=1.5\text{ mm}$, $\alpha=3.43^\circ$

图 2 试样表面微观形貌

Fig. 2 Micro-structure on the surface of the tested sample



(a) distribution of the measured point



(b) distribution of residual stress on the surface of typical tested sample

$P=1000\text{ W}$, $D=4\text{ mm}$, $n=10$,
 $v=1200\text{ mm/min}$, $h=2\text{ mm}$, $\alpha=7.20^\circ$

图 3 试样表面残余应力分布

Fig. 3 Distribution of residual stress on the surface of the tested sample

宏观上可以测量的衍射角 2θ 与微观的晶面间距 d 建立起确定的关系。当材料中有应力 σ 存在时, 其晶面间距 d 随晶面与应力相对取向的不同而有所变化, 按照布拉格定律, 衍射角 2θ 也相应改变。因此可以通过测量衍射角 2θ 随晶面取向的变化来求得应力 σ 。

实验中, 试样成形表面的残余应力测试采用固定 ψ 法, 辐射为钴钐 $CoK\alpha$, 交相关法定峰, ψ 角为 $0^\circ \sim 45^\circ$, 2θ 角为 $162^\circ \sim 170^\circ$, 准直管直径为 $\phi 2\text{ mm}$, X 光管高压为 22 kV , 电流为 6.0 mA 。通过实验, X 射线衍射残余应力测试仪可生成每个测量点的测试结果。

由于影响残余应力产生的因素较多, 测量仪器也存在一定误差, 所以只能定性分析试样表面的残余应力分布情况。由于试样是通过机械加工的铣削和线切割而成的, 在成形前上下表面都为残余拉应力, 应力值在 250 MPa 左右。成形后在变形区的残余应力分布将产生变化, 典型试样表面残余应力分布如图 3(b) 所示。

实验结果表明, 对典型试样来说, 在远离试样表面变形区处的残余应力基本不产生变化, 在变形区内, 在试样正面的光斑辐照区域的残余应力分布为 W 形状, 在光斑辐照的边缘处残余应力值最大; 另

一方面,在反面残余应力分布为锅底形,中心位置残余应力值和初始残余应力值相比下降250 MPa左右。随着距中间位置距离的增大,表面残余应力值将逐渐增大,直至与原始应力相当。这是由于试样下表面的冷却条件比上表面好,在板料进行激光热应力成形时,下表面(如图4所示)的温度不会上升得太高,相当于进行了退火处理,导致试样反面变形区的中心位置残余应力值较初始残余应力值低。影响残余应力的因素较多,考虑到板料在温度梯度机制的作用下弯曲时,下表面被拉伸,材料产生塑性变形,因而产生残余拉应力。上述两因素相互作用,使弯曲变形较小,退火起主导作用,最终导致试样反面变形区的中心位置残余应力值接近零。

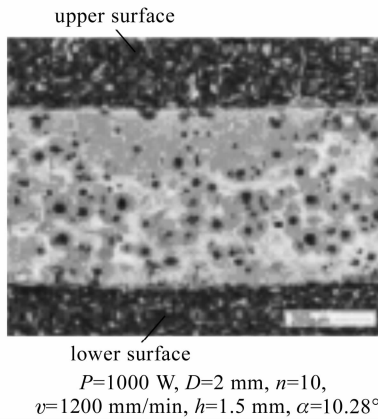


图4 试样断面组织形貌

Fig. 4 Micro-structure on the cross section of representative tested sample

考虑到试样上表面(如图4所示)直接受激光束辐射,温度上升得很高,表面发生激光重熔处理,内部产生足够大的温度梯度,使激光热应力成形有效地开展;另一方面,激光束能量在光斑内符合准高斯分布,所以上表面成形区内不同点的温度都较高,但各自的温度不同。成形区的中间位置处的温度最高,组织要产生相变,其残余应力的变化原因比较复杂。板料成形时,在该处材料最后冷却,先冷却部分的外形先固定下来,后冷却部位材料收缩时受到先冷却部分的牵制,最终导致成形区上表面出现拉应力。

由图3(b)所示,试样正面的光斑辐照区域的残余应力分布为W形。与激光束的强度分布和外界冷却条件有关,光斑两侧冷却条件最好,发生重熔处理后最先冷却,后冷却部分对其将产生拉应力。一般说来,光束能量在光斑内并不呈均匀分布,当激光束为准高斯TEM₁₀模式时,激光束在辐照平面 xy

内的功率密度为

$$P(x, y) = \frac{4P_0(x^2 + y^2)}{\pi\omega^4} \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right), (1)$$

图5为(1)式采用Matlab模拟的激光束的强度分布。由此可见,激光成形时,光斑中心位置的温度并不是最高。

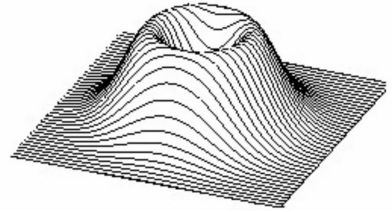


图5 激光束描述

Fig. 5 Description of laser beam

5 典型试样变形区的显微硬度

球墨铸铁板料热应力成形后,其变形区的硬度产生了明显的变化。为了便于测量试样变形区的端面方向的显微硬度,先将试样进行镶嵌,采用XQ-2型金相试样镶嵌机。试样规格为 $\phi 22 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。对试样端面进行打磨、抛光,测量时使用HVS-1000显微硬度测试仪。图4为断面微观形貌,测量时在变形区中心位置从上向下取点,注意避开球状石墨。

测量结果如图6所示,在变形区中间位置,上表面的显微硬度最高,其显微硬度达到700HV左右;随着距上表面距离的增加,显微硬度值逐渐降低;在热影响区外的显微硬度值和原始显微硬度值基本相同。变形区内的显微硬度提高,其主要原因是该处的材料组织发生了变化,球状石墨数量减少,如图4所示。

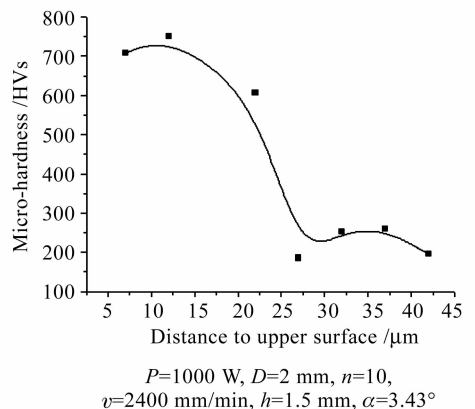


图6 典型试样断面上显微硬度的变化规律

Fig. 6 Regularity of micro-hardness variation on cross section of representative tested sample

6 变形区断面上金属元素含量测定

图 7 所示 QT450 扫描电镜(SEM)照片为试样变形区断面上金属元素的含量变化图。测量时,在试样上选择一条同时穿过变形区和基体的直线,扫描电镜进行扫描分析。结果表明,碳、硅、铁在不同区域的含量基本不变。图中各元素突变处,是扫描线刚好穿过的石墨团。

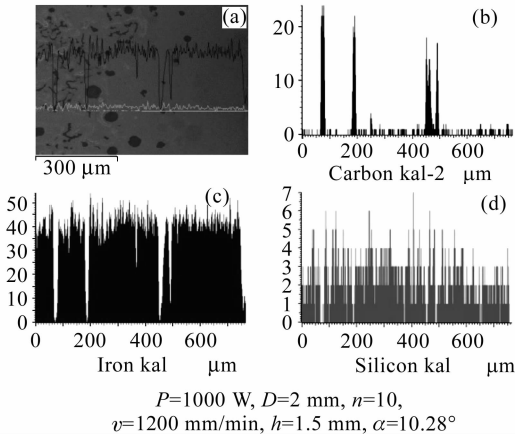


图 7 QT450 试样扫描电镜图

Fig. 7 SEM of QT450 tested sample

7 典型试样变形区的组织

在用扫描电镜对试样进行拍照前,需将抛光好的试样放在克劳尔(Kroll)试剂中浸蚀 3~10 s。克劳尔试剂采用 100 mL 的蒸馏水,1~3 mL 的氢氟酸和 2~6 mL 的硝酸配制。

如图 8(a)所示,球墨铸铁原始组织中球状石墨均匀分布。而在激光热应力成形区域,球状石墨消失(图 8(b))。从图中可见,该区域产生了新的均匀组织。存在 Fe₃C 成分。

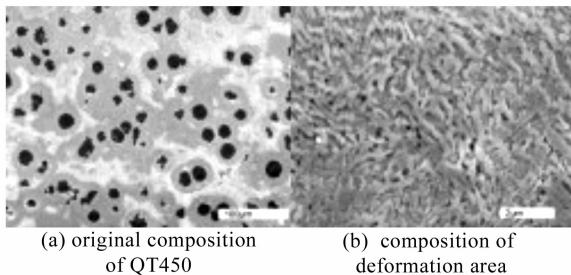


图 8 典型试样扫描电镜图

Fig. 8 SEM of representative tested sample

在激光成形过程中,试样表面局部区域的高温已经使球墨铸铁发生重熔,随后冷却。但这一过程大大偏离平衡状态下石墨化过程的条件,从而使铁

碳之间更倾向于按照亚稳条件下的铁-碳化铁(渗碳体)的形式存在。或者说,在这种工艺条件下,球墨铸铁表面的局部区域中的部分碳的形态发生转变,将由球状石墨部分溶解,如图 4 所示,中心区域球状石墨的形貌变小或者减少。在激光成形的非平衡条件下,碳将以碳化铁(渗碳体)的形式存在,碳化铁(渗碳体)在球墨铸铁中起到一定的强化作用。由成分分析可知,激光成形前后球墨铸铁基体中碳的含量以及分布情况相当,这表明碳化铁(渗碳体)未在球墨铸铁中呈连续的片状分布,而是均匀弥散分布。即碳化铁(渗碳体)在球墨铸铁中起到弥散强化作用,由于碳化铁(渗碳体)本身具有较高的硬度,球墨铸铁(QT450)的局部性能势必改变。

球墨铸铁局部性能的变化,由激光成形中心区和远离成形区的硬度的变化曲线(如图 7)证明,试样上表面的显微硬度最高达到 700HV 左右;随着距上表面距离的增加,显微硬度值逐渐降低;在热影响区外的显微硬度值和原始显微硬度值基本相同。在激光成形过程中,试样表面到中心部位的温度逐渐降低,导致石墨转化为碳化铁(渗碳体)的程度不同,从而碳铁强化作用的程度存在差异,均匀、弥散分布的碳化铁(渗碳体)使激光成形区域球墨铸铁的硬度连续变化,且呈下降趋势。

由此可见,激光成形前球墨铸铁的组织主要为铁素体基体上分布着球状石墨,激光成形后球墨铸铁的组织主要为铁素体基体上分布着球状石墨和弥散的碳化铁(渗碳体)。

图 9 为激光束能量较大时,激光热应力成形区域的组织。该区域生成了柱状晶体,其生长方向有一定规律性,基本是从下向上,并向上表面变形区两边扩散。这是由于在冷却过程中上表面温度最低,而在光斑两侧,冷却条件最好。

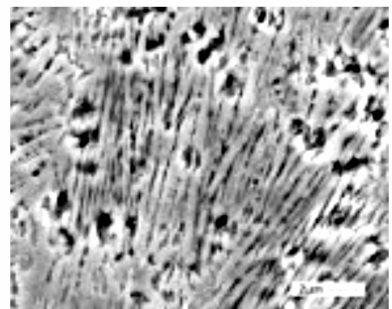
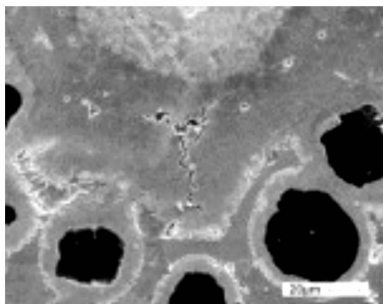


图 9 激光束能量较高时试样的扫描电镜图
Fig. 9 SEM of the tested sample irradiated by high laser power

图 10 为激光束能量较大时试样变形区的扫描电镜照片,在基体上方的热影响区产生了微裂纹。在成形时,晶格之间产生滑移,由于变形量较大,塑性较低,会产生微裂纹。这是脆性材料激光热应力成形的缺点。为了防止产生微裂纹,要控制激光束能量等工艺参数。如果变形量较大,不可避免要产生部分微裂纹;成形后的试样或工件必须进行处理,消除微裂纹。



$P=1000\text{ W}, D=4\text{ mm}, n=10,$
 $v=1200\text{ mm/min}, h=2\text{ mm}, \alpha=7.20^\circ$

图 10 试样热影响区扫描电镜图

Fig. 10 SEM of the tested sample in influencing area of heat

8 结 论

1) 脆性材料球墨铸铁也可以进行激光热应力成形。激光热应力成形的工艺参数之间存在交互作用,通过正交实验可以找到最佳的工艺参数组合。

2) 板料激光热应力成形后,在远离试样表面变形区处的残余应力基本不产生变化,在变形区内,在试样正面的光斑辐照区域,上表面的最大残余拉应力在250 MPa左右,下表层的残余应力值接近为零。

3) 板料激光热应力成形后,在变形区域热影响区内的显微硬度值明显增大。上表面显微硬度达到700HV左右;随着距上表面距离的增加,显微硬度值逐渐降低;在热影响区外的显微硬度值和原始显微硬度值基本相同。

4) 在成形区域将产生相变组织,球状石墨数量减少,生成了柱状晶体;柱状晶体形成时按一定规律生长。当激光束能量较大时,在基体上方的热影响区产生了微裂纹。

5) 在成形前后,试样内在的碳、硅、铁在不同区域的含量基本不变。

参 考 文 献

- Zhang Yongkang, Zhang Xingquan, Zhou Jianzhong *et al.*. Deformation of aluminum alloy LY12CZ plate by laser shot peening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1417~1421
张永康, 张兴权, 周建忠, 等. LY12CZ 铝合金激光喷丸变形 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1417~1421
- Zhou Jianzhong, Du Jianjun, Huang Shu *et al.*. Visual numerical study on surface micro-topography of sheet metal by laser peening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):728~732
周建忠, 杜建钧, 黄舒等. 激光喷丸后板料表面微观形貌的可视化数值研究 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):728~732
- Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, Ye Yunxia. Technology of Laser Processing [M]. 1st ed.. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 235~238
张永康, 周建忠, 叶云霞. 激光加工技术 [M]. 第一版. 北京: 化学工业出版社, 2004. 235~238
- Zhang Yongkang, Zhou Yijun, Zhou Jianzhong *et al.*. Experiment and evaluation for synthetic action of process parameters in sheet metal laser forming with thermal stress [J]. *J. Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2006, **27**(4):303~305
张永康, 周益军, 周建忠等. 激光热应力成形工艺参数综合作用试验及评估 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2006, **27**(4):303~305
- Zhou Yijun, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Study on bending with thermal stress and evaluating its process parameters of stainless sheet steel [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2005, (10):8~11
周益军, 张永康, 周建忠等. 不锈钢板热应力成形试验研究及其工艺参数评价 [J]. *现代制造工程*, 2005, (10):8~11
- K. C. Chan, Y. Harada, J. Liang *et al.*. Deformation behaviour of chromium sheets in mechanical and laser bending, [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2002, **122**(2-3):272~277
- 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. 激光诱发板料热应力成形技术及其研究现状 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(4):425~428
- K. C. Chan, J. Liang. Laser bending of a Ti_3Al -based intermetallic alloy [J]. *Mater. Lett.*, 2001, **49**(1):51~55
- Li Weimin, Manfred Geiger, Frank Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9):859~864
李伟民, Manfred Geiger, Frank Vollertsen. 金属板料激光弯曲成形规律的研究 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(9):859~864
- Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqun *et al.*. Study on relationship between material properties and bending angles in laser forming process of sheet metals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):499~504
管延锦, 孙胜, 赵国群等. 材料性能参数与板料激光弯曲成形角度的相关性研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):499~504
- Liao Yongping, Yan Qingyu. Application in Machinery of Orthogonal Experimental Method [M]. Beijing: Press of Agriculture Implement and Machinery, 1982. 49~91
廖永平, 严擎宇. 正交试验法在机械工业中的应用 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982. 49~91