

激光冲击参数对 2024 铝合金冲击区域的主应力及其方向的影响

聂贵锋¹ 冯爱新¹ 任旭东¹ 曹宇鹏^{1,2} 周鹏程¹ 李彬¹

(¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

(²南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要 为了研究不同功率密度对激光冲击诱导的残余主应力及其方向的影响,采用 5 种不同功率密度对 2024 铝合金进行冲击,用 X 射线应力分析仪测量 3 个方向的残余应力,计算出残余主应力及其方向。结果表明,激光功率密度对冲击区域的残余主应力幅值、主应力方向角的分散程度、应力强度及最大切应力有影响;对于 2024 铝合金,功率密度为 2.8 GW/cm² 时,残余最大主应力的方差为 1987,主应力方向角的方差为 13905,残余应力分布均匀,主应力方向角分散,但残余最大主应力的均值为 -158 MPa;功率密度为 2.1 GW/cm² 时,残余最大主应力的均值为 -239 MPa,冲击区域的残余应力值最大,但残余最大主应力的方差为 5471,残余应力分布均匀性差。

关键词 激光技术;激光冲击;激光功率密度;X 射线衍射;残余主应力;2024 铝合金

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0103006

Effect of Laser Shock Processing Parameters on Residual Principal Stresses and Its Directions of 2024 Aluminum Alloy

Nie Guifeng¹ Feng Aixin¹ Ren Xudong¹ Cao Yupeng^{1,2} Zhou Pengcheng¹ Li Bin¹

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

(²School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

Abstract In order to study the effect of laser power density on principal stresses and their directions by laser shock processing (LSP). 2024 aluminum alloy samples are processed with five different laser power densities. Residual stresses of three directions are measured by X-ray diffraction (XRD), and the principal stresses and their directions are calculated. Experimental results show that effect of laser power density on the amplitude of principal stresses and the spread of its direction, stress intensity and maximum shear stress by LSP. The variance of maximum principal stress and its direction of 2024 aluminum alloy are 1987 and 13905 respectively, with the laser power density of 2.8 GW/cm². Residual stress is of uniform distribution, and the angles of principal stress directions are scattered. But the average of maximum principal stress of 2024 aluminum alloy is -158 MPa. The average of maximum principal stress of 2024 aluminum alloy is -239 MPa with the laser power density of 2.1 GW/cm². The variance of maximum principal stress and its directions of 2024 aluminum alloy is 5471. Residual stress is less uniformity.

Key words laser technique; laser shock processing; laser power density; X-ray diffraction; residual principal stress; 2024 aluminum alloy

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 350.3390; 350.3850

收稿日期: 2011-08-02; **收到修改稿日期**: 2011-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51175237)、中国博士后基金(20100481096)、江苏省自然科学基金(BK2007512, BK2010352, BK2011487)、江苏省博士后基金(1002029C)、江苏大学高级人才启动基金(09JDG090),江苏大学技术人才培养工程项目,江苏高校优势学科建设工程资助项目资助课题。

作者简介: 聂贵锋(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化及冲击波衰减规律的研究。

E-mail: ngf3693@163.com

导师简介: 冯爱新(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工与检测技术等方面的研究。

E-mail: aixfeng@ujs.edu.cn

1 引 言

2024 铝合金属于 Al-Cu-Mg 系高强变形铝合金,具有很高的抗疲劳性能和高温力学性能,尤其是强度和伸长率的搭配范围宽,热处理强化效果明显,广泛应用于制造承受较大载荷的航空、航天及民用机械构件^[1~3]。在铝合金构件的使用过程中发现,其主要的失效形式是构件表面的疲劳、腐蚀、磨损^[4,5]。

激光冲击处理(LSP)是一项新兴的表面强化技术,利用强脉冲激光产生冲击波对材料进行强化处理,能有效改善材料的强度、硬度、耐磨性和耐应力腐蚀性能,尤其能有效改善金属材料的抗疲劳断裂性能^[6~8]。目前,对激光冲击强化效果的研究表明,激光冲击波是激光冲击强化的力源,冲击波峰值压力是关于激光功率密度的函数。激光功率密度的增加导致作用在材料表面压力脉冲幅值的增加,金属表面的残余压应力值增大,塑性影响层深度增加。当激光功率密度超过一定阈值时,由于表面稀疏波

的存在导致表面残余压应力值没有增加(已达到饱和),而残余压应力的影响深度却仍增加^[9,10]。而目前关于功率密度对激光冲击区域的主应力及其方向影响的研究还未见报道。

本文通过调整不同激光功率密度对 2024 铝合金进行单点冲击,用 X 射线应力分析仪测量激光冲击区域 5 个点的残余应力,这 5 个测点位于冲击光斑的同一条直径上,每个点测量 3 个方向,计算出残余主应力及其方向,研究激光功率密度对冲击区域残余应力及主应力分布特性的影响,不仅为预选激光冲击参数及精确控制强化质量提供依据,同时丰富完善了激光冲击区域残余应力的表征,提高了残余应力测量精度,为残余应力大小的比较带来方便。

2 实验设计

实验采用工业中广泛使用的 2024 铝合金,其具体化学成分如表 1 所示。

表 1 2024 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composites of 2024 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Others	Others		Al
								Single	Sum	
0.5	0.5	3.5~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.25	0.15	Cr0.10Ti+Zr0.20	0.05	0.15	Bal.

用线切割法加工成尺寸为 60 mm×40 mm×6 mm 的试样[如图 1(a)所示]。激光冲击时采用 0.1 mm 的美国 3M 公司专用铝箔(其中一面为粘贴剂,与试样表面粘贴)作为激光能量吸收层,K9 玻璃作约束层。LSP 前,试样表面用细砂纸和砂布打磨、乙醇清洗、冷风吹干。

LSP 2024 铝合金实验在江苏大学强激光实验

室的 Gaia-R 系列高能脉冲灯抽运 YAG 激光器上进行,激光脉冲能量分别为 5、6、8、9、10 J,冲击光斑直径 6 mm,激光波长 1064 nm,脉宽 10 ns,根据激光能量与功率密度的关系计算得激光功率密度分别为 1.8×10^9 、 2.1×10^9 、 2.8×10^9 、 3.2×10^9 、 3.5×10^9 W/cm²,分别对 5 块相同的试样进行单次冲击。

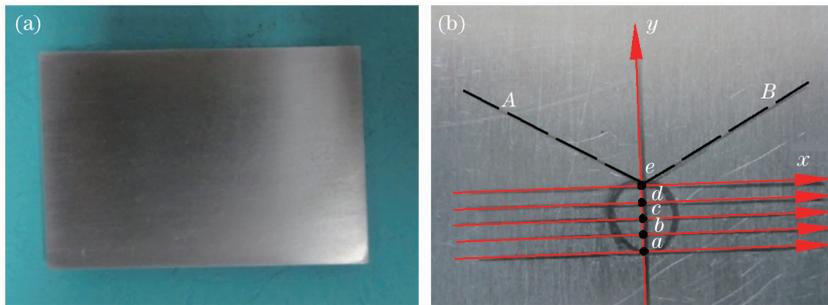


图 1 激光冲击处理试样。(a) LSP 前;(b) LSP 后

Fig. 1 Samples of laser shock processing. (a) Before LSP; (b) after LSP

用乙醇清洗冲击处理后的试样表面,用记号笔分别标记出 5 块试样的残余应力检测点的位置,记为测点 a、b、c、d 和 e,5 个测点位于冲击光斑的同一条直径上[如图 1(b)所示]。以测点 e 为坐标原点

建立直角坐标系[如图 1(b)所示],虚线 eA 和 eB 是残余应力测量方向,其他测点的直角坐标系及测量方向与测点 e 相同。

用河北爱斯特应力技术有限公司生产的 X-

350A 型 X 射线应力分析仪测量试样表面沿着 eA 、 y 轴、 eB 3 个方向的残余应力,其中 eB 与 x 轴正方向的夹角为 30° ,设为 α_1 ; y 轴与 x 轴的夹角设为 α_2 ; eA 与 x 轴正方向的夹角为 150° ,设为 α_3 。管电压 20.0 kV,管电流 5.0 mA,铬靶 $K\alpha$ 特征辐射,准直管直径为 $\phi 1$ mm,阶梯扫描步进角为 0.1° ,时间常数为 1 s,扫描起始角及终止角分别为 134° 和 143° ,侧倾角 Ψ 分别取 10° 、 25° 、 35° 和 45° 。对于 Cr 靶, $K\alpha$ 特征辐射,2024 铝合金为(311)晶面,应力常数 $K = -162$ MPa/($^\circ$)。

3 实验结果与分析

采用 X-350A 型 X 射线应力分析仪对 5 种不同功率密度的激光冲击区域进行了 3 个方向残余应力测量,具体测试位置及方向如图 1(b)所示,测量结果如表 2 所示。

从表 2 的测量值看出,应力是一个矢量,具有方向性,同一测点 3 个方向的残余应力值各不相同,给激光冲击区域残余应力分布特性的研究带来很大困

难。但是,通过受力构件的任意一点皆可找到 3 个相互垂直的主平面,该点任意方向上的力都可以用主平面的 3 个主应力来表示。因此,研究激光冲击区域残余主应力的分布特性更能准确反映激光冲击强化效果。

表 2 中各测点 3 个方向的测量值满足的关系为^[11]

$$\sigma_{\alpha_i} = \sigma_x \cos^2 \alpha_i + \sigma_y \sin^2 \alpha_i - 2\tau_{xy} \sin \alpha_i \cos \alpha_i, \quad (1)$$

式中 σ_{α_i} 是法线与 x 轴成 α_i 角斜截面的正应力($i = 1, 2, 3$); σ_x 是法线与 x 轴平行的平面上的正应力分量; σ_y 是法线与 y 轴平行的平面上的正应力分量; τ_{xy} 是法线与 x 轴平行的平面上的切应力分量。

主应力方向角 α_0 和最大切应力 τ_m 可计算为^[11]

$$\tan 2\alpha_0 = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}, \quad (2)$$

$$\tau_m = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (3)$$

表 2 不同功率密度的激光冲击区域各测点的残余应力

Table 2 Residual stresses of the shocked region by different laser power densities

Power density / (GW/cm ²)	Station	a		b		c		d		e	
		Stress	Error								
1.8	α_1	-90	±58	-91	±30	-87	±27	-57	±11	-138	±29
	α_2	-149	±31	-96	±11	-114	±28	-100	±27	-89	±20
	α_3	-203	±32	-80	±18	-85	±27	-77	±5	-122	±30
2.1	α_1	-185	±24	-56	±19	-134	±4	-185	±35	-189	±32
	α_2	-73	±64	-119	±31	-205	±32	-141	±56	-161	±14
	α_3	-142	±48	-199	±4	-181	±52	-228	±11	-160	±40
2.8	α_1	-40	±11	-74	±45	-163	±44	-138	±10	-153	±16
	α_2	-140	±12	-109	±16	-113	±31	-163	±10	-143	±36
	α_3	-99	±13	-114	±15	-101	±10	-105	±18	-182	±29
3.2	α_1	-127	±58	-23	±8	-104	±23	-198	±16	-238	±9
	α_2	-170	±20	-134	±11	-128	±53	-161	±17	-186	±17
	α_3	-109	±43	-109	±17	-129	±12	-146	±35	-206	±44
3.5	α_1	-128	±36	-164	±52	-143	±91	-76	±43	-176	±32
	α_2	-86	±31	-102	±12	-141	±32	-133	±33	-155	±26
	α_3	-71	±40	-90	±18	-144	±28	-201	±17	-51	±24

α_0 的数值有两个,通常把最大主应力对应的 α_0 称为主应力方向角,再将(2)式求解的两个 α_0 角度分别代入(1)式中求解出最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_2 。

各测点的应力强度 σ_i 为

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}. \quad (4)$$

将(1)、(2)、(4)式求解的各个测点残余最大主应力 σ_1 、残余最小主应力 σ_2 、主应力方向角 α_0 、应力

强度 σ_i 以及它们的均值和方差如表 3 所示。

列表 3 中不同激光功率密度的残余主应力及其方向角、应力强度变化曲线,如图 2、3 和 4 所示。图 2 是不同激光功率密度诱导的残余主应力分布,图 3 是不同激光功率密度诱导的主应力方向角分布,图 4 是不同激光功率密度诱导的应力强度分布。

材料表面的残余主应力取决于作用在材料表面的应力波强度、反射系数和透射系数,虽然本次实验

中反射系数和透射系数相同,但在不同激光功率密度作用下材料表面的冲击波和稀疏波的强度变化非常复杂^[9,12,13],导致材料表面残余主应力状态分布规律比较复杂。

表 3 不同功率密度的激光冲击区域各测点残余主应力及其方向

Table 3 Residual principal stresses and its directions by different laser power densities

Power density / (GW/cm ²)	1.8	2.1	2.8	3.2	3.5
σ_1					
<i>a</i>	-213	-282	-151	-137	-129
<i>b</i>	-98	-206	-124	-199	-165
<i>c</i>	-114	-230	-164	-172	-144
<i>d</i>	-103	-273	-169	-156	-209
<i>e</i>	-145	-203	-183	-240	-205
Mean	-135	-239	-158	-181	-170
Variance	9017	5471	1987	6447	4655
σ_2					
<i>a</i>	-82	-45	-35	-99	-61
<i>b</i>	-80	-49	-74	-21	-73
<i>c</i>	-77	-85	-88	-104	-141
<i>d</i>	-53	-140	-102	-137	-64
<i>e</i>	-87	-146	-136	-180	-50
Mean	-76	-93	-87	-108	-78
Variance	703	9322	5500	13691	7669
σ_3					
<i>a</i>	186	262	137	150	112
<i>b</i>	90	186	108	147	143
<i>c</i>	101	201	142	124	143
<i>d</i>	89	236	147	176	185
<i>e</i>	126	181	165	216	185
Mean	119	214	140	163	154
Variance	6596	4833	1695	5005	4813
α_0					
<i>a</i>	134	20	108	82	37
<i>b</i>	69	138	123	114	34
<i>c</i>	88	114	35	121	-10
<i>d</i>	104	6	73	38	-44
<i>e</i>	9	31	-23	19	55
Mean	81	62	63	75	14
Variance	8715	14341	13905	8191	8163

由图 2 可以看出,不同激光功率密度诱导的残余主应力的分布规律不同,同一激光功率密度诱导的各点残余最大主应力和残余最小主应力值不相等,它们之间的差值随着激光功率密度和光斑直径上位置的不同而变化。当激光功率密度为2.8 GW/cm²时,残余最大主应力变化范围为-124~-183 MPa,平均值为-158 MPa,方差为1987,与其他4组试样的残余最大主应力的方差相比最小,残余最大主应力波动比较小,分布基本均匀。当激光功率密度增加或者减小时,冲击光斑同一直径上的残余最大主应力的

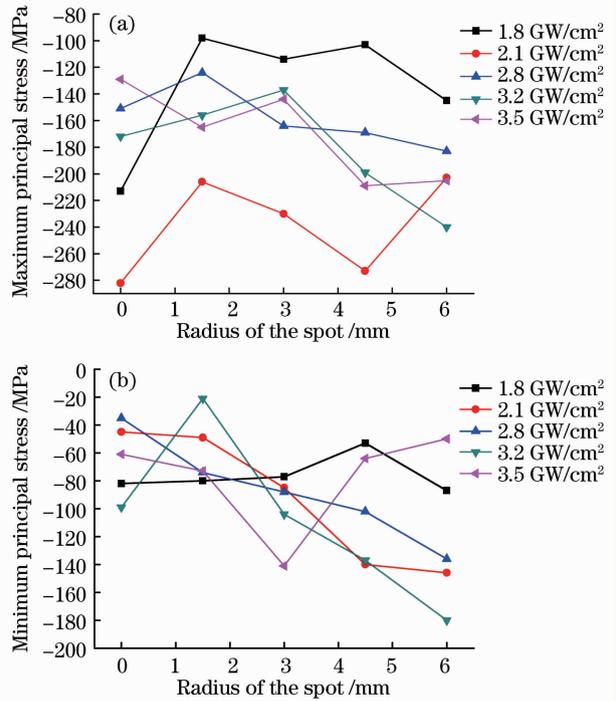


图 2 不同激光功率密度诱导的残余主应力分布。

(a)残余最大主应力;(b)残余最小主应力

Fig. 2 Distributions of residual principal stresses by different laser power densities. (a) Residual maximum principal stresses; (b) residual minimum principal stresses

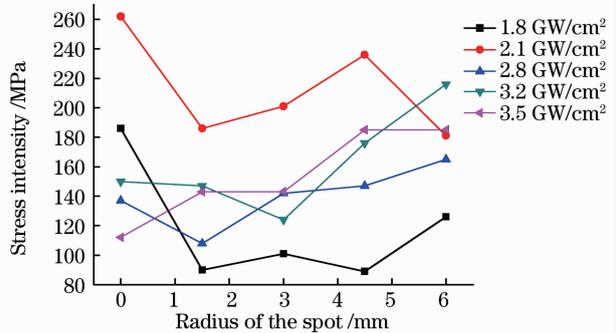


图 3 不同激光功率密度诱导的应力强度分布

Fig. 3 Distributions of stress intensity by different laser power densities

方差增大,残余最大主应力的分布梯度增加。当激光功率密度为1.8 GW/cm²时,冲击光斑同一直径上的残余最大主应力的方差达到最大值9017,残余最大主应力的分布均匀性最差。

应力强度是残余最大主应力和残余最小主应力的函数,对材料的性能有很大影响。由图 3 可以看出,不同激光功率密度诱导的残余应力场的应力强度分布规律不同,同一激光功率密度诱导的残余应力场各点的应力强度值不同。当激光功率密度为

2.8 GW/cm² 时,冲击光斑同一直径上的应力强度的均值为 140 MPa,方差为 1695,与其他 4 组试样的应力强度的方差相比最小,应力强度波动比较小,分布基本均匀。当激光功率密度为 2.1 GW/cm² 时,冲击光斑同一直径上的应力强度的均值为 214 MPa,达到最大值,但是方差为 4833,应力强度波动比较大,分布均匀性差。

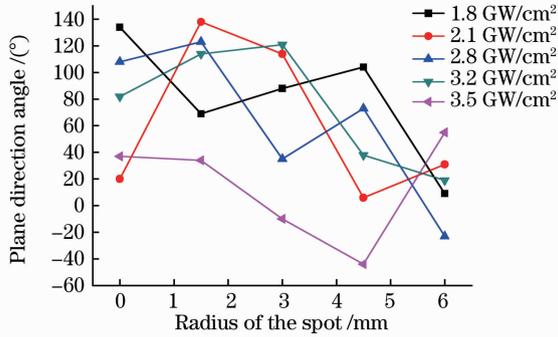


图 4 不同激光功率密度诱导的主应力方向角分布
Fig. 4 Distributions of the directions of principal stresses by different laser power densities

由图 4 可以看出,当激光功率密度为 2.1 GW/cm² 和 2.8 GW/cm² 时,冲击光斑同一直径上的主应力方向角的曲线变化大,主应力方向角的方差值比较大,这说明主应力方向角比较分散。而激光功率密度为 1.8、3.2、3.5 GW/cm² 时,冲击光斑同一直径上的主应力方向角的方差值比较小,这说明主应力方向角相对集中。

激光冲击波作用初期,冲击波压力比较大,材料的剪切强度可以忽略不计,可近似作流体动力学处理,受各向相等的平均压缩作用力,随着冲击波作用时间的延长,冲击波压力逐渐减小,必须考虑固体材料的剪切强度^[13]。因此,在冲击区域还存在着切应力,并且在冲击波峰值过后卸载阶段产生。

图 5 是不同激光功率密度诱导的最大切应力分布。由图 5 可以看出,当激光功率密度由 1.8 GW/cm² 增加到 2.1 GW/cm² 时,激光冲击区域最大切应力值明显增加,激光功率密度进一步增加时,冲击区域最大切应力值反而减小。当激光功率密度为 3.5 GW/cm² 时,光斑中心的最大切应力值达到最小 2 MPa。这是因为切应力是位错运动的推动力,引起材料发生塑性变形^[14]。激光功率密度增大时冲击波峰值压力增加,材料表面的塑性变形增加,但同时增加稀疏波的强度,引起冲击光斑中心的残余漏洞现象,光斑中心区域的残余压应力减小,表层材料的塑性变形也减小^[15]。

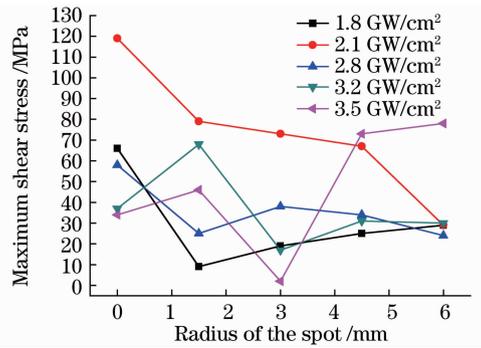


图 5 不同激光功率密度诱导的最大切应力分布
Fig. 5 Distributions of maximum shear stresses by different laser power densities

4 结 论

1) 通过对不同激光功率密度诱导的残余主应力及其方向的研究发现,功率密度对激光冲击区域的残余主应力幅值、主应力方向分散程度、应力强度和最大切应力有很大影响。

2) 对于 2024 铝合金,采用 2.8 GW/cm² 的激光功率密度冲击时,残余最大主应力的方差为 1987,应力强度的方差为 1695,主应力方向角的方差为 13905,与其他 4 组试样相比,残余应力分布均匀,主应力方向角分散,不容易形成应力集中现象。但是激光冲击区域的残余最大主应力的均值为 -158 MPa,应力强度的均值为 140 MPa。

3) 对于 2024 铝合金,采用 2.1 GW/cm² 的激光功率密度冲击时,残余最大主应力的均值为 -239 MPa,应力强度的均值为 214 MPa,与其他 4 组试样相比,冲击区域的残余应力值最大。但是残余最大主应力的方差为 5471,应力强度方差为 4833,残余应力分布均匀性差。

参 考 文 献

- Chen Gang, Gao Pingping, Fan Caihe *et al.*. Effect of heat treatment on structures and properties of squeeze casting 2024 aluminum alloy [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2010, **37**(5): 74~77
陈 刚, 高平平, 范才河等. 热处理对挤压铸造 2024 铝合金组织与性能的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, **37**(5): 74~77
- Chen Yuqiang, Yi Danqing, Pan Suping *et al.*. Effect of temperature on creep behavior of 2024 aluminum alloy[J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2010, **20**(4): 632~638
陈宇强, 易丹青, 潘素平等. 温度对 2024 铝合金蠕变行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, **20**(4): 632~638
- F. J. Carpio, D. Araújo, F. J. Pacheco *et al.*. Fatigue behaviour of laser machined 2024 T3 aeronautic aluminium alloy [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2003, **208/209**: 194~198
- L. Zhang, J. Z. Lu, Y. K. Zhang *et al.*. Effects of different shocked paths on fatigue property of 7050-T7451 aluminum alloy

- during two-sided laser shock processing [J]. *Materials and Design*, 2011, **32**(2): 480~486
- 5 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3323~3328
罗新民, 张静文, 赵广志等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 6 Y. K. Zhang, C. L. Hu, L. Cai *et al.*. Mechanism of improvement on fatigue life of metal by laser-excited shock waves [J]. *Appl. Phys. A*, 2001, **72**(1): 113~116
- 7 Y. K. Zhang, J. Z. Lu, X. D. Ren *et al.*. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy[J]. *Materials and Design*, 2009, **30**(5): 1697~1703
- 8 Yongkang Zhang, Jian You, Jinhong Lu *et al.*. Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, **204**(24): 3947~3953
- 9 C. S. Montros, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review[J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 10 Chen Ruifang, Guo Naiguo, Hua Yinqun. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 932~936
- 陈瑞芳, 郭乃国, 花银群. 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 932~936
- 11 Liu Hongwen. *Material Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. 216~226
刘鸿文. *材料力学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 216~226
- 12 Yang Jianfeng, Zhou Jianzhong, Feng Aixin. Measure and analysis the residual stress of laser shock processing[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(3): 157~162
杨建风, 周建忠, 冯爱新. 激光冲击强化区的残余应力测试分析[J]. *应用激光*, 2006, **26**(3): 157~162
- 13 Ma Xiaoqing. *Shock Dynamic* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. 77~169
马晓青. *冲击动力学* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992. 77~169
- 14 Wang Lei. *Mechanical Properties of Material* [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2007. 18~19
王磊. *材料的力学性能* [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2007. 18~19
- 15 Jiang Yinfang, Lai Yanling, Zhang Lei *et al.*. Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2073~2079
姜银方, 来彦玲, 张磊等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2073~2079

栏目编辑: 宋梅梅