

# 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织 结构的影响

张青来<sup>1</sup> 王 荣<sup>1</sup> 张冰昕<sup>2</sup> 钱 阳<sup>1</sup> 陈 骏<sup>1</sup> 洪妍鑫<sup>1</sup> 吴铁丹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

<sup>2</sup>上海交通大学密西根学院, 上海 200240

**摘要** 为了研究激光冲击强化(LSP)对镁合金力学性能的影响,采用电子万能高温拉伸机和钕玻璃脉冲激光(波长1064 nm,脉冲宽度20 ns)研究AZ31镁合金薄板室温和300 ℃时拉伸应力-应变曲线和力学性能。结果表明,LSP提高了AZ31镁合金室温和高温抗拉强度,而冲击试样的最大热流变应力明显高于未冲击的试样,双面单次LSP导致室温力学性能降低,在激光冲击试样断口发现了沿次表层扩展的层裂现象。讨论和分析了残余压应力、细微结构、表面形貌和粗糙度对激光冲击镁合金力学性能的影响。

**关键词** 材料; AZ31 镁合金; 激光冲击强化; 应力-应变曲线; 热拉伸性能; 细微结构

**中图分类号** TN249; TG146.2+

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0303001

## Effect of Laser Shock Processing on Mechanical Properties and Mesostructures of AZ31 Magnesium Alloy

Zhang Qinglai<sup>1</sup> Wang Rong<sup>1</sup> Zhang Bingxin<sup>2</sup> Qian Yang<sup>1</sup> Chen Jun<sup>1</sup>

Hong Yanxin<sup>1</sup> Wu Tiedan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China*

<sup>2</sup>*University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

**Abstract** In order to study the effect of laser shock processing (LSP) on mechanical properties of magnesium alloy, the room and thermal (300 ℃) tensile stress-strain curves of AZ31 alloy sheets are investigated by using electronic universal high temperature tensile machine and Nd: glass laser with wavelength of 1064 nm and pulse width of 20 ns. The results show that the room and thermal tensile strength of AZ31 alloy are improved by LSP. The maximum thermal flow stress of laser shocked specimens is obviously higher than that of untreated. However, the double-sided single LSP results in the reduction of mechanical properties at room temperature. And the spallation phenomenon which extends along subsurface occurs on fracture of the shocked samples. Effect of the residual compressive stress, mesostructures, surface morphologies and roughness on mechanical properties of magnesium alloy by LSP are discussed and analyzed.

**Key words** materials; AZ31 magnesium alloy; laser shock processing; stress-strain curves; hot tensile properties; mesostructures

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引 言

激光冲击强化(LSP)作为表面改性技术,是利用激光在纳秒时间内产生的超高压,使材料表层产生刷

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51175231)

作者简介: 张青来(1962—),男,博士,教授,主要从事镁合金、钛合金及激光加工技术等方面的研究。

E-mail: zhangql196210@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

烈的塑性形变、残余压应力和晶粒细化,从而提高材料的力学性能、耐腐蚀和疲劳性能等。双面两次LSP后7050铝合金紧固孔的疲劳寿命比未强化的疲劳寿命提高1.5倍<sup>[1]</sup>;LSP处理后2A02铝合金试件疲劳寿命是未冲击的2倍左右<sup>[2]</sup>;连续3次LSP后ZK60变形镁合金的疲劳寿命增益达61%<sup>[3]</sup>;LSP处理提高了AZ31和AZ91镁合金中心缺口试样拉-拉疲劳寿命<sup>[4-5]</sup>。LSP处理明显地改善了AZ31镁合金抗应力腐蚀性<sup>[6-7]</sup>和AZ91镁合金在NaCl溶液中的耐电化学腐蚀性<sup>[8-9]</sup>。LSP提高了材料的力学性能,如AZ31和AZ91镁合金<sup>[10-11]</sup>、AISI304不锈钢<sup>[12]</sup>、铝合金<sup>[13-15]</sup>。经检索,关于LSP的材料热拉伸性能研究未见报道。

本文采用纳秒脉冲激光对AZ31镁合金薄板进行LSP,采用电子万能高温拉伸机测定激光冲击前后AZ31镁合金在室温和300℃时热拉伸应力-应变曲线和抗拉强度,研究微观组织、表面形貌和晶粒细化对其影响,对进一步研究镁合金激光冲击热强化及其热塑性形变提供技术支持。

## 2 试 验

### 2.1 试验材料与试验方法

本试验选用厚度为1.5 mm的AZ31轧制板材,用线切割加工呈拉伸试样,激光冲击试验前进行退火处理和表面抛光处理,其尺寸如图1(a)所示。在激光冲击过程中,用流动水作为约束层,黑色胶带作为吸收层,光斑搭接率为50%,冲击区域尺寸为25.4 mm×6.35 mm,LSP试样如图1(b)所示。激光器参数:激光脉冲能量选2.8 J和5 J两种,光斑直径为3 mm,脉宽20 ns,波长为1064 nm,功率密度为1.98 GW/cm<sup>2</sup>和3.54 GW/cm<sup>2</sup>。激光功率密度*I*计算公式为: $I = 4E/\pi\tau D^2T$ ,其中*E*为激光脉冲能量, $\tau$ 为脉宽,*D*为光斑直径。

热拉伸试验在WDW-E200微机控制电子万能拉伸机(如图2所示)上进行,试验温度为室温和300℃两种,加热装置为三段控温电阻炉,温控误差为±1℃,试验采用1×10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>拉伸速度。热拉伸试验设备工作方式:控温仪输入温度参数,经数模转换器转换后开始加热,在炉温度达到设定值后,保温10 min,待炉温恒定,将试样放入炉中加热到设定温度,保温2~5 min进行拉伸,拉伸所得位移和受力曲线经计算机处理后输出。拉伸试验后应及时对拉伸断裂试样进行水冷,且烘干处理,以供后续微观结构分析使用。

采用Veeco Wyko NT1100型光学轮廓仪和X350A型X射线应力仪分别对镁合金靶材表面形貌和表面残余应力进行测试。通过HVS-1000Z型显微硬度仪测量冲击横断面的显微硬度。利用Leica DM2500M型正置透反射光学显微镜对镁合金微观组织进行观察和分析。

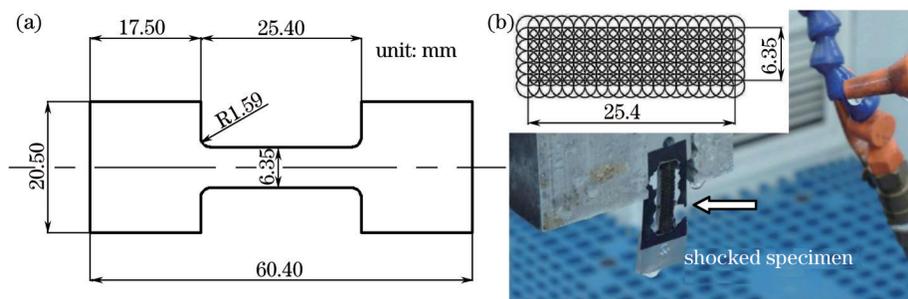


图1 AZ31镁合金。(a)拉伸试样尺寸;(b)其LSP试样  
Fig.1 AZ31 magnesium alloy. (a) Tensile specimen; (b) LSP specimen



图2 热拉伸试验设备  
Fig.2 Hot tensile experimental equipment

### 3 结果与分析

#### 3.1 LSP对室温和热拉伸性能的影响

为了研究激光冲击对镁合金力学性能的影响,本试验选用厚度为 1.5 mm 的轧制 AZ31 退火薄板。由于 AZ31 薄板硬度较低(显微硬度平均值为 65 HV),高应变速率高能激光冲击的试样将发生塑性变形,影响测试结果,为此,本试验选用两种功率密度 1.98 GW/cm<sup>2</sup> 和 3.54 GW/cm<sup>2</sup>。由于激光冲击后拉伸试样厚度变薄,将沿冲击试样长度方向多点测量试样厚度,取其平均值作为拉伸试样厚度,而拉伸试样标距长度按体积不变原则计算得出。AZ31 镁合金薄板单面或双面 LSP 试验方案及其测试力学性能结果如表 1 所示。

表 1 激光冲击 AZ31 镁合金薄板力学性能

Table 1 Mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets after LSP

Test number	Tensile temperature /°C	Power density / (GW·cm <sup>-2</sup> )	Elongation δ /%	Tensile strength σ <sub>s</sub> /MPa	Single-sided or double-sided LSP
101	Room temperature	0	16.1	261	Single-sided
102	Room temperature	3.54	10.2	302	Single-sided
103	300	0	114.6	22.8 <sup>#</sup>	Single-sided
104	300	3.54	69.3	31.8 <sup>#</sup>	Single-sided
107	Room temperature	1.98	10.2	294.5	Single-sided
108	Room temperature	1.98	8.3	273.5	Double-sided

Note: # represents the maximum flow stress value.

##### 3.1.1 室温拉伸应力-应变曲线

图 3 是单面单次和双面单次 LSP 前后 AZ31 镁合金薄板拉伸应力-应变曲线。[LSP 处理前(ULSP), LSP]由图 3 可见, LSP 前后 AZ31 镁合金室温拉伸应力-应变曲线的整体变化趋势相似,由两个阶段区域组成: I 区域是弹性变形阶段; II 区域为形变强化阶段。在室温拉伸过程中,较小应变后试样达到屈服,之后进入塑性变形阶段,应力随应变增加而增加;对比未冲击试样, LSP 处理延迟了镁合金达到屈服时间,在塑性形变阶段, LSP 试样的变形抗力明显大于未冲击试样。

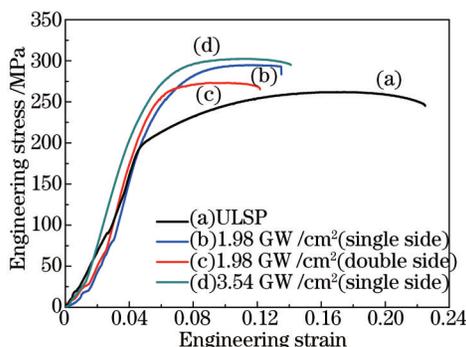


图 3 激光冲击前后 AZ31 镁合金薄板拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Tensile stress-strain curves of AZ31 alloy sheets after and before LSP

由表 1 和图 3 可观察到单面 LSP 的 AZ31 镁合金薄板室温力学性能:当激光功率密度为 1.98 GW/cm<sup>2</sup> 时,抗拉强度从 261 MPa 增加到 294.5 MPa,即增加量为 12.8%;延伸率从 16.1% 减小到 10.2%,即减小量为 36.6%;当功率密度增至 3.54 GW/cm<sup>2</sup> 时,抗拉强度从 261 MPa 增加到 302 MPa,即增加量为 15.7%;延伸率从 16.1% 减小到 10.2%,即减小量为 36.6%。随功率密度的增加抗拉强度随之增加,这可能是由于激光冲击引起材料的形变硬化而致<sup>[16]</sup>。

对比单面激光冲击,功率密度为 1.98 GW/cm<sup>2</sup> 的双面单次 LSP 导致镁合金薄板的室温力学性能减小:抗拉强度从 294.5 MPa 减小到 273.5 MPa,即减小量为 7.1%;延伸率从 10.2% 减到 8.3%,即减小量为 18.6%。尽管如此,双面激光冲击 AZ31 镁合金试样抗拉强度比未冲击试样增加 4.8%。因此,单面或双面激光冲击均使 AZ31 镁合金得到强化,且随功率密度增加激光冲击试样强化程度相应增加。

### 3.1.2 热拉伸应力-应变曲线

试验以功率密度为  $3.54 \text{ GW/cm}^2$  激光冲击试样为例,研究 LSP 对 AZ31 镁合金薄板热拉伸性能的影响及其强化机制。

图 4 所示为 AZ31 镁合金薄板在应变速率为  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  下测得的室温和  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时拉伸应力-应变曲线。由图 4 可观察到,在温度为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时整个变形过程中,随着变形温度增加,AZ31 镁合金塑性明显增大,同时峰值应力前的应变硬化率显著下降,而峰值应力后的软化阶段明显延长。AZ31 镁合金热拉伸应力-应变的流变曲线明显区别于室温流变曲线,具有明显三个阶段:1) 流变曲线经历了一个突然上升和下降的过程,在变形的初始阶段发生了剧烈的孪生变形,因位错密度剧增而产生硬化行为,应力达到峰值时动态再结晶便开始进行,温变形中峰值应力是位错塞积导致的硬化和动态再结晶导致的软化之间形成平衡的初始点<sup>[17]</sup>;2) 合金进入软化阶段,动态再结晶占主导地位,曲线随应变增加呈现下降趋势;3) 是颈缩阶段,当应变量达到某值时,流变曲线突然下降,试样被拉断。与未冲击试样曲线不同的是,LSP 处理明显地增加了镁合金的热变形抗力。

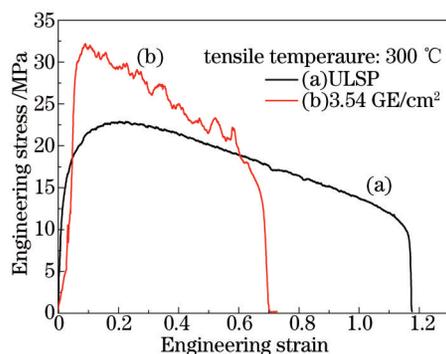


图 4 在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时 AZ31 镁合金薄板热拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Thermal tensile stress-strain curves of AZ31 alloy sheets at  $300 \text{ }^\circ\text{C}$

由表 1 和图 4 可见,功率密度为  $3.54 \text{ GW/cm}^2$  LSP 的 AZ31 镁合金试样在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时热拉伸性能发生了明显变化。最大流变应力从  $22.8 \text{ MPa}$  增加到  $31.8 \text{ MPa}$ ,即增量为  $39.5\%$ ;延伸率从  $114.6\%$  减小到  $69.3\%$ ,即减量  $39.5\%$ 。

综上所述,LSP 提高了 AZ31 镁合金室温和高温抗拉强度,而冲击试样的最大热流变应力明显大于未冲击的,所测试样延伸率减小量变化很小。

### 3.2 断口分析

本试验以功率密度为  $3.54 \text{ GW/cm}^2$  激光冲击试样为例,讨论激光冲击 AZ31 镁合金薄板拉伸断口特征。图 5 是激光冲击前后 AZ31 镁合金薄板的室温和  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时拉伸断口形貌。由图 5 可知,未冲击试样室温拉伸断口分布着大量等轴韧窝[图 5(a)],韧窝大而浅,而激光冲击试样断口表现为少量韧窝和河流花样组成的准解理断裂,表面韧窝数量少而浅,且存有层裂<sup>[18]</sup>,这是由于激光冲击导致镁合金靶材表面和厚向残余拉/压应力分布及应变硬化程度不同所致,以致层裂在拉伸过程中沿拉应力与压应力弱界面产生,即次表层,如图 5(b)所示。

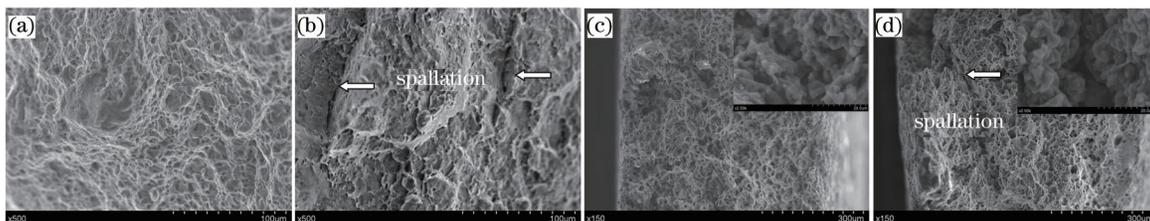


图 5 功率密度为  $3.54 \text{ GW/cm}^2$  激光冲击的 AZ31 镁合金拉伸 SEM 断口形貌。(a) 室温+ULSP; (b) 室温+LSP; (c)  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ +ULSP; (d)  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ +LSP

Fig.5 SEM tensile fracture morphologies of AZ31 alloy specimens by LSP with power density of  $3.54 \text{ GW/cm}^2$ .

(a) Room temperature+ULSP; (b) room temperature+LSP; (c)  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ +ULSP; (d)  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ +LSP

当变形温度为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时,热拉伸断口由分布均匀的细小等轴韧窝组成,由于动态再结晶和塑性变形,韧窝深度增加,在断裂横截面上接近等轴状,由于晶粒度很小,撕裂棱变得细长,在高倍扫描电镜(SEM)下可观

察到韧窝内分布着完整的细小动态再结晶晶粒。激光冲击致使镁合金剧烈塑性形变,引起应变硬化,由于镁合金层错能低,以致难以产生内缩颈,故韧窝尺寸变小,而在冲击试样断口发现层裂现象,这种层裂同样沿次表层-弱界面扩展,如图5(c)和(d)所示。

## 4 讨论与分析

### 4.1 细晶强化

LSP致使合金晶粒细化和形成高密度织构,是AZ31镁合金薄板流变应力增加的原因之一。AZ31镁合金轧制板材经300℃/30min退火处理(T4)后由细小等轴晶组成,内含有少量加工织构,如图6(a)所示;经功率密度为3.54 GW/cm<sup>2</sup>的LSP后,镁合金表层晶粒得到明显细化,其内部含有高密度孪晶和位错,如图6(b)所示。已有的研究表明,激光冲击诱导的合金伴随着高密度孪晶、位错和亚晶的产生,甚至表层形成纳米晶<sup>[10,19]</sup>,从而提高了合金的抗拉强度<sup>[12-15]</sup>。在热拉伸过程中,激光冲击诱导的高密度织构减少,同时发生软化和动态再结晶过程,尽管如此,LSP仍提高了镁合金热变形抗力(见图4),这可能归于细晶强化作用结果。

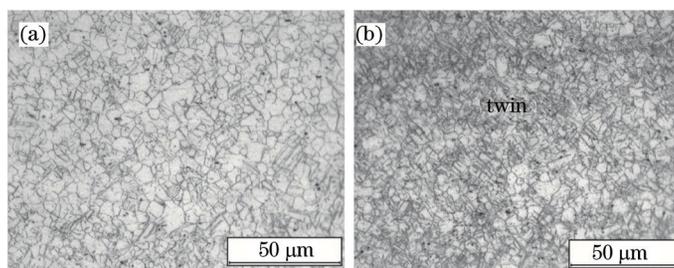


图6 激光冲击前后AZ31镁合金的金相组织。(a)未冲击;(b)冲击

Fig.6 Microstructures of AZ31 alloy after and before LSP. (a) ULSP; (b) LSP

### 4.2 残余应力与显微硬度

激光冲击诱导的残余压应力和显微硬度的增加也是提高AZ31镁合金薄板变形抗力的影响因素<sup>[10-12]</sup>。

图7为功率密度为3.54 GW/cm<sup>2</sup>激光冲击的AZ31镁合金薄板厚向显微硬度。由图7可知,AZ31镁合金薄板显微硬度平均值为66 HV,激光冲击的薄板厚向显微硬度发生变化,即表层显微硬度平均值达87 HV,增加了31.8%,而离板材表面1.0 mm处显微硬度平均值达到79 HV,提高了19.7%。合金薄板表层显微硬度增加的原因解释为:1)产生残余压应力;2)发生动态再结晶,表层合金晶粒细化,形成动态再结晶晶粒,甚至出现纳米晶;3)形成高密度孪晶和位错。

运用X350A型X射线应力仪对拉伸试样表面的激光冲击区和未冲击区分别进行残余应力测试,其结果表明,激光冲击前后试样的表面残余应力分别为(+49±16) MPa和(-123±21) MPa,表面残余应力由拉应力转变为压应力。因此,除了晶粒细化外,激光冲击诱导的残余压应力也是AZ31镁合金抗拉强度提高的影响因素之一。

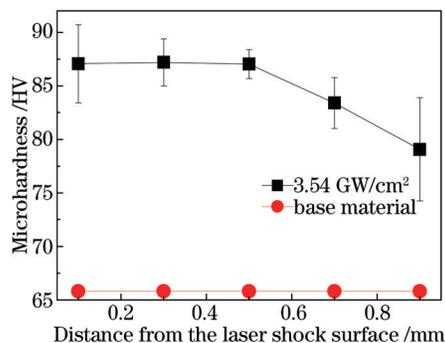


图7 激光冲击AZ31镁合金试样厚向显微硬度

Fig.7 Microhardness along thickness of AZ31 alloy specimen after LSP

### 4.3 表面形貌

图8所示为功率密度为3.54 GW/cm<sup>2</sup>激光冲击前后AZ31镁合金试样三维(3D)表面形貌和粗糙度。由图8可知,激光冲击的试样表面比未冲击的更凸凹不平,表面粗糙度 $R_a(R_a=R_p-R_v)$ 沿X方向从1.36 μm增加到

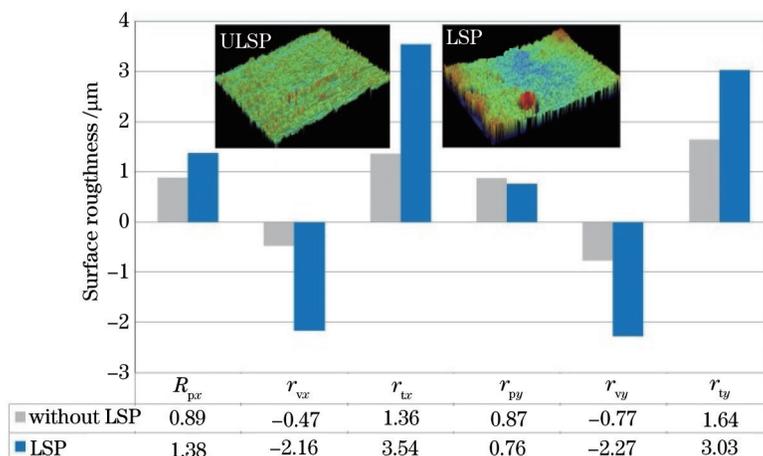


图8 激光冲击前后 AZ31 镁合金三维表面形貌和粗糙度

Fig.8 3D surface morphologies and roughness of AZ31 magnesium alloy after and before LSP

3.54  $\mu\text{m}$ ,沿 Y 方向则从 1.64  $\mu\text{m}$  增加到 3.03  $\mu\text{m}$ ,且 Y 方向表面粗糙度  $R_a$  是 X 方向的 2 倍左右。

激光冲击的表面凹坑形貌和表面粗糙度对 AZ31 镁合金薄板拉伸性能具有明显的影响。当功率密度过小时,激光冲击降低了 AZ31 镁合金力学性能,这可能是由于激光冲击致使表面产生更多的凹坑和表面粗糙度的增加,表面凸凹不平或粗糙度将成为导致拉伸试样过早断裂的裂纹源,或者小功率密度激光冲击诱导的表层晶粒细化、残余压应力和高密度孪晶位错等累积强化效应不足以弥补表面凸凹形变所引起的负作用;当功率密度足够大时,LSP 效应大于表面凸凹形变和粗糙度的负作用,此时表现出一定强化效果,如功率密度为 3.54  $\text{GW}/\text{cm}^2$  的单面单次 LSP 大于 1.98  $\text{GW}/\text{cm}^2$  时强化效果。又如功率密度为 1.98  $\text{GW}/\text{cm}^2$  的双面单次激光冲击致使镁合金试样表面发生剧烈塑性形变和粗糙度增加,其强化效果小于单面单次,如表 1 中镁合金拉伸试验结果所示。

## 5 结 论

1) 室温与热拉伸试验表明,LSP 提高了 AZ31 镁合金室温和高温抗拉强度,而且激光冲击的最大热流变应力明显高于未冲击的试样,延伸率变化量很小。如功率密度为 3.54  $\text{GW}/\text{cm}^2$  激光冲击试样:室温抗拉强度增加了 15.7%,延伸率减小了 36.6%;300  $^{\circ}\text{C}$  时最大流变应力增加了 39.5%,延伸率减小了 39.5%。在激光冲击试样断口发现层裂现象,层裂沿次表层-弱界面扩展。

2) AZ31 镁合金 LSP 效果随功率密度增加相应增加,而双面单次 LSP 致使室温力学性能降低,影响合金力学性能的因素包括残余压应力、晶粒细化、高密度织构、表面形貌和粗糙度。

## 参 考 文 献

- 1 Cao Ziwen, Che Zhigang, Zou Shikun, *et al.*. The effect of laser shock peening on fatigue property of 7050 aluminum alloy fastener hole[J]. Applied Laser, 2013, 33(3): 259-262.  
曹子文,车志刚,邹世坤,等.激光冲击强化对 7050 铝合金紧固孔疲劳性能的影响[J].应用激光,2013,33(3): 259-262.
- 2 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.
- 3 Jiang Suqin, Zhou Jianzhong, Wu Jianhua, *et al.*. Research on fatigue properties of ZK60 wrought magnesium alloy treated by laser shot peening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 081403.  
蒋素琴,周建忠,吴建华,等.激光喷丸强化 ZK60 变形镁合金的疲劳性能研究[J].激光与光电子学进展,2012,49(8): 081403.
- 4 Zhang Qinglai, Wu Tiedan, Qian Yang, *et al.*. Study on high cycle fatigue properties and laser shock processing of AZ91D-T6 cast magnesium alloy[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(10): 1003008.  
张青来,吴铁丹,钱 阳,等. AZ91D-T6 铸造镁合金激光冲击强化和高周疲劳性能研究[J].中国激光,2014,41(10): 1003008.
- 5 Huang Shu, Zhou Jianzhong, Jiang Suqin, *et al.*. Study on strain hardening and fatigue fracture of AZ31B magnesium alloy after

- laser shot peening[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0803002.
- 黄 舒, 周建忠, 蒋素琴, 等. AZ31B 镁合金激光喷丸后的形变强化及疲劳断口分析[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803002.
- 6 Li X C, Zhang Y K, Chen J F, *et al.*. Effect of laser shock processing on stress corrosion cracking behavior of AZ31 magnesium alloy at slow strain rate[J]. Mater Sci Technology, 2013, 29(5): 626–630.
- 7 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang. Effect of laser shock processing on resistance to stress corrosion cracking of tungsten inert-gas welded AZ31B magnesium alloy[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(12): 1203007.
- 葛茂忠, 项建云, 张永康. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金焊接件抗应力腐蚀的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1203007.
- 8 Zhang Qinglai, Qian Yang, An Zhibin, *et al.*. Study on electrochemical corrosion of magnesium alloys by LSP in NaCl solution[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903002.
- 张青来, 钱 阳, 安志斌, 等. 基于激光冲击的镁合金在 NaCl 溶液中电化学腐蚀的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903002.
- 9 Li Shaozhe, Zhang Lingfeng, Xing Qingpu. Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 40(5): 0503004.
- 李少哲, 张凌峰, 邢清蒲. 激光冲击强化对 AZ91 镁合金的电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503004.
- 10 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang, *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, (9): 54–59.
- 葛茂忠, 项建云, 张永康, 等. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金力学性能的影响[J]. 材料工程, 2013, (9): 54–59.
- 11 Fei Xu, Ren Aiguo, Gu Yongyu, *et al.*. Effects of laser shock processing on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy[J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 552–556.
- 裴 旭, 任爱国, 顾永玉, 等. AZ91 镁合金激光冲击强化力学性能研究[J]. 激光技术, 2010, 34(4): 552–556.
- 12 Zhong Jinshan, Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, *et al.*. Influence of laser shock processing on tensile properties and tribological behaviors of AISI304 stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503002.
- 钟金杉, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能和摩擦磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503002.
- 13 Hu Zhenxing, Xie Huimin, Liu Zhanwei, *et al.*. Experimental study of tensile behavior of LY12 aluminium alloy processed by laser shot peening and laser irradiation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(2): 87–95.
- 胡振兴, 谢惠民, 刘战伟, 等. 激光冲击喷丸与激光辐照 LY12 铝合金材料拉伸力学行为的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(2): 87–95.
- 14 Simge G I, Nursen S, Erhan A, *et al.*. Pulsed Nd:YAG laser shock processing effects on mechanical properties of 6061-T6 alloy[J]. Opt & Laser Technol, 2014, 56: 273–277.
- 15 Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K. Effects of laser shock processing and strain rate on tensile property of LY2 aluminum alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2010, 528(2): 730–735.
- 16 Ye C, Liao Y L, Cheng G J. Warm laser shock peening driven nanostructures and their effects on fatigue performance in aluminum alloy 6160[J]. Advanced Eng Mater, 2010, 12(4): 290–297.
- 17 Zhang Qinglai, Hu Yongxue, Wang Lili. Stress-strain of uniaxial tension and recrystallization structures of AZ31B magnesium alloy [J]. Rare Metal Materils and Engineering, 2008, 37(4): 678–681.
- 张青来, 胡永学, 王粒粒. AZ31B 镁合金拉伸时应力-应变和再结晶组织[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(4): 678–681.
- 18 Zhang Qinglai, Wang Rong, Hong Yanxin, *et al.*. Study on laser shock forming and fracture behavior of metal sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403010.
- 张青来, 王 荣, 洪妍鑫, 等. 金属板料激光冲击成形及其破裂行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403010.
- 19 Zhang Qinglai, Hong Yanxin, Wang Rong, *et al.*. The effect of laser shock forming on the microstructure and residual stress of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 8(3): 166–172.
- 张青来, 洪妍鑫, 王 荣, 等. 激光冲击成形对 AZ31 镁合金微观结构和残余应力的影响[J]. 材料研究学报, 2014, 8(3): 166–172.

栏目编辑: 张浩佳