

# AZ80-T6 镁合金激光冲击温强化特性研究

张青来<sup>1</sup> 张 乔<sup>1</sup> 张冰昕<sup>2</sup> 李兴成<sup>3</sup> 刘 惠<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

<sup>3</sup>江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州 213000

**摘要** 采用钕玻璃脉冲激光器进行了室温到300℃区间AZ80-T6镁合金激光冲击温强化(WLSP)实验研究。结果表明:WLSP具有明显的温强化效果,比室温冲击强化(LSP)产生更高幅值的残余压应力,150℃时表面残余压应力(-150 MPa)和显微硬度均达到最大值,此时硬度较基体提高了35.8%,具有最佳的温强化效果;而150℃~250℃区间表面显微硬度趋于稳定值,其范围为122.1~119.1 HV,表现出良好的热稳定性。此外,还对不同温度下冲击凹坑的三维(3D)轮廓、表面形貌和表面粗糙度进行了分析和讨论。

**关键词** 激光光学; AZ80 镁合金; 激光冲击温强化; 残余应力; 表面硬度; 表面形貌

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.1006002

## Study on Characteristic of Warm Laser Shock Peening of AZ80-T6 Magnesium Alloy

Zhang Qinglai<sup>1</sup> Zhang Qiao<sup>1</sup> Zhang Bingxin<sup>2</sup> Li Xingcheng<sup>3</sup> Liu Hui<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

<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213000, China

**Abstract** Experiment of warm laser shock peening (WLSP) of AZ80-T6 magnesium alloy at room temperature to 300 °C is carried out using Nd: glass laser. The results show that WLSP has obvious warm strengthening effect and generates higher residual compressive stress compared with LSP at room temperature. Surface compressive residual stress (-150 MPa) and micro-hardness get to the highest value at 150 °C. Micro-hardness is improved by 35.8% compared with the substrate, showing the best warm strengthening effect. While the surface micro-hardness tends to be a stable value ranging from 122.1 to 119.1 HV at 150 °C~250 °C, exhibiting a good thermal stability. The three dimensional (3D) profile, surface morphology and surface roughness of the laser shocked craters at different temperatures are analyzed and discussed.

**Key words** laser optics; AZ80 magnesium alloy; warm laser shock peening; residual stress; surface hardness; surface morphology

**OCIS codes** 160.3900; 140.3390; 240.6700; 240.5770

## 1 引 言

激光冲击温强化(WLSP)是一种热机械强化技术,结合了激光冲击强化(LSP)和动态应变时效(DSA)的各自优势。Chang等<sup>[1]</sup>首次利用WLSP技术进行了AA6061铝合金温强化实验及疲劳性能研究,其结果表明:强化表层形成大量的纳米级析出相、高密度位错和更稳定的高幅值残余压应力,明显地提高了合金的疲劳寿命。Chang等<sup>[2-5]</sup>和Tani等<sup>[6]</sup>对AA7075铝合金和AISI4140结构钢也进行了WLSP基础研究,包括动态应变时效及热稳定性。目前为止,WLSP主要针对时效硬化型合金及其组织性能方面研究,而关于温度对不同材料WLSP及其表面残

收稿日期: 2015-04-03; 收到修改稿日期: 2015-05-14

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方面的研究。

E-mail: zhangql196210@163.com

余应力和表面宏观/微观形貌的影响方面未见研究报道。时效型 AZ80 镁合金在热塑性变形过程中发生动态再结晶和动态析出<sup>[7-10]</sup>。经检索, AZ80 镁合金高应变速率激光冲击温强化也未见资料报道。

本文以时效 AZ80 镁合金为研究对象, 在室温到 300 °C 条件下进行了激光冲击温强化实验, 并对冲击表面残余应力、显微硬度及其宏观/微观形貌进行了分析和讨论, 实验结果将对进一步完善激光冲击温强化技术提供理论支持。

## 2 实 验

### 2.1 实验材料与实验方法

本实验选用 AZ80 镁合金轧制板材, 固溶处理: 410 °C/3 h/AC, 时效处理: 170 °C/16 h/AC。固溶时效后 AZ80-T6 镁合金显微组织由均匀分布的细小等轴晶和板条状  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出相组成, 如图 1 所示。

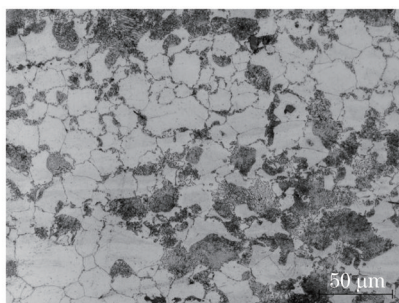


图 1 AZ80-T6 镁合金显微组织  
Fig.1 Microstructure of AZ80-T6 alloy

在 WLSP 实验中分别采用 K9 光学玻璃和 B-1939 耐高温黑漆作为约束层和吸收层。首先将 WLSP 用靶材固定在专用加热模具上, 然后把靶材和模具一起加热到预设温度, 保温一定时间使模具均匀受热, 将黑漆-吸收层均匀喷在镁合金靶材表面, 涂层厚度约 100  $\mu$ m, 然后把 K9 玻璃-约束层固定在靶材上。为了保证靶材温度均匀性, 视靶材厚度控制保温 2~5 min, 待靶材温度均匀后进行 WLSP 实验。WLSP 实验用激光器参数: 激光能量为 6 J, 脉宽为 20 ns, 波长为 1064 nm, 光斑直径为 3 mm, 功率密度为 4.24 GW/cm<sup>2</sup>。激光功率密度  $I$  计算公式为:  $I = 4E/\pi\tau D^2$ , 其中  $E$  为激光脉冲能量,  $\tau$  为脉宽,  $D$  为光斑直径。WLSP 过程示意图和实验设备如图 2 所示。

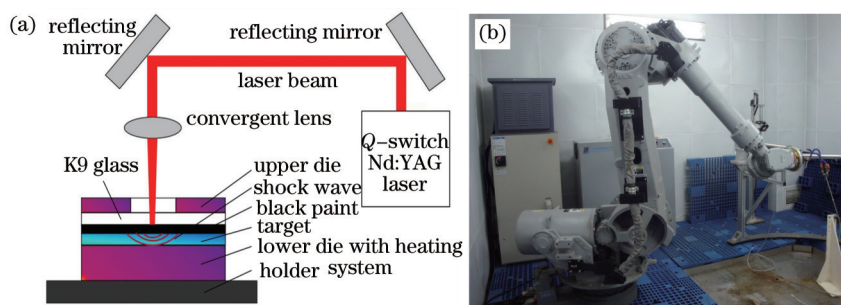


图 2 激光冲击温强化系统(a)示意图及(b)实验设备

Fig.2 (a) Sketch map and (b) experimental equipment for WLSP

采用 X350A 型 X 射线应力测定仪测试靶材表面残余应力。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分析。运用 HVS-1000Z 型显微硬度仪测量冲击显微硬度。采用 Veeco Wyko NT1100 型光学轮廓仪测量激光冲击表面微区形貌及其粗糙度。采用 OLS4100 型激光共焦显微镜对激光冲击凹坑整体三维(3D)轮廓进行测量。

## 3 结果与分析

### 3.1 表面宏观形貌

为了更好地评定 WLSP 后形变凹坑的形貌, 用激光共焦显微镜对冲击凹坑进行拼接分析, WLSP 冲击凹

坑形貌及其整体拼接三维形貌,如图3所示。为了定量表征 WLSP凹坑大小,对凹坑中心 X 方向进行了轮廓测量[凹坑轮廓测试位置如图3(b)所示],冲击凹坑二维轮廓曲线如图4所示。

由图3和图4可观察到,WLSP靶材表面形成了一个近似圆形的凹坑,冲击区发生了塑性变形,凹坑呈平底形状,边缘呈弧状,这是因为圆形光斑的能量呈准高斯分布,即光斑能量从中心到边缘呈减小趋势,导致冲击区边缘塑性变形小于中心部分,以致形成“平底锅状”的凹坑。

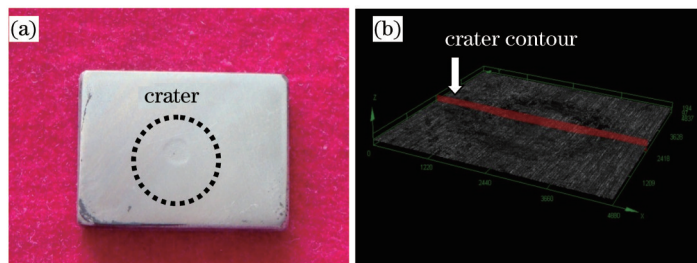


图3 激光冲击温强化后凹坑形貌。(a) 冲击试样;(b) 光学三维形貌

Fig.3 Crater morphology after WLSP. (a) Shocked specimen; (b) 3D optical morphology

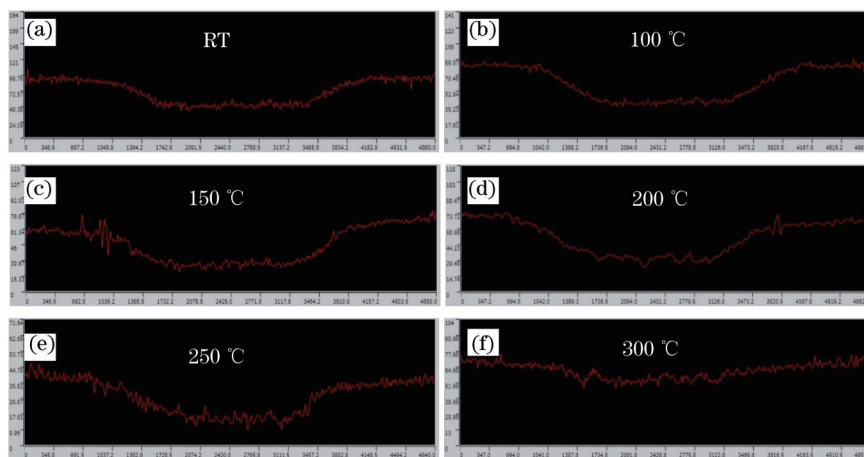


图4 不同温度激光冲击温强化后整体凹坑轮廓

Fig.4 Whole crater contour after WLSP at different temperatures

根据图4中轮廓曲线测出的冲击凹坑深度和宽度,绘出其与温度的变化曲线如图5所示。由图4和图5可以观察到,冲击凹坑深度并不随着温度的增加而减小,而是在200 °C时冲击凹坑深度出现峰值,其数值为58.001  $\mu\text{m}$ 。在室温到200 °C范围内,冲击凹坑深度在50.122~58.001  $\mu\text{m}$ 之间小幅增减波动;在200 °C~300 °C范围内,随着温度增加冲击凹坑深度明显减小,而在300 °C时凹坑出现最小深度(27.246  $\mu\text{m}$ ),这可能是由于激光冲击波导致靶材表面产生较大的塑性变形,冲击中心受到其周围大幅拉应力的作用,冲击变形区产生较大的动态回弹。

由图5还观察到,温度对激光冲击凹坑宽度的影响较小,凹坑宽度在3.19~3.23 mm之间小幅变化。这是

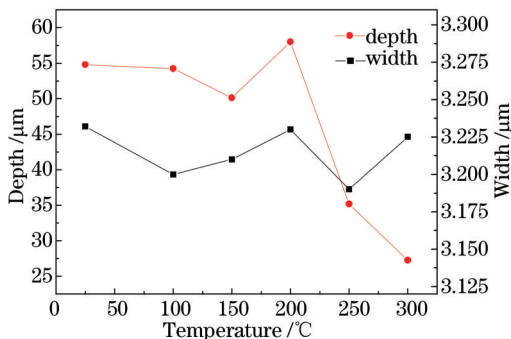


图5 不同温度激光冲击温强化后凹坑深度和宽度

Fig.5 Depth and width of the crater after WLSP at different temperatures

因为激光诱导的冲击波压力与试样温度无关,在WLSF过程中冲击波的产生机理与LSP时相同。已有研究<sup>[1]</sup>表明,激光冲击靶材时激光诱导的冲击波是一维弹塑性波,靶材厚度方向应力波的幅值远高于侧向应力波,与传播距离呈指数关系快速衰减,塑性波无法波及远离光斑作用的其他区域,当应力波峰值小于材料一维应变条件下的 Hugoniot 弹性极限(HEL)时,材料不发生变形,这就使得冲击凹坑宽度趋于一个稳定的范围。

### 3.2 冲击微区形貌和表面粗糙度

图6所示为用 Veeco Wyko 光学轮廓仪测量的激光冲击表面微区形貌。图7为未冲击、室温和 300 °C 时三种试样冲击中心区的二维轮廓。由图6(a)可见,靶材基体表面经砂纸打磨后留有明显的深沟槽形貌。在超应变速率的激光冲击波作用下,靶材表面产生了明显的塑性变形,由于激光能量为准高斯分布,冲击区表层发生不均匀的变形,而且随着实验温度升高,冲击区表层深沟槽变得越来越浅,甚至在 250 °C 激光冲击靶材的表面形貌中未观察到尖锐的沟槽峰,如图6(b)~(g)所示。同时可以观察到,WLSF靶材表面轮廓起伏程度均小于LSP靶材表面轮廓起伏,如300 °C时靶材表面轮廓起伏为-1.15~+1.59 μm,而LSP轮廓起伏为-2.03~+1.02 μm,均高于原始靶材表面轮廓起伏,如图7所示。

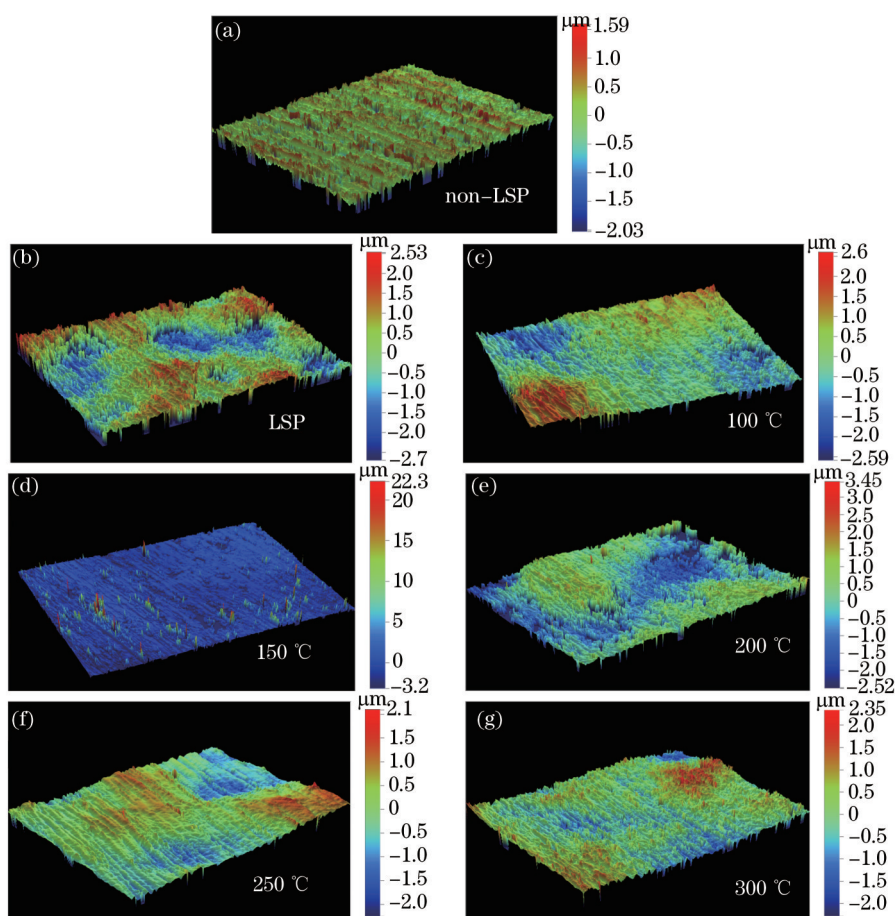


图6 不同温度 WLSF 光斑中心微区 3D-表面形貌

Fig.6 3D-surface morphology of spot center micro-zone by WLSF with different temperatures

图8所示为不同温度下激光冲击区表面粗糙度  $R_a$  与温度之间关系。由图8可知,WLSF表面粗糙度随着温度的升高而降低,且均小于LSP表面粗糙度。如基体靶材表面粗糙度为 0.268 μm,LSP靶材表面粗糙度为 0.694 μm,为基体表面粗糙度的 1.58 倍;300 °C 时 WLSF 靶材表面粗糙度为 0.46 μm,比 LSP 表面粗糙度减小 50% 左右。

### 3.3 残余应力

利用 X 射线应力仪分别测试不同温度下未冲击区和 WLSF 后光斑中心位置的残余应力值。图9为不同温度下激光冲击镁合金表面残余应力测试值。由图9可知,经不同温度激光冲击后,靶材表面残余应力从拉

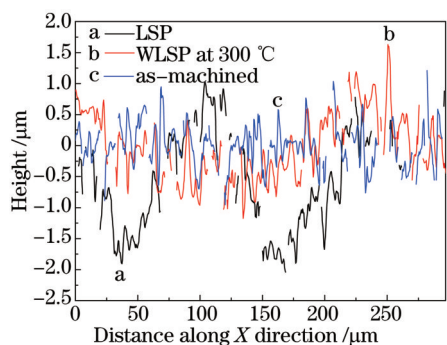


图7 不同温度下WLSP后AZ80-T6合金2D-表面轮廓  
Fig.7 2D-surface profile of AZ80-T6 alloy after WLSP at different temperatures

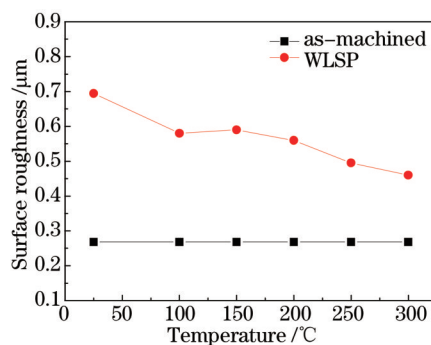


图8 不同温度下WLSP后AZ80-T6合金表面粗糙度  
Fig.8 Surface roughness of AZ80-T6 alloy after WLSP at different temperatures

应力转变为压应力,并产生高幅值残余压应力,且表面残余应力值随着温度增加而发生变化。当温度升到150℃时表面残余压应力达到最大值,即从基体表面的残余拉应力+40 MPa转变为残余压应力-150 MPa,之后随温度的升高表面残余压应力相应地减小。WLSP之所以会提高表面残余压应力,这可能与激光冲击波、动态再结晶、DSA和高密度位错密切相关。因此,WLSP比LSP产生更高的残余压应力,其影响因素是非常复杂的,如温度和再结晶软化等因素。

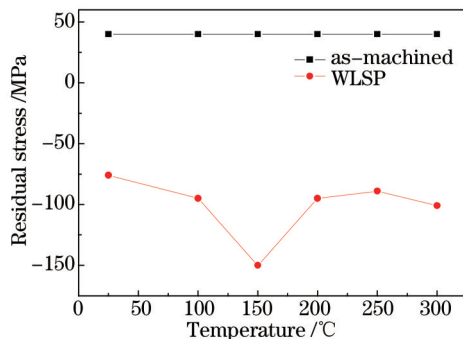


图9 不同温度下WLSP镁合金表面残余应力  
Fig.9 Surface residual stress of magnesium alloy by WLSP at different temperatures

### 3.4 显微硬度

激光诱导的冲击波在材料内部引起高应变率响应,使得表层产生剧烈塑性变形,进而提高了材料的表面显微硬度。本实验中对不同温度下未冲击区和冲击区中心位置分别测量三个点的显微硬度,取平均值来表征不同温度下WLSP表面显微硬度。

图10为不同温度下WLSP凹坑表面显微硬度。由图10可以看出,靶材基体表面显微硬度和冲击表面显微硬度均随着温度的增加而呈现先增加后减小的变化趋势,且WLSP靶材表面显微硬度均高于未冲击表面显微硬度,这可能是由于发生动态再结晶、DSA和Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相析出的缘故。

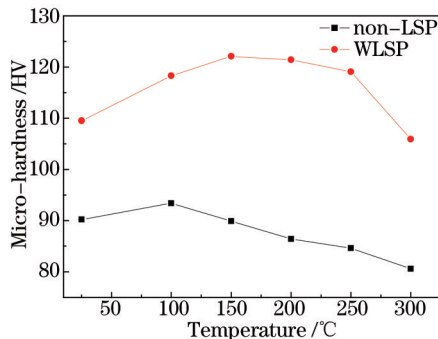


图10 不同温度下WLSP镁合金表面显微硬度  
Fig.10 Surface micro-hardness of magnesium alloy by WLSP at different temperatures

当实验温度为 100 °C 时, 基体显微硬度值为 93.4 HV, 冲击表面显微硬度值增加到 118.3 HV, 较基体显微硬度提高了 26.7%, 获得一定的强化效果; 当试验温度在 150 °C~250 °C 区间, 冲击表面显微硬度趋于稳定值, 其变化范围为 122.1~119.1 HV, 具有良好的热稳定性, 其中 150 °C 时显微硬度最大, 较基体显微硬度(89.9 HV) 提高了约 35.8%, 达到明显的强化效果, 这可能是由于在 150 °C 时 AZ80-T6 镁合金发生 DSA 引起的。根据“钱一萧-李判据模型”<sup>[12]</sup>, 发生 DSA 的温度位于  $0.2 T_m \sim 0.5 T_m$  的范围内, 而镁合金的熔点  $T_m$  约为 650 °C, 如 AZ91D 镁合金 DSA 温度区间为 -25 °C~150 °C<sup>[13]</sup>, 热挤压 AZ81 镁合金发生动态应变时效的温度区间为 125 °C~200 °C<sup>[14]</sup>, 本实验 WLSP 实验温度正符合 DSA 温度。

当温度升至 300 °C 时, 基体显微硬度和冲击表面显微硬度均下降, 其值分别为 80.6 HV 和 105.9 HV, 表面显微硬度提高了 31.4%, 强化效果有下降趋势, 但仍表现出良好的温强化效果。这是因为实验温度在 DSA 温度之外, AZ80 镁合金发生了动态再结晶软化和  $Mg_{17}Al_{12}$  相析出<sup>[15]</sup>。根据文献[7], AZ80 镁合金析出相形状对合金性能影响较大, 如 310 °C 时效时连续析出相呈菱形片状或颗粒状, 对合金性能强化作用较小; 当时效温度小于 250 °C 时, 不连续析出相呈片层状, 对合金性能强化效果明显。

由以上可得出, WLSP 提高了 AZ80-T6 镁合金表面显微硬度, 获得了良好的温强化效果, 特别是 150 °C~250 °C 区间 WLSP 效果明显, 且温强化效果高于室温冲击强化。

### 3.5 讨论

众所周知, 高功率密度激光诱导产生高压等离子体, 等离子体膨胀对靶材产生高幅值、短脉冲的冲击压力, 在超短时间和高应变率( $10^6 \sim 10^7/s$ )的作用下, 当冲击波峰值压力超过动态屈服极限时, 靶材发生塑性变形<sup>[16]</sup>。

根据参考文献[10], AZ80 镁合金在热塑性变形过程中发生动态再结晶和动态析出现象, 且随着温度提高, 合金屈服强度逐渐减小, 塑性和动态再结晶软化逐渐增加, 特别是 300 °C 时软化现象更加明显, 导致合金动态屈服强度大幅下降(动态屈服强度是静态屈服强度 2~4 倍<sup>[16]</sup>), 以致 WLSP 比 LSP 使镁合金获得更大的塑性变形, 但是冲击凹坑深度并不随塑性增加而增加。

本实验表明, WLSP 时形成的冲击凹坑深度除 200 °C 时突变外, 却随温度的增加而减小。而且在 WLSP 处理前镁合金将被加热和保温, 在此期间会发生时效现象, 析出  $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$  相, 随着温度的提高和保温时间的增加, 析出相体积分数快速增加, 其结果导致合金时效强化, 由于这些析出相分布在晶界, 将成为动态再结晶晶核, 加速动态再结晶过程, 会形成更细小动态再结晶晶粒, 而本实验用镁合金进行了预时效处理, 预析出的  $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$  相也将提供大量的动态再结晶晶核, 所有这些现象成为影响凹坑形貌和强化层组织及性能的重要因素。因此, 时效型镁合金 WLSP 是极其复杂的过程, 在超高速超短时间内是否来得及发生动态再结晶和时效析出现象, 尚未见这方面研究报道, 将是今后的研究课题。

## 4 结论

采用钨玻璃脉冲激光器在室温到 300 °C 区间对 AZ80-T6 镁合金 WLSP 实验研究, 得出如下结论:

1) WLSP 比室温产生更高的残余压应力, 当温度为 150 °C 时表面残余压应力达到最大值, 其值为 -150 MPa, 且残余应力受温度、动态回复和再结晶软化影响较大;

2) 激光冲击表面显微硬度随着温度增加而先增加后减小。150 °C 时表面显微硬度最大, 较基体提高了 35.8%, 获得明显的温强化效果; 在 150 °C~250 °C 区间表面硬度趋于稳定值, 表现出良好的热稳定性; 300 °C 时表面硬度提高 31.4%, 也具有好的温强化效果;

3) 冲击凹坑深度不随温度增加而减小, 150 °C 时发生突变而增加; 凹坑宽度受温度影响较小; 冲击表面粗糙度随温度增加呈减小趋势, 而室温时表现出较大的粗糙度。

### 参考文献

- 1 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 Engineering Materials*, 2010, 12(4): 291-297.
- 2 Ye C, Suslov S, Kim B J, *et al.*. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(3): 1014-1025.

- 3 Ye C, Liao Y L, Suslov S, *et al.*. Ultrahigh dense and gradient nano-precipitates generated by warm laser shock peening for combination of high strength and ductility[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2014, 609: 195–203.
- 4 Liao Y L, Ye C, Gao H, *et al.*. Dislocation pinning effects induced by nano-precipitates during warm laser shock peening: Dislocation dynamic simulation and experiments[J]. *J Appl Phys*, 2011, 110(2): 023518.
- 5 Liao Y L, Suslov S, Ye C, *et al.*. The mechanisms of thermal engineered laser shock peening for enhanced fatigue performance[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(13–14): 4997–5009.
- 6 Tani G, Orazi L, Fortunato A, *et al.*. Warm laser shock peening: New developments and process optimization[J]. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 219–222.
- 7 Tang Wei, Han Enhou, Xu Yongbo, *et al.*. Effect of heat treatment on microstructure and properties of AZ80 magnesium alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 41(11): 1199–1206.  
唐 伟, 韩恩厚, 徐永波, 等. 热处理对 AZ80 镁合金结构及性能的影响[J]. *金属学报*, 2005, 41(11): 1199–1206.
- 8 Zhao D G, Wang Z Q, Zuo M, *et al.*. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of extruded AZ80 magnesium alloy[J]. *Materials and Design*, 2014, 56: 589–593.
- 9 Wang Z J, Yang Y Q, Li B C, *et al.*. Effect of hot-deformation on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2013, 582: 36–40.
- 10 Zhou H T, Li Q B, Zhao Z K, *et al.*. Hot workability characteristics of magnesium alloy AZ80–A study using processing map[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(7–8): 2022–2026.
- 11 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 铝合金激光喷丸成形[J]. *中国激光*, 2006, 33(10): 1417–1421.
- 12 Qian Kuangwu, Li Xiaoqi, Xiao Lingang, *et al.*. Dynamic strain aging phenomenon in metals and alloys[J]. *Journal of Fuzhou University*, 2001, 29(6): 8–23.  
钱匡武, 李效琦, 萧林钢, 等. 金属和合金中的动态应变时效现象[J]. *福州大学学报*, 2001, 29(6): 8–23.
- 13 Lin Na, Zeng Shaofeng, Peng Kaiping, *et al.*. Dynamic strain aging phenomenon of AZ91D wrought magnesium alloys[J]. *The Chinese J Nonferrous Metals*, 2010, 20(8): 1455–1460.  
林 娜, 曾绍峰, 彭开萍, 等. AZ91D 变形镁合金的动态应变时效现象[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(8): 1455–1460.
- 14 Chen Lijia, Mao Liang, Zhang Siqian, *et al.*. Tensile deformation behavior of hot-extruded AZ81 magnesium alloy[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2008, 30(4): 419–428.  
陈立佳, 茆 亮, 张思倩, 等. 热挤压 AZ81 镁合金的拉伸变形行为[J]. *沈阳工业大学学报*, 2008, 30(4): 419–428.
- 15 Song Bo, Xin Renlong, Liu Qing. Research progress on effect of precipitation on deformation mechanism of magnesium alloys[J]. *The Chinese J Nonferrous Metals*, 2011, 21(11): 2719–2731.  
宋 波, 辛仁龙, 刘 庆. 析出相对镁合金变形机理影响的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(11): 2719–2731.
- 16 Liu Yuanxun, Wang Xi, Wu Xianqian, *et al.*. Surface morphology and deformation mechanism of 304 stainless steel treated by laser shock peening[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103004.  
柳沉汛, 王 曦, 吴先前, 等. 激光冲击处理 304 不锈钢表面的形貌特征及其机理分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0103004.

栏目编辑: 张浩佳