

AZ91D-T6 铸造镁合金激光冲击强化和高周疲劳性能研究

张青来 吴铁丹 钱 阳 王 荣 洪妍鑫 陈 骏

(江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了研究激光冲击对 AZ91D-T6 铸造镁合金高周疲劳性能的影响,采用钕玻璃脉冲激光器(波长 1064 nm, 脉冲宽度 20 ns),对中心缺口试样进行激光冲击强化(LSP)处理,并进行了拉-拉疲劳试验,分析了表面形貌、表面显微硬度、微观组织、疲劳断口特征和残余应力分布,结果表明:以 1.5 GW/cm² 功率密度和光斑 50% 搭接的激光冲击强化后,中心缺口疲劳试样上下表面形成高残余压应力,显微硬度提高 24% 左右,晶粒明显细化,冲击试样循环周次比未冲击的提高 33.7%,疲劳断口呈解理断裂特征,主要表现为大量解理台阶和河流花样, β -Mg₁₇Al₁₂ 相的存在改变了疲劳裂纹扩展路径。激光冲击延迟了裂纹萌生时间,提高了 AZ91D-T6 铸造镁合金的疲劳寿命。

关键词 材料; 镁合金; 激光冲击强化; 疲劳性能; 残余应力; 微观组织

中图分类号 TN249; TG146.2+2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1003008

Study on High Cycle Fatigue Properties and Laser Shock Processing of AZ91D-T6 Cast Magnesium Alloy

Zhang Qinglai Wu Tiedan Qian Yang Wang Rong Hong Yanxin Chen Jun

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract In order to study the effect of laser shock processing (LSP) on the high cycle fatigue properties of AZ91D-T6 cast magnesium alloy, the test samples with center hole are shocked with Nd:glass laser with the wavelength of 1064 nm and pulse width of 20 ns. Tensile-tensile fatigue test is also carried out on the samples. The surface morphology, surface micro-hardness, microstructures, fatigue fracture characteristics and residual stress are analyzed. The results show that after LSP with power density of 1.5 GW/cm² and spots of 50% overlap rate, high residual compressive stress is generated on the upper and lower surface of the fatigue samples. The micro-hardness of shocking area increases by about 24% and the grains are refined obviously. Fatigue life of the shocked samples is improved by 33.7% than that of the un-shocked samples. The Fatigue fractures show characteristics of the cleavage fracture, and the cleavage steps and river pattern are mainly observed. The crack propagation path is changed because of the existence of the β -Mg₁₇Al₁₂ phase. The crack initiation time is delayed after LSP, which improves the fatigue life of AZ91D-T6 cast magnesium alloy.

Key words materials; magnesium alloy; laser shock processing; fatigue properties; residual stress; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850; 240.6690

1 引 言

变形镁合金作为一种航空用结构材料,疲劳失效是其主要破坏形式之一。随着镁合金应用日益增多,疲劳性能成为人们感兴趣的课题之一,主要集中在

在 AZ31、AZ91 和 ZK60 铸造镁合金高周疲劳性能研究^[1-3]。

激光冲击处理(LSP)作为一种新型的材料表面改性技术,可改善材料耐腐蚀性和耐疲劳性能^[4]。

收稿日期: 2014-05-07; **收到修改稿日期**: 2014-05-13

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、钛合金和激光冲击技术等方面的研究。

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

双面双次激光冲击强化后 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^[5]；LSP 后 2A02 铝合金试件疲劳寿命是未冲击的 2 倍左右^[6]。3 次 LSP 后 ZK60 变形镁合金的疲劳寿命增益达 61%^[7]；黄舒等^[8]研究了 AZ31 镁合金中心缺口试样的激光喷丸形变强化以及疲劳断口，拉-拉疲劳寿命提高了 52.2%；AZ31B 和 ZK60 镁合金激光冲击强化及其疲劳寿命的数值模拟结果表明，高强度材料激光强化高于低强度材料^[9]；Horstemeyer 等^[10]研究了 AZ91E-T4 铸造镁合金高周疲劳性能，讨论了疲劳裂纹形成和扩展；Yang 等^[11-13]研究了 AZ91D-T6 铸造镁合金高周疲劳行为，AZ91 合金含有高 β -Mg₁₇Al₁₂ 相，特别是时效后沿晶界析出大量的 β 相， β 相的存在对合金疲劳裂纹扩展有重要影响。激光冲击提高了 AZ91 镁合金的纳米硬度和力学性能^[14]。关于激光冲击对 AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳性能研究未见报道。

本文通过拉-拉疲劳试验和有限元方法研究了激光冲击 AZ91D-T6 铸造镁合金中心缺口试样残余应力数值分布及高周疲劳行为，讨论 β -Mg₁₇Al₁₂ 相对疲劳裂纹扩展的影响。

2 实 验

实验材料是直径为 90 mm 的 AZ91D 镁合金连铸棒材。利用线切割将其加工成中心缺口疲劳拉伸

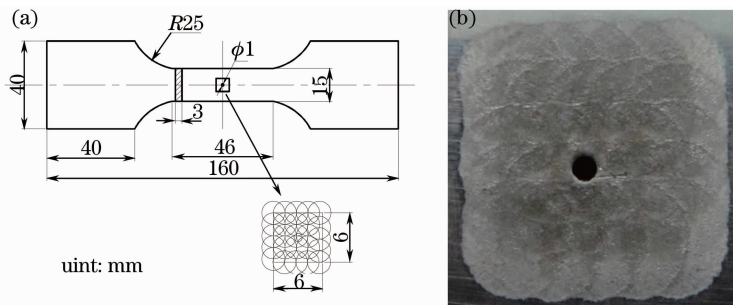


图 1 (a) 试样尺寸和冲击路径及 (b) 激光冲击铝箔表面形貌

Fig. 1 (a) Specimen size with impact path and (b) surface morphology of Al foil by LSP

3 结果与分析

3.1 微观组织

实验以 AZ91D-T6 铸造镁合金作为激光冲击靶材材料。加工疲劳试样前将水冷连续铸造 AZ91D 镁合金棒材进行固溶和时效处理。时效处理(T6)制度：首先按 420 °C/14 h/AC 制度进行固溶处理，然后按 200 °C/15 h/AC 热处理工艺进行时效处理。AZ91D-T6 镁合金显微组织由基体 α -Mg

试样，其工作断面尺寸为 46 mm×15 mm×3.0 mm [见图 1(a)]，中心孔直径为 1 mm，加工流程：1) 线切割成外形尺寸；2) 试样表面用 1000# 金相砂纸打磨抛光；3) 钻中心孔；4) 精镗中心孔至 1 mm；5) 中心孔位置激光单次单面激光冲击强化。

激光冲击工艺参数：激光能量 6 J，脉宽 20 ns，光斑直径 3 mm，计算得激光功率密度为 1.5 GW/cm²，用流动水为约束层，选用厚度为 100 μ m 的专用铝箔作为吸收层。在 LSP 过程中，疲劳试样被夹持在工作台上，采用 50% 的搭接率进行区域冲击强化，冲击区域尺寸为 6 mm×6 mm，如图 1(a) 所示。

疲劳试验在 Instron-8800 液压伺服疲劳试验机上进行，采用应力控制模式，疲劳裂纹扩展实验采用拉-拉正弦波加载，加载频率为 10 Hz，应力比为 0.1，即对称拉压疲劳。试验环境室温空气介质，最大载荷 $F_{\max}=3$ kN，最小载荷 $F_{\min}=0.3$ kN，总应变幅为 1%，循环直至断裂。

采用光学轮廓仪 VEECO WYKO NT1100 对镁合金靶材表面形貌进行测试。用 HVS-1000Z 型显微硬度仪测量镁合金表面显微硬度。利用正置透反射光学显微镜 LEICA DM2500M 观察显微组织。利用热场发射高分辨率电镜 JEOL JSEM-7001F 对镁合金疲劳断口进行分析。

相(灰色)和 β -Mg₁₇Al₁₂ 相(黑色)组成，其中 β -Mg₁₇Al₁₂ 相主要沿晶界连续或非连续析出，如图 2(a) 所示。以 1.5 GW/cm² 激光功率密度对 AZ91D-T6 合金靶材进行激光冲击强化，LSP 后镁合金晶粒明显细化，晶界上 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的形状和分布发生变化，可能是由于激光冲击产生的残余压应力所致，另外在光学显微镜下无法观察到孪晶和位错，如图 2(b) 所示。

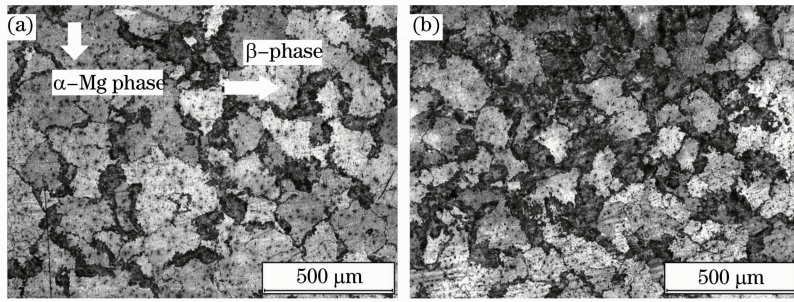


图 2 AZ91D-T6 铸造镁合金微观组织。(a) T6; (b) T6+LSP

Fig. 2 Microstructures of AZ91D-T6 cast magnesium alloy. (a) T6; (b) T6+LSP

3.2 显微硬度

众所周知,激光冲击促使合金表面产生残余压应力同时提高硬度。本文利用显微硬度计对激光冲击 AZ91D-T6 镁合金进行显微硬度测试,表面硬度从冲击区边缘每隔 0.5 mm,而厚向硬度从次表面层 0.1 mm 每隔 0.5 mm 测量 3 组显微硬度值,取其平均值绘制显微硬度变化曲线。图 3 所示为激光冲击 AZ91D-T6 铸造镁合金显微硬度。从图 3(a) 可知,未冲击疲劳试样表面显微硬度平均值为 96.5 HV,激光冲击区边缘显微硬度为 98.3 HV,远离边缘冲击区域显微硬度在 110~120 HV 范围波

动,表面显微硬度相对未冲击提高了 14%~24.3%。表面显微硬度值波动一方面是钨玻璃激光器能量高斯分布所致,另一方面是由于时效过程中 AZ91D 镁合金在晶内和晶界析出 β -Mg₁₇Al₁₂ 相以及晶内 Al₈Mn₅ 相^[15]。随着离冲击表面距离增加合金厚向显微硬度快速降低,当厚度为 1.0 mm 时,厚向硬度缓慢降低,逐渐接近基体硬度,激光冲击影响厚度近 1.5 mm,如图 3(b)所示。因此,功率密度为 1.5 GW/cm² 的激光冲击后,AZ91D-T6 铸造镁合金的表面/厚向显微硬度均得到提高。

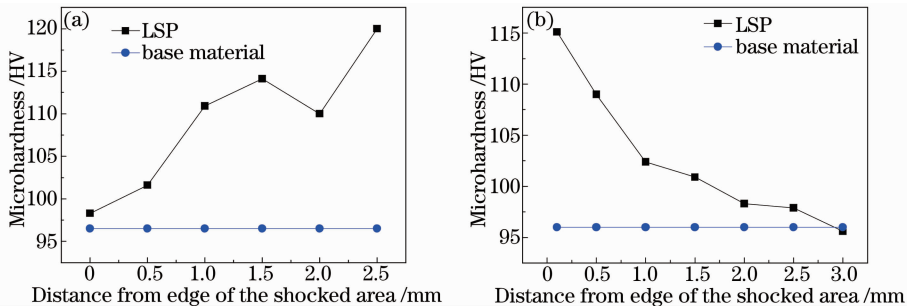


图 3 激光冲击 AZ91D-T6 铸造镁合金显微硬度。(a) 表面; (b) 厚向

Fig. 3 Microhardnesses of AZ91D-T6 cast magnesium alloy by LSP. (a) Surface; (b) along thickness

3.3 残余应力分布

为了绘出激光冲击区域表面残余应力分布,一方面残余应力测试费用高,另一方面冲击靶材加工是否合理,都会影响残余应力测量值。利用有限元模拟方法可以很易地模拟出不同条件下残余应力分布及其变化规律。本文将采用 ABAQUS 有限元分析软件对中心孔板料的激光冲击过程进行数值仿真,来讨论中心孔周围表面和厚向的残余应力分布。激光冲击数值模拟条件:激光脉宽为 20 ns,板料厚度为 2 mm,中心孔直径为 1 mm,光斑直径为 3 mm,50% 搭接区域强化,模拟区域为 6 mm×6 mm,加载的峰值压强选为 2 GPa。

图 4 所示为疲劳试样中心孔周围的残余应力分

布及其云图的模拟结果。由图 4 可观察到 50% 搭接区域激光冲击强化试样的残余应力分布情况。试样中心孔周围冲击表面、下表面和厚向均产生残余压应力,最大残余压应力位于中心孔边缘,其有利于提高镁合金的耐疲劳性能。冲击表面残余应力 S_{11} 最大值为 -123.65 MPa,如图 4(a) 所示,这一模拟结果与裴旭等^[14]对激光冲击 AZ91 铸造镁合金实测最大残余应力 -120 MPa 相符合;下表面同样出现残余压应力,其 S_{11} 最大值为 -31.17 MPa,如图 4(b) 所示;中心孔厚向表面残余应力分布随着深度增加先增后降,中间部分存有残余拉应力,如图 4(c) 所示。根据资料^[16],残余压应力在疲劳过程中被看作负载荷,降低了裂纹尖端的有效应力强度因

子或应力比,增大了裂纹尖端张开的门槛阈值,降低了裂纹扩展速率。因此,激光冲击使中心孔上下表

面产生残余压应力,有利于提高试样的疲劳性能。

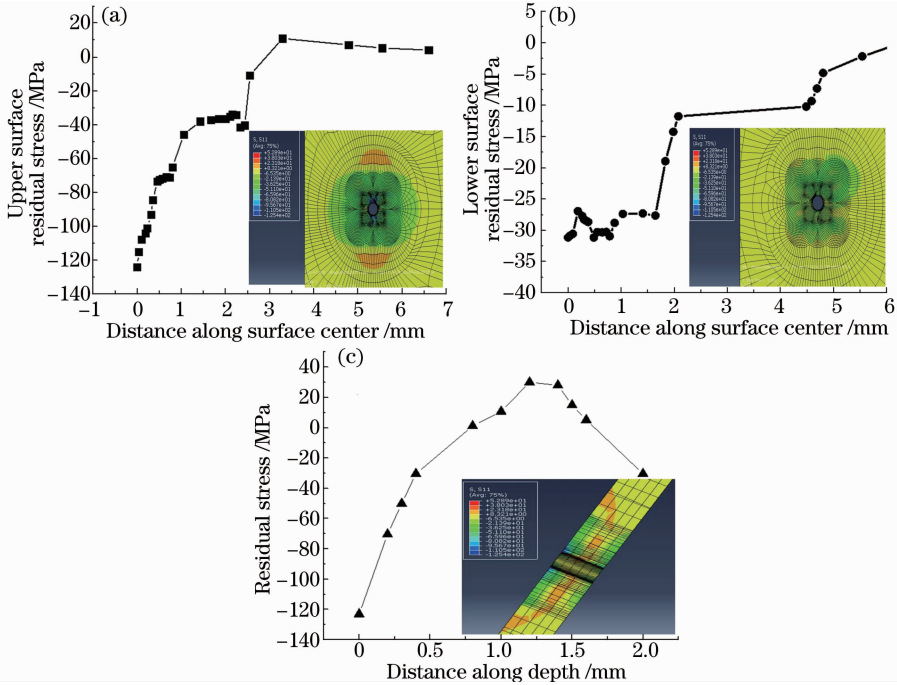


图 4 激光冲击中心孔试样残余应力分布及其云图。(a) 冲击表面; (b) 下表面; (c) 厚度方向
Fig. 4 Residual stress distributions and the corresponding contours of specimens with center hole after LSP.

(a) Shocked surface; (b) lower surface; (c) along thickness

3.4 冲击表面形貌

疲劳裂纹通常起源于表面,表面的粗糙度、应力状态和塑性形变对试件寿命有很大的影响。表面波谷越深,曲率半径越小,越容易形成应力集中;表面粗糙度越大,疲劳极限应力越小,越容易形成疲劳断裂,疲劳寿命越低^[17]。本文试验之所以选择激光功率密度为 1.5 GW/cm²,是因为镁合金表面硬度较低,激光冲击功率密度越高,冲击表面形变越严重,激光冲击波产生的冲击强化效果反而降低。

图 5 是功率密度为 1.5 GW/cm² 时激光冲击 AZ91D-T6 铸造镁合金试样的表面三维形貌和表面

粗糙度变化情况。激光冲击后疲劳试样铝箔保护层表面完整,其表面的激光烧蚀痕迹面积为 6 mm × 6 mm[如图 1(b)所示],小心揭去铝箔并及时用酒精清洗表面。与未冲击试样对比,激光冲击试样表面发生形变,其表面粗糙度 R_t ($R_t = R_p - R_v$, R_p 和 R_v 分别为峰值和谷值)沿 X 方向从 1.98 μm 增加到 3.74 μm ,沿 Y 方向则从 2.04 μm 增加到 3.94 μm ,均增加近 1 倍,如图 5 所示。

3.5 疲劳试验及分析

本文疲劳裂纹扩展实验采用拉-拉正弦波加载,加载频率为 10 Hz,应力比为 0.1,最大载荷 $F_{\text{max}} =$

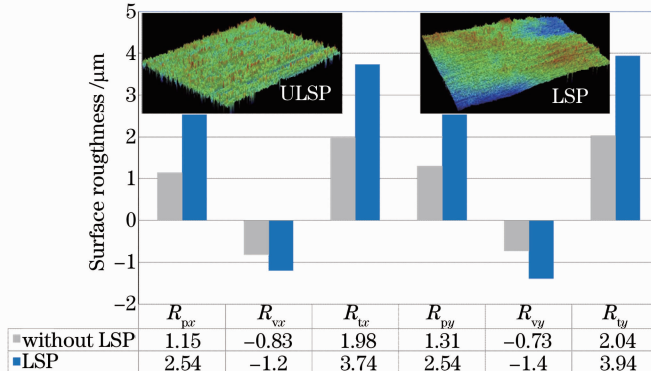


图 5 激光冲击前后 AZ91D-T6 铸造镁合金的表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of AZ91D-T6 cast magnesium alloy before and after LSP

3 kN, 最小载荷 $F_{\min} = 0.3$ kN, 总应变幅为 1%, 循环直至断裂。拉-拉疲劳试验结果表明, 未冲击强化 AZ91D-T6 铸造镁合金试样拉-拉循环周次为 11205, 而功率密度为 1.5 GW/cm^2 的激光冲击强化试样循环周次为 14976, 冲击试样循环周次比未冲击的提高了 33.7%, AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳寿命得到明显提高。下面通过疲劳断口特征来探讨激光冲击对 AZ91D-T6 镁合金强化及疲劳行为的影响。

图 6 为 LSP 后 AZ91D-T6 铸造镁合金试样的疲劳断口扫描电镜(SEM)形貌。从图 6(a)断口全貌可观察到, 激光冲击区试样表面发生了塑性变形(见图 5), 表面显微硬度高于基体(见图 3), 合金脆性增加, 疲劳断口具有解理断裂特征, 由疲劳源(I)、疲劳扩展区(II)和瞬断区(III)三个区域组成。孔角和边缘处是容易产生应力集中和疲劳裂纹位置, 激光冲击后中心孔边缘未见疲劳显微裂纹, 这是因为激光冲击使中心孔周围产生较高的残余压应力, 延迟了裂纹萌生时间。在激光冲击背面中心孔角“A”放大图 6(b)中可见明显的疲劳裂纹源和裂纹扩展区, 未观察到疲劳显微裂纹, 这可能是由于激光冲击中心孔试样背面产生了有利于疲劳寿命的残余压应力缘故, 背面残余压应力 S_{11} 最大值为 -31.17 MPa , 如图 4(b)所示。

图 6(c)~(e)疲劳断口形貌表明, 激光冲击中心孔试样疲劳裂纹源或裂纹多集中在壁厚中间附近, 这可能由于残余拉应力所致, 由图 4(c)中厚向残余应力模拟结果得到证明, 残余拉应力达到 30 MPa 左右。

图 6(c)表明, 疲劳裂纹源产生于中心孔孔壁, 沿扇形放射状条纹扩展, 其扩展路径沿着 α 和 β 相界面, 或穿晶扩展。由图 6(d)可观察到, 在靠近中心孔壁存有一些二次相, 二次相在疲劳载荷的作用下容易引起应力集中而形成裂纹源, 二次相周围产生非扩展裂纹和二次微裂纹, 二次微裂纹沿扇形放射状条纹和 β 晶界扩展, 同时观察到与孔壁和扩展方向成一定角度的扩展性微裂纹。在试样近表面区存在一条与孔壁平行扩展的微裂纹, 并观察到准解理区, 如图 6(e)所示。

图 6(f)中瞬断区清晰的韧窝表明了疲劳变形时的韧性行为, 在放大韧窝撕裂棱上清楚可见大量尺寸小于 $1 \mu\text{m}$ 的细小韧窝, 内存有块状物(即 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相, 三角箭头所指), 这是时效过程中沿晶界析出的大量 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相(见图 2)。因此, 时效析出的大量 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相也是导致疲劳裂纹扩展速率增加的原因, 对 AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳裂纹萌生和扩展有着重要的影响。

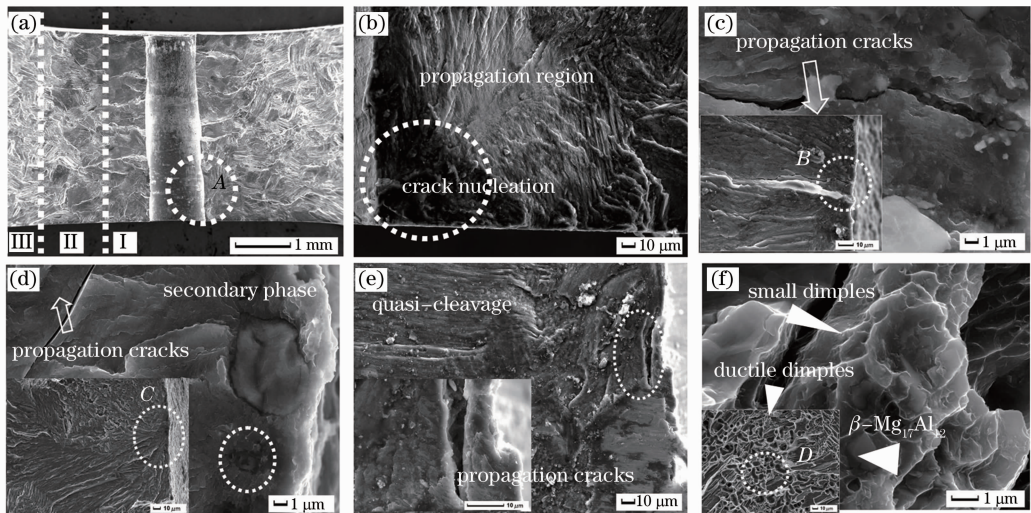


图 6 激光冲击 AZ91D-T6 铸造镁合金试样疲劳断口形貌。(a) 断口全貌; (b) 图(a)放大图; (c), (d), (e) 不同位置表面微裂纹形貌; (f) 瞬断区

Fig. 6 Fatigue fracture morphologies of AZ91D-T6 cast magnesium alloy sample after LSP. (a) Overall fracture image; (b) high magnification of fig. (a); (c), (d), (e) fracture surface with microcracks in different locations; (f) fracture region

图 7 所示为未冲击的 AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳断口形貌。由图 7 可见, AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳断口呈解理断裂特征, 表现为大量解理台阶和河流花样, 在瞬断区观察到韧性撕裂棱存在, 局部区

域可见非扩展微裂纹, 靠近孔壁局部裂纹扩展区观察到放射状条纹, 区别于激光冲击试样疲劳断口形貌(见图 6)。根据 AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳寿命试验结果^[12], 分布于晶界的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相降低了疲

劳裂纹扩展门槛值, 裂纹尖端的局部应力使 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相与 $\alpha\text{-Mg}$ 基体脱开或 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相发生解理断裂, 疲劳裂纹将沿着 α 和 β 相的界面扩展, 或者穿过断裂的 β 相扩展。

由以上研究结果得出, 高应变速率激光冲击在

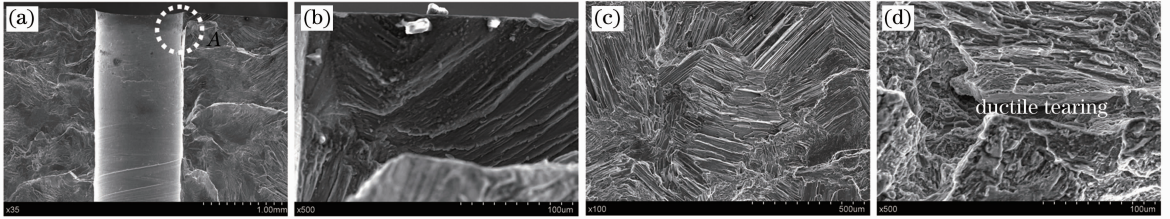


图 7 AZ91D-T6 铸造镁合金试样疲劳断口形貌。(a) 断口全貌; (b) 图(a)放大图; (c) 扩展区; (d) 瞬断区
Fig. 7 Fatigue fracture morphologies of AZ91D-T6 cast magnesium alloy sample. (a) Overall fracture image; (b) high magnification of fig. (a); (c) propagation region; (d) fracture region

4 结 论

1) 激光冲击在 AZ91D-T6 铸造镁合金产生高残余压应力, 表面显微硬度相对未冲击提高了 14%~24.3%, 晶粒明显细化, $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相形状、大小和分布发生变化。

2) 疲劳试验和数值模拟结果表明, 激光冲击中心孔上下表面均产生残余压应力, 冲击试样循环周次比未冲击的提高了 33.7%, AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳寿命得到明显提高。

3) AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳断口具有解理断裂特征, 由疲劳源、疲劳扩展区和瞬断区三个区域组成, 未冲击试样主要表现为大量解理台阶和河流花样, 激光冲击延迟裂纹萌生时间, 晶界析出的大量 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相改变了疲劳裂纹扩展路径, 瞬断区产生大量细小韧窝, 韧性撕裂棱上有 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相存在。

参 考 文 献

- 1 G Murugan, K Raghukandan, U T S Pillai, *et al.*. Influence of transverse load on the high cycle fatigue behaviour of low pressure cast AZ91 magnesium alloy[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(10): 4211-4217.
- 2 F Yang, S M Yin, S X Li, *et al.*. Crack initiation mechanism of extruded AZ31 magnesium alloy in the very high cycle fatigue regime[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 491(1): 131-136.
- 3 W C Liu, J Dong, P Zhang, *et al.*. High cycle fatigue behavior of as-extruded ZK60 magnesium alloy [J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(1): 2916-2924.
- 4 Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianyun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(11): 2925-2930.
- 葛茂忠, 张永康, 项建云. AZ31B 镁合金激光冲击强化及抗应力

AZ91D-T6 铸造镁合金表面层产生较高的残余压应力、晶粒细化以及 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相形状、大小和分布的改变, 能延迟强化层裂纹萌生时间和改变疲劳裂纹扩展路径, 成为改善 AZ91D-T6 铸造镁合金疲劳性能的主要原因。

- 腐蚀研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2925-2930.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Jiang Suqin, Xu Hongguang. Numerical study on strengthening effect of laser shot peening for wrought magnesium alloy [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 217: 2234-2237.
- 10 M F Horstemeyer, N Yang, Ken Gall, *et al.*. High cycle fatigue of a die cast AZ91E-T4 magnesium alloy[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(5): 1327-1336.
- 11 Yang You, Liu Yongbing, Qin Shuying, *et al.*. High cycle fatigue properties of die cast magnesium alloy AZ91D with addition of different concentrations of cerium[J]. *Journal of Rare Earths*, 2006, 24(5): 591-595.
- 12 Yang You, Wu Yaoda. Influences of heat treatment on fatigue properties of AZ91D cast magnesium alloys[J]. *Foundry*, 2009, 58(4): 383-386.
- 杨友, 吴耀达. 热处理对 AZ91D 铸造镁合金疲劳性能的影响 [J]. *铸造*, 2009, 58(4): 383-386.
- 13 Yang You, Liu Yongbing, Yang Xiaohong. High cycle fatigue properties of AZ91D die cast magnesium alloy [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2006, 26(2): 105-107.
- 杨友, 刘勇兵, 杨晓红. 压铸镁合金 AZ91D 高周疲劳性能研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2006, 26(2): 105-107.

- 14 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.
- 15 M Mokhtarishirazabad, S M A Boutorabi, M Azadi, *et al.*. Effect of rare earth elements on high cycle fatigue behavior of AZ91 alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 587: 179-184.
- 16 Nie Defu, Zhao Jie. Fatigue crack growth and overload effect in AZ31 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(5): 771-776.
聂德福, 赵杰. AZ31 镁合金疲劳裂纹扩展和过载效应[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(5): 771-776.
- 17 Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, *et al.*. Influence of laser shock processing on fatigue life of titanium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(9): 1485-1489.
任旭东, 张永康, 周建忠, 等. 激光冲击工艺对钛合金疲劳寿命的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(9): 1485-1489.

栏目编辑: 史敏