

文章编号: 0258-7025(2010)11-2925-06

AZ31B 镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究

葛茂忠^{1,2} 张永康¹ 项建云^{1,2}

(¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 常州轻工职业技术学院模具系, 江苏 常州 213164)

摘要 为了研究激光冲击强化对镁合金性能的影响, 根据优化后的工艺参数, 采用钕玻璃脉冲激光, 对轧制态 AZ31B 镁合金薄板试样表面进行冲击强化实验。实验结果表明, 晶粒得到明显细化, 晶粒大小由 20 μm 左右细化到 10 μm 左右, 试样表面激光诱导的残余压应力高达 -126 MPa。室温下通过三点加载的方法, 对激光冲击、局部区域激光冲击以及未激光冲击的试样在去离子水中进行了应力腐蚀试验, 对其断口进行了宏观和微观分析, 表明激光冲击能够抑制应力腐蚀裂纹的产生和扩展。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 镁合金; 残余压应力; 微观组织; 应力腐蚀开裂

中图分类号 TN249; TG156.99 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2925

Research on Laser Shock Strengthening and Stress Corrosion Cracking Resistance of AZ31B Magnesium Alloy

Ge Maozhong^{1,2} Zhang Yongkang¹ Xiang Jianyun^{1,2}

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

² Mould Department, Changzhou Institute of Light Industry Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China

Abstract In order to study the effect of laser shock processing (LSP) on the properties of magnesium alloy, according to the laser technology parameters after optimization, Rolled AZ31B magnesium alloy sheets surface were processed with Nd: glass laser. Test results showed that grain is refined obviously, grain size changes from about 20 μm to 10 μm . Residual compressive stress induced by LSP reached up to -126 MPa. At room temperature, through three points loading method, samples performed by LSP, local regional LSP and without LSP were immersed in deionized water to carry out stress corrosion experiment. Macroscopical and microcosmical analysis was applied to its fracture surface. It shows that LSP completely prevents stress corrosion cracking (SCC) initiation for AZ31B in deionized water, and it indicates that LSP inhibits the propagation of the SCC crack.

Key words laser technique; laser shock strengthening; magnesium alloy; residual compressive stress; microstructure; stress corrosion cracking

1 引 言

镁合金是目前最轻的金属结构材料, 具有比强度和比刚度高、密度小、阻尼性能好、导热性好、电屏蔽性好和易回收等优点^[1,2], 被认为是 21 世纪最具开发和应用潜力的“绿色材料”, 在航空、航天、汽车、计算机、电子、通信和家电行业有着广泛的应

用^[3,4]。但由于镁合金易腐蚀, 尤其是作为结构零件在使用中往往受到机械应力与腐蚀介质的共同作用, 易产生应力腐蚀开裂(SCC)。SCC 破坏性很大, 断裂前往往没有明显的变形, 人们很难对其加以预测, 常常造成灾难性事故, 从而导致镁合金的使用受到一定的限制。

收稿日期: 2010-02-03; 收到修改稿日期: 2010-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(50735001, 50675089, 50975127)资助课题。

作者简介: 葛茂忠(1970—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事镁合金的激光表面改性方面的研究。

E-mail: gmzxjy@126.com

导师简介: 张永康(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造与检测技术等方面的研究。

E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn(通信联系人)

为了扩大镁合金在汽车和航空领域的应用范围,许多学者采用激光冲击强化技术(LSP)来提高镁合金的综合机械性能(如强度、硬度、耐磨性和耐腐蚀性能等)。激光冲击强化技术是一种新型的表面强化技术。这种技术利用功率密度大于 10^9 W/cm^2 , 脉冲宽度为纳秒量级的激光束穿过透明的约束层辐照材料表面,使涂层材料气化后形成高温和高压等离子体。该等离子体迅速膨胀向外喷射,由于约束层的存在,等离子体的膨胀受到约束限制,导致等离子体压力进一步升高,直到等离子体爆炸产生高强度的冲击波冲击金属材料的表面并向内传播,在形成密集的位错结构的同时,使表面材料发生塑性变形并残留压应力,从而提高金属材料的多种机械性能。

目前,采用激光冲击强化铝合金、不锈钢和钛合金等材料的研究较多,Zhang Yongkang 等^[5]用激光冲击 2024T62 铝合金以提高其抗疲劳断裂的能力;罗新民等^[6]用激光冲击 2A02 变形铝合金以提高其疲劳寿命;Yuji Sano 等^[7]用钽玻璃脉冲激光冲击

304 及 316 不锈钢,实验表明,激光冲击可以抑止裂纹的产生,阻止裂纹的扩展;曹子文等^[8]用激光冲击 1Cr11Ni2W2MoV 材料,实验证明,激光冲击可以提高其疲劳寿命;任旭东等^[9]研究了激光冲击过程中涂层对钛合金机械性能的影响。而采用激光冲击镁合金的研究较少,张永康等^[10]用激光冲击 AM50 镁合金以提高其机械性能,但用激光冲击镁合金提高其抗应力腐蚀性能的研究尚未有报道。本文采用钽玻璃脉冲激光对生产上广泛使用的轧制 AZ31B 镁合金进行冲击处理,并对其工艺参数、微观组织、残余应力及抗应力腐蚀等进行分析与探讨。

2 实验过程

2.1 试样制备

轧制态 AZ31B 镁合金的具体化学成分和机械性能如表 1 所示,试样横截面的微观组织如图 1 所示,试样的组织主要由基相 $\alpha\text{-Mg}$ 及少量分布于晶内的析出相组成。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分(质量分数,%)和机械性能

Table 1 Chemical compositions (mass fraction, %) and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy

Al	Mn	Zn	Fe	Si	Be	Cu	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
3.19	0.334	0.81	0.005	0.02	0.01	0.005	300	220	18

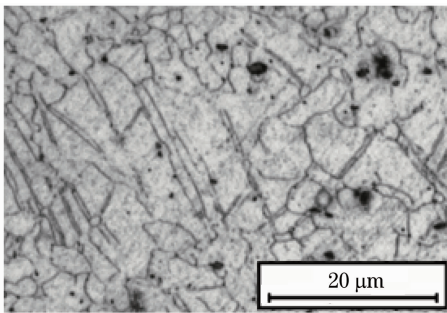


图 1 AZ31B 镁合金微观组织金相图

Fig.1 Microstructure of AZ31B magnesium alloy

根据 ASTM39-79《弯曲梁应力腐蚀试样制备和应用标准方法》,将厚度为 2.2 mm 的轧制 AZ31B 镁合金薄板用线切割机床加工成尺寸为 $135 \text{ mm} \times 30.2 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm}$ 的试样,试样的长度方向与轧制方向平行,试样表面用砂纸逐级打磨,保证最终尺寸为 $135 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,然后用乙醇清洗,接着用冷风吹干。

2.2 实验仪器

实验采用钽玻璃脉冲激光,激光波长 1064 nm,脉冲宽度 23 ns;采用 XJL-02 立式金相显微镜观察、拍摄金相组织;利用 X-350A 型 X 射线应力仪测试表

面残余应力,管电压 22 kV,管电流 6 mA,钴靶 K_α 特征辐射,准直管直径 $\phi=2 \text{ mm}$,阶梯扫描步进角 0.1° ,时间常数 1 s,侧倾角 Ψ 分别取 $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ 和 35° ,应力测试晶面为 (122),应力常数 $K=-129 \text{ MPa}/(^\circ)$,扫描起始及终止角分别为 137° 和 133° ;采用 JSM-7001F 热场发射扫描电镜(SEM)扫描应力腐蚀断面。

2.3 工艺参数优化

合理选择激光参数、涂层及约束层,使之优化组合,对于达到最佳的激光冲击波峰压有着直接的影响,因此,激光冲击处理前必须对这些工艺参数进行优化。

2.3.1 激光功率密度的选择

在激光冲击过程中,材料的应变速率高达 10^7 s^{-1} 以上,属于高应变率^[11]。大多数金属和合金在高应变率下,屈服强度随应变速率的增加而增加,与静态载荷作用时的屈服强度不同。因此,在工程实际中,对于强动载荷常常采用动态屈服强度,它约为静态屈服强度的 2~4 倍^[11]。要使材料发生塑性变形,必须使激光诱导的冲击波压力大于材料的动态屈服强度。实验测得 AZ31B 镁合金的静态屈服强度为 220 MPa,故 AZ31B 镁合金的动态屈服强

度可取为 660 MPa。

由于激光光斑尺寸有限,当激光束垂直于材料表面辐照引起的材料变形,可视为局部材料在其周边为刚性约束条件下的塑性变形,由于试样的横向尺寸大大超过其厚度,所以试样处于一维应变状态,这时材料的动态屈服强度 σ_H 可表示为^[11]

$$\sigma_H = \frac{1-\nu}{1-2\nu}\sigma_0, \quad (1)$$

镁合金的泊松比 $\nu=0.3$,材料一维应力时的动态屈服强度为 $\sigma_0 \approx 660$ MPa。将 ν 和 σ_0 代入(1)式,得 $\sigma_H=1155$ MPa。

激光诱导的冲击波压力 p 的最佳范围为 $2\sigma_H \leq p \leq 2.5\sigma_H$ ^[12],可得 AZ31B 镁合金的最佳范围为

$$2.31 \text{ GPa} \leq p \leq 2.89 \text{ GPa}. \quad (2)$$

许多学者对激光冲击靶材所产生的冲击波压力的估算,已进行了较为深入的研究。为提高激光冲击波压力,P. Peyre 等^[12]建立了激光冲击波传播的一维模型,并对靶材表面的冲击波压力进行了估算

$$p = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \times \sqrt{Z} \times \sqrt{I_0}, \quad (3)$$

式中 α 为内能转化为热能的系数, $\alpha=0.1$; I_0 为入射激光功率密度, Z 为靶材与水约束层的合成冲击波声阻抗,它定义为^[10]

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}, \quad (4)$$

式中 Z_1 为靶材的声阻抗, Z_2 为约束层水的声阻抗。靶材镁合金和约束层水的声阻抗分别为^[10] $Z_1=0.946 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 和 $Z_2=0.165 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

联立(2)~(4)式,可得激光功率密度的最佳范围为 $6 \text{ GW}/\text{cm}^2 \leq I_0 \leq 9.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$,激光功率密度可通过改变脉冲能量和光斑直径进行调整,即激光功率密度满足

$$I_0 = \frac{4E}{\pi D^2 \tau}, \quad (5)$$

式中 E 为激光器脉冲能量, D 为光斑直径, τ 为激光脉冲宽度。由于激光的脉冲宽度恒为 23 ns,实验采用优化后的参数为脉冲能量为 27 J,光斑直径为 5 mm,平均激光功率密度为 $6 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。

2.3.2 涂层与约束层

在激光冲击强化技术研究中,国内外许多学者对合适的涂层^[13,14]、约束层^[15,16]材料及其机理进行了大量的研究。考虑到镁合金易被腐蚀,故选用铝箔作为涂层,铝箔厚度为 0.1 mm,选用水作为约束层,水流厚度为 3 mm。

2.4 激光冲击实验

根据 ASTM39-79,采用三点加载试样,所以设计专用夹具来装夹镁合金薄板,考虑到镁合金易与其他金属形成电偶腐蚀,故选用尼龙作为夹具材料。在制备好的镁合金薄板待冲击区粘贴铝箔并压实,最后将其安装在夹具上,使试样外表面所承受的最大应力(屈服应力)为 220 MPa,为了防止镁合金薄板在冲击过程中失稳变形,故采用双层镁合金薄板。采用优化后的工艺参数和水约束层进行冲击实验,激光光斑搭接率为 30%,激光冲击处理后,去除铝箔,并用乙醇清洗接着用冷风吹干。

2.5 应力腐蚀实验

在室温下,将固定在夹具上的激光冲击、局部区域激光冲击以及未激光冲击的镁合金试样同时浸没在装有去离子水(pH 值在 5 左右)的容器中进行应力腐蚀试验。为了确保化学腐蚀反应不断进行,必须控制 pH 值,使其小于 11^[1],因此每隔 3 天换一次去离子水。定期观察试验现象,记录断裂时间,用乙醇清洗断口后用扫描电镜观察断口形貌。

3 实验结果与分析

3.1 激光冲击后的微观组织

图 2 为试样横截面上激光冲击区的微观组织,与激光冲击前试样横截面上微观组织(见图 1)相比,晶粒更加细小均匀。激光冲击前晶粒平均直径为 20 μm 左右,晶粒比较粗大,而且晶粒大小不均匀;激光冲击后晶粒平均直径为 10 μm 左右,晶粒大小比较均匀,而且激光冲击后晶界清晰完整,这说明激光冲击对材料表面的热影响很小。

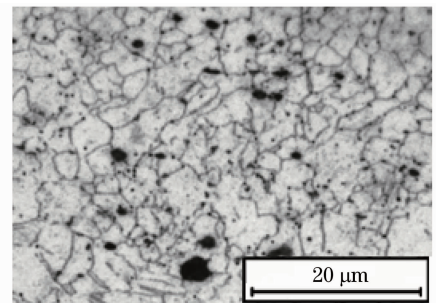


图 2 激光冲击区的微观组织

Fig. 2 Microstructure of LSP area

在激光诱导的强冲击波作用下,材料内部经历了剧烈的塑性变形过程,由于激光脉冲宽度为纳秒级,材料的应变速率高达 10^7 s^{-1} 以上,属于高应变率。关于高应变率加载条件下超细晶的形成机理目

前还存在争议^[17],一般认为,材料在高应变率作用下,原始晶粒在垂直于应力方向被拉长和碎化,从而使得晶粒显著细化。

根据 Hall-Petch 公式^[18]

$$\sigma_s = \sigma_0 + K_y d^{-1/2}, \quad (6)$$

式中 σ_s 为金属的屈服强度, σ_0 为晶格阻力, K_y 为与材料有关的常数, d 为晶粒的直径。可见随着晶粒尺寸的变小,金属的屈服强度值会增大。另外,还能提高材料脆断抗力、塑性和韧性^[18],晶粒的细化使得相同的变形量下,变形分散在较多的晶粒内进行,使变形分布得更加均匀,从而使可能导致局部开裂的应力集中程度减小,并易得到松弛,使材料在断裂前能承受较大的变形量,而呈现出较好的脆断抗力、塑性和韧性,是改善材料机械性能的最好手段之一。

3.2 激光冲击诱导的残余应力

激光冲击处理后,用 X 射线应力仪测试激光冲击区内外的表面残余应力,在激光冲击区表面,残余应力值为 -126 MPa (误差为 $\pm 18.2 \text{ MPa}$),而在远离激光冲击区的表面,其残余应力值为 -2.8 MPa (误差为 $\pm 12.7 \text{ MPa}$)。可见激光冲击处理使冲击区表层产生残余压应力,表面残余压应力值高达 -126 MPa 。

激光诱导的强冲击波使试样表层材料产生塑性变形,次表层发生弹性变形,当激光冲击结束后,表层材料被压扁,离开平衡位置的质点无法回到原先位置,同时塑性层阻挡了已发生弹性变形层的回复,从而在材料表层产生了残余压应力^[10]。材料表面的残余压应力可以平衡材料使用过程中的拉应力,从而阻止应力腐蚀裂纹的产生,抑制应力腐蚀裂纹的扩展,有效提高材料抗应力腐蚀的能力。

3.3 激光冲击对镁合金抗应力腐蚀性能的影响

为了验证激光冲击处理对镁合金抗应力腐蚀性能的影响,将试样分成 3 组,第 1 组为激光冲击试样,第 2 组为局部区域激光冲击试样,第 3 组为激光未冲击试样,将 3 组试样放在相同的腐蚀环境下进行试验。在应力腐蚀试验过程中,试样表面不断有气泡逸出,开始时气泡逸出速率较快,随着时间的延长,气泡逐渐减少,但仍有气泡逸出,每次换去离子水后,重复上述过程。激光未冲击的试样在浸没了 261 h 后,在受拉应力一侧的试样表面出现了许多丝状裂纹,裂纹作横向扩展,并很快连接在一起,形成大的裂纹而断裂(如图 3 所示)。从宏观上看裂纹较平直,裂纹出现在受拉应力最大的区域内,这表明拉应力在应力腐蚀过程中起了重要作用。另外镁合

金板的表面失去了原有的金属光泽变为灰白色,这表明去离子水对镁合金有较强的腐蚀作用。局部区域激光冲击的试样,在激光冲击区域未出现裂纹,而激光未冲击的区域产生了裂纹,该裂纹扩展到激光冲击区域的边缘处就停止了,这说明了激光冲击强化可以阻止应力腐蚀裂纹的扩展(如图 4 所示)。而激光冲击的试样未出现裂纹,这表明激光冲击强化能够抑制应力腐蚀裂纹的产生(如图 5 所示)。

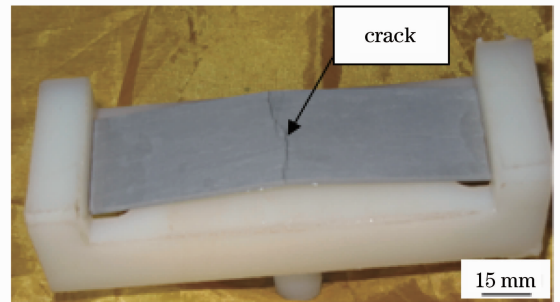


图 3 激光未冲击试样产生应力腐蚀的结果
Fig. 3 SCC results of sample without LSP

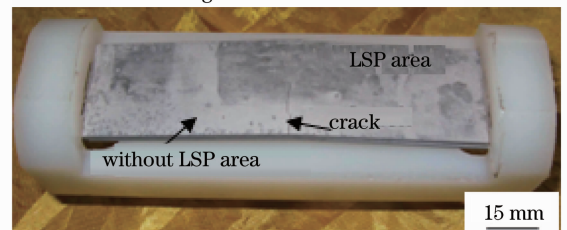
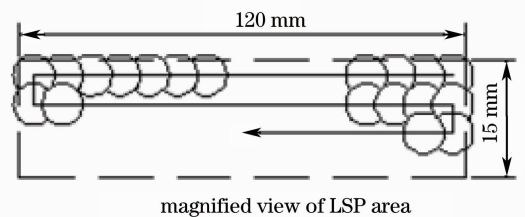


图 4 局部区域激光冲击试样产生应力腐蚀的结果
Fig. 4 SCC results of sample with local regional LSP



图 5 激光冲击试样应力腐蚀的结果
Fig. 5 SCC results of sample with LSP

3.4 断口分析

从宏观上看,在断口上没有出现明显的塑性变形,断口截面未产生明显的收缩现象,断裂面基本上

与所受的拉应力垂直,断口比较平齐,故属于脆性断裂。

图 6 为镁合金 AZ31B 在去离子水中应力腐蚀开裂后的断口 SEM 形貌。从微观上来看,断口形貌表现出明显的应力腐蚀特征:河流状腐蚀裂纹向试样纵深扩展和较多的二次侧向裂纹、泥纹状的花纹以及残留的腐蚀产物等。由于“河流”的流向与裂纹扩展方向一致,所以可以根据“河流”的流向确定裂纹的扩展方向,而按“河流”的反方向可以去寻找断裂源。根据镁合金 AZ31B 应力腐蚀断口形貌,该应力腐蚀断口可以分为 3 个区域:裂纹起源区(裂纹源)、裂纹扩展区及瞬断区[如图 6(a)所示]。这表明在应力及化学腐蚀的共同作用下,首先在受拉应

力一侧的试样表面产生裂纹源,裂纹源主要沿纵向和横向扩展形成裂纹,最终导致断口有效承载面积的减小而断裂。图 6(b)为放大的裂纹起源区断口形貌,可以看到在平坦面上分布着许多龟壳状裂纹,颇象泥土干裂的形貌,这种断口称为泥纹花样,这种平坦面并非是断口的真实形貌,而是在断口表面覆盖了厚厚的一层龟裂的腐蚀产物的结果,而且距离裂纹源越近,腐蚀产物越多。图 6(c)为放大的裂纹扩展区断口形貌,表面已被氧化,覆盖了一层腐蚀产物,可以看到许多沿侧向扩展的二次裂纹。图 6(d)为放大的瞬断区断口形貌,可以看到一些较浅的韧窝,这是由于断口有效承载面积的减小而瞬时塑性断裂的结果。

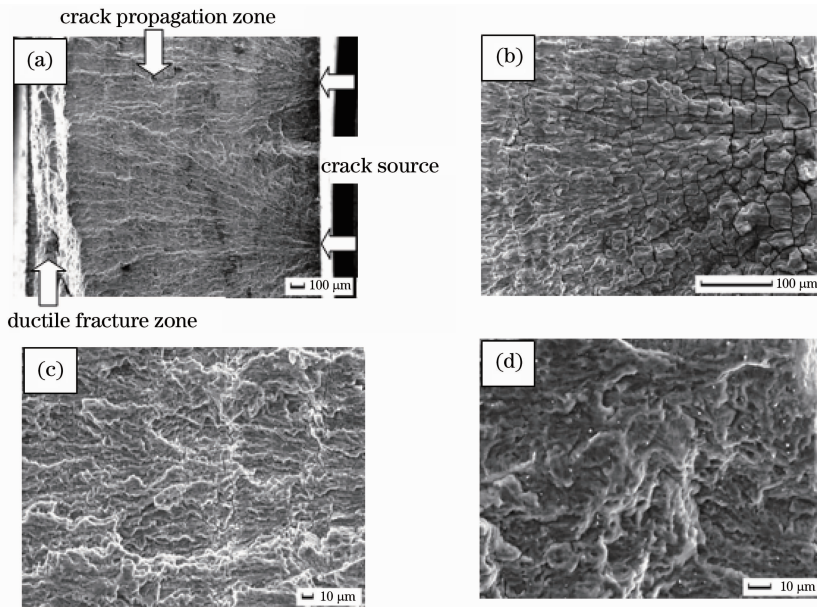


图 6 镁合金 AZ31B 应力腐蚀 SEM 断口形貌

Fig. 6 SEM fractography of SCC of AZ31B magnesium alloy

3.5 断裂路径

镁合金 AZ31B 试样断裂路径金相照片如图 7 所示。由图 7 可知,裂纹的扩展路径穿过晶粒的内部,因此镁合金 AZ31B 在去离子水中的应力腐蚀断

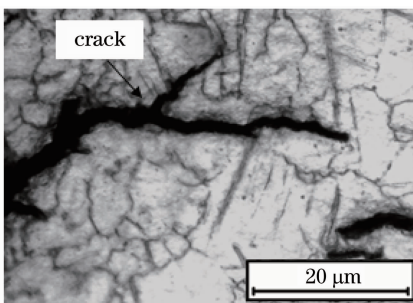


图 7 镁合金 AZ31B 试样断裂路径

Fig. 7 Fracture path of AZ31B magnesium alloy sample

裂属于穿晶型应力腐蚀断裂。裂纹在扩展过程中,在主裂纹的两侧出现了分支裂纹,这是应力腐蚀区别于其他腐蚀的重要特征,主裂纹扩展较快,而分支裂纹扩展较慢。另外主裂纹的扩展是非连续的,这表明在试样表面存在多个裂纹源,这些裂纹源不断作横向扩展,就形成了应力腐蚀主裂纹。主裂纹的扩展方向基本上与试样所承受的拉应力方向垂直。

3.6 二次裂纹

AZ31B 镁合金在去离子水中发生应力腐蚀后,在试样受拉应力的一侧表面上分布着许多二次裂纹^[19],如图 8 所示。而且这些二次裂纹也是非连续的。这也表明试样表面上存在多个裂纹源,这些裂纹的扩展方向与拉应力方向垂直,不同裂纹之间基本上互相平行,而且基本上平行于应力腐蚀断口截面。

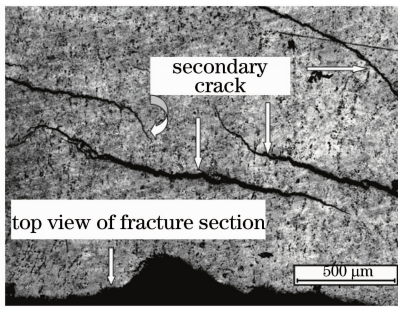


图 8 二次裂纹分布

Fig. 8 Distribution of secondary crack

4 结 论

采用钕玻璃脉冲激光,激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 23 ns,根据优化后的激光工艺参数,脉冲能量为 27 J,光斑直径为 5 mm,厚度为 0.1 mm 的铝箔作为涂层,3 mm 厚的水流作为约束层,对轧制态 AZ31B 镁合金薄板表面进行冲击强化实验,实验表明可以获得理想的冲击效果。晶粒得到明显细化,晶粒平均直径由 20 μm 左右细化到 10 μm 左右,试样表面激光诱导的残余压应力高达 -126 MPa。激光冲击强化表面改性技术,能够抑制镁合金 AZ31B 薄板在去离子水中应力腐蚀裂纹的产生,阻止镁合金 AZ31B 薄板在去离子水中应力腐蚀裂纹的扩展。激光未冲击的镁合金 AZ31B 薄板在去离子水中的应力腐蚀开裂属于穿晶型脆性断裂。

参 考 文 献

- Zhang Jin, Zhang Zonghe. Magnesium Alloys and the Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 1~307
张津,章宗和. 镁合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2004. 1~307
- Song Guangling. Corrosion and Protection of Magnesium[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 10~11
宋光铃. 镁合金腐蚀与防护[M]. 北京:化学工业出版社, 2006. 10~11
- A. Tharumarajah, P. Koltun. Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weight cars? [J]. *J. Cleaner Production*, 2007, **15**(11): 1007~1013
- B. L. Mordike, T. Ebert. Magnesium properties-applications-potential [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, **302**(1): 37~45
- Zhang Yongkang, Zhang Shuyi, Yu Chengye *et al.*. Laser shock-processing for fatigue and fracture resistance [J]. *Science in China (Series E)*, 1997, **4**(2): 170~177
- 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

- Yuji Sano, Minoru Obata, Tatsuyu Kubo *et al.*. Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **417**: 334~340
- Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 316~320
曹子文,邹世坤,刘方军等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 316~320
- Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Study of the effect of coatings on mechanical properties of TC4 titanium alloy during laser shock processing [J]. *Materials Science Forum*, 2006, **532-533**: 73~76
- Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1068~1072
张永康,陈菊芳,许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究 [J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1068~1072
- Zhou Nan, Qiao Dengjiang. Material Dynamics under Pulse Beam Radiation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 1~159
周南,乔登江. 脉冲束辐照材料动力学 [M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 1~159
- P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien *et al.*. Laser shock processing of aluminium alloys. application to high cycle fatigue behavior [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, **210**: 102~113
- Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zuo Dunwen *et al.*. Effect of coating on titanium alloy during laser shock processing [J]. *J. Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2006, **27**(1): 10~13
任旭东,张永康,左敦稳等. 涂层对钛合金激光冲击效果的影响 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, **27**(1): 10~13
- Liu Shiwei, Guo Dahao, Wang Shengbo *et al.*. Effects of experimental parameters on LSP [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10): 937~940
刘世伟,郭大浩,王声波等. 实验参数对激光冲击强化效果的影响 [J]. 中国激光, 2000, **A27**(10): 937~940
- Zhou Jianzhong, Zhou Ming, Xiao Aimin *et al.*. Study of the effects of overlay thickness and flexibility on laser shock processing [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(1): 7~9
周建忠,周明,肖爱民等. 约束层的厚度和柔性对激光冲击强化效果的影响 [J]. 应用激光, 2002, **22**(1): 7~9
- Zhang Lingfeng, Ren Fengzhang, Zhou Heyu *et al.*. Experimental study on actual role area of plasma in laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1224~1228
张凌峰,任凤章,周合玉等. 激光冲击过程中等离子体实际作用面积实验研究 [J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1224~1228
- Zhu Xiangqun, Zhou Ming, Dai Qixun *et al.*. Substructural modification of austenitic stainless steel induced by laser shock [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 1006~1010
朱向群,周明,戴起勋等. 激光冲击奥氏体不锈钢表面的亚结构变化 [J]. 中国激光, 2005, **32**(7): 1006~1010
- Shu Delin. Metal Mechanical Properties [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 1~169
束德林. 金属力学性能 [M]. 北京:机械工业出版社, 1999. 1~169
- N. Winzer, A. Atrens, W. Dietzel *et al.*. Fractography of stress corrosion cracking of Mg-Al alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, **39**(A): 1157~1173