

# 激光冲击层数和氯离子浓度对 AM50 镁合金 耐腐蚀性能的影响

江崇远\*\*, 王长雨, 罗开玉\*, 鲁金忠  
江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 利用激光冲击强化技术对 AM50 镁合金进行了表面处理,研究了试样在 NaCl 溶液中的抗应力腐蚀性能和断口形貌的变化,并对断口进行了成分分析;研究了激光冲击层数和氯离子浓度对 AM50 镁合金耐腐蚀性的影响。结果表明,大面积激光冲击强化处理的 AM50 镁合金表面产生了残余压应力,表层晶粒得到细化,AM50 镁合金的抗应力腐蚀性能得到改善。AM50 镁合金的抗应力腐蚀性能随激光冲击层数的增加而增强,但随氯离子浓度的增大而减弱。

**关键词** 激光技术; 激光冲击强化; AM50 镁合金; 应力腐蚀; 氯离子浓度; 残余压应力

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0902004

## Effects of Laser Shock Layer Number and $\text{Cl}^-$ Concentration on Anticorrosion Behaviors of AM50 Mg Alloys

Jiang Chongyuan\*\*, Wang Changyu, Luo Kaiyu\*, Lu Jinzhong

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

**Abstract** The surface treatment of AM50 Mg alloys is conducted by the laser shock peening (LSP) technique. The resistance to tensile stress corrosion and the fracture morphologies of specimens in NaCl solution are investigated. The compositions of the fracture are also analyzed. The effects of laser shock layer number and  $\text{Cl}^-$  concentration on the anticorrosion behavior of AM50 Mg alloys are researched. The results show that the large area LSP treatment to AM50 Mg alloys can induce the compressive residual stress and make the refinement of surface grains, and thus the resistance to tensile stress corrosion of AM50 Mg alloys is significantly improved. The resistance to tensile stress corrosion of AM50 Mg alloys is enhanced with the increase of laser shock layer number, but is weakened with the increase of  $\text{Cl}^-$  concentration.

**Key words** laser technique; laser shock peening; AM50 Mg alloy; stress corrosion;  $\text{Cl}^-$  concentration; compressive residual stress

**OCIS codes** 140.3390; 310.4925

## 1 引言

镁合金具有比强度高、比刚度高、阻尼性能好等特点,被广泛应用于汽车工业和航空航天领域,但其耐腐蚀性能较差。镁合金构件在潮湿环境中会产生应力腐蚀<sup>[1]</sup>或发生腐蚀疲劳断裂<sup>[2]</sup>,从而发生破坏性事故。因此,改善镁合金的耐腐蚀性能具有重要意义。改善镁合金耐腐蚀性能的

方法主要有提高合金的纯度,开发新的合金,及采取快速凝固技术和表面处理技术等。传统的镁合金表面处理方法主要有机械表面处理<sup>[3]</sup>、化学表面处理<sup>[4]</sup>和高能束表面处理<sup>[5]</sup>等。但机械表面强化处理技术(如喷丸和滚压)诱导的残余压应力层较浅;化学表面处理容易污染环境;高能束表面处理容易在样件表面产生缩孔、微裂纹等缺陷。激光冲击强化(LSP)技术利用高压冲击波使得材料

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-05-07

基金项目: 国家重点研发计划“增材制造与激光制造”重点专项课题(2017YFB1103603)、国家自然科学基金(51575242, 51471078)、江苏省科技计划项目(BE2016148, BE2017142, BK20151341)

\* E-mail: kyluo@ujs.edu.cn; \*\* E-mail: 852527202@qq.com

表层产生超高应变速率的塑性变形,能有效改善材料的微观组织,提高其力学性能<sup>[6]</sup>,减少或延迟裂纹的形核和扩展,延长金属材料的疲劳寿命<sup>[7]</sup>,提高其耐磨性和耐腐蚀性<sup>[8]</sup>。

葛茂忠等<sup>[9]</sup>研究发现,激光冲击强化能够抑制去离子水中的 AZ31 镁合金应力腐蚀裂纹的产生;李兴成等<sup>[10]</sup>研究发现,激光冲击强化提高了 AZ31 镁合金的抗应力腐蚀性能;Zhang 等<sup>[11]</sup>研究发现,激光冲击强化阻碍了 NaOH 溶液中的 AZ31B 镁合金应力腐蚀裂纹的扩展;张永康等<sup>[12]</sup>研究发现,激光冲击强化改善了 AM50 镁合金的力学性能。然而,激光冲击层数和氯离子浓度对镁合金抗应力腐蚀性能影响的研究鲜有报道。

本文对 AM50 铸造镁合金进行了不同层数的激光冲击强化处理,同时,在不同浓度的 NaCl 溶液中进行慢应变速率拉伸实验,对腐蚀断口进行了形貌观测及成分分析,研究了激光冲击层数和氯离子浓度对 AM50 铸造镁合金抗应力腐蚀性能的

影响。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料及试样的制备

采用厚度为 6 mm 的 AM50 铸造镁合金板材作为实验材料,其化学成分见表 1。AM50 铸造镁合金的极限抗拉强度为 221 MPa,屈服强度为 125 MPa<sup>[13]</sup>。采用线切割方式将镁合金板材加工成测试试样,如图 1 所示。试样的厚度为 4 mm,标距部分为 25 mm×7 mm。通过砂纸打磨试样的上下表面,并进行抛光处理。将抛光后的试样用丙酮超声清洗后冷风吹干,冲击面贴上铝箔后进行激光冲击强化实验。

表 1 AM50 镁合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of AM50 Mg alloy (mass fraction, %)

Element	Al	Mn	Cu	Fe	Si	Mg
Content	4.83	0.32	0.001	0.001	0.003	Bal.

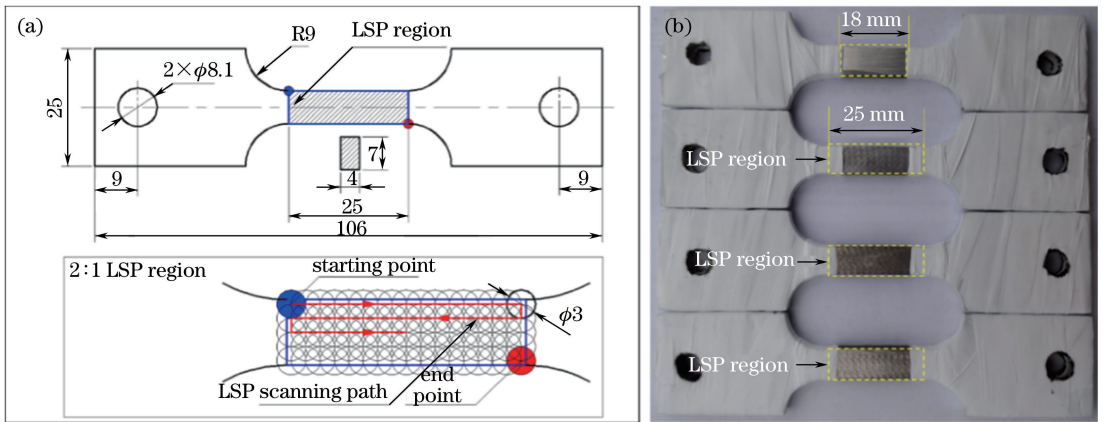


图 1 应力腐蚀试样。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 1 Stress corrosion specimen. (a) Schematic; (b) physical map

### 2.2 大面积激光冲击强化实验

激光冲击强化实验采用 Nd:YAG 激光器,波长为 1064 nm,脉冲宽度 10 ns。光斑直径为 3 mm,脉冲频率为 1 Hz,脉冲能量为 8 J,横向和纵向的光斑搭接率为 50%。采用厚度为 0.1 mm 的铝箔作为吸收层,1 mm 厚的流水作为透明约束层。

实验共有 24 个试样,将其中 9 个试样进行一层双面激光冲击强化处理(LSP-1),3 个试样进行两层双面激光冲击强化处理(LSP-2),3 个试样进行四层双面激光冲击强化处理(LSP-4),其余 9 个试样不进行处理(LSP-0)。采用“Z”字形冲击路径进行激光冲击强化,冲击区域为试样的标距部分,冲击路径如图 1(a)所示。冲击层数概念的详细说明详见文

献<sup>[14]</sup>。

### 2.3 慢应变速率拉伸实验

激光冲击强化实验后,去除试样表面的铝箔,并采用丙酮进行超声清洗。将所有试样用生料带密封处理,仅暴露试样中间的 18 mm 实验区域,如图 1(b)所示。在由微机控制慢应变应力腐蚀试验机上进行实验,最大载荷为 50 kN,最小载荷速率为  $1 \times 10^{-7} \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,慢应变速率为  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。在室温条件下,LSP-0 和 LSP-1 试样在质量分数(全文同)为 3.5%,7%和 14%的 NaCl 溶液中进行慢应变速率拉伸实验,并得到了应力应变曲线,LSP-2 和 LSP-4 试样在 3.5%的 NaCl 溶液中进行慢应变速率拉伸(SSRT)实验,并得到了应力应变曲线。

### 2.4 微观形貌观察实验

采用线切割方式沿断裂方向切割以获取试样的断口,并通过丙酮超声清洗后用冷风吹干。采用日本电子株式会社的JSM-7001F型扫描电子显微镜(SEM)观察断口形貌,并通过扫描电子显微镜自带的X射线能谱仪对试样断口进行成分分析。

## 3 实验结果

### 3.1 冲击层数对 AM50 镁合金抗应力腐蚀性能的影响

试样在 3.5%NaCl 溶液中的应力应变曲线如图 2 所示。可以看出,LSP-0 试样的应力应变曲线的初始斜率较小,随着应变的增大,斜率缓慢增大,应力加速增大;当应力大于 40 MPa 时,应变的增大速率略有减小,到最高点时应力值瞬间减小至零,试样断裂。当应力小于 60 MPa 时,LSP-1、LSP-2、LSP-4

试样的应力应变曲线的斜率逐渐增大,然后斜率明显减小,直到应力值上升到最高点时试样断裂。其中,LSP-2 和 LSP-4 试样在断裂时应力应变曲线的斜率几乎为零,说明应力增幅不大。

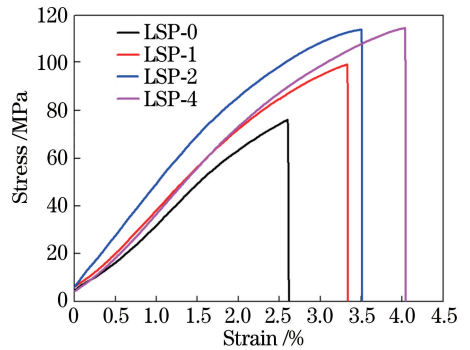


图 2 试样在 3.5%NaCl 溶液中的应力应变曲线  
Fig. 2 Stress-strain curves of specimens in 3.5% NaCl solution

表 2 试样在 3.5%NaCl 溶液中的慢应变速率拉伸实验结果

Table 2 Experimental results of SSRT test of specimens in 3.5% NaCl solution

Specimen	Mass fraction of NaCl /%	Fracture time /h	Tensile strength /MPa	Maximum strain /%
LSP-0	3.5	7.30	76.2	2.56
LSP-1	3.5	9.37	99.4	3.32
LSP-2	3.5	9.85	114.1	3.52
LSP-4	3.5	11.33	114.6	4.04

试样在 3.5%NaCl 溶液中的应力腐蚀结果见表 2,断裂的形貌如图 3 所示。结合表 2 和图 3 可以看出,LSP-0 试样的抗拉强度为 76.2 MPa, LSP-1、LSP-2、LSP-4 试样的抗拉强度分别增大至 99.4, 114.1, 114.6 MPa。大面积激光冲击强化处理明显增大了试样的抗拉强度,且随着激光冲击层数的增加,试样的抗拉强度逐渐增大,但 LSP-2 和 LSP-4 试样的抗拉强度相近。LSP-0 试样的最大应变为 2.56%,LSP-1、LSP-2、LSP-4 试样的最大应变分别增大到了 3.32%, 3.52% 和 4.04%。LSP-0 试样的断裂时间为 7.3 h, LSP-1、LSP-2、LSP-4 试样的断裂时间延长到了 9.37, 9.85, 11.33 h。大面积激光冲击强化处理明显增大了试样的最大应变,延长了断裂时间,且随着激光冲击层数的增加而增大。因此,激光冲击强化处理试样在 3.5%NaCl 溶液中的抗应力腐蚀性能明显增大。

从图 3 可以看出,试样暴露在溶液中的部分腐蚀严重,试样表面腐蚀溶解明显。LSP-0、LSP-1、LSP-2、LSP-4 试样腐蚀区域的剩余宽度分别为 6.44, 6.63, 6.70, 6.77 mm。未冲击试样腐蚀区域的剩余宽度小于激光冲击试样的,说明激光冲击能抑

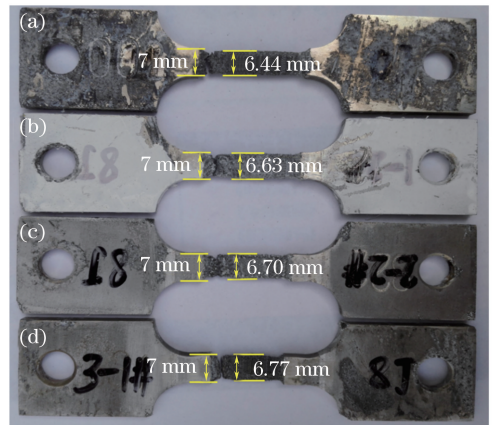


图 3 试样在 3.5%NaCl 溶液中的断裂形貌。  
(a) LSP-0; (b) LSP-1; (c) LSP-2; (d) LSP-4

Fig. 3 Fracture topographies of specimens in 3.5% NaCl solution. (a) LSP-0; (b) LSP-1; (c) LSP-2; (d) LSP-4

制腐蚀过程;激光冲击层数越多,试样腐蚀区域的剩余宽度越大,抑制腐蚀的作用越明显。

试样在 3.5%NaCl 溶液中的近表层断口形貌如图 4 所示。所有试样的断口表面都出现了腐蚀产物。LSP-0 试样的断口是光滑的解理面,断口表面充满了长的河流状花纹<sup>[15]</sup>,断口平滑。这表明

LSP-0 试样发生了解理断裂,解理断裂为脆性断裂,其塑性变形能力差,这与文献[16]的研究发现一致。LSP-1 试样的断口表面出现了不连续的解理面以及较大的解理台阶,同时存在许多弯曲的撕裂棱,河流花纹短并且弯曲,LSP-1 试样发生了准解理断裂。

LSP-2 和 LSP-4 试样的断口表面存在一些小的解理台阶和短的撕裂棱,以及少量的韧窝。由此可知,LSP-2 和 LSP-4 试样的抗应力腐蚀性能明显优于 LSP-0 和 LSP-1 试样,但仍发生的是准解理断裂,有发生韧性断裂的趋势。

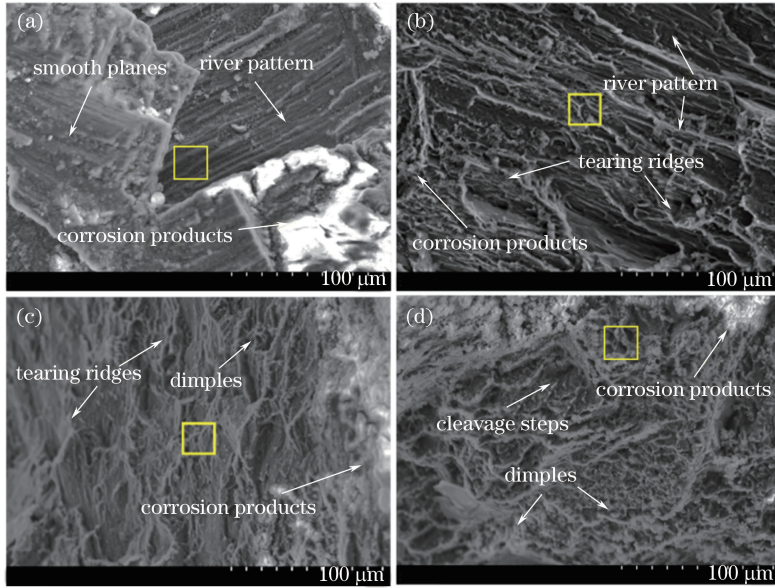


图 4 试样在 3.5%NaCl 溶液中的断口形貌。(a) LSP-0;(b) LSP-1;(c) LSP-2;(d) LSP-4

Fig. 4 Fracture morphologies of specimens in 3.5% NaCl solution. (a) LSP-0; (b) LSP-1; (c) LSP-2; (d) LSP-4

试样在 3.5%NaCl 溶液中的近表层断口能谱图如图 5 所示。可以看出,经过应力腐蚀实验后,所有试样的断口表面出现了 O 元素和 Cl 元素,结合表 1 可知,O 元素和 Cl 元素是应力腐蚀后出现的,而氯离子具有很强的侵入性<sup>[17]</sup>,在腐蚀过程中部分氯离子侵入到了试样表面,因此,在断口表面检测到了 Cl 元素,而 O 元素的出现则是因为形成了氧化物。

未冲击试样的 Mg 元素含量最小,O 元素含量最大,说明未冲击试样溶解的 Mg 元素最多,腐蚀最严重,表明大面积激光冲击强化能够改善 AM50 镁合金的耐腐蚀性。经过激光冲击处理的试样,随着激光冲击层数的增加,Mg 元素的相对含量逐渐增大,而 O 元素的逐渐减小,腐蚀逐渐减弱,表明激光冲击层数的增加进一步改善了 AM50 镁合金的耐腐蚀性。

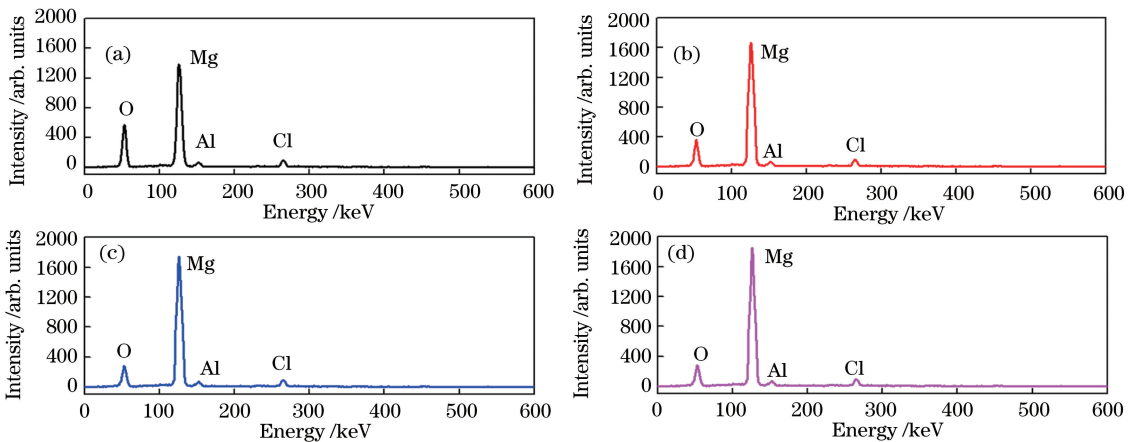


图 5 试样在 3.5%NaCl 溶液中的近表层断口能谱图。(a) LSP-0;(b) LSP-1;(c) LSP-2;(d) LSP-4

Fig. 5 Energy spectra of near surface fracture of specimens in 3.5% NaCl solution.

(a) LSP-0; (b) LSP-1; (c) LSP-2; (d) LSP-4

### 3.2 氯离子浓度对 AM50 镁合金抗应力腐蚀性能的影响

试样在不同浓度 NaCl 溶液中的应力应变曲线如图 6 所示。在 3.5% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 和 LSP-1 试样的应力应变曲线见 3.1 节。在 7% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 和 LSP-1 试样的应力应变曲线以相同的斜率增大至应力值约为 45 MPa, 然后曲线的斜率缓慢减小至 0, 达到曲线的最大值点, 斜率继续减小, 同时应力值开始减小, 约减小 2 MPa 后试样发生断裂。在 14% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 和 LSP-1 试样的应力应变曲线以相同的斜率上升至应力值约为 50 MPa, 然后曲线的斜率缓慢减小至 0,

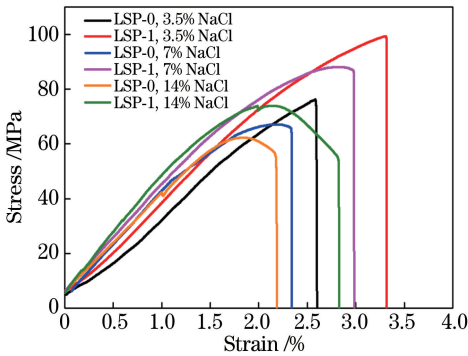


图 6 试样在不同浓度 NaCl 溶液中的应力应变曲线  
Fig. 6 Stress-strain curves of specimens in NaCl solutions with different concentrations

表 3 试样在不同浓度 NaCl 溶液中的慢应变速率拉伸实验结果

Table 3 Experimental results of SSRT test of specimens in NaCl solutions with different concentrations

Specimen	Mass fraction of NaCl /%	Fracture time /h	Tensile strength /MPa	Maximum strain /%
LSP-0	3.5	7.30	76.2	2.56
LSP-1	3.5	9.37	99.4	3.32
LSP-0	7	6.63	69.2	2.38
LSP-1	7	8.42	88.1	2.98
LSP-0	14	6.18	62.3	2.20
LSP-1	14	7.97	73.9	2.81

不同浓度 NaCl 溶液中试样的宏观形貌如图 7 所示。可以看出, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 和 LSP-1 试样腐蚀区域的宽度分别为 6.44 mm 和 6.63 mm; 在 7% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 和 LSP-1 试样腐蚀区域的宽度分别为 5.53 mm 和 5.73 mm; 在 14% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 和 LSP-1 试样腐蚀区域的宽度分别为 5.00 mm 和 5.26 mm。在相同浓度的 NaCl 溶液中, LSP-0 试样比 LSP-1 试样腐蚀严重, 说明大面积激光冲击强化处理能抑制试样腐蚀。随着氯离子浓度的增大, LSP-0 和 LSP-1 试样的腐蚀都越来越严重, 说明氯离子明显加快了试样的腐蚀。

达到曲线的最大值点, 斜率继续减小, 同时应力值开始减小; LSP-0 试样的应力减小 7 MPa 后试样发生断裂, LSP-0 试样的应力减小约 20 MPa 后试样发生断裂。

试样在不同浓度 NaCl 溶液中的慢应变速率拉伸实验结果见表 3。结合图 6 和表 3 可知, 当氯离子的质量分数分别为 3.5%、7% 和 14% 时, LSP-0 试样的抗拉强度从 76.2 MPa 减小到 69.2 MPa 再到 62.3 MPa, 最大应变从 2.56% 减小到 2.38% 再到 2.20%, 断裂时间从 7.30 h 减小到 6.63 h 再到 6.18 h; LSP-1 试样的抗拉强度从 99.4 MPa 减小到 88.1 MPa 再到 73.9 MPa, 最大应变从 3.32% 减小到 2.98% 再到 2.81%, 断裂时间从 9.37 h 减小到 8.42 h 再到 7.97 h。随着氯离子浓度的增大, LSP-0 和 LSP-1 试样的抗应力腐蚀性能都逐渐减小。在 3.5%、7% 和 14% 的 NaCl 溶液中, LSP-1 试样的抗拉强度比 LSP-0 试样的分别增大了 23.2、18.9、11.6 MPa; 最大应变分别增大了 0.76%、0.60%、0.61%; 断裂时间分别延长了 2.07、1.79、1.79 h。可以看出, 在相同氯离子浓度的溶液中, 大面积激光冲击强化能改善试样的抗应力腐蚀性能。随着氯离子浓度的增大, 激光冲击强化对试样抗拉强度的提升幅度减小, 对最大应变和断裂时间的影响不大。

试样在不同浓度 NaCl 溶液中近表层的断口形貌如图 8 所示。所有试样的断口表面都出现了腐蚀产物。在 3.5% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 和 LSP-1 试样的断口形貌见 3.1 节。在 7% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 试样断口表面出现了大的光滑解理面, 河流状花纹长且互相平行; LSP-1 试样断口表面存在解理面, 但其河流状花纹短且弯曲。因此, 在 7% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 试样发生了脆性断裂, 而 LSP-1 试样发生了准解理断裂。在 14% 的 NaCl 溶液中, LSP-0 试样的断口平整, 表面布满大的河流状花纹, 发生了脆性断裂; LSP-1 试样的断口表面出现了解理面以及河流状花纹, 但其河流状花纹短小, 表明

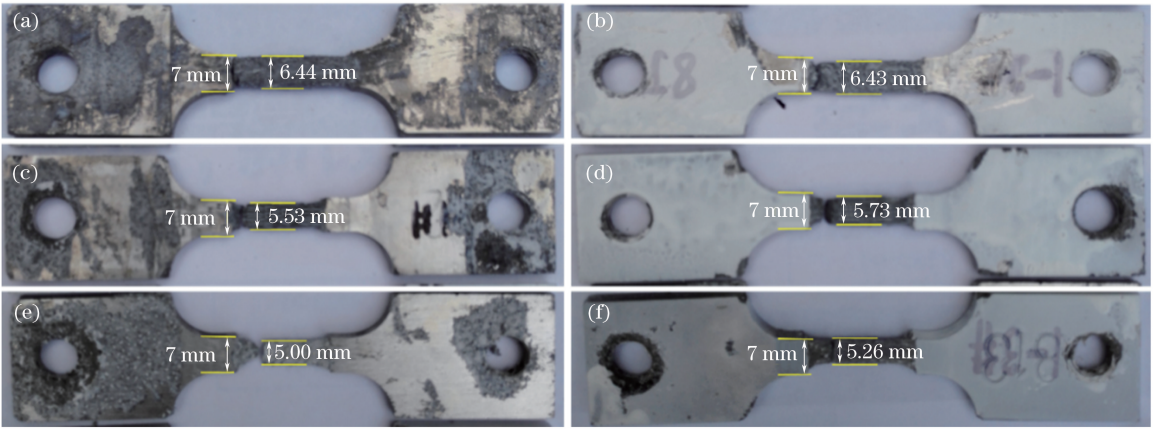


图 7 试样在不同浓度 NaCl 溶液中的断裂形貌。(a) LSP-0,3.5%;(b) LSP-1,3.5%;  
(c) LSP-0,7%;(d) LSP-1,7%;(e) LSP-0,14%;(f) LSP-1,14%

Fig. 7 Fracture topographies of specimens in NaCl solutions with different concentrations.

(a) LSP-0, 3.5%; (b) LSP-1, 3.5%; (c) LSP-0, 7%; (d) LSP-1, 7%; (e) LSP-0, 14%; (f) LSP-1, 14%

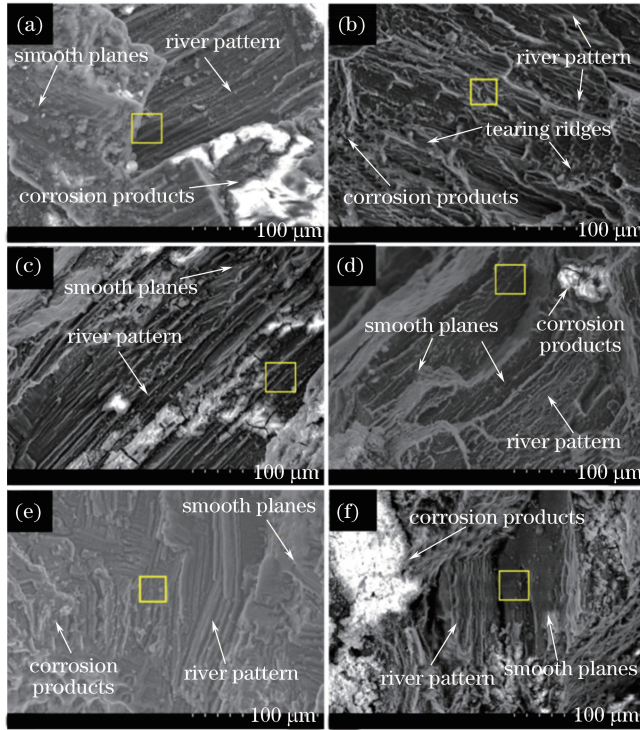


图 8 试样在不同浓度 NaCl 溶液中的断口形貌。(a) LSP-0,3.5%;(b) LSP-1,3.5%;  
(c) LSP-0,7%;(d) LSP-1,7%;(e) LSP-0,14%;(f) LSP-1,14%

Fig. 8 Fracture morphologies of specimens in NaCl solutions with different concentrations.

(a) LSP-0, 3.5%; (b) LSP-1, 3.5%; (c) LSP-0, 7%; (d) LSP-1, 7%; (e) LSP-0, 14%; (f) LSP-1, 14%

发生了准解理断裂。在相同浓度 NaCl 溶液中,大面积激光冲击强化处理改善了试样的抗应力腐蚀性,并且随着氯离子浓度的增大,试样的抗应力腐蚀性减弱。

试样在不同浓度 NaCl 溶液中近表层断口的能谱图如图 9 所示。可以看出,随着氯离子浓度的增大,LSP-0 和 LSP-1 试样中的 Mg 元素含量逐渐减小,O

元素的含量则逐渐增大,说明试样的材料缺失越来越严重,其抗应力腐蚀性能越来越差。在相同氯离子浓度溶液中,LSP-1 试样中的 Mg 元素含量明显大于 LSP-0 试样的,说明激光冲击试样的腐蚀弱于未冲击试样的,大面积激光冲击强化处理明显改善了试样的耐腐蚀性。但随着氯离子浓度的增大,大面积激光冲击强化处理对试样耐腐蚀性的改善减弱。

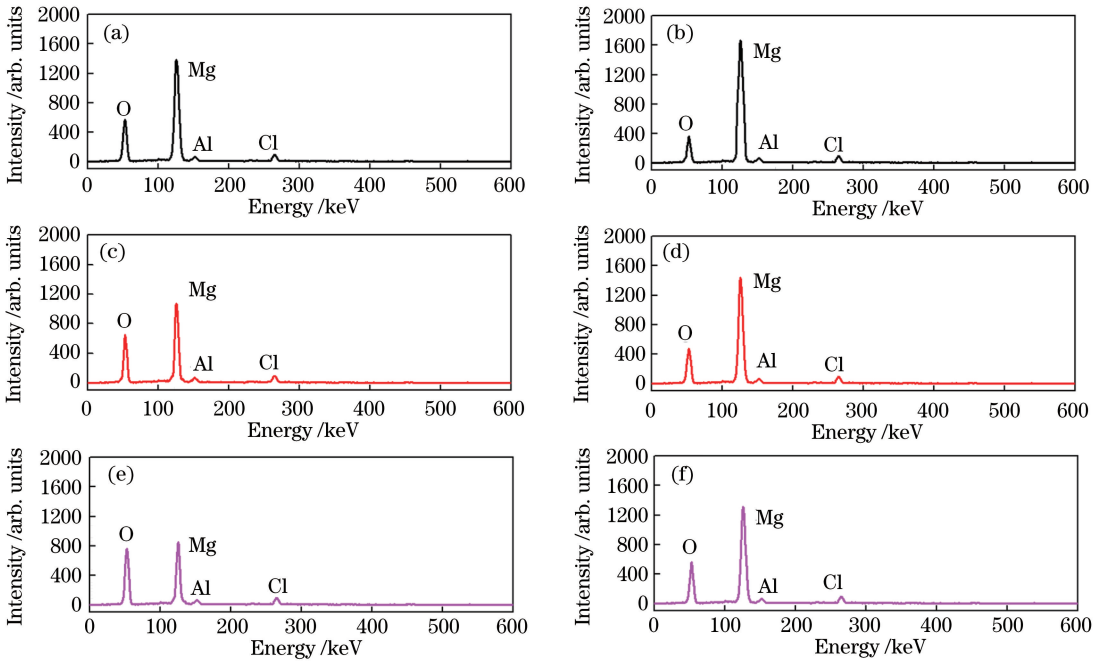


图 9 试样在不同浓度 NaCl 溶液中近表层的断口能谱图。(a) LSP-0, 3.5%; (b) LSP-1, 3.5%; (c) LSP-0, 7%; (d) LSP-1, 7%; (e) LSP-0, 14%; (f) LSP-1, 14%

Fig. 9 Energy spectra of near surface fracture of specimens in NaCl solutions with different concentrations. (a) LSP-0, 3.5%; (b) LSP-1, 3.5%; (c) LSP-0, 7%; (d) LSP-1, 7%; (e) LSP-0, 14%; (f) LSP-1, 14%

## 4 分析与讨论

激光冲击强化及氯离子对试样抗应力腐蚀性能影响的示意图如图 10 所示。镁合金在空气中发生氧化后表面形成氧化物薄膜,阻碍镁合金的进一步腐蚀;而在 NaCl 溶液中,镁合金上施加的拉应力极易破坏氧化物薄膜,氯离子的侵蚀作用加快了镁合金的腐蚀,因此,未冲击的试样腐蚀相对严重。激光冲击强化处理的镁合金表层产生了较大的残余压应力<sup>[18]</sup>,在慢拉伸实验中残余压应力能够抵消部分拉应力。此外,激光冲击强化能够诱导表层晶粒细化,其表面获得表层高密度位错、孪晶和亚晶等显微结构<sup>[10]</sup>,产生更多的晶界,导致位错滑移受阻,使得表层材料发生硬化,晶粒细化能使形成的氧化物薄膜更加致密和稳定,并且晶粒细化层也能阻碍裂纹的产生和扩展<sup>[10]</sup>。残余压应力和表层硬化的共同作用使得氯离子侵入受阻,裂纹萌生及扩展受到一定程度的抑制,AM50 镁合金在 NaCl 溶液中的抗应力腐蚀性能得到提高。随着激光冲击层数的增加,试样表面的残余压应力逐渐增大,表层晶粒更加细化<sup>[19]</sup>,因此,冲击处理试样的抗应力腐蚀性能逐渐增强。

在 NaCl 溶液中,镁合金不仅受到拉应力的作

用,还承受溶液中氯离子的侵袭,且氯离子的浓度对 AM50 镁合金在 NaCl 溶液中的抗应力腐蚀性能的影响很大。随着溶液中氯离子浓度的增大,更多的氯离子附着到材料表面,在拉应力的共同作用下,材料表面的氧化物薄膜被破坏,应力腐蚀速率加快,裂纹萌生进而扩展,同时更多的氯离子随着裂纹侵入到材料内部,导致裂纹扩展速率增大,从而 AM50 镁合金的抗应力腐蚀性能进一步减弱。随着溶液中氯离子浓度的增大,激光冲击强化处理 AM50 镁合金的抗应力腐蚀性能减弱。

## 5 结 论

利用激光冲击强化技术对 AM50 镁合金进行了表面处理,研究了激光冲击层数和氯离子浓度对 AM50 镁合金耐腐蚀性的影响,得到以下结论。

1) 大面积激光冲击强化处理的 AM50 镁合金在 3.5%NaCl 溶液中的抗应力腐蚀性能得到改善,并且随着冲击层数的增加,其抗应力腐蚀性能得到进一步改善。

2) 随着氯离子浓度的增大,激光冲击强化处理前后 AM50 镁合金的抗应力腐蚀性能都减弱。

3) 激光冲击强化处理后,试样表面的残余压应力和表层硬化的共同作用使得氯离子侵入受阻,裂

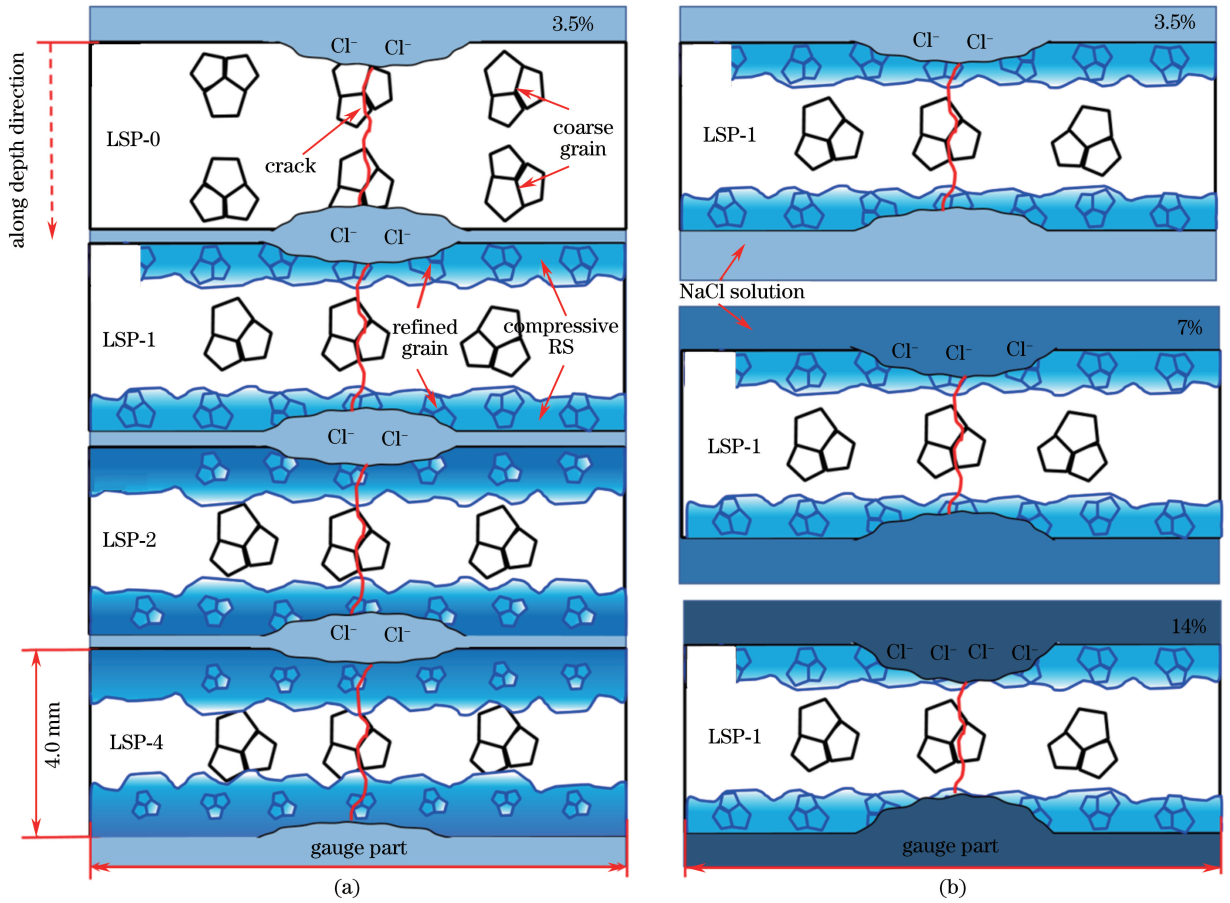


图 10 激光冲击强化层数及氯离子对 AM50 镁合金抗应力腐蚀性能影响的示意图。(a)激光冲击强化层数;(b)氯离子浓度

Fig. 10 Schematic of effects of (a) LSP layer number and (b)  $\text{Cl}^-$  concentration on stress corrosion resistance behaviors of AM50 Mg alloys

纹萌生及扩展受到一定程度的抑制,AM50 镁合金在 NaCl 溶液中的抗应力腐蚀性能得到增强。

参 考 文 献

[1] Cao F Y, Shi Z M, Song G L, *et al.* Stress corrosion cracking of several hot-rolled binary Mg-X alloys[J]. Corrosion Science, 2015, 98: 6-19.

[2] Singh Raman R K, Jafari S, Harandi S E. Corrosion fatigue fracture of magnesium alloys in bioimplant applications: A review [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 137: 97-108.

[3] Zhang P, Ding W J, Lindemann J, *et al.* Mechanical properties of the hot-rolled Mg-12Gd-3Y magnesium alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 118(2/3): 453-458.

[4] Gray J E, Luan B. Protective coatings on magnesium and its alloys—a critical review [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 336(1/2): 88-113.

[5] Wang Z T, Lin X, Cao Y Q, *et al.* External cooling condition effects on formation of anomalous eutectic in Ni-Sn alloy by laser remelting[J]. Chinese Journal

of Lasers, 2014, 41(12): 1203006.

汪志太, 林鑫, 曹永青, 等. 外部冷却条件对激光熔凝 Ni-Sn 合金反常共晶形成的影响 [J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1203006.

[6] Zhang Q L, Wang R, Zhang B X, *et al.* Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0303001. 张青来, 王荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响 [J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303001.

[7] Wang C, Lai Z L, He W F, *et al.* Effect of multi-impact on high cycle fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel subject to laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0103001. 汪诚, 赖志林, 何卫锋, 等. 激光冲击次数对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢高周疲劳性能的影响 [J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103001.

[8] Wang J T, Zhang Y K, Chen J F, *et al.* Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of 7075 aluminum alloy plasma arc



- weldments[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1203006.  
王江涛, 张永康, 陈菊芳, 等. 强激光冲击对 7075 铝合金等离子弧焊接头电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203006.
- [9] Ge M Z, Zhang Y K, Xiang J Y. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy [J]. Chinese Journal of 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腐蚀研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2925-2930.
- [10] Li X C, Zhang Y K, Lu Y L, *et al.* Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0403002.  
李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403002.
- [11] Zhang Y K, You J, Lu J Z, *et al.* Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(24): 3947-3953.
- [12] Zhang Y K, Chen J F, Xu R J. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. Chinese Journal of 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.
- [13] Liu B, Luo K Y, Wu L J, *et al.* Effect of laser shock processing on property and microstructure of AM50 magnesium alloy [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0814003.  
刘波, 罗开玉, 吴刘军, 等. 激光冲击强化对 AM50 镁合金性能和结构的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0814003.
- [14] Lu J Z, Duan H F, Luo K Y, *et al.* Tensile properties and surface nanocrystallization analyses of H62 brass subjected to room-temperature and warm laser shock peening [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 698: 633-642.
- [15] Wang C Y, Luo K Y, Lu J Z. Effect of advancing direction on residual stress fields of AM50 Mg alloy specimens treated by double-sided laser shock peening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303002.  
王长雨, 罗开玉, 鲁金忠. 双面激光喷丸条件下冲击前进方向对 AM50 镁合金试样残余应力场的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303002.
- [16] Yang M, Liu Y H, Zhang Z Y, *et al.* Influence of hot-extrusion on microstructure and mechanical properties of AM50 magnesium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(12): 114-116.  
杨森, 刘耀辉, 张志义, 等. 热挤压对 AM50 镁合金组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(12): 114-116.
- [17] Esmaily M, Shahabi-Navid M, Svensson J E, *et al.* Influence of temperature on the atmospheric corrosion of the Mg-Al alloy AM50 [J]. Corrosion Science, 2015, 90: 420-433.
- [18] Liu Y, Lu J Z, Luo K Y, *et al.* Effect of laser shock processing on tensile property and fracture morphology of CP-Ti under elevated temperature condition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0902005.  
刘月, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 升温条件下激光冲击强化对工业纯钛拉伸性能和断口形貌的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0902005.
- [19] Hu Y X, Yao Z Q, Hu J. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(6): 846-851.  
胡永祥, 姚振强, 胡俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 846-851.