

AM50 镁合金表面激光喷丸强化层耐蚀性能与机理研究

陈菊芳^{1,2} 李兴成^{1,2} 周金宇¹ 叶霞¹

(¹江苏技术师范学院材料工程学院, 江苏 常州 213001
²江苏大学光子制造科学与技术重点实验室, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了研究激光喷丸强化对镁合金耐蚀性能的影响,采用钕玻璃激光对 AM50 镁合金表面进行喷丸强化实验。结果表明,当激光功率密度约 3 GW/cm² 时,表层材料发生塑性变形,致密度、硬度提高并产生较大的残余压应力,表面残余压应力高达 146 MPa。电化学极化曲线测试结果显示,激光喷丸表面的自腐蚀电位和点蚀电位较未处理试样分别提高了 64 mV 和 92 mV,腐蚀电流密度降低了 88.6%。在盐雾环境下连续喷雾 20 h 后,未处理试样表面较激光喷丸试样表面出现了更多更大的点蚀坑,激光喷丸后镁合金表面的腐蚀面积减小了 84.7%。激光喷丸强化使镁合金表面的耐蚀性能得到了显著提高。

关键词 激光技术;激光喷丸;AM50 镁合金;耐蚀性能;极化曲线;盐雾试验

中图分类号 TN249;TG146.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1203001

Research on Corrosion Resistance and Mechanism of Strengthened Layer on AM50 Mg Alloy Surface Processed by Laser Shot Peening

Chen Jufang^{1,2} Li Xingcheng^{1,2} Zhou Jinyu¹ Ye Xia¹

(¹ School of Materials Science and Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China
² Key Laboratory for Science and Technology of Photon Manufacturing, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract In order to study the influence of laser shot peening (LSP) on the corrosion resistance of Mg alloy, some AM50 samples are processed with Nd: glass pulsed laser. The experimental results show that plastic deformation occurred in the surface layer, density and hardness are improved, great compressive residual stress is formed, and the residual stress on the surface reaches 146 MPa with laser power density of 3 GW/cm². The electrochemical polarization results show that the corrosion potential and pitting potential of the LSP sample increase by 64 mV and 92 mV as compared to the untreated sample, respectively, while the corrosion current density decreases about 88.6%. After 20 hours continuous spraying in the salt spray environment, more and larger pits appear on the surface of untreated sample, and the corrosion area is reduced by 84.7% after laser shot peening. The corrosion resistance of AM50 Mg alloy is improved markedly by laser shot peening.

Key words laser technique; laser shot peening; AM50 Mg alloy; corrosion resistance; polarization curve; salt spray test

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 160.3900; 350.3850

1 引 言

镁合金具有密度低、比强度和比刚度高、良好的

减振性和切削加工性,并可回收再利用,被誉为 21 世纪的“绿色工程材料”,广泛应用于航空航天、电子

收稿日期: 2011-08-11; 收到修改稿日期: 2011-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(50805070),江苏省科技计划项目(BK2011261)和江苏省高校自然科学基金(09KJB460002)资助课题。

作者简介: 陈菊芳(1971—),女,博士,副教授,主要从事镁合金的激光表面改性方面的研究。

E-mail: jfchen1031@sina.com

和汽车工业等领域^[1,2],但镁合金低的耐蚀性能限制了其更广泛的应用发展。由于腐蚀是材料的表面行为,因此进行适当的表面处理,改善材料的表面性能是解决镁合金腐蚀问题最直接有效的方法^[3,4]。

半个多世纪以前,人们发现大量弹丸在压缩空气的推动下,形成高速运动的弹丸流不断喷向金属零件表面,通过对表层材料实施冷挤压使金属表层得到强化并产生残余压应力,即工业中广泛应用的机械喷丸(SP)。已有的研究表明,机械喷丸获得的表面强化层和强化层内的残余压应力能有效延缓或抑制腐蚀点的萌生和扩展,使材料的耐蚀性能得到提高^[5,6]。Alobaid^[5]采用铸钢弹丸对不锈钢 2205 表面进行了机械喷丸处理,使材料的应力腐蚀开裂时间延缓了 15 倍以上。倪红芳等^[6]采用玻璃弹丸对 304 不锈钢焊缝进行了喷丸处理,由于采用玻璃弹丸代替铸钢弹丸,克服了喷丸过程中铸钢弹丸碎片残留在工件表面易引起电化学腐蚀的缺点,达到了很好的抗腐蚀效果。

激光喷丸(LSP),或激光冲击,是一种新型的表面强化技术,采用短脉冲强激光束代替有质弹丸,利用脉冲激光与物质作用诱导的冲击波使金属表层产生塑性变形,获得残余压应力,其强化原理类似机械喷丸。与机械喷丸相比,激光喷丸技术具有非接触加工、残余压应力层深、表面粗糙度小、加工硬化程度低、易于自动控制等特点,在抗腐蚀方面具有更好的技术优势^[7]。目前,激光喷丸提高不锈钢、铝合金耐蚀性能的研究较多^[8,9],但激光喷丸提高镁合金耐蚀性能的研究很少^[10],对压铸镁合金的研究未见报道,本文采用钎玻璃脉冲激光对工程中广泛使用的压铸镁合金 AM50 进行喷丸强化处理,并对强化区的表面形貌和成分、显微硬度、残余应力、耐蚀性能及腐蚀机理等进行了研究与探讨。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

实验采用压铸镁合金 AM50,其化学成分见表 1,显微组织见图 1,主要由基相 α -Mg 及少量分布于晶界的析出相 β -Mg₁₇Al₁₂组成。试样用线切割法加工成 25 mm×25 mm×6 mm 的试块,试样表

表 1 AM50 镁合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of AM50 magnesium alloy (mass fraction, %)

Al	Mn	Cu	Fe	Si	Mg
4.83	0.32	0.001	0.001	0.003	Bal

面用 100~1000# SiC 砂纸逐级打磨、丙酮去油、无水乙醇超声振洗、冷风吹干后备用。

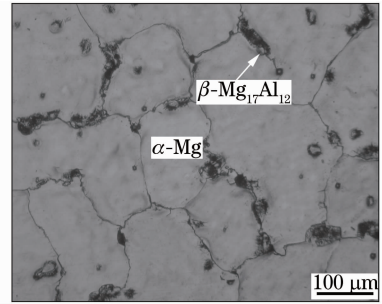


图 1 AM50 镁合金的显微组织

Fig. 1 Microstructure of AM50 magnesium alloy

2.2 激光喷丸强化实验

图 2 为激光喷丸强化示意图,利用功率密度为吉瓦每平方厘米量级、脉冲宽度为纳秒量级的强脉冲激光束穿过透明约束层辐照靶材表面的涂层,涂层吸收激光能量后气化形成高温高压等离子体。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限制,产生高强冲击波冲击金属材料的表面并向内传播,使表层材料发生塑性变形的同时产生残余压应力。实验采用钎玻璃脉冲激光,波长 1054 nm,脉宽 23 ns,采用搭接冲击方式,纵横方向光斑间搭接量均为 30%。从经济、便于清理等角度考虑,实验选择了目前广泛使用的黑漆涂层与水约束层,涂层厚约 100 μ m,流水厚约 3 mm。

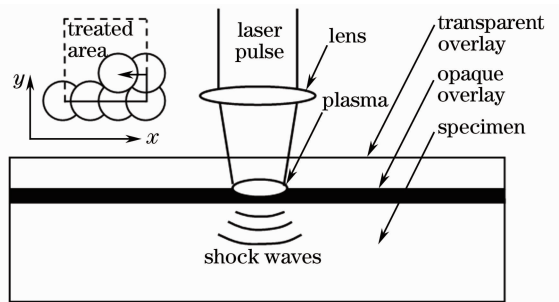


图 2 激光喷丸强化示意图

Fig. 2 Sketch map of laser shot peening

由于激光诱导的应力波近似按一维应变平面波方式传播,一维应变问题中 AM50 镁合金的动态屈服强度 σ_H 约为 660 MPa^[11]。已有的研究表明,当激光诱导的冲击波峰值压力为 $2\sigma_H \leq P \leq 2.5\sigma_H$ 时,可获得最佳强化效果^[7,11]。激光诱导的冲击波峰值压力可表示为^[12]

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (1)$$

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,定义为^[12]

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{target}}} + \frac{1}{Z_{\text{water}}}. \quad (2)$$

对于靶材镁合金和约束层水,其声阻抗分别为 $0.946 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.165 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ^[13,14],联立(1),(2)式可得激光功率密度的最佳范围为 $2.0 \text{ GW}/\text{cm}^2 \leq I_0 \leq 3.1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。由于激光的脉冲宽度为 23 ns,激光功率密度可通过改变脉冲能量和光斑直径进行调整,实验采用脉冲能量 14 J,光斑直径 5 mm,平均激光功率密度约为 $3 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。

2.3 强化效果测试

由于激光诱导的冲击波峰值压力高达吉帕量级,远高于靶材的动态屈服强度,冲击波向靶材内部传播过程中引起表层材料产生塑性变形,材料内产生高密度的位错和孪晶,引起材料强度、硬度提高^[15],冲击波作用结束后,塑性变形层阻挡了表层下既已发生弹性变形层的恢复,因此在材料表层产生残余压应力场^[16]。激光喷丸处理后,采用丙酮清洗去除试样表面残留的黑漆涂层。采用 JSM-6480 型扫描电镜 (SEM) (配有 INCA 型能谱仪) 对表面形貌及成分进行分析。采用 HV-1000 型显微硬度计测试喷丸强化区横截面由表及里的显微硬度分布,加载 100 g,保荷时间 10 s。采用 X-350A 型 X 射线应力仪测试残余应力,为测试材料深层的残余应力,采用电解抛光法将表层材料逐层剥离。

2.4 腐蚀实验

采用 CHI660B 型电化学分析站测试电化学极化曲线,实验采用三电极体系:试样为工作电极,铂片为辅助电极,饱和甘汞电极 (SCE) 为参比电极,扫描速度为 5 mV/s,实验在室温下进行,腐蚀液采用

分析纯 NaCl 和蒸馏水配制的质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液,试样采用线切割法和 400~1000# SiC 砂纸逐级打磨成工作面积为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的试块,从试样背面引出导线,用 704 硅胶将非工作面密封。盐雾腐蚀实验在 YWX/Q010 型盐雾腐蚀试验箱中进行,采用连续喷雾方式,实验温度为 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$,腐蚀液采用分析纯 NaCl 和蒸馏水配置的质量分数为 5% NaCl 溶液,盐雾沉降量为 $1 \sim 2 \text{ mL}/(80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$,实验过程中定期观察试样表面状况,实验结束后采用 SISC IAS V8.0 金相图像分析软件对腐蚀面积进行分析计算。

3 激光喷丸强化效果与分析

3.1 表面形貌与成分

激光喷丸处理后,采用丙酮清洗去除试样表面残留的黑漆涂层,肉眼可见在激光喷丸区留下了光亮的微凹坑,表层材料发生了明显的塑性变形。图 3 为试样表面的扫描电镜微观形貌图,由图可见,激光喷丸后,表面纹路清晰,没有烧伤痕迹,而且因为激光冲击波的瞬时高压使得表面纹路变得更低,材料表面变得更加光滑。采用能谱仪对试样表面成分进行检测可知,激光喷丸试样和未处理试样表面的化学成分没有明显差异,这一结果与文献[8]的实验结果一致。激光喷丸时,脉冲激光穿过透明约束层辐照在涂层上,涂层吸收激光能量后迅速气化、电离、爆炸产生高压冲击波,因激光作用时间极短,仅使涂层表面发生气化、电离,涂层的底部材料起到了热屏障作用,由于涂层的牺牲保护作用,激光喷丸对靶材表面的热影响很小,不会使靶材表面的化学成分发生明显变化。

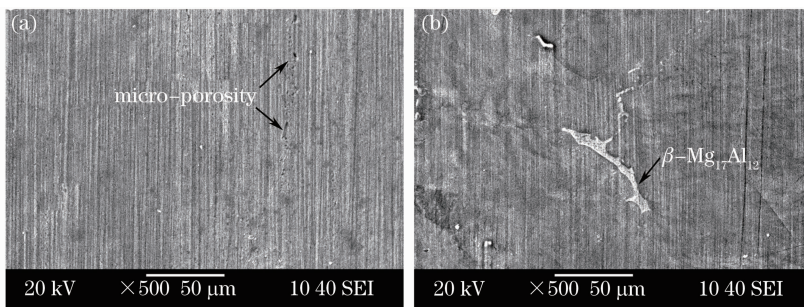


图 3 试样表面的 SEM 微观形貌。(a)激光喷丸处理前;(b)激光喷丸处理后
Fig. 3 SEM micrographs of specimen surface. (a) Before LSP; (b) after LSP

仔细观察可见,未处理试样表面有明显的微观孔隙, Lee 等^[17]研究了不同工艺参数下的压铸镁合金 AM50 中的微观孔隙的分布,结果显示,微观孔

隙是压铸镁合金难以避免的铸造缺陷。宋光铃等^[18]研究了压铸镁合金中的微观孔隙对腐蚀的影响,结果表明,孔隙为腐蚀介质进入镁合金内部提供

了通道,加速了镁合金的腐蚀。由图 3(b)可见,激光喷丸后的表面已没有了明显的孔隙,在激光冲击波的强烈作用下,表层材料被压实,消除了微观孔隙对腐蚀的不利影响。由图 3(b)还可看出,激光喷丸后,有亮白相显露于试样表面,对其进行成分检测可知,其含铝量高达 37% 质量分数,可见该亮白相为 β -Mg₁₇Al₁₂。因 β 相的硬度明显高于基相 α ,在激光冲击波作用下,基相 α 被压低,使较硬的 β 相凸显于试样表面。

3.2 残余应力与显微硬度

实验测得激光喷丸区的残余应力及显微硬度沿深度的分布见图 4。由图可见,表层材料的残余压应力和显微硬度值较高,表面的残余压应力和显微硬度值分别为 146 MPa 和 67 HV,随着到表面距离的增加,残余压应力与显微硬度值逐渐减小,强化层深约 0.8 mm。已有的研究表明,激光喷丸时,激光诱导的冲击波向靶材内部传播过程中,其峰值压力随传播距离的增加逐渐衰减^[19],在靶材表面时最强,对材料的强化效果最好,随着冲击波向靶材内部传播距离的增加,强度逐渐减小,对材料的强化效果也逐渐减弱,因此,表层材料的残余压应力和显微硬度值较高,随着到表面距离的增加,残余压应力和显微硬度值逐渐减小。

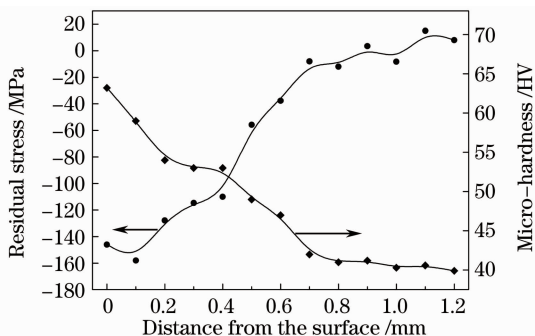


图 4 激光喷丸区残余压应力与显微硬度分布曲线

Fig. 4 Residual stress and micro-hardness profiles of LSP zone

4 强化层的耐蚀性能及机理分析

4.1 电化学极化曲线

试样在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学极化曲线测试结果见图 5,图中分别标出了激光喷丸和未处理试样的自腐蚀电位 E_{corr} 和点蚀电位 E_{pit} 。由图可见,经激光喷丸处理后,镁合金的自腐蚀电位和点蚀电位分别提高了 64 mV 和 92 mV。采用电化学测试软件对极化曲线进行分析计算可

得,激光喷丸试样和未处理试样的腐蚀电流密度分别为 $2.701 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 和 $2.359 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,激光喷丸处理后,试样的腐蚀电流密度减小了 88.6%。进一步仔细观察可见,未处理试样的点蚀电位比它的自腐蚀电位负,但激光喷丸试样的点蚀电位比它的自腐蚀电位正,这样的极化行为意味着激光喷丸前,镁合金在 NaCl 溶液中会自发地产生点蚀破坏,而激光喷丸后,材料的点蚀倾向则较小。可见,激光喷丸使镁合金的电化学稳定性得到显著提高。

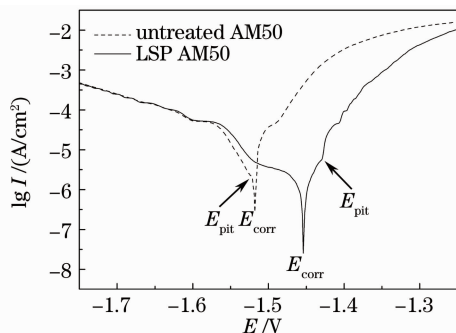


图 5 激光喷丸和未处理试样在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of LSP and untreated sample obtained in a solution of 3.5% NaCl

4.2 盐雾腐蚀实验

盐雾腐蚀实验在 YWX/Q010 型盐雾腐蚀试验箱中进行,实验温度为 $(35 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$,采用连续喷雾方式,实验过程中定期观察试样表面的变化。不足 30 min,未经激光喷丸处理的试样表面就出现了肉眼可见的腐蚀点,而经激光喷丸的试样,2 h 后才出现明显的腐蚀点。随着时间的推移,腐蚀点逐渐扩展变大,并有新的腐蚀点出现,但激光喷丸试样表面的腐蚀点扩展速度及新腐蚀点的出现速度明显缓慢于未处理试样。图 6 为连续喷雾 20 h 后的试样表

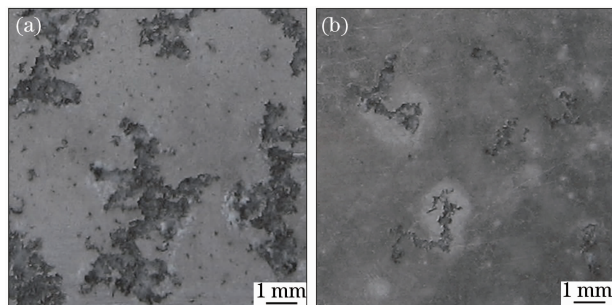


图 6 经盐雾腐蚀 20 h 后的试样表面形貌。

(a) 未处理试样; (b) 激光喷丸试样

Fig. 6 Surface images of samples after 20 h continuous salt spray test. (a) Untreated sample; (b) LSP sample

面形貌,由图可见,未处理试样表面的腐蚀点数量和尺寸明显大于激光喷丸试样,采用 SISC IAS V8.0 金相图像分析软件对腐蚀面积进行分析可得,未处理试样表面的腐蚀面积占试样表面积的 20.9%,而激光喷丸试样仅为 3.2%,激光喷丸后,镁合金的腐蚀面积减小了 84.7%,可见,激光喷丸使镁合金的耐蚀性能得到显著提高。

4.3 腐蚀机理分析

从极化曲线和盐雾腐蚀实验结果可见,激光喷丸使镁合金的耐蚀性能得到显著提高。镁合金耐蚀性能提高的主要原因有:1)镁合金非常活泼,容易在表面形成氧化膜,但由于微观孔隙等铸造缺陷的存在使镁合金的氧化膜变得疏松多孔,对镁合金基体没有良好的腐蚀防护作用。激光喷丸后,镁合金的表层材料被压实,消除了微观孔隙等铸造缺陷,使表面膜的完整性和致密度得到提高,增强了表面膜的腐蚀防护作用。2)微观孔隙为腐蚀介质进入镁合金内部提供了通道,加速了镁合金的腐蚀,激光喷丸消除了微观孔隙对腐蚀的加速作用。3)镁合金在铸造、机械加工、装配等过程中产生的残余拉应力及工作过程中受到的拉应力容易将表面膜撕裂,膜破裂处的表面直接暴露在腐蚀介质中,对腐蚀起加速作用^[20]。激光喷丸使镁合金表面产生较大的残余压应力,残余压应力对拉应力具有平衡作用,在压应力作用下,表面膜不易被撕裂,增加了表面膜的稳定性。4) AM50 镁合金由基相 α 和少量沿晶界析出的 β 相组成,Song 等^[21]的研究表明, β 相比 α 相稳定,在腐蚀介质中, β 相与基相 α 组成腐蚀微电偶, β 相充当阴极加速镁合金的腐蚀。激光喷丸后,由于微观孔隙的消除和残余压应力的存在,提高了基相 α 的稳定性,从而使 β 相与基相 α 构成的微电偶的活性减小。

5 结 论

通过对 AM50 镁合金表面激光喷丸强化处理及对喷丸区的表面形貌、显微硬度、残余应力和耐蚀性能的研究,得出以下结论:1)激光喷丸使镁合金表面留下了光亮的微凹坑,表面形貌良好,没有灼伤痕迹,表面成分没有明显变化;2)激光喷丸使镁合金的表层材料被压实,消除了微观孔隙等铸造缺陷对腐蚀的不利影响;3)激光喷丸对镁合金的强化效果显著,使镁合金表层材料的显微硬度得到明显提高,并在表层材料内产生较大幅度的残余压应力;4)残余压应力能平衡镁合金在生产及工作中的拉应力,使表面膜不容易被撕裂,增强了表面膜的腐蚀防护作

用;5)电化学极化曲线测试和盐雾腐蚀实验结果均表明,激光喷丸强化使镁合金的耐蚀性能得到了显著提高。

参 考 文 献

- 1 A. Tharumarajah, P. Koltun. Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2007, **15**(11): 1007~1013
- 2 B. L. Mordike, T. Ebert. Magnesium properties-applications-potential [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, **302**(1): 37~45
- 3 Guangling Song, Amanda L. Bowles, David H. StJohn *et al.*. Corrosion resistance of aged die cast magnesium alloy AZ91D [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, **366**(1): 74~86
- 4 M. K. Lei, P. Li, H. G. Yang *et al.*. Wear and corrosion resistance of Al ion implanted AZ31 magnesium alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, **201**(9): 5182~5185
- 5 Y. F. Alobaid. The effect of shot peening on stress corrosion cracking behaviour of 2205-duplex stainless steel [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, **51**(1): 19~25
- 6 Ni Hongfang, Ling Xiang, Peng Weiwei. Prevention of stress corrosion cracking in weld joint of type 304 stainless steel by glass bead peening [J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2005, **25**(3): 152~156
- 倪红芳,凌祥,彭薇薇.玻璃喷丸处理提高 304 不锈钢焊接接头抗应力腐蚀性能的研究 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2005, **25**(3): 152~156
- 7 Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 8 P. Peyre, X. Scherpereel, L. Berthe *et al.*. Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, **280**(2): 294~302
- 9 H. Amar, V. Vignal, H. Krawiec *et al.*. Influence of the microstructure and laser shock processing (LSP) on the corrosion behaviour of the AA2050-T8 aluminium alloy [J]. *Corrosion Science*, 2011, **53**(10): 3215~3221
- 10 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腐蚀研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2925~2930
- 11 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
- 12 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 13 Zhou Nan, Qiao Dengjiang. *Materials Dynamics under Pulse Beam Radiation* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 47~69
- 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. 47~69
- 14 Zhang Yongkang, Gao Li, Yang Chaojun. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1282~1287
- 张永康,高立,杨超君.激光冲击 TA2 板料变形的理论分析

- 和实验研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1282~1287
- 15 J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel [J]. *Acta Materialia*, 2010, **58** (16): 5354~5362
- 16 Wu Xianqian, Huang Chenguang, Song Hongwei. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2632~2637
吴先前, 黄晨光, 宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2632~2637
- 17 S. G. Lee, A. M. Gokhale, G. R. Patel *et al.*. Effect of process parameters on porosity distributions in high-pressure die-cast AM50 Mg-alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **427**(1): 99~111
- 18 Song Guangling. Corrosion and Protection of Magnesium Alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 175~179
- 宋光铃. 镁合金腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 175~179
- 19 Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao *et al.*. Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25** (10): 1352~1356
吴 边, 王声波, 郭大浩 等. 强激光冲击铝合金改性处理研究 [J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1352~1356
- 20 Xu Yue, Li Jiayue, Li Sha. Analysis on stress corrosion crack mechanism of magnesium alloys [J]. *Materials Science & Technology*, 2008, **16**(3): 314~318
许 越, 李家学, 李 莎. 镁合金应力腐蚀机理及其影响因素分析[J]. 材料科学与工艺, 2008, **16**(3): 314~318
- 21 Guangling Song, Andrej Atrens, Matthew Dargusch. Influence of microstructure on the corrosion of diecast AZ91D [J]. *Corrosion Science*, 1999, **41**(2): 249~273

栏目编辑: 宋梅梅