

激光冲击强化对 AM50 镁合金性能和结构的影响

刘 波 罗开玉 吴刘军 鲁金忠

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 采用激光冲击强化(LSP)处理方法研究了激光冲击强化对 AM50 铸造镁合金深度方向的晶粒结构、显微硬度和残余应力的影响。结果表明,经过单次冲击强化后,合金表层的显微硬度值、残余压应力值均有明显改善;在冲击强化层,原始粗晶明显细化,表层显微硬度值提高了 19%,残余压应力达到-225 MPa,且显微硬度提高区、晶粒细化层及残余压应力层的深度明显增大;当冲击次数增加到 2 次时,显微硬度、晶粒尺寸和残余应力得到进一步改善。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; AM50 镁合金; 显微硬度; 残余应力; 晶粒分布

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0814003

Effect of Laser Shock Processing on Property and Microstructure of AM50 Magnesium Alloy

Liu Bo Luo Kaiyu Wu Liujun Lu Jinzhong

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

Abstract The method of laser shock processing (LSP) is used to investigate the effect of LSP on the grain structure, micro-hardness, and residual stress of the AM50 magnesium cast alloy along its depth direction. Results indicate that the micro-hardness and residual compressive stress of the alloy surface both have significant improvement after single LSP. On the LSP layer where original coarse grains are refined obviously, the surface micro-hardness value is increased by 19%, and the residual compressive stress is up to -225 MPa. Besides, the depths of the micro-hardness-improved area, grain-refined layer, and residual compressive stress layer are obviously increased. When the impact times is increased to two, the micro-hardness, grain size, and residual compressive stress are further improved.

Key words laser technique; laser shock processing; AM50 magnesium alloy; micro-hardness; residual stress; grain distribution

OCIS codes 140.3390; 310.4925; 160.3900

1 引 言

镁合金具有密度低、比强度和比刚度高、尺寸稳定性好、导热性和导电性良好、阻尼减震性能优良、加工工艺性能优良及回收方便等诸多优点,已成为一种重要的轻质结构材料,在汽车、航空航天、计算机、电子通讯、国防军事等领域得到了广泛应用^[1]。镁合金按成型工艺的不同,可分为铸造镁合金和变形镁合金。其中铸造镁合金的生产工艺较简单,主要通过压铸工艺来生产,该工艺具有生产效率高、精度高、铸件表面质量高等优点,可生产薄壁及外形复杂的制品。但铸造镁合金构件表面微观硬度较低,在潮湿环境中服役时,易产生晶间腐蚀和微电偶腐蚀^[2],在承受静载荷或交变载荷时会产生应力腐蚀^[3]或腐蚀疲劳断裂^[4],进而导致破坏性事故发生。

表面处理是一种提高镁合金表面性能的有效方法。传统的镁合金表面处理方法有很多,根据处理方法

收稿日期: 2016-04-07; **收到修改稿日期:** 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(51275220)、中国博士后特别资助基金(2015T80504)、江苏省自然科学基金(BK20140012, BK20151341)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(2014ZBZZ015)、江苏省高校自然科学研究重大项目(14KJA460002)

作者简介: 刘 波(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光表面改性技术方面的研究。E-mail: liubo200799@163.com

导师简介: 罗开玉(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事激光冲击波非传统制造技术方面的研究。

E-mail: kyluo@ujs.edu.cn(通信联系人)

的机理和特点分可分为机械表面处理^[5]、化学表面处理^[6]和高能束表面处理^[7]。机械表面处理产生的残余压应力层较浅,不能满足需要;化学表面处理的转化涂层主要以高毒性的致癌物铬化物为基础,对环境造成污染;在激光束表面处理中,激光熔凝、激光合金化和激光熔敷等表面技术均利用了激光热效应,热效应会带来表层残余拉应力,并导致一些缩孔、微裂纹等凝固缺陷产生。

激光冲击强化(LSP)是一种新型表面改性强化技术,在高压冲击波作用下材料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,提高材料的力学性能^[8],减少或延迟裂纹的形核和扩展,延长金属材料的疲劳寿命^[9],提高耐磨性和耐腐蚀性^[10]。与传统的表面处理技术相比,激光冲击强化具有高压、高能、高应变率及超短时间等鲜明特点。研究表明,随着冲击次数的增加,金属材料强化效果的提升并不明显;激光冲击强化使材料表面产生微塑性变形,但冲击次数超过两次后,塑性变形深度就不再增加^[11];两次冲击能使材料表层的硬度值从原始的 300 HV 提高到 333 HV,但冲击次数增加到 6 次时,硬度值仅提高到 353 HV^[12];一次冲击能使 AZ31 镁合金的抗腐蚀性能明显提高,但随着冲击次数的增多,抗腐蚀性能没有明显变化^[13]。

目前,国内外关于采用激光冲击强化的方法提高镁合金机械性能的研究报道越来越多,例如激光冲击强化后 AM50 镁合金表面产生高达 -145.9 MPa 的残余压应力^[14],激光冲击强化可有效提高 AZ31B 镁合金的抗腐蚀性能,阻止裂纹形核和扩展^[15]。但关于激光冲击强化对镁合金深度方向力学性能和微观结构的影响的研究鲜有报道。

本文以 AM50 铸造镁合金为研究对象,采用 Nd:YAG 激光器对其进行一次和两次的激光冲击强化处理,研究了激光冲击强化前后镁合金深度方向晶粒分布、显微硬度及残余应力的演化过程,揭示了激光冲击强化对镁合金晶粒分布、显微硬度及残余应力的影响规律。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料及试样的制备

试验材料选取 AM50 铸造镁合金,具体化学成分见表 1,极限抗拉强度和屈服强度分别为 221 MPa 和 125 MPa,伸长率为 12.5%,维氏硬度约为 65 HV。

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, %)

Element	Al	Mn	Cu	Fe	Si	Mg
Content	4.830	0.320	0.001	0.001	0.003	Bal.

选取厚度为 4 mm 的 AM50 镁合金板材进行线切割,切割成尺寸为 40 mm \times 20 mm \times 2 mm 的试样块。切割时在厚度方向上选取板材中间 2 mm 的部分,避免镁合金试样原有的表面对试验结果造成影响。将切割好的试样块分成三组,每组三个试样。将所有试样的上表面作为待冲击面,用金相砂纸进行逐级打磨,然后用丙酮超声清洗,最后将铝箔贴在待冲击面上。

2.2 试验方法及过程

对于所有试样,激光冲击区域均为上表面的中间区域,面积为 20 mm \times 10 mm,如图 1(a)所示。激光冲击强化时选用 Nd:YAG 激光器作为发射源,激光脉冲能量为 11 J,冲击频率为 1 Hz,波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns,光斑直径为 3 mm,横向和纵向的光斑搭接率为 50%,用厚度为 0.1 mm 的铝箔作为吸收层,厚度为 1 mm 的流水作为透明约束层。对其中两组试样分别进行一次和两次激光冲击强化处理。

将镶嵌好的激光冲击强化试样的截面进行打磨、抛光、超声清洗等处理,如图 1(b)所示。从每组试样中选取第一个镶嵌试样,进行深度方向上显微硬度测量,然后再从每组中选取第二个镶嵌试样,进行截面深度方向上的残余应力值测量,每个测量点测量 5 次取平均值。最后将每组剩余的第三个试样进行金相腐蚀,即采用由 1.5 g 苦味酸、25 ml 乙醇、5 ml 乙酸和 10 ml 水混合而成的腐蚀液侵蚀 5~10 s,然后用金相显微镜(OM)观察整个截面深度方向上的微观组织。由于高倍显微镜的镜头观察区域有限,采用分段拍摄、图片拼接的方法获得整个截面显微组织的金相图。

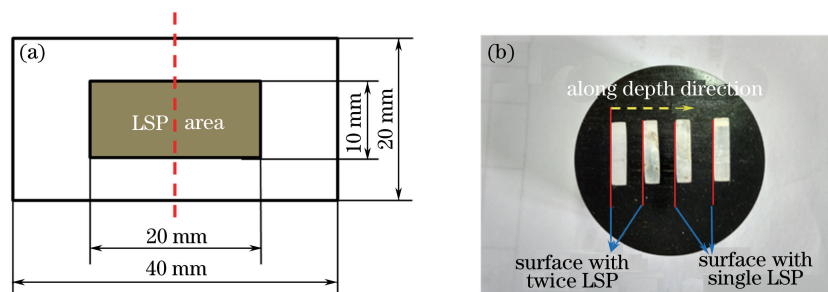


图 1 (a) LSP 试样示意图; (b) 镶嵌试样实物图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of specimen with LSP; (b) photograph of mosaic specimens

3 试验结果与分析

3.1 显微硬度与晶粒结构分析

图 2(a)所示为未冲击试样深度方向上的显微硬度分布,部分测量点的测试压痕也在图中画出。从图 2(a)可以看出,靠近上下底面显微硬度变化趋势基本对称。两侧的硬度值略高于中间区域,最高值为 73 HV,随着与表面距离的增大,硬度值逐渐下降,中间区域的硬度值基本稳定在 65 HV 左右,两侧硬度值较高区域的深度约为 0.2 mm。造成这一现象的主要原因是两个表面的机械加工如切割、打磨、抛光等使表层组织得到强化。图 2(b)所示为未冲击试样深度方向上的微观组织金相拼接图,图 2(c)~(f)分别为图 2(b)中 A~D 对应区域的放大图。从图 2(b)中可以看出,靠近上下底面的晶粒相对细小,平均直径为 15~20 μm ,如图 2(c)和图 2(f)所示,深度为 0.18~0.2 mm;中间部分的晶粒较粗大,晶粒尺寸为 20~60 μm ,如图 2(d)和图 2(e)所示。从图 2 中可以看出晶粒尺寸的变化趋势与显微硬度的变化趋势基本一致。

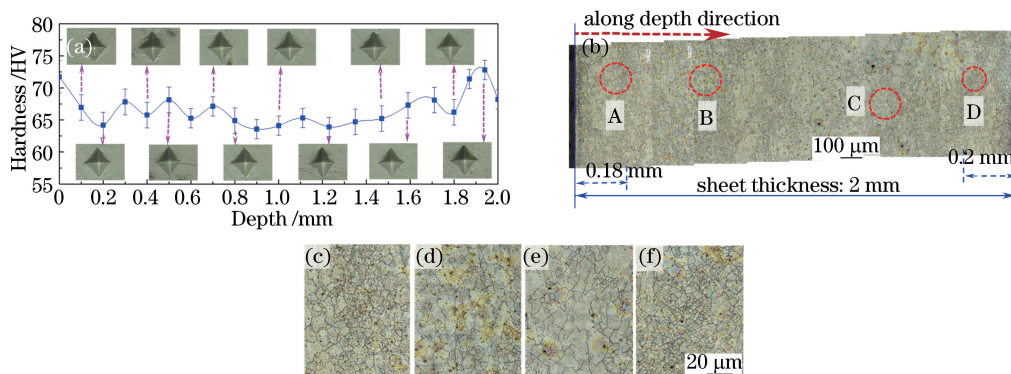


图 2 未冲击试样深度方向的(a)显微硬度分布和(b)金相组织, (c)~(f) A~D 对应区域的放大图

Fig. 2 (a) Micro-hardness distribution and (b) OM morphologies along depth direction of specimen without LSP, and (c)-(f) are the corresponding magnifications to circle areas indicated by A, B, C, and D, respectively.

图 3(a)所示为单次冲击处理后镁合金深度方向的显微硬度分布曲线,部分测量点的测试压痕也在图中画出。从图中可以看出,经过单次冲击处理后,试样冲击面附近区域的显微硬度值最大,对应值为 87 HV,且随着与冲击表面距离的增大,硬度值逐渐下降,距离冲击表面 0.7 mm 时,硬度值基本保持稳定,在 66 HV 上下波动,在底面附近显微硬度又有微小提升。说明经过单次冲击后,镁合金表层的显微硬度得到明显提升。图 3(b)所示为经过单次冲击后镁合金沿深度方向的金相组织拼接图,可以看到细化层深度扩大到 0.7 mm,右侧边界附近晶粒细化层的宽度依然为 0.2 mm 左右。图 3(c)~(f)分别为图 3(b)中 A~D 对应区域的放大图。激光冲击区域表层晶粒尺寸相对较小,晶粒得到明显细化,粒径尺寸为 10~15 μm ,如图 3(c)和图 3(f)所示;两个晶粒细化层之间为粗晶层,晶粒尺寸为 15~60 μm ,如图 3(e)所示。从图 3 可以看出晶粒的变化趋势与显微硬度曲线的变化趋势基本一致。

图 4(a)所示为两次激光冲击强化试样深度方向上整个横截面的显微硬度分布曲线,部分测量点的测试

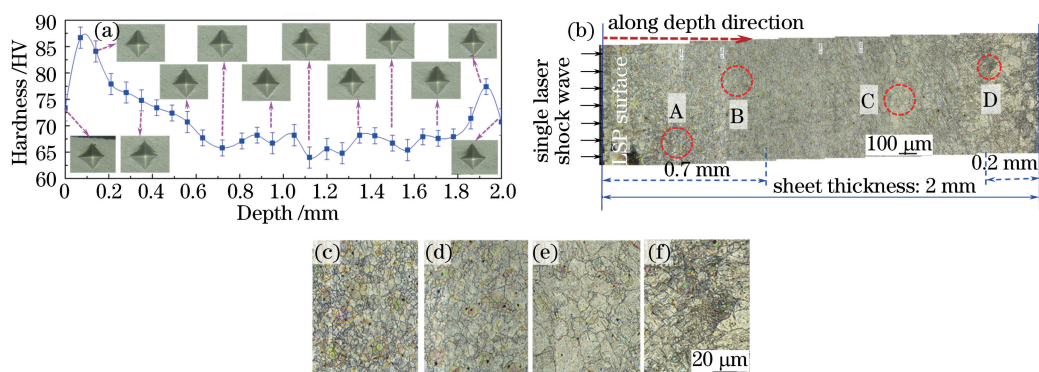


图3 单次激光冲击强化试样深度方向(a)显微硬度分布和(b)金相组织, (c)~(f) A~D对应区域的放大图

Fig. 3 (a) Micro-hardness distribution and (b) OM morphologies along depth direction of specimen with single impact of LSP, and (c)-(f) are the corresponding magnifications to the circle areas indicated by A, B, C, and D, respectively.

压痕也在图中画出。从图中可以看出,经过两次激光冲击强化后,试样的显微硬度得到进一步提升,在激光冲击表层达到最大值(94 HV),随着与冲击表面距离的增大,硬度值逐渐下降,显微硬度改善层深度为0.9 mm,中间区域的硬度值基本保持稳定,在65 HV上下波动,在另一侧表面附近,硬度有微小提升。说明经过两次冲击后,镁合金表面的显微硬度得到进一步提高,提高区域的深度也进一步增大。图4(b)所示为两次激光冲击强化后镁合金深度方向上的微观组织金相拼接图,可以看到晶粒细化层的深度扩大到0.9 mm,右侧边界附近晶粒细化层的宽度依然为0.2 mm左右。图4(c)~(f)分别为图4(b)中A~D对应区域的放大图。激光冲击区域表层晶粒粒径尺寸为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$,如图4(c)和图4(d)所示;两个晶粒细化层之间为粗晶层,晶粒尺寸为 $10\sim 60\ \mu\text{m}$,如图4(e)所示。图4(f)为未冲击面受到机械处理造成晶粒细化现象的放大图。从图4中可以看出晶粒的变化趋势与硬度曲线的变化趋势基本一致。

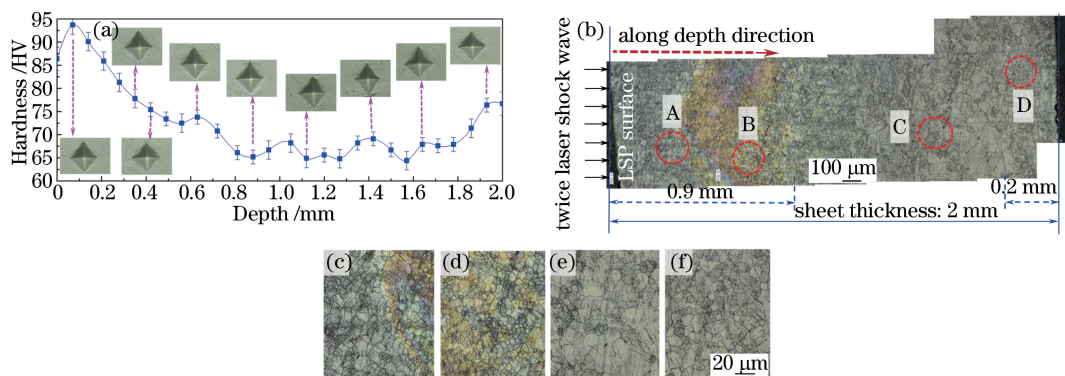


图4 两次激光冲击强化试样深度方向(a)显微硬度分布和(b)金相组织,图(b)中A~D对应区域的(c)-(f)放大图

Fig. 4 (a) Micro-hardness distribution and (b) OM morphologies along depth direction specimen with twice impacts of LSP, and (c)-(f) are the magnifications to the circle areas indicated by A, B, C, and D, respectively.

从图2、3、4可以看出,随着激光冲击次数的增加,显微硬度值明显增大,单次冲击后显微硬度的最大值为87 HV,比未冲击试样增大了19%;两次冲击试样显微硬度得到进一步改善,最大值为94 HV,比单次冲击试样增大了8%。另外,随着激光冲击次数的增加,显微硬度改善区域的深度也明显变大,单次冲击强化后显微硬度得到改善的区域深度为0.7 mm,比未冲击试样增大了250%;两次冲击试样显微硬度改善深度为0.9 mm,比单次冲击试样增大了29%。随着激光冲击次数的增加,晶粒结构的变化也表现出和显微硬度变化相似的趋势,单次冲击后晶粒细化层深度为0.7 mm,是未冲击试样的2.5倍,晶粒尺寸从原始粗晶的 $50\ \mu\text{m}$ 左右细化到 $10\sim 15\ \mu\text{m}$,排列更加紧密、有序,产生大量孪晶。这一晶粒尺寸的变化与Luo等^[16]前期的研究结果一致。两次冲击试样晶粒细化层的深度进一步扩大,达到0.9 mm,比单次冲击试样增大了29%,晶粒也得到进一步细化,尺寸达到 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 。

3.2 残余应力分析

图 5 所示为未冲击试样、单次冲击试样和两次冲击试样深度方向上残余应力分布曲线。从图中可以看出,未冲击试样残余应力值基本保持稳定,仅在两侧边界附近各出现一段较窄的残余压应力层,这是表面进行切割、打磨、抛光等机械处理造成的。与未冲击试样近似零应力状态相比,经过单次冲击后,镁合金残余压应力值及残余压应力层深度均明显变大,最大残余压应力达到 -225 MPa,残余压应力层的深度达到 0.8 mm。经过两次激光冲击后,残余压应力值及残余压应力层深度进一步变大,最大残余压应力达到 -304 MPa,比单次冲击试样增大了 35% ,残余压应力层深度达到 1.0 mm,比单次激光冲击强化试样增加了 25% 。

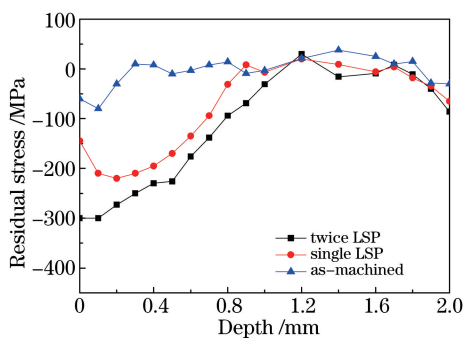


图 5 三种试样深度方向上残余应力分布曲线

Fig. 5 Residual stress distribution along depth direction of three samples

研究表明,单次冲击后,镁合金表层产生高幅残余压应力值及较深压应力层,随着冲击次数的增加,残余压应力数值变大且残余压应力层进一步加深。

3.3 微观特性变化机理分析

激光冲击波形成的高压等离子体在极短时间($60\sim 100$ ns)内施加给材料表面一个冲击加载,产生向金属内部传播的强冲击波,使材料产生高应变速率的塑性变形和弹性变形,冲击波卸载后塑性变形保留,在冲击区周围材料的弹性挤压下形成残余压应力;表面强化层出现孪晶,形成极其细小、相互缠绕的高密度位错结构,晶粒得到细化,甚至达到纳米量级,材料的显微硬度得到提高。因此,激光冲击强化的效果是应力强化和组织强化共同作用的结果。随着激光冲击次数的增加,能量得到积累,强化效果得到进一步提升,具体表现为残余压应力及显微硬度进一步增大,晶粒结构进一步细化。

图 6 所示为冲击次数对 AM50 镁合金结构、显微硬度(HV)及残余应力(RS)的影响示意图,其中标尺颜色的深浅代表数值的大小。从图中可以看出,晶粒结构、显微硬度及残余应力的变化趋势基本一致,晶粒细化层的深度、硬度改善区域的深度及残余压应力层的深度基本相同。随着激光冲击次数的增加,冲击面附近的显微硬度值明显增大,其中单次冲击后显微硬度的最大值比未冲击试样增大了 19% ,两次冲击试样显微硬度最大值比单次冲击试样增大了 8% 。随着激光冲击次数的增加,显微硬度改善区域的深度也明显增大,其中单次冲击强化后显微硬度得到改善的区域深度比未冲击试样增大了 250% ,两次冲击试样显微硬度改善区域的深度比单次冲击试样增大了 29% 。另外,随着激光冲击次数的增加,晶粒结构和残余应力的变化也表现出和显微硬度变化相似的趋势。

Wang 等^[17]研究了激光冲击强化对 K403 镍合金微观结构和力学性能的影响,研究结论与本文研究结果一致。综上所述,激光冲击强化能够明显提高 AM50 镁合金表层的显微硬度和残余压应力,细化晶粒,增大残余压应力层和晶粒细化层的深度;激光冲击强化次数增加到两次时,AM50 镁合金的微观性能得到进一步提升,但提升幅度减小。

4 结 论

研究了激光冲击强化对 AM50 镁合金深度方向力学性能和微观结构的影响。结果表明,激光冲击强化提高了试样的显微硬度值、残余压应力值及晶粒细化程度,增大了显微硬度提高区域的深度、残余压应力层

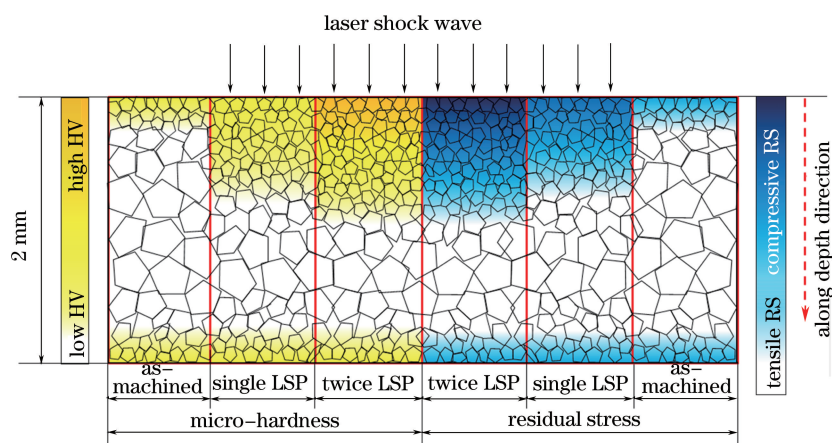


图6 LSP次数对AM50镁合金结构和性能影响的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of influence of LSP times on the property and microstructure of AM50 magnesium alloy

深度和晶粒细化层深度;显微硬度、残余压应力及晶粒细化程度,表现出相似的变化趋势,且三者变化区域的深度基本一致。

此外,定量研究了激光冲击强化次数对AM50镁合金微观结构和性能的影响,结果表明,一次激光冲击强化能够明显改善AM50镁合金的微观结构和性能;当冲击次数增加到两次时,镁合金微观性能得到进一步改善,但改善幅度减小。

参 考 文 献

- Liu Qian, Shan Zhongde. Application and prospect of magnesium alloys in automotive industry[J]. Found Technology, 2007, 28(12): 1668-1671.
刘 倩, 单忠德. 镁合金在汽车工业中的应用现状与发展趋势[J]. 铸造技术, 2007, 28(12): 1668-1671.
- Coy A E, Viejo F, Skeldon P, *et al.* Susceptibility of rare-earth-magnesium alloys to micro-galvanic corrosion[J]. Corrosion Science, 2010, 52(12): 3896-3906.
- 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.
- Raman R K S, Jafari S, Harandi S E. Corrosion fatigue fracture of magnesium alloys in bioimplant applications: A review [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 137: 97-108.
- Zhang P, Ding W J, Lindemann J, *et al.* Mechanical properties of the hot-rolled Mg-12 Gd-3Y magnesium alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 118(2-3): 453-458.
- 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.
- Wang Zhitai, Lin Xin, Cao Yongqing, *et al.* External cooling condition effects on formation of anomalous eutectic in Ni-Sn alloy by laser remelting[J]. Chinese J 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.
- Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.* Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J 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.
- Wang Cheng, Lai Zhilin, He Weifeng, *et al.* Effect of multi-impact on high cycle fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel subject to laser shock processing[J]. Chinese J 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.
- Wang Jiangtao, Zhang Yongkang, Chen Jufang, *et al.* Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of 7075 aluminum alloy plasma arc weldments[J]. Chinese J 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.
- 11 Zhu Ying, Fan Bowen, Guo Wei, *et al.* Influence of laser shock peening times on microstructure and hardness of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(4): 444-448.
朱 颖, 范博文, 郭 伟, 等. 激光冲击次数对 TA15 微观组织和硬度的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 444-448.
- 12 Xiong Yi, He Hongyu, Luo Kaiyu, *et al.* Effect of laser shock processing times on microstructure and microhardness of high carbon pearlitic steel[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403006.
熊 毅, 何红玉, 罗开玉, 等. 激光冲击次数对高碳珠光体钢组织和显微硬度的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403006.
- 13 Li Xingcheng, Zhang Yongkang. Effect of laser shock times on electrochemical performance of AZ31 magnesium alloy[J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 466-470.
李兴成, 张永康. 激光冲击次数对镁合金电化学特性的影响[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 466-470.
- 14 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.
- 15 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 & Coatings Technology, 2010, 204(24): 3947-3953.
- 16 Luo K Y, Wang C Y, Sun G F, *et al.* Investigation and microstructural analyses of massive LSP impacts with coverage area on crack initiation location and tensile properties of AM50 magnesium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 650: 110-118.
- 17 Wang C, Shen X J, An Z B, *et al.* Effects of laser shock processing on microstructure and mechanical properties of K403 nickel-alloy[J]. Materials and Design, 2016, 89: 582-588.