

激光喷丸强化 ZK60 变形镁合金的疲劳性能研究

蒋素琴¹ 周建忠² 吴建华¹ 裴旭¹

(¹淮阴工学院机械工程学院, 江苏省数字化制造技术重点建设实验室, 江苏 淮安 223003)

²江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 为研究激光喷丸对高强度变形镁合金 ZK60 疲劳性能的影响机理,使之适应交变应力结构件的工作需要,进行了激光喷丸强化表面改性和拉伸疲劳性能实验。实验结果表明,在激光喷丸强化区域获得有益的残余压应力,产生硬化效应,表面塑性变形的微小区域,变形轮廓曲线波动范围较基体小,增加喷丸次数可增强激光喷丸的强化效应。经 3 次激光喷丸后,中心孔疲劳试样的平均疲劳寿命由未喷丸试样的 78023 次提高到 125641 次,寿命增益达 61%。从断口来看,激光喷丸强化主要是改变了裂纹源萌生位置,延缓了裂纹扩展速率,对瞬断区无明显影响。激光喷丸强化为镁合金的抗疲劳制造提供了新的途径。

关键词 激光技术;激光喷丸强化;疲劳寿命;变形镁合金;残余压应力

中图分类号 TG665;TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.081403

Research on Fatigue Properties of ZK60 Wrought Magnesium Alloy Treated by Laser Shot Peening

Jiang Suqin¹ Zhou Jianzhong² Wu Jianhua¹ Pei Xu¹

(¹Jiangsu Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China
²School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract In order to study the influence mechanism of laser shot peening (LSP) on the fatigue properties of wrought magnesium alloy ZK60 with high intensity, which can adapt the need of structural parts under alternate stress, the surface modification of ZK60 by LSP and the tensile fatigue test are carried out. The results show that the beneficial residual compressive stress is obtained and hardening effect is produced on the strengthening region by LSP. The profile curve fluctuation in the microscopic region of plastic deformation is less than that in magnesium matrix. With the increment of peening number, the strengthening effect of LSP can be enhanced. The average fatigue life of specimen with center hole increases from 78023 cycles to 125641 cycles after 3 LSP modifications, showing the gain of 61%. The compressive residual stress induced by LSP changes the position of fatigue crack initiation, and delays the fatigue growth rate, but it has less effect on the fast fracture area. LSP technology provides a new method for anti-fatigue manufacture of magnesium alloy.

Key words laser technique; laser shot peening; fatigue life; wrought magnesium alloy; residual stress

OCIS codes 140.3390; 240.6690; 350.3850

1 引言

镁合金因其质轻、比强度高及易回收等优点,符合航空航天及汽车材料轻量化、节能化和环保化的发展要求,具有广阔的应用前景^[1]。采用高强度变形镁合金代替传统的钢、铝合金构件可明显减轻结构重量,特别是在航空航天器、军工装备和汽车方面^[2~4],其带来的经济效益非常显著。据研究,机械零部件在服役过

收稿日期: 2012-03-16; 收到修改稿日期: 2012-04-27; 网络出版日期: 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(51175212)、江苏省科技支撑项目(BE2011726)和江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ200901)资助课题。

作者简介: 蒋素琴(1975—),女,硕士,讲师,主要从事构件的激光成形、激光表面强化与检测方面的研究。

E-mail: jsq20040404@163.com

程中疲劳失效占失效总数的 50%~90%^[5],因此如何提高镁合金的抗应力腐蚀和抗疲劳性能,延长产品服役周期,提高其工作可靠性,对于进一步发挥其应用潜力具有现实意义。工程中常用机械抛光、喷丸强化、滚压强化和冷挤压强化等方法进行表面强化处理,以激光喷丸(LSP)的强化效果最佳^[6],它是利用短脉冲高能量密度的激光辐照金属表面产生高压效应,在强化区获得有益的残余压应力、高密度位错组织、细化的晶粒和较基体更高的显微硬度,从而达到强化的目的^[7~11]。

目前已有学者对镁合金材料激光喷丸强化效应(如残余应力、表面粗糙度、显微组织及硬度等)、抗应力腐蚀及抗疲劳性能开展了研究^[8,10,11],所涉及的镁合金多为铸造镁合金,型号有 AM50、AZ91 和 AZ31B 等。这些镁合金力学性能有限,多用于制造座椅、踏板、轮毂及各种电子附件等。与铸造镁合金相比,高强度变形镁合金具有高强度、高延伸率和优越的力学性能,更能满足承受交变应力结构件的需要。本文以具有高强韧性能的 ZK60 变形镁合金为对象,研究其激光喷丸强化效果和疲劳性能,分析其强化机理,有望为镁合金应用范围的不断拓宽提供可能。

2 激光喷丸试样的疲劳实验

2.1 试样制备

ZK60 变形镁合金成分及力学性能如表 1 所示。疲劳试样参照国标 GB 5287-1996(金属材料加载疲劳试验方法)加工成图 1 所示的形状,拉伸方向为横向(即拉伸方向与板材轧制方向垂直),激光喷丸前用金相砂纸打磨并抛光,用丙酮清洗并吹干后,通过自然时效消除机械加工引起的初始应力。

表 1 ZK60 镁合金成分及力学性能

Table 1 Composition and main mechanical properties of ZK60 magnesium alloy

Component	Zn	Zr	Others		Mg	
Mass fraction / %	5.2	0.47	0.3		Bal.	
Mechanical property	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	E / GPa	ρ / (kg/m ³)	ν
Value	355	300	11	44	1800	0.35

2.2 实验方法

激光喷丸实验选用高功率钕玻璃激光冲击强化系统,激光器主要技术参数见表 2。因板料厚度只有 2 mm,只需对中心孔位置进行单面单点激光喷丸强化处理。激光光斑直径至少达到孔径的 3 倍^[7],实验时光斑直径取 6 mm,激光脉冲能量 20.7 J,脉冲宽度 23 ns。考虑到镁合金易氧化,能量吸收层和约束层分别选用 100 μ m 厚铝箔和 K9 玻璃。实验结束后测定不同喷丸次数下强化区域的残余应力、表面三维形貌和显微硬度。

表 2 激光器技术参数

Table 2 Technical parameters of laser

Parameter	Value	Parameter	Value
Laser wavelength / nm	1064	Pulse duration / ns	23
Pulse energy / J	<50	Peak power of laser pulse / W	$\geq 1.5 \times 10^9$
Frequency / Hz	0.5	Laser spot / mm	2~13

疲劳实验在 MTS-809 电液伺服疲劳试验机上进行,以拉-拉正弦波载荷谱轴向应力来控制加载, $F_{\max} = 2.8$ kN,应力比 $R_s = 0.1$,实验频率 $f = 10$ Hz,实验环境为空气、室温。试样分 2 组分别进行激光喷丸强化前后的疲劳寿命测试,每组重复 5 次。实验结束后对疲劳断口取样,置入丙酮溶液中用超声波清洗并吹干。

3 实验结果与分析

3.1 激光喷丸强化效果与分析

激光喷丸后的残余应力采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪检测,测试方法采用侧倾固定 Ψ 法,交相关

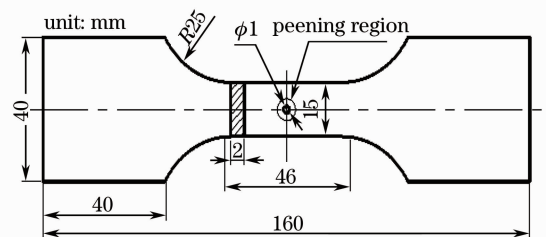


图 1 疲劳拉伸试样

Fig. 1 Fatigue tensile specimen

法定峰;采用 $\text{CrK}\alpha$ 辐射,(122)晶面衍射,衍射峰在 134.7° 左右。图 2 为 ZK60 试样的表面残余应力测试结果,基体经时效处理后表面应力只有 -2 MPa ,单次激光喷丸处理后喷丸区表面中心残余压应力为 -151.9 MPa ,连续 3 次喷丸后,其值可增大到 -207.5 MPa 。

Test results				
$\Psi/(\circ)$	0	15	25	35
$2\theta_p/(\circ)$	134.739	134.810	134.852	134.842
peak counts	168	229	252	344
pulse width/ (\circ)	2.09	1.91	1.90	1.87
integral intensity	409.7	497	548.8	718.4
integral width/ (\circ)	2.44	2.17	2.18	2.09
Stress value σ	-2 MPa	Error $\Delta\sigma$	$\pm 7 \text{ MPa}$	

Test results				
$\Psi/(\circ)$	0	15	25	35
$2\theta_p/(\circ)$	134.604	134.880	134.898	135.070
peak counts	195	175	137	143
pulse width/ (\circ)	1.87	1.95	1.95	1.93
integral intensity	377	336	234	286
integral width/ (\circ)	1.93	1.92	1.71	2.00
Stress value σ	-151.9 MPa	Error $\Delta\sigma$	$\pm 18.6 \text{ MPa}$	

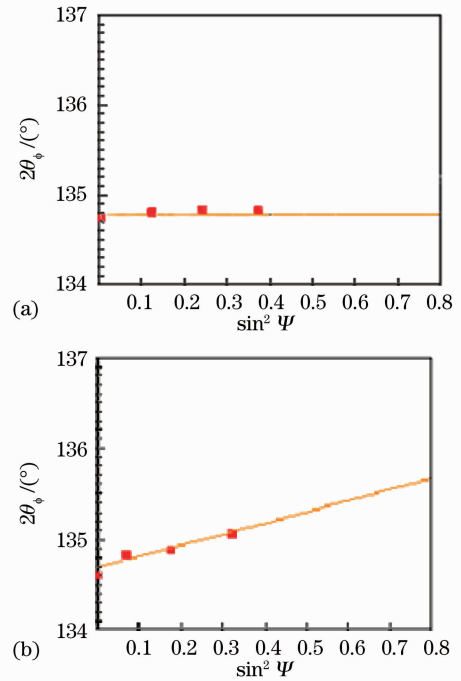


图 2 ZK60 试样表面残余应力。(a) 喷丸前;(b) 喷丸后

Fig. 2 Surface residual stress of ZK60. (a) Before LSP; (b) after LSP

表面三维形貌及塑性变形用 MicroXAM 型非接触式三维光学轮廓仪测量。激光喷丸强化前后 Y 截面的表面轮廓如图 3 所示,单次喷丸后喷丸区域表面的最大变形深度为 $16.10 \mu\text{m}$,表面三维粗糙度 S_q 由基体

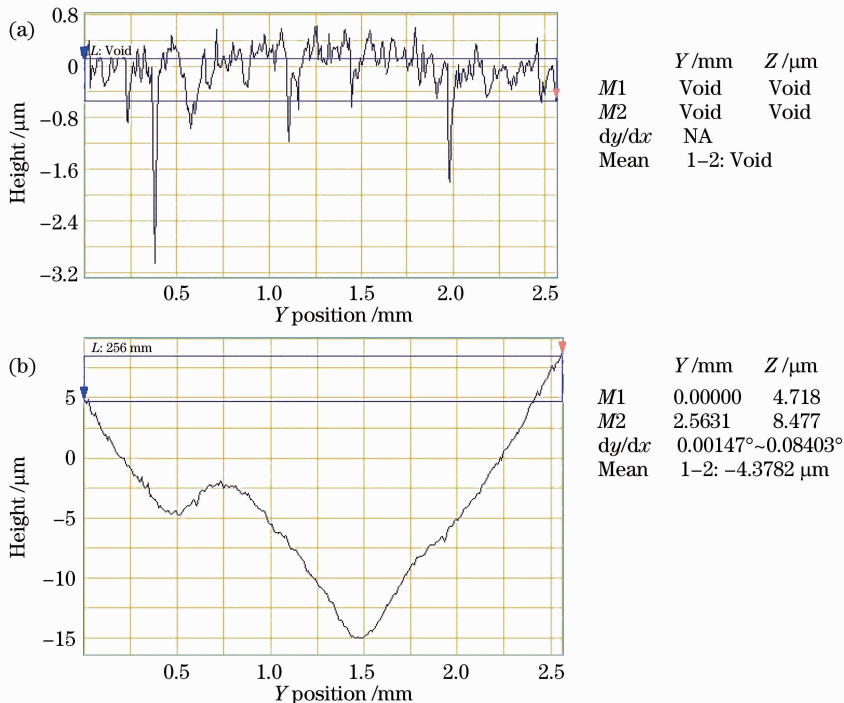


图 3 ZK60 激光喷丸强化前后的 Y 截面的表面轮廓图。(a) 基体;(b) 单次喷丸

Fig. 3 Cross-section profiles of ZK60 along Y direction before and after LSP. (a) Before LSP; (b) after LSP

的 $0.42 \mu\text{m}$ 增加为 $1.29 \mu\text{m}$ 。当喷丸次数增加到 3 次时,相应的变形深度达到 $43.3 \mu\text{m}$,此时表面的 S_q 值为 $2.65 \mu\text{m}$ 。这一结果说明,随着喷丸次数的增加,塑性变形深度变大,在一定范围内可以获得更大的残余压应力,而表面三维粗糙度值也随之增大。但从图 3 中表面轮廓曲线的微小区域来看,喷丸强化后的表面变形轮廓曲线波动范围较基体小,在图 4 激光喷丸试样的微观三维形貌和宏观形貌中表现为喷丸区域比基体更光洁。

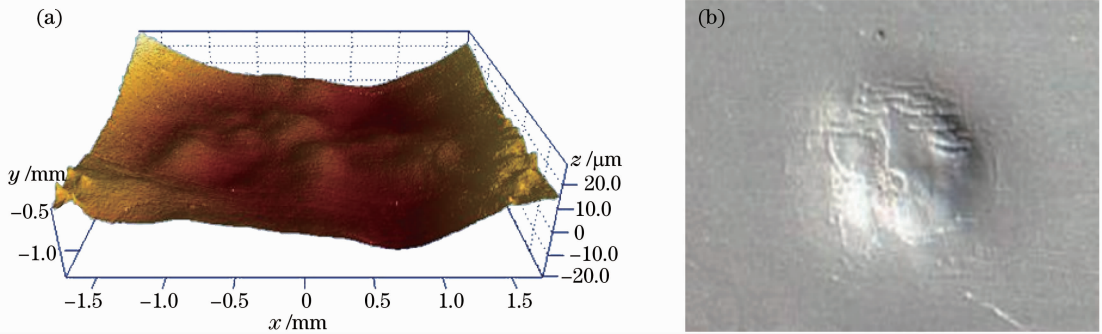


图 4 ZK60 激光喷丸强化后的表面三维形貌。(a)微观;(b)宏观

Fig. 4 3D topographies of ZK60. (a) Micro topography; (b) macro topography

硬度在一定程度上可以反映材料的机械性能,强化后的硬度变化幅度亦与材料特性相关。显微硬度用 HXD-1000TMC 型自动转塔显微硬度计测量,加载的载荷 50 g ,保压时间 10 s 。在喷丸区域的表面上每隔 $100 \mu\text{m}$ 测量 1 次,每个位置测量 3 次,取算术平均值。测得基体和单次喷丸后强化区域表面的显微硬度分别为 91.8 HV 和 118.16 HV ,当喷丸达到 3 次后显微硬度提高到 137.4 HV ,较基体提高了 49.7% 左右。结果说明,高压冲击波在强化区域产生残余压应力、塑性应变和相变效应,在三者的协同作用下,材料产生硬化效应,增加喷丸次数可提升激光喷丸的强化效应。

3.2 疲劳寿命及断口形貌分析

表 3 为两组试样的疲劳实验结果,从疲劳寿命结果来看,喷丸试样疲劳寿命数据的分散性明显大于基体,这主要是因为 ZK60 镁合金的缺口敏感性较高,激光器喷丸处理后的强化效果如表面粗糙度、硬度及残余应力不完全一致,未强化处理的试样平均寿命为 78023 次,经激光喷丸强化后寿命提高到 125641 次,寿命增益达 61% 。

表 3 ZK60 疲劳实验结果

Table 3 Results of fatigue tests for ZK60

Test number	Hole size /mm	Parameters of LSP	F_{max}/kN	Cycles /N	Mean life
1-1				72635	
1-2				63346	
1-3	1	Unpeened specimen	2.8	74129	78023
1-4				96251	
1-5				83756	
2-1				144129	
2-2				126251	
2-3	1	20 J, 6 mm, 3 times	2.8	134447	125641
2-4				94129	
2-5				129251	

为进一步研究激光喷丸强化对 ZK60 镁合金疲劳性能的影响机理,采用 JSM-7001F 型扫描电镜(SEM)分析两组试样的疲劳断口形貌特征。图 5 为 ZK60 镁合金孔边疲劳裂纹源的 SEM 照片,由于试样中心孔边应力集中,沿板厚方向孔边有多处裂纹源出现,并向周围扩散,但两组试样的裂纹在孔边缘位置的扩散方向有所不同,图 5(a)中未喷丸试样的裂纹扩散路径基本与断裂面扩展方向一致,而图 5(b)中经激光喷丸处理的试样在孔边缘位置裂纹沿厚度向下扩散。已有研究表明^[12],强化处理在材料表面及一定深度范围引入了残余压应力场,并与外加拉应力叠加作用后,使得裂纹扩展所需的最大“有效应力”由表面位置转移到次表面

层的残余拉应力区,疲劳源由表面推移至次表面萌生,次表面层位错受周围晶粒的约束较表面大,不易滑移和开动,因而临界应力高,疲劳极限大,从而导致强化区域的裂纹扩展方向发生变化。

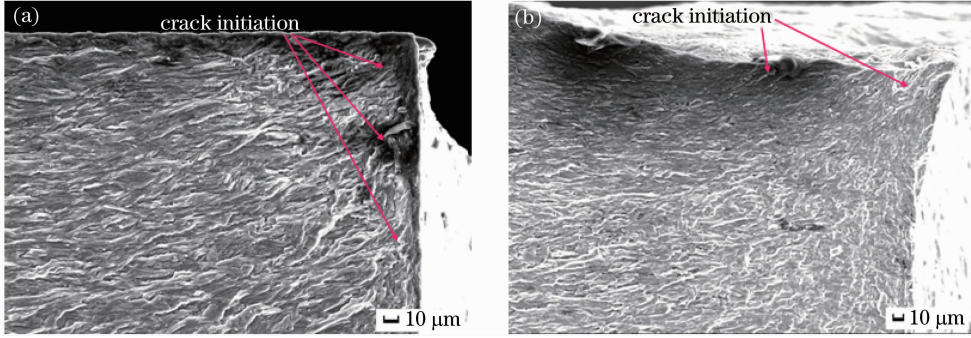


图5 ZK60 镁合金孔边的疲劳裂纹源 SEM 形貌。(a)未喷丸;(b)喷丸

Fig. 5 SEM morphology of fatigue crack initiation of ZK60 near hole edge. (a) Unpeened; (b) after LSP

在图6所示激光喷丸影响区的断口形貌中,发现了较明显的裂纹滑移台阶,并沿次表面向下发生转折,这与文献[13]中2024-T62铝合金激光喷丸强化试样的疲劳断口现象相似,研究发现,在喷丸强化影响区出现了疲劳源,并扩展成扇形光亮细滑的断口。这主要是因为因激光喷丸化后在材料喷丸影响区出现了与残余压应力相抗衡的拉应力,应力状态由压缩过渡到拉伸,此处的“总拉应力”大于外加应力,降低了裂纹萌生和扩展所需的“有效应力”。

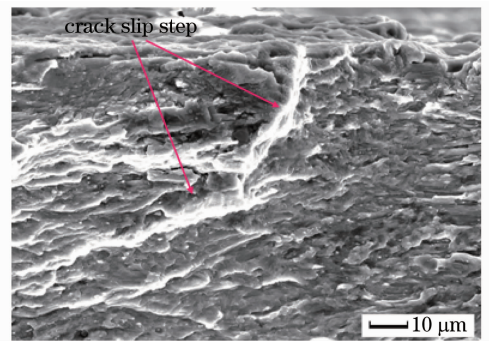


图6 喷丸影响区断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of ZK60 in the peened regions

图7为ZK60镁合金激光喷丸前后裂纹扩展区的断口形貌,从微观断口来看,两者的疲劳断裂机制没有明显区别,裂纹都以沿晶扩展为主,二次裂纹沿断晶方向扩展,断口由许多片状解理面组成,密排六方的镁合金常温下塑性较差,比起塑性较好的面心立方铝合金材料,其断口疲劳辉纹不太明显。从解理面方向来看,未喷丸疲劳试样断口的裂纹扩展方向较为平直[图7(a)],而激光喷丸试样因残余压应力在裂纹扩展阶段还未完全松弛、消失,当裂纹扩展到与夹杂物、亚晶界或次级相相遇时就会受到阻碍,从而形成位错塞积群,在该位置产生应力集中,塑变阻力增大,残余压应力的作用使得裂纹扩展所需的“有效应力”增大,裂纹便沿薄弱位置继续扩展,使得原有的扩展方向面变得更为曲折[图7(b)]。

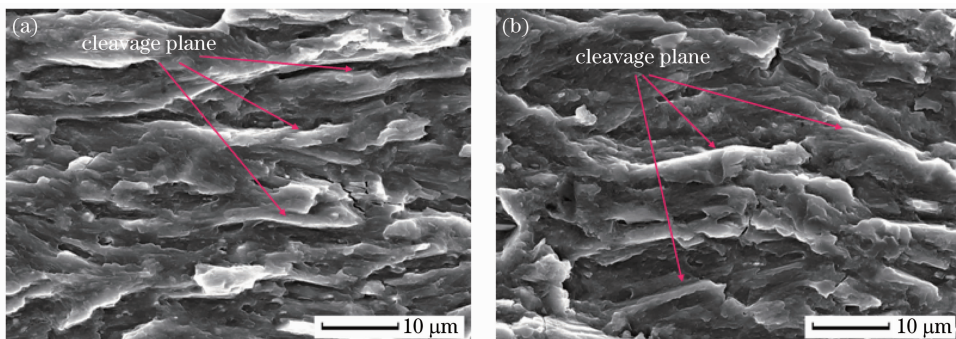


图7 ZK60 镁合金激光喷丸前后裂纹扩展区的断口形貌。(a)未喷丸;(b)喷丸

Fig. 7 Fracture morphology of crack propagation zone of ZK60. (a) Unpeened; (b) after LSP

图8为ZK60镁合金激光喷丸前后瞬断区的断口形貌,此时残余应力已全部释放,硬化层及塑性变形层对疲劳极限的影响已经不太明显,图8(a)的未喷丸试样和图8(b)的喷丸试样瞬断区的疲劳断口形貌无太大

差别,微观特征都与静载下的断裂断口相似,主要由含有细小颗粒(MgZn 和 Mg_2Zn_3 化合物)的小且深的韧窝组成。

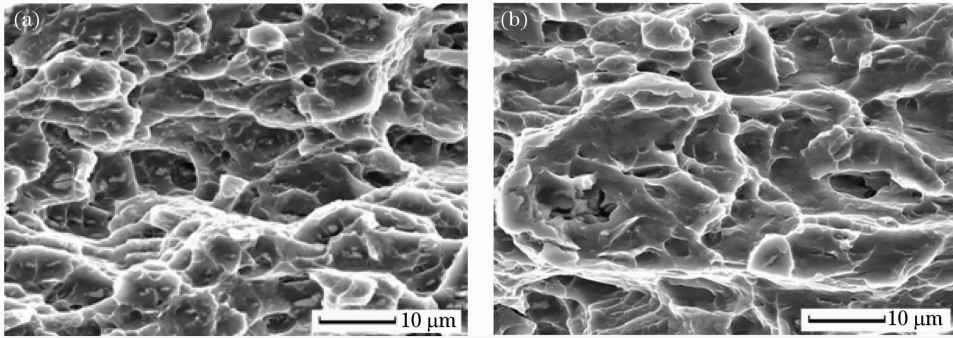


图 8 ZK60 镁合金激光喷丸前后瞬断区的断口形貌。(a) 未喷丸;(b) 喷丸

Fig.8 Fracture morphology of instant rupture zone of ZK60. (a) Upeened; (b) after LSP

4 结 论

1) 对 ZK60 变形镁合金进行激光喷丸强化实验,测量并分析了各项强化效果。激光喷丸次数由 1 次增加到 3 次后,光斑中心残余压应力由 -151 MPa 增加到 -207.5 MPa,显微硬度由 118.1 HV 提高到 137.4 HV,较基体增长了 49.7% ,表面的塑性变形量由 16.10 μm 增加到 43.3 μm ,同时表面三维粗糙度 S_q 由基体的 0.42 μm 增加到 2.65 μm 。但从表面轮廓曲线的微小区域来看,喷丸强化后的表面变形轮廓曲线波动范围较基体小,表面更加光亮。

2) 对疲劳试样的中心孔位置 3 次激光喷丸后,疲劳寿命由喷丸前的 78023 次提高到 125641 次,寿命增益达 61% 。从断口特征来看,激光喷丸试样的疲劳断口裂纹源主要出现在孔边的次表面位置和喷丸影响区,激光喷丸强化改变了裂纹扩展方向,延缓了裂纹扩展速率。当裂纹扩展到瞬断区后,残余应力已完全释放,硬化层及塑性变形层对疲劳极限的影响程度不明显,因而强化前后的瞬断区疲劳断口特征基本相同,由夹杂细小颗粒的韧窝组成,且与静载下的断裂断口相似。

参 考 文 献

- 1 Pan Fusheng, Han Enhou. High-Performance Wrought Magnesium Alloy and Processing Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007. 5~14
潘复生, 韩恩厚. 高性能变形镁合金及加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 5~14
- 2 Chen Zhenhua. Wrought Magnesium Alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004
陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 3 I. J. Polmear. Magnesium alloys and application[J]. *Mater. Sci. Technol.*, 1994, **10**(11): 1~16
- 4 H. E. Friedrich, B. L. Mordike. Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications[M]. New York: Springer, 2006
- 5 Gao Zhentong, Xiong Junjiang. Fatigue Reliability[M]. Beijing: Beihang University Press, 2000
高镇同, 熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000
- 6 C. S. Montross, T. Wei, L. Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 7 Zhang Hong, Yu Chengye, Wu Hongxing *et al.*. Laser shock processing of small hole[J]. *Acta Armamentarii*, 2001, **22**(3): 330~332
张 宏, 余承业, 吴鸿兴 等. 小孔激光冲击表面强化技术研究[J]. 兵工学报, 2001, **22**(3): 330~332
- 8 J.-M. Yang, Y. C. Her, Nanlin Han *et al.*. Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes[J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2001, **A298**(1-2): 296~299
- 9 Zhou Jianzhong, Wang Chengdong, Huang Shu *et al.*. Study on fatigue crack growth performance of 6061-t6 aluminum alloy after laser shot peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0703009
周建忠, 王呈栋, 黄 舒 等. 6061-T6 铝合金紧凑拉伸试样激光喷丸强化后的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. 中国激光,

2011, **38**(7): 0703009

- 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): 2926~2930
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): 2926~2930
- 11 L. A. Hackel, H. L. Chen. Laser Peening-Strengthening Metals or Alloys to Improve Fatigue Lifetime and Retard Stress-Induced Corrosion Cracking in Gears, Bolts and Cutters[R]. Livermore; Lawrence Livermore National Laboratory, 2003
- 12 Wang Renzhi, Ru Jilai, Li Xiangbin *et al.*. A micro-meso-process theory of fatigue crack initiation and theory of internal fatigue limit[J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 1995, **16**(4): 26~34
王仁智, 汝继来, 李向斌 等. 疲劳裂纹萌生的微细观过程与内部疲劳极限理论[J]. *金属热处理学报*, 1995, **16**(4): 26~34
- 13 Wang Min. Principle & Technology of Anti-Fatigue Manufacture[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1999
王 珉. 抗疲劳制造原理与技术[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999