

激光冲击强化对 TC17 钛合金残余应力及显微组织的影响

孙浩¹, 朱颖¹, 郭伟^{1*}, 彭鹏¹, 黄帅²

¹北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

²北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191

摘要 采用不同的工艺参数对 TC17 钛合金进行了激光冲击强化(LSP)处理,对 LSP 后 TC17 钛合金的残余应力分布进行了测试,并用透射电子显微镜观察了显微组织。结果表明,LSP 后 TC17 钛合金表面残余压应力随着冲击次数和冲击能量的增大而增大。LSP 使 TC17 钛合金表面产生了剧烈的塑性变形和高密度位错,且随着激光冲击次数和能量的增大,位错密度也逐渐增大。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 残余应力; 显微组织

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041405

Effect of Laser Shock Peening on Residual Stress and Microstructure of TC17 Titanium Alloy

Sun Hao¹, Zhu Ying¹, Guo Wei¹, Peng Peng¹, Huang Shuai²

¹ School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

² School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Laser shock peening (LSP) with different process parameters is applied on TC17 titanium alloy, the distribution of the residual stress of TC17 titanium alloy after LSP is tested, and the microstructure is observed by transmission electron microscopy. The results show that, the surface residual stress of TC17 titanium alloy after LSP increases with the increase of impact number and pulse energy. Severe plastic deformation and high density dislocation are found on TC17 titanium alloy surface after LSP. The density of dislocation increases with the increase of laser impact number and pulse energy.

Key words laser technique; laser shock peening; residual stress; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

TC17 钛合金是由美国空军和通用电气公司于 20 世纪 70 年代合作研制的新型高性能材料,属于 $\alpha+\beta$ 双相结构,具有较高的强度、较好的韧性和淬透性以及热稳定性等优点,广泛应用于航空发动机叶片和压气机转子等部件^[1]。但是,钛合金疲劳强度低、分散性大、耐磨性能差等缺点导致其对疲劳特别敏感,在发动机工作过程中,TC17 钛合金叶片常常在离心力等外力作用下发生高周疲劳断裂,严重威胁飞机的安全^[2]。为了改善钛合金的性能,国内外学者研究了钛合金的表面处理技术并取得了一定的成果。激光冲击强

收稿日期: 2016-11-16; 收到修改稿日期: 2016-12-08

基金项目: 国家国际科技合作专项(2013DFR50590)

作者简介: 孙浩(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: sunhaoserenade@163.com

导师简介: 朱颖(1968—),女,博士,副教授,主要从事钎焊和激光冲击强化方面的研究。

E-mail: Bh_zhuying@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: gwei@buaa.edu.cn

化(LSP)是一种新型的表面处理技术,其基本原理是采用高峰值功率密度的短脉冲激光辐照金属表面,使覆盖在材料表面的吸收层吸收能量并发生汽化蒸发,产生高压的等离子体冲击波,冲击波作用于金属表面并向内部传播^[3-4]。当冲击波的峰值压力超过材料动态屈服强度时,表层材料微观组织发生变化,形成一定深度的残余压应力层,从而显著提高金属材料的抗疲劳、耐磨损和耐应力腐蚀等性能^[5]。

LSP具有超高应变率、较小热影响和良好的可控性等优点,近年来成为表面改性领域的研究热点。Fairand等^[6-7]首次用高功率脉冲激光诱导的冲击波来改变7075铝合金的显微组织,显著提高了其硬度和疲劳强度。Hatamleh等^[8]用激光冲击7075振动摩擦焊接件后发现,试样的疲劳裂纹扩展速率得到大幅降低,疲劳寿命延长了217%。Breuer^[9]发现激光冲击能产生比机械喷丸深4~5倍的残余压应力层,延长了材料的疲劳寿命。目前,美国已经实现了LSP工程应用,其中美国空军研究实验室、通用电气公司和微芯科技公司利用LSP技术显著延长了整体叶盘和压气机叶片等构件的疲劳寿命^[10-11]。

20世纪90年代,高功率钕玻璃激光装置的研制成功开启了国内对LSP技术的研究^[12]。邹鸿成等^[13]对LY12铝合金进行了小能量(20~190 mJ)、小光斑(光斑直径0.3~1 mm)的多点搭接LSP处理,认为LSP能够延长材料疲劳寿命的微观机理在于位错密度的提高。王华明等^[14]在对1Cr18Ni9Ti(1%、18%、9%分别指对应组分所占的质量分数,下同)奥氏体不锈钢和GH30镍基高温合金进行了LSP处理后发现,在冲击区的组织中存在高密度位错和孪晶,并且显微硬度和残余压应力都有一定程度的提高。张永康等^[15]发现激光冲击可使TC4钛合金表层产生较大的残余压应力值,并获得较深的残余压应力层,可大幅延长材料的疲劳寿命。曹宇鹏等^[16]在对7050铝合金薄板进行LSP后发现,采用较大的激光功率密度(4.07 GW/cm²)冲击时,试样能产生较大的塑性变形,残余压应力分布均匀。王长雨等^[17-18]对AM50镁合金进行LSP后发现,冲击前进方向对残余应力的均匀性和一致性有决定性影响,冲击后试样的显微硬度值、残余压应力值以及晶粒细化程度都得到了提高。

本文选用不同的工艺参数对TC17钛合金试样进行了LSP,分别研究冲击能量和次数对钛合金微观组织以及表层残余应力的影响。

2 实验过程和方法

2.1 实验材料

TC17钛合金的主要化学成分见表1。其名义成分为Ti5Al2Sn2Zr4Mo4Cr,是一种富 β 稳定元素的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金,其扫描电子显微镜(SEM)形貌如图1所示。单脉冲LSP试样为100 mm×40 mm×5 mm的钛合金板材,搭接冲击试样为10 mm×10 mm×5 mm的小块,对整个上表面区域进行LSP处理,如图2所示。

表1 TC17钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical components of TC17 titanium alloy (mass fraction, %)

Element	Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	C	N	H
Content	Bal.	4.5-5.5	1.6-2.4	1.6-2.4	3.5-4.5	3.5-4.5	0.3	0.05	0.05	0.0125

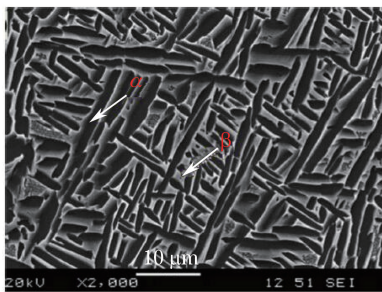


图1 TC17钛合金 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphology of TC17 titanium alloy

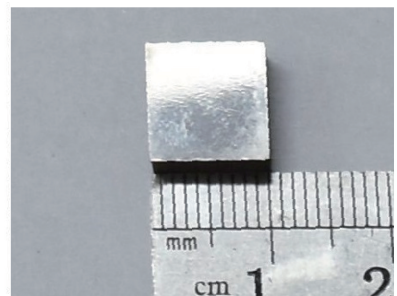


图2 TC17钛合金 LSP 试样

Fig. 2 Specimen for LSP of TC17 titanium alloy

2.2 LSP 实验

实验采用中国科学院沈阳自动化研究所装备制造技术研究室的 LSP 系统,该系统包括Nd:YAG脉冲激光器、冲击光路、约束层系统、工件夹持运动系统,以及监控系统等部分,其中 Nd:YAG 激光器具有高频率、短脉宽等特点,主要参数见表 2,其中 ASE 表示放大自发辐射。LSP 工艺参数如下:光斑直径为 3 mm,光斑搭接率为 50%,吸收保护层为 0.4 mm 厚的黑漆胶带,约束层材料为 3 mm 厚的水层。其中,直径为 3 mm 的光斑无法通过单个脉冲的方式对试样表面进行大面积冲击强化,因此选择大量光斑搭接的方式覆盖试样的冲击强化区域。实验中光斑保持不动,采用高精度五维机器人来实现试样的移动以完成搭接冲击强化,搭接方式如图 3 所示。

表 2 Nd:YAG 激光器的主要参数

Table 2 Major parameters of Nd:YAG laser

Laser wavelength /nm	Pulse energy/J	Impact number	Frequency / Hz	Pulse duration /ns	Energy stability of output laser /%	System ASE energy /mJ	Lapping rate /%
1064	1,3,5,7	1,2,3,4	2	10	≤ 3	≤ 50	50

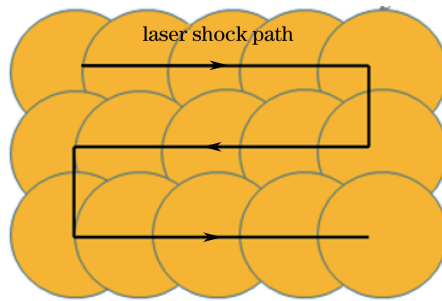


图 3 光斑搭接强化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spot lap strengthening

2.3 测试方法

采用美国硅谷的 KLA-Tencor 三维白光干涉表面形貌仪对试样单脉冲冲击后的表面形貌进行观测,干涉仪的 XYZ 行程为 100 mm×100 mm×100 mm,分辨率为 752 pixel×480 pixel。采用加拿大 Proto 公司的 iXRD1.2X 残余应力测试仪对激光冲击前后试样表面的不同位置进行残余应力测试,测试过程中选择 Mn-K α 辐射。采用日本电子的 JEM-2100 透射电子显微镜(TEM)对未经冲击强化的试样以及不同工艺参数下 LSP 处理后的试样进行微观组织观察。具体方法如下:采用线切割方式将试样切割至厚度为 0.5 mm,用砂纸继续打磨试样至厚度为 50 μ m,制备出直径为 3 mm 的透射试样后进行双喷,在 TEM 下观察试样薄区的显微组织。

3 实验结果与分析

3.1 表面形貌

图 4 所示为 TC17 钛合金经两次能量为 5 J 的激光单脉冲冲击后的表面形貌。可以看到,激光脉冲冲击

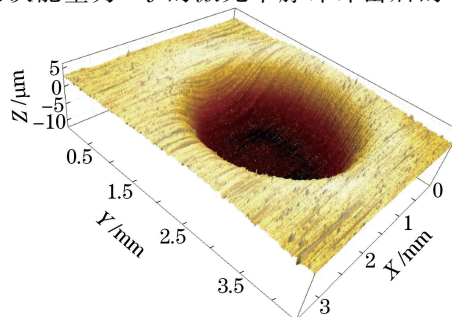


图 4 两次能量为 5 J 单脉冲冲击后的 TC17 钛合金表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of TC17 titanium alloy after two single pulse impacts with laser energy of 5 J

后在试样表面留下直径约为 3 mm 的微凹坑,表明激光束产生的等离子体冲击波的压力已经超过了材料的动态屈服强度,使其发生了塑性变形。

3.2 表面残余应力

残余应力测量所用的试样为 10 mm×10 mm×5 mm 的正方形板状(图 2),由于 LSP 区域覆盖材料的整个表面,故分别在母材试样和冲击试样表面的相同位置任意取一条直线。因为正方形试样搭接冲击时四条边线附近搭接部分少,所以沿着该直线从左向右间隔 1.2 mm 共测量 5 个点,从左向右依次编号为 1~5,如图 5 所示。

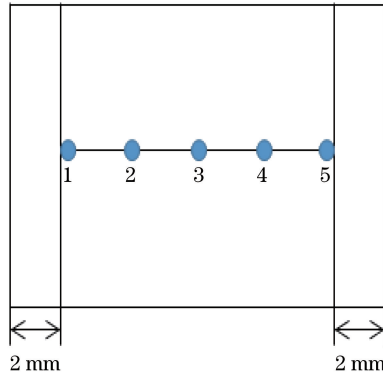


图 5 表面残余应力的测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of measurement of surface residual stress

图 6 是不同工艺参数下 LSP 后 TC17 钛合金的表面残余压应力。从图 6(a)可知,随着冲击次数的增加,钛合金表面的残余压应力增大。以 5 J 能量冲击 1 次时,试样表面产生 105.6 MPa 的平均残余压应力。当冲击次数提高到 2、3、4 后,表面平均残余压应力分别达到 121.6、202.6、313 MPa,相较于 1 次冲击增幅分别为 15.2%、91.9%、196.4%。从图 6(b)可知,随着冲击能量的增加,钛合金表面的残余压应力也增大。以 1 J 能量冲击 4 次时,试样表面产生 117.6 MPa 的平均残余压应力,当冲击能量提高到 3、5、7 J 后,冲击 4 次后表面平均残余压应力分别达到 127.8、313、462.8 MPa,相较于 1 J 能量时的,增幅分别为 10.2%、166.2%、293.5%。

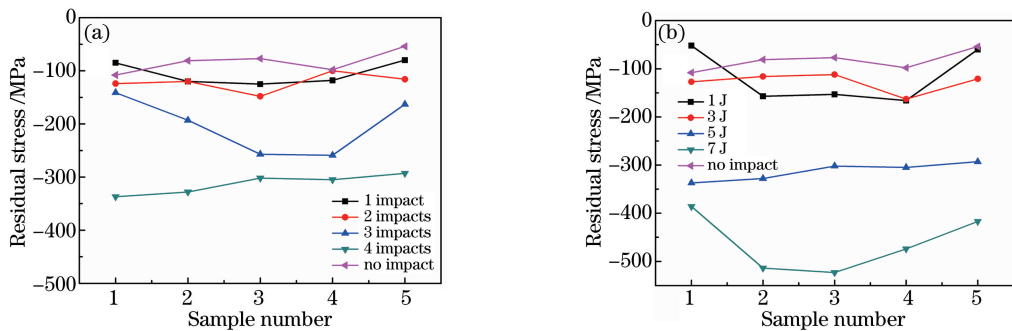


图 6 不同工艺参数下 LSP 后 TC17 钛合金的表面残余压应力。(a)能量 5 J,不同冲击次数;(b) 4 次冲击,不同冲击能量

Fig. 6 Surface residual stress of TC17 titanium alloy after LSP with different process parameters.

(a) Laser energy of 5 J, different impact number; (b) 4 impacts, different impact energy

材料的表面残余应力随着冲击能量和冲击次数的增大而出现逐渐增大的趋势,这是因为:一方面,当冲击能量增大时,冲击波压力也增大,这促使材料发生更剧烈的塑性变形,从而产生较大残余应力;另一方面,冲击次数的增加相当于延长了材料的塑性变形时间^[19],随着塑性变形不断累积加剧,残余压应力也进一步增大。引入应力比 R 和应力强度因子幅值 ΔK 来计算疲劳裂纹扩展速率 da/dN (a 为裂纹长度, N 为应力循环次数),进而对疲劳寿命进行预测^[20]。采用应力强度叠加法,将残余压应力导致的应力强度因子 K_{rs} 和外载荷导致的应力强度因子 K 叠加起来,得到材料表面有效应力强度因子 K_{eff} 和有效应力比 R_{eff} :

$$K_{eff} = K + K_{rs}, \quad (1)$$

$$\Delta K_{eff} = K_{eff,max} - K_{eff,min}, \quad (2)$$

$$R_{\text{eff}} = K_{\text{eff, min}} / K_{\text{eff, max}} \quad (3)$$

在(1)式中,对 K 取极值 K_{max} 和 K_{min} , 可得应力比 $R = K_{\text{min}} / K_{\text{max}}$, 且由于残余压应力为负值, K_{rs} 的符号为负, 则由(2)式和(3)式可得

$$\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{max}} - K_{\text{min}} = \Delta K, \quad (4)$$

$$R_{\text{eff}} < R. \quad (5)$$

根据 Forman 公式, 有

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^m}{(1 - R) K - \Delta K}, \quad (6)$$

式中 C 和 m 为常数。由(4)、(5)式可知, 激光冲击后产生的残余压应力会导致应力比减小, 而根据(6)式, 应力比 R 减小将会降低疲劳裂纹的扩展速率 da/dN 。这说明残余压应力可以有效地平衡试件在交变载荷作用下的平均拉应力, 提高疲劳裂纹扩展抗力。除此之外, 残余压应力场还会增强裂纹闭合效应, 极大地减小了裂纹的表面张开位移^[21], 从而改善材料的抗疲劳性能, 延长疲劳寿命。

3.3 显微组织

图 7 是不同冲击次数下 TC17 钛合金的 TEM 图。图 7(a) 是未经激光冲击的 TC17 钛合金的显微组织, TC17 是 $\alpha + \beta$ 型钛合金, 图中 β 相呈长条状, 镶嵌在其中的网篮组织为 α 相; 晶体内部靠近晶界处只有少许几处位错, 主要出现在 β 相中, 且分布比较分散, 而在 α 相中几乎没有位错。由图 7(b) 可以看出, TC17 钛合金经过 1 次冲击后, 晶粒内产生大量位错, 出现了位错线及位错环, 同时位错在晶界处滑移受阻而形成位错堆积。随着冲击次数的增加, 位错密度不断增大, 除晶界外, 在 α 相和 β 相内部均发现大量位错, 如图 7(c)、(d) 所示。位错不断滑移、增殖, 出现位错塞积、位错缠结等现象, 最终形成了图 7(e) 所示的位错墙。

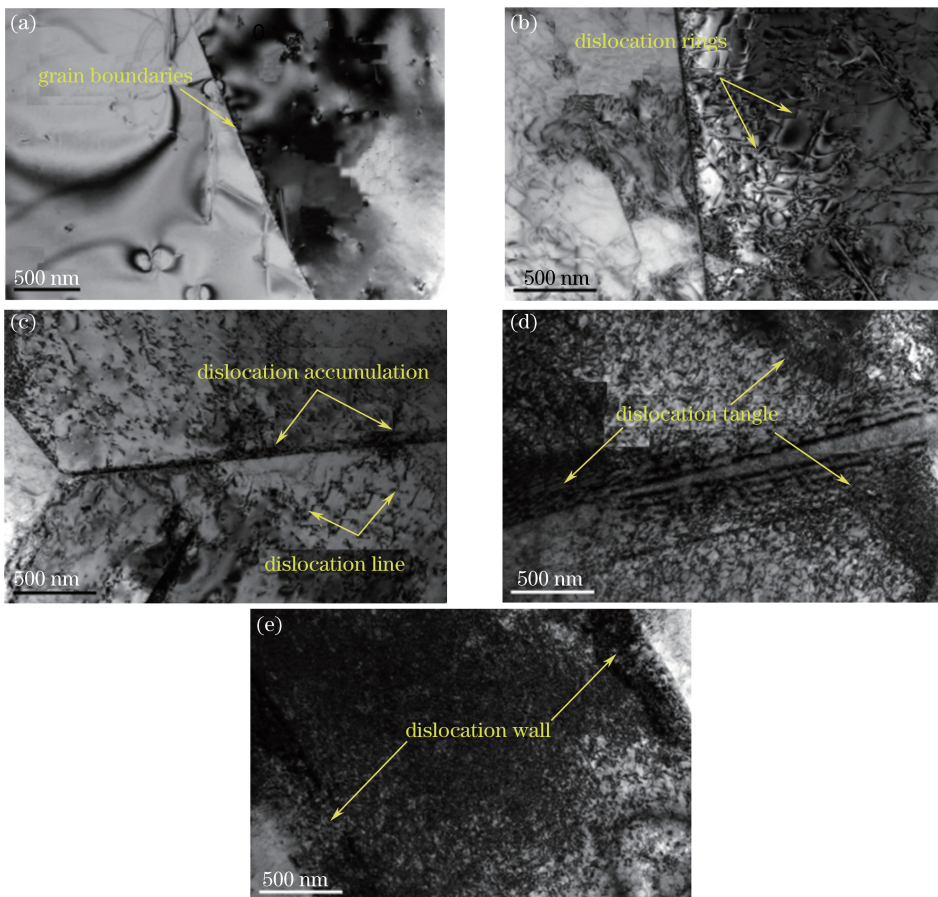


图 7 不同冲击次数下 TC17 钛合金的表面 TEM 图。(a) 未冲击; (b) 冲击 1 次; (c) 冲击 2 次; (d) 冲击 3 次; (e) 冲击 4 次

Fig. 7 TEM photographs of TC17 titanium alloy surface with different impact numbers.

(a) Without impact; (b) 1 impact; (c) 2 impacts; (d) 3 impacts; (e) 4 impacts

图 8 为经过 7 J 激光脉冲冲击 2 次后 TC17 合金的显微组织,与图 7(c)相比,位错的密度在一定程度上有所提高,图 7(c)中只观察到位错堆积和位错线,而图 8 中的试样晶粒内位错缠结严重,晶界处有位错墙出现。

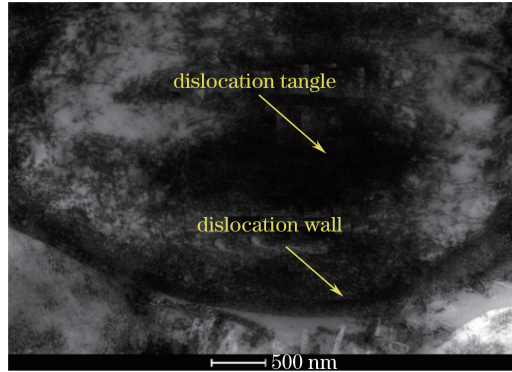


图 8 两次能量为 7 J 的冲击后 TC17 钛合金的表面 TEM 图

Fig. 8 TEM photograph of TC17 titanium alloy surface after two impacts with laser energy of 7 J

当冲击波的压力超过了材料动态屈服强度时,材料会发生塑性变形,而钛合金主要通过位错运动来协调塑性变形。Meyers 等^[22]在均匀形核理论中指出,位错在冲击波波阵面上形成,并在后续冲击波推动下发生滑移。TC17 钛合金属于双相多晶体材料,内部存在多种界面和缺陷,这将导致冲击波发生反射和透射而产生多方向载荷,致使位错滑移方向不断改变,产生塞积、湮灭和重排等现象,从而形成图 7 中的位错结、位错墙等结构。其中,位错塞积群等高密度位错结构的出现会引起应力集中,从而提高钛合金的屈服强度,对钛合金起到强化作用^[23]。同时,高密度位错的产生还可以有效地阻止疲劳裂纹的萌生和扩展^[24],在一定程度上能够提高 TC17 钛合金的疲劳强度。

4 结 论

TC17 钛合金经过 LSP 后,材料表面发生了塑性变形,产生了高残余压应力场,且表面残余压应力随着冲击次数和冲击能量的增大而增大,在 7 J 能量下冲击 4 次时表面残余压应力可达 462.8 MPa。LSP 处理使 TC17 表层组织中产生了高密度位错,随着冲击次数和冲击能量的增加,位错密度逐渐增大,并产生了位错缠结、位错墙等结构。

参 考 文 献

- [1] Wang Xuede, Yang Lei, Zhou Xin, *et al.* Residual stress and microstructure of laser shock peened layer of titanium alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(4): 77-83.
王学德, 杨磊, 周鑫, 等. 钛合金激光冲击强化层的残余应力及显微组织[J]. *机械工程材料*, 2012, 36(4): 77-83.
- [2] Li Chonghe, Zhu Ming, Wang Ning, *et al.* Application of titanium alloy in airplane[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2009, 33(1): 84-91.
李重河, 朱明, 王宁, 等. 钛合金在飞机上的应用[J]. *稀有金属*, 2009, 33(1): 84-91.
- [3] Li H M, Liu Y G, Li M Q, *et al.* The gradient crystalline structure and microhardness in the treated layer of TC17 via high energy shot peening[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 357(A): 197-203.
- [4] Zhou L C, Li Y H, He W F, *et al.* Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 578: 181-186.
- [5] Cao X W, Xu H Y, Zou S K, *et al.* Investigation of surface integrity on TC17 titanium alloy treated by square-spot laser shock peening[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(4): 650-656.
- [6] Fairand B P, Clauer A H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(3): 1497-1502.
- [7] Nie Xiangfan, He Weifeng, Zang Shunlai, *et al.* Effects on structure and mechanical properties of TC11 titanium alloy by laser shock peening[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(2): 321-327.
聂祥樊, 何卫锋, 臧顺来, 等. 激光冲击对 TC11 钛合金组织和力学性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(2):

- 321-327.
- [8] Hatamleh O, Lyons J, Forman R. Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(3): 421-434.
- [9] Breuer D. Laser peening-Advanced residual stress technology[J]. *Industrial Heating*, 2007, 74(1): 48-50.
- [10] Ricbard D T, David F L. Preventing fatigue failures with laser peening[J]. *AMPTIAC Quarterly*, 2003, 7(2): 3-7.
- [11] Bartsch T M. High cycle fatigue (HCF) science and technology program 2002 annual report[R]. Dayton: Universal Technology Corporation, 2003.
- [12] Zhang Hong, Yu Chengye, Lu Boliang. The research of laser shock processing to improve the mechanical properties of aeronautical materials[J]. *Laser Journal*, 1996, 17(5): 221-224.
张宏, 余承业, 陆博良. 激光冲击处理提高航空材料机械性能的研究现状[J]. *激光杂志*, 1996, 17(5): 221-224.
- [13] Zou Hongcheng, Dai Shujuan, Yang Xiao, *et al.* Study on improvement of fatigue life of aluminum alloy by small energy laser shock processing[J]. *Applied Laser*, 1995, 15(6): 250-252.
邹鸿成, 戴蜀娟, 杨晓, 等. 小能量激光冲击处理提高铝合金疲劳寿命的研究[J]. *应用激光*, 1995, 15(6): 250-252.
- [14] Wang Huaming, Li Xiaoxuan, Sun Xijun, *et al.* Study of surface mechanical properties of laser shock processed austenitic steel and Ni-based super alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(8): 756-760.
王华明, 李晓轩, 孙锡军, 等. 激光冲击处理不锈钢及镍基合金后表面力学性能的研究[J]. *中国激光*, 2000, 27(8): 756-760.
- [15] Zhang Yongkang, Zhou Lichun, Ren Xudong, *et al.* Experiment and finite element analysis on residual stress field in laser shock processing TC4 titanium alloy[J]. *Journal of Jiangsu University*, 2009, 30(1): 12-13.
张永康, 周立春, 任旭东, 等. 激光冲击 TC4 残余应力场的试验及有限元分析[J]. *江苏大学学报*, 2009, 30(1): 12-13.
- [16] Cao Yupeng, Xu Ying, Feng Aixin, *et al.* Experimental study of residual stress formation mechanism of 7050 aluminum alloy sheet by laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0702008.
曹宇鹏, 徐影, 冯爱新, 等. 激光冲击强化 7050 铝合金薄板表面残余应力形成机制的实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0702008.
- [17] Wang Changyu, Luo Kaiyu, Lu Jinzhong. Effect of advancing direction on residual stress fields of AM50 Mg alloy specimens treated by double-sided laser shock peening[J]. *Chinese J 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.
- [18] Liu Bo, Luo Kaiyu, Wu Liujun, *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.
- [19] Lou S, Li Y, Zhou L, *et al.* Surface nanocrystallization of metallic alloys with different stacking fault energy induced by laser shock processing[J]. *Materials & Design*, 2016, 104: 320-326.
- [20] Li Wei. Study on principle and key technologies of laser shock processing used in steel blade[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2010: 19-24.
李伟. 钢制叶片激光冲击强化原理与关键技术研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2010: 19-24.
- [21] Manson S S. Fatigue damage of metals[M]. Lu Suo, Transl. Beijing: National Defence Industry Press, 1976: 314-333.
曼森 S S. 金属疲劳损伤[M]. 陆索, 译. 北京: 国防工业出版社, 1976: 314-333.
- [22] Meyers M A, Gregori F, Kad B K, *et al.* Laser-induced shock compression of monocrystalline copper: Characterization and analysis[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(5): 1211-1228.
- [23] Garcia-Mateo C, Caballero F G. Ultra-high-strength bainitic steels[J]. *ISIJ International*, 2005, 45(11): 1736-1740.
- [24] Ling Chao, Li Guobin, Meng Xianling. An investigation on the relation between the fatigue crack propagation threshold and grain size-the application of the dislocation theory[J]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 1992, 21(3): 68-70.
凌超, 李国彬, 孟宪玲. 疲劳裂纹扩展门槛值与晶粒尺寸关系-位错理论的应用[J]. *河北工学院学报*, 1992, 21(3): 68-70.