

文章编号：1001-3806(2017)01-0068-06

激光冲击强化对 TC17 微观组织和表面硬度的影响

侯果¹, 朱颖¹, 郭伟^{1*}, 范博文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: 为了研究激光冲击次数和冲击能量对 TC17 钛合金微观组织和表面硬度的影响, 采用不同的工艺参数对 TC17 钛合金进行了激光冲击强化处理。TC17 钛合金在激光冲击后, 表面形成了剧烈塑性变形和高密度位错, 冲击过程中位错发生增殖、塞积、缠结等现象, 单脉冲冲击形成的微凹坑的深度最大可达 $21.4\mu\text{m}$; 脉冲能量为 5J、搭接冲击次数从 1 次增加到 4 次时, 材料的表面硬度相比母材的增幅分别为 8.3%, 17.2%, 24.3% 和 24.5%; 5J 和 7J 冲击 1 次时, 表面硬度相比母材增幅分别达 8.3% 和 14.2%。结果表明, 随着冲击次数和脉冲能量的增加, TC17 材料表面硬度随之增加, 激光冲击强化使材料表面产生高密度位错, 这是其表面硬度增加的关键原因。

关键词: 激光技术; 激光冲击强化; TC17 钛合金; 微观组织; 表面硬度

中图分类号: TG665 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2017. 01. 015

Influence of laser shock peening on microstructure and surface hardness of TC17 titanium alloy

HOU Guo¹, ZHU Ying¹, GUO Wei¹, FAN Bowen¹, HUANG Shuai²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To study the influence of laser shock peening number and pulse energy on microstructure and surface hardness of TC17 titanium alloy, TC17 titanium alloy samples were laser shock peened with different process parameters. The results show that severe plastic deformation and a great deal of high-density dislocations, such as proliferate, pile up and tangle, are generated in the material surface layer in the process. The maximum depth of micro-pits created by single pulse can be $21.4\mu\text{m}$. When pulse energy is 5J, and overlap impacts increase from 1 time to 4 times, the surface hardness of materials increases by 8.3%, 17.2%, 24.3% and 24.5% respectively, compared with parent metal. In the meantime, when overlap impact is 1 time, and pulse energy is 5J and 7J, the surface hardness increases by 8.3% and 14.2% respectively. The conclusion is that the surface hardness is enhanced with the increase of impacts and pulse energy. High density dislocation on material surface by laser shock processing is the key reason for the increase of surface hardness.

Key words: laser technique; laser shock peening; TC17 titanium alloy; microstructure; surface hardness

引言

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好和耐高温等一系列优点, 其广泛应用于航空、航天、化工、电力等领域^[1,2], 因此被称为“太空金属”和“海洋金属”。其中, TC17 由于其 $\alpha + \beta$ 的双相结构, 并且具有较高的强度、韧性和淬透性, 以及良好的热稳定性、断裂韧性

基金项目: 国家国际科技合作专项资助项目
(2013DFR50590)

作者简介: 侯果(1992-), 男, 硕士研究生, 现主要从事钛合金激光冲击强化的研究。

* 通讯联系人。E-mail:gwei@buaa.edu.cn

收稿日期: 2015-12-23; 收到修改稿日期: 2016-03-16

和抗蠕变性, 被广泛应用于航空发动机叶片和压气机转子等部件^[3]。但是, 金属材料经常发生疲劳、腐蚀和磨损等失效现象, 并且几乎都发生在材料表面。钛合金也不例外, TC17 钛合金叶片作为飞机的重要构件, 因为经常受冲刷磨损的作用而引起疲劳断裂, 所以提高其表层硬度是一种十分有效的工艺处理方法^[4]。

激光冲击强化(laser shocking peening, LSP)技术是利用高峰值功率密度(GW/cm² 级)、短脉冲(纳秒级)的激光, 通过与物质的相互作用而产生的高压冲击波所带来的力学效应对材料表面进行强化处理的技术^[5]。与其它表面强化技术相比, 激光冲击强化技术由于自身的超高应变率、热影响较小和良好的可控性等优点而成为表面改性的研究热点^[6]。国外对于激光冲击强化技术的研究已经有 50 年, 激光冲击强

化技术的设备、工艺、机理和应用研究都比较成熟^[7-8]。而我国激光冲击强化技术的发展比较缓慢,直到 20 世纪 90 年代,我国高功率铷玻璃激光装置的成功研制才开启了激光冲击强化技术的研究^[9]。目前国内学者对不锈钢、铝合金及 TC4 钛合金等材料进行了相当多的试验研究,代表单位有空军工程大学、江苏大学和北京航空制造工程研究所等^[10-13],但他们同样对航空方面应用较多的 TC17 钛合金的研究还较少。本文中选用 TC17 钛合金作为研究对象,尝试用不同的工艺参数对试样进行冲击强化,探索不同冲击次数和冲击能量对材料微观组织和表面形貌、硬度的影响。

1 试验材料及方法

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

Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	C	N	H
balance	0.045 ~ 0.055	0.016 ~ 0.024	0.016 ~ 0.024	0.035 ~ 0.045	0.035 ~ 0.045	0.003	0.0005	0.0005	0.000125

Fig. 1 Specimen for laser shock peening

a—specimen for single pulse impact b—specimen for overlap impact

1.2 试验方法

激光冲击强化试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整套激光冲击强化系统,该系统包括 SGR-Extra 型 Nd:YAG 脉冲激光器、冲击光路、工件的夹持运动系统、约束层系统以及监控系统等部分(如图 2 所示)。其中 Nd:YAG 脉冲激光器需要高功率、高频率、短脉宽等条件才能达到激光冲击强化的工艺要求,主要参数如表 2 所示。激光冲击强化打出的圆形光斑直径为 2mm,搭接冲击时搭接率为 50%,材料表面的吸收层和约束层分别采用 0.4mm 厚的黑漆胶带和 1mm ~ 2mm 厚的水层。

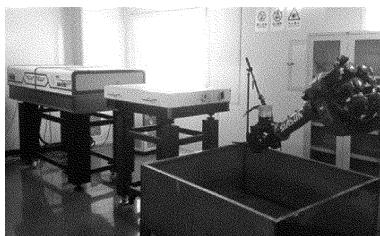


Fig. 2 Laser shock peening system

Table 2 Performance parameters of Nd:YAG laser

wavelength	maximum pulse energy	frequency	pulse width	divergence angle	beam pointing stability
1064nm	7J	5Hz	10ns	2.2mrad	$\leq 50\mu\text{rad}$

1.1 试验材料

试验中采用 TC17 钛合金,其主要化学成分如表 1 所示。TC17 钛合金名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr,是由美国空军和通用电气公司于 20 世纪 70 年代合作研制成功的新型高性能航空发动机材料,是一种富含 β 稳定元素的 $\alpha + \beta$ 两相钛合金^[14]。采用线切割机床加工出单脉冲冲击和搭接冲击的试样,如图 1 所示。其中单脉冲冲击试样为 100mm × 40mm × 5mm 的钛板,为降低粗糙度带来的影响,将其打磨光滑,在钛板中间区域进行单脉冲冲击;搭接冲击试样为 10mm × 10mm × 5mm 的小块,激光冲击强化之前将小块 10mm × 10mm 的这一面进行打磨抛光,冲击区域覆盖整个上表面。

在试验中,分别选定冲击 1 次、冲击 2 次、冲击 3 次和冲击 4 次对试样表面进行单脉冲冲击和光斑搭接冲击。

已知 TC17 钛合金的组成及性能,根据 Fabbro 冲击波峰值压力 p 与功率密度 I 的经验公式^[15]计算,要使 TC17 材料发生塑性变形,功率密度应该超过 1.6GW/cm²^[16]。激光功率密度与脉冲能量的关系^[17]为:

$$I_0 = 4E/(\pi D^2 \tau) \quad (1)$$

式中, I_0 为激光功率密度, E 为脉冲能量, τ 为脉宽, D 为光斑直径。因为脉宽 τ 和光斑直径 D 已经确定,由(1)式可知,能量超过约 5J 时 TC17 材料会发生塑性变形。根据激光器实际情况,本试验中采用 5J 能量和 7J 能量分别进行冲击实验。

本次激光冲击强化的试验方案汇总如表 3 所示。

Table 3 Test scheme of laser shock peening

pulse energy/J	times	impact modes
5	1	single pulse/overlap
5	2	single pulse/overlap
5	3	single pulse/overlap
5	4	single pulse/overlap
7	1	single pulse/overlap
7	2	overlap
7	3	overlap
7	4	overlap

试样冲击后通过 JEM-2100 透射电镜对搭接后试样的微观组织进行观察。将适当大小的试样用线切割切到 0.3mm 的厚度,并用砂纸打磨直至厚度为 50μm,为了不破坏冲击面,只对未冲击面进行打磨。冲孔出直径 $\varnothing 3\text{mm}$ 大小的透射试样后进行双喷减薄。减薄

后便可透射电镜下观察试样薄区的微观组织。

采用 KLA-Tencor 3 维白光干涉表面形貌仪对微凹坑的深度进行测量, 分辨率为 752 pixel \times 480 pixel, xyz 行程为 100 mm \times 100 mm \times 100 mm。

表层硬度测试采用 DHV-1000 显微硬度计, 测量载荷 500 g, 加载后停留时间为 15 s。

2 试验结果与分析

2.1 表面形貌

单脉冲冲击后在试样表面留下直径大约 2 mm 的微凹坑, 微凹坑的深度则在一定程度上表征了材料表

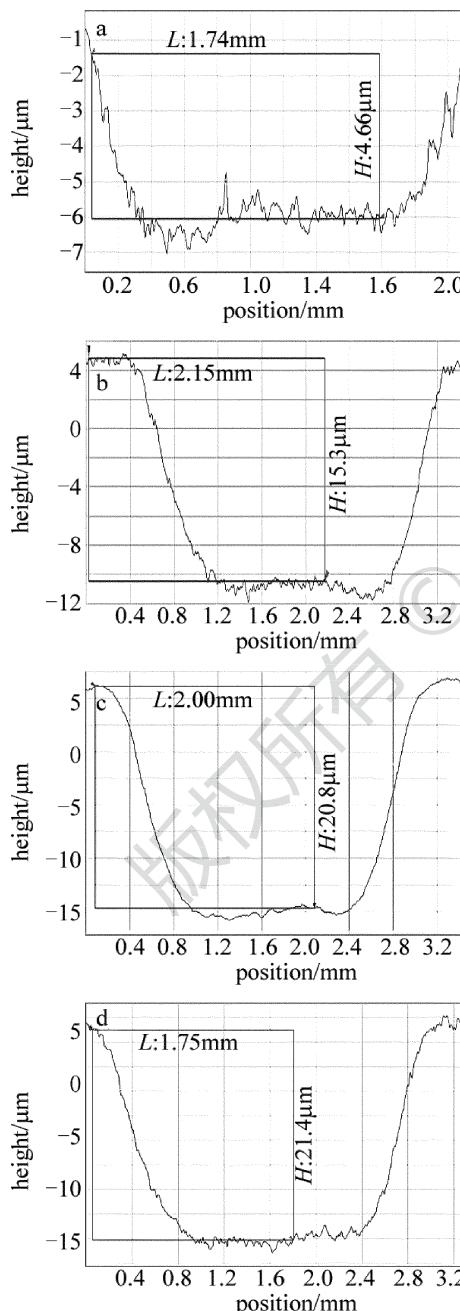


Fig. 3 Measurement of micro-pit depth with single pulse of different impacts and 5J
a—1 impact b—2 impacts c—3 impacts d—4 impacts

面塑性变形程度的大小。图 3 所示是经 5J 不同次数单脉冲冲击后的微凹坑深度的测量结果。

从图 3 可以看出, 5J 能量单脉冲冲击分别 1 次、2 次、3 次和 4 次后微凹坑的深度分别为 4.66 μm, 15.3 μm, 20.8 μm 和 21.4 μm。随着激光冲击次数的增加, 表面微凹坑的深度也随之增加, 即材料表面的塑性变形也逐渐加剧; 但是随着冲击次数的增加, 微凹坑深度的增幅逐渐变小。

图 4 所示的是经 7J 能量冲击 1 次的单脉冲冲击后的微凹坑轮廓图, 以及对微凹坑深度的测量结果。

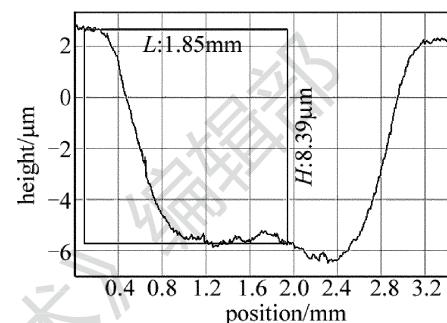


Fig. 4 Measurement of micro-pit depth with single pulse of impacts and 7J

对比图 3a 和图 4 可知, 经 5J 能量和 7J 能量单脉冲冲击 1 次后的微凹坑深度分别为 4.66 μm 和 8.39 μm, 脉冲能量越高, 形成的冲击波压力越高, 材料的表面塑性变形加剧, 导致微凹坑的深度变大。

2.2 表面显微硬度

对单脉冲冲击后产生的微凹坑进行表面硬度的测量, 测量方式如图 5 所示。从微凹坑周围开始测量, 每次测量间隔 0.25 mm, 测量一直贯穿整个微凹坑直径, 图 5 中, 编号 3 和编号 11 为微凹坑的边缘, 编号 7 为微凹坑的中心处。

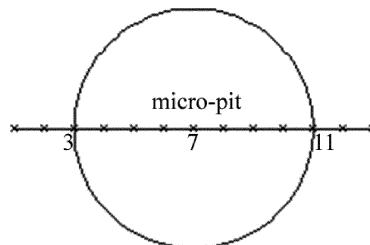


Fig. 5 Diagrammatic sketch of hardness measurement with single pulse impacts

图 6 所示的是经 5J 能量不同次数单脉冲冲击后的微凹坑硬度分布。从图 6 可以看出, 基体表面硬度为 225 HV_{0.5} 左右, 随着逐渐接近微凹坑的中心, 硬度逐渐增加并在中心处达到最大值。冲击次数为 1 次、2 次、3 次和 4 次中心处硬度分别为 252 HV_{0.5}, 270 HV_{0.5}, 288 HV_{0.5} 和 290 HV_{0.5}, 相比基体硬度的增幅分别为 12.0%, 20.0%, 28.0% 和 28.9%。在冲击次数为 3 次以下时, 随着冲击次数的增大, 在相对应的微凹坑的

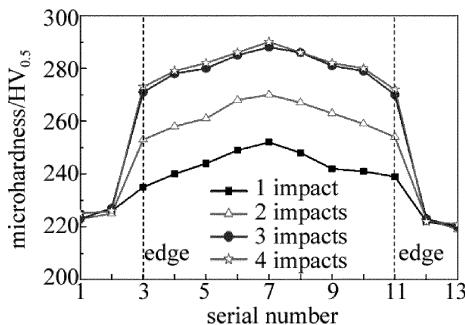


Fig. 6 Micro-pit hardness with single pulse of different impacts

边缘和中心处,硬度都逐渐增加。而在冲击次数达到4次时,微凹坑各个位置硬度与3次冲击下的硬度相比基本没有变化,这说明在冲击3次后,再次进行冲击对硬度的影响并不明显。

图7所示的是经不同能量单脉冲冲击后微凹坑的硬度分布。由图7中同样可以看出,逐渐接近微凹坑的中心时,硬度也逐渐增加并在中心处达到最大值。5J能量冲击1次和7J能量冲击1次时,中心处硬度相比于基体硬度的增幅分别为12.0%和18.6%。说明脉冲能量的增加对微凹坑平均硬度的提高有良好的效果。

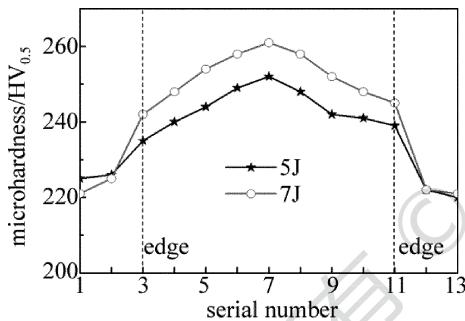


Fig. 7 Micro-pit hardness with single pulse of 5J and 7J

分别对母材和搭接冲击试样的表面硬度进行测量,测量示意图如图8所示。在试样表面中心位置任取一条直线,并从左向右依次测量5个点,每个点间隔1.5mm。

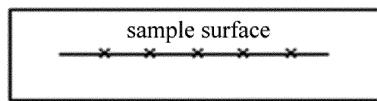


Fig. 8 Diagrammatic sketch of hardness measurement with overlap impacts

图9所示的是母材和经5J能量不同次数搭接冲击后试样表面的硬度分布。从图9中可以看到,在3次冲击次数以下时,表面硬度随冲击次数的增加而增加。母材表面平均硬度为225.2HV_{0.5},冲击次数为1次、2次、3次和4次下表面平均硬度分别为243.8HV_{0.5}、264.0HV_{0.5}、280.0HV_{0.5}和280.4HV_{0.5},相比母材硬度的增幅分别为8.3%,17.2%,24.3%和24.5%。若继续冲击,其表面硬度的提高很小,这也与之前单脉冲冲

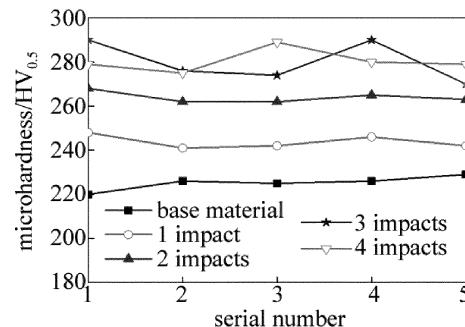


Fig. 9 Surface hardness with overlap of different impacts

击后,微凹坑的硬度变化相似。进一步说明冲击3次后继续冲击,表面塑性变形有限,激光冲击强化提高表面硬度的效果趋向饱和。

图10所示的是不同脉冲能量搭接冲击后试样表面的硬度分布。从图10中同样发现搭接冲击后,随着脉冲能量的提高,材料的表面硬度也随之提高。5J能量和7J能量冲击时表面平均硬度分别为243.8HV_{0.5}和257.2HV_{0.5},相比母材增幅分别达8.3%和14.2%,激光冲击强化的能量越大,强化效果越好。

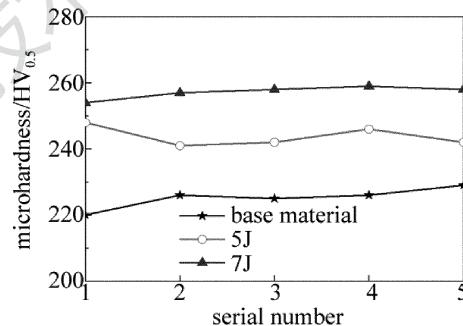


Fig. 10 Surface hardness with overlap impact of 5J and 7J

2.3 微观组织

图11为冲击能量为5J能量时,不同搭接冲击次数下TC17钛合金的透射电镜显微图(transmission electron microscope, TEM)。

TC17是 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金,从图11a中可以看出,未冲击时, β 相内部靠近晶界处有少量位错,它们分布得较为分散,而在 α 相中几乎没有看到位错;冲击1次时,由图11b可以看到晶粒内发现大量位错线,并在晶界处遇阻发生塞积;当冲击次数由2次逐渐增加到4次时,位错密度不断增大,除晶界外,在 α 相和 β 相内部都发现大量位错,位错不断滑移、增殖,发生塞积、缠结等现象,如图11b~图11e所示。

图12为7J能量3次搭接冲击后TC17钛合金的透射电镜图。与图11d对比发现,5J能量3次冲击后,位错已发生严重的缠结,当冲击能量增加到7J时,位错继续缠结,有位错墙形成。

在激光冲击过程中涂层吸收了激光束能量并且气化形成等离子体,等离子体会膨胀、爆炸,产生高强度

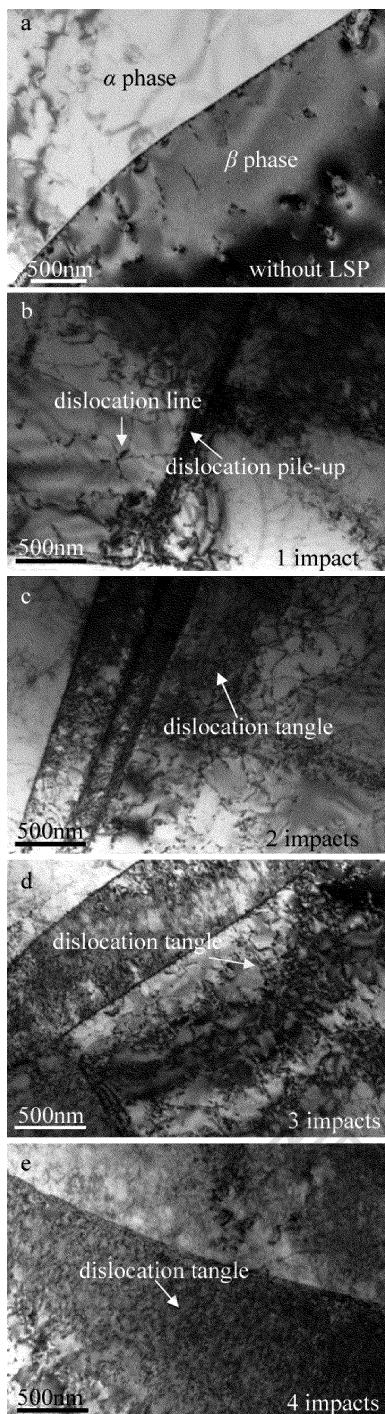


Fig. 11 TEM photographs of surface layer of TC17 titanium alloy samples with different LSP impacts

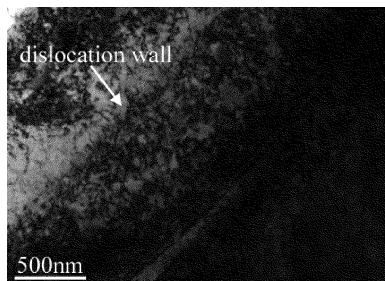


Fig. 12 TEM photographs of surface layer of TC17 titanium alloy with 3 impacts of 7J

冲击波,材料表面发生的微塑性变形就是由于该冲击波与金属表面相互作用所导致的,同时在这种情况下位错源增殖并移动^[18]。随着冲击次数和冲击能量的不断增加,位错密度逐渐增大,引起加工硬化。根据材料的微观硬度 H_v 与位错密度 ρ 的关系^[19]:

$$H_v = H_{v,0} + aGb\rho^{1/2} \quad (2)$$

式中, $H_{v,0}$ 为基体的微观硬度; a 为与材料有关的常数; G 为切变模量; b 为柏氏矢量。

由(2)式可以看到,材料硬度 H_v 和 $\rho^{1/2}$ 成正比,随着冲击次数的增加,位错密度也随之增加,材料的表面硬度得到改善,这就是位错强化现象。但同时 TC17 材料的塑性流动会变得困难,所以对材料进行多次激光冲击强化会使表面硬度值达到饱和,试验中单脉冲和搭接的硬度测量结果也验证了这一点。

3 结 论

(1) 激光冲击强化后 TC17 试样表面发生塑性变形,留下微凹坑。随着冲击次数和脉冲能量的增加,塑性变形随之加剧。

(2) 激光冲击强化能显著提高 TC17 材料表面的硬度。搭接冲击次数从 1 次增加到 4 次时,相比母材硬度的增幅分别为 8.3%, 17.2%, 24.3% 和 24.5%;当冲击次数达到 3 次以上时,材料表面硬度的提高幅度有限。同时脉冲能量越高,材料的表面硬度也越大。5J 和 7J 冲击时,表面平均硬度相比母材增幅分别达 8.3% 和 14.2%。

(3) 随着冲击次数和冲击能量的增加,材料晶粒内位错密度不断增大,位错发生增殖、塞积和缠结,微观组织的变化是提高钛合金材料表面硬度的关键。

参 考 文 献

- [1] LI X W, SHA AI X, ZHANG W F, et al. TA15 titanium alloy and its applying prospects on airframe [J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(4):90-93 (in Chinese).
- [2] WANG X D, YANG L, ZHOU X, et al. Residual stress and microstructure of laser shock peened layer of titanium alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(4):77-83 (in Chinese).
- [3] WU B, LI J W, GONG Sh L, et al. Fatigue crack growth properties and fatigue crack growth life of the EB-joints of TC17 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3):170-174 (in Chinese).
- [4] NIE X F, LONG N D, LIU H L, et al. Effect of laser shock peening on surface hardness of TC17 titanium alloy [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(1):198-199 (in Chinese).
- [5] REN X D, ZHANG Y K, YE Y X, et al. Laser shock modification and life-extending technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011:12 (in Chinese).
- [6] WANG X D, NIE X F, LUO X H, et al. Study on effects of laser shock peening in TC11 titanium alloy with different impacts [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(9):997-998 (in Chinese).

- [7] SWIFT D, PAISLEY D, KYRALA G, *et al.* Laser-induced shock waves in condensed matter: some techniques and applications [J]. *High Pressure Research*, 2004, 24(4):409-422.
- [8] DAHOTRE N, HARIMKAR S. Laser fabrication and machining of materials [M]. New York, USA: Springer Science, 2008:477-496.
- [9] ZHANG H. The research state of laser shock processing to improve the mechanical properties of aeronautical materials [J]. *Laser Journal*, 1996, 17(5):221-224 (in Chinese).
- [10] PEI X, WU J H, JIANG S Q, *et al.* Study on mechanical properties in the laser spot center of Fe-Ni elastic alloy induced by laser shock processing [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3):350-352 (in Chinese).
- [11] REN X D, ZHANG T, ZHANG Y K, *et al.* Improving fatigue properties of 00Cr12 alloy by laser shock processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8):2111-2115 (in Chinese).
- [12] LUO X M, ZHANG Y K, REN X D, *et al.* Laser shock processing of Ti-6Al-4V and analysis of its microstructure response [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(9):1116-1122 (in Chinese).
- [13] LI Y, PEI X. Investigation on tribological behaviors of surface micro-forming 20CrNiMo steel under laser shock processing [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6):815-817 (in Chinese).
- [14] EDITORIAL BOARD OF CHINA AERONAUTICAL MATERIALS HANDBOOK. China aeronautical materials handbook: titanium alloy & copper alloy [M]. Beijing: China Standards Press, 2002:179-187 (in Chinese).
- [15] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and application [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, 27(12):1213-1229.
- [16] LI J, LI J, HE W F, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9):2890-2891 (in Chinese).
- [17] LI Y H. Theory and technology of laser shock processing [M]. Beijing: Science Press, 2013:181-182 (in Chinese).
- [18] ZHU Y, FAN B W, GUO W, *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):446-447 (in Chinese).
- [19] YANG D Zh. The strengthening mechanism of dislocation and metal [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1990:128-131 (in Chinese).