

激光喷丸对 TC17 钛合金恒温抗氧化性能的影响

黄帅¹, 朱颖^{2*}, 郭伟², 彭鹏², 刁训刚¹

¹北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191;

²北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191

摘要 利用高功率、短脉冲 Nd:YAG 激光对 TC17 钛合金进行了激光喷丸(LP)处理,并在 400 °C 温度下进行了恒温氧化增重试验,分析了 LP 对钛合金恒温氧化性能的影响。研究结果表明,相较于 LP 前,LP 后 TC17 钛合金在 400 °C 下的恒温氧化增重减小了 64.9%;材料表面的氧化膜更加致密,能更有效阻挡氧的扩散。表面能谱分析结果显示,LP 后氧化试样表面的 Cr 比未喷丸处理的多。大量的 Cr 能改善氧化层与基体间的附着力,因此 LP 可以改善钛合金的恒温抗氧化性能。

关键词 激光技术; 激光材料加工; 激光喷丸; TC17 钛合金; 恒温氧化增重; 微观组织

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.121401

Effect of Laser Peening on Isothermal Oxidation Resistance Property of TC17 Titanium Alloys

Huang Shuai¹, Zhu Ying², Guo Wei², Peng Peng², Diao Xungang¹

¹ School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

² School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract With a high-power and short-pulse Nd:YAG laser, TC17 titanium alloys are processed by laser peening (LP), the isothermal oxidation weight gain experiment at the temperature of 400 °C is carried out, and the effect of LP on the isothermal oxidation performance of titanium alloys is analyzed. The study results show that, as for the TC17 titanium alloys after LP, if compared with those before LP, the isothermal oxidation weight gain at 400 °C decreases by 64.9%, and the oxide film on the material surface becomes more dense, which can resist the oxygen diffusion more effectively. The surface energy spectral analysis results show that the Cr on the surface of the oxidized sample after LP is more than that before LP. A large amount of Cr can improve the adhesive force between the oxide layer and the substrate, and thus LP can improve the isothermal oxidation resistance property of titanium alloys.

Key words laser technique; laser material processing; laser peening; TC17 titanium alloys; isothermal oxidation weight gain; microstructure

OCIS codes 140.3390; 350.5400; 240.6700

1 引言

钛合金由于具有比强度高、比重小、低温和高温力学性能均良好等特点,被广泛应用于航空航天领域中。但是,钛在高温时能与许多元素或化合物发生反应,其与氧的亲合力也较强。钛的氧化行为对钛合金零件的性能有明显的损害^[1-2],对钛合金的高温氧化防护已有较多报道^[3-4]。扩散性涂层是应用范围较广的一类防护方法,在钛合金表面渗铝能有效提高钛合金的抗氧化性能。然而,线膨胀系数不匹配会在渗滤层引起裂

收稿日期: 2017-05-15; 收到修改稿日期: 2017-06-19

基金项目: 国家国际科技合作专项(2013DFR50590)

作者简介: 黄帅(1989—),男,博士研究生,主要从事钛合金激光冲击强化方面的研究。E-mail: hshuai987@buaa.edu.cn

导师简介: 刁训刚(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事材料表面工程方面的研究。

E-mail: diaoxg@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: bh_zhuying@buaa.edu.cn

纹,这会对钛合金零件产生破坏作用^[5]。离子注入及离子束辅助沉积抗氧化表面的改性方法可使钛合金的抗氧化性能和循环氧化性能得到改善,不足之处在于注入层太浅,仅为 0.1~0.5 μm ,因此存在着一定的缺陷^[6]。激光喷丸(LP)作为一种表面强化技术,能提高钛合金材料的抗疲劳性能,已被广泛应用于航空发动机的强化^[7-9]。不同于表面渗铝及离子注入等表面强化工艺,LP 能避免其他外来元素的侵入,且 LP 的光斑直径为 1~5 mm,故强化区域较其他表面强化方式更为精确。

关于 LP 后材料的高温性能研究已有较多报道。任旭东等^[10]分别在 200,300,400,500 $^{\circ}\text{C}$ 温度下,对 LP 处理的 6061-T651 铝合金进行了性能测试,从残余应力、显微硬度和微观组织等方面分析了 LP 对其高温性能的影响。Altenberger 等^[11]的研究结果表明,LP 后 TC4 钛合金高温下的疲劳性能得到显著提升。Karthik 等^[12]的研究表明,LP 能显著降低金属材料的热松弛效应。Hua 等^[13]的研究结果表明,LP 后镍基高温合金在 800 $^{\circ}\text{C}$ 及 900 $^{\circ}\text{C}$ 下的氧化增重量较未喷丸材料的有明显降低。但关于 LP 对 TC17 钛合金高温抗氧化性能影响的研究鲜有报道。

TC17 钛合金主要用于制造发动机风扇、压气机盘件和大截面的锻件,最高工作温度为 427 $^{\circ}\text{C}$,相变点为 890 $^{\circ}\text{C}$ 。本文在 400 $^{\circ}\text{C}$ (与服役温度相差不大)下对 TC17 钛合金进行了 100 h 恒温氧化增重试验,并研究了 LP 对钛合金高温氧化性能的影响。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验所用 TC17 钛合金的主要化学成分见表 1,该材料是一种富 β 稳定元素的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金。

表 1 TC17 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of TC17 titanium alloys (mass fraction, %)

Element	Al	Cr	Mo	Sn	Zr	Ti
Value	4.5-5.5	3.5-4.5	3.5-4.5	1.6-2.4	1.6-2.4	Bal.

2.2 LP 试验

LP 试验采用中国科学院沈阳自动化所搭建的 SIA-LSP-4 高性能 LP 系统,该 LP 系统主要由激光器电源、激光发生器及五轴机械手臂组成。所用高能脉冲激光器的能量范围为 0~8 J,激光波长为 1064 nm,脉宽为 15 ns,圆形光斑直径为 2.5 mm,重复频率为 2 Hz。五轴机械手臂有五个自由度,即沿 X、Y、Z 方向的移动以及绕 X、Z 方向的转动。该机械手臂的总重量为 650 kg,可负载 50 kg。

当高能脉冲激光辐照靶材时,涂覆于靶材上的吸收层吸收激光能量,并在约束层的作用下形成高能冲击波作用于靶材表面,进而改变材料的表面性能。LP 工艺的关键是激光诱导冲击波的峰值压力及持续时间,而根据 Peyre 等^[14]的研究结果可知,当冲击波压力为弹性极限的 2.0~2.5 倍时,喷丸强化效果较好。根据一维应变冲击压缩条件,TC17 钛合金的 Hugoniot 弹性极限 σ_{HEL} 为

$$\sigma_{\text{HEL}} = \left(\frac{K}{2G} + 2/3 \right) \sigma_{0.2}, \quad (1)$$

式中 K 为体积模量, G 为剪切模量, $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度。

对于 TC17 钛合金, $K = 112 \text{ GPa}$, $G = 43.2 \text{ GPa}$, $\sigma_{0.2} = 1110 \text{ MPa}$,由此可计算出 TC17 钛合金的 Hugoniot 弹性极限为 2.2 GPa,所需冲击波的压力为 4.4~5.5 GPa。根据激光诱导冲击波峰值压力模型,计算出喷丸强化 TC17 钛合金所需的功率密度^[15]表达式为

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

式中 P 为冲击波峰值压力; α 为等离子体冲击波的能量转换因子(一般取值为 0.2); I_0 为功率密度; Z 为总阻抗,存在 $2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2$,其中 Z_1 、 Z_2 分别为靶材材料与约束材料的阻抗。钛合金靶材的阻抗为 $1.38 \times 106 \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$,水约束层的阻抗为 $0.165 \times 106 \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ^[16],由此计算出功率密度最小为 $6 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。激光功率密度和脉冲激光能量的转换公式^[17]为

$$I_0 = \frac{4E}{\pi D^2 \tau}, \quad (3)$$

式中 E 为脉冲激光能量, D 为光斑直径, τ 为脉冲宽度。由(3)式可算出最小脉冲能量为 4.4 J, 故本试验采用 5 J 能量对试样进行 LP 处理。

2.3 恒温氧化增重试验

将 2 mm 厚的 TC17 钛合金板材用砂纸依次打磨完毕, 对双面各进行两次喷丸强化, 搭接率为 50%。经 LP 处理后, 将 TC17 钛合金线切割成 10 mm×10 mm×2 mm 尺寸的试样。将未喷丸的 TC17 钛合金也线切割成相同尺寸的试样进行恒温氧化处理。恒温氧化设备如图 1 所示。试验时, 将未经 LP 的试样与 LP 后的试样分别放置于陶瓷板上, 如图 1 右上角插图所示, 再放入管式炉中。为保证试验的准确性, 试验分别采用 5 个试样。



图 1 管式炉

Fig. 1 Tube furnace

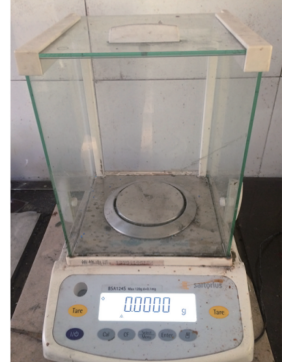


图 2 电子天平

Fig. 2 Electronic balance

在设定温度 400 °C 下, 每隔 1, 3, 5, 10, 25, 50, 75, 100 h 取出试样, 用图 2 所示的电子天平对试样进行称重。该电子天平采用防静电涂层玻璃防风罩, 能有效屏蔽外界静电荷的干扰, 天平可读性为 0.1 mg, 称重范围为 0~120 g, 重复性小于等于 ±0.1 mg。由于每个试样的氧化增重量很小, 因此为了确保试验的准确性, 将试样置于高温氧化环境中保温一段时间后取出, 冷却后再进行称重, 称重的环境保持密闭, 防止扰动对氧化增重量测试的影响。

3 试验结果与分析

3.1 恒温氧化增重数据分析

母材(BM)与 LP 试样在 400 °C 下恒温氧化 100 h 后, 每组 5 个试样的增重数据见表 2。图 3 所示为 BM 与 LP 后 TC17 钛合金在 400 °C 下不同时间内的单位面积氧化增重曲线(也称氧化动力学曲线)。可以看出, 该曲线基本符合 Wagner 抛物线氧化理论^[18]。未经喷丸强化的钛合金材料在氧化的前 50 h 一直处于增重状态, 50 h 后趋于平缓; 而 LP 后的钛合金材料在氧化的前 10 h 处于增重状态, 之后趋于平缓。二者氧化

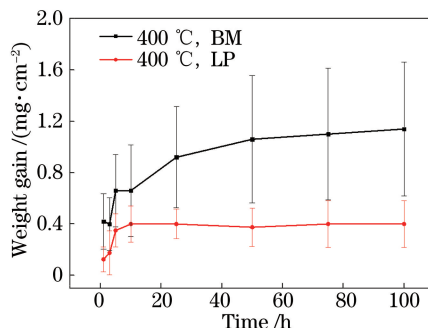


图 3 BM 与 LP 后试样在 400 °C 下的恒温氧化动力学曲线

Fig. 3 Isothermal oxidation kinetic curves of BM and specimen after LP at 400 °C

10 h后,单位面积增重分别为 $1.14 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,与未喷丸材料相比,LP 后的 TC17 钛合金在 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的增重速率减小了 64.9% 。

表 2 BM 与 LP 后试样在 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的恒温氧化增重数据

Table 1 Isothermal oxidation weight gain data of BM and specimen after LP at $400 \text{ }^\circ\text{C}$

Specimen No.	1	2	3	4	5
Weight increase for BM / ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.9	0.9	1.1	1.3	1.5
Weight increase for specimen after LP / ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.1	0.5	0.2	0.3	0.6

3.2 微观组织及机理分析

钛的氧溶解量很大,内氧化和外氧化共同决定了其氧化过程。钛合金中主要存在 Ti 和 Al 两种元素的氧化过程,它们在高温氧化时的反应式^[19]为



根据文献[20]可知, TiO_2 及 Al_2O_3 的形成自由能 ΔG 随温度 T 变化的表达式为

$$\Delta G(\text{TiO}_2, T) = -956600 + 347.73T + 6.52 \times 10^{-3}T^2 + 8.27 \times 10^5 T^{-1} - 23.14T \ln T, \quad (6)$$

$$\Delta G(\text{Al}_2\text{O}_3, T) = -1128390 + 303.737T + 1.85 \times 10^{-3}T^2 + 9.68 \times 10^5 T^{-1} - 12.71T \ln T. \quad (7)$$

图 4 所示为 TiO_2 和 Al_2O_3 在 4 种温度下的标准吉布斯形成自由能。因为 Al_2O_3 的吉布斯生成自由能较 TiO_2 的低,所以高温下 Al_2O_3 更稳定。

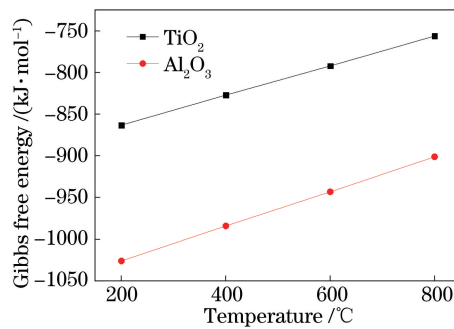


图 4 TiO_2 和 Al_2O_3 吉布斯自由能与温度间的关系

Fig. 4 Gibbs free energies of TiO_2 and Al_2O_3 versus temperature

在 TC17 钛合金中,Al 含量的增加会降低氧化膜的厚度,提高钛合金材料的抗氧化性能。Cr 是难熔金属,具有良好的高温抗氧化性能,钛合金中 Cr 的加入能大大降低相变温度,但会形成脆性极大的 TiCr_2 ,故钛合金材料中不能大量添加 Cr^[20]。

图 5 所示为 BM 与 LP 试样在 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温氧化后表面的 X 射线衍射(XRD)谱图。结果显示,表面氧化物主要由 Al_2O_3 和 TiO_2 组成,且 LP 后氧化物的峰强明显低于未经 LP 试样的,这也间接证明了 LP 后

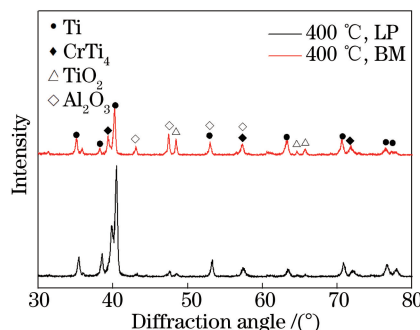


图 5 BM 与 LP 试样氧化后的 XRD 谱图

Fig. 5 XRD spectrogram of BM and LP specimen after oxidation

TC17 钛合金表面氧化物比未喷丸试样的少。与此同时,材料氧化物表面都有 CrTi_4 的存在,表明 Cr 携带 Ti 向外发生了扩散。文献[21]表明,一定量的 Cr 有利于 Al 在较低含量下形成连续的 Al_2O_3 膜,阻挡 O 的扩散。

图 6 所示为 TC17 钛合金 BM 与 LP 试样在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下经恒温氧化处理后的表面及截面微观形貌。如图 6(a)、(b)所示,钛合金 BM 表面为疏松多孔的氧化物,其在高温环境下很难有效阻挡 O 向钛合金内部扩散;而经 LP 后,钛合金氧化物表面的孔洞明显比未 LP 的小,即 LP 后材料的氧化膜更致密,有效阻挡了 O 的扩散。

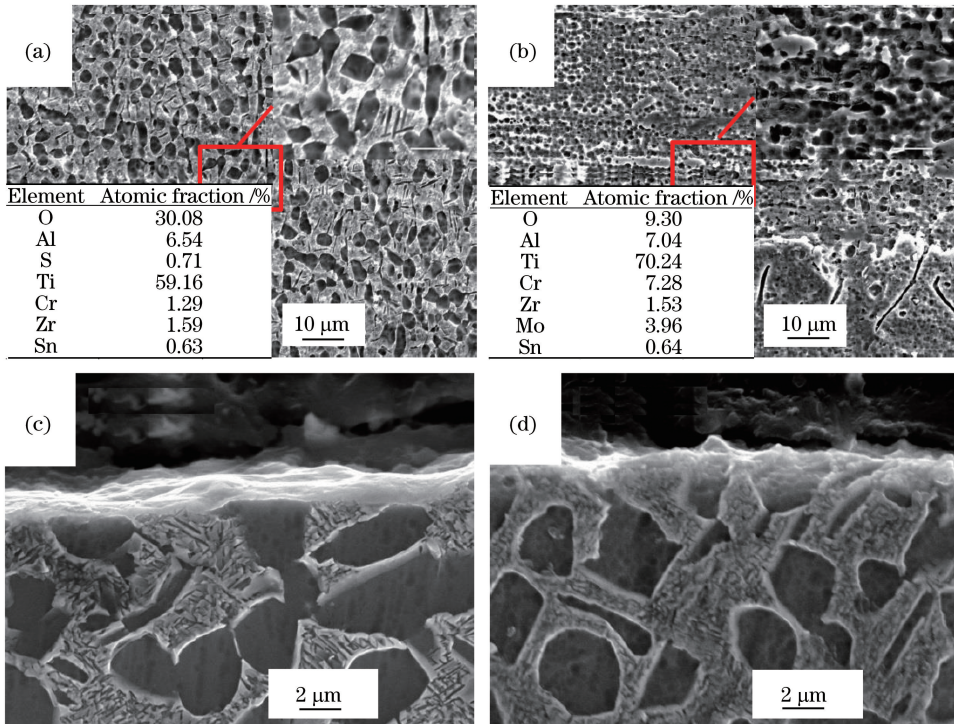


图 6 微观组织。(a) BM 表面;(b) LP 试样表面;(c) BM 横截面;(d) LP 试样横截面

Fig. 6 Microstructures. (a) Surface of BM; (b) surface of specimen after LP; (c) cross section of BM; (d) cross section of specimen after LP

图 6(a)、(b)左下角插图为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下氧化层表面的能谱(EDS)分析结果,可以看出,LP 后材料表面氧的含量减小,而 Cr 的含量明显增大。但是很难利用 Cr 的合金化来形成 Cr_2O_3 氧化膜,这是由于 Ti 和 O 的亲合力远高于 Cr 的, TiO_2 的稳定性也比 Cr_2O_3 的高。此外,由于 Cr^{3+} 与 Ti^{4+} 的结构及离子尺寸都很相近,氧化时大部分 Cr^{3+} 会固溶置换 TiO_2 中的 Ti,形成堆积的 Cr^{3+} ,进而障碍 TiO_2 层的扩散,降低氧化速率。此外,氧化层与基体的附着力也由于 Cr^{3+} 迁移到氧化层而得以改善^[22-23]。为了进一步分析 TC17 钛合金氧化层的剖面形貌,对氧化层的剖面进行了扫描电子显微镜观察,如图 6(c)、(d)所示,可以观察到,BM 在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下恒温氧化处理 100 h 后,材料表面产生了约 $2\text{ }\mu\text{m}$ 厚的氧化膜,而 LP 后材料表面的氧化膜厚度明显减小。这也侧面验证了 LP 对 TC17 钛合金抗氧化性能的改变。

4 结 论

研究了 LP 对 TC17 钛合金在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下的恒温氧化行为的影响,结果显示,LP 能阻碍钛合金材料表面的氧化行为。 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下,未喷丸 TC17 钛合金试样的增重为 $1.14\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,LP 后试样的增重为 $0.4\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,后者减少了 64.9%,即 LP 增强了 TC17 钛合金的抗氧化性能。微观组织显示,LP 后 TC17 钛合金表面的氧化膜更加致密,有效阻挡了氧的扩散。表面 XRD 分析结果显示,LP 后氧化试样表面的 Cr 比未喷丸处理的多,而大量的 Cr 能改善氧化层与基体间的附着力。LP 提高了钛合金的恒温抗氧化性能。

参 考 文 献

- [1] Shao Dechun, Li Xin, Liu Keyong. Improvement in resistance to high temperature oxidation of titanium alloy by laser surface alloying with Al+Nb[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(3): 281-285.
邵德春, 李鑫, 刘克勇. 激光表面合金化提高钛合金高温抗氧化性能的研究[J]. 中国激光, 1997, 24(3): 281-285.
- [2] Cui Li, Li Zhuoxin, Wei Qi. Influence of high temperature oxidation on the superplastic ability of Ti-6Al-4V alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(2): 21-24.
崔丽, 栗卓新, 魏琪. 高温氧化对钛合金超塑性能的影响[J]. 钛工业进展, 2006, 23(2): 21-24.
- [3] Cao J D, Zhang J S, Hua Y Q, *et al.* Improving the high temperature oxidation resistance of Ni-based superalloy GH202 induced by laser shock processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 31-39.
- [4] Jia Xinyun, Liu Peiyong, Tao Ye, *et al.* High temperature oxidation and protection of titanium alloys[J]. Aeronautical Engineering and Maintenance, 2000(4): 19-21.
贾新云, 刘培英, 陶冶, 等. 钛合金的高温氧化及防护[J]. 航空工程与维护, 2000(4): 19-21.
- [5] Liu Pei, Wang Zhenyu, Li Xiaowei, *et al.* Preparation of Cr₂AlC coatings on TC4 titanium alloy and its high temperature oxidation behavior[J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 16-22.
刘培, 王振玉, 李晓伟, 等. TC4 钛合金表面 Cr₂AlC 涂层的制备及高温氧化行为[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 16-22.
- [6] Liu Fengbin, Li Huiping, Cui Yan, *et al.* Surface structure of NiTi alloy by chromium ion implantation[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2): 31-37.
刘峰斌, 李慧萍, 崔岩, 等. Cr 离子注入镍钛合金的表面组织结构[J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 31-37.
- [7] Huang S, Zhu Y, Guo W, *et al.* Effects of laser shock processing on fatigue crack growth in Ti-17 titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(2): 813-821.
- [8] Zou Shikun, Gong Shuili, Guo Enming, *et al.* Laser peening of turbine engine integrally blade rotor[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601009.
邹世坤, 巩水利, 郭恩明, 等. 发动机整体叶盘的激光喷丸技术[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601009.
- [9] Qiao Hongchao, Zhao Jibin, Lu Ying, *et al.* Develop and analysis of nanosecond pulse width Nd:YAG laser for laser peening[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0802001.
乔红超, 赵吉宾, 陆莹, 等. 纳秒脉宽 Nd:YAG 激光喷丸激光器的研制及分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802001.
- [10] Ren Xudong, Ruan Liang, Huangfu Yongzhuo, *et al.* Experimental research of laser shock processing 6061-T651 aluminium alloy during elevated temperature[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303010.
任旭东, 阮亮, 皇甫喆卓, 等. 中高温条件下 6061-T61 铝合金激光喷丸研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303010.
- [11] Altenberger I, Nalla R K, Sano Y, *et al.* On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low and high cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44: 292-302.
- [12] Karthik D, Swaroop S. Laser peening without coating induced phase transformation and thermal relaxation of residual stresses in AISI 321 steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 291: 161-171.
- [13] Hua Y Q, Rong Z, Ye Y X, *et al.* Laser shock processing effects on isothermal oxidation resistance of GH586 superalloy[J]. Applied Surface Science, 2015, 330(6): 439-444.
- [14] Peyre P, Fabbro R, Merrien P, *et al.* Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behavior[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 210(1/2): 102-113.
- [15] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.* Physical study of laser produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775-784.
- [16] 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, 杨朝君. 激光冲击 TA2 板材变形的理论分析和研究[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1282-1287.
- [17] Hu Yongxiang. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

- [18] Guleryuz H, Cimenoglu H. Oxidation of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472(1): 241-246.
- [19] Dai J J, Zhu J Y, Chen C Z, *et al.* High temperature oxidation behavior and research status of modifications on improving high temperature oxidation resistance of titanium alloys and titanium aluminides: a review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 685: 784-798.
- [20] Wang Qi, Wen Zhi, Yi Danqing, *et al.* Oxidation behavior of TA15 titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2012, 17(5): 571-578.
王琪, 文智, 易丹青, 等. TA15 钛合金高温氧化行为[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(5): 571-578.
- [21] Wei Dongbo, Zhang Pingze, Yao Zhengjun, *et al.* Effect of double glow plasma surface chromizing on high-temperature oxidation resistance of TC4 titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(10): 146-150.
魏东博, 张平则, 姚正军, 等. TC4 合金双辉等离子渗 Cr 高温氧化行为[J]. 材料热物理学报, 2011, 32(10): 146-150.
- [22] Esaka F, Furuya K, Shimada H, *et al.* Comparison of surface oxidation of titanium nitride and chromium nitride films studied by X-ray absorption and photoelectron spectroscopy[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, 1997, 15(5): 2521-2526.
- [23] Wei Dongbo. Preparation and properties of high-temperature oxidation resistant coating on titanium alloy based on double glow plasma surface metallurgy technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
魏东博. 基于双辉技术的钛合金表面抗高温氧化合金层的制备及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.