

文章编号: 1001-3806(2016)02-0288-04

中高温条件下激光冲击处理 Ti-6Al-4V 表面完整性变化

侯丽华, 任旭东*, 周王凡, 戴文杰, 徐士东, 黄晶晶

(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了研究中高温条件下激光冲击处理对 Ti-6Al-4V 钛合金的表面完整性的影响, 采用高功率、短脉冲 Nd:YAG 激光器对 Ti-6Al-4V 钛合金表面进行激光冲击, 并将冲击后的钛合金试样分别置于 400℃, 500℃, 550℃ 和 600℃ 的温度下进行保温处理。从表面形貌、表面粗糙度、表面残余应力等方面分析了中高温条件下激光冲击处理对 Ti-6Al-4V 钛合金的表面完整性的影响。结果表明, 激光冲击处理增大了 Ti-6Al-4V 钛合金的表面粗糙度, 且热处理温度越高, Ti-6Al-4V 钛合金的表面粗糙度越大; 激光冲击处理显著提高了 Ti-6Al-4V 钛合金材料的表面残余压应力, 随着温度的升高, 残余压应力值降低。研究结果对了解和掌握 Ti-6Al-4V 钛合金的使用性能是有帮助的。

关键词: 激光技术; 表面完整性; 中高温; Ti-6Al-4V 钛合金

中图分类号: TG156.99

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.029

Change of surface integrity of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser shock processing at middle and high temperatures

HOU Lihua, REN Xudong, ZHOU Wangfan, DAI Wenjie, XU Shidong, HUANG Jingjing

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

Abstract: In order to study effect of laser shock processing (LSP) on surface integrity of Ti-6Al-4V titanium alloy at middle and high temperatures, a high power short pulse Nd:YAG laser was used to shock the surface of Ti-6Al-4V titanium alloy. And then, the specimens after LSP were held at 400℃, 500℃, 550℃ and 600℃ respectively for one hour. The influence of LSP on surface integrity of Ti-6Al-4V titanium alloy at middle and high temperatures were analyzed from surface morphology, surface roughness and surface residual stress. The results indicate that LSP increases the surface roughness of Ti-6Al-4V titanium alloy. The surface roughness increases with the increase of heat treatment temperature. The surface residual stress of Ti-6Al-4V titanium alloy increases obviously after LSP. The higher the temperature, the smaller the surface residual stress is. The research results are helpful for understanding the performance of Ti-6Al-4V titanium alloy.

Key words: laser technique; surface integrity; middle and high temperatures; Ti-6Al-4V titanium alloy

引言

Ti-6Al-4V 钛合金以其比强度高、高温抗氧化性能好等特点被广泛应用于航天航空、汽车、化工等领域^[1-3]。在这些应用领域中, Ti-6Al-4V 钛合金构件多服役于高温、冲击载荷等复杂的环境下, 易发生磨损、腐蚀等失效, 且绝大部分失效发生在材料的表面^[4]。因此, 很有必要研究 Ti-6Al-4V 钛合金材料的表面改性技术。作为先进表面改性技术的激光冲击处理 (laser shock processing, LSP) 是利用激光器发出功率密度为 GW/cm^2 量级、脉宽为纳秒量级的强激光束辐照材

料表面, 由于高温高密度等离子体的喷射形成的冲击应力波可以改善金属材料的抗疲劳寿命等多种性能^[5-7], 同时在冲击强化区域形成能够提高金属表面层质量的高位错密度和残余压应力, 使得金属零部件的使用性能得到了有效改善^[8]。

已有报道中对于钛合金表面改性技术的研究也不少。例如, 2008 年, WANG 等人^[9]介绍了激光熔覆、激光合金化和激光熔凝技术在钛合金表面改性中的应用, 并总结出激光表面改性是一项钛合金表面处理的理想技术; 2011 年, SUN 等人^[10]介绍了钛合金表面氧化行为、表面涂层技术和表面合金化处理技术等, 指出了钛合金表面改性技术的研究方向。但多数都是在常温条件下, 利用传统的表面改性方法进行的研究, 没有涉及高温条件下表面改性技术对钛合金性能的影响。材料的表面完整性影响着其整体强度的高低或疲劳性能的优劣^[11-12], 因此研究中高温条件下激光冲击处理

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275556)

作者简介: 侯丽华(1988-), 女, 硕士研究生, 现主要从事机械制造及其自动化专业的研究。

* 通讯联系人。E-mail: renxd@mail. ujs. edu. cn

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-02-15

对 Ti-6Al-4V 钛合金表面完整性的影响是很有必要的。本文中对 Ti-6Al-4V 钛合金表面进行激光冲击处理和不同温度下的保温处理后,从表面形貌、表面粗糙度和表面残余应力等方面分析讨论了中高温条件下激光冲击处理 Ti-6Al-4V 钛合金的表面完整性的变化,为进一步了解、控制钛合金的使用性能提供了一种参考方法,具有一定的实际工程应用意义。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料为轧制状态的 Ti-6Al-4V 钛合金,试样用线切割加工成尺寸为 35mm × 25mm × 8mm 的试块,

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V titanium alloy

composition	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
mass fraction	0.055 ~ 0.068	0.035 ~ 0.045	≤0.0030	≤0.0010	≤0.0010	≤0.0005	≤0.00015	≤0.00015	other

1.2 激光冲击试验及热处理

试验装置如图 2 所示。试验在江苏大学强激光实验室的高功率短脉冲 Nd:YAG 激光器上进行,试验中选用的激光参量分别为:波长 1064nm,脉宽 10ns,脉冲频率 1Hz,能量 8J,光斑直径 3mm。约束层选用 3mm 厚的水层,吸收涂层选用美国 3M 公司的铝箔,其厚度为 0.1mm。冲击强化方式为无重复单面处理,在材料的表面选取中间 13.5mm × 13.5mm 的区域作为激光冲击区域。为了保证冲击效果的均匀性,采用 50% 的搭接率。激光冲击处理后试样的外貌如图 1b 所示。激光冲击处理试样 S₂, S₃, S₄, S₅ 和 S₆, 试样 S₁ 不做激光冲击处理。

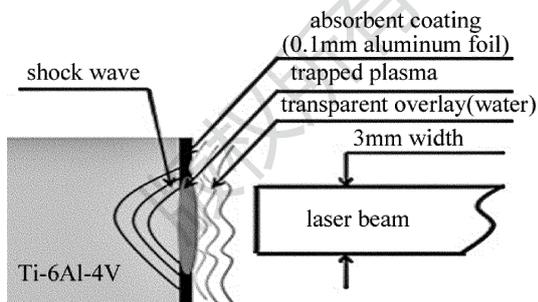


Fig. 2 Principle of laser shock processing

激光冲击处理后,将标号为 S₃, S₄, S₅ 和 S₆ 的 Ti-6Al-4V 钛合金试样依次放入 SXL 系列 1208 型程控箱式电阻炉内并分别加热到 400℃, 500℃, 550℃ 和 600℃,保温 1h,出炉空冷;将标号为 S₁ 和 S₂ 的 Ti-6Al-4V 钛合金试样置于室温下,不做任何加热处理。

1.3 性能测试方法

采用 OLYMPUS (DSX500) 光学数码显微镜测试样的表面形貌和表面粗糙度,在测量表面粗糙度时,每个试样取 3 个不同的区域进行测量,求平均值。在 X-

分别标号为 S₁, S₂, S₃, S₄, S₅ 和 S₆。每个试样依次用 400#, 600#, 800#, 1000# 和 1200# 的砂纸进行预磨,再用抛光机进行抛光直至出现镜面效果后使用无水乙醇进行超声波清洗。试样的外貌如图 1a 所示,试样的化学成分如表 1 所示。

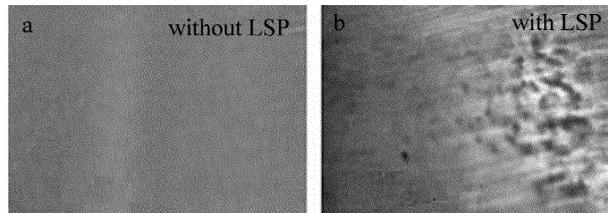


Fig. 1 Photograph of specimen a—without LSP b—with LSP

350A 残余应力测定仪上测试试样的表面残余应力,测量方法采用侧倾固定 Ψ 法,定峰方法采用交相关法;辐射 Coka;衍射晶面 114; Ψ 角分别取 0.0°, 25.0°, 35.0° 和 45.0°; 2θ 扫描 162.00° ~ 152.00°, 2θ 扫描步距 0.10°;计数时间 1.00s; X 光管高压 20.0kV, X 光管电流 5.0mA,准直管直径 \varnothing 2mm。

2 结果与分析

2.1 表面形貌

Ti-6Al-4V 钛合金的 3 维表面形貌图如图 3 所示。从图 3 可以看出,3 维表面形貌以微观的峰和谷的形式表现出来。没有经过激光冲击处理的试样的表面形貌相对来说比较平滑,峰和谷的高度在 0 μ m ~ 5 μ m 之间变化。经过激光冲击处理后,试样的表面形貌变得比较粗糙(峰和谷的高度在 0 μ m ~ 6 μ m 之间变化),这说明激光冲击处理改变了试样的表面形貌。主要原因是激光光斑内的能量分布不均匀,导致产生的相应的冲击力也不均匀,激光冲击处理后, Ti-6Al-4V 钛合金表面受到不均匀的变形,表层材料发生塑性变形,表面形成微凹坑。经过激光冲击处理和热处理后, Ti-6Al-4V 钛合金的 3 维表面形貌的峰谷高度差如表 2 所示。实验结果表明,随着温度的升高, Ti-6Al-4V 钛合金的

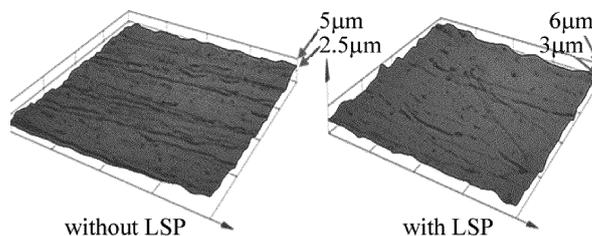


Fig. 3 3-D surface morphology of Ti-6Al-4V titanium alloy

Table 2 Change of 3-D surface morphology of specimen

specimens	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
the height difference between peak and valley/ μm	0~7	0~8	0~9	0~10

微观表面的峰谷高度差增大。这是因为高温处理(400℃~600℃)使得 Ti-6Al-4V 钛合金的表面发生氧化现象,形成一层由颗粒大小相当的氧化物组成的氧化膜,随着温度的升高,氧化膜颗粒尺寸增大,同时颗粒间间隙也增大^[13-14]。

2.2 表面粗糙度

激光冲击处理前后,不同温度下 Ti-6Al-4V 钛合金的表面粗糙度如图 4 所示,本试验中主要以表面均方根偏差 S 作为评定表面粗糙度的主要参量。由图 4 可以看出,未经激光冲击处理和经过激光冲击处理的 Ti-6Al-4V 钛合金的表面粗糙度分别是 0.0906 μm 和 0.119 μm ,这说明激光冲击处理对材料的表面粗糙度虽有影响,但影响不大。随着温度的升高,不管试样是否经过激光冲击处理,其表面粗糙度都呈现增大的趋势,且相比于未经过激光冲击处理的试样,经过激光冲击处理的试样的表面变得更加粗糙。这是因为当温度高于 400℃ 时, Ti-6Al-4V 钛合金发生了氧化现象,在其表面形成一层不均匀的氧化层,增加了表面粗糙度。而且激光冲击处理对材料的表面粗糙度也有影响。材料表面的粗糙度值越大,就意味着冲击坑越深,而过深的冲击坑会引起应力集中使得材料表面的残余压应力值变小,从而缩短零部件的疲劳寿命^[15]。

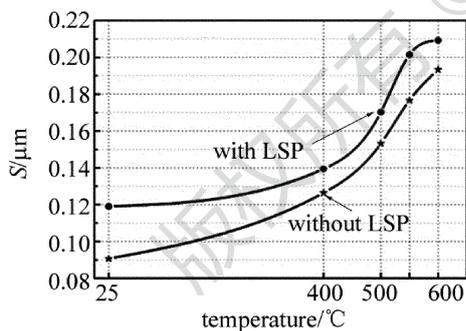


Fig. 4 Surface roughness of Ti-6Al-4V titanium at different temperatures before and after LSP

2.3 表面残余应力

Ti-6Al-4V 钛合金试样 S_1 和 S_2 表面同一点处的残余应力测量结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,激光冲击前后,材料表面的残余应力均为压应力,但在同一点处,激光冲击后的残余压应力明显大于激光冲击前的残余压应力。分析认为,在激光冲击强化过程中,激光器发出功率密度为 GW/cm^2 量级、脉宽为纳秒量级的强激光束。当该激光束冲击到金属材料的表面

Table 3 Surface residual stress of Ti-6Al-4V titanium alloy before and after LSP

LSP	without LSP	with LSP
the measurement results		
ψ	0.0°, 25.0°, 35.0°, 45.0°	0.0°, 25.0°, 35.0°, 45.0°
2θ	157.178°, 157.392°, 157.624°, 157.822°	157.700°, 158.000°, 158.475°, 158.788°
peak count	86, 77, 66, 34	255, 149, 143, 155
width of half height	4.85°, 5.25°, 3.75°, 3.87°	2.58°, 2.60°, 2.41°, 2.59°
the integral intensity	444.1, 356.5, 246.9, 175.9	744.2, 436.3, 376.5, 465.2
the integral width	5.16°, 4.63°, 3.74°, 5.17°	2.92°, 2.93°, 2.63°, 3.00°
the residual stress σ	-226MPa	-389MPa
error $\Delta\sigma$	$\pm 7\text{MPa}$	$\pm 27\text{MPa}$

时,高能激光的能量被能量吸收层充分吸收,在极短的时间内形成一个能够快速向外膨胀的高能高压的等离子体层。但存在的约束层阻碍了等离子体的向外膨胀,造成其压力的迅速升高,结果在金属表面施加一冲击载荷,产生压力高达数个吉帕的强冲击波。该冲击波向金属内部传播,由于其压力远高于金属材料的动态屈服强度,使得材料发生屈服和微塑性变形,并在成形区域形成残余压应力^[16-17]。

随着温度的升高,经过激光冲击处理和未经过激光冲击处理的 Ti-6Al-4V 钛合金试样的表面残余压应力均呈现降低的趋势,如图 5 所示。这是因为在高温条件下,更容易发生材料表面残余压应力的释放而造成其值的减小,Zener-Wert-Avrami 公式可以用来解释高温下材料表面的残余应力释放机制^[18]。激光冲击处理后,材料表面获得的表面残余压应力能够均衡材料使用过程中的拉应力,并将部分拉应力转化为压应力,使得疲劳裂纹的产生和扩展速度得以延缓^[19-20]。

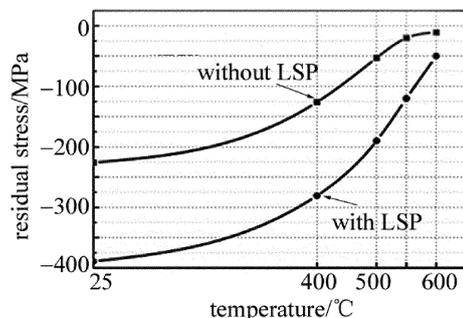


Fig. 5 Surface residual stress of Ti-6Al-4V titanium alloy at different temperatures before and after LSP

3 结 论

对 Ti-6Al-4V 钛合金进行激光冲击处理和热处理后,从表面形貌、表面粗糙度和表面残余应力三方面对它的表面完整性进行了研究。

(1) 激光冲击处理改变了 Ti-6Al-4V 钛合金的表面形貌。室温下, 试样表面凸起和凹坑间的波动范围在 $0\mu\text{m} \sim 6\mu\text{m}$ 之间, 中高温条件下 ($400^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$), 试样表面凸起和凹坑间的波动范围增大。

(2) 激光冲击处理对 Ti-6Al-4V 钛合金的表面粗糙度有影响; 随着温度的升高, 试样的表面粗糙度呈现增加的趋势。

(3) 激光冲击处理显著提高了 Ti-6Al-4V 钛合金的表面残余压应力, 且温度越高, 试样的表面残余压应力越低。

参 考 文 献

- [1] HUANG X, LI Zh X, HUANG H. Recent development of new high-temperature titanium alloys for high thrust-weight ratio aero-engines [J]. *Materials China*, 2011, 30(6): 20-27 (in Chinese).
- [2] BI X G, BU F L, KANG J. Titanium alloy drilling and new development [J]. *Tool Engineering*, 2008, 42(12): 19-22 (in Chinese).
- [3] HACKEL L A, CHEN H L. Laser peening—A processing tool to strengthen metals or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003: 1058-1061.
- [4] LI L, SUN J K, MENG X J. Development and application of titanium alloy [J]. *Titanium Industry Progress*, 2004, 21(5): 19-23 (in Chinese).
- [5] MONTROSS C S, TAO W, LIN Y, *et al.* Laser shock processing and its effects on micro-structure and properties of metal alloys: a review [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(2): 1021-1036.
- [6] ZHANG Y K, CHEN J F, XU R J. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 1068-1072 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] PEI X, REN A G, GU Y Y, *et al.* Effects of laser shock processing on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 552-556 (in Chinese).
- [9] WANG D Sh, TIAN Z J, SHEN L D, *et al.* Research states of laser surface modification technology on titanium alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(6): 24-32 (in Chinese).
- [10] SUN Z C, SUN H L, HUANG Z W, *et al.* Research progress on surface oxidation resistant modification technology of titanium alloy [J]. *Materials Review*, 2011, 5(17): 507-509 (in Chinese).
- [11] YU K G, XIANG B L, QING X Y. Influence of surface integrity on fatigue strength of 40CrNi2Si2MoVA steel [J]. *Material Letters*, 2007, 61(1/2): 466-469.
- [12] HUANG Sh, ZHOU J Zh, SUN Y Q, *et al.* Study on surface integrity of 6061-T6 aluminum alloy sheet after laser shot peening [J]. *Applied Laser*, 2007, 27(6): 450-455 (in Chinese).
- [13] LIU X L, AN Zh X, DING Zh M, *et al.* Effect of high temperature oxidation treatment on the surface morphology and properties of valve steel [J]. *Locomotive & Rolling Stock Technology*, 2007, 18(1): 8-12 (in Chinese).
- [14] GUO B G, LIANG J, CHEN J M, *et al.* Effects of oxidation time on micro-structure and performance of micro-arc oxidation coatings formed on Ti-6Al-4V alloy [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(6): 982-984 (in Chinese).
- [15] REN X D, RUAN L, HUANG F Y, *et al.* Experimental research of laser shock processing 6061-T651 aluminum alloy during elevated temperature [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 1231-1234 (in Chinese).
- [16] ELIEZER S, RAICHER N N E, MARTINEZ-VAL J M. Relativistic shock waves induced by ultra-high laser pressure [J]. *Laser and Particle Beams*, 2014, 32(2): 243-251.
- [17] LU Ch L, HU F Y, HUANG X R, *et al.* Numerical simulation of temperature and stress field of metal plates irradiated by pulsed laser [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 754-758 (in Chinese).
- [18] JUJERM P, ALTENBERGER I. Residual stress relaxation of deep-rolled Al-Mg-Si-Cu alloy during cyclic loading at elevated temperatures [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(12): 1111-1114.
- [19] WANG X F, PAN A X. Experimental study of residual stress with laser shock on TC₄ alloy [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2010, 222(20): 106-108 (in Chinese).
- [20] REN X D, ZHANG Y K, ZHOU J Zh, *et al.* Laser shock processing effects on mechanical properties of Ti6Al4V alloy [J]. *Functional Materials*, 2006, 37(11): 1781-1783 (in Chinese).