

TC17 钛合金激光多次冲击强化后组织和力学性能研究

李 靖, 李 军, 何卫锋, 李玉琴, 聂祥樊, 何光宇

(空军工程大学 航空航天工程学院 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038)

摘 要: 对 TC17 钛合金激光冲击强化前后的微观组织和力学性能作了对比研究, 将 TC17 钛合金进行同一功率密度下不同次数的激光冲击, 分别利用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X 射线衍射仪、残余应力测试仪和显微硬度计对激光冲击前后 TC17 钛合金的微观组织、残余应力和显微硬度进行了观察和测试。试验结果表明: TC17 钛合金在不同次数激光冲击后, 表面形成了剧烈塑性变形和高密度位错, 晶粒细化明显, 3 次激光冲击后有纳米晶形成; 残余应力和显微硬度都随着冲击次数的增加数值增大, 且沿深度方向的变化规律基本相同; 与未冲击试样相比, 5 次冲击后试样表面显微硬度提高了 20.7%, 沿深度方向 300 μm 范围内影响明显, 表面残余应力达到 -644.3 MPa, 残余压应力影响层深度增加至 1.9 mm。

关键词: TC17 钛合金; 激光冲击强化; 纳米晶; 残余应力; 显微硬度

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2889-07

Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts

Li Jing, Li Jun, He Weifeng, Li Yuqin, Nie Xiangfan, He Guangyu

(Plasma Dynamics Laboratory, Aeronautical and Astronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy with and without laser shock peening (LSP) were examined and compared. The titanium alloy samples were laser shock peened with different impacts at the same power density. Microstructure, microhardness and residual stress of TC17 titanium alloy introduced by LSP with different impacts were discussed by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscope (TEM), X-ray diffraction (XRD), residual stress tester and sclerometer. The results indicate that a great deal of high-density dislocations and grain refinement are generated in the material surface layer. After 3 impacts LSP, there are nanocrystals in the LSP zone. The microhardness and residual stress value increase with greater impacts, and the variational trend with the depth is the same. Compared with the unsettled samples, the microhardness of TC17 titanium alloy treated by 5 impacts LSP has been increased by 20.7% at the surface, with a 300 μm depth affected layer. A high compressive residual stress about 644.3 MPa is introduced with an increasing plastically affected layer by 5 impacts, and the affected depth increases to 1.9 mm.

Key words: TC17 titanium alloy; laser shock peening; nanocrystal; residual stress; microhardness

收稿日期: 2014-01-10; 修订日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(51205406)

作者简介: 李靖(1990-), 男, 硕士生, 主要从事航空装备损伤修复与表面强化研究。Email: jingying0226@163.com

导师简介: 李军(1963-), 男, 博士生导师, 主要从事飞机推进系统气动热力理论和工程方面的研究。Email: apsl87324@163.com

0 引言

钛合金因其比强度高、工作温度范围广和抗腐蚀能力优异等特点,已经取代铝合金、镁合金及钢,在航空及宇航工业得到了广泛应用。目前在先进航空发动机上,压气机盘、压气机叶片、风扇叶片以及机匣等均由钛合金制造,实现了压气机全钛化^[1],但是,由于钛合金自身的结构特点(耐磨性差、疲劳强度低等)限制了它的进一步应用。在发动机实际工作过程中,在热应力、离心力、空气激振力及外来物的复合作用下,使得钛合金叶片发生高周疲劳断裂,这已成为实现新一代发动机降低发动机质量、提高推重比的“瓶颈”问题^[2]。为了改善这种现状,提高钛合金构件的疲劳寿命,常采用超声喷丸(USSP)、机械研磨(SMAT)^[3-4]等机械处理方法,在多次、不同方向塑性变形的作用下,最终将一定深度内的原始粗晶组织细化,并引入较高的残余压应力。但受制于制备工艺、加工工件尺寸、形状等原因,这些处理方法未达到工业应用的实际要求。

激光冲击强化(Laser Shock Peening)作为一种新型表面处理技术,由于其无接触、无热影响和精确可控等特点成为表面改性领域的研究热点。美国已将激光冲击强化应用于航空航天等领域结构件的强化

之中,提高了金属材料的抗疲劳、耐磨损和抗应力腐蚀等性能^[5-7]。国内江苏大学、北京航空制造工艺研究所、空军工程大学等对常用合金钢、不锈钢及铝合金等进行了一定的材料试验^[8-10],但国内钛合金激光冲击强化研究受激光冲击强化设备、强化工艺、质量监控技术、检测和考核技术的制约还限制在实验室条件下,仅对个别型号钛合金试件进行了 LSP 工艺研究。文中以 TC17 钛合金为对象,主要研究激光冲击次数对钛合金微观组织的影响以及表层残余应力和显微硬度等力学性能的变化情况。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

TC17 合金是一种富 β 稳定元素的 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金,其名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr,主要成分如表 1 所示^[11]。热处理制度为双重退火:950~980℃,1~2 h,空冷;530℃,6 h,空冷;相变点为 980~1 020℃;其室温拉伸性能: $\sigma_b=1 183$ MPa、 $\sigma_{0.2}=1 144$ MPa、 $\psi=23.3\%$ 、 $\delta_5=12.8\%$ 。该合金具有强度高、焊接性能好和机械加工性能良好等一系列优点,能够满足损伤容限设计的需要和高可靠性、低制造成本的要求,主要用于制造航空发动机风扇、压气机盘件和大截面锻件,最高工作温度为 427℃。

表 1 TC17 钛合金的主要化学成分(质量分数:%)

Tab.1 Chemical component of TC17 titanium alloy (Mass fraction:%)

Element	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	C	N	H	O	Ti
Concentration	4.5-5.5	1.6-2.4	1.6-2.4	3.5-4.5	3.5-4.5	0.30	0.05	0.05	0.0125	0.08-0.13	Bal

1.2 激光冲击强化

激光冲击强化原理是高功率激光脉冲作用在吸收保护层上,使其吸收激光能量并发生汽化蒸发,形成高温、高压等离子体冲击波作用于材料表面并向内部传播,引起材料产生塑性变形,使表层材料的微观组织发生改变,并在一定深度内残留压应力,从而提高材料的力学性能。

激光冲击强化试验在 SGR-25 高能 Nd:YAG 激光器(图 1)上完成,该型激光器解决了传统 YAG 激光器脉冲能量较低的问题,最高脉冲能量可达 25 J。成套强化设备共包括五大子系统:总控系统、激光器系统(含外光路系统)、机器人系统、约束冲击系统、监控系统。



图 1 试验所用 YAG 激光器及其性能参数

Fig.1 YAG laser and its performance parameter

依据 TC17 钛合金材料的组成及性能,利用 Fabbro^[12]冲击波峰值压力 P 与功率密度 I 的经验计算公式,功率密度超过 1.6 GW/cm² 时 TC17 材料会发生塑性变形。此次试验采用的具体参数为:激光功

率密度 4 GW/cm^2 , 脉宽 20 ns , 光斑直径 3 mm , 冲击次数 1、3、5 次, ASE 能量小于 50 mJ 、激光能量稳定度小于 5% , 搭接率 60% , 水(厚度 2 mm)为约束层, 吸收保护层为铝箔(厚度 0.1 mm)。试验选用 $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的板材, 对中心 $20 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 区域进行激光冲击强化处理, 将试样固定在两自由度控制的机器人系统上, 通过 X 、 Y 轴两自由度移动实现冲击过程的自动化和快速化, 强化区如图 2 中指示区域所示。为防止铝箔在多次冲击时破损, 整个区域冲击完一次后需更换铝箔再进行第二次冲击。

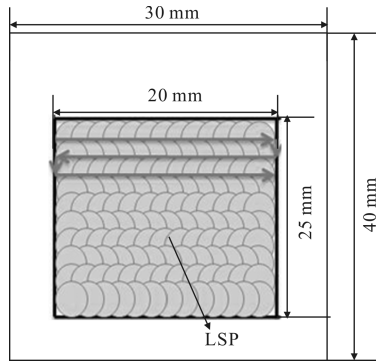


图 2 激光冲击强化示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch of laser shock peening

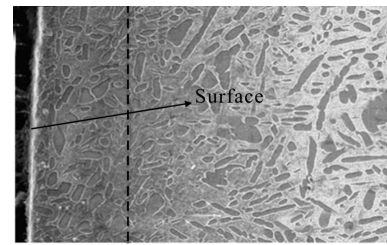
1.3 测试方法

文中采用 JEOL/JSM-6360LV 型扫描电子显微镜、TEM-3010 型透射电子显微镜和 MFS-7000s 型 X 射线衍射仪, 观察强化前后钛合金表层微观组织的变化情况。残余应力测试在 Proto-LXRD 型 X 射线衍射仪上进行, 采用侧倾固定 Ψ 法, 进行截面残余应力测试时需要进行电解抛光对材料表面逐层减薄后再进行测试, 选用的腐蚀溶液为 $\text{HNO}_3 24\% + \text{HF} 14\% + \text{H}_2\text{O} 62\%$ (体积比), 腐蚀速率为 1 cm^2 面积 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m/s}$ 。采用 MVS-1000JMT2 型显微维氏硬度计, 对激光冲击强化前后的试样进行硬度测量。表面硬度测量载荷为 200 g , 横截面硬度测量载荷为 100 g , 保压时间都是 10 s 。考虑到测量误差, 在每一深度分别测量 3~5 个点求平均值, 并根据测得的平均值做出深度方向硬度分布曲线。

2 试验结果与分析

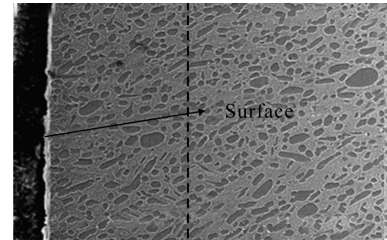
2.1 微观组织

图 3 为原始试样和同一功率密度下不同次数激光冲击处理后试样的横截面 SEM。



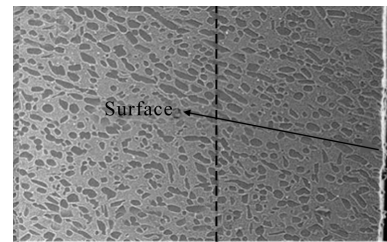
(a) 1 次

(a) 1 impact



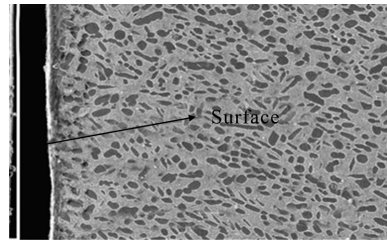
(b) 3 次

(b) 3 impacts



(c) 5 次

(c) 5 impacts



(d) 未处理

(d) Without LSP

图 3 不同次数冲击下钛合金横截面的 SEM 图

Fig.3 SEM photographs of cross section of titanium alloy samples with different LSP impacts

从图 3 中可以看到, 经过激光冲击强化处理的试样表层有一明显的深色带, 冲击次数不同, 激光冲击强化的效果差别很大, 至少从冲击后产生的影响层可以看出, 随着冲击次数的增加影响层的深度加深, 当从一次增加到三次时, 影响深度由 $30 \mu\text{m}$ 增加到 $50 \mu\text{m}$ 左右, 而当从三次增加到五次时, 影响深度达到了 $60 \mu\text{m}$ 左右。图 3(a)、(b)、(c) 所标出的虚线之后仍有染色加深, 并逐渐过渡到基体的颜色, 这一层

是影响较轻的区域,而虚线之前颜色较重,是属于严重影响区。激光冲击强化使材料表层的颜色加深可能是晶粒细化、冲击相变或是有非晶态的产生,但从 SEM 图中分析不出来,下面通过透射电镜和 X-射线衍射对激光冲击强化处理及未处理的试样进行更进一步的分析。

图 4 为未处理试样和不同次数冲击处理后试样的透射电镜观察图。从 4(a)中可以看出,未进行激光冲击强化处理的 TC17 钛合金原始组织由 α 相和 β

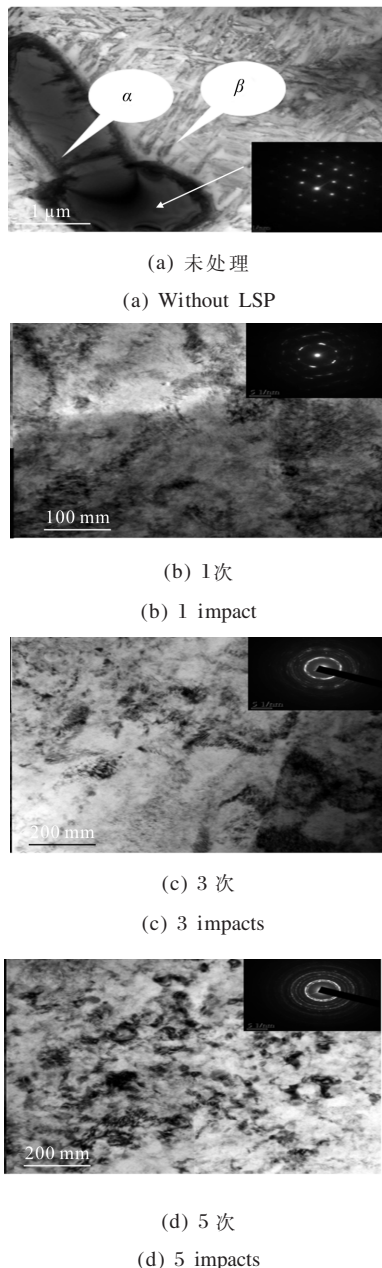


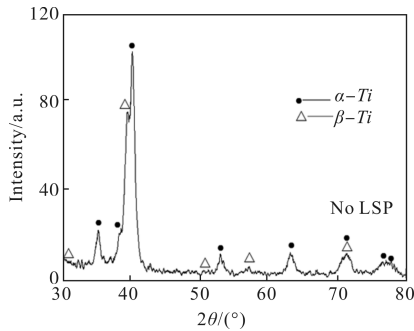
图 4 不同次数冲击下钛合金表面的 TEM 图和衍射花样
Fig.4 TEM photographs and diffraction patterns of surface layer of titanium alloy samples with different LSP impacts

相组成,组织粗大, α 相呈针状或长条状,无明显晶界,未见位错和明显的缺陷,图中衍射斑点为 α 相。在图 4(b)中,与未处理试样相比,激光冲击强化 1 次处理后的 TC17 钛合金在材料表层形成了高密度位错,在相界附近有大量位错缠结、切割、交错分布。图中衍射斑点为 α 相,衍射斑点已有成环的趋势,这是由于在激光冲击强化过程中,强激光诱导的高压冲击波引起材料内部剧烈的塑性变形而产生位错增殖,进而形成大量的高密度位错,使得晶粒发生细化。从图 4(c)中可以看出,激光冲击强化 3 次处理后晶粒进一步细化,对应的衍射花样已经成环,可见激光冲击强化 3 次后材料表面已经形成纳米级晶粒。在图 4(d)中,结合衍射花样可知,随着冲击次数的增加,衍射环更加连续,纳米晶的数量越来越多,且更加细小均匀。

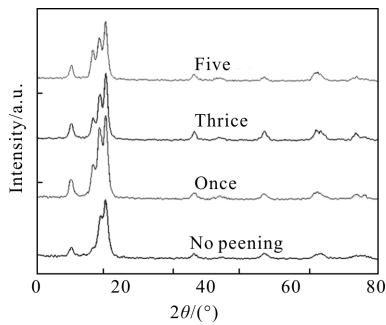
TC17 是高层错能钛合金,结合高层错能钛合金的塑性变形特点和透射结果,说明在高功率激光多次作用下,材料表面发生剧烈的塑性变形,位错滑移并大量增殖,使得表层内部位错密度急剧增加。随着位错的滑移及不断增殖,高密度位错聚集形成位错胞界及高密度位错墙。随着冲击应变的增加,为了降低系统的能量,高密度位错会发生湮灭和重排,使得位错墙和位错缠结向小角度亚晶界、大角度亚晶界转变,最终形成新的晶界,新晶界的产生将原始粗大的晶粒细化为新的细小晶粒^[13]。综上可知,TC17 钛合金激光多次冲击后表层经受了剧烈的塑性变形过程,晶粒得到了明显细化,位错密度增加,并出现了纳米晶(晶粒尺寸在纳米量级(<100 nm)的多晶超细材料)。通过透射电镜观察发现的激光冲击强化后材料表层晶粒细化及纳米晶的出现,可以很好地解释扫描电镜试验中所观察到的颜色加深带,这是因为经激光冲击强化处理后,材料表层晶粒细化,晶界增多,在扫描电镜观察之前进行腐蚀(腐蚀的是晶界)时,由于在冲击区域腐蚀的晶界多而且密集,同时材料经剧烈塑性变形会更容易腐蚀,所以在扫描电镜中看到了颜色加深的一层,这一层为激光冲击强化后经剧烈的塑性变形,产生高密度位错(甚至细化)的一层。

图 5 为 TC17 钛合金未冲击和不同次数冲击处理后的材料表面 X 射线衍射图谱。图 5(a)为未冲击处理试样的衍射图谱,通过标定证实材料由 α 和 β 相组成。从图 5(b)中可以看出,与未强化试样相比,

不同次数处理后的试样 X 射线衍射图谱没有新峰产生,说明试样仍由 α 相和 β 相组成,没有新相产生。随着冲击次数的增加,TC17 钛合金的 X 射线布拉格衍射峰宽化明显增强,说明材料表层发生了明显的塑性变形。对于 TC17 这种高层错能钛合金,主要通过位错滑移进行塑性变形,结合投射结果可知布拉格衍射峰宽化与晶粒细化有关。



(a) 未冲击
(a) Without LSP



(b) 不同次数冲击
(b) With different LSP impacts
图5 TC17 试样 X 射线衍射图谱

Fig.5 XRD patterns of TC17

2.2 残余应力

图 6 所示为不同次数冲击下的残余应力分布图,测试时直到残余应力变为 0 时停止。可以看出,不同次数的激光冲击强化后,深度方向残余压应力的变化规律是基本相同的,即在表面处最大,随着深度的增加而逐渐降低;不同次数冲击下的表面残余应力值分别为-551.4 MPa、-628.2 MPa 和 -644.3 MPa,可以看出由一次到三次要比由三次到五次的增加幅度要高。激光冲击三次后的残余压应力深度约为 1.5 mm,而冲击五次后残余压应力的深度约为 1.9 mm。可见,与扫描电镜的结果相同,经多次激光冲击后的影响层会更深,相对应的残余压应力在表面以下的

影响深度也会更深。随着冲击次数的增加,由塑性变形引起的残余压应力的深度呈非线性增加。当激光冲击次数由 1 次增加到 3 次时,塑性变形影响深度由 0.8 mm 增至 1.5 mm,由 3 次增加到 5 次时,影响深度由 1.5 mm 增至 1.9 mm。

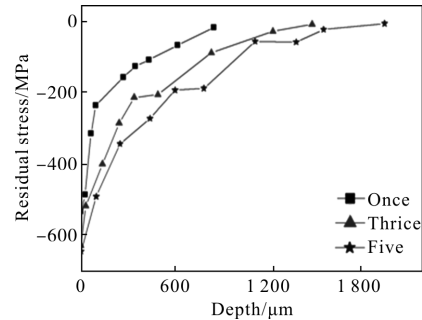


图6 不同次数冲击下的截面残余应力分布

Fig.6 Residual stress in cross section with different LSP impacts

残余压应力的数值和影响层深度随着冲击次数的增加而增加,这是因为当冲击次数增加,冲击波压力也随之增加,促使材料发生更加剧烈的塑性变形,产生更大的残余压应力。而残余压应力沿深度方向逐渐下降则是由于高能激光诱导的冲击波压力沿深度传播过程中逐渐衰减,材料塑性变形量降低,产生的残余压应力数值下降^[14]。

材料的抗疲劳性能主要取决于冲击强化产生的残余压应力,它可以提高裂纹扩展的门槛值,从而对疲劳裂纹扩展产生抑制作用;同时,残余压应力可以对裂纹产生闭合效应,二者共同作用可以有效提高钛合金疲劳强度。激光冲击后的金属表面存在残余压应力,由于在试样表面承受疲劳载荷的过程中会发生应力松弛,且强化产生的残余应力在试件表面并不是一个定值,因此为了便于分析,评价残余应力可以用平均应力的观点。平均应力观点对疲劳强度的影响常用古德曼关系式来描述^[15],由残余应力而引起的材料疲劳强度的变化为:

$$\Delta\sigma_w^r = -m\sigma_r \quad (1)$$

式中: σ_r 为激光冲击后在材料表层形成的残余应力; m 为残余应力作用系数; $\Delta\sigma_w^r$ 为疲劳强度的变量。由公式(1)可知,疲劳强度的变化与残余应力的符号有关,试样表面存在残余压应力(即 $\sigma_r < 0$)会使得材料的疲劳强度提高。激光多次冲击强化后,材料产生的

残余压应力数值增加,疲劳强度的变化增大,抗疲劳性能提高明显。

2.3 显微硬度

图 7 为 TC17 钛合金在不同次数冲击下表面和深度方向的硬度变化情况。从图 7(a)可以看出:激光冲击强化后试样表面的硬度是随着冲击次数的增加而增加的,与未处理试样相比,5 次强化后的表面显微硬度提高了 20.7%。图 7(b)是不同次数冲击后试样沿深度方向的显微硬度分布(考虑 60 μm 以内由于靠近边缘不可避免的测量误差)。从图中可以看出,经过激光冲击处理的试样在 60~300 μm 范围内显微硬度值明显提高,且 800 μm 时显微硬度值全部高于未强化试样;随着冲击次数的增加,硬度值增大,影响的深度也有所增加;冲击五次时硬度的最大值要高于其他次数,与未冲击相比,1、3、5 次冲击后的最大值分别提高了 11.4%、14.2%和 17.1%。

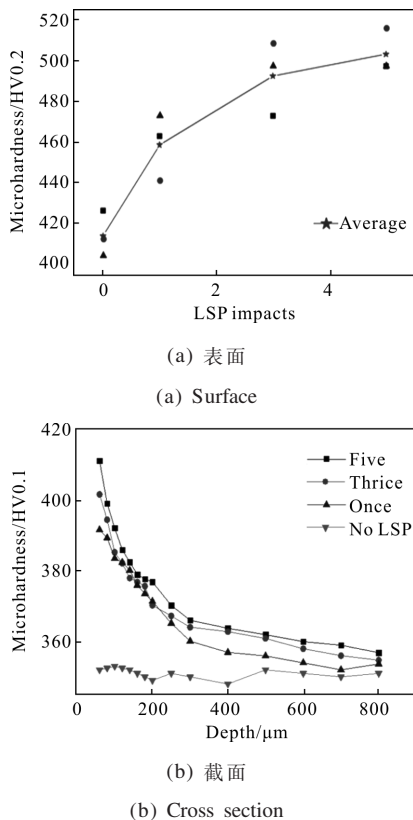


图 7 不同次数冲击下显微硬度分布

Fig.7 Microhardness with different LSP impacts

激光冲击强化后,材料表面塑性变形层晶粒发生细化,随着冲击次数的增加,材料表层的微观组织细化更加均匀。但是随着深度的增加,强化对于微观

组织的影响逐渐减弱,从而引起硬度值的逐渐减小,直到微观组织基本不受影响时,硬度值趋于稳定。激光冲击强化对于材料的强化作用主要有晶界强化和位错强化两方面,下面从这两个方面对激光冲击强化后材料硬度的改善进行简要分析。

晶界强化方面,激光冲击强化使金属表层晶粒细化,晶界、亚晶界增多,晶界强化作用增强。这种材料屈服强度的增强可以用霍尔—佩奇关系式来表示:

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (2)$$

式中: σ_s 为金属材料的屈服强度; σ_0 为与材料、温度相关的常数; K 为晶界对位错相关的常数; d 为晶粒的直径。由关系式可知晶粒尺寸越小,金属的屈服强度值越大,硬度越高。

位错强化方面,在金属晶体中,疲劳强度的增量大致与晶体中位错密度的平方根成正比,即

$$\Delta\sigma_d \propto \rho^{1/2} \quad (3)$$

式中: $\Delta\sigma_d$ 为强化增量; ρ 为金属中的位错密度。从透射电镜观察中可得,冲击一次时就产生大量位错,且随着冲击次数的增加,位错密度变大,材料的强度和硬度不断增大。

激光冲击强化过程中金属晶粒细化是金属表层组织发生明显塑性变形的结果,这种明显塑性变形使表层组织内产生高密度的位错、晶界、亚晶界等晶体缺陷,这些晶体缺陷能够阻碍晶体中位错的滑移和增值,使金属材料中不易发生塑性流动,从而提高金属的疲劳强度。

3 结论

(1) 激光冲击下 TC17 钛合金表层组织形成了一个剧烈塑性变形层,且有大量位错和细化晶粒生成,当冲击次数大于 3 次时,晶粒细化形成纳米晶。

(2) TC17 钛合金激光冲击后在表面形成 550 MPa 以上的残余压应力,且随着次数的增加,数值增大,塑性变形深度由 0.8 mm 增至 1.9 mm。

(3) 经激光冲击强化后,表层硬度值显著提高,且沿深度方向 300 μm 范围内影响明显;相比于未冲击试样,截面硬度最大值在 1、3、5 次冲击后分别提高了 11.4%、14.2%和 17.1%。

参考文献:

- [1] Fu Yanyan, Song Yueqing, Hui Songxiao, et al. Research and application of typical aerospace Ti [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2006, 30(6): 850–856.
付艳艳, 宋月清, 惠松骁, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850–856.
- [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] Zhang H W, Hei Z K, Liu G, et al. Formation of nanostructure surface layer on AISI304 stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment [J]. *Acta Mater*, 2003, 51: 1871–1881.
- [4] Wu X, Tao N R, Hong Y, et al. Microstructure and evolution of mechanically-induced ultrafine grain in surface layer of Al-alloy subjected to USSP [J]. *Acta Mater*, 2002, 50: 2075–2084.
- [5] Lu J Z, Luo K Y, Dai F Z, et al. Effects of multiple laser shock processing (LSP) impacts on mechanical properties and wear behaviors of AISI 8620 steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 536(2012): 57–63.
- [6] Peyre P, Fabbro R, Merrien P, et al. Laser shock processing of aluminum alloys: Application to high cycle fatigue behavior [J]. *Materials Science and Engineering*, 1996, A210: 102–113.
- [7] Peyre P, Scherpereel X, Berthe L, et al. Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot-peening influence on pitting corrosion resistance [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 280 (2000): 294–302.
- [8] Ren Xudong, Zhang Tian, Jiang Dawei, et al. Effects of laser shock processing and aluminizing on microstructure and properties of 12CrMoV alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 241–244. (in Chinese)
任旭东, 张田, 姜大伟, 等. 激光冲击与渗铝复合对12CrMoV组织性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 241–244.
- [9] Zhou Shikun, Wang Jian, Wang Huaming, et al. Fatigue growth rate of laser shock processed metal sheet [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(3): 189–191. (in Chinese)
邹世坤, 王健, 王华明, 等. 激光冲击处理金属板材后的裂纹扩展速率[J]. 激光技术, 2002, 26(3): 189–191.
- [10] Zhou Lei, Li Yinghong, Wang Cheng, et al. Laser shock peening for LY2 alloy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1780–1784. (in Chinese)
周磊, 李应红, 汪诚, 等. LY2铝合金激光冲击处理工艺[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1780–1784.
- [11] Chinese Aeronautical Materials Handbook Compiling Committee. *Aeronautical Materials Handbook* [M]. Beijing: Chinese Standards Press, 2002. (in Chinese)
《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [12] Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and application [J]. *Opt and Quantum Electron*, 1995, 27(12): 1213–1229.
- [13] Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K, et al. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts [J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(11): 3984–3994.
- [14] Kong Dejun, Zhou Chaozheng, Wu Yongzhong. Mechanism on residual stress of 304 stainless steel by laser shock processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 736–740. (in Chinese)
孔德军, 周朝政, 吴永忠. 304不锈钢激光冲击处理后的残余应力产生机理[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 736–740.
- [15] Manson S S, Lu Suo. *Metal Fatigue Damage* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1976. (in Chinese)
S.S.曼森, 陆索. 金属疲劳损伤[M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.