

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0004-04

激光冲击处理钛合金

邹世坤, 曹子文, 刘方军

(北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

摘要 介绍了激光冲击处理(LSP)的特点和应用情况,研究了激光冲击处理对钛合金表面轮廓、残余应力和疲劳性能的影响。结果表明,经激光冲击处理后效果十分明显,钛合金获得光斑大小的凹坑,凹陷值 $10\sim 20\ \mu\text{m}$,残余应力最大可达 $-600\ \text{MPa}$ 以上,表面残余应力水平与高强度喷丸相当,但塑性变形程度明显大于喷丸;合适的激光参数和搭接率可以获得光滑平整的冲击区,双光束冲击处理涡轮叶片后有明显冲击痕迹和残余压应力,并且没有发现变形和裂纹。

关键词 激光技术; 激光冲击处理; 表面轮廓; 残余应力; 钛合金; 涡轮叶片

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

Laser Shock Processing of Titanium Alloy

ZOU Shi-kun, CAO Zi-wen, LIU Fang-jun

(National Key Laboratory of High Energy Density Beam Processing Technology,
Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract The characteristic and application of laser shock processing (LSP) was introduced, then the surface profile, surface residual stress and fatigue properties of laser shock processed titanium alloy were studied. The results showed that laser shock processing had obvious effects on titanium alloy. There was shocked zone on the surface of the metal after laser shock processing, which with the same size as laser spot and depression of $10\sim 20\ \mu\text{m}$, the most residual stress was about $-600\ \text{MPa}$, which corresponded to the result with intense shot peening, but the intensity of plastic deformation was much more than that of shot peening. Suitable laser parameters and overlap rate can gain smooth and even surface, there were obvious marks, little deformation and no cracks on the surface of dual beam laser shock processed titanium turbine blade.

Key words laser technique; laser shock processing; surface profile; residual stress; titanium alloy; turbine blade

1 引 言

激光冲击处理(LSP)利用高功率密度($>10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$)的激光透过约束层作用于金属表层时产生的高强度冲击波,从而提高结构疲劳性能的表面强化技术。由于其强化原理及应用目标类似喷丸(SP),因此也称作激光喷丸^[1]。激光冲击处理具有应变率高、应变影响层深、冲击区域和压力可控、对表面粗糙度影响小、易于自动化等特点。与喷丸相比,激光冲击处理获得的残余压应力层可达 $1\ \text{mm}$,约为喷丸的 $2\sim 5$ 倍。另外,激光冲击处理能很好地保持强化位置的表面粗糙度和尺寸精度。

激光冲击处理在航空发动机上的应用最为成熟

和广泛^[1~3]。2001~2002年,美国F-22系统项目办公室采用激光冲击处理技术解决了F119发动机上的四级整体叶盘强化的难题。叶片激光冲击处理技术包括自动涂层、保证工艺参数稳定的控制和监测以及保证激光束在叶片上正确定位的图像处理^[4]。我国由于受强脉冲激光设备的限制,激光冲击处理在铝合金方面的实验研究较多^[5,6],而激光冲击处理钛合金一直没能取得实质性的效果。北京航空制造工程研究所近年开展了水约束激光冲击处理钛合金及钛合金叶片的研究^[7,8],并取得了一定的效果,但激光冲击处理效率还未能满足工程应用的需要。

基金项目: 国防科技预研项目(513180302)和航空支撑项目(61901090202)资助课题。

作者简介: 邹世坤(1974—),男,湖北麻城人,高级工程师,主要从事激光加工设备工艺研究。E-mail: zousk@sina.com

2 表面轮廓和残余应力

激光冲击处理钛合金表面轮廓,试样采用钛合金相试件和线接触磨损下试样($\phi 24 \text{ mm} \times 7.88 \text{ mm}$),激光器采用北京航空制造工程研究所从俄罗斯引进的调Q钕玻璃激光器,激光输出光斑 $\phi 20 \text{ mm}$,激光脉冲能量40 J,脉宽30 ns;吸收层采用0.1~0.2 mm的铝箔,流水为约束层,水层厚1~2 mm。激光经反射、透镜(焦距为500 mm)聚焦后到达试件表面的光斑大小 $\phi 4 \sim 5 \text{ mm}$,峰值功率密度约为 8 GW/cm^2 。

表面轮廓的测试在清华大学摩擦学重点实验室进行,采用的仪器是Taly surf 5P-120表面形貌测量系统,测试长度16 mm。该系统完成测试后生成图1、图2所示的图形文件和数据文件。

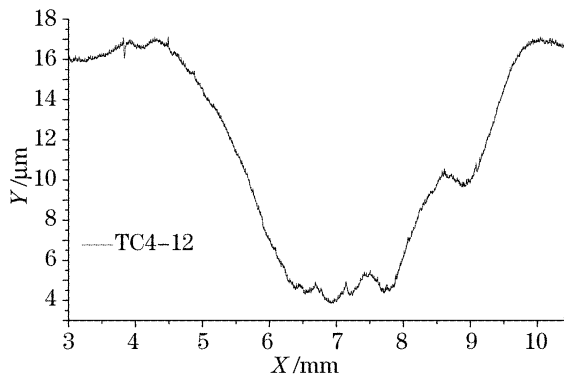


图1 激光冲击处理TC4后表面轮廓

Fig. 1 Surface profile of laser shock processed titanium alloy (one spot)

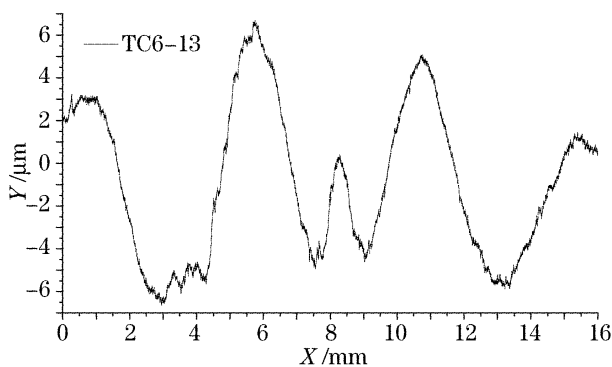


图2 激光冲击处理TC6后表面轮廓(三次冲击)

Fig. 2 Surface profile of laser shock processed titanium alloy (three spots)

激光冲击处理TC4, TC6钛合金时,激光导致的冲击波在冲击区域产生压缩作用,材料产生强烈的弹塑性变形。激光冲击处理过程完成后在材料表面残留了一定的塑性变形,宏观上表现为深度 $11 \sim 15 \mu\text{m}$ 的凹坑,在凹坑周围的局部弹塑性变形必然导致残余应力的存在。

为研究激光冲击处理区域残余应力分布情况,

采用X射线进行了测试。测试在江苏大学进行,采用X-350A型X射线应力测定仪,准直管直径 $\phi 2 \text{ mm}$,X光管电压22 kV,电流6.0 mA。图3是TC6钛合金试样残余应力分布图,其中 0° 方向为光斑搭接方向。可以看出,激光冲击处理区域表现出较大残余压应力,应力值在 $-200 \sim -500 \text{ MPa}$ 。

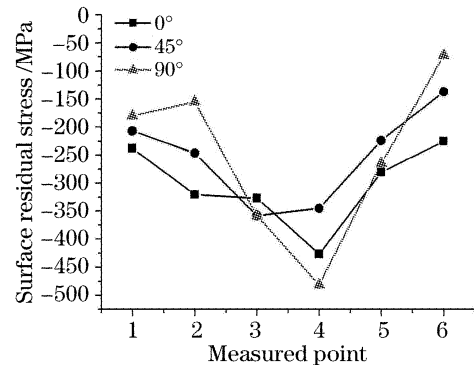


图3 TC6钛合金激光冲击处理区域残余应力分布
(点间距2 mm)

Fig. 3 Distribution of surface residual stress of laser shock processed titanium alloy (the distance of two near spot was 2 mm)

为研究激光冲击处理与喷丸的对比,采用线接触磨损下试件尺寸制作实验材料,圆柱顶面一半采用高强度的喷丸处理,另一半靠近分界线位置采用激光冲击处理。激光冲击处理区域采用两个光斑搭接,表面轮廓测量线经高强度喷丸区、两光斑搭接的激光冲击处理、未处理的原始表面,所测表面轮廓如图4所示。

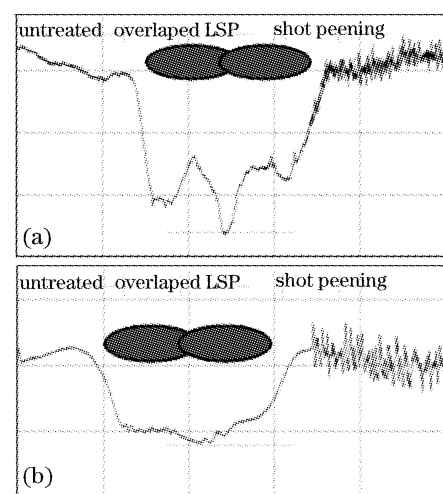


图4 激光冲击处理区域表面轮廓同喷丸的对比
(a) 冲击强度过大; (b) 冲击强度合适

Fig. 4 Comparison of surface profile of laser shock processing with shot peening. (a) biggish shock intensity; (b) suitable shock intensity

由图4(a)可以看出,激光冲击处理的强度略大,塑性变形强度明显,冲击区域有一定的挤出效

应,最大凹陷约 $20\ \mu\text{m}$,出现在搭接处。激光冲击处理强度过大时,容易导致材料内部剪切破碎,并使表面凹凸不平,因此在实际的冲击处理时,要适当降低冲击处理的强度和适当增加搭接率。由图 4(b)可以看出,激光冲击处理的强度比较合适,存在一定的塑性变形,没有明显的挤出、剪切效应和最大凹陷位置,整体凹陷约 $9\ \mu\text{m}$,这种冲击处理的强度和搭接率能获得光滑表面轮廓。

北京机电研究所对激光冲击处理区[图 4(a)对应的激光冲击处理区域]和喷丸区的残余应力进行了测试,结果如表 1。可以看出,一次激光冲击处理就能获得很高的表面残余压应力,如考虑最大应力方向的应力值,其强度和喷丸区基本相当。

表 1 激光冲击处理和喷丸区残余应力的对比

Table 1 Comparison of surface stress of laser shock processing with shot peening

Parameter	LSP	SP
Stress in X-direction /MPa	-603	-439
Stress in Y-direction /MPa	-560	-910

3 叶片的实验研究

激光冲击处理薄壁结构件(如发动机叶片,压气机叶片等)时,很难实现对叶片边缘强化有效而又没有变形,在背面垫支撑对不规则的叶片型面又很难实现。当采用双束激光同时冲击叶片两面时,两边同时相对传播的冲击波可抵消单边冲击产生的变形。然而双面冲击强化会产生另外的问题,压力波在背面反射后变成拉力波,导致叶片内部更强的拉力波而使材料内部发生层裂。

实验中,要强化的钛合金转子叶片边缘的刀口厚度不到 $1\ \text{mm}$,同时又是整个叶片结构的疲劳性能薄弱环节,因此对叶片边缘约 $10\ \text{mm}$ 的区域进行全面强化,同时对离叶根 $1/3$ 部位进行重点强化。

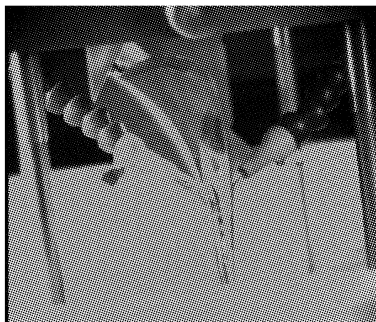


图 5 双光束激光冲击处理钛合金转子叶片
Fig. 5 Laser shock processing titanium blade with dual side

采用专用贴膜作为保护涂层,厚度 $100\ \mu\text{m}$,在连续三次冲击下也能有效保护金属表面不产生热损伤。保护涂层外以流水作为约束层,水层厚度 $1\sim 2\ \text{mm}$ 。两束激光以一定的倾角从两面同时入射零件表面,如图 5 所示。

双光束的脉冲能量约 $20\ \text{J}$,光斑直径 $2\sim 3\ \text{mm}$ 。冲击波到达背面的金属和水的界面后,压力波以反射系数 $R = -0.84$ 衰减并转化成拉力波向内部传播,反射前两股压力波同时向金属内部传播并在中间交界面加强,对中间部位强化有利,而发射后拉力波的增强可能达到材料的破坏极限,使材料内部层裂,两光束的偏移设置可以使两股压力波的强势部位错开。双面激光冲击处理的关键是避免两面残余应力的不平衡导致叶片的应力变形,因此有必要发展在线监测技术以保证整个过程质量控制。

采用一定的倾角激光入射方式的另一优点是减少溅射的水污染聚焦镜头,因为在界面产生压力波的同时,水被冲击波推进并加速离开界面,溅射方向主要沿叶片处理部位的法线方向。

为避免双光束冲击处理产生的破坏效应,还采用了双面铝箔作正面吸收层以方便吸波层的保护方式,利用铝合金声阻抗和钛合金匹配实现对钛合金的有效保护。

经激光冲击处理后,叶片表面没有发现变形和裂纹,只看见叶片表面冲击后产生的冲击坑,如图 6 所示。采用 MSF-2MX X 射线应力分析仪对冲击区进行表面残余应力测定, X 射线功率 $30\ \text{kV} \times 10\ \text{mA}$, 输出光斑 $4\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$ 。分别测试了叶缘附近叶背、叶盆各两个点,并定义沿叶片边缘方向的应力为 σ_x , 垂直于叶片边缘方向的应力为 σ_y 。测试结果为,叶背两点应力分别为 $\sigma_x = -236\ \text{MPa}$, $\sigma_y = -159\ \text{MPa}$; $\sigma_x = -277\ \text{MPa}$, $\sigma_y = -108\ \text{MPa}$ 。叶盆两点应力分别为 $\sigma'_x = -390\ \text{MPa}$, $\sigma'_y = -190\ \text{MPa}$; $\sigma'_x = -292\ \text{MPa}$, $\sigma'_y = -218\ \text{MPa}$ 。

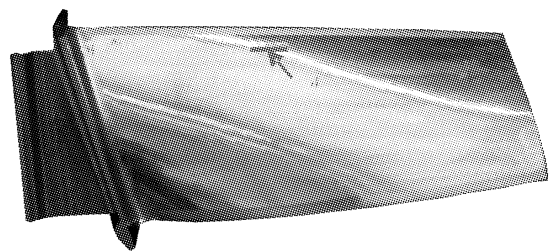


图 6 激光冲击处理钛合金转子叶片的冲击坑
Fig. 6 Shocked zone of laser shock processing titanium blade

4 结 论

钛合金经激光冲击处理后效果十分明显,每次冲击获得光斑大小的凹坑,凹陷值 10~20 μm ,残余应力最大可达-600 MPa 以上,表面残余应力水平与高强度喷丸相当,但塑性变形程度明显大于喷丸。合适的激光参数和搭接率可以获得光滑平整的冲击区,双光束冲击处理叶片后有明显冲击痕迹和残余压应力,并且没有发现变形和裂纹。随着强脉冲激光设备输出平均功率的提高,激光冲击处理钛合金叶片有望取得实质进展。

参 考 文 献

- 1 Lloyd A. Hackel, John M. Halpin, B. Harris, Jr. Laser peening of components of thin cross-section[P]. U. S. Patent 6, 657,160B2, 2003-12-02
- 2 Setharamaiah Mannava, William D. Cowie. Laser shock peening gas turbine engine intermetallic parts[P]. U. S. Patent, 6,551, 064B1, 2003-04-2
- 3 Graham Hammersley, Lloyd A. Hackel, Fritz Harris. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**: 327~337
- 4 M. Hill, J. Rankin, L. Hackel *et al.*. Engineering and economic considerations for life-extension by laser peening[C]. *Conf. on Aging Aircraft*, 2002
- 5 Zou Shikun, Tan Yongsheng, Guo Dahao *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of Al-Li alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 371~373
邹世坤,谭永生,郭大浩等. 激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 371~373
- 6 Wang Shengbo, Fang Yong, Wu Hongxing *et al.*. Research on strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 125~128
王声波,范勇,吴鸿兴等. 7050 航空铝合金结构材料激光冲击[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 125~128
- 7 Liu Songping, Guo Engming, Wang Ruichuan *et al.*. Ultrasonic quantitative evaluation of titanium alloy diffusion bonding interface homogeneity [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2003, (5): 32~36
刘松平,郭恩明,王瑞川等. 钛合金扩散连接界面完整性超声定量评估[J]. *航空制造技术*, 2003, (5): 32~36
- 8 Li Ju, Shi Yaowu, Guan Qiao *et al.*. Influence of heat conduction ability of backing of bar on welding residual stress in titanium alloy thin plate[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2004, **40**(3): 133~136
李菊,史耀武,关桥等. 垫板导热能力对钛合金薄板焊接残余应力的影响 [J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(3): 133~136