

激光冲击对 TC11 钛合金组织和力学性能的影响

聂祥樊¹, 何卫锋¹, 臧顺来², 王学德¹, 李玉琴¹, 柴 艳¹

(1. 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, 西安 710038;

2. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘 要: 对 TC11 钛合金进行激光冲击强化处理,通过透射电子显微镜观察不同参数下 TC11 钛合金的微观组织变化,用显微硬度计和 X 射线应力测试仪分别测试材料表层硬度和残余应力,并通过 TC11 钛合金标准疲劳试片高周振动疲劳试验验证激光冲击对其疲劳性能的影响. 试验结果表明:激光冲击波作用后表面组织结构发生明显变化,当冲击次数增加,先后出现了高密度位错、位错胞和纳米级晶粒等微观组织特征. 冲击 10 次后,表面残余应力最高达到 -632.5 MPa,相应的塑性变形层深度达到 1500 μm 左右;同时表面硬度在冲击 1 次即可提高 19%,硬度影响深度为 700 μm ,随着次数增加而提高,但幅度不大. 经 3 次冲击处理的 TC11 钛合金标准疲劳试片的疲劳极限由原始 483 MPa 提高到 593 MPa.

关 键 词: 激光冲击强化; TC11 钛合金; 纳米级晶粒; 残余应力; 疲劳极限

中图分类号: V216.3; TG665

文献标志码: A

Effects on structure and mechanical properties of TC11 titanium alloy by laser shock peening

NIE Xiang-fan¹, HE Wei-feng¹, ZANG Shun-lai², WANG Xue-de¹,
LI Yu-qin¹, CHAI Yan¹

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory,

Aeronautics and Astronautics Engineering College,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: TC11 titanium alloy was treated by laser shock peening (LSP), while micro-structure, residual stress and microhardness without/with LSP in different laser impacts were examined and compared via transmission electron microscope (TEM), X-ray diffractometer and microhardness tester. The high-cycle vibration fatigue test of TC11 titanium alloy standard vibration specimens was conducted to verify effects of LSP on the high-cycle fatigue property. The results indicated that severe plastic deformation was formed and grains on the surface were refined with high-density dislocations, dislocation cells. Nanocrystals were generated successively with increasing laser impact. The maximum residual stress reached -632.5 MPa in 10 impacts with 1500 μm thick plastic deformation layer. The microhardness was increased by 19% with 700 μm thick affected layer. The affected depth increased with the laser impact, but amplitude was limited. Fatigue limit of TC11 titanium alloy standard vibration specimens treated by LSP in 3 impacts had been improved from 483 MPa to 593 MPa.

收稿日期: 2012-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51205406); 西安市科技计划项目(CXY116(4))

作者简介: 聂祥樊(1988-),男,江西南昌人,博士生,主要从事激光冲击强化技术及其应用等方面的研究.

E-mail: skingkd@163.com

Key words: laser shock peening; TC11 titanium alloy; nanocrystals; residual stress; fatigue limit

激光冲击强化技术是一种新型表面改性技术^[1],在近40年的发展历程中成功地在多种金属材料 and 构件上实现了应用^[2-11]. 激光冲击强化一般采用波长为1064,532 nm 或355 nm,短脉冲(几十纳秒),高功率密度($> \text{GW}/\text{cm}^2$ 级)的激光,通过吸收保护层和约束层将激光诱导的等离子体冲击波(以下简称激光冲击波)的力学效应作用于金属靶材上,当冲击波压力超过材料的动态屈服强度则引起塑性变形,使材料表层组织结构发生变化,并形成较大的残余应力,从而提高材料的抗疲劳^[11-15]、抗磨损^[16-17]和抗应力腐蚀^[18-19]等性能. 由于激光冲击强化的技术优点,如高压高应变率、无热影响、无接触、精确可控和无污染等,使其越来越受表面处理领域研究学者所关注.

自1972年美国巴特尔学院的 Fairand B P 等^[20]首次在7075铝合金上开展技术研究至今的近40年间,激光冲击强化技术得到了较好的发展和应用. 目前,美国已经实现了激光冲击强化工程应用,其中美国空军研究实验室、GE公司和MIC(Metal Improvement Company)公司利用激光冲击强化技术显著地提高了压气机叶片和整体叶盘等构件的疲劳寿命^[14-15]. 国内发展现状仍处于基础试验和机理研究阶段,其中,曹子文、张永康、何卫锋等人就一般金属材料开展了大量试验研究,分析了激光冲击参数对组织和基本力学性能的影响,并探讨了其强化机制^[5-12,21-22],但目前针对航空钛合金的影响研究较少. TC11钛合金主要用于发动机压气机叶片和压气机盘,由于其工况的恶劣致使构件在服役期内易发生疲劳断裂,严重影响了发动机的性能和安全性,因此开展激光冲击对TC11钛合金的影响研究,探究其应用的可行性. 本文通过微观组织观察和力学性能测试讨论激光冲击强化对TC11钛合金的影响,根据试验结果确定具体强化工艺,并通过振动疲劳试验验证激光冲击对材料疲劳性能的影响.

1 试验设计

1.1 试验材料

TC11钛合金(Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si,近似于BT9)是 $\alpha+\beta$ 型钛合金,在500℃以下具有较好的热强性和良好的综合性能. TC11钛合

金的化学成分(质量分数)^[23]:Al为5.8~7.0,Mo为2.8~3.8,Zr为0.8~2.0,Si为0.2~0.35,Fe为0.25,Ti为余量. 热处理制度双重退火:950~980℃,1~2h,空冷;530℃,6h,空冷. 其室温下的基本力学性能为抗拉强度 $\sigma_b=1\,030$ MPa,屈服强度 $\sigma_{0.2}=930$ MPa,断面收缩率 $\psi=30\%$,延伸率 $\delta_5=9\%$,其组织如图1所示.

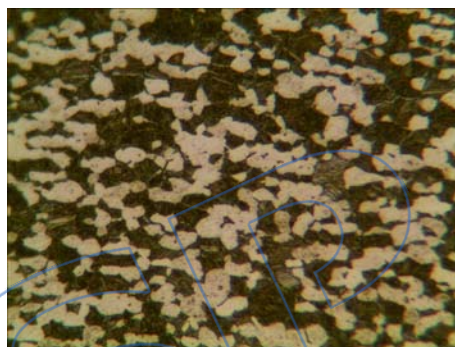


图1 TC11钛合金组织金相图

Fig. 1 Metallographic microscope of TC11 titanium alloy

用于激光冲击强化影响研究的试件的尺寸为30 mm×40 mm×4 mm,而激光冲击强化区域为试样中心的20 mm×25 mm区域,如图2所示.

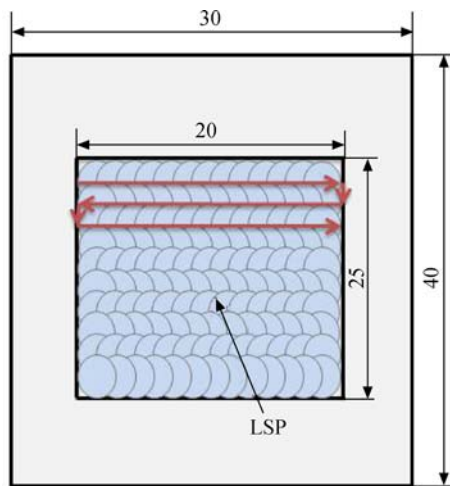


图2 试件的激光冲击强化区域示意图(单位:mm)

Fig. 2 Diagrammatic sketch of LSP specimen (unit:mm)

1.2 试验方法

根据Peyer等人提出的关于冲击波压力与塑性变形的关系可知^[24-25],当冲击波压力(p)达到

2.0~2.5HEL(HEL是金属材料的Hugoniot弹性极限)时,会发生最大程度的塑性变形.若冲击波作用过程满足一维应变冲击压缩条件,其弹性极限为

$$\sigma_{hel} = (K/2G + 2/3)\sigma_{0.2} \quad (1)$$

TC11钛合金的体积模量 $K=124\text{ GPa}$,切变模量 $G=66\text{ GPa}$,屈服强度 $\sigma_{0.2}=930\text{ MPa}$.再根据Fabbro的冲击波峰值压力模型^[26],可以反推计算得到,若要达到2.0~2.5HEL的冲击波压力,其激光功率密度阈值为 4.0 GW/cm^2 .因此,研究中具体的激光冲击参数:波长为 1064 nm ;脉宽为 20 ns ;光斑直径为 3 mm ;能量为 6 J ;功率密度为 4.24 GW/cm^2 ;冲击0次、冲击1次、冲击3次、冲击5次、冲击10次;光斑搭接率为60%;约束层为水(1~2 mm厚);吸收保护层为铝箔(0.1 mm厚).

通过TEM-3010型透射电子显微镜观察试件表面的微观组织,透射样品采用单边(冲击背面)电解抛光和离子减薄.利用Proto-LXRD型X射线应力测试仪对强化前后试样进行残余应力测试.衍射仪采用侧倾固定 Ψ 法,针对TC11钛合

金其采用Cu靶头和 $\phi 2\text{ mm}$ 的准直管,相应的衍射晶面和衍射角分别为 $\text{Ti}\{213\}$ 和 $136.1^\circ\sim 145.3^\circ$,扫描步距和步时分别为 0.02° 和 5 s ,其电流和电压为 6 mA 和 40 kV ;进行深度上的应力测试时需要进行电解抛光,其抛光液为 $24\%\text{ HNO}_3 + 14\%\text{ HF} + 62\%\text{ H}_2\text{O}$ (体积比).显微硬度测试是在MVS-1000JMT2型显微硬度计上完成,其具体设置:载质量为 500 g ;保压时间为 10 s ,每个有效值取3~5个测试值的平均值.最后,在D-300-3型电动振动系统上进行TC11钛合金标准疲劳试件的疲劳试验,疲劳试验为1阶弯曲试验;当试件频率降低1%以上即可认为试件发生裂纹停止试验.

2 微观组织

从图3中的透射电子显微镜图发现,试件原始表面组织和不同的冲击次数下表面组织呈现出不同的微观特征.试件原始组织是较大尺寸的等轴状 α 相和针状 β 相;试件在1次冲击后,表面产生了高密度位错,并形成了位错胞结构,尺寸为 300 nm 左右;当冲击次数增加到3,5,10次时,表

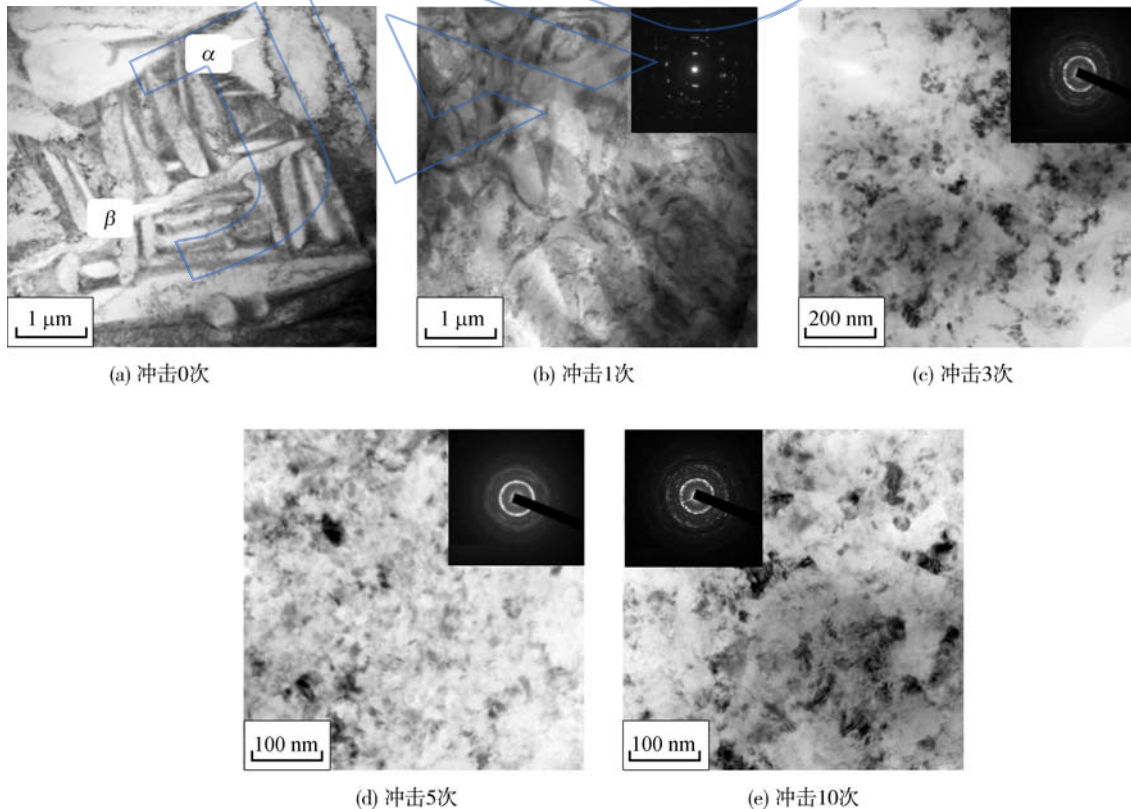


图3 不同冲击次数下试件表面透射电子显微镜图和衍射花样

Fig. 3 TEM photographs and diffraction patterns of the surface layer of the titanium alloy samples with different impacts

面形成大量纳米级晶粒组织,随着冲击次数的增加,纳米级晶粒平均尺寸呈现出逐渐降低。冲击 10 次时,晶粒尺寸仅为 30 nm 左右。而由透射电子显微镜图及衍射花样可以发现,当冲击次数增加到 5 次以上时,晶粒不再发生明显细化,但可以进一步提高组织均匀程度。由不同冲击次数下表面微观组织的变化过程表明:激光冲击波作用下,试件首先会形成大量位错,当位错增加到一定程度后再通过滑移进行变形,而激光冲击波为此提高了足够的动力,从而使位错发生滑移、集聚和湮灭、重排后形成新晶界,从而实现晶粒的细化。进行多次冲击时,当晶粒细化成较小尺寸纳米级晶粒后;后续冲击的冲击波作用晶粒上,激光冲击波很难使纳米级晶粒内发生塑性变形,此时表层纳米级晶粒则会发生晶粒转动,增大相邻晶粒的取向差。

3 残余应力

试件在激光冲击波作用后会发生塑性变形,宏观塑性变形在微观上体现为晶格的畸变,如微观组织观察到的高密度位错和位错胞结构,而正是晶格发生畸变,从而形成残余应力。

TC11 钛合金试件在不同冲击次数的冲击下,表层产生了较大的残余应力,且残余应力值大小与冲击次数有关,如图 4。原始试件由于模拟实际 TC11 钛合金叶片成形工艺过程而产生一定的残余压应力,约为 30 MPa 左右。而经过不同冲击次数处理后材料表层形成很大的残余压应力,且塑性变形层很深。激光冲击后,残余压应力的最大值位于材料表面,1 次冲击即可形成 541.6 MPa 的压应力,且增加冲击次数可以进一步增大表面残余压应力,冲击 10 次时达到了 632.5 MPa。相

比冲击 1 次后的压应力提高幅度,后续冲击的提高幅度不大,说明多次冲击并不能有效地进一步提高表面残余压应力。由于激光冲击波在深度方向上传播时发生了衰减,而使深度上发生不同程度上的塑性变形,因此截面上的残余压应力呈显出逐渐下降趋势。而当激光冲击波压力衰减至材料动态屈服强度以下时,材料不再发生塑性变形,此时深度即认为是材料的塑性变形层深度。由图中可以发现多次冲击可以有助于提高增加塑性变形层的深度,冲击 10 次能形成大约 1.5 mm 厚的塑性变形层,是冲击一次时的 2 倍左右,则与前期研究结论相一致^[27-28]。

4 显微硬度

激光冲击使材料发生高应变率下的塑性变形,空位、位错、层错等晶体缺陷产生和晶粒细化随之发生,根据位错强化和 Hall-Petch 公式可知,塑性变形的产生会造成材料的加工硬化和细晶强化,进而提高材料的强度和硬度。图 5 为不同冲击次数下试件深度方向上的显微硬度变化曲线,冲击 1 次后表面硬度由基体的 351 HV 提高到 416 HV,提高幅度为 18.5%;10 次冲击则达到 426 HV,提高幅度为 21%。在微观组织观察中发现冲击次数增加会使试件表面位错密度增加和晶粒尺寸减小,这也正是表面硬度随着冲击次数增加而增加的原因。多次冲击对提高表面硬度的效果不大,是因为 1 次冲击后试件屈服强度有所提高,当后续冲击波再进行作用时,其发生的塑性变形量相比第 1 次冲击时有所下降,致使后续冲击的硬度增幅减小。截面硬度上的分布趋势同残余应力分布趋势类似,这同样是因为冲击波压力深度上的衰减,致使截面组织体现出不同程度的位

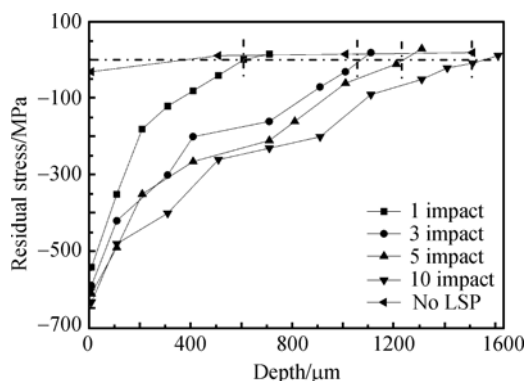


图 4 不同冲击次数下沿深度方向的残余应力分布
Fig. 4 Residual stress distribution on cross section with different impacts

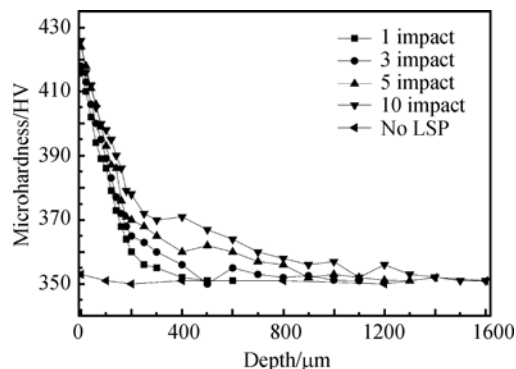


图 5 不同冲击次数下截面硬度分布
Fig. 5 Microhardness distribution on the cross section with different impacts

错密度和晶粒细化,从而使截面硬度得到不同程度的提高,所以截面上的硬度随着深度加深而降低.当硬度达到基体硬度时,此时深度为冲击的硬度影响层的深度.冲击1次、冲击3次、冲击5次、冲击10次时材料硬化层深度分别为0.7、1.1、1.3、1.5 mm,这说明冲击次数的增加有利于提高材料硬化层深度.

5 疲劳性能

为了验证激光冲击对 TC11 钛合金疲劳性能的影响,利用 TC11 钛合金标准疲劳试件进行振动疲劳试验验证.疲劳试件是按照实际叶片的热处理工艺进行热处理,根据 HB5277-84 制作标准经线切割、打磨、抛光工艺制成.振动疲劳试验中的试件固定采用单边夹持方式,在此1阶弯曲试验中,试件的最大应力水平位于 R20 弧区域,为了验证激光冲击强化效果,对 R20 弧区域进行强化处理,如图6.

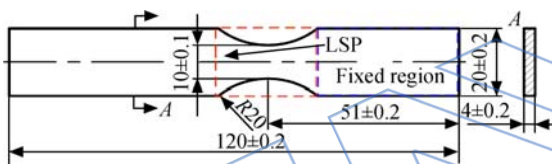


图6 TC11 钛合金标准疲劳试件(单位:mm)

Fig.6 Standard fatigue specimen of TC11 titanium alloy (unit:mm)

疲劳试件分为两组:一组为未进行激光冲击强化的15件试件;另一组为进行激光冲击强化的15件试件.考虑到技术在实际叶片上的应用,而根据实际 TC11 钛合金叶片工程上表面粗糙度为 $0.8\mu\text{m}$ 的要求,利用表面轮廓测试仪对不同冲击次数下试件表面进行表面粗糙度测量,发现1次冲击后平均表面粗糙度为 $0.53\mu\text{m}$,3次冲击后平均表面粗糙度为 $0.68\mu\text{m}$,而5次冲击后平均表面粗糙度为 $0.92\mu\text{m}$,综合上述组织、性能试验结果,选用波长为1064 nm,能量为6 J,脉宽为20 ns,光斑直径为3 mm,3次冲击等激光冲击参数对疲劳试件 R20 弧区域进行双面对冲方式的激光冲击强化处理.利用疲劳升降法进行疲劳实验数据(1×10^7 次循环次数的疲劳寿命水平下)处理,得到疲劳试件强化前后的疲劳升降图,如图7所示.

当应力水平 σ_i 服从正态分布,其子样平均值即可作为母体中值估计值,则疲劳极限 σ_r 就等于

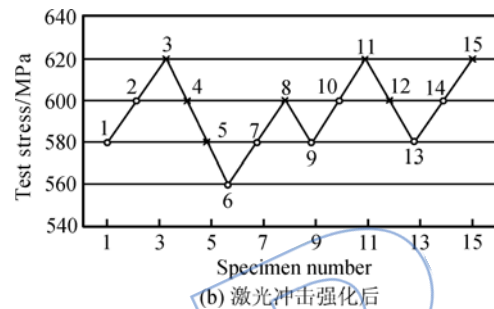
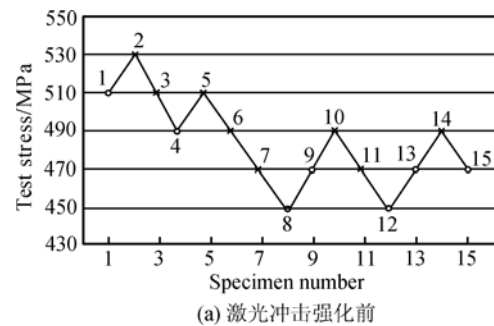


图7 冲击前后试件疲劳升降图

Fig.7 Fatigue lift figure of specimens before and after impacts

以 n'_i 为权重系数的 σ_{ri} 的加权平均值

$$\sigma_r = \frac{1}{n'} \sum \sigma_{ri} n'_i \quad (2)$$

式中 n' 为对子总数

$$n' = \sum n'_i \quad (3)$$

根据疲劳升降图对各点进行升降配对(以未进行激光冲击强化试件的升降图为例):1和2,3和4,7和8,9和10,11和12,13和14,还有不相邻的6和15,总共7对($n'=7$).根据上面计算疲劳极限的方法,计算得到激光冲击后标准疲劳试件的疲劳极限由原始试件的483 MPa提高到593 MPa,提高了22.8%,说明激光冲击可以明显提高 TC11 钛合金的疲劳强度.

根据具体的表面微观组织、截面上残余应力和显微硬度的结果,表明激光冲击强化后表层晶粒的细化、残余压应力的产生与及材料表层的加工硬化效应是提高 TC11 钛合金疲劳强度的主要原因.一方面,因为位错的大量产生,形成位错强化,引入一个有益的强度增量;且多次冲击造成的纳米级晶粒细化会带来大量新生晶界,材料表面的新生晶界越多,越能有效抑制裂纹的萌生和降低裂纹的扩展速率,从而提高其疲劳寿命.另一方面,激光冲击波在材料表层引入了数值大、影响深的残余压应力;而残余压应力在振动疲劳试验过程中可以很大程度上抵消振动载荷引起的表面拉

应力,降低试件表面的拉应力水平,使试件表面的应力状态不能满足裂纹的萌生条件,延迟裂纹的形成,从而提高试件的裂纹形成寿命。

6 结 论

通过对不同冲击次数下 TC11 钛合金微观组织、残余应力和显微硬度的观察和测试,总结了冲击次数的影响规律;再利用振动疲劳试验验证其强化效果,并分析了激光冲击对强化 TC11 钛合金疲劳性能的强化机制。

1) TC11 钛合金在激光冲击波作用下,随着冲击次数的增加,材料表面呈现出位错胞和纳米级晶粒等微观结构特征,其中冲击 3 次即可在材料表面形成纳米级晶粒组织。

2) 激光冲击强化可以显著提高材料表层的残余压应力和硬度,在截面上随着冲击波的传播、衰减而呈现出逐渐下降趋势,且多次冲击可以有效提高其影响层深度。

3) 激光冲击强化可以有效提高 TC11 试件的疲劳强度,提高幅度达到 22.8%,其表层晶粒高度细化、残余应力和显微硬度大幅提升是疲劳性能得以提高的主要原因。

参考文献:

- [1] 李伟,李应红,何卫锋,等. 激光冲击强化技术的发展和应
用[J]. 激光与光电子学进展,2008,45(12):15-19.
LI Wei, LI Yinghong, HE Weifeng, et al. Development and
application of laser shock processing[J]. Laser & Optoe-
lectronics Progress, 2008, 45(12): 15-19. (in Chinese)
- [2] 马壮,李应红,任旭东,等. 航空铝合金激光喷丸强化工艺
[J]. 机械工程材料,2007,31(8):32-34.
MA Zhuang, LI Yinghong, REN Xudong et al. Strengthen-
ing of aerial aluminum alloy with laser shock peening[J].
Materials For Mechanical Engineering, 2007, 31(8): 32-
34. (in Chinese)
- [3] NIE Xiangfan, LONG Nidong, HE Weifeng, et al. The
effect on the surface of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr by laser
shock peening[J]. Materials Science Forum, 2011, 694:
946-950.
- [4] ZHOU Lei, HE Weifeng, WANG Xuede. Effect of laser
shock processing on high cycle properties of
1Cr11Ni2W2MoV stainless steel[J]. Rare Materials and
Engineering, 2011, 40(4): 174-177.
- [5] 曹子文,邹世坤,刘方军,等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV
不锈钢[J]. 中国激光,2008,35(2):316-320.
CAO Ziwen, ZOU Shikun, LIU Fangjun et al. Laser shock
processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel[J]. Chi-
nese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 316-320. (in Chinese)
- [6] 张永康,陈菊芳,许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验
研究[J]. 中国激光,2008,35(7):1068-1072.
ZHANG Yongkang, CHEN Jufang, XU Renjun. Experi-
mental research of laser shock strengthening AM50 mag-
nesium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7):
1068-1072. (in Chinese)
- [7] 周磊,李应红,翟旭生,等. 利用激光冲击强化提高均压孔
结构的疲劳寿命[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42
(3):379-382.
ZHOU Lei, LI Yinghong, ZHAI Xusheng, et al. Fatigue-
life improvement of symmetrical pressure hole by laser
shock processing[J]. Journal of Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(3): 379-382. (in
Chinese)
- [8] 李启鹏,李应红,何卫锋,等. 激光冲击强化提高主动连杆
振动疲劳性能[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(1):
69-74.
LI Qipeng, LI Yinghong, HE Weifeng, et al. LSP to im-
prove vibration fatigue performance of deflation value lever
[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and As-
tronautics, 2012, 38(1): 69-74. (in Chinese)
- [9] 周留成,周磊,李应红,等. 激光冲击强化对不锈钢焊接接
头拉伸性能的影响[J]. 焊接学报,2011,32(4):51-54.
ZHOU Liucheng, ZHOU Lei, LI Yinghong, et al. The
effects of laser shock processing on tensile property of wel-
ded joints[J]. Transaction of the China Welding Institu-
tion, 2011, 32(4): 51-54. (in Chinese)
- [10] 何卫锋,李应红,李启鹏,等. 涡轮叶片榫槽部位激光冲击
强化试验研究[J]. 中国激光,2010,37(7):1898-1902.
HE Weifeng, LI Yinghong, LI Qipeng, et al. Experiment
research on laser shock peening of Ni-based superalloy[J].
Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1898-1902. (in
Chinese)
- [11] 何卫锋,李应红,李伟,等. 激光冲击强化提高压气机叶片
疲劳性能研究[J]. 航空动力学报,2011,26(7):1551-1556.
HE Weifeng, LI Yinghong, LI Wei, et al. Laser shock pee-
ning on vibration fatigue behavior of compressor blade[J].
Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1551-1556. (in
Chinese)
- [12] 李伟,何卫锋,李应红,等. 激光冲击强化对 k417 材料振动
疲劳性能的影响[J]. 中国激光,2009,36(8):2197-2201.
LI Wei, HE Weifeng, LI Yinghong et al. Effects of laser
shock processing on vibration fatigue properties of K417
material[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 2197-
2201. (in Chinese)
- [13] Yang J M, Her Y C, Han N, et al. Laser shock peening on
fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes
and stop holes[J]. Materials Science Engineering: A, 2001,
298(1/2): 296-299.
- [14] Richard D T, David F L. Preventing fatigue failures with
laser peening[J]. Advanced Material and Processes Tech-
nology Information Analysis Center (AMPTIAC) Quar-
terly, 2003, 7(2): 3-7.
- [15] Bartsch T M. High cycle fatigue(HCF) science and tech-

- nology program 2002 annual report[R]. Dayton:Universal Technology Corporation,2003.
- [16] Lim H, Kim P, Jeong H, et al. Enhancement of abrasion and corrosion resistance of duplex stainless steel by laser shock peening[J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2012, 212(6):1347-1354.
- [17] Barletta M, Rubino G, Gisario A. Adhesion and wear resistance of CVD diamond coatings on laser treated WC-Co substrates[J]. *Wear*, 2011, 271(9/10):2016-2024.
- [18] Wataru S, Takayuki A, Takashi I, et al. Stress corrosion cracking countermeasure observed on Ni-based alloy welds of BWR core support structure[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(4):655-664.
- [19] Omar H. A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA 2195 joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(5):974-988.
- [20] Fairand B P, Clauer A H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(3):1497-1502.
- [21] 任旭东, 张田, 张永康, 等. 激光冲击处理提高 00Cr12 合金的疲劳性能[J]. *中国激光*, 2010, 37(8):2111-2115.
REN Xudong, ZHANG Tian, ZHANG Yongkang, et al. Improving fatigue properties of 00Cr12 alloy by laser shock processing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8):2111-2115. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册[M]. 北京:航空工业出版社, 1997.
- [24] Peyer 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.
- [25] Ballard P, Fournier J, Fabbro R, et al. Residual stresses induced by laser shocks [J]. *Journal de Physique*, 1991, 1(3):487-494.
- [26] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(1):75-84.
- [27] Clauer A H. Laser shock peening for fatigue resistance proceedings of surface performance of titanium[J]. *The Material Society of AIME*, 1996, 56(2):217-230.
- [28] 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*, 2012, 536(2):57-63.