

激光冲击强化研究现状与展望

高玉魁, 蒋聪盈

(同济大学航空航天与力学学院, 上海 200082)

[摘要] 激光冲击强化是一种新型的表面改性技术, 相比于传统的喷丸强化技术有诸多突出优势。对激光冲击强化技术原理进行分析, 总结激光冲击强化技术的各个工艺参数, 并对激光冲击强化后材料表层性能变化进行阐述。讨论激光冲击强化技术的发展与现状, 并对该技术在未来的运用进行展望。

关键词: 激光冲击强化; 残余应力; 表层改性技术; 延寿; 表面完整性

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.04.016



高玉魁

博士, 同济大学航空航天与力学学院教授和博士生导师, 主要从事航空航天先进材料与制造技术、表面完整性和结构完整性、残余应力、表层改性等研究, 发表学术论文 50 余篇, 出版专著 1 部。

激光冲击强化(Laser Shock Peening, LSP)是一种利用短脉冲激光束对材料表面进行改性, 提高材料的抗疲劳、磨损和应力腐蚀性能的技术。激光冲击强化可以同时做到在材料表面产生残余压应力, 降低表面

粗糙度, 提高表面硬度, 改善组织结构等效果^[1]。相比于传统的喷丸强化, 激光冲击强化具有非接触、无热影响区和强化效果突出等特点。同时, 激光冲击强化不会破坏材料表面完整性且产生的残余应力场深度较深。

激光冲击强化的发展可以追溯到 20 世纪 60 年代, 当时科学家发现, 激光可以产生冲击波, 从而使材料表面产生塑性变形^[2]。1972 年, 美国科学家 Fairand 等研究了激光冲击后材料表层的微观结构变化和位错, 提出激光冲击可提高 7075 铝合金抗疲劳性能和抗应力腐蚀性能^[3]。1973~1981 年, 美国 Battelle 学院 Clauer 等研究了激光冲击的工业运用, 提出用激光冲击强化来替代传统的喷丸强化^[4]。1987 年以来, 以 Fabbro 为首的法国科学家在法国汽车工业的支持下对激光冲击强化技术进行了系统性的研究, 探索了激光冲击产生冲击波的机理和模型、激光冲击后材料性能的变化等, 提出了冲击波峰值和压力的估算公式^[5]。1999 年, Braisted 和 Brockman 首次使用数值模拟的方法来对激光冲击强化进行分析, 并用试验方法验证了模拟的有效性^[6]。

我国对激光冲击技术研究和应用起步较晚, 国内首台大功率激光装置在 1996 年研制成功, 但该设备只能用来单次冲击, 且可靠性不高^[7]。张永康教授等对激光冲击强化进行了一系列理论分析, 研究了涂层约束层的影响等^[8-9]。2009 年, 胡永祥教授研究激光冲击光斑形状的影响^[10]。2012 年, LUO 研究了光斑搭接率对残余应力场分布的影响^[11]。

激光冲击强化原理

激光冲击强化原理如图 1 所示, 高能激光束穿过材料表面的约束层照射到材料的吸收层上。激光发射器能在 100ns 内发射出 1~100J 的激光束, 这使得激光的能量密度可以达到 kW 量级^[12]。吸收层材料在吸收大量的激光能量后, 会产生高压等离子体。由于约束层的存在, 等离子体会冲击材料表层, 产生应力波, 从而使材料表层产生向两侧的塑性应变。当冲击结束后, 由于材料内部力的自平衡作用, 材料表层会形成残余的压应力。

激光冲击强化是一个高应变率的动力学冲击过程。同时, 由于吸收层的存在, 激光不会烧伤材料表面,

也不会材料表面产生高温,因此激光冲击强化属于冷加工。

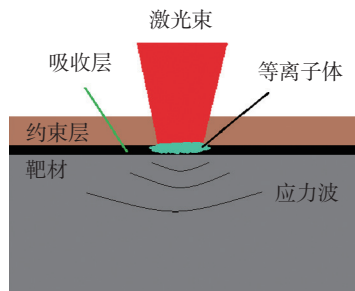


图1 激光冲击原理示意图

Fig.1 Schematic of laser shock peening

激光冲击强化工艺影响参数

激光冲击强化是一个复杂的加工过程,涉及到物理、力学、材料学等多个学科。激光功率密度、光斑形状和大小、光斑叠加率、吸收层和约束层的材料等都会影响强化的效果。

1 峰值压力

激光冲击强化是一个瞬时过程,一般在几十 ns 内完成,因此无法对激光束冲击靶材所产生压力进行准确测试和计算。目前常用的方法就是将等离子体产生的冲击波以一个均布压力场的形式进行表达。为了对冲击波产生的压强大小进行估算,Fabbro 等进行了一系列的试验和理论推导,提出了靶材表面冲击波峰值压力估算公式^[13]:

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{a}{2a+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}$$

式中, P 表示冲击波产生的表面压强最大值; $2a$ 表示等离子体冲击波的能量转换效率,由吸收层材料决定; I_0 表示激光冲击的功率密度; Z 表示约束层和靶材材料的总阻抗,由约束层阻抗和靶材阻抗一起决定,公式如下:

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{overlay}}} + \frac{1}{Z_{\text{target}}}$$

峰值压力估算公式建立了激光冲击功率密度和峰值压力的关系,可以通过公式估算激光冲击强化的峰值压力^[14]。当峰值压力超过

Hugoniot 弹性极限时,材料表层即发生塑性应变,从而引起材料表层的残余压应力。Hugoniot 弹性极限计算公式如下:

$$HEL = \sigma_y^D \frac{1-\nu}{1-2\nu}$$

式中, σ_y^D 表示材料的动态屈服强度。

2 压力时间分布

激光冲击强化过程中压力并不是常值,而会随时发生变化。Fabbro 等在 1990 年测试了没有约束层的激光冲击强化过程中压力的时间演化规律,并将压力-时间分布和激光脉宽联系起来,如图 2 所示^[15]。Oros 在 2002 年研究了多种材料在激光冲击下的压力-时间演化曲线,并提出压力时间演化曲线和约束层有关,约束层可以同时提高峰值压力值以及峰值压力的持续时间^[16]。

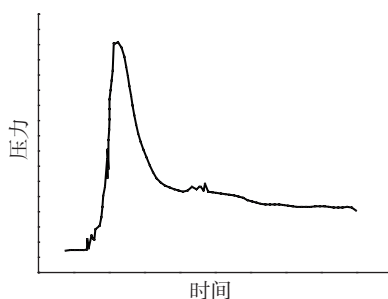


图2 激光冲击压力-时间演化图

Fig.2 Temporal evolution of shock wave pressure

3 光斑形状与叠加率

在激光冲击强化过程中,光斑的形状是可控的,常见的光斑有方形和圆形,光斑形状的不同会影响激光冲击后残余应力的分布。圆形光斑激光冲击引起的残余应力是各向同性的,而方形光斑在各个方向上的残余应力不同。

研究表明,圆形光斑更容易引起“残余应力洞”现象,使得强化中心残余应力缺失,降低强化效果^[17]。

由于单次激光冲击范围有限,为了完整处理零件的表面,有必要对激光冲击进行搭接。为保证残余应力在材料表层的均匀性,必须保证光斑在

材料表层的全覆盖。圆形光斑正方形阵列形式强化时需要覆盖率 136%,而方形光斑只需要略高于 100%,而且方形光斑搭接强化后材料表面的粗糙度比圆形光斑更有优势^[18]。

激光冲击强化工艺和效果

材料的腐蚀、磨损和疲劳断裂等失效事故常常起源于表面,因此材料的表层状态对材料的性能有重要影响^[1]。激光冲击强化会从多个方面对材料表层性质产生有利影响。激光冲击强化后的材料除了在表层有残余压应力外,材料表层的组织结构和硬度也会发生变化。

1 残余应力与抗疲劳性能

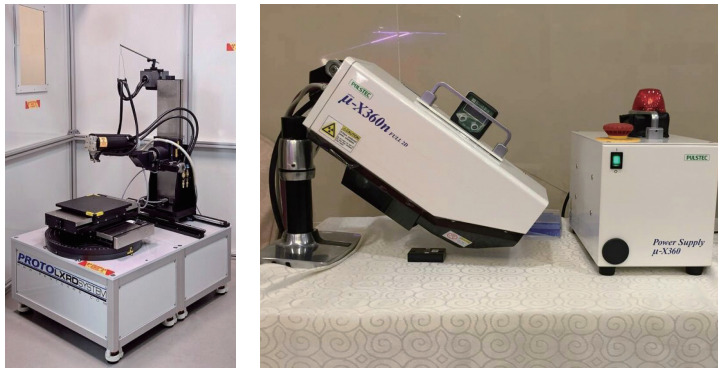
疲劳裂纹通常从材料的表面萌生,而表层的残余压应力可以抑制裂纹的扩展,从而达到延长材料寿命甚至止裂效果^[19]。因此,残余压应力场的深度和数值大小常被用来评估表层改性后材料的抗疲劳性能。

常见的残余应力的定量测量方法有 X 射线衍射法,中子衍射法,钻孔法等。其中 X 衍射法因其不损伤材料表面,穿透层较浅,测试技术成熟有效而被广泛运用,美国汽车学会和日本材料学会都把 X 射线衍射法作为测量材料应力的标准使用。X 射线衍射法的工作原理是根据 X 射线与材料晶体点阵结构发生衍射,通过度量晶体点阵的应变来测定残余应力。X 衍射的布拉格方程反映了晶体衍射面间距与衍射角之间的关系:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

目前,常用的 X 射线衍射残余应力分析方法有一维线探法和二维面探法,图 3 中的两台装置就是基于这两种原理的 X 衍射残余应力测试仪。

传统的 X 射线衍射法采用一维探测器,通过改变测试角,对固定点进行多次曝光,最后对测试结果进行数据拟合,计算出 θ 方向上的应力



(a)一维线探 (b)二维面探

图3 X射线残余应力测试仪

Fig.3 X-ray residual stress testing instrument

值:

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{(1+\nu)} \left(\frac{\partial \varepsilon_{\psi\theta}}{\partial \sin^2 \psi} \right)$$

近年来开发的二维面探X射线衍射法采用二维探测器,固定测试角,对固定点进行单次曝光,得到完整的德拜环,如图4所示,最后分析德拜环上不同的衍射角峰值变化,根据公式得到方向上的应力值:

$$\sigma_{\theta} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0}$$

$$\left(\frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right),$$

$$a_1(0) = \frac{1}{2} [(\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})]$$

二维面探得到的完整德拜环,不仅可以进行应力的计算分析,而且可以反映物质的一些微观特征,如晶体特征以及晶粒取向等。图5中显示了X射线衍射法测得的激光处理强

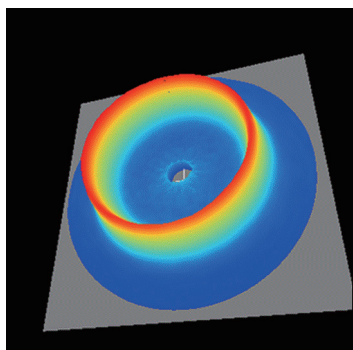


图4 X射线二维面探得到的德拜环
Fig.4 Debye ring using X-ray 2-dimension detector

化后的铝合金表层残余应力沿深度的分布^[20]。随着冲击次数的增加,残余压应力深度也会增加。冲击次数超过两次后,材料表层残余压应力深度超过2mm,而传统的喷丸强化引起的残余压应力深度一般不超过0.5mm。残余应力深度较深是激光冲击强化优于传统喷丸的主要方面,较深的残余应力层意味着更强的抗疲劳性能。

激光冲击强化、喷丸强化以及未经表面处理的铝合金材料的S-N,如图6所示^[21]。喷丸强化以及激光冲击强化都可以提高铝合金材料的疲劳极限和疲劳寿命,而且激光冲击强化比喷丸强化效果更佳。对包含初始裂纹的材料,激光冲击强化也可以降低裂纹的扩展速率^[22],这使得激光冲击强化在零件的维修和再制造方面有着巨大的潜能。图7比较了激光冲击强化前后裂纹的扩展速率,从图7中可以看到,虽然材料有1mm的初始裂纹,但是在激光冲击强化后此裂纹不会扩展至2mm以上^[22]。

2 表面粗糙度,微观组织与屈服强度变化

在单个光斑的激光冲击强化下,材料表面的粗糙度会

减小,这对材料强化是有利的。当材料需要多个小光斑的叠加强化时,材料表面的粗糙度会增加,这与光斑的形状以及叠加率有关。对于多个光斑的叠加来说,方形光斑比圆形光斑对减小表面粗糙度更有优势。

激光冲击强化不同于常规的喷丸强化等方式,在等离子体的高压冲击下,材料表面的应变率可以达到 10^6s^{-1} 以上,在这个超高的应变率下,材料表层位错密度增加,组织结构发生改变,形成多种强化的亚细结构,从而提高了表面强化层的失效抗力。同时激光冲击强化会使材料表层形变产生硬化,表面层的屈服强度提高,失效抗力提高。

ZHANG Y等发现激光冲击强化可以细化镁合金的晶粒,实现Mg合金的表面纳米化,如图8所示。随着

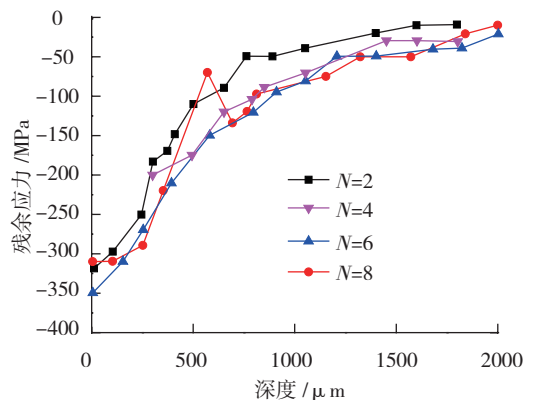


图5 激光冲击后残余压应力场沿深度分布

Fig.5 Distribution of compressive residual stress field caused by laser shot peening

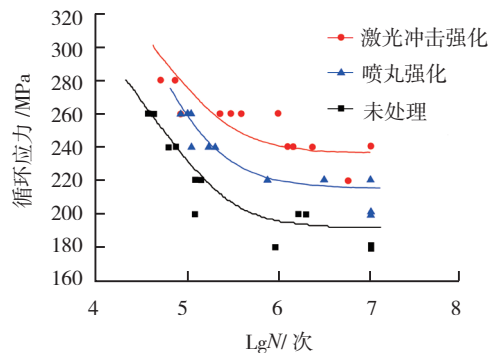


图6 喷丸、激光冲击强化和未处理的铝合金S-N曲线

Fig.6 S-N curve of SP, LSP and untreated Al alloy

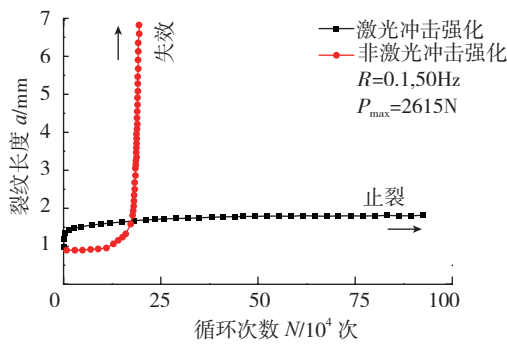


图7 激光冲击前后钛合金 $a-N$ 曲线

Fig.7 Crack length (a) vs. cycles (N) curves before and after LSP for Ti alloy

激光冲击次数的增加, Mg 合金的晶粒会不断细化^[23]。CHE Zhigang 等发现了激光冲击强化后 TC4 钛合金材料的自纳米效应^[24]。

激光冲击强化的数值模拟

激光冲击强化过程复杂, 影响因素多, 因此激光冲击强化的定量分析一般都会借助于数值方法来完成。在确定了激光冲击过程的压力时间曲线后, 就可以通过有限元软件来进行激光冲击模拟。

激光冲击强化的 ABAQUS 有限元模型, 为了提高计算效率, 建立了激光冲击的 1/4 模型。为了消除冲击波在边界上的反射, 在有限元网格周围包围上一圈无限元网格, 在冲击的对称面, 建立对称边界条件, 红色区域为激光冲击区域。

建立有限元模型后, 输入激光冲击强化的压力-时间曲线, 并输入材料的弹塑性本构方程, 就能用 ABAQUS/Explicit 对激光冲击过程进行模拟。在模拟结束后, 采用 ABAQUS/Standard 进行回弹分析, 回弹结束后就能模拟得到残余应力沿材料各个方向的分布。图 9 展示了不同压力峰值下高温镍基合金 GH4169 激光冲击强化后残余应力沿深度方向的分布。

激光冲击强化的工程应用

虽然激光冲击强化的理论研究

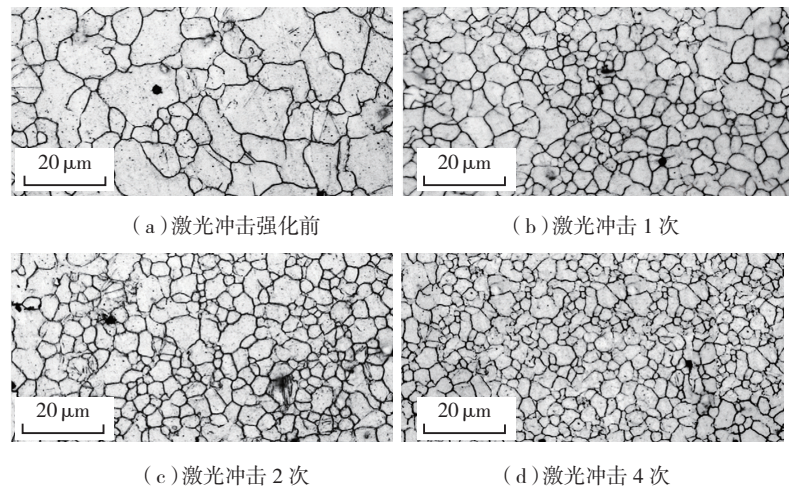


图8 AZ31B镁合金表面显微照片

Fig.8 OM micrographs on the surface of the AZ31B Mg alloy

已有 50 多年, 但是其工程应用是从 20 世纪 90 年代在美国开始兴起的, 这主要是由于传统的强脉冲激光装置造价高昂、重复频率低。1995 年, Jeff Dulaney 博士创建了世界上第一家从事激光处理技术应用公司, 并在 1997 年建成第一套用于商业应用的激光冲击处理设备。1998 年美国研发杂志将激光冲击处理评为全美 100 项最重要的先进技术之一。1998 年后, 美国 GE 公司已开始利用激光对涡轮风扇叶片和 F110-GE-100、F110-GE-129 的风扇第 I 级工作叶片进行冲击强化。2004 年 LSP 技术被用于 F119-PW-100 发动机生产线, 到 2009 年, 75% 的 F119 发动机高压压气机整体叶盘都经过了激光冲击处理。2003 年 LSP 技术被美联邦航空局 (FAA) 和日本亚细

亚航空 (JAA) 批准为飞机关键件维修技术。美国在 2004 年正式颁布了 LSP 操作规范, 当年这项技术还被应用于波音 777 民用飞机的叶片处理。激光冲击强化技术的成功运用, 为美国节约了许多成本, 预计仅仅战斗机发动机叶片的处理就能节约超过 10 亿美元。2012 年, 美国金属改进公司生产了移动式激光冲击强化设备, 可以实现移动式的激光冲击强化。激光冲击强化除了在航空航天上有较好的运用, 还在核废料处理、汽车、医疗、船舶等产业上发挥巨大的作用。

国内研究者及对激光冲击强化的工业运用进行了系列研究。2008 年, 西安空军工程大学研制成功连续脉冲激光冲击强化设备。2011 年, 中科院沈阳自动化团队向沈阳黎明发动机有限公司交付首台整体叶盘激光冲击强化设备, 填补了我国无工业应用激光冲击强化设备的空白。

结束语

激光冲击强化作为一种新型表层改性工艺, 在多方面显示出比传统喷丸强化的优势, 在某些零部件的强化上可以逐步替代传统的喷丸工艺。随着激光器制造工艺日渐成熟, 特别是随着大型结构激光冲击强化高

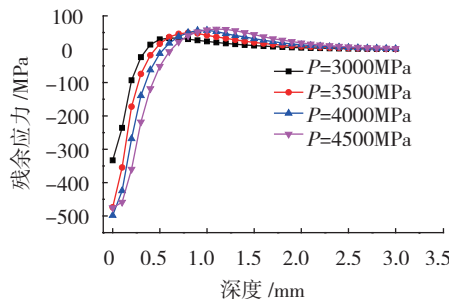


图9 不同压力峰值下残余应力沿深度方向的分布

Fig.9 Distribution of residual stress in depth with different peak pressure

效化研究的深入,以及激光冲击强化过程的模拟仿真及测试评价方法的制定,这项技术必将在各个领域得到广泛应用,尤其是在航空航天领域。

参考文献

- [1] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- GAO Yukui. Theory and application of surface integrity [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [2] NEUMAN F. Momentum transfer and cratering effects produced by giant laser pulses [J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(9): 167-169.
- [3] FAIRAND B P, WILCOX B A, GALLAGHER W J, et al. Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(9): 3893-3895.
- [4] CLAUSER A H, HOLBROOK J H, FAIRAND B P. Effects of laser induced shock waves on metals[M]. Shock Waves and High-Strain-Rate phenomena In Metals, Springer US, 1981.
- [5] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and applications[J]. Optical and Quantum Electronics, 1995, 27(12): 1213-1229.
- [6] BRAISTED W, BROCKMAN R. Finite element simulation of laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(7): 719-724.
- [7] 高建民. 我国首台激光冲击强化装置问世 [J]. 高技术通讯, 1996(9):32.
- GAO Jianmin. Chinese First LSP Device is Published[J]. High Technology Letters, 1996(9):32.
- [8] 张永康, 周建忠, 叶云霞. 激光加工技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- ZHANG Yongkang, ZHOU Jianzhong, YE Yunxia. Laser processing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [9] ZHANG X C, ZHANG Y K, LU J Z, et al. Improvement of fatigue life of Ti - 6Al - 4V alloy by laser shock peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(15): 3411-3415.
- [10] HU Y, GONG C, YAO Z, et al. Investigation on the non-homogeneity of residual stress field induced by laser shock peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(23): 3503-3508.
- [11] LUO K Y, LU J Z, WANG Q W, et al. Residual stress distribution of Ti-6Al-4V alloy under different ns-LSP processing parameters[J]. Applied Surface Science, 2013, 285: 607-615.
- [12] MONTROSS C S, WEI T, YE L, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
- [13] 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.
- [14] GUJBA A K, MEDRA J M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening[J]. Materials, 2014, 7(12): 7925-7974.
- [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] OROS C. Investigations involving shock waves generation and shock pressure measurement in direct ablation regime and confined ablation regime[J]. Shock Waves, 2002, 11(5): 393-397.
- [17] ZIWEN C, ZHIGANG C, SHIKUN Z. Simulation Study of Stress Hole on Laser Shock Peening with Square Spot[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42: 222-225.
- [18] 邹世坤, 郭恩明, 李斌. 发动机整体叶盘的激光冲击强化技术 [J]. 中国激光, 2011, 38(6): 76-82.
- ZOU Shikun, GUO Enming, LI Bin, al. Laser shock peening laser peening of turbine engine integrally blade rotor[J]. Chinese Journal of Laser, 2011, 38(6): 76-82.
- [19] GAO Y K, WU X R. Experimental investigation and fatigue life prediction for 7475-T7351 aluminum alloy with and without shot peening-induced residual stresses[J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3737-3747.
- [20] GAO Y K. Improvement of fatigue property in 7050 - T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(10): 3823-3828.
- [21] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 210(1): 102-113.
- [22] RUSCHAU J J, JOHN R, THOMPSON S R, et al. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21: S199-S209.
- [23] ZHANG Y, YOU J, LU J, et al. Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(24): 3947-3953.
- [24] CHE Zhigang, JIE Y, SHUILI G, et al. Self-nanocrystallization of Ti-6Al-4v alloy surface induced by laser shock processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(5): 1056-1060.

Review and Prospect on Laser Shock Peening

GAO Yukui, JIANG Congying

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[ABSTRACT] Laser shock peening is a new surface modification method. Compared with the conventional shot peening technique, Laser shock peening has some outstanding advantages. The principle of laser shock peening is analyzed. The parameters of laser shock peening process are summarized. The changing of surface property after laser shock peening is expounded. Discuss the development and current situation of laser shock peen, and prospect the future of laser shock peening.

Keywords: Laser shock peening; Residual stress; Surface modification technique; Prolong life; Surface integrity

(责编 古系)