



激光冲击强化技术原理及研究发展

李松夏^{1,2}, 乔红超², 赵吉宾^{2*}, 陆莹²

¹东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110000;

²中国科学院沈阳自动化研究所装备制造技术研究室, 沈阳 110016

摘要: 激光冲击强化技术(LSP)是一种新型的激光应用表面处理技术。与传统表面改性技术相比,激光冲击强化技术能给材料带来更深的残余应力层,使材料表层晶粒细化甚至出现纳米晶,同时大幅提高材料的疲劳寿命。利用高能激光辐照约束层材料(黑漆、黑胶带或铝箔),约束层材料在瞬间熔融气化并产生高温高压的等离子体。等离子体冲击波是一种爆轰波,可以通过 C-J 模型计算冲击波的峰值压力。等离子体冲击波在约束层(水、光学玻璃)的约束下向材料内部传播,其压力远远超过了材料的弹性屈服极限,材料经历了弹性-塑性变形,最终材料表面形成稳定的残余应力场并发生微弱的塑性变形。本文介绍了激光冲击强化技术的研究发展历程,在此基础上对该技术发展方向进行了展望。

关键词: 激光冲击强化; 表面处理; 残余应力层; 纳米晶; 等离子体冲击波; 塑性变形

中图分类号: O439

文献标志码: A

Research and development of laser shock processing technology

Songxia Li^{1,2}, Hongchao Qiao², Jibin Zhao^{2*} and Ying Lu²

¹School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110000, China; ²Equipment

Manufacturing Technology Department, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: Laser shock processing (LSP) is a new and efficient type of laser surface treatment technologies. Compared with the traditional surface modification technologies, laser shock processing can form a deeper residual stress layer to the material and make surface grain refinement or even appear nano-crystalline, meanwhile significantly improving the fatigue life of the material. When the high-energy laser irradiates at the confinement layer (black paint, black tape or aluminum foil), the material of the confinement layer is instantaneously melted and gasified to produce a high-temperature and high-pressure plasma. The plasma shock wave is a detonation wave that can be used to calculate the peak pressure of the shock wave by the C-J model. The plasma propagates to the interior of the material under the constraint of the confinement layer (water or optical glass). The pressure of the shock wave far exceeds the elastic yield limit of the material. Therefore, the material undergoes elastic-plastic deformation and eventually forms a stable residual stress field and a slight plastic deformation. The development of the technology research process is also introduced. On this basis, the development direction of the technology is forecasted.

Keywords: laser shock processing; surface strengthening; residual stress layer; nanocrystalline; plasma shock wave; plastic deformation

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.001

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(6): 569–576

收稿日期: 2017-04-08; 收到修改稿日期: 2017-05-12

*E-mail: jbzhaosia.cn

1 引言

激光加工技术是利用激光束与物质相互作用对材料(包括金属与非金属)进行去除、连接和表面处理^[1]。激光加工技术高效可靠,对于许多传统加工手段难以完成的问题,激光技术往往能够带来与众不同的解决方案,因此激光加工技术在工业上越来越受到人们的重视,被誉为“万能加工工具”和“未来制造系统的共同加工手段”^[2]。本文将介绍激光冲击强化这一新型的激光加工技术的原理以及研究发展历程。

2 激光冲击强化技术简介

激光冲击强化技术(Laser shock peening/processing, LSP)是激光加工技术的最新应用,是一种高效的表面改性技术,其强化原理如图 1。利用峰值功率达到 GW 级别的纳秒强脉冲激光来轰击金属材料表面吸收层;吸收层的材料吸收激光能量并在很短的时间内(ns 量级)气化电离成等离子体状态,等离子体会继续吸收能量并快速膨胀。由于吸收层表面还有一层约束层,因此等离子体膨胀后形成的冲击波只能向着材料方向继续传播。等离子冲击波形成时间短能量大,因此产生的压力将远大于材料的屈服强度,材料在冲击波压力下会产生一系列变化,包括在内部形成残余应力场,出现位错、孪晶等晶体结构,改善材料近表面的微观组织并在材料表面形成残余压应力,进而显著提升金属材料的疲劳寿命和耐腐蚀、抗磨损性能^[3-5]。

与传统的表面强化技术相比,激光冲击强化技术有其自身的特点和技术优势,主要体现在:

1) 强化效果更佳。由于等离子体冲击波的压力可以达到数 GPa,甚至 TPa 量级^[7],在冲击之后金属材

料表面会形成比较深的残余压应力层,能达到 1 mm~2 mm,比机械喷丸强化高出 5~10 倍,且表层金属的晶粒会细化甚至出现纳米晶,这些会显著提高金属材料的疲劳寿命^[8-11],传统的表面改性技术是无法实现的。

2) 可操控性强,应用范围广。与传统的机械喷丸、低塑性滚光和滚压等表面强化技术相比,激光冲击强化技术拥有更佳的操控性,其强化设备与工艺不需要针对不同零件进行专门设计。这主要是由于该技术操作过程中激光光斑可控,其大小和位置均可以精确控制,因此能够处理一些狭小或者难处理的零件部位,例如:燕尾凹槽、焊缝、深孔等。

3) 适用性好。激光冲击强化对金属材料表面基本无影响,与喷丸强化对零件表面粗糙度改变较大相比,其在材料表面留下的冲击微凹坑深度只有数微米,同时也没有热影响^[12]。

3 激光冲击强化技术原理

激光冲击强化的过程可简述为:短脉冲高能激光作用于吸收层,使其产生等离子冲击波,冲击波作用于金属材料,使材料在超高应变速率下产生一系列物理变化。其原理主要涉及到等离子体冲击波的形成以及冲击波对金属材料的作用两方面。

3.1 等离子体冲击波

高能激光束照射靶材表面吸收层,吸收层材料吸收大量能量会引起升温、熔融、气化、喷溅等现象,这是等离子体产生的过程。等离子体的一部分能量以辐射的形式耗散,在激光能量被周围电离气体吸收传播中,由于不同波长的波之间存在传播速度差,扰动波阵面在穿过材料时会产生冲击波。冲击波可以描述

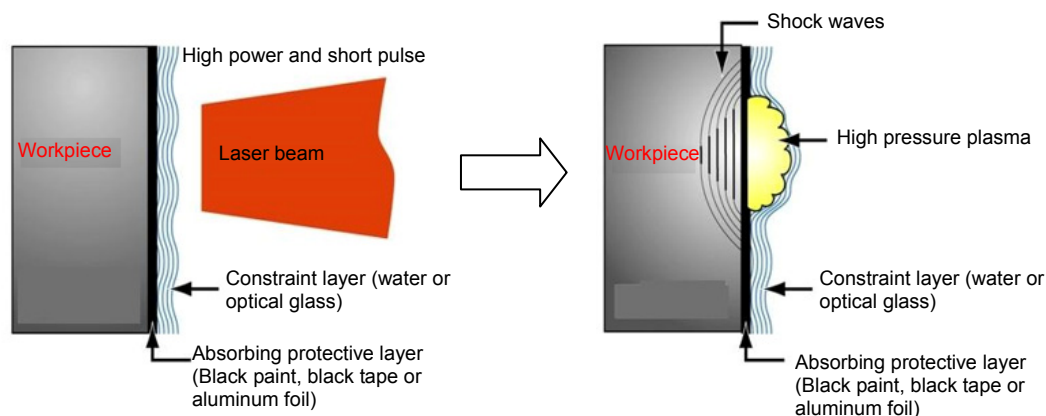


图 1 技术原理示意图^[6]。

Fig. 1 Technical principle diagram of laser shock processing^[6].

为使同一阵面介质的压力、温度和密度在很短时间内发生间断改变的不连续峰^[13]。等离子体是冲击波能量的载体，等离子体冲击波依靠吸收激光能量而自持传播，这是一种物理性质的爆轰波。

对爆轰波的研究最早是由 20 世纪初的 Chapman 和 Jouguet 开始的，他们提出了最初的可以代表爆轰过程的数学模型——C-J 模型^[14]。该模型认为爆轰过程是在爆轰平面上瞬时完成的。忽略热传导和其他效应，可以直接用一维模型处理爆轰过程中的化学反应，并用流体力学的基本理论来研究爆轰波。通过实验和模型计算相互验证，他们认为该模型有比较高的可靠性，能够大致反应爆轰过程中冲击波初始压力、初始速度等一些基本的参数。其公式如下：

$$P_1 - P_0 = \rho_0^2 D^2 (v_0 - v_1), \quad (1)$$

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_1 v_1 - P_0 v_0) - v_0 \sqrt{\frac{P_1 - P_0}{v_0 - v_1}} + \frac{\sqrt{(P_1 - P_0)(v_0 - v_1)}}{2} - \alpha I_0 \sqrt{\frac{v_0 - v_1}{P_1 - P_0}} = 0, \quad (2)$$

式中： P_0 、 P_1 为冲击波前和波后物质的压力； ρ_0 为冲击波前物质的密度； D 为冲击波前物质的运动速度； v_0 、 v_1 为冲击波前和波后的比容， $v=1/\rho$ ； γ 为等熵指数，理想气体的值约为 1.4； α 为吸收层材料在激光作用下形成的靶蒸气的激光吸收率，计算时假设是理想气体，约为 0.8； I_0 为激光功率密度。

上述公式是爆轰产物的 Rayleigh 和 Hugoniot 关系，借上述关系可以计算出爆轰产物的初始压力。但此压力并非材料表面受到的压力，爆轰波产生于吸收层，在激光能量结束之后，由于受到表面约束层的约束，其压力会继续增加。在激光冲击强化领域用于计算爆轰波峰值压力较多的模型是法国科学家 Fabbro 等人在 20 世纪 90 年代提出的等离子体膨胀模型^[15]。该模型是在实验基础上建立的一维爆轰波膨胀半经验模型，能够反应冲击过程中各参数之间的关系，包括激光能量、功率密度、脉宽与冲击波峰值压力的关系，金属材料、吸收层材料和约束层材料三者之间的声阻抗关系。

该模型认为在激光脉冲结束时将会产生最大冲击力，其表达式为

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I}, \quad (3)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}, \quad (4)$$

$$I_0 = \frac{4E}{\pi d^2 \tau}, \quad (5)$$

式中： P_{\max} 为最大冲击力，单位 GPa； α 为等离子体热能占内能的比例系数，通常情况 α 取值 0.2~0.5； Z 为金属材料 and 约束层材料的联合声阻抗，单位 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ， Z_1 和 Z_2 代表吸收层和约束层材料的声阻抗，可以通过常用材料声阻抗表来获取相关参数； E 为激光能量，单位为 J； d 为激光光斑直径，单位 mm； τ 为激光脉冲宽度，单位 s； I_0 为激光功率密度，单位 $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

该公式能较好地反应等离子体爆轰冲击波的峰值压力的变化规律。1982 年，Cottet 通过解析方法研究了冲击波产生—发展—减弱的过程^[16]。通过质量、能量和动量守恒方程计算出冲击波的发展过程方程，并通过压力时间关系图进行描述。公式如下：

$$D[(D-u) + \rho C^2 \frac{du}{dP}] \frac{dP}{dx} = [(D-u)^2 - C^2] \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{(n-1)C^2 \rho u (D-u)}{x}, \quad (6)$$

式中： D 为冲击波速度， C 为压力为 0 时材料内部的声速， u 、 ρ 和 P 分别为介质的速度、密度和压力。图 2 表示在 Cottet 的公式下简化的冲击波压力与时间变化关系，以及冲击波产生—发展—减弱的过程， P_m 表示冲击波的峰值压力， t_0 、 t_1 表示冲击波的形成时间， t_2 、 t_3 表示冲击波的发展时间， t_4 、 t_5 表示冲击波的减弱时间。

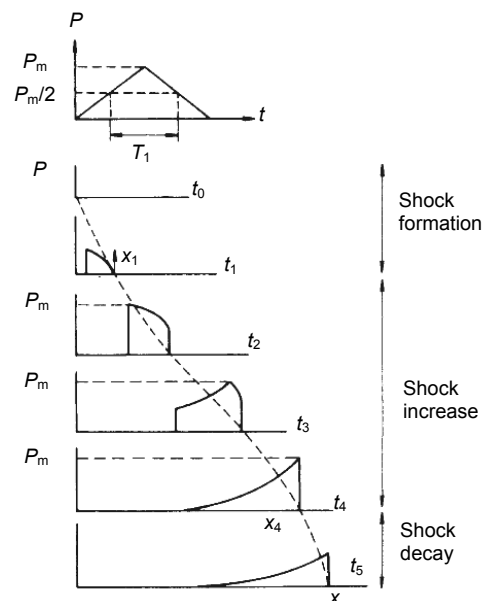


图 2 激光冲击波的形成增强及衰减^[16]。

Fig. 2 The formation and enhancement and attenuation of laser shock waves^[16].

高能激光诱发的等离子冲击波是激光冲击强化技术的前提。上述模型对激光冲击强化技术的研究有一定的推动,但随着该技术的发展应用仍存在局限性:上述模型只是一维模型,不能很好地反映爆轰波的空间特性,计算结果与实测值存在误差。目前针对等离子冲击波的研究,尤其是在冲击波的二维数学模型方面还有待继续完善。

3.2 冲击波在材料内部的传播和相互作用

研究激光诱导冲击波在材料内部中的传播与相互作用过程,可以揭示激光冲击强化技术的强化原理,研究材料晶体结构的变化过程以及残余应力的形成规律,进而优化冲击参数。冲击波对材料影响主要是由冲击波的特性决定的,在原理部分我们可知等离子体冲击波产生在一个高温高压的环境下,这样就使得冲击波的峰值压力远大于金属材料发生变形时的屈服极限,而且强化过程十分短暂(ns量级),材料在这样的压力作用下将会发生很复杂的组织变化。当冲击波压力大于金属材料弹性极限时,材料会发生动态响应,形成动态塑性变形。Johnson和Rohde在1971年提出Hugoniot许贡纽弹性极限(σ_{HEL})理论,并指出动态屈服强度与 σ_{HEL} 之间的关系,如下述公式所示:

$$\sigma_Y^{\text{dyn}} = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \sigma_{\text{HEL}}, \quad (7)$$

式中: σ_Y^{dyn} 为动态屈服强度, ν 为材料的泊松比。其整个塑性变形和残余应力的形成过程如图3所示,激光在金属材料表面诱导产生等离子冲击波,等离子冲击波经历形成—发展—减弱的过程,由Cottet公式可知该过程中冲击波压力随时间近似为三角形变化。冲击波开始向材料内部传播时,其压力小于材料的 σ_{HEL} ,材料仅会发生弹性变形;随着冲击波压力的增加,当压力大于 σ_{HEL} 时,材料此时处于弹-塑性变形阶段,表面会出现塑性变形;当冲击波压力超过 $2\sigma_{\text{HEL}}$

时,材料表面塑性变形加剧直至饱和,形成完全的塑性变形^[17]。随着冲击波向材料内部的传播,其压力逐渐减小,在材料内部沿深度方向上的压力会出现递减趋势,材料内部部分区域所受到的压力小于 σ_{HEL} ,这些位置只会发生弹性变形。当冲击波结束后,发生弹性变形的部分会发生弹性回复,材料表面的塑性变形部位会受到内部材料的反作用力,这些径向的拉应力和表面的压应力共同造就了材料沿深度方向的残余应力场^[18]。

4 激光冲击强化技术机理的形成和发展趋势

自20世纪爱因斯坦提出“激光”的概念以来,经过一世纪的发展,激光的研究与应用越来越受到重视。现代激光工业应用主要是利用了激光的热效应,常见的有切割、焊接、激光增材制造、激光抛光等,而作为激光表面改性最新技术的激光冲击强化技术,其加工过程中利用的却是激光的力学效应。

20世纪60年代,美国研究人员提出了激光冲击强化概念,但是直到70年代才开始正式研究该技术。在1972年,来自美国巴特爾学院(Battelle Memorial Institute)的Fairand等人^[19]尝试利用大功率短脉冲激光诱导产生的冲击波来改变7075铝合金的显微结构和组织。结果表明采用该技术可以提高7075铝合金的机械性能,其结果如图4所示。

这是激光冲击强化技术的第一次应用研究,主要是进行了技术可行性方面的探索,因此存在许多有待解决的技术问题。直到1977年,Clauer^[20]等人为该技术的发展奠定了基础,他们在冲击试验中开创性地在金属材料表面涂覆了一层黑色涂层材料,然后再覆盖透明约束层。结果表明采用这种模式可以使冲击波的压力提高到GPa级且显著提高冲击后的残余应力

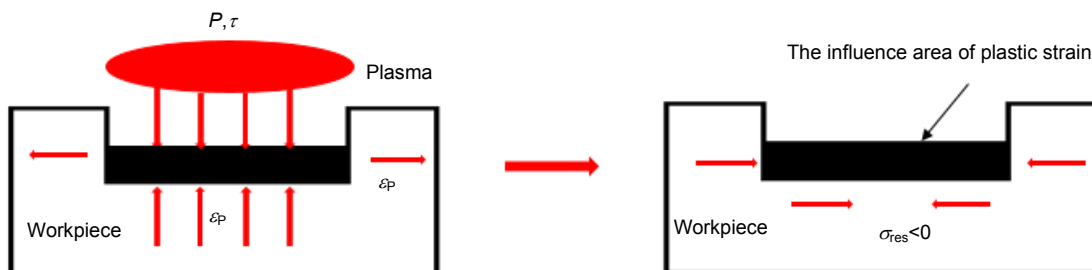


图3 残余压应力和塑性变形产生示意图^[17]。

Fig. 3 The formation diagram of residual compressive stress and plastic deformation^[17].

场,因此这种模式也成为了激光冲击强化的典型模式。Clauer 等人随后继续进行涂层对激光冲击强化技术效果的影响研究,最终得以确定目前常用的涂层材料。

水作为常用的约束层材料之一,其依据主要是来自 1997 年日本 Sano^[21] 等人关于等离子冲击波压力在不同介质中的差别的研究。研究通过对比在水和空气两种介质中等离子体的膨胀速度,发现在空气中等离子体膨胀速度过快(约为水中的 20 倍),过快的膨胀速度导致冲击波压力无法累积,因此难以形成有效的冲击载荷,如图 5 所示。同年,国内的李志勇等人^[22]研究了 K9 玻璃作为约束层材料时对冲击产生的效果。结果表明,K9 玻璃也可以达到提高冲击波峰压的作

用。原理与水相似,等离子体在这两种介质中的膨胀速度都可以保证冲击压力的有效累积,从而提高其峰值压力,而且水和光学玻璃都能保证良好的激光穿透性,保证激光能量的高效利用。

2002 年,江苏大学周建忠^[23]等人针对约束层不同参数对等离子体冲击波压力的影响进行了研究。水膜厚度在一定范围内时,水膜越厚,冲击波压力累积效果越好,峰值压力越大,但当厚度超过这个范围反而会减弱这种效果。他们认为这是由于水膜对激光存在散射,而且水膜太厚会吸收大量等离子体的能量。在对光学玻璃的研究上也存在这样的现象,这与 Clauer 等人的研究结果一致。

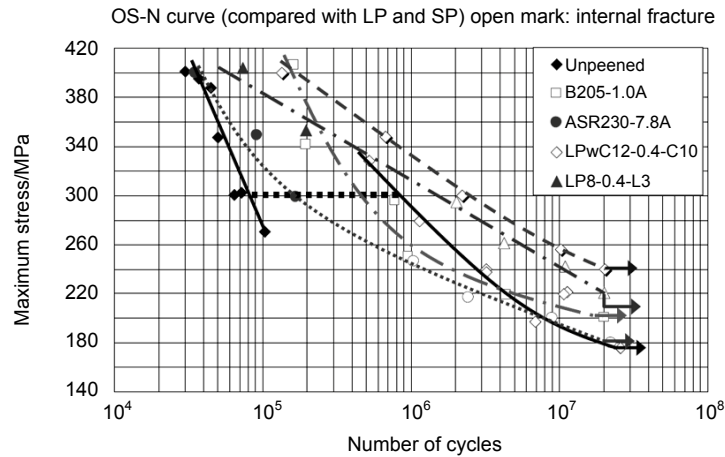


图 4 激光冲击强化对 7075 铝合金疲劳寿命的影响^[19].

Fig. 4 Effect on fatigue life of 7075 aluminum alloy by LSP^[19].

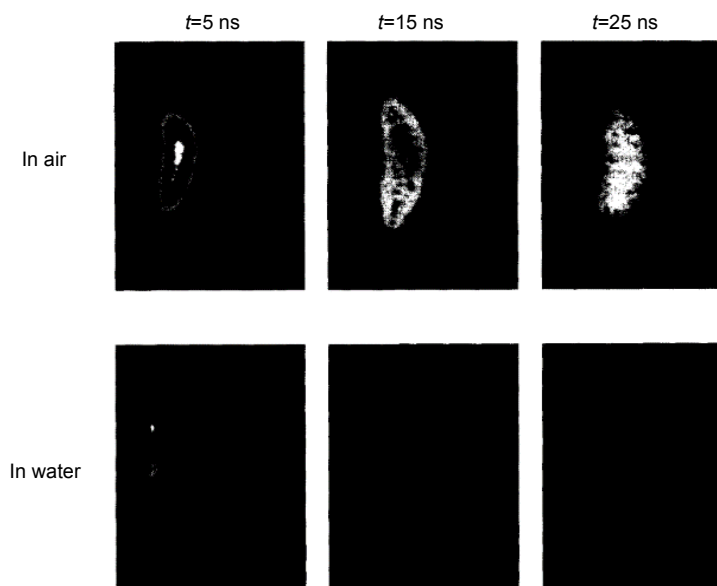


图 5 空气与水中等离子体膨胀过程^[21].

Fig. 5 The expansion process of plasma in air and water^[21].

上世纪 80 年代以后, 各国兴起了对激光冲击强化技术的研究, 对其技术完善和工业应用起到很大促进作用。其中, 法国学者^[24-26]偏向于研究激光冲击强化的机制, 进一步拓展了激光诱导冲击波理论; 日本研究人员则主要研究用激光冲击强化技术解决核电站关键部件的应力腐蚀问题^[27,28]。另外, 西班牙、印度、德国和澳大利亚等国家的研究人员也对强化数值模拟^[29]、材料的微观组织分析^[30,31]、冲击波测试^[32]等进行了研究, 部分结果如图 6、图 7 所示。

随着研究的深入进行, 近几年国外研究人员陆续提出了“热激光冲击强化”^[33]和“深冷激光冲击强化”^[34-36]的概念。这两种概念是指通过改变金属材料温度来研究强化效果的变化。目前的结果表明: 与常温激

光冲击强化技术相比, 高温和超低温环境下的强化效果有独特的优点和应用优势, 代表了激光冲击强化技术的最新研究方向。

我国激光冲击强化技术起步较晚, 比国际研究主流晚了二三十年, 初期国内研究者主要是跟随验证国外已有的结论, 目前该研究主要集中在各科研院所和大学, 主要包括江苏大学、中科院沈阳自动化所、中航工业北京航空制造工程研究所和空军工程大学等单位^[39-43]。虽然我国激光冲击强化研究的时间较短但成果显著, 2007 年, 空军工程大学、江苏大学联合国内几家先进的激光设备生产企业协同攻关, 攻克了激光冲击强化技术工业应用的技术设备难关, 生产了一系列高性能激光器(如图 8 所示), 在国内首次开展激光

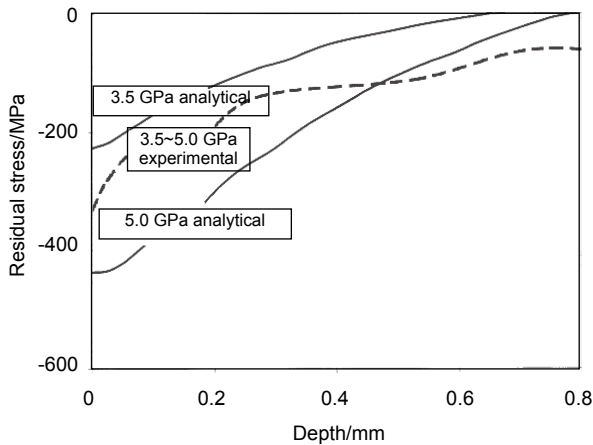


图 6 ABAQUS 模拟激光冲击强化 TC4 残余应力场^[37]。
Fig. 6 Simulation of the residual stress field produced in TC4 alloy by LSP with ABAQUS software^[37].

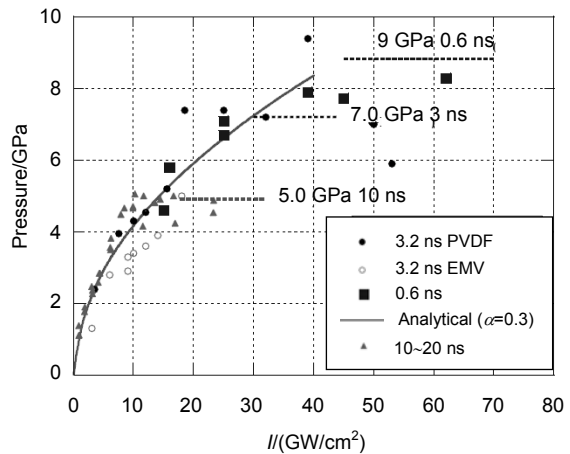


图 7 PVDF(压电薄膜法)和 EMV(电磁法)两种测试方法对不同脉宽的冲击压力测量结果^[38]。
Fig. 7 The measurement results of the impact pressure for different pulse widths tested by polyvinylidene fluoride (PVDF) and electromagnetic gauges (EMV)^[38].

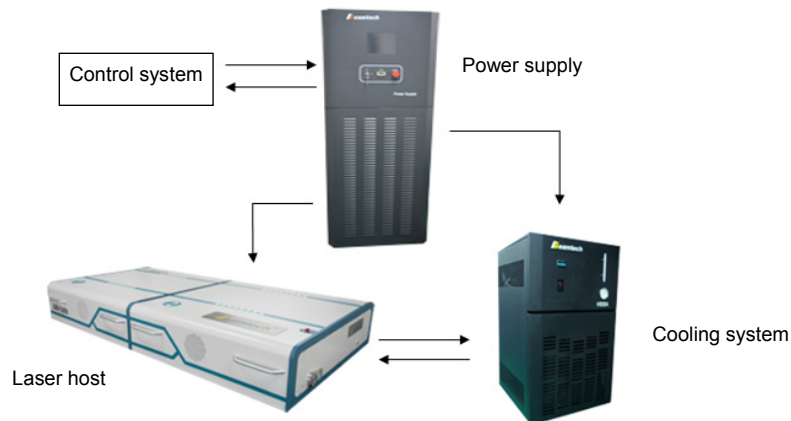


图 8 镭宝光电生产的高性能 SGR-Extra 脉冲纳秒 Nd:YAG 激光器^[44]。
Fig. 8 High performance SGR-extra pulse nanosecond Nd: YAG laser produced by beamtech^[44].

冲击强化技术的技术推广和产业应用,并在西安建立首条激光冲击强化的工业生产线上,至此激光冲击强化技术获得了巨大的飞跃,目前也只有中国和美国实现了该技术的工业规模化应用。

2009年,中国科学院沈阳自动化研究所开展了激光冲击强化技术和工业应用的研究,研制的我国首台叶盘激光冲击强化设备,推进了激光冲击强化技术的应用化,实现了简单结构件和叶片的激光冲击强化加工,并获得了中国科学院创新2020技术创新奖。

激光冲击强化技术作为一种新型高效的表面强化技术,有着广泛的应用前景和潜力。由于该技术目前主要用于提高航空发动机零部件疲劳寿命,其社会推广还存在一些障碍。相信在不久的将来,该技术将会带来更大的经济效益。

5 结束语

1) 激光冲击强化是激光加工技术的最新应用,是一种高效的表面改性技术。该技术能给材料表面带来较大的残余应力,且残余应力层厚度较传统技术更深,同时材料表层晶粒尺寸会大大减小甚至出现纳米晶,材料的疲劳寿命也会显著增加,相比于传统表面强化技术有巨大的优势,是一种高效无损的表面强化方法。

2) 综合阐述了激光冲击强化技术的技术原理,激光冲击强化过程中等离子体冲击波的形成以及冲击波与材料的相互作用,激光诱发的等离子体冲击波的数学模型仍需继续完善。

3) 介绍了激光冲击强化技术中典型模式的完善过程以及该技术的未来发展,指出了未来该技术的发展方向。

基金项目

国家自然科学基金(2015020115)资助项目;国家重点专项(U1608259)。

参考文献

- 刘其斌. 激光加工技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 1.
- Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, et al. Development and application of laser shock processing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12): 15-19.
李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(12): 15-19.
- Sealy M P, Guo Y B, Caslaru R C, et al. Fatigue performance of biodegradable magnesium-calcium alloy processed by laser shock peening for orthopedic implants[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, **82**: 428-436.

- Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin, et al. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(7): 1766-1773.
乔红超, 赵亦翔, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(7): 1766-1773.
- Caralapati V K, Narayanswamy S. Analyzing the effect of high repetition laser shock peening on dynamic corrosion rate of magnesium[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, **93**: 165-174.
- 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 7.
- 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.
- Zhou Liucheng, He Weifeng, Luo Sihai, et al. Laser shock peening induced surface nanocrystallization and martensite transformation in austenitic stainless steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, **655**: 66-70.
- Che Zhigang, Yang Jie, Gong Shuili, 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.
车志刚, 杨杰, 巩水利, 等. 激光冲击强化 TC4 钛合金表面自纳米化研究(英文)[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, **43**(5): 1056-1060.
- Zhu Ying, Fan Bowen, Guo Wei, et al. Influence of laser shock peening times on microstructure and hardness of TA15 titanium alloy [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, **40**(4): 444-448.
朱颖, 范博文, 郭伟, 等. 激光冲击次数对 TA15 微观组织和硬度的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, **40**(4): 444-448.
- Kashaev N, Ventzke V, Horstmann M, et al. Effects of laser shock peening on the microstructure and fatigue crack propagation behaviour of thin AA2024 specimens[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, **98**: 223-233.
- 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.
- 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 112.
- 泽尔道维奇 Я Б, 康巴涅耶茨 А С. 爆震原理[M]. 徐华舫译. 北京: 高等教育出版社, 1958.
- 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): 755-784.
- Cottet F, Romain J P. Formation and decay of laser-generated shock waves[J]. *Physics Review A*, 1982, **25**(1): 576-579.
- 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 133.
- Sun Rujian, Zhu Ying, Guo Wei, et al. Effect of laser shock processing on surface morphology and residual stress field of TC17 titanium alloy by FEM method[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, **24**(1): 187-193.
孙汝剑, 朱颖, 郭伟, 等. 激光冲击强化对 TC17 表面形貌及残余应力场影响的有限元数值模拟研究[J]. *塑性工程学报*, 2017, **24**(1): 187-193.
- 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): 3893-3896.
- Clauer A H, Fairand B P, Wilcox B A. Pulsed laser induced deformation in an Fe-3 Wt Pct Si alloy[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1977, **8**(1): 119-125.
- Sano Yuji, Mukai N, Okazaki K, et al. Residual stress improve-

- ment in metal surface by underwater laser irradiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1997, **121**(1-4): 432-436.
- 22 Li Zhiyong, Zhu Wenhui, Zhou Guangquan, *et al.* Experimental study of the effects of PMMA confinement on laser-induced shock waves[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **24**(2): 118-122.
李志勇, 朱文辉, 周光泉, 等. 实验研究有机玻璃约束层对激光冲击波的影响[J]. *中国激光*, 1997, **24**(2): 118-122.
- 23 Zhou Jianzhong, Zhou Ming, Xiao Aimin, *et al.* Study of the effects of overlay thickness and flexibility on laser shock processing[J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(1): 7-9, 6.
周建忠, 周明, 肖爱民, 等. 约束层的厚度和柔性对激光冲击强化效果的影响[J]. *应用激光*, 2002, **22**(1): 7-9, 6.
- 24 Grevey D, Maiffredy L, Vannes A B, *et al.* Transformation de phase par choc laser d'un acier T.R.I.P.[J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1990, **24**(4): 767-772.
- 25 Forget P, Strude J L, Jeandin M, *et al.* Laser shock surface treatment of Ni-based superalloys [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1990, **5**(4): 501-528.
- 26 Cellard C, Reira D, François M, *et al.* Laser shock peening of Ti-17 titanium alloy: influence of process parameters[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **532**: 362-372.
- 27 Sano Y, Obata M, Kubo T, *et al.* Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, **417**(1-2): 334-340.
- 28 Sano Y, Adachi Y, Akita K, *et al.* Enhancement of surface property by low-energy laser peening without protective coating[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, **345-346**: 1589-1592.
- 29 Ocaña J L, Morales M, Molpeceres C, *et al.* Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments[J]. *Applied Surface Science*, 2004, **238**(1-4): 242-248.
- 30 Bischoff A J, Arabi-Hashemi A, Ehrhardt M, *et al.* Shock wave induced martensitic transformations and morphology changes in Fe-Pd ferromagnetic shape memory alloy thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(15): 151901.
- 31 Shadangi Y, Chattopadhyay K, Rai S B, *et al.* Effect of LASER shock peening on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of interstitial free steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, **280**: 216-224.
- 32 Peyre P, Berthe L, Scherpereel X, *et al.* Experimental study of laser-driven shock waves in stainless steels[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, **84**(11): 5985-5992.
- 33 Ye Chang, Suslov S, Kim B J, *et al.* Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening[J]. *Acta Materialia*, 2011, **59**(3): 1014-1025.
- 34 Ye Chang, Suslov S, Lin Dong, *et al.* Deformation-induced martensite and nanotwins by cryogenic laser shock peening of AISI 304 stainless steel and the effects on mechanical properties[J]. *Philosophical Magazine*, 2012, **92**(11): 1369-1389.
- 35 Ye Chang, Suslov S, Lin Dong, *et al.* Microstructure and mechanical properties of copper subjected to cryogenic laser shock peening[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**(8): 083504.
- 36 Ye Chang, Liu Yang, Sang Xiahan, *et al.* Solid state amorphization of nanocrystalline nickel by cryogenic laser shock peening[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **118**(13): 134902.
- 37 Braisted W, Brockman R. Finite element simulation of laser shock peening[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, **21**(7): 719-724.
- 38 Peyre P, Berthe L, Fabbro R, *et al.* Experimental determination by PVDF and EMV techniques of shock amplitudes induced by 0.6-3 ns laser pulses in a confined regime with water[J]. *Journal of Physics*, 2000, **33**(5): 498-503.
- 39 Ge Maozhong, Xiang Jianyun. Effect of laser shock peening on microstructure and fatigue crack growth rate of AZ31B magnesium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, **680**: 544-552.
- 40 Lu J Z, Wu L J, Sun G F, *et al.* Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts[J]. *Acta Materialia*, 2017, **127**: 252-266.
- 41 Li Jing, Li Jun, He Weifeng, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(9): 2889-2895.
李靖, 李军, 何卫锋, 等. TC17 钛合金激光多次冲击强化后组织和力学性能研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(9): 2889-2895.
- 42 Meng Xiankai, Zhou Jianzhong, Su Chun, *et al.* Effect of temperature on surface mechanical property of 2024 aluminum alloy treated by laser peening[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(10): 1002003.
孟宪凯, 周建忠, 苏纯, 等. 温度对激光喷丸强化 2024 航空铝合金表面力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2016, **43**(10): 1002003.
- 43 Lu G X, Liu J D, Qiao H C, *et al.* Surface nano-hardness and microstructure of a single crystal nickel base superalloy after laser shock peening[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, **91**: 116-119.
- 44 Qiao Hongchao, Zhao Jibin, Lu Ying. Develop and analysis of nanosecond pulse width Nd: YAG laser for laser peening[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(8): 802001.
乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 纳秒脉宽 Nd: YAG 激光冲击强化激光器的研制及分析[J]. *中国激光*, 2013, **40**(8): 802001.