



DOI: 10.12086/oe.2018.170690

激光冲击强化技术的应用现状与发展

吴嘉俊^{1,2}, 赵吉宾^{1*}, 乔红超¹, 陆莹¹, 孙博宇¹, 胡太友^{1,2}, 张旖诺^{1,2}¹中国科学院沈阳自动化研究所装备制造技术研究室, 辽宁 沈阳 110016;²中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

摘要: 激光冲击强化是一种利用激光诱导等离子体冲击波来提高材料疲劳寿命的新型表面改性技术, 具有强化效果显著、可控性强、适应性好等优点, 对提高结构可靠性和部件疲劳强度、延长材料使用寿命具有重要作用。近年来, 该技术受到了广泛重视, 得到了快速发展。本文简要介绍了激光冲击强化技术的基本原理、特点与应用领域; 总结了国内外激光冲击强化技术的发展状况与研究成果; 并针对国内外激光冲击强化技术的现状, 提出了一些现在需要解决的强化工艺问题; 最后对激光冲击强化技术的应用前景进行了展望。

关键词: 激光冲击强化; 等离子体; 冲击波; 疲劳寿命; 表面改性

中图分类号: O439

文献标志码: A

引用格式: 吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 等. 激光冲击强化技术的应用现状与发展[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 170690

The application status and development of laser shock processing

Wu Jiajun^{1,2}, Zhao Jibin^{1*}, Qiao Hongchao¹, Lu Ying¹,Sun Boyu¹, Hu Taiyou^{1,2}, Zhang Yinuo^{1,2}

¹Manufacturing Technology Department, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China; ²School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Laser shock processing is a new type of surface modification technology that can improve the fatigue life of materials by using laser-induced plasma shock waves. It has the advantages of significant strengthening effect, strong controllability and good adaptability. Laser shock processing plays an important role in improving the structural reliability, the fatigue strength of parts and the service life of materials. In recent years, the technology has received widespread attention and developed rapidly. This paper briefly introduces the basic principle, characteristics and application fields of laser shock processing, and summarizes the development and research results of laser shock processing. In view of the current situation of laser shock processing at home and abroad, some problems of the technology that need to be solved now are put forward. Finally, the application prospect of laser shock processing is forecasted.

Keywords: laser shock processing; plasma; shock waves; fatigue life; surface strengthen

Citation: Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, *et al.* The application status and development of laser shock processing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170690

收稿日期: 2017-12-15; 收到修改稿日期: 2018-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51501219); 国家重点研发计划项目(2016YFB1102704); 国家基金委-辽宁省联合基金项目(U1608259); 辽宁省自然科学基金项目(2015020115)

作者简介: 吴嘉俊(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光冲击强化表面改性技术的研究。E-mail: wujiajun@sia.cn

通信作者: 赵吉宾(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事复杂曲面精密加工技术和激光快速成形与激光冲击强化技术的研究。E-mail: jbzhaos@sia.cn

1 引言

材料的主要失效形式有：磨损、腐蚀、疲劳等，一些调查数据显示^[1]：因磨损、腐蚀、疲劳等源于材料表面的失效形式占了 80%以上，可见材料表面的结构和性能对材料综合性能有着至关重要的影响。在载荷的作用下，构件的疲劳断裂往往源于材料表面产生的裂纹，裂纹的进一步扩展可能导致材料的整体破坏，甚至导致设备故障^[2]。为提高零部件的可靠性，延长材料的使用寿命，在不改变基体材料性能的前提下，表面强化技术与方法得到了广泛应用，取得了良好的经济效益^[3]。表面强化是表面抗疲劳制造的一种，常用的有喷丸、表面滚压、锻打和挤压等，喷丸强化利用高速弹丸强烈撞击零部件表面，使其产生形变硬化层并引起残余压应力，残余压应力可以抵消一部分工作载荷(拉应力)，从而提高零件的抗疲劳强度；表面滚压则是通过一定形式的滚压工具向材料表面施加一定数值压力，使其表面发生局部微小的塑性变形，达到改善表面粗糙度和均匀应力场分布的效果；锻打和挤压也是在材料表面引入一定数值的压力，使物件具有较好的力学性能和使用寿命。随着航空航天、武器、核能、交通等高端设备的发展，对其零件表面性能要求也越来越高，传统的喷丸、表面滚压等强化技术渐渐难以满足高性能设备的生产要求，而激光冲击强化技术很好地解决了这些问题。与传统的表面强化技术相比，激光冲击强化获得更深残余应力层、产生加工硬化、细化晶粒的优势，能够显著提高材料的疲劳寿命^[4]，在各个领域有着广泛应用，获得了越来越多的青睐^[5]。

2 激光冲击强化技术概述

激光冲击强化(Laser shock processing/peening, LSP)又名激光喷丸，是一种新型表面强化技术，具有显著的技术优势，能够带来与众不同的技术解决方案，在工业界越来越受重视。

2.1 激光冲击强化的基本原理

激光冲击强化的基本原理如图 1 所示。

该技术的基本原理为：短脉冲(几十纳秒)、高功率密度($> 10^9 \text{ W/cm}^2$)的激光透过透明约束层(一般采用材料有：流水、有机玻璃等)后作用在工件表面，涂覆在工件表面的吸收涂层(一般采用材料有铝箔、黑胶带、黑漆等)吸收激光能量并发生爆炸性气化，形成等离子团进一步吸收激光能量，产生温度 $t > 10^7 \text{ }^\circ\text{C}$ 、

压强 $P > 1 \text{ GPa}$ 的等离子体；该等离子体在约束层的限制作用下，形成 GPa 级瞬时高压等离子体冲击波，并向工件材料内部传播；在冲击波的力学效应作用下，由于冲击波峰值应力极高，远超材料的屈服极限，材料表层发生塑性变形，引起晶格畸变、位错、位错交织、位错墙、晶粒细化等微观织构变化，产生了平行于材料表面的拉应力；根据力学效应的反作用原理可知，在等离子体冲击波作用结束后，材料表面将形成一定深度的残余压应力层(残余应力场形成原理见图 2)，从而实现对零件的表面强化或精密成型加工，大幅提高金属材料的耐磨损、抗应力腐蚀和抗疲劳等性能^[6-11]。

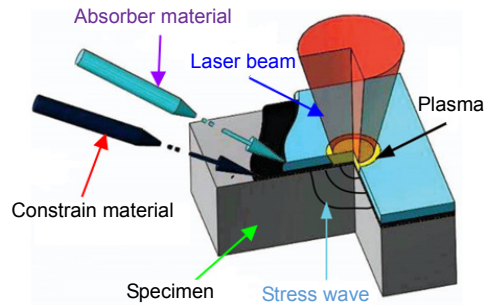


图 1 激光冲击强化原理示意图^[5]
Fig. 1 The schematics of laser shock processing^[5]

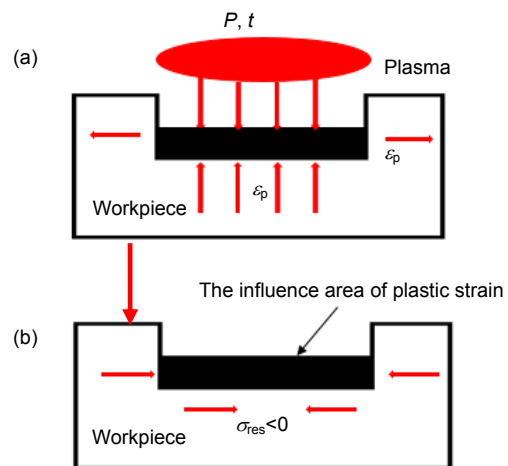


图 2 残余应力场形成原理^[12]
Fig. 2 The formation mechanism of residual stress field^[12]

2.2 激光冲击强化技术的特点与应用领域

激光冲击强化不同于传统表面强化技术，其典型的约束层与吸收保护层原理结构可以显著增加冲击波压力，进而对材料进行强化^[6]。这种强化方式具有高压(GPa 级)、高能(GW 量级)和超高应变率($> 10^6 \text{ s}^{-1}$)的特点^[13-16]。与传统的激光切割、激光淬火、激光焊接

等利用激光热效应的激光加工技术不同,激光冲击强化则是一种利用激光冲击波力学效应的表面改性技术,在加工过程对工件几乎没有热效应^[17]。

因激光冲击强化技术具有上述优势,近年来发展迅速,目前主要应用于航空航天与国防军工领域。随着该技术的不断成熟,激光冲击强化技术在船舶制造业、核工业、石油化工行业、生物医药、轨道交通、电网电力等领域展示出了无可比拟的技术优势,拥有着巨大的应用前景和商业价值。

3 激光冲击强化技术的国内外研究进展

20世纪60年代,美国科学家发现了激光诱导冲击波现象^[18]。与此同时,我国的钱临照先生也发现了此现象,提出冲击波有可能对材料作用后使材料位错密度增加的概念^[6]。由于受当时实验条件和应用背景的影响,激光冲击强化技术在20世纪70年代才开始得到实际研究,而受到广泛重视和快速发展则是上世纪末的事情。五十多年来,该技术取得了巨大进步,技术也日益成熟,带动了一大批产业的发展^[19]。

3.1 国外激光冲击强化技术的研究状况

1972年,美国巴特爾学院(Battelle Memorial Institute, BMI)的Fairand等人通过短脉冲、高功率密度激光诱导的冲击波来改变7075铝合金的显微结构组织,发现经激光冲击强化试验后,合金的疲劳寿命与抗应力腐蚀能力得到一定幅度的提高^[19-21]。这是激光冲击强化实验研究的首次尝试,其采取的强化方式属于无约束层模式,主要用来验证激光冲击强化技术的可行性。1977年,BMI的Calaur等人通过在样品表面使用不同的约束层和涂层材料组合来改变应力波的大小和持续时间,发现在有约束层的模式下,冲击波压力可以达到GPa级且材料疲劳寿命显著提高^[23]。这种由透明约束层与吸收涂层的组合方式也成为了激光冲击强化的典型模式。当时由于缺少性能可靠、短脉冲高功率密度的激光器,激光冲击强化技术未能得到实际应用。1984年,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore national laboratory, LLNL)成功研制出世界上第一台具有板条结构的钕玻璃激光器,促进了激光冲击强化技术的发展。

20世纪90年代,美国推出针对航空航天发动机高周疲劳断裂的“高周疲劳科学与技术”(high cycle fatigue science and technology program)计划,该计划旨

在提高材料的高周疲劳设计水平,提高飞机的安全性,该计划的横空出世将激光冲击强化技术由实验室推向了工业应用^[24-29]。在该计划提出后的几年内,美国成功将激光冲击强化技术用于增强Ti-6-4^[30]、Al2024-762^[31]、IN718^[32]和Al7075-77351^[33]等发动机合金材料的疲劳寿命。由于激光冲击强化的效率不高,处理时间较长,无法快速去除喷射涂层。1997年,涂层快速处理系统在美国应运而生,该系统能够快速地在工件上涂覆吸收涂层和去除涂层^[34]。且首先应用在军用燃气涡轮发动机叶片的激光冲击强化处理,强化效果相当不错。同年,日本科学家Sano^[35]在水浸材料的激光冲击强化实验过程中发现:等离子体在空气中的膨胀速度约为声速的20倍,而在水中的膨胀速度仅与声速相当,这为水作为常用约束层提供了数据依据。

21世纪以来,激光冲击强化技术取得了更为惊人的进步,其应用领域也不断扩大,如:汽车关键零部件、水轮机叶片、大型汽轮机、石油管道、纳米仿生等领域。2003年,激光冲击强化技术被用于波音飞机的叶片处理,标志着激光冲击强化技术开始应用于军民两用飞机领域^[36]。2007年,日本开发了微激光冲击强化(micro-laser shock peening, MLSP)技术,成功用于核电站压力容器的强化处理,极大提高了压力容器焊缝的抗腐蚀性能。该技术的成功应用,还促进了水下作业激光器与光纤传输技术的发展。随着激光冲击强化工业化应用水平的不断提高,一系列技术瓶颈有待突破,除设备价格和运行成本因素外,人们希望开发可现场操作的便捷设备,在设备出现故障的时候以最快速度解决问题,节约时间与成本。2012年,美国MIC公司取得重大突破,成功研制出可移动式激光冲击强化设备^[37],如图3所示;该设备的诞生,解决了激光冲击强化现场作业难题。为了获得更好的激光冲击强化效果,2010年,美国在原有激光冲击强化技术的基础上,结合热力耦合效应在材料表面强化方面的优势,提出温度辅助的激光冲击强化(temperature-assisted microscale laser shock peening)技术,即激光温喷丸(warm laser peening, WLP)技术^[38-42],其工艺原理见图4。由于目前激光温喷丸技术应用的理论和背景相对不多,需要科研工作者不断完善与研究。2017年,美国的Kalentic等用激光冲击强化技术对选择性激光熔化(selective laser melting, SLM)部件进行相关实验,提出将SLM和LSP这两个过程结合起来的“3D LSP”方法^[43],将激光冲击强化技术推向一个新高度。

3.2 我国激光冲击强化技术的研究状况

我国在上世纪 90 年代开始进行激光冲击强化技术的研究,二十余年来取得了举世瞩目的成就。

1992 年,南京航空学院(现南京航空航天大学)利用我国自主研发的钜玻璃激光器对 7475-T761 铝合金与 30CrMnSiNi2A 高强度合金钢进行激光冲击强化处理^[44],该实验结果表明经激光冲击强化处理后,合金疲劳寿命约提高了 80%,这是国内在激光冲击强化领域的首次研究。1996 年,中国科学技术大学的吴鸿兴教授团队成功开发了我国首台激光冲击强化装置,建立了激光冲击强化效果定性判断的直观检测方法,推动激光冲击强化技术走向工程应用具有重要意义^[45]。与此同时,江苏大学在激光冲击强化方面也做了大量研究,为激光冲击强化技术的发展做出了突出贡献。然而受当时激光器性能的限制,再加上没有明确的应用背景,我国激光冲击强化技术仍未推向工业应用。

随着研究的不断深入与激光器技术的进步,激光冲击强化技术得到了快速发展,我国逐渐具备激光冲击强化技术实际工程应用的能力。2008 年,我国第一条激光冲击强化工程生产线在西安阎良高新区诞生,标志着我国成为第二个掌握该技术工程实际应用的国家^[46]。2011 年,中国科学院沈阳自动化研究所装备制造技术研究室成功开发了整体叶盘激光冲击强化系统

(如图 5 所示),该系统是我国第一台工业应用激光冲击强化设备,填补了我国在该领域的空白^[36,47]。2013 年,沈阳自动化研究所和鞍山钢铁厂合作,用激光冲击强化技术对含有微小裂纹的锻压模具进行强化处理,有效控制模具裂纹扩展速率,节约了模具生产成本,缩短停机修复时间^[47]。2016 年,中国科学院宁波材料技术与工程研究所在新—代激光冲击强化研究方面获得突破(工艺原理见图 6),标志着第三代激光冲击强化技术的成熟,可广泛应用于复杂金属部件(如:齿轮、机电腔体、刀具、微细结构等)的处理,目前该技术正通过宁波大艾激光科技公司进行产业化^[48]。

4 存在问题与应用前景

在近五十年的研究历程中,激光冲击强化技术得到了快速发展,取得了丰厚的科研成果,在众多领域都有着广泛应用,具有巨大的潜在市场和广阔的发展前景;当然,也存在着一些问题需要有待解决。

4.1 存在的问题

激光器作为激光冲击强化技术的关键设备之一,对激光冲击强化技术发展起到决定性作用。目前国际上只有美国拥有成熟的激光器,对我国属于封锁的敏感设备;国内设备相对落后,需要研制出大能量、短



图 3 可移动式激光冲击强化设备^[37]

Fig. 3 Removable laser shock peening equipment^[37]

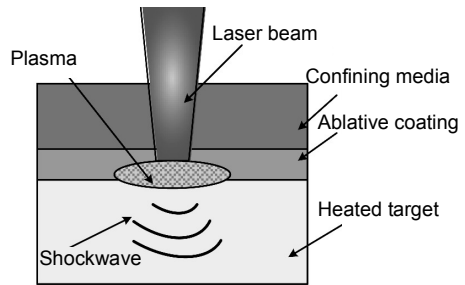


图 4 激光温喷丸原理图^[39]

Fig. 4 Schematic of warm laser peening^[39]



图 5 整体叶盘激光冲击强化设备^[47]

Fig. 5 Overall leaf disk laser shock peening device^[47]

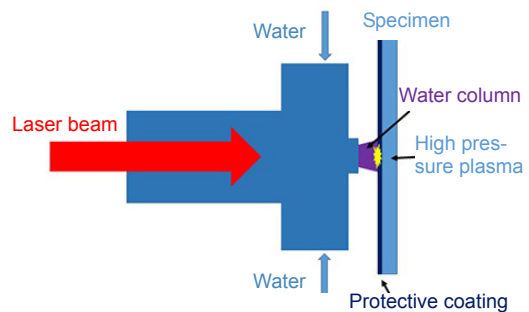


图 6 新一代激光冲击强化原理图^[48]

Fig. 6 A new generation of laser shock peening schematics^[48]

脉冲、高频率的高性能激光器以满足激光冲击强化技术工业应用的要求。激光冲击强化在某种程度上可以说属于“贵族加工技术”，光一套冲击强化设备就高达几百万美元，昂贵的价格让中小企业难以接受，在一定程度上限制了该技术的大规模推广。目前，冲击强化效率普遍较低，吸收涂层大多数采用黑胶带、黑漆、铝箔等形式，加工过程比较耗时，涂层自动处理系统的开发将会是提高生产效率的有效手段之一。现有的冲击强化方法前后预处理工艺繁琐、光学系统复杂以及存在辅助装置过多的缺点，操作起来不方便，有必要对现用方法进行优化与革新。激光冲击强化在线监测技术有待完善，目前国内依然没有能够实现实时监测的在线监测系统和控制方法。

4.2 应用前景

激光冲击强化技术作为一种利用激光诱导等离子体冲击波的力学效应对材料表面进行改性的新型技术，与传统激光加工技术相比，其几乎不对材料产生热效应；与传统表面改性技术相比，其能在材料表面引入更深的残余压应力层、提高材料抗疲劳性能，具有强化效果更加、适用性好、可控性强等技术优势。

目前，激光冲击强化在航空航天和军工领域应用比较普遍。随着社会需求的增加，激光冲击强化的应用也会进一步的扩大。在汽车制造工业、核工业、船舶制造业、石油化工行业、生物医药、微系统等领域具有巨大的潜在应用市场。相信在不久的将来，经激光冲击强化的产品会进入寻常百姓家。

5 结束语

激光冲击强化是一种利用激光诱导等离子体冲击波来提高材料疲劳寿命的新型表面改性技术，有着广阔的应用前景和发展潜力。在不改变基体材料的前提下，其可获得比传统表面强化技术数值更大、影响层更深的残余压应力层，能够有效改善材料的耐磨损、耐腐蚀和抗疲劳性能。该技术的出现，在高端装备的制造和特殊零部件处理过程中扮演着越来越关键的角色，具有不可替代的作用。随着社会需求的日益增长、高性能激光器技术的不断成熟，激光冲击强化工艺研究不断深入，该技术一定会在各个领域得到普遍应用。

参考文献

- [1] Alexander W O, Davies G J, Reynolds K A, et al. *Essential Metallurgy for Engineers*[M]. United Kingdom: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- [2] Manson S S. *Metal Fatigue Damage*[M]. Lu S, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 1976.
曼森 S S. 金属疲劳损伤: 机理、探测、预防和维修[M]. 陆索, 译. 北京: 国防工业出版社, 1976.
- [3] Xu B S, Ma S N, Liu S C, et al. *Nano Surface Engineering*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
徐滨士, 马世宁, 刘世参, 等. 纳米表面工程[M]. 北京: 中国化工出版社, 2000.
- [4] Li S X, Qiao H C, Zhao J B, et al. Research and development of laser shock processing technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 569–576.
李松夏, 乔红超, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化技术原理及研究发展[J]. 光电工程, 2017, **44**(6): 569–576.
- [5] Singh G, Grandhi R V, Stargel D S. Modeling and parameter design of a laser shock peening process[J]. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 2011, **12**(5): 233–253.
- [6] Li Y H. *Theory and Technology of Laser Shock Processing*[M]. Beijing: Science Press, 2013.
李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] Li W, Li Y H, He W F, 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.
- [8] Lu J, Ni X W, He A Z. *Laser and Material Interaction Physics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1996.
陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [9] Nalla R K, Altenberger I, Noster U, et al. On the influence of mechanical surface treatments—deep rolling and laser shock peening—on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, **355**(1–2): 216–230.
- [10] Pirri A N. Analytic solutions for laser-supported combustion wave ignition above surfaces[J]. *AIAA Journal*, 1977, **15**(1): 83–91.
- [11] Zou S K. The latest development of laser shock processing[J]. *New Technology & New Process*, 2005(44): 44–46.
邹世坤. 激光冲击处理技术的最新发展[J]. 新技术新工艺, 2005(4): 44–46.
- [12] Fabbro R, Peyre P, Berthe L, et al. Physics and applications of laser-shock processing[J]. *Journal of Laser Applications*, 1998, **10**(6): 265–279.
- [13] Bi F Q, Zhang C C, Li H C, et al. Development and application of laser shock processing[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2010, **33**(1): 101–104.
毕凤琴, 张春成, 李红翠, 等. 激光冲击强化技术的发展及应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, **33**(1): 101–104.
- [14] Xiao A M, Yang J C, Zhang Y K. Physical processes of Laser Shock processing and examples of application[J]. *Electromachining & Mould*, 2000(6): 7–10.
肖爱民, 杨继昌, 张永康. 激光冲击强化原理及应用概述[J]. 电加工与模具, 2000(6): 7–10.
- [15] Zhang H, Deng Q L, Tang Y X, et al. Laser shock processing and its progress[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1997(1): 19–21.
张宏, 邓琦林, 唐亚新, 等. 激光冲击强化技术及其进展[J]. 航空工艺技术, 1997(1): 19–21.
- [16] Ding Y X, Zhou L Z. Status and development of laser surface treating[J]. *Metal Hotworking Technology*, 2007, **36**(6): 69–72.
丁阳喜, 周立志. 激光表面处理技术的现状及发展[J]. 热加工工艺, 2007, **36**(6): 69–72.

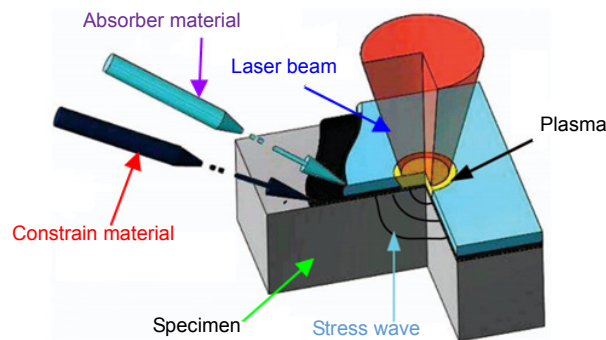
- [17] Montross C S, Wei T, Ye L, *et al.* Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021–1036.
- [18] Askar'yan G A, Moroz E M. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam[J]. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1963, **16**: 1638–1639.
- [19] Hu T Y, Qiao H C, Zhao J B, *et al.* Development of laser shock peening equipment[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(7): 732–737.
胡太友, 乔红超, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化设备的开发[J]. *光电工程*, 2017, **44**(7): 732–737.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Gao Y K, Jiang C Y. Review and prospect on laser shock peening[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(4): 16–20.
高玉魁, 蒋聪盈. 激光冲击强化研究现状与展望[J]. *航空制造技术*, 2016(4): 16–20.
- [23] 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.
- [24] Universal Technology Corporation. High Cycle Fatigue (HCF) science and technology program 1997 annual report[R]. 1998.
- [25] Universal Technology Corporation. High cycle fatigue science and technology program 1999 annual report[R]. Dayton, Oh: Universal Technology Corporation: Universal Technology Corporation, 2000.
- [26] Universal Technology Corporation. High Cycle Fatigue (HCF) science and technology program 2000 annual report[R]. Dayton, Oh: Universal Technology Corporation, 2000.
- [27] Universal Technology Corporation. High Cycle Fatigue (HCF) science and technology program, 2001 annual report[R]. Dayton, Oh: Universal Technology Corporation, 2002.
- [28] Universal Technology Corporation. High Cycle Fatigue (HCF) Science and Technology Program 2002 Annual Report[R]. Dayton, Oh: Universal Technology Corporation, 2003.
- [29] Bartsch T M. High Cycle Fatigue (HCF) science and technology program[M]//*Nuclear Data in Science and Technology*, International Atomic Energy Agency, 2002: 607–614.
- [30] Peyre P, Fabbro R, Berthe L, *et al.* Laser shock processing of materials, physical processes involved and examples of applications[J]. *Journal of Laser Applications*, 1996, **8**(3): 135–141.
- [31] Zhang H, Yu C Y. Laser shock processing of 2024-T62 aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, **257**(2): 322–327.
- [32] Ruschau J J, John R, Thompson S R, *et al.* Fatigue crack growth rate characteristics of laser shock peened Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1999, **121**(3): 321–329.
- [33] Prevéy P S. The effect of cold work on the thermal stability of residual compression in surface enhanced IN718[C]// *Proceedings of the 20th ASM Materials Solutions Conference & Exposition*, 2000.
- [34] See D W, Dulaney J L, Clauer A H, *et al.* The air force manufacturing technology laser peening initiative[J]. *Surface Engineering*, 2002, **18**(1): 32–36.
- [35] Sano Y, Mukai N, Okazaki K, *et al.* Residual stress improvement 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.
- [36] Qiao H C, Zhao J B, Lu Y. Current status of laser-induced shock wave application technology[J]. *Surface Technology*, 2006, **45**(1): 1–6, 48.
乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 激光诱导冲击波应用技术研究现状[J]. *表面技术*, 2006, **45**(1): 1–6, 48.
- [37] Hashmi S, Batalha G F, Van Tyne C J, *et al.* *Comprehensive Materials Processing*[M]. Oxford: Elsevier, 2014.
- [38] Su C, Zhou J Z, Meng X K, *et al.* Research progress of temperature-assisted laser shock technology[J]. *Surface Technology*, 2006, **45**(10): 121–128.
苏纯, 周建忠, 孟宪凯, 等. 温度辅助的激光冲击技术研究进展[J]. *表面技术*, 2006, **45**(10): 121–128.
- [39] Liao Y L, Ye C, Kim B J, *et al.* Nucleation of highly dense nanoscale precipitates based on warm laser shock peening[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(6): 063518.
- [40] Ye C, Liao Y L, Cheng G J. Warm laser shock peening driven nanostructures and their effects on fatigue performance in aluminum alloy 6160[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, **12**(4): 291–297.
- [41] Lin D, Suslov S, Ye C, *et al.* Laser assisted embedding of nanoparticles into metallic materials[J]. *Applied Surface Science*, 2012, **258**(7): 2289–2296.
- [42] Liao Y L, Suslov S, Ye C, *et al.* The mechanisms of thermal engineered laser shock peening for enhanced fatigue performance[J]. *Acta Materialia*, 2012, **60**(13–14): 4997–5009.
- [43] Kalentics N, Boillat E, Peyre P, *et al.* Tailoring residual stress profile of Selective Laser Melted parts by Laser Shock Peening[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, **16**: 90–97.
- [44] Liu Z D, Yang Y S, Yu C Y. Using laser shock processing to improve metal fatigue property[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1992(5): 8–12.
刘志东, 杨怡生, 余承业. 激光冲击强化改善金属疲劳特性的研究[J]. *航空工艺技术*, 1992(5): 8–12.
- [45] Gao J M. Chinese first laser shock peening equipment is published[J]. *High Technology Letters*, 1996(6): 32.
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.
- [46] Anonymous. Chinese first laser shock peening production line is established[J]. *Dual Use Technology & Products*, 2009(1): 29.
佚名. 我国第一条激光冲击强化生产线建成[J]. *军民两用技术与产品*, 2009(1): 29.
- [47] Qiao H C, Gao Y, Zhao J B, *et al.* Research process of laser peening technology[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, **25**(7): 1744–1755.
乔红超, 高宇, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化技术的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2015, **25**(7): 1744–1755.
- [48] Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, CAS. A new generation of laser shock peening technology get a breakthrough[J]. *Surface Engineering & Remanufacturing*, 2017, **17**(1): 53.
中科院宁波材料技术与工程研究所. 新一代激光冲击强化技术研究获得突破[J]. *表面工程与再制造*, 2017, **17**(1): 53.

The application status and development of laser shock processing

Wu Jiajun^{1,2}, Zhao Jibin^{1*}, Qiao Hongchao¹, Lu Ying¹,
Sun Boyu¹, Hu Taiyou^{1,2}, Zhang Yinuo^{1,2}

¹Manufacturing Technology Department, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

²School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



The schematics of laser shock processing

Overview: The fatigue properties of metal components are related to their surface integrity closely. In general, the components' fatigue fracture, especially the high-cycle fatigue fracture is often due to the surface cracks, and the gradual expansion of the crack may leads to the overall destruction. In order to improve the structural reliability and extend the fatigue life without changing the properties of the matrix material, the surface strengthening technology has got more and more research and application internationally. Common surface strengthening techniques include shot peening, surface rolling, forging and extrusion, etc. Shot peening is a surface technology that uses the high-speed projectile to hit the material surface, which can produce Strain hardening layer and cause residual compressive stress in the surface. The compressive stress can cancel part of the working load (tensile stress), thereby enhancing the fatigue strength of the parts. Surface rolling can apply a certain amount of pressure to the surface of material by the rolling tools, and the local slight plastic deformation would occur in the surface of material, and improve the surface roughness and uniform the stress field distribution. Certainly, the technology of forging and the extrusion can introduce a certain amount of pressure in the surface of materials, and it can improve the mechanical properties and service life of materials too. With the development of high-end equipment such as aerospace, weapons, nuclear energy and transportation, the surface requirements of parts are becoming higher and higher. The traditional strengthening technique such as shot peening and surface rolling will difficult to meet the production requirements of high-performance equipment gradually. But the laser shock processing can solve these problems well. Laser shock processing is a new surface strengthening technology that can improve the fatigue life of materials by using laser-induced plasma shock waves. It has the advantages of significant strengthening effect, strong controllability and good adaptability. Laser shock processing plays an important role in improving the structural reliability, the fatigue strength of parts and the service life of materials. In recent years, laser shock processing has received widespread attention and developed rapidly. This paper briefly introduces the basic principle, characteristics and application fields of laser shock processing, and summarizes the development and research results of laser shock processing. In view of the current situation of laser shock processing at home and abroad, some problems of the technology that need to be solved now are put forward. Finally, the application prospect of laser shock processing is forecasted.

Citation: Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, *et al.* The application status and development of laser shock processing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(2): 170690

Supported by National Natural Science Foundation of China (51501219), National Key Development Program (2016YFB1102704), NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1608259) and National Natural Science Foundation of Liaoning Province (2015020115)

* E-mail: jbzhaosia.cn