

# 航空发动机部件激光冲击强化研究进展与展望\*

聂祥樊<sup>1,2</sup> 李应红<sup>1</sup> 何卫锋<sup>1</sup> 罗思海<sup>1</sup> 周留成<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学航空等离子体动力学国家级重点实验室 西安 710038;

2. 华东理工大学机械与动力工程学院 上海 200237)

**摘要:** 航空发动机部件服役环境恶劣、工作载荷复杂, 容易发生高周疲劳断裂, 严重影响发动机安全可靠。激光冲击强化是一种新兴的表面塑性强化技术, 可通过残余压应力预制和微观组织改善显著提升金属材料高周疲劳性能, 已在航空发动机部件生产和修理中实现了批量化应用。本文将深入讨论风扇/压气机叶片、涡轮叶片、涡轮盘、机匣、作动筒、导管、齿轮等部件激光冲击强化研究进展和应用情况及有待解决的问题, 分析总结近年来航空发动机部件激光冲击强化研究历程及特点, 并就未来设备、工艺、机理和应用等方面工作进行展望, 希望通过全行业、全技术链的力量创新协同, 推动激光冲击强化技术在我国航空发动机部件上的规模化工业应用。

**关键词:** 激光冲击强化; 航空发动机; 抗疲劳; 研究进展; 研究展望

**中图分类号:** TG665

## Research Progress and Prospect of Laser Shock Peening Technology in Aero-engine Components

NIE Xiangfan<sup>1,2</sup> LI Yinghong<sup>1</sup> HE Weifeng<sup>1</sup> LUO Sihai<sup>1</sup> ZHOU Liucheng<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038;

2. School of Mechanical and Power Engineering,

East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

**Abstract:** Because of hostile service environment and complicated working loads, aero-engine components are apt to high-cycle fatigue fracture, which seriously affects security and reliability of aero-engine. Laser shock peening, LSP, is a novel surface plastic-strengthening technology. High-cycle fatigue performance can be improved effectively under the action of compressive residual stress and microstructural modification. LSP has been widely applied in the batch production and maintenance of aero-engine components. Research status, application situation and problems to be resolved of laser shock peening on fan/compressor blade, turbine blade, turbine disk, cartridge receiver, hydraulic actuator, pipe, gear and so on were discussed deeply. The development tendency of laser shock peening research on aero-engine components in recent years was analyzed and concluded. The future work on equipment, technique, mechanism and application of laser shock peening on aero-engine components was taken an outlook. In future, hope that the large-scale industrial application of laser shock peening on aero-engine components could be realized under the synergistic action of the whole industry and the whole technology chain.

**Key words:** laser shock peening; aero-engine; anti-fatigue; research progress; research outlook

## 0 前言

航空发动机作为飞机的动力系统, 又称为“飞

机心脏”, 是一种高度复杂、精密的热力机械, 被视为“现代工业皇冠上的明珠”。航空发动机服役工况具有高转速、高温、振动、长寿命等特点, 部件在旋转离心力、热应力、气流激振力和整机振动等载荷作用下容易发生高周疲劳断裂。高周疲劳断裂占到发动机部件失效/故障的 40%以上, 甚至引起了多起飞行事故, 是一个世界性航空技术难题。

\* 国家自然科学基金委重大研究计划培育(92060109)、国防科工局基础科研计划重点(JCKY2019802B001)和全国博士后创新人才支持计划(BX201700077)资助项目。

航空发动机金属部件在交变载荷作用下, 表面材料发生循环滑移、塑性积累而形成疲劳裂纹, 即疲劳裂纹一般萌生于材料表面, 向内部扩展而导致整个部件断裂。航空发动机一旦设计定型后, 部件的材料和结构都很难进行更换或改动, 因此, 在不改变部件材料体系和结构设计的前提下, 表面强化技术成为解决部件疲劳断裂的主要技术途径。机械喷丸、滚压、低塑性抛光、激光冲击强化等表面塑性强化技术都已在航空发动机部件上实现了工程应用, 其中, 激光冲击强化因其独特的技术优势得到广大学者的关注和大量推广应用。

激光冲击强化(Laser shock peening, LSP)是一种新兴的表面塑性强化抗疲劳技术, 其基本原理是: 利用高功率( $\text{GW}/\text{cm}^2$ )、短脉冲(纳秒级、甚至皮秒、飞秒)激光辐照金属表面, 金属表面涂覆的吸收保护层(铝箔、黑漆等)迅速吸收激光能量而发生爆炸性气化, 产生稠密的高温( $>10^7 \text{K}$ )、高压( $>\text{GPa}$ )等离子体; 等离子体继续吸收激光能量而向外剧烈膨胀, 形成高压等离子体冲击波(激光维持燃烧波(Laser supported combustion wave, LSC)/激光维持爆轰波(Laser supported detonation wave, LSD)), 在约束层(水、玻璃等)约束下作用于材料表面并向内部传播; 当冲击波压力超过材料的动态屈服强度, 材料发生动态塑性变形, 如图 1 所示。因此, 激光冲击强化是利用激光诱导冲击波的力学效应使表层材料发生塑性变形, 预制残余应力和改变微观组织, 引入加工硬化效应, 从而提高金属材料的抗疲劳<sup>[1]</sup>、抗应力腐蚀<sup>[2]</sup>和耐磨损<sup>[3]</sup>等性能。该技术具有高能、高压、超快、超高应变率、非接触等特点, 相比机械喷丸、滚压等传统表面强化技术, 具有强化效果好(残余压应力层深度达到 1 mm 以上)、实用性好(表面粗糙度影响小、处理后可直接实用)和可控性好(参数精确设定、工艺精确控制)等优势。

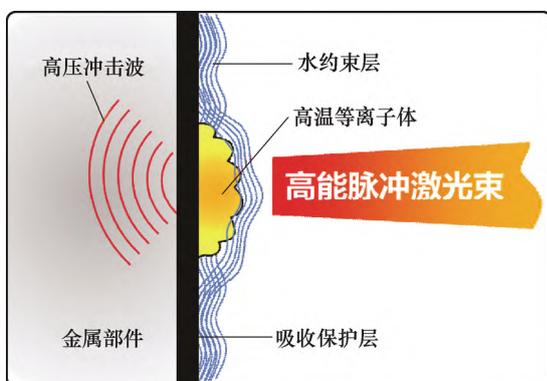


图 1 激光冲击强化示意图

激光冲击强化技术自 1972 年美国俄亥俄州的

巴特利-哥伦布斯实验室发明以来, 因其独特的技术特点和优势, 国内外学者和机构纷纷开展相关设备研制、基础研究和关键技术攻关。相继召开了 7 届激光冲击强化国际学术会议(International Conference on Laser Peening and Related Phenomena), 第 8 届将在中国上海举办(上海交通大学承办, 原计划 2020 年 6 月, 因新冠疫情推迟); 美国激光冲击强化技术公司、金属改性公司和中国西安天瑞达光电技术股份有限公司等企业先后研制、生产了两类激光冲击强化成套设备(固定式、移动式); 陆续在航空发动机、飞机、燃气轮机、核反应堆、容器管道、轨道交通、汽车等重大装备部件上实现了工程应用, 其中航空发动机部件高周疲劳断裂问题是推动该技术快速发展和工程实用的关键, 也是首个工程应用对象。

## 1 发动机部件激光冲击强化研究进展

### 1.1 风扇/压气机叶片

风扇/压气机叶片广泛采用钛合金, 国外典型的有 Ti-6Al-4V、Ti-17 等, 国内典型的有 TC4、TC6、TC11 和 TC17 等。风扇/压气机叶片作为转子叶片, 服役过程中容易在机械振动、气流激振力等载荷作用下发生高周疲劳, 尤其飞机起飞着陆过程中发生外物打伤后, 形成凹坑、撕裂、缺口、局部残余拉应力和微裂纹, 微裂纹迅速扩展而导致叶片断裂。此外, 随着发动机推重比提升, 风扇/压气机叶片向整体化、轻量化发展, 与盘组成整体叶盘, 这给激光冲击强化工程应用带了光束遮挡和薄壁叶片变形等新的技术难题。1995—2002 年间, 美国 GE/PW/LSPT/MIC 等单位利用“高周疲劳科学与技术研究计划”研究成果, 成功将激光冲击强化应用于 F101/F110/F119 等发动机风扇/压气机/整体叶盘叶片上, 提高叶片前缘损伤容限 15 倍以上<sup>[4]</sup>。2003 年, 陆续应用于波音 737 飞机 CFM-56 发动机和空客 A380 飞机 GE90 的叶片制造和维修。2008 年, MIC 公司在英国 Earby 建立激光冲击强化生产线, 主要为罗-罗公司 Trent 500、Trent 800、Trent 1000 发动机风扇/压气机叶片进行强化处理<sup>[5]</sup>。美国虽早在 21 世纪初就实现了航空发动机风扇/压气机叶片的规模化生产, 但对我国实施严格的设备禁运和设备封锁, 相关技术细节不清楚。

考虑外物打伤对叶片疲劳断裂机制及激光冲击强化抗疲劳机理、效果的差异, 以及整体叶盘结构特殊性引起的工艺问题, 下面主要从完好叶片抗疲

劳、叶片抗外物打伤和整体叶盘强化三个方面进行介绍。

(1) 完好叶片抗疲劳方面。早期研究中普遍认为,同机械喷丸一样,激光冲击强化是通过残余压应力来平衡工作拉应力、抑制裂纹萌生,改变裂纹尖端应力强度因子、减缓裂纹扩展速率<sup>[6]</sup>,因此,早期研究主要聚焦在不同工艺参数对残余压应力分布和疲劳性能的影响规律上。SHEPARD等<sup>[7]</sup>通过试验测试获得了不同功率密度和冲击次数对钛合金模拟叶片残余应力分布的影响规律,功率密度和冲击次数的增加有利于形成更大、更深的残余压应力。DING等<sup>[8]</sup>则通过有限元仿真更加详细地分析了不同激光冲击参数(冲击波压力、脉宽、光斑大小)、冲击方式(单面/双面,单次/多次)对残余压应力分布的影响,为工艺设计提供了大量的数据和规律支持。FANG等<sup>[9]</sup>考虑发动机叶片结构特征和背面反射等因素,在TC4钛合金叶片上仿真分析了激光参数和光斑路径对残余应力分布的影响规律,可为叶片实际工艺设计提供指导。ZHANG等<sup>[10]</sup>采用不同冲击次数对Ti-6Al-4V合金进行激光冲击处理,试验结果表明冲击次数从1增加至2次后,表面残余压应力由340 MPa提高到420 MPa、残余压应力层深度由0.75 mm增大1 mm,疲劳强度提升幅度由22.2%增大至41.7%,说明通过增大冲击次数引入更大幅值和深度的残余压应力可以进一步提高钛合金的疲劳性能, JIA等<sup>[11]</sup>亦有同样发现。YANG等<sup>[12]</sup>发现低功率密度、高冲击次数工艺相比高功率密度、低冲击次数工艺,使材料表层塑性变形更接近饱和极限,硬度提高了25%、疲劳寿命提高了40%。BHAMARE等<sup>[13]</sup>通过数值仿真分析了不同强化工艺下的残余应力分布特征,以截面穿透型残余压应力分布为目标,反向优化工艺,并通过三点弯曲疲劳试验得到了验证。因此,工程应用中往往通过残余应力分布优化布置反向设计工艺,更好提高叶片疲劳性能,如中国航发624所和空军工程大学针对模拟叶片提出的分区强化工艺,疲劳极限提高了8%<sup>[14]</sup>。

ALTENBERGER等<sup>[15]</sup>研究发现,Ti-6Al-4V钛合金激光冲击强化后残余压应力在450~550℃和交变载荷作用下发生大幅度松弛,但表层加工硬化层中高密度位错组织具有较好的热稳定性,保证了抗疲劳效果的保留。NIE等先后针对TC6<sup>[16]</sup>、TC11<sup>[17]</sup>和TC17<sup>[18]</sup>钛合金,开展了不同工艺参数对残余应力、微观组织和疲劳性能的影响规律及抗疲劳机理研究:在残余应力分布方面,增加激光功率密度可显著提升表面残余压应力,最大表面残余压应力可

达600 MPa以上,约为钛合金屈服强度 $\sigma_s$ 的70%,但压应力层深度变化不明显,如图2a所示<sup>[18]</sup>;而增加激光冲击次数则对表面残余压应力提升效果不显著、更有利于提升残余压应力层深度,冲击10次时残余压应力层深度可达1.6 mm,如图2b所示<sup>[17]</sup>。在微观组织方面,钛合金作为高层错能金属材料,主要是通过位错运动适应塑性变形,所以激光冲击强化后钛合金内部形成大量高密度位错组织,如图3a所示<sup>[16]</sup>,并且增加激光功率密度或增加激光冲击次数都可以提升位错密度,甚至在功率密度4 GW/cm<sup>2</sup>、冲击3次以上可形成高度细化的纳米晶组织,最小晶粒尺寸可达30 nm左右,如图3b所示<sup>[16]</sup>;TC6、TC11和TC17钛合金试件疲劳极限(10<sup>7</sup>循环次下)可提高20%以上。TC17钛合金叶片进、排气边和一阶节线处进行激光冲击强化(4 GW/cm<sup>2</sup>、冲击1次)后,在630 MPa应力水平下疲劳寿命提升了2倍<sup>[19]</sup>。通过上述结果分析表明,除了残余压应力外,表层高密度位错和纳米晶组织可以提升材料强度、抵抗塑性滑移,抑制疲劳裂纹萌生,是疲劳强度提高的另一个关键因素。PAN等<sup>[20]</sup>和JIAO等<sup>[21]</sup>针对叶片局部截面过渡区域吸收保护层难于施加的问题,采用无吸收保护层激光冲击方式,同样可以形成较高残余压应力和高密度位错组织,疲劳极限提高幅度可达20%左右。

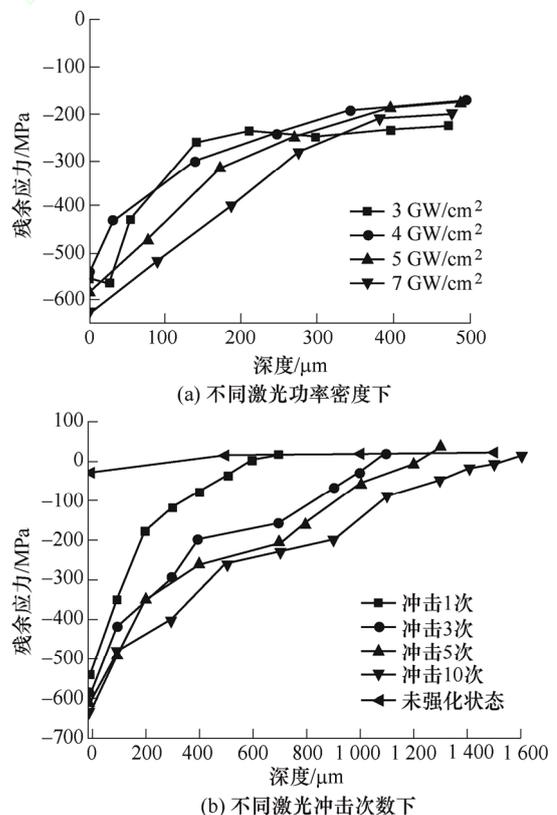


图2 不同激光冲击工艺参数下的残余应力分布规律

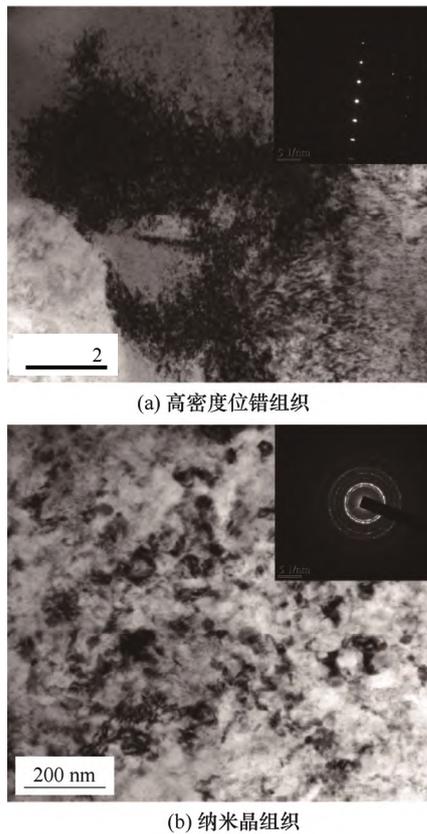


图 3 钛合金强化后高密度位错和纳米晶组织

李媛等<sup>[22]</sup>对 TC17 钛合金 CT 试件进行两种激光冲击路径处理, 裂纹扩展寿命分别提升了 2.14 倍和 1.90 倍, 间隔强化区域形成的拉应力区会提高裂纹扩展速率。SUN 等<sup>[23]</sup>分别研究了不同激光冲击区域和激光能量对 Ti-17 裂纹扩展速率的影响, 不同冲击区域内的残余应力分布形式不同, 不仅疲劳条带大小不同, 而且裂纹止裂方向与扩展方向的角度关系也不同, 从而导致不同程度的延寿效果, 另外, 试件边缘效应和高能量冲击下裂纹尖端应力分布复杂等因素会造成扩展抑制效果不好。裂纹扩展抑制主要取决于裂纹尖端塑性区域和能量密度, 提出利用裂纹尖端能量密度准则量化裂纹扩展抑制效果。残余压应力除了抑制裂纹萌生、裂纹偏转和减小疲劳条带等作用外, 裂纹闭合也是激光冲击强化减缓裂纹扩展的主要原因之一, LUO 等<sup>[24]</sup>利用微观断裂力学模型表征了闭合应力对裂纹扩展速率的影响。

(2) 叶片抗外物打伤方面。激光冲击强化在叶片表层预制残余压应力, 改善外物打伤局部应力场形成耦合应力场, 抑制疲劳裂纹扩展, 延长叶片服役寿命。英国曼切斯特大学 ZABEEN 等<sup>[25-26]</sup>和朴茨茅斯大学 LIN 等<sup>[27-28]</sup>分别通过强化试件外物打伤试验和数值仿真, 分析了强化试件在  $0^\circ$  正冲击(图 4a<sup>[25]</sup>)和  $45^\circ$  斜冲击(图 4b<sup>[25]</sup>)后耦合残余应力场

分布特征, 正冲击底部存在压应力区, 两侧材料隆起区域存在严重拉应力, 而斜冲击侵入入口区域存在严重拉应力。

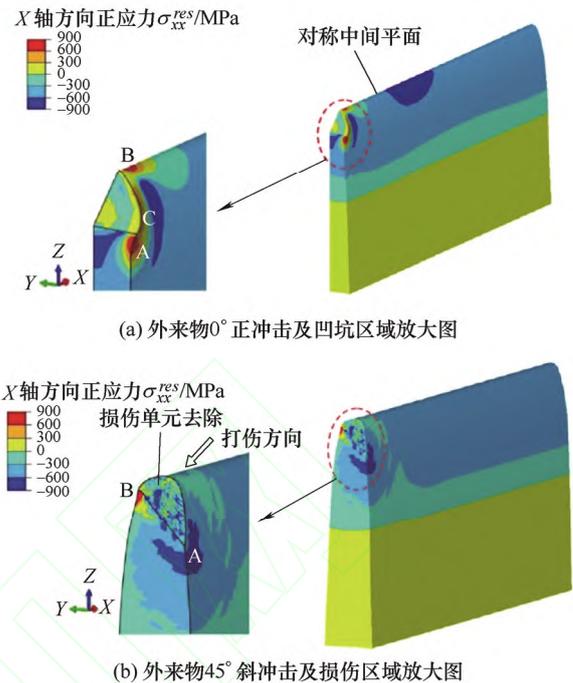


图 4 激光冲击强化叶片外物打伤后耦合应力场

吴俊峰等<sup>[29]</sup>和 LUO 等<sup>[30]</sup>分别利用电火花和轻气炮对 TC17 钛合金激光冲击强化模拟叶片进行外物打伤模拟试验, 结果表明电火花条件下 LSP-TC17 缺口模拟件的疲劳强度提高 55.6%, 而轻气炮条件下疲劳强度仅提升 17.06%~35.8%, 说明外物动态冲击引入的拉应力场会影响激光冲击预制压应力场, 所以耦合应力场分布状态直接影响外物打伤叶片剩余疲劳强度。

SPANRAD 等<sup>[31]</sup>研究了激光冲击强化对外物打伤后 Ti-6Al-4V 钛合金模拟叶片疲劳寿命的影响, 试验结果表明不同应力水平下疲劳寿命分别提高了 5 倍、10 倍和 25 倍, 并认为疲劳寿命的提高是因为激光冲击诱导残余压应力有效降低了外物损伤处的应力集中程度, 说明耦合应力场是有利的, 阻滞疲劳裂纹扩展, 但是耦合应力场如何影响裂纹扩展行为并未深入剖析。ZABEEN 等<sup>[26]</sup>则利用同步辐射表征了外物打伤后 Ti-6Al-4V 钛合金强化试件的耦合残余应力场分布, 证实了 SPANRAD 等<sup>[31]</sup>关于延寿原因的推测分析。YANG 等<sup>[32]</sup>和 REN 等<sup>[33]</sup>对钛合金外物打伤试件的裂纹扩展路径上进行双面激光冲击处理, 再进行疲劳裂纹扩展试验, 试验结果表明激光冲击强化可提高裂纹扩展寿命 94%~169%, 并认为强化区残余压应力和细晶组织仍然是其延寿机

理,但研究针对的仍是长裂纹线性扩展阶段,耦合应力场对裂纹扩展(尤其小裂纹)的影响机制并未深入探究。

RUSCHAU等<sup>[34]</sup>研究了应力比 $R=0.1$ 和 $R=0.8$ 下不同状态试件(原始、缺口、外物打伤)以及强化打伤试件的裂纹扩展行为,不同应力比下激光冲击对打伤试件裂纹扩展速率的效果不同,应力比越小效果越好,说明打伤区域裂纹尖端应力对裂纹扩展速率影响较大。SPARAND<sup>[35]</sup>研究了 $0^\circ$ 正冲击和 $45^\circ$ 度斜冲击条件下强化试件的长裂纹( $>1\text{ mm}$ )扩展速率,裂纹扩展寿命提高了5倍以上,如图5所示<sup>[35]</sup>,获得了等效应力强度因子与疲劳裂纹扩展速率的影响规律。外物打伤后强化叶片的耦合应力场分布直接改变裂纹尖端应力强度因子,影响裂纹扩展速率及寿命,因此,强化叶片外物打伤后的疲劳寿命预测必须考虑耦合应力场分布和裂纹扩展的多尺度效应,但目前国内外针对耦合应力场下的疲劳寿命预测研究仍有待深入研究。

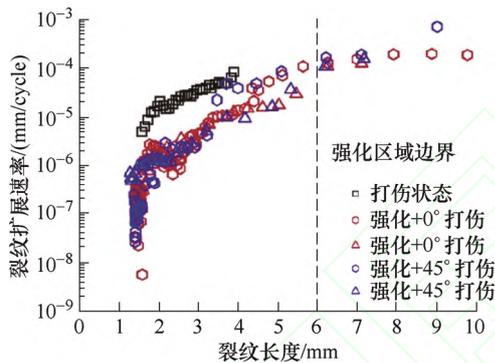


图5 外物打伤后强化试件的裂纹扩展速率曲线

(3) 整体叶盘激光冲击强化方面。由于整体叶盘的叶片相互之间存在遮挡,尤其涡轴等小型发动机遮挡问题更加严重,目前,主要采用激光斜入射和伸入式导光头等方案,前者比较成熟,是工程常用方案。激光斜入射时,斜入射角度过大会导致光斑畸变严重,激光功率密度达不到要求,可通过激光传输末端的光学装置进行光斑动态矫形,即对椭圆光斑进行调圆。采用伸入式导光头时,需通过精确数控系统进行轨迹控制,保证冲击路径和光斑聚焦,但由于距离太近,光路污染问题有待解决。在工艺设计与实施方面,由于叶片很薄,甚至不足 $1\text{ mm}$ ,激光冲击工艺造成塑性累积易引起薄壁叶片宏观变形,类似激光冲击成形<sup>[36]</sup>,需根据叶片激光冲击变形规律反向优化工艺,控制宏观变形量;同时,薄壁叶片内激光冲击波反射严重,容易造成强化过程中吸收保护层起泡破裂、叶片烧蚀;此外,整体叶盘上有数十个叶片,吸收保护层涂覆、约束

层施加、工艺控制与实现等方面都导致强化效率较低,需进一步提升自动化程度。美国在2003年实现了F119发动机整体叶盘激光冲击强化工程应用,我国空军工程大学、北京航空制造工程研究所和中科院沈阳自动化所先后完成了整体叶盘激光冲击强化试制,如图6所示,叶片强化后疲劳强度可提升20%,寿命提高4~6倍,随着相关设备和工艺的进一步升级和成熟,激光冲击强化整体叶盘规模化工业生产和应用有望实现<sup>[37-38]</sup>。



图6 整体叶盘激光冲击强化试制(空军工程大学)

## 1.2 涡轮叶片

涡轮叶片主要采用镍基高温合金,国外典型的有IN718等,国内典型的有GH4169、K417等。涡轮叶片工作在高温燃气条件下,激光冲击强化引入的残余压应力会发生松弛、回复,导致抗疲劳强化效果大幅度降低,在美国AMS 2546激光冲击强化技术规范中规定镍基高温合金上限使用温度为 $538\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[39]</sup>。

ZHOU等<sup>[40]</sup>和ZHOU等<sup>[41]</sup>利用有限元法研究了IN718和K417镍基高温合金激光冲击强化试件的残余应力热松弛规律,当温度超过 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 后残余应力开始松弛,且随着加热温度、保温时间的增加而增大,同时冲击次数越多松弛程度越大,说明激光冲击引入的塑性变形程度越大,高温下应力松弛越严重。PREVÉY<sup>[42]</sup>通过对比不同表面强化技术残余应力热松弛现象,发现残余应力热松弛程度与表面强化技术引入的冷作硬化率成反比,冷作硬化率越低、残余应力热稳定性越好,其中激光冲击强化冷作硬化率一般低于10%,相比机械喷丸具有更好的热稳定性。

李玉琴等<sup>[43]</sup>和周磊等<sup>[44]</sup>分别对GH4133和K417镍基高温合金进行激光冲击强化处理,组织观察发现表层塑性变形层内产生大量细化晶粒和孪晶组织,甚至形成纳米晶组织, $500\text{ }^\circ\text{C}$ 下纳米晶的钉扎作用使残余应力更稳定,疲劳寿命提升了1.34倍。

LI 等<sup>[45]</sup>发现 K417 激光冲击强化试件表面残余压应力在 530 °C、700 °C、900 °C 下松弛程度分别为 19%、39%和 72%，但在 900 °C 保温 10 h 后疲劳强度仍提高了 1.1 倍，如图 7 所示<sup>[45]</sup>，这主要是因为表层 30~500 nm 的纳米晶组织在高温下未发生明显长大、且其钉扎效应使周围位错等组织具有更好的稳定性。LUO 等<sup>[46]</sup>则利用原位加热试验，观察发现 K417 高温合金激光冲击纳米晶组织在 500 °C/1 h、700 °C/1 h 和 900 °C/3 h 下都未明显长大，验证了纳米晶组织在高温下的良好稳定性。针对某弹用发动机涡轮叶片 (K24 和 DZ17G) 疲劳断裂问题，考虑叶片根部吸收保护层难于贴覆，LUO 等<sup>[47]</sup>和 NIE 等<sup>[48]</sup>采用无吸收保护层的水下微尺度激光扫描冲击方法，在残余压应力和高密度位错组织作用下疲劳强度提高了 16% 以上，即使 800 °C 保温 2 h 后疲劳强度仍有 9% 以上的提升。

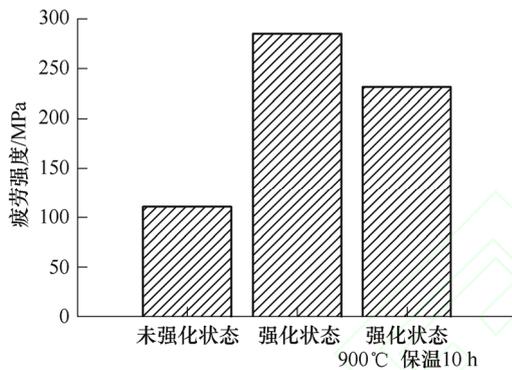


图 7 K417 高温合金激光冲击强化效果

CHASWAL<sup>[49]</sup>研究发现 IN718Plus 高温合金激光冲击后虽会提高表层塑性变形层回复再结晶的概率，但较为稳定的残余压应力对中温疲劳性能提升显著。此外，LU 等<sup>[50-52]</sup>进一步研究了激光冲击强化对镍基单晶合金性能的影响，证实了激光冲击强化同样可以提升单晶高温合金的中/高温疲劳性能，但塑性变形引入大量晶体缺陷对高温蠕变的影响需进一步分析。

周留成<sup>[53]</sup>和 CHEN 等<sup>[54]</sup>对高温下镍基高温合金涡轮叶片激光冲击强化抗疲劳效果进行了试验验证，如图 8 所示<sup>[53]</sup>，530 °C 下高-低周复合疲劳试验结果表明，K403 和 GH4133 高温合金涡轮叶片的安全寿命分别提高了 1.63 倍(振幅 1.5 mm)和 1.32 倍(振幅 1.7 mm)。

上述研究主要针对的是第二、三代发动机涡轮叶片，其材料采用的是多晶系(变形、铸造)和定向凝固镍基高温合金，第四代发动机涡轮叶片材料主要采用单晶高温合金，因此，单晶高温合金及涡轮

叶片激光冲击强化研究亟待针对性开展，目前已有研究讨论了单晶高温合金激光冲击强化的微观组织和基本力学性能的影响<sup>[50-52, 55-56]</sup>，但还需进一步揭示单晶高温合金内微观组织演化规律及高温稳定性，探明激光冲击强化对单晶涡轮叶片热机疲劳、高温蠕变等服役性能的影响规律及温度适用范围，尤其需要明确塑性变形引入的位错、孪晶、新生晶界是否会造成涡轮叶片热强性服役性能的下降。

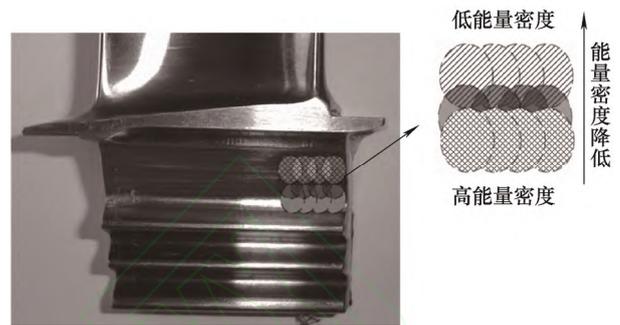


图 8 涡轮叶片激光冲击强化示意图

### 1.3 涡轮盘和篦齿盘等盘部件

涡轮盘和篦齿盘等部件容易发生疲劳失效的部位有中心孔、均压孔和榫槽。汪诚等<sup>[57]</sup>和何卫锋等<sup>[58]</sup>针对某型发动机涡轮盘均压孔裂纹故障，开展了激光冲击强化的疲劳性能影响研究，结果表明，激光冲击形成高幅值残余压应力可以有效抑制孔边裂纹的萌生，以及裂纹萌生后受压应力作用发生闭合而形成大量二次裂纹；深度 1 mm 以上的残余压应力可以在更大裂纹面上对裂纹扩展进行抑制，均压孔模拟件拉-拉疲劳寿命提高了 3.6 倍，振动疲劳寿命提高了 2.4 倍。涡轮盘中心孔承受的离心力载荷很大，可能属于低周疲劳，激光冲击强化的抗疲劳效果有待验证；而涡轮盘榫槽由于激光导光和疲劳性能考核难度大，目前相关报道很少。

另外，随着下一代航空发动机涡轮盘材料体系逐渐由变形高温合金向粉末高温合金、高熵合金转变，粉末高温合金、高熵合金激光冲击强化工艺基础及服役性能影响等相关研究亟待系统开展。

### 1.4 机匣、作动筒、导管等焊接部件

航空发动机上存在大量焊接部件，如机匣、作动筒、导管等，其中焊接部件的焊缝区域受焊接热应力影响而导致过渡区存在晶粒粗大、残余拉应力等问题，疲劳性能较差，一般不到基体疲劳强度的 60%。空军工程大学团队先后对机匣、作动筒和导管等焊接部件的试验模拟件进行激光冲击强化处理，结果表明，通过激光冲击形成残余压应力可以将焊接区域拉应力状态改善为压应力状态，同时粗

大晶粒得到了细化, P2 导管模拟试件疲劳寿命最大提升了 1.66 倍, 作动筒在综合实验器上 300 h 未发现裂纹(超过 200 h 的工厂标准), 风扇机匣焊缝强化后通过了 600 h 的长试。

### 1.5 榫头/榫槽、齿轮等连接部件

叶片和轮盘一般通过榫头和榫槽进行连接, 但是该连接形式并不属于刚性连接, 服役过程中容易因振动引起榫头与榫槽接触部位的微动疲劳, 进而引发榫头或榫槽断裂。美国空军、海军联合支持的 SBIR 计划中支持了利用激光冲击强化提高发动机叶盘/叶片微动疲劳寿命, Ti-6Al-4V 试样微动疲劳寿命提高了 10~25 倍, 提高  $10^6$  循环次疲劳强度 70% 以上。南京航空航天大学崔海涛团队联合空军工程大学开展了激光冲击 TC11 钛合金试件常温/高温下的微动疲劳试验研究, 常温下、300 °C、500 °C 条件下微动疲劳寿命分别提升了 5.5 倍、3.5 倍和 1.7 倍, 并将初始残余压应力嵌入计算分析模型, 对激光冲击强化后微动疲劳寿命进行了有效预测<sup>[59]</sup>。

齿轮相互啮合过程中容易在啮合部位发生接触疲劳, 此外在齿根常因弯曲应力过大而发生弯曲疲劳断裂。在美国陆军制造技术计划中, 利用激光冲击强化对阿帕奇、黑鹰和支奴干等直升机动力和传动装置进行激光冲击强化处理, 系统性开展了齿轮和渗碳钢强化工艺研究, 有效提高了传动齿轮的疲劳强度, 已在生产过程中贯彻, 相关技术细节尚不清楚, 而国内相关研究报道很少; 目前中国航发 608 所联合空军工程大学和西安交通大学正在开展涡轴发动机传动齿轮激光冲击强化工艺影响及应用验证研究。

## 2 发动机部件激光冲击强化研究历程与发展特点

### 2.1 发动机部件激光冲击强化研究共性问题

上述涉及的发动机部件虽种类繁多、结构特征和服役条件也不相同, 但部件主要失效模式同为高周疲劳断裂, 激光冲击强化技术作为表面塑性加工技术, 表层材料塑性变形引入的残余压应力和加工硬化效应是其实现抗疲劳的核心影响因素。因此, 发动机部件激光冲击强化研究共性问题是金属材料在激光诱导冲击波作用下的残余应力分布规律、组织结构特征及演化机制和抗疲劳强化机理, 研究主要包括合金钢、钛合金、镍基高温合金等典型发动机材料在不同激光冲击强化工艺方式/参数下的微观组织表征、残余应力和硬度、强度、韧性、高周

疲劳等力学性能测试, 通过塑性形变理论与仿真揭示塑性变形微观演化(位错形成、滑移、孪生、相变、亚晶等)机制; 结合加工硬化效应和残余应力作用原理, 分析微观组织结构和残余应力对疲劳裂纹萌生和扩展的影响机制及程度, 阐明激光冲击强化抗疲劳机理; 根据不同微观组织结构和残余应力的分布特征与疲劳性能的映射关系, 进行激光冲击强化抗疲劳效果评估方法或模型的建立, 以及提出基于抗疲劳效果的强化工艺方式/参数的设计方法。

### 2.2 研究重点由残余应力向微观组织发展

激光冲击强化早期研究中, 认为激光冲击强化作为一种表面塑性加工技术, 其影响主要体现在残余应力的引入和加工硬化效应, 因此通常采用应力测试和有限元仿真等方法研究残余应力场的分布特征及激光冲击参数的影响规律。随着材料微观表征手段的成熟, 可利用电子显微镜观察到塑性变形层内的位错、孪晶、细化晶粒等微观组织特征, 进而深入分析微观组织的演化机制、微观组织特征与激光冲击参数的对应关系、以及微观组织演化对宏观力学性能的影响。从发现位错、孪晶等晶体缺陷<sup>[60]</sup>, 到 LU 等<sup>[61-62]</sup>阐明晶粒细化机制, 再到李应红院士提出激光冲击表面纳米化<sup>[63]</sup>, 后续研究<sup>[64-69]</sup>更加关注晶粒细化、纳米化的组织结构分布特征及形成机制, 体现了激光冲击强化研究正在向更加微观上发展。

### 2.3 强化机理由单一向复合发展

随着激光冲击强化后微观组织表征研究的深入, 人们逐渐认识到激光冲击强化抗疲劳不仅仅是残余压应力抵消工作拉应力、改变裂纹尖端应力场这么简单。无论是高密度位错、还是纳米晶组织, 都可以很大程度上提高表层材料强度和变形抗力, 从而在疲劳裂纹萌生早期循环滑移阶段就起到很好的抑制作用, 阻滞材料表面裂纹萌生、减缓早期裂纹扩展, 提升疲劳强度。残余压应力和微观组织都起着抑制裂纹萌生和扩展的作用, 是激光冲击强化抗疲劳机理的两个主要因素, 因此, 李应红院士在激光冲击表面纳米化基础上明确提出了基于残余压应力和纳米晶组织的复合强化机理<sup>[70]</sup>, 国内外相关研究中也从不同角度关注、分析和认同<sup>[71-75]</sup>。尤其, 在机械载荷、热应力载荷作用下残余应力发生大幅度松弛时, 稳定性较好的微观组织起着更加重要的抗疲劳作用。

### 2.4 强化工艺由单一向复合发展

航空发动机部件服役工况复杂, 因各种功能需求而采用了多种表面强化/表面改性工艺, 例如机械

喷丸、振动光饰、渗碳、渗氮、渗铝等工艺。但是，单一强化工艺往往存在某一方面的不足，例如喷丸可以产生高幅值表面残余应力，但影响深度较小；渗碳等可以大幅度提高表层硬度，但渗层深度往往受表面渗碳浓度限制而不能进一步提升。因此，近年来，根据激光冲击强化技术特点和优势，逐渐发展了多种组合工艺，例如激光冲击强化+喷丸<sup>[76]</sup>和激光冲击强化+振动光饰<sup>[77]</sup>可进一步提高残余压应力层深度，激光冲击强化+渗碳<sup>[78]</sup>和激光冲击强化+渗铝<sup>[79]</sup>可改善表面渗层组织均匀性、提升渗层深度。

### 3 发动机部件激光冲击强化研究展望

#### 3.1 发展高效强化设备

激光冲击强化与机械喷丸的原理和强化机理及功能作用相似。由于机械喷丸具有压应力深度小、冷作硬化率高、工艺污染及精确控制性较差等缺点，激光冲击强化取代机械喷丸成为一种趋势，但需要解决工艺成本高、强化效率低等问题。美国 LSPT 公司 Procudo 强化系统的激光重频已达到 20 Hz，相比本世纪初用于 F101、F119 发动机部件强化的设备，重复频率提升好几倍。印度威尔洛大学近年来采用小能量、短脉宽激光进行了大量无吸收保护层激光冲击强化工艺影响研究<sup>[80]</sup>，重频可达几十 Hz 以上。日本东芝公司和法国空客可将小能量、短脉宽激光冲击强化设备提高到百 Hz 水平，主要应用于核反应堆壳体和飞机部件。虽然目前激光冲击强化重频水平，相比 21 世纪初美国发动机部件应用空军工程大学和西安天瑞达公司正在合作研发 kHz~10 kHz 级重频、小光斑、低能量的低成本高可靠激光冲击强化设备，用于取代喷丸，对发动机叶片、导管等部件进行大面积、大批量的强化处理。另外，利用飞秒、皮秒等超短脉冲激光虽可以大幅提升重频水平，但激光光斑过小、处理效率同样受限，且飞秒<sup>[81-82]</sup>、皮秒<sup>[83-84]</sup>激光脉冲太短导致塑性强化层太浅，目前并不满足发动机部件抗疲劳需求。综上，利用低能量、短脉宽、小光斑、高重频脉冲激光可实现高效激光冲击强化，有望代替喷丸工艺，但同时强化过程中吸收保护层易破裂、降低塑性强化深度，水约束层容易破坏，往往采用水下无吸收保护层方式，给工艺应用带了一系列问题需要解决：激光烧蚀层对部件疲劳性能的影响以及激光烧蚀层如何标准化定量化去除，建议可以结合发动机部件其他表面工艺进行去除，例如强化后进行喷砂、磨粒

流、振动光饰等。

#### 3.2 辅助增材制造/修复技术

随着金属材料增材制造技术的发展和成熟，航空发动机部件同样有采用激光束/电子束/离子束等高能束进行增材制造或损伤修复的趋势，但由于航空发动机部件载荷大、工况复杂、疲劳性能要求高，增材制造/修复部件难于满足技术指标。利用激光冲击强化对增材制造/修复部件进行辅助强化主要包括增材制造/修复部件在线强化，即一边增材成形一边激光冲击强化，又称激光锻打或 3D 激光冲击强化<sup>[85]</sup>，激光冲击强化可通过逐层强化调控微观组织结构、降低内部残余拉应力水平，显著提升增材部件疲劳性能<sup>[86-87]</sup>，但激光冲击波作用下的热态凝固金属组织结构动态演化、抗疲劳机理及工艺参数影响规律等还需深入分析；增材制造/修复部件离线强化，即增材成形后进行激光冲击强化处理，GUO 等<sup>[88]</sup>、JIN 等<sup>[89]</sup>和 LUO 等<sup>[90]</sup>开展了初步研究工作，结果表明激光冲击强化可以显著提升增材制造/修复部件的疲劳性能；上述两个方面研究虽都已验证技术方案的可行性，但还需系统开展工艺参数影响、工艺应用、服役性能验证等工作，从而，推动增材制造/修复部件的工程化应用。

#### 3.3 加强强化部件疲劳性能评估研究

激光冲击强化技术可以显著提高发动机部件疲劳性能，通过疲劳试验即可验证疲劳性能的提升幅度，但是服役工况下部件疲劳性能的提升程度却很难明确，制约该技术纳入发动机设计大纲和维修准则，因此，需要从结构强度角度加强基础研究，将强化后表面状态变化及疲劳性能影响考虑至强度分析中，准确评估服役工况下强化部件的疲劳性能，为设计大纲和维修准则的制定提供理论基础和数据支持。

#### 3.4 发展统一的技术标准和规范

目前开展航空发动机部件激光冲击强化研究的单位很多，也已开展的大量的试验和仿真研究，但设备体系多样、研究较为独立分散、研究结果可共用性较差，制约我国激光冲击强化规模化工业应用，需要发展统一的技术标准和规范。

## 4 结论

(1) 激光冲击强化技术在航空发动机部件上应用研究主要面向风扇/压气机叶片、涡轮叶片、涡轮盘、机匣、作动筒、导管、齿轮等部件，每种部件结构特点和疲劳失效模式不同，研究需要从不同角

度进行切入; 美国已在风扇/压气机叶片上实现了规模化工业应用, 我国主要在涡轮叶片、机匣、作动筒、导管等部件修理中得到初步应用。

(2) 航空发动机部件激光冲击强化研究历程及发展特点主要包括: 研究重点由残余应力向微观组织发展, 强化机理由单一向复合发展, 强化工艺由单一向复合发展。

(3) 航空发动机部件激光冲击强化研究工作建议聚焦于: 发展高效强化设备, 辅助增材制造/修复技术, 加强强化部件疲劳性能评估研究, 发展统一的技术标准和规范。

### 参 考 文 献

- [1] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing of aluminum alloys: Application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Materials Science & Engineering A*, 1996, 210: 102-113.
- [2] HATAMLEH O, SINGH P M, GARMESTANI H. Corrosion susceptibility of peened friction stir welded 7075 aluminum alloy joints[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51: 135-143.
- [3] BARLETTA M, RUBINO G, GISARIO A. Adhesion and wear resistance of CVD diamond coatings on laser treated WC-Co substrates[J]. *Wear*, 2011, 271: 201-2024.
- [4] Universal Technology Corporation. High cycle fatigue (HCF) science and technology program 2002 annual report [R]. Dayton: Air Force Research Laboratory, 2003: 1-10.
- [5] COWLES B, MORRIS B, NAIK R, et al. Applications, benefits, and challenges of advanced surface treatments surface treatments-an industry perspective[C]//Proceeding of the First International Conference on Laser Peening, Houston: ASME Press, 2008: 30-31.
- [6] 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: 1021-1036.
- [7] SHEPARD M J, SMITH P R, AMER M S. Introduction of compressive residual stresses in Ti-6Al-4V simulated airfoils via laser shock processing[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2001, 10: 670-678.
- [8] DING K, YE L. Laser shock peening performance and process simulation[M]. New York: Woodhead, 2006.
- [9] FANG Y W, LI Y H, HE W F, et al. Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 559: 683-692.
- [10] 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 & Engineering A*, 2010, 527(15): 3411-3415.
- [11] JIA W J, HONG Q, ZHAO H Z, et al. Effect of laser shock peening on the mechanical properties of a near- $\alpha$  titanium alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 606: 354-359.
- [12] YANG H, ZHAO J B, WANG T R. Research on a different method to reach the saturate limit of titanium aluminide alloy surface mechanical and fatigue properties by laser shock process[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, 193: 162989.
- [13] BHAMARE S, RAMAKRISHNAN G, MANNAVA S R, et al. Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 232: 464-474.
- [14] 刘亮, 聂祥樊, 胡仁高, 等. 激光冲击强化对 TC17 钛合金模拟叶片疲劳极限的影响[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2019, 32(4): 48-52.  
LIU Liang, NIE Xiangfan, HU Rengao, et al. The effects of laser shock processing on the fatigue limit of TC17 alloy simulated blades[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2019, 32(4): 48-52.
- [15] ALTENBERGER I, NALLA R K, SANO Y, et al. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C [J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 44: 292-302.
- [16] NIE X F, HE W F, ZHOU L C, et al. Experiment investigation of laser shock peening on TC6 titanium alloy to improve high cycle fatigue performance[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 594: 161-167.
- [17] NIE X F, HE W F, ZANG S L, et al. Effects and application to improve high cycle fatigue resistance of TC11 titanium alloy by laser shock peening with multiple impacts[J]. *Surface & Coating Technology*, 2014, 253: 68-75.
- [18] NIE X F, HE W F, LI Q P, et al. Experiment investigation on microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy treated by laser shock peening with different laser fluence[J]. *Journal of Laser Application*,

- 2013, 25(4): 042001-1-6.
- [19] 聂祥樊, 何卫锋, 王学德, 等. 激光冲击强化对 TC17 钛合金微观组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(7): 1691-1696.
- NIE Xiangfan, HE Weifeng, WANG Xuede, et al. Effects of laser shock peening on microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 1691-1696.
- [20] PAN X L, LI X, ZHOU L C, et al. Effect of residual stress on s-n curves and fracture morphology of Ti6Al4V titanium alloy after laser shock peening without protective coating[J]. Materials, 2019, 12: 3799.
- [21] JIAO Y, HE W F, SHEN X J. Enhanced high cycle fatigue resistance of Ti-17 titanium alloy after multiple laser peening without coating[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 1333-1343.
- [22] 李媛, 何卫锋, 聂祥樊, 等. 激光冲击 TC17 钛合金疲劳裂纹扩展试验[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 40-47.
- LI Yuan, HE Weifeng, NIE Xiangfan, et al. Fatigue crack growth behavior of tc17 titanium alloy with laser shock peening[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 40-47.
- [23] SUN R J, LI L H, GUO W, et al. Laser shock peening induced fatigue crack retardation in Ti-17 titanium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 737: 94-104.
- [24] LUO Y J, CHEN J B, WANG X F, et al. A micromechanical model to study the closure stress effect on fatigue life of Ti6Al4V subjected to laser shock peening[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 200: 327-338.
- [25] ZABEEN S, PREUSS M, WITHERS P J. Residual stresses caused by head-on and 45° foreign object damage for a laser shock peened Ti-6Al-4V alloy aerofoil[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 560: 518-527.
- [26] ZABEEN S, PREUSS M, WITHERS P J. Evolution of a laser shock peened residual stress field locally with foreign object damage and subsequent fatigue crack growth[J]. Acta Materialia, 2015, 83: 216-226.
- [27] LIN B, LUPTON C, SPANRAD S, et al. Fatigue crack growth in laser-shock-peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens due to foreign object damage[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 59: 23-33.
- [28] LIN B, ZABEEN S, TONG J, et al. Residual stressed due to foreign object damage in laser-shock peened aerofoils: Simulation and measurement[J]. Mechanics of Materials, 2015, 82: 78-90.
- [29] 吴俊峰, 邹世坤, 张永康, 等. 激光冲击强化 TC17 叶片前缘模拟件的抗 FOD 性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(11): 3359-3364.
- WU Junfeng, ZOU Shikun, ZHANG Yongkang, et al. FOD resistance of the simulator samples of TC17 blades leading edges with laser shock processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(11): 3359-3364.
- [30] LUO S H, NIE X F, ZHOU L C, et al. High cycle fatigue performance in laser shock peened TC4 titanium alloys subjected to foreign object damage[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(3): 1466-1474.
- [31] SPANRAD S, TONG J. Characterisation of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(4-5): 2128-2136.
- [32] YANG Y, ZHOU W F, CHEN B Q, et al. Fatigue behaviors of foreign object damaged Ti-6Al-4V alloys under laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 136: 105596.
- [33] REN X D, CHEN B Q, JIAO J F, et al. Fatigue behavior of double-sided laser shock peened Ti-6Al-4V thin blade subjected to foreign object damage[J]. Optics & Lasers Technology, 2020, 121: 105784.
- [34] 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: 199-209.
- [35] SPANRAD S. Fatigue crack growth in laser shock peened aerofoils subjected to foreign object damage[D]. Portsmouth: University of Portsmouth, 2011.
- [36] CELLARD C, RETRAINT D, FRANCOIS 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.
- [37] 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.
- QIAO Hongchao, GAO Yu, ZHAO Jibin, et al. Research process of laser peening technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(7): 1744-1755.
- [38] 邹世坤, 巩水利, 郭恩明, 等. 发动机整体叶盘的激光冲击强化技术[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601009.

- ZOU Shikun, GONG Shuili, GUO Enming, et al. Laser peening of turbine engineering integrally blade rotor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0601009.
- [39] SAE International. AMS 2546-2004(R2010), Laser peening[S]. Warrendale: SAE Press, 2004.
- [40] ZHOU Z, GILL A S, TELANG A, et al. Experimental and finite element simulation study of thermal relaxation of residual stresses in laser shock peened IN718 spf superalloy[J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(9): 1597-1611.
- [41] ZHOU W F, REN X D, REN Y P, et al. Laser shock processing on Ni-based superalloy K417 and its effect on thermal relaxation of residual stress[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(1): 675-681.
- [42] PREVÉY P. The effect of cold work on the thermal stability of residual compression in surface enhanced IN718[C]//Proceeding of 20th ASM Materials Solutions Conference & Exposition, Missouri: ASM Press, 2000.
- [43] 李玉琴, 何卫锋, 聂祥樊, 等. GH4133 镍基高温合金激光冲击强化研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(6): 1517-1521.
- LI Yuqin, HE Weifeng, NIE Xiangfan, et al. Laser shock peening of GH4133 nickel-based superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(6): 1517-1521.
- [44] 周磊, 李应红, 汪诚, 等. 激光冲击强化渗铝法提高 K417 合金疲劳性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(6): 1093-1096.
- ZHOU Lei, LI Yinghong, WANG Cheng, et al. Vibration fatigue performance improvement of K417 alloy by laser shock processing and aluminizing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(6): 1093-1096.
- [45] LI Y H, ZHOU L C, HE W F, et al. The strengthening mechanism of a nickel-based alloy after laser shock processing at high temperatures[J]. Science & Technology of Advanced Materials, 2013, 14(5): 1574-1578.
- [46] LUO S H, NIE X F, ZHOU L C, et al. Thermal stability of surface nanostructure produced by laser shock peening in a Ni-based superalloy[J]. Surface & Coating Technology, 2017, 311: 337-343.
- [47] LUO S H, NIE X F, WANG X D, et al. Experiment study on improving fatigue strength of K24 nickel based alloy by laser shock processing without coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(12): 3682-3687.
- [48] NIE X F, LI Y H, TU S D, et al. Feasibility study of microscale laser shock processing without absorbing coating to improve high-cycle fatigue performance of DZ17G directionally solidified superalloy[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31: 042007.
- [49] CHASWAL V. A study of laser shock peening on fatigue behavior of IN718Plus superalloy: Simulations and experiments[D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2013.
- [50] LU G X, LIU J D, QIAO H C, et al. Effect of laser shock on tensile deformation behavior of a single crystal nickel-base superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 686: 46-53.
- [51] LU G X, LIU J D, QIAO H C, et al. Surface topography evolution of Ni-based single crystal superalloy under laser shock: Formation of the nano-scale surface reliefs[J]. Applied Physics A, 2017, 123(3): 213.
- [52] LU G X, LIU J D, QIAO H C, et al. Crack appearance of a laser shock-treated single crystal nickel-base superalloy after isothermal fatigue failure[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 321: 74-80.
- [53] 周留成. 激光冲击复合强化机理及在航空发动机涡轮叶片上的应用研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2014.
- ZHOU Liucheng. The strengthening mechanism of laser shock processing and its application on the aero-engine components[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2014.
- [54] CHEN C, ZHANG X Y, YAN X J, et al. Effect of laser shock peening on combined low-and high-cycle fatigue life of casting and forging turbine blades[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25: 108-119.
- [55] LU G X, LIU J D, QIAO H C, et al. Nonuniformity of morphology and mechanical properties on the surface of single crystal superalloy subjected to laser shock peening[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 658: 721-725.
- [56] GENG Y X, DONG X, WANG K D, et al. Evolutions of microstructure, phase, microhardness, and residual stress of multiple laser shock peened Ni-based single crystal superalloy after short-term thermal exposure[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 123: 105917.
- [57] 汪诚, 任旭东, 周鑫, 等. 激光冲击对 GH742 镍基合金疲劳短裂纹扩展的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(7): 57-60.
- WANG Cheng, REN Xudong, ZHOU Xin, et al.

- Influence of laser shock processing on short crack growth of GH742 nickel-base alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2009, 34(7): 57-60.
- [58] 何卫锋, 李应红, 周章文, 等. 激光冲击工艺对 GH742 镍基高温合金疲劳性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(3): 42-45.  
HE Weifeng, LI Yinghong, ZHOU Zhangwen, et al. Effects of laser shock processing on fatigue property of GH742 Ni-based superalloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, 30(3): 42-45.
- [59] 陈旭, 崔海涛, 田增, 等. 激光冲击强化对钛合金高温微动疲劳寿命的影响[J]. *推进技术*, 2020, 41(4): 903-909.  
CHEN Xu, CUI Haitao, TIAN Zeng, et al. Effects of laser shock peening on high-temperature fretting fatigue life of titanium alloy[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(4): 903-909.
- [60] CHU J P, RIGSBEE J M, BANAS G, et al. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 1999, 260(1-2): 260-268.
- [61] LU J Z, LUO K Y, ZHANG Y K, et al. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel[J]. *Acta Materialia*, 2010, 16: 5354-5362.
- [62] 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, 11: 3984-3994.
- [63] 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
LI Yinghong. *Theory and technology of laser shock peening*[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [64] CHE Z G, YANG J, GONG S L, et al. Self-nanocrystallization of Ti-6Al-4V alloy surface induced by laser shock processing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 33(5): 1056-1060.
- [65] ZHOU L C, HE W F, LUO S H, et al. Laser shock peening induced surface nanocrystallization and martensite transformation in austenitic stainless steel[J]. *Journal of Alloys and compounds*, 2015, 655: 66-70.
- [66] LUO S H, LI Y H, ZHOU L C, et al. Surface nanocrystallization of metallic alloys with different stacking fault energy induced by laser shock processing[J]. *Materials & Design*, 2016, 104: 320-326.
- [67] LU J Z, DUAN H F, LUO K Y, et al. Tensile properties and surface nanocrystallization analyses of H62 brass subjected to room-temperature and warm laser shock peening[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 698: 633-642.
- [68] 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.
- [69] LUO S H, ZHOU L C, WANG X D, et al. Surface nanocrystallization and amorphization of dual phase TC11 titanium alloys under laser induced ultrahigh strain-rate plastic deformation[J]. *Materials*, 2018, 11: 563.
- [70] 李应红, 何卫锋, 周留成. 激光冲击复合强化机理及在航空发动机涡轮叶片上的应用研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(1): 1-8.  
LI Yinghong, HE Weifeng, ZHOU Liucheng. The strengthening mechanism of laser shock processing and its application on the aero-engine components[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2015, 45(1): 1-8.
- [71] QIAO H C. Experimental investigation of laser peening on Ti17 titanium alloy for rotor blade applications[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 351: 524-530.
- [72] KATTOURA M, MANNAVA S R, QIAN D, et al. Effect of laser shock peening on elevated temperature residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 104: 366-378.
- [73] ZOU S K, WU J F, ZHANG Y K, et al. Surface integrity and fatigue lives of Ti17 compressor blades subjected to laser shock peening with square spots[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 347: 398-406.
- [74] ZHOU L C, LONG C B, HE W F, et al. Improvement of high-temperature fatigue performance in the nickel-based alloy by LSP-induced surface nanocrystallization[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 744: 156-164.
- [75] SHENG J, ZHANG H, HU X Q, et al. Influence of laser peening on the high-temperature fatigue life and fracture of Inconel 718 nickel-based alloy[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 109: 102757.
- [76] WU Junfeng, ZOU Shikun, ZHANG Yongkang, et al. Microstructures and mechanical properties of  $\beta$  forging Ti17 alloy under combined laser shock processing and

- shot peening[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 328: 283-291.
- [77] LUO S H, ZHOU L C, NIE X F, et al. The compound process of laser shock peening and vibratory finishing and its effect on fatigue strength of Ti-3.5Mo-6.5Al-1.5Zr-0.25Si titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 783: 828-835.
- [78] 李靖, 李军, 何卫锋, 等. 激光冲击与渗碳复合工艺改善 12CrNi3A 钢磨损性能[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(5): 059005.
- LI Jing, LI Jun, HE Weifeng, et al. Improvement of wear resistance by laser shock processing and carburization composite technology used on 12CrNi3A steel[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(5): 059005.
- [79] LUO S H, HE W F, ZHOU L C, et al. Aluminizing mechanism on a nickel-based alloy with surface nanostructure produced by laser shock peening and its effect on fatigue strength[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 342: 29-36.
- [80] KALAINATHAN S, PRABHAKARAN S. Recent development and future perspectives of low energy laser shock peening[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 81: 137-144.
- [81] WANG H, KALCHEV B, Y WANG H C, et al. Surface modification of NiTi alloy by ultrashort pulsed laser shock peening[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 394: 125899.
- [82] WANG H, GUREVICH E L, OSTENDORF A. Femtosecond laser shock peening on the surface of NiTi shape memory alloy[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 94: 910-913.
- [83] ELANGO K, HOPPIUS J S, KUKREJ L M, et al. Studies on ultra-short pulsed laser shock peening of stainless-steel in different confinement media[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 397: 125988.
- [84] PETRONIĆ S, ČOLIĆ K, ĐORĐEVIĆ B, et al. Effect of laser shock peening with and without protective coating on the microstructure and mechanical properties of Ti-alloy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 129: 106052.
- [85] KALENTICS N, BOILLAT E, PEYRE P, et al. 3D laser shock peening—A new method for the 3D control of residual stresses in selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2017, 130: 350-356.
- [86] KALENTICS N, SOHRABI N, TABASI H G, et al. Healing cracks in selective laser melting by 3D laser shock peening[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100881.
- [87] KALENTICS N, SEIJAS M O V, GRIFFITHS S, et al. 3D laser shock peening—a new method for improving fatigue properties of selective laser melted parts[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 33: 101112.
- [88] GUO W, SUN R J, SONG B W, et al. Laser shock peening of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 349: 503-510.
- [89] JIN X, LAN L, GAO S, et al. Effects of laser shock peening on microstructure and fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy fabricated via electron beam melting[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2020, 780: 139199.
- [90] LUO S H, HE W F, CHEN K, et al. Regain the fatigue strength of laser additive manufactured Ti alloy via laser shock peening[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 750: 626-635.

作者简介：聂祥樊，男，1988 年出生，副教授，硕士研究生导师，重点实验室主任助理。主要研究方向为激光冲击强化及应用关键技术。

E-mail: skingkd@163.com

李应红(通信作者)，男，1963 年出生，教授，博士研究生导师，重点实验室主任，中国科学院院士。主要研究方向为航空(动力)与等离子体技术交叉。

E-mail: yinghong\_li@126.com