

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

双面激光冲击强化技术研究进展

刘永恒, 顾鑫, 邓大祥, 张永康

引用本文:

刘永恒, 顾鑫, 邓大祥, 等. 双面激光冲击强化技术研究进展[J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220186.

Liu Y H, Gu X, Deng D X, et al. Research progress of double-sided laser shock peening technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220186.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220186>

收稿日期: 2022-07-29; 修改日期: 2022-12-08; 录用日期: 2022-12-19

相关论文

激光冲击强化技术的应用现状与发展

吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 陆莹, 孙博宇, 胡太友, 张旖诺

光电工程 2018, 45(2): 170690 doi: [10.12086/oe.2018.170690](https://doi.org/10.12086/oe.2018.170690)

激光冲击强化技术原理及研究发展

李松夏, 乔红超, 赵吉宾, 陆莹

光电工程 2017, 44(6): 969 doi: [10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.001)

Acoustic wave detection of laser shock peening

Jiajun Wu, Jibin Zhao, Hongchao Qiao, Xuejun Liu, Yinuo Zhang, Taiyou Hu

Opto-Electronic Advances 2018, 1(9): 180016 doi: [10.29026/oea.2018.180016](https://doi.org/10.29026/oea.2018.180016)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.oeejournal.org/oe>



OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220186

双面激光冲击强化技术研究进展

刘永恒¹, 顾鑫¹, 邓大祥^{1*}, 张永康²¹哈尔滨工业大学(深圳) 机电工程与
自动化学院, 广东 深圳 518055;²广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510320

摘要: 激光冲击强化利用激光的力效应进行表面强化, 传统的激光冲击强化技术为单面冲击, 强化复杂型面薄壁件时, 难以同时实现形状控制(控形)和疲劳性能控制(控性)。新型的双面激光冲击强化技术是解决复杂型面薄壁件表面强化难题的理想选择。介绍了两种双面激光冲击强化技术的原理和技术特点, 对双面激光冲击强化的应力波传播、应力场分布等过程进行了分析, 介绍了双面激光冲击强化在控形和控性方面的应用, 并对双面激光冲击强化未来的发展进行了展望。

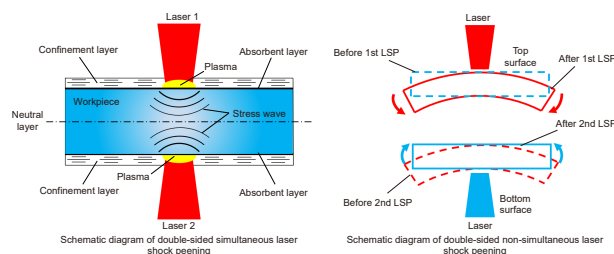
关键词: 激光冲击强化; 双面激光冲击; 形状控制; 疲劳性能

中图分类号: TN249

文献标志码: A

刘永恒, 顾鑫, 邓大祥, 等. 双面激光冲击强化技术研究进展[J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220186

Liu Y H, Gu X, Deng D X, et al. Research progress of double-sided laser shock peening technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220186



Research progress of double-sided laser shock peening technology

Liu Yongheng¹, Gu Xin¹, Deng Daxiang^{1*}, Zhang Yongkang²¹School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518055, China;²School of Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510320, China

Abstract: Laser shock peening uses the force effect of the laser to strengthen the surface. The traditional laser shock peening technology is a single-sided shock. When applied to thin-walled parts with complex profiles, it is difficult to achieve shape control and fatigue performance control coordination. The new double-sided laser shock peening technology is ideal for solving the surface strengthening challenges of thin-walled parts with complex profiles. On the basis of introducing the characteristics and deficiencies of single-sided laser shock peening technology, the principle and technical characteristics of two double-sided laser shock peening technologies are summarized. The application of simulation research in analyzing the physical mechanism of stress wave propagation and stress field distribution of double-sided laser shock peening is expounded. The mechanism and application of double-sided laser shock peening in the application of shape control and fatigue performance control

收稿日期: 2022-07-29; 修回日期: 2022-12-08; 录用日期: 2022-12-19

基金项目: 深圳市基础研究重点项目 (JCYJ20200109112808109)

*通信作者: 邓大祥, dengdaxiang@hit.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

are introduced, and the future development of double-sided laser shock peening is prospected.

Keywords: double-sided laser shock peening; simulation research; shape control; fatigue performance

1 引言

随着航空、航天、航海、高铁等高端领域装备的飞速发展, 复杂型面薄壁件 (如航空发动机叶片等) 应用日益广泛, 其服役环境恶劣, 对构件的疲劳性能提出了苛刻的要求。现有研究表明, 80% 以上的金属零部件失效是由于发生了疲劳失效^[1], 通过表面强化技术, 可以有效抑制疲劳失效, 提高零部件的疲劳寿命, 降低使用成本^[2]。传统的表面强化主要分为两大类: 一类为表面热处理或化学处理, 如表面淬火、渗碳、渗氮、碳氮共渗等; 另一类为形变强化, 通过塑性变形的方式改变零部件表面残余应力场和显微组织, 如机械喷丸强化、挤压强化、滚压强化等^[3-4]。形变强化方法对设备要求低, 工艺简单, 灵活性好, 受到工业界的广泛关注。然而, 其应用于叶片等复杂型面薄壁件加工时, 普遍存在非期望变形大、强化层深度浅、表面质量差等问题, 材料的表面完整性和疲劳寿命难以保证。

激光冲击强化 (Laser shock peening, LSP) 是目前最有效的表面抗疲劳强化技术之一, 可以显著改善材料表层残余应力场分布^[5]、细化表层晶粒^[6]、提高表面硬度^[7], 且可应用于多数传统表面强化技术不适用的场合。单面激光冲击强化技术, 对厚零件的强化效果良好, 但在叶片等薄壁件表面强化时, 局部微量塑性变形积累导致宏观非期望变形, 从而降低了工件尺寸精度; 此外, 单面激光冲击强化低刚度零部件时易导致剥落和断裂等问题^[8-9]。因此, 在提高零部件抗疲劳性能的同时, 提高其形状精度和表面完整性, 是复

杂型面难加工材料薄壁件表面冲击强化迫切需要解决的关键问题。

双面激光冲击强化技术是解决复杂型面薄壁件表面强化难题的理想选择。其在工件两侧采用激光束诱导局部塑性变形, 利用塑性变形的对称性消除非期望变形, 保证工件的尺寸精度; 并同时工件两侧表面进行冲击强化, 改善残余应力分布, 从而提高抗疲劳性能^[10-11]。近年来, 双面激光冲击强化吸引了大量研究的关注, 在提高零部件服役和疲劳性能方面作用愈发重要。然而, 目前尚未有双面激光冲击强化方面的研究总结。为加深业界对双面激光冲击强化技术方面的理解, 本文对其技术原理、仿真研究、应用等方面展开综述, 并对其存在的问题和发展前景进行了展望。

2 激光冲击强化技术原理及特点

单面激光冲击强化技术 (Single-sided laser shock peening, SLSP), 其实质是利用激光诱导等离子体冲击波的力效应对材料进行形变强化。具体过程如图 1 所示。当高功率密度 (GW/cm^2 量级)、短脉冲宽度 (8 ns~30 ns) 的激光辐照吸收层, 吸收层吸收激光的能量并气化形成高温高压等离子体, 等离子体继续吸收激光能量发生膨胀和爆炸产生高压 (GPa 量级) 冲击波。由于约束层的存在, 更多的冲击波传入材料内部。冲击波压力超过材料的动态屈服极限时, 材料迅速屈服并以极高应变率 ($10^6/\text{s}$) 发生弹塑性变形。在极高的应变率作用下, 材料表层产生高密度位错, 晶粒尺寸得以细化^[12]; 弹性回弹对塑性变形部分产生挤压, 形

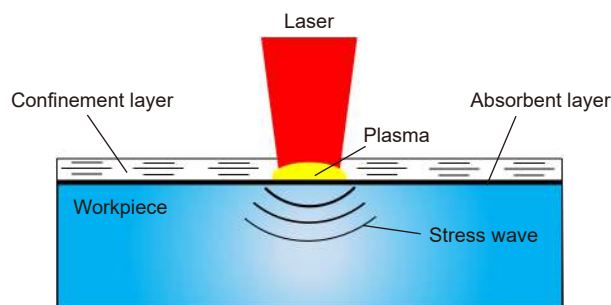


图 1 传统激光冲击强化原理图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional laser shock peening

成残余压应力^[13]。在残余压应力、高密度位错、晶粒细化的共同作用下, 材料的抗疲劳性能^[14]、抗腐蚀性能^[15]和抗磨损性能^[16]显著提高。

激光冲击强化技术具有如下特点:

1) 非接触式强化。激光器通过发射激光束照射靶材表面进行加工, 不与靶材直接接触, 因而避免了摩擦和磨损等问题, 对表面完整性影响小;

2) 强化效果好。相比于机械喷丸, 激光冲击强化后的残余应力层深度增加 5 倍以上, 且表面质量更好;

3) 适用性强。可以强化多种金属材料, 如 TC17、Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo、7050-T7451 铝合金、AM50 镁合金等, 也可以强化复杂型面结构件;

4) 可控性强。调节激光参数和工艺参数, 可以控制强化效果。

然而单面激光冲击强化过程中, 会因冲击弯曲机制、应力梯度机制而产生非期望变形^[17], 造成尺寸精度降低, 尤其是应用于低刚度薄壁件时, 其控形能力较差。

3 双面激光冲击强化技术原理

双面激光冲击强化在具有传统单面激光冲击强化技术优点的同时, 可以通过调控厚度方向上的横向塑性应变分布来抑制非期望变形, 在确保抗疲劳性能的前提下, 保证零部件的形状精度, 实现形状-性能协调控制, 并提高其抗疲劳性能。美国通用公司很早意识到双面激光冲击强化技术的技术优势, 并申请了该方面的专利^[18-19]。根据材料两侧激光入射时间是否同

步, 双面激光冲击强化可分为双面同步激光冲击强化(double-sided simultaneous laser shock peening, DSLSP)和双面异步激光冲击强化(double-sided non-simultaneous laser shock peening, DNLSPP)两类。

3.1 双面同步激光冲击强化

双面同步激光冲击强化(DSLSP)原理如图2所示。高能脉冲激光器发射的激光经过分束器被分为两束, 两束光沿着不同的传播路径同时到达靶材的相对表面, 运用激光力效应使其产生塑性变形, 防止了试样的反向变形, 并在两侧产生残余压应力, 从而进行表面强化^[20]。根据固有矩理论^[21], 由于载荷关于中平面对称, 两侧产生相同的塑性应变, 但是等效固有矩为0, 靶材性能得到强化且几何形状不变, 即双面激光冲击强化通过载荷对称性消除非期望变形, 从而控制形状。

设备方面, 双面同步激光冲击强化所需的光路提出了较高的要求。通常需要借助分束器将激光分为两束, 分离出的两束光沿不同路径同时到达工件表面, 实现双面同步激光冲击^[22]。

DSLSP相较于传统的SLSP有着鲜明的优势, 首先, 其特殊的双光路布置能将强化工时缩短一倍, 保证了强化效率并且大幅减少非期望变形, 保证工件尺寸精度; 其次, DSLSP可以避免SLSP冲击波的惯性不对称导致的断裂缺陷, 有利于保证工件完整性^[10]。但是, 其也存在以下四点问题亟待解决。第一, DSLSP将一束激光分成两束作用于工件的不同表面, 作用于工件表面的激光束的能量在分束的过程中减半, 因而需要高能或超高能脉冲激光器的介入, 增加了设备本身的制造难度和成本; 第二, DSLSP需要光束

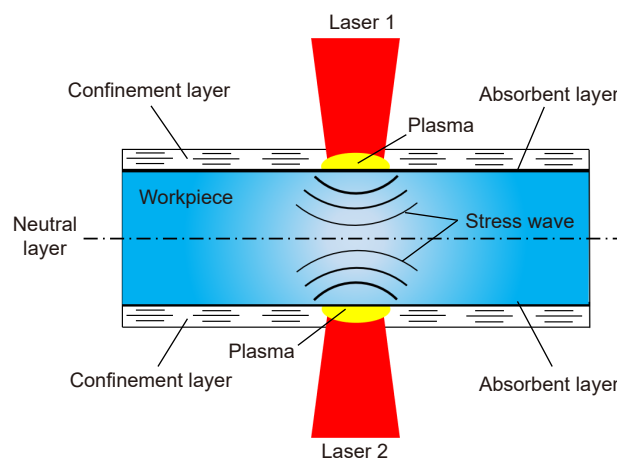


图2 双面同步激光冲击强化原理图

Fig. 2 Schematic diagram of DSLS

同时作用于工件表面, 两个分离的光束通道需要精确校准和定位而制造困难; 第三, 非规则几何形状增加了 DSLSP 的实施难度, 对于厚度非均匀变化的表面和复杂型面, 分别需要考虑动态调焦和光束可达性的问题, 对于严重非对称表面, 需要谨慎分配双面光束能量才能确保两侧的变形完全抵消; 第四, DSLSP 工艺方案需谨慎规划, 若工艺方案不合理, DSLSP 可能会导致中平面附近出现高幅值的残余拉应力或层裂, 并进一步促进裂纹的萌生和扩展, 对疲劳性能产生负面影响^[23]。因此, 双面同步冲击的控形能力强于控性能力。

3.2 双面异步激光冲击强化

为了克服 DSLSP 工艺的不足, 实现对工件形状-性能协调控制, 在 DSLSP 的基础上发展而来的双面异步激光冲击强化技术 (DNLSP), 其原理如图 3 所示。对靶材的预处理与 DSLSP 一致, 区别在于激光的入射方式。DNLSP 时, 两侧激光的入射存在先后顺序, 即第一束激光束先辐照并强化材料第 1 表面, 此时第 1 表面产生正向弯曲变形, 整体形状发生改变; 随后第二束激光辐照并强化材料第 2 表面, 在第 2 表面产生反方向弯曲变形迫使材料恢复原状, 即 DNLSP

对几何形状的控制是通过对已有的非期望变形进行校正实现的。

设备方面, 双面异步激光冲击强化技术使用的设备与常规的单侧激光冲击强化设备相同, 为商用 Nd:YAG 纳秒激光器^[24]。

DNLSP 相较于 DSLSP, 避免了因残余拉应力过高而导致的内部剥落缺陷^[22], 从而减少了裂纹的萌生和扩展, 有利于疲劳寿命的提高。然而, 虽然 DNLSP 非期望变形量远低于同参数下的 SLSP, 但是激光冲击第 1 表面后, 冲击区域材料产生弯曲变形和加工硬化, 加工硬化和弯曲变形导致的几何效应^[24]耦合作用机理不明确, 所以很难控制冲击第 2 表面产生与第 1 表面等量的塑性变形, 因而非期望变形并不能完全消除, 控形能力略差。此外, 双面异步冲击是两次单面激光冲击的叠加, 可能会因冲击惯性不对称导致低刚度构件的大变形或断裂, 所以对强化件的刚度有一定的阈值要求。因此, 双面异步冲击的控性能力强于控形能力。

从技术原理、优缺点、强化物理机制、应用领域等方面对两种双面激光冲击强化方式进行对比总结, 如表 1 所示。

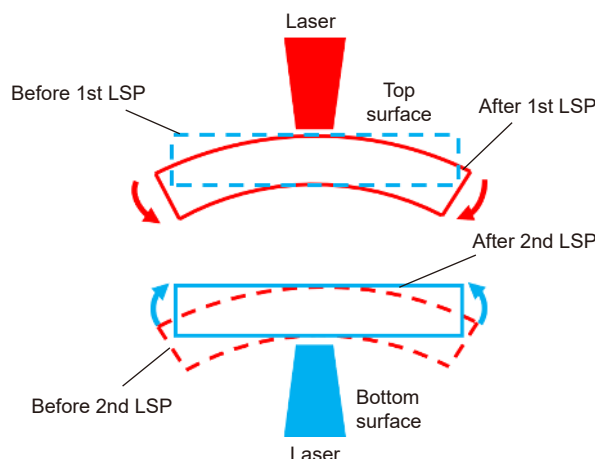


图 3 双面异步激光冲击强化原理

Fig. 3 Schematic diagram of DNLSP

表 1 双面激光冲击强化技术对比总结

Table 1 Comparison and summary of DSLSP

	DNLSP	DSLSP
技术原理	双光束上下入射	双光束同步入射
优点	控性强化	控形强化
缺点	冲击低刚度件产生大变形或断裂	中性层附近可能存在高幅值残余拉应力或层裂
物理机制	诱导近似对称分布的塑性应变	诱导完全对称分布的塑性应变
应用领域	一定刚度的薄壁件	低刚度的薄壁件

4 双面激光冲击强化过程分析

双面激光冲击强化在应力波传播、应力场分布等物理机制方面, 具有独特的特征。然而激光冲击诱导的应力波在极短的时间内以极快的速度传播、衰减, 难以通过仪器获取其内部的动态行为。因此, 许多研究者采用数值模拟方法, 对双面激光冲击强化材料应力波之间相互作用(同步冲击)、应力波与应力场相互作用(异步冲击), 及其对最终残余应力场影响等开展了研究, 为揭示其物理机制提供了理论支撑。

4.1 应力波传播

双面同步激光冲击强化(DSLSP)产生的应力波会在板材内部相互作用, 从而深刻影响板材内部应力场分布, 并最终影响工件的强化效果和疲劳性能。Braisted等^[25]率先采用商用软件Abaqus来分析DSLSP应力波的加载历程, 证明了利用有限元模拟预测工件的应力波传播和应力场分布的可行性。Fan等^[26]研究发现, DSLSP任意时刻应力波波沿厚度方向对称分布, 相向传播的应力波在中平面附近存在交互作用, 双波叠加, 从而导致DSLSP的表面残余压应力峰值相较于SLSP提高了大约33%, 并显著增加残余压应力层的周向宽度, 如图4所示, 压应力峰值和宽度的增大显示出更优异的抗疲劳性能。研究还发现, 激光脉冲持续时间显著影响应力波的传播, 持续时间越短, 冲击波的快速衰减会导致波与波的交互作用减弱, 从而导致表面残余压应力的减弱。张兴权等^[27]通过绘制波形图研究应力波在材料内部的交互作用, 结果表明由于衰减效应, 应力

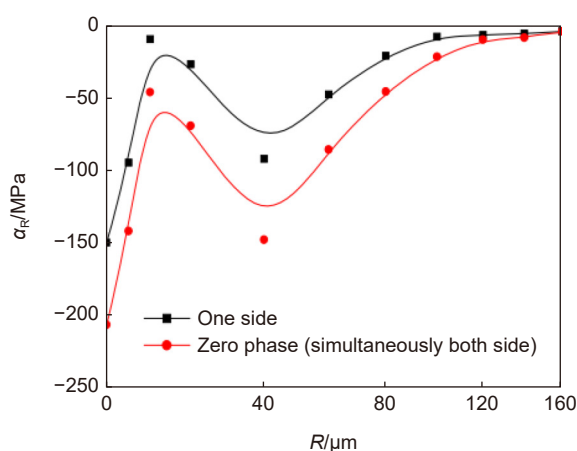


图4 工件上表面残余应力值随冲击模式的变化^[26]

Fig. 4 The variation of residual stress on workpiece surface with impact mode (one side: SLSP; zero phase: DSLSP)^[26]

波之间的第一次交互最为剧烈, 对最终应力场分布的影响最大。

欧阳佩旋等^[28]的研究结果表明, 板材厚度显著影响DSLSP时的应力波传播。对于壁厚1.2 mm的钛合金薄板, 应力波叠加后会增强原有的峰值压力, 造成中平面附近的塑性应变变化剧烈, 导致厚度方向上应力场过渡不平滑, 出现内部缺陷, 不利于疲劳寿命的提高; 增加板料厚度, 可以削弱应力波相遇时的峰值压力, 厚度方向获得平滑过渡的整体塑性应变。

张兴权等^[29]研究发现, 应力波的传播对DSLSP下吸收层的失效有着显著影响。激光脉冲产生的应力波在多层材料中的透射和反射会对吸收层产生向外拉伸作用, 当应力波的强度超过吸收层和靶材之间的粘接强度时, 吸收层会以阻尼振荡的方式从靶材上凸起, 两者发生分离, 同时靶材表面留下浅凹坑, 如图5所示。因此, 需要对应力波强度进行合理控制, 以免吸收层发生破裂失效。

通过对双面异步激光冲击强化(DNLSP)的研究发现, DNLSP发生应力波与应力场相互作用, 冲击方式对应力波的传播有着重要影响。DNLSP下中平面附近没有波的叠加, 塑性应变分布更平滑, 相较于DSLSP, 有利于部件的疲劳性能。但是, 由于应力波传播到表面反射为拉伸波, 靠近表面处的塑性应变急剧变化, 可能伴随着较大的残余拉应力和材料剥落, 因此采用DNLSP需要考虑应力波的反射问题^[28]。

Xiang等人^[30]对DSLSP对2024-T351叶片的残余应力场开展了仿真和实验研究, 结果表明, 对于诸如叶片一类的非均匀截面, 双面激光冲击的应力波的传播、交互和反射过程比常规矩形试件更为复杂, 如图6所示。

4.2 应力场分布

在双面同步激光冲击诱导应力场的研究方面, Fang等^[11]发现, 对于非对称结构件, 残余应力场仅在厚度方向沿中平面服从对称分布规律, 而表面残余压应力的最大值不在激光的中心, 而处在离光斑1.1 mm左右位置, 如图7所示, 这是因为表面波的聚集导致在光斑中心区域出现了残余拉应力, 明显削弱了原有的残余压应力。而对于几何形状对称的结构件, 残余应力场在空间上呈完全对称分布。

Zhang等^[27]研究发现, 板材厚度对DSLSP作用下应力场分布的影响非常显著, 如图8(a)所示。对于较厚板材, 随着传播距离增加, 应力波大幅衰减, 双

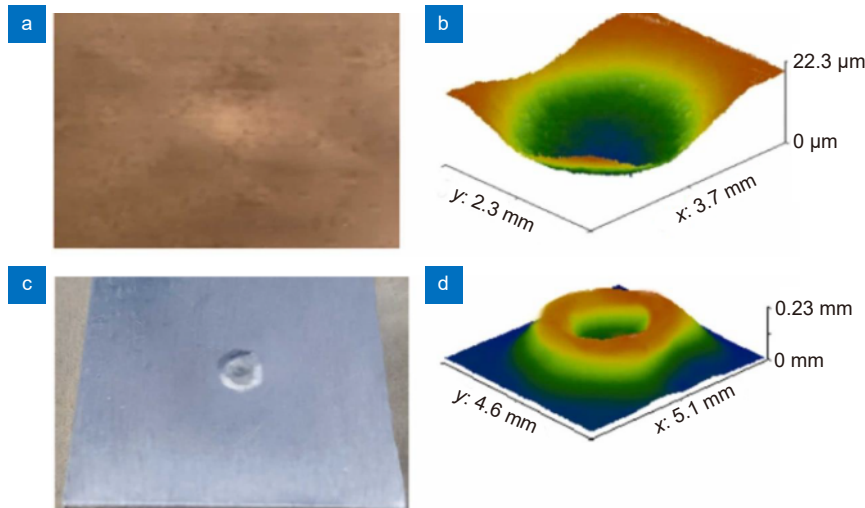


图 5 工件和吸收层形貌^[29]。(a) 工件表面形貌; (b) 工件 3D 形貌; (c) 吸收层表面形貌; (d) 吸收层 3D 形貌
Fig. 5 The topography of the workpiece and the absorption film^[29]. (a) The surface morphology of the workpiece; (b) 3D morphology of the workpiece; (c) Surface morphology of the absorption layer; (d) 3D morphology of the absorption layer

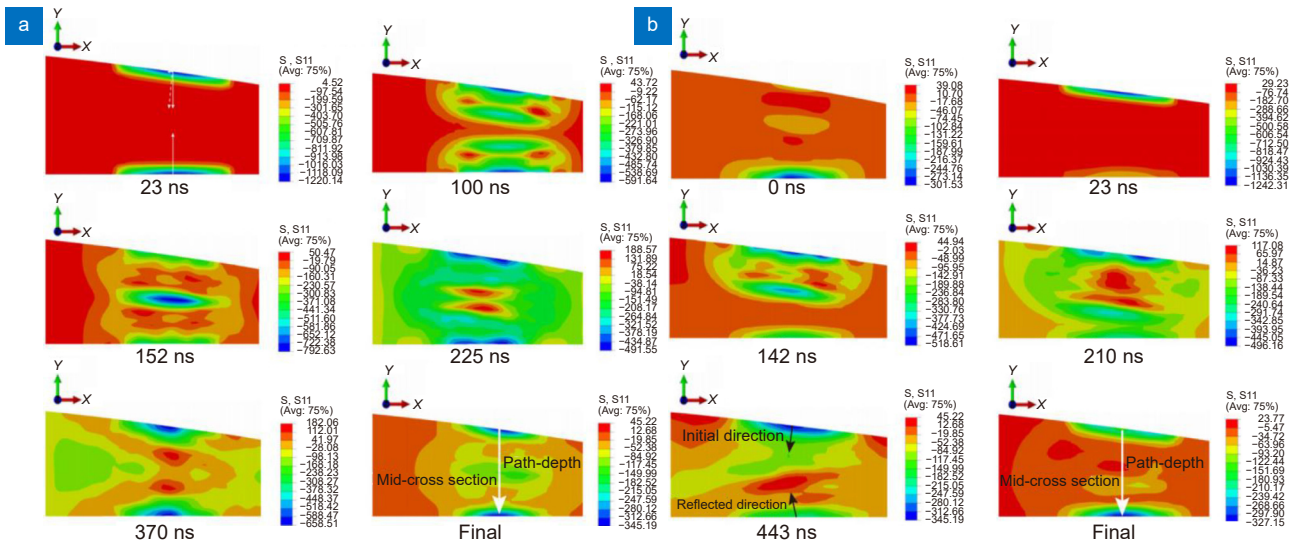


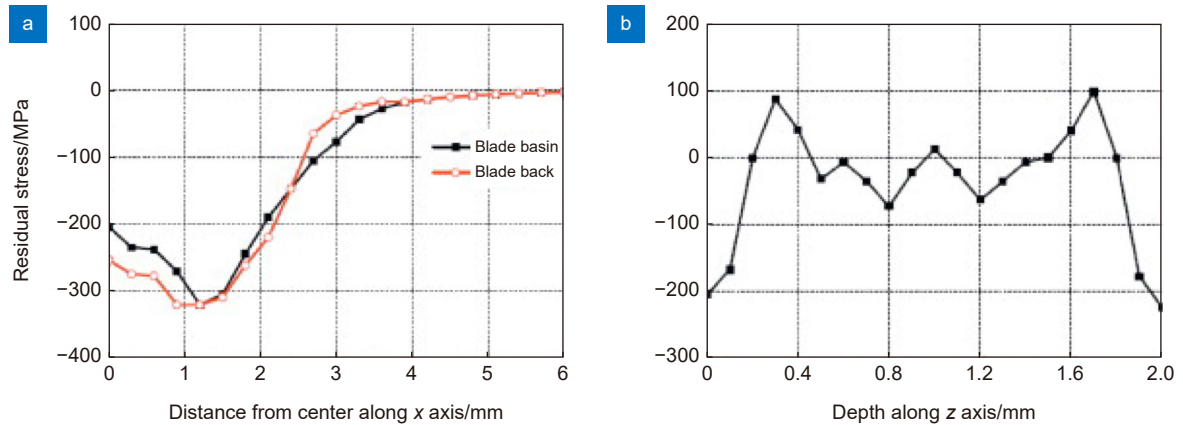
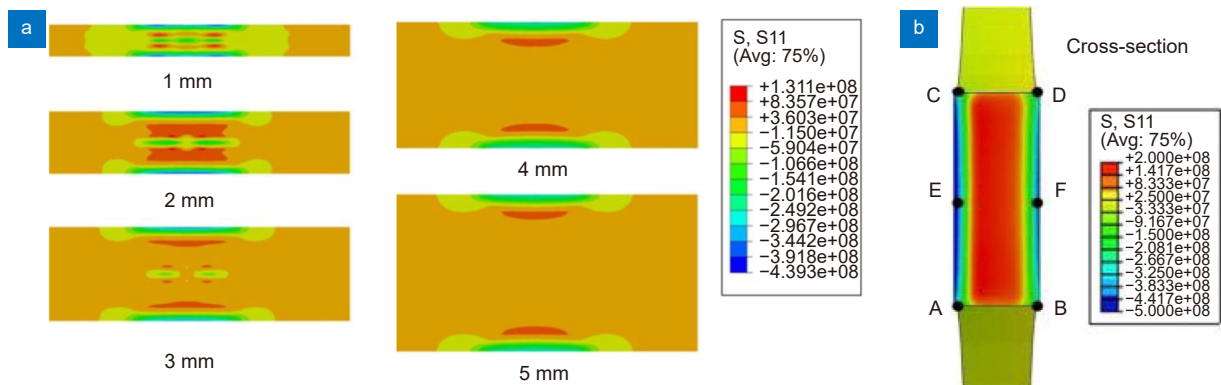
图 6 双面激光冲击强化应力波在叶片中传播^[30]。(a) DSLSP; (b) DNLSP
Fig. 6 Double-sided laser shock peening stress wave propagating in the blade^[30]. (a) DSLSP; (b) DNLSP

波在中平面叠加后峰值压力降低到低于材料的动态屈服极限, 中平面周围不会产生残余应力, 呈现压-拉-无-拉-压残余应力场分布, 后续为了保持板材内力平衡, 中平面会产生残余拉应力与之平衡; 对于相当薄的板材, 因为双面激光冲击强化上下表面的激波发生交互作用和叠加效应, 应力场沿厚度方向呈压-拉-压-拉-压交错对称分布。Nam 等^[31]对相当薄的板材进行 DSLSP 后, 中平面也观察到生成局部残余压应力的出现。

Ayeb 等^[32]研究发现, 激光脉冲的冲击次数增加, 可以提高零部件 DSLSP 后的残余应力幅值, 并增加

残余应力场厚度, 从而提高叶片的疲劳性能。Ling^[33]等人研究了激光功率密度、脉冲持续时间对 304 不锈钢焊接件的最终残余压应力场分布的影响, 结果表明, 激光功率密度的增大, 脉冲持续时间的增长, 有利于表面残余压应力层的厚度和大小的增大。

双面激光冲击强化在厚度方向的诱导的残余应力场分布, 不仅与板材厚度、冲击次数、激光功率密度和脉冲持续时间相关, 还与冲击方式有关。Correa^[34]等研究发现, DNLSP 厚度方向上为压-拉-压应力非对称分布, 如图 8(b) 所示, 呈现出与 DSLSP 完全不同的分布特征, 当板材厚度增大, 冲击波压力传播到中

图7 双面同步激光冲击强化的残余应力^[11]。(a) 表面残余应力; (b) 厚度方向残余应力Fig. 7 Residual stress induced by DSLSP^[11]. (a) Surface residual stress; (b) Residual stress in the thickness direction图8 双面激光冲击强化后的残余应力场。(a) 板材厚度对双面同步激光冲击强化残余应力场影响^[27];(b) 双面异步激光冲击强化残余应力场^[34]Fig. 8 Residual stress field of DLSP. (a) Effect of sheet thickness on the residual stress field of DSLSP^[27]; (b) Residual stress field of DNLSP^[34]

平面前低于动态屈服极限, 此时每次冲击均不会引起对侧材料的塑性变形, 因而应力倾向于呈压-拉-无-拉-压应力分布, 厚度的增大使应力场的分布趋于对称。欧阳佩璇^[28]发现, 冲击方式对残余应力分布的影响比工件厚度和激光功率密度更明显, 对于 DNLSP, 沿厚度方向也呈现压-拉-压应力规律, 残余应力分布的差异可以用激波传播理论来解释, 如波的相互作用和自由表面的反射。研究还发现, DSLSP 比 DNLSP 在上下表面获得的残余应力场更对称。

Xiang 等人^[30]对具有非矩形截面的叶片进行了仿真和实验研究, 结果表明, DNLSP 可以极大地限制边缘处应力的集中, 得到更有利的残余应力分布, 如图 9(a) 所示; 而 DSLSP 会在边缘处产生较强的拉应力集中现象, 如图 9(b) 所示。

综上所述, 对于双面激光冲击强化, 冲击方式和几何形状是影响残余应力波传播和应力场分布的

关键因素, 其影响规律如表 2 所示。具体表现为: 冲击方式决定应力波是否存在相互作用, 厚度影响应力波的相互作用程度, 厚度增大, 应力场的分布趋于一致。

5 双面激光冲击强化的应用

5.1 几何形状控制

实现几何形状控制(控形), 保证零部件的尺寸精度, 是双面激光冲击强化的重要用途之一, 控形效果对冲击方式(双面同步、双面异步)体现出较强的依赖性, 也因冲击方式的差异体现出不同的特点。

在钛合金双面异步激光冲击强化控形方面, 胡永祥等人^[22]的研究结果表明, 相比于单面冲击强化, 在厚度方向上, 双面异步冲击可以诱导近似对称分布的横向塑性应变, 如图 10(a) 所示, 此时横向塑性应变作用于横截面的等效弯矩大幅降低, 如图 10(b) 所

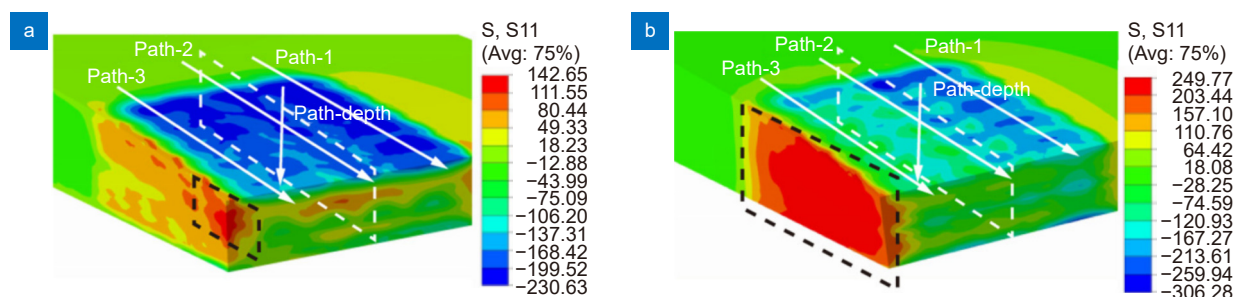


图 9 双面激光冲击诱导边缘处应力分布^[30]。(a) DNLSP; (b) DSLSP

Fig. 9 Stress distribution at the edge induced by double-sided laser shock peening^[30]. (a) DNLSP; (b) DSLSP

表 2 冲击方式和厚度对应力波传播和应力场分布的影响

Table 2 Effects of impact mode and thickness on stress wave propagation and stress field distribution

	双面同步冲击	双面异步冲击
	(应力波相互作用强)	(应力波无相互作用)
薄壁件	CRS-TRS-CRS-TRS-CRS	CRS-TRS-CRS
	对称分布	非对称分布
	(应力波相互作用弱)	(应力波无相互作用)
厚壁件	CRS-TRS-0-TRS-CRS	CRS-TRS-0-TRS-CRS
	对称分布	对称分布

CRS: compressive residual stress; TRS: tensile residual stresses; 0: no residual stress

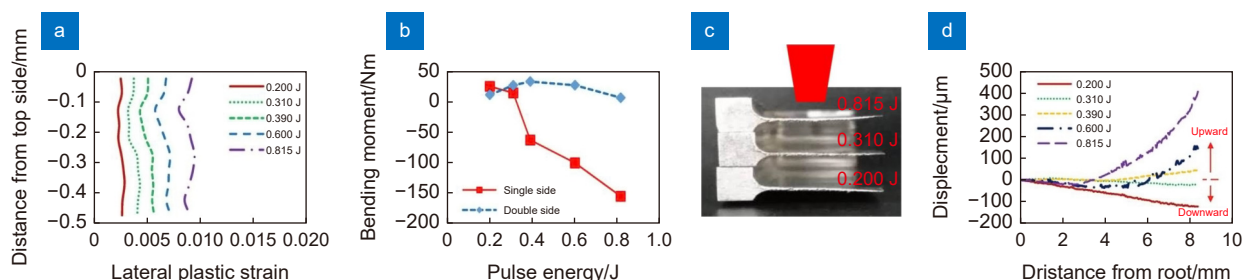


图 10 双面异步激光冲击强化钛合金薄壁件^[22]。(a) 厚度方向横向塑性应变分布; (b) 不同能量下单面冲击和双面冲击的等效弯矩; (c) 冲击强化后的零件; (d) 轮廓曲线图

Fig. 10 Titanium alloy sheet subject to DNLSP^[22]. (a) Transverse plastic strain distribution in the thickness direction; (b) Equivalent bending moment of SLSP and DLSP under different energy; (c) Parts after laser shock peening; (d) Contour graph

示, 因而仅产生微量非期望变形。如图 10(c)、10(d) 所示, 当单脉冲能量为 0.2 J、0.31 J、0.6 J、0.815 J, 厚度为 0.5 mm 的钛合金强化件非期望变形抑制率分别达 91.7%、72.6%、77%、94.4%, 表明在高压低刚度条件下, 双面异步冲击仍可使强化件保持近似平直的状态。值得注意的是, 双面异步激光冲击强化产生的非期望变形主要出现在边缘处, 因此对于尺寸精度要求的器件, 需要着重对边缘处的非期望变形进行控制。

Zhao 等^[35] 模拟 2 mm TC17 钛合金板料边缘强化后的变形, 发现无论采用何种扫描路径, 双面同步激

光冲击强化后仅在冲击区域产生微量塑性变形, 而未冲击区域则无塑性变形, 如表 3 所示, 最大非期望变形数值被控制在微米量级, 由此可见双面同步激光冲击强化控形效果极强, 且不受具体工艺参数选择的影响。双面异步激光冲击强化后, 未冲击区域在冲击区域变形的带动下, 也会产生非期望变形, 但由于变形的抵消作用, 非期望变形量被控制在 0.1 mm 量级以内, 相较于同参数下单面冲击强化, 变形大幅降低, 但控形能力始终弱于 DSLSP。

双面同步激光冲击强化技术相较于双面异步激光冲击强化技术, 在控形能力方面表现更为优异, 两者

均远优于单面激光冲击强化技术。双面激光冲击强化技术控形能力的提高,关键在于使厚度方向横向塑性应变产生的等效弯矩趋于0。

5.2 抗疲劳性能提升

双面激光冲击强化提升抗疲劳性能(控性)研究主要集中在抗疲劳机理研究和工艺研究两方面。

5.2.1 疲劳机理研究

双面冲击强化的机理呈现出一定的复杂性。一方面,双面冲击的整体性强化效果能显著提升疲劳寿命,诱导的晶粒细化和表面残余压应力可以强化抗疲劳性能。这是因为,一者,双面激光冲击强化产生大量的位错,并进一步促进位错胞、位错墙和亚晶粒的形成,以及晶粒的细化^[36-37]。晶粒细化有助于降低的裂纹萌生速率,从而抑制疲劳裂纹扩展,如图11所示^[38];二者,工件表面产生稳定的残余压应力。残余压应力能够减小如尖角等易发生应力集中的薄弱环节表层应力幅值,使表层的总应力值大大低于强化层的疲劳极限^[39],又能够提高疲劳裂纹扩展阈值,还能对疲劳裂纹产生闭合效应,从而抑制裂纹萌生,减缓裂纹扩展,提高疲劳寿命^[40]。然而,双面同步激光冲击强化也可能在表面产生残余压应力之后,在材料内部会平衡出幅值更大或者跨度更宽的残余拉应力,导致残余应

力沿厚度分布不合理,其还会在内部诱导产生剥落、断裂等缺陷,从而降低抗疲劳性能,如图12所示^[41]。

5.2.2 工艺研究

双面激光冲击强化提升抗疲劳性能的工艺研究包括扫描路径、冲击区域、厚度选择等方面,通过优化工艺可以获得最优分布的表层组织和应力场分布,从而获得最大限度的疲劳增益。

激光冲击强化是一个多点渐进加载的过程,加载顺序影响最终残余应力的分布,扫描路径是加载顺序最直观的体现。Bhamare等^[42]对Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo试样优化扫描路径实现了对弯曲疲劳寿命的显著提高。聂祥樊等^[43]的研究结果表明,扫描路径规划不合理会影响整体的疲劳条纹数,从而降低疲劳寿命。按照图13(a)所示Z形扫描路径强化TC17钛合金叶片后,疲劳极限降低了11.3%,而按图13(b)所示扫描路径强化后,疲劳极限提高了14.1%。Correa等^[34]发现,双面异步冲击316L不锈钢,激光扫描前进方向垂直于疲劳载荷方向获得的疲劳寿命提高471%,显著高于平行于疲劳载荷方向的166%。这是因为垂直方向较之于平行方向,可以获得更大的残余压应力,且压应力场均匀性和一致性更好,从而更好地抑制裂纹的

表3 不同扫描路径下单面、双面同步和双面异步冲击下强化件的最大变形

Table 3 Maximum deformation of the model in single-sided, double-sided simultaneous (DSLSP) and double-sided non-simultaneous(DNLSP) shock under different scan paths

	扫描路径1/mm	扫描路径2/mm	扫描路径3/mm
单面	-1.091	-1.070	-1.098
双面同步	-0.00409	-0.00415	-0.00427
双面异步	-0.1164	-0.1327	-0.1122

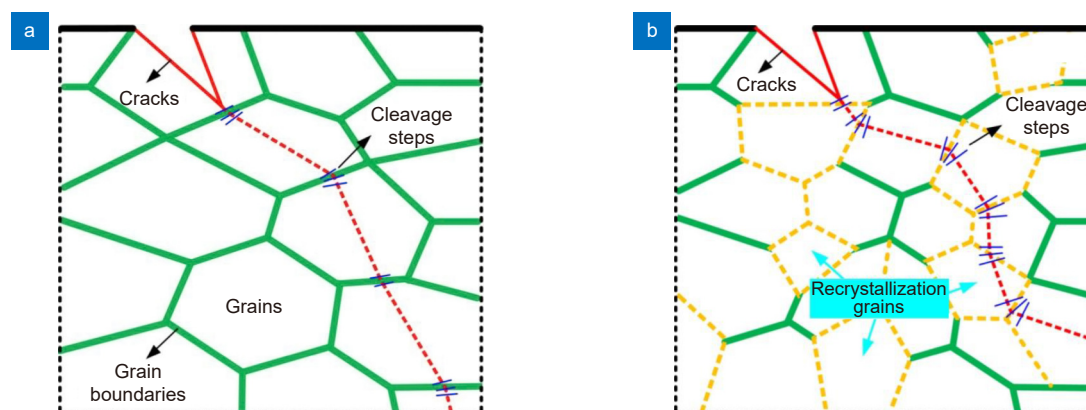
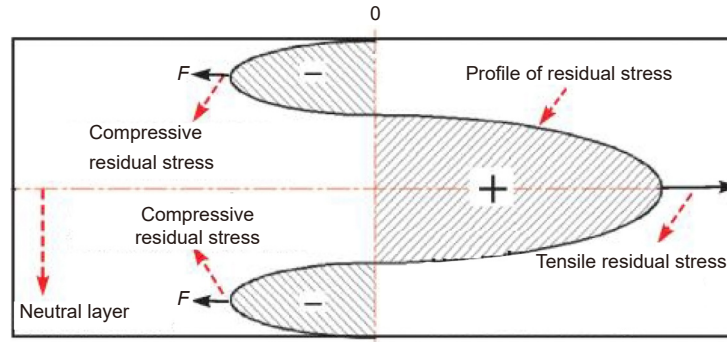
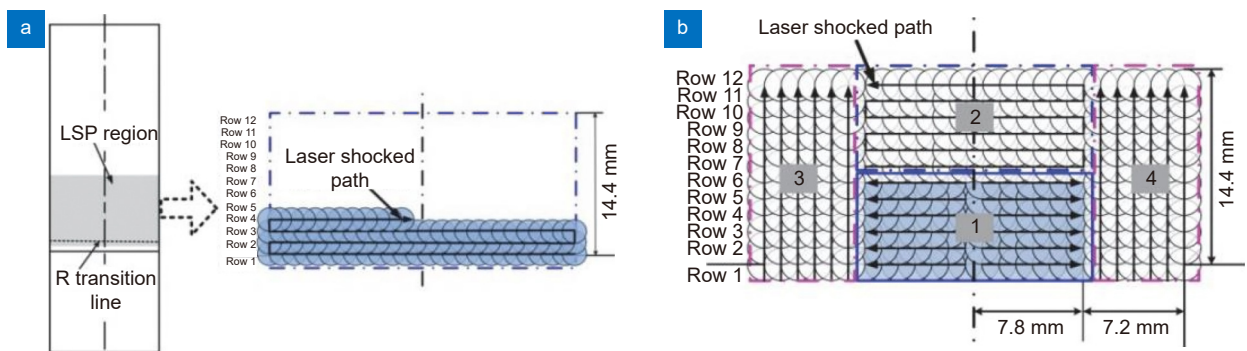


图11 裂纹扩展路径^[38]。(a)晶粒细化前;(b)晶粒细化后

Fig. 11 Crack propagation path^[38]. (a) Before grain refinement; (b) After grain refinement

图 12 双面同步激光冲击强化产生不合理的应力分布^[41]Fig. 12 Unfavorable stress distribution induced by DSLSP^[41]图 13 两种不同的扫描路径^[43]. (a) Z型扫描路径; (b) 优化后的扫描路径Fig. 13 Two different scan paths^[43]. (a) Z-scan path; (b) Optimized scanning path

萌生和扩展^[44]。张磊等人^[45]以双面异步冲击方式强化 7050-T7451 铝合金, 发现随着激光喷丸路径的增多, 疲劳寿命增加, 且疲劳裂纹萌生区逐渐由表面向内部转移, 疲劳裂纹扩展区内裂纹层变多, 裂纹间距减小, 二次裂纹增多。Correa 等^[46]采用如图 14 所示的三种不同的扫描路径优化了残余应力的大小和分布, 研究发现, 扫描路径 3 能迫使边缘的残余拉应力向材料内部转移, 并在边缘处诱导出高幅值的残余压应力, 从而大幅提高疲劳寿命。Zhao 等^[35]研究发现, 如图 15 所示的往复路径 3 激光冲击强化相较于锯齿路

径 1 和 2 激光冲击强化具有更小的冲击变形和更高的残余应力。

激光冲击强化边缘区域时, 传到边缘的冲击波变为拉伸波并反向传播, 导致边缘处出现密集的残余拉应力, 降低疲劳寿命, 因此需要谨慎选择冲击区域规避应力波的边缘反射。孙汝剑等^[47]的研究结果表明, 冲击区域设计不合理会降低疲劳寿命, 如图 16(a) 和 16(b), 其原因在于边缘处的材料受约束弱, 冲击边缘部分时, 引发边缘效应, 造成几何不连续、局部塌陷, 出现了应变集中现象, 如

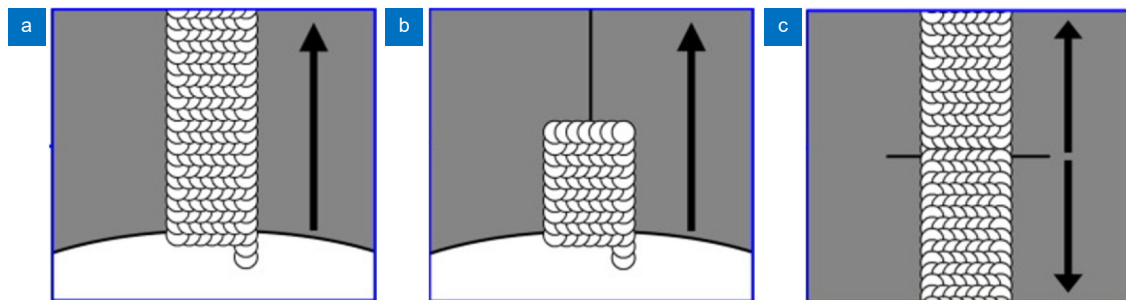
图 14 不同的加载路径^[46]. (a) 路径 1; (b) 路径 2; (c) 路径 3Fig. 14 Different laser shock processing strategies^[46]. (a) Path 1; (b) Path 2; (c) Path 3

图 16(c) 所示。Yang 等^[48] 人研究采用如图 17 所示的两种冲击区域不同的 DSLSP 加载方式对试样前缘抗疲劳性能和抗异物损伤性能, 研究发现经图 17(c) 的冲击区域处理比图 17(b) 的冲击区域处理, 试样的最大疲劳寿命分别较原材提高 94% 和 169%, 激光喷丸区域与零件边缘部位保持一定距离可以产生软硬交替的吸能结构, 如图 18 所示, 在外物撞

击时, “软区” 有较好的缓冲作用, 有利于抑制疲劳裂纹的形成, 而“硬区” 则有利于抑制疲劳裂纹的扩展。因此, 激光冲击区域的边界与零件的几何边界保持一定的距离, 有助于提高材料的抗疲劳性能和抗异物损伤性能。

工件厚度对应力波传播和残余应力场分布有着显著的影响, 进而影响最终的疲劳性能。Luo 等人^[49] 进

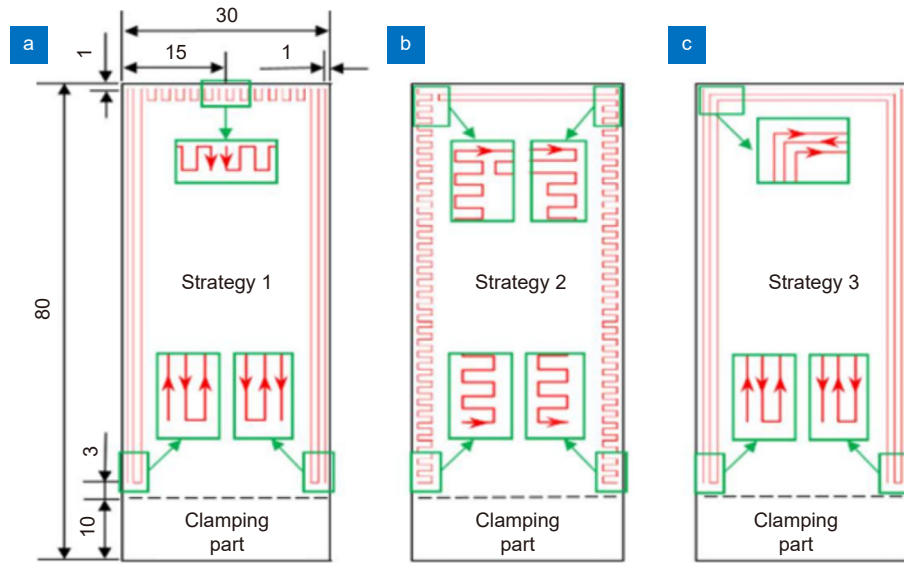


图 15 不同的激光冲击路径^[35]。(a) 路径 1; (b) 路径 2; (c) 路径 3

Fig. 15 Different laser shock processing strategy^[35]. (a) Strategy 1; (b) Strategy 2; (c) Strategy 3

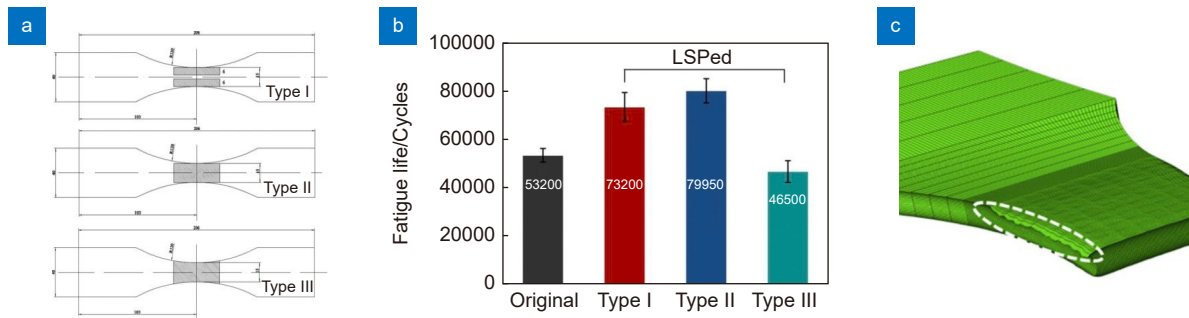


图 16 双面同步激光冲击区域设计对强化效果的影响^[47]。(a) 冲击区域设计; (b) 延寿效果; (c) 边缘坍塌

Fig. 16 Influence of region design of DSLSP on the strengthening effect^[47]. (a) Impact zone design; (b) Life extension effect; (c) Edge collapse

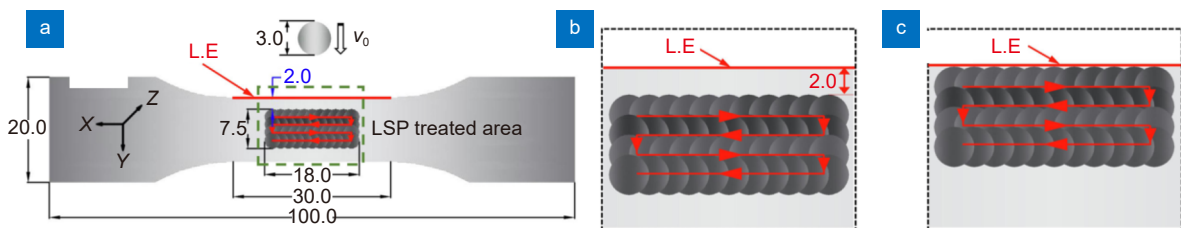


图 17 两种冲击区域不同的 DSLSP 加载方式^[48]。(a) 工件的几何尺寸; (b) 冲击区域 1; (c) 冲击区域 2

Fig. 17 Different DSLSP loading modes in two impact regions^[48]. (a) Geometric dimensions of the workpiece; (b) Impact area 1; (c) Impact area 2

行镁铝锰合金双面激光冲击强化研究发现, 冲击波相互作用如图 19 所示, 对于薄壁件, 残余压应力不但存在于两侧表面层, 还存在于中平面; 对于厚壁件, 残余压应力仅存在于两侧表面层, 中平面产生残余拉应力。厚壁件在厚度方向上的残余拉应力在循环外力作用下, 裂纹在拉应力区域容易得到萌生和扩展, 导致工件疲劳寿命的减小。若板材需达到一定的壁厚要求, 可以在工件整个表面上增大激光光斑重叠率, 从

而提高工件的疲劳寿命^[50-51]。Zhang 等^[52]研究了薄壁件厚度方向残余应力随板材厚度的变化, 如图 20 所示, 研究表明, 中面层的残余压应力厚度和大小随着板材厚度的增大而降低, 呈反比关系, 板材厚度的增大造成薄壁件疲劳寿命的降低。对于厚壁件, 增大材料厚度可以增强双向应力波相遇前的衰减程度, 降低双向冲击波叠加后的峰值应力, 避免材料内部出现高峰值拉应力及断裂缺陷。罗开玉等^[53]基于 AM50 镁

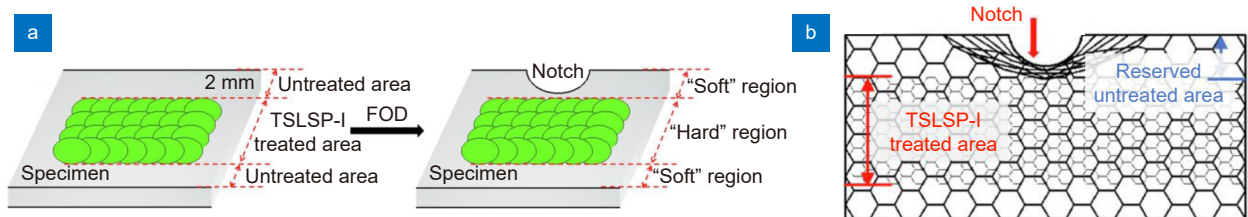


图 18 激光冲击强化产生的软硬交替吸能结构和晶粒分布细化。(a) 软硬交替吸能结构; (b) 晶粒分布细化^[48]

Fig. 18 Soft and hard alternate energy absorption structures and grain distribution refined by laser shock peening.

(a) Soft and hard alternating energy absorbing structures; (b) Grain distribution refinement^[48]

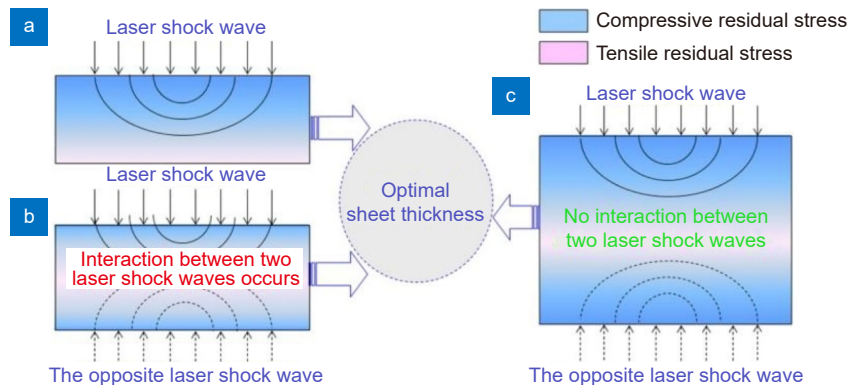


图 19 Mg-Al-Mn 合金在 DSLSP 下的冲击波相互作用^[49]。(a) 单面激光冲击强化影响;

(b) 薄板双面同步激光冲击强化; (c) 薄板双面异步激光冲击强化。

Fig. 19 Schematic illustrations of laser shock wave interaction on Mg-Al-Mn alloy sheet subjected to DSLSP^[49]. (a) One-sided LSP impacts;

(b) Two-sided and simultaneous LSP impacts for the thin sheet; (c) Two-sided and simultaneous LSP impacts for the thin sheet

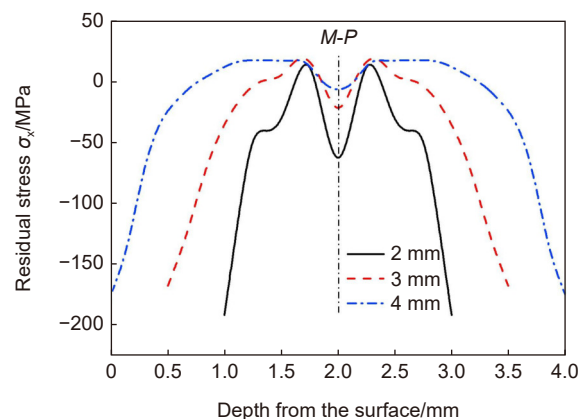


图 20 厚度方向的残余应力随板材厚度的变化^[52]

Fig. 20 Variation of residual stress along the thickness direction^[52]

合金的研究发现, 随着板材厚度增大到某一阈值后, 表面径向方向和轴向方向的残余压应力峰值达到峰值, 因此, 厚壁件的板材厚度不能单方面增大, 需选取合适厚度的板材。

6 总结与展望

激光冲击强化是提高结构件抗疲劳性能的有效手段, 双面激光冲击强化通过在工件两侧利用激光的力效应进行表面强化, 在调控复杂型面薄壁件的形状-性能方面具有不可替代的优势。本文在介绍单面激光冲击强化技术特点和不足的基础上, 介绍了两种双面激光冲击强化技术的原理和技术特点, 指出双面同步激光冲击强化技术的优势在于较强的控形能力, 双面异步激光冲击强化技术的优势在于较强的控性能力。对双面激光冲击强化的应力波传播、应力场分布等过程进行了分析, 并对双面激光冲击强化在几何形状控制、抗疲劳性能提升等方面的应用进行了综述。为进一步增强复杂化、整体化薄壁结构件的疲劳性能, 实现形状精度-疲劳性能的协调控制, 未来可从如下方面, 深入开展双面激光冲击强化的研究工作:

1) 复杂型面双面激光斜冲击强化。针对具有相互遮挡型面的复杂结构件, 采用斜冲击方式解决光路不可达和光路干涉等问题, 在此基础上探究型面形状和入射角对冲击强化效果的协同作用机制, 为解决复杂型面疲劳延寿问题提供理论指导。

2) 双面异步冲击强化形状控制。在考虑加工硬化的前提下建立双面异步激光冲击强化控形控性的理论解析模型, 指导双面异步激光冲击强化的工艺规划。

3) 双面激光冲击强化形状-性能高效调控。开展疲劳服役状态下应力松弛和表面微观组织演化的研究, 探究梯度残余应力对于疲劳性能的强化机制及表层组织与残余应力耦合作用机理, 通过残余应力场和表层组织的最优匹配实现形状-性能的高效调控。

4) 恶劣服役环境下稳定双面激光冲击强化。现有涡轮盘等航空部件, 长期工作在高温、高压、高转速等恶劣服役环境下, 需探究恶劣服役环境下的残余应力热松弛行为原理, 从而提高恶劣环境下双面冲击强化的稳定性。

5) 除数值模拟与实验研究等手段外, 还可采用近年来新兴的技术, 如深度学习方法^[54], 对双面激光冲击强化技术进行过程监测, 进而指导其工艺优化。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, et al. The application status and development of laser shock processing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(2): 170690.
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.
- [2] Zhu Y L, Wang Y L, Bian F L, et al. Progresses on research and application of metal ultrasonic surface enhancement technologies[J]. *J Mech Eng*, 2014, **50**(20): 35–45.
朱有利, 王燕礼, 边飞龙, 等. 金属材料超声表面强化技术的研究与应用进展[J]. *机械工程学报*, 2014, **50**(20): 35–45.
- [3] Cong J H, Wang L. Research status and application progress of ultrasonic shot peening surface strengthening technology[J]. *Mater Mech Eng*, 2019, **43**(5): 1–5.
丛家慧, 王磊. 超声喷丸表面强化技术的研究现状与应用进展[J]. *机械工程材料*, 2019, **43**(5): 1–5.
- [4] Tang C B, Liu D X, Tang B, et al. Influence of plasma molybdenizing and shot-peening on fretting damage behavior of titanium alloy[J]. *Appl Surf Sci*, 2016, **390**: 946–958.
- [5] Huang X, Cao Z W, Chang M, et al. Effects of laser shock processing on fatigue performances of TC4 titanium alloy single-side laser modification welding joints[J]. *China Mech Eng*, 2018, **29**(1): 104–109.
黄潇, 曹子文, 常明, 等. 激光冲击强化对TC4钛合金单面修饰激光焊接接头疲劳性能的影响[J]. *中国机械工程*, 2018, **29**(1): 104–109.
- [6] Li J, Feng A X, Zhou J Z, et al. Enhancement of fatigue properties of 2024-T351 aluminum alloy processed by cryogenic laser peening[J]. *Vacuum*, 2019, **164**: 41–45.
- [7] Siddaiah A, Mao B, Kasar A K, et al. Influence of laser shock peening on the surface energy and tribocorrosion properties of an AZ31B Mg alloy[J]. *Wear*, 2020, **462–463**: 203490.
- [8] King A, Evans A D, Preuss M, et al. Study of residual stresses introduced by laser shock peening in wide chord fan blades by neutron and synchrotron diffraction[J]. *J Neutron Res*, 2004, **12**(1–3): 207–211.
- [9] Mannava S R, Risbeck J D, Jacobs L G. Distortion control for laser shock peened gas turbine engine compressor blade edges: US5531570A[P]. 1996-07-02.
- [10] Ding K. FEM simulation of two sided laser shock peening of thin sections of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Surf Eng*, 2003, **19**(2): 127–133.
- [11] 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]. *Mater Sci Eng A*, 2013, **559**: 683–692.
- [12] Ren X D, Yang X Q, Zhou W F, et al. Thermal stability of surface nano-crystallization layer in AZ91D magnesium alloy induced by laser shock peening[J]. *Surf Coat Technol*, 2018, **334**: 182–188.
- [13] Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, et al. Evaluating methods for quality of laser shock processing[J]. *Optik*, 2020, **200**: 162940.
- [14] Peyre P, Fabbro R, Merrien P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Mater Sci Eng A*, 1996, **210**(1–2): 102–113. doi: 10.1016/0921-5093(95)10084-9.

- [15] Peyre P, Berthe L, Fabbro R, et al. Corrosion reactivity of laser-peened steel surfaces[J]. *J Mater Eng Perform*, 2000, **9**(6): 656–662.
- [16] Sánchez-Santana U, Rubio-González C, Gomez-Rosas G, et al. Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing[J]. *Wear*, 2006, **260**(7–8): 847–854. doi: 10.1016/j.wear.2005.04.014.
- [17] Hu Y X, Xu X X, Yao Z Q, et al. Laser peen forming induced two way bending of thin sheet metals and its mechanisms[J]. *J Appl Phys*, 2010, **108**(7): 073117.
- [18] Graham M E, Jackson J D. Dual laser shock peening: 6479790[P]. 2002-11-12.
- [19] Mannava S, Wright III P K, Azad F H, et al. Single sided laser shock peening: 6559415[P]. 2003-05-06.
- [20] Ge M Z, Xiang J Y, Yang L, et al. Effect of laser shock peening on the stress corrosion cracking of AZ31B magnesium alloy in a simulated body fluid[J]. *Surf Coat Technol*, 2017, **310**: 157–165.
- [21] Luo M S, Hu Y X, Hu L, et al. Efficient process planning of laser peen forming for complex shaping with distributed Eigen-moment[J]. *J Mater Process Technol*, 2020, **279**: 116588.
- [22] Hu Y X, Yang R Y, Wang D Y, et al. Geometry distortion and residual stress of alternate double-sided laser peening of thin section component[J]. *J Mater Process Technol*, 2018, **251**: 197–204.
- [23] Ivetic G. Three-dimensional FEM analysis of laser shock peening of aluminium alloy 2024-T351 thin sheets[J]. *Surf Eng*, 2011, **27**(6): 445–453.
- [24] Hu Y X, Xie Y F, Wu D, et al. Quantitative evaluation of specimen geometry effect on bending deformation of laser peen forming[J]. *Int J Mech Sci*, 2019, **150**: 404–410.
- [25] Braisted W, Brockman R. Finite element simulation of laser shock peening[J]. *Int J Fatigue*, 1999, **21**(7): 719–724.
- [26] Fan Y J, Wang Y N, Vukelic S, et al. Numerical Investigation of opposing dual sided micro scale laser shock peening[J]. *J Manuf Sci Eng*, 2007, **129**(2): 256–264.
- [27] Zhang X Q, Li H, Duan S W, et al. Modeling of residual stress field induced in Ti-6Al-4V alloy plate by two sided laser shock processing[J]. *Surf Coat Technol*, 2015, **280**: 163–173.
- [28] Ouyang P X, He L J, Li P J, et al. Effect of dual-sided laser peening modes on residual stress distribution of aero-engine titanium blades[M]//Han Y F. *Advances in Materials Processing*. Singapore: Springer, 2017: 29–45. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0107-0_4.
- [29] Zhang X Q, Chen T, Zhang Y, et al. Investigation on failure mechanism of the absorption film subjected to double-sided laser shock processing[J]. *Optik*, 2022, **251**: 168363.
- [30] Xiang Y F, Mei R L, Zhao L Z, et al. Effects of processing parameters on residual stress fields of 2024-T351 alloy blade subjected to massive double-sided laser peening treatment[J]. *J Laser Appl*, 2022, **34**(2): 022015.
- [31] Nam T. Finite element analysis of residual stress field induced by laser shock peening[D]. Columbus: The Ohio State University, 2002.
- [32] Ayeb M, Frija M, Fathallah R. Influence of multiple laser impacts on thin leading edges of turbine blade[J]. *Proc Inst Mech Eng L J Mater Des Appl*, 2020, **234**(1): 130–143.
- [33] Ling X, Peng W W, Ma G. Influence of laser peening parameters on residual stress field of 304 stainless steel[J]. *J Pressure Vessel Technol*, 2008, **130**(2): 1030–1036.
- [34] Correa C, De Lara L R, Diaz M, et al. Effect of advancing direction on fatigue life of 316L stainless steel specimens treated by double-sided laser shock peening[J]. *Int J Fatigue*, 2015, **79**: 1–9.
- [35] Zhao M H, Duan C H, Li J Y, et al. Deformation and residual stress characteristics of TC17 alloy subjected to laser shock peening with single and double sides[J]. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2019, **493**: 012001.
- [36] Trdan U, Skarba M, Grum J. Laser shock peening effect on the dislocation transitions and grain refinement of Al-Mg-Si alloy[J]. *Mater Charact*, 2014, **97**: 57–68.
- [37] Chen L, Ren X D, Zhou W F, et al. Evolution of microstructure and grain refinement mechanism of pure nickel induced by laser shock peening[J]. *Mater Sci Eng A*, 2018, **728**: 20–29.
- [38] Meng X K, Wang H, Tan W S, et al. Gradient microstructure and vibration fatigue properties of 2024-T351 aluminium alloy treated by laser shock peening[J]. *Surf Coat Technol*, 2020, **391**: 125698.
- [39] Pantelakis S G, Petroyiannis P V, Bouzakis K D, et al. Surface hardness increase of 2024 aluminum alloy subjected to cyclic loading[J]. *Theor Appl Fract Mech*, 2007, **48**(1): 68–81.
- [40] 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]. *Opt Laser Technol*, 2020, **121**: 105784.
- [41] Zhang L, Lu J Z, Zhang Y K, et al. Effects of processing parameters on fatigue properties of LY2 Al alloy subjected to laser shock processing[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, **9**(6): 061406.
- [42] 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]. *Surf Coat Technol*, 2013, **232**: 464–474.
- [43] Nie X, Li Y, He W, et al. Optimization and fracture mechanism analysis of TC17 titanium alloy simulated-blade with two-sided laser shock processing[M]//Ye L. *Recent Advances in Structural Integrity Analysis-Proceedings of the International Congress*. Amsterdam: Elsevier, 2014: 2–6. <https://doi.org/10.1533/9780081002254.2>.
- [44] Wang C Y, Luo K Y, Lu J Z. Effect of advancing direction on residual stress fields of AM50 Mg alloy specimens treated by double-sided laser shock peening[J]. *Chin J Lasers*, 2016, **43**(3): 0303002.
王长雨, 罗开玉, 鲁金忠. 双面激光喷丸条件下冲击前进方向对AM50镁合金试样残余应力场的影响[J]. *中国激光*, 2016, **43**(3): 0303002.
- [45] Zhang L, Lu J Z, Zhang Y K, et al. Effects of different shocked paths on fatigue property of 7050-T7451 aluminum alloy during two-sided laser shock processing[J]. *Mater Des*, 2011, **32**(2): 480–486.
- [46] Correa C, Ruiz de Lara L, Díaz M, et al. Influence of pulse sequence and edge material effect on fatigue life of Al2024-T351 specimens treated by laser shock processing[J]. *Int J Fatigue*, 2015, **70**: 196–204.
- [47] Sun R J, Che Z G, Cao Z W, et al. Fatigue behavior of Ti-17 titanium alloy subjected to different laser shock peened regions and its microstructural response[J]. *Surf Coat Technol*, 2020, **383**: 125284.
- [48] 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]. *Int J Fatigue*, 2020, **136**: 105596.
- [49] Luo K Y, Liu B, Wu L J, et al. Tensile properties, residual stress distribution and grain arrangement as a function of

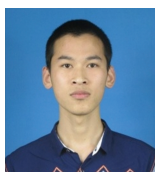
sheet thickness of Mg-Al-Mn alloy subjected to two-sided and simultaneous LSP impacts[J]. *Appl Surf Sci*, 2016, **369**: 366–376.

- [50] Correa C, Peral D, Porro J A, et al. Random-type scanning patterns in laser shock peening without absorbing coating in 2024-T351 Al alloy: a solution to reduce residual stress anisotropy[J]. *Opt Laser Technol*, 2015, **73**: 179–187.
- [51] Jiménez C A V, Rosas G G, González C R, et al. Effect of laser shock processing on fatigue life of 2205 duplex stainless steel notched specimens[J]. *Opt Laser Technol*, 2017, **97**: 308–315.
- [52] Zhang X Q, Huang Z W, Chen B, et al. Investigation on

residual stress distribution in thin plate subjected to two sided laser shock processing[J]. *Opt Laser Technol*, 2019, **111**: 146–155.

- [53] Luo K Y, Chen Q, Lv C, et al. Thickness analysis of two-sided simultaneous laser shock processing on AM50 Mg alloy[J]. *Chin J Lasers*, 2014, **41**(1): 0103003.
- 罗开玉, 陈起, 吕刺, 等. 双面激光同时冲击AM50镁合金板料的厚度分析[J]. *中国激光*, 2014, **41**(1): 0103003.
- [54] Zhang Z F, Qin R, Li G, et al. Deep learning-based monitoring of surface residual stress and efficient sensing of AE for laser shock peening[J]. *J Mater Process Technol*, 2022, **303**: 117515.

作者简介



刘永恒 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光喷丸成形技术。

E-mail: 1815896646@qq.com



【通信作者】邓大祥 (1985-), 男, 博士, 教授、博导, 主要研究方向为激光加工与成形、功能微结构与器件制造、高效散热冷却技术等。

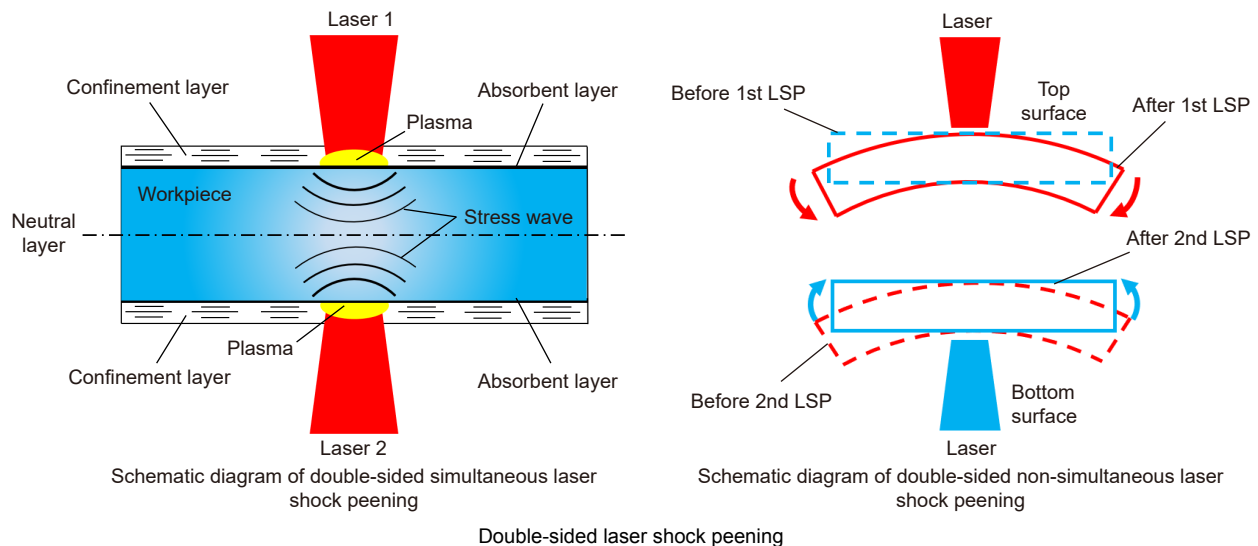
E-mail: dengdaxiang@hit.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress of double-sided laser shock peening technology

Liu Yongheng¹, Gu Xin¹, Deng Daxiang^{1*}, Zhang Yongkang²



Overview: Thin-wall structures servicing under some extreme conditions may risk fatigue failure and lead to undesirable disasters. The service life of components will be prolonged if their fatigue performance can be enhanced. Since fatigue failure mainly emerges from the surface of the component, it can be delayed if the surface property can be improved with some surface treatment methods, such as heat treatment, chemical treatment, and strain-strengthening treatment. Strain strengthening methods can modify the residual stress field and micro-structure by inducing inelastic deformation to enhance fatigue performance. Compared with other surface treatment methods, strain-strengthening methods have attracted much attention in the past several years due to their low costs, high efficiency, and flexibility. Among the strain-strengthening methods, laser shock peening (LSP) shows an excellent strengthening effect because it can bring deeper compressive residual stress and finer grains with less sacrifice on the surface integrity. Besides, LSP can be applied to process complex and convert surfaces that are hard to be touched by traditional surface treatment methods. Therefore, LSP is viewed as the most promising method for the fatigue life extension of key components in aerospace, vehicles, and ships.

The traditional single-sided laser shock peening (SLSP) is generally used to treat thick-wall components with significant stiffness because the distortion induced by SLSP can be inhibited. However, for the thin-walled structures with low stiffness, the geometry shape can be changed due to the laser-induced local deformation. More seriously, the impact inertia induced by the laser-induced shock wave leads to the fracture of thin-walled structures. Therefore, shape accuracy should be taken into account carefully when the LSP is used to treat thin-wall structures.

The double-sided laser shock peening (DSLSP) is proposed to overcome the surface treatment problem related to thin-walled parts with complex surfaces. DSLSP can induce symmetric local deformation on both sides of the workpiece. The symmetric deformation can ensure shape accuracy by forcing local deformation on two sides to eliminate each other. Besides, DSLSP induces compressive residual stress and refined grains on both sides of the workpiece, which contributes to excellent fatigue performance. Recently, DSLSP has attracted great research attention and plays an increasingly critical role in the fatigue life extension of thin-walled components. However, few summaries on DSLSP have been reported in the past several years. For a better understanding of DNLSP, this article summarizes its technical principle, physical mechanism, application, and other aspects, and prospects of its existing problems and development prospects.

Liu Y H, Gu X, Deng D X, et al. Research progress of double-sided laser shock peening technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220186; DOI: 10.12086/oe.2023.220186

Foundation item: Basic Research Projects of Shenzhen Research & Development Fund (JCYJ20200109112808109)

¹School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518055, China; ²School of Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510320, China

* E-mail: dengdaxiang@hit.edu.cn