

特邀综述

激光冲击强化的影响参数与发展应用

乔红超^{1,2}, 胡宪亮^{1,2,3}, 赵吉宾^{1,2}, 吴嘉俊^{1,2,3}, 孙博宇^{1,2}, 陆莹^{1,2}, 郭跃彬⁴

(1.中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110016; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.阿拉巴马大学, 美国 塔斯卡卢萨 AL 35486)

摘要: 激光冲击强化是一种先进表面技术, 其利用激光诱导形成的等离子冲击波对金属材料进行强化, 因具有强化效果更佳、可控性更强和适用性更好等技术优势, 得到了越来越广泛的应用与研究, 对提高部件的疲劳性能和延长材料使用寿命具有重要作用。简要介绍了激光冲击强化技术的发展概况, 分别从激光工艺参数、约束层与吸收保护层、冲击角度等影响参数进行了重点分析与总结。激光工艺参数是影响强化效果的最重要因素, 选取最佳的激光功率密度、最优的光斑搭接率、适当的冲击次数以及合适的脉冲宽度可以明显提高强化效果。针对不同的材料形态, 应选取合适的约束层和吸收保护层, 提高激光透光率的同时防止材料表面烧蚀。此外还需考虑激光冲击强化的冲击角度, 选择合适的冲击角度, 能够对复杂的结构进行强化。综合考虑激光冲击强化的影响参数, 可为得到最佳激光冲击强化效果提供重要的理论参考。

关键词: 激光冲击强化; 激光工艺参数; 约束层; 吸收保护层; 冲击角度

中图分类号: TN249; TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0001-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.001

Influence Parameters and Development Application of Laser Shock Processing

QIAO Hong-chao^{1,2}, HU Xian-liang^{1,2,3}, ZHAO Ji-bin^{1,2}, WU Jia-jun^{1,2,3},
SUN Bo-yu^{1,2}, LU Ying^{1,2}, GUO Yue-bin⁴

(1.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2.Institute for Robotics and Intelligent Manufacturing Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.University of Alabama, Tuscaloosa AL 35486, USA)

ABSTRACT: Laser shock processing is an advanced surface technology to strengthen metal materials by the laser-induced plasma shock wave, thus getting more and more applications and researches, and playing an important role in improving fatigue properties of components and extending service life of materials due to its technical advantages, such as better strengthening effect, stronger controllability and better applicability, etc. The development of laser shock processing was briefly introduced, and the laser parameters, confinement layer, absorbing protective layer, laser shocked angle and other influencing parameters were emphatically analyzed and summarized, respectively. The laser parameters are the most important factors to determine the strengthening effect and the optimal laser power density, optimum spot overlap ratio, suitable laser shocked times and appropriate laser pulse width can be selected to significantly improve the strengthening effect. For the different material forms,

收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2019-11-04

Received: 2019-07-26; Revised: 2019-11-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51875558); 国家基金委-辽宁省联合基金 (U1608259); 国家重点研发计划 (2016YFB1102704)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51875558), NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1608259), National Key Development Program (2016YFB1102704)

作者简介: 乔红超 (1982—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光冲击强化与水导激光加工。邮箱: hcqiao@sia.cn

Biography: QIAO Hong-chao (1982—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: laser shock processing and water-jet guided laser processing. E-mail: hcqiao@sia.cn

the appropriate confinement layer and the absorbing protective layer should be selected to improve the laser transmittance and prevent the laser ablation of the material in near surface. In addition, the laser shocked angle should be considered, and the appropriate suitable laser shocked angle can realize the laser shock processing for complex structure. Therefore, the influence parameters of laser shock processing should be considered comprehensively, to provide a theoretical basis for obtaining the best strengthening effect of laser shock processing.

KEY WORDS: laser shock processing; laser parameters; confinement layer; absorbing protective layer; laser shocked angle

随着航空航天、石油化工、高铁、武器、核电等高端领域装备的发展,对金属材料服役性能有着越来越高的要求。为提升装备整体性能,延长零部件的使用寿命,在不改变基体材料的前提下,表面强化技术得到了人们的广泛关注与研究^[1]。然而传统的表面强化技术,如喷丸^[2]、滚压^[3]、低塑性滚光^[4]等,因在材料表面引入的压应力层深度最大仅能达到 75~250 μm ,且成形困难,不能满足高性能材料的生产加工需求。激光冲击强化(Laser shock processing/peening, LSP)技术^[5-6]是一种先进的表面强化技术,其不仅可以引入超过 1 mm 的残余压应力层,同时因各种工艺参数(如激光脉冲能量、光斑搭接率等)可精确调节设定,能实现对材料性能指标的精确控制,因此可以很好地解决传统表面强化技术存在的难题^[7]。激光冲击强化的技术原理如图 1 所示^[8],短脉冲、高功率密度的脉冲激光透过透明约束层辐照在涂覆吸收保护层的材料表面,使吸收保护层吸收激光能量并发生爆炸性气化蒸发,生成的高温($>10^7$ K)、高压(>1 GPa)等离子体继续吸收激光能量,进而产生高达几十 GPa 的高温高压等离子团,该等离子团在约束层

的限制下发生爆炸,产生 GPa 量级的高压冲击波,形成的高压冲击波向材料内部传播;由于冲击波的力效应,使材料表层发生塑性变形以及微观组织改变,并且产生的残余压应力深度远大于传统的表面改性技术,从而有效改善材料防应力腐蚀、耐磨损和抗疲劳等性能^[8-11]。

作为目前最为先进的表面改性技术,激光冲击强化具有强化效果更佳、可操控性更强和适用性更好等技术优势,在提高材料综合性能和零部件的疲劳寿命方面的作用愈发重要,国内外关于激光冲击强化的研究成果也十分丰硕。然而,关于各种工艺参数对激光冲击强化效果影响方面的研究总结相对较少,为加深人们对激光冲击强化技术与激光冲击强化影响参数方面的理解,本文简要介绍了激光冲击强化的发展概况,并对其存在的问题和发展前景进行了展望。分别从激光工艺参数、约束层与吸收保护层、冲击角度等对激光冲击强化效果的影响参数进行了重点分析与总结。综合考虑各种影响参数,可为得到最佳激光冲击强化效果提供重要的理论参考,对激光冲击强化技术的实际生产具有重要意义。

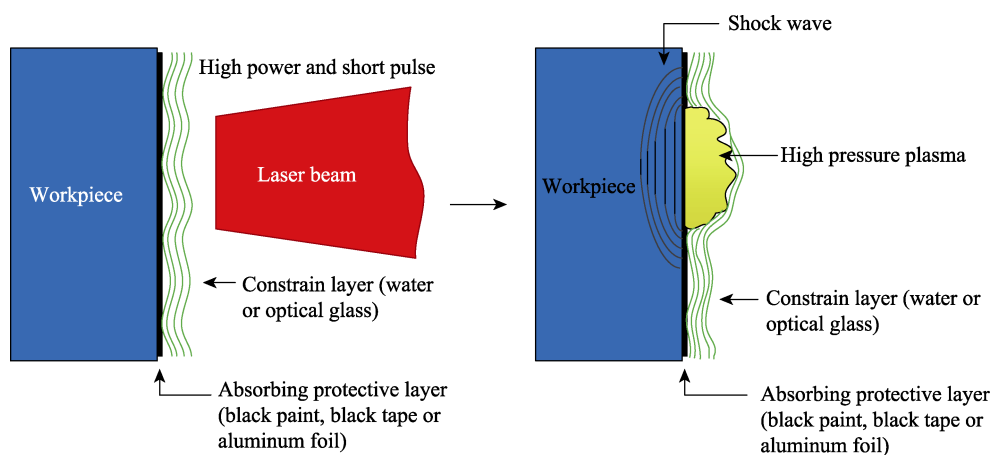


图 1 激光冲击强化技术原理^[8]

Fig.1 Technology principle of laser shock processing^[8]

1 激光冲击强化技术发展概况

激光冲击强化的本质是利用激光诱导的冲击波作用在材料表面,并使近表层材料产生塑性变形,同时伴随位错的缠结、运动和孪晶变形等晶体缺陷,起

到提高位错密度,降低表面粗糙度,提高表面显微硬度,改善组织结构的效果^[12-13],从而使材料服役性能得到显著提高。相比于传统的表面强化技术,激光冲击强化技术具有巨大的技术优势和应用前景,自始至终得到了广泛重视。

20 世纪 60 年代,美国科学家 White^[14-15]首次发

现激光诱导冲击波现象。1972 年, 美国巴特学院^[16-18]利用高功率脉冲激光诱导的冲击波冲击铝合金试件, 进而改变试件显微结构组织, 研究发现铝合金的硬度、疲劳性能和强度等均得到大幅度的提高, 展现了激光冲击强化技术的应用前景。1990 年, Grevey 等^[19]进行了激光冲击诱导合金钢中马氏体相变的研究, 解释了马氏体相变的机制。Forget 等^[20]利用激光冲击强化镍基高强度合金发现, 激光冲击强化在材料内部诱导了压应力, 能够提高材料抗磨损性能和疲劳寿命。

自两项重要专利^[21]在 1974 年和 1983 年首次公开后, 激光冲击强化技术逐渐应用于工业领域。自 1996 年起, 通用电气公司申请了大量关于激光冲击强化技术应用的专利。在航空航天领域, 激光冲击强化可以有效改善涡轮叶片^[22]、转子组件、圆盘及齿轮、轴承部件等^[21,23]关键部件的机械性能和疲劳寿命, 激光冲击强化也可优化覆盖部件中的紧固件孔。2007 年, 日本东芝公司开发了微激光冲击强化 (Microscale Laser Shock Processing, μ LSP) 技术, 并应用在核电站压力容器焊缝上, 极大提高了焊缝抗应力腐蚀能力, 并且该公司利用开发的激光器设备和辅助技术, 实现了对直径 9.5 mm 的管道内壁的激光冲击强化^[24-25]。

自 2010 年起, 国外学者相继对刚性脊柱^[26]、儿童膝关节^[27]等永久性植入物和钙镁合金等^[28-29]可降解植入物进行了激光冲击强化处理, 提高了永久性植入物的耐磨性、疲劳强度, 降低了可降解植入物的腐蚀速率。此外, 有关学者利用激光冲击强化实现了对微小梁^[30]和纳米线^[31]等结构的精密成形, 通过改变工艺参数能够控制微小梁的变形量, 降低了纳米线成形的成本。随着激光冲击强化技术逐步走向成熟, 其应用领域不断扩大, 该技术的优势以及重要性得到了重视, 这些都将进一步促进激光冲击强化技术的发展。

国内关于激光冲击强化技术研究起始于 20 世纪 90 年代初, 经过近三十年的发展, 我国相继在材料超高应变率塑性变形理论、残余应力场分布和激光诱导等离子体冲击波机理等方面取得了丰硕的成果^[9]。我国前期主要受激光器设备、强化工艺与质量控制等多因素限制, 激光冲击强化技术基本处于实验室研究阶段, 期间江苏大学、空军工程大学等在国内开展的研究工作较多^[9]。2008 年, 我国第一条激光冲击强化生产线在西安建立, 并陆续应用在多种航空发动机部件上^[32]。2011 年, 中国科学院沈阳自动化研究所^[33-35]研制了我国首台整体叶盘激光冲击强化系统, 突破了激光冲击强化技术工业生产应用的瓶颈, 该系统可提高航空发动机叶盘疲劳寿命 6 倍以上。随后沈阳自动化所相继在微小裂纹的锻压模具^[34]、短弧汞灯电极生产和高速机车轴生产^[36]等激光冲击强化应用领域取得突破。2014 年, 江苏大学利用激光冲击强化在铜箔表面上形成了规则的微坑, 促进了激光冲击强化在微机电系统器件领域的应用^[37]。2018 年, 陈啸等^[38]

利用激光冲击波调控 NiCrBSi 熔覆层表面应力状态, 加载的激光冲击波可以消除熔覆层表面残余拉应力, 限制了零件的开裂与变形, 有效促进了激光熔覆技术的工程应用。从激光冲击强化技术的发展来看, 该技术在从实验研究逐渐应用到各个领域, 并逐步走向工业化应用, 展现了该技术巨大的应用前景, 这对我国制造业的发展具有重要的战略意义。

由于激光冲击强化技术在材料表面改性方面具有显著技术优势, 并且应用范围广, 目前国际上很多国家纷纷开展了激光冲击强化技术的研究, 从不同方向推动了该技术的发展, 但真正实现在工程中规模化应用的只有美国和中国^[9]。我国近年来在激光冲击强化技术上取得重大突破, 但与国外相比, 在工艺、装备等技术上还存在不少差距, 尤其是缺少可提供现场服务的移动式激光冲击处理设备^[39]。未来激光冲击强化技术要在实际工程中得到更广泛的应用, 需要研制出具有装置小型化、高重复频率以及输出脉冲能量稳定等特点的高性能激光冲击装置, 并且需要提高激光冲击强化设备的移动性、可靠性和方便性, 完善激光冲击强化效果的无损检测效果和在线控制方法。

2 影响激光冲击强化效果的因素

在激光冲击强化过程中, 激光诱导等离子体冲击波是提升材料疲劳性能的直接动力, 会引起材料的超高动态变形和在材料表面形成数值较大、深度较深的残余压应力层。不同的激光冲击强化工艺参数能够形成不同的残余应变场, 通过研究并选取合适的激光冲击强化工艺参数, 分析激光冲击强化的规律, 有助于提升材料的强化效果。

2.1 激光工艺参数

在激光冲击过程中, 激光工艺参数对材料的强化效果起决定性作用, 选取最佳的激光功率密度、合理的光斑搭接率、合适的脉冲宽度以及适当的冲击次数可以明显提高强化效果。

2.1.1 激光功率密度

激光功率密度^[40-43]的计算公式如下:

$$I_0 = \frac{4E}{\pi d^2 \tau} \quad (1)$$

式中, I_0 为激光功率密度, E 为激光脉冲能量, d 为光斑直径, τ 为激光脉冲宽度^[43]。由于不同靶材的物理力学特性以及不同厚度的约束层对激光透过约束层后的能量大小均有所影响, 且不同类型吸收层影响等离子体冲击波压力的减弱效果有差异, 因此要综合选择合适的激光功率密度^[44]。Fabbro 等^[40,45]认为, 选取合适的激光功率密度, 使其诱导形成的冲击波峰值压力介于 2~2.5 倍 HEL (Hugoniot 弹性极限) 内, 在此条件下能获得更理想的残余压应力分布。Jiang

等^[46]研究了激光功率密度对铝合金紧固件孔试样疲劳寿命和断裂特征的影响,试样的加载循环次数和疲劳增益百分比随激光功率密度变化的实验曲线如图2所示,结果表明,随着激光功率密度的增加,样品的疲劳寿命和疲劳寿命增长率先增加,后减小,再增加,处理区的疲劳裂纹扩展速率降低。邓仲华等^[47]对钢材表面进行了激光冲击强化,结果表明,合适的激光功率密度使得材料的强化层和钝化膜的密度增加,产生的横向残余压应力使得钝化膜更加稳定,从而提高材料的耐腐蚀性能。但是过大的功率密度会导致材料表面出现压痕,甚至出现吸收保护层烧蚀等现象。可见合适的激光功率密度对材料的残余应力分布有着至关重要的影响,对提高材料疲劳寿命具有重要意义。

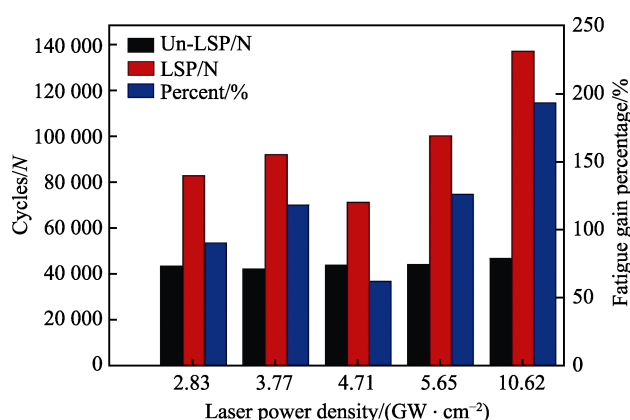


图2 循环次数和疲劳增益百分比随激光功率密度变化的实验曲线^[46]

Fig.2 Experimental curves of cycles and fatigue gain percentage as a function of different laser power densities^[46]

2.1.2 光斑搭接率

在激光冲击强化过程中,激光光斑参数对残余应力场的深度和均匀性有着重要影响。对于确定的激光冲击强化设备,光斑形状是确定的,可以通过调节距离来控制光斑的大小,采用小光斑能够在较低激光功率密度下获得与采用大光斑冲击相近的强化效果,由于实际生产条件下激光能量会存在一定程度的衰减,因而对于特定的激光冲击强化设备有着最佳的距离,从而存在最合适的光斑大小^[9,48-49]。在光斑形状、光斑大小确定的情况下,为实现较好的冲击强化效果,单纯调整激光功率密度的作用是有限的,必须采用大量光斑搭接来覆盖待处理材料表面^[9]。钱绍祥等^[50]研究光斑搭接率对不锈钢焊接接头激光冲击应力分布的影响,结果表明,提高光斑搭接率可以优化激光冲击处理后焊接接头的应力分布。胡永祥等^[51]利用小激光点冲击加工钢材表面,通过实验和数值模拟研究了不同搭接率处理试样引起的力学性能变化,其表面残余应力分布和冲击区显微硬度分布结果如图3、4所示,结果表明,诱导残余应力场在表面分布均匀,且随着搭接率的增加而增强,表面显微硬度比未处理

区域的值更大,且随着搭接率的增加而提高。因此,针对不同材料的具体形貌、材料参数和最佳残余压应力等因素,选取合理的光斑搭接率,可使得残余压应力分布更均匀,并且“残余应力洞”现象可以得到有效抑制,进而得到最佳激光冲击效果。

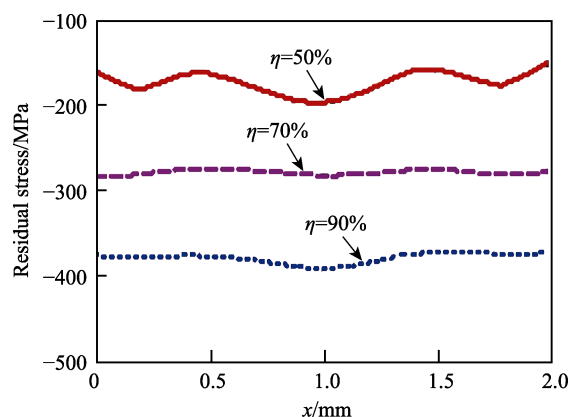
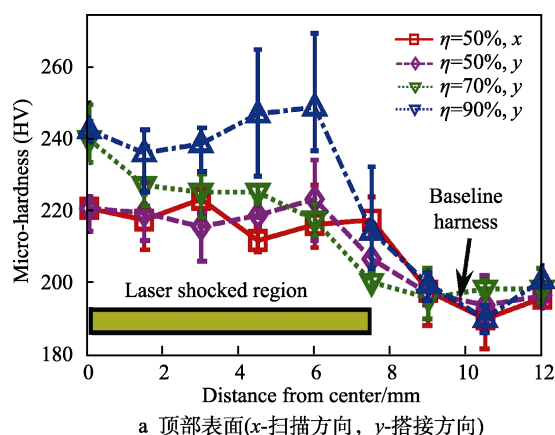
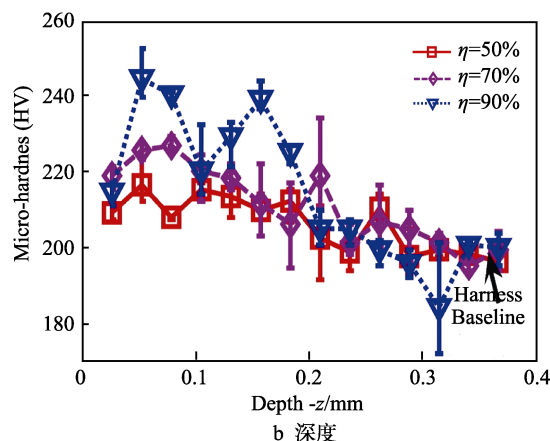


图3 不同搭接率下的表层残余应力分布^[51]

Fig.3 Residual stress distribution on the top surface with different overlapping rates^[51]



a 顶部表面(x-扫描方向, y-搭接方向)



b 深度

图4 不同搭接率下的冲击区显微硬度分布^[51]

Fig.4 Micro-hardness distribution in the impact region with different overlapping rates: a) top surface (x-scanning direction, y-overlapping direction); b) depth^[51]

2.1.3 激光脉宽

激光脉冲宽度 τ 用来衡量脉冲激光的时间分布特

征^[49], 对激光冲击强化生成的残余应力影响层深度(塑性变形深度)有着重要影响。Peyre 等^[44,52]研究发现, 改变激光脉冲的波形从而得到的短上升沿(SRT)的脉冲, 可有效削弱约束层表面等离子的逆韧致吸收效应, 从而获得更高的激光诱导冲击波压力。李博民等^[53-54]进行了铝合金激光冲击强化的三维数值模拟, 详细讨论了激光冲击参数对残余应力的影响, 发现随着脉宽的增加, 深度方向残余应力场的改善效果相对比较稳定, 但是表面残余压应力出现了先增大后减小, 甚至出现了加剧“残余应力洞”和材料表面烧蚀现象。在激光功率密度确定的情况下, 其诱导产生的冲击波峰值应力是确定的, 而脉冲宽度的持续时间则直接决定了冲击波压力的持续时间。随着脉冲宽度的增加, 冲击波压力作用的持续时间增加, 材料的塑性变形加剧, 有利于提高材料冲击强化后的表面残余应力。随着脉冲宽度的进一步增加, 冲击波的加载时间也在增加, 在材料内部传播的冲击波遇到材料边界则会形成向光斑中心汇聚的稀疏波, 因而稀疏波的强度也会随着脉冲宽度的增加而增加, 从而降低了光斑中心附近区域的残余应力值, 形成所谓的“残余应力洞”现象。此外, 过大的脉冲宽度, 能够增加激光爆炸燃烧的作用时间, 使得吸收保护层过度损耗, 带来表层材料激光烧蚀的现象。因此, 选择适当的激光脉宽有利于增强激光冲击强化效果, 一般应为爆轰波点燃时间的 3~4 倍^[9,55]。

2.1.4 冲击次数

激光冲击强化过程中, 在固定的激光功率密度下, 不同金属材料被允许冲击的次数不同, 冲击次数直接影响残余应力场的分布情况^[9]。LU 等^[56]研究了冲击次数对铝合金性能的影响, 结果表明, 材料的残余压应力主要存在于材料的近表面, 且不同次数冲击的表面残余压应力最大值不同: 残余应力随着深度的增加而逐渐减小, 然而冲击次数对残余应力值的影响随深度的增加而逐渐减弱。Kim 等^[57]对 35CD4 50HRC 合金进行了激光冲击强化数值模拟, 结果表明, 材料表面残余压应力的数值随冲击次数增加得到了增大, 但残余拉应力变化不明显。

增加冲击次数可以改善材料表面残余压应力分布和增大残余压应力影响层深度, 然而过多的冲击次数也会增加材料表面粗糙度, 降低冲击强化效果, 出现层裂现象等。吴俊峰等^[58]对 Ti17 合金试样进行了不同冲击次数强化实验, 研究了冲击次数对材料层裂特性和层裂阈值的影响, 得到不同冲击次数下的材料表面形貌, 如图 5 所示。从图可知, 材料表面产生方形凹坑, 且凹坑中心凸起, 层裂面积与冲击次数呈正相关趋势。激光诱导冲击波作用在材料表面, 随着冲击次数的增加, 材料表面硬化且塑性变形困难, 冲击波难以传播到材料内部, 导致材料表面残余应力基本达到饱和, 应力层深度难以增加。

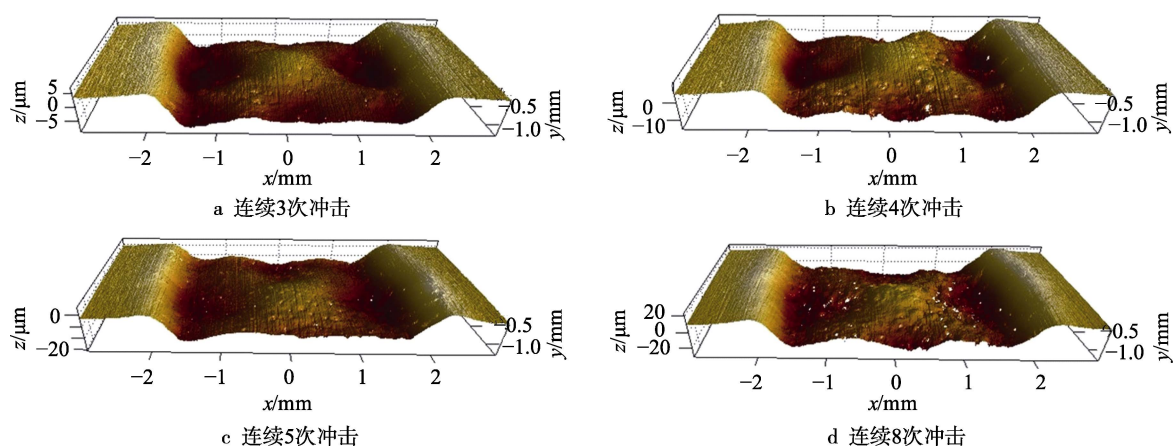


图 5 不同连续激光冲击次数下 Ti17 合金中厚样品的表面形貌^[58]:

Fig.5 Surface morphology of Ti17 alloy mid-thick sample under different continuous LSP shots^[58]

a) continue three shots; b) continue four shots; c) continue five shots; d) continue eight shots

2.2 约束层和吸收保护层

为了保证材料激光冲击强化后的质量, 一般采用约束层和吸收保护层的典型结构。面对不同材料表面的几何形状以及特性, 选取合适的约束层和吸收保护层能够得到较好的冲击强化效果。

2.2.1 约束层

早期的激光冲击强化实验研究, 基本上采用将脉

冲激光直接辐照材料表面吸收层的方式进行, 但这种方式获得的残余压应力往往较低、强化效果不够明显, 甚至会形成残余拉应力。后来, Clauer 等^[59]采用在材料表面加透明约束层和黑色涂层的方式, 发现冲击波应力幅值得到了极大的提高, 达到 GPa 量级。Fabbro 等^[44]通过实验再次证明在约束模式下, 可以获得更好的强化效果。从而形成了目前激光冲击强化带约束层和吸收保护层常用的方式。

在激光冲击强化的过程中,由于约束层的作用,可以有效提高激光诱导冲击波的峰值压力和冲击波的脉冲宽度。目前,激光冲击强化实验中的约束层一般采用水或有机玻璃,然而有机玻璃只能应用在平面金属材料表面,并且玻璃破碎时可能会对人员和设备产生威胁。因此,研究人员常采用水作为约束层,它可提高激光冲击强化的效率以及降低成本。吴江等^[60]研究了不同约束层材料对铝合金激光喷丸表面强化效果的影响,结果表明,不同的约束层材料对材料表面显微硬度的提高是有差异的,其中柔性约束层的效果最为明显。对于不同的约束层材料,其强化作用的机理不同。通过选用合适的约束层材料,可以提高激光诱导冲击波的压力,从而提升材料强化效果,同时,适当提高约束层厚度,可使得冲击波峰压趋于饱和。此外,约束层材料的刚性越好,强化效果越佳^[9,61]。

2.2.2 吸收保护层

吸收保护层的主要作用是提高对激光辐射的吸收能力、增大压力波峰值和防止材料表面熔化等^[17]。为克服金属材料对直接辐照激光的高反射率等问题,相关学者开始探索各种吸收保护层材料,如铝箔、黑

漆、石墨等,目前常选取铝箔或黑漆作吸收保护层^[62]。

对未涂敷吸收保护层的金属材料表面直接进行激光冲击强化处理,不仅会烧蚀金属表面,而且在表面产生的熔凝层会在快速冷却中形成细小裂纹,并产生残余拉应力,从而降低材料的机械性能^[42]。Amrinder 等^[63]研究了有/无保护层的铬镍铁合金的激光冲击强化实验,并且比较了处理后试样的微观结构和残余应力状态,3.9 J 能量冲击合金试样后的表面形貌如图 6 所示。由图可知,吸收保护层可使得试样表面更加光滑,结果表明,在给定的激光条件下,激光冲击烧蚀吸收保护层可使试件产生残余应力分布,并且试件表面会具有高残余压应力。相关研究表明,在一定条件下,吸收保护涂层厚度有一临界值,当厚度超过该值,未被气化的部分会使冲击波产生损耗;当厚度低于该值,未被吸收的激光能量使金属表层产生气化,从而形成粗糙的冲击凹坑,并降低冲击效果^[64]。在激光冲击强化实验中,根据试样具体结构和激光工艺参数,通过选取合适的吸收保护层材料和材料厚度,可以增加激光吸收率,进而使激光诱导形成的等离子体能更高效地产生高压冲击波,最终提升材料激光冲击强化效果。

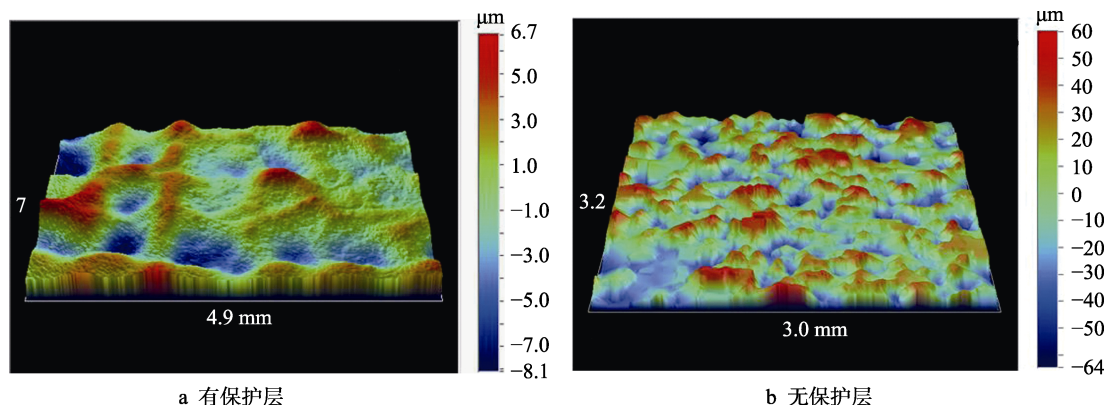


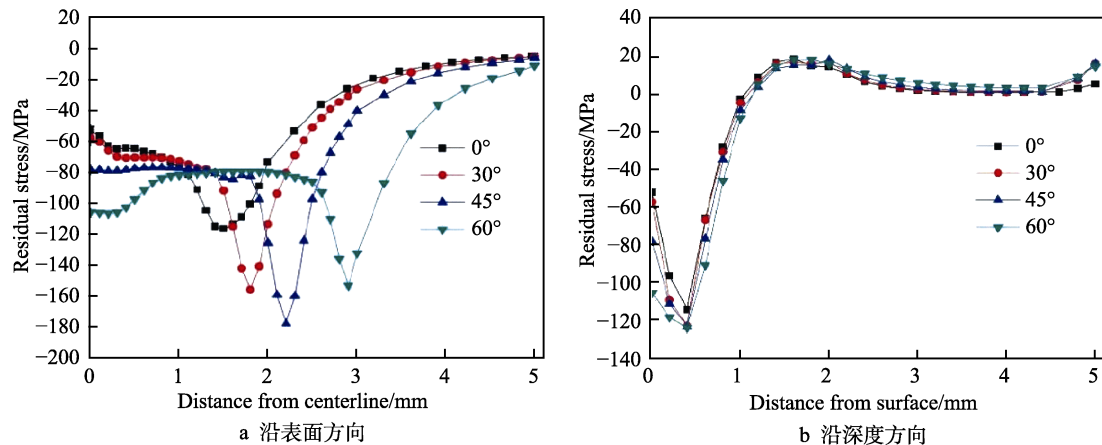
图 6 3.9 J 能量冲击后的表面形貌^[63]

Fig.6 Surface profiles of 3.9 J single dimples peened: a) with protective coating; b) without protective coating^[63]

2.3 冲击角度

随着激光冲击强化应用研究的丰富,对一些复杂形状结构件,由于存在相邻结构遮挡光路等问题,使得激光难以垂直入射待强化区域,从而需要采用斜冲击角度来进行强化。沈晓骏等^[65]采用激光斜入方法,对航空发动机扇轴转接圆角部位进行激光冲击强化试验,分析了斜冲击机理和方法以及计算了斜激光冲击强化试验参数,并对冲击前后的试件进行对比,结果显示,表面显微硬度和旋转弯曲疲劳寿命均有所提高,残余应力不均匀性得到改善。汪静雪等^[66]进行了激光参数对圆杆件残余应力场影响的数值模拟与实验研究,得到了如图 7 所示的不同激光冲击角度下,沿光斑表面(长轴)方向和深度方向的残余应力场分

布。从图 7a 可知,光斑中心的残余压应力值随激光冲击角度增大而逐渐增大,这是由于冲击角度影响光斑形状,进而使得稀疏波汇聚强度减弱。从图 7b 可知,次表层残余压应力的最大值随激光冲击角度增大而缓慢增大,直至趋于饱和。实验表明在其他参数相同的情况下,激光冲击角度有利于改善光斑中心残余压应力的缺失效应。孙博宇等^[67]研究了激光冲击强化中,冲击角度对强化效果的影响,得到了经不同偏振方向和冲击角度冲击后的 TC4 钛合金的表面形貌、残余应力和硬度。结果表明,在一定实验条件下,斜冲击可以有效避免残余应力洞的产生。在激光冲击强化试验中,选择一定的冲击角度既可以满足特殊形状构件的激光冲击处理要求,也可使材料表面残余应力分布更均匀,从而获得更佳的激光冲击强化效果。

图 7 不同冲击角度下残余应力场的分布^[66]Fig.7 Residual stress distribution under different shocking angles: a) along surface direction; b) along depth direction^[66]

3 结语

激光冲击强化因其强化效果更佳、可操控性强和适用性好等技术优势,得到了越来越广泛的应用与研究,对提升部件疲劳性能和延长材料使用寿命具有重要意义。本文简要介绍了激光冲击强化技术的发展概况,分别从激光工艺参数、约束层与吸收保护层、冲击角度等影响参数进行了重点分析与总结,并对其存在的问题和发展前景进行了展望:

1) 激光工艺参数是影响激光冲击强化效果的最重要因素,选取最佳的激光功率密度、合理的光斑搭接率、适当的冲击次数以及合适的脉冲宽度,可有效改善材料残余应力分布,从而显著提高材料强化效果。然而目前的激光器存在脉冲能量较低、光斑质量差、重复率低等问题,极大限制了激光冲击强化技术的发展,未来新型激光器的开发,应着重于研究高质量激光束,抑制自发辐射光,提高散热性能等。

2) 针对不同的材料形态,应选取合适的约束层和吸收保护层,提高激光的透光率以及冲击波的峰值压力和时间,同时防止近表面材料的激光烧蚀。面对激光冲击强化试验中存在约束层厚度均匀性差、吸收保护层涂覆效率低、光路污染等问题,今后新型高效率的约束层和吸收保护层材料仍是值得研究的重点。

3) 需考虑激光冲击强化的冲击角度,选择合适的冲击角度,能够对复杂的结构进行强化,并且改善材料残余应力不均匀性,提升复杂构件激光冲击强化效果。

参考文献:

- [1] 吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 等. 温度辅助激光冲击强化对 GH4169 合金力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(1): 199-205.
WU Jia-jun, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao, et al. Effect of temperature-assisted laser shock peening on mechanical

properties of GH4169 alloy[J]. Journal of plasticity engineering, 2019, 26(1): 199-205.

- [2] 赵西洋, 陈晓秀, 孟海英. 喷丸强化技术在某型作动筒延寿修理中的应用[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 97-100.
ZHAO Xi-yang, CHEN Xiao-xiu, MENG Hai-ying. Application of shot peening technology on lifetime extension repair of an actuator cylinder[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(12): 97-100.
- [3] LIU Y G, LI H M, LI M Q. Characterization of surface layer in TC17 alloy treated by air blast shot peening[J]. Materials & design, 2015, 65: 120-126.
- [4] 贺蒙. 低塑性滚压钛合金 TC4 表面完整性及低周疲劳寿命研究[D]. 山东: 山东大学, 2015.
HE Meng. Surface integrity and low cycle fatigue life of titanium alloy TC4 with low plasticity burnishing[D]. Shandong: Shandong University, 2015.
- [5] GUO W, SUN R J, SONG B W, et al. Laser shock peening of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy[J]. Surface and coatings technology, 2018, 349: 503-510.
- [6] 鲁金忠. 激光冲击强化铝合金力学性能及微观塑性变形机理研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2010.
LU Jin-zhong. Investigation of laser shock processing on the mechanical properties and micro-plastic deformation mechanism of LY2 aluminum alloy[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2010.
- [7] TRDAN U, SKARBA M, GRUM J. Laser shock peening effect on the dislocation transitions and grain refinement of Al-Mg-Si alloy[J]. Materials characterization, 2014, 97: 57-68.
- [8] WU J J, LIU X J, ZHAO J B, et al. The online monitoring method research of laser shock processing based on plasma acoustic wave signal energy[J]. Optik, 2019, 183: 1151-1159.
- [9] 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
LI Ying-hong. The theory and technology of laser shock processing[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [10] 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.

- WU Jia-jun, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao, et al. The application status and development of laser shock processing[J]. Opto-electronic engineering, 2018, 45(2): 170690.
- [11] NALLA R K, AITENBERGER 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 & engineering A, 2003, 355(1): 216-230.
- [12] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- GAO Yu-kui. Surface integrity theory and its applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [13] 陆莹, 赵吉宾, 乔红超. TiAl 合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003013.
- LU Ying, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao. Investigation of technical and strengthening mechanism research of TiAl alloy by laser shock peening[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(10): 1003013.
- [14] ASKAR'YAN G A, MOROZ E M. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam[J]. Soviet journal of experimental & theoretical physics, 1963, 16(6): 1638-1644.
- [15] WHITE R M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption[J]. Journal of applied physics, 1963, 34(7): 2123-2124.
- [16] 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.
- [17] FAIRAND B P, CLAUSER A H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. Journal of applied physics, 1979, 50(3): 1497-1502.
- [18] 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.
- HU Tai-you, QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, et al. Development of laser shock peening equipment[J]. Opto-electronic engineering, 2017, 44(7): 732-737.
- [19] GREVEY D, MAIFFREDY L, VANNES A B, et al. Transformation de phase par choc laser d'un acier T.R.I.P.[J]. Scripta metallurgica et materiala, 1990, 24(4): 767-772.
- [20] FORGET P, STRUDEL J L, JEANDIN M, et al. Laser shock surface treatment of ni-based superalloys[J]. Advanced manufacturing processes, 1990, 5(4): 501-528.
- [21] ZHANG Y K, LU J Z, LUO K Y. Laser shock processing of FCC metals[M]. Springer berlin heidelberg, 2013.
- [22] RUSCHAU J J, JOHN R, THOMPSON S R, et al. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium[J]. International journal of fatigue, 1999, 21(1): 199-209.
- [23] GRAHAM H, LLOYD A H, FRITZ H. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening[J]. Optics and lasers in engineering, 2000, 34(4): 327-337.
- [24] SANO Y, OBATA M, KUBO T, et al. Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating[J]. Materials science and engineering: A, 2006, 417: 334-340.
- [25] SANO Y, ADACHI T, AKITA K, et al. Enhancement of surface property by low-energy laser peening without protective coating[J]. Key engineering materials, 2007, 345-346: 1589-1592.
- [26] MANNAVA S R, BHAMARE S, CHASWAL V, et al. Application of laser shock peening for spinal implant rods[J]. International journal of structural integrity, 2011, 2(1): 101-113.
- [27] VASU A, GRANDHI R V. Effects of curved geometry on residual stress in laser peening[J]. Surface and coatings technology, 2013, 218: 71-79.
- [28] GUO Y B, SEALY M P, GUO C S. Significant improvement of corrosion resistance of biodegradable metallic implants processed by laser shock peening[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2012, 61(1): 583-586.
- [29] SEALY M P, GUO Y B. Surface integrity and process mechanics of laser shock peening of novel biodegradable magnesium-calcium (Mg-Ca) alloy[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2010, 3(7): 488-496.
- [30] MORALES M, PORRO J A, GARÍA-BALLESTEROS J J, et al. Effect of plasma confinement on laser shock microforming of thin metal sheets[J]. Applied surface science, 2011, 257(12): 5408-5412.
- [31] LI J, LIAO Y L, SUSLOV S, et al. Laser shock-based platform for controllable forming of nanowires[J]. Nano letters, 2012, 12(6): 3224-3230.
- [32] 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.
- LI Song-xia, QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, et al. Research and development of laser shock processing technology[J]. Opto-electronic engineering, 2017, 44(6): 569-576.
- [33] 乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 纳秒脉宽 Nd: YAG 激光冲击强化激光器的研制及分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802001.
- QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, LU Ying. Develop and analysis of nanosecond pulse width Nd: YAG laser for laser peening[J]. Chinese journal of lasers, 2013, 40(8): 0802001.
- [34] 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 Hong-chao, GAO Yu, ZHAO Ji-bin, et al. Research process of laser peening technology[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2015, 25(7): 1744-1755.
- [35] 卢国鑫, 金涛, 周亦胄, 等. 激光冲击强化在高温合金材料应用上的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 51-60.
- LU Guo-xin, JIN Tao, ZHOU Yi-zhou, et al. Research progress of applications of laser shock processing on superalloys[J]. The chinese journal of nonferrous metals, 2018, 28(9): 51-60.
- [36] 杨灏, 赵吉宾, 乔红超, 等. 金属钨的激光冲击强化研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 214001.
- YANG Hao, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao, et al. Res-

- earch of laser shock peening on tungsten[J]. *Acta optica sinica*, 2014, 34(2): 214001.
- [37] YE Y X, FENG Y Y, LIAN Z C, et al. Plastic deformation mechanism of polycrystalline copper foil shocked with femtosecond laser[J]. *Applied surface science*, 2014, 309: 240-249.
- [38] 陈啸, 陈志斌, 张健, 等. 激光冲击波调控 NiCrBSi 熔覆层表面应力状态研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(3): 387-392.
- CHEN Xiao, CHEN Zhi-bin, ZHANG Jian, et al. Study on laser shock wave control surface stress state of NiCrBSi cladding layer[J]. *Applied laser*, 2018, 38(3): 387-392.
- [39] 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*, 2016, 45(1): 1-6.
- QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, LU Ying. Current status of laser-induced shock wave application technology[J]. *Surface technology*, 2016, 45(1): 1-6.
- [40] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *Journal of applied physics*, 1990, 68(2): 775-784.
- [41] 侯丽华. 激光冲击对 Ti-6Al-4V 钛合金中高温力学性能及微观组织的影响研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2015.
- HOU Li-hua. Investigation of laser shock processing on mechanical properties and microstructure of Ti-6Al-4V titanium alloy at elevated temperatures[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2015.
- [42] WU J J, ZHAO J B, QIAO H C, et al. Acoustic wave detection of laser shock peening[J]. *Opto-electronic advances*, 2018, 1(9): 180016.
- [43] 季彬. 激光功率密度对钛合金小孔结构三维应力分布及疲劳的影响研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2018.
- JI Bin. Study on the effect of laser peening with different power densities on fatigue life of titanium alloy fastener hole[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2018.
- [44] 卢国鑫. 激光冲击对高温合金表面形貌、组织与性能的影响[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2017.
- LU Guo-xin. Effect of laser shock on surface topography, microstructure and mechanical behaviors of superalloys[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [45] FABBRO R, PEYRE P, BERTHE L, et al. Physics and applications of laser-shock processing[J]. *Journal of laser applications*, 1998, 10(6): 265.
- [46] JIANG Y F, JI B, GAN X D, et al. Study on the effect of laser peening with different power densities on fatigue life of fastener hole[J]. *Optics and laser technology*, 2018, 106: 311-320.
- [47] 邓仲华, 刘其斌, 徐鹏, 等. 方形光斑激光冲击强化金属表面的耐腐蚀性能及机理[J]. *材料工程*, 2018, 46(8): 140-147.
- DENG Zhong-hua, LIU Qi-bin, XU Peng, et al. Corrosion resistance and mechanism of metallic surface processed by square-spot laser shock peening[J]. *Journal of materials engineering*, 2018, 46(8): 140-147.
- [48] LU J Z, LUO K Y, YANG D K, et al. Effects of laser peening on stress corrosion cracking (SCC) of ANSI 304 austenitic stainless steel[J]. *Corrosion science*, 2012, 60: 145-152.
- [49] 胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- HU Yong-xiang. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [50] 钱绍祥, 殷苏民, 张飞霞, 等. 搭接率对 AISI202 焊接接头激光冲击应力分布的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(6): 15-17.
- QIAN Shao-xiang, YIN Su-min, ZHANG Fei-xia, et al. Effects of overlapping rate on stress distribution of AISI202 welding joint by laser shock processing[J]. *Surface technology*, 2013, 42(6): 15-17.
- [51] HU Y X, YAO Z Q. Overlapping rate effect on laser shock processing of 1045 steel by small spots with Nd: YAG pulsed laser[J]. *Surface and coatings technology*, 2008, 202(8): 1517-1525.
- [52] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Materials science and engineering: A*, 1996, 210(1/2): 102-113.
- [53] 李博民, 刘新民, 张晖辉, 等. 铝合金激光冲击强化的三维数值模拟[J]. *应用激光*, 2017, 37(6): 852-858.
- LI Bo-min, LIU Xin-min, ZHANG Hui-hui, et al. Numerical simulation of laser shock processing in 2024 aluminum alloy[J]. *Applied laser*, 2017, 37(6): 852-858.
- [54] 花国然, 蒋苏州, 曹宇鹏, 等. 激光冲击 7050 铝合金表面“残余应力洞”的模拟[J]. *金属热处理*, 2017, 42(7): 154-157.
- HUA Guo-ran, JIANG Su-zhou, CAO Yu-peng, et al. Numerical simulation of residual stress hole on 7050 aluminum alloy under laser shock[J]. *Heat treatment of metals*, 2017, 42(7): 154-157.
- [55] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- SUN Cheng-wei. The effect of laser irradiation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [56] 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, 58(11): 3984-3994.
- [57] KIM J H, KIM Y J, KIM J S. Effects of simulation parameters on residual stresses for laser shock peening finite element analysis[J]. *Journal of mechanical science & technology*, 2013, 27(7): 2025-2034.
- [58] 吴俊峰, 邹世坤, 张永康, 等. 多次激光冲击导致的 Ti17 合金层裂[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1091-1098.
- WU Jun-feng, ZOU Shi-kun, ZHANG Yong-kang, et al. Spall of Ti17 alloy induced by laser shock peening with multiple shots[J]. *Explosion and shock waves*, 2018, 38(5): 1091-1098.

- [71] HAENSCH C, HOEPFNER S, SCHUBERT U S. Chemical modification of self-assembled silane based monolayers by surface reactions[J]. Chemical society reviews, 2010, 39(6): 2323-2334.
- [72] CHAUSSÉ A, CHEHIMI M M, KARSİ N, et al. The electrochemical reduction of diazonium salts on iron electrodes. the formation of covalently bonded organic layers and their effect on corrosion[J]. Chemistry of materials, 2002, 14(1): 392-400.
- [73] COMBELLAS C, DELAMAR M, KANOUEFI F, et al. Spontaneous grafting of iron surfaces by reduction of aryldiazonium salts in acidic or neutral aqueous solution. Application to the protection of iron against corrosion[J]. Chemistry of materials, 2005, 17(15): 3968-3975.
- [74] 陈玉林, 屈钧娥, 王海人, 等. 医用 316L 不锈钢表面多巴胺/BSA 复合膜缓蚀性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(7): 92-96.
CHEN Yu-lin, QU Jun-e, WANG Hai-ren, et al. Corrosion inhibition performance of composite dopamine/BSA film on medical 316L stainless steel surface[J]. Surface technology, 2015, 44(7): 92-96.
- [75] YANG Y, QI P, DING Y, et al. A biocompatible and functional adhesive amine-rich coating based on dopamine polymerization[J]. Journal of materials chemistry B, 2015, 3(1): 72-81.
- [76] FRIIS J E, BRONS K, SALMI Z, et al. 051-Hydrophilic polymer brush layers on stainless steel using multilayered atp initiator layer[J]. ACS appl mater interfaces, 2016, 8(44): 30616-30627.
- [77] SHIMIZU K, MALMOS K, HOLM A H, et al. 040-Improved adhesion between PMMA and stainless steel modified with PMMA brushes[J]. ACS appl mater interfaces, 2014, 6(23): 21308-21315.
- [78] PARHIZKAR N, SHAHRABI T, RAMEZANZADEH B, A new approach for enhancement of the corrosion protection properties and interfacial adhesion bonds between the epoxy coating and steel substrate through surface treatment by covalently modified amino functionalized graphene oxide film[J]. Corrosion science, 2017, 123: 55-75.
- [79] 李伟明, 宋诗哲, 卞琳在纯铁表面电化学修饰层的缓蚀作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1992, 4(2): 101-106.
LI Wei-ming, SONG Shi-zhe, Corrosion resistance of pure iron surface electrochemically modified by porphyrin[J]. Corrosion science and protection technique, 1992, 4(2): 101-106.
- [80] LIU Y, ZHAO W, CHEN C H, et al. Chloride capture using a C-H hydrogen bonding cage[J]. Science, 2019, 6449: 159-161.

(上接第 9 页)

- [59] CLAUSER 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.
- [60] 吴江, 程秀全, 夏琴香, 等. 约束层材料对 7075 铝合金激光喷丸表面强化的实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 124-129.
WU Jiang, CHENG Xiu-quan, XIA Qin-xiang, et al. Experimental research on influence of restraint layer materials on surface strengthening of 7075 aluminum alloy laser shot peening[J]. Surface technology, 2017, 46(3): 124-129.
- [61] FAIRAND B P, CLAUSER A H. Effect of water and paint coatings on the magnitude of laser-generated shocks[J]. Optics communications, 1976, 18(4): 588-591.
- [62] 周磊, 李应红, 汪诚, 等. LY2 铝合金激光冲击处理工艺[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1780-1784.
ZHOU Lei, LI Ying-hong, WANG Cheng, et al. Laser shock peening for LY2 alloy[J]. High power laser and particle beams, 2010, 22(8): 1780-1784.
- [63] AMRINDER S G, ABHISHEK T, VIJAY K V. Characteristics of surface layers formed on inconel 718 by laser shock peening with and without a protective coating[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 225: 463-472.
- [64] 任旭东, 张永康, 周建忠, 等. 激光冲击加工表面涂层厚度的优选[J]. 金属热处理, 2006, 31(7): 61-64.
REN Xu-dong, ZHANG Yong-kang, ZHOU Jian-zhong, et al. Thickness optimizing of surface coating for laser shock processing[J]. Heat treatment of metals, 2006, 31(7): 61-64.
- [65] 沈晓骏, 汪诚, 安志斌, 等. 斜激光冲击对航空发动机风扇轴弯曲疲劳性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3548-3553.
SHEN Xiao-jun, WANG Cheng, AN Zhi-bin, et al. Effects of oblique laser shock processing on rotary bending fatigue of aero-engine fan shaft[J]. Infrared and laser engineering, 2015, 44(12): 3548-3553.
- [66] 汪静雪, 章艳, 张兴权, 等. 激光参数对圆杆件残余应力场影响的数值模拟[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802007.
WANG Jing-xue, ZHANG Yan, ZHANG Xing-quan, et al. Numerical simulation of residual stress field induced in round rod part affected by laser parameters[J]. Chinese journal of lasers, 2016, 43(8): 0802007.
- [67] 孙博宇, 乔红超, 陆莹, 等. 线偏振激光斜冲击实验与理论研究[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 126-132.
SUN Bo-yu, QIAO Hong-chao, LU Ying, et al. Experiment and theoretic analysis of linear polarized laser oblique shock[J]. Surface technology, 2019, 48(1): 126-132.