

基于非激光参数调整的表面冲击工艺研究进展

卢国鑫¹, 罗学昆², 王强², 刘纪德³, 王欣², 张永康⁴, 李金国³, 陆峰²

(1. 山东大学 材料科学与工程学院 金属成形高端装备与先进技术全国重点实验室, 山东 济南 250061)

(2. 中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095)

(3. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016)

(4. 广东工业大学 广东省海洋能源装备先进制造技术重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 工程材料疲劳延寿与复杂构件表面改性等应用需求不断提高, 对激光冲击表面改性工艺进行合理改进和优化已尤为迫切。本文针对激光冲击处理在航空制造等重大工业领域所面临的具体需求, 综述了新近发展的若干工艺改进方法。所涉及工艺策略摆脱了激光冲击对高性能激光器的设备依赖, 从非激光参数调整的角度实现更具经济性和可行性的表面防护与加工。所指非激光参数包括吸收层、约束层以及激光与材料离焦状态等可调节指标, 该类指标的工艺设定区间广泛且易控, 体现出良好的异形构件适应性。所涉及新方法、新技术有望推动研究人员进一步探索绿色激光的应用潜力。

关键词: 激光冲击; 表面强化; 残余应力; 服役性能

中图分类号: TG174.4; TN249

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)11-3246-13

激光冲击 (laser shock processing or laser shock peening, LSP) 可有效改善金属材料的残余应力状态及表面质量, 对金属构件的疲劳寿命等服役特性具有积极作用^[1]。20 世纪 90 年代后期, 美国在航空发动机高频疲劳研究计划中, 将激光冲击强化列为待发展工艺技术的首位; 2003 年, 美国联邦航空管理局 (Federal Aviation Administration, FAA) 和欧洲联合航空管理局 (Joint Aviation Administration, JAA) 正式批准将激光冲击技术列入飞机维修保养的工艺方法; 2005 年, 美国进一步将该技术列为第 4 代战斗机发动机延寿关键技术之一。上述事实均证实激光冲击技术的重大工业价值。

目前, 众多国家和地区开展了激光冲击强化方面的科研工作, 但从公开报道来看, 针对实际零部件进行激光冲击强化的文献仍显匮乏^[2-4]。美国公开了少量对叶片等航空零部件进行激光冲击表面加工的专利, 指出通过单纵模激光器对不同机械零部件进行激光冲击处理可取得优异强化效果。这间接反映出, 高性能激光器的欠缺是导致该技术在我国应用迟滞的原因之一。在受制于激光设备性能水平的情况下, 如何突破设备因素对工艺应用的限制以最大化提高激光冲击效果成为提升激光冲击技术应用效能的关键方面。鉴于激光冲击技术的相关探索

大多停留在“材料”维度的实验室理论研究阶段, 针对具有不同结构特征的复杂零部件进行实际应用拓展更是我国研究人员的努力方向。

1 激光冲击表面技术发展概述

1.1 国外发展历程

1963 年, 美国科学家首先发现脉冲激光可诱导强冲击波, 使材料表面发生塑性变形^[5]; 1968 年, 美国巴特勒纪念研究所 (Battelle Memorial Institute) 安装了一种用于激光聚变研究的大型高能脉冲激光器^[6]; 1972 年, Fairand 等人^[7]用高功率脉冲激光诱导的冲击波改变 7075 铝合金的显微组织, 进而提高其机械性能; 1974 年, Mallozzi 和 Fairand 获授权首件关于激光冲击强化技术的专利^[8]。自此, 激光冲击应用探索的序幕被揭开。

20 世纪 80 年代初, 美国瓦格纳铸造公司 (Wagner Castings Company) 采用激光冲击延长铸铁材料的疲劳寿命并取得优异效果^[9]。为证明该技术的商业可行性, Wagner Castings 联合 Battelle 于 1986 年资助设计和建造一种占地面积小、脉冲速度快的激光器, 并于 1987 年完成并展示。80 年代后期, 法国国家科学研究中心 (Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS) 的 Fabbro

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFE0106500); 国家自然科学基金 (52171073)

作者简介: 卢国鑫, 男, 1988 年生, 博士, 副研究员, 山东大学材料科学与工程学院, 金属成形高端装备与先进技术全国重点实验室, 山东 济南 250061, E-mail: gxlu@sdu.edu.cn

等人^[10-13]启动了关于激光冲击技术理论基础与工业应用的一系列研究，在脉冲激光诱导等离子体产生的物理机制与激光参数对表面改性效果的影响规律等方面取得大量有价值成果。

20 世纪 90 年代以来，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 和通用电气公司 (General Electric Company, GE)、金属改性公司 (Metal Improvement Company, MIC) 等联合开展了激光冲击强化技术的理论、工艺和设备研究，使该技术逐步用于 F101、F110、F414 等发动机关键零部件的表面改性和修理^[14-15]。为了满足 GE 航空公司 (GE Aviation) 所需的工业激光系统需求，1995 年，Dulaney 成立了 LSP Technologies 公司 (LSPT)，成为世界上首个激光冲击设备的商业供应商。2004 年，LSPT 与美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL) 开展了 F/A-22 战斗机上 F119 发动机钛合金损伤叶片的修复研究，采用激光冲击方法对具有 1.27 mm 长度微裂纹且疲劳强度较低 (仅为 206.85 MPa) 的损伤叶片进行处理，修复叶片的疲劳强度大幅超过设计要求^[14,16]。

20 世纪 90 年代中期，日本东芝集团 (Toshiba Corporation) 的 Sano 等人^[17-18]独立于美国和法国的激光冲击技术研发工作，开发出适用于水下服役环境的激光冲击系统，该系统能够在核电站压力容器中进行激光冲击焊接，减轻了焊接区域的应力腐蚀开裂倾向。同时期，Ocaña 等人^[19-20]在西班牙马德里理工大学 (Universidad Politécnica de Madrid, UPM) 成立另一个致力于激光冲击技术探索的团队，他们改善待加工材料的表面涂层状态，重点开展了低能量脉冲激光冲击的理论和实验研究。

随着激光冲击技术在多种型号航空发动机的大规模商业化应用，致力于提供激光冲击技术服务或设备研发的机构不断发展。GE Aviation 和 LSPT 是第一批进行商业激光冲击技术研发的公司，这两家公司皆得到了 Battelle 的技术支持。GE Aviation 为航空航天发动机部件提供激光冲击技术支持，LSPT 将激光冲击服务和设备销售给更广泛的工业基地。后来，基于 LLNL 提供的可靠脉冲激光源，其与 MIC 合作开发了激光冲击系统，并于 2008 年在波音 747-8 上进行了机翼壁板成形的商业化应用。Toshiba Corporation 研发的主要面向核电站场景的激光冲击系统也在 2013 年投入工业应用。

1.2 国内发展情况

国内的激光冲击技术研究始于 20 世纪 90 年代，中国科学技术大学和江苏大学联合研制出国内首台激光冲击处理设备，并在激光冲击强化机理与工艺试验等方面开展了一系列系统而富有创新性的研究，为激光冲击技术在国内的实际应用奠定了良好基础。近年来，多家单

位开展了基于激光冲击原理的强化技术和成形技术研究。北京航空制造工程研究所引进俄罗斯激光冲击处理设备，对不同合金与多种构件进行了激光冲击表面处理^[21-23]。上海交通大学则多关注激光冲击成形研究，采用数值模拟与试验验证相结合的方式对不同厚度板材的不同变形模式进行了机理探索^[24-27]。

2008 年，针对重大工程应用需求，西安天瑞达光电技术公司将激光器和运动平台进行了集成与控制，并指导陕西蓝鹰电器有限公司在阎良建立了激光冲击强化示范生产线，该生产线实现了复杂曲面 (如叶片) 双面激光冲击强化，为该技术在国内航空制造领域的实际应用打下基础^[28]。2011 年，中国科学院沈阳自动化研究所向沈阳黎明航空发动机有限责任公司交付了国内首台整体叶盘激光冲击强化系统，彻底突破了工业生产应用瓶颈，该设备可使叶盘服役寿命提高 4~6 倍以上，创造了可观的经济和社会效益^[29-30]。2017 年以来，广东工业大学、山东迈特莱斯金属表面科技有限公司相继于 LSPT 引进世界最先进的 Procudo[®]200 第 3 代激光冲击系统，可实现包括强化改性的多种激光冲击处理要求，打开了国内激光冲击技术应用与设备开发的新局面^[31]。

2 工艺制定与优化理论基础

2.1 激光冲击技术基础理论

激光冲击是一种利用脉冲激光与物质相互作用产生的力效应对工程材料进行表面处理的技术 (图 1)^[32-34]。在激光冲击过程中，材料表面被均匀涂覆吸收层 (黑漆、铝箔等，又名烧蚀层)，具有高峰值功率密度与超短脉冲的激光光束辐射材料表面后，涂覆层吸收激光能量汽化蒸发而产生等离子体；该等离子体疾速向外膨胀但受到约束层 (通常为水，又名限制层) 的制约，等离子体气压迅速

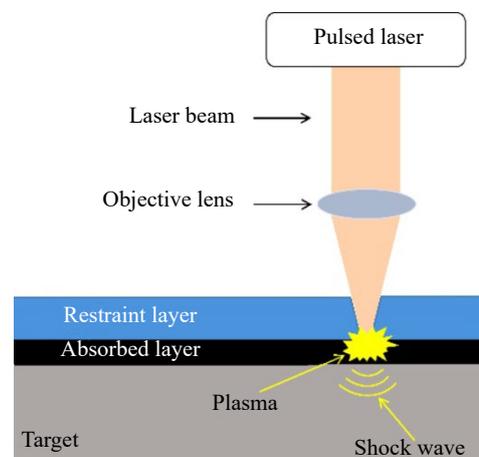


图 1 激光冲击原理示意图

Fig.1 Schematic of the principle of laser shock processing^[34]

上升并产生高压冲击波，作用于材料表面并向内部传播，使材料表层发生塑性变形；由于受到周围材料的挤压作用，受冲击区域形成一定深度的组织演变与残余压应力层，有助于改善金属材料的疲劳等服役性能。

激光冲击处理可控制的工艺参数主要源于 3 个方面：脉冲激光、吸收层与约束层。其中，激光参数对冲击效果起决定性作用，包括功率密度 I_0 、光束能量 E 、脉冲宽度（脉宽） τ 、光斑面积 S 等，各参数值间具有公式(1)的关系^[10,35]。

$$I_0 = E / (\tau \cdot S) \tag{1}$$

通常，根据靶材的物理、力学特性以及不同吸收层对冲击波压力的减弱效果来选择激光功率密度。选取吸收层与约束层后，影响应力波峰值压力的要素仅有激光功率密度^[10,32]。

约束层在激光冲击过程中对等离子体的向外膨胀起到有效的阻止作用，增加了激光诱导冲击波的最大压力和脉宽。为防止击穿破坏，约束层的厚度与强度均有一定要求。另外，约束层还应具备高的透光率与声阻抗等物理特性。在激光冲击过程中一般选用非流体和流体性质的约束层，例如水或 K9 玻璃^[35-36]。

在激光冲击处理之前，材料待加工表面须涂敷吸收（涂）层。吸收层的作用包括：(i) 提高对激光辐射的吸收能力；(ii) 增大压力波峰值；(iii) 防止金属表面熔化和汽化^[6]。吸收层厚度对激光冲击处理效果产生显著影响：吸收层过薄，不足的等离子体密度导致诱导峰压降低，且激光能量击穿易造成材料表面烧蚀；吸收层过厚，未被汽化的部分对冲击波形成衰减影响^[37]。在特定的冲击环境中，吸收层具有一临界厚度。

2.2 激光冲击原理的新理解

一般认为，脉冲激光诱导靶材表面形成等离子体冲击波是激光冲击调控材料表面完整性的物理机制。等离

子体冲击效应（plasma shock）会导致激光冲击材料表面出现一种“残余应力洞”（residual stress hole, RSH）现象（圆形的单光斑辐照的中心区域发生残余压应力的局部缺失），不利于激光能量的充分利用。对比分析液体约束条件激光冲击处理后材料表面残余应力或机械性能研究的文献资料，可发现残余应力洞问题仅较小比例出现在数值模拟结果中，而大多实际试验的中心区域应力缺失情况相对不明显甚至未出现^[38-39]。例如，若同时采用模拟和试验方法检测激光冲击表面机械性能分布规律，则可发现：采用 K9 玻璃为约束层时，试验与模拟结果均出现残余应力洞，但试验结果显示的应力缺失程度较模拟结果低（图 2a）^[40]；而选择水约束层的实际试验并未获得模拟结果中出现的残余应力洞（图 2b）^[41-42]。

通常，纳秒脉冲激光冲击处理中的高温高压等离子体由涂覆在材料表面的烧蚀层材料汽化而成，无烧蚀层激光冲击过程中等离子体的产生则通过待加工材料的表面烧蚀而实现。近年来，具有更短脉宽的皮秒或飞秒激光凭借可保持待加工材料表面无烧蚀的技术优势引起研究者的关注，例如日本发展了应用于核电领域的水下无烧蚀层飞秒激光冲击方法^[43-44]。然而，在这种既无烧蚀层涂覆，又无材料表面烧蚀的超快激光冲击过程中，高温高压等离子体的形成已失去物质基础，激光冲击波怎样形成是个问题。

以上问题均有迹象表明液体约束条件激光冲击过程中存在除等离子体冲击之外的物理现象。图 3 显示，激光还可通过一种空化效应（cavitation）的发生来完成由光能向力能的转变。对大量关于激光诱导空化效应的报道进行分析，可发现脉冲激光引发水中空化效应的物理条件与水约束层激光冲击的实施基础高度一致，那么水约束层激光冲击过程是否伴随不同程度激光诱导空化效应，研究者利用高速摄像获得了同一激光冲击过程中的等

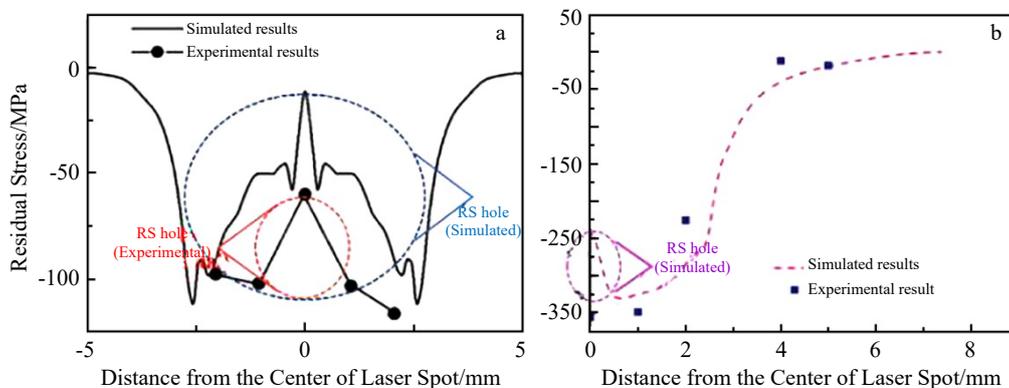


图 2 K9 玻璃与水为约束层激光冲击后金属材料表面残余应力分布的模拟与试验结果

Fig.2 Simulated and experimental results of residual stress distribution on the surface of metal after laser shock using K9 glass and water as the confinement layer: (a) K9 glass confinement layer and 7050 aluminum surface; (b) water confinement layer and 35CD4 steel surface^[40-42]

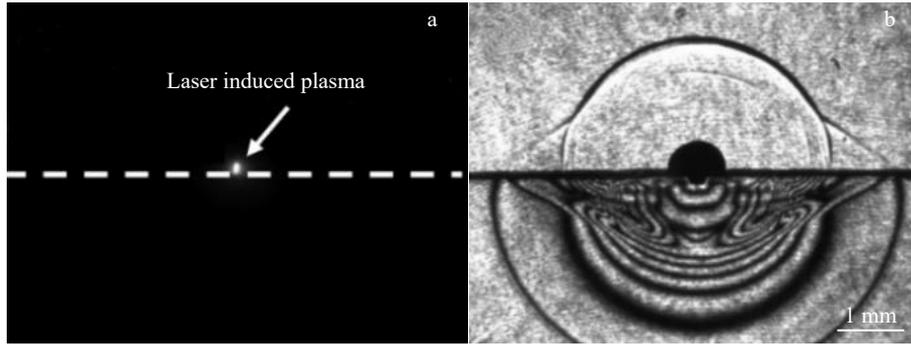


图 3 脉冲激光与物质相互作用过程中发生的等离子体与空化泡图像

Fig.3 Images of the plasma (a) and the cavitation bubble (b) during the interaction between pulsed laser and matter^[45]

离子体 (ns 阶段) 与空化泡 (μs 阶段) 图像, 为证实空化效应提供了现象性依据^[45]。

通过前述相关研究结果的分析可得: 液体约束条件激光冲击的残余应力洞现象在数值模拟与实际试验中表现出较大差异, 这在一定程度上缘于对空化效应的忽视。有限元模型只包含等离子体冲击波压力载荷 (冲击载荷大, GPa 量级, 但持续时间短, ns 量级), 导致数值模拟结果通常呈现突出的残余应力洞现象。实际加工过程中, 激光空化效应 (冲击载荷小, MPa 量级, 但持续时间长, μs 量级) 对材料表面的局部应力缺失起到一定削弱作用。另外, 还可得出: 当激光诱导等离子体冲击波无法作为加工载荷时, 水下无烧蚀层飞秒激光冲击的载荷来源或为脉冲激光引发的空化泡爆裂效应。

入射到液体中的激光如何由光能转化为力能, 不同

学科的研究者给出不同的答案。激光冲击技术领域研究者在对于该技术的物理阐释中, 只关注超快激光诱导材料烧蚀而形成的等离子体冲击波 (目前还不存在技术手段可对 ns 时间范围以内的物理反应进行原位或动态观察, 所以较难看到所述的等离子体演化细节), 这是导致上面所述的两个问题无法解释的直接原因; 而研究激光空化材料处理方法的科学家只聚焦激光击穿水后所形成的空化效应 (研究者已经利用高速摄像等手段揭示激光空化效应对材料表面的作用过程); 光谱学领域的研究者则通常给出一个相对全面的结果, 由于浸没在水环境的固体物质的激光诱导击穿光谱至少包含了激光诱发材料表面在不同时期分别出现的等离子体阶段和气相阶段 (空化泡), 所以脉冲激光可通过上述两种物理效应而转化为机械载荷 (图 4) ^[39,42,46-48]。

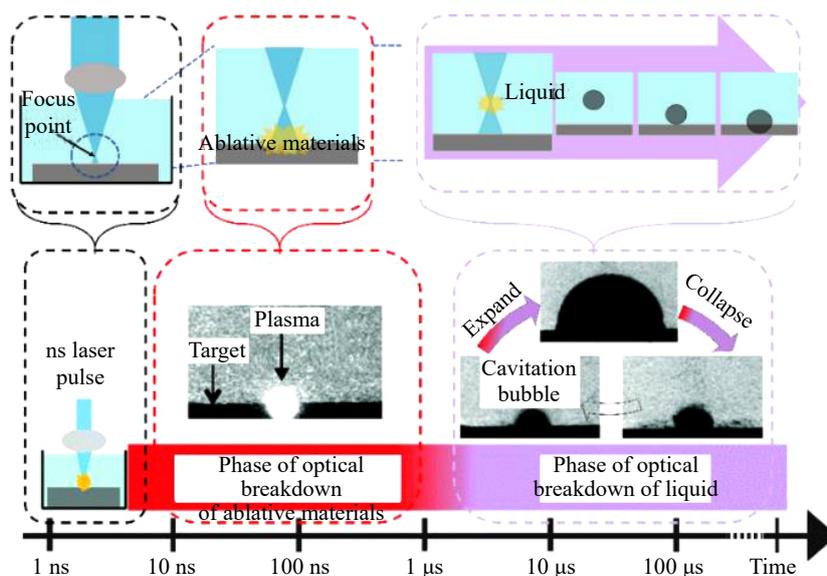


图 4 液体环境中激光 (以 ns 脉冲为例) 诱发不同力效应的示意图

Fig.4 Physical effects of ultrafast pulsed laser (ns pulse width) irradiating substances in the liquid^[39,42,46-48]

3 无依赖激光调整的工艺优化新策略

3.1 均匀加工工艺优化方法

3.1.1 单光斑辐照范围内的均匀激光冲击

激光冲击过程中，残余应力洞的形成导致材料表面残余应力分布的不均匀，会对其服役性能产生不利影响。在采用去离子水为约束介质的激光冲击过程中，通过调整约束层厚度等方式在靶材金属表面产生较高程度的空化效应，进而可利用空化泡爆炸产生的二次冲击波对脉冲激光光束的几何中心进行二次强化（图 5）^[49-50]。基于以上，空化效应带来的二次冲击可对残余应力洞效应的抑制或消除产生积极影响。

为证实空化效应对激光冲击表面强化过程中的残余应力洞现象的影响，利用 304 不锈钢试块开展验证性试验。对块状 304 不锈钢材料的激光冲击处理进行仿真和

实验研究，参考文献[13,51]提供的 Hugoniot 弹性极限计算公式和数据，确保验证性试验所选择的测试参数满足前人提出的“应力洞”形成的力学条件。

图 6 显示了验证性试验的模拟和测试结果^[52]。在激光冲击面上随机选取 3 个光斑区域作为测试对象，光斑中心区域的应力分布趋势如图 6a 所示。结果表明，激光光斑中心区域存在残余压应力，不同位置的残余压应力值差异不大。相比之下，图 6b 所示的测试点中心的残余压应力明显缺失。在数值模拟过程中，研究者利用经验公式计算脉冲激光诱导等离子体产生的冲击波压力，并通过施加计算出的冲击压力等效处理激光冲击过程中的目标载荷。而激光冲击往往伴随着空化效应，但研究者在数值研究中从未考虑过这种情况是否会发生。基于此，图 6 结果间接证实了空化效应对材料表面残余应力洞的抑制效果。

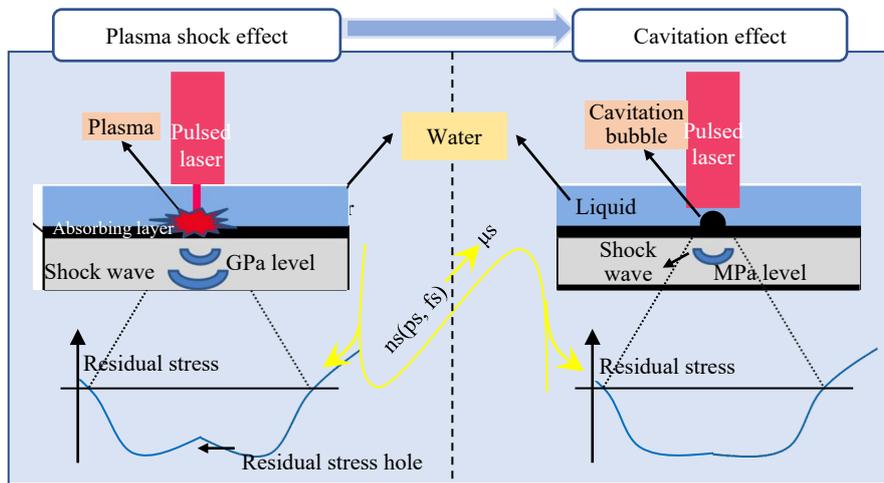


图 5 基于空化效应抑制残余应力洞形成的物理机制

Fig.5 Mechanism of the cavitation effect inhibiting the formation of residual stress hole^[49-50]

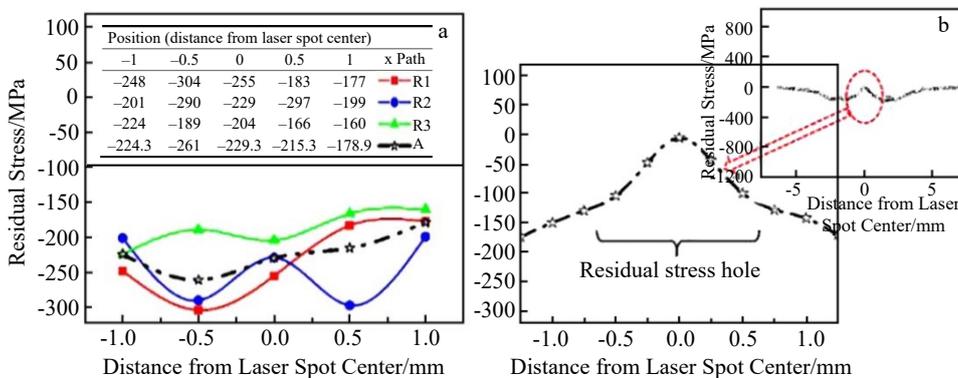


图 6 激光冲击处理后试样冲击区域的表面残余应力分布测试结果与模拟结果

Fig.6 Surface residual stress distributions of the impact region of the sample after laser shock treatment: (a) test results^[52], where R1, R2, and R3 represent the radial paths of the central regions of three different spots, and A represents a virtual radial path formed by averaging the residual stresses of specific positions of the above three spots; (b) simulation results

既然利用液体约束激光冲击过程中的空化效应可抑制或消除残余应力洞，那么如何精准分配和调节“等离子体冲击”以及“空化”两种效应在单次激光冲击过程中的作用强度，是技术人员将空化效应的物理效果真正应用于实际生产的技术关键。以常规的激光冲击表面加工技术为基础，通过改变约束层材料特征可调节待加工材料表面的空化效应强度。

在所述的液体约束激光冲击过程中，等离子体冲击效应与空化效应均发生于激光光束的焦点位置。不同的是，等离子体冲击效应的发生对激光光束的焦点位置的敏感性较低。即，空化效应仅在激光光束的焦点位置才会明显形成，而等离子体冲击效应在偏离激光光束焦点位置的一定距离范围内均会形成。激光从空气入射到液体介质中时会发生折射现象，可导致激光光束的焦点位置在液体内部发生偏移。基于此，当材料表面的液体约束层特性不同时，激光光束在液体约束层内的焦点位置也发生变化；而激光光束焦点位置改变时，等离子体冲击效应与空化效应的产生强度的变化也不一样。因此，当液体约束层特性变化时，等离子体冲击效应与空化效应的作用强度的比例必然不等。

综上所述，通过改变约束层的材质、粘性、厚度等特征，可以实现对液体约束条件激光冲击过程中的双物理效应的调节和分配。在所述技术原理的基础上，可提出基于约束层特征变化的单光束双物理效应协调分配方法^[53-54]。

3.1.2 多光斑搭接工况下的均匀化处理

粗糙表面的应力集中效应对工件服役寿命有不利影响，因此金属工件一般均具有较高的表面质量要求，在激光冲击加工过程中实现工件表面的低波纹度变化具有重要意义。针对激光冲击强化易诱发构件较高表面波纹度的现状，一种低波纹度变化激光冲击的光斑搭接率选取方法可实现对激光冲击表面宏观形貌的精准调控，有效控制工件表面粗糙程度，并使工件表面形成较均匀的残余压应力分布^[55]。

如图 7 所示，脉冲激光可诱导工程材料表面产生 2 类不同形态特征的圆形凹坑，即平底凹坑（高强度/硬度金属材料在激光冲击脉冲作用下形成的平底凹坑形貌，此类圆形凹坑底部为平面）与弧底凹坑（低强度/硬度金属材料形成的弧底凹坑形貌，此类圆形凹坑底部为曲面）。在假定光斑搭接率为 η_0 的条件下，具有平底凹坑的材料表面波纹度变化处于较低水平，但搭接率过高导致激光光斑中心区域与搭接区域出现较大的加工强度差，因此优选光斑搭接率应满足 $\eta_1 < \eta_0$ ；而对于具有弧底凹坑的材料来说，光斑搭接率为 η_0 仍导致较大的材料表面波纹度，相对更高的搭接率 η_2 才能削弱波纹度的增加趋势。

选择 TiAl 基合金与纯铜分别作为不同硬度的试验材料，采用波长 1064 nm、频率 2 Hz、脉宽 14 ns 的 Nd:YAG 激光系统进行单点冲击处理。激光能量为 6 J，采用圆形光斑且其直径为 2 mm。另外，吸收层与约束层分别为厚度约 100 μm 的黑色胶带与厚度约为 2 mm 的去离子水幕。激光冲击处理后，利用白光干涉仪观测激光冲击诱导材料表面形成的圆形凹坑，定量分析凹坑的形貌特征。如图 8 所示，显微硬度 ($\text{HV}_{0.2}$) 为 2940 MPa 的 TiAl 基合金试样在激光冲击脉冲（光斑直径 D ）作用下形成平底凹坑，其底部平面直径 $d \approx 1.25 \text{ mm}$ ；而显微硬度为 823 MPa 的纯铜试样则形成弧底凹坑^[56]。

依据圆形凹坑底部平面尺寸（直径 d ），确定光斑搭接率的优选范围并给出预选值。为不引起较大表面波纹度变化，需至少保证相邻凹坑的平面区域相切，此条件下光斑搭接率的选取原则为 $\eta \geq 1 - d/D$ ；对于产生曲面底部形态凹坑的工件，可使光斑搭接率 $\eta \rightarrow 1$ 。为获得更优的强化效果，加工低强度/硬度金属材料时可适当减小激光脉宽，降低塑性变形层深度。

3.2 变截面构件的不等强度强化工艺

3.2.1 改变吸收层厚度的不等强度强化

激光冲击特别适合对小孔、倒角、焊缝和沟槽等部位进行强化。而复杂型面结构的零部件（图 9）往往

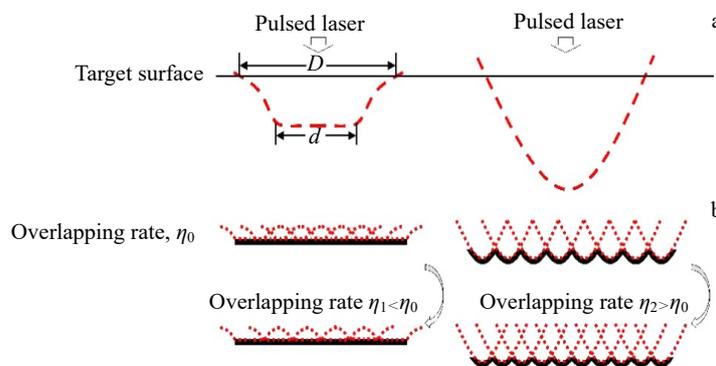


图 7 激光冲击诱导的 2 类不同形态圆形凹坑以及不同光斑搭接率诱导工件表面形貌示意图

Fig.7 Schematic diagrams of two types of circle pits by laser shock (a) and surface topographies under different overlapping rates (b)^[56]

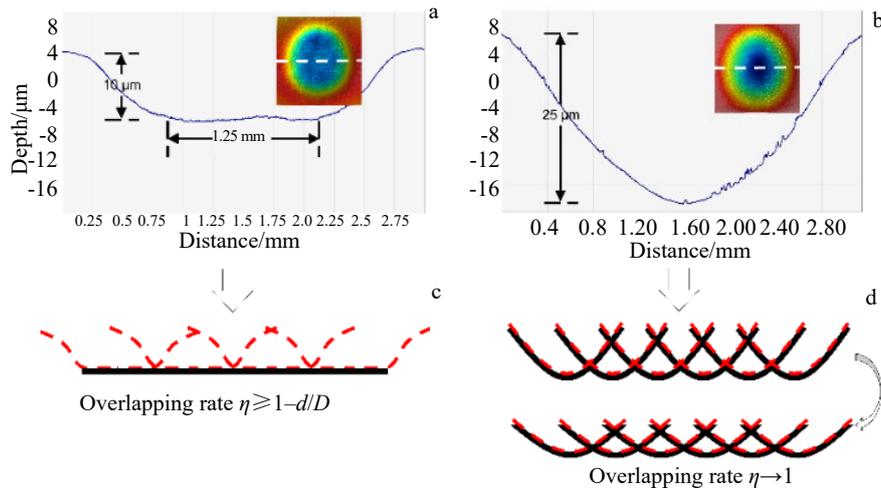


图 8 激光冲击诱导 2 种不同金属材料 (TiAl 与 Cu) 产生的 2 类圆形凹坑以及优选光斑搭接率诱导材料表面形貌示意图

Fig.8 Two types of circle pits induced by laser shock produced on metallic materials TiAl (a) and Cu (b)^[56]; diagrams of surface topographies caused by the preferred overlapping rates (c-d)^[55]



图 9 具有不同区域不同厚度分布的变截面特征典型构件

Fig.9 Typical component with a variable cross-section characteristic of different thicknesses in different regions

在不同区域具有不同的形状特征或失效形式，这就要求不同区域需对应不同的激光冲击加工强度，以使材料获得“形-性”协同的优异综合性能。

以往对形状复杂构件进行分区域不等强度的强化处理时，一般通过调节激光脉冲参数来实现不同区域的不同加工强度。脉冲参数的调节对激光冲击设备性能要求较高，且不同脉冲参数在不同区域的编程设定工序复杂，严重影响了不等强度激光冲击表面加工的实用性与操作效率。鉴于复杂结构构件对不等强度激光冲击强化加工的强烈需求以及以往不等强度强化加工工艺较低的可行性，一种改变吸收层厚度的不等强度激光冲击强化方法发展起来^[57]，可实现复杂形状构件的分区域不等强度表面处理，有效降低加工成本，提高强化效率，并使构件内部残余压应力实现变截面一致性分布。该方法的原理

是：在激光冲击强化过程中，构件表面吸收层将激光能量汽化为等离子体，其厚度控制是决定冲击波强度的关键因素。吸收层厚度临界值以发生完全灼烧为准，在大于临界值的条件下，激光冲击过程中的剩余吸收层（在具备足够初始厚度的情况下，激光光热效应将靶材表面一定厚度吸收层烧蚀殆尽，剩余未被烧蚀的部分厚度吸收层被定义为剩余吸收层）导致构件表面激光能量损失，对冲击波形成衰减作用，明显降低冲击强度^[58]。通过改变构件表面不同区域的吸收层涂覆厚度可获取不同冲击强度，从而实现复杂形状构件的不等强度激光冲击处理（图 10）。

3.2.2 基于变化离焦量的不等强度强化

在激光冲击处理过程中，冲击波大小是由激光光束功率密度直接决定的。激光冲击表面处理所采用的激光光束属于汇聚光束，即激光光束聚焦位置的辐照面积代表最小光斑大小，而偏离光束焦点的距离越大，激光光束的辐照面积也越大。因此，可利用激光光束离焦量大小决定光束辐照面积的物理规律，通过改变变截面厚度构件不同位置的激光光束离焦量来获得不同的激光功率密度，进而在不同冲击波压力作用下，材料表面不同位置可获得与其厚度匹配的加工效果^[59]。

激光光束与材料表面不离焦的情况下，材料表面接收脉冲激光诱导的最大冲击波强度；激光光束与材料表面存在离焦的情况下，材料表面接收的激光冲击波强度降低。以正离焦量变化对应的冲击效果降低为基本原理，可实现材料的不同强度激光冲击表面加工。技术人员也可根据具体加工条件，选择以负离焦量变化对应的冲击效果降低为依据，制定不同强度表面加工工艺。

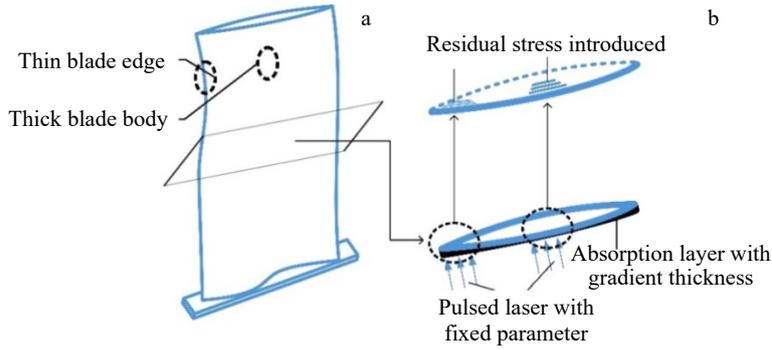


图 10 分区域不等强度激光冲击加工的发动机叶片及利用改变吸收层厚度的不等强度强化方法加工叶片叶身示意图

Fig.10 Schematic diagrams of aero-engine blade that needs to be processed by subarea unequal intensity laser shock treatment (a) and blade body processed by unequal intensity strengthening method with varying absorption layer thicknesses (b)^[57]

如图 11 所示,对待加工构件的不同厚度部位采用不同正离焦量的脉冲光束进行激光冲击处理。在不同离焦状态的冲击过程中,待加工构件的不同厚度部位具有变化的激光辐照面积。辐照面积的变化直接决定激光功率密度的分布,进而使得构件不同区域在不同冲击载荷作用下形成与其截面厚度相匹配的残余应力场(图 12)^[59]。

3.3 非“变激光”的高强度表面强化策略

对于部分表面光洁度不高的待强化构件来说,激光冲击处理往往无法实现高表面光洁度构件的表面强化效果。由于激光冲击过程中的靶材表面作用力取决于激光器发生激光的功率密度,而目前激光能量、脉宽以及光束面积的调节范围均较小,这导致激光诱导冲击波在材料表面的作用强度受到一定限制。为增强作用强度,

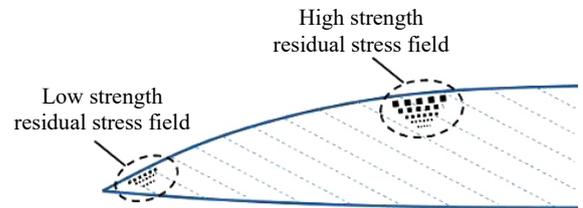


图 12 不同截面厚度区域采用变化离焦状态的激光光束的脉冲激光表面强化效果

Fig.12 Pulsed laser surface strengthening effect of laser beams with varying defocusing states in areas with different cross-sectional thicknesses^[59]

针对构件的不同局部进行工艺参数调整,成本则较高。在不改变既定激光冲击工艺的条件下,如何实现构件的高强度强化是技术人员需要解决的问题。

制备具有不同表面粗糙度的试样,并对试样进行相同激光参数的冲击强化处理,获得了初始表面粗糙度对激光冲击实际作用强度的影响规律。靶材初始表面粗糙度越低,材料在激光冲击处理之后的塑性变形程度越高。另外,更光滑的靶材表面使得激光冲击引入材料表面更高的残余压应力。研究结果为提高激光冲击实际作用强度提供了不同的解决思路,通过降低靶材的初始表面粗糙度来达到更明显的激光冲击强化效果,可行性和经济性均更高^[60]。

在原理性验证试验中,试验材料选择 304 奥氏体不锈钢。分别用 200#砂纸或 800#砂纸进行研磨处理获得较差表面质量的靶材试块,通过机械研磨和抛光处理获得较低表面粗糙度的试样。图 13 示出了试验靶材初始表面状态,经过机械抛光 (mechanical polisher, MP)、800#砂纸研磨 (mechanical grinding by 800# sandpaper, 800MG)、200#

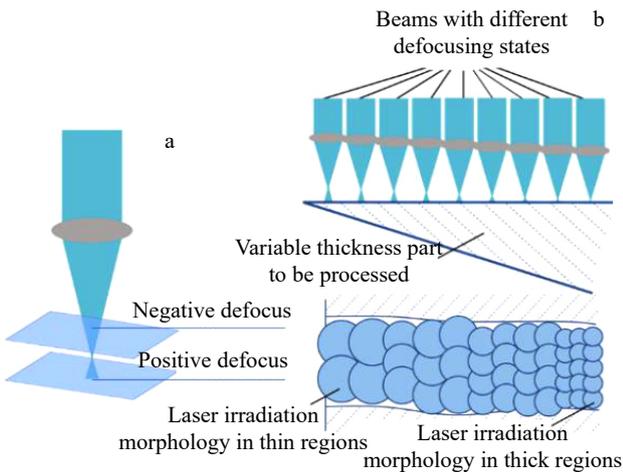


图 11 正、负离焦条件以及变化正离焦量的不等强度表面处理示意图

Fig.11 Schematic diagrams of positive and negative defocusing conditions (a) and unequal intensity surface treatment with varying positive defocusing amount (b)^[59]

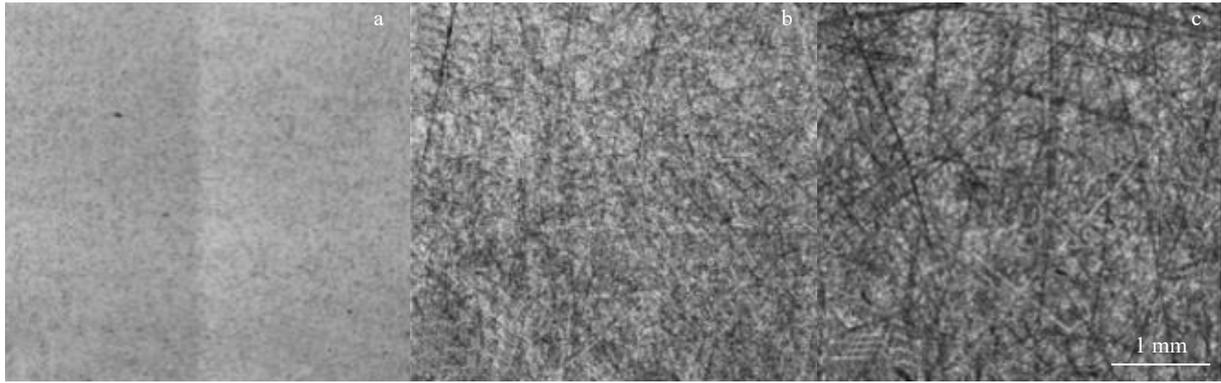


图 13 金属靶材激光冲击处理前的表面状态

Fig.13 Initial surface states of the metal targets before laser shock treatment: (a) MP treatment, (b) 800MG treatment, and (c) 200MG treatment^[52]

砂纸研磨（200MG）的试块表面的粗糙程度呈现递增趋势^[52]。3 类不同试块分别对应了具有不同最终机械加工工序的金属零部件，例如，相比机械抛光为最后加工工序的金属零部件，磨削加工为最后加工工序的金属零部件一般具有更高的表面粗糙度。经过不同预处理手段加工的试块在激光冲击处理后，采用 X 射线应力仪检测其表面残余应力情况。不同表面状态的靶材试块获得的平均表面残余应力分别为-330 MPa（MP）、-298 MPa（800MG）、-233 MPa（200MG）。残余压应力的引入是激光冲击处理提高材料疲劳等服役性能的最主要原因，残余压应力值越大说明激光冲击处理的强度越高。

脉冲激光诱导冲击波的大小与作用时间共同决定了激光冲击处理的强度大小，而脉冲激光对构件的实际作用面积通过改变激光功率密度的方式改变了冲击波的大小。如图 14 所示，对于表面完全平整的待强化区域，激光光束的辐照面积为激光冲击波的实际作用面积，而对于表面粗糙度较高的待强化区域，激光冲击波的实际作用面积在不同程度上超过了激光光束的辐照面积^[52]。实

际作用面积的增大必然引起激光功率密度的降低，因此高表面粗糙度区域在激光冲击过程中将获得相对较弱的强化效果。对具有较高表面粗糙度的待强化区域进行平整化处理以减小激光功率密度损失的程度，可有效提高实际激光冲击强度。

4 无依赖激光调整的表面加工新技术

高能短脉冲激光可引发显著的力效应，从而可导致金属材料发生不同程度的塑性变形。技术人员基于该原理，发展了激光冲击强化技术与激光冲击成形技术。激光冲击成形技术目前主要应用于薄壁构件，可以实现金属材料的精准变形，是具有重要发展潜力的金属材料成形技术。利用高能激光开发更多有应用价值的工业技术是研究人员的共同目标，近年来，激光冲击压印（laser shock marking, LSM）等新技术被提出^[58,61-62]。

以往在金属材料表面进行标记处理时，常采用“刻”、“蚀”等方法，上述机械加工方法在加工标记的同时，对金属材料表面质量以及表层显微组织产生不利影响。利

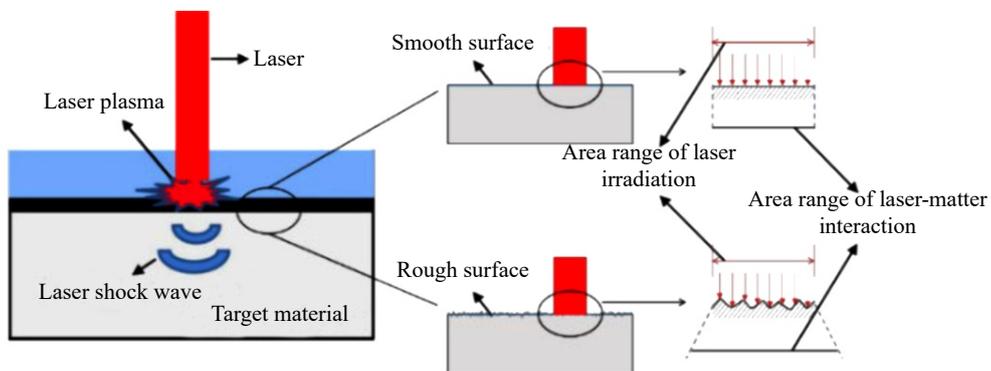


图 14 脉冲激光在不同表面粗糙度构件表面的实际作用面积变化示意图

Fig.14 Schematic diagram of actual active area change of pulsed laser on the surface of parts with different surface roughness^[52]

用接触式的机械加工方法对靶材金属进行标记，破坏了标记区域的抗疲劳性能且增强了材料的腐蚀倾向。采用非接触式激光冲击方式进行标记，可使金属材料保持较好的表面组织状态，并引入材料内部一定深度的残余应力场，是一项值得推广的绿色加工技术。

图 15 示出了激光冲击压印方法的基本原理^[58,63]。靶材金属表面涂覆一定厚度 (\geq 临界厚度) 的吸收层，激光冲击处理使得材料表面形成的凹陷具有与激光光斑相同的形状。设计一种带方形孔 (尺寸小于激光光斑) 的吸收层，并将其覆盖在第一吸收层之上，激光光束对准方形孔区域进行激光冲击处理，靶材表面获得与方形孔对应的凹陷形貌。也就是说，方形孔区域覆盖了初始厚度的吸收层，而方形孔区域之外则覆盖了相对更厚的吸收层。这直接导致方形孔区域具有相对高的激光冲击诱导压力，方形孔区域内外具有不同的塑性变形程度。根据各自的主要作用，可将涂覆在靶材表面的初始吸收层称为“成形层 (shape-forming layer)”，而把覆盖在“成形层”之上的发挥降低激光冲击压力作用的吸收层称为“控形层 (shape-controlling layer)”。

以获得“X”字母形状的标记为例，设计了 2 种类型的压印方式，压印形状分别取决于“控形层”为“浮雕”或“镂空”两种形式的哪一种。吸收层材料选取黑色胶带，“成形层”为 1 层吸收层，“控形层”为叠加在“成形层”之上的 3 层吸收层。对吸收层的“X”字母标记区域进行搭接率 $\eta=20\%$ 的激光冲击处理。试验靶

材金属材料为 7075 铝合金，试样尺寸不小于 24 mm×24 mm×4 mm。

图 16 示出了采用激光冲击方法获得的“X”标记形态^[58]。“X”字母的标记区域覆盖多层吸收层作为“控形层”时 (“控形层”为“浮雕”形式)，其具有高于周围基体区域的高度，呈现凸出形态，并保持了基体初始的平整状态 (图 16a)；而当该区域覆盖了单层“成形层”，其环绕区域为多层“控形层”时 (“控形层”为“镂空”形式)，“X”标记则呈现凹陷形貌 (图 16b)。将获得凸出形态标记的处理模式称为“控形模式 (shape controlling mode, SC mode)”，另一种即为“成形模式 (shape forming mode, SF mode)”。

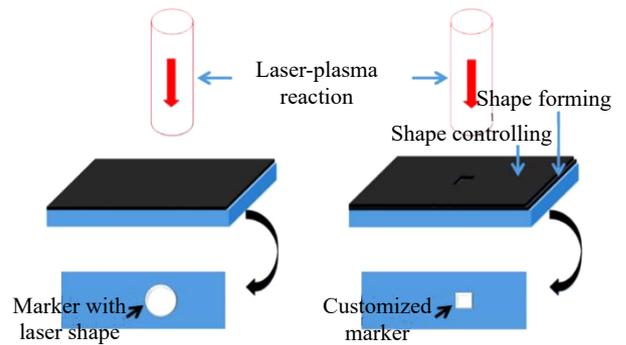


图 15 激光冲击压印成形的原理图
Fig.15 Principle sketch of LSM^[58,63]

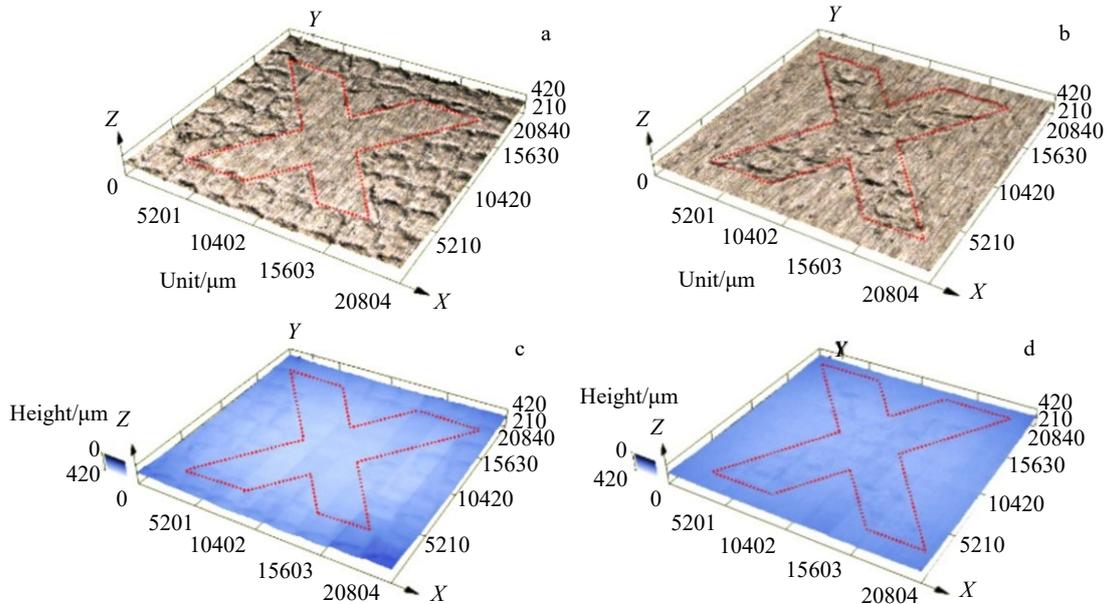


图 16 获得的“X”字母标记的三维形貌

Fig.16 Three-dimensional morphologies (a–b) of the obtained “X” letter mark and undulating states of target surfaces (c–d): (a, c) shape-controlling marking pattern; (b, d) shape-forming marking pattern

5 结论与展望

航空精密零部件的服役要求愈发苛刻,对表面强化引入残余应力与组织演变层分布的均匀性提出更高要求;不同区域不同厚度的变尺寸构件在均匀强化后,又表现出较高的宏观变形几率。针对增长的高性能激光表面强化需求与滞后的高性能激光器研发之间的矛盾,本文分别从调整多层激光冲击处理工艺与改变待加工材料表面质量的角度出发,展示可提高残余压应力场强度与实际激光冲击强度的创新措施。为更充分发挥激光作为绿色能量的优势,还以脉冲激光诱导的力效应为基础,介绍了激光标记新技术。借助脉冲激光力效应制备金属标记克服了传统标记方法破坏材料表面状态进而降低服役性能的弊端,具有很强的应用价值。

本文所述关于激光冲击技术的改进措施及相关新技术是在激光冲击技术快速发展与应用的背景下提出,这些措施或方法或许仍不完善或仍具备改进空间。随着激光冲击技术应用领域的进一步拓展,激光冲击工艺实施将愈发成熟。另外,更加智能化、自动化的激光加工装备的制造也将成为重要的发展方向。

参考文献 References

- [1] Geng Y X, Zheng H Z, Li G F *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(8): 2721
- [2] Kalentics N, Seijas M, Griffiths S *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 33: 101112
- [3] Zhang C Y, Dong Y L, Ye C. *Advanced Engineering Materials*[J], 2021, 23(7): 2001216
- [4] Gupta R K, Pant B, Kain V *et al.* *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*[J], 2019, 6(4): 424
- [5] White R M. *Journal of Applied Physics*[J], 1963, 34(7): 2123
- [6] Clauer A H. *Metals*[J], 2019, 9(6): 626
- [7] Fairand B P, Clauer A H. *Journal of Applied Physics*[J], 1979, 50(3): 1497
- [8] Mallozzi P, Fairand B. *Altering Material Properties, USA patent US3850698A*[P]. 1974
- [9] Clauer A H, Walters C T, Ford S C. *ASM Conference on Lasers in Materials Processing*[C]. Materials Park, OH: ASM International, 1983
- [10] Fabbro R, Fournier J, Ballard P *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 1990, 68(2): 775
- [11] Peyre P, Fabbro R. *Optical and Quantum Electronics*[J], 1995, 27(12): 1213
- [12] Peyre P, Fabbro R, Berthe L *et al.* *Journal of Laser Applications*[J], 1996, 8(3): 135
- [13] Peyre P, Fabbro R, Merrien P *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 1996, 210(1-2): 102
- [14] Bartsch T M. *High Cycle Fatigue (HCF) Science and Technology Program*[R]. Dayton: Universal Technology Corp, 2002
- [15] Davis B, Mannava S, Rockstroh T *et al.* *45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*[C]. Palm Springs: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004: 50
- [16] Lumley R. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy-Production, Processing and Applications*[M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2011
- [17] Okazaki Y, Ito A, Sano Y *et al.* *Underwater Laser Fabrication Method and Device, Japan Patent, JP 8-206869/A*[P]. 1996
- [18] Sano Y, Mukai N, Okazaki K *et al.* *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*[J], 1997, 121(1-4): 432
- [19] Ocana J L, Molpeceres-Criado J L, Gamez M *et al.* *9th International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers*[C]. Heraklion: SPIE, 1993: 1810
- [20] Ocana J L, Molpeceres C, Morales M *et al.* *High-Power Laser Ablation II*[C]. Osaka: SPIE, 2000: 3885
- [21] Zou Shikun(邹世坤), Tan Yongsheng(谭永生), Guo Dahao(郭大浩) *et al.* *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2004, 31(3): 371
- [22] Zou Shikun(邹世坤), Gong Shuilu(巩水利), Guo Enming(郭恩明) *et al.* *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2011, 38(6): 76
- [23] Cao Z W, Che Z G, Zou S K. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2013, 42(S): 222
- [24] Hu Y X, Yao Z Q. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2008, 48(2): 152
- [25] Hu Y X, Xu X X, Yao Z Q *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2010, 108(7): 073117
- [26] Hu Y X, Li Z, Yu X C *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 221: 214
- [27] Yang R Y, Hu Y X, Luo M S *et al.* *Optics and Lasers in Engineering*[J], 2019, 115: 90
- [28] Zhou Lei(周磊), Li Yinghong(李应红), Wang Cheng(汪诚) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2011, 40(6): 1093
- [29] Qiao Hongchao(乔红超), Zhao Jibin(赵吉宾), Lu Ying(陆莹). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2013, 40(8): 1
- [30] Qiao Hongchao(乔红超), Gao Yu(高宇), Zhao Jibin(赵吉宾) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2015, 25(7): 1744
- [31] Lu Guoxin(卢国鑫), Jin Tao(金涛), Zhou Yizhou(周亦胄) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2015, 25(7): 1744

- 学报[J], 2018, 28(9): 1755
- [32] Fabbro R, Peyre P, Berthe L *et al.* *Journal of Laser Applications*[J], 1998, 10(6): 265
- [33] Lu Guoxin(卢国鑫). *Effect of Laser Shock on Surface Topography, Microstructure and Mechanical Behaviors of Superalloys*(激光冲击对高温合金表面形貌、组织与性能的影响)[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017
- [34] Lu G X, Liu J D, Qiao H C *et al.* *Advanced Engineering Materials*[J], 2016, 19(2): 1600672
- [35] Hou Lihua(侯丽华). *Investigation of Laser Shock Processing on Mechanical Properties and Microstructure of Ti-6Al-4V Titanium Alloy at Elevated Temperatures*(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]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015
- [36] Li Y X, Ren Z C, Jia X *et al.* *Manufacturing Letters*[J], 2021, 27: 26
- [37] Ren Xudong(任旭东), Zhang Yongkang(张永康), Zhou Jianzhong(周建忠) *et al.* *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2006, 31(7): 61
- [38] Qiao H C, Sun B Y, Zhao J B *et al.* *Optik*[J], 2019, 186: 52
- [39] Chen H Q, Wang Y, Kysar J W *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2007, 101(2): 024904
- [40] Cao Yupeng(曹宇鹏), Zhou Dongcheng(周东呈), Feng Aixun(冯爱新) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2016, 43(11): 1102003
- [41] Hu Y X, Yao Z Q. *Acta Metallurgica Sinica, English Letters*[J], 2008, 21(2): 125
- [42] Lu G X, Li J, Ji Z *et al.* *Measurement*[J], 2021, 185: 110016
- [43] Kalainathan S, Sathyajith S, Swaroop S. *Optics and Lasers in Engineering*[J], 2012, 50(12): 1740
- [44] Cunha A, Giacomelli R O, Kaufman J *et al.* *2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference*[C]. New York: IEEE, 2021
- [45] Nguyen T T P, Tanabe R, Ito Y. *Applied Physics Letters*[J], 2013, 102(12): 775
- [46] Sano Y. *Metals*[J], 2020, 10(1): 152
- [47] Lam J, Amans D, Chaput F *et al.* *Physical Chemistry Chemical Physics*[J], 2014, 16(3): 963
- [48] Barney C W, Dougan C E, McLeod K R *et al.* *Proceedings of the National Academy of Sciences*[J], 2020, 117(17): 9157
- [49] Lu G X, Wang D G, Gao S *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2022, 18: 3626
- [50] Lu Guoxin(卢国鑫). *A Uniform Surface Strengthening Method Based on Laser Shock Wave*(一种基于激光冲击波的均匀表面强化方法), *China Patent*, ZL202010014492.5[P]. 2021
- [51] Ling X, Peng W W, Ma G. *Journal of Pressure Vessel Technology*[J], 2008, 130(2): 021201
- [52] Lu G X, Li J, Zhang Y K *et al.* *Surface Topography: Metrology and Properties*[J], 2019, 7: 015025
- [53] Lu Guoxin(卢国鑫), Wang Diangang(王佃刚), Zheng Chao(郑超) *et al.* *A Dual-Physical-Effect Pulse Laser Shock Method Based on the Variable Physical Properties of Liquid Confining Layers*(一种基于变液体约束层物性的双物理效应脉冲激光冲击方法), *China Patent*, ZL202110320522.X[P]. 2022
- [54] Lu Guoxin(卢国鑫), Wang Diangang(王佃刚), Su Qingcai(宿庆财) *et al.* *A Control Method for Laser Shock "Cavitation" Effect Based on Feature Adjustment of Liquid Confining Layers and Its Application*(一种基于液体约束层特征调整的激光冲击“空化”效应控制方法及其应用), *China Patent*, ZL202110206119.4[P]. 2022
- [55] Lu Guoxin(卢国鑫), Zhang Yongkang(张永康), Yang Qingtian(杨青天). *A Method and System for Pulse Laser Strengthening Metal Parts*(一种脉冲激光强化金属零件的方法及系统), *China Patent*, ZL201711217299.6[P]. 2019
- [56] Lu G X, Liu J D, Zhou Y Z *et al.* *Optics Communications*[J], 2019, 436: 188
- [57] Zhang Yongkang(张永康), Lu Guoxin(卢国鑫), Lin Chaohui(林超辉) *et al.* *A Laser Shock Processing Method and Device*(一种激光冲击强化方法及装置), *China Patent*, ZL201810663972.7[P]. 2019
- [58] Lu G X, Li J, Zhang Y K *et al.* *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2019, 34(6): 598
- [59] Lu Guoxin(卢国鑫). *A Method of Unequal Intensity Laser Shock Processing Based on Variable Defocusing Amount*(一种基于变化离焦量的不等强度激光冲击加工方法), *China Patent*, ZL202110918764.9[P]. 2022
- [60] Lu Guoxin(卢国鑫), Gao Rong(高荣), Wang Xin(王欣) *et al.* *A Method of Unequal Intensity Laser Shock Based on Load Transfer*(一种载荷传递式不等强度激光冲击方法), *China Patent*, ZL202011548746.8[P]. 2021
- [61] Lu G X, Trdan U, Zhang Y K *et al.* *Mechanics of Materials*[J], 2020, 143: 103310
- [62] Gao H, Hu Y W, Xuan Y *et al.* *Science*[J], 2014, 346(6215): 1352
- [63] Lu Guoxin(卢国鑫), Zhang Yongkang(张永康), Liu Jun(刘俊). *A Laser Shock Imprinting Method and Device*(一种激光冲击压印方法及装置), *China Patent*, ZL201810663962.3[P]. 2020

Research Progress on Methods of Shock Treatment Based on Adjustment of Non-laser Parameters

Lu Guoxin¹, Luo Xuekun², Wang Qiang², Liu Jide³, Wang Xin², Zhang Yongkang⁴, Li Jinguo³, Lu Feng²

(1. National Key Laboratory of High-End Metal Forming Equipment and Advanced Technology, School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

(2. Aviation Key Laboratory of Advanced Corrosion and Protection on Aviation Materials, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(3. Shi Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Marine Energy Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: With the further improvement of material fatigue life extension and processing of parts with complex shapes, laser shock processing has encountered more and more obstacles in practical applications and it is particularly urgent to improve and optimize the specific processing methods in laser shock treatments. Using the stress effect produced by pulsed lasers to process materials in various fields still has broad prospects. Given the specific needs of laser shock in different industrial applications, several processing improvement methods which get rid of the equipment dependence on high-performance laser units were proposed. The non-laser parameters include adjustable indicators, such as absorption layer, constraint layer, and defocusing state between laser and material. The selected material, thickness, and other related attributes of the absorption layer and the constraint layer directly affect the intensity of laser-induced shock waves, while changes in defocusing amount lead to differences in physical or chemical effects on the material surface. The process setting range for the above non-laser indicators is wide, easy to control, and can reflect good adaptability of irregular components. The development of new technologies for equal/unequal-strength and high-strength surface strengthening based on changes in these indicators, as well as new green packaging technologies such as laser marking, were introduced in detail. The new ideas behind these new methods are expected to inspire researchers to further explore the application potential of green lasers.

Key words: laser shock; surface strengthening; residual stress; service performance

Corresponding author: Lu Guoxin, Ph. D., Associate Professor, National Key Laboratory of High-End Metal Forming Equipment and Advanced Technology, School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China, Tel: 0086-531-88392817, E-mail: gxlu@sdu.edu.cn