

引文格式:贺劲舸,赵万芹,孙涛,等.激光制孔在线监测技术研究综述[J].航空制造技术,2026,69(8):25010172.

HE Jinge, ZHAO Wanqin, SUN Tao, et al. Review on online monitoring technology during laser drilling holes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(8): 25010172.

激光制孔在线监测技术研究综述

贺劲舸^{1,2,3}, 赵万芹^{1,2,3}, 孙涛^{1,2,3}, 钟元华^{1,2,3}, 薛博中^{1,2,3}, 李嘉思^{1,2,3}, 梅雪松^{1,2,3}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049;

2. 西安交通大学精密微纳制造技术全国重点实验室, 西安 710049;

3. 西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室, 西安 710049)

[摘要] 激光制孔技术作为精密制造领域的关键工艺,在航空航天、新能源及微电子等高端制造领域中广泛应用,非接触加工、高精度和材料适用性广等优势使之成为毫米/微米级孔加工的核心方案。但激光与材料相互作用中存在复杂多物理场耦合,加工机理不清晰、质量缺陷难以实时诊断等问题,制约了工艺优化与效率提升,为此,在线监测技术逐渐成为提升可控性与质量稳定性的重要手段。本文以研究逻辑框架与技术体系总览为引领,系统梳理了激光制孔在线监测技术的研究进展,重点阐述被动监测(声发射信号、光电信号、视觉信息)与主动监测(光学相干成像、X射线同步辐射成像、激光共聚焦显微)两类方法的原理与现状,分析各类技术的监测内容,揭示当前研究中存在的监测信号与孔参数关联模糊、大深径比制孔信号衰减、复杂工况抗干扰能力不足等问题,并基于各类技术的监测原理、信号特点及适用性,总结其精度、响应速度、成本及工程局限性。最后,从模块化监测装备、多模态融合模式和加工—监测闭环控制3个方面进行展望,为相关技术由实验室走向工程化和产业化提供参考。

关键词: 激光制孔; 在线监测; 加工状态识别; 被动监测; 主动监测

中图分类号: V26; TN249; TG665

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010172



贺劲舸

博士研究生,主要研究方向为激光加工在线监测技术。

激光制孔技术具有加工速度快、效率高、可加工材料种类广、非接触加工无刀具损耗、可实现微细孔加工以及灵活可达性高等显著优势^[1-3],是现代精密制造领域的关键技术之一,在航空航天、新能源、微电子器件等高端制造领域发挥着不可替代的作用。典型应用包括航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔加工^[4-6]、锂离子电池正负电极通孔加工^[7-9]以及微电子器件微孔阵列加工^[10-13]等。然而,激光制孔过程本质上是一个复杂的多物理场耦合过程,当激光能量密度超过材料烧蚀阈值时,材料发生熔化喷溅、气化蒸发或等离子体喷射

等复杂的去除行为,并伴随剧烈的热-力-光耦合效应。这一过程受激光参数、材料特性以及环境因素等多重因素影响,导致加工过程呈现出显著的非线性和不确定性^[14-16]。为了实现高精度、高稳定性的激光制孔加工,准确掌握制孔过程中的动态演化信息、实时监测孔深、孔径变化,激光制孔在线监测技术应运而生。不同激光制孔工艺在能量传递方式与材料去除机理上存在差异,其在线监测需求的侧重点也各不相同。脉冲制孔是由高能短脉冲累积效应主导的瞬态去除机制,伴随剧烈的等离子体喷发,使得监测难点在于捕捉极

收稿日期: 2025-11-24; 退修日期: 2025-12-16; 录用日期: 2026-01-09

基金项目: 新材料重大专项(2025ZD0609600); 国家自然科学基金(52575531, 52335009)

通信作者: 赵万芹, 副研究员, 博士, 主要研究方向为激光光束调控精密加工及其在线监测技术等。

短时间窗口内的穿透时刻与深孔演变,这要求监测系统必须优先保障极高的时间分辨率与高频瞬态响应能力,以精准反馈 μs 级的熔池动力学行为^[17-19]。旋切制孔依赖于光束轨迹的精密螺旋进给,孔型的形成过程及其几何质量与旋切轨迹的高度相关,因此监测需求更侧重于空间分辨率与几何形貌重构能力,旨在通过高精度的位置映射与轨迹追踪来管控孔型的圆度和锥度偏差^[20-22]。水导激光制孔引入了复杂的固-液-气多相耦合环境,带来了严峻的流体噪声以及信号衰减挑战,迫使监测策略必须聚焦于抗干扰技术与信号解耦算法,以突破介质层物理屏障并从强背景噪声中提取真实的加工状态信息^[23-25]。综上所述,针对不同激光制孔工艺特点与监测目标,亟须发展多种在线监测方法,以实现对制孔过程关键状态参数的有效感知与表征。

激光制孔在线监测技术可分为两类:被动监测和主动监测。被动监测捕捉加工过程中激光与材料相互作用所产生的信号,例如声发射信号^[26-29]、光电信号^[30-32]、视觉信息^[33-35]等,这类方法的优势在于信号直接来源于加工过程,能够反映激光与材料的相互作用,系统搭建相对简单、成本较低,易于与现有加工设备集成。其局限性在信号与加工质量间的定量关系复杂且尚不明确,难以直接获取孔的几何尺寸等关键信息。主动监测通过向被加工区域主动发射探测信号并接收实时响应,能够直接、准确地反映加工形态信息,包括光学相干成像(Optical coherence tomography, OCT)^[36-38]、X射线同步辐射技术^[39-41]与激光共聚焦显微技术^[42-44]。这类方法的优势在于可直接获取加工区域的微观结构和几何参数,无需依赖复杂的信号解析模

型,且能与加工系统同轴集成。但主动监测系统通常结构复杂、成本较高,成像速度与加工过程的阶段识别匹配难度大,同时加工过程中的等离子体、飞溅物等干扰会影响信号质量,限制了其在复杂工况下的应用。

激光制孔在线监测技术正处于从单一信号向多信息融合、从被动监测向主动控制转变的关键时期,并面临着信号-质量映射模糊、监测精度与系统成本难以平衡、以及工艺调控滞后等核心挑战。鉴于此,基于国内外在激光制孔在线监测领域的研究进展,绘制了技术逻辑总览图(图1),以此为脉络梳理现阶段的技术体系。首先,详细阐述被动监测与主动监测两大类方法,对比分析各类技术的监测原理、信号特性及在多物理场环境下的适应性;其次,探讨多模态信息融合策略,分析异构信号互补对解决过程非线性难题的作用;最后总结

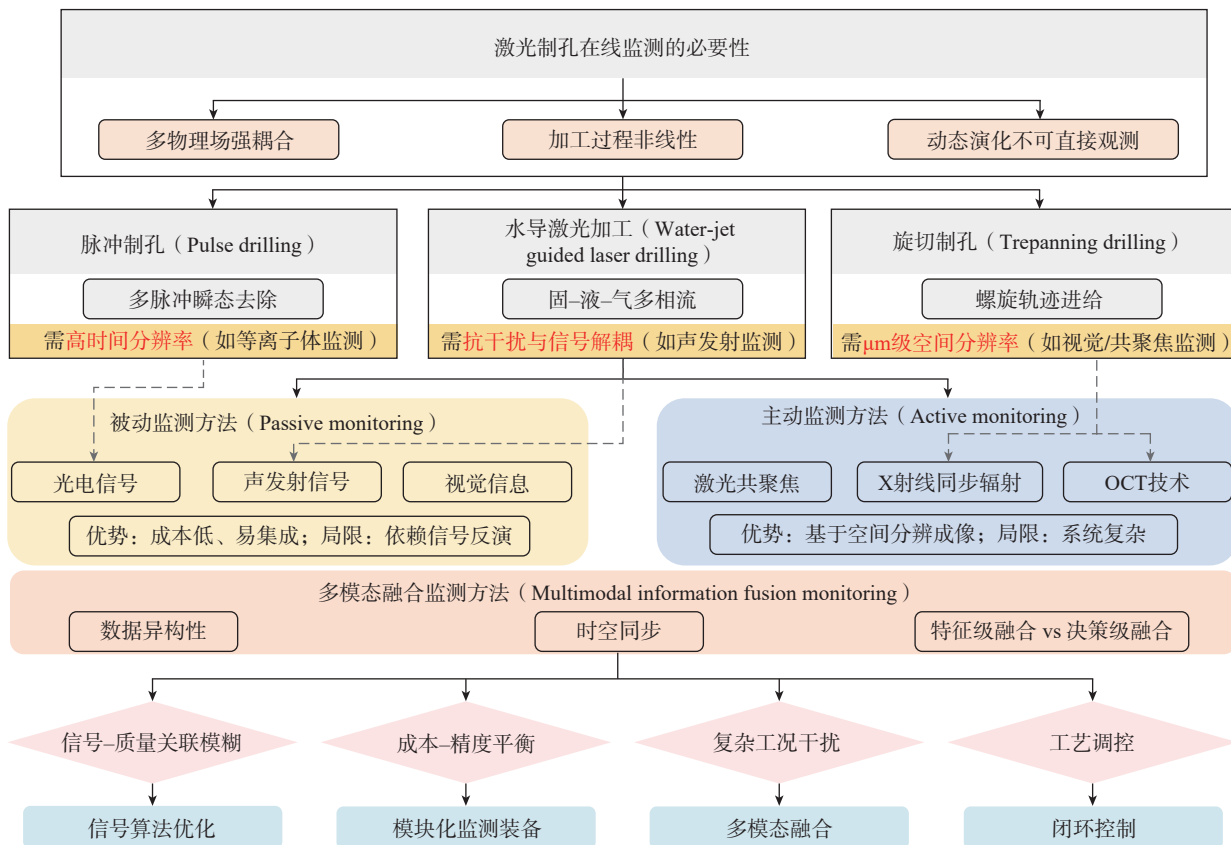


图1 激光制孔在线监测技术的研究逻辑框架与技术体系总览

Fig.1 Research logic framework and technical system overview of online monitoring technology for laser drilling

现有技术的优势与不足,并从模块化装备集成与智能闭环控制等维度进行未来展望,旨在为推动该技术从实验研究走向工业应用提供理论参考。

1 激光制孔被动在线监测方法

1.1 基于声发射技术的在线监测方法

声发射是指材料在应力作用下发生变形或损伤时,其内部快速释放应变能,从而产生瞬态弹性波的物理现象^[27],原理如图2所示。在激光加工过程中,高能量密度激光束与材料相互作用引发热-力耦合效应:激光诱导的等离子体羽流对熔池产生反冲压力,结合材料快速熔化、气化过程中的热应力释放,共同激发声发射源;产生的弹性波在材料中传播,最终被传感器捕获并转换为电信号,经信号特征提取后实现加工过程的在线监测^[45-47]。由于声发射技术具有高频响应特性和对材料微观损伤的高灵敏度,能够实时捕捉激光加工瞬态过程并有效抵抗强光辐射、等离子体及烟尘等光学干扰^[48-49];但激光加工中多物理场耦合会导致声发射信号成分复杂、背景噪声严重,且作为间接测量手段难以直接定量表征缺陷的几何特征,限制了其独立应用的可靠性^[50]。该技术主要应用于激光焊接熔池稳定性监测与缺陷识别^[51]、激光切割过程质量评估与穿透监测^[52]、激光增材制造层间结合质量与裂纹实时预警^[47],以及激光制孔过程中的穿透状态识别与孔壁损伤评估^[53]等方面。

希腊帕特雷大学 Stourmaras 等^[29]针对激光制孔过程的声发射信号时域以及频域特征进行了剖析,发现声发射信号幅值和孔深的增长速率呈现出明显的正相关关系,证实了声发射信号能够作为制孔进度的一种间接的表征方式,进而为深孔加工的动态监控建立基础。以色列拉马特甘

巴伊兰大学 Gorodesky 等^[54]提出依托光学差分测量的声发射信号深度估计算法,其凭借激光玻璃制孔过程中声波到达时间差来反演孔深,由此在透明材料制孔环节实现了 μm 级别的精度监测,其核心在于借助声速和材料物理性质之间的定量关系去构建孔深模型,从而实现深度的监测,图3展示了其声发射监测设备与深度监测过程。

利用声发射信号对制孔阶段识别与工艺调控工作中,浙江工业大学的 Lian 等^[53]针对激光制孔穿透判断问题,采集穿透瞬间的声发射信号突变特征,提出了一种基于声学原理的激光制孔穿透监测方法,确定了指

定试验参数下孔穿透信号的阈值,从而能够采集声发射信号并识别孔穿透状态,并建立声发射信号强度与制孔出口孔径之间的相关性,如图4所示。试验验证了声学原理监测孔穿透状态和测量孔径是可行的,并为激光制孔中因“过烧”导致的出口损伤问题提供了理论基础。日本宇都宫大学 Hayasaki^[55]发现激光烧蚀量与声压强度呈单调关系,并且当激光脉冲聚焦在玻璃表面时,声压在激光制孔的初始阶段会增加,随着孔的加深而下降,其创新性地将激光诱导超声波压力作为监测指标,通过最大化脉冲照射时的声压来控制物镜的轴向位置,加工出大深径比的孔,为高

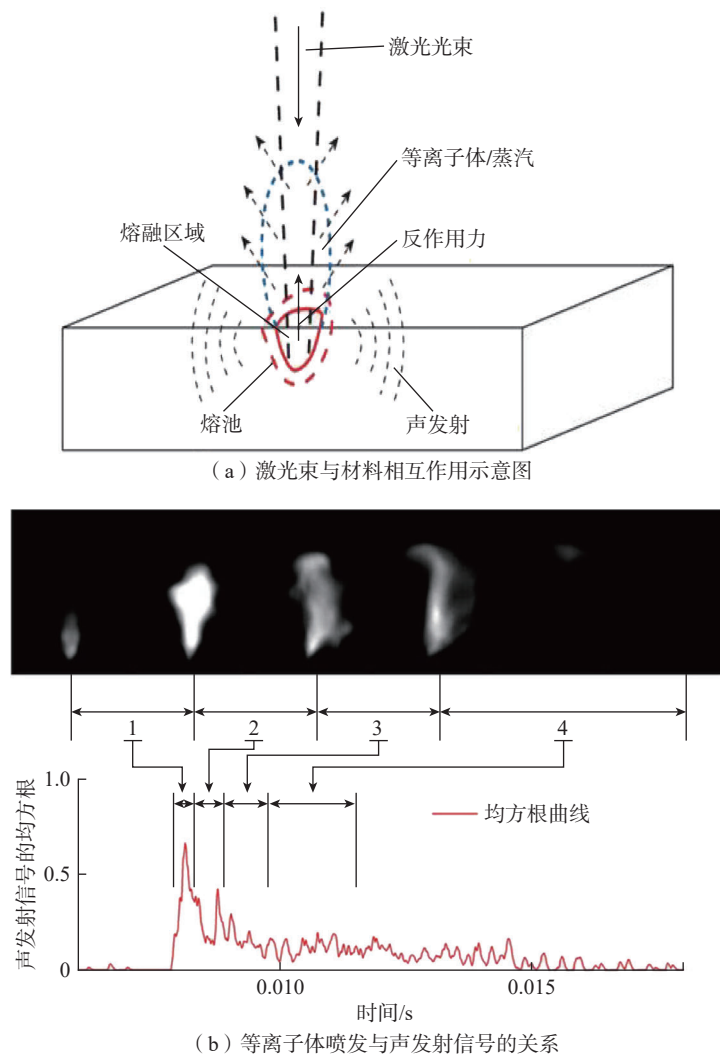


图2 声发射技术在线监测原理^[27]

Fig.2 Principle of monitoring of acoustic emission technology^[27]

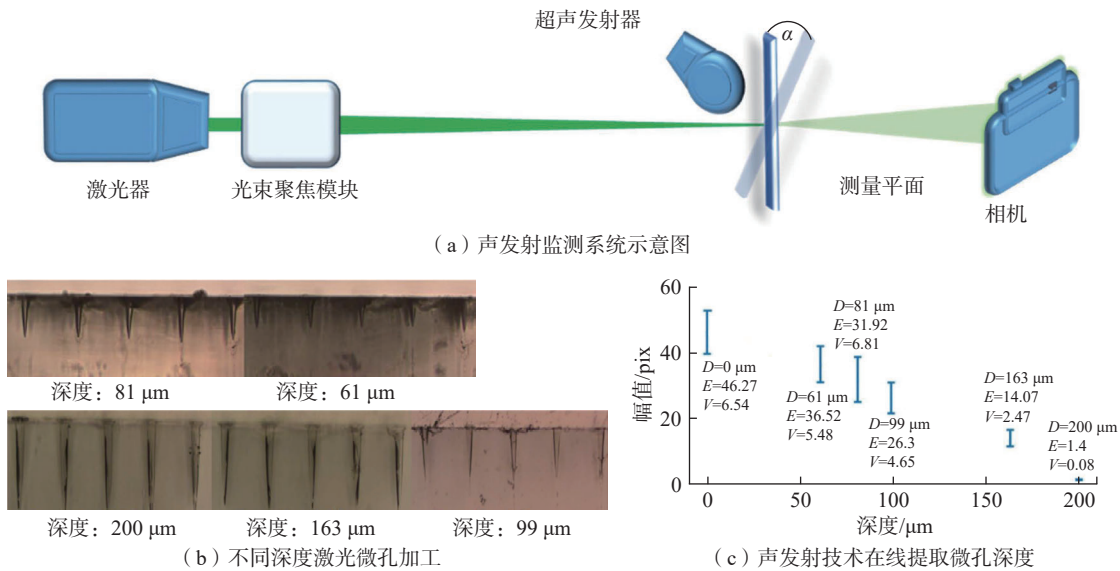


图3 声发射技术在激光制孔过程的深度提取方法^[54]
Fig.3 Depth extraction method of acoustic emission technology in laser drilling^[54]

精度微孔的加工工艺调控提供方法。在高端制造领域的应用中,哈尔滨工业大学 Zhang 等^[25]利用声发射技术,在水导激光加工镍基高温合金气膜冷却孔中实现加工过程中深度的实时计量,并利用穿透瞬间信号强度骤降特征实现穿透状态识别。

基于声发射信号的激光制孔在线监测具有系统成本低、响应速度快、环境适应性强等优势。但作为被动监测手段,其信号特征参数与制孔几何尺寸(孔径、锥度、孔深)之间缺乏明确的定量映射模型,导致实时测量精度不足;声发射波形特征与激光制孔过程中的物理现象的关联机制尚未充分揭示,尤其是对孔型动态演化过程,包括孔壁形貌变化、锥角发展、穿透阶段识别等,难以实现直接监测,制约了该技术向工业化制孔在线监测的应用。

1.2 基于光电信号的在线监测方法

当激光能量密度大于物质的烧蚀阈值时,物质会从基体中剥离,这一过程中伴随着大量等离子体的产生,等离子体中包含了激发态原子、电子和带电粒子,如图 5(a)所示^[31],而入射激光与等离子体相互作用会诱发电磁波辐射,通过光谱仪或光电

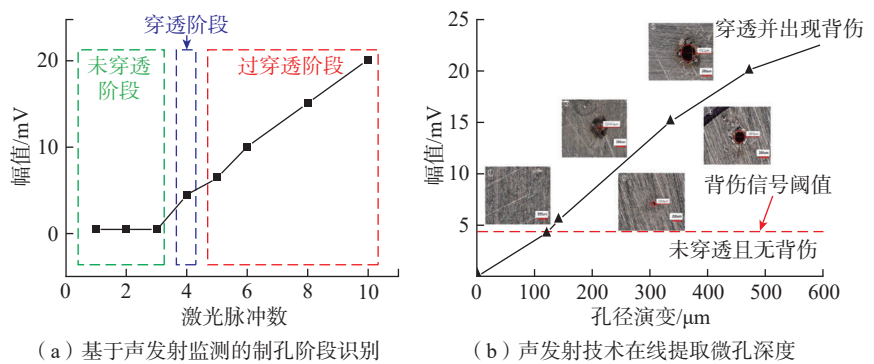


图4 声发射技术针对制孔过程的加工阶段识别^[53]
Fig.4 Acoustic emission technology for monitoring of stage identification of the laser drilling^[53]

二极管采集电磁波信号的光谱分布、辐射强度等特征数据可以实时对激光加工实现在线监测。由于光电信号监测技术具有非接触测量、时间分辨率高、信息维度丰富等优势,能够直接反映等离子体状态变化并实现对加工过程的快速响应^[56-58];但该技术易受加工激光、飞溅物遮挡、烟尘散射等干扰影响,且光路设计和传感器布置对测量结果敏感性高,在复杂工况下的稳定性和可靠性仍需进一步验证^[59]。

针对光谱信号的在线监测,新加坡国立大学 Hong 等^[30]对脉冲激光烧蚀初始阶段的等离子体发射光谱展开分析,研究连续谱以及特征谱线

的演化规律,研究与激光能量密度、环境压力之间存在的关系,发现在早期的光谱中,连续谱会随着时间的推移而出现衰减的情况,而且谱线的宽度会变窄,其峰值呈现出蓝移的趋势,由于等离子体存在重合的现象,所以离子谱线会比原子谱线更早地消失,该现象揭示了在烧蚀刚开始阶段,等离子体所经历快速膨胀、冷却以及复合等一系列的动力学过程。德国亚琛工业大学 Brajdic 等^[60],提出了一种在激光制孔中研究等离子体和冲击波特性的新方法。通过将高速成像与光谱学的结合,实现了等离子体和冲击波动力学的时间和空间的监测,图 5(c)~(d)^[60]是其对纳

秒脉冲激光在不锈钢制孔过程中等离子体和冲击波的光发射进行的监测,确定了孔内冲击波以及等离子体具体的空间分布状况以及速度情况。

在使用光电二极管的在线监测研究中,希腊帕特雷大学 Stournaras 等^[61]将等离子体信号强度与制孔过程联系起来,研究了传感器输出与孔几何形状之间的相关性,实现对激光切割过程的实时监控。台北工业大学 Ho 等^[62]采用与光路同轴放置的光电二极管对激光制孔过程进行在线监测,系统搭建如图 6 (a)所示,由此得到过程中孔深度与光电二极管响应电压的关系,光电二极管将等离子体信号转变为电信号并在工控机中实现可视化监测,如图 6 (b)所示。西

安交通大学 Sun 等^[63]针对阶段识别问题提出基于顺序三向决策的超快激光制孔穿透阶段实时监测与控制方法,通过提取光发射信号的时域统计特征并结合支持向量机识别模型,构建综合高斯权重顺序三向决策方法以降低决策偏差,该方法有效降低了在实际制孔过程中控制延迟时间。

基于光电信号的激光加工在线监测技术因其系统构建简便、响应速度快、非接触测量等优势,已在缺陷识别与质量控制等方面得到应用^[64-65]。但该方法在激光制孔领域仍面临显著挑战:(1)虽然等离子体光电辐射信号蕴含丰富的加工过程信息,但光电信号特征与制孔几何参数的关联机制认识不足,难以实现对

孔型动态演化的直观表征与精确预测;(2)光电监测系统对激光工艺参数、材料属性及环境条件高度敏感,每当更换加工场景或材料体系时均需重新开展大量标定试验以建立信号-质量映射模型,显著增加了技术迁移成本和难度。

1.3 基于视觉的在线监测方法

基于视觉的激光加工在线监测技术通过光学成像系统捕获加工区域的动态视觉信息,结合图像处理与分析实现加工过程的状态感知与参数反演。视觉传感器通过同轴或旁轴光路采集动态图像,经光学滤波和成像透镜聚焦后,将光信号转换为数字图像序列^[66-67]。由于视觉监测技术具有直观性强、非接触测量等优

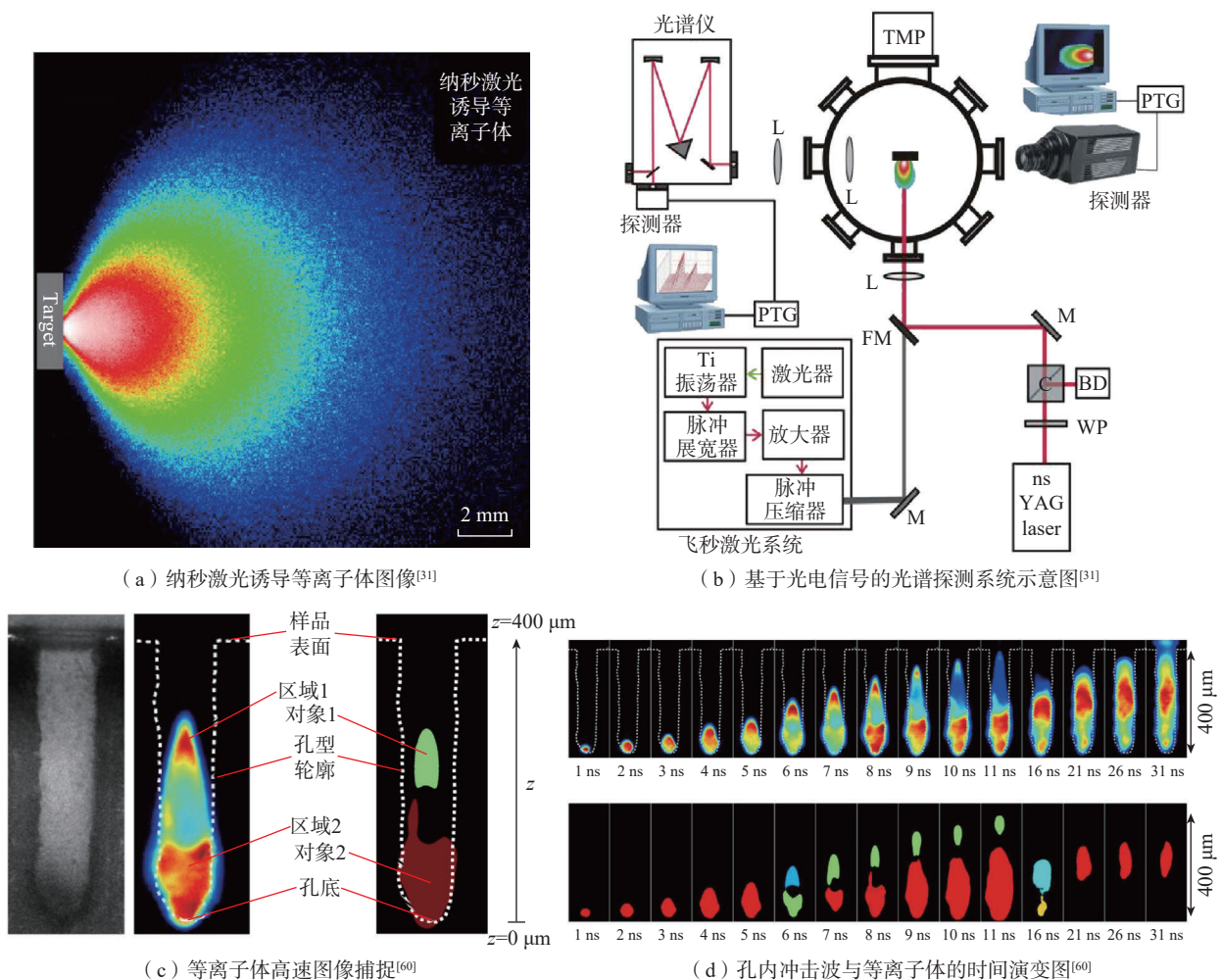
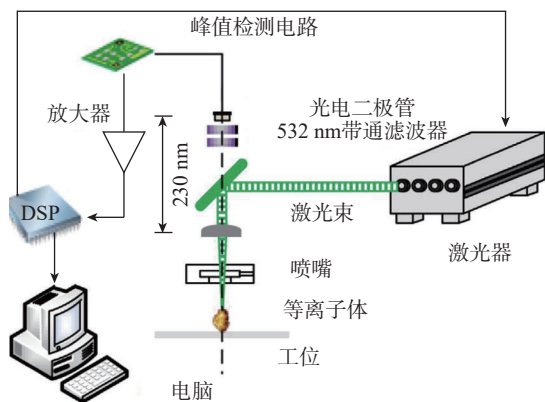
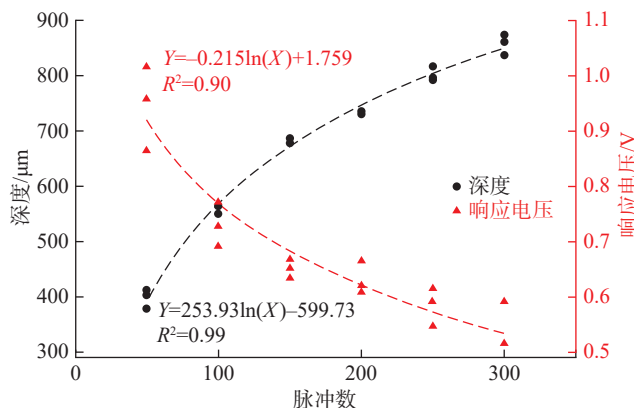


图 5 光谱信号在线监测激光制孔等离子体演化

Fig.5 Spectral signal monitoring of laser drilling plasma evolution



(a) 光电二极管捕获等离子体信息



(b) 孔深与光电二极管响应电压关系

图6 光电二极管在线监测系统及其试验结果^[62]

Fig.6 Photodiode online monitoring system and its experimental results^[62]

势, 能够实现对孔几何形态、等离子体空间分布、材料去除过程的直接观测; 但该技术易受强激光背景光干扰, 且高速成像系统成本高、数据量大, 图像特征与内部缺陷之间的关联性较弱, 难以实现对加工区域内部质量的准确评估^[68-69]。

国立云林科技大学 Ho 等^[70]提出一种用于激光制孔穿透检测的在线监测系统, 将 CMOS 相机安装在工件入口表面附近, 径向监测工作现场激光制孔过程测量工件表面等离子体的亮度, 以图像中光束直径迅速缩小的节点作为穿透阶段的识别, 为无接触式深度监测提供了新思路。该团队进一步优化同轴机器视觉系统, 通过图像灰度处理与边缘增强算法提取等离子体喷射动态特征, 结合时间序列分析实现制孔深度与孔径变化的同步监测^[33]。如图 7 所示, 结果表明, 激光制孔的深度与阈值图像面积呈线性正比。

随着高速相机等技术的进步, 同轴视觉所能够监测到的现象也逐渐丰富。北京理工大学的夏博^[71]搭建跨尺度视觉监测系统的平台, 将泵浦探测超快成像系统和 ns-ms 曝光成像加以集成, 从而实现了从单脉冲作用一直到累积加工整个全时域范围内的视觉覆盖效果。该系统发现由飞秒激光的“高效率导光通道效应”

会引发深径比提升, 并通过在真空以及非真空环境当中开展等离子体喷射对比试验, 揭示出碎屑清除效率对于微孔弯曲所产生的影响机制, 为高深孔加工工艺的优化给予视觉支撑。江苏大学 Wang 等^[72]采用高速摄像与光谱联用的视觉监测方法, 研究毫秒激光制孔中有无纵向辅助气流对等离子体喷射形态的影响。通过高速相机捕捉到气流作用下等离子体羽流从“弥散状”向“定向束流状”转变的过程。

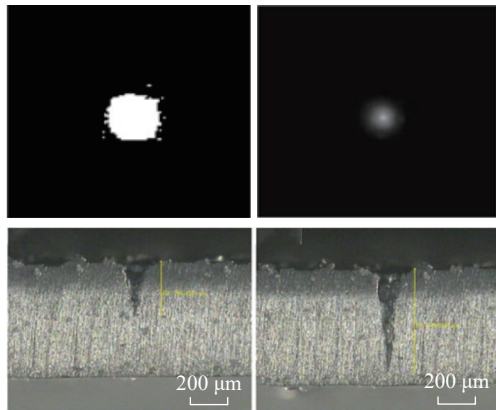
随着深度学习技术不断应用于视觉信息庞大的数据量, 通过图像分类的 AI 模型对激光加工过程中的视觉信息进行分类成为了新突破点, 韩国蔚山国立科学技术研究院的 Kim 等^[73]搭建了融合 532 nm/660 nm 双波段带通滤波的视觉监测系统, 利用同步采集的小孔形貌图像训练深度学习模型, 实现激光焊接过程中熔池深度与缺陷的实时识别, 模型对全熔透状态的判断准确率达 95.6%, 验证了视觉-深度学习框架在激光加工过程的监测潜力, 启发了激光制孔监测在视觉方向的发展, 韩国仁川仁和大学 Lim 等^[74]在不同激光功率与加工循环次数下获取显微镜 2D 孔图像, 并通过调整光照亮度、曝光时间及伽马值优化图像对比度, 结果如图 8 所示。以测得的孔深数据为标签, 结

合图像灰度及孔径参数, 构建并训练了全连接深度神经网络, 以获得图像信息与深度提取之间的关系, 在孔深 $\leq 100 \mu\text{m}$ 范围内, 模型预测精度可达 $\pm 5 \mu\text{m}$, 平均误差最低为 $3.86 \mu\text{m}$ 。

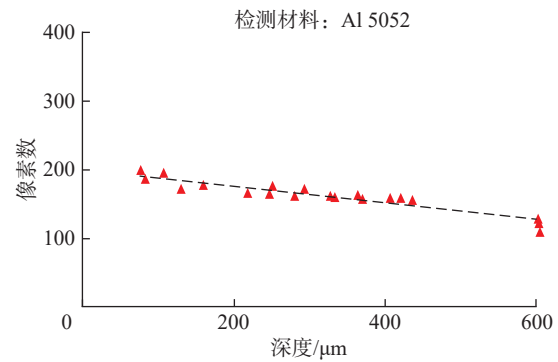
基于视觉信息的在线监测系统具有成本低、搭建难度小的特点, 且图像采集过程对外界环境干扰具有较强的抗干扰性, 能够较为精确地识别激光加工区域的表面形貌特征^[75]。然而该方法一方面受制于图像采集机理的固有光学约束, 视觉传感器难以有效识别加工区域沿深度方向的演化过程, 仅能捕获孔入口或出口处的加工现象; 另一方面, 由于制孔阶段信息的准确识别高度依赖于大规模试验数据集、复杂的图像处理算法以及机器学习模型的支撑, 致使前期数据积累与算法开发工作量巨大, 从而制约了该技术的大规模应用。

2 激光制孔的主动监测方法

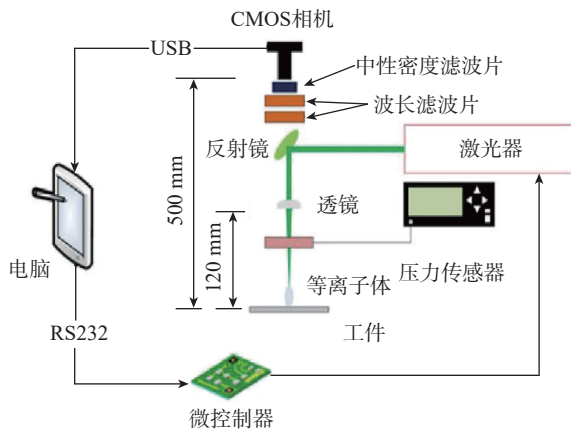
直接接受激光与材料作用过程中信号的被动监测方法, 其优势是信号与加工过程关联性强, 往往复杂的信号中存储着大量试验所需要的信息和数据, 可以通过各种信号处理的方法挖掘获取。但是被动监测的方式却始终无法直观地表现激光加工过程中材料形貌的实时变化, 很难直接获取深度、孔径等坐标信息。由此,



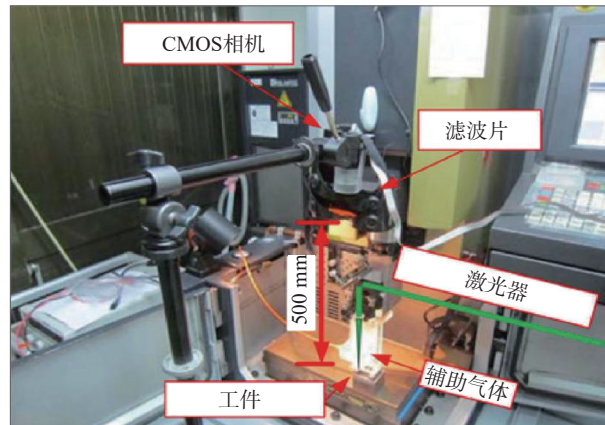
(a) 同轴视觉采集等离子体亮度图与实际深度剖面



(b) 孔深与等离子体图像像素数的线性关系



(c) 基于视觉的激光制孔在线孔深监测系统示意图



(d) 基于视觉的激光制孔在线孔深监测系统实物图

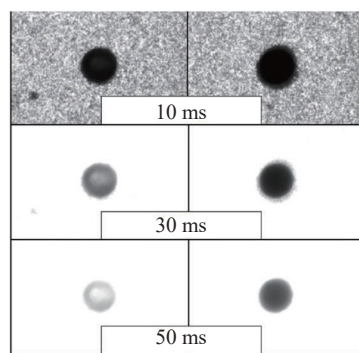
图7 同轴视觉监测激光制孔的深度提取技术^[33]

Fig.7 Coaxial vision monitoring of the depth extraction technology of laser drilling^[33]

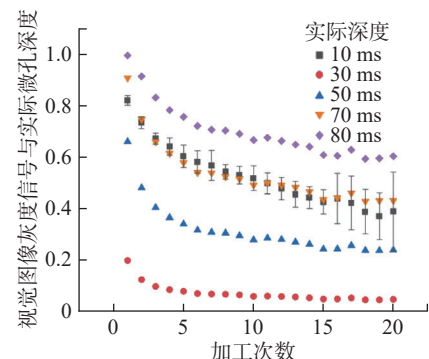
能够主动获取激光制孔过程中深度或二维截面的主动监测技术逐渐成为该领域的研究热点。

2.1 基于同步辐射 X 射线成像技术的在线监测技术

同步辐射 X 射线层析成像技术 (Synchrotron X-ray tomography) 是一种利用同步辐射光源产生的高亮度、高准直性和宽谱范围的 X 射线, 通过样品的多角度透射成像, 重建其内部结构的成像方法^[76-78]。试验中, 样品装夹在固定位置后, 探测器将记录在该视角下的二维投影图像。该技术以其高空间分辨率、非破坏性和透视能力, 被广泛应用于复合材料内部三维结构的高精度无损监测, 但是依赖大型同步辐射装置, 试验成本高、样品尺寸受限、数据采集与处理时间长的缺点, 限制了其在工业现场



(a) 不同曝光时间下制孔的显微视觉成像特征



(b) 视觉图像灰度信号与实际微孔深度的关系

图8 视觉信息监测激光制孔深度的应用^[74]

Fig.8 Application of visual information monitoring in the laser drilling depth^[74]

的应用^[79-80]。

德国斯图加特大学 Buser 等^[36]将同步辐射 X 射线成像应用在激光深孔加工的在线监测中, 实现了激光制孔过程高时间分辨率和 μm 级空间分辨率的实时视频捕捉。同步辐

射 X 射线成像可直接观测钢材中孔底的动态变化过程, 精确反映孔深演进及孔壁结构特征, 是验证和校准其他测量结果的标准, 结果如图 9 所示。研究中通过对比激光制孔在不同参数下的孔深测量数据, 发现 X

射线同步辐射技术能有效捕获大深径比孔径深孔的形貌变化,在孔底识别上表现出较高的准确性。该方法为激光加工过程中的孔径和孔深动态结构演化提供了直观可靠的三维定量表征手段,有助于深入理解超短脉冲激光与材料相互作用机理。

尽管同步辐射 X 射线层析成像技术展现出优异的三维成像性能和动态过程解析能力,但其对大型同步辐射装置的强依赖性以及高昂的试验成本,使其难以作为工业现场的在线监测手段进行规模化应用。作为激光制孔领域的科研验证技术,该技术为深孔内部质量评估提供了不可替代的价值:能够实现对孔壁微裂纹、重铸层厚度、锥度分布、内部气孔等缺陷的无损三维定量表征,获取其他监测手段无法触及的孔深方向完整信息;可作为激光制孔数值模拟的验证基准,校验模型准确性并优化物理参数;为其他在线监测技术提供标定数据,建立监测信号与孔内部真实质量的定量映射关系,从而提升在线监测系统的可靠性。

2.2 激光共聚焦显微在线监测技术

激光共聚焦显微成像技术基于光学共聚焦原理,通过消除离焦光干扰实现高分辨率三维成像。其结构包括激光光源、针孔光阑和点探测

器,激光经物镜聚焦于样品焦平面某点,该点散射或反射的光经原光路返回,通过与光源共轭放置的针孔光阑后被探测器接收;只有焦平面的光可通过针孔,非焦平面光被针孔有效阻挡,通过逐点扫描样品表面并结合计算机图像重建算法,可获取样品的三维表面形貌与微观结构^[81-82]。由于激光共聚焦显微成像技术具有高横向分辨率、高轴向分辨率以及表面形貌定量测量功能,能够实现对激光加工后样品表面微观形貌、加工区边缘质量、表面重铸层特征的高精度三维定量表征,且样品制备简单、无需真空环境、可在常温常压下快速成像,为激光加工表面质量离线检测提供了有效手段^[43-44];但该技术的成像深度受限于光学穿透能力,对高反射率金属表面易产生强反射干扰,且仅能获取表面及近表面信息,无法检测材料内部深层缺陷,同时对样品表面清洁度要求较高,油污、氧化层或飞溅物会显著影响成像质量^[83]。

国立成功大学 Lin 等^[84]搭建了基于共聚焦原理的实时孔深监测系统,通过激光二极管作为光源,利用共聚焦显微镜的轴向分辨率优势,结合快速扫描模块,实现对激光加工微孔深度的实时追踪。试验平台与共聚焦测量结果如图 10 所示。通过共

聚焦光路消除了传统成像中孔壁散射光的干扰,首次实现了动态加工过程中孔深的非接触式连续测量。韩国科技大学 Ahn 等^[85]进一步提出光纤共聚焦与干涉测量联用系统,采用单模光纤传输探测光,通过共聚焦信号强度分布计算孔径尺寸,同时结合低相干干涉法测量孔深,使测量速度提升至 100 Hz。在 0.1~1 mm 深度范围内,孔径与孔深测量误差分别控制在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 和 $\pm 2 \mu\text{m}$,验证了激光共聚焦技术在狭小空间制孔监测中的可行性。

共聚焦测量可实时跟踪孔底位置变化,深度分辨率可达亚 μm 级,且无需机械扫描,结构紧凑,易于与激光加工工作站集成,适合高纵深微孔的在线测量与反馈控制,不受孔径限制,具备较好的普适性。然而,该技术对孔底表面粗糙度、熔渣和碎屑敏感,易引起信号波动或误判深度,对高长径比孔的深度测量可能出现反射光衰减,降低测量稳定性。这些问题需要通过优化光学设计、改进碎屑清除及信号处理算法来进一步提升其应用可靠性。

2.3 基于光学相干成像技术的在线监测技术

光学相干成像是一种基于低相干干涉原理的主动探测式成像与测

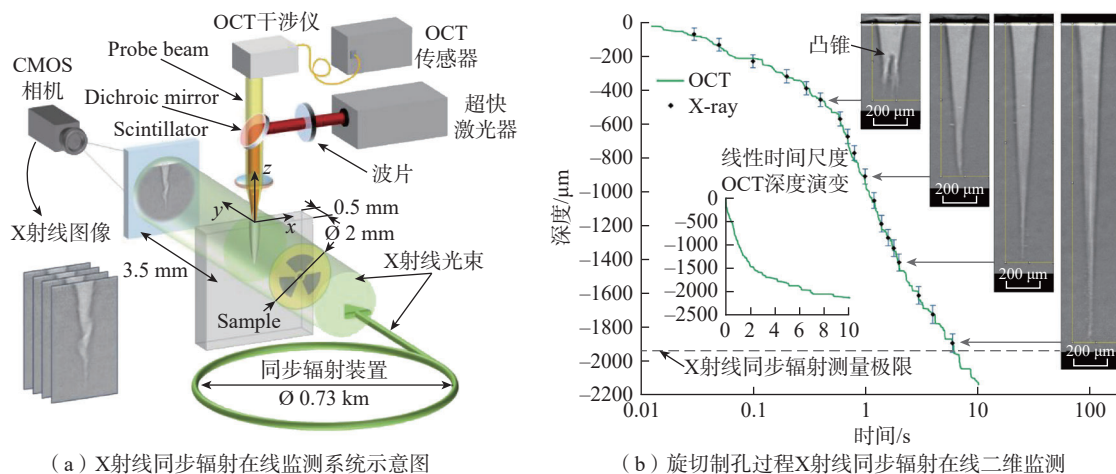
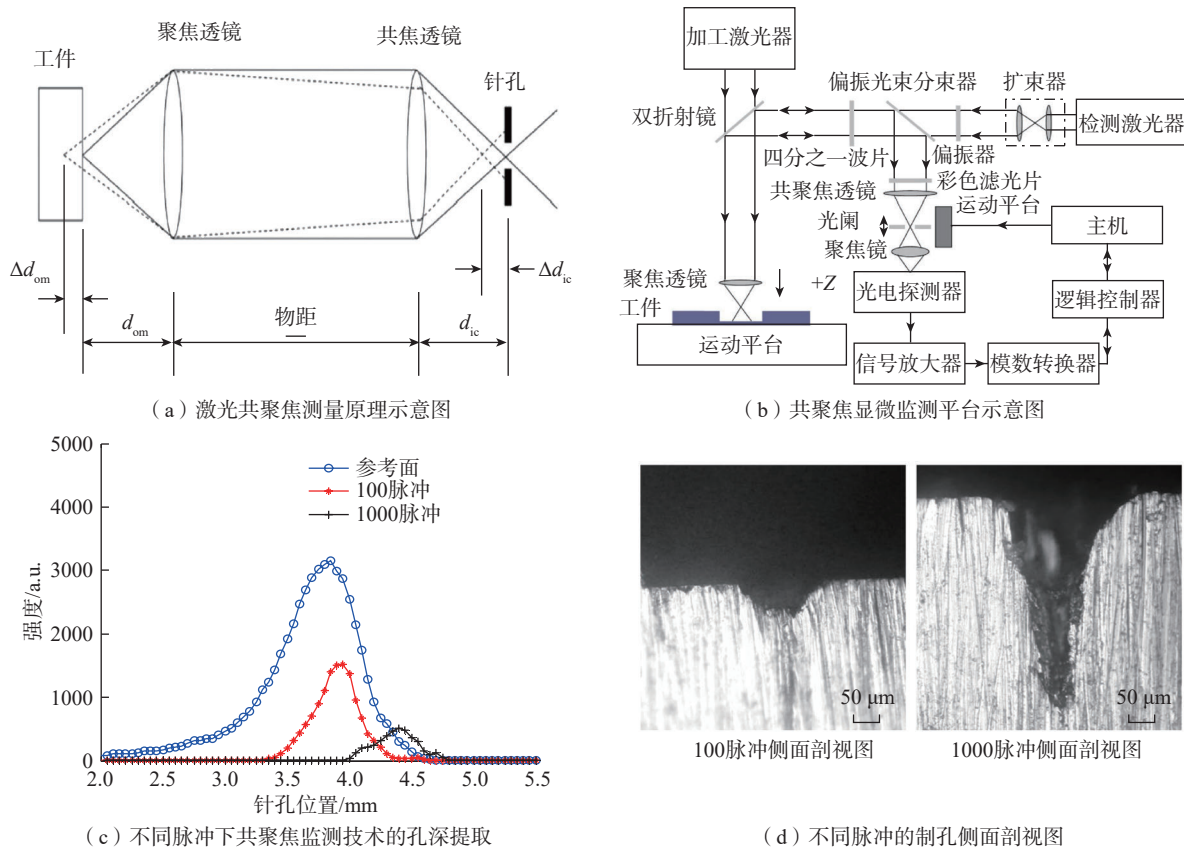


图 9 X 射线同步辐射在线监测在激光制孔中的应用^[36]
 Fig.9 Application of X-ray synchrotron radiation monitoring in laser drilling^[36]

图 10 激光共聚焦技术监测激光冲孔中的深度变化^[84]Fig.10 Laser confocal technology monitors depth variations during laser drilling^[84]

量方法。其工作原理是将宽带或扫频光源发出的光束分为参考光束和样本光束,样本光束入射至被测对象内部或表层,在不同深度位置发生反射或散射后返回,与参考臂返回的光在探测端形成干涉信号;仅当两束光的光程差落在光源相干长度范围内时,才能产生具有较高对比度的稳定干涉条纹,由此实现深度分辨^[86]。OCT 具有非接触、无辐射、高轴向分辨率以及高成像速度等优势,其轴向分辨率主要由光源带宽决定,可达 μm 量级,探测深度可在 mm 级,兼顾一定穿透能力和精细成像能力,适合在不破坏被测对象的前提下实现高精度几何量与内部结构的监测^[87-89]。然而,受限于金属材料对光束的高反射, OTC 难以穿透材料基体内部成像,主要依靠气-固界面的反射信号来重构孔的三维几何轮廓,无法像 X 射线那样直接观测重铸层内部气

孔或微裂纹等缺陷;同时,系统对振动、环境扰动及数据处理速度较为敏感,在复杂工程现场应用时需要针对性优化。得益于上述特点, OCT 已在眼科、牙科等医学诊断中获得广泛应用^[90-92],并逐渐拓展至材料与结构监测、涂层厚度与界面检测、微结构三维形貌测量等工程领域^[93-95]。

OCT 技术在激光制孔过程的应用最早出现在 2005 年,日本学者 KAMIYA 等^[96]将马赫曾德尔干涉仪与飞秒激光加工系统结合,实现了孔深的实时测量,开创了干涉测量技术在激光制孔监测中的先河。加拿大女王大学 Webster 团队^[97-98]在此基础上系统开展了内联相干成像(ICI)技术的研发工作,他们将光学相干系统集成到激光微加工平台中,以 μs 级时间分辨率和 $10 \mu\text{m}$ 横向分辨率重建加工过程中孔洞的三维形貌,并

通过实时成像信号实现对激光制孔过程中熔体回弹和孔深偏差的反馈调节,显著提高了孔洞深度重复性和加工一致性。该团队进一步提出面向激光加工的低成本 ICI 系统并开发了基于同频滤波的快速处理算法,实现对激光制孔过程的同轴高频实时深度测量^[99],如图 11(a)所示,为在线反馈控制与自动化引导奠定了可行路径。德国斯图加特大学 Holder 团队^[100]在将 OCT 与振镜结合实现激光加工过程监测,通过逐像素深度测量重建表面拓扑并结合二维傅里叶变换识别碳纤维复合材料纤维方向,实现了层级精确的激光修复。该团队将 OCT 应用于超短脉冲激光钢材微孔加工,通过不同厚度钢板贯穿试验验证了 OCT 在线深度测量的准确性,并将实时获取的孔深信息与加工振镜扫描及焦点位置调整策略相结合,实现基于深度反馈的

自适应旋切制孔,有效克服了能量沉积衰减与制孔停滞问题,实现了深达 10 mm 的锥形微孔制备^[101]。

华中科技大学 MA^[102] 提出基于过程信息数据库的穿透深度控制策略,通过 OCT 获取匙孔深度信号并结合经验模态分解,建立深度置信网络预测穿透深度曲线,实现了穿透深度的精确控制。电子科技大学 Zhao^[103] 等提出了一种高效深度测量方法,通过在原始干涉图中局部搜索已知的最后一个深度,在亚像素跟踪精度下将测量速度提高六倍。西安交通大学 Sun 等^[104] 开发了基于谱域光学相干成像(Spectral domain optical coherence tomography, SD-OCT)的超快激光制孔孔深原位实时监测技术,首次引入位置编码扫描,将深度信息与空间坐标精准配准,揭示了旋切制孔轨迹与测量结果之间的空间相关性,位置同步测量有效减弱了孔内残留物对信号的干扰,

显著提升了深度测量精度,其测量结果如图 11(c)所示。该团队提出的时空相关深度提取算法结合激光制孔的空间相关性与时间连续性,实现了孔深的自动化、位置同步原位测量,测量最大偏差仅为 66.4 μm ;平均偏差约 36.8 μm ,与 X 射线显微成像测量结果高度一致,验证了 SD-OCT 实现制孔深度原位测量与演化过程原位观测的可行性。

综合来看, OCT 作为主动探测式成像手段,能够在不干扰加工过程的前提下对加工区进行实时监测,具备非接触、高灵敏度和高空间分辨率等显著特性,目前在激光加工气膜冷却孔中逐渐开始进行相关应用,已实现在旋切制孔过程中对 1 mm 孔深的实时测量^[104]。但是其结构复杂,光源、干涉仪及扫描模块等精密部件价格昂贵,整体成本显著高于被动监测技术,不利于在普通工业生产线进行广泛部署。并且由于光束入射与

扫描范围的限制, OCT 在测量深径比过大的孔结构时,内部成像可能存在盲区,孔底特征解析能力不足,导致结果失真。

3 多模态信息融合的激光制孔在线监测技术

多模态融合技术旨在整合来自不同类型传感器或数据源的异构信息,通过挖掘各模态信号之间的互补特征与时空关联关系,提升对复杂加工过程状态的判识能力与决策准确性。相较于单一传感器监测,多模态融合通常可在数据层、特征层或决策层对多源信息进行协同处理,利用不同物理量之间的内在关联与互补优势,有效抑制单一模态信号的不确定性与噪声干扰,从而提高在线监测系统在复杂工况下的稳定性与鲁棒性。在先进制造与精密加工领域,多模态融合已被证明在故障诊断、过程状态识别及智能控制等方面具有显著优

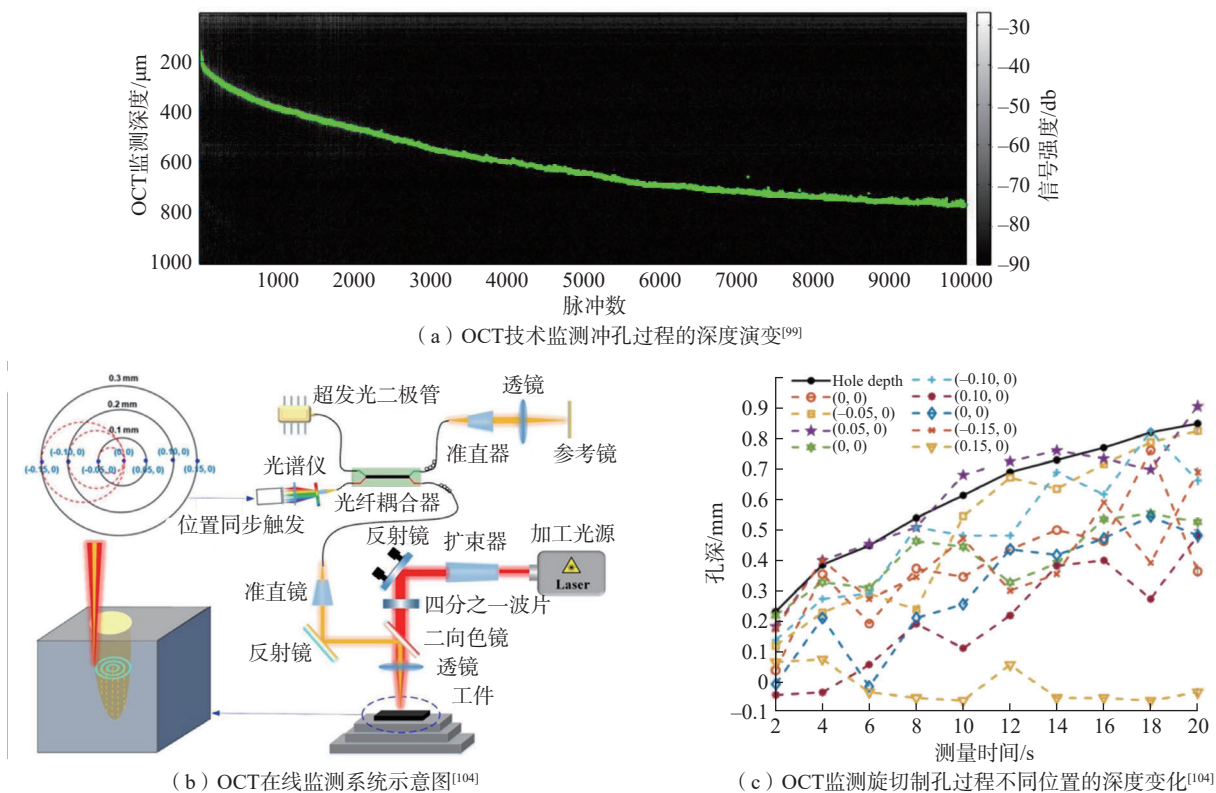


图 11 OCT 技术监测制孔过程的深度演变

Fig.11 Depth extraction of OCT technology in laser drilling

势^[105-107]。在激光焊接中,华南理工大学^[108]在数据层实现信息融合,提出了一种基于交叉注意力机制的多模态融合方法,用于激光焊接缺陷检测,美国桑迪亚国家实验室^[109]采用了基于 CLIP 的对比学习多模态融合方法,通过训练图像、音频及 DAQ 信号编码器,在无需标注数据的情况下学习多模态联合表征,实现对激光增材制造过程参数变化和零件位置信息的有效区分。

然而,在激光制孔场景中,多模态信息融合仍面临一系列亟待解决的关键问题。首先,由于声发射、光学辐射及视觉成像等信号在采样频率、数据结构与物理含义方面存在显著差异,不同模态数据通常表现出强烈的异构性,使得原始信号难以在数据层直接对齐与融合。其次,激光制孔过程中材料去除与等离子体演化具有强瞬态特征,对监测系统的时间同步与空间配准精度提出了更高要求,传感器布置形式(同轴或旁轴)及观测区域差异均可能引入时空偏置。此外,当前多模态融合方法多依赖机器学习模型完成特征关联与决策判别,其物理可解释性相对有限,在加工质量形成机理分析与参数反向优化方面仍存在问题。这些挑战

在一定程度上制约了多模态融合技术在激光制孔领域的系统化应用与工程化推广^[109-113]。

尽管如此,已有少量研究开始探索多模态融合在激光制孔过程中的应用潜力。北京航空航天大学 Zhang 等^[114]针对飞秒激光骨制孔技术,通过开发的神经网络模型确定了最佳的无创激光加工参数,同时结合光纤光谱仪与红外热成像实现焦点状态及温度的实时监测,确保在制孔过程中的焦点位置与骨温处在目标范围内,实现了对激光骨制孔技术的实时工艺调控和反馈调节。西安交通大学的 Sun 等^[115]提出了面向超快激光制孔过程的“时空融合决策”方法,将声学发射与光学发射信号进行多模态融合,其系统搭建与决策框架如图 12 所示,结合顺序三分决策思想,对机器学习模型的输出概率进行二次评估。相比传统单一模型的二元判定,该方法显著提升了制孔时刻的识别精度,将平均决策偏差由 68.06 降至 11.72,识别精度达 94.13%,该方案能够在数据量较少情况下依旧保持高稳定性与抗干扰性,为稳定高质量激光制孔提供了新型实时监测与控制框架。

当前多模态制孔监测技术面临

的主要难点在于多源异构数据的高效融合、模型泛化能力不足以及实时性与精度之间的平衡问题。未来研究应重点探索多物理场信号的深度耦合机制与自适应融合算法,构建具有更强泛化能力和可解释性的智能监测模型,提升系统在不同材料、不同工况下的适应性。同时,需开发轻量化、低延迟的计算架构,实现从数据采集到反馈控制的闭环一体化。与此同时应推动多模态监测系统与数字孪生、工业互联网等技术的深度融合,构建虚实映射的智能监测与预测性维护体系,为高端装备领域的精密加工提供更加可靠、高效的质量保障手段。

4 激光制孔在线监测技术综合对比与适用性分析

综合前述各类激光制孔在线监测技术的原理、实现方式与应用实例可以看出,不同技术在监测能力、时间响应、系统复杂度及工程适用性方面呈现出明显差异,且不存在单一技术能够在所有指标上同时占优。被动监测技术整体以 μs - ns 级响应速度和较低系统成本见长,适用于制孔时刻识别、加工状态判识等实时性要求较高但定量精度要求相对有限的

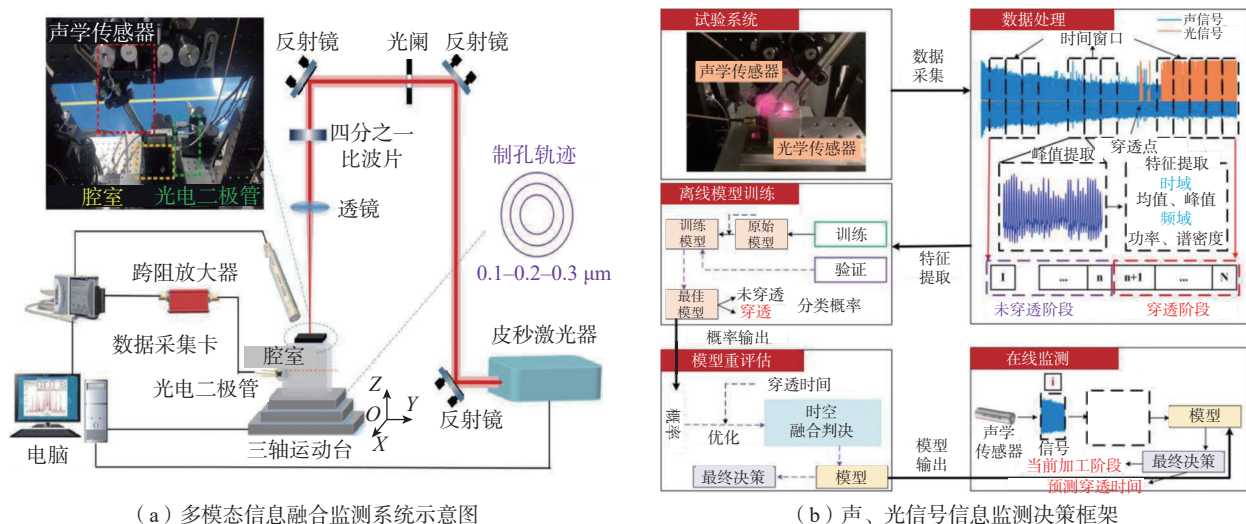


图 12 多模态信息融合的在线监测技术研究^[115]

Fig.12 Research on monitoring technology for multimodal information fusion^[115]

应用场景,其工业可实现性较高,但对孔深、内壁形貌等关键几何参数的直接测量能力受限。相比之下,主动监测技术能够提供明确的几何量或内部结构信息,在孔深与形貌测量精度方面具有不可替代的优势,但系统成本较高、对加工环境与光学条件敏感,目前主要服务于高附加值加工或试验验证场景。多模态融合技术通过整合不同监测手段的互补信息,在提高复杂工况下监测稳定性与可靠性方面显示出良好潜力,但其系统集成复杂度和工程成熟度仍有待进一步提升。为更直观地比较各类监测技术在精度、响应速度、成本及适用材料与工况等方面的差异,表1对典型激光制孔在线监测技术进行了系统归纳与对比总结。

5 结论与展望

5.1 结论

本文聚焦于激光制孔在线监测技术的现状演变与未来趋势,构建“工艺场景-监测需求-技术路线-核心挑战-发展方向”逻辑框架,系统阐述了被动监测与主动监测的技术原理及应用进展。现阶段激光制

孔在线监测技术已形成被动监测与主动监测为核心,并逐步向多模态融合演进的技术体系。被动监测技术主要依据激光与材料相互作用衍生的声发射、光电及视觉等物理信号实施实时监控,实现对加工过程的实时监控,其核心优势在于系统成本低、易于集成,且信号与加工状态关联性强,可通过信号处理挖掘丰富的工艺信息。然而,该类技术依赖经验模型进行参数反演,无法直接量化孔深、孔径等三维几何特征,加之在跨材料及变工艺条件下的泛化能力较弱,往往需要依赖大量预试验进行模型标定。主动监测技术则通过 OCT、X 射线同步辐射成像或激光共聚焦等主动探测手段,重构加工区域的微观形貌,具备高分辨率和直接成像能力,可直接测量孔结构演化过程,减少对经验模型的依赖。但主动监测系统结构复杂、设备成本高昂,易受限于成像视野与加工环境干扰。各类在线监测技术在监测能力、时间响应、系统成本与工程适用性等方面存在差异,因此各具优势与适用场景,应根据具体加工需求(如实时性、精度、成本预算及材料特性)选择适配

的监测方式。当前多模态融合技术已在实验室环境下初步验证了可行性,但现有研究多局限于被动信号的浅层叠加,仍受制于多源异构数据融合、时空精准同步及模型泛化不足等瓶颈,且系统集成度与工程成熟度尚需完善。因此,面向复杂工况与工程化应用需求,多模态融合技术需向深度耦合与智能决策方向突破,以实现监测稳定性与可靠性的实质性提升,并为闭环控制奠定基础。

5.2 展望

未来为应对日益严苛的精密制造标准,激光制孔在线监测技术需聚焦模块化监测装备、多模态融合及闭环控制三大方向的协同发展。模块化主动监测装备开发需突破狭小空间限制,通过与加工系统的结构耦合设计,开发 OCT 探测头与共聚焦监测设备,优化光路设计,最大限度适配多变的加工光学环境,提升在线实时监测的工况适应性,推动高精度监测技术的工业化普及。多模态融合方面,需面向航空发动机叶片气膜孔等复杂工况(如高深径比、跨材料加工)下监测鲁棒性的提升需求,突破现有被动信号间简单组合的技术局限,向“被动-主动”的协同感知演进;重点探索光、声、热学等多物理场信号的动态关联机制,开发具有物理可解释性的自适应融合方法,结合时空关联机制与深度学习算法,构建高泛化性与鲁棒的加工状态识别模型,提升复杂工况下制穿时刻识别精度与缺陷预警能力,减少对单一信号的路径依赖。闭环控制体系构建需融合数字孪生技术与深度学习、大模型等 AI 技术,实现加工过程可视化预演与自适应参数调控,结合模型预测控制算法,将实时监测数据与激光加工参数进行 ms 级动态耦合,形成“感知-决策-执行”的智能闭环,提升孔深精度与加工效率。通过三大方向的协同发展与技术迭代,可以推动激光制孔在线监测技术从实验室研

表 1 激光制孔在线监测技术对比表

Table 1 Comparison table of laser drilling online monitoring technologies

技术类别	主要监测对象	精度(深度)	响应速度	成本	适用材料与局限性	文献
被动-声发射信号	内部缺陷	定性识别	μs 级	低	金属/复材;对振动敏感	[53-55]
被动-光电信号	等离子体	定性识别	ns 级	低	金属;对烟尘、遮挡敏感	[61-63]
被动-视觉信息	孔口形貌	± 5 μm(100 μm)	μs 级	中	多材料;深孔内部不可见	[71]
主动-光学相干成像	孔深、内壁形貌	± 30 μm(10 mm)	4~14 μs	较高	多材料;等离子体干扰	[96-97]
主动-共聚焦成像	孔口/表面高度	± 2 μm(1 mm)	10 ms	较高	多材料;深孔内部受限	[81]
主动-X射线成像	孔深、内壁形貌	1.17 μm(2 mm)	1 ms	极高	多材料;无法产线部署	[36]
多模态融合	状态识别、缺陷预警	融合模式决定	μs 级	较高	适用性强	[114-115]

究向航空航天、新能源等高端制造领域的工业化应用转化,支撑高精度、高效率、高可靠性的智能制造需求。

参考文献

- [1] 姚振强, LAWRENCE Y Y, 王飞, 等. 先进激光制造技术研究新进展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 57-61.
- YAO Zhenqiang, LAWRENCE Y Y, WANG Fei, et al. Progress in advanced laser assisted manufacturing technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(12): 57-61.
- [2] JI L F. Research progress and development of industrial application of picosecond laser processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 115.
- [3] 温秋玲, 杨野, 黄辉, 等. 激光复合加工硬脆性材料研究进展综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(9): 168-188.
- WEN Qiuling, YANG Ye, HUANG Hui, et al. Review of research progress in laser-based hybrid machining of hard and brittle materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(9): 168-188.
- [4] 朱海南, 齐歆霞. 涡轮叶片气膜孔加工技术及其发展[J]. 航空制造技术, 2011, 54(13): 71-74.
- ZHU Hainan, QI Xinxia. Development of machining technology gas holes on turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(13): 71-74.
- [5] LI M, WEN Z X, WANG P, et al. Femtosecond laser high-quality drilling of film cooling holes in nickel-based single superalloy for turbine blades with a two-step helical drilling method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 312: 117827.
- [6] 赵万芹, 张涛, 孙涛, 等. 涡轮叶片气膜冷却孔超快激光加工及后壁防护综述[J]. 机械工程学报, 2025, 61(17): 314-330.
- ZHAO Wanqin, ZHANG Tao, SUN Tao, et al. Overview of ultrafast laser processing and back wall protection for turbine blade film cooling holes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(17): 314-330.
- [7] 林兆涵. 锂离子电池垂直取向微孔阵列厚电极的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- LIN Zhaohan. Vertically aligned micropore array structured thick electrodes of Li-ion battery[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [8] YAMADA M, SOMA N, TSUTA M, et al. Development of a roll-to-roll high-speed laser micro processing machine for preparing through-holed anodes and cathodes of lithium-ion batteries[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2023, 5(3): 035004.
- [9] ZHU P C, BOYCE A, DAEMI S R, et al. A groovy laser processing route to achieving high power and energy lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Materials, 2024, 69: 103373.
- [10] 乔明, 闫剑锋, 俞嘉晨, 等. 超快激光加工二氧化钛微纳结构及功能器件研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2200002.
- QIAO Ming, YAN Jianfeng, YU Jiachen, et al. Research progress in ultrafast laser processing of titanium dioxide micro/nano structures and functional devices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2200002.
- [11] LIU H L, ZHENG Y, CHEN Z M, et al. Dual-stage UV laser induction & activation enables high-surface-area microporous graphene for enhanced micro-supercapacitors[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 524: 169214.
- [12] JUNG C H, JUNG J P, SHARMA A, et al. Advanced through-glass via (TGV) electro-filling and solder bumping for miniaturized 3D MEMS packaging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1038: 182619.
- [13] JIA X S, CHEN Y Q, LIU L, et al. Advances in laser drilling of structural ceramics[J]. Nanomaterials, 2022, 12(2): 230.
- [14] ZHAO W Q, SHEN X W, LIU H D, et al. Effect of high repetition rate on dimension and morphology of micro-hole drilled in metals by picosecond ultra-short pulse laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105811.
- [15] BRUNEAU S, HERMANN J, DUMITRU G, et al. Ultra-fast laser ablation applied to deep-drilling of metals[J]. Applied Surface Science, 2005, 248(1-4): 299-303.
- [16] HAASLER D, FINGER J. Investigation of heat accumulation effects during deep hole percussion drilling by high power ultrashort pulsed laser radiation[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2): 022201.
- [17] HOLDER D, WEBER R, GRAF T, et al. Analytical model for the depth progress of percussion drilling with ultrashort laser pulses[J]. Applied Physics A, 2021, 127(5): 302.
- [18] 罗垚, 庞盛永, 周建新, 等. 镍基高温合金纳秒激光脉冲制孔再铸层形成过程数值模拟[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 403007.
- LUO Yao, PANG Shengyong, ZHOU Jianxin, et al. Numerical simulation of recast layer formation in nanosecond pulse laser drilling on nickel-based high-temperature alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 403007.
- [19] HO C C, KAO J Y. Electric field assisted field monitoring laser drilling in transparent and hard brittle materials[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 163: 109344.
- [20] JIANG H, MA C W, LI M, et al. Femtosecond laser drilling of cylindrical holes for carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites[J]. Molecules, 2021, 26(10): 2953.
- [21] 张健, 卓瑾, 金会良, 等. 基于扫描振镜的超短脉冲激光旋切制孔光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 1422003.
- ZHANG Jian, ZHUO Jin, JIN Huiliang, et al. Optical design of helical drilling system with ultrashort pulse laser based on scanning galvanometer[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1422003.
- [22] 陶能如, 蔡颂, 陈根余, 等. 碳纤维复合材料皮秒激光旋切制备大孔工艺[J]. 光学学报, 2024, 44(14): 1422003.
- TAO Nengru, CAI Song, CHEN Genyu, et al. Picosecond laser drilling of carbon fiber reinforced composite laminates by helical drilling process[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(14): 1422003.
- [23] WANG S W, XIE W D, DING Y, et al. Investigations on the Water-Jet Guided Laser drilling film cooling holes on the 8.5 mm-thick TBC superalloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 374-388.
- [24] 王水旺. 陶瓷涂层高温合金的水导激光蚀除行为与制孔技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- WANG Shuiwang. Study on water-guided laser ablation behavior and hole-making technology of ceramic-coated superalloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024.
- [25] ZHANG X Y, XIE W D, WANG S W, et al. Metrological acoustic emission approach for in-process depth measurement in water-jet guided laser drilling of nickel-based superalloy[J]. Measurement, 2026, 259: 119549.
- [26] KEK T, GRUM J. Monitoring laser cut quality using acoustic emission[J]. International Journal of Machine Tools and

Manufacture, 2009, 49(1): 8–12.

[27] LUO Y, ZHU L, HAN J T, et al. Study on the acoustic emission effect of plasma plume in pulsed laser welding[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124: 715–723.

[28] YANG R W, HUANG Y, RONG Y M, et al. Evaluation and classification of CFRP kerf width by acoustic emission in nanosecond laser cutting[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108165.

[29] STOURNARASA, CHRYSOLOURIS G. On acoustic emissions in percussion laser drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(5): 611–620.

[30] HONG M H, LU Y F, BONG S K. Time-resolved plasma emission spectrum analyses at the early stage of laser ablation[J]. Applied Surface Science, 2000, 154: 196–200.

[31] VERHOFF B, HARILAL S S, FREEMAN J R, et al. Dynamics of femto- and nanosecond laser ablation plumes investigated using optical emission spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(9): 093303.

[32] 王迪, 唐涛, 蒋仁武, 等. 基于光电二极管的激光选区熔化过程监测及信号分析[J]. 中国激光, 2025, 52(8): 0802304.

WANG Di, TANG Tao, JIANG Renwu, et al. Monitoring and signal analysis of selective laser melting process based on photodiodes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(8): 0802304.

[33] HO C C, HE J J. On-line monitoring of laser-drilling process based on coaxial machine vision[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(4): 671–678.

[34] WEN P, ZHANG Y Q, CHEN W Z. Quality detection and control during laser cutting progress with coaxial visual monitoring[J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(3): 032006.

[35] 李春凯, 代悦, 王嘉昕, 等. 脉冲熔化极气体保护焊熔池振荡行为检测及特征分析[J]. 机械工程学报, 2024, 60(16): 141–150.

LI Chunkai, DAI Yue, WANG Jiixin, et al. Detection and characteristic analysis of weld pool oscillation behavior in pulsed gas metal arc welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(16): 141–150.

[36] BUSER M, HENN M,

SCHNELLER L, et al. Measuring the progress of laser drilling by means of OCT and validation using X-ray synchrotron imaging[J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2025, 12(2): 257–273.

[37] WU D, ZHANG P L, SHI H C, et al. Advancements and prospects of OCT-enabled all-process monitoring and inline quality assurance in laser keyhole welding: A critical review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 152: 1179–1203.

[38] 梅雪松, 孙涛, 赵万芹, 等. 光学相干成像技术在激光加工过程实时监测与控制中的应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(15): 216–231.

MEI Xuesong, SUN Tao, ZHAO Wanqin, et al. Recent advances of optical coherence tomography technology in real-time monitoring and control of laser processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(15): 216–231.

[39] ARATA Y, FUJISAWA M, ABE E. A study on dynamic behaviours of electron beam welding (Report I): The observation by a fluoroscopic method[A]. Osaka: Welding Research Institute of Osaka University, 1976.

[40] PARAB N D, ZHAO C, CUNNINGHAM R, et al. Ultrafast X-ray imaging of laser-metal additive manufacturing processes[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2018, 25(5): 1467–1477.

[41] LEUNG C L A, MARUSSI S, ATWOOD R C, et al. In situ X-ray imaging of defect and molten pool dynamics in laser additive manufacturing[J]. Nature Communications, 2018, 9: 1355.

[42] 张帆. 同轴共源超快激光共焦加工测量一体化系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.

ZHANG Fan. Research on integrated system of coaxial common source ultrafast laser confocal machining and measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.

[43] DU X H, FLORIAN C, ARNOLD C B. Single-lens dynamic z-scanning for simultaneous in situ position detection and laser processing focus control[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 274.

[44] QUAN H S, WANG R S, MA W F, et al. A study on ultrafast laser Bessel beam processing and laser confocal in-situ measurement method[J]. Optics & Laser Technology, 2025,

187: 112865.

[45] FU Y Z, SU Y, WEI J Y, et al. Auto-focusing femtosecond laser manufacturing system via acoustic emission technology[J]. Optics Letters, 2024, 49(3): 558–561.

[46] 谢小柱, 欧德亿, 刘涛, 等. 激光加工过程中声发射检测技术的研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(23/24): 98–109.

XIE Xiaozhu, OU Deyi, LIU Tao, et al. Research progress of acoustic emission detection technology in laser processing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(23/24): 98–109.

[47] 张赛凡, 李博, 轩福贞. 激光选区熔化过程声发射信号的降噪与分类预测方法[J]. 机械工程学报, 2024, 60(6): 163–176.

ZHANG Saifan, LI Bo, XUAN Fuzhen. Signal denoising and classification prediction method for on-line monitoring of acoustic emission during laser melting process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(6): 163–176.

[48] 黄维鹏, 周锐, 陈哲堃, 等. 激光烧蚀硅基表面抗反射微结构的声信号监测[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 0924001.

HUANG Weipeng, ZHOU Rui, CHEN Zhekun, et al. Acoustic signal monitoring in laser ablation of anti-reflective microstructured silicon surface[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(9): 0924001.

[49] CHEN L, HUANG Y, LI W Y, et al. Acoustic emission monitoring and heat-affected zone evaluation of CFRP laser cutting[J]. Composite Structures, 2023, 304: 116419.

[50] HAMIDI NASAB M, MASINELLI G, DE FORMANOIR C, et al. Harmonizing sound and light: X-ray imaging unveils acoustic signatures of stochastic inter-regime instabilities during laser melting[J]. Nature Communications, 2023, 14: 8008.

[51] 罗钟毅, 吴岷, 王润, 等. 基于声波特性和深度学习的铝合金脉冲激光焊接熔透定量评估[J]. 中国激光, 2023, 50(8): 0802104.

LUO Zhongyi, WU Di, WANG Run, et al. Quantitative evaluation of penetration state in pulsed laser welding of aluminum alloys based on acoustic-wave time-frequency characteristics and deep learning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(8): 0802104.

[52] CHEN L, RONG Y M, HUANG Y, et al. Revealing thermal-mechanical hybrid

- ablation mechanism in carbon fiber reinforced plastic laser cutting by acoustic emission monitoring[J]. *Measurement*, 2023, 221: 113473.
- [53] LIAN B W, PAN K W, WANG L Q, et al. Research and experimentation on acoustic monitoring technology for laser drilling penetration[J]. *Micromachines*, 2025, 16(4): 475.
- [54] GORODESKY N, OZANA N, BERG Y, et al. Depth estimation of laser glass drilling based on optical differential measurements of acoustic response[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(9): 095402.
- [55] HAYASAKI Y, MIURA T. Femtosecond laser drilling controlled with laser-generated ultrasound pressure[J]. *Applied Physics B*, 2024, 130(12): 220.
- [56] SHU L S, ZHOU Y F, WU W D, et al. Online diagnosis of weak welds in busbar laser welding based on photoelectric signals and machine learning[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025, 156: 111277.
- [57] ZENG D, WU D, ZHANG P L, et al. Shedding light on correlation mechanism between the keyhole/melt pool behaviors and photoelectric radiation information during laser welding process[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113465.
- [58] ZENG D, WU D, HUANG H X, et al. Online identification of laser welding penetration through multi-photoelectric decomposition-reconstruction and shifted-windows-based transformer deep learning framework[J]. *Measurement*, 2025, 247: 116872.
- [59] 李显旺, 王铁军, 刘尧香, 等. 基于等离子体光学辐射的飞秒激光加工实时监测稳定性对比[J]. *中国激光*, 2025, 52(19): 1908018.
- LI Xianwang, WANG Tiejun, LIU Yaoliang, et al. Comparison of real-time monitoring stability in femtosecond laser filament processing based on plasma optical radiation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(19): 1908018.
- [60] BRAJDIC M, HERMANS M, HORN A, et al. In situ measurement of plasma and shock wave properties inside laser-drilled metal holes[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(10): 105703.
- [61] STOURNARAS A, SALONITIS K, CHRYSOLOURIS G. Optical emissions for monitoring of the percussion laser drilling process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46(5): 589–603.
- [62] HO C C, CHANG Y J, HSU J C, et al. Optical emission monitoring for defocusing laser percussion drilling[J]. *Measurement*, 2016, 80: 251–258.
- [63] SUN T, MEI X S, SUN X M, et al. Real-time monitoring and control of the breakthrough stage in ultrafast laser drilling based on sequential three-way decision[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(4): 5422–5432.
- [64] LESSMUELLER. Lessmueller-Weldcheck 检测系统 [EB/OL]. [2025–10–17]. <http://www.lessmueller.cn/>.
- LESSMUELLER. Lessmueller-Weldcheck detection system [EB/OL]. [2025–10–17]. <http://www.lessmueller.cn/>.
- [65] 德擎光学科技. 广州德擎光学科技激光焊接诊断系统 [EB/OL]. [2025–10–17]. <http://diligine.net>.
- DILIGINE. Guangzhou Diligine laser welding detection system [EB/OL]. [2025–10–17]. <http://diligine.net>.
- [66] 蔡旺, 蒋平, 舒乐时, 等. 基于机器视觉的高功率激光焊接过程飞溅监测方法与飞溅特征研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(24): 2402106.
- CAI Wang, JIANG Ping, SHU Leshi, et al. Machine vision-based spatter monitoring method and spatter characterization for high power laser welding process[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(24): 2402106.
- [67] MILLS B, HEATH D J, GRANT-JACOB J A, et al. Image-based monitoring of femtosecond laser machining via a neural network[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2019, 1(1): 015008.
- [68] 蔡玉华, 朱世良, 田修波, 等. 深度学习驱动的激光熔丝增材制造过程稳定性控制 [J]. *中国激光*, 2025: 1–17.
- CAI Yuhua, ZHU Shiliang, TIAN Xiubo, et al. Controlling of deposition process stability in wire-laser additive manufacturing driven by deep learning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025: 1–17.
- [69] ZHANG Z H, LI B, ZHANG W F, et al. Real-time penetration state monitoring using convolutional neural network for laser welding of tailor rolled blanks[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, 54: 348–360.
- [70] HO C C, CHANG Y J, HSU J C, et al. Monitoring and breakthrough control of laser drilled holes by means of machine vision[J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2013, 37(3): 355–363.
- [71] 夏博. 飞秒激光高质量高深径比微孔加工机理及其在线观测 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- XIA Bo. Mechanism and online observation of high-aspect-ratio, high-quality microholes drilling with femtosecond laser [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [72] WANG H X, XU Y, ZHENG H Y, et al. Monitoring and analysis of millisecond laser drilling process and performance with and without longitudinal magnetic assistance and/or assist gas[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 48: 297–312.
- [73] KIM C H, AHN D C. Coaxial monitoring of keyhole during Yb:YAG laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1874–1880.
- [74] LIM D W, KIM M, CHOI P, et al. Hole depth prediction in a femtosecond laser drilling process using deep learning[J]. *Micromachines*, 2023, 14(4): ml14040743.
- [75] PRECITEC. Precitec 激光焊接监控器 LWM [EB/OL]. [2025–10–17]. <https://www.precitec.cn>.
- [76] 胡保花. 碳纤维复合材料 X 射线数字化实时成像检测技术 [J]. *航空制造技术*, 2012, 55(18): 83–85.
- HU Baohua. Carbon fiber composites X-ray digitization of real-time imaging detection technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(18): 83–85.
- [77] 付艳娟, 卢聪, 叶小军, 等. 激光材料加工熔池流动行为实验研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(5): 291–306.
- FU Yanshu, LU Cong, YE Xiaojun, et al. Review of experimental study on melt pool flow dynamics during laser material processing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(5): 291–306.
- [78] 黄婷, 徐家乐, 肖荣诗, 等. 激光加工匙孔动态行为 X 射线原位监测研究进展 [J]. *北京工业大学学报*, 2025, 51(11): 1284–1303.
- HUANG Ting, XU Jiale, XIAO Rongshi, et al. Progress in X-ray in-situ monitoring of keyhole dynamic behavior during laser processing[J]. *Journal of Beijing University of*

- Technology, 2025, 51(11): 1284–1303.
- [79] TERADA T, YAMADA T, NISHIMURA A. Development of laser cladding system with process monitoring by X-ray imaging[J]. High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications III, 2014, 8963: 896310.
- [80] ABTF, BOLEY M, WEBER R, et al. Novel X-ray system for in-situ diagnostics of laser based processes-first experimental results[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 761–770.
- [81] WANG F Y, YUAN Y H, SUN Q, et al. Design and implementation of the galvanometer scanning system for reflectance confocal and stimulated Raman scattering microscopy[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(12): 121703.
- [82] 邹景武, 余卿, 程方. 差动式彩色共聚焦粗糙度评定系统及实验研究[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1103–1114.
- ZOU Jingwu, YU Qing, CHENG Fang. Differential chromatic confocal roughness evaluation system and experimental research[J]. Chinese Journal of Optics, 2020, 13(5): 1103–1114.
- [83] YU S, WANG Z R, QIU L R, et al. High-precision and high-speed surface topography measurement method of microstructures based on laser scanning transverse differential confocal[J]. Measurement, 2024, 226: 114208.
- [84] LIN C H, POWELL R A, JIANG L, et al. Real-time depth measurement for micro-holes drilled by lasers[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(2): 025307.
- [85] AHN H, PARK J, KIM J A, et al. Optical fiber-based confocal and interferometric system for measuring the depth and diameter of through silicon vias[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(23): 5462–5466.
- [86] DREXLER W, FUJIMOTO J G. Optical coherence tomography: Technology and applications[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [87] HE B, ZHANG Y X, ZHAO L, et al. Robotic-OCT guided inspection and microsurgery of monolithic storage devices[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5701.
- [88] FLEMING T G, CLARK S J, FAN X Q, et al. Synchrotron validation of inline coherent imaging for tracking laser keyhole depth[J]. Additive Manufacturing, 2023, 77: 103798.
- [89] MA D Y, ZHANG Y, SHU L S, et al. Study on penetration depth in laser welding: A process information database-based control strategy and OCT measuring verification[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62: 102825.
- [90] POTSAID B, BAUMANN B, HUANG D, et al. Ultrahigh speed 1050 nm swept source/Fourier domain OCT retinal and anterior segment imaging at 100, 000 to 400, 000 axial scans per second[J]. Optics Express, 2010, 18(19): 20029.
- [91] 代豪, 杨亚良, 岳献, 等. 基于模块化降噪自编码器的视网膜 OCT 图像降噪方法[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 0110001.
- DAI Hao, YANG Yaliang, YUE Xian, et al. Denoising method of retinal OCT images based on modularized denoising autoencoder[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(1): 0110001.
- [92] PULIAFITO C A, HEE M R, LIN C P, et al. Imaging of macular diseases with optical coherence tomography[J]. Ophthalmology, 1995, 102(2): 217–229.
- [93] YANG X Y, ZHANG Z J, LI X H, et al. High-speed low-cost line-field spectral-domain optical coherence tomography for industrial applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 184: 108631.
- [94] ZHANG Z J, YANG X Y, ZHAO Z Y, et al. Rapid imaging and product screening with low-cost line-field Fourier domain optical coherence tomography[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 10809.
- [95] DEMIR A G, COLOMBO P, NORGIA M, et al. Evaluation of self-mixing interferometry performance in the measurement of ablation depth[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(11): 2621–2630.
- [96] KAMIYA M, AOSHIMA S I. Real-time monitoring of processed hole depth under femtosecond laser processing[J]. The Review of Laser Engineering, 2005, 33(10): 685–689.
- [97] WEBSTER P J L, MULLER M S, FRASER J M. High speed in situ depth profiling of ultrafast micromachining[J]. Optics Express, 2007, 15(23): 14967–14972.
- [98] WEBSTER P J L, YU J X Z, LEUNG B Y C, et al. In situ 24 kHz coherent imaging of morphology change in laser percussion drilling[J]. Optics Letters, 2010, 35(5): 646–648.
- [99] WEBSTER P J L, WRIGHT L G, MORTIMER K D, et al. Automatic real-time guidance of laser machining with inline coherent imaging[J]. Journal of Laser Applications, 2011, 23(2): 022001.
- [100] HOLDER D, BOLEY S, BUSER M, et al. In-process determination of fiber orientation for layer accurate laser ablation of CFRP[J]. Procedia CIRP, 2018, 74: 557–561.
- [101] HOLDER D, KLÖPFER R, HAGENLOCHER C, et al. Online determination of the hole depth during drilling with ultrashort laser pulses for depth-adapted drilling strategies[J]. Procedia CIRP, 2024, 124: 649–652.
- [102] ZHAO J H, ZHANG C L, DING Y Y, et al. Efficient depth measurement for live control of laser drilling process with optical coherence tomography[J]. Photonics, 2024, 11(8): 743.
- [103] SUN T, ZHAO W Q, FAN Z J, et al. In-situ monitoring of hole evolution process in ultrafast laser drilling using optical coherence tomography[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 133: 1290–1299.
- [104] MA D Y, JIANG P, SHU L S, et al. Real-time porosity monitoring during laser welding of aluminum alloys based on keyhole 3D morphology characteristics[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 65: 70–87.
- [105] 吕锐婵, 徐涵, 訾斌, 等. 集成制造在线故障监测的多模态物理信息融合方法[J/OL]. 机械工程学报, 2025: 1–12[2025–10–21]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids=YSTT4HG0%2CLSTPFY1C%2CJUP3MUPD%2CMPMFIG1A%2CWQ0UVIAA%2CBLZOG7CK%2CPWFIRAGL%2CEMRPGLPA%2CNLBO1Z6R%2CNN3FJMUV&korder=SU&kw=成制造在线故障监测的多模态物理信息融合方法>.
- LÜ Ruichan, XU Han, ZI Bin, et al. Physical information fusion of multi-modal data for online fault monitoring of selective laser melting integrated manufacturing[J/OL]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2025: 1–12[2025–10–21]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids=YSTT4HG0%2CLSTPFY1C%2CJUP3MUPD%2CMPMFIG1A%2CWQ0UVIAA%2CBLZOG7CK%2CPWFIRAGL%2CEMRPGLPA%2CNLBO1Z6R%2CNN3FJMUV&korder=SU&kw=成制造在线故障监测的多模态物理信息融合方法>.
- [106] JAMNIKAR N D, LIU S, BRICE

- C, et al. In-process comprehensive prediction of bead geometry for laser wire-feed DED system using molten pool sensing data and multi-modality CNN[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(1–2): 903–917.
- [107] JAMNIKAR N D, LIU S, BRICE C, et al. In situ microstructure property prediction by modeling molten pool-quality relations for wire-feed laser additive manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 79: 803–814.
- [108] ZHANG Q, ZHAO Z Y, WANG Z M, et al. Deep multimodal fusion of spectral and visual data for laser welding defect classification[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2026, 165: 113473.
- [109] MCKINNEY M, GARLAND A, CILLESSEN D, et al. Unsupervised multimodal fusion of in-process sensor data for advanced manufacturing process monitoring[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2025, 78: 271–282.
- [110] LI J J, ZHAO J H, LUO Y X, et al. Fusing optical coherence tomography and coaxial image for contact width and penetration depth monitoring during laser lap welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 183: 112294.
- [111] KLAIBER M, HARTMANN M, HERMANI J P, et al. Multimodal sensor fusion with SWIR imaging and audio for inline gas-tightness monitoring in laser-welded bipolar plates[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113441.
- [112] WANG H X, LIU J, XU Y, et al. Experimental characterization and real-time monitoring for laser percussion drilling in titanium alloy using transverse electric field assistance and/or lateral air blowing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 845–858.
- [113] XIE J R, SAFDAR M, CHEN L Q, et al. Audio-visual cross-modality knowledge transfer for machine learning-based in-situ monitoring in laser additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2025, 101: 104692.
- [114] ZHANG Q R, ZHANG X N, ZHOU Y L, et al. Intelligent femtosecond laser bone drilling via online monitoring and machine learning[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 117: 224–231.
- [115] SUN T, FAN Z J, ZHAO W Q, et al. Hybrid Machine learning and temporal-spatial fusion decision for real-time monitoring of drilling stage in ultrafast laser drilling[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 184: 112354.

Review on Online Monitoring Technology During Laser Drilling Holes

HE Jinge^{1,2,3}, ZHAO Wanqin^{1,2,3}, SUN Tao^{1,2,3}, ZHONG Yuanhua^{1,2,3},
XUE Bozhong^{1,2,3}, LI Jiasi^{1,2,3}, MEI Xuesong^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robots, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[ABSTRACT] Laser drilling is a key enabling process in precision manufacturing and is widely used in high-end sectors such as aerospace, new energy, and microelectronics. Owing to its non-contact nature, high accuracy, and broad material compatibility, it has become a core solution for producing millimeter and micrometer scale holes. However, the highly coupled multiphysics interactions between the laser and the material, together with incomplete understanding of the underlying mechanisms and the difficulty of real-time defect diagnosis, hinder process optimization and productivity improvement. Accordingly, online monitoring during drilling has become an essential approach to enhance process controllability and quality consistency. This paper systematically reviews recent advances in online monitoring technologies for laser drilling. Both passive monitoring methods (acoustic emission, photoelectric signals, and visual information) and active monitoring methods (optical coherence tomography, synchrotron X-ray imaging, and laser confocal microscopy) are discussed, with an emphasis on their monitoring capabilities and applicable scenarios. Current challenges are identified, including ambiguous correlations between monitoring signals and hole geometrical/quality parameters, signal attenuation in high-aspect-ratio drilling, and insufficient robustness to interference under complex operating conditions. Finally, future directions are outlined in terms of modular monitoring instrumentation, multimodal data-fusion, and closed-loop processing-monitoring control systems, aiming to facilitate the transition of these technologies from laboratory demonstrations to engineering practice and industrial deployment.

Keywords: Laser drilling; Monitoring; Processing Status Recognition; Passive monitoring; Active monitoring

(责编 晓月)