

基于机器视觉的激光熔覆熔池形貌检测方法研究

刘建平, 耿家源, 刘怀海, 刘馨屿
湖南应用技术学院, 湖南 常德 415100
DOI:10.61369/ECE.2026010013

摘 要 : 激光熔覆技术作为金属增材制造与零件修复的核心技术, 广泛应用于航空航天、工程机械等领域, 熔池形貌的稳定性直接决定熔覆层质量与加工效率。传统检测方法依赖人工经验, 存在滞后性强、精度不足等问题, 难以满足智能化生产需求。本文基于机器视觉技术, 搭建同轴视觉激光熔覆监控平台, 研究抗干扰熔池成像与图像增强方法, 实现熔池轮廓精确重构与熔覆层质量实时预测, 建立工艺闭环调控机制。研究结果表明, 该方法可有效抑制强光与飞溅干扰, 提升熔池图像清晰度与检测精度, 为激光熔覆装备智能化升级提供核心技术支持, 具有重要的工程应用价值与理论研究意义。

关 键 词 : 机器视觉; 激光熔覆; 熔池形貌; 图像增强; 在线检测; 闭环调控

Research on Molten Pool Morphology Detection Method of Laser Cladding Based on Machine Vision

Liu Jianping, Geng Jiayuan, Liu Huaihai, Liu Xinyu
Hunan University of Applied Technology, Changde, Hunan 415100

Abstract : As a core technology for metal additive manufacturing and part repair, laser cladding technology is widely used in aerospace, engineering machinery and other fields. The stability of molten pool morphology directly determines the quality and processing efficiency of the cladding layer. Traditional detection methods rely on manual experience, suffering from strong lag and insufficient precision, which are difficult to meet the needs of intelligent production. Based on machine vision technology, this paper builds a coaxial vision laser cladding monitoring platform, studies anti-interference molten pool imaging and image enhancement methods, realizes accurate reconstruction of molten pool contour and real-time prediction of cladding layer quality, and establishes a closed-loop process control mechanism. The research results show that this method can effectively suppress the interference of strong light and spatter, improve the clarity of molten pool images and detection accuracy, provide core technical support for the intelligent upgrading of laser cladding equipment, and has important engineering application value and theoretical research significance.

Keywords : machine vision; laser cladding; molten pool morphology; image enhancement; online detection; closed-loop control

引言

激光熔覆技术通过高能量激光束使粉末与基体表面快速熔化凝固, 形成冶金结合良好的熔覆层, 可显著提升零件表面耐磨、耐腐蚀性能, 在零件修复与精密制造中占据重要地位。熔池作为激光熔覆过程的核心区域, 其形貌参数直接反映熔覆过程稳定性, 与熔覆层缺陷形成密切相关。当前工业生产中, 熔池形貌检测多依赖人工经验判断, 缺乏实时性与客观性, 易导致熔覆层出现孔隙、裂纹等缺陷, 制约技术规模化应用^[1]。机器视觉技术具有非接触、响应快、信息丰富等优势, 已成为熔池在线检测的主流方向。本文结合激光熔覆工艺特点, 针对熔池成像干扰大、轮廓提取难等问题, 开展基于机器视觉的熔池形貌检测方法研究, 实现熔池形貌实时监测与工艺精准调控, 推动激光熔覆技术向智能化、自动化升级。

一、激光熔覆熔池形貌检测基础与平台搭建

(一) 激光熔覆工艺与熔池特性分析

激光熔覆是复杂的多物理场耦合过程, 涉及激光能量传递、

粉末熔化、液态金属流动及快速凝固等一系列物理化学变化, 熔池作为该过程的核心载体, 其形貌特征直接决定熔覆层的最终质量。激光熔覆过程中, 熔池由激光束聚焦加热形成, 其形貌主要受激光功率、扫描速度、送粉速率等工艺参数影响, 同时易受激

项目信息: 湖南省常德市科技创新指导性计划项目, 项目名称: 基于机器视觉的激光熔覆熔池形貌检测技术的研究 (项目编号: 2025ZD132)。

光等离子体辐射、飞溅等外界干扰，呈现动态变化特性。熔池的几何参数包括宽度、长度、面积及边缘轮廓，表面纹理则反映熔池内部流动状态，这些参数的稳定性直接关系到熔覆层的厚度均匀性、结合强度及致密性^[2]。当工艺参数不合理或存在外界干扰时，熔池易出现过熔、欠熔等现象，进而导致熔覆层产生裂纹、未熔合等缺陷。因此，深入分析熔池特性，明确其与工艺参数、熔覆质量的关联，是开展熔池形貌检测研究的基础。

（二）机器视觉检测原理与技术选型

机器视觉检测技术通过图像采集设备获取目标场景图像，经图像处理算法提取特征信息，实现对目标的自动识别与参数测量，其核心优势在于非接触式检测，可避免对熔覆过程造成干扰，同时具备实时性与高精度特点。结合激光熔覆熔池的高温、强光、动态变化等特性，需合理选型视觉检测组件。图像采集设备选用高频工业相机，具备高帧率、低延迟和强抗干扰能力，可实现熔池动态演变过程的毫秒级记录，为后续图像分析提供可靠基础^[3]。光学组件方面，优化滤光系统选型，用于抑制激光等离子体辐射和飞溅干扰，减少强光对图像采集的影响。图像传输与处理采用 PLC 作为核心处理器，实现图像信息的快速采集与传输，保障检测过程的实时性。同时，选用合适的图像采集软件，实现图像的实时显示、存储与初步预处理，为后续图像增强与特征提取奠定基础。

（三）同轴视觉激光熔覆监控平台搭建

搭建同轴视觉激光熔覆监控平台是实现熔池形貌在线检测的硬件基础，平台整体由激光加工模块、视觉采集模块、信号传输模块及控制模块四部分组成。激光加工模块选用合适功率的激光加工设备，实现粉末与基体的熔化沉积；视觉采集模块由高频工业相机、滤光组件、相机夹具组成，相机通过夹具固定，调整安装角度确保同轴采集熔池图像，滤光组件安装在相机镜头前端，抑制强光与杂光干扰。信号传输模块采用 PLC 作为核心处理器，连接相机与控制终端，实现图像信息与控制信号的双向传输，保障采集与控制的协同性^[4]。控制模块负责统筹整个平台的运行，设定激光加工参数、相机采集参数，实现激光加工、图像采集与过程控制的同步进行。平台搭建过程中，对相机夹具进行结构设计，确保相机安装稳定，同时完成相机标定，消除镜头畸变对图像采集精度的影响，为熔池图像的精准采集提供可靠硬件保障。

（四）平台性能测试与优化

平台搭建完成后，开展性能测试与优化工作，确保平台满足熔池形貌在线检测的需求。测试内容主要包括图像采集精度、信号传输稳定性、抗干扰能力三个方面。图像采集精度测试通过采集标准试样图像，对比实际尺寸与测量尺寸，调整相机标定参数，将测量误差控制在合理范围。信号传输稳定性测试通过长时间连续采集熔池图像，观察图像传输过程中的卡顿、丢失现象，优化 PLC 传输参数，确保图像传输流畅。抗干扰能力测试模拟激光熔覆过程中的强光、飞溅干扰，观察图像采集质量，优化滤光系统参数，提升平台抗干扰性能^[5]。针对测试中发现的问题，对平台组件进行调整优化，如调整相机曝光时间、优化夹具结构、完善滤光系统，使平台能够稳定、精准地采集熔池图像，为后续

熔池图像处理与特征提取提供高质量的图像数据。经过优化后的监控平台，可有效抑制外界干扰，实现熔池图像的实时、精准采集，满足熔池形貌在线检测的工程需求。

二、基于机器视觉的熔池形貌检测方法研究

（一）抗强光干扰熔池成像方法研究

激光熔覆过程中，激光等离子体辐射与飞溅产生的强光干扰，是影响熔池图像采集质量的主要因素，易导致熔池区域过曝或背景欠曝，无法清晰捕捉熔池轮廓与表面纹理。因此，研究抗强光干扰的熔池成像方法，是实现熔池形貌精准检测的关键。首先优化光学滤光系统，根据激光熔覆过程中干扰光的波长特性，选用合适的滤光片，过滤多余的强光与杂光，仅允许熔池辐射的特征光通过，减少强光对图像采集的影响^[6]。其次改进自适应曝光控制算法，根据熔池区域的亮度变化，自动调整相机曝光时间与增益参数，避免熔池区域过曝与背景欠曝，确保采集到的熔池图像具有合适的对比度。通过实验对比不同滤光参数与曝光参数的成像效果，确定最优参数组合，实现高对比度、高清晰度熔池图像的采集。该方法可有效抑制激光等离子体辐射与飞溅干扰，解决熔池成像过程中的亮度不均匀问题，为后续图像增强与特征提取提供高质量的原始图像数据^[7]。

（二）熔池图像增强算法研究与实现

采集到的熔池原始图像仍存在噪声、边缘模糊等问题，影响熔池轮廓的精准提取，因此需要通过图像增强算法提升图像质量。本文基于 Retinex 与同态滤波两种经典图像增强算法，结合熔池图像的特点，进行算法优化与实现。Retinex 算法通过分离图像的光照分量与反射分量，抑制光照不均匀的影响，提升图像的对比度与细节清晰度，适用于解决熔池图像中过曝与欠曝并存的问题。同态滤波算法通过对图像的对数域进行滤波处理，增强图像的高频分量，抑制低频噪声，提升熔池边缘与表面纹理的清晰度。针对两种算法的优缺点，将两者结合优化，首先采用同态滤波算法抑制图像噪声，提升图像整体清晰度，再通过 Retinex 算法调整图像光照分布，进一步增强熔池边缘细节^[8]。通过 MATLAB 软件实现算法编程，对采集到的熔池原始图像进行增强处理，实验结果表明，优化后的图像增强算法可有效提升熔池边缘及表面纹理的清晰度，抑制噪声干扰，使熔池轮廓更加明显，为后续熔池轮廓重构与特征提取奠定坚实基础。

（三）熔池轮廓精确重构与特征提取

熔池轮廓的精确重构与特征提取是熔池形貌检测的核心内容，其精度直接影响熔覆层质量预测的准确性。在图像增强的基础上，开展熔池轮廓重构与特征提取研究。首先对增强后的熔池图像进行预处理，采用阈值分割算法实现熔池区域与背景区域的分离，根据熔池图像的灰度特性，确定最优阈值，避免分割过度或分割不足导致的轮廓失真。然后采用边缘检测算法提取熔池边缘像素点，结合形态学处理算法，去除边缘噪声与毛刺，平滑边缘轮廓，实现熔池轮廓的精确重构。轮廓重构完成后，提取熔池的关键特征参数，包括几何特征与纹理特征。几何特征主要包括

熔池的宽度、长度、面积、周长及形状系数，反映熔池的整体形态；纹理特征主要包括熔池表面的灰度均值、方差、熵值，反映熔池内部的流动状态与均匀性^[9]。通过编写特征提取程序，实现特征参数的自动提取与计算，确保提取结果的准确性与实时性。实验验证表明，该方法可实现熔池轮廓的精确重构，特征参数提取误差控制在合理范围，能够有效反映熔池的实际形貌状态。

（四）熔覆层质量预测与工艺闭环调控

熔池形貌特征与熔覆层质量密切相关，通过提取的熔池特征参数，可实现熔覆层质量的实时预测与工艺闭环调控。首先建立熔池特征参数与熔覆层质量的关联模型，通过大量激光熔覆实验，采集不同工艺参数下的熔池特征参数与对应的熔覆层质量数据，采用多模态特征融合方法，分析两者之间的内在关联，建立质量预测模型。该模型可根据实时提取的熔池特征参数，预测熔覆层的质量等级，识别可能出现的缺陷类型。然后基于质量预测结果，建立工艺闭环调控机制，将预测结果反馈至 PLC 控制系统，由控制系统根据预设的控制策略，自动调整激光功率、扫描速度、送粉速率等工艺参数，使熔池形貌保持稳定，从而避免熔覆层缺陷的产生。闭环调控过程中，实时采集调整后的熔池图像，提取特征参数，验证调控效果，形成“采集—处理—预测—调控—再采集”的闭环循环^[10]。实验结果表明，该工艺闭环调控

机制可有效提升熔覆层质量的稳定性，减少缺陷发生率，实现激光熔覆过程的智能化控制。同时，该机制可替代传统人工操作，降低人工劳动强度，提高生产效率，为智能化激光增材制造提供可靠的过程监控保障。

三、结语

本文围绕基于机器视觉的激光熔覆熔池形貌检测方法展开深入研究，结合激光熔覆工艺特点与机器视觉技术优势，搭建了同轴视觉激光熔覆监控平台，系统研究了抗强光干扰成像、图像增强、轮廓重构、特征提取及质量预测与闭环调控等关键技术，主要研究结论如下：搭建的同轴视觉监控平台经过优化测试，可稳定、精准地采集熔池图像，有效抑制强光与飞溅干扰，为检测工作提供可靠硬件支撑；优化后的图像增强算法结合 Retinex 与同态滤波的优势，可显著提升熔池图像清晰度与对比度，解决了熔池成像过程中的过曝、欠曝与噪声问题；提出的熔池轮廓重构与特征提取方法，可实现熔池轮廓的精确重构与特征参数的自动提取，满足检测精度要求；建立的熔覆层质量预测模型与工艺闭环调控机制，可实现熔覆层质量的实时预测与工艺参数的自动调整，提升熔覆过程的稳定性与智能化水平。

参考文献

[1] 郭黎明. 基于机器视觉的激光熔覆熔池形貌监测研究 [D]. 山东理工大学, 2025.
[2] 白云, 董泽西, 李忠华, 等. 激光熔覆视觉监测与熔池图像处理研究综述 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (20): 1-8+17.
[3] 刘银银. 基于深度学习的激光熔覆熔池及熔覆层形貌提取研究 [D]. 中原工学院, 2024.
[4] 雍耀维, 张伟伟, 王刚, 等. 基于深度学习的激光熔覆熔池形貌提取方法研究 [J]. 应用激光, 2024, 44 (02): 34-41.
[5] 李明, 杜茂华, 曹立超, 等. 基于机器视觉的激光熔覆熔池形貌监测 [J]. 工具技术, 2023, 57 (11): 131-137.
[6] 张伟伟. 基于深度学习的激光熔覆熔池形貌与状态的研究 [D]. 宁夏大学, 2023.
[7] 李明. 基于机器视觉的激光熔覆熔池形貌监测及熔覆工艺研究 [D]. 昆明理工大学, 2023.
[8] 李奇灵. 激光熔覆熔池形貌及其动态稳定性监测方法研究 [D]. 江苏大学, 2022.
[9] 宋伟, 程延海, 澹台凡亮, 等. 激光熔覆精准再制造在线监测研究 [J]. 应用激光, 2021, 41 (01): 183-188.
[10] 乔亚丽, 宋建丽, 石晓蕾, 等. 激光熔覆成形过程的检测与控制研究进展 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (12): 14-20.
[11] 李媛媛. 同轴送粉式激光熔覆气体—粉末流对熔池形貌的影响研究 [D]. 湖南大学, 2012.