

复杂曲面激光熔覆再制造教学实验设计与实践

祖海英^{1,2}, 丛怡冰¹, 宋玉杰^{1,2}, 叶卫东^{1,2}, 赵海洋¹, 李大奇^{1,2}

(1. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 黑龙江省石油钻采装备再制造技术创新中心, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:为满足智能制造人才培养需求,设计了多学科融合的激光熔覆再制造教学实验项目。项目构建了“逆向建模-工艺优化-机器人熔覆”教学实验平台,并采用“理论-仿真-实操”3阶教学法,指导学生完成采油螺杆泵转子三维扫描建模、响应面法工艺参数优化以及等弓高误差路径规划及代码生成等实验。教学实践表明:该实验项目能实现复杂曲面的高质量修复,提升教学实验技术水平;同时显著增强了学生多学科技术整合与工程创新能力。形成的技术链与教学链深度融合方案,为智能制造人才培养提供了可复制的工程教育范式。

关键词:教学实验设计;激光熔覆;复杂曲面;多学科交叉

中图分类号:G 642

文献标志码:A

文章编号:1006-7167(2025)07-0193-06



Design and Practice of Teaching Experiment of Laser Cladding Remanufacturing of Complex Surfaces

ZU Haiying^{1,2}, CONG Yibing¹, SONG Yujie^{1,2}, YE Weidong^{1,2}, ZHAO Haiyang¹, LI Daqi^{1,2}

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318,

Heilongjiang, China; 2. Heilongjiang Petroleum Drilling Equipment Remanufacturing Technology Innovation Centre, Daqing 163318, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to meet the needs of intelligent manufacturing talents training, a multidisciplinary integration of laser cladding and remanufacturing teaching experimental project was designed. The teaching experiment platform of “reverse modelling-art optimization-robot cladding” is constructed. The “theory-simulation-operational” 3-step teaching method is used to guide students to complete the three-dimensional scanning modeling experiment of the oil extraction screw pump rotor, response surface method is used to complete optimizing parameter experiment, isobaric high error path planning experiment and code generation experiment. Teaching practice shows that the designed experiments can achieve high-quality repair of complex surfaces and promote the improvement of the technical level of teaching experiments; at the same time, it also significantly improves students' multidisciplinary technology integration and engineering innovation ability, and the formation of the deep integration of the technology chain and the teaching chain provides a replicable engineering education paradigm for the cultivation of intelligent manufacturing talents.

Key words: teaching experiment design; laser cladding; complex surface; multidisciplinary integration

收稿日期:2025-02-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52374383);黑龙江省高等教育教学改革重点项目(SJGZB2024177)

作者简介:祖海英(1979-),女,河北唐山人,博士,副教授,现主要从事石油钻采装备激光熔覆技术研究。

Tel.:13614598464; E-mail: zuhaiying@126.com

通信作者:宋玉杰(1968-),男,内蒙古赤峰人,博士,教授,现主要从事机械设备智能制造技术研究。

Tel.:13059068597; E-mail: syjdqpi@163.com

0 引言

激光熔覆技术作为集成光学、机械、材料及信息科学的智能制造技术^[1],其教学实验体系建设对落实《中国制造 2025》战略具有重要意义^[2]。传统教学实验项目和现有人才培养模式相对滞后,难以满足智能制造人才培养的需求^[3]。因此,亟需设计一系列创新的教学实验项目,以促进学生掌握智能制造技术,提升解决复杂工程问题的能力。

目前激光熔覆教学实验多聚焦规则试件验证性项目,例如,周金字等^[4]提出了采用 Unity3D 建立激光熔覆虚拟仿真平台,以产教融合方式开展教学实验;杨未柱等^[5]设计了激光熔覆修复镍基高温合金小试样实验项目;胡正强等^[6]开展了 WE43 镁合金激光熔覆温度场和应力场数值模拟实验研究。但面向高校的实验教学,尚缺乏面向复杂曲面的激光熔覆综合性实验。复杂曲面零件普遍应用于高端装备,是国家对制造业升级的重要方向。复杂曲面激光熔覆再制造是一个典型的复杂工程问题,其难点主要在于:① 复杂曲面零件破损不规则,常规的测量方法很难获得精确的破损信息;② 复杂曲面激光熔覆路径规划与熔覆成形难以精确控制;③ 熔覆层质量受多种工艺参数的耦合影响,参数选择困难。

为解决复杂曲面激光熔覆再制造难点问题,本文结合黑龙江省石油钻采装备再制造技术创新中心最新科研成果^[7],设计融合逆向工程和机器人技术的复杂曲面激光熔覆^[8]教学实验方案,并搭建实验平台。同时,以采油螺杆泵转子、PDC 钻头、双圆弧齿轮等石油钻采装备中典型复杂曲面零件为案例进行建模教学实验,这有助于提升学生跨学科知识整合、复杂系统设计及工程实践创新的核心竞争力,推动教学质量的内涵式发展。

1 激光熔覆教学实验平台设计

1.1 实验总体方案

本文构建的教学实验平台包含损伤零件逆向建模、激光熔覆工艺参数优化、机器人仿真模拟与熔覆成形 3 个模块的教学实验项目,总体方案如图 1 所示。

(1) 复杂曲面逆向建模模块。旨在培养学生逆向设计思维^[9],掌握曲面重构理论并应用于实践。在此模块实验中,学生采用手持激光扫描仪或三坐标测量机对复杂表面进行数据采集,通过 Geomagic 或 UG 等软件处理点云数据和曲面重构,并进行误差分析,得到复杂曲面零件逆向实体模型,为后续的熔覆路径规划提供准确模型。

(2) 激光熔覆工艺参数优化模块。旨在培养学生采用科学先进的工具设计实验方案的能力,有效分析、

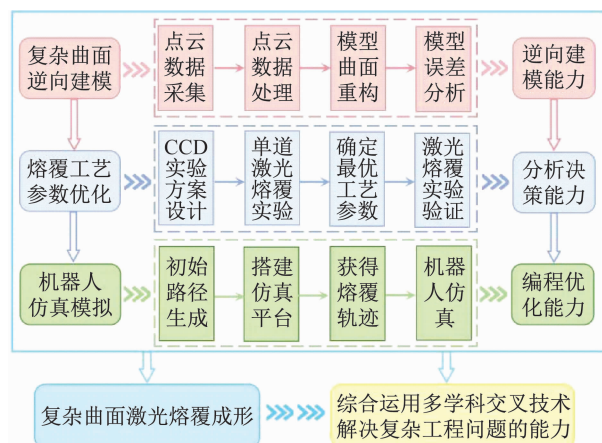


图1 激光熔覆教学实验方案

准确处理实验数据的能力,促进学生掌握激光熔覆原理。在此模块实验中,学生需掌握激光熔覆操作方法,有效提取实验数据,并探究工艺参数耦合作用下对熔覆层几何形貌和质量的影响规律,优选出适应条件的工艺参数,为完成复杂曲面的激光熔覆提供优化参数^[10]。

(3) 机器人仿真模拟与熔覆成形模块。旨在促进学生掌握机器人复杂曲面路径规划和运动实现能力。在此模块实验中,学生通过机器人运动学分析与轨迹规划,在搭建的激光熔覆轨迹规划仿真模拟平台进行仿真分析,得到加工代码。根据选定的最优工艺参数,实现复杂曲面的激光熔覆再制造。

1.2 教学实验平台设计

图2所示为设计的激光熔覆教学实验平台架构。该平台主要由逆向建模系统、激光熔覆系统和机器人系统等组成。其中:逆向建模系统由数据采集设备、逆向建模软件等组成;激光熔覆系统由计算机、光纤激光器、送粉器、冷却装置、熔覆头、3.5轴数控系统等组成,并将熔覆头装夹在数控系统上并控制其运动。工件由固定装置连接在机器人的机械臂末端,工件的运动轨迹由机械臂控制系统编程完成。熔覆头运动和工件运动形成一个复合成形运动,实现激光熔覆的加工路径^[11]。

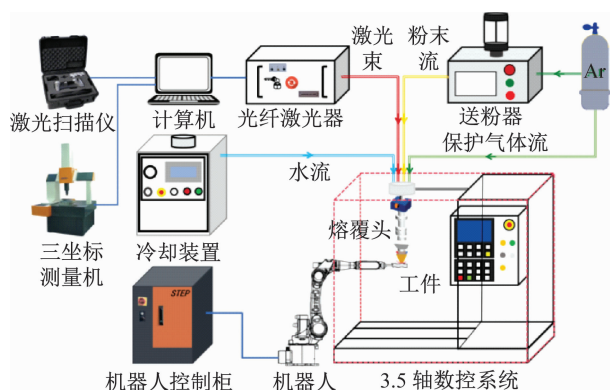


图2 激光熔覆教学实验平台架构

2 激光熔覆教学实验实施过程

本教学实验项目总学时为 32 学时,4 人一组开展实验,以螺杆泵转子激光熔覆再制造为例,展示实验实施过程。

2.1 复杂曲面逆向建模

为实现损伤零件的激光熔覆再制造,需先准确获取零件损伤部位的表面信息,该单元采用数据采集—模型重构—误差分析 3 阶递进式教学,8 个学时。图 3 所示为复杂曲面逆向建模过程图。

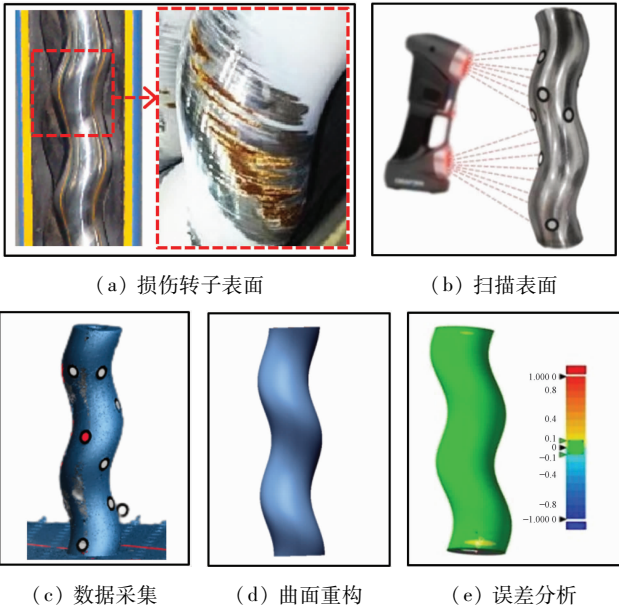


图 3 复杂曲面逆向建模过程

(1) 复杂曲面数据采集。学生需按照数据采集设备操作规范和技巧,分析转子表面的结构特点,在损伤表面粘贴标记点;在 Vxelements 扫描软件中设定标点类型及分辨率,调整快门时间;利用 Handy SCAN 300™ 3D 三维激光扫描仪独立完成采集转子点云数据操作;拼接、整理点云,输出扫描结果。操作过程见图 3(a)~(c)。

(2) 复杂曲面模型重构。学生依据 Geomagic 软件操作要点,对采集的点云数据开展“点云去噪→孔洞修复→曲面优化”处理操作;通过探测轮廓线、构造曲面片等操作生成 NURBS 曲面,获得转子 STL 模型,操作过程见图 3(d)。

(3) 误差分析。解析误差分析方法,将逆向得到的模型与理论模型进行 3D 比对计算得到误差,将整体误差控制在 ± 0.15 mm 之内,验证逆向模型是否满足要求[见图 3(e)]。对于误差超标模型,学生实验小组需回溯扫描参数与操作流程,总结误差超标原因并提出扫描工艺改进方案,为后续的激光熔覆路径规划提供准确模型。

2.2 激光熔覆工艺参数优化

单道激光熔覆是激光熔覆成形的最小制造单元,其特征尺寸直接决定着零件精度。本单元采用单道激光熔覆实验—实验结果分析—工艺参数优化及验证的教学形式,共计 16 学时,以保证学生理解和掌握如何获得符合性能质量要求的熔覆层^[12]。

(1) 单道激光熔覆实验。在解析响应面法设计实验方案的原理,现场演示激光熔覆操作后,学生实验小组进行实验:① 选用 45 钢作为熔覆基板(80 mm × 40 mm × 20 mm)材料,熔覆修复材料为混合粉末(80% 的 420 铁基粉末和 20% 的碳化硼粉末);② 采用响应面法中的标准实验设计方法(中心复合设计),制定“三因素三水平”单道激光熔覆工艺实验方案,以激光功率、送粉速率、扫描速度作为影响因素,以 -1、0、1 为各因素低、中、高水平编码,以熔覆层的宽高比和稀释率为响应目标^[13];③ 对基板进行砂纸打磨除锈等预处理,采用 SAMTLas 4s 光纤激光器(光斑直径为 2.4 mm),保护气体流量设置为 5 L/min,按照实验方案开展 20 组单道激光熔覆实验操作;④ 通过线切割基体、抛光基材表面、腐蚀处理等系列操作制作金相试件,金相显微镜观察分析不同工艺参数熔覆层截面形貌。⑤ 测量并记录熔覆层宽度、高度、熔深等几何特征数据,计算得到熔覆层宽高比和稀释率。

(2) 单道激光熔覆实验结果分析。学生通过分析响应曲面图,实验探究工艺参数对熔覆层形貌和质量的影响规律:① 将实验结果导入 Design-Expert 软件中,得到不同扫描速度下,激光功率和送粉速率对熔覆层 3D 响应曲面图,如图 4 所示;② 比较宽高比的响应曲面[见图 4(a)~(c)]、稀释率响应曲面[见图 4(d)~(f)] 的坡度、极值点峰值、各因素影响变化趋势,得到随着送粉速率和激光功率变化,响应目标的变化规律;③ 根据能量密度、粉末堆积等物理机制解释实验规律:出现在同一位置的粉末量变多,而作用于基体上的热量减少,基体上熔化的区域减小,熔覆层稀释率呈现下降趋势;④ 确定了各激光工艺参数对单道熔覆层的影响由主到次序为送粉速率、扫描速度、激光功率。

(3) 工艺参数优化及实验验证。学生实验小组以熔覆层宽高比和稀释率为目标进行优化:① 参考文献[14]中参数设置宽高比的优化目标值为 2.5,稀释率的优化目标值为 35%;② 运用 Design-Expert 软件建立多目标优化模型,本案例实验确定的优化工艺参数:激光功率为 2 284 W、送粉速率为 2.92 r/min 和扫描速度为 401 mm/min;③ 采用优化工艺参数开展实际激光熔覆实验验证操作得到熔覆层;④ 实验后测量计算宽高比和稀释率实际值,并与预测值进行比较,计算得到宽高比误差为 1.10%,稀释率的误差为 5.15%。表明优化工艺参数能够精准地控制熔覆层形貌和质量。

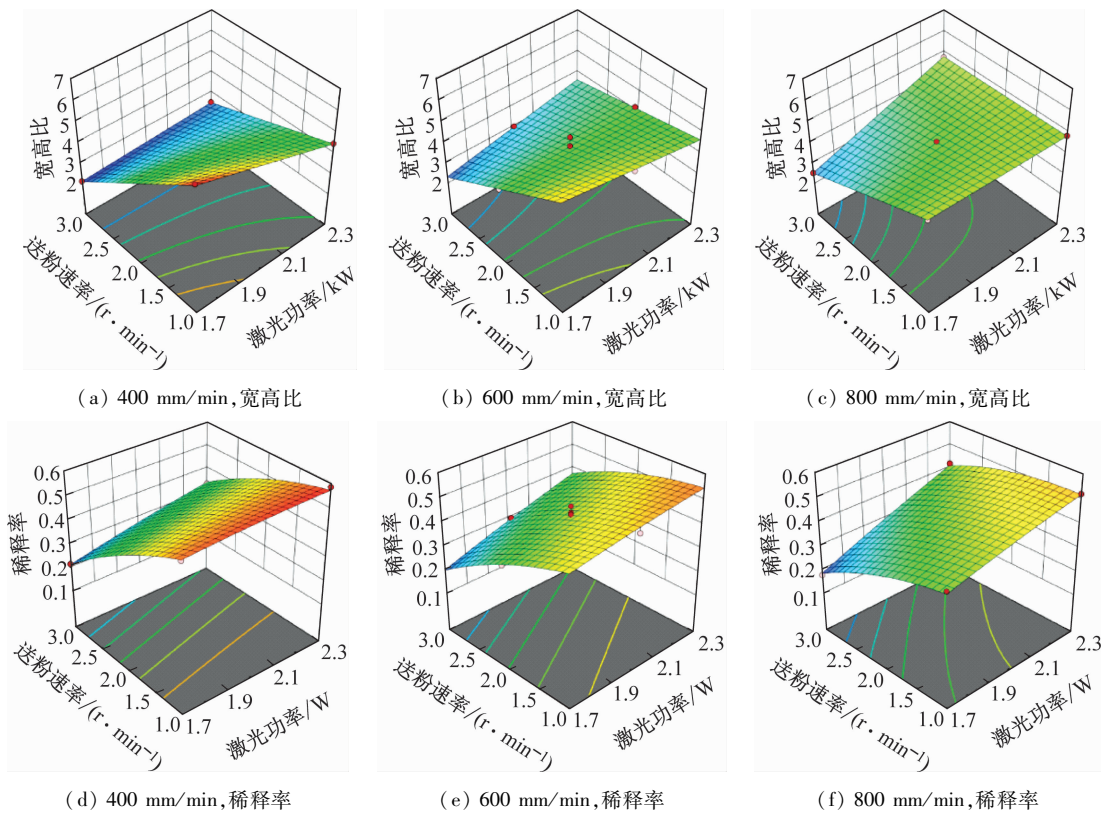


图 4 不同扫描速度下激光功率和送粉速率对宽高比、稀释率的影响

2.3 机器人仿真模拟与熔覆成形

本单元采用路径规划—机器人运动学仿真—激光熔覆仿真模拟—激光熔覆实现的 4 阶递进教学形式, 共计 8 学时, 培养学生智能制造核心能力^[15]。

(1) 激光熔覆路径规划。曲面特征的激光熔覆路径规划实验如图 5 所示。学生实验小组采用等距平行平面组切割逆向建模得到零件的 STL 模型, 计算切平面与三角面片网格生成的交点, 有序连接所有交点,

获得初始熔覆路径[见图 5(a)、(b)]。为了保证熔覆质量, 适应曲率变化较大表面, 采用等弓高误差的等距曲线切线法对初始路径进行离散, 计算插补点法向矢量, 并依次建立插补点的局部笛卡尔坐标系, 确定插补点处的位姿[见图 5(c)]; 设置熔覆头沿曲面法矢方向向外延伸的距离^[16], 完成激光熔覆路径平滑处理操作, 防止熔覆过程中抖动引起的不利影响。

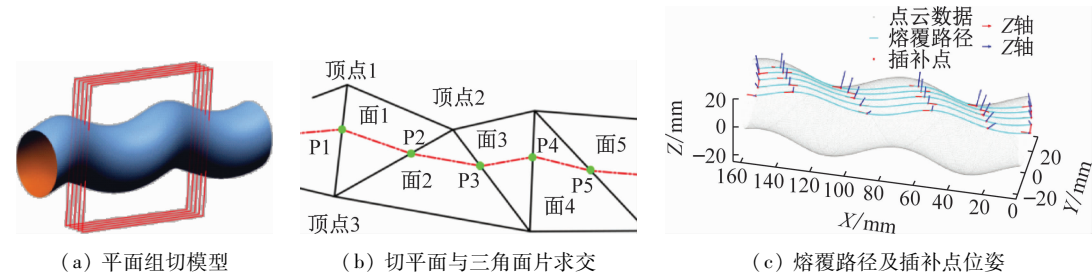
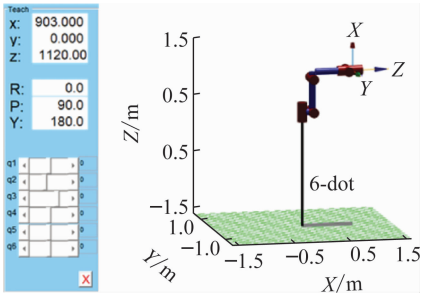


图 5 激光熔覆路径规划

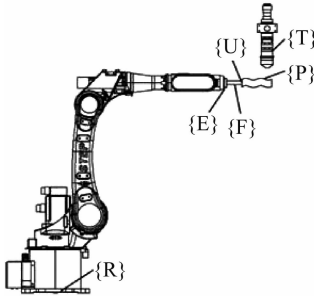
(2) 机器人运动学仿真。机器人运动学仿真实验如图 6 所示。实验采用改进 MD-H 参数法建立机器人的运动学模型, 学生实验小组使用 Matlab Robotics Toolbox 机器人工具箱建立 SA1400 型机器人的数学模型[见图 6(a)]。根据已知机器人各关节角度, 计算出机器人末端正运动学解; 根据 Piper 准则, 对机器人末端位姿矩阵进行齐次变换求逆, 得到机器人运动学逆解, 并将逆解代入工具箱正运动学函数 fkine 中验证正确性; 建立机器人运动耦合关系[见图 6(b)], 对机

器人末端与熔覆头运动链进行解耦以及位姿变换, 得到机器人末端的位姿矩阵, 完成机器人的运动学仿真分析操作。

(3) 机器人激光熔覆仿真模拟。机器人激光熔覆路径规划及仿真模拟实验如图 7 所示。学生实验小组在 PQart 软件中搭建激光熔覆仿真模拟平台[见图 7(a)], 建立机器人、熔覆头与待加工螺杆转子运动耦合关系; 将 APT 轨迹文件与转子 STL 模型关联生成加工路径, 设置运动链耦合参数; 调整轨迹点姿态矩阵,



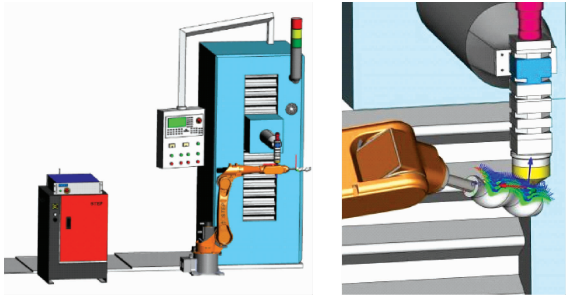
(a) 数学模型



(b) 运动耦合关系

图 6 SA1400 机器人运动学仿真

消除 3 处关节超限点,设置线速度,完成仿真模拟操作;分析机器人的各关节处于运动范围内,运行至各轨迹点处未发生空间不可达,轴超限、奇异点等错误[见图 7(b)];对轨迹进行后处理,将机器人加工路径输出为加工代码。

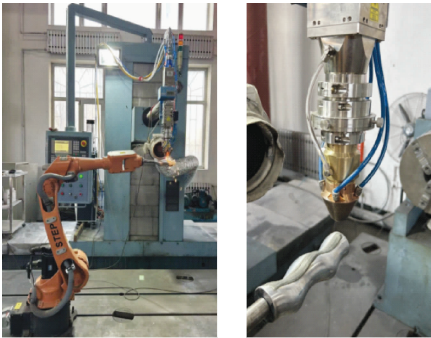


(a) 仿真模拟平台 (b) 轨迹点机器人姿态
图 7 激光熔覆路径规划及仿真模拟过程

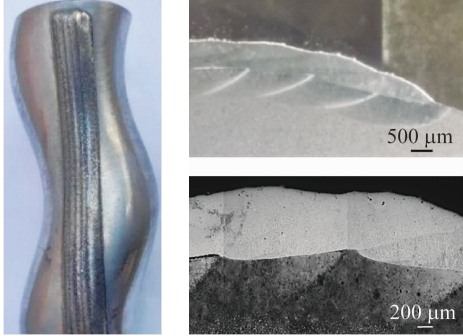
(4) 复杂曲面激光熔覆成形。图 8 所示为完成激光熔覆转子的实验过程及及熔覆后形貌。学生实验小组将工件装夹在机器人末端,根据优化工艺参数设定激光器工作参数;将仿真模拟得到的加工代码输入数控系统,验证机器人仿真分析轨迹运行无误后,启动激光熔覆操作;观察激光熔覆过程中机器人运行姿态准确性和平稳性^[17][见图 8(a)~(c)];实验操作结束后观察熔覆层宏观形貌[见图 8(d)],发现熔覆层厚度变化均匀,熔覆层表面大致成为一个平面,且在转子表面复杂曲面处修复效果良好,判断能够满足修复精度要求。

3 实施成效

本教学实验项目在 2020 级机械设计制造及其自



(a) 熔覆中 (b) 熔覆结束



(c) 熔覆结果 (d) 熔覆层宏观形貌

图 8 激光熔覆转子实验过程及熔覆后形貌

动化专业实施以来,已经开展了 5 个批次,取得显著成效:

- (1) 教学数据显示,90% 学生能独立完成全流程操作,掌握了逆向建模、激光熔覆工艺参数优化、机器人仿真等关键技术,培养了智能制造理念,达成了操作规范—理论深化—应用创新能力跃升。
- (2) 本教学实验项目实施以来,学生实验参与度显著提升,实验方案创新率从 30% 提升至 70%;由项目成果形成的实验报告创新性内容占比达 95%;2020~2024 级学生实验综合优秀率从 34.6% 稳步提升至 52.8%。选课人数年均增长 28%,5 年培养学生总数为 340 名,学生评教中在技术前沿性、实践创新性、产业衔接度三项指标上均高于 95 分。
- (3) 学生反馈:通过三维扫描将不规则损伤表面转化为精准数字模型,深刻理解了逆向设计技术的工程价值;借助响应面法建立的工艺模型,完成通过数据预演实验,系统理解参数间的耦合规律;当见证机器人精准执行预设熔覆轨迹时,深刻体会到智能制造的精确性与可靠性。
- (4) 毕业生跟踪表明,毕业生在激光熔覆再制造岗位的工艺设计能力表现优异。优化的工艺方案通过石油装备激光再制造行业标准认证率达 85%,成功应用于油田装备修复产线,使单件维修成本降低 23%。本实验 4 项衍生成果在省级工程竞赛中获奖,且获批 2 项大学生创新创业训练计划项目。

4 结 语

本文设计的面向复杂曲面修复的激光熔覆再制造

教学实验项目,在经过 5 轮教学实践后,表明科研反哺教学模式成效显著。通过采用工业级激光熔覆装备与虚拟仿真平台联动的沉浸式实验模式,使 90% 的学生掌握了激光熔覆全流程技术,工艺参数优化效率提升 35%;并有 4 项优化创新方案获国家实用新型专利。跨学科协作机制有效培养了学生的系统化工程思维。随着激光熔覆技术的不断发展,本实验项目具备持续迭代升级潜力。后续将拓展激光熔覆过程中热-力-流多场耦合仿真、熔覆层组织演变机理研究、机器人协同熔覆智能系统研究等高阶性实验内容,以增强实验的智能化水平和工程实用性,构建培养学生跨学科技术整合与复杂工程问题解决能力的框架,为智能制造人才培养提供可复制路径。

参考文献(References):

[1] Yao L M, Xiao Z M, Hoo Z S, *et al.* Mechanism analysis of grain growth dominated by alloy composition gradients during powder bed fusion[J]. *Materials Research Letters*, 2023, 11(10): 814-820.

[2] 周 济. 智能制造是推进新型工业化的主要技术路线[J]. *中国工业和信息化*, 2024(11): 42-45.

[3] 赖李媛君,张 霖,任 磊. 智能制造系统课程教学新体系与新模式探索[J]. *实验室研究与探索*, 2024, 43(11): 181-185.

[4] 周金字,李晓晖. 面向产教融合的激光熔覆虚拟仿真实验平台开发[J]. *实验科学与技术*, 2022, 20(2): 28-32.

[5] 杨未柱,樊哲铭,李 磊,等. 融合增材制造技术的工程力学专业课程创新实验教学实践[J]. *大学教育*, 2024(8): 43-48.

[6] 胡正强,雷 声,申家升,等. WE43 镁合金激光熔覆温度场和应力场数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2024(24): 97-101.

[7] 祖海英,卢兴宇,宋玉杰,等. 基于激光熔覆再制造 PDC 钻头的机器人仿真分析[J]. *焊接学报*, 2022, 43(10): 71-76.

[8] 刘伟军,张 凯,王慧儒,等. 激光定向能量沉积技术的研究现状与应用进展[J]. *沈阳工业大学学报*, 2024, 46(5): 631-645.

[9] 周 琴,吴志超,罗龙君,等. 基于正逆向设计结合的 3D 打印实践教学[J]. *实验室研究与探索*, 2024, 43(2): 217-221.

[10] 刘婷婷,章 林. 选区激光熔化金属增材制造实验质量控制[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(9): 48-53.

[11] Amar E, Popov V, Sharma V M, *et al.* Response surface methodology (RSM) approach for optimizing the processing parameters of 316L SS in directed energy deposition[J]. *Materials*, 2023, 16(23): 7253.

[12] 陈儒森,吉小超,张梦清. 机器学习在激光熔覆涂层缺陷检测中的研究现状与进展[J]. *中国表面工程*, 2024, 37(5): 112-137.

[13] Jiang R W, Lin C S, Li Y D, *et al.* Optimization of laser cladding process parameters and analysis of organizational properties of mixer liners[J]. *Materials*, 2024, 17(21): 5158.

[14] Kaya G, Yıldız F, Korkmaz İ H, *et al.* Effects of process parameters on selective laser melting of Ti6Al4V-ELI alloy and parameter optimization via response surface method [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2023, 885.

[15] 李本杰,郑华林,李炳林. 双碳背景下“油气装备绿色再制造技术”课程建设探索[J]. *教育教学论坛*, 2024(21): 1-4.

[16] Huang H L, Zhou L, Luo S M. Laser cladding path planning for gear repair based on area division and trajectory correction[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 134(7): 3719-3732.

[17] Yang C C, Wang J L, Wang J M, *et al.* Study on surface thermal deformation of laser cladding screw based on path planning [C]// *International Conference on Electronic Materials and Information Engineering (EMIE 2023)*. SPIE, 2023, 12919: 119-124.

(上接第 186 页)

[2] 肖 玉. 加强实验教学示范中心建设培养学生的创新[J]. *实验室研究与探索*, 2014, 33(7): 157-160.

[3] 许 云. 普通高校专业实验室面临的问题与对策[J]. *实验科学与技术*, 2017, 15(2): 139-141.

[4] 卢行伟,田茂毅,李 庆. 基于微课和雨课堂的大学计算机混合实验教学模式[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(6): 203-206.

[5] 阎西康,梁 栋,张静娟,等. 虚拟仿真在土木工程类实验教学中的应用[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(3): 207-209.

[6] 龙海洋,夏彬伟,姜永东,等. 实验室管理平台的建设与实践[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(10): 252-255.

[7] 刘宇雷,王 勤,余 明. “双一流”背景下高校实验室建设路径探究[J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(12): 242-245.

[8] 卫飞飞,石 琦,钟 冲,等. 高校实验室安全信息化建设探究[J]. *实验室研究与探索*, 2020, 38(10): 300-303.

[9] 崔 勇,张 茜,富 立. 基于云实验平台的无线传感器网络实验教学探索[J]. *实验技术与管理*, 2019, 36(9): 161-163.

[10] 张振锋,陈 杰. 基于云平台的信息安全专业云实验教学系统构建实践[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(9): 251-255.

[11] 高洪皓,单子鹏,陈章进,等. 云实验室在大学计算机基础实验教学中的应用[J]. *电气电子教学学报*, 2016, 38(5): 130-133.

[12] 黎 想,雷 霞,李 宏,等. 基于云实验室的数字电子技术实验课程教学改革[J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(4): 208-212.

[13] 王华忠,姚 俊,程 华,等. 基于云计算的过程控制远程实验系统[J]. *实验室研究与探索*, 2015, 34(4): 103-106.

[14] 史建焘,李秀坤,张兆心. 基于 CloudStack 的网络攻防虚拟实验云平台[J]. *实验室研究与探索*, 2017, 36(5): 75-78.

[15] 陶 冲,李 宏. 远程控制数字系统实验平台设计与实现[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(1): 104-108.

· 名人名言 ·

科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,也是工程技术的基础。

——张文裕