

以学生为中心的金属增材制造高校教学改革与探索

黄啸，户召淼，梅硕

中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院，北京 100083

DOI: 10.61369/SDME.2025250032

摘要：高等院校金属增材制造教学存在前沿衔接断层与硬件资源不足问题，围绕“金属粉末－粘结剂复合材料熔丝”技术构建“知识－能力－素质”递进式教学体系可提升育人效果。知识维度整合材料科学、机械工程与智能制造跨学科课程，涵盖粉末冶金理论、设备控制算法、数字化建模技术；能力维度通过全流程实践，强化参数化设计、工艺实验及标准化检测能力；素质维度依托“科技矿场”实践基地与双导师制，融合工程伦理与创新创业教育。实施中开发五大模块化课程，引入正交试验方法，建立覆盖尺寸公差、力学性能、物相等6项指标的质量评价体系，有效解决教学与产业需求脱节问题，为培养高端装备制造复合型人才提供可推广方案。

关键词：金属增材制造；高等教育；创新创业；产学研结合

Teaching Reform and Exploration of Metal Additive Manufacturing in Universities Centered on Students

Huang Xiao, Hu Zhaomiao, Mei Shuo

School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083

Abstract : Higher education institutions in metal additive manufacturing face challenges including gaps in cutting-edge knowledge integration and insufficient hardware resources. Developing a progressive "knowledge–competency–quality" teaching system centered on "metal powder–binder composite wire" technology can enhance educational outcomes. The knowledge dimension integrates interdisciplinary courses from materials science, mechanical engineering, and intelligent manufacturing, covering powder metallurgy theory, equipment control algorithms, and digital modeling techniques. The competency dimension strengthens practical skills through full-process training, emphasizing parametric design, process experimentation, and standardized testing. The quality dimension combines engineering ethics with innovation and entrepreneurship education through the "Tech Mine" practice base and dual–mentorship system. The implementation features five modular courses, introduces orthogonal experimental methods, and establishes a six-parameter quality evaluation system covering dimensional tolerances, mechanical properties, and material phases. This effectively addresses the disconnect between academic instruction and industrial demands, providing a replicable model for cultivating versatile talents in advanced equipment manufacturing.

Keywords : metal additive manufacturing; higher education; innovation and entrepreneurship; industry–university–research collaboration

引言

增材制造（3D 打印）是通过计算机辅助设计制作零部件三维模型，经切片软件分层后，由 3D 打印机按切片路径逐层堆积材料制造实体的技术^[1]。我国增材制造技术起步于 21 世纪初，2013 年科技部将其列入国家 863 计划关键课题，聚焦航空航天、模具等核心领域，突破关键技术并研制重点装备，初步具备推广应用条件；2015 年《中国制造 2025》明确其为智能制造核心突破领域，在高档数控机床、新材料、生物医药等领域发挥核心作用；2018 年《增材制造产业发展行动计划（2017–2020 年）》将专用材料、装备、核心器件及软件纳入核心目标，推进其在船舶、核工业、航空航天等行业应用，同时提升教育、医疗等领域示范效果^[2]。随着产业扩张，未来行业对设备研发、工艺优化及新材料创新等高端人才需求将显著增长。

基金项目：2023年中国矿业大学（北京）教育教学改革与研究“材料类课程以学生为中心的教学探索与改革”（J230407）。

作者简介：

黄啸，中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院 博士、副教授，本文通讯作者；

户召淼，中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院 硕士研究生；

梅硕，中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院 硕士研究生。

为应对技术迭代与产业升级，缓解人才缺口，国内多所高校已在机械工程、材料科学与工程等工科专业引入增材制造课程^[3]，覆盖产品设计、材料特性、设备操作及工艺优化等模块，但多以高分子材料为教学载体。金属增材制造作为战略发展方向，在高复杂度、高性能关键部件领域优势显著，如航空发动机钛合金机匣与叶片已实现从原型验证到批量生产的跨越^[4]。相较于高分子材料增材制造，金属增材技术壁垒更高，全产业链依赖特种粉末材料、高精度热源系统及闭环质量控制体系，其多学科融合特性是理想育人载体，可夯实学生跨学科基础并对接前沿需求。

当前高校金属增材教学面临两大瓶颈：一是课程与前沿技术断层，粘结剂喷射成型、电子束熔融等新兴工艺未形成规范教学体系；二是硬件资源不足，工业级设备成本高，多数院校仅能维持基础配置，难以满足实践需求^[5]。亟需以“学生为中心”改革教学模式，围绕真实工程问题设计任务，缩短课堂与实践距离，提升育人质量。本研究聚焦我校自主研发的“金属粉末—粘结剂复合材料熔丝”技术，探讨其在新工科人才培养中的价值，阐述教学框架与实施路径，为高校相关人才培养提供参考。

一、以学生为中心的金属增材制造教学设计思路

以学生为中心的内涵在于把学习者置于学习过程的核心：学生通过选择、实践与反思主动建构意义，教师从“讲授者”转为“引导者/设计者”，课程机制提供差异化支持与自我调节空间。对应到工程教育，这意味着从“教了什么”转向“学生做了什么、学到了什么”，并用可验证证据持续改进。国内与国际高教工程教育普遍支持这一取向，认为其能提升学习主动性和教学成果。

金属增材制造课程首先评估学习者画像与起点诊断。面向材料、机械、智能制造等不同背景学生，学期初设置低门槛的起点测评与小测，识别粉末冶金/烧结动力学、运动控制、数字化建模与闭环控制等基线差异；据此分层分轨布置任务、匹配资源与关注点，确保“从学生出发”的个性化路径，而非以学科划线的“一刀切”。

随后依据学生特点完善学习与实践设计，课程拟采用“PBL项目式学习^[6]+CDIO构思—设计—实现—运行”一体化探究式教学模式^[6]，围绕企业与科研课题设定跨学科项目，按“构思—设计—实现—运作”推进；课堂端以翻转课堂、讨论与同伴互评为主，实验端以“结构设计→成形/脱脂烧结→测试→迭代”为主线，强调参数—质量—成本—安全的证据链构建。多年教学结果Meta分析与综述显示，PBL及探究式学习在复杂领域可显著提升深度理解与能力提升。鉴于大型工业级金属增材设备成本高，台套数有限的现状，课程采用“四级实践策略”以扩大受益面：1. 虚拟/仿真：切片与路径仿真、参数灵敏度分析和缺陷案例库先行；2. 桌面级流程：引入可在普通实验室运行的金属打印—烧结教学工作流，使学生完成材料—工艺—结构的实验闭环；3. 共享工位：以预约轮转制进入校级/联合实验室完成关键步骤与对标测试；4. 集中产线：学期末在工业平台上完成验证样件的成形与检测。

课程内容同时与学校特色衔接，依托我校自主研发的“金属粉末—粘结剂复合材料熔丝”技术，教学活动围绕金属丝材打印路径与烧结机理展开，设置两类项目主线：其一为“可制造性受限的功能结构件”，面向结构与拓扑优化；其二为“工艺窗口与缺陷机理研究”，面向参数—组织—性能关联。为补足学生对

粉末基增材流程的全面认识，还加入金属粘结剂喷射案例研读与工艺链对比，强调设计—脱脂—烧结的全流程一致性与质量控制要点。在课程评价环节，建立“形成性+终结性”的多元评价体系：设计档案强调需求分析；实验日志包括过程监控、缺陷分析；终期技术报告+答辩注重结果分析与总结，依据学生不同的基础和偏重点多元化评价。

课程中同时注重产教融合与导师机制。结合“校内学术导师+企业/研究院导师”的双导师制，企业导师提供真实约束、场景需求与合规要求，学术导师聚焦方法论与证据规范；课程项目与毕业设计贯通，形成“技术反哺教学、教学促进创新”的良性循环，既提升学生内在动机，也缩短课堂与工厂之间的距离。

二、金属增材制造授课模块框架

面向“以学生为中心、产出导向(OBE)”的培养目标，本课程采用模块化教学改革思路，将学习内容划分为五个相互衔接的功能模块：1. 金属增材制造的基础认知与工程需求分析；2. 丝材制备工艺与安全规范实践；3. 三维模型切片与打印参数优化训练；4. 脱脂—烧结过程控制与后处理操作；5. 零件性能表征与质量检测。课程以“教—学—做—评”闭环为抓手，强调课堂讲解与工位实操的协同推进，通过项目化任务与过程性评价，引导学生把前沿技术理解转化为可验证的学习产出，促进学科知识、工程应用与课程目标的动态对齐与持续改进。

(一) 金属增材制造理论基础与工程需求分析模块

本模块帮助学生建立技术体系整体认知，理解不同技术路线特点与适用场景，能基于真实工程需求分析方案。教师通过实物展示、视频动画与案例解析，讲授选区激光熔化、金属熔丝沉积成型等典型技术，对比成形原理、设备结构及材料适配性，引导学生认识主流技术在成本、效率与材料适用性上的差异，培养技术选择能力。结合我校自主研发的金属熔丝沉积设备实例，展示低成本制造路径与国产装备创新成果，帮助学生形成“技术原理—工程实现—经济约束”思维逻辑。

工程需求分析环节，引入典型零部件案例，指导学生从材料性能与加工精度维度开展分析，以小组为单位完成性能目标设定、材料选择与制造工艺建议，掌握技术需求到工程规范的转化

方法，形成参数化设计与标准化思维，为后续学习奠定基础。

(二) 增材制造丝材制备工艺模块

该模块以粉末冶金知识为支撑，培养学生动手能力与过程控制意识，强化材料特性、工艺设计及质量检测认知，分三环节教学：1. 粉末特性分析：讲解粒度分布、形貌与流动性对零件质量的影响，指导学生用激光粒度仪和SEM检测，建立“形貌—流动性—成形性能”认知；2. 粘结剂体系设计：以ASTM B988-18为标准，讲解粘结剂各组分功能与机理，引导学生通过差热分析和润湿角测定，理解材料选择与性能匹配关系；3. 复合线材制备与检测：学生分组完成金属粉末与粘结剂的混炼、造粒、拉丝全过程，体验协同作业与质量控制。课程同步嵌入职业安全与绿色制造教育，通过现场风险识别与“三重防护”演示，强化安全与环保理念。

(三) 三维模型切片与打印参数优化模块

本模块旨在培养学生精度控制与数据分析能力。课程从建模误差分析入手，引导学生理解切片参数对成型质量的影响；教师通过案例讲解“模型网格化误差与表面精度”关系，指导学生用正交试验法开展参数优化实验。学生以小组形式完成不同参数组合的打印样件测试，运用计量学工具测量误差并撰写分析报告，通过“实验设计—数据分析—参数优化”过程性学习，掌握工艺优化方法，提升实验设计思维与质量改进能力。

(四) 脱脂—烧结工艺控制及后处理模块

该模块重点培养学生过程监控与缺陷分析能力。教学从典型缺陷案例入手，讲解脱脂过程热分解机理与力学稳定性，结合热重分析实验，帮助学生理解“催化优先—热脱脂”工艺逻辑；烧结教学中，讲解固相扩散、相变行为及气氛控制原理，通过真空与分压烧结实例，引导学生分析致密化机理与组织演变规律。学生需完成《烧结工艺参数卡》与《缺陷诊断记录表》，在实践中强化过程分析与问题追溯能力。

(五) 零件性能表征与质量检测模块

本模块为课程总结与应用环节，目标是培养学生综合测试、分析与改进能力，采用“理论讲解+实训验证”模式，涵盖密度测试、力学性能、耐腐蚀性与磨损性能等项目。学生在教师指导下使用三坐标测量仪、电化学工作站等设备，完成零件尺寸精度与

性能测试，形成“检测—分析—改进”学习链条；课程通过真实案例引导学生建立“工艺参数—微观组织—宏观性能”因果逻辑，强化工程思维与质量管理意识。

(六) 教学成效分析

通过模块化改革，课程实现从“教师讲授型”向“学生探究型”转变，学生技术认知、实验技能与工程判断能力显著提升，课程整体达成度提高，为金属增材制造类课程提供可复制、可推广的改革范式。

三、结语

本研究以“金属粉末—粘结剂复合材料熔丝”技术为载体，构建以学生为中心的“知识—能力—素质”递进式教学体系，探索新工科背景下金属3D打印课程改革路径，三年实践取得以下成果：

教学理念与体系建设：确立“以学生为中心、产出导向、理论与实践并重”理念，形成知识传授、能力培养与素质提升结合的框架；通过模块化设计与项目式学习，实现教学内容、实验训练与工程应用融合，为学生提供跨学科学习平台。

教学内容与方法创新：引入金属增材核心工艺，构建涵盖理论认知、工艺实训、质量检测的五大模块体系；采用“课堂讲授—实验验证—项目实践”三位一体模式，强化工程思维、数据分析与创新设计能力；实验教学融入安全环保理念，提升学生职业素养与社会责任感。

实践成效与育人效果：教学改革提高学生学习主动性与科研创新能力，学生在省部级创新竞赛、企业项目及毕业设计中表现突出，部分成果实现技术转化，验证改革有效性与可推广性。

未来，金属增材制造教学仍面临课程资源共享不足、设备更新滞后、产教融合不深等问题，后续将从三方面深化：一是加强跨院系协同，建设共享型实验教学平台；二是完善评价体系，探索数据分析驱动的学习成效评价机制；三是拓展国际与产业合作，推动人才培养标准体系建立。本研究为金属3D打印课程建设提供经验，验证“以学生为中心”理念在新工科教育中的可行性，为智能制造复合型人才培养提供可持续路径。

参考文献

- [1] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, (42): 1-4.
- [2] 欧阳安. 增材制造从产业培育步入推广应用新阶段——《增材制造产业发展行动计划(2017—2020年)》解析[J]. 中国机械工程, 2018 (29): 2895-2897.
- [3] 孟令涛, 彭传校, 王胜海, 等. 以学生为中心的3D打印实验教学改革与探索[J]. 实验室科学, 2024, (27): 147-152+158.
- [4] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, (35): 2690-2698.
- [5] 程鹏, 杨柳青. 增材制造产业需求导向下的产教融合路径研究[J]. 教学研究与实践, 2025 (1): 1-4.
- [6] 胡红杏. 项目式学习:培养学生核心素养的课堂教学活动[J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2017 (45): 165-172.
- [7] 顾学雍. 联结理论与实践的CDIO——清华大学创新性工程教育的探索[J]. 高等工程教育研究, 2009 (01): 11-23.