

面向增材制造行业的产学研融合研究生培养创新与实践

陈超 潘鹏 邓轩

中南大学 粉末冶金研究院, 湖南 长沙 410083

[摘要]随着增材制造技术在全球范围内的快速发展, 具备增材制造思维的材料类研究生的需求日益增长。文中分析了当前国内增材制造人才培养面临的挑战, 如研究生缺乏增材制造思维、理论与实践脱节、教师团队分散和校企联合培养机制不完善等问题, 并提出了改革策略, 包括思政教育融合、教研互促、数据驱动的材料交叉学科建设, 产学研融合强化专业本领和校企联合完善培养机制等。通过实践教学的实施, 提升了研究生的创新思维和实践能力, 培养了高素质的增材制造人才。

[关键词]产学研融合; 增材制造; 材料类研究生; 教育模式

DOI: 10.33142/fme.v6i3.15885

中图分类号: TH16

文献标识码: A

Innovation and Practice in Graduate Education of Industry-University-Research Integration for Additive Manufacturing Industry

CHEN Chao, PAN Peng, DENG Xuan

Powder Metallurgy Institute, Central South University, Changsha, Hu'nan, 410083, China

Abstract: With the rapid development of additive manufacturing technology worldwide, there is an increasing demand for materials graduate students with additive manufacturing thinking. The article analyzes the challenges faced by current domestic additive manufacturing talent cultivation, such as the lack of additive manufacturing thinking among graduate students, the disconnect between theory and practice, the dispersion of teacher teams, and the imperfect mechanism of school enterprise joint training. Reform strategies are proposed, including the integration of ideological and political education, mutual promotion between education and research, data-driven interdisciplinary construction of materials, strengthening professional skills through industry-university-research integration, and improving the training mechanism through school enterprise cooperation. Through the implementation of practical teaching, the innovative thinking and practical skills of graduate students have been enhanced, and high-quality additive manufacturing talents have been cultivated.

Keywords: integration of industry-university-research; additive manufacturing; graduate students in materials science; educational models

增材制造作为一项革命性创新的制造技术, 打破了传统减材制造的束缚, 具有生产效率高、近净成形、适于制备复杂零件的优点, 已广泛应用于航空航天、汽车、医疗器械、建筑、能源等领域^[1,2]。自 2013 年至 2020 年, 全球增材制造产值达到 126 亿美元, 增长近 4.2 倍。中国的增材制造起步较晚, 但对于行业的扶持政策发力迅速,《中国制造 2025》《十四五规划》等一系列产业政策描绘了增材制造行业的发展路线图, 同时在行业标准体系上, 对增材制造行业出台相应标准体系, 规范行业发展方向。

未来增材制造创新人才主要是现在青年一代大学生和研究生, 因此增材制造技术的发展迫切需要大学生有理想、有情怀、有责任、有担当, 迫切需要高校坚持育人导向, 全面统筹各方面的育人资源和育人力量, 构建全员全程全方位育人的长效机制, 从而担负好培养中国特色社会主义建设者与可靠接班人的重任。习近平总书记高度重视创新, 他强调“广大科技工作者要树立敢于创造的雄心壮志, 敢于提出新理论、开辟新领域、探索新路径, 在独创独有上下功夫。科学研究特别是基础研究的出发点往往是科学家探究自然奥秘的好奇心”。当今时代, 知识更新不

断加快, 社会分工日益细化, 新技术新模式新业态层出不穷, 这既为青年施展才华、竞展风采提供了广阔舞台, 也对青年能力素质提出了新的更高要求。在此背景下, 高校教育不断升级优化, 学生不仅可以通过课堂教学和科研实验提升专业知识素养, 还可以通过校企联合、科研竞赛提升综合素质。中南大学粉末冶金研究院结合专业办学特色, 基于产学研融合模式的理论基础和增材制造类研究生的培养现状, 对产学研融合培养具有增材制造思维材料类研究生以及实践教学进行了探索与实践。

1 产学研融合模式的理论基础

产学研融合是一种将产业、学术和科研有机结合的教育模式, 不仅有效整合了各方优势资源, 精准对接创新发展需求和产业升级需要, 同时也提升了高校创新型人才培养能力和科技成果转化水平, 是培养应用型人才的有效途径^[3-5]。以斯坦福大学的发展为例, 该学府在 20 世纪初期还是一所默默无闻的乡村学府, 然而到了 20 世纪 80 年代, 它已跻身美国顶尖大学之列, 这一转变主要得益于产学研结合的办学策略。作为产学研融合模式的孕育产物, “硅谷”这一美国高科技与信息产业人才的聚集地, 形成了以

斯坦福为核心,构建了一个集生产、研发和经营于一体的体系,为斯坦福大学跻身世界顶尖学府提供了坚实的科技和资源后盾^[6]。我国的产学研合作从上世纪便开始启动,发展至今取得了一定的成果。产学研政策体系渐趋完善,国家层面(包括中共中央、国务院、全国人大、国务院所属部委)关于产学研协同创新的各种政策文件信息大约在2000条以上,这为产教研融合发展提供了坚实的政策保障。在增材制造学科领域,产学研深度融合的理论基础主要包括以下几个方面。

1.1 实践导向的教学计划与学科理论

通过将实践导向的教学计划与学科理论相结合,可以实现教育内容与行业需求的对接,该模式重点强调实践活动来加深对理论知识的理解 and 应用。增材制造学科具有实践导向的特征,仅依靠课本知识还无法完全理解增材制造构件的特殊性,这意味着教学计划不仅要包含传统的学科理论知识,还要融入实际操作技能的培养,如3D打印技术、材料科学、计算机辅助设计(CAD)等。通过课程设置和实际工程案例的有机结合,学生可以更高效地理解增材制造理论,获得实际操作经验,进一步为未来的职业生涯打下坚实的基础。

1.2 产业需求与人才培养的结合

相较于传统的减材制造技术,增材制造作为一种新兴的制造方法,在材料使用效率、复杂结构制造能力、个性化生产以及设计优化等方面展现出显著优势。产业对人才的需求作为教学改革的重要推动力^[7]。基于劳动市场理论,即教育系统应响应劳动市场的变化,培养符合产业需求的人才。在增材制造领域,这意味着教育内容和培训项目需要根据行业的最新发展和趋势进行调整,以确保毕业生具备行业所需的技能和知识。在院校与企业界合作方面,部分院校的协同机制尚显不足,这导致了学生在实习和实际操作环节中难以深入把握行业实际需求,同时也难以快速融入企业的实际工作环境。通过与企业的紧密合作,将行业需求有效地融入课程设计中,从而培养出更符合市场需求的人才。

1.3 跨学科合作的推动

增材制造是一个多学科交叉领域,涉及粉体材料、材料科学、冶金工程、机械工程、计算机科学,以及医学等多学科的领域知识^[8]。跨学科合作的理论基础在于系统论和协同学,强调不同系统或学科间的相互作用和协同效应。在不同学科专家共同参与教学的产学研深度融合模式下,学科间的壁垒被拆除,可以促进学生创新思维的形成,为学生有效构建一个更为综合的知识结构,进一步提高解决问题的能力,并推动增材制造技术的发展。以美国西北大学材料科学与工程学科为例,研究生课程除了我国大学已有的材料科学基础相关课程内容外,计算材料学、工艺设计和有限元仿真、工程材料设计的计算方法等摆在了非常

突出的位置,学生通过这些课程的学习和训练,可以实际了解工业界的真实需求,毕业后企业也非常欢迎这些“实用的”毕业生。与此同时,以材料基因工程为代表新材料数字化研发,从理念到应用已经历了十余年的时间,是集基础研究、共性技术、工业放大技术和产品集成技术为一体的综合性技术,贯穿发现、开发、生产、应用的全生命周期开发过程,是加速增材制造新材料研发和产业化的有效手段^[9,10]。随着新一轮科技革命和产业变革加速,诸如ChatGPT这样的高级语言模型展示出在内容创建、个性化学习和互动参与等方面改变教育的巨大潜力^[11]。增材制造产业将与人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术的交叉融合越来越紧密,数字化研发正成为新材料创新发展的革命性力量。

2 增材制造行业材料类研究生培养面临的主要问题

中国增材制造产业联盟预测:增材制造领域研发、工程、设计、应用等方面科研型和技能型人才数量短缺严重,产业快速发展的趋势与高素质、高综合能力人才不足之间的矛盾越来越凸显^[12]。增材制造技术拔尖创新人才的培养,对于弥补增材制造行业严峻的人才空缺,推动我国关键和核心技术的发展具有重要的意义。但是,目前增材制造材料类研究生的培养存在以下问题:

2.1 传统培养模式对增材制造创新思维的限制

由于增材制造是近些年来才发展起来的一种新型制造技术,所以在过去很长一段时间内,材料加工方法均为减材制造。制造零件首先需要设计模具,再通过浇注等方法制备想所需零件,亦或是通过车床减材制造出所需零件。所以在研究生理解能力范围内,减材制造的思想根深蒂固,缺少相应的增材制造思维。增材制造思维就是要抛弃传统的模具设计等复杂步骤,通过计算机建模设计,使用增材制造的方法直接一体成型,得到所需零件的过程。也就是一种敢于想象、善于设计、勇于创新的一种新思维。由于缺乏增材制造思维,这使得研究生往往不能将增材制造理论合理地运用到解决实际问题中,在科研工作中思考的深入性和逻辑的缜密性达不到要求,更无法在增材制造领域做到学有所用,从而造成研究生在学习、科研、工作、生活上缺乏应有的积极性。

2.2 增材制造教学方法与实际联系不足

增材制造涉及到包括材料科学、冶金工程、机械工程、计算机科学,以及医学等多个交叉学科的领域知识。既懂增材制造技术,又能在材料研发、模具制造、机械加工方面有较深基础,并具有一定开拓能力的复合型、创新型和应用型人才供不应求^[13,14]。传统授课方式以基础理论知识教学为主,讲授的增材制造知识往往只停留于书本而与实际生产实践存在差别。这种过于注重知识的传授而忽视实际操作能力的锻炼、注重理论的研究而忽视工程实践能

力的培养方式,使得传统研究生的培养一直是填鸭式被动接受知识^[15]。而且由于增材制造相关设备造价高昂,能拥有多种类增材制造设备的企业较少,所以研究生能参与实习的企业相对较少,此外增材制造成本也居高不下,导致研究生参与增材制造实验的机会也较少,实习机会的贫乏和实验操作能力的不足严重限制了增材制造理论在实际生产过程中的运用,更无法将所学知识合理地运用到解决实际增材制造问题中。

2.3 增材制造教学资源分散

增材制造专业教师团队的素质和责任心是影响课程教学质量与研究生科研创新活动的重要因素之一。在增材制造备受关注的今天,一支优秀的增材制造教师团队对培养具有增材制造思维的研究生至关重要,而我国增材制造起步较晚,增材制造专业培养体系还不完善,负责增材制造的教师团队分散、课程教学方式不完善、核心优势突出不明显,不利于增材制造思维教育的进行。此外,一些教师将大量的时间花在项目和课题上,未能做到与时俱进,忽略了增材制造教学内容的及时更新,这在增材制造思维研究生的培养上仍是一项挑战。

2.4 增材制造行业校企联合培养机制不完善

当前国内高校的研究生培养模式大都是自教自用,与企业和先进科技院所的联系过少,这使得学生往往无法将科研与增材制造行业联系起来,使得所学的增材制造知识未能较好地服务于科研和生产,所以无法在生产实践中培养和提升增材制造思维,从而限制了向社会输入高质量的增材制造应用型人才,这也是培养高质量材料类研究生所面临的问题^[16]。

因此,通过课堂教学、科研实验相协调,增材制造与社会实践相融合等方式,对研究生教育进行综合改革和可靠探索,联合企业实践提升学生增材制造素养,借助创新创业大赛或增材制造高新技术企业等平台进行社会实践,提升大学生的增材制造思维能力,培养面向国际化和产业化的创新型人才,使具有增材制造思维的青年一代肩负起建设祖国的重任。

3 产学研融合培养具有增材制造思维材料类研究生的改革策略

通过改革研究生课程教学内容,完善校企联合培养模式,提升研究生科研能力,做到学有所研、研有所产、产有所学,以学促研、以研帮产、以产带学,产学研有机融合,促进材料类研究生形成材制造思维,塑造材料类研究生增材制造综合本领,培养国际化产业化增材制造创新人才,助力增材制造行业和产业的快速发展,满足现代制造行业对高素质创新型人才的需要。

3.1 思政教育融合增材制造专业课堂教学设计

进行合理的增材制造专业课堂教学设计,充分利用中南大学粉末冶金研究院陈列室、校级示范社会实践工作室等平台,加强思政教育,提升专业兴趣,推动增材制造相

关专业学生在专业知识、专业技能与政治素养方面协同成长,构建良好的教育生态圈,获取足够的增材制造专业知识。

增材制造专业教学与思政教育同向进行、相互促进。寻找专业知识的渗透点和结合点,将思政元素融入到增材制造专业课堂教学中。坚持“育人为本、德育为先”,宣扬社会主义核心价值观,实现人生价值观的良好培养,实现知识传授、技能培养和价值引领的协同前行。

①教学目标融入思政元素

通过逐条分析课堂教学目标,将细化的若干知识点融入思政元素,使增材制造技术的课堂教学更好地应用于国家、社会、行业的发展需求。思政文化全面覆盖课堂教学目标,使学生构建关于增材制造专业知识整体脉络。

②知识框架穿插人物事件

用细化的知识点为学生构建整体的知识框架,在知识体系的构建中穿插关于科研精神、家国情怀的人物、事件实例。让学生在具体的人物事例中牢铸自己的知识体系,细碎的知识点在事件和实例的呈现下更具内涵,也使得学生的人文素养得到充分的提升。

③明确教学内容的和范围

课程都是有教学要求的,知识的讲授具有一定的内容和范围。细分知识点的考核,使课堂教学要求进一步细化,把握教学的层次,明确教学的内容和范围。通过趣味课堂、翻转课堂等形式适当地拓展和延伸,激发学生的思维和创造活力。

3.2 教研互促提升增材制造专业素养

完善高层次人才培养体系,发展以社会需求为导向、以实践能力培养为重点,将课程教学与科学实验结合起来,贯彻材料研究生培养的全过程。通过课程体系“模块化”建设与科学实验有机结合,实现课程安排和科学实验的深度融合,培养出满足社会发展急需的具有增材制造学科思维的高水平人才。

①通过教学,增加模型设计和拓扑优化能力

将建模、设计纳入教学,打破传统教学的僵化模式,加强必要和薄弱环节的培养,改革研究生课程教学内容和考察形式。课堂教学应该为日后的科学研究做铺垫,根据专业方向的细分和个人兴趣的选择,将传统课堂教学的大班改建为学科小组,进行系统化、精细化的课程设计。通过将建模、设计纳入教学,研究生能在课堂上接触到的增材制造技术理论体系涉及到的方方面面。

②参加实践,提升增材制造科学实验水平

以研究生课题组或学科小组为单位,对科学实验的具体任务进行制定、举办、总结、归纳。在实验过程中培养研究生的分析能力,通过总结科学实验中涉及相关学科的知识体系和方法,从而提升整体的基础理论水平。并通过理论指导实践,将专业知识吸收和运用达到融会贯通,使创新思维和实践水平得到有效提升。

③举办学术汇报, 擦出增材制造思维火花

科研团队的学术汇报是关于当前增材制造技术研究、发展最新进展的交流讨论平台, 是对团队成果的阶段性总结、汇报、讨论、调整、完善的过程。研究生通过参与学术汇报能拓展其关于增材制造技术的视野, 体会到增材制造技术的蓬勃发展, 意识到发展中所面临的挑战, 接触到思维碰撞过程中的创新火花。学术汇报能促使优秀人才思想火花的碰撞, 为分析科研成果提供不同的视角, 有效的提升了研究生的专业素养。

3.3 数据驱动的材料交叉学科建设

近些年, 材料基因工程、机器学习、互联网、大数据、智能制造等新概念逐步融入到材料行业, 已不再是新兴行业的专属名词。以“数据+人工智能”为标志的数据引领模式围绕数据产生与数据处理展开, 代表了材料基因工程的核心理念与发展方向^[9]。材料基因工程是包括增材制造等先进材料研发模式的新方法、新理念和新范式, 是材料工程与信息工程的深度融合。在这一领域, 无论是其中包含的机器学习、数据挖掘, 还是高通量制备及表征, 都有许多新知识、新手段与新探索。

3.3.1 充分发挥高校的引领与支撑作用

高校具有多学科交叉、人才队伍强以及研究积累厚的优势, 是人才培养与科学研究的结合点, 能更好地与企业、科研院所合作, 发挥在该领域的引领作用。具体的实施举措可包括以下三方面: (1) 建立完善的研究课程教学体系: 例如可以借鉴美国成熟的课程体系, 在大学材料科学工程专业开设集成计算材料工程课程。还可以设置人工智能与材料结合的课程, 目前国际上这方面还没有相关的教材, 主要通过人工智能/计算机软件课程培训来完成。

(2) 建立高水平师资队伍和教学管理体系: 依托材料基因工程高水平科研中心、海外合作平台等, 打造高水平创新人才培养团队, 开展国际化的研究型学习, 培育具有国际视野的、创新能力突出的材料领域领军人才。健全教学管理体系。开展面向学科前沿和国家重大需求的科学研究。分设学位管理小组和教学督导组, 监督教育教学培养质量。(3) 构建多学科交叉、教学-科研-实践全贯通的高质量人才培养模式: 以材料基因工程国家级重大项目和科技创新为依托, 促进青年教师开展多学科交叉教学与研究工作, 强化研究生多学科知识和技能培养, 造就具备材料、计算机、人工智能等多学科领域知识与视野的高质量人才。

3.3.2 企业需引入“材料基因工程”的新思想新技术变革研发模式

企业首先要建立行业创新平台, 横向整合纵向集成, 以市场需求为导向, 以生产技术难点为突破口, 使高校的高通量计算、实验等理论研究与企业的需求紧密结合。其次, 企业要构建高通量计算、高通量实验平台, 变革传统试错的研发模式, 将“理性设计-高效实验-大数据技术”

深度融合、协同创新的新型材料研发模式引入到企业新产品新工艺的研发中, 使“材料基因工程”研究成果更好的在生产中落地实施, 显著提高新材料的研发效率, 促进新材料的应用。再次, 以企业联合实验室为实践基地, 提升青年教师和研究生在行业企业中的科研教学实践水平。突出企业在人才培养中的作用, 包括参与研究生职业规划、全程培养并提供实践岗位。践行以创新人才培养为导向的教学-科研-实践全方位深层次合作。

3.4 产学研融合对增材制造专业能力的强化

通过课堂讲授、科学研究、企业实习、社会实践等多元机制的有机融合, 全面强化学生理论基础和实践技术, 做到学有所研、研有所产、产有所学, 以学促研、以研帮产、以产带学, 产学研有机融合, 充分锻炼材料类研究生解决实际问题的能力, 提升其增材制造相关制备的使用技能, 激发其增材制造创新性思维^[17]。

3.4.1 校企联合完善增材制造培养机制

充分发挥校企合作的优势, 通过生产实习、联合科研项目等形式^[18, 19], 在增材制造技术相关公司对材料类研究生进一步培养。邀请业内工程师参与教学活动, 通过分析具体的工程实例, 阐释企业在面对工程挑战时所采取的解决策略、所依据的技术原理以及由此带来的经济效益。同时, 企业也应参与材料工程教育课程规划, 课程设置与时俱进。国内的绝大多数材料工程教育长期着眼于传统专业内容进行教学工作, 相关材料类毕业学生也大多只能从事传统的岗位, 对于企业在新时期发展的增材制造及其多学科交叉类人才需求难以满足, 因此有必要针对企业的实际需求进行增材制造以及材料基因工程等方面课程的设置及教学内容的补充, 企业也应当积极参与新设置材料工程专业课程的培养体系建设。进一步地, 采用校内导师与企业导师共同指导的形式, 形成产教协同育人模式, 以此提升学生对工程实践的理解和专业素养。

3.4.2 社会实践拓展增材制造学科视野

利用假期积极组织学生进行增材制造领域的社会实践, 通过走访、调研增材制造相关领域的国家高新区、科技园等形式, 培养材料类研究生增材制造方面的学科认知能力。高质量的社会实践能有效地激发学生的学科兴趣和创新思路, 为其在学校的科学研究提供源源不断的动力, 做到真正的产学研用、提升专业本领。

3.4.3 学科竞赛锻炼增材制造综合能力

在以“互联网+”、建模大赛为代表的一批高质量的竞赛平台上, 学生能够培养创新型学科思维, 提升增材制造专业素养和综合能力^[20]。通过鼓励材料类研究生报名参赛, 提升参与的积极性和广泛性, 完善增材制造思维的培养。

4 实践教学的实施及效果

在探索和实践产学研融合培养具有增材制造思维的材料类研究生过程中, 始终动态调整和更新培养方案, 基

于增材制造学科特点,通过优化课堂教学模式和深度参与科研项目,着力提升研究生的创新思维和实践技能,全面增强其学科素养和综合能力。依托于中南大学粉末冶金国家重点实验室以及增材制造研究中心,以及与广州塞隆、湖南华曙、湖南华翔等公司共建增材制造人才培育基地,通过集中学院内增材制造研究方向的教学资源,从而有效集中力量发展科研,培养增材制造创新人才。

在实践教学实施过程中,通过全面调研,了解现状,梳理问题,拟定项目具体任务,完成顶层设计以及全面动员,学生积极开展假期“读书月”活动,并以PPT汇报形式展示学习体会。通过组织学生走访长沙地区高新企业,了解其生产现状与经营模式,并启发学生了解企业生产运营过程所需的专业知识和技能及在其各个环节发挥的作用。近三年以来,指导的研究生在“挑战杯”、《质云三维-金属3D打印全球领航者》“升华杯”大学生创业计划竞赛、“互联网+”大学生创新创业全国总决赛以及科创中国创新创业投资大会等高水平比赛中获得省部级以上奖励2次,并获得金/银奖5次,相关教学教研成果荣获省部级教学成果奖2次。在高水平学科竞赛的历练中,能使材料类研究生成长为德才兼备的高水平人才,在相关行业领域焕发光彩,书写中国智造的华章。

然而,培养具有增材制造思维材料类研究生的道路任重而道远。在以科研为主导,竞赛、项目为辅的校企联合培养模式下,如何进行合理的资源分配使得学生真正做到学有所研、研有所产、产有所学是我们将要解决的关键问题。此外,抓住研究生培养过程中的主要矛盾,需要更加深入增材制造产业,充分了解增材制造产业对人才的需求,才能使材料类研究生真正做到以学促研、以研帮产、以产带学,才能使其真正成长为具有学科创新性思维的高水平、高素质人才,用人单位才会对本专业学生的工程素养给予充分的肯定。

基金项目:2022年湖南省普通高等学校教学改革研究项目“产学研融合培养具有增材制造思维材料类研究生的探索与实践”(2022CG011)。

[参考文献]

- [1]魏青松,史玉升.增材制造技术原理及应用[M].北京:科学出版社,2017.
- [2]卢秉恒.增材制造技术-现状与未来[J].中国机械工程,2020(1):19-23.
- [3]徐艳茹,刘继安,包云岗.产学研融合如何提升科研影响力?[J].清华大学教育研究,2023(2).
- [4]陈瑜,黄林冲,伍浩良,等.基于产学研融合的隧道工程课程实践教学探索[J].中国现代教育装备,2024(19):152-154.
- [5]刘彦军,张王珂,王孝武.应用型高校教师产教融合能

力的形成与提升机制[J].高等工程教育研究,2024(1):104-110.

[6]翟瑶.“双一流”建设背景下高校产学研融合发展新路径[J].江苏高教,2024(7):48-54.

[7]雷朝滋,刘怡.加快高校科技成果转化推动企业主导的产学研深度融合[J].中国高教研究,2024(9).

[8]彭程,刘松利,戴甲洪,等.多学科交叉复合的新工科专业建设探索与实践——以增材制造专业建设为例[J].教育现代化,2020(3):84-86.

[9]汪洪,项晓东,张澜庭.数据+人工智能是材料基因工程的核心[J].科技导报,2018(14):15-21.

[10]林伟坚,张博文,汪卫华.从全球气候变化、制造业产业升级、国家安全及材料基因工程维度探讨材料科学发展趋势[J].中国科学院院刊,2022(3):336-342.

[11]徐玲琳,蒋正武,杨晓杰,等.新时代基于人工智能赋能材料学院“本研贯通”人才培养体系建设[J].教育科学,2024(3):1-3.

[12]左世全.中国战略性新兴产业研究与发展:增材制造[M].北京:机械工业出版社,2021.

[13]邓庆田,李新波,商泽进.基于增材制造技术的力学专业人才实验能力提升探索[J].力学与实践,2024(3):649-655.

[14]李鹏飞,银锐明,蹇海根,等.面向增材制造产业材料研发与制造人才培养的探索与实践[J].工业和信息化教育,2024(6):11-14.

[15]杨勇,江京亮,孙瑞,等.“产教融合,科教融汇”背景下专业学位研究生教学案例库建设与实践[J].Creative Education Studies,2024(2):286.

[16]李方正,周岩.我国增材制造产业发展人才瓶颈探究及建议[J].工业技术创新,2020(4):34-40.

[17]陈霞玲,张虎.产学研合作推动学术发展的实践研究——以清华大学为例[J].中国高校科技,2020(4):7-10.

[18]李瑞迪,王悦婷,袁铁锤,等.新工科背景下粉体材料专业创新创业教育的若干思考[J].科教导刊,2023(3):27-30.

[19]温贻芳,沈中彦.产教融合视角下高职院校科教融汇的理论逻辑,应然策略与实践探索[J].高等工程教育研究,2024(2):139-144.

[20]魏青松,李继康,闫春泽,等.“新工科”下3D打印前沿学科三位一体多维度教学模式研究[J].实验技术与管理,2020(9):5.

作者简介:陈超,中南大学粉末冶金研究院功能材料研究所副所长,教授及博士生导师;潘鹏,中南大学粉末冶金研究院,博士生;邓轩,中南大学粉末冶金研究院,博士生。