

# 3D 打印技术在矿山工程中的应用进展与展望

罗雨婷 薛创 李德星 马蓉

安徽理工大学 安全科学与工程学院 安徽淮南 232000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20149

[摘要] 随着矿山智能化建设的推进,传统制造与维修模式面临周期长、成本高、非标件难采购等痛点。3D打印技术凭借其“无模成型、定制化、修复快”的优势,为矿山工程提供了创新解决方案。本文重点分析了FDM、LMD及3DP等工艺在矿山复杂环境下的适配性,系统梳理了3D打印在矿山勘探建模、开采支护、运维修复及生态治理场景的应用现状,并探讨了专用材料改性及标准化建设面临的挑战。研究表明,3D打印技术正从单一模型展示向“材料-工艺-场景”一体化工程应用跨越。然而,受限于井下环境适应性与全流程标准体系缺失,3D打印技术在矿山领域的规模化推广仍面临挑战,未来需融合人工智能与数字孪生等前沿技术,构建一体化协同应用生态,助力矿山绿色智能化发展。

[关键词] 3D打印; 矿山工程; 技术演进; 智能化应用

## 引言

当前,全球矿业正加速向智能化、绿色化、高效化转型。矿山作业环境恶劣,设备大型化且工况复杂,导致非标准化零部件多、易损部件更换频繁、库存压力大。一旦关键设备损坏或急需非标备件,传统机加工或外购周期长达数周至数月,严重影响生产效率。

3D打印(Three-Dimensional Printing),作为增材制造(Additive Manufacturing, AM)的核心实现形式,突破传统减材制造局限,通过逐层堆积材料的方式制造实体零件,具有设计自由度高、生产周期短、材料利用率高等显著优势。近年来,随着金属打印与复合材料技术的成熟,3D打印正从早期的原型设计向直接制造和现场修复延伸。

本文旨在探讨3D打印技术在矿山“勘探-开采-运维-治理”全生命周期中的应用,分析不同工艺的适配性,探讨其在降低备件成本、提升运维效率、支撑智能矿山建设中的潜力,旨在为矿山增材制造的工程应用与发展方向提供参考。

## 1、3D打印技术在矿山领域的适配性分析

矿山作业环境具有高湿、高粉尘、强冲击以及工况复杂多变的显著特征,且面临非标件多、供应链长、生态压力大等系统性挑战,传统的“通用型”3D打印技术选型难以完全满足矿山工程的特殊需求。基于此,本文构建了以下“痛点-技术-场景”适配性分析表,以明确不同技术路径在矿山工程中的应用定位与价值。

表1 适用于矿山领域的3D打印技术

Table 1 3D Printing Technology for the Mining Industry

矿山工程核心痛点	具体表现与需求	适配的3D打印技术	技术解决路径与优势	对应应用场景
供应链冗长	备件非标、进口依赖、采购周期长	LMD(激光金属沉积) SLM(选择性激光熔化)	快速制造与修复:无需模具,现场或就近制造非标件;修复磨损部件	设备运维、应急备件、齿辊修复
安全风险突出	地质结构复杂,缺乏实时监测手段	SLA(立体光固化成型) SLM(选择性激光熔化)	高保真模拟与智能支护:打印透明、类岩石模型进行应力试验;制造带传感器的智能锚杆	地质勘探、岩体监测、巷道支护
绿色开采需求	尾矿堆积、环境污染、资源利用率低,需低碳化开采	3DP(三维打印)	固废资源化:利用尾矿打印砂型或建材;低成本制作生态修复模型	尾矿利用、绿色建材、生态治理
智能化水平低	数据孤岛,需统一平台集成	FDM(熔融沉积建模)	智能装备快速迭代:快速制造智能传感器外壳、巡检机器人结构件,加速智能装备落地	智能装备的研发、原型制造与迭代优化

## 2、国内外研究现状

3D 打印技术已成为矿山工程领域实现工艺智能化、试验精准化的重要技术手段，国内外学者及研究机构围绕该技术

在矿山领域的应用展开了大量研究。但受矿山工程需求、技术发展基础等因素影响，二者在应用阶段、技术路线及研究侧重点等方面形成了差异化发展特征，如表 2 所示。

表2 3D打印技术在矿山领域的国内外研究对比

Table 2 Domestic and International Research Comparison of 3D Printing Technology in Mining

对比维度	发展阶段	技术路线	侧重点	典型技术成果
国外研究现状	起步早，整体处于技术研发与现场试点融合推进阶段	偏向材料改性-工艺优化-工程场景落地的全链条研发，注重技术的工程化落地与产业化布局	矿山固废资源化高值利用与设备修复的工艺创新，金属部件打印的现场工程试点	研发矿山废料适配的GeoBJT喷射打印技术，搭配集装箱式移动装备实现现场加工；完成矿山金属机械零件井下现场打印与工况性能全流程测试
国内研究现状	起步相对较晚，呈快速发展态势，整体处于技术攻关与实验室验证为主的阶段	以工程问题为导向，走需求-适配-优化的研发路径，紧扣行业痛点开展针对性技术攻关	矿山专用打印材料研发，复杂地质条件下的岩体力学模拟与精准试验，矿山灾害防控相关的打印技术研发	研发适配煤岩腐蚀等特殊环境的专用打印材料；探明复杂地质下岩体力学规律并完成精准试验建模；开发出井下灾害防控的相关打印技术

整体而言，3D 打印技术在矿山领域的国内外研究均处于快速发展期，国外的工程化试点经验与产业化模式可为国内提供参考，而国内针对我国矿山地质条件的定制化研究成果也为全球矿山工程提供了中国方案。值得注意的是，目前国内外尚未形成覆盖材料选型、工艺参数、设备标准、工程验收等全流程的行业通用标准，各研究团队与机构多依据自身研究条件和试验需求制定技术指标，导致不同研究成果的可比性、兼容性较差，这成为制约 3D 打印技术在矿山领域规模化、标准化推广应用的重要因素。

### 3、3D打印技术在矿山全生命周期的应用场景

3D 打印技术在矿山工程领域的应用正实现从早期单一的局部地质模型构建，向贯穿矿山“勘探设计-开采支护-运维修复-生态治理”全生命周期的系统性工程应用跨越。

#### 3.1 勘探设计

在勘探与设计环节，3D 打印技术早期应用于地质信息的直观呈现。如杨礼朋等<sup>[1]</sup>融合三维可视化数据制作高精度矿山实体模型，通过几何形态的精准复刻实现矿区场景的直观还原，服务于生产规划与管理决策。在突破静态几何呈现的基础上，当前研究聚焦于赋予 3D 打印模型力学感知能力，实现岩体在真实应力环境下力学响应与变形演化的高保真复现。如杨菊等<sup>[2]</sup>利用 3D 打印制备透明隧道模型，结合数字光弹性技术实现围岩全场应力与塑性区定量表征，建立了地下隧道破坏机制的可视化分析方法，显著提升了复杂地质条件下工程设计的可靠性。

#### 3.2 开采支护

在开采与支护环节，3D 打印技术的应用范畴已实现从实验室物理模拟向井下实体工程构筑的跨越。张自浩<sup>[3]</sup>针对煤矿井下火区密闭构筑的行业痛点，研发了混凝土 3D 打印智能密闭墙构建系统，显著提升灾害防控工程的施工效率与结构可靠性；云伟等<sup>[4]</sup>则聚焦于材料服役性能，通过模拟矿井水腐蚀环境，揭示了不同材质 3D 打印锚杆的腐蚀规律，为腐蚀环境下支护结构的设计与稳定性评价提供了关键理论依据；张秋菊等创新性地将分布式光纤传感技术与 3D 打印混凝土工艺相融合，构建了温度敏感混凝土系统，通过立方体试件实验与数值模拟验证，该系统对内部温度场的监测精度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内，模拟与实验数据差异小于 5%，为解决传统检测手段难以定位温度诱导裂纹起始位置与拓展路径的难题提供了新型技术路径。

#### 3.3 运维修复

在运维与修复环节，3D 打印技术正逐步从实验室探索走向工程化应用，展现出显著的技术优势与经济价值。Fraunhofer 与合作伙伴开展 AI-SLAM 项目，创新性地将人工智能与激光材料沉积金属 3D 打印工艺结合，开发出具备自适应控制能力的修复系统，可自动检测矿山磨损部件修复中的几何偏差并优化工艺参数，解决采矿设备修复中层厚适配的人工调试难题，提升了 3D 打印修复的自动化与效率。石建国进一步从应用层面系统梳理了 3D 打印在露天采矿设备维修中的实施路径，深入剖析了其技术原理与关键工艺流程，并结合实际案例验证该技术在零部件快速修复中的适用性，验证了 3D 打印作为一项高效、灵活且经济可行的运维支撑技

术,在复杂工况矿山装备修复中具备广阔的应用前景。

#### 3.4 生态治理

在生态修复环节,3D打印技术应用正呈现出从材料重构、工程优化到功能拓展的多元化技术路径并行发展的态势。Aranibar主张通过地质聚合反应将矿山尾矿应用于3D打印,以固废消纳与碳减排为核心目标,其路径偏向材料本体的重构,为矿山固废高值化利用与绿色建材开发提供了新思路;相比之下,刘雄飞等<sup>[1]</sup>则聚焦工程性能的提升,采用100%隧道渣替代细骨料,显著改善了打印材料的可打印性、力学性能及界面结合力,并实现孔隙率降低41.30%,体现出以工程适用性为导向的技术优化逻辑。

### 4、关键材料与工艺的核心机理

#### 4.1 材料体系的重构与性能跃迁

矿山3D打印材料的技术演进,呈现出从通用工业材料向矿山固废基复合材料重构的显著趋势,实现了材料属性从“单一成型”向“多性能协同”的跨越。在材料本体重构方面,通过引入地质聚合反应机理,利用碱激发剂调控硅铝比,成功将矿山尾矿、隧道渣等低活性固废转化为具备类岩石力学性能的绿色建材,解决了传统材料在矿山环境中耐久性差的痛点。在流变性能调控方面,蒋力帅创新性地采用了颗粒级配优化与纤维增强技术,通过超细粉体填充与微观结构设计,显著提升了打印材料的触变性与致密度。此外,针对特定功能需求,通过分子结构设计(如接枝特定官能团)实现了材料表面能的改性,赋予了打印构件选择性吸附稀土元素等特殊功能,完成了从“被动消纳固废”到“主动提取资源”的材料技术革命。

#### 4.2 工艺控制的智能化与场景适配

工艺技术的突破主要体现在从通用成型向“智能感知-功能定制”的多元化适配转变。在控制逻辑层面,深度融合人工智能与机器视觉技术,实现了从“人工示教”到“机器自感知”的跨越。在成型方式层面,针对矿山大型化与功能化的需求,突破了传统单一工艺的限制,Demir Engineering采用粘结剂喷射技术研发大型砂3D打印机,省去传统制模的繁琐工序,降低设备停机带来的生产损失,同时借助数字化设计进一步提升了矿山铸造工艺的整体效率。这种工艺层面的创新不仅实现了从“实验室小试样”到“矿山大型装备”的尺寸跨越,更通过数字化设计与直接制造的结合,显著缩短了非标备件的供应链周期,为矿山应急响应提供了强有力的技术支撑。

### 5、结论与展望

3D打印技术凭借其快速成型、高度定制和柔性制造优势,在矿山机械修复、非标部件制备及固废资源化利用中展现出良好应用前景。其在缩短备件周期、提升设备维护效率、实现复杂结构一体化成型方面优势显著,为矿山智能化与绿色转型提供有力支撑。

然而,技术推广仍面临突出挑战。首先是标准体系缺失,ISO/ASTM通用标准难以覆盖矿山防爆、阻燃、高耐磨等特殊需求,设备与材料参数不统一,导致打印质量不稳定,缺乏统一验收依据。其次是装备环境适应性差,多数金属打印设备体积大、依赖洁净恒温环境,难以满足井下潮湿、粉尘多、空间受限的工况。最后是成本与人才双重制约,设备与金属粉末投入高,同时矿山企业普遍缺乏掌握建模、切片及后处理技术的专业人才,严重制约技术落地。

未来,3D打印技术在矿山领域的应用将向标准化、场景化与智能化发展。行业将加快制定矿山专用增材制造标准,推动材料与工艺规范化;设备将向模块化、防爆型、小型化演进,提升井下适配能力;通过结合AI与数字孪生技术,实现打印过程智能控制,降低人工依赖,推动3D打印技术在矿山领域的规模化、产业化应用,使其成为助力矿山产业转型升级、实现绿色高效智能开采的关键技术支撑。

#### [参考文献]

[1]杨礼朋,郭琪璇,张迪. 3D打印技术在矿山三维实体建模中的应用研究[J]. 山西煤炭, 2022, 42(04):95-100.

[2]Ju Y, Xing D, Ren Z, et al. Experimental characterization of full-field stress, plastic zones, and failure mechanisms of subsurface tunnels using 3D printed transparent models[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 181109979-109979.

[3]张自浩. 混凝土3D打印在煤矿井下密闭构筑中的实验研究[D]. 华北科技学院, 2025.

[4]云伟,田威,王文奎,等. 基于金属粉末的3D打印锚杆在模拟矿井水中腐蚀试验[J]. 工程科学学报, 2025, 47(07):1409-1422.

作者简介: 罗雨婷(2005-)女,安徽理工大学,本科,矿山工程。

基金资助:安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202510361008)。