

砂型 3D 打印技术在铸造中应用现状及展望

李明波

(山东济钢泰航合金有限公司, 山东济南 250101)

摘要: 砂型3D打印技术通过数字化无模成形显著提升了复杂铸件的制造能力和生产灵活性。本文系统梳理了该技术的核心原理、应用领域及与传统砂型铸造的对比,重点分析其在复杂结构制造、定制化生产及协同研发中的技术优势。研究表明,砂型3D打印可将砂型制造的周期缩短70%,材料利用率90%以上,但设备投资成本(超300万元/台)与标准化缺失仍是产业化发展的瓶颈。与传统铸造工艺相比,其无模化铸造的特性降低了小批量生产成本达70%,但大批量生产经济性尚未突破。未来需通过智能化算法优化、国产低成本设备研发及产业链协同等,推动3D打印技术从“创新示范”向“规模化应用”跨越,为铸造行业的高端化、绿色化升级提供核心支撑。

关键词: 砂型3D打印; 粘结剂喷射; 无模化铸造; 数字化铸造; 航空航天

全球制造业面临碳中和目标和工业4.0的双重挑战,高端化、智能化和环保化是传统制造业转型升级的主要方向。铸造作为机械制造的基础环节,存在能耗高、污染大的问题^[1]。国际铸造协会(IFA)数据显示,传统砂型铸造的碳排放占机械制造业总排放的23%以上,废砂回收率不到35%,每年全球废砂堆积超过2亿吨。同时,产品迭代速度加快和定制化需求的激增,传统铸造工艺中模具制作时间长(占生产周期的30%~50%)、工艺柔性不足等问题更加明显,在一定程度上限制了铸造业发展。

在此背景下,基于粘结剂喷射成形的砂型增材制造技术,展现出了核心优势。通过无模化快速成形(缩短周期时间 $\geq 70%$)、数字化驱动的工艺链集成,以及材料利用率90%以上的低碳生产模式,有效解决了铸造业“高碳锁定”与“柔性不足”的困境。然而,高昂的设备投资、工艺稳定性不足及产业链协同缺失等问题,严重制约了该技术的规模化应用。因此,通过对比砂型3D打印与传统铸造的工艺流程、材料成本及技术指标,并结合典型产业案例分析,提出未来的发展路径,对提升铸造业的生产效率和质量具有重要意义。

1 砂型3D打印技术概述

3D砂型打印技术是一种基于粘结剂喷射成形(Binder Jetting Fabrication, BJJ)的砂型增材制造技术,直接从数字模型创建砂型模具。传统铸造工序节点从7个直降为5个(图1),颠覆了“设计-制模-造型-浇注”的多工序流程。该技术的关键流程见图2。

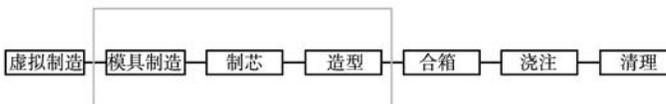


图1 砂型3D打印技术减少的工序

Fig. 1 Streamlined processes through sand mold 3D printing

作者简介:

李明波(1980-),男,高级工程师,主要研究方向为铸造工艺设计及设备研发。E-mail: 496122422@qq.com

中图分类号: TP391.73

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)10-1411-06

收稿日期:

2025-03-31 收到初稿,
2025-04-16 收到修订稿。

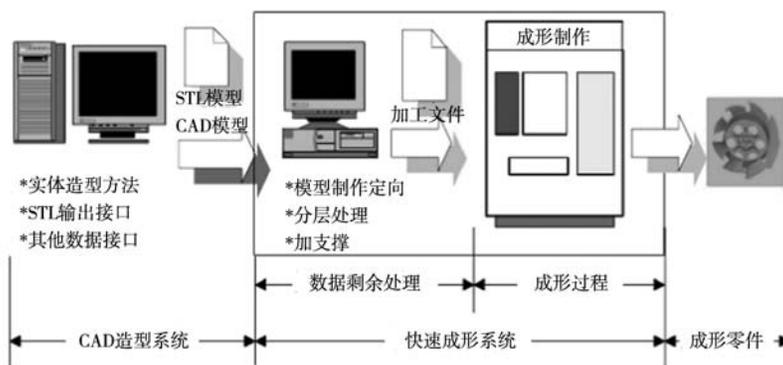


图2 砂型3D打印的关键步骤

Fig. 2 Key steps of the sand mold 3D printing

1.1 三维模型设计

使用专业的三维建模软件设计出铸件的三维模型，并留出余量；重点优化传统工艺难以实现的复杂特征，如薄壁结构、内腔流道与空腔等。

1.2 砂型分型设计

基于铸件的几何形状、浇注工艺、砂型模具设计和浇注系统设置，进行分型设计，将模型拆分成符合要求的模块化砂芯和砂型，让其能够一次成形，降低后期模芯拼装劳动强度，提高铸造效率。

1.3 切片处理

把零件的三维模型转换成分层切片文件，并生成每层的平面形状和尺寸数据。通常每层的厚度设置为0.2~0.5 mm，以确保砂型表面粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu\text{m}$ 。

1.4 工艺仿真优化

使用Magma或ProCAST软件模拟金属液充型与凝固过程，调整浇口大小和冒口位置。例如，铸造汽缸盖，在顶部比较厚的部位采用发热冒口，用以补缩^[2]；并在燃烧室面做好冷铁设置，用以加快铸件局部冷却速度，提升铸件的内部质量、尺寸精度和力学性能。重点优化浇注系统参数：内浇道截面积误差控制 $\pm 5\%$ 、冒口热节消除率 $>90\%$ 、充型速度波动范围 $<15\%$ ，实现铸造缺陷预测准确率 $\geq 85\%$ 。

1.5 砂型打印成形

将设计的三维模型数据导入3D打印机，并在打印设备的料仓中装入打印材料（砂子和粘合剂）。设定相关参数（如层高、填充率等），在计算机的控制下，喷头精准喷出粘合剂粘住砂粒。每做完一层，3D打印设备的工作台下降一定高度，继续打印下一层，直到整个砂型打印完成。

1.6 后处理

砂型打印完成后，对铸型进行后处理：将中间未固化的散砂（即支撑结构）清理干净，得到所需的铸型，并打磨表面^[3]，提高精度和表面质量。必要时对砂型做热处理或表面涂层处理，即可用于浇注金属。

2 砂型3D打印技术在铸造领域的技术优势

2.1 设计自由

复杂结构的成形：传统砂型铸造必须“迁就”工艺，难以制作内部空腔、弯曲通道等复杂形状。例如，发动机缸体的冷却流道往往被简化成直线，影响散热效率。而砂型3D打印铸造可根据数字模型直接打印镂空砂型的轻量化结构^[4]，且强度不变，满足复杂结构件的浇注生产。

个性化定制：针对一些小批量、定制化的铸件生产需求，砂型3D打印铸造具有独特优势：可以根据客户的要求快速设计并打印对应砂型，避免传统模具制造中的开模、修模等繁琐流程，满足不同客户的个性化需求。

2.2 缩短生产周期

简化模具制造：传统砂型铸造需先制作模具，再利用模具制造砂型。模具的设计、制造和调试过程往往耗费大量时间和人力。砂型3D打印技术可以将产品的CAD设计文件直接转化为砂模，快速、精准地制造出符合设计要求的复杂结构零部件，缩短生产周期。

快速迭代和修改：在产品研发设计阶段，若发现铸件设计需要修改，传统砂型铸造需要重新制作模具，成本高且时间长；砂型3D打印铸造只需在计算机上修改数字模型后重新打印砂型即可，快速实现设计迭代修改，加速产品研发。

2.3 提高精度和质量

尺寸精度高：3D打印技术可以实现型芯一体化的设计，显著减少型芯装配的数量，降低了因装配操作产生的尺寸误差，提升了铸件成形精度^[5]。打印的砂型表面光滑，提高了铸件的表面质量，减少了后续加工量。

内部质量好：3D打印砂型可实现砂型均匀密实，避免传统砂型铸造出现的局部疏松、夹砂等缺陷，提高铸件内部质量。同时，通过精确控制，优化铸件凝固过程，减少缩孔、缩松等缺陷。

2.4 成本效益

材料利用率高：相比传统的砂型制造过程，3D打印砂型铸造是按需打印，仅使用所需材料，减少废料产生。此外，在打印过程中可根据砂型结构和强度要求精确控制材料分布，进一步提高材料利用率。

降低人工成本：传统铸造依赖人工操作（如制模、修型），成本高。砂型3D打印铸造实现自动化生产，降低人工成本，减少操作误差，提高生产稳定性和一致性。

2.5 绿色环保

减少废弃物排放：传统砂型铸造在模具制造和砂型处理过程中会产生大量废弃物，如废弃的模具材料和废砂等，对环境造成污染。砂型3D打印铸造产生的废弃物较少，剩余材料可回收再利用，符合绿色环保要求。

改善生产环境：砂型3D打印铸造不需要使用大量化学试剂和粘结剂，减少了对环境的污染和操作人员健康的危害。同时，自动化的生产方式也减少了粉尘和噪音的产生，改善了生产环境。

3 砂型3D打印在铸造中的应用现状

3.1 制造复杂结构的零部件

砂型3D打印技术不仅能够直接打印复杂砂型和型芯，无需模具，还可以提升设计自由度，优化铸造工艺设计，提高铸件的成形质量和性能。

传统铸造制造方法难以实现复杂结构的零部件制造，而砂型3D打印技术可以将产品的CAD设计文件直接转化为砂型，通过堆积多层的砂粉和粘合剂，实现快速、精准地制造出符合设计要求的复杂结构零部件，满足装备轻量化、绿色化及智能化的发展需求。例如，6G通讯卫星的支架^[6]、蒙皮点阵结构板、无人机外壳和涡轮叶片，这些铸件需要轻质、高强度和耐极端条件。

3.2 定制化与快速响应生产

砂型3D打印无需模具，支持小批量、定制化生产，尤其适用于新兴市场需求，可以根据客户需求灵活地制造产品，能够生产出个性化的铝合金铸件。对于一些需要灵活设计和生产铝合金铸件的行业，如医疗器械、消费品等，砂型3D打印技术具有明显优势，能够快速满足市场多样化定制需求，提高产品的市场竞争力，降低生产成本和库存压力。例如，采用3D打印砂芯+传统手工造型工艺+重力浇注的方式生产的导弹外壳、舰炮炮台；3D打印砂芯+钢模+低压浇注工艺”生产GIS电力组合开关等^[7-8]。

3.3 材料与工艺协同研发

砂型3D打印技术可以与新产品研发相结合，探索铝合金材料的新用途和新性能；通过3D打印出特殊结构和成分的砂型，用于研究铝合金材料的性能和结构特性；通过多材料复合砂型和淀粉改性生物基粘结剂研发，及功能集成创新（即同一零部件实现多个零件、多种功能的集成），为新铝合金件的研发提供有力支持。例如，发动机缸盖的铸造使用3D打印优化设计，研发时间从28天缩短至9天，材料利用率从67%提升至92%，表面粗糙度Ra值从12.5 μm降低至6.3 μm^[9]。

3.4 砂型快速制造与传统工艺革新

砂型3D打印技术可以快速地制备出复杂形状的铝合金铸造砂型，无需经历模型设计、制作以及模框压印等繁琐步骤，有效节约了时间、成本和资源，并提高零部件的质量和性能。相比传统铸造工艺，砂型3D打印实现了“五无”生产（无模具、无吊车、无重体力、无废尘、无温差），提升效率和推动绿色铸造转型。

4 砂型3D打印与传统铸造的对比分析

从技术流程、生产周期、设计自由度和打印材料等方面对3D打印铸造与传统砂型铸造的对比分析，详见表1。

5 砂型3D打印在铸造领域的技术挑战与瓶颈

5.1 技术挑战

打印精度与表面质量：砂型打印的精度和表面光洁度直接影响铸件质量，砂型打印层厚通常为200~500 μm，与传统铸造工艺相比仍有差距，特别是采用钢模，表面不够光滑，影响铸件质量。

表1 砂型3D打印与传统铸造的对比分析
Tab. 1 Comparative analysis of the sand mold 3D printing and traditional casting

对比维度	传统砂型铸造	3D打印铸造	成本对比
技术流程	依赖模具制造砂型（木模/金属模），流程复杂：模具设计→模具→制芯→造型→浇注→后处理	无模具直接成形，流程简化：CAD设计→打印砂型→浇注→后处理	模具成本节省：某汽车零部件项目省去50万元模具费用（传统模具成本占比30%~50%）
生产周期	模具制作周期6~8周，小批量订单经济性差	无需模具，打印周期缩短至3~5天（复杂件≤7天）	时间成本降低：某转向器研发周期缩短70%，节约试制成本约12万元/次
设计自由度	受限于分型线和起模斜度，无法制造复杂空腔、薄壁结构	一体化成形，支持随形冷却通道、非均匀分模线等创新设计	设计优化成本：某电机壳体避免了50个模块组装，减少返工成本约8万元
打印材料	以天然石英砂为主，辅以黏土（如膨润土）或者树脂、水玻璃等作为粘结剂	砂型材料主要是覆膜砂、陶瓷砂和石英砂等；粘结剂为呋喃树脂、酚醛树脂或环保型无机粘结剂（如硅酸盐） ^[10]	小批量订单成本降低（试制成本降70%）打印成本1.5~1.6元/公斤，手工造型0.7~0.8元/公斤
材料利用率	砂铁比3:1，废砂处理成本高（约200元/吨）	砂铁比优化至1.5:1，废砂回收率>90%（回收成本降低60%）	材料成本节约：某耐磨件项目材料成本下降30%，年节省废砂处理费15万元
性能指标	传统铸造精度±1.0 mm；能源指标550~700 kg标准煤/吨	3D打印铸造精度±0.3 mm；能源指标300~400 kg标准煤/吨	降低30%~50%的后处理成本；综合节能20%~40%
设备投资	模具加工设备（数控机床等）投资约50~100万元	工业级砂型打印机（如VX2000）设备成本300~1 000万元，但单件边际成本低	初期投入对比：3D打印设备投资高3~6倍，但小批量订单回本周期可缩短至2年（传统需5年）
环保成本	粉尘污染治理费用约10万元/年，废砂填埋成本8万元/年	封闭式生产减少粉尘排放，无机粘结剂技术降低VOCs处理成本60% ^[11]	环保成本差异：某企业年环保支出从18万元降至6万元，符合碳税减免政策
典型案例	汽车发动机缸体：金属模成本50万元，修改需2个月；航空钛合金件：传统锻造材料利用率仅10%	宝马发动机缸体：非对称浇注系统减重15%，研发成本降低40%；航空主承力构件：材料利用率提升至90%，周期缩短83%	综合成本效益：某3D打印项目单件成本降低52%，全生命周期成本节约超200万元（5年周期）

材料性能匹配：砂型打印材料（如硅砂、粘土粒砂）必须严格匹配打印要求，须具有良好的流动性、粘结性和热稳定性。不同材料性能差异大，若选用不当，可能造成砂型强度不足或透气性差，导致铸件质量下降。

支撑与后处理困难：3D打印能制造复杂砂型，但薄壁、悬空结构需额外支撑材料，清砂和打磨步骤增加成本。

5.2 材料挑战

材料成本高：3D打印专用砂（如覆膜砂）价格高，进口材料达每吨2 000元。虽然国产化材料已逐步推广，但成本仍高于传统砂。

回收难度大：未使用的砂粉和废砂需回收处理，虽热法再生可降低成本，但热法再生设备昂贵（如280万元的热法再生设备），且工艺复杂（破碎、磁选、焙烧），技术门槛高。再生砂的性能（如角型系数、强度）需严格匹配打印要求，以免影响砂型强度和铸件质量。

材料多样性不足：现有砂型打印材料种类有限，难以满足高温合金、铝合金等不同铸件的多样化需求。

5.3 成本挑战

设备价格高：工业级砂型3D打印机单台成本超百万元，且需要配套智能工厂^[12]，推高了初期投资。

运营维护成本高：设备需专业维护（如更换喷嘴、校准激光器），部分工艺（如焙烧）能耗高。模型设计、清理砂型等人工成本占总成本一半以上，增加了应用成本与难度。

规模化生产的经济性瓶颈：3D砂型打印在小批量定制化场景优势明显，但大规模生产时，传统铸造效率和成本更有优势。且大型铸件受到设备成形尺寸的限制，需分段打印，成本提升。

5.4 工艺挑战

参数控制难：砂型打印需精确控制粘结剂用量、层厚和固化时间，以免造成砂型强度不足、发气量过

高，增加废品率。例如，粘结剂多1%就开裂，层厚差0.05 mm就变形。新手调试报废率超50%。工艺稳定性：材料批次差异、环境温湿度变化可能影响打印质量，导致工艺稳定性不足。

后处理复杂性：打印后的砂型需清粉、固化和组装，自动化程度低，增加时间和人工成本。例如，每打印一箱需要10 h，清理砂粉仍需8 h，且组装误差超0.5 mm就要整批报废。

5.5 市场与行业挑战

市场接受度低：传统铸造行业对3D砂型打印技术认知不足，中小企业对高成本和复杂性持观望态度。

标准化与认证不足：3D打印砂型的质量标准和认证体系不完善，影响其在航空航天、新能源汽车等领域的应用。

产业链协同不足：3D打印技术涉及材料、设备和软件等诸多环节，产业链各环节协同性差，铸造数字化人才不足，制约该技术的快速落地。

5.6 环保与可持续发展挑战

废砂处理难：未使用的砂粉和废砂需回收处理。热法再生环保设备昂贵，中小企业负担困难。

部分工艺（如焙烧、激光烧结）能耗高，与绿色制造理念不一致。

材料可持续性：现有使用的砂型材料（如硅砂）资源有限，需开发更环保可持续的替代材料。

6 未来的发展趋势和创新路径

3D砂型打印+铸造技术作为增材制造与传统铸造工艺的结合，近年来在制造业中展现出巨大潜力。

6.1 材料多样化与环保化

材料创新：正在开发的陶粒砂、覆膜砂等多材质复合型砂^[13]，能适应飞机铸件用钛合金、汽车铸件用铝合金等不同金属铸造需求。比如飞机涡轮叶片现在需要特制砂料，耐温要比普通砂高300℃。

环保材料：新规要求铸造厂废水废气排放减少30%，从而推动砂厂研发可降解粘结剂。例如，某企业最新推出的植物基粘结剂，焚烧后碳排放降低60%。

6.2 设备智能化与高效化

多激光头提速与绿光技术：新型打印机装4个激光头，24 h能打2 t砂型，比老机型快3倍。绿光技术专治铜、银等反光金属，成功打印出0.2 mm薄的散热片。设备国产化：国内厂家自研的砂型打印机价格降低一半，耗电量降40%。

6.3 智能化与规模化应用

工艺智能化：通过AI智能算法优化打印参数（如粘结剂分布和温度控制），构建铸造工艺-缺陷-材料知识图谱，提升打印精度和稳定性。AI智能技术还将渗透到设备运行、材料研发和工艺监控等环节，实现全自动过程优化。

规模化生产：3D砂型打印正在从原型制造向规模化生产过渡。例如，宝马和通用汽车已采用砂型3D打印技术实现了发动机零部件的大规模生产，大大缩短了生产周期。

6.4 产业链协同与标准化

产业链完善：3D打印产业链包括上游材料、中游设备及服务、下游应用领域。国内企业正突破对金属粉末、激光器等核心材料的进口依赖，推动国产替代。

标准化建设：随着行业规模的扩大，砂型3D打印的标准化与认证体系将逐步完善，推动其在高端领域的广泛应用。

6.5 低成本与市场普及

降本增效：通过材料再生技术（如闭环再生砂系统）和设备国产化，砂型3D打印的成本将逐步接近传统铸造，推动其在中小企业的普及。

消费级应用：砂型3D打印技术正从工业领域向消费市场拓展，如文化创意、沙盘和考古修复等，未来可能进一步渗透到个性化定制市场。

7 结语

砂型3D打印技术凭借无模化、高精度与快速响应的核心优势，正在推动铸造产业的创新与变革^[14]。相较于传统工艺，其设计自由度显著提升，材料利用率从60%增至90%以上，且废砂再生率超85%。在复杂结构领域，该技术已实现一体化成形，研发周期缩短60%；在成本方面，小批量试制成本降低70%，但设备投资与专用材料成本仍是中小企业应用的主要障碍。

未来技术发展需聚焦三大方向：一是智能化升级，通过AI算法优化工艺参数，降低试错成本；二是国产化突破，开发低成本设备与环保材料（生物基粘结剂）；三是产业协同，构建“云端设计+本地制造”的分布式网络，推动旧砂循环利用与工艺标准化。只有突破经济性瓶颈并完善产业生态，砂型3D打印技术才能真正成为铸造行业转型升级的核心引擎，助力“中国制造”向高效、精密和绿色方向迈进。

参考文献:

- [1] 李天才, 刘轶, 曹继伟, 等. 砂型3D打印技术在铸造铝合金领域的研究与应用 [J]. 材料导报, 2024, 38 (S2): 382-386.
- [2] 史书考, 李松山, 向青春, 等. 一种双相不锈钢闭式叶轮熔模铸造的工艺优化 [J]. 铸造, 2025, 74 (3): 370-375.
- [3] 杨小平, 李瑛辉, 李天才. 3D打印砂型硬化技术的研究与应用 [J]. 铸造, 2025, 74 (3): 288-297.
- [4] 徐敬英. 基于3D打印多层壳镂空砂型的铸造工艺研究 [D]. 北京科技大学, 2024.
- [5] 艾雨蒙, 游志勇, 刘世龙, 等. 基于砂型3D打印技术的壳体低压铸造工艺开发与验证 [J]. 铸造, 2024, 73 (8): 1159-1164.
- [6] 于瑞龙, 常成, 王岩, 等. 砂型3D打印原材料标准解读 [J]. 铸造, 2023, 72 (11): 1506-1510.
- [7] 王亮, 刘中令. 铝合金变速箱壳体低压铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2025, 74 (2): 203-210.
- [8] 李红强, 朱广, 李沛根, 等. 仿真分析辅助GIS铝合金支持缸铸造工艺设计 [J]. 铸造, 2025, 74 (2): 263-268.
- [9] 刘士渊, 杨成龙, 黄雪枫, 等. 基于3D打印技术的气缸盖自补缩低压铸造工艺优化研究 [J]. 铸造, 2022, 71 (10): 1295-1298.
- [10] 苏志东, 冯周荣, 李彩虹, 等. 大型铸钢件3D砂型打印用原砂研究及应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1178-1182.
- [11] 张研, 秦旭升, 苏柏林. 铸造行业VOCs治理及应用 [J]. 铸造工程, 2022, 46 (1): 12-17.
- [12] 鲁云, 张颖, 马娅玲, 等. 共享创新中心3D打印智能工厂颠覆传统铸造 [J]. 企业管理, 2023 (10): 64-69.
- [13] 闫丹丹. 多材质复合砂型3D打印形性调控技术研究 [D]. 北京科技大学, 2023.
- [14] 马涛, 李哲, 程勤, 等. 3D打印技术在砂型铸造领域的应用前景浅析 [J]. 现代铸铁, 2019, 39 (2): 38-40, 50-51.

Research on Current Applications and Future Prospects of Sand Mold 3D Printing Technology in Casting

LI Ming-bo

(Shandong Jigang Taihang Alloy Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract:

Sand mold 3D printing technology has significantly enhanced the manufacturing capability and production flexibility of complex castings through its digital mold-free forming process. This study systematically examined the technology's core principles, application areas, and comparative advantages over traditional sand casting, with a focus on its technical strengths in fabricating intricate structures, enabling customized production, and facilitating collaborative R&D. The research indicated that the technology can reduce sand mold production cycles by 70% while achieving a material utilization rate exceeding 90%. However, barriers to industrial adoption persist, including high equipment investment costs (over 3 million RMB per unit) and a lack of standardization. Compared to conventional casting methods, the sand mold 3D printing technology, by virtue of its mold-free characteristic, reduces small-batch production costs by up to 70%, yet its economic viability for mass production remains unproven. Future advancements should prioritize intelligent algorithm optimization, development of cost-effective domestic equipment, and cross-industry collaboration to transition 3D printing from "innovative demonstration" to "large-scale application," thereby providing critical support for the high-end and sustainable transformation of the foundry industry.

Key words:

sand mold 3D printing; binder Jetting; mold-free casting; digital casting; aerospace