

# 激光选区烧结在铸造领域的应用现状与发展趋势

周士翔<sup>1, 2</sup>, 闫春泽<sup>1, 2</sup>, 史玉升<sup>1, 2</sup>

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074;  
2. 华中科技大学增材制造陶瓷材料教育部工程研究中心, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 增材制造(3D打印)技术作为一种先进的数字化成形技术,正在深刻变革传统铸造行业。本文系统综述了增材制造技术,特别是激光选区烧结技术(Selective laser sintering, SLS)在铸造领域的应用现状。首先分析了传统铸造面临的挑战及与增材制造技术结合的必然性;然后重点阐述了SLS技术在熔模铸造、砂型铸造等方面的具体应用案例与显著成效,包括缩短制造周期、提升铸件精度与性能、实现复杂结构整体成形;最后,展望了该领域未来的发展趋势,重点探讨了多材料(含金属芯骨)砂型增材制造以及增减材复合制造具有随形冷却流道的压铸模具等前沿方向。研究表明,增材制造与铸造的深度融合是实现高性能复杂铸件高效、精密、低成本制造的关键路径,未来发展潜力巨大。

**关键词:** 增材制造; 铸造; 激光选区烧结; 熔模铸造; 砂型铸造; 陶瓷型芯

**中图分类号:** V231.43; TG24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977(2026)03-0232-07

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0032

## Application Status and Development Trends of Selective Laser Sintering in the Casting Field

ZHOU Shi-xiang<sup>1, 2</sup>, YAN Chun-ze<sup>1, 2</sup>, SHI Yu-sheng<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Engineering Research Center of Additive Manufacturing for Ceramic Materials, Ministry of Education, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** Additive manufacturing (3D printing) technology, as an advanced digital forming technology, is profoundly transforming the traditional casting industry. This paper systematically reviews the application status of additive manufacturing technology, particularly selective laser sintering (SLS), in the casting field. Firstly, the challenges the traditional casting faced and the inevitability of its integration with additive manufacturing technology are analyzed; Subsequently, the concrete application cases and significant results of SLS technologies in investment casting, sand casting, and so on are elaborated, including shortening the manufacturing cycle, improving casting accuracy and performance, and enabling the integral forming of complex structures; Finally, the future development trends in this field are outlined, focusing on frontier directions such as multi-material (including metal reinforcement) sand mold additive manufacturing and the hybrid additive-subtractive manufacturing of die-casting molds with conformal cooling channels. Research indicates that the deep integration of additive manufacturing and casting is a key pathway for achieving the efficient, precise, and low-cost manufacturing of high-performance complex castings, and possesses immense potential for future development.

**Key words:** additive manufacturing; casting; selective laser sintering (SLS); investment casting; sand casting; ceramic core

铸造是装备制造业的基础工艺,我国作为世界铸造大国,其产量连续多年位居全球首位,在国民经济和国防建设中占有举足轻重的地位<sup>[1]</sup>。然而,随着高端

装备向功能化、轻量化、高性能化方向飞速发展,其对关键铸件的要求也日益严苛<sup>[2]</sup>。以航空发动机和航天火箭为例,新一代产品中的关键构件,如中介机匣、

**基金项目:** 工业和信息化部,“航空发动机与燃气轮机”国家科技重大专项,2017-VII-0008-0102,燃气轮机定向柱晶/单晶涡轮叶片定向凝固成形控形控性技术基础。

**收稿日期:** 2025-11-24 收到初稿,2026-01-04 收到修订稿。

**作者简介:** 周士翔(1992-),男,博士,主要研究方向为陶瓷增材制造。电话:18627086599, E-mail: sxzhou@hust.edu.cn

**通信作者:** 史玉升,男,教授,博士,博士生导师。电话:13871344486, E-mail: shiyusheng@hust.edu.cn

**引用格式:** 周士翔,闫春泽,史玉升.激光选区烧结在铸造领域的应用现状与发展趋势[J].铸造,2026,75(3):232-238.

ZHOU Shixiang, YAN Chunze, SHI Yusheng. Application status and development trends of selective laser sintering in the casting field [J]. Foundry, 2026, 75(3): 232-238.

涡轮泵等，不仅结构日益复杂，呈现出多空腔、薄壁、异形等特征，而且对减重、承力、耐高温等性能提出了极高要求<sup>[3]</sup>。例如，新一代航空发动机的中介机匣要求重量减轻达30%以上<sup>[3]</sup>。

传统的铸造工艺流程长，通常需要经过型芯型壳模具分体设计、模具制造、分段浇注、机械拼接等多个环节。这种“分体制造再拼接”的模式不仅生产周期漫长，而且过程中影响因素众多，容易产生如缩孔、缩松等多种缺陷，难以满足高性能复杂零件整体成形的要求，严重制约了高端装备的研制进程<sup>[4-5]</sup>。在此背景下，以增材制造技术为代表的数字化制造技术为铸造行业的革新提供了强大动力<sup>[6-7]</sup>。将增材制造技术与铸造工艺相结合，能够充分发挥二者优势，实现“优势互补”。铸造擅长高效成形致密金属构件，而增材制造则擅长无模具、快速、自由地制造复杂结构<sup>[6, 8]</sup>。二者的结合，能够实现复杂铸造型芯型壳的整体数字化快速成形，从而从根本上变革传统铸造流程，实现绿色设计与制造，提升零件性能，提高加工精度，缩短研发与制造周期，降低成本，并对铸造过程进行数字仿真与工艺优化，预测并控制缺陷<sup>[8-10]</sup>。因此，研究增材制造技术在铸造领域的应用现状并把握其未来发展趋势，具有极其重要的理论意义与工程价值<sup>[11-15]</sup>。

本综述旨在系统梳理激光选区烧结技术在铸造中的应用全貌，重点围绕以下内容展开：首先，深入剖析铸造与增材制造结合的必然性与独特优势；其次，重点论述激光选区烧结技术的原理、装备进展及其在熔模铸造、砂型铸造等方面的具体应用案例与成效；最后，深入展望该领域的前沿发展趋势，包括多材料砂型增材制造和增减材复合制造压铸模具等方向，以期对相关领域的研究与实践提供参考。

## 1 增材制造技术与铸造的结合优势及应用背景

### 1.1 我国铸造市场现状与大尺寸高性能铸件的需求导向

铸造产业在国民经济发展和国防建设中具有举足轻重的地位。伴随着国家战略的深入推进，高端装备制造业迎来了飞速发展，这对作为其基础环节的铸造业提出了更高要求<sup>[6]</sup>。其中，高性能、大尺寸复杂构件的需求日益迫切。在航空航天、能源动力、重型机械等领域，诸如大型飞机发动机机匣、重型燃气轮机叶片、大型水轮机转轮及大型柴油发动机缸体等关键部件，其结构尺寸不断增大，形状日趋复杂，并且严格

要求在保证高承载能力和可靠性的同时，实现显著的轻量化<sup>[16-17]</sup>。例如，针对大型水轮机转轮，在保障转轮强度、刚度、水力效率和服役寿命的前提下，为实现全生命周期的性能提升、成本降低与风险管控，明确提出了轻量化设计要求。这些大尺寸、高性能铸件的制造能力，直接关系到国家重大装备的自主研制水平。

### 1.2 传统铸造方法在高端铸件生产中的局限性

面对上述高性能复杂铸件的制造需求，传统铸造工艺的局限性日益凸显，如图1(a)所示。其典型的工艺流程包括：型芯型壳模具的分体设计、模具（通常是木模或金属模）的制造、利用模具制造砂型或蜡模、浇注，对于复杂大件往往还需要分块铸造后进行机械拼接<sup>[18]</sup>。传统模式存在几个主要缺陷：①工艺流程长、周期漫长；②难以实现复杂结构整体成形；③精度控制难、缺陷率高；④高成本与低灵活性。

### 1.3 增材制造与铸造结合的技术优势

为了克服传统铸造的瓶颈，增材制造技术被引入并与之深度融合，形成了优势互补的协同制造模式。增材制造技术“逐层堆积、自由成形”的特点，恰好弥补了传统铸造在“复杂结构成形”和“快速原型”方面的短板，如图1(b)所示。二者的结合展现出显著优势：①实现极致复杂结构整体制造，利用SLS等技术可直接无模具成形整体、复杂的铸造型芯，摆脱了可制造性的几何约束，实现了空腔、悬臂、异形流动等结构的整体铸造，避免了拼接，提升了零件性能。②大幅缩短制造周期，省去了耗时耗成本的模具制造环节，从CAD模型到铸型直接成形，尤其适用于新产品开发与试制，能将制造周期从数月缩短至数周甚至数天<sup>[19]</sup>。③提升铸件精度与质量，高精度的3D打印铸型保证了铸件的尺寸精度。同时，基于数字模型可以更精准地进行铸造过程模拟，优化浇冒口系统，从而预测并减少铸造缺陷，提高成品率。④推动绿色与柔性制造，实现了按需生产，减少了模具材料浪费。同时，制造灵活性极高，设计变更只需修改数字模型，无需物理工装的改动，特别适应定制化、柔性化生产趋势<sup>[20-21]</sup>。基于此，形成了典型的“增材制造-铸造”整体成形技术路线：数字模型设计与仿真→采用3D打印技术直接整体成形复杂铸型（砂型砂芯/熔模/陶瓷型芯型壳）→进行传统的浇注及后处理工序。该路线构成了现代数字化、智能化铸造的核心，彻底革新了复杂零件的开发与制造流程。

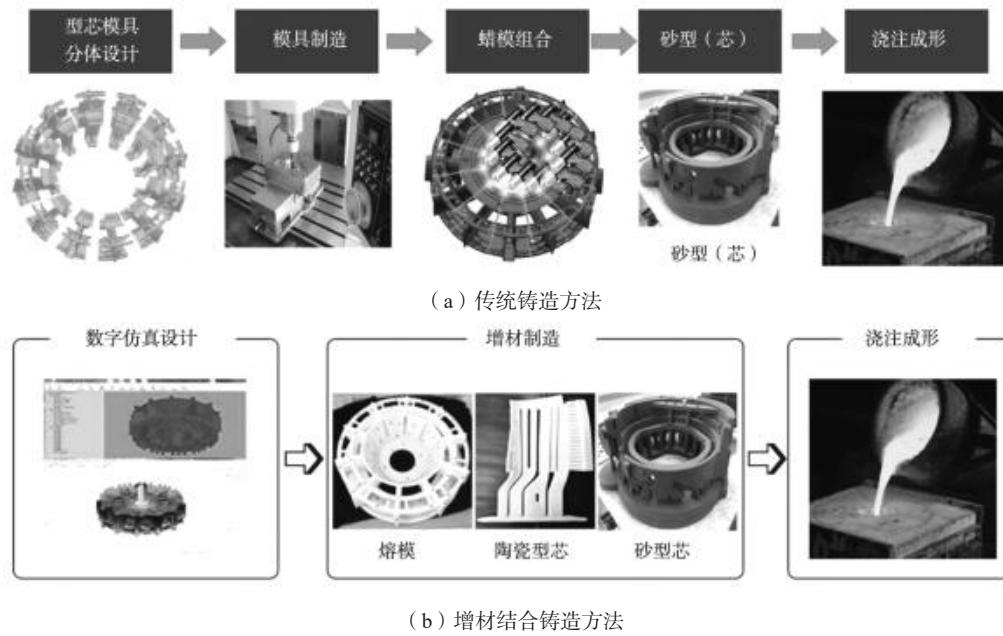


图1 传统铸造方法和增材制造结合的铸造方法技术路线对比图

Fig. 1 Comparison of technical routes between traditional casting methods and additive manufacturing-integrated casting methods

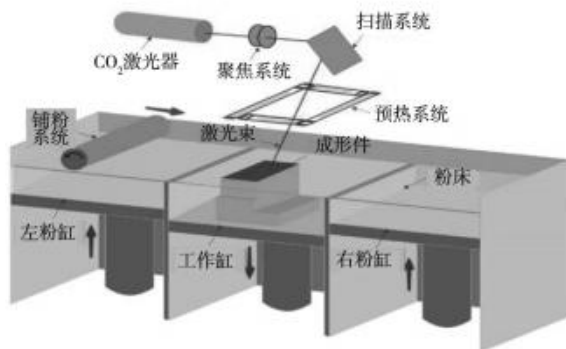
## 2 激光选区烧结增材制造技术

### 2.1 激光选区烧结技术特点

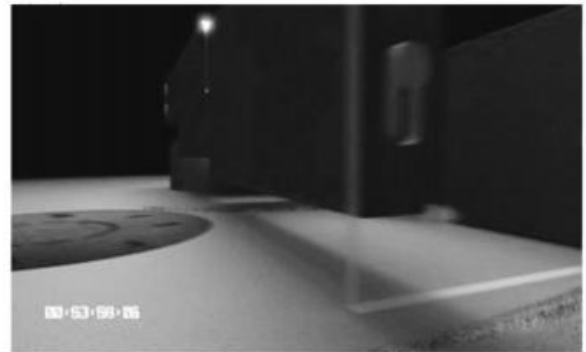
SLS技术通过激光束选择性扫描烧结粉末材料层叠成形(图2)<sup>[22]</sup>。其主要特点包括:①无需支撑结构,未被烧结的粉末自然成为支撑,特别适用于成形具有空腔、悬臂等复杂结构的零件,简化了工艺,提高了材料利用率;②成形件强度高、性能稳定,SLS成形的铸型(如砂型、陶瓷型)具有足够的强度以满足搬运、组型和浇注过程中的力学要求,性能稳定可靠;③材料适用性广,可使用的材料种类丰富,包括高分子(用于熔模)、覆膜砂、陶瓷粉末和金属粉末等,能够覆盖多种铸造工艺的需求。

### 2.2 SLS 装备研发进展

我国在SLS装备研发方面已取得显著成就。以华中科技大学为例,史玉升教授团队及其技术转化平台武汉华科三维已成功自主研发系列化SLS装备。例如:高精度SLS设备HK C250的成形空间为 $0.25 \text{ m}^3$ ,如图3(a)所示,采用高精度振镜系统,最小光斑达 $0.15 \text{ mm}$ ,可实现最小壁厚小于 $0.4 \text{ mm}$ 的精细结构成形;多激光大型SLS设备HK C170采用“四激光、四振镜”系统,成形台面尺寸达 $1\,700 \text{ mm} \times 1\,700 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ,满足了大型复杂铸件的整体成形需求,如图3(b)和(c)所示。该装备已出口至英、俄、巴西、新加坡等国。依托上述自研设备,团队已建立SLS规模化生产以及铸造型芯型壳生产基地,如图3(d)所示。



(a) 激光选区烧结设备示意图



(b) 激光选区烧结制备铸型过程照片

图2 激光选区烧结设备示意图及激光选区烧结制备铸型过程

Fig. 2 Schematic diagram of SLS equipment and photos of the process of preparing casting molds by SLS



图3 自主研发的系列化SLS装备

Fig. 3 Self-developed series of SLS equipment

### 3 SLS在铸型领域的应用现状

#### 3.1 SLS在熔模铸造中的应用

SLS在熔模铸造领域的应用主要集中在铸造航空发动机用钛合金中介机匣以及航天发动机用高强不锈钢涡轮泵壳体和离心轮,如图4(a)、(b)所示。对于钛合金机匣,传统分块制造蜡模的方式精度差、缺陷多。采用SLS技术直接整体打印高分子熔模,再进行熔模铸造,成功实现了钛合金中介机匣的整体铸造。该方法应用效果显著,缩孔缺陷率从90%大幅降低至20%以下,铸件精度从CT9提升至CT7-CT6,生产效率提升6倍以上,零件重量减轻30%。此举使我国成为继美国之后全球第二个掌握该类零件整体铸造技术的国家。

作为航天发动机的“心脏”,涡轮泵对质量和性能要求极高。通过SLS技术整体成形熔模,实现了壳体 and 离心轮的高精度铸造。成果显示:缩孔缺陷降低30%,精度由CT8提升至CT6-CT5,涡轮泵扬程提升2.9%,效率提升1.2%,有力支撑了长征系列火箭及480 t重型运载火箭等国家重大工程。

#### 3.2 SLS技术在砂型铸造中的应用

本团队利用SLS技术成功制备广西玉柴公司蠕铁六缸柴油发动机缸盖,如图5(a)所示,整体成形了尺寸超过1 m、最薄处仅5 mm的复杂缸盖砂型砂芯。将原本需要5~6个月的模具制造和砂型制备周期缩短至20天以内,极大地加快了产品上市速度。此外,本团队



(a) 航空发动机用钛合金中介机匣

(b) 航天发动机用不锈钢涡轮泵壳体和离心轮

图4 SLS技术在熔模铸造领域的应用

Fig. 4 Application of SLS technology in the field of investment casting

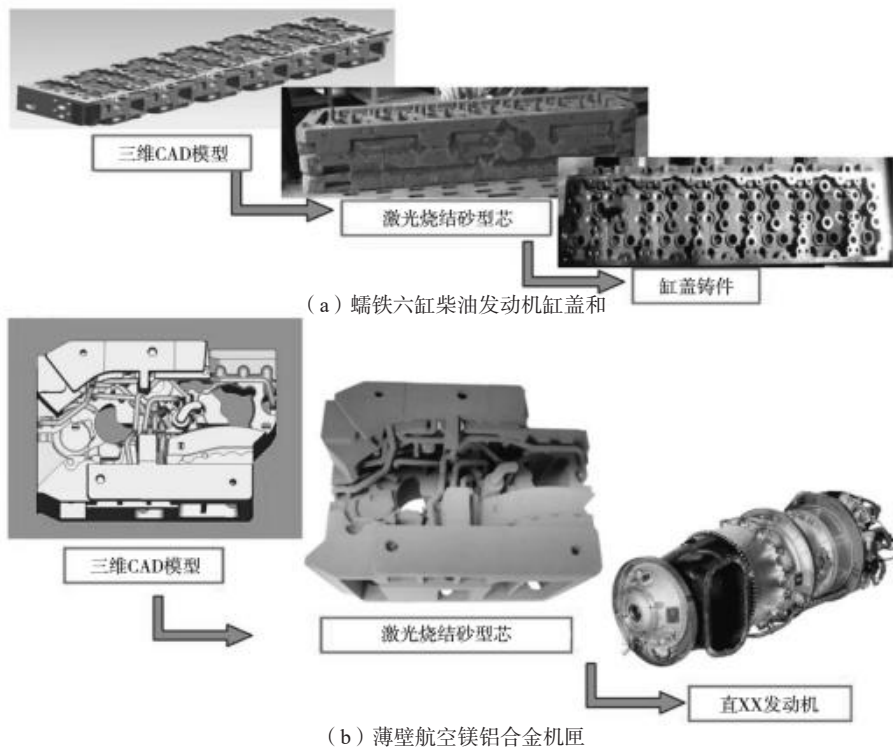


图5 SLS技术在砂型铸造中的应用

Fig. 5 Application of SLS technology in sand casting

还制备了哈尔滨东安发动机厂用薄壁航空镁铝合金机匣，如图5（b）所示，针对直XX发动机的薄壁机匣，使用SLS整体成形砂型，成功解决了薄壁铸件成形难、易变形等问题，满足了航空发动机对轻量化、高精度构件的迫切需求。大连理工大学的姚山及其团队通过将先进的砂型3D打印技术与数字化仿真优化相结合，成功攻克了大型复杂铝青铜叶轮的铸造难题，不仅高效地制造出了高质量产品，也为复杂构件的先进制造提供了新的技术范式<sup>[23]</sup>。南昌航空大学徐志锋团队通过创新性地采用SLS双组分粘结剂工艺，实现了钛合金铸造用砂型的高强度、低发气量制备，并成功浇注出高质量铸件。这项工作不仅提升了钛合金砂型铸造的可行性，也为增材制造在特种合金领域的应用树立了标杆，具有重要的工程和学术价值<sup>[24]</sup>。

### 3.3 SLS 在陶瓷型芯型壳制造中的应用

航空发动机和重型燃气轮机用单晶/柱晶空心叶片的制造是铸造领域的皇冠，其核心是复杂的陶瓷型芯与型壳。传统陶瓷型芯制备工艺复杂、周期长，且对于大尺寸、复杂异形空心结构的成形能力不足。传统SLS工艺制备的氧化硅基型芯型壳高温性能较差，而氧化铝基型芯型壳虽然高温稳定性更好，但是难以脱芯，制造工艺复杂。

本团队针对此难题，开展了陶瓷型芯型壳一体化

增材制造技术攻关。在装备研发方面：研制了新型双材料SLS装备，突破了双材料（如氧化铝/氧化硅）精准铺粉、送粉、吸粉及过程精确控制等关键技术，实现氧化铝型壳/氧化硅型芯双材料铸型的一次制备（图6）。在工艺创新方面：结合增材制造与喷涂精整的复合制造技术，实现了对微小区域的精确控制，提升了陶瓷型芯/型壳的表面质量。在应用成效方面：成功突破了大尺寸空心叶片陶瓷型芯/型壳成形技术，成形的陶瓷件力学性能和尺寸精度满足技术要求，已成功应用于重型燃气轮机用单晶/柱晶叶片的定向凝固铸造，实现了从素坯强化、脱脂烧结到最终叶片成形的全流程技术贯通。

## 4 未来发展趋势

尽管增材制造在铸造中的应用已取得显著成果，但其技术潜力远未枯竭，未来将向更高效、更复杂、功能集成的方向发展。

在多材料（包括金属芯骨）砂型增材制造领域，高性能复杂铸件（如水轮机叶片、大型转子）要求砂型砂芯具备多功能分区特性，如面砂（接触金属液部分）需耐高温、背砂需透气性好且易溃散，有时还需要在砂芯中嵌入金属芯骨以增强强度。当前激光3D打印多采用均一材质粉末，无法一次性整体成形由面/背砂组合或内含金属芯骨的砂型。未来可开发多材料粉

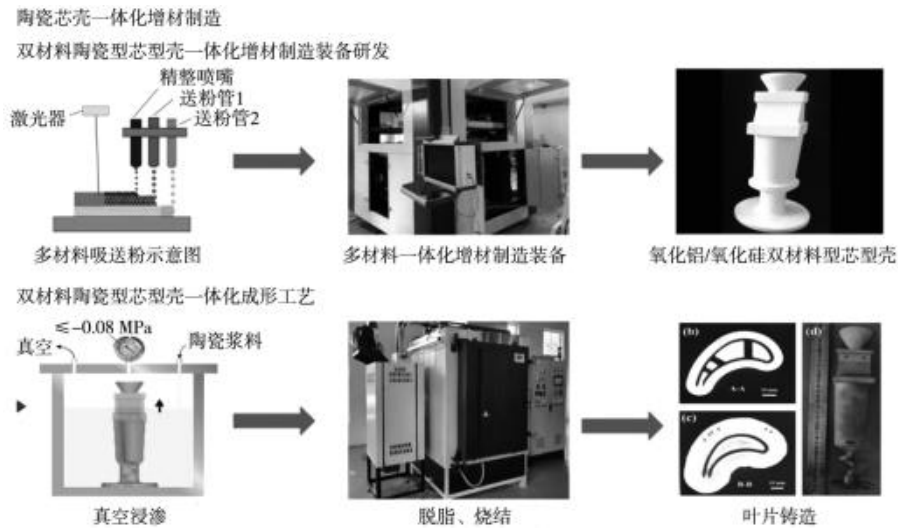


图6 陶瓷型芯/型壳一体化双材料SLS增材制造技术

Fig. 6 Dual-material SLS additive manufacturing technology for integrated ceramic cores and shells

未选择性吸送与激光选区烧结/熔化复合技术。通过数字化定义砂型不同区域的材料属性，利用多吸送粉系统和不同激光器（如CO<sub>2</sub>激光用于烧结型砂，光纤激光用于熔化金属芯骨），实现区域性能可变的复杂砂型砂芯一体化激光增材制造。

在增减材复合制造具有随形冷却流道的压铸模具领域，压铸模具是批量生产的关键工装，但传统单材料模具难以压铸不锈钢等高熔点金属，且冷却效率低，影响生产效率和铸件质量。目前需要制造一种多材料随形冷却流道压铸模具。其基底层为分布复杂、贴合型腔的随形冷却流道以提高冷却效率；硬面层

需使用耐高温、耐磨损的材料以承受高于不锈钢熔点（1450℃）的工作温度；中间需有过渡层以保证结合强度。电弧熔丝增材制造技术因其无环境要求、能量利用率高（90%）、成形尺寸大、成本低、效率高且易于实现多材料成形，被认为是大型多材料构件制造的最适宜技术。结合机加增减材制造，可以加工出光滑的内流道。本研究团队已采用自研的铁基硬面粉芯丝材，利用五电弧增材制造技术，整体成形了具有复杂随形冷却流道的多材料压铸模具（图7），并成功用于压铸阀门壳体等零件，展示了该技术的巨大应用前景。

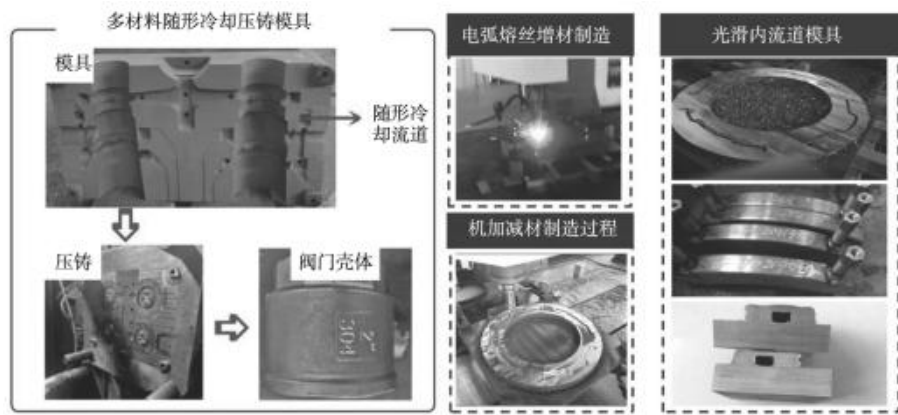


图7 铁基硬面粉芯丝材及五电弧增材制造技术成形的多材料压铸模具（含复杂随形冷却流道）

Fig. 7 Multi-material die casting mold (with complex conformal cooling channels) formed by using of powder cored wire with iron-based hard surface and five-arc additive manufacturing technology

## 5 结论

增材制造技术，特别是激光选区烧结技术，与铸造工艺的深度融合，已成为推动铸造行业技术升级和

变革的核心驱动力。

(1) SLS技术凭借其无需支撑、材料适应性广、成形件性能优良等特点，在熔模铸造、砂型铸造和高端陶瓷型芯型壳制造中取得了卓有成效的应用，显著

提升了铸件质量、精度与性能，大幅缩短了制造周期，解决了多项国家重大工程关键构件的制造瓶颈。

(2) 面向未来，铸造增材制造技术正朝着多材料功能化和增减材复合制造的方向发展。多材料砂型(含金属芯骨)增材制造和具有随形冷却流道的多材料压铸模具增减材复合制造，将是突破现有技术局

限、进一步释放设计和制造潜能的关键前沿领域。

可以预见，随着这些技术的不断成熟与推广应用，增材制造将在更广阔的范围内重塑铸造产业生态，为实现我国从“铸造大国”向“铸造强国”的转变提供坚实的技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 中国铸造协会. 铸造行业“十四五”发展规划 [J]. 铸造工程, 2021, 45 (4): 1-14.
- [2] LUO A A, SACHDEV A K, APELIAN D. Alloy development and process innovations for light metals casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 306: 117606.
- [3] 李涤尘, 鲁中良, 田小永, 等. 增材制造——面向航空航天制造的变革性技术 [J]. 航空学报, 2022, 43 (4): 15-31.
- [4] 张少平, 郭会明, 高彤, 等. 基于先进激光加工技术的下一代航空发动机跨尺度整体式承力薄壁构件设计方法与应用 [J]. 航空学报, 2024, 45 (13): 162-174.
- [5] LEHMHUS D, LI G, CZEKALLA M, et al. Combining metal additive manufacturing and casting technology: high performance cooling channels for electric powertrain components [J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27 (16): 2500445.
- [6] GAO M, LI L, WANG Q, et al. Integration of additive manufacturing in casting: advances, challenges, and prospects [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2022, 9 (1): 305-322.
- [7] SIVARUPAN T, BALASUBRAMANIN, SAXENA P, et al. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting [J]. Additive Manufacturing, 2021, 40: 101889.
- [8] SHAH M, PATEL D R, PANDE S. Additive manufacturing integrated casting- a review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 7199-7203.
- [9] ZHANG Z F, WANG L, ZHANG L T, et al. Binder jetting 3D printing process optimization for rapid casting of green parts with high tensile strength [J]. China Foundry, 2021, 18 (4): 335-343.
- [10] KANG J, SHANGGUAN H, DENG C, et al. Additive manufacturing-driven mold design for castings [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 472-478.
- [11] WANG J, SAMA S R, LYNCH P C, et al. Design and topology optimization of 3D-printed wax patterns for rapid investment casting [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 34: 683-694.
- [12] KANG J W, MA Q X. The role and impact of 3D printing technologies in casting [J]. China Foundry, 2017, 14 (3): 157-168.
- [13] 樊自田, 杨力, 唐世艳. 增材制造技术在铸造中的应用 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 1-16.
- [14] SAMA S R, BADAMO T, LYNCH P, et al. Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing [J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 563-578.
- [15] ZHENG J, ZHOU X, SHI J, et al. Method for evaluating the resource, energy, and environmental impact of the casting fault rectification process in patternless sand castings [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2023, 35: e00565.
- [16] 刘大响. 一代新材料, 一代新型发动机: 航空发动机的发展趋势及其对材料的需求 [J]. 材料工程, 2017, 45 (10): 1-5.
- [17] 王强, 郑日恒, 陈懋章. 航空发动机科学技术的发展与创新 [J]. 科技导报, 2021, 39 (3): 59-70.
- [18] LEHMHUS D. Advances in metal casting technology: a review of state of the art, challenges and trends—part II: technologies new and revived [J]. Metals, 2024, 14 (3): 334.
- [19] SRIVASTAVA M, RATHEE S. Additive manufacturing: recent trends, applications and future outlooks [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2022, 7 (2): 261-287.
- [20] 宋波, 张金良, 章媛洁, 等. 金属激光增材制造材料设计研究进展 [J]. 金属学报, 2023, 59 (1): 1-15.
- [21] 周士翔, 孙冬, 陈双, 等. 激光选区烧结成形涡轮叶片铸造用陶瓷铸型材料及浸渗强化工艺 [J]. 精密成形工程, 2024, 16 (12): 82-90.
- [22] PAPAZOGLU E L, KARKALOS N E, KARMIRIS-OBRAŃSKI P, et al. On the modeling and simulation of SLM and SLS for metal and polymer powders: a review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29 (2): 941-973.
- [23] 卞政, 姚平坤, 刘忠高, 等. 基于砂型3D打印的双吸叶轮铸造工艺研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59 (5): 45-51.
- [24] 李政勋, 徐志锋, 张守银, 等. 基于SLS的双组分黏结剂钛合金砂型制备工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (2): 228-234.