

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0406

## 先进增材制造技术在模具行业的应用现状与展望

陈 澧<sup>1</sup>, 张纪奎<sup>1</sup>, 曹 苗<sup>2\*</sup>, 梅碧舟<sup>3</sup>, 齐士杰<sup>1</sup>, 谢重阳<sup>4</sup>, 邓益民<sup>4</sup>

(1.北京航空航天大学 宁波创新研究院, 浙江 宁波 315800; 2.西北工业大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315103;  
3.浙江易锻精密机械有限公司, 浙江 宁波 315700; 4.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 模具在现代工业生产中有着重要地位, 而增材制造技术出现和产业化应用为模具行业带来了变革. 本文对目前模具行业应用较多的增材制造技术, 包括喷射粘结成形、选择性激光烧结、选择性激光融化和光固化成形进行了原理简述. 同时, 根据增材制造技术在模具行业的 2 个典型应用方向(模具快速原型制造和高性能模具零件制造), 分析了增材制造技术在其中的具体应用方法, 并对国内外相关研究成果进行了综述, 总结出增材制造技术在模具行业进行批量化应用所需要解决的关键问题是: 如何通过对原材料、工艺和设备的研究来提高增材制造技术相比于传统制造技术的性价比. 最后对增材制造技术在模具行业的未来发展进行了展望.

**关键词:** 模具; 增材制造; 模具快速原型制造; 高性能制造

**中图分类号:** TG76

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2023) 06-0001-16

中国是模具制造大国, 2022 年模具行业市场规模已达 3 429.39 亿元, 模具年产量高达 2 524.45 万套<sup>[1]</sup>. 但目前我国大型、精密、复杂、长寿命的高品质模具自给率仅为 30%左右, 绝大部分仍然依赖进口<sup>[2]</sup>. 从技术角度分析, 其原因是国产模具钢的材料性能、热处理工艺与国外相比还存在差距, 而根本原因是我国现代化工业起步晚, 先入场的西方发达国家已经完成传统制造业关键技术的多次迭代和市场垄断, 使后来者难以追赶. 而增材制造技术(Additive Manufacturing, AM)<sup>[3]</sup>作为近年来快速发展的先进近净成形技术, 能够在实现形状控制的同时, 对组织和成分进行精细调控, 将彻底改变工业革命以来形成的物体和复杂系统的制造或组装方式, 是我国高端制造业对国外发达国家实现弯道超车的绝佳机会.

早在 20 世纪 80 年代, 美、日、法等国科技人员就开始对增材制造技术进行了探索<sup>[4]</sup>, 我国科学家紧随其后, 从 1990 年开始对增材制造技术开展

了基础性研究<sup>[5]</sup>. 经过 40 多年发展, 目前增材制造技术已形成规范的技术体系, 根据(GB/T 35351—2017)增材制造标准可分为 7 类工艺: 黏结剂喷射、定向能量沉积、材料挤出、材料喷射、粉末床熔合、薄片叠层以及光聚合/立体光固化. 通过增材制造方法实现复杂、高性能零件的批量化、无模快速制造是发展增材制造技术的最终目标. 但由于目前我国增材制造技术还不成熟、产业链不完善, 导致增材件的生产效率较低、成本居高不下, 因此多用于少数高端制造领域中高性能、特殊结构零件的小批量制造, 尚无法替代模具成形技术面向民用产品的批量化制造. 故在目前阶段, 将先进增材制造技术与传统模具技术相结合, 以缩短模具研发周期、降低模具开发成本、提高成形件形性质量, 是符合目前制造业发展背景的最佳手段.

目前, 增材制造技术在模具行业的应用主要包括: (1)模具快速原型制造; (2)高性能模具零件制造. 其中应用较多的增材技术为喷射粘结成形

收稿日期: 2023-04-09.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市软科学研究项目(2022R028); 宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”(2022Z014, 2022Z015, 2022T004); 北仑区关键核心技术攻关项目(2021BLG001).

第一作者: 陈澧(1990-), 男, 江苏泰州人, 博士, 主要研究方向: 高端模具增材设计、制造和修复. E-mail: long\_chen@buaa.edu.cn

\*通信作者: 曹苗(1988-), 女, 陕西西安人, 博士, 主要研究方向: 关键核心件先进成形工艺和装备. E-mail: 529265371@qq.com

(Binder Jetting, BJ), 选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS), 选择性激光熔化(Selective laser melting, SLM)和光固化成形(Stereo Lithography Appearance, SLA).

## 1 模具行业常用的增材制造技术

### 1.1 喷射粘结成形

喷射粘结成形技术于 1993 年由美国麻省理工学院提出<sup>[6]</sup>, 其基本原理是将粘结剂以液滴的形式喷射至特定区域, 使该区域的粉末粘合, 通过粉末床实现层层叠加制造出所需的三维结构. 打印完成后的零件经过固化、清粉和后处理, 即可获得所需构件<sup>[7]</sup>, 其工艺原理如图 1 所示<sup>[8]</sup>. 喷射粘结成形可以用于高分子材料、金属、砂粒、陶瓷等材料零件的增材制造, 成形效率高, 但成形件的机械性能较弱, 需要通过后续固化、烧结、浸润以及其他表面处理工序实现性能强化.

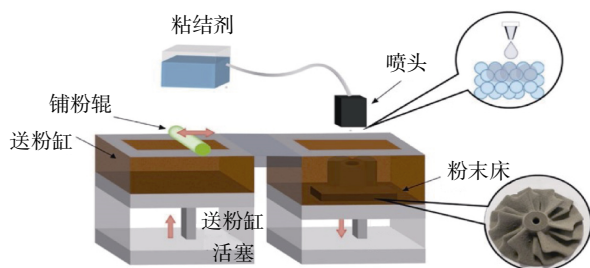


图1 喷射粘结成形技术原理图<sup>[8]</sup>

### 1.2 选择性激光烧结

选择性激光烧结技术最早由 Deckard<sup>[9]</sup>在 1986 年提出, 是一种基于粉末床的增材制造技术. 利用粉末状材料(如塑料粉、蜡粉、金属粉及其复合粉末等)在激光照射下烧结, 控制激光束逐层扫描,

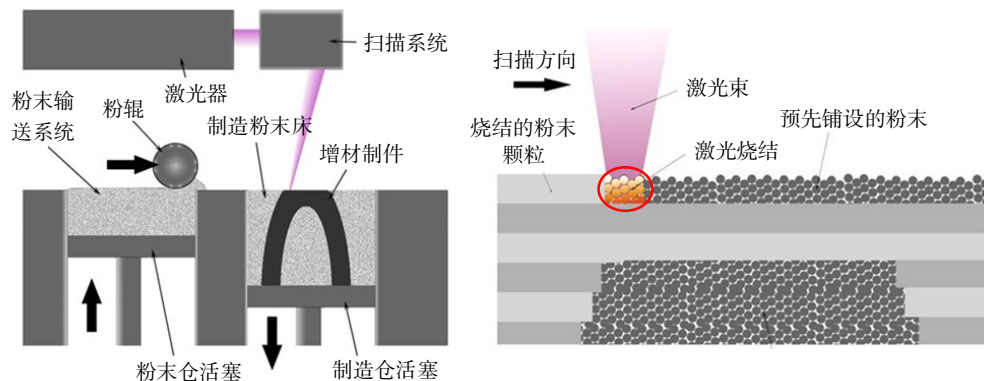


图2 选择性激光烧结技术原理图<sup>[11]</sup>

并通过层层叠加得到所需的零件<sup>[10]</sup>, 其技术原理如图 2 所示<sup>[11]</sup>. SLS 技术可使用材料广泛, 理论上凡经激光加热后能在粉末颗粒间形成连接的材料都可以作为 SLS 成形材料, 具有自支撑性, 能够制造任意复杂的形体, 因仅是烧结粉末, 故成形效率较高. 但是 SLS 技术的原材料和设备价格都较高, 导致零件制造成本居高不下. SLS 成形件的孔隙度高、机械性能弱, 特别是延伸率很低, 很少能够直接应用于金属功能零件的制造. SLS 可以用于制造零件模样、模具母模、精铸熔模、铸造型壳和型芯等.

### 1.3 选择性激光熔化

选择性激光熔化技术是由德国弗劳恩霍夫激光技术研究所(Fraunhofer ILT)于 1996 年研发成功<sup>[12]</sup>, 其成形原理与 SLS 相似, 但专用于金属粉末成形. 通过金属粉末在高能量密度激光束下的熔化、冷却凝固以达到冶金结合的效果, 经过逐层堆积后得到金属零件. 激光选区熔化技术可广泛用于金属合金, 且能实现复杂异形结构的高精度、高性能、无模、快速、近净成形, 是传统制造方法的绝佳替代技术<sup>[13]</sup>. 尽管激光选区熔化技术极具潜力, 但由于生产成本低, 目前仅在航空航天等部分高端制造领域得到批量化应用, 在模具行业主要用于少量性能要求高的零件增材制造, 如带随形水路的模具镶块等.

### 1.4 光固化成形

光固化成形技术由 Hull<sup>[14]</sup>在 1986 年提出, 其原理是利用液态光敏树脂在一定波长紫外激光束(250~400 nm)照射下会引起聚合反应并快速固化的特性层层叠加, 以获得三维零件<sup>[15]</sup>, 该工艺和设

备的原理如图3所示<sup>[16]</sup>。光固化成形技术可实现高表面精度、复杂结构模型的制备。目前主要将其与熔模精密铸造工艺相结合,采用光固化技术制备熔模精密铸造所需的熔模和型壳(芯)等,可以极大缩短产品的制备周期。

## 2 增材制造实现模具的快速原型制造

模具是利用自身型腔将原材料成形为特定形状尺寸制件的工具,所以制造模具的最初目的是提供一个满足以下功能需求的型腔:(1)保证模具型腔与成形件的形状尺寸相匹配;(2)保证模具型腔在成形过程中不会剧烈变形乃至破坏。传统模具型腔的制造方法有直接成形和间接成形2种(图4),具体选择取决于成形件的结构复杂程度和形性质量要求。

直接成形模腔一般是指通过减材制造方法,

如机加工、特种加工等,将毛坯材料制成模具各零部件再进行装配,形成完整的模具型腔。虽然通过该方法能获得良好的模具形位尺寸精度和表面质量,且能通过选用不同模具材料获得相应的强度、刚度、硬度和使用寿命,但这种制模方式存在柔性差、费用高、周期长等缺陷,无法满足现代市场对新产品的快速迭代需求。

间接成形模腔首先需要制造零件模样,以其外形为支撑,通过浸渡、喷涂等不同方法快速得到形状完整,但结构脆弱的型腔壳体,然后去除零件模样,并经后处理方法加固模具型腔。该方法虽然可以制造复杂程度很高的模具型腔,但存在生产工序多、所得模具精度低、性能弱、寿命短等缺陷。而增材制造技术可以介入上述模腔制造过程中的不同阶段,以达到减少生产工序、提高生产效率的目的,这在砂型铸造、熔模铸造、注塑和压铸等模

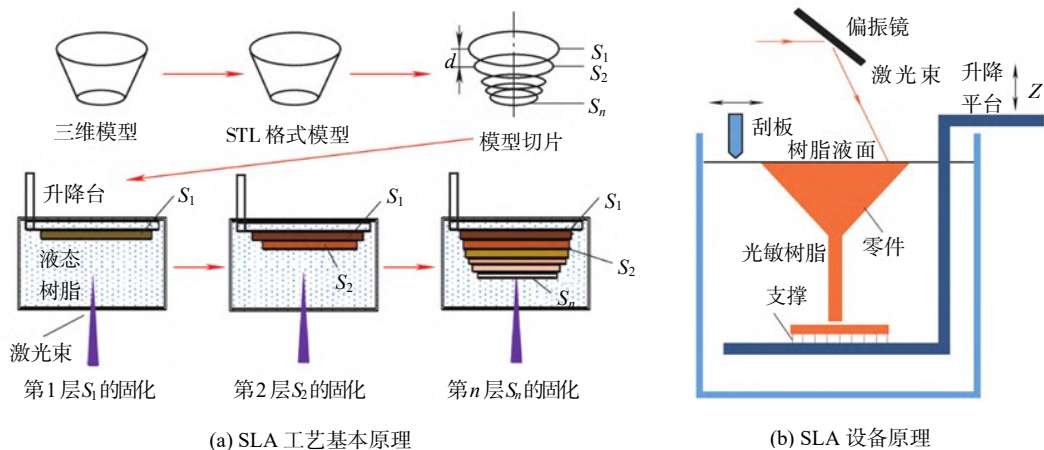


图3 光固化成形技术和设备原理图<sup>[16]</sup>

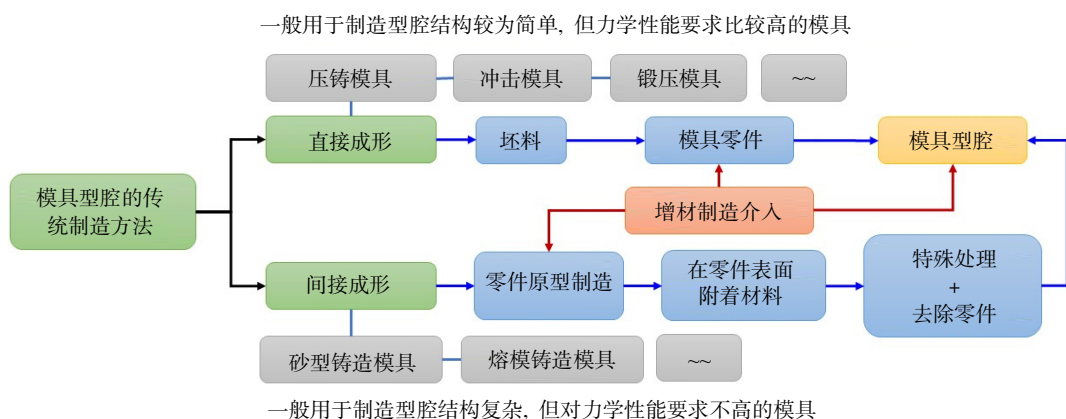


图4 传统模腔制造技术和增材制造工艺的结合

具中都得到了应用<sup>[2,17-18]</sup>。

## 2.1 砂型铸造模具

砂型铸造是指在砂制模腔中生产零件的铸造方法,可生产钢、铁和大多数有色合金铸件。因价格低廉,是大型铸件批量生产的首选方案之一。传统砂型铸造的工艺流程如图 5 所示,需要制备零件模样和芯盒模具才能完成砂型和砂芯的制造,这在工艺验证与批量生产中会造成资源的严重浪费。而通过增材技术直接制造砂型(芯)可以缩减生产工序、提高生产效率。

### 2.1.1 喷射粘结成形砂型(芯)工艺

选择合适的砂粒、粘结剂和固化剂,利用喷射粘结成形技术将砂粒粘结成砂型(芯),并组装为铸型,用于后续金属液浇注成形。目前喷射粘结成形砂型的主要材料有各种硅砂、锆砂等,粘结剂主要为呋喃树脂、酚醛树脂和无机粘结剂等<sup>[19]</sup>。相比传统砂型铸造,喷射粘结成形技术在制备砂型(芯)过程中具有明显的优越性<sup>[20-21]</sup>,可制备形状复杂的砂型模具(图 6)。目前砂型的喷射粘结成形技术发展已较为成熟,国内有华中科技大学<sup>[22]</sup>、太原理工

大学<sup>[23]</sup>、中国机械科学研究总院<sup>[24]</sup>、先进成形技术与装备国家重点实验室<sup>[25]</sup>,国外有法国国立高等工艺学院<sup>[26]</sup>等单位的相关学者对砂型的喷射粘结成形工艺进行研究,分析了影响成形砂型(芯)外形尺寸偏差、表面质量和力学性能的主要因素及其机理,并通过工艺优化提升砂型(芯)的形性质量。

### 2.1.2 激光选区烧结覆膜砂

以覆膜砂作为烧结材料,通过激光选区烧结法可直接成形铸造用型(芯),与传统砂型铸造方法相比,简化了流程、节省了设备成本。20 世纪 90 年代,德国 EOS 公司和中国华中科技大学<sup>[27]</sup>的相关研究人员对激光烧结覆膜砂的相关工艺进行了探索,发现激光功率、激光光斑尺寸、扫描速度、砂的预热温度、层厚等工艺参数是影响激光选区烧结覆膜砂成形性能的关键因素。国内的高校,如华中科技大学、南昌航空大学、中北大学等主要进行新型覆膜砂研发<sup>[28-30]</sup>和激光烧结工艺<sup>[31-32]</sup>研究,以获得更优的烧结件形性质量。广西大学的研究人员采用自研的高性能覆膜砂,通过选择性激光烧结技术仅用 10 多天的时间就完成了 KJ100 型气缸

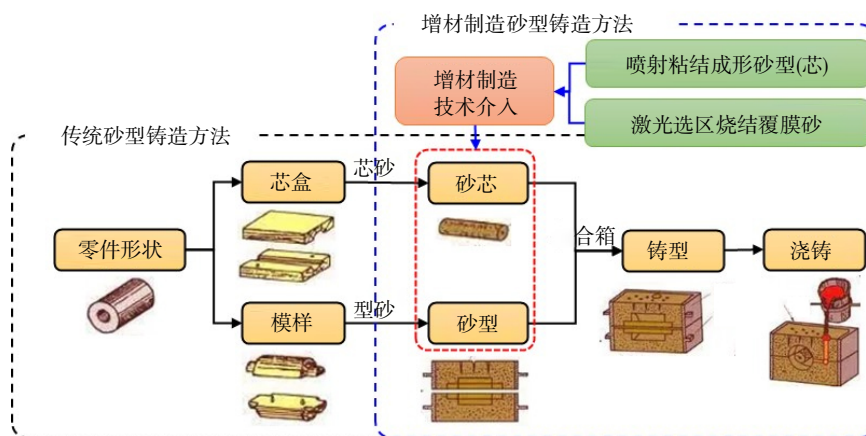
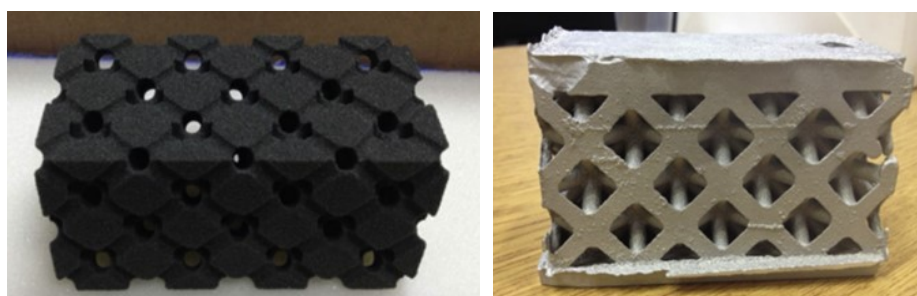


图 5 砂型铸造工艺流程



(a) 粘合剂喷射制造的砂型模具

(b) 浇注后得到的复杂零件

图 6 喷射粘结成形砂型<sup>[21]</sup>

盖全套覆膜砂芯的制备(图 7(a)和(b)), 而传统方法的生产周期需要5个月, 可见效率提升极为显著<sup>[33]</sup>. 华中科技大学的研究人员提出运用覆膜砂 3D 打印造型结合传统铸造工艺的方法, 制造具有随形冷却水道的热冲压模具(图 7(c)), 能够显著提高冷却性能<sup>[34]</sup>. 新加坡国立大学的研究人员研究了激光烧结工艺参数对烧结件精度、强度和表面光洁度的影响, 揭示了粉末状砂在激光烧结过程中的固化机理, 并获得了最佳的烧结工艺参数<sup>[35]</sup>.

## 2.2 熔模铸造模具

熔模精密铸造工艺源于传统的失蜡法, 其关键在于制备出匹配成形件外形尺寸的陶瓷型芯、型壳, 而传统的陶瓷型(芯)制造工序繁琐<sup>[36]</sup>, 如图 8 所示. 熔模精密铸造在零件复杂性和材料适应性方面具有较大的优势, 但其柔性较差、生产周期长、工艺环节多, 铸件结构和尺寸的改变往往直接影响铸型(包括铸模和型芯)的设计、制造、装配等

过程, 从而产生巨大的时间和经济成本. 特别是应用于高熔点金属(如钛金属、镍基高温合金等)零件(如高温涡轮叶片、大型整体机匣等)精密铸造的陶瓷铸型, 通过“传统制造简单铸型+机加工精细结构”的方法存在难度大、周期长、成本高的缺陷, 难以满足现代航空工业的需求<sup>[37-38]</sup>. 故引入增材制造技术制造模样或铸型, 可极大提高熔模精密铸造的柔性, 加速铸件的生产研制过程, 满足新产品试制和小批量生产任务的快速响应需求.

### 2.2.1 模样的增材制造

将易熔材料通过增材制造技术直接成形为零件模样, 可替代原有较为繁琐的模样制备工序, 在一定程度上缩短铸型的制备周期. 目前主要方法有激光选区烧结成形和光固化成形方法.

(1)激光选区烧结成形模样. 早在 20 世纪 90 年代, 美国 DTM 等公司, 国内北京隆源公司、华中理工大学、南京航空航天大学等已将 SLS 技术应

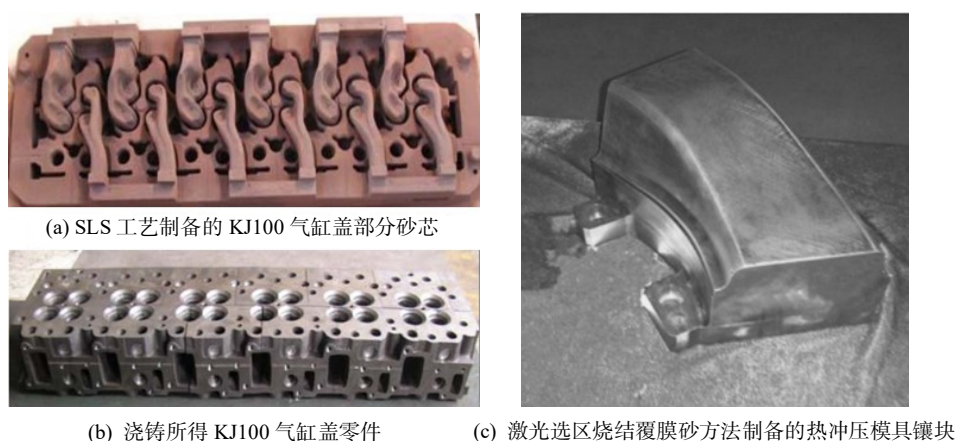


图 7 激光选区烧结覆膜砂方法制备零件<sup>[33-34]</sup>

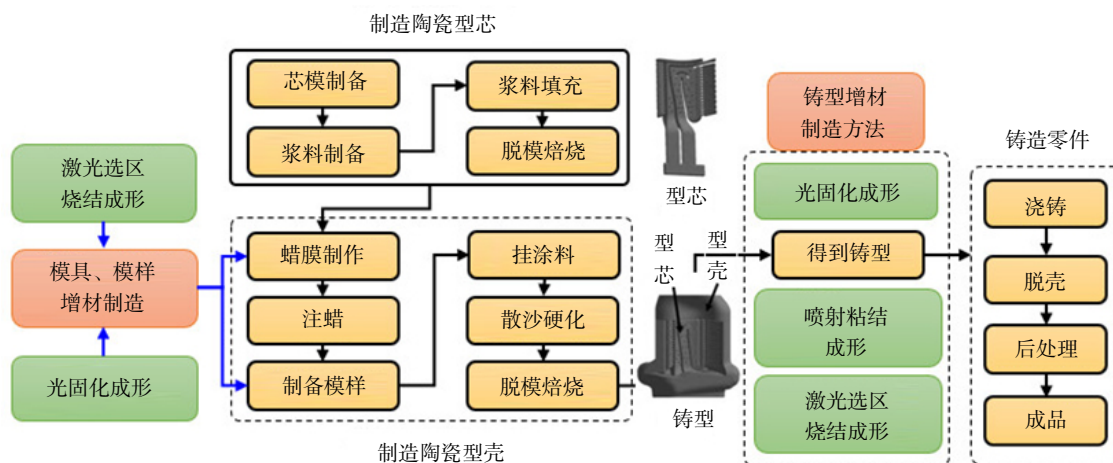


图 8 熔模铸造工艺流程

用于熔模精密铸造<sup>[39-40]</sup>。聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)具有良好的激光烧结性能,且烧结后具有较高强度,是最早用于 SLS 制备模样的材料。但 PC 熔点高、流动性不佳,国内外相关研究者对聚碳酸酯的替代材料,如聚苯乙烯(Polystyrene, PS)<sup>[41]</sup>与高抗冲聚苯乙烯(High Impact Polystyrene, HIPS)<sup>[42-43]</sup>进行研究,发现可以制备出具有良好尺寸精度和力学性能的烧结件(图 9)。此外,通过环氧树脂浸渍<sup>[43-44]</sup>或蜡渗<sup>[45-46]</sup>(图 10)后处理,可以进一步提高激光烧结零件的机械性能。

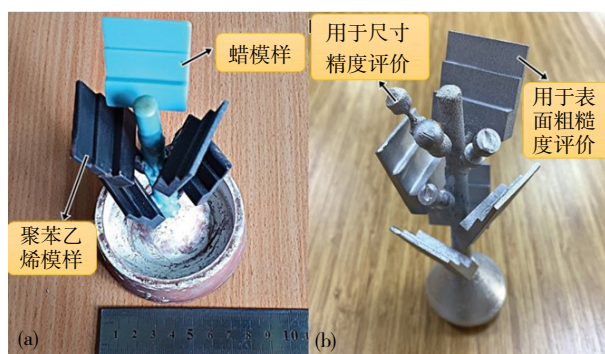


图 9 采用聚苯乙烯和蜡材料通过 SLS 制备熔模并对比铸件性能<sup>[41]</sup>

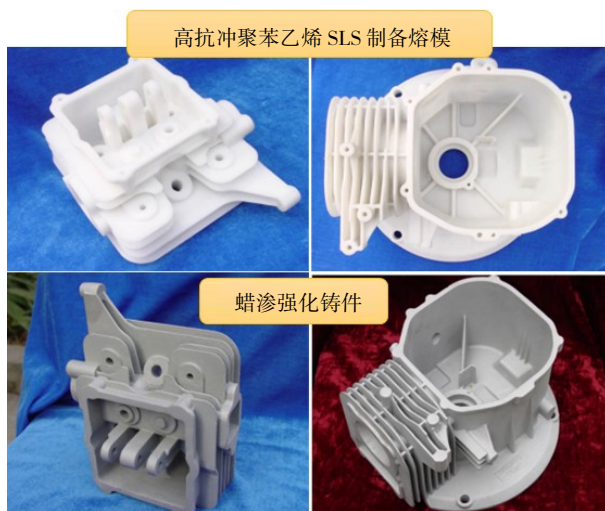


图 10 采用高抗冲聚苯乙烯 SLS 制备熔模并蜡渗强化铸件<sup>[45]</sup>

(2)光固化成形模样。以光敏树脂为主要材料,在特定光源照射下固化成为零件模样,用于后续型壳制备。但采用光敏树脂所制造的零件模样因其热膨胀系数较大,外裹型壳在焙烧过程中易出现胀裂现象,这是在熔模精密铸造领域应用光固化成形技术需解决的关键技术问题<sup>[47]</sup>。宗学文等<sup>[48-49]</sup>对光固化树脂熔模与型壳材料在高温烧结过程中

的热变形机理和型壳开裂条件进行了研究,并采用光固化成形工艺制得叶轮铸件的熔模,相比传统铸造技术可以降低 2/3 的技术成本和 4/5 的时间成本。姜耀林等<sup>[50]</sup>以闭式离心泵叶轮为研究对象,通过光固化技术制造叶轮及其浇注系统整体树脂熔模,并进行熔模精密铸造,成功制得闭式离心泵叶轮金属铸件。除了通过增材制造技术直接成形模样外,以增材制造方法制备内带冷却流道的蜡模也是提高蜡模成形质量和效率的一种方法<sup>[51]</sup>。

无论采用何种增材工艺制备零件模样,其目的都是为了获得优质的陶瓷铸型。故提高模样的外形尺寸精度和表面光洁度,以及约束模样在铸型制造过程中外形尺寸变化是关键,也是零件模样增材制造技术未来发展所要关注的重点。

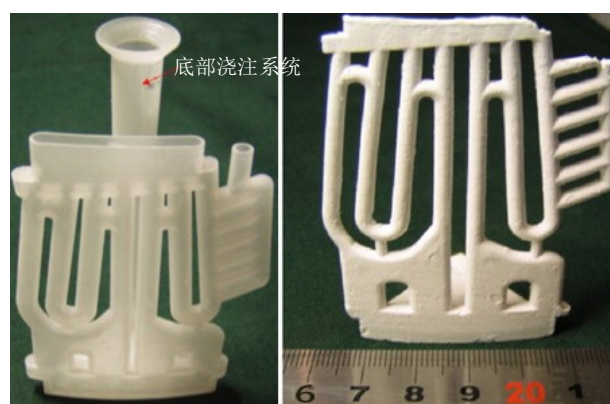
### 2.2.2 陶瓷型(芯)的增材制造方法

陶瓷型(芯)是熔模铸造工艺中的关键部件,其外形尺寸精度和型腔面粗糙度将直接决定铸件的外形质量。利用增材制造技术对陶瓷型(芯)进行高质量制造,可以解决传统加工成形手段难以成形复杂精细陶瓷结构的难题<sup>[37]</sup>。陶瓷增材制造技术在国外的初步应用约出现在 1990 年,而国内主要受制于专业陶瓷打印设备以及打印材料的成本,起步较晚。目前陶瓷型(芯)的主要增材工艺有光固化成形、喷射粘结成形和激光选区烧结成形,所用材料以氧化硅、氧化铝及其复合材料为主。

(1)光固化直接成形陶瓷型(芯)。使用激光固化光敏陶瓷浆料(光敏树脂+陶瓷粉体+添加剂)成形陶瓷坯体,经脱脂、烧结后获得陶瓷型(芯),能极大缩短制备周期。1996 年,由 Griffith 等<sup>[52]</sup>率先通过光固化技术直接成形致密陶瓷坯体。光敏陶瓷浆料的成分是影响成形陶瓷型(芯)质量的关键因素,华中科技大学<sup>[53]</sup>、西北工业大学<sup>[54]</sup>、中国运载火箭技术研究院空间物理重点实验室<sup>[55]</sup>的相关研究人员均对其进行了研究。陶瓷型(芯)的浆料应具备高固相含量、良好的流动性、低黏度以保证光固化 3D 打印过程中浆料良好的铺展性和型芯素坯固化后有足够的强度<sup>[56]</sup>。陶瓷坯体成形后的脱脂过程主要用于去除固化的光敏树脂等粘结剂,而烧结过程促进陶瓷颗粒的长大,脱脂→烧结工艺过程的良好设计能制备性能优异的陶瓷型芯,已有相关学者<sup>[57-58]</sup>对其进行了研究。光固化技术具有高分辨率

和效率优势,打印的陶瓷型(芯)有很高的表面光洁度,但受限于光源,可打印的陶瓷材料有限。

(2)光固化间接成形陶瓷型(芯)。首先采用光固化技术制备树脂模,再将陶瓷浆料注入树脂模中经固化、烧结后得到可用于浇注的陶瓷型(芯)。该过程中,陶瓷浆料在固化和烧结过程中的体积变化是影响最终陶瓷型(芯)尺寸精度的关键因素。西安交通大学李涤尘团队通过添加氧化镁粉末和研发新的烧结工艺控制了陶瓷芯的烧结收缩<sup>[59]</sup>;同时对光固化成形模样融化过程进行热力学分析,揭示了涡轮叶片陶瓷壳体破裂的原因,并提出了加入聚酰亚胺提高强度以防止壳体开裂的方法<sup>[60]</sup>。基于上述研究和光固化间接成形原理,该团队发明了一体化陶瓷铸型的型芯型壳定制方法(图 11),以此制备空心涡轮叶片<sup>[61]</sup>。此外,李涤尘团队还研究了熔模铸造光固化和非水基凝胶注模成形技术,分析了叔丁醇基氧化钙浆料的流变性能及凝胶参数对凝胶时间和凝胶强度的影响,制备了一种高性能 CaO 基整体陶瓷模具<sup>[62]</sup>。



光固化成形的树脂模具

烧结所得陶瓷芯

图 11 SLA 制备树脂模具注射-烧结陶瓷型芯<sup>[60]</sup>

(3)喷射粘结成形陶瓷型(芯)。麻省理工学院的 Sachs 等<sup>[63]</sup>早在 1990 年就采用喷射粘结成形技术制备出氧化铝陶瓷型壳(芯)。在粘结剂喷射过程中液态粘结剂喷出后会发生渗透现象,产生的误差会影响打印精度。而粘结剂的组成成分对陶瓷型芯的尺寸精度、表面粗糙度、抗弯强度等形性质量影响显著,通过喷射无机粘结剂<sup>[64-65]</sup>可以使陶瓷型(芯)在烧结后产生较高强度与较低收缩。故通过优化打印工艺减小渗透误差<sup>[66]</sup>、改善粘结剂体系与颗粒级配,并对陶瓷粉末进行改性,可以有效提高

型芯的综合性能。

(4)激光选区烧结成形陶瓷型(芯)。由于陶瓷材料的成形温度较高,目前激光选区烧结设备无法在短时间内实现陶瓷粉体颗粒的熔融粘接,故采取间接成形陶瓷型(芯)方法。通过激光选区烧结熔化陶瓷粉末表面的粘结剂,促使陶瓷粉末颗粒间粘结形成坯体,进行后续脱脂、烧结后制得所需陶瓷型壳(芯)。故激光选区烧结的陶瓷粉末一般需要表面包覆热塑性、热固性粘结剂,或者要求粉末颗粒加热后具有能相互粘结的性能<sup>[67]</sup>。华中科技大学的 Zhang 等<sup>[68]</sup>通过研究发现,合理的颗粒级配(粗粉混合适量细粉)能有效提高选择性激光烧结二氧化硅陶瓷的力学性能,抗弯强度可达 7.15 MPa;此外粘结剂的种类、引入方式以及加入量对于成形精度和强度有着重要影响。韩国的 Kim 等<sup>[69]</sup>分别采用粘结剂喷射成形和选择性激光烧结技术配合不同的粉末材料进行叶轮叶片用陶瓷芯的增材制造,采用莫来石粉体+酚醛树脂+选择性激光烧结方法制成的陶瓷芯强度更高、热膨胀系数更小,更适用于精密铸造。总之,通过选择性激光烧结方法制备的陶瓷型芯致密度较低、力学性能较弱,但是可以通过浸渍强化处理以提升性能。此外,通过减小晶粒尺寸和改变陶瓷材料的成分和结构,进一步改善激光功率和扫描间距,有助于提高陶瓷材料的强韧性能。

综上所述,制备陶瓷型(芯)的不同增材制造技术各有特点,增材制造的型芯性能还弱于传统铸造方法,如硬度、耐磨性等。因此,如何提升型芯的综合性能,是增材制造中重要的研究方向之一。目前解决方案主要包括以下 5 种:(1)优化制造参数<sup>[70]</sup>,调整喷嘴直径、喷嘴温度、层厚等,可以改变制造过程中的熔体流动速度和温度梯度等因素,从而影响型芯的性能。(2)优化材料特性<sup>[71]</sup>,添加碳纳米管、陶瓷等纳米颗粒,可以增强材料的强度、硬度、磨损性能等。(3)改进后处理工艺<sup>[72]</sup>,采用热处理、表面处理等方法,可以改变材料的晶体结构、表面形貌等因素,提高其机械性能、耐磨性等。(4)协同设计<sup>[73]</sup>,优化型芯的形状和结构等设计参数,以提高其综合性能,如采用多梯度结构、异种材料复合等设计方案,可以针对具体应用场景进行优化。(5)智能制造<sup>[74]</sup>,可以实现对生产过程的自

动化、数字化控制,提高型芯的一致性和稳定性,从而进一步提高其综合性能。

### 3 高性能模具零件的增材制造

增材制造技术在高性能模具零件制造方面具有诸多应用<sup>[75]</sup>。首先,增材制造技术可以实现高度定制化的设计。传统的模具制造通常需要进行复杂的加工和组装过程,而增材制造技术可以直接将设计文件转化为实体,实现快速、精确的制造过程,这使得设计师能够更灵活地调整模具的形状、结构和功能,以满足不同行业和产品的需求。其次,增材制造技术可以制造复杂形状的模具零件。传统的制造方法可能无法实现复杂形状的模具零件制造,而增材制造技术可以通过逐层堆积材料的方式制造出具有复杂几何结构的零件,这为模具设计带来了更大的自由度,可以实现更高效的功能整合和优化设计。第三,增材制造技术可以提高模具零件的性能和耐用性。通过增材制造,可以选择适合特定应用的高性能材料,如金属合金、陶瓷等,以提高模具零件的强度、硬度和耐磨性。此外,增材制造还可以实现材料的局部调控,例如调整材料的组织结构和晶粒大小,从而进一步提高模具零件的性能。第四,增材制造技术可以减少制造周期和成本。传统的模具制造通常需要进行多个加工步骤和组装过程,而增材制造技术可以将这些步骤简化为一个连续的制造过程,这不仅减少了制造周期,还降低了人工和设备成本。此外,增材制造还可以减少材料的浪费,提高资源利用率。最后,增材制造技术可以促进模具制造的可持续发展。由于增材制造可以实现精确的材料控制和定制化设计,因此可以减少能源消耗和环境污染。此外,增材制造还可以实现模具零件的修复和再

制造,延长其使用寿命,减少废弃物的产生。

增材制造技术可以制造具有结构功能一体化、轻质且超高强韧、耐极端工况或超强散热能力的新型结构,为高性能零件的制造提供新的解决方案。但是目前高性能零件增材制造的成本居高不下,对于模具等体积较大的产品进行整体高性能增材制造将产生巨大的经济成本。因此,以传统制造方法为主制造模具主体、以高性能增材制造技术为辅制造局部特殊的功能镶块,能用较低成本实现模具性能的显著提升,是目前模具行业采用的主流方法。

#### 3.1 带随形流道冷却镶块的增材制造

在注塑和压铸过程中,模具温度对成形件的质量和生产效率有重要的影响。模具型腔的冷却均匀性直接影响成形件的热残余应力,而热残余应力是产品变形的重要原因。模具型腔的冷却强度直接影响成形件的冷却时间,进而影响整个产品的生产周期和生产效率。因此,提升模具型腔的冷却性能,包括冷却强度和均匀性,是提升注塑件和铸件产品质量、提高产品生产率的关键。

模具型腔的冷却性能主要取决于模具材料热导率和模具内部冷却流道方案设计。美国麻省理工学院的 Sachs 教授早在 1997 年就提出了模具随形冷却技术的概念,认为与部件轮廓一致的冷却流道是控制注塑模具温度的最佳解决方案([http://www.simmtime.com/news\\_en.htm?dId=1114](http://www.simmtime.com/news_en.htm?dId=1114))。然而,受当时制造工艺的限制,随形冷却带来的模具制造复杂度和难度,使大部分模具制造商都对其望而却步。注塑和压铸模具中较为主流的冷却流道方案是由直通式管道互联形成的管道网(用于整体冷却)辅以冷却销(用于点冷却)构成(图 12)。该冷却流道设计方法可以解决绝大部分压铸和注塑零件

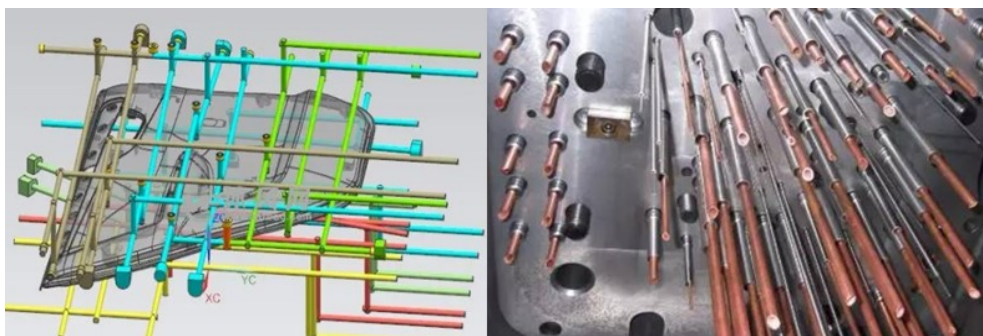


图 12 目前压铸和注塑行业主要采用的冷却流道方案

的冷却问题, 但该方法的冷却效果较为粗糙, 且对设计人员的经验要求较高, 经常会由于局部冷却不足而产生过热点, 导致模具返修, 难以满足现代模具工业生产的高质量和高效率要求。

对于如图 13(a)所示的异型零件<sup>[76]</sup>, 难以采用“横平竖直”的冷却流道获得满意的冷却效果, 而采用增材制造方法, 实现模具型面+内部随形流道的一体成形是获得模具良好冷却性能的有效手段。

### 3.1.1 带随形流道冷却镶块的增材制造设计

增材制造工艺在成形复杂结构方面的独特优势为模具内部冷却流道的设计提供了极大的设计自由度, 使得冷却模具的设计与制造摆脱了交叉钻孔的限制, 可以实现内部流道更靠近模具冷却表面的随形冷却流道设计。同时, 流道可以具有平滑过渡转角, 能减小冷却介质的流动阻力、增加对

流换热效率。设计人员还可以根据冷却性能要求设计不同的冷却流道方案, 以促进冷却的均匀性。强大的设计自由度带来无限可能的设计方案, 但为提高冷却流道设计效率和质量, 需要建立系统性的随形冷却流道增材制造设计方法。

基于传统设计范式的随形冷却流道设计流程包括: (1)综合考虑模腔形状、热源位置、冷却性能要求和管道流阻等因素, 确定冷却流道的布局并进行参数预设计。(2)建立数值模型, 并通过模流分析软件来验证预设计方案的冷却效果。(3)根据仿真所得温度场数据分析冷却流道的设计缺陷, 并对其进行优化。(4)反复迭代获得满意的模具冷却效果。虽然通过该方法必能获得合适的模具随形流道设计方案, 但是会产生较高的时间成本, 因此需要研发更为自动化和智能化的冷却流道设计方

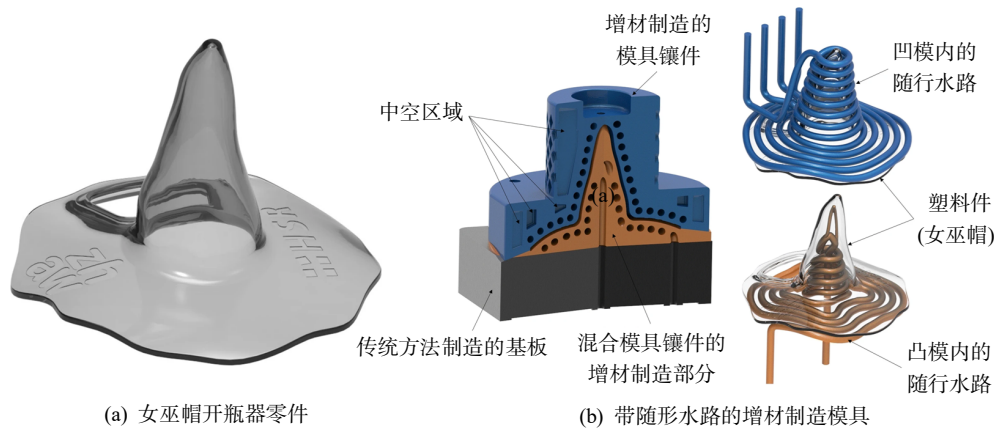
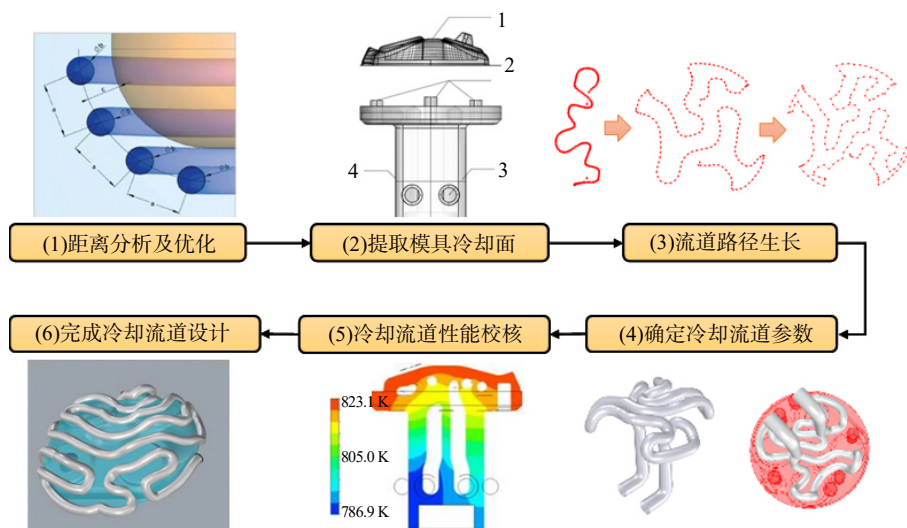


图 13 压铸模具冷却管道的增材制造应用<sup>[76]</sup>



1 为模具冷却面, 2 为需要避让的顶针孔和镶件孔, 3 和 4 分别为流道出入口。

图 14 随形冷却流道的创成式设计方法<sup>[77]</sup>

法. 文献[77]提出了一种随形冷却流道的创成式设计方法(图 14), 在确定流道出入口、顶针孔和镶件孔等避让位置基础上, 通过制定合理路径延伸规则和尺寸约束范围实现冷却流道的自适应设计. 经过流道结构参数调整和仿真评价, 获得最优冷却流道设计方案.

### 3.1.2 带随形流道冷却镶块的增材制造方法

在现有增材制造工艺中, 选择性激光熔化、电子束熔化(Electron Beam Melting, EBM)和激光近净成形(Laser Engineered Net Shaping, LENS)都可用来制造高性能模具零件. 但是 SLM 技术具有能量密度高、光斑尺寸小、成形精度高、冷却速度快的特点, 所得增材件有良好的表面粗糙度和尺寸精度, 是目前用于带随形流道冷却镶块零件增材制造的主要方法<sup>[18]</sup>. 采用 SLM 技术制造零件有直接打印和嫁接打印 2 种方法: 直接打印通过增材方法制造整个冷却镶块零件, 而嫁接打印指在机加工零件上增材制造出无法通过机加工制造的部分(图 15). Marin 等<sup>[78]</sup>提出一种机械加工和金属粉末增材制造结合的混合制造工艺, 用于随形冷却通道的镶块制造, 结果表明, 具有随形冷却通道的模具使注塑塑料零件的翘曲缩减为原有产品的 1/7, 沿着镶块的温度差缩减为原有模具的 1/10, 成形周期相比传统模具缩短约 36%. 吴成龙<sup>[79]</sup>采用光固化 3D 打印工艺, 制备用于铸造模中的随形流道冷却镶块. 实验结果表明, 利用光固化 3D 打印工艺所制备的随形流道冷却镶块具有更高的冷却效果和更好的制造精度, 适用于更为复杂的零件制造. 目前的金属 3D 打印相比成熟的传统制造工艺, 其效率偏低、成本偏高. 在制造一些尺寸较大的模具工件时, 用传统机加工制造基座部分并在基座上面进行嫁接打印, 可显著降低打印成本, 缩短打印时间, 而其难点在于对基座材料有要求, 以及在机加工至增材制造过程中的零件定位.

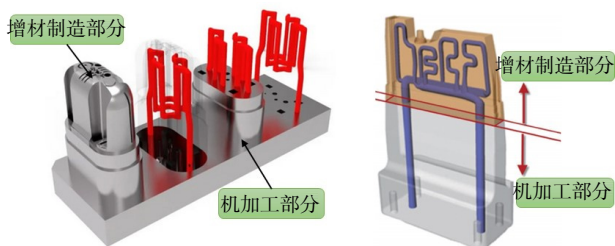


图 15 模具零件嫁接打印方法

### 3.1.3 带随形流道冷却镶块的增材制造应用研究

在注塑模中某些细小型芯内部难以通过传统加工方式制造冷却水路, 故在注射过程中依靠自然冷却, 热惯性不仅会导致注射周期加长, 还易在注塑件表面产生缩痕和变形缺陷. 而采用增材制造技术可在细长型芯内部构造螺旋式冷却水路<sup>[80]</sup>, 增大热交换面积和冷却介质紊流度, 实现细长型芯充分且均匀冷却. 德国的 SLM Solutions、EOS<sup>[81]</sup>、Concept Laser、Technische Universität Dortmund, 英国的 Renishaw、University of Central Lancashire 和美国的 3D Systems、Honeywell 等都已开始采用增材制造技术制造随形冷却流道模具, 经济效益显著. 针对某款铝合金压铸模具的浇口分流器(图 16), 基于德国通快 TruPrint 3000, 通过 SLM 方法制造, 使其获得随形冷却流道, 可明显提升浇口分流器的冷却性能, 使压铸模具开模时间减少 30%<sup>[82]</sup>.

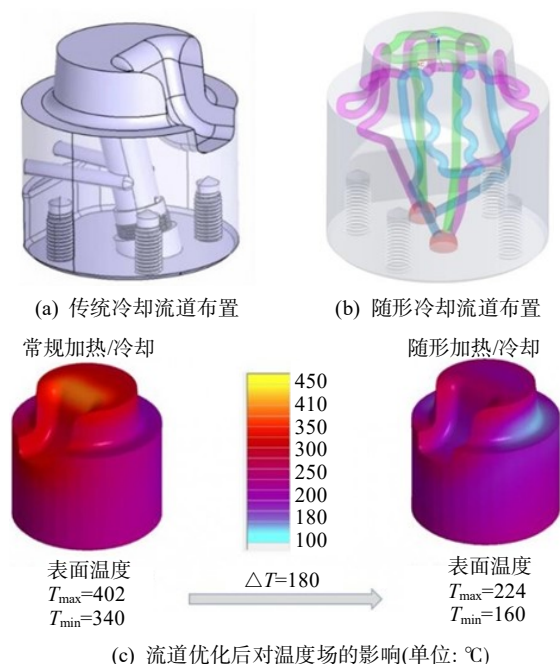


图 16 某浇口分流器内部冷却水道的优化设计<sup>[82]</sup>

针对 ABB OY 公司生产的电缆套管注塑模具镶件, 芬兰国家技术研究中心使用 SLM®125 设备制造内带随形冷却流道的模具镶件(图 17). 相比实心模具镶块需 30 s 冷却时间, 后者只需 6 s 即可完成制件冷却, 且生产周期从 60.5 s 减至 14.7 s<sup>[83]</sup>. 在 2021 亚洲 3D 打印、增材制造展览会(TCT)上, 知名模具服务商(Laser Bearbeitungs Center, LBC; 展位号 G14)展示了利用 EOS 直接激光烧结技术优化

的模具镶件, 其内部随形冷却流道使模具镶件的冷却周期缩短了 55%, 使用增材技术后, 该公司的生产成本每年可节省近 2 万欧元<sup>[84]</sup>。

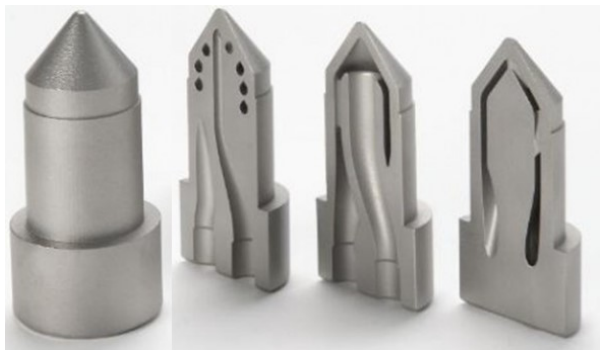


图 17 内带随形冷却流道的电缆套管注塑模具镶件<sup>[83]</sup>

近年来, 国内众多高校、科研院所及企业也开始将增材技术应用于高性能模具零件的设计制造, 如华中科技大学(图 18)<sup>[85]</sup>、华南理工大学<sup>[86]</sup>、大连理工大学、西安铂力特增材技术股份有限公司<sup>[87]</sup>、武汉华科三维科技有限公司、上海悦瑞三维科技股份有限公司、深圳光韵达光电科技股份有限公司和东江模具(深圳)有限公司<sup>[88]</sup>等。



图 18 华中科技大学增材制造的模具镶块<sup>[85]</sup>

西安铂力特增材技术股份有限公司在实现复杂流道结构及设计优化方面进行了长期探索(图 19), 能够根据客户的具体需求量身定制模具内部的复杂流道结构, 解决其生产难题<sup>[87]</sup>。



图 19 铂力特增材技术股份有限公司制造的模具镶块<sup>[87]</sup>

东江模具(深圳)有限公司通过增减材集成工艺实现带冷却流道模仁的高效制作<sup>[88]</sup>, 即在通过机加工方法制得底座基础上, 采用嫁接增材制造在底座上增材制造出带有随形冷却流道的部分(图 20), 如此所得模具能显著缩短生产周期(22%)、提高月产量(28%)。该公司表示, 上述复合工艺能用于大部分需要随形冷却流道的模具制造, 而且制造的模具具有很好的质量。



(a) 随形流道设计 (b) 减材制造所得底座 (c) 嫁接打印所得样件

图 20 东江模具(深圳)有限公司增减材集成的模具零件<sup>[88]</sup>

北京航空航天大学宁波创新研究院增材制造中心与宁波本地压铸企业合作, 针对其细长型冷却形块无法采用常规减材方法制造内部冷却流道的情况, 采用流道优化设计+激光粉末床选区熔化方法制造了带随形冷却流道的冷却镶块(图 21), 并成功投入实际生产, 且服役情况良好。



图 21 北京航空航天大学宁波创新研究院增材制造中心制造的模具冷却镶块

### 3.2 其他高性能模具零件的增材制造

除了制造带随形水路的冷却镶块以显著提高其散热性能外, 增材制造的高性能模具零件还有其他一些应用。

其一是高性能轮胎模具。因轮胎的性能取决于轮胎模具中的花纹设计, 且花纹的结构往往呈现出空间三维扭曲、具有弧度和角度多的特点, 这就导致难以用传统加工手段精准完成配套模具表面纹路的制造。而模具的加工精密程度会直接影响轮胎的精度和质量, 甚至是轮胎安全、驾驶舒适

度等. 故通过选区激光熔化增材制造实现轮胎花纹设计的复杂性, 是一种有效的方法. 目前在轮胎模具制造领域, 3D 打印技术有 2 个层面的应用: (1) 复杂轮胎模具, 尤其是高性能要求的冬季胎或雪地胎模具中的钢片制造, 这一技术已在国内外轮胎模具制造知名企业投入使用. (2) 复杂花纹模具的一体化制造, 虽然该应用目前仍存在易变形、成本高等应用难点, 但在工序简化和提升轮胎性能方面极具优势. 图 22 为加工方案公司(Georg Fischer Ltd)采用增材制造方法为米其林公司提供的轮胎模具钢片<sup>[89]</sup>和复杂花纹模具<sup>[90]</sup>.

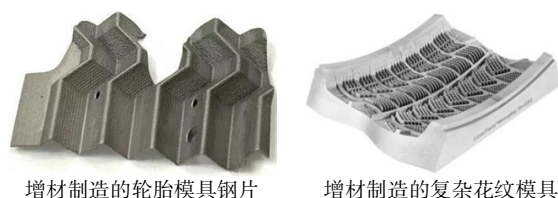


图 22 GF 加工方案公司在轮胎模具的应用<sup>[89-90]</sup>

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

相比基于减材制造理念的传统切削制造技术, 增材制造技术的核心优势在于: 制造理念的创新带来设计、制造方面的高度灵活性和自由度, 特别适合某些具有复杂形状特征或特殊性能要求产品的生产制造. 虽然增材制造技术已出现 40 多年, 但目前仍处于高速发展阶段. 围绕高性能、高效率、低成本的目标, 增材制造技术不断推陈出新, 还远未达到瓶颈状态. 在这种技术剧烈迭代的情况下, 增材制造技术难以在产业界构筑稳定的产业链, 导致增材制造技术的成本居高不下. 目前, 增材制造技术主要应用于航空航天、武器装备等关乎国家安全的领域, 而在民用市场由于其性价比不高使其应用受限, 增材制造所用设备和原材料的价格是影响增材制造技术工业化普及程度的关键因素. 在模具行业, 目前增材制造技术的应用主要集中在模具快速原型制造和高性能模具零件制造两个方面.

在模具快速原型制造方面的主要应用: 通过喷射粘结成形、激光选区烧结和光固化成形技术快速、精准制造砂型铸造和熔模铸造工艺中的模具型腔, 以缩短模具开发周期. 通过模具进行零件生产,

模具的制造成本不可忽视. 对于砂型铸造和熔模铸造工艺, 其优势在于模具制造成本低、可以低成本实现形状复杂零件的批量化生产; 缺点在于模具制备工序多、时间长. 而对于喷射粘结成形、激光选区烧结和光固化成形技术而言, 相关设备的国产化以及原材料(砂粒、陶瓷粉末、粘结剂)来源广泛, 使得采用上述增材制造技术制备砂型或陶瓷模具能够以较低的投入成本、较高的生产效率为民营资本所接受. 基于增材制造技术实现模具快速原型制造, 关键需要解决如何快速制造具有高型面质量的模具型腔、如何使模腔的型面质量在生产过程中保持稳定两个问题. 故需要针对不同的模腔服役工况去优化原材料成分和增材工艺参数, 以获得尺寸精度更高、表面光洁度更好、服役性能更稳定的模具型腔, 而这也是目前国内外相关单位重点关注和争相研发的内容.

在高性能模具零件制造方面的主要应用: 通过选择性激光熔化技术制造内含随形水路的高性能冷却镶块, 是增材制造技术在压铸和注塑模具中的主要应用. 因为 SLM 技术是利用金属粉末在光束激光照射下迅速熔化粘合, 并在激光束离开后迅速冷却固化以获得高性能零件, 故对粉末质量和设备性能都有较高的要求. SLM 设备的高昂价格、粉末生产体系的不完善、专业人员的稀少等原因导致采用 SLM 技术制造零件的成本居高不下. 因此, 将 SLM 技术用于少部分关键模具零部件的制造, 如冷却镶块、轮胎模具钢片等, 以有限的投入获得显著的模具性能提升是目前高端模具制造企业普遍采用的方法. 采用 SLM 技术制造模具零件的目标之一是获得优于传统制造方法的性能, 如散热好、透气好、寿命长等, 而这些性能由粉末组分、SLM 工艺和零件结构等综合决定, 故进行材料-结构-性能一体化增材设计制造研究是实现高性能零件增材制造的根本与关键.

### 4.2 展望

未来的增材制造技术在制造模具方面具有广阔的应用前景. 首先, 增材制造技术可以实现高度定制化的模具设计, 满足不同行业和产品的需求. 其次, 增材制造技术可以快速制造复杂形状的模具, 缩短生产周期、减少生产成本. 再次, 增材制造技术还可以实现模具的功能整合, 将多个部件

合并为单一的模具,提高生产效率。

然而,增材制造技术在制造模具方面仍面临一些困难。首先,制造大型模具受到增材制造设备尺寸的限制,目前的增材制造设备尺寸有限,无法满足大型模具的需求。其次,在增材制造过程中可能出现材料性能不均匀、残余应力等问题,影响模具的质量和使用寿命。此外,增材制造技术的制造速度相对较慢,无法满足大规模生产的需求。

为了克服这些难题,未来需要解决以下几个问题:(1)需要开发更大尺寸的增材制造设备,以满足大型模具制造的需求。(2)需要进一步研究材料的性能和特性,以提高模具的质量和耐用性。(3)需要改进增材制造的速度和效率,以适应大规模生产的需求。(4)需要加强增材制造技术的标准化和规范化,以确保模具的制造质量和稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 赵雪榛. 2022 年中国模具行业全景速览: 产品出口规模扩大, 行业市场加速扩容[EB/OL]. [2023-02-27]. <https://www.chyxx.com/industry/1137362.html>.
- [2] 张亮亮, 周阳, 刘世锋, 等. 模具钢增材制造及其性能的研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(3):1-8.
- [3] 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(4):1-4.
- [4] Abdulhameed O, Al-Ahmari A, Ameen W, et al. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications[EB/OL]. [2023-02-27]. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814018822880>.
- [5] 黄树槐, 张祥林, 马黎, 等. 快速原型制造技术的进展[J]. 中国机械工程, 1997, 8(5):8-12.
- [6] Emanuel M S, John S H, Michael J C, et al. Three-dimensional printing techniques: US05204055A[P]. 1993-04-20.
- [7] Utela B, Storti D, Anderson R, et al. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2008, 10(2):96-104.
- [8] Gilmer D, Han L, Hong E, et al. An *in situ* crosslinking binder for binder jet additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35:101341.
- [9] Deckard C R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering: US5316580[P]. 1994-05-31.
- [10] Awad A, Fina F, Goyanes A, et al. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2020, 586:119594.
- [11] Wikipedia. Selective laser sintering[EB/OL]. [2023-02-26]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_sintering](https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering).
- [12] Griffith M L, Keicher D M, Atwood C L, et al. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)[EB/OL]. [2023-02-26]. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/69929>.
- [13] 史玉升, 鲁中良, 章文献, 等. 选择性激光熔化快速成形技术与装备[J]. 中国表面工程, 2006, 19(S1):150-153.
- [14] Hull C W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography: US4575330[P]. 1986-03-11.
- [15] 胡可辉, 赵鹏程, 吕志刚. 光固化增材制造技术在熔模铸造中的应用[J]. 铸造, 2021, 70(2):155-159.
- [16] 靳逸飞, 丁永春, 温家浩. 立体光固化增材制造技术应用现状及展望[J]. 金属加工(热加工), 2023(3):18-23.
- [17] 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.
- [18] 文世峰, 季宪泰, 周燕, 等. 激光选区熔化成形模具钢的发展现状及前景[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1):47-57.
- [19] Mitra S, Rodríguez de Castro A, El Mansori M. On the rapid manufacturing process of functional 3D printed sand molds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42:202-212.
- [20] Hawaldar N, Zhang J. A comparative study of fabrication of sand casting mold using additive manufacturing and conventional process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1):1037-1045.
- [21] Snelling D A, Williams C B, Druschitz A P. Mechanical and material properties of castings produced via 3D printed molds[J]. Additive Manufacturing, 2019, 27:199-207.
- [22] 赵火平. 微喷射粘结快速成形铸造型芯关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [23] 李慧. 基于增材制造技术的无模铸型工艺优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [24] 余洛生, 刘丰, 刘丽敏, 等. 3D 打印呋喃树脂砂型收缩性能研究[J]. 铸造, 2022, 71(5):614-618.
- [25] 李征, 单忠德, 孙启利, 等. 树脂渗透对砂型 3D 打印成型精度影响机理研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(4):247-251.
- [26] Upadhyay M, Sivarupan T, El Mansori M. 3D printing for rapid sand casting: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29:211-220.
- [27] Fan Z, Huang N Y, Li Y, et al. Investigating on casting

- mold (or core) making with coated sand by the selected laser sintering[J]. *China Foundry*, 2004, 1(2):122-126.
- [28] Wen S F, Shen Q W, Wei Q S, et al. Material optimization and post-processing of sand moulds manufactured by the selective laser sintering of binder-coated  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sands[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 93-102.
- [29] 司晨, 党惊知, 李玉新, 等. 激光 3D 打印用覆膜砂的制备工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(5):93-95.
- [30] 梁小文, 王德清, 徐志锋, 等. 选区激光烧结用覆膜铝砂的制备及其SLS成形工艺研究[J]. *铸造*, 2017, 66(8): 814-819; 825.
- [31] Xu Z F, Liang P, Yang W, et al. Effects of laser energy density on forming accuracy and tensile strength of selective laser sintering resin coated sands[J]. *China Foundry*, 2014, 11(3):151-156.
- [32] 薄夫祥, 何冰, 蹇雪梅. 覆膜砂选择性激光烧结工艺[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9):247-253.
- [33] 王春风, 沈其文, 庞祖高. SLS 快速制造大型复杂四气门六缸柴油发动机蠕墨铸铁缸盖[C]//2010 年中国铸造活动周论文集. 杭州, 2010:461-467.
- [34] 贺斌, 李显达, 胡平, 等. 基于数值模拟和 3D 打印的热冲压模具随形水道设计制造研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(19):180-188.
- [35] Tang Y, Fuh J Y H, Loh H T, et al. Direct laser sintering of a silica sand[J]. *Materials & Design*, 2003, 24(8):623-629.
- [36] Kanyo J E, Schafföner S, Uwanyuze R S, et al. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(15):4955-4973.
- [37] 刘岩松, 李文博, 刘永胜, 等. 3D 打印陶瓷铸型研究与应用进展[J]. *材料工程*, 2022, 50(7):18-29.
- [38] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(9):38-52.
- [39] 薛旷华. RP 技术在熔模铸造中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [40] 冯涛, 孙建民, 宗贵升. 用选择性激光烧结实现快速精密铸造[J]. *中国机械工程*, 1997, 8(5):21-23.
- [41] Özer G, Özbay B, Öter Z Ç, et al. Investigation of the surface quality and dimensional accuracy of polymer patterns produced by selective laser sintering (SLS) method for investment casting (IC)[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2020, 33(2/3):146-152.
- [42] Wang D H, Dong A P, Zhu G L, et al. Rapid casting of complex impeller based on 3D printing wax pattern and simulation optimization[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(9): 2629-2635.
- [43] Shi Y S, Wang Y, Chen J B, et al. Experimental investigation into the selective laser sintering of high-impact polystyrene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 108(1):535-540.
- [44] Shi Y, Chen J, Wang Y, et al. Study of the selective laser sintering of polycarbonate and postprocess for parts reinforcement[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2007, 221(1):37-42.
- [45] Yang J S, Shi Y S, Shen Q W, et al. Selective laser sintering of HIPS and investment casting technology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(4): 1901-1908.
- [46] 杨来侠, 白祥, 徐超, 等. 基于 SLS 的诱导轮快速熔模铸造工艺研究[J]. *铸造*, 2019, 68(10):1121-1126.
- [47] 姜耀林, 邵中魁. 3D 打印在快速熔模精密铸造技术中的应用[J]. *机电工程*, 2017, 34(1):48-51.
- [48] 宗学文, 刘亚雄, 魏罡, 等. 光固化立体造型熔模铸造工艺的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(1):87-90; 95.
- [49] 宗学文, 刘洁, 徐文博. 基于 SLA 的复杂零件低压熔模快速铸造工艺[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(3): 300-303.
- [50] 姜耀林, 何朝辉, 邵中魁. 基于 ProCAST 及 3D 打印技术的闭式叶轮快速铸造技术研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(9):1166-1169; 1191.
- [51] 鲁中良, 周江平, 杨东升, 等. 基于 3D 打印技术的预研涡轮叶片精铸蜡型快速制造方法[J]. *航空学报*, 2015, 36(2):651-660.
- [52] Griffith M L, Halloran J W. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 79(10):2601-2608.
- [53] Zheng W, Wu J M, Chen S, et al. Influence of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content on mechanical properties of silica-based ceramic cores prepared by stereolithography[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, 10(6):1381-1388.
- [54] Li H, Liu Y S, Li W B, et al. Effect of zirconia content and particle size on the properties of 3D-printed alumina-based ceramic cores[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, 104(11):6015-6028.
- [55] 刘国仟, 闫长海, 张可强, 等. 立体光刻增材制造中固含量对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷性能的影响[J]. *无机材料学报*, 2022, 37(3):353-360.
- [56] 赵世鑫, 龚雨波, 周起, 等. 3D 打印陶瓷型芯研究进展[J/OL]. [2023-03-17]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001->

- 3814.20221152.
- [57] 曾勇, 张子佳, 孙立君, 等. 3D 打印氧化铝陶瓷的气氛脱脂热处理工艺研究[J]. 无机材料学报, 2022, 37(3): 333-337.
- [58] Li H, Liu Y S, Liu Y S, et al. Influence of debinding holding time on mechanical properties of 3D-printed alumina ceramic cores[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(4):4884-4894.
- [59] Wu H H, Li D C, Tang Y P, et al. Rapid fabrication of alumina-based ceramic cores for gas turbine blades by stereolithography and gelcasting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(18/19):5886-5891.
- [60] Chen X J, Li D C, Wu H H, et al. Analysis of ceramic shell cracking in stereolithography-based rapid casting of turbine blade[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55(5):447-455.
- [61] 李涤尘, 鲁中良, 荆慧. 一种空心涡轮叶片一体化陶瓷铸型的型芯型壳定制方法: CN103360079A[P]. 2013-10-23.
- [62] Yang Q, Zhu W J, Lu Z L, et al. Rapid fabrication of high-performance CaO-based integral ceramic mould by stereolithography and non-aqueous gelcasting[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, 12(6):934.
- [63] Sachs E, Cima M, Cornie J. Three-dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a CAD model[J]. *CIRP Annals*, 1990, 39(1):201-204.
- [64] Zhao H P, Ye C S, Xiong S H, et al. Fabricating an effective calcium zirconate layer over the calcia grains via binder-jet 3D-printing for improving the properties of calcia ceramic cores[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32:101025.
- [65] Huang S J, Ye C S, Zhao H P, et al. Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 29: 100802.
- [66] 杨伟东, 高翔宇, 刘卫胜, 等. 基于微滴喷射的3DP工艺中渗透误差补偿算法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21):269-278.
- [67] 郑玉惠, 余欢, 徐志锋, 等. 激光选区烧结陶瓷粉末材料的研究进展[J]. 铸造技术, 2009, 30(2):260-264.
- [68] Zhang J, Zheng W, Wu J M, et al. Effects of particle grading on properties of silica ceramics prepared by selective laser sintering[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(1):1173-1180.
- [69] Kim E H, Choi H H, Jung Y G. Fabrication of a ceramic core for an impeller blade using a 3D printing technique and inorganic binder[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 53:43-47.
- [70] Shamsaei N, Yadollahi A, Bian L, et al. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 8:12-35.
- [71] Mai D S, Doan T K, Paris H. Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties[J]. *Engineering Science and Technology: An International Journal*, 2021, 24(4):1015-1026.
- [72] Chao Q, Thomas S, Birbilis N, et al. The effect of post-processing heat treatment on the microstructure, residual stress and mechanical properties of selective laser melted 316L stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 821:141611.
- [73] Wang X, Qin R, Chen B, et al. Multi-scale collaborative optimization of lattice structures using laser additive manufacturing[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 222:107257.
- [74] Li X, Jia X, Yang Q, et al. Quality analysis in metal additive manufacturing with deep learning[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, 31:2003-2017.
- [75] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. *Science*, 2021, 372(6545):eabg1487.
- [76] Kirchheim A, Katrodiya Y, Zumofen L, et al. Dynamic conformal cooling improves injection molding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(1):107-116.
- [77] 3DScienceValley. 随形冷却流道可以自动生成吗?浅谈创成式设计在其中的应用[EB/OL]. [2023-03-26]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=24989>.
- [78] Marin F, Souza A F, Ahren C H, et al. A new hybrid process combining machining and selective laser melting to manufacture an advanced concept of conformal cooling channels for plastic injection molds[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113:1561-1576.
- [79] 吴成龙. 基于3D打印的随形冷却水道注塑模设计与制造技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [80] 伍仕雄, 杨安民. 金属增材制造技术在模具开发中的应用[J]. 模具制造, 2017, 17(3):68-71.
- [81] Ahn D G. Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools – State of the art[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(5): 925-938.

- [82] 3DScienceValley. 铝合金压铸模具开模时间减少 30%! 3D 打印冷却水路起关键作用[EB/OL]. [2023-03-26]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=21988>.
- [83] 3DScienceValley. SLM 金属 3D 打印技术为模具行业带来新的解决方案[EB/OL]. [2023-03-26]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=19126>.
- [84] 3DScienceValley. 来 TCT 亚洲展, 全面探索 3D 打印随形冷却应用[EB/OL]. [2023-03-26]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=22728>.
- [85] 魏青松. [例 47]激光选区熔化技术 3D 打印模具钢工艺及应用[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6):F0002.
- [86] 刘斌, 谭景焕, 吴成龙. 基于 3D 打印的随形冷却水道注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(10):71-74.
- [87] 3DScienceValley. 实现复杂的冷却流道, 铂力特 3D 打印随形冷却模具[EB/OL]. [2023-03-20]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=11195>.
- [88] 3DScienceValley. 东江模具成功案例-嫁接打印在智能手表包装盒生产中的应用[EB/OL]. [2023-03-17]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=22405>.
- [89] 3DScienceValley. 钢片还是复杂花纹一体化模具? 3D 打印在轮胎模具制造中的两种应用(上篇)[EB/OL]. [2023-03-20]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=18053>.
- [90] 3DScienceValley. 钢片还是复杂花纹一体化模具? 3D 打印在轮胎模具制造中的两种应用(下篇)[EB/OL]. [2023-03-20]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=20470>.

## Overview of advanced additive manufacturing technology in die and mold industry

CHEN Long<sup>1</sup>, ZHANG Jikui<sup>1</sup>, CAO Miao<sup>2</sup>, MEI Bizhou<sup>3</sup>, QI Shijie<sup>1</sup>, XIE Chongyang<sup>4</sup>, DENG Yimin<sup>4</sup>

(1. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315800, China;

2. Ningbo Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315103, China;

3. Zhejiang Yiduan Precision Machinery Co., Ltd., Ningbo 315700, China;

4. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Die and mold play the important role in modern industrial production, and the appearance and industrialization of additive manufacturing technology has brought changes to the die and mold industry. In this paper, the main additive manufacturing technologies applied in die and mold industry, including binder jetting, selective laser sintering, selective laser melting and stereo lithography appearance, are briefly introduced. At the same time, according to two typical application fields of additive manufacturing technology, namely “mold rapid prototyping manufacturing” and “high performance parts manufacturing”, the specific application methods of additive manufacturing technology were analyzed, and the relevant research results at home and abroad were summarized. Finally, the key problem to be solved in the mass application of additive manufacturing technology in die and mold industry is “how to improve the cost performance of additive manufacturing technology compared with traditional manufacturing technology through the study of raw materials, process and equipment”, and the future development of additive manufacturing technology in the mold industry is prospected.

**Key words:** die and mold; additive manufacturing; rapid prototyping of molds; high performance manufacturing

(责任编辑 史小丽)