

增材制造技术在铸造中的应用

樊自田, 杨力, 唐世艳

(华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)



樊自田, 华中科技大学二级教授、博士生导师、教学名师、材料科学与工程学院副院长, 国务院特殊津贴专家、全国宝钢优秀教师。现兼任全国铸造学会副理事长、全国工程专业认证专家,《铸造》《特种铸造及有色合金》等杂志编委副主任,《China Foundry》等杂志编委。

长期从事铸造材料、工艺及装备技术研究与教学工作, 主要研究方向为: 铝镁合金材料及其精密铸造技术、绿色铸造技术与理论、3D打印快速铸造技术等。主持完成了国家级科研、教研项目等20余项, 省部级及企业合作研究项目60余项。在国内外重要期刊和国际会议上发表了研究论文500余篇, 获国家发明专利授权36项, 主编出版著作及教材12部, 以第1获奖人获得省部级科技(教学)成果一等奖2项、二等奖2项、三等奖2项。

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)01-0001-16

基金项目:

国家自然科学基金重点项目(59635040); 国家自然科学基金面上项目(51775204, 51375190); 国家重点研发计划项目(2020YFB2008300, 2020YFB2008304)。

收稿日期:

2020-08-06。

摘要: 增材制造技术在铸造中的应用是增材制造技术应用的主要领域之一。它可在无模具条件下直接制备铸造型(芯)、快速浇注复杂铸件。将增材制造与传统铸造技术相结合, 打破了传统铸造工艺束缚, 提高了铸造柔性, 改善了铸造环境; 可实现零件“自由铸造”, 极大减少加工工序, 缩短制造周期。本文概述了增材制造技术的基本原理及其国内外发展概况, 重点介绍了几种主要的适用于铸造领域的增材制造技术发展现状, 包括喷射粘结成形、激光选区烧结成形、光固化成形、分层挤出成形等, 最后展望了未来增材制造技术在铸造领域中的发展方向。

关键词: 增材制造; 快速成形; 3D打印; 铸造工艺; 快速铸造

增材制造(Additive Manufacturing, AM), 早期称为快速成形制造(Rapid Prototyping Manufacturing, RPM)、近期宣传报导上多称为3D打印(Three Dimensional Printing, 3DP)。它本质是基于“离散/堆积”原理, 根据计算机辅助设计产生的零件进行三维数据处理, 按高度方向离散化, 通过成形机将材料一层一层加工并堆积成整个制件。

国外对增材制造技术的研究始于20世纪80年代初期^[1]。1984年Hull^[2]发明了将数字资源打印成三维立体模型的技术, 1986年3D Systems公司成立, 并于1988年生产了第一台光固化成形机(Stereolithography Apparatus, SLA); 1989年德克萨斯大学奥斯汀分校Deckard与Beaman^[3]发明了选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术; 1989年麻省理工教授Emanuel Sachs^[4]最早申请喷射粘结成形(Three-dimensional printing, 3DP)技术专利; 1989年Crump等人^[5]申请了熔融沉积成形(Fused deposition modelling, FDM)技术发明专利, 并于1993年授权; 1997年Cesarano等人^[6]申请浆料直写(Direct Ink Writing, DIW)成形技术发明专利, 并于2000年授权。近几十年来, 国外增材制造技术得到快速发展, 涌现出了一批公司, 包括3D Systems、ExOne、Voxeljet、SLM Solutions等^[7]。各国对增材制造技术的发展也越来越重视, 2019年德国经济和能源部发布《国家工业战略2030》草案中, 将增材制造列为十个工业领域“关键工业部门”之一; 美国GE公司为代表的航空应用企业计划2021年启用一万台金属打印机, 显示了增材制造技术的颠覆性意义^[8]。

国内自1990年起开始对增材制造技术进行基础研究工作^[9-10], 华中理工大学于20世纪90年代成功开发了分层实体制造(LOM)打印机, 在快速成形设备、材料及应用方面进行了大量研究, 同时进行选区激光烧结(SLS)设备系统的研制和开发; 同期, 清华大学研制成功了一种“M-RPMS型多功能快速原型制造系统”, 西安交通大学开展了大量光固化设备及材料研究, 北京隆源自动化成形系统有限公司开展SLS成

形材料及工艺研究。虽然国内增材制造技术相对国外起步较晚，但目前在某些领域已经达到了国际先进水平，如共享装备股份有限公司在2015推出了工艺、材料、软件、集成及设备全部为国产化的工业级铸造3D打印机，并涌现出一批具有代表性的企业，如铂力特增材技术股份有限公司、华曙高科技有限责任公司、武汉华科三维科技有限公司等。

经过近40年的发展，增材制造技术在机械工业制造、航空航天、汽车、陶瓷、铸造砂芯、生物、医疗、食品、鞋服、建筑等领域展现出重大应用价值和广阔发展前景，突破了传统制造（冷、热加工）模式，是制造业领域的一项重大技术成就，并且随着这一技术的发展，其应用领域还将不断扩大，成形材料广泛，主要包括塑料、金属、陶瓷等^[11-13]。

将增材制造与传统铸造技术相结合^[14]，可充分发挥增材制造的技术优势，提高铸造柔性，从而极大降低产品研发创新成本，缩短创新研发周期，提高新产品投产的一次成功率；拓展产品创意与创新空间，无需任何模具就能制造出传统工艺无法加工的零部件，极大增强工艺的实现能力，对推动传统铸造的发展与转型具有重要的理论与实际意义。

美国、日本及西欧国家等从20世纪90年代起开始研究增材制造技术在传统铸造领域的应用^[15]，例如美国Pratt & Whitney实验室已于1994年制造了2 000个铸件^[10]。同时期，中国的华中理工大学、清华大学、北京隆源自动化成形系统有限公司、西安交通大学等也开始了快速铸造技术研究工作^[16-17]，例如华中科技大学于1998年使用自主研发的SLS设备系统制备出了覆膜砂

试验铸件^[18]。

增材制造技术的分支众多，目前应用于铸造领域的增材制造技术主要包括喷射粘结成形、激光选区烧结成形、光固化成形等^[19-20]，本文重点介绍了上述几种主要的适用于铸造领域的增材制造技术与发展趋势，最后展望了未来增材制造技术在铸造领域的发展方向。

1 喷射粘结成形技术（3DP）

喷射粘结成形（即3DP，三维打印）技术，于1989年由麻省理工学院提出^[4]，从那时起就开始用于制备快速铸造所需的模样^[7]，清华大学在喷射粘结成形基础上较早提出了快速无模铸型制造技术（PCM）。如今发展较为成熟的3DP设备公司主要有美国的ExOne、德国VoxelJet等，国内的有宁夏共享集团有限公司、广东峰华卓立科技股份有限公司、武汉易制科技有限公司等，相关的3DP典型设备参数如表1所示^[7, 21-23]。喷射粘结成形工作原理是将粉体材料铺在工作台上，通过打印头把粘结剂以液滴的形式喷到选定区域，从而将粉末粘结在一起，打印完一层后工作台下下降一个层高，重复上述过程，打印完成后零件经过固化建立一定强度后进行清粉处理，最后通过后处理即获得所需的构件^[24-26]。目前，喷射粘结成形可制备砂型（芯）、陶瓷型（芯），主要应用于砂型铸造、熔模铸造等领域。

1.1 喷射粘结成形砂型（芯）

在传统的砂型铸造中，需首先制备模样和芯盒才能完成造型、制芯，在工艺验证与批量生产中，工艺过程复杂，还会造成资源浪费。目前，砂型的喷射

表1 国内外部分厂家生产的3DP典型设备
Table 1 3DP typical equipment produced by some domestic and foreign manufacturers

公司简称	型号	成形空间 ($l \times w \times h$)/mm ³	分辨率/dpi	层厚/mm	喷头数量
ExOne	Innovent Platform	160 × 65 × 65	400 × 400	0.1	—
	S-Print Platform	800 × 500 × 400	400 × 400	0.28~0.5	—
	Exerial Platform	2 200 × 1 200 × 600	300 × 300	0.28~0.5	—
Voxeljet	VX200	300 × 200 × 150	300 × 300	0.15	256
	VXC800	850 × 500 × 300	600 × 600	0.15~0.4	2 656
	VX4000	4 000 × 2 000 × 1 000	600 × 600	0.12~0.3	26 560
宁夏共享	AJS 1000A	1 000 × 600 × 500	400 × 400	—	—
	AJS 2500A	2 600 × 2 000 × 1 000	300 × 300	0.2~0.5	—
	AJD 2500B	2 500 × 1 800 × 1 000 × 2	≥300	—	—
峰华卓立	PCM300	300 × 250 × 250	—	—	1 × 1 024P
	PCM1200	1 200 × 1 000 × 600	300 × 400 or 400 × 400	0.2~0.5	4 × 1 024P
	PCM2200	2 200 × 1 000 × 800	—	—	4 × 1 024P
易制科技	Easy3DP-S2200	2 000 × 1 000 × 600	360	0.1~0.5	—
	Easy3DP-M500	500 × 450 × 400	600	0.04~0.2	—
	Easy3DP-G450	450 × 220 × 300	180	0.1~0.2	—

粘结成形技术发展较为成熟，可直接无模快速成形砂型，改变铸造行业的生产模式，提高金属铸件的成形效率^[27-29]，砂型试样如图1所示。

3DP砂型铸造工艺首先进行砂型（芯）的三维建模，选择合适的砂粒、粘结剂与固化剂；随后按切片路径进行喷射粘结成形；接着对成形的砂型（芯）进行组装；最后就可以进行金属液浇注，待冷却后去除砂型（芯）就可以获得金属零件，工艺流程如图2所示。喷射粘结成形砂型材料主要有硅砂、锆砂等，粘结剂主要为呋喃树脂、酚醛树脂、无机粘结剂等^[30-31]。

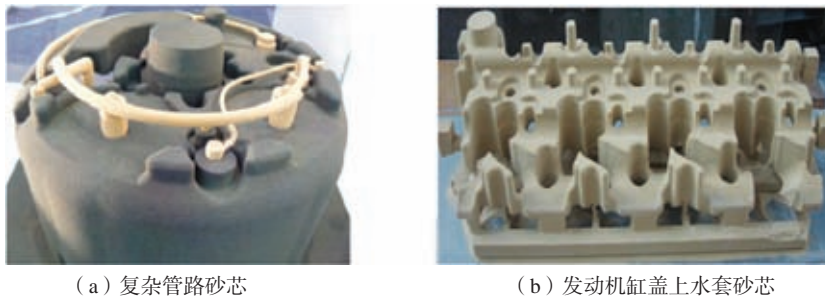
Hawalidar等人^[28]对传统砂型铸造与喷射粘结成形砂型铸造工艺进行了对比研究，结果表明，喷射粘结成形技术在制备砂型（芯）过程中具有明显优越性，不仅可以节省大量砂子，而且相比于传统砂型，喷射粘结成形砂模具有更好的力学性能。

赵火平^[32]系统研究了砂粒角形系数与粒径分布、

粘结剂的表面张力和粘度等因素对喷射粘结成形砂型轴向精度和性能的影响及机理，研究发现角形系数为1.1的宝珠砂成形的砂型质量最好，X、Y、Z轴向尺寸偏差分别为0.18 mm、0.11 mm、-0.04 mm，砂型抗拉强度为0.88 MPa。图3所示为不同砂粒粒径、分层厚度和粘结剂喷射量下，砂粒的粘结形貌。从图3^[32]可以看出，砂粒粒径越小、层高越低，粘结剂喷射量越大，砂粒之间粘结桥越多越明显，从而强度也越高。

Deng等人^[33]采用喷射粘结成形技术制备呋喃树脂砂型，制备带有中空隔离带的双层保温砂型冒口（图4）^[33]，并浇注A356铝合金以验证保温效果。使用中空隔离带双层冒口使金属液凝固时间延长了12.5%。通过3DP可快速制备出设计砂型并快速验证浇注效果，缩短实验周期，提高效率。

田乐^[34]采用一种基于溶剂法的喷射粘结成形铸造砂型（芯）新工艺，该工艺变传统喷射“粘性树脂



(a) 复杂管路砂芯

(b) 发动机缸盖水上水套砂芯

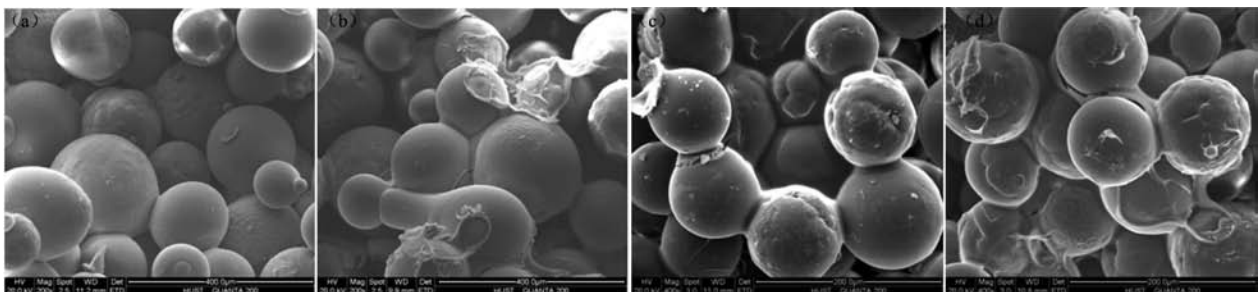
图1 喷射粘结成形的砂型（芯）

Fig. 1 Typical sand mold (core) prepared by 3DP method



图2 3DP砂型铸造工艺流程

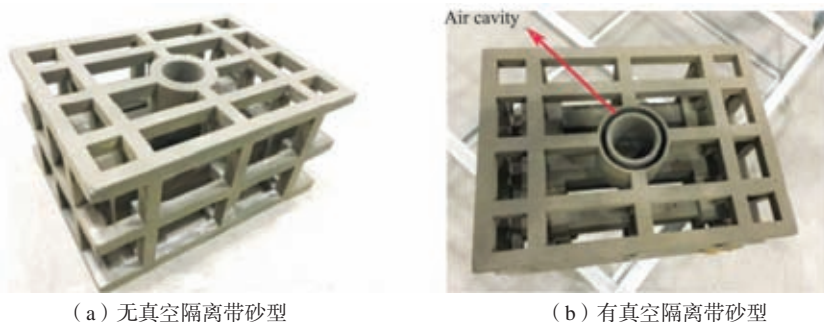
Fig. 2 Flow chart of 3DP-based sand casting process



(a) 70~140目、0.32 mm、10%；(b) 70~140目、0.32 mm、25%；(c) 140~200目、0.12 mm、10%；(d) 140~200目、0.12 mm、25%

图3 不同粒径、分层厚度和粘结剂喷射量的宝珠砂型微观形貌

Fig. 3 Bonding morphology of sand particles with different particle size, layer thickness and binder injection amount



(a) 无真空隔离带砂型

(b) 有真空隔离带砂型

图4 喷射粘结成形带中空隔离带的呋喃树脂砂型

Fig. 4 Furan resin sand mold printed by 3DP technology without (a) and with (b) air cavity surrounding the riser

型粘结剂”为“溶剂型粘结剂”，以树脂与无水乙醇为粘结剂，利用溶质溶解的析出原理进行喷射粘结成形。当树脂含量为2.5%，无水乙醇含量为90%，层厚为0.25 mm，3DP成形砂型（芯）的初坯抗拉强度为0.48 MPa，经后处理强度为3.787 MPa，并浇注12CrMo合金，铸件经喷丸处理后无明显表面缺陷。

李慧^[35]对喷射粘结成形的材料及工艺参数进行研究，引入树脂稀释、层间烘烤等方法，有效降低了铸型的发气量。该工艺采用的原砂、粘结剂所用原料与传统自硬树脂砂成分基本相同，只是结合PCM工艺特点对粘结剂和催化剂的粘度、表面张力等物化特性进行调整，无需独立制备原材料，铸型强度高，较适合大中型零件的制造。

宁夏共享集团^[36]探索实践“3D打印、机器人等创新技术+绿色智能工厂”的铸造转型升级之路，实现了铸造3D打印材料、工艺、软件、设备等国产化，并在宁夏银川建成了万吨级铸造3D打印工厂，为中国传统制造业转型升级提供一种思路，但核心的粘结剂喷射打印系统仍有待攻克。

喷射粘结成形砂型的强度主要由粘结剂逐层包裹粘结型砂颗粒形成粘结桥从而形成交联网络结构所提供。在成形材料相同的条件下，微喷射粘结成形的砂型强度要明显低于传统工艺获得的强度。为了使微喷射粘结成形的砂型满足一定的强度使用要求，研究者们通常采用增大粘结剂喷射量的方法提高铸型强度，但粘结剂喷射量太大会导致砂型产生“粘砂”或“结瘤”，导致砂型面精度偏低，铸件的气孔缺陷也增多^[25]。

1.2 喷射粘结成形陶瓷型（芯）

早在1990年，Sachs等人^[4, 37]就采用微滴喷射粘结成形技术制备出氧化铝陶瓷型壳（芯）；美国Z Corp公司推出的Z Casting（Z Cast Direct Metal Casting）工艺，制备的陶瓷型壳经焙烧处理后可进行浇注，但主要针对于有色合金^[38]；Gill与Singh等人^[39-42]等人采用喷射粘结成形技术制备陶瓷型壳并进行铝合金、锌合金

与铅合金的浇注。Chhabra等人^[25, 43]以ZCast501粉末为原材料制备型壳并浇注Al、黄铜、Cu铸件，最终获得的铸件表面粗糙度分别为6.76 μm 、11.27 μm 、11.56 μm ，相比砂型铸造（6.25~25 μm ），属于可接受的范围值。

近年来，采用喷射粘结成形技术制备高温陶瓷型（芯），通过喷射无机粘结剂可以使陶瓷型（芯）在烧结后产生较高强度与较低收缩。Zhao等人^[44-45]以纳米氧化锆无水乙醇分散液为粘结剂，对喷射粘结成形氧化钙基陶瓷型芯进行了研究。研究表明：随粘结剂喷射量的增大，型芯坯体的尺寸误差和致密度增大，分散液喷射量为20%时，成形的氧化钙陶瓷型芯坯体经1 300 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后获得的烧结体质量最好，其长度方向的烧结线收缩率为2.11%、抗弯强度为14 MPa。

黄双君等人^[46]采用微滴喷射粘结成形技术制备氧化铝基陶瓷型芯（图5）^[46]，以碱式碳酸锆（ZBC）为粘结剂，通过调节ZBC颗粒含量和烧结温度，改善细长氧化铝陶瓷芯的致密度和力学性能，研究发现当ZBC含量为35wt.%时，氧化铝基陶瓷型芯1 500 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后的抗弯强度为79 MPa，线收缩率为13%。

与其他增材制造方法相比，微滴喷射粘结的成形速度快，在制备大型零件上具有优势，成形材料价格相对较低，而且成形过程不需要支撑，特别适合于做内腔复杂的原型，如表1所示，最大成形尺寸可达4 m；但成形件疏松多孔，坯体强度较低，表面较粗糙，需进行必要的后处理，进一步提高精度与强度。若要从根本上解决铸型微喷射粘结快速成形的精度和强度问题，就需要对喷射粘结过程中的若干关键技术问题进行系统而深入的分析，探索喷射粘结工艺中的喷射方式、喷射参数、粘结剂性能及固化行为、成形粉末材料参数对制件精度的影响机理，研究铺粉过程中粉末层之间力的相互作用规律，为提高铸型微喷射粘结成形的精度和强度奠定理论基础。

另外，在3DP设备方面，国内虽有一些企业面向市场推广国产微喷射粘结成形设备，但核心部件“喷

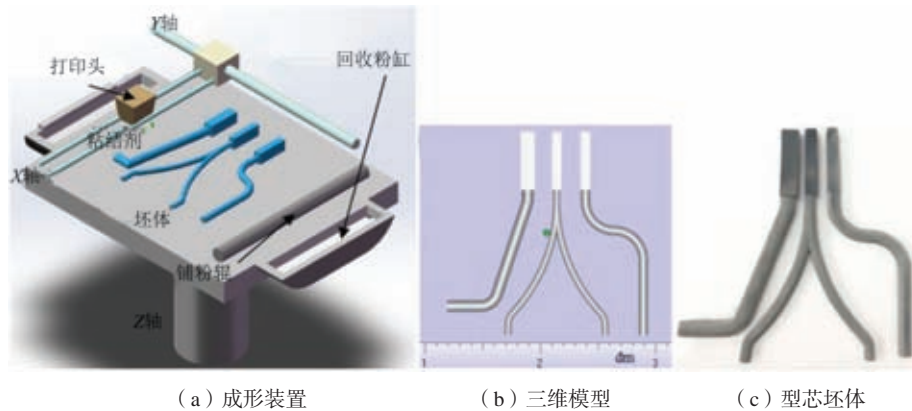


图5 喷射无机粘结剂制备的复杂形状的氧化铝陶瓷芯

Fig. 5 Photographs of complex-shaped alumina ceramic cores fabricated by an inorganic binder

头”属于高精尖科技产品，被英国、日本、美国等垄断，从而严重限制了我国工业喷墨打印行业的发展。希望将来能有国产化的喷头，解决这一卡脖子的技术难题。

2 激光选区烧结技术 (SLS)

激光选区烧结技术最早由Deckard和Beaman在1986年提出^[3]，国内对SLS技术的研究开始于20世纪90年代，起初只是引进了多台国外SLS设备，随后开展对SLS设备系统的研制和开发。激光选区烧结的工作原理是利用超大功率光源产生激光，在计算机的控制下，激光以一定的扫描速度和能量密度有选择地对材料粉末分层扫描，使颗粒熔化或在粘结剂的作用下产生较好的粘结效果，完成一层后，工作台下降一个层厚，控制激光束再扫描烧结新层，如此循环往复，去掉未烧结粉末，最后得到区域结构不同的三维零件^[47]。目前国内外SLS设备制造商主要有3D Systems、EOS、北京隆源自动成形系统有限公司、华科三维科技有限公司、华曙高科技有限责任公司等，如表2所示^[48-52]。

激光选区烧结技术在制造复杂、轻量、薄壁零件及新产品开发等方面发挥了很大作用。激光选区烧结技术所使用的材料主要有覆膜砂、蜡基铸造模样、陶瓷等，如图6所示^[13]。

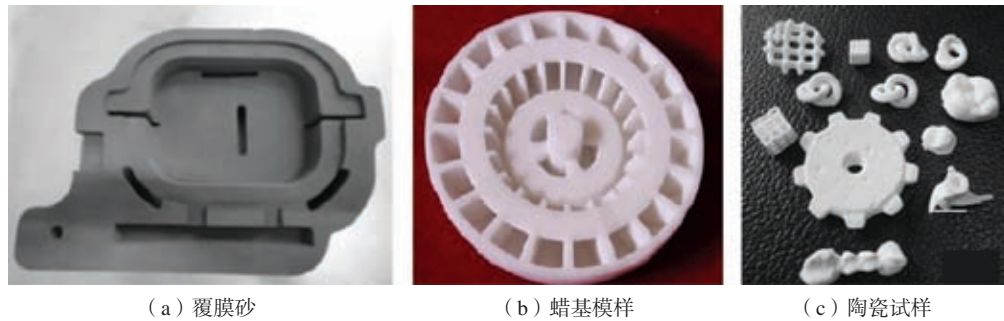
2.1 激光选区烧结覆膜砂

以覆膜砂作为烧结材料并用激光选区烧结法直接成形铸造用型(芯)，是快速成形技术在铸造行业中的杰出应用^[9]。与传统的砂型铸造方法相比，省去了许多工装设备(造型机、制芯机、运输设备等)，使得复杂、笨重的铸件生产过程可以在激光选区烧结机器上完成。

以覆膜砂作为烧结材料，直接烧结成形的试验研究开始于1996年的欧洲(如德国EOS公司等)，首先将砂粒表面用树脂等粘结剂包裹，然后在激光作用下使粘结剂受热熔化后冷却固化，粘结成形所需的砂型(芯)^[53]。同期华中科技大学樊自田教授也开展了这项研究，系统地试验研究了激光选区烧结法制造覆膜砂铸型(芯)的工艺参数，分析了覆膜砂在激光下受

表2 国内外部分厂家生产的SLS设备
Table 2 Typical SLS equipment by some domestic and foreign manufacturers

公司简称	型号	成形空间/mm ³	激光类型	分层厚度/mm	扫描速度/(m·s ⁻¹)
3D Systems	sPro™ 230	550 × 550 × 750	CO ₂ , 70 W	0.08~0.15	10
	ProX® SLS 6100	381 × 330 × 460	CO ₂ , 70 W	0.08~0.15	12.7
EOS	EOS P810	700 × 380 × 380	CO ₂ , 2 × 70 W	0.12	2 × 6
	FORMIGA P 110 Velocis	200 × 250 × 330	CO ₂ , 30 W	0.06~0.10~0.12	5
北京隆源	LaserCore-6000	1 050 × 1 050 × 650	CO ₂ , 120 W	0.08~0.35	6
	LaserCore-5300	700 × 700 × 500	CO ₂ , 55 W or 120 W	0.08~0.35	6
华科三维	HK S1400	1 400 × 1 400 × 500	CO ₂ , 2 × 100 W	0.08~0.3	2 × 8
	HK S800	800 × 800 × 500	CO ₂ , 100 W	0.08~0.3	8
华曙高科	HT1001P	1 000 × 500 × 450	CO ₂ , 2 × 100 W	0.06~0.3	2 × 15.2
	Flight 403P	400 × 400 × 450	Fiber Laser 2 × 300 W	0.06~0.3	20



(a) 覆膜砂

(b) 蜡基模样

(c) 陶瓷试样

图6 不同的激光选区烧结成形材料

Fig. 6 Different materials for parts by SLS technique

热硬化的机理和特点，并浇注出多种金属铸件^[9, 54-57]。而工艺参数（激光功率、激光光斑尺寸、扫描速度、砂的预热温度、层厚等）对SLS覆膜砂成形性能的影响一直是研究的重点。

Wen等人^[58]以新型粘结剂涂覆 Al_2O_3 砂为原材料，研究了粘结剂含量、原砂类型和后固化参数对涂层砂强度和气体析出量的影响，最终成功制备了复杂六缸柴油机缸盖的大型砂型并浇注，最终获得了表面质量和尺寸精度满足设计要求的铸件，砂型与铸件如图7所示^[58]。

Tang等人^[59]以硅砂为基体材料，采用激光选区烧结技术制备铸造用模具，研究了工艺参数对烧结件精度、强度和表面光洁度的影响。烧结件的抗压强度和表面粗糙度随激光功率的增大而增大，随扫描速度的增大而减小。

薄夫祥等人^[60]在不同工艺参数组合下，分析了激光扫描速度、激光功率、分层厚度、扫描间距以及预热温度等工艺参数对激光选区烧结原型件强度与尺寸精度的影响。结合传统砂型铸造方式，实现了全新高端工程机械液压多路阀的快速铸造，验证了激光选区烧结技术快速铸造液压元件的可行性。

王春风等人^[61]采用大型SLS成形机（成形尺寸

1 000 mm × 1 000 mm × 6 00 mm），配合自行研发的高性能覆膜砂，采用选择性激光烧结快速成形技术，制作了KJ100型气缸盖全套覆膜砂芯，并浇注获得了合格的KJ100大型缸盖铸件，如图8所示^[61]。

司晨等人^[62-63]为解决SLS技术制备的覆膜砂型初始强度低的问题，采用正交试验研究了粘结剂含量、固化温度、固化时间的影响。结果表明：粘结剂含量3wt.%、固化温度110℃、固化时间35s时，砂型强度可达3.6 MPa；并通过正交试验对激光烧结工艺参数进行了研究，各工艺参数对覆膜砂的烧结特性影响大小：激光功率 > 扫描距离 > 扫描速度 > 铺粉层厚，制备的覆膜砂型如图9所示^[63]。

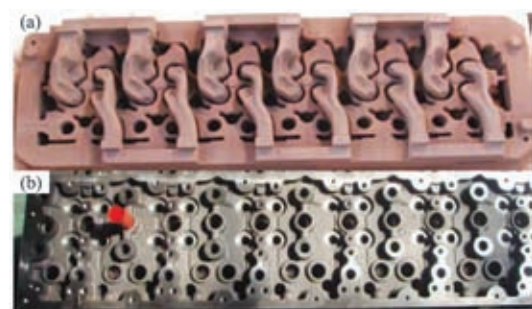
梁小文等人^[64]采用冷、热法制备覆膜铝砂，并进行了选区激光烧结成形工艺研究，重点研究了单层扫描面积和激光功率对激光选区烧结覆膜铝砂砂型抗拉强度的影响。随着扫描面积的增大，在同样烧结参数下，成形初强度由0.27 MPa迅速下降到0.04 MPa，激光



(a) 砂型芯；(b) 六缸柴油机缸盖铸件

图7 激光选区烧结砂型与铸件

Fig. 7 Sand mold and casting prepared by SLS method



(a) SLS汽缸盖砂芯组装图；(b) 汽缸盖铸件

图8 汽缸盖砂芯及浇注铸件

Fig. 8 Cylinder cover sand core and casting



图9 SLS成形的某发动机水道砂芯

Fig. 9 An engine channel sand core by SLS

功率是决定覆膜锆砂型抗拉强度的关键因素。制备出覆膜锆砂型并浇注，获得了轮廓清晰、表面较光亮的钛合金铸件。

2.2 激光选区烧结成形陶瓷型(芯)

陶瓷型壳(芯)在铸造中具有广泛应用,传统成形工艺在制备复杂陶瓷型壳(芯)方面存在难度大、制作周期长、成本高等缺点。在SLS成形陶瓷型(芯)的过程中,由于陶瓷材料的成形温度较高,目前SLS加工设备的激光器在短时间内无法实现陶瓷粉体颗粒熔融粘接,一般是将陶瓷粉与聚合物混合后在低温下烧结成形,将SLS烧结得到的坯体还需要进行脱脂、烧结后才能获得所需的陶瓷型壳(芯)。

Li等采用激光选区烧结技术成形 $Al_2O_3-SiO_2$ 基陶瓷模具(图10)^[65],陶瓷颗粒用环氧树脂E12(8wt.%)预处理后,研究优化了激光选区烧结成形工艺参数,当填充间距0.15 mm、激光功率10 W、分层厚度0.10 mm、扫描速度1 500 mm/s,并经过后处理的试样线收缩率最小(<1%),翘曲度最小(<3%),表面形貌最佳(表面高差<170 μm)。

Wei等人^[66]针对传统制壳工艺生产的陶瓷型壳强度相对较低,在铸造过程中因强度较低容易产生裂纹的问题以及传统的制壳工艺成本高、周期长等问题,以莫来石为主体材料,固体聚合物环氧树脂为粘结剂,采用激光选区烧结技术制备了一种莫来石陶瓷型壳,通过正交试验获得了优化的工艺参数,制备的陶瓷型壳试样的抗压强度达到99.01~172.02 MPa,远大于传统的制壳工艺。随后又采用激光选区烧结技术制备出氧化铝基陶瓷型芯坯体,并结合高温烧结技术从而提高陶瓷型壳的抗弯强度,试验结果表明,陶瓷型壳坯体经1 600 $^{\circ}C$ 烧结后抗弯强度达到38.03 MPa^[67]。

2.3 激光选区烧结成形熔模

传统熔模精密铸造主要包括制备蜡模、组装蜡模、制备多层陶瓷壳、脱蜡、型壳焙烧、浇注、去除陶瓷型壳、经后处理获得所需金属铸件^[68-69],生产周期长、工艺环节多。

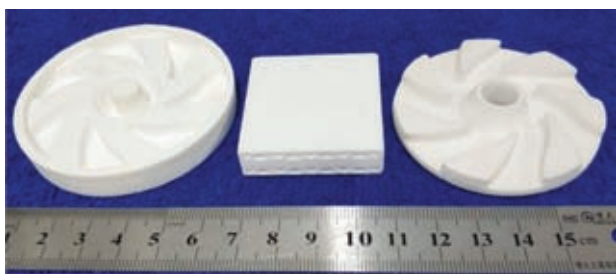


图10 激光选区烧结技术制备 $Al_2O_3-SiO_2$ 陶瓷

Fig. 10 $Al_2O_3-SiO_2$ ceramic parts prepared by SLS technique

针对传统熔模精密铸造需要模具制备蜡模等问题,采用激光选区烧结技术直接成形蜡模、树脂模等以代替熔模,可突破传统蜡模设计极限,一定程度上缩短了陶瓷型壳的制备周期,这也是激光选区烧结技术在铸造领域的另一重要应用。20世纪90年代就已经将SLS应用于熔模精密铸造,国外对该技术开发较早的是美国DTM公司,随后国内的华中理工大学、南京航空航天大学、北京隆源公司相继进行相关研究^[10, 17, 70]。

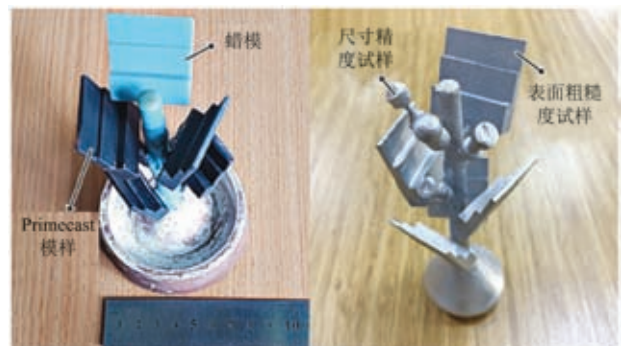
聚碳酸酯(PC)具有良好的激光烧结性能、制件强度较高等优良性能,是最早用于SLS制备熔模的材料。但PC熔点很高,流动性不佳,需要较高的焙烧温度,国内外主要以聚苯乙烯(PS)与高抗冲聚苯乙烯(HIPS)为原材料,采用SLS技术制备“熔模”^[71]。

Özer等人^[72]以聚苯乙烯粉末为基体材料,采用SLS技术制备聚合物模,在聚合物模表面涂挂石膏浆料,经干燥、脱模、烧结获得浇注所需的陶瓷型壳,相比传统技术缩短了生产周期,降低了生产成本,模样与铸件如图11所示^[72]。

Wang等^[73]采用SLS技术制备耐冲击聚苯乙烯模代替“蜡模”,在其表面涂挂硅溶胶/锆石粉浆料后放置于19~25 $^{\circ}C$ 环境中干燥24 h,经干燥、脱蜡、烧结后获得了厚度为5.5 mm的陶瓷型壳,并通过实验验证了优化后的浇注系统,最后获得了质量较好的复杂不锈钢叶轮铸件。

史玉升等^[74-76]通过后处理浸蜡等方法来提高SLS成形聚苯乙烯(PS)、高抗冲聚苯乙烯(HIPS)构件的力学性能与表面质量,最终制件能够满足一般功能件的要求,可以代替精密铸造中的熔模使用。图12所示为SLS成形用于熔模精密铸造的高抗冲聚乙烯模样,并结合熔模精密铸造制备出的金属精铸件^[76]。

杨来侠等^[77]开展了基于激光选区烧结复杂曲面零件快速熔模铸造工艺研究。采用激光选区烧结成形聚苯乙烯制备叶轮树脂模型并进行浸蜡处理,然后采用硅溶胶工艺制得该诱导轮的型壳,并进行实际浇注试



(a) 蜡模组

(b) A356铸件

图11 SLS制备熔模与铸件

Fig. 11 SLS patterns and casting

验, 获得良好内外质量的诱导轮, 平均尺寸相对误差范围0.17%~0.19%, 表面粗糙度平均值是0.693 μm , 达到试验预期。

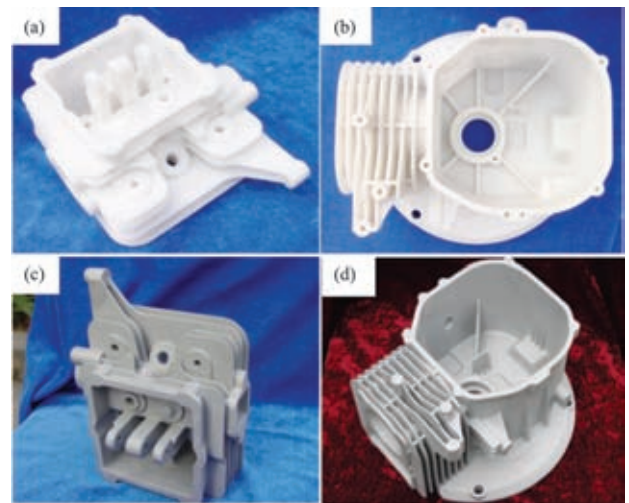
激光选区烧结技术的成形材料利用率较高; 但成形试样结构疏松、多孔, 且有内应力, 制件易变形, 成形试样表面粗糙多孔, 并受粉末颗粒大小及激光光斑的限制, 设备成本高, 维护困难。另外, 为了改善SLS成形试样的强度与精度以满足使用要求, 一般需进行后期处理, 如SLS覆膜砂型(芯)应进行后期再加热固化与表面涂料处理以提高强度与表面精度, 可用于制备铸钢、铸铁、镁合金、钛合金等铸件^[58, 64, 71, 78], 铸件尺寸精度一般可达CT6-8, 表面粗糙度一般可达12.5~3.2 μm ; 而制备熔模取代熔模一般通过渗蜡或树脂进行处理以提高强度与表面精度, 可用于制备不锈钢、铝合金铸件等^[72-73, 79], 铸件尺寸精度一般可达CT6, 表面粗糙度一般在6.3 μm 以下, 但这属于间接成形型壳, 后期还需在熔模表面涂多层涂料、结壳, 脱模、烧结成陶瓷壳后才能用于金属浇注。

3 光固化成形技术(SL)

光固化技术于1986年由Hull提出, 并发明了第一台光固化设备^[2], 主要是采用光敏树脂在特定波长的紫外光下曝光一定时间, 从而使光敏树脂固化成形, 层层叠加最终获得具有复杂形状的构件^[80]。目前国内外生

产的光固化设备如表3所示^[81-82]。

由于光固化技术的精度较高, 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树脂模、蜡模、陶瓷型壳(芯)等, 可以极大缩短产品制备周期, 不同光固化材料试样如图13所示, 国内西安交通大学研究团队对光固化材料、工艺等进行了较多研究。



(a, b) SLS熔模; (c, d) 铸件

图12 SLS制备的熔模及相应铸件

Fig. 12 HIPS sample formed by SLS for investment casting

表3 国内外部分厂家生产的SL设备

Table 3 SL equipments produced by some domestic and foreign manufacturers

公司简称	型号	成形空间/mm ³	分层厚度/ μm	光源
Prodways	ProMaker L6000	800 × 330 × 400	25~150	LED
	ProMaker LD20	300 × 445 × 200		
Admatec	Admaflex 130	160 × 100 × 110	10~200	UV laser
	Admaflex 300	260 × 220 × 500		
3D Systems	ProX 950	1 500 × 750 × 550	125~750	UV laser
	ProJet 7000 HD	380 × 380 × 250	75~750	
联泰科技	Lite-800	800 × 800 × 550	70~250	UV laser
	D300	300 × 300 × 100	50~250	UV laser



(a) 树脂

(b) 蜡模

(c) 陶瓷壳

图13 光固化成形材料

Fig. 13 SL samples with different materials

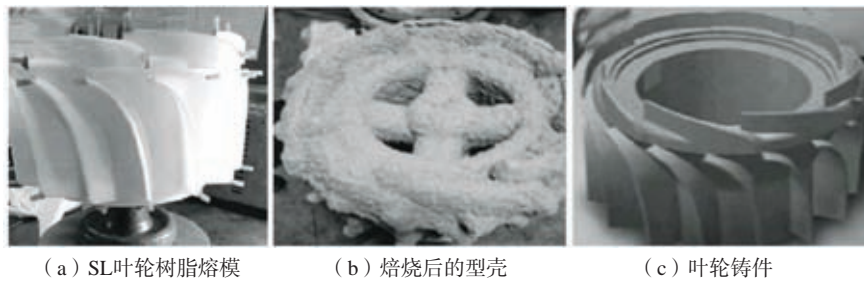
3.1 光固化成形熔模与模型

以树脂为主要材料，一种是采用光固化技术制备“熔模”原型，结合熔模精密铸造工艺，在“熔模”表面涂挂耐火材料制备型壳，型壳干燥、脱蜡、焙烧等工序制成耐热且有一定强度的型壳即可进行金属浇注。宗学文等人^[83]采用光固化技术制得叶轮铸件的原型，结合精密铸造最终获得了性能良好的通风机叶轮铸件，如图14所示^[83]，相较于传统熔模精密铸造，实际成本仅为传统铸造技术成本的1/3，耗时仅为1/5。

另一种是采用SL技术制备树脂模，将浆料注入

树脂模中，经固化、烧结后得到可用于浇注的陶瓷型（芯）。李涤尘等人^[84-85]提出了一种将光固化技术与凝胶注模技术相结合制备空心涡轮叶片一体化陶瓷铸型的方法。

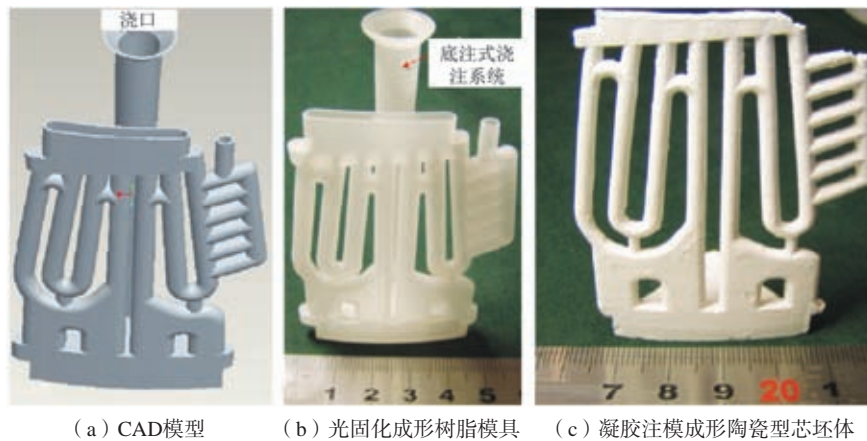
Wu等人^[86]将光固化成形技术与凝胶注模技术相结合，首先采用光固化成形技术制备树脂模具，然后将制备好的浆料注入树脂模具中，采用冷冻干燥工艺代替传统的风干工艺，使陶瓷型芯的干燥收缩率由原来的2.0%降低到0.25%，有利于保持复杂陶瓷芯的结构完整性，如图15所示^[86]。



(a) SL叶轮树脂熔模 (b) 焙烧后的型壳 (c) 叶轮铸件

图14 光固化+熔模精密铸造制备叶轮

Fig. 14 Impeller by SL combined with investment casting



(a) CAD模型 (b) 光固化成形树脂模具 (c) 凝胶注模成形陶瓷型芯坯体

图15 一种复杂铝基陶瓷型芯制备过程

Fig. 15 Fabrication process of a complex alumina core

Yang等人^[87]采用光固化成形结合凝胶注模技术制备了氧化钙基整体陶瓷模具坯体，如图16所示^[87]，坯体经合理烧结后收缩率仅为0.6%，室温下弯曲强度为14.12 MPa，解决了复杂型芯无法成形的问题。

3.2 光固化直接成形陶瓷型（芯）

直接成形法就是采用光固化技术直接制备陶瓷型壳/芯坯体，坯体经脱脂、烧结后获得陶瓷型壳/芯，无需开发型芯与蜡模所需的模具，极大缩短了传统精密铸造的工艺流程与制备周期。

Li等人^[88]采用光固化成形技术制备氧化铝基陶瓷型芯坯体，研究了在氩气氛下烧结温度对氧化铝陶瓷型芯性能的影响，采用二次分步烧结工艺，在氩气氛

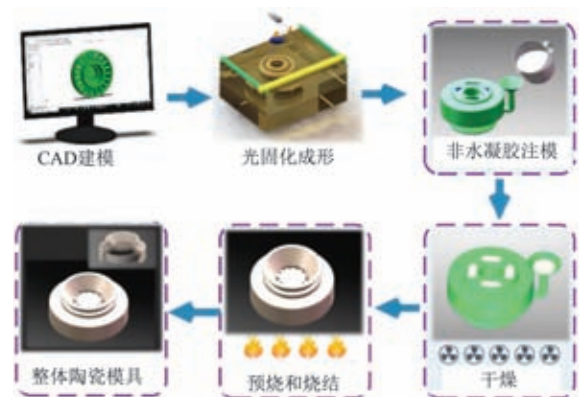


图16 光固化结合凝胶注模制备陶瓷型/芯工艺流程

Fig. 16 Schematic diagram of integral ceramic mold via SL combined gel-casting

中最佳烧结温度为1 350 °C时, 型芯试样的弯曲强度为26.7 MPa, 体积密度为2.5 g/cm³, 孔隙率33.8%, 满足陶瓷型芯的性能要求。

Bae与Halloran等人^[89-92]采用光固化成形技术实现

了石英陶瓷型芯(壳)的整体制备(图17)^[89], 研究了烧结温度对陶瓷试样强度的影响, 结果表明陶瓷试样经1 300 °C烧结后的弯曲强度为11.4 MPa, 相对密度为71%。

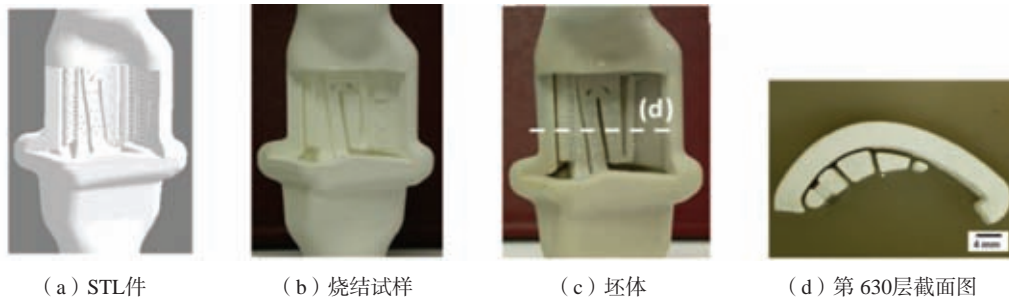


图17 光固化成形具有复杂内中空结构的高温合金涡轮翼型整体陶瓷型(芯)

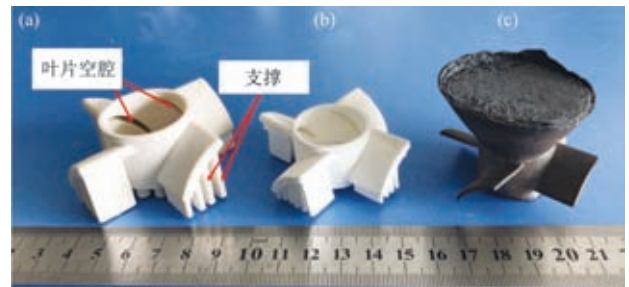
Fig. 17 Integrally cored ceramic mold (core) for superalloy turbine airfoil with complex internal hollow structure fabricated

Li等人^[93]采用光固化技术中的DLP技术, 以光固化树脂为粘结剂、Al₂O₃-SiO₂粉末为基体制备固含量为45vol.%的悬浮液制备叶轮陶瓷型壳坯体, 坯体经1 200 °C烧结后横向断裂强度为9.98 MPa, 线收缩率在22%以上, 表面粗糙度Ra为4.51~4.82 μm, 最后进行浇注获得了不锈钢叶轮铸件, 如图18所示^[93]。

Lu等人对光固化成形氧化硅基与氧化铝基陶瓷型芯进行了一些研究, 系统研究了烧结工艺对光固化制备氧化硅陶瓷型芯的影响, 随着α-方石英含量的增加, 陶瓷在1 300 °C烧结时的抗弯强度达到最大为12.1 MPa^[94]; 通过引入真空烧结, 研究了真空烧结温度对氧化铝基陶瓷显微组织和力学性能的影响, 当烧结温度为1 150 °C时, 氧化铝基陶瓷型芯的抗弯强度为33.7 MPa, X、Y、Z方向的收缩率分别为2.3%、2.4%和5.3%, 开孔率为37.9%, 当烧结温度达到1 350 °C时, 试样最大收缩率接近12%, 如图19所示^[95]。

光固化成形技术可实现高表面精度、复杂结构模型的制备, 与熔模精密铸造工艺结合代替蜡模, 可用于制备碳钢、不锈钢等铸件。当使用光固化技术制备

熔模代替传统蜡模时, 获得的铸件尺寸精度可达CT4, 表面粗糙度Ra可达6.3以下, 但这属于间接成形方法, 仅取代蜡模, 进行熔模铸造; 直接制备陶瓷壳(芯)时, 虽大幅缩短工艺, 成形的陶瓷壳(芯)表面精度较好, 但经高温烧结后, 尺寸收缩较大、尺寸稳定性较差, 易产生变形或开裂, 陶瓷壳(芯)精度较难控制^[93, 96]。另外, 设备运行及维护成本较高, 且液态树脂具有气味和毒性。



(a) 陶瓷型壳坯体; (b) 烧结后的陶瓷型壳; (c) 叶轮铸件

图18 光固化陶瓷型壳

Fig. 18 Ceramic shell prepared by SL method

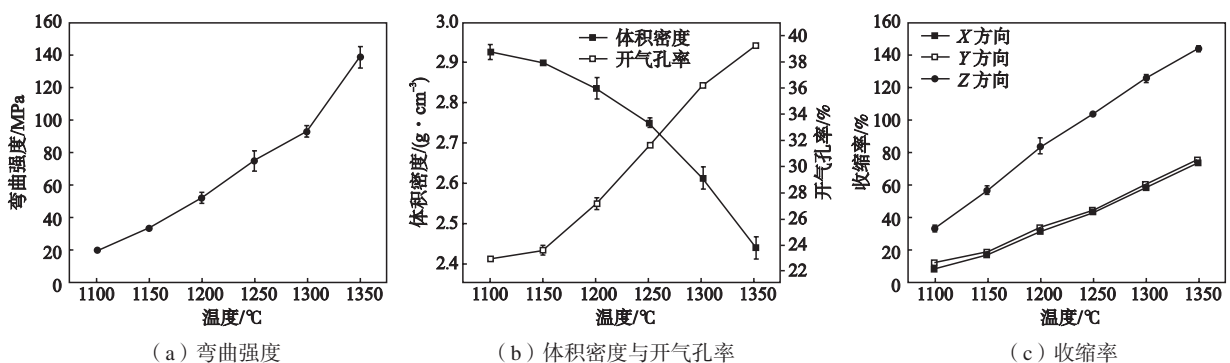


图19 不同真空烧结温度下氧化铝陶瓷型芯性能

Fig. 19 Performances of samples sintered at different temperatures in vacuum

4 分层挤出成形 (LEF)

分层挤出成形也称浆料直接成形,最早由Cesarano等人^[6]提出,通过计算机辅助制造进行图形的预先设计,由计算机控制安装在Z轴上的浆料输送装置在X-Y平台上移动,形成所需要的图形。第一层成形完毕后,Z轴上升到合适的高度,在第一层的基础上堆积成形第二层结构,通过反复的叠加增材制造,最终得到精细的三维立体结构^[97]。

近年来,分层挤出成形技术的研究和应用取得了一定的进展,主要集中在成形材料及其应用领域,包括生物、陶瓷、食品、药品、电子等^[98-104],而将其应用于铸造领域的研究较少,但已有研究者开始关注该方法在铸造领域应用的可行性,主要制备铸造中的陶瓷型壳(芯)。相比于其他的增材制造方法,分层挤出成形具有装备成本低、材料来源广、烧结收缩小、污染小等优点^[105-106]。

近年来,本课题组提出采用分层挤出成形工艺制备铸造用陶瓷型壳(芯)^[107-108],包括氧化铝基、氧化钙基陶瓷型芯等,系统研究了浆料组成与工艺参数对分层挤出成形陶瓷试样尺寸精度与表面质量的影响,对陶瓷氧化铝基陶瓷型芯精度影响的优先级为浆料固含量>挤出头直径>层高>成形速率^[109],并研究了通过添加纳米SiO₂, MgO等^[110-111]降低氧化铝陶瓷型芯烧结温度,使氧化铝陶瓷在较低烧结温度下获得高强度,分层挤出典型陶瓷试样如图20所示。

为了获得复杂(中空、悬臂等)陶瓷构件,分层挤出成形逐渐朝着双头及多头的方向发展,在多材料成形中具有优势。目前国内外研究者已开发出多种可用复杂构件成形所需的支撑材料,包括盐基、氧化钙基、石墨基、淀粉基、塑料等并制备出了不同复杂程度的构件,如镁支架、汽轮鼓风机陶瓷外壳等^[112-118]。

但由于浆料挤出工艺的特殊性,浆料在驱动力作用下经喷嘴挤出后逐层堆积,成形的试样表面会呈现比较明显的层纹效应,从而导致成形试样的表面精度偏低(图21)^[109]难以满足铸造要求,若能提高分层挤出成形陶瓷型芯表面精度达到铸造要求,实现多材料

多头协同挤出成形,将使该工艺在铸造领域具有更广阔的发展前景。

5 结束语与展望

增材制造技术与传统铸造工艺相结合,可大大减少铸造工序,减少人工投入,缩短制造周期,提高铸造柔性,改善生产环境,在未来的铸造生产中有着广泛应用前景。但不同增材制造技术在铸造中的应用,有着各自的适用范围与特点。

(1) 喷射粘结成形(3DP),耐火材料主要有细砂粒(石英砂、锆砂等)、陶瓷粉(氧化铝、氧化锆等),粘结剂材料主要有有机树脂粘结剂、无机粘结剂等,可直接制备砂型(芯)、陶瓷壳(芯),适于砂型铸造与陶瓷壳型铸造。3DP的成形速度快,高精度要求的铸造型芯其表面需要进行光整化后处理。

(2) 选择性激光烧结(SLS),成形材料主要有覆膜砂、蜡基材料、高分子聚合物(PS)等,可制备覆膜砂型壳(芯)、熔模,适于壳型铸造与熔模铸造。SLS材料、设备及维护成本高,成形件强度偏低。覆膜砂壳型(芯)需后期加热固化,才能壳型浇注。熔模属于间接成形,仅取代蜡模,需后期浸涂处理来提高其强度与表面精度,后续还需在熔模表面涂多层涂料、结壳,脱模、烧结成陶瓷壳后才能用于金属浇注。

(3) 光固化(SL),成形材料主要是光敏树脂、陶瓷粉+光敏树脂,可制备熔模、陶瓷壳型(芯),树

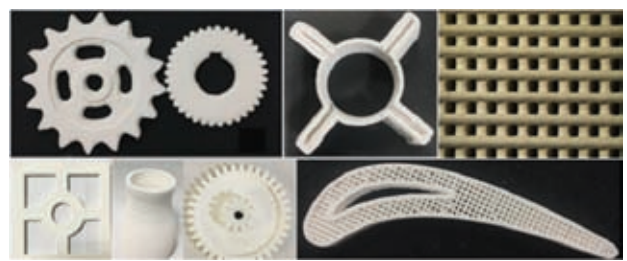


图20 几种挤出成形的陶瓷典型试样

Fig. 20 Some typical ceramic samples prepared by LEF method

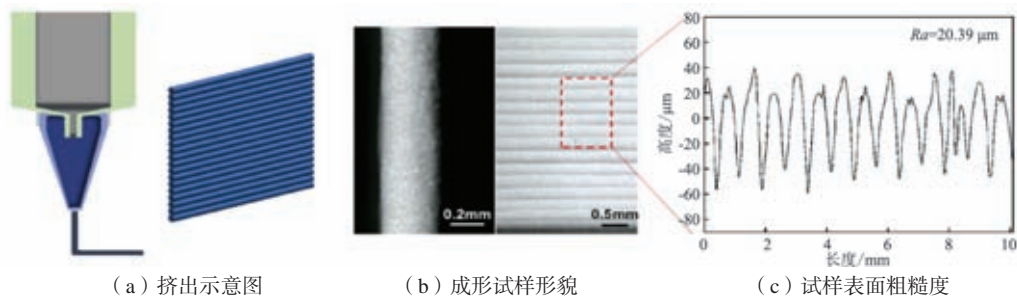


图21 浆料逐层堆积图

Fig. 21 Layer-by-layer stacking diagram in LEF method

脂材料及设备成本较高。用于制备熔模时，试样表面与尺寸精度较好，但属于间接成形，仅取代蜡模，进行熔模铸造。如直接制备陶瓷壳（芯），由于树脂含量较高（约50%），高温烧结后陶瓷壳（芯）收缩大、尺寸稳定性差，易发生开裂或变形，壳型（芯）精度较难控制。

（4）分层挤出成形（LEF或DIW），成形材料主要是陶瓷粉与有机粘结剂制备成陶瓷浆料，可制备陶瓷壳（芯），设备及材料成本低，环境友好，浆料固含量较高，高温烧结后收缩率低。目前，用该方法制备的陶瓷壳（芯）表面粗糙度还有待提高，与熔模铸造的铸件表面精度要求还有一定距离。

展望未来，增材制造技术在铸造领域中的研究与应用，应充分发挥增材制造和铸造工艺的各自优势，从工艺方法、装备精度、材料种类等多方面展开，关键是提高型（芯）精度、降低制备成本，向智能化、绿色化、高质量发展。

（1）增材制造制备型（芯）时，需系统研究各工艺方法中影响铸造型（芯）的成形精度、表面精度、强度性能的原因，深入研究各种材料的成形性及型（芯）缺陷的形成机理，提出各自提高精度和强度的解决方案。

（2）用3DP制备铸造砂型（芯），需进一步提高砂型（芯）精度，研发高强度无机粘结剂材料，满足绿色铸造生产要求。研制构建低成本3DP设备，在核心技术（如3DP喷头等）方面加大研发力度，实现国产化。

（3）直接制备陶瓷型壳（芯）时，应重点解决陶瓷型壳（芯）精度、变形、开裂等问题，实现陶瓷型壳（芯）高效、低成本制备。如果制备的陶瓷型壳（芯）在尺寸精度与表面精度能达到熔模铸造的水平要求，将彻底改变传统熔模铸造的工艺流程，大大缩短精密铸件生产周期，具有重大的理论与实际意义。

参考文献：

- [1] ABDULHAMEED O, AL Ahmari A, AMEEN W, et al. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11 (2) : 2072051376.
- [2] HULL C W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereo-lithography [P]. Google Patents, 1986.
- [3] DECKARD C R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering [P]. Google Patents, 1989.
- [4] SACHS E M, HAGGERTY J S, CIMA M J, et al. Three-dimensional printing techniques [P]. Google Patents, 1993.
- [5] CRUMP S S. Apparatus and method for creating three-dimensional objects [P]. Google Patents, 1992.
- [6] CESARANO III J, CALVERT P D. Free forming objects with low-binder slurry [P]. Google Patents, 2000.
- [7] SIVARUPAN T, BALASUBRAMANI N, 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 (12) : 101889.
- [8] 卢秉恒. 增材制造技术-现状与未来 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31 (1) : 19-23.
- [9] 樊自田. 金属零件快速成形技术中材料及工艺的基础研究 [D]. 武汉: 华中理工大学博士学位论文, 1999.
- [10] 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 (5) : 8-12, 116.
- [11] SINGH S, RAMAKRISHNA S, SINGH R. Material issues in additive manufacturing: A review [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 25: 185-200.
- [12] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A Review [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23 (6) : 1917-1928.
- [13] CHEN Z, LI Z, LI J, et al. 3D printing of ceramics: A review [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39 (4) : 661-687.
- [14] 董云菊, 李忠民. 3D打印及增材制造技术在铸造成形中的应用及展望 [J]. *铸造技术*, 2018, 39 (12) : 2901-2904.
- [15] 段望春, 高佳佳, 董兵斌, 等. 3D打印技术在金属铸造领域的研究现状与展望 [J]. *铸造技术*, 2018, 39 (12) : 2895-2900.
- [16] 樊自田, 黄乃瑜, 罗占荣, 等. 用快速造型技术生产金属零件的方法及评价 [J]. *中国机械工程*, 1997 (5) : 25-26, 55.
- [17] 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 (5) : 21-23, 116-117.
- [18] FAN Z, HUANG N, LI Y, et al. Investigating on casting molds (or cores) making with the coated sand by the selected laser sintering. Yongnian Yan, Progress in rapid prototyping manufacturing and rapid tooling [C]//Proceeding of The First International Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing'98, Beijing) : 412-417. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, July 1998.
- [19] 关彦齐, 王芳芳. 增材制造 (3D打印) 铸造的发展与应用 [J]. *科技创新与应用*, 2020 (21) : 110-111.
- [20] 李少海, 李昭青. 3D打印在铸造技术中应用 [J]. *铸造技术*, 2018, 39 (2) : 384-389.
- [21] 峰华卓立. 砂型3D打印机. <http://www.fhzi.co/en/product2-743-2138.html>.
- [22] 易制科技. 产品中心. <http://www.easy3dmade.com/list/7.html>.
- [23] LÜ X, YE F, CHENG L, et al. Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment [J]. *Ceramics International*, 2019, 45 (10) : 12609-12624.

- [24] 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.
- [25] UPADHYAY M, SIVARUPAN T, EL Mansori M. 3D printing for rapid sand casting-A review [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 211-220.
- [26] ZOCCA A, COLOMBO P, GOMES C M, et al. Additive manufacturing of ceramics: issues, potentialities, and opportunities [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, 98 (7): 1983-2001.
- [27] RAMAKRISHNAN R, GRIEBEL B, VOLK W, et al. 3D Printing of inorganic sand moulds for casting applications [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1018: 441-449.
- [28] HAWALDAR N, ZHANG J. A comparative study of fabrication of sand casting mold using additive manufacturing and conventional process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97 (1): 1037-1045.
- [29] 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.
- [30] ExOne. Sand Casting 3D Printing Materials & Binders, 2020. <https://www.exone.com/en-US/3d-printing-materials-and-binders>
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] DENG C, KANG J, SHANG Guan H, et al. Insulation effect of air cavity in sand mold using 3D printing technology [J]. *China Foundry*, 2018, 15 (1): 37-43.
- [34] 田乐. 三维喷印快速成形铸造型芯材料与工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [35] 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.
- [36] 宁夏共享. 公司及简介. <https://www.kocel.com/page3>
- [37] SACHS E M, CIMA M J, CORNIE J. Three-dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a CAD model [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39 (1): 201-204.
- [38] YAN Y, LI S, ZHANG R, et al. Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends [J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2009, 14: 1-12.
- [39] GILL S S, KAPLAS M. Comparative study of 3D printing technologies for rapid casting of aluminium alloy [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2009, 24: 1405-1411.
- [40] GILL S S, KAPLAS M. Efficacy of powder-based three-dimensional printing (3DP) technologies for rapid casting of light alloys [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 52: 53-64.
- [41] KAPLAS M, SINGH R. Experimental investigations for reducing wall thickness in zinc shell casting using three-dimensional printing [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2008, 222: 2427-2431.
- [42] SINGH J P, SINGH R. Investigations for a statistically controlled rapid casting solution of lead alloys using three-dimensional printing [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2009, 223 (9): 2125-2134.
- [43] CHHABRA M, SINGH R. Mathematical modeling of surface roughness of castings produced using ZCast direct metal casting [J]. *Journal of the Institution of Engineers*, 2015, 96 (2): 145-155.
- [44] ZHAO H, YE C, FAN Z, et al. 3D printing of CaO-based ceramic core using nanozirconia suspension as a binder [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37 (15): 5119-5125.
- [45] ZHAO H, YE C, XIONG S, 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.
- [46] HUANG S, YE C, ZHAO H, et al. Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 29: 100802.
- [47] 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.
- [48] 3D Systems. Select Laser Sintering Printers [EB/OL]. <http://www.3dsystems-china.com/printers/#p95>
- [49] EOS. EOS Polymer Systems [EB/OL]. https://www.eos-apac.info/info2.php?class_id=110101101102&id=465
- [50] 北京隆源. 选择激光烧结快速成形机-产品中心 [EB/OL]. <http://www.lyafs.com.cn/products.aspx?id=4>.
- [51] 华科三维. 产品中心 [EB/OL]. http://www.huake3d.com/product_detail.asp?Product_ID=45&Product_ParentID=6.
- [52] 华曙高科. 3D printing solutions [EB/OL]. http://en.farsoon.com/solution_list_01.html.
- [53] XU Z, 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.
- [54] FAN Z, HUANG N, YAN L, 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.

- [55] FAN Z, HUANG N, XIAO Y. Accuracy analysis of the part made by selected laser sintering [J]. *China Foundry*, 2004, 1 (1): 49–52.
- [56] 樊自田, 黄乃瑜, 宋象军, 等. 提高SLS覆膜砂铸型(芯)强度的措施 [J]. *特种铸造及有色合金*, 1999 (2): 1–4.
- [57] 樊自田, 黄乃瑜, 陈宗孟. 基于选择性激光烧结技术的快速铸造 [J]. *特种铸造及有色合金*, 1999 (5): 7–9.
- [58] WEN S, SHEN Q, WEI Q, et al. Material optimization and post-processing of sand moulds manufactured by the selective laser sintering of binder-coated Al_2O_3 sands [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 93–102.
- [59] TANG Y, FUH J Y H, LOH H T, et al. Direct laser sintering of a silica sand [J]. *Materials and Design*, 2003, 24: 623–629.
- [60] 薄夫祥, 何冰, 蹤雪梅. 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.
- [61] 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中国铸造活动周, 杭州: 2010.
- [62] 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.
- [63] 司晨. 激光3D打印用覆膜砂制备及成型工艺研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [64] 梁小文, 王德清, 徐志锋, 等. 选区激光烧结用覆膜砂的制备及其SLS成形工艺研究 [J]. *铸造*, 2017, 66 (8): 814–819.
- [65] LI C H, HU L, ZOU Y, et al. Fabrication of Al_2O_3 - SiO_2 ceramics through combined selective laser sintering and SiO_2 -sol infiltration [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2019, 17 (1): 255–263.
- [66] WEI Q, ZHONG J, XU Z, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of ceramic shell moulds for investment casting of turbine blades by selective laser sintering [J]. *Ceramics International*, 2018, 44 (11): 12088–12097.
- [67] 魏倩, 许自霖, 许庆彦, 等. 烧结温度对氧化铝基陶瓷型壳显微组织及力学行为的影响 [J]. *航空材料学报*, 2019, 39 (2): 10–15.
- [68] 赵效忠. 陶瓷型芯的制备与使用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [69] 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.
- [70] 唐亚新, 邓琦林, 张宏, 等. 选择性激光烧结成形技术及其在航空零件精密铸造中的应用 [J]. *航空精密制造技术*, 1996 (2): 21–24.
- [71] 闫春泽, 史玉升, 魏青松, 等. 激光选区烧结3D打印技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2019.
- [72] 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.
- [73] WANG D, DONG A, ZHU G, 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 (9–12): 2629–2635.
- [74] 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 & Applications*, 2006, 221 (1): 37–42.
- [75] SHI Y, WANG Y, CHEN J, et al. Experimental investigation into the selective laser sintering of high-impact polystyrene [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 108 (1): 535–540.
- [76] YANG J, SHI Y, SHEN Q, et al. Selective laser sintering of HIPS and investment casting technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209 (4): 1901–1908.
- [77] 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.
- [78] 李偲偲, 徐志锋, 赵燕燕, 等. 基于SLS覆膜砂型(芯)的镁合金砂型铸造的阻燃机理分析 [J]. *铸造*, 2015, 64 (2): 140–143.
- [79] 孙旋, 罗兆伟, 张建巧. SLS技术在熔模精密铸造中的应用 [J]. *塑料工业*, 2019, 47 (11): 68–70.
- [80] 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.
- [81] ZAKERI S, VIPPOLA M, LEVÄNEN E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 101177.
- [82] 3D Systems. Stereolithography [EB/OL]. <https://cn.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla>
- [83] 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.
- [84] 李涤尘. 一种空心涡轮叶片一体化陶瓷铸型的型芯型壳定制方法: ZL201310289486.0. [P]. 中国发明专利.
- [85] CHEN X, LI D, WU H, et al. Analysis of ceramic shell cracking in stereolithography-based rapid casting of turbine blade [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55 (5–8): 447–455.
- [86] WU H, LI D, TANG Y, 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.
- [87] YANG Q, ZHU W, LU Z, et al. Rapid fabrication of high-performance CaO-based integral ceramic mould by stereolithography and non-aqueous gelcasting [J]. *Materials*, 2019, 12 (6): 934.
- [88] LI H, LIU Y, LIU Y, et al. Effect of sintering temperature in argon atmosphere on microstructure and properties of 3D printed alumina ceramic cores [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2020, 9 (2): 220–231.
- [89] BAE C, KIM D, HALLORAN J W. Mechanical and kinetic studies on the refractory fused silica of integrally cored ceramic mold fabricated by additive manufacturing [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39 (2–3): 618–623.

- [90] BAE C, HALLORAN J W. Integrally cored ceramic mold fabricated by ceramic stereolithography [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8 (6) : 1255-1262.
- [91] HALLORAN J W, TOMECKOVA V, GENTRY S, et al. Photopolymerization of powder suspensions for shaping ceramics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31 (14) : 2613-2619.
- [92] HALLORAN J W. Ceramic stereolithography: Additive manufacturing for ceramics by photopolymerization [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2016, 46 (1) : 19-40.
- [93] LI F, JI X, WU Z, et al. Digital light processing 3D printing of ceramic shell for precision casting [J]. *Materials Letters*, 2020, 276: 128037.
- [94] LI H, HU K, LIU Y, et al. Improved mechanical properties of silica ceramic cores prepared by 3D printing and sintering processes [J]. *Scripta Material*, 2021, 194: 113665.
- [95] LI H, LIU Y, LIU Y, et al. Evolution of the microstructure and mechanical properties of stereolithography formed alumina cores sintered in vacuum [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40: 4825-4836.
- [96] 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.
- [97] 李亚运. 陶瓷无模直写成形技术的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [98] ZOCCA A, FRANCHIN G, ELSAYED H, et al. Direct ink writing of a preceramic polymer and fillers to produce hardystonite ($\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$) bioceramic scaffolds [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, 99 (6) : 1960-1967.
- [99] KOSKI C, ONUIKE B, BANDYOPADHYAY A, et al. Starch-hydroxyapatite composite bone scaffold fabrication utilizing a slurry extrusion-based solid freeform fabricator [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 24: 47-59.
- [100] KENEL C, CASATI N P M, DUNAND D C. 3D ink-extrusion additive manufacturing of CoCrFeNi high-entropy alloy micro-lattices [J]. *Nature Communications*, 2019, 10 (1) : 904.
- [101] MARTÍNEZ Vázquez F J, PERERA F H, MIRANDA P, et al. Improving the compressive strength of bioceramic robocast scaffolds by polymer infiltration [J]. *Acta Biomaterialia*, 2010, 6 (11) : 4361-4368.
- [102] ROWLANDS W, VAIDHYANATHAN B. Additive manufacturing of barium titanate based ceramic heaters with positive temperature coefficient of resistance (PTCR) [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39 (12) : 3475-3483.
- [103] 朱伟杰. 高粘度材料三维打印机开发及食品药品打印研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [104] ZHANG D, CHI B, LI B, et al. Fabrication of highly conductive graphene flexible circuits by 3D printing [J]. *Synthetic Metals*, 2016, 217: 79-86.
- [105] HON K K B, LI L, HUTCHINGS I M. Direct writing technology-advances and developments [J]. *CIRP Annals*, 2008, 57 (2) : 601-620.
- [106] LEWIS J A, SMAY J E, STUECKER J, et al. Direct ink writing of three-dimensional ceramic structures [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89 (12) : 3599-3609.
- [107] TANG S, FAN Z, ZHAO H, et al. Layered extrusion forming-a simple and method for rapid prototyping ceramic core [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96 (9-12) : 3809-3819.
- [108] YANG L, TANG S, LI G, et al. Performance characteristics of collapsible CaO-SiO₂ based ceramic core material via layered extrusion forming [J]. *Ceramics International*, 2019, 45 (6) : 7681-7689.
- [109] TANG S, YANG L, LI G, et al. 3D printing of highly-loaded slurries via layered extrusion forming: Parameters optimization and control [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28 (6) : 546-553.
- [110] TANG S, YANG L, LIU X, et al. Direct ink writing additive manufacturing of porous alumina-based ceramic cores modified with nanosized MgO [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40 (15) : 5758-5766.
- [111] TANG S, YANG L, LI G, et al. Effect of the addition of silica sol on layered extrusion forming of Al₂O₃-based cores [J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2019, 118 (3) : 145-152.
- [112] YANG L, TANG S, LI G, et al. Layered extrusion forming of complex ceramic structures using starch as removable support [J]. *Ceramics International*, 2019, 45 (17) : 21843-21850.
- [113] LI G, TANG S, YANG L, et al. Fabrication of soluble salt-based support for suspended ceramic structure by layered extrusion forming method [J]. *Materials & Design*, 2019, 183: 108173.
- [114] KLEGER N, CIHOVA M, MASANIA K, et al. 3D printing of salt as a template for magnesium with structured porosity [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31 (37) : 1903783.
- [115] LI W, GHAZANFARI A, MCMILLEN D, et al. Fabricating ceramic components with water dissolvable support structures by the ceramic on-demand extrusion process [J]. *CIRP Annals*, 2017, 66 (1) : 225-228.
- [116] MARTÍNEZ Vázquez F J, PAJARES A, MIRANDA P. A simple graphite-based support material for robocasting of ceramic parts [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38 (4) : 2247-2250.

- [117] XU C, QUINN B, LEBEL L L, et al. Multi-material direct ink writing (DIW) for complex 3D metallic structures with removable supports [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11 (8) : 8499–8506.
- [118] LI W, ARMANI A, MCMILLEN D, et al. Additive manufacturing of zirconia parts with organic sacrificial supports [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2020, 17 (4) : 1544–1553.

Additive Manufacturing Technology and Its Application to Casting

FAN Zi-tian, YANG Li, TANG Shi-yan

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineer, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

The application of additive manufacturing technology in casting is one of the main fields of additive manufacturing technology application. Additive manufacturing technology can directly prepare casting molds (cores) with no need of patterns, and quickly cast complex castings. The combination of additive manufacturing and traditional casting technology can break the constraint of traditional casting technology, improve the casting flexibility and ameliorate working environment. Besides, the additive manufacturing promotes realizing “free casting”, greatly simplifying the processing process and shortening the manufacturing cycle. This paper summarizes the basic principle of additive manufacturing technology and its development situation domestic and overseas, mainly focuses on the development status of several main additive manufacturing technologies applicable to the casting field, including three-dimensional printing, selective laser sintering, stereolithography, layered extrusion forming, etc. Finally, the future development direction of additive manufacturing technology in casting field is prospected.

Key words:

additive manufacturing; rapid prototyping; 3D printing; casting process; rapid casting
