

陶瓷增材制造技术的研究现状与展望^①

胡子健, 俞风英, 钟佳妮, 占丽娜, 刘耀

(萍乡学院 机械电子工程学院, 江西 萍乡 337000)

摘要: 为深入了解陶瓷增材制造技术的研究现状,基于国内外学者关于陶瓷增材制造技术的研究成果,针对直写成型技术、熔融沉积成型技术、选择性激光烧结技术、立体光刻成型技术和数字光处理技术的工艺和使用材料进行了综述,并总结了5种陶瓷增材制造技术的优缺点,可为陶瓷增材制造技术应用场景提供参考。最后展望了陶瓷增材制造技术的未来发展方向。

关键词: 陶瓷; 增材制造; 结构陶瓷; 技术工艺; 3D打印; 陶瓷浆料

中图分类号: TQ174; TP391

文献标志码: B

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.035

文章编号: 0253-6099(2025)02-0197-08

Research Status and Prospects of Ceramic Additive Manufacturing

HU Zijian, YU Fengying, ZHONG Jiani, ZHAN Lina, LIU Yao

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Pingxiang University, Pingxiang 337000, Jiangxi, China)

Abstract: To gain an in-depth understanding of research status of ceramic additive manufacturing, the technical processes of direct ink writing, fused deposition modeling, selective laser sintering, stereolithography and digital light processing, as well as the materials used in those technologies are reviewed based on domestic and international researches on ceramic additive manufacturing. The advantages and disadvantages of those five technologies are summarized, which can provide references for their application scenarios. Finally, the prospect for the development of ceramic additive manufacturing is also discussed.

Key words: ceramic; additive manufacturing; structural ceramics; technical process; 3D printing; ceramic pulp

先进结构陶瓷作为新材料产业的代表,近年来,发展比较迅速,已经广泛应用于航空航天、军工、化工、医疗等领域。然而,陶瓷具有极高的硬度和脆性,其成型和加工一直是材料成型领域的难点。相较于传统的依赖模具的成型方法,如干压、胶带铸造、滑铸、凝胶铸造,增材制造(additive manufacturing, AM)技术能够制造高精度、复杂致密的陶瓷组件,是制造先进结构陶瓷的关键技术。

陶瓷增材制造技术的发展对推动我国陶瓷制造产业的整体进步和转型升级、提升陶瓷产品性能指标与应用范围具有重要意义。目前,陶瓷增材制造技术领域的专家学者们对陶瓷增材制造技术工艺、性能特点、应用领域以及原料配比等都进行了相关研究,但对于陶瓷增材制造技术的整体发展情况还缺少比较全面的归纳和总结。因此,本文综述了陶瓷增材制造技术的

发展现状,介绍了5种常用的陶瓷增材制造技术,列举了国内外部分具有代表性的陶瓷增材制造技术应用成果,在此基础上,归纳了陶瓷增材制造技术的特点,并对其未来发展方向进行了展望。

1 陶瓷增材制造技术的研究现状

近年来,陶瓷增材制造技术在先进制造领域得到了广泛关注与研究,成为制造复杂陶瓷部件的重要手段。该技术基于三维数字模型,通过逐层积累的方式将陶瓷材料加工成所需的形状。不同于传统的成型技术,陶瓷增材制造技术采用粉末或丝材作为原料,并通过激光、电子束等高能束源实现原位冶金熔化和快速凝固,从而完成零件的逐层堆积成形。随着高精度打印技术的进步,陶瓷增材制造技术在多材料或多功能结构集成制造方面展现了巨大潜力和独特优势。

① 收稿日期: 2024-10-26

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2022117);江西省高等学校教学改革研究省级项目(JXJG-22-22-11)

作者简介: 胡子健(1985—),男,江西萍乡人,硕士,讲师,主要研究方向为增材制造、智能仪器仪表。E-mail:314937876@qq.com

通信作者: 刘耀(1985—),男,浙江温州人,博士,副教授,主要研究方向为陶瓷增材制造、粉体成型。E-mail:65485913@qq.com

当前,陶瓷增材制造技术研究主要集中在加工方法、材料体系的开发与优化以及制备过程中遇到的挑战等方面。研究者在改善陶瓷增材制造技术可靠性与稳定性方面做了大量工作,提出了多种解决方案,包括优化激光参数、开发新型陶瓷粉末及复合材料体系等。提高陶瓷材料的力学性能和加工精度,解决材料退火与烧结过程中的难题,也是当前的研究热点。

综上所述,陶瓷增材制造技术正在快速发展,尤其是在高性能陶瓷部件的设计、制造和应用上展现出巨大的前景。然而,该技术仍面临一些挑战,包括材料性能的提升、成形精度的控制以及生产效率的提高等。随着新材料、新技术及新工艺的不断涌现,陶瓷增材制造技术的应用范围将进一步扩展。

2 陶瓷增材制造技术

2.1 直写成型技术

直写成型(direct ink writing, DIW)技术于1997年由 Cesarano^[1]首次提出,其技术原理^[2]如图1所示。首先,需要制备具有高固相含量的陶瓷浆料。该浆料通过安装在Z轴方向上的喷嘴挤出,喷嘴能够根据计算机控制软件设定的截面轮廓在X轴和Y轴平面上运动,形成一层三维平面。当一层平面形成后,喷嘴将在计算机的控制下沿Z轴上升至预定高度,随后,第二层平面将通过喷嘴按“直写”方式完成。此过程通过逐层堆叠的方式,最终打印出具有三维结构的陶瓷毛坯。

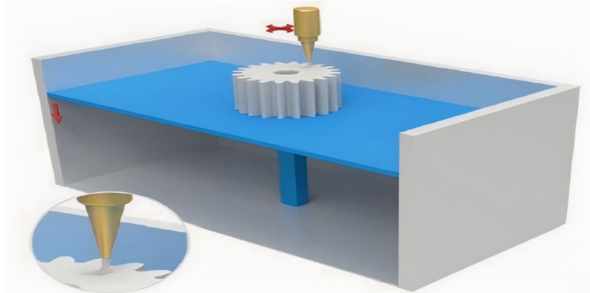


图1 DIW 技术原理

Fig.1 DIW technology principle

与其他陶瓷增材制造技术相比,DIW 技术具有以下优点^[3]:① 可以使用去离子水作为分散介质,通过加入超细陶瓷粉末,制备出稳定且分散均匀的陶瓷浆料;② 操作简单,可以在常温下完成成型;③ 采用直接挤出的打印方法,无需紫外光或激光辐射,显著降低了打印成本和技术难度。

在结构陶瓷制造方面,文献[4]首次报道了使用DIW 技术结合无压力火花等离子体烧结制造具有复杂结构的碳化硼组件。同时,DIW 技术即使不采用支

撑物(如粉末床、液体桶或印刷支撑)也能打印出具有高纵横比或跨越部件的独立结构,在小型电子元器件、晶格结构元件、催化剂载体、能源器件^[5]和组织工程^[6-7]等领域具有极大的应用前景。此外,DIW 技术能制备有利于细胞和组织生长的多孔点阵结构,在生物陶瓷植入物制造方面具有较为广泛的应用。文献[8]利用DIW 技术打印三维多孔羟基磷灰石(HA)结构支架并进行骨生长(见图2),通过模拟人类骨骼的自然微结构构建多尺度孔隙,显示出在骨骼修复和替换领域的巨大应用潜力。

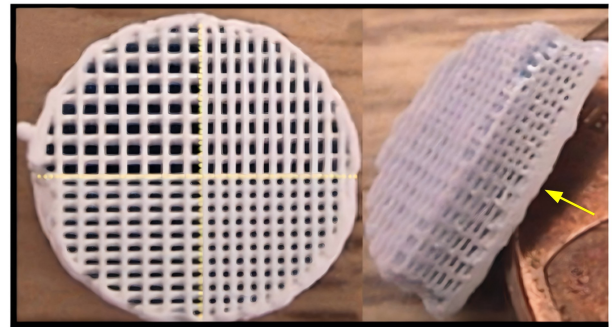


图2 DIW 技术制备的羟基磷灰石(HA) 结构支架

Fig.2 Hydroxyapatite (HA)-based scaffold prepared by DIW

目前,陶瓷材料的DIW 技术在实际应用中仍面临挑战,主要集中在如何制备既具备良好稳定性又具有适当流动性的陶瓷浆料,以及如何确保浆料能够平稳顺畅地挤出,避免出现堵塞、流涎或断丝等问题。

2.2 熔融沉积成型技术

熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)技术首先利用机械设计软件根据打印对象的尺寸和形状构建三维数字模型,然后将该模型导入切片软件并设置相关参数。通过挤出系统将各种热熔性丝状材料(如尼龙、聚碳酸酯、聚乳酸等)送入热熔喷头进行加热熔化。喷头根据预设的截面轮廓和填充路径运动,将半熔融状态的材料逐层挤出并沉积在预定位置,随着每一层的叠加和凝固,最终完成三维物体的打印。打印完成后,坯体通过热脱脂和烧结处理,最终获得致密的陶瓷零件。FDM 技术打印原理如图3所示:塑料丝在驱动电动机的作用下推送到熔浆室,加热后通过喷嘴挤压放置在打印平台上。图4为FDM 技术打印ABS-氧化锆复合材料工艺流程图^[9]。

FDM 技术已广泛应用于生物医疗、军工和汽车等领域,文献[10-11]研究表明,基于FDM 技术研究的3D 打印细胞传感器已成功应用于细胞密度成像和细胞毒性测试。文献[12]将聚合物/碳纳米材料与FDM 技术结合在一起制造电化学传感器。文献[13]通过

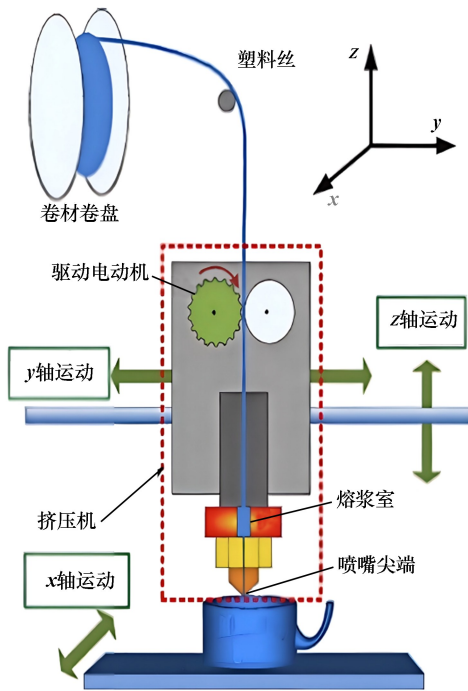


图 3 FDM 技术打印原理
Fig.3 FDM printing principle

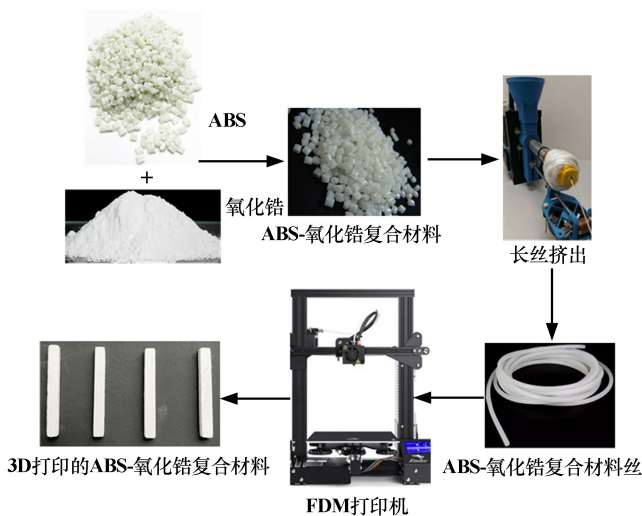


图 4 FDM 技术打印 ABS-氧化锆复合材料工艺流程图
Fig.4 Process flow chart of ABS-zirconia composite printed by FDM

研究碳纤维和陶瓷颗粒增强的热塑性聚氨酯、尼龙和聚乳酸长丝,探讨了 FDM 技术打印结构的能量耗散问题。文献[14]研究了碳纳米管热塑性聚氨酯长丝的导电性,并分析了使用 FDM 将电容和压阻传感器集成到机器人制动器中的应用前景。文献[15]以 PA/HAp/ZrO₂ 复合材料为原料制作了一个 3D 打印模型,发现在基体聚合物中加入碳纳米管可显著改善 FDM 打印部件的机械属性和功能。文献[16]研究了 FDM 3D 打印机制造的高陶瓷填充聚酰胺 12 的机械和物理

特性,并将其作为潜在的生物材料应用于颅面植入物中。

FDM 技术具有易于控制和加工、操作温度低及操作过程无需监控等优点^[17],能有效提高打印效率。然而,FDM 技术在实际应用中依然存在以下问题:用于 FDM 的材料有限、机械性能较低及 FDM 打印零件的功能性较差等。文献[18]研究了不同喷嘴直径与螺杆转速下挤出流量与料筒温度的关系,指出料筒温度对挤出流量有影响,进而影响成型,影响 FDM 打印样品的性能。目前,研究人员致力于扩大可用于 FDM 加工的材料范围,主要的研究对象为复合材料,如陶瓷复合材料和天然纤维增强复合材料^[19]。此外,还重点研究了 FDM 打印用填料改性材料,以期提高 FDM 打印材料的机械性能^[20]。

2.3 选择性激光烧结技术

选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)技术是一种以粉末为原料的增材制造技术,由于其材料选择的多样性及其结构设计的灵活性和通用性,该技术已得到广泛应用^[21]。图 5 为 SLS 技术原理图^[22],整个系统主要由激光器、振镜扫描系统、加热系统、工作台、粉末缸、铺粉辊等构成。激光烧结成型过程^[23]为:首先在工作台上均匀铺设一层热敏粉末(层厚为 0.08~0.3 mm),通过辅助加热设备将粉末预热至其熔点以下温度(即黏结剂的软化温度)。随后,激光束在粉末层表面进行选择性烧结^[24]。接着,将工作台下降至一定高度,铺粉装置重新铺上一层粉末,激光束开始对新的一层粉末进行扫描烧结。整个过程不断循环,直到完成打印。打印完成后,通过去除未烧结的松散粉末,得到初步的坯件。随后对坯件进行二次烧结或浸渍等后处理,即可获得最终的零件^[25]。

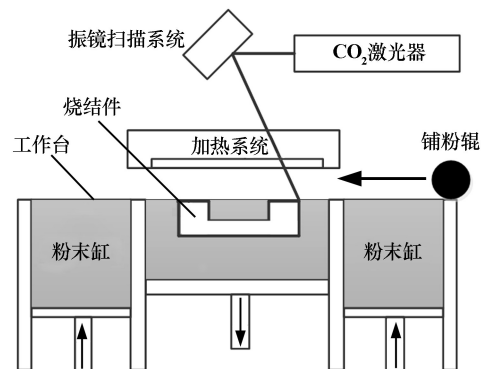


图 5 SLS 技术原理
Fig.5 SLS technology principle

SLS 技术的优势包括:能够制造高强度且性能优越的工件;成型过程中不需要额外设计或构建支撑结

构;能够显著缩短零部件的加工时间,降低制造成本,并且对环境影响较小。在SLS工艺中,粉末流动性对扩散质量起着重要作用,流动性越好的粉末扩散性也越好。通常情况下,粒径分布越窄、球形度越高、颗粒越大时,粉末的流动性更好^[26]。在双峰分布的颗粒粉末中,较小的颗粒能够填充较大颗粒间的空隙,从而提高粉末床的堆积密度。

目前,研究人员针对SLS技术的原料、原理等做了大量研究。文献[27]通过横向送粉建立了宽波束激光熔覆工艺的激光-粉末相互作用模型,提出使用衰减系数描述激光能量在激光-粉末相互作用区的分布情况;结果表明,衰减系数和粉末温度的分布是不对称的,激光功率对衰减系数没有影响,粉末进给率对宽光束激光熔化粉末的温度分布也没有影响。文献[28]利用激光粉末床打印法制备了具有孔隙结构的高性能3D氧化铝泡沫陶瓷。文献[29]提出了一种新的制备方法,显著提高了选择性激光打印制备的双壳结构多孔多晶的力学性能;该方法采用 $Mn(Ac)_2 \cdot 4H_2O$ 与高锰酸钾的共沉淀反应制备二氧化锰内壳,并利用溶剂蒸发法制备酚醛树脂外壳;与未经处理的莫来石粉末(未添加二氧化锰)相比,所制备的多孔莫来石陶瓷抗压强度和断裂韧性显著提高1~2个数量级。

SLS技术可以制备传统陶瓷制备工艺无法实现的复杂结构,如晶格、蜂窝、波纹等夹层结构。文献[30]通过SLS技术制备SiCw/SiC复合材料,建立了晶须生长速率与孔隙率的关系模型,为陶瓷基复合材料的3D打印应用提供了理论支持。文献[31]制备了一种具有多层结构的高性能吸波陶瓷气凝胶,该气凝胶由透波层(Si_3N_4)和吸波层(SiC)交替组成,温度1000℃时,其最小反射损耗为-45 dB,具有优异的吸波性能。

为提高SLS技术打印精度,文献[32]提出了仿真与实验相结合,采用添加支撑和偏置余量的方法对容易翘曲变形的特征尺寸进行修正补偿。对于聚合物而言,只有少数聚合物粉末材料适用于SLS打印,其中价格高昂的PA12最为常见。因此,未来需开发更多适用于SLS打印的廉价聚合物材料。

2.4 立体光刻成型技术

立体光刻成型(stereo lithography apparatus, SLA)技术原理^[33]如图6所示,该技术主要依靠特定波长和强度的紫外光作为光源,通过扫描系统控制激光在液槽中扫描。液槽中浆料在激光照射下发生光聚合反应,导致浆料的分子量急剧增加,从液态转变为固态。当一层固化完成后,激光未照射的部分保持液态,工作平台通过升降台下降一个层高,随后刮板涂布并刮平

新一层树脂^[34-35],然后再进行下一层扫描,新固化的一层树脂牢固地黏在前一层树脂上,如此重复直到整个零件打印完毕。该技术具有精度高、打印速度快、原材料可回收利用、无需支撑结构等优点,与数字光处理技术相比,SLA技术使用的陶瓷浆料固体含量更高,制得的零件尺寸更大且具有良好的表面质量、高致密度和良好的机械性能。

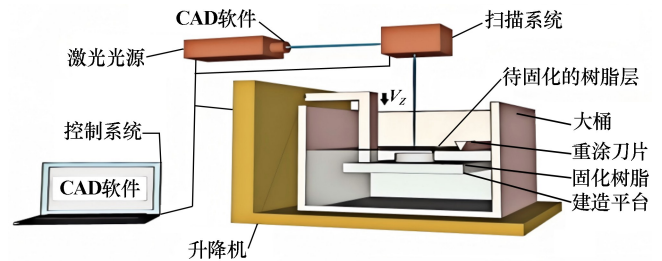


图6 SLA技术原理

Fig.6 SLA technology principle

陶瓷材料一直是SLA技术研究的重点,其中针对 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Si_3N_4 等陶瓷材料的SLA技术受到广泛关注。在SLA技术中,所制备的陶瓷悬浮液的分散性、稳定性、流变特性是影响成型的主要因素^[36]。文献[37]发现分散剂质量分数5%时,浆料黏度最低,此时固相含量达到最高。文献[38]指出陶瓷浆料中的添加剂会影响陶瓷浆料的流变性。文献[39]发现浆料的流变特性对3D打印成型起关键作用。文献[40]研究了陶瓷成型工艺中影响坯体质量的因素,发现膏料黏度低于1000 Pa·s时,坯体可以获得较高的成形精度。此外,陶瓷颗粒粒径^[41]对打印成型也有很大影响,粒径增大会影响液体中光线散射,增大折射率,降低聚合物的聚合速率,导致成型效率降低。

文献[42]开发了逐层制备陶瓷分层晶体结构的方法,以两种改性的高级掺杂氧化锆陶瓷为原料,仅用56 min就制得22个样品。文献[43]系统评估了SLA技术制备的羟基磷灰石(HAP)部件的固化和界面拉伸强度,探究了分散剂和辐照参数对HAP陶瓷浆料的影响。文献[44]提出适用于SLA技术的陶瓷浆料应具有剪切稀化流变特性,剪切速率 $30 s^{-1}$ 时,浆料黏度不应超过5000 mPa·s,以确保重涂平面的平滑。文献[45]研究了固含量70%的 Al_2O_3 陶瓷浆料,并通过双刮刀模块实现了高屈服应力浆料的均匀涂层。文献[46]采用SLA技术打印样品,并通过改变激光功率测量固化线宽度和深度,激光功率越大时,固化线的宽度和深度值越大。

此外,一些研究人员采用SLA技术制备医用双相磷酸钙(BCP)生物陶瓷。文献[47]利用SLA技术成

功制备了具有优异致密性和力学性能的 BCP 生物陶瓷,并首次探讨了烧结温度对 SLA 打印 BCP 生物陶瓷微观结构及其力学性能的影响。文献[48]采用 SLA 技术制备了孔隙率 15% 的 BCP 生物陶瓷,其抗压强度为 4.32 MPa。图 7 为 BCP 生物陶瓷生坯和 1 250 °C 下烧结的支架。SLA 技术对产品设计、参数处理等专业性要求较高,设备、光敏树脂、打印服务价格昂贵,一定程度上限制了 SLA 技术的发展、应用及推广。

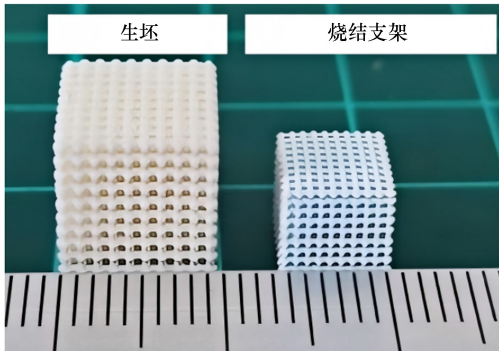


图 7 SLA 技术制备 BCP 生物陶瓷

Fig.7 Preparation of BCP bioceramics by SLA

2.5 数字光处理技术

数字光处理(digital light processing, DLP)技术是一种基于离散堆积原理的成型技术,通过紫外光引发光敏树脂的聚合反应,能够实现数字模型的物质重构。该技术能够制造出具有高自由度、优异尺寸精度和表面质量的工件,广泛应用于聚合物、金属、陶瓷以及复合材料的制备^[49]。DLP 主要工艺步骤为:① 将模型切片后的数据转化为连续的投影图像,并传输至数字光处理模块;② 配制光敏树脂基陶瓷浆料;③ 在设定好打印参数的 DLP 打印设备上打印;④ 从打印平台取出素坯,进行清洗和烘干处理;⑤ 根据陶瓷浆料的组分和固相含量,采用优化的脱脂和烧结工艺,最终获得成型的陶瓷部件^[50]。DLP 技术原理如图 8 所示,系统主要由光学设备、浆料槽、成型平台、刮刀等构成,紫外光照射固化陶瓷浆料,可旋转浆料槽通过刮刀将非自流平陶瓷浆料填充到成型之后的空缺位置。

目前,陶瓷部件的 DLP 技术仍面临许多挑战,尤其是在如何获得高质量陶瓷浆料方面。文献[51]通过醇水溶剂和正、反向共沉淀法制备了分散性较好的 $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 复合陶瓷粉末,研究表明,反向共沉淀法能有效抑制粉末团聚,获得粒径较小、分散均匀的陶瓷浆料。文献[52]从光敏树脂的角度出发,研究单体与铝合金光固化增材制造的关系,总结了单体种类对光固化增材制造 5052 铝合金浆料稳定性、黏度的影响。

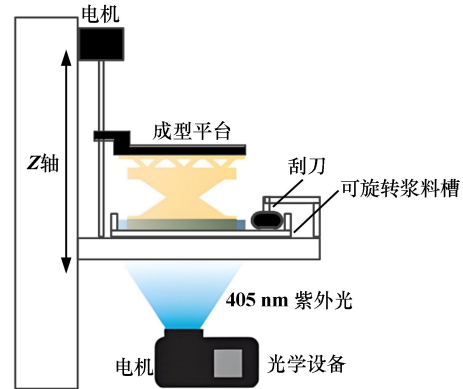


图 8 DLP 技术原理

Fig.8 DLP technology principle

此外,脱胶也是 DLP 技术所面临的一项重大挑战。在脱胶过程中,形成缺陷的概率极高^[53]。脱胶时,温度升高会打断聚合物链,将其分成更小的单元并以气体形式从坯体中逸出。脱胶和烧结工艺的选择对获得无缺陷、结构致密、性能优异的高精度大尺寸陶瓷部件有至关重要的作用。

尽管面临以上挑战,但 DLP 技术仍是一种极具潜力的陶瓷增材制造技术,可为设计、制造和应用具有高几何复杂性的催化剂结构提供新思路。文献[54]采用渗入沸石颗粒的方法提高机械稳定性,并使用 DLP 技术打印了具有较好机械稳定性的纯 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂载体。文献[55]使用 DLP 技术制备了声学谐振器,吸音效果出色。文献[56]详细讨论了增塑剂在 ZrO_2 陶瓷立体光刻增材制造中的作用,并评估了使用 DLP 技术打印的 ZrO_2 的生物学性能。文献[57]以自主合成的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ 复合粉体为原料制备了适用于 DLP 光固化 3D 打印成型的光敏陶瓷浆料,通过真空高温烧结获得了高致密 YAG 透明陶瓷。

3 陶瓷增材制造技术的特点

基于前述陶瓷增材制造技术的工艺、使用材料和应用场景,5 种常用的陶瓷增材制造技术的特点如下。

直写成型技术的优点是制备温度低,可操作性好,可制备多孔点阵结构,缺点是应用领域相对特殊,设备投资与加工成本高。

熔融沉积成型技术的优点是操作温度低,易于控制和加工,操作过程无需监控;缺点是需要设计和制作支撑结构,需对整个截面进行扫描涂覆,成型时间较长。

选择性激光烧结技术的优点是成型过程中无需设计和构造支撑部件,加工时间短,制造成本低;缺点是

样件后期处理较难、原型结构疏松、多孔,且有内应力,制作易变形,成型过程可能产生有毒气体及粉尘,污染环境。

立体光刻成型技术的优点是成本低,性能稳定,可制备大尺寸样件;缺点是样件经过脱脂和烧结之后的收缩量较大。

数字光处理技术的优点是可制备高自由度、高尺寸精度的样件;缺点是技术性相对复杂,对设备性能要求较高。

目前,陶瓷增材制造产业仍处于技术研发和小规模试产阶段。相较于传统陶瓷制备技术,陶瓷增材制造技术只是取代了传统陶瓷成型工艺,但在成型后仍需要进行脱脂和烧结以使成品达到设计要求。尽管陶瓷增材制造技术在成型速度、成型幅面、成型精度等方面取得了显著进步,但整体行业发展水平仍难以满足陶瓷增材制造业的实际需求。

4 结语

目前,陶瓷增材制造技术已成为陶瓷材料界以及增材制造领域备受关注的研究热点,但根据目前的技术发展现状,利用陶瓷增材制造技术制备先进结构陶瓷仍需持续加大研究力度。陶瓷增材制造技术的未来发展方向主要包括以下3个方面。

1) 通过采用新型材料和智能数控技术,提高陶瓷零件的精度、性能和生产效率,制备大尺寸复杂异形功能陶瓷。

2) 通过 TG-FTIR 实验优化产品脱脂烧结曲线,以及选用合适的脱脂气氛、升温速率,并添加烧结剂和晶粒细化剂,以减少表面裂纹、提高陶瓷产品最终烧结后的密度和力学性能。

3) 选用合适的分散剂、表面改性剂和增塑剂等添加剂,制备兼具高固含量、良好流变性能、稳定的陶瓷浆料。

研发制备功能陶瓷的浆料与创新陶瓷材料结构将是陶瓷增材制造技术未来的研究热点。随着科技的发展,陶瓷增材制造技术将来具有更广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] CESARANO J. A review of robocasting technology[J]. MRS Online Proceedings Library (OPL), 1998,542:133-139.
- [2] CHEN Z W, LI Z Y, LI J J, et al. 3D printing of ceramics: A review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019,39(4):661-687.
- [3] LI Y Y, SI Y H, XIONG X B, et al. Ceramic 3D printing[J]. Journal of Silica, 2017,4(56):793-805.
- [4] EQTESADI S, MOTEALLEH A, PERERA F H, et al. Fabricating geometrically-complex B₄C ceramic components by robocasting and pressureless spark plasma sintering[J]. Scripta Materialia, 2018,145:14-18.
- [5] LIU C, CHENG X, LI B, et al. Fabrication and characterization of 3D-printed highly-porous 3D LiFePO₄ electrodes by low temperature direct writing process[J]. Materials, 2017,10(8):934.
- [6] MICHNA S, WU W, LEWIS J A. Concentrated hydroxyapatite inks for direct-write assembly of 3-D periodic scaffolds[J]. Biomaterials, 2005,26(28):5632-5639.
- [7] SIMON J L, MICHNA S, LEWIS J A, et al. In vivo bone response to 3D periodic hydroxyapatite scaffolds assembled by direct ink writing[J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2007,83A(3):747-758.
- [8] ZOCCA A, FRANCHIN G, ELSAYED H, et al. Direct ink writing of a preceramic polymer and fillers to produce hardystonite (Ca₂ZnSi₂O₇) bioceramic scaffolds[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2016,99(6):1960-1967.
- [9] BADOGU K, KUMAR R. Investigations on hardness and surface roughness of 3D printed ABS-ZrO₂ composite structures for post processing applications[J/OL]. Materials Today: Proceedings, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.032>.
- [10] ANDERSON K B, LOCKWOOD S Y, MARTIN R S, et al. A 3D printed fluidic device that enables integrated features[J]. Analytical Chemistry, 2013,85(12):5622-5626.
- [11] ALAPAN Y, HASAN M N, SHEN R C, et al. Three-dimensional printing based hybrid manufacturing of microfluidic devices[J]. Nanotechnology in Engineering and Medicine, 2015,6(2):021007.
- [12] OMAR M H, RAZAK K A, WAHAB M N A, et al. Recent progress of conductive 3D-printed electrodes based upon polymers/carbon nanomaterials using a fused deposition modelling (FDM) method as emerging electrochemical sensing devices[J]. RSC Advances, 2021,11(27):16557-16571.
- [13] TOLOCHYNA O, ZGALAT-LOZYNSKI N, PODREZOV Y. The role of flexible polymer composite materials properties in energy absorption of three-dimensional auxetic lattice structures[J]. Materials Today Communications, 2023,37:107370.
- [14] HLAVÁČKOVÁ S, OMANÍKOVÁ L, HORVÁTH V. The possibility of using the regranulate of a biodegradable polymer blend based on polylactic acid and polyhydroxy butyrate in FDM 3D printing technology[J]. Results in Materials, 2024,21:10051.
- [15] TUAN N A T R, ABDUL M A, HAZIZAN M. The improvement of mechanical and thermal properties of polyamide 12 3D printed parts by fused deposition modelling[J]. Express Polymer Letters, 2017,11(2):963-982.
- [16] ABDULLAH A M, RAHIM T N A T, MOHAMAD D, et al. Mechanical and physical properties of highly ZrO₂/β-TCP filled polyamide 12 prepared via fused deposition modelling (FDM) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application[J]. Materials Letters, 2017,189:307-309.
- [17] 李茂, 周子民, 梁叔全. 粉末注射成型充填过程数值模拟[J]. 矿冶工程, 2006,26(6):77-80.
- LI Mao, ZHOU Jieming, LIANG Shuquan. Numerical simulation of the filling process in powder injection molding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006,26(6):77-80.

- [18] 贺庆龙. 基于FDM的3D打印机设计及其在氧化锆陶瓷制备中的应用[D]. 长沙:长沙理工大学, 2020.
HE Qinglong. Design of 3D printer based on FDM and its application in the preparation of zirconia ceramics[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2020.
- [19] MOHAN N, SENTHIL P, VINODH S. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modeling process[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12(1): 47-59.
- [20] KOUCHAKZADEH S, NAROUEI K. Simulation of piezoresistance and deformation behavior of a flexible 3D printed sensor considering the nonlinear mechanical behavior of materials[J]. *Sensor Actuators A: Physics*, 2021, 332:113214.
- [21] DENG K X, WU H H, LI Y, et al. The resin-ceramic-based Fe_3O_4 /graphite composites rapidly fabricated by selective laser sintering for integration of structural-bearing and broadband electromagnetic wave absorption[J]. *Alloys and Compounds*, 2023, 943:169120.
- [22] 陈旭. 选择性激光烧结技术在机械制造领域中的应用[J]. *制造技术与机床*, 2022(12):11-14.
CHEN Xu. Application of selective laser sintering technology in the field of mechanical manufacturing[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2022(12):11-14.
- [23] 杨高峰. 选择性激光烧结陶瓷设备铺粉机构的优化设计[J]. *陶瓷*, 2019(7):51-64.
YANG Gaofeng. Optimization design of powdering mechanism for selective laser sintering ceramic equipment[J]. *Ceramics*, 2019(7): 51-64.
- [24] 水东莉,李刚,徐晓辰. 激光烧结原位合成Cu-Al合金组织结构及性能研究[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(3):156-159.
SHUI Dongli, LI Gang, XU Xiaochen. Research on the microstructure and properties of Cu-Al alloy synthesized in situ by laser sintering[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(3): 156-159.
- [25] SHAO S Y, DU X T, LU J, et al. Application of FRP powder in selective laser sintered polystyrene[J]. *Plastics Industry*, 2018, 46(1): 49-53.
- [26] LU H F, GUO X L, LIU Y, et al. Effect of particle size on flow mode and flow characteristics of pulverized coal[J]. *KONA Powder Part J*, 2015, 32:143-153.
- [27] LIU H, ZHOU Y. An interaction model for laser and powder in wide-beam laser cladding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112:15-23.
- [28] DONG Y, CHEN A, YANG T, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Al_2O_3 foams via laser powder bed fusion from Al particles[J]. *Advanced Powder Materials*, 2023, 2(4): 100135.
- [29] CHEN A, LU L, CHENG L J, et al. TEM analysis and mechanical strengthening mechanism of MnO_2 sintering aid in selective laser sintered porous mullites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 809(15):151809.
- [30] LU D, ZHANG L, CHENG S, et al. Microstructure control of SiC_w/SiC composites based on SLS technology[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(9):3747-3758.
- [31] CAI Z, SU L, WANG H, et al. Alternating multilayered $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ aerogels for broadband and high-temperature electromagnetic wave absorption up to 1000 °C[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(14): 16704-16712.
- [32] 刘利剑,朱守宵,等. 选区激光烧结工艺打印精度控制方法[J]. *塑料科技*, 2024, 52(5):130-133.
LIU Lijian, ZHU Shouxiao, et al. Control method for printing accuracy in selective laser sintering process[J]. *Plastic Science & Technology*, 2024, 52(5):130-133.
- [33] KRUTH J P, FROYEN L J, VAERENBERGH V, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149:616-622.
- [34] LIRAVI F, DAS S, ZHOU C. Separation force analysis and prediction based on cohesive element model for constrained-surface stereolithography processes[J]. *Computer-Aided Design*, 2015, 69:134-142.
- [35] MELCHELS F P, FEIJEN J, GRIJPMAN D W. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering[J]. *Biomaterials*, 2010, 31(24):6121-6130.
- [36] 刘金枝,高子明,程起超,等. 温度对膏体充填料浆流变特性影响试验研究[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(3):24-26.
LIU Jinzhi, GAO Ziming, CHENG Qichao, et al. Experimental study on the effect of temperature on rheological properties of paste fillers[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(3):24-26.
- [37] CHEN F, ZHU H, WU J M, et al. Preparation and biological evaluation of ZrO_2 all-ceramic teeth by DLP technology[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(8):11268-11274.
- [38] ZAMAN A A, FRICKE A L. Viscoelastic properties of high solids softwood kraft black liquors[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1995, 34(1):382-391.
- [39] BERLI C L A, QUEMADA D. Rheological modeling of microgel suspensions involving solid-liquid transition[J]. *Langmuir*, 2000, 16(21): 7968-7974.
- [40] SCHWARZER E, GÖTZ M, MARKOVA D, et al. Lithography-based ceramic manufacturing(LCM): Viscosity and cleaning as two quality influencing steps in the process chain of printing greenparts[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37(16):5329-5338.
- [41] XU X Y, ROBLES-MARTINEZ P, MADLA C M, et al. Stereolithography (SLA) 3D printing of an antihypertensive polyprintlet: Case study of an unexpected photopolymer-drug reaction[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 33:101071.
- [42] PCHELINTSEV I, KARAMOV R, TIKHONOV A, et al. Fabrication of hierarchical lattice structures from zirconia stabilized ceramics by micro-SLA 3D printing approach[J]. *Ceramics International*, 2023, 49:29409-29416.
- [43] CHEN Q H, ZOU B, LAI Q G, et al. Influence of irradiation parameters on the curing and interfacial tensile strength of HAP printed part fabricated by SLA-3D printing[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(14):6721-6732.
- [44] HINCZEWSKI C, CORBEL S, CHARTIER T. Stereolithography for

- the fabrication of ceramic three-dimensional parts[J]. *Rapid Prototype Journal*, 1998,4(3):1355-2546.
- [45] HE L, SONG X. Supportability of a high-yield-stress slurry in a new stereolithography-based ceramic fabrication process[J]. *JOM*, 2018, 70:407-412.
- [46] XU X Y, ROBLES-MARTINEZ P, MADLA C M, et al. Stereolithography (SLA) 3D printing of an antihypertensive polyprintlet: Case study of an unexpected photopolymer-drug reaction[J]. *Additive Manufacturing*, 2020,33:101071.
- [47] DONG D, SU H J, LI X, et al. Microstructures and mechanical properties of biphasic calcium phosphate bioceramics fabricated by SLA 3D printing[J]. *Manufacturing Processes*, 2022,81(10):433-443.
- [48] LI X, YUAN Y, LIU L, et al. 3D printing of hydroxyapatite/tricalcium phosphate scaffold with hierarchical porous structure for bone regeneration[J]. *Bio-Design and Manufacturing*, 2020,3:15-29.
- [49] KAI C C. Three-dimensional rapid prototyping technologies and key development areas[J]. *Control Engineering Journal*, 1994,5(4):200-206.
- [50] GONG P, YAN X K, XIONG W, et al. Design of a debinding process for polymetallic material green parts fabricated via metal paste injection 3D printing with dual nozzles[J]. *RSC Advances*, 2020,10:18000-18007.
- [51] 何轶伦,周伍喜,李松林,等. $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 纳米复合陶瓷粉末的制备[J]. *矿冶工程*, 2014,34(1):100-102.
HE Yilun, ZHOU Wuxi, LI Songlin, et al. Preparation of $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ nano-composite ceramic powder[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2014,34(1):100-102.
- [52] 刘明信,乔聪卓. 单体种类对光固化增材制造 5052 铝合金的影响[J]. *矿冶工程*, 2024,44(2):145-152.
LIU Mingxin, QIAO Congzhuo. Effect of monomer types on photocuring additive manufacturing of 5052 aluminum alloy[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(2):145-152.
- [53] SANTOLIVUDDO O, CAMEROTA F, ORTONA A. The influence of topology on DLP 3D printing, debinding and sintering of ceramic periodic architectures designed to replace bulky components[J]. *Open Ceramics*, 2021,5:100059.
- [54] MASTROIANNI L, RUSSO V, ERÄNEN K. Towards unconstrained catalyst shaping: High accuracy DLP printing of porous $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ -based catalysts [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2024(5):1336-1348.
- [55] CARBAJO J, NAM S H, FANG N X. Fabrication of micro-perforated panel (mpp) sound absorbers using digital light processing (DLP) 3D printing technology [J]. *Applied Acoustics*, 2023,216(15):109788.
- [56] HAN Z Q, LIU S H, QIU K, et al. The enhanced ZrO_2 produced by DLP via a reliable plasticizer and its dental application[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023,141:105751.
- [57] HU S, TANG Y X, ZHOU G H, et al. Photocured 3D printed yttrium aluminum garnet transparent ceramics and their microstructure regulation[J]. *Journal of Silicate*, 2024,52(3):882-889.
- 引用本文:胡子健,俞凤英,钟佳妮,等. 陶瓷增材制造技术的研究现状与展望[J]. *矿冶工程*, 2025,45(2):197-204.
HU Zijian, YU Fengying, ZHONG Jiani, et al. Research status and prospects of ceramic additive manufacturing[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(2):197-204.

(上接第 196 页)

- [17] XU H, DONG Y, BAI S, et al. Effect of small Sn addition on the initial strengthening and microstructural evolution of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023,943:169167.
- [18] TRUDONOSHYN O, PRACH O, RANDELZHOFFER P, et al. Heat treatment of the new high-strength high-ductility Al-Mg-Si-Mn alloys with Sc, Zr and Cr additions[J]. *Materialia*, 2021,15:100981.
- [19] WANG X, MA P K, MENG Z Y, et al. Effect of trace Cr alloying on centerline segregations in sub-rapid solidified Al-Mg-Si (AA6061) alloys fabricated by twin-roll casting[J]. *Materials Science Engineering: A*, 2021,825:141896.
- [20] WANG J, LIU Z Y, BAI S, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of the electron-beam welded joints of cast Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020,801:140363.
- [21] KURMANAEVA L, TOPPING D T, WEN H, et al. Strengthening mechanisms and deformation behavior of cryomilled Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015,632:591-603.
- [22] GAZIZOV M, KAIBYSHEV R. Precipitation structure and strengthening mechanisms in an Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. *Materials Science Engineering: A*, 2017,702:29-40.
- 引用本文:杨国强,刘志义,柏松,等. Cr 含量对低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2025,45(2):193-196.
YANG Guoqiang, LIU Zhiyi, BAI Song, et al. Effect of Cr content on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloy with a low Cu/Mg ratio[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(2):193-196.