引用格式：孙云飞，王泽皓，刘亦欣，等．增材制造水处理用陶瓷的研究现状与发展趋势[J]．材料工程，2026，54(5)：184-199.
SUN Yunfei, WANG Zehao, LIU Yixin, et al. Research status and trends of additive manufacturing of ceramics for water treatment[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(5): 184-199.

增材制造水处理用陶瓷的研究现状与发展趋势

孙云飞[1]，王泽皓[1]，刘亦欣[1]，贺俊超[1]，龚小龙[1,2]，周士翔[3]，
刘　凯[1,4*]，孙华君[4]，闫春泽[5]，史玉升[5]

（1 武汉理工大学 材料科学与工程学院，武汉 430070；2 中南大学 粉末冶金全国重点实验室，长沙 410083；
3 武汉理工大学 交通与物流工程学院，武汉 430070；4 武汉理工大学 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室，武汉 430070；5 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室，武汉 430074）

摘要：增材制造技术具有高精度、无需模具、可调控陶瓷多级结构的优势，为高性能水处理用陶瓷的开发提供了新途径。本文系统综述了基于光固化和直写挤出等增材制造技术制备的水处理用陶瓷在结构设计、材料复合、水处理性能等方面的最新研究进展，并探讨了其在有机污染物催化降解、油水分离等场景的应用潜力。然而，该技术仍面临难以直接制备分离层、极端工况适应性差以及规模化生产难度大等关键挑战。最后展望了水处理用陶瓷在自愈合智能陶瓷材料和机器学习辅助工艺-结构-性能协同优化的研究。本文旨在为增材制造水处理用陶瓷的研究提供参考，以推动增材制造技术在高通量、长寿命水处理用陶瓷中的工业化应用。

关键词：增材制造；陶瓷；水处理；催化降解；油水分离
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000701　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000701
中图分类号：TB32　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)05-0184-16

Research status and trends of additive manufacturing of ceramics for water treatment

SUN Yunfei[1], WANG Zehao[1], LIU Yixin[1], HE Junchao[1], GONG Xiaolong[1,2], ZHOU Shixiang[3], LIU Kai[1,4*], SUN Huajun[4], YAN Chunze[5], SHI Yusheng[5]

(1 School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2 State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China; 3 School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 4 State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 5 State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Additive manufacturing offers a transformative approach to fabricating ceramics for water treatment through precise multi-scale structural control. This paper comprehensively reviews the application advancements of stereolithography and extrusion-based additive manufacturing techniques for fabricating water treatment ceramics in oil-water separation, organic pollutant degradation, and seawater desalination scenarios. However, persistent challenges involve resolution limitations below 100 nm constraining precise separation layers, trade-offs between structural complexity and mechanical integrity causing delamination risks under pressure, and scalability barriers elevating costs. Future advancements will require self-healing smart ceramics enabling autonomous crack repair alongside machine learning-guided co-design strategies to optimize structure-function relationships. This review aims to provide a reference for the research on additive manufacturing of water treatment ceramics, to promote the industrial application of additive manufacturing technology in high-throughput and long-life water treatment ceramics.

Key words: additive manufacturing; ceramics; water treatment; catalytic degradation; oil-water separation

全球水资源危机已成为21世纪人类面临的严峻挑战之一[1-2]。据最新研究统计，全球近40亿人每年至少面临一个月的严重缺水问题，其中半数集中在中国和印度等发展中国家[3-4]。此外，随着工业化和城市化进程加速，水资源污染问题日益凸显，含油废水[5-7]、有机污染物废水[8-11]及高盐废水[12-13]不仅破坏生态平衡，更直接威胁人类健康。传统水处理技术如化学沉淀法[14]、生物降解法[15]等在应对复杂污染物体系时，普遍存在能耗高、二次污染、处理效率低等瓶颈[16]。在此背景下，分离技术凭借其高效分离、能耗低等优势，成为水处理领域的核心技术[17]。其中，水处理用陶瓷因具有卓越的化学稳定性[18]、高机械强度[19]、长使用寿命[20]，在愈发严苛的水处理环境中展现出不可替代的应用潜力。

水处理用陶瓷结构可分为三部分：分离层、过渡层和支撑体。其中，分离层是过滤杂质和净水的主要功能层。然而，陶瓷表面易吸附污染物并堵塞孔道，导致水通量下降，甚至会引起过滤功能失效[21]。此外，功能层间的孔隙突变层状结构也制约了水处理用陶瓷的进一步应用[22]。传统陶瓷制备工艺如流延成型、挤压烧结虽可实现规模化生产，但难以解决上述难题[23-25]。

增材制造（additive manufacturing，AM）技术通过逐层堆积原理，将计算机辅助设计（computer-aided design，CAD）转化为物理实体，实现了“设计即生产”的革命性跨越[26-27]。图1(a)统计了Web of Science平台中2015～2025年水处理用陶瓷相关文献的发表总数。随着研究的深入，增材制造技术在水处理用陶瓷成型与制备流程中的应用占比逐年提升。按照所用原材料的不同，可分为：(1)基于浆料的陶瓷增材制造技术，如直写挤出（direct ink writing，DIW，图1(b)[28]）技术与光固化增材制造（vat photopolymerization，VPP）技术，包括立体光刻（stereolithography apparatus，SLA，图1(c)[29]）和数字光处理（digital light processing，DLP，图1(d)[30]）；(2)基于粉体的陶瓷增材制造技术，如黏结剂喷射（binder jetting，BJ）、激光选区烧结（selective laser sintering，SLS）；(3)基于块材的增材制造工艺，如薄材叠层成型（laminated object manufacturing，LOM）和熔融沉积（fused deposition modeling，FDM）等。

在众多增材制造技术中，VPP与DIW技术已在水处理用陶瓷制造领域得到应用。VPP技术的核心在于利用光敏树脂作为陶瓷颗粒的载体进行固化成型。其中，SLA采用点/线激光逐层扫描固化，能够实现微米级的成型精度和良好的表面质量；但其逐点/线的加工方式使得制造大尺寸或复杂构件耗时较长。相对于SLA，DLP技术使用面光源投影进行整层固化，显著提高了成型效率与精度。总体而言，VPP技术凭借其高精度特性，非常适于制造对结构要求严苛的水处理用陶瓷部件，例如精密的梯度孔道[31]或具有高比表面积的复杂催化骨架。相较之下，DIW技术则展现出极其广泛的材料适应性，能处理多种陶瓷体系及复合材料，且成型效率显著高于光固化技术。尽管其成型精度（主要受限于喷嘴尺寸，通常为100微米至毫米级）和表面质量普遍低于VPP技术，但DIW在制备大尺寸水处理用陶瓷构件以及构建宏观层面的表面功能结构[32]方面，具有难以替代的优势。VPP与DIW技术的应用，为水处理用陶瓷的高效制备和多功能结构实现开辟了重要的新途径（图1(e)）。

本文系统综述了基于光固化和直写挤出等增材制造技术制备的水处理用陶瓷在结构设计、材料复合、水处理性能等方面的最新研究进展，并探讨了其在有机污染物催化降解、油水分离等场景的应用潜力，同时剖析了增材制造水处理功能陶瓷时面临的成型精度、力学性能以及规模化生产效率不足等关键问题，最后对自愈合智能陶瓷材料、结构功能优化设计与性能预测等未来发展方向进行了展望。

1　增材制造水处理用陶瓷的结构与性能

1.1　表面功能结构与性能

在水处理用陶瓷表面进行微纳功能结构设计，可通过诱导局部湍流和增加表面附近的流体剪切应力来减缓污染物的沉积[33]。增材制造技术精度高、可设计性强，在制备表面微纳结构方面具有显著的优势。Armbruster[34]和Ng[35]研究团队主要聚焦于陶瓷表面功能结构设计，以提升水处理用陶瓷的抗污性能。Armbruster等[34]使用数字光处理3D打印制备多种几何形状（螺旋带、Kenics等）的湍流促进器并插入ZrO_2管状膜内，使其改变流道形状，诱导二次流、涡旋，增强流体扰动（图2(a)）。以腐殖酸为模型污染物，在陶瓷管状膜中进行污染实验，在相同的能耗下发现Kenics形状的湍流促进器水通量提升最高，达到140%，且污染曲线接近线性，抗污染能力显著提升。南京理工大学仲兆祥团队[36]通过协同DLP 3D打印技术与浸涂工艺，成功在管式陶瓷膜内表面制备了周期性波纹结构（波长4.8 mm，振幅0.32 mm，图2(b)）。内表面波纹管状陶瓷支撑体由3D打印Al_2O_3浆料烧结成型，分离层通过浸渍旋涂Al_2O_3浆料并二次烧结形成。与常规Al_2O_3管状陶瓷膜相比，过滤纳米颗粒时，水通量提升1.7倍，污染物沉积量减少40%；处理油水乳液和酵

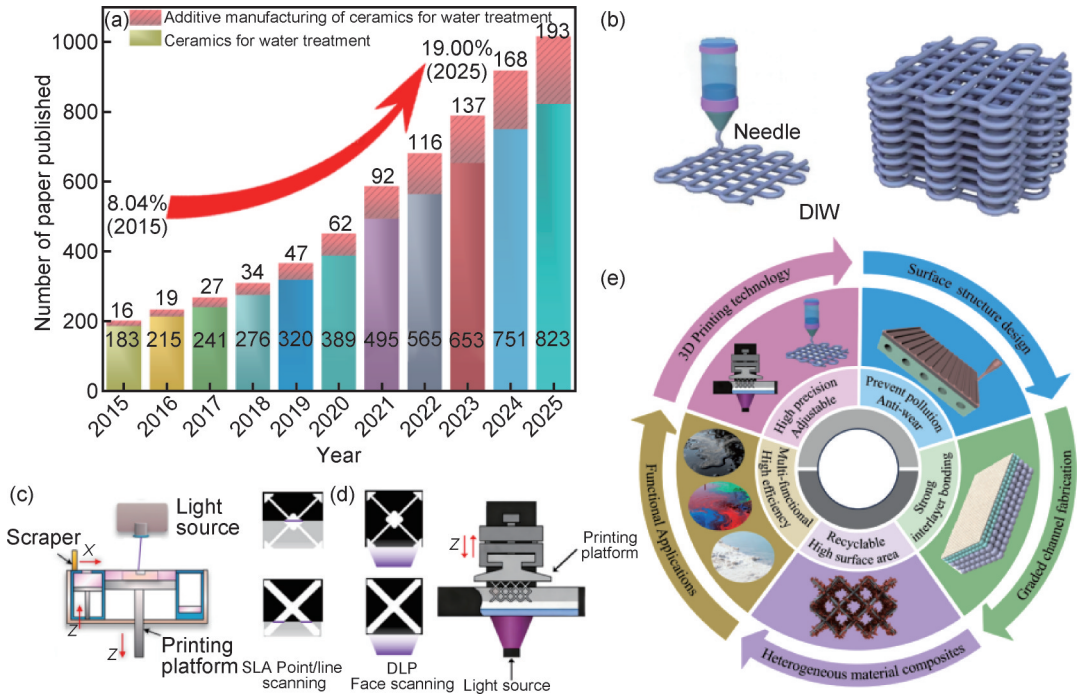


图1 增材制造水处理用陶瓷

(a)水处理用陶瓷相关文献的发表总数(数据来源于Web of Science);(b)DIW技术与逐层叠加成型原理[28];(c)SLA技术与点/线扫描成型原理[29];(d)DLP技术与面扫描成型原理[30];(e)增材制造水处理用陶瓷的主要研究进展与应用

Fig.1 Additive manufacturing of ceramics for water treatment

(a)total number of publications related to ceramics for water treatment(data sourced from Web of Science);(b)DIW technology and layer-by-layer stacking forming principle[28];(c)SLA technology and point/line scanning forming principle[29];(d)DLP technology and surface scanning forming principle[30];(e)main research progress and applications of additive manufacturing ceramics for water treatment

母悬浮液时通量衰减也更为缓慢。通过COMSOL Multiphysics流体仿真模拟,波纹结构通过诱发局部湍流及波峰处高强度剪切应力,破坏污染物的均匀沉积,仅波谷形成局部污染层。膜经清洗后水通量恢复率超90%,为工业废水处理提供了免化学改性的高效解决方案。Zoumpouli等[37]基于DLP 3D打印技术一体化制备出具有正弦波纹与螺旋结构的TiO_2多孔管状陶瓷膜,实现50 μm精度的复杂结构的整体成型。波纹管在波峰处诱导局部涡流,壁面剪切应力最高达10 Pa(直管仅5 Pa),螺旋管则通过旋转流场提升涡旋强度,有效破坏污染物沉积边界层(图2(c))。此外,该陶瓷膜的高孔隙结构兼具渗透性与催化活性载体功能,特殊几何构型通过主动流场调控替代传统湍流促进器,为膜分离、催化反应及气液传质过程提供低能耗、抗污染新方案。

在平板膜中,Ng团队[35]采用直写挤出3D打印技术,在梯度多孔结构的平板氧化铝陶瓷膜表面构筑了功能化微结构(图2(d))。研究表明,当线型结构与进料方向垂直时,膜污染被有效抑制。在50 kPa恒定跨膜压力下过滤稀释活性污泥30 min后,线型结构膜通量仅下降46%(无结构平板膜通量下降达82%);此外,Ng等[38]继续对表面结构参数进行调控,系统研究了高度(h=80、120、250 μm)和线型结构间距(S=200、500、1000 μm)对防污性能的影响规律(图2(e))。

覃航团队[39]将表面微纳功能结构研究扩展到圆形陶瓷膜中,通过流体力学模拟(computational fluid dynamics,CFD)与直写挤出3D打印实验证明,线型比环型结构更能强化膜面剪切力和流速(分别提升55.8%与19.4%)。在75000 Pa跨膜压差下以及分离Al_2O_3悬浮固体颗粒时,200 min时无表面功能结构的陶瓷膜水通量下降到67%,而具有线型结构和环型结构陶瓷膜的水通量分别保持在90%和83%,这是因为形成的高剪切流能有效阻止滤饼层形成,从而显著提升陶瓷膜防污性能(图2(f))。此外,覃航团队[40]还研究了线型结构对圆盘陶瓷膜耐磨性的影响。基于直写式3D打印技术,使用直径1.2 mm的喷嘴在圆盘陶瓷膜上分别打印4、8和12行,在膜表面构建线型“装甲条带”(图2(g))。与常规膜相比,在表面构建功能结构陶瓷膜的耐磨性分别提高了56.1%、89.2%和92.9%。此外,对固含量为100 g/L的Al_2O_3悬浮液进行长时间过滤时,表面功能结构陶瓷膜的渗透通量稳定在0.00321 g/(m^2•h•Pa),截留率超过99.6%,兼具耐磨性和防污性。

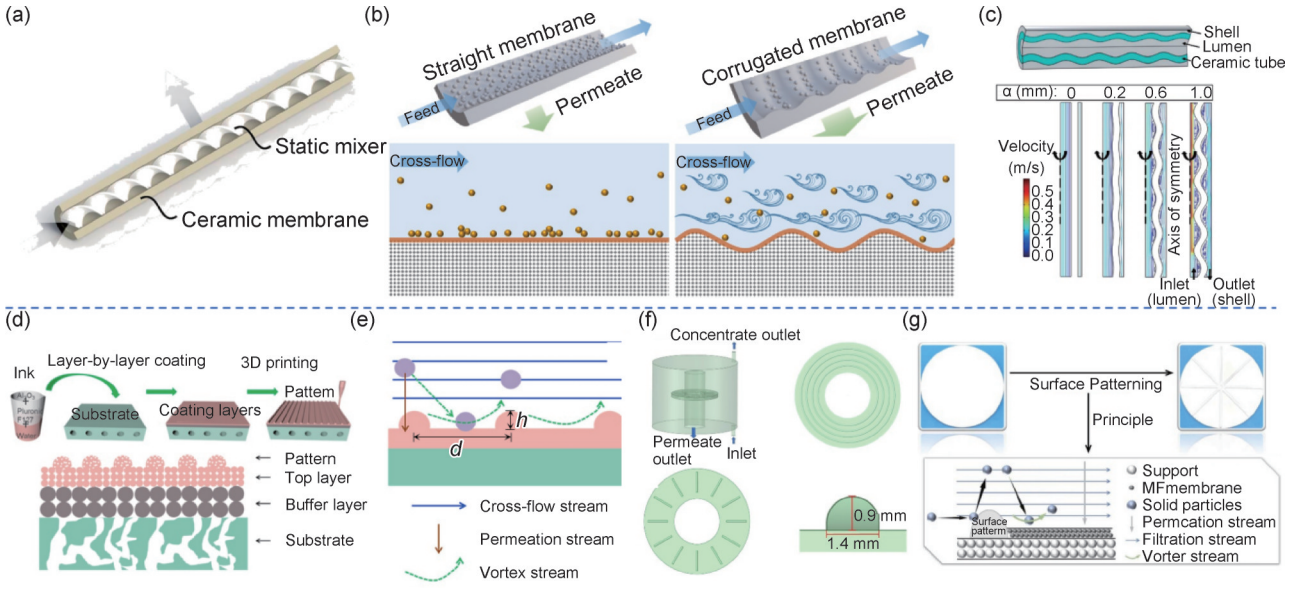


图2　表面微纳功能结构

(a)螺旋带湍流促进器[34]；(b)直管与波纹结构[36]；(c)管状膜的正弦波纹与螺旋结构[37]；(d)直写挤出制备表面线型结构[35]；(e)防污原理示意图[38]；(f)圆形膜表面线性结构与环形结构[39]；(g)线型耐磨功能层[40]

Fig.2　Micro- and nanoscale functional surface structures

(a)helical turbulence promoter[34]; (b)straight tube and corrugated structure[36]; (c)sinusoidal corrugation and helical configuration of tubular membranes[37]; (d)surface-linear structures prepared by direct-write extrusion[35]; (e)diagram of the antifouling principle[38]; (f)linear and annular patterns on cylindrical membrane surfaces[39]; (g)linear wear-resistant functional layer[40]

通过增材制造技术构建陶瓷膜表面微纳功能结构，利用波纹、线型等结构诱导局部湍流、增强膜面剪切应力，有效破坏污染物边界层沉积并阻隔颗粒磨蚀，实现了抗污染与耐磨性的协同提升，为水处理提供了免化学改性的高效路径。然而，表面微纳功能结构与分离层的界面结合力较低，烧结和水处理过程易导致功能结构剥离，甚至堵塞膜孔，导致防污性能及分离性能失效[41]。

1.2　梯度孔道结构与性能

传统陶瓷因流延成型、挤出等工艺限制，形成孔隙突变的层状结构（如支撑层 1 μm 至分离层 100 nm 的跳跃），导致跨膜压差剧增[42]，且在表面引发污染物均匀沉积[22]。梯度孔道通过孔隙尺寸的梯度变化，实现跨膜压差的连续变化[43]。传统工艺由于流变特性限制，难以精确构建复杂的梯度孔道。然而，增材制造技术为这一难题提供了解决途径[44]。武汉理工大学刘凯、西南交通大学龚正君[45]等团队在增材制造陶瓷梯度孔道工艺革新方面取得重要进展。

武汉理工大学刘凯团队形成了平板陶瓷膜支撑体/分离层的等级孔梯度设计策略，建立了 Al_2O_3 陶瓷片材辊压粘接-逐层堆叠增材成形法（layered object manufacturing，LOM），解决了大尺寸平板陶瓷膜界面匹配性差的问题。西南交通大学龚正君团队[45]使用疏水纳米二氧化硅（SiO_2）填充的聚二甲基硅氧烷（PDMS）作为直写挤出 3D 打印的原料，一体化制备了多孔陶瓷膜以及超疏水表面（图 3(a)～(c)），规避了界面黏附问题。但制备的陶瓷膜层间黏合力不强，而且无法有效控制孔径大小。西北工业大学梅辉团队[46]通过 DLP 光固化 3D 打印技术制备 Al_2O_3 陶瓷锥形梯度孔，从底部（300 μm）向顶部（200 μm）线性缩减，并通过流体动力学优化将通量提升 40%。在 200 ℃的温度下，梯度孔隙陶瓷膜对柴油、二氯甲烷等油水混合物（图 3(d)～(f)）的分离效率均高于 96.5%，为高温油水分离提供了兼具高效性和设计自由度的新型解决方案。为解决陶瓷膜因高孔隙率导致机械强度过低以及梯度孔道难以调控的问题，Kim 等[47]采用 200 nm 玻璃粉体作为强化相，基于黏结剂喷射 3D 打印技术在目标区域重复打印，通过控制打印次数调控玻璃相含量，从而实现孔隙/强度梯度 Al_2O_3 陶瓷膜结构的制备。这种设计使陶瓷膜层间孔隙和强度过渡平滑，彻底消除脆性界面，提高了陶瓷膜在极端工况（如高温、高压、腐蚀）下的可靠性。

为提高陶瓷膜的水通量，南京理工大学范益群团队[48]以 3D 打印的微孔支撑体（孔径约 0.9 μm）为基底，先后浸渍涂覆微米级和纳米级 Al_2O_3 陶瓷光敏浆

料颗粒，在数十秒的UV光照下分别形成中间层（孔径约226 nm）和分离层（孔径约108 nm），然后进行一次性共烧结，避免了传统分层烧结的繁琐步骤（图3(g)，(h)）。采用该方法制备的陶瓷膜支撑体与膜层结合紧密，孔分布均匀，纯水通量高达0.0122 L/(m²•h•Pa)，可100%截留CeO_2及TiO_2悬浮液。此外，范益群团队[49]基于DLP 3D打印技术，通过精确控制打印结构实现膜层通道的非对称设计（图3(i)～(k)）。与对称结构相比，非对称结构的有效厚度显著减小，水的传质阻力较小，该结构还兼具高机械强度，纯水通量远超传统同孔径陶瓷膜。北京化工大学王涛团队[50]采用DLP 3D打印技术，一体化成型了Al_2O_3陶瓷膜的支撑体、过渡层、分离层以及防污线型阵列（图3(l)～(n)）。其中，支撑层孔径约150 μm，分离层厚度仅38 μm，烧结后无分层裂纹，解决了传统陶瓷膜多步骤制备、层间开裂、精度不足的问题。AM技术制备的陶瓷膜对100 mg/L含油废水进行过滤时，截留率达82%，渗透通量稳定在0.00053 L/(m²•h•Pa)。该研究通过DLP 3D打印技术，实现高精度集成陶瓷膜的一步成型，为设计复杂结构功能膜提供了新思路。

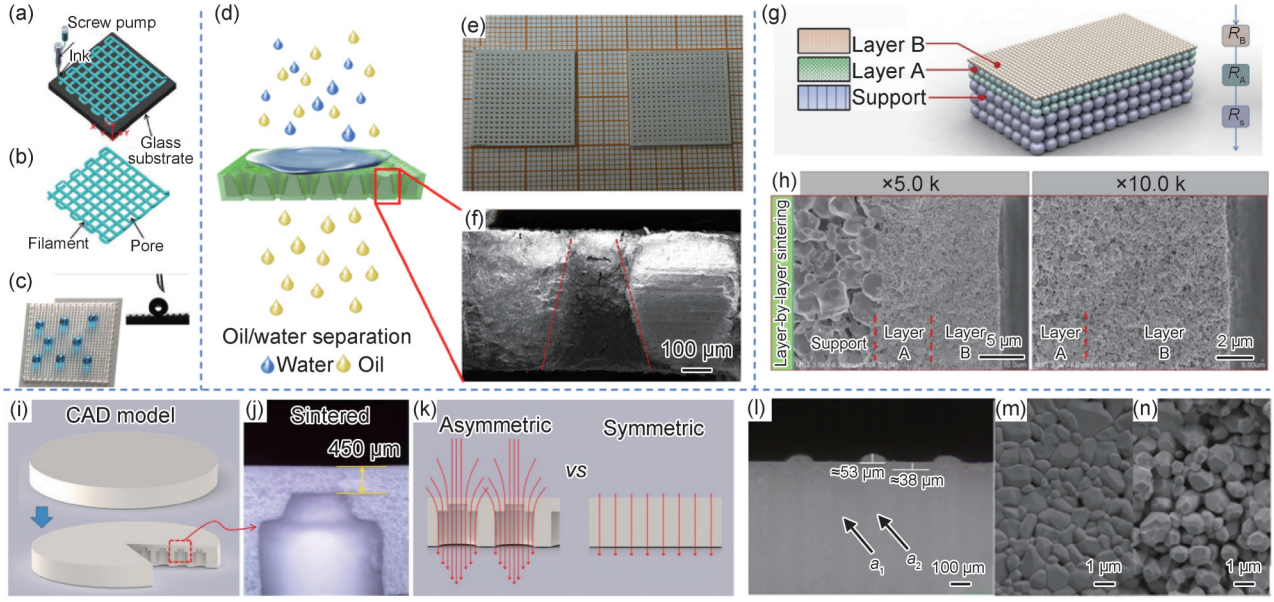


图3 陶瓷梯度孔道制备

(a)～(c)直写挤出3D打印纳米SiO_2填充的PDMS多孔膜及润湿性测试[45]；(d)～(f)光固化3D打印Al_2O_3锥形梯度孔及油水分离示意图[46]；(g)，(h)光固化3D打印Al_2O_3陶瓷膜的支撑层、中间层、分离层示意图及微观形貌[48]；(i)～(k)光固化3D打印Al_2O_3陶瓷膜高通量非对称通道[49]；(l)～(n)光固化3D打印一体成型Al_2O_3陶瓷膜及微观形貌[50]

Fig.3 Fabrication of ceramic gradient channels

(a)-(c)DIW 3D-printed porous PDMS membrane filled with nano-SiO_2 and its wettability tests[45]; (d)-(f)stereolithography 3D-printed Al_2O_3 conical gradient pores and a schematic of the oil-water separation process[46]; (g), (h)schematic illustration and microstructure of the support layer, intermediate layer, and separation layer of a stereolithography 3D-printed Al_2O_3 ceramic membrane[48]; (i)-(k)stereolithography 3D-printed Al_2O_3 ceramic membrane with high-flux asymmetric channels[49]; (l)-(n)monolithically integrated Al_2O_3 ceramic membrane fabricated by stereolithography 3D printing and its microscopic morphology[50]

增材制造技术为水处理用陶瓷制造提供了新途径，不仅能实现连续梯度孔道的制备，并显著缩短简化了传统繁琐的多步制备工艺。更重要的是，该技术可实现对孔径尺寸和分布的按需、精准调控[51-53]。然而，受限于设备分辨率，难以直接制备分离层所需的纳米级孔径结构[54-55]。攻克这一瓶颈将是实现增材制造技术在高性能水处理用陶瓷设计与制备进一步应用的关键。

1.3 异质材料结构与性能

通过增材制造技术在水处理用陶瓷上复合异质材料是提升其功能性与应用潜力的核心路径之一[41]。以增材制造支架为基体，在制造过程或后处理阶段在其内部或表面原位引入第二种乃至多种功能材料，从而在微观尺度上构建紧密结合的异质结或功能复合体[55-57]，以此同步解决粉末催化剂易流失、难回收和块状催化剂比表面积不足的问题。此外，通过结构与组分间的协同效应实现催化性能（如降解效率、稳定性等）的显著提升[58-60]。增材制造技术为这种精准的“结构设计”与“材料复合”一体化提供了更多的可能性[61-63]。目前，中南大学张斗[28]、香港城市大学吕坚[64]

以及美国和韩国等国内外研究团队在催化功能化与基体一体化制造方面取得突破性进展。

贾文宝团队[65]通过优化浆料配方和烧结制度，在直写成型的陶瓷体内诱导原位生长出针状硼酸铝晶须，形成独特的分层孔结构，为催化剂提供了优异的载体。Kim 等[66]在 Al_2O_3 基体上通过原位合成引入光催化活性组分 TiO_2，使得复合材料具有高水通量、优异抗污能力和良好光催化活性。Fang 团队[67]通过 DLP 技术和水热合成法制备了聚合物-陶瓷纳米晶体复合的开放网格结构，该异质结界面有效促进了光生载流子的分离，从而提高了光催化降解效率。

更进一步地，还可直接采用功能材料作为支架。张斗团队[28]通过直写成型技术制备三维 $BaTiO_3$ 压电陶瓷支架（图 4(a)），进而利用水热法和化学浴法分别在其表面原位生长 TiO_2 纳米线阵列（$BaTiO_3$-TiO_2 纳米线和纳米点，图 4(b)～(d)）。这种设计使得材料在超声（提供机械应力）和光照共同作用下，$BaTiO_3$ 产生的压电内建电场能够有效驱动 TiO_2 光生电子-空穴对的分离，从而展现了压电效应与光催化效应 1＋1＞2 的协同增强作用，对 10 mg/L 靛蓝胭脂红（indigo carmine，IC）的降解速率常数最高达 0.109 min^{-1}，性能远超单一的光催化或压电催化。中国科学院兰州化学物理研究所王晓龙团队[68]通过 3D 打印制备具有多级孔道的陶瓷支架，通过水热处理在支架内部原位生长 MOF 催化剂，成功制备出兼具宏观结构强度与微观催化活性的复合材料（图 4(e)）。在基于类芬顿反应的有机染料降解中，表现出接近完全的去除效率（99.68%），并且在 50 次重复使用循环后仍能保持 75% 以上的降解效率（图 5(g)～(j)）。针对机械强度和比表面积、催化性能之间的固有矛盾，吕坚团队[64]从道格拉斯杉木得出灵感，通过重叠微晶格超材料的设计，并用 Co^{2+} 进行电化学修饰（图 4(f)～(i)），成功打破了机械强度、传质效率与催化性能之间的权衡关系，实现了三者的协同优化。这些研究展现出增材制造在实现“材料-结构-功能”一体化设计与制备方面的强大综合能力。

尽管在水处理用陶瓷复合异质材料仍面临界面控制和制备等方面的技术挑战，但其显著拓展了陶瓷

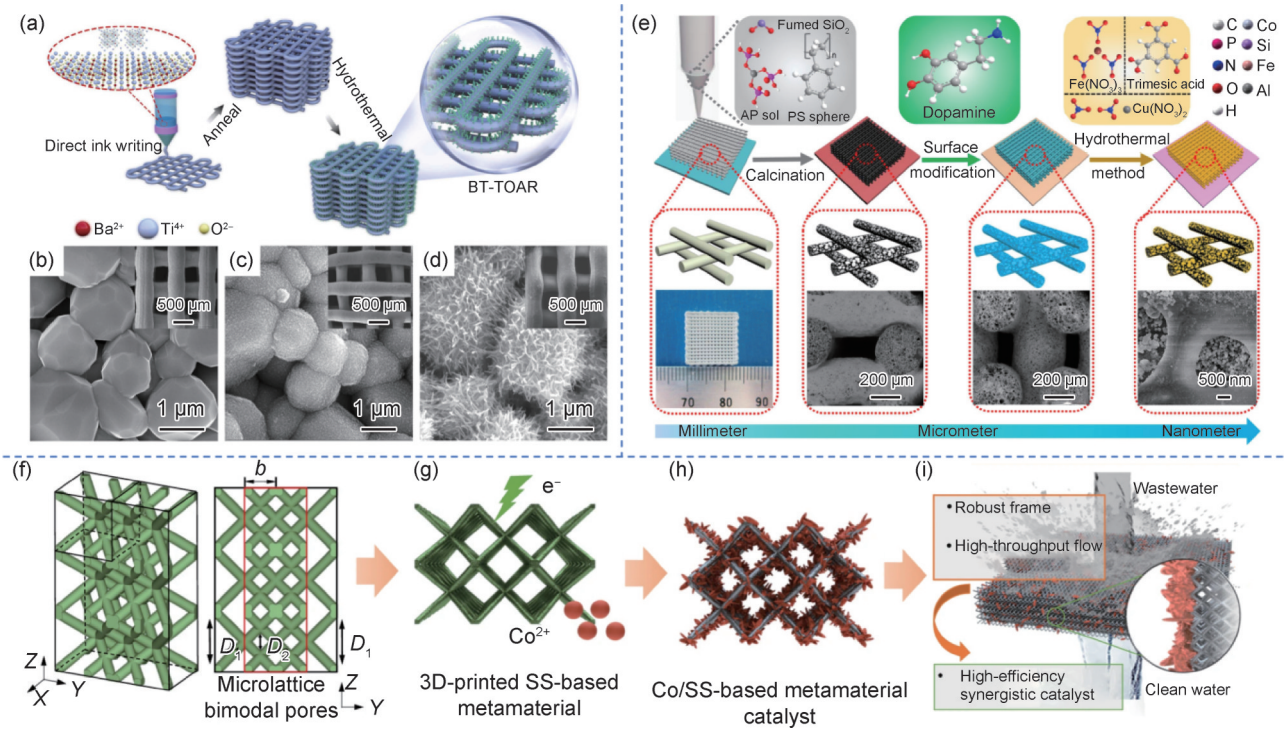


图 4　异质材料结构与性能

(a)在三维 $BaTiO_3$ 支架表面生长 TiO_2 纳米材料的示意图[28]；(b)$BaTiO_3$ 三维支架[28]；(c)$BaTiO_3$-TiO_2 纳米点[28]；(d)$BaTiO_3$-TiO_2 纳米线[28]；(e)在陶瓷支架上原位生长 MOF 催化剂[68]；(f)在重叠微晶格超材料支架上原位附着 Co^{2+}[64]；(g)电化学修饰[64]；(h)C_O/SS 复合催化材料[64]；(i)污水催化降解示意图[64]

Fig.4　Heterogeneous material structures and performance

(a)schematic diagram of TiO_2 nanomaterial growth on a 3D $BaTiO_3$ scaffold surface[28]; (b)3D $BaTiO_3$ scaffold[28]; (c)$BaTiO_3$-TiO_2 nanoparticle dots[28]; (d)$BaTiO_3$-TiO_2 nanowires[28]; (e)*in-situ* growth of MOF catalysts on ceramic scaffolds[68]; (f)*in-situ* Co^{2+} attachment on overlapping microlattice metamaterial scaffolds[64]; (g)electrochemical modification[64]; (h)Co/SS composite catalytic material[64]; (i)schematic diagram of catalytic wastewater degradation[64]

材料的催化降解性能，使水处理用陶瓷从传统的被动分离介质，演进为具备主动降解污染物能力，甚至可响应外界刺激的智能材料[69-70]。

在增材制造技术推动下，水处理用陶瓷的抗污染性、稳定性、多功能性都得到显著提升。表面微纳与梯度孔道功能结构有效调控了流体行为，提升了抗污与分离效能，为陶瓷应用于油水分离等场景提供了关键支撑；同时，异质材料的引入赋予了陶瓷催化活性等主动功能特性，为降解有机污染物等场景的应用奠定了基础。这些结构设计与材料复合的协同作用，显著扩展了水处理用陶瓷的功能应用。

2 增材制造水处理用陶瓷的功能应用

2.1 有机污染物的催化降解

有机污染物的高效治理是水处理领域面临的长期挑战，其主要原因在于许多污染物具有高稳定性、生物难降解性以及复杂的共存体系，这使得开发兼具高活性、易回收且能适应复杂工况的催化材料变得至关重要[71-72]。传统的纳米催化剂虽然活性高，但易团聚、难以从水体中分离回收，且在实际复杂水处理工况下稳定性差，限制了其大规模应用[73-74]。在这一背景下，通过巧妙的结构设计与材料复合，增材制造技术为催化剂的制备开辟了新路径[75-79]，使其在光催化（图5(a)～(c)）[66]、压电-光催化（图5(d)，(e)）[28]及高级氧化过程（图5(f)）[80]等多种降解机制中均表现出卓越性能。

光固化增材制造技术（如DLP/SLA）凭借更高成型精度，可构筑具有精细孔隙和高比表面积的陶瓷骨架结构；而DIW技术则在材料兼容性方面优势显著，其成型的微米级粗糙表面为催化剂负载提供了更丰富的活性位点锚定界面。翁子骧团队[81]通过DLP技

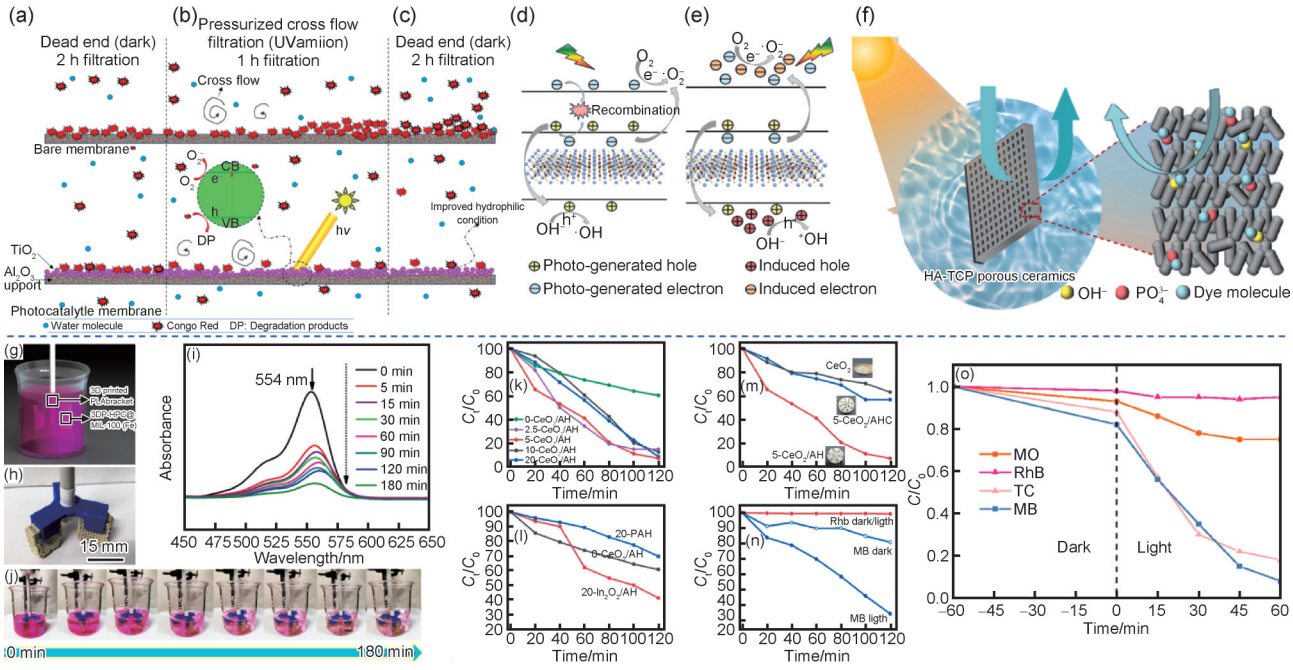


图5 有机污染物的催化降解

(a)～(c)光催化陶瓷抗污染机理图[66]；(d)，(e)压电与压电-光催化降解有机污染物机理图[28]；(f)HA-TCP多孔陶瓷光催化降解染料污染物机理图[80]；(g)3DP-HPC@MOFs陶瓷降解Rh B示意图[68]；(h)3DP-HPC@MOFs陶瓷搅拌器示意图[68]；(i)降解180 min后Rh B染料的颜色变化[68]；(j)降解180 min后Rh B染料的紫外分光测试图[68]；CeO_2/γ-Al_2O_3-HNTs材料的催化降解性能测试：(k)不同催化剂负载量[81]；(l)不同制备工艺[81]；(m)不同基体结构[81]；(n)不同外部条件[81]；(o)HA-TCP多孔陶瓷在可见光下对不同染料的光催化降解曲线[80]

Fig.5 Catalytic degradation of organic pollutants

(a)-(c)mechanism diagram of photocatalytic ceramic anti-pollution[66]；(d)，(e)mechanism diagram of piezoelectric and piezo-photocatalytic degradation of organic pollutants[28]；(f)mechanism diagram of HA-TCP porous ceramic photocatalytic degradation of dye pollutants[80]；(g)schematic diagram of 3DP-HPC@MOFs ceramic degrading Rh B[68]；(h)schematic diagram of 3DP-HPC@MOFs ceramic stirrer[68]；(i)color change of Rh B dye solution after 180 min degradation[68]；(j)UV spectrophotometry of Rh B dye after 180 min degradation[68]；catalytic degradation performance testing of CeO_2/γ-Al_2O_3-HNTs material：(k)with different catalyst loadings[81]；(l)prepared via different processes[81]；(m)with different substrate structures[81]；(n)under different external conditions[81]；(o)photocatalytic degradation curves of HA-TCP porous ceramic for different dyes under visible light[80]

术，成功制备出含有多种活性组分的浆料，一次打印出具有复杂拓扑结构的CeO_2/γ-Al_2O_3-HNTs整体式催化剂（图5(k)～(n)），高比表面积和分级孔隙使其具有卓越的光催化性能，2 h内对四环素（tetracycline，TC）的降解率高达92.7%。天津城建大学赵巍团队[80]利用SLA技术制造的羟基磷灰石基HA-TCP多孔陶瓷，成功将生物活性HA粉末与精确设计的陶瓷架构相结合（图5(o)）。对TC和亚甲基蓝（methylene blue，MB）均表现出超过90%的光催化降解率及良好的循环稳定性。除了高活性，催化剂的长期运行稳定性同样关键。Bonilla-Cruz团队[82]等开发了无需有机黏合剂的ZnO纳米颗粒浆料用于DIW直写成型，打印出的ZnO三维支架实现了高降解效率催化剂的便捷回收与重复使用，在连续多个循环后对双酚A（bisphenol A，BPA）仍能保持85%～95%的高降解效率，展现出优异的耐久性。此外，增材制造的灵活性还体现在广泛的材料适用性上。Bernasconi等[83]通过DLP技术实现了TiO_2基复合材料的增材制造，DLP过程使得表面局部富集TiO_2，增强了TiO_2的光催化活性，对罗丹明B（rhodamine B，Rh B）展现出优异的降解能力，最高降解速率常数为0.28 h^{-1}；而Ruiz-Morales团队[84]则利用间接基础打印（indirect inject print，IIP）技术制备了$CaSO_4$载体结构，经TiO_2活化后，5 h后对MB的降解率可达88.6%，拓展了催化材料的可选范围。表1[28,64-65,67-68,80-84]总结了近期基于增材制造技术制备水处理用陶瓷用于有机物催化降解的研究进展。

表1　增材制造技术用于相关有机物污染降解

Table 1　Application of additive manufacturing in degrading related organic contaminants

Base material	Composite material	Molding method	Pollutant	Optimal degradation effect	Reference
$Al_{18}B_4O_{33}$	TiO_2	DIW	20 mg/L methyl orange	3.5 h，84.89%	[65]
PEGDA700	TiO_2	DLP	10 mg/L methylene blue	6 h，98%	[67]
$BaTiO_3$	TiO_2	DIW	10 mg/L indigo carmine	30 min，95.74%	[28]
SiO_2	MOFs	DIW	20 mg/L malachite green	20 min，99.8%	[68]
316L stainless steel	Co	SLM	20 mg/L sulfamethoxazole	15 min，99%	[64]
Hydroxyapatite	HA-TCP	SLA	5 mg/L methylene blue	1 h，96%	[80]
γ-Al_2O_3	CeO_2，Ln_2O_3	DLP	5 mg/L tetracycline	2 h，92.7%	[81]
ZnO	SiO_2	DIW	15 mg/L bisphenol A	6 h，95%	[82]
Acrylate group	TiO_2	DLP	4.79 mg/L rhodamine B	6 h，81%	[83]
$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$	TiO_2	IIP	20 mg/L methylene blue	5 h，88.6%	[84]

Note："t min/h，X%" denotes the pollutant removal ratio（degradation efficiency）within t minutes/hours

综上所述，增材制造技术实现了催化剂的宏观结构化、结构复杂化以及材料多元集成化，成功地将其应用从被动分离扩展到有机污染物的主动高效降解领域。这些催化剂不仅展现出可与粉末催化剂相媲美甚至更优的催化性能，并且解决了催化剂的回收与重复使用难题，然而，要真正实现其工业化应用，仍面临制造成本高昂以及在复杂废水环境中长期运行的稳定性等挑战[85-87]。

2.2　油水乳液分离

近几十年来，石油泄漏事故频发以及工业含油废水排放量激增[88]，成为加剧水资源污染的关键因素，严重危及生态系统稳定与人类健康安全[89]。含油污水可大致分为三类：油水混合物、不稳定的油水乳状液和稳定的油水乳状液[90-91]。前两种可通过常规方法如气浮、脱脂、吸附等方式去除。而对于稳定的油水乳状液，常规方法难以适用，膜分离技术拥有更高的分离效率[92-93]。其中，水处理用陶瓷以其卓越的热稳定性、化学稳定性、机械强度以及亲水性，在处理含油废水方面展现出巨大潜力[94]。

为了实现高效的油水乳液分离，水处理用陶瓷通常需要具备特殊的表面润湿性，即超亲水/水下超疏油特性[95]。这种特性使得水能够优先通过膜孔，同时有效排斥油滴，防止油污堵塞膜孔[96]。广东工业大学黄梅鹏[97]采用DIW技术制备Al_2O_3多孔陶瓷膜，利用低表面能聚二甲基硅氧烷（polydimethylsiloxane，PDMS）修饰膜体表面，制备了"仿生荷叶表面疏水亲油性"陶瓷膜材料（图6(a)，(b)）。结果表明，其分离效率达到99.6%以上，而且在磨砂磨损实验后均能保持高效的分离性能与良好的界面超疏水状态。Peng等[98]提出了一种结合陶瓷3D打印与原位生长晶须技术的新型油水分离方法（图6(c)，(d)）。通过DLP技术制备了Al_2O_3基底结构（蜂窝状、多孔海绵和木堆支架），并在1200 ℃下通过B_2O_3与Al_2O_3反应原位生长出铝硼酸盐晶须（$Al_{18}B_4O_{33}$）。该晶须具有超亲水性（水

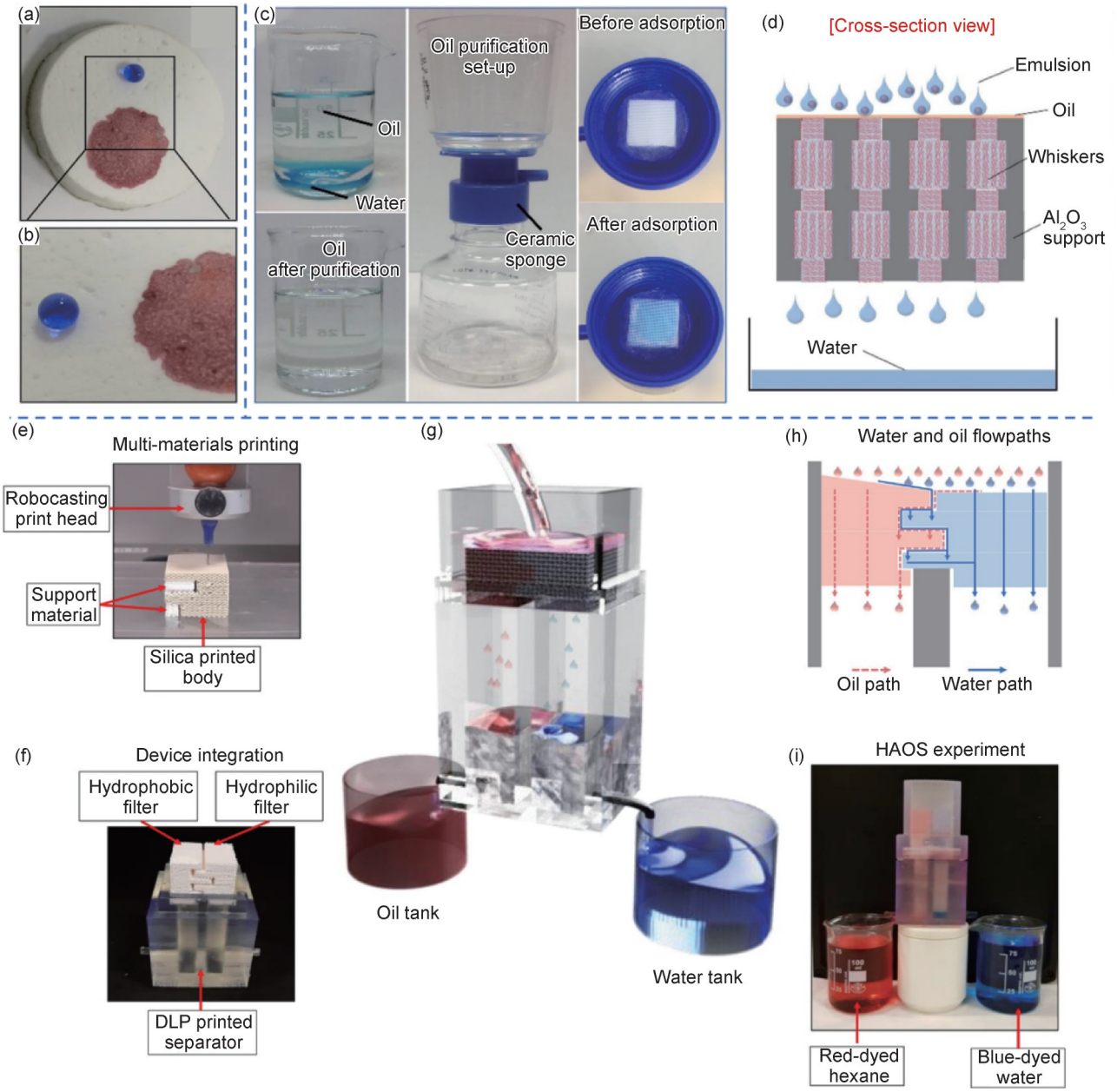


图 6 油水乳液分离

(a)“仿生荷叶表面疏水亲油性”陶瓷润湿性测试[97];(b)润湿性测试的放大图[97];(c)光固化 3D 打印 Al_2O_3 陶瓷油水分离测试[98];(d)油水分离原理示意图[98];(e)分层式油水自动分离器(HAOS)[99];(f)多材料 3D 打印制造 HAOS[99];(g)与次级容器集成的设备(用于引导两种不同液体的流向)[99];(h)水和油分层流动路径示意图[99];(i)HAOS 过滤油水混合物示意图[99]

Fig.6 Oil-water emulsion separation

(a)wettability testing of “lotus-inspired hydrophobic-oleophilic surface” ceramic[97];(b)enlarged view of wettability testing[97];(c)oil-water separation testing of stereolithographic 3D printed Al_2O_3 ceramic[98];(d)schematic diagram of oil-water separation principle[98];(e)hierarchical automatic oil-water separator (HAOS)[99];(f)multimaterial 3D printing fabrication of HAOS[99];(g)device integrated with secondary containers for guiding two different liquid flows[99];(h)schematic diagram of water and oil stratified flow paths[99];(i)schematic diagram of HAOS filtering an oil-water mixture[99]

接触角约 0°)和水下超疏油性(油接触角>150°),其表面羟基基团和粗糙多孔形貌增强了极性作用力,同时排斥非极性油类物质。针对不同油水混合体系,优化设计了三种分离方案:蜂窝网用于重力分离自由油水混合物(如原油泄漏),孔径 100 μm 的网在仅靠重力驱动下对七类油品(己烷、硅油等)实现>99% 分离效率,通量高达 170000 L/(m²•h);海绵结构用于吸附油品中微量水,多孔支架的毛细作用结合晶须亲水性可实现 96% 以上吸水率;木堆支架内部填充晶须处理乳化油,通过微米级孔隙截留油滴,乳化油分离率达 99.7%。此外,该陶瓷膜在抗磨损、强酸碱、800 ℃高温的严苛环境中具有全工况适用性,在石化、食品和制

药领域废水处理中具有应用前景。丁军团队[99]通过挤出和光固化相结合的3D打印技术制备SiO_2多孔结构，并在其表面水解沉积有机硅烷涂层进行改性，制备出可复用、可回收的陶瓷过滤器(hierarchical autonomous oil-water separator，HAOS)。制备的350 μm孔径陶瓷膜在重力驱动下，纯水通量高达100000 L/(m²·h)，对水包油和油包水乳液的分离效率＞99%，在单一步骤中完成油水自动分离与分装，无需后续处理(图6(e)～(i))。同时，该陶瓷膜还具备高机械强度(抗压强度＞30 MPa)和热稳定性(耐温160～350 ℃)，显著推进了油水分离技术的实用化与自动化进程。

基于增材制造技术制备的水处理用陶瓷突破了传统陶瓷的限制，在高效率、高通量、强耐受性、定制化设计方面取得了重大突破，在解决稳定乳化油难题方面展现出巨大的应用潜力[100]。然而，要真正实现大规模工业应用，降低制造成本[101]、攻克规模化生产瓶颈、解决极端复杂废水工况下的长期稳定性与抗污堵问题[102]，是目前研究的关键方向。

2.3　其他应用场景

随着全球经济和工业的发展，对淡水资源的需求日益增长[103]。尽管海洋覆盖了地球表面的70%，蕴藏着巨大的水资源储备，但其中的淡水占比仅约3%，且大部分以冰冻状态存在难以开采[104]。海水淡化便成为满足这一需求的重要解决方案之一[105]。过滤膜通过膜孔选择性地通过水分子、分离无机盐离子进行海水淡化。膜根据孔径分为微滤(microfiltration，MF)、超滤(ultrafiltration，UF)、纳滤(nanofiltration，NF)和反渗透(reverse osmosis，RO)。由于无机盐离子的水化半径(离子在水中被水分子包围形成的有效半径)相对较小，仅有纳滤和反渗透膜技术可以有效截留[42]。受到成型精度的限制，通过增材制造技术制备陶瓷膜进行海水淡化具有极高的挑战性。然而，太阳能蒸馏是另一有效的途径进行海水淡化[106]。Jonhson等[107]基于直写挤出3D打印技术制备便携式太阳能海水淡化装置，其上层的改性石墨烯/二氧化硅(MG@silica)复合材料作为高效太阳能吸收体，下层的多孔二氧化硅网格作为输水层与隔热层(图7(a)，(b))。该设计通过优化微通道(网格间距0.44 mm)实现快速毛细输水，并结合分层热管理技术，显著减少热损失。在一倍太阳光下，装置蒸发速率达2.4 kg/(m²·h)，淡水产量约0.5 L/(m²·h)，太阳能-蒸汽转换效率高达98%；所产水质符合WHO饮用水标准，为偏远地区的海水淡化提供了无需外部能源的便携式可持续解决方案。暨南大学刘明贤团队[108]采用直写挤出3D打印技术制备高岭土蜂窝状多孔陶瓷支架，并通过聚多巴胺(PDA)涂层改性，增强支架的亲水性和光热转换能力(图7(c)～(e))。实验表明，在太阳光照下(1 kW/m²)，PDA涂层PCS在室内蒸发速率达1.53 kg/(m²·h)，蒸发效率高达84.2%，且在10次循环实验中性能稳定。在连续7天的真实渤海海水淡化测试中，支架维持2.4 kg/(m²·h)左右的高蒸发速率和良好的抗盐性。

常规平板膜具有离子传输路径长、电导率低、电极-膜接触面积小、界面极化严重的问题[109]。而增材制造技术可实现陶瓷膜的定制化、高机械强度以及高离子传导性，在液体电池领域具有极大的应用潜力[110]。南京理工大学黄康团队[111]首次将增材制备的陶瓷膜应用于液体电池领域：采用DLP 3D打印技术在陶瓷基底上创建深度约1 mm的圆柱阵列孔结构，并涂覆磺化聚醚醚酮(polyetheretherketone，SPEEK)形成复合膜(图7(f)～(i))。圆柱阵列孔设计将离子通量提高150%、电阻降低60%，同时作为电解液储库调节锌沉积分布，结合陶瓷超高硬度有效抑制枝晶穿透。装配该隔膜的锌铁液流电池在280 mAh/cm²的超高面容量下稳定运行超950 h，能量效率保持79%以上。3D打印技术突破了传统陶瓷膜加工限制，为储能器件设计开辟了新路径。

除了在水处理方面的应用外，增材制备的陶瓷膜在气体分离方面也有巨大的应用潜力。Bartoletti等[112]首次提出采用3D微挤出成型技术制备高性能全陶瓷氢分离膜，通过开发水基$BaCe_{0.65}Zr_{0.20}Y_{0.15}O_{3-\delta}$-$Gd_{0.20}Ce_{0.80}O_{2-\delta}$复合陶瓷浆料，并对聚乙二醇(PEG200)渗透干燥与温乙醇清洗工艺进行优化，成功实现无裂纹、高致密平板膜成型。所得膜经铂纳米颗粒活化后，在750 ℃下对含体积分数50%和80% H_2混合气的氢渗透率分别达0.21、0.32 mL/(min·cm²)，为目前对称全陶瓷膜的最高记录。微观分析表明，3D打印形成细小均匀晶粒((2.7±1.0) μm)和低孔隙结构(0.7%)，显著提升质子-电子传导效率，其渗透性能超越传统干压法制备膜3倍。Rana等[113]通过3D打印技术制造了具有双螺旋通道结构的多孔Al_2O_3陶瓷支撑体，创新采用反扩散合成法，并在其表面均匀生长了两种金属有机框架分离薄膜，膜面积达50 cm²，较传统管式支撑体提升4倍(图7(j)～(m))。气体分离测试发现，沸石咪唑骨架(zeolitic imidazolate framework 8，ZIF-8)膜对H_2/CH_4选择性达24.6(理想)和21.6(混合气)，H_2/CO_2选择性为11.8(理想)和11.3(混合气)，展现出优异的分子筛分能力。

光固化和直写挤出增材制造技术凭借其在精细调控陶瓷多级结构与材料分布方面的显著优势，在水处理用陶瓷的制备成型中应用日趋广泛。通过上述

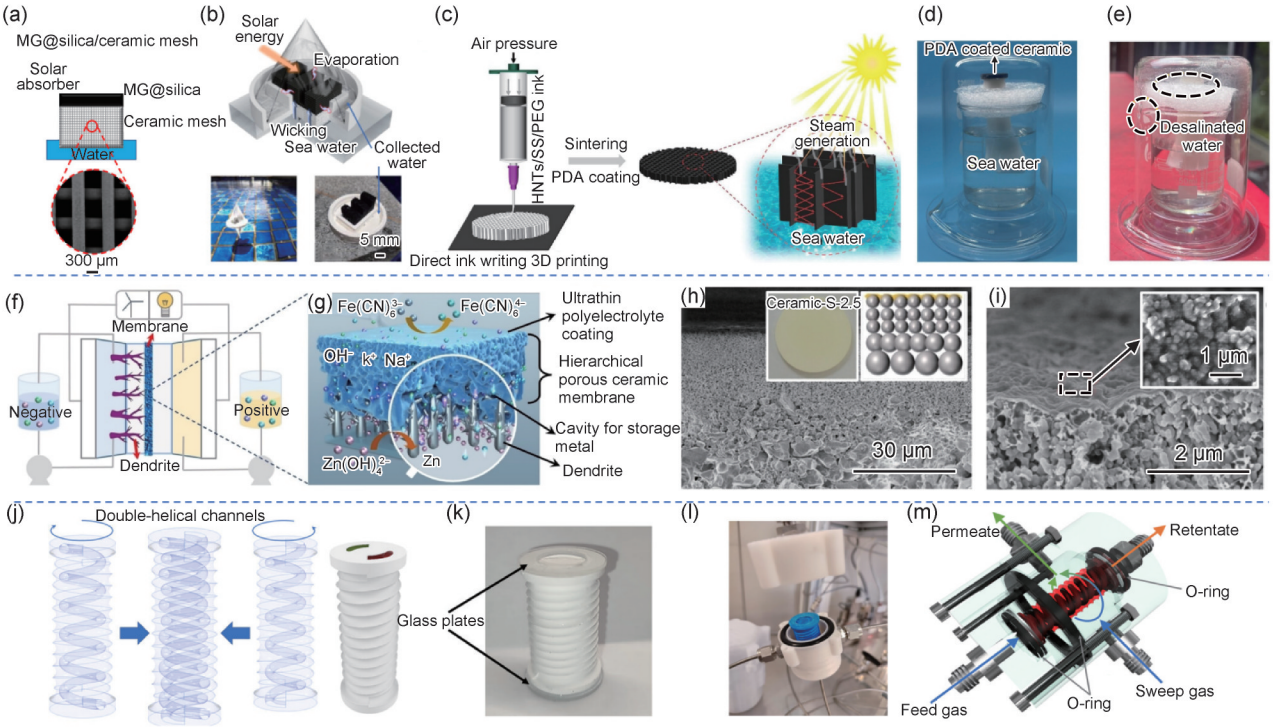


图 7 其他应用场景

(a)直写 3D 打印 MG@silica 多孔网状陶瓷[107];(b)高效陶瓷太阳能脱盐装置[107];(c)直写 3D 打印高岭土/PDA 多孔陶瓷[108];(d)海水淡化处理示意图[108];(e)海水淡化效果图[108];(f)碱性锌铁液流电池示意图[111];(g)分级多孔陶瓷复合膜示意图[111];(h)Ceramic-S-2.5 复合膜横截面的 SEM 图像[111];(i)聚电解质涂层的横截面 SEM 图像[111];(j)3D 打印陶瓷支架双螺旋支架的 CAD 模型[113];(k)制备的陶瓷支架[113];(l)气体渗透器结构实物图[113];(m)CAD 示意图[113]

Fig.7 Other application scenarios

(a)DIW 3D printed MG@silica porous mesh ceramic[107];(b)high-efficiency ceramic solar desalination device[107];(c)DIW 3D printed kaolinite/PDA porous ceramic[108];(d)schematic diagram of seawater desalination treatment[108];(e)rendering of seawater desalination effect[108];(f)schematic diagram of an alkaline Zn-Fe flow battery[111];(g)schematic diagram of a graded porous ceramic composite membrane[111];(h)SEM image of the cross-section of Ceramic-S-2.5 composite membrane[111];(i)cross-sectional SEM image of polyelectrolyte coating[111];(j)CAD model of a double helix ceramic scaffold fabricated by 3D printing[113];(k)fabricated ceramic scaffold[113];(l)photo of physical structure of the gas permeator[113];(m)CAD schematic diagram[113]

技术制备的水处理用陶瓷不仅成功应用于有机物降解与油水乳液分离等场景，在海水淡化、液态电池及气体分离等领域也展现出巨大的应用前景。

3 增材制造水处理用陶瓷面临的挑战

增材制造技术可调控陶瓷的多级结构及材料分布，为高性能水处理用陶瓷的设计与制备提供了新途径。然而，该技术在迈向规模化应用道路上仍面临“性能-可靠性-产业化”系列挑战：首先，增材制造技术的精度局限性会直接影响截留率与通量等性能；其次，陶瓷材料面临的强度与通量难以兼顾的结构-性能矛盾，威胁着陶瓷构件的长期运行可靠性；最终，规模化制备瓶颈成为阻碍该技术实现水处理用陶瓷产业化的关键因素。具体而言，主要挑战聚焦于以下三个方面：

(1)亚微米精度与分离性能的局限

现有增材制造技术(如 SLA、DIW)受限于光斑尺寸或喷嘴分辨率，难以直接成型亚微米级孔道结构。而高效分离过程(如纳滤、反渗透)要求分离层孔径精确调控至纳米尺度(< 100 nm)，以保障离子截留率。虽可通过原子层沉积(atomic layer deposition，ALD)等后处理技术实现孔道的纳米级调控，但高能耗与复杂工艺显著增加制造成本，且难以应用于大面积陶瓷组件。

(2)结构设计与力学性能的冲突

增材制造技术能够实现微纳表面结构(如波纹、线型结构)、梯度孔隙等复杂设计，以提升膜的抗污染性和渗透通量。然而，增材制备陶瓷的层间结合力较弱导致力学性能下降。此外，异质材料(如 TiO_2/Al_2O_3)由于界面结合力弱，在水流冲击下功能层易剥离，影响催化/分离协同功能。这都将限制其在极端

工况下的应用。

(3)规模化制备瓶颈

增材制造的逐层堆积特性导致其在量产效率方面低于传统制造方法,且纳米浆料和专用设备成本高昂,这限制了陶瓷的大规模应用。例如,立体光刻(SLA)虽然能实现复杂形状,但其制造单个部件可能需要数小时。此外,增材制造设备的打印尺寸通常受腔体大小限制,难以满足工业级大通量膜组件的需求。拼接技术虽然可以解决尺寸限制,但拼接界面结合力较弱,影响陶瓷的完整性和分离效率。

4　未来发展趋势

增材制造技术凭借逐层堆积与结构精密调控的优势,为水处理用陶瓷的设计与制备开辟了新路径。大量学者采用该技术对陶瓷的结构、材料和水处理性能进行设计和优化,有力推动其在油水分离、有机污染物催化降解等场景的应用。然而,该领域还面临着样品成型精度与力学性能不足、难以规模化制备等挑战。在此背景下,基于增材制造技术制备的水处理用陶瓷展现出以下未来发展趋势。

(1)自愈合智能陶瓷材料

陶瓷材料通常以其高硬度、高强度和耐高温性而闻名,但也普遍存在脆性大、断裂韧度低的缺点,在服役过程中容易产生微裂纹,进而导致结构失效。开展自修复智能陶瓷材料的研究有望从根本上解决这一问题。对于高温应用环境,可以通过设计氧化物或非氧化物陶瓷基复合材料,使其在高温下通过氧化物相变、玻璃相的形成或热裂解产物的填充来实现微裂纹的闭合与修复,同时维持多孔结构稳定性。对于其他应用环境,可在陶瓷内部添加具有响应性官能团的陶瓷前驱体或复合材料体系,通过外部刺激(如光、电场)触发材料内部的修复反应。然而,目前该方向研究仍处于实验室阶段,向工程化应用的转化仍需克服若干技术瓶颈。

(2)机器学习辅助工艺-结构-性能协同优化

大数据与机器学习算法的引入,为建立增材制造工艺参数、陶瓷微观结构与宏观性能的关联模型提供了高效途径,对加速陶瓷材料开发与性能优化具有重要意义。通过整合工艺参数(打印参数、材料配方、烧结条件)、结构特征(孔径、孔隙率、微观形貌)与性能指标(渗透通量、截留率、抗污染性),训练神经网络模型以实现工艺-结构-性能的协同优化,最终实现陶瓷水处理性能提升与处理成本降低的双重目标。

面对全球水资源日益短缺、污染日趋复杂的严峻挑战,政策资源正加速向绿色水处理技术倾斜。“十五五”规划已将水处理用陶瓷材料明确列为战略性新兴产业的重点发展方向。欧盟《面向空气、水和土壤零污染行动计划》也大力支持采用增材制造替代传统高能耗工艺。通过增材制造技术,水处理用陶瓷的结构和材料设计得以革新,其应用场景从物理过滤拓展到了有机污染物催化降解、油水乳液分离乃至海水淡化等前沿领域。随着材料科学、人工智能与制造技术的深度融合,增材制造技术将驱动水处理用陶瓷向智能化、定制化和高性能化方向跃迁,为应对全球水资源危机提供可持续的解决方案。

参考文献

[1] HERING J G, INGOLD K M. Water resources management: what should be integrated [J]. Science, 2012, 336(6086): 1234-1235.

[2] WU F, YANG X L, CUI Z Y, et al. The impact of human activities on blue-green water resources and quantification of water resource scarcity in the Yangtze River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2024, 909: 168550.

[3] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances, 2016, 2(2): e1500323.

[4] ZHANG Y H, CHEN T, CHEN X F, et al. The application of pressure-driven ceramic-based membrane for the treatment of saline wastewater and desalination-a review[J]. Desalination, 2025, 597: 118327.

[5] RAMAKRISHNAN R K, PADIL V V T, ŠKODOVÁ M, et al. Hierarchically porous bio-based sustainable conjugate sponge for highly selective oil/organic solvent absorption[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(18): 2100640.

[6] MA W J, JIANG Z C, LU T, et al. Lightweight, elastic and superhydrophobic multifunctional nanofibrous aerogel for self-cleaning, oil/water separation and pressure sensing[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 132989.

[7] TIJING L D, DIZON J R C, IBRAHIM I, et al. 3D printing for membrane separation, desalination and water treatment[J]. Applied Materials Today, 2020, 18: 100486.

[8] ZHOU X C, SHEVATE R, HUANG D H, et al. Ceramic thin-film composite membranes with tunable subnanometer pores for molecular sieving[J]. Nature Communications, 2023, 14: 7255.

[9] WANG Y, MA B W, ULBRICHT M, et al. Progress in alumina ceramic membranes for water purification: status and prospects[J]. Water Research, 2022, 226: 119173.

[10] WANG X Y, CHEN C J, LI Z M, et al. Preparation of binder-free composite filters material and their efficient removal of slag powder[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 63: 105527.

[11] KWON H J, YANG D S, KOO M S, et al. Long-lifetime water-washable ceramic catalyst filter for air purification [J]. Nature Communications, 2023, 14: 520.

[12] AHMAD N N R, ANG W L, LEO C P, et al. Current advances in membrane technologies for saline wastewater treatment: a compre-

hensive review[J].Desalination,2021,517:115170.
[13] GOH P S,WONG K C,ISMAIL A F.Membrane technology:a versatile tool for saline wastewater treatment and resource recovery[J].Desalination,2022,521:115377.
[14] LIN H,WANG Y L,DONG Y B.A review of methods,influencing factors and mechanisms for phosphorus recovery from sewage and sludge from municipal wastewater treatment plants[J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2024,12(1):111657.
[15] KINTZI A,DATURPALLI S,BATTAGLIARIN G,et al.Biodegradation of water-soluble polymers by wastewater microorganisms:challenging laboratory testing protocols[J].Environmental Science & Technology,2024:acs.est.4c05808.
[16] LOGANATHAN P,VIGNESWARAN S,KANDASAMY J,et al.Bisphenols in water:occurrence,effects,and mitigation strategies[J].Chemosphere,2023,328:138560.
[17] KHANZADA N K,FARID M U,KHARRAZ J A,et al.Removal of organic micropollutants using advanced membrane-based water and wastewater treatment:a review[J].Journal of Membrane Science,2020,598:117672.
[18] YAN W,CHEN Z,LI G Q,et al.Preparation and enhanced mechanical properties of novel Al_2O_3-C ceramic filter reinforced by microporous powder and SiC whiskers[J].Journal of the American Ceramic Society,2024,107(4):2725-2737.
[19] BORTOT COELHO F E,MAGNACCA G,BOFFA V,et al.From ultra to nanofiltration:a review on the fabrication of ZrO_2 membranes[J].Ceramics International,2023,49(6):8683-8708.
[20] ZHAO Y,GU Y N,LIU B,et al.Pulsed hydraulic-pressure-responsive self-cleaning membrane[J].Nature,2022,608(7921):69-73.
[21] 马敬环,项军,李娟.陶瓷膜错流微滤海水的污染机理[J].膜科学与技术,2010,30(3):87-92.
MA J H,XIANG J,LI J.Fouling machanism of ceramic membranes in pretreating seawater by cross-flow microfiltration[J].Membrane Science and Technology,2010,30(3):87-92.
[22] MA J,HE C,HUA K H,et al.Fabrication and application of highly permeable ceramic membranes:membrane-forming mechanism,pore structure,separation performance and fouling mechanism analyses[J].Separation and Purification Technology,2025,356:129866.
[23] JIN Z,MEI H,LIU H,et al.High-strength,superhydrophilic/underwater superoleophobic multifunctional ceramics for high efficiency oil-water separation and water purification[J].Materials Today Nano,2022,18:100199.
[24] MCGLADE C,EKINS P.The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 ℃[J].Nature,2015,517(7533):187-190.
[25] QIU L,SUN Y H,GUO Z G.Designing novel superwetting surfaces for high-efficiency oil-water separation:design principles,opportunities,trends and challenges[J].Journal of Materials Chemistry A,2020,8(33):16831-16853.
[26] CHEN X F,CAO Q R,CHEN T,et al.3D printing for precision construction of ceramic membranes:current status,challenges,and prospects[J].Advanced Membranes,2023,3:100068.
[27] JIANG R Y,PU J,WANG Y X,et al.Tailored wrinkles for tunable sensing performance by stereolithography[J].Interdisciplinary Materials,2024,3(3):414-424.
[28] LIU Q,LI Z Y,LI J,et al.Three dimensional $BaTiO_3$ piezoelectric ceramics coated with TiO_2 nanoarray for high performance of piezo-photoelectric catalysis[J].Nano Energy,2022,98:107267.
[29] SUN H W,ZOU B,WANG X F,et al.Advancements in multi-material additive manufacturing of advanced ceramics:a review of strategies,techniques and equipment[J].Materials Chemistry and Physics,2024,319:129337.
[30] LIU K,ZHOU C Y,HU J M,et al.Fabrication of barium titanate ceramics *via* digital light processing 3D printing by using high refractive index monomer[J].Journal of the European Ceramic Society,2021,41(12):5909-5917.
[31] LI Y F,CHEN A N,SU J,et al.An overview on ceramic multi-material additive manufacturing:progress and challenges[J].International Journal of Extreme Manufacturing,2025,7(4):042005.
[32] CHOWDHURY M R,STEFFES J,HUEY B D,et al.3D printed polyamide membranes for desalination[J].Science,2018,361(6403):682-686.
[33] SHANG W T,YANG S W,LIU W J,et al.Understanding the influence of hydraulic conditions on colloidal fouling development by using the micro-patterned nanofiltration membrane:experiments and numerical simulation[J].Journal of Membrane Science,2022,654:120559.
[34] ARMBRUSTER S,CHEONG O,LÖLSBERG J,et al.Fouling mitigation in tubular membranes by 3D-printed turbulence promoters[J].Journal of Membrane Science,2018,554:156-163.
[35] LYU Z Y,NG T C A,TRAN-DUC T,et al.3D-printed surface-patterned ceramic membrane with enhanced performance in cross-flow filtration[J].Journal of Membrane Science,2020,606:118138.
[36] CHEN T,XU P,QIU M H,et al.Construction of anti-fouling ceramic tubular membranes with corrugated inner surfaces using DLP 3D printing[J].Journal of Membrane Science,2024,706:122941.
[37] ZOUMPOULI G A,GUARALDO T T,WARREN Z,et al.Reimagining the shape of porous tubular ceramics using 3D printing[J].Applied Materials Today,2024,37:102136.
[38] NG T C A,LYU Z Y,WANG C S,et al.Effect of surface-patterned topographies of ceramic membranes on the filtration of activated sludge and their interaction with different particle sizes[J].Journal of Membrane Science,2022,645:120125.
[39] ZHOU X Y,DAI Q S,LIU Z W,et al.Introducing surface patterns on disc ceramic membranes to alleviate membrane fouling:numerical simulation and experiments[J].Journal of Water Process Engineering,2025,71:107269.
[40] DAI Q S,ZHOU X Y,LIU Z W,et al.A novel approach for enhancing the abrasion resistance of disc ceramic membranes by surface-patterning technology[J].Materials Today Communications,2025,45:112281.
[41] VICENTE R,CESCA K,DA SILVA A F V,et al.Hierarchical membrane by centrifugal casting and effects of incorporating activated carbon as pore-former[J].Journal of the European Ceramic

Society,2023,43(8):3447-3453.

[42] ROY S. Recent developments in processing techniques and morphologies of bulk macroporous ceramics for multifunctional applications[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107752.

[43] JARRAR R, ABBAS M K G, AL-EJJI M. Environmental remediation and the efficacy of ceramic membranes in wastewater treatment: a review[J]. Emergent Materials, 2024, 7(4): 1295-1327.

[44] VILLA A, GIANCHANDANI P, BAINO F. Sustainable approaches for the additive manufacturing of ceramic materials[J]. Ceramics, 2024, 7(1): 291-309.

[45] LV J, GONG Z J, HE Z K, et al. 3D printing of a mechanically durable superhydrophobic porous membrane for oil-water separation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(24): 12435-12444.

[46] JIN Z P, MEI H, YAN Y K, et al. 3D-printed controllable gradient pore superwetting structures for high temperature efficient oil-water separation[J]. Journal of Materiomics, 2021, 7(1): 8-18.

[47] CHOI J H, HAN K S, KIM J H, et al. Glass frit-ink development and relevant process technology for fabricating functionally graded material-structured ceramic filters *via* binder-jetting 3D printer [J]. Journal of the Korean Ceramic Society, 2024, 61(5): 828-836.

[48] CHEN T, XU P, CHEN X F, et al. High-flux ceramic membrane derived from UV-curable slurry for efficient separation of nanoparticles suspension [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 304: 122331.

[49] CHEN T, WANG D Y, CHEN X F, et al. Three-dimensional printing of high-flux ceramic membranes with an asymmetric structure *via* digital light processing[J]. Ceramics International, 2022, 48(1): 304-312.

[50] YE Y Y, DU Y, HU T Y, et al. 3D printing of integrated ceramic membranes by the DLP method [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(26): 9368-9377.

[51] CHEN C Y, XIE Y C, YIN S, et al. Ductile and high strength Cu fabricated by solid-state cold spray additive manufacturing [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 134: 234-243.

[52] ZHOU T, XUE K L, ZHANG H, et al. Analysis of pore size control and application of ceramic membrane based on particle sintering method[J]. Energy, 2025, 328: 136721.

[53] WANG Y, LIU Y, CHEN Z, et al. Recent progress in the pore size control of silicon carbide ceramic membranes[J]. Ceramics International, 2022, 48(7): 8960-8971.

[54] ZHANG X Q, ZHANG K Q, ZHANG L, et al. Additive manufacturing of cellular ceramic structures: from structure to structure-function integration[J]. Materials & Design, 2022, 215: 110470.

[55] WU X Q, TENG J C, JI X X, et al. Research progress of the defects and innovations of ceramic vat photopolymerization[J]. Additive Manufacturing, 2023, 65: 103441.

[56] CHAUDHARY R P, PARAMESWARAN C, IDREES M, et al. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics: materials, technologies, properties and potential applications[J]. Progress in Materials Science, 2022, 128: 100969.

[57] LIU W B, ZOU B, WANG X F, et al. Tailored microstructure and enhanced high temperature behavior of TiC/Inconel 718 composites through dual-gradient printing strategy in direct energy deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 336: 118679.

[58] LIU L Q, WANG D, HAN C J, et al. Additive manufacturing of multi-materials with interfacial component gradient by *in-situ* powder mixing and laser powder bed fusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 978: 173508.

[59] PATHAK S, SAINI S, KONDAMUDI K, et al. Insights into enhanced stability and activity of silica modified SiC supported iron oxide catalyst in sulfuric acid decomposition[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 284: 119613.

[60] SINGH A K, VISHWAKARMA P K, PANDEY S K, et al. A comparative study of band gap engineered *in-situ* and *ex-situ* MWCNTs/TiO_2 heterostructures for their enhanced photocatalytic activity under visible light [J]. Inorganic Chemistry Communications, 2023, 150: 110540.

[61] ZHANG S S, JIANG P, QI J X, et al. Biomimetic dual-phase ceramic lattice architectures with enhanced mechanical and vibration isolation performances [J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108742.

[62] LI J G, AN X L, LIANG J J, et al. Recent advances in the stereolithographic three-dimensional printing of ceramic cores: challenges and prospects[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 117: 79-98.

[63] MEHDIPOUR F, DELRIEUX T, MAURER F, et al. Opportunities and limitations of metal additive manufacturing of structured catalytic converters [J]. Catalysis Communications, 2024, 187: 106873.

[64] ZHANG L, LIU H W, SONG B, et al. Wood-inspired metamaterial catalyst for robust and high-throughput water purification[J]. Nature Communications, 2024, 15: 2046.

[65] LAO D, ZHANG Y, CHEN R Y, et al. Novel ceramic supports for catalyst with hierarchical pore structures fabricated *via* additive manufacturing-direct ink writing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(10): 5823-5835.

[66] AHMAD R, LEE C S, KIM J H, et al. Partially coated TiO_2 on Al_2O_3 membrane for high water flux and photodegradation by novel filtration strategy in photocatalytic membrane reactors [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 163: 138-148.

[67] KIM D H, NAM S H, HAN G, et al. Robust catalyst 3D microarchitectures by digital light printing with ceramic particle-polymer composites[J]. APL Materials, 2024, 12(2): 021129.

[68] LIU D S, JIANG P, LI X C, et al. 3D printing of metal-organic frameworks decorated hierarchical porous ceramics for high-efficiency catalytic degradation[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 397: 125392.

[69] SPINA R, MORFINI L. Material extrusion additive manufacturing of ceramics: a review on filament-based process[J]. Materials, 2024, 17(11): 2779.

[70] LIU G, LU X Y, ZHANG X F, et al. 3D/4D additive-subtractive manufacturing of heterogeneous ceramics[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 201: 210-221.

[71] KUMAR A, SHARMA P, SHARMA G, et al. Simultaneous hydrogen production and photocatalytic pollutant removal: a review

[J].Environmental Chemistry Letters,2024,22(5):2405-2424.
[72] SIVANESAN J, SIVAPRAKASH B, RAJAMOHAN N, et al. Remediation of tetracycline pollution using microplastics, green materials, membranes and sonocatalysts: a review [J]. Environmental Chemistry Letters,2024,22(6):2943-2975.
[73] ZHAI C Y,CHEN Y P,HUANG X X,et al.Recent progress on single-atom catalysts in advanced oxidation processes for water treatment[J]. Environmental Functional Materials, 2022, 1(3): 219-229.
[74] YI X H,WANG C C.Metal-organic frameworks on 3D interconnected macroporous sponge foams for large-scale water decontamination:a mini review[J].Chinese Chemical Letters,2024,35(5):109094.
[75] ROY BARMAN S, GAVIT P, CHOWDHURY S, et al. 3D-printed materials for wastewater treatment[J].JACS Au,2023,3(11):2930-2947.
[76] BAI S W,MEI H,ZHANG M G,et al.3D printing assemble technology toward advanced photocatalysis [J]. Materials Today Nano,2023,24:100385.
[77] CUONG D V,WU J C,KHAN E,et al.Integrated 3D pore architecture design of bio-based engineered catalysts and adsorbents: preparation, chemical doping, and environmental applications[J]. Environmental Science:Advances,2023,2(9):1167-1188.
[78] BAO Y P,XIAO K K,YUE S,et al.Wastewater decontamination *via* piezoelectric based technologies:materials design,applications and prospects[J].Surfaces and Interfaces,2023,40:103107.
[79] CHEN J X,FU G W,TIAN Y,et al.Three-dimensional-printed Ni-based scaffold design accelerates bubble escape for ampere-level alkaline hydrogen evolution reaction[J].Interdisciplinary Materials,2024,3(4):595-606.
[80] ZHANG Y D,ZHANG B,LI N S,et al.Additive manufacturing of HA-TCP catalytic porous ceramics by stereolithography technology[J].Materials Chemistry and Physics,2026,347:131412.
[81] LIN Z A,LI Y,KUZHANDAIVEL D,et al.Vat photopolymerization of high-solid content UV-curable resins for low-temperature sintered ceramic catalyst scaffolds[J].Ceramics International,2025,51(20):30068-30077.
[82] CÁRCAMO-GUTIÉRREZ A Y, ÁVILA-LÓPEZ M A, LARA-CENICEROS T E,et al.3D-printable scaffolds *via* DIW from ceramic pastes of ZnO nanoparticles without organic binders and their application as reusable photocatalysts for the degradation of Bisphenol A [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025,45(15):117578.
[83] BERNASCONI R,BELLÈ U,BRIGATTI S,et al.3D printing of photocatalytic nanocomposites containing titania nanoparticles [J].Additive Manufacturing,2024,79:103916.
[84] HERNÁNDEZ-AFONSO L, FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ R, ESPARZA P,et al.Ceramic-based 3D printed supports for photocatalytic treatment of wastewater[J].Journal of Chemistry,2017,2017:7602985.
[85] TISATO S,VERA G,SONG Q C,et al.Additive manufacturing of multi-material and hollow structures by embedded extrusion-volumetric printing[J].Nature Communications,2025,16:6730.
[86] AFSHAR A, WOOD R. Development of weather-resistant 3D printed structures by multi-material additive manufacturing [J]. Journal of Composites Science,2020,4(3):94.
[87] ISLAM M A,MOBARAK M H,RIMON M I H,et al.Additive manufacturing in polymer research:advances,synthesis,and applications[J].Polymer Testing,2024,132:108364.
[88] WORTON D R,ZHANG H F,ISAACMAN-VANWERTZ G, et al.Comprehensive chemical characterization of hydrocarbons in NIST standard reference material 2779 gulf of Mexico crude oil [J].Environmental Science & Technology,2015,49(22):13130-13138.
[89] YANG B,ZHANG Z M,LIU P T,et al.Flatband λ-Ti_3O_5 towards extraordinary solar steam generation[J].Nature,2023,622(7983):499-506.
[90] ZHONG Y T,LU Y T,PAN Z H,et al.Efficient water splitting system enabled by multifunctional platinum-free electrocatalysts [J].Advanced Functional Materials,2021,31(20):2009853.
[91] TAGHIPOUR E,TAHMASEBI N.One-step hydrothermal synthesis of MoO_3/MoO_2 composite for efficient removal of methylene blue from aqueous solutions[J].Materials Today Communications,2021,26:102012.
[92] 左继浩,陈嘉慧,文秀芳,等.用于分离油水乳液的先进材料[J].化学进展,2019,31(10):1440-1458.
ZUO J H,CHEN J H,WEN X F,et al.Advanced materials for separation of oil/water emulsion[J].Progress in Chemistry,2019,31(10):1440-1458.
[93] LI B F,QI B,GUO Z Y,et al.Recent developments in the application of membrane separation technology and its challenges in oil-water separation: a review [J]. Chemosphere, 2023, 327: 138528.
[94] ZOU D,FAN W,XU J R,et al.One-step engineering of low-cost Kaolin/fly ash ceramic membranes for efficient separation of oil-water emulsions [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 621: 118954.
[95] RAJI Y O,OTHMAN M H D,MD NORDIN N A H S,et al. Surface matrix functionalization of ceramic-based membrane for oil-water separation:a mini-review[J].Korean Journal of Chemical Engineering,2020,37(10):1631-1641.
[96] BAIG U,WAHEED A,DASTAGEER M A.Facile fabrication of silicon carbide decorated ceramic membrane,engineered with selective surface wettability for highly efficient separation of oil-in-water emulsions[J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2023,11(2):109357.
[97] 黄梅鹏.具有特殊浸润性的仿生多孔陶瓷材料的制备及应用[D].广州:广东工业大学,2020.
HUANG M P.Preparation and application of biomimetic porous ceramic materials with special wettability[D].Guangzhou:Guangdong University of Technology,2020.
[98] CHEN Z, ZHANG D W, PENG E, et al. 3D-printed ceramic structures with *in situ* grown whiskers for effective oil/water separation[J].Chemical Engineering Journal,2019,373:1223-1232.
[99] JONHSON W,XU X,BIAN K,et al.3D-printed hierarchical ceramic architectures for ultrafast emulsion treatment and simultane-

ous oil-water filtration[J]. ACS Materials Letters, 2022, 4(4): 740-750.

[100] GU Q L, NG T C A, BAO Y P, et al. Developing better ceramic membranes for water and wastewater treatment: where microstructure integrates with chemistry and functionalities[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 428: 130456.

[101] LAGDALI S, EL-HABACHA M, BENJELLOUN M, et al. Low-cost ceramic membranes: manufacturing methods, cost analysis and application in water and wastewater treatment: a review[J]. ChemPhysMater, 2026, 5(1): 22-49.

[102] CHEN M L, HEIJMAN S G J, RIETVELD L C. Ceramic membrane filtration for oily wastewater treatment: basics, membrane fouling and fouling control[J]. Desalination, 2024, 583: 117727.

[103] GUDE V G. Desalination and water reuse to address global water scarcity[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2017, 16(4): 591-609.

[104] HASSAN A A, AWAD M M. Bibliometric analysis on hybrid renewable energy-driven desalination technologies [J]. Energy Nexus, 2023, 11: 100215.

[105] DUTTA S, DE LUIS R F, GOSCIANSKA J, et al. Metal - organic frameworks for water desalination [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(43): 2304790.

[106] BHAGWATI A, SHAH M, PRAJAPATI M. Emerging technologies to sustainability: a comprehensive study on solar desalination for sustainable development [J]. Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2023, 2: 100007.

[107] JONHSON W, XU X, ZHANG D W, et al. Fabrication of 3D-printed ceramic structures for portable solar desalination devices [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(19): 23220-23229.

[108] ZHOU X Y, GUO M S, HUANG M, et al. 3D printing of porous ceramic scaffold based halloysite clay for efficient seawater desalination[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 501: 157659.

[109] HUSSAIN M I, XIA M, REN X N, et al. Digital light processing 3D printing of ceramic materials: a review on basic concept, challenges, and applications [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130(5): 2241-2267.

[110] LIU X, XU K N, DING J Y, et al. 3D-printed pillar array pore ceramic membrane for high areal capacity zinc-based flow battery [J]. AIChE Journal, 2025, 71(5): e18728.

[111] HUANG K, MU F Y, HOU X X, et al. Porous ceramic metal-based flow battery composite membrane [J]. Angewandte Chemie, 2024, 136(19): e202401558.

[112] BARTOLETTI A, MERCADELLI E, SARACENI V, et al. 3D-printed ceramic membranes: fabrication and hydrogen permeation performance[J]. Journal of Membrane Science, 2025, 733: 124311.

[113] RANA S, SAJZEW R, SMIRNOVA O, et al. Gas-separating metal-organic framework membrane films on large-area 3D-printed tubular ceramic scaffolds [J]. Small Structures, 2024, 5(5): 2300346.

基金项目：国家自然科学基金项目(52202066)；国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFB3703100)；湖北省重大专项(JD)项目(2023BAA023)；湖北省自然科学基金面上项目(2025AFB457)；中南大学粉末冶金全国重点实验室开放课题(Sklpm-KF-2025008)；武汉理工大学 2025 年度研究生自主创新基金研究生自由探索项目(104972025YJS0054)

收稿日期：2025-12-01；**录用日期**：2026-01-20

通讯作者：刘凯(1987—)，男，教授，博士，研究方向为无机非金属材料增材制造技术，联系地址：湖北省武汉市洪山区珞狮路122号武汉理工大学材料科学与工程学院(430070)，E-mail：victor_liu@whut.edu.cn

(本文责编：齐书涵)