

引用格式:王毅,张驰,刘富初,等.多层交叉孔结构氧化铝基陶瓷的微挤出3D打印成形及污水过滤性能[J].材料工程,2026,54(2):122-133.

WANG Yi, ZHANG Chi, LIU Fuchu, et al. Micro-extrusion 3D printing and sewage filtration performance of multi-layer cross-hole alumina ceramics[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(2): 122-133.

## 多层交叉孔结构氧化铝基陶瓷的微挤出3D打印成形及污水过滤性能

王毅<sup>1,2</sup>, 张驰<sup>1,2</sup>, 刘富初<sup>1,2\*</sup>, 王妙<sup>1,2</sup>, 綦吉<sup>1,2</sup>, 孙庆磊<sup>2,3</sup>, 韩光超<sup>1,2</sup>

(1 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 武汉 430074; 2 中国地质大学深圳研究院, 广东深圳 518057; 3 中国地质大学(武汉)珠宝学院, 武汉 430074)

**摘要:**以氧化铝和碳酸钙粉末为基体材料、聚乙烯醇溶液为黏结剂和乙酸为分散剂制备陶瓷浆料,采用微挤出3D打印成形技术制备多孔氧化铝基陶瓷,研究了多孔氧化铝基陶瓷的孔道结构、厚度对污水过滤性能的影响及其机理。结果表明,采用逐层递增30°填充角度和改变填充率的微挤出3D打印成形方法,成功制备了孔径小于0.1 mm的多层交叉孔结构的氧化铝基陶瓷。交错分布的孔道可对污水进行分流、增大污水的有效过滤面积,较厚的多层级交叉孔氧化铝多孔过滤陶瓷处理污水的路径更长,有利于去除污水中的小分子颗粒。当填充率为90%、多孔陶瓷厚度超过8 mm时,污水浊度的去除率超过90%、过滤后的污水浊度低于10 NUT,满足工业、农业用水要求。基于吸附、筛分-滤饼-深床过滤机理,构建了多层交叉孔与贯通孔的过滤机理模型。兼具亚微米、微米级孔隙的多层交叉孔结构氧化铝基陶瓷在污水的渗透性及过滤能力方面优于贯通孔氧化铝过滤陶瓷,多层交叉孔氧化铝过滤陶瓷在污水处理方面具有较大的应用潜力。本研究为微挤出3D打印技术在多孔陶瓷过滤领域的应用提供了有益参考。

**关键词:**微挤出3D打印技术;氧化铝多孔陶瓷;多层级交叉孔;污水过滤

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000114 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000114

**中图分类号:** TB321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)02-0122-12

### Micro-extrusion 3D printing and sewage filtration performance of multi-layer cross-hole alumina ceramics

WANG Yi<sup>1,2</sup>, ZHANG Chi<sup>1,2</sup>, LIU Fuchu<sup>1,2\*</sup>, WANG Miao<sup>1,2</sup>, QI Ji<sup>1,2</sup>,  
SUN Qinglei<sup>2,3</sup>, HAN Guangchao<sup>1,2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2 Shenzhen Research Institute, China University of Geosciences, Shenzhen 518057, Guangdong, China;

3 Gemmological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The ceramic slurry is prepared using alumina and calcium carbonate powder as matrix materials, polyvinyl alcohol solution as a binder, and acetic acid as a dispersant. Different porous alumina-based ceramics are printed by micro-extrusion 3D printing technology. The effects of hole structure and thickness on the sewage filtration performance and its affecting mechanism of porous alumina-based ceramics are investigated. The results show that the multi-layer cross-hole alumina-based ceramic samples with the hole diameter less than 0.1 mm are successfully fabricated by the micro-extrusion 3D printing method with a stepwise 30° filling angle and varying filling rates. The cross hole distribution can divert sewage flow and increase the effective filtration area, while the thicker multi-layer cross-hole porous alumina-based ceramic provides a longer path for sewage filtration, facilitating the removal of small molecular particles in the sewage. When the filling rate is 90% and the ceramic thickness exceeds 8 mm, the sewage turbidity removal rate exceeds 90%, and the filtered sewage turbidity is below 10 NUT, satisfying the industrial and

agricultural requirements for water. Based on adsorption, screening-filter cake-deep bed filtration mechanism, a filtration mechanism model of the multi-layer cross-hole and through-hole structures is established. The multi-layer cross-hole alumina-based ceramics with submicron and micron-sized holes perform better in terms of permeability and filtration ability, compared to through-hole alumina filtration ceramics, possessing higher potential for sewage treatment applications. This research provides valuable reference for the application of micro-extrusion 3D printing technology in the field of porous ceramic filtration.

**Key words:** micro-extrusion 3D printing technology; porous alumina ceramics; multi-layer cross-hole; sewage filtration

多孔氧化铝陶瓷凭借其高硬度、高强度、好的化学稳定性、耐高温、耐腐蚀等特性及其优异的孔隙结构和比表面积,在过滤、吸附、催化等领域广泛应用。其中多层交叉孔结构陶瓷以其独特的结构设计不仅能够提供高比表面积和可控的孔隙率,还能通过多层交叉孔道的设计实现流体的高效传输与分离<sup>[1-2]</sup>。然而,尽管多层交叉孔陶瓷在理论上具有诸多优势,但其实际应用仍面临一些挑战。传统陶瓷制备方法如造孔剂法、发泡法等往往难以精确控制孔道结构的几何形状和分布,特别是在制备复杂多层交叉孔结构时,容易出现孔道堵塞、结构不均匀等问题<sup>[3-8]</sup>。因此,开发一种能够精确调控孔道结构、实现复杂几何形状的制备技术成为多层交叉孔结构氧化铝基陶瓷研究的重点。

3D 打印技术为多层交叉孔结构陶瓷的快速制造带来了革命性变化,尤其是在实现复杂孔结构方面,该技术结合了材料、自动化、机械等多个领域的相关知识<sup>[9-11]</sup>。利用增材制造技术,可以根据设计需求直接打印出具有多层级、交叉孔等复杂形态的陶瓷材料,而无需依赖传统的铸模或切削工艺。浆料微挤出 3D 打印成形技术又称浆料直写成形,是挤出 3D 打印中的一种关键方法,于 1998 年由 Cesarano 等提出<sup>[12]</sup>,为多孔氧化铝陶瓷的制备开辟了全新的路径和方法。该技术所具有的高度设计自由度,使其能够突破传统工艺的设计桎梏,根据实际需求制备出复杂多样的孔结构,在复杂结构多孔陶瓷的制备方面展现出令人瞩目的巨大潜力<sup>[13-17]</sup>。

Huo 等<sup>[18]</sup>使用中空微球作为孔模板,将其添加到陶瓷浆料中,并使用浆料挤出直写成形技术制备多孔陶瓷,得到具有三级孔结构的多级多孔陶瓷材料,用该方法制备的分级多孔材料的抗压强度比化学组成和相对密度接近的多孔材料的抗压强度约高一个数量级。Minas 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于浆料直写挤出和乳液/泡沫模板相结合的多级多孔陶瓷制造的新型多功能方法,成功制备了具有多层次孔结构的多孔陶瓷材

料,不仅能够独立控制毫米级和微米级的孔结构,还能通过多材料打印实现局部孔隙率的调控。Xu 等<sup>[20]</sup>基于微挤出 3D 打印技术,对比了不同的填充策略对 3D 打印氧化铝陶瓷表面形貌和强度的影响,结果表明使用较小的喷嘴直径与短程方式对其的打印路径有利于表面粗糙度,使用 0.5 mm 喷嘴沿平行于打印路径的方向进行打印可有效提高氧化铝陶瓷的弯曲强度。Zhang 等<sup>[21]</sup>为制备高强度、高孔隙率、低收缩率的多孔氧化铝陶瓷,使用碳酸钙作为矿化剂,采用微挤出 3D 打印技术成功制备出弯曲强度 8.9 MPa,孔隙率 71.9%,X、Y 和 Z 方向的收缩率分别为 0.9%、1.1% 和 1.5% 的多孔氧化铝陶瓷。上述研究表明,采用浆料直写挤出成形技术可实现多孔陶瓷的快速制备,但在多层结构 3D 打印成形及其污水过滤方面研究较少。

氧化铝陶瓷多层级交叉孔结构的设计不仅仅是简单的孔隙引入,更是在功能性上进行深度优化<sup>[22-24]</sup>。本工作旨在深入探讨 3D 打印氧化铝基陶瓷中多层级交叉孔结构的设计及成形原理,调控内部填充率和填充角度,制备出贯通孔、多层交叉孔氧化铝基陶瓷,对比不同孔道结构的过滤性能,并研究了不同厚度的多层级交叉孔氧化铝基过滤陶瓷性能及机理,以期为高效污水处理及相关精细过滤应用提供新的材料选择和工艺改进思路,拓展多层级交叉孔结构陶瓷在实际应用中的潜力。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料与设备

以氧化铝陶瓷粉末( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,纯度 $\geq 98.50\%$ (质量分数,下同),郑州翔宇铸造材料有限公司)为骨料,平均粒径  $D_{50} \approx 1.859 \mu\text{m}$ ,氧化铝的粒径分布和微观形貌见图 1、化学成分见表 1。使用 3000 目的碳酸钙粉末(常州市禹恩新材料科技有限公司)作为矿化剂,能促进氧化铝高温烧结、改善力学性能,其

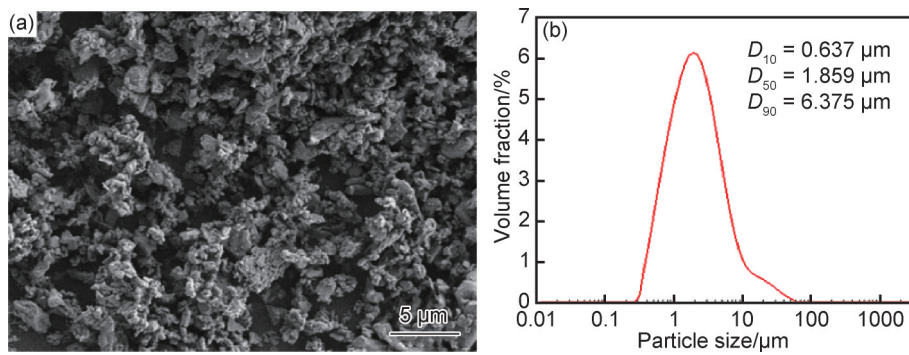


图1 氧化铝粉末微观形貌(a)和粒径分布(b)

Fig.1 Microstructural morphology(a) and particle size distribution(b) of alumina powder

表1 氧化铝粉末的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of alumina powder (mass fraction/%)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO
≥98.50	≤1.0	≤0.04	≤0.22	≤0.03

粒径分布和微观形貌见图2。聚乙烯醇(PVA-1788,上海锆源化工科技有限公司)水溶液为有机黏结剂,其相关参数如表2所示,乙酸(浓度36%,国药试剂)为分散剂,并结合有机硅消泡剂制备微挤出3D打印用陶瓷浆料。

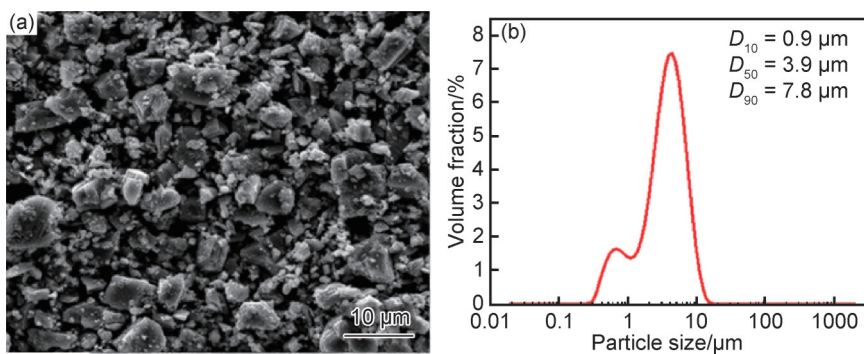


图2 碳酸钙粉末(a)和粒径分布(b)

Fig.2 Microstructural morphology(a) and particle size distribution(b) of CaCO<sub>3</sub> powder

表2 聚乙烯醇的理化参数

Table 2 Physicochemical parameters of polyvinyl alcohol

Molecular formula	Average molecular weight	Viscosity/(Pa·s)	pH	Scorch residue/%	Hydrolysis temperature/°C
[C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O] <sub>n</sub>	110000-130000	21.0-33.0	5-8	≤2.0	90-95

多孔陶瓷的制备:氧化铝基陶瓷浆料的配比见表3、工艺参数见表4,将陶瓷浆料装入实验室自主研发的微挤出3D打印装置的挤出料筒内,打印路径及挤出状态由上位机切片软件Simplify 3D来实现,浆料挤出的动力来源为气泵,如图3所示。该装置主要有3个模块组成:机械运动模块、驱动浆料挤出装置和软件控制系统。机械运动模块包括

成型平台和传动机构两个部分。成型平台为随Z轴升降式,挤出机构在X-Y面做平移运动;为保证成型平台平稳精确运动至指定位置,Z轴采用滚珠丝杠传动,X和Y轴采用同步带传动来实现快速打印。该装置的最大成形尺寸为450 mm×450 mm×500 mm、打印速度可达30 mm/s、定位精度在0.02~0.1 mm。

表3 氧化铝基陶瓷浆料组分及配比

Table 3 Composition and ratio of alumina-based ceramic slurry

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	CaCO <sub>3</sub> /%	PVA aqueous solution/%	Acetic acid/%	Silicone defoamer/%
57	20	21	1	1

表 4 微挤出打印工艺参数

Table 4 Micro-extrusion printing process parameters

Extrusion head diameter/mm	Height/mm	Printing speed/(mm·min <sup>-1</sup> )
0.51(inner diameter of outlet end of extruder head)	0.306(height between adjacent floors)	1.0×10 <sup>3</sup> (extrusion head moving speed)

多孔氧化铝基陶瓷浆料按照预设的打印路径沉积在基板上,形成具有不同孔道结构的圆柱形陶瓷坯体。坯体在自然干燥 24 h 后放入 60 °C 恒温干燥箱内干燥 2 h,随后进行分步式烧结,具体步骤如下:以 2 °C/min 的速率升温至 300 °C 并保温 2 h,进行脱脂;然后以 2 °C/min 的升温速率加热至 800 °C 并保温 2 h;再以 5 °C/min 的速率升温至 1400 °C 烧结 2 h,最后随炉冷却至室温。

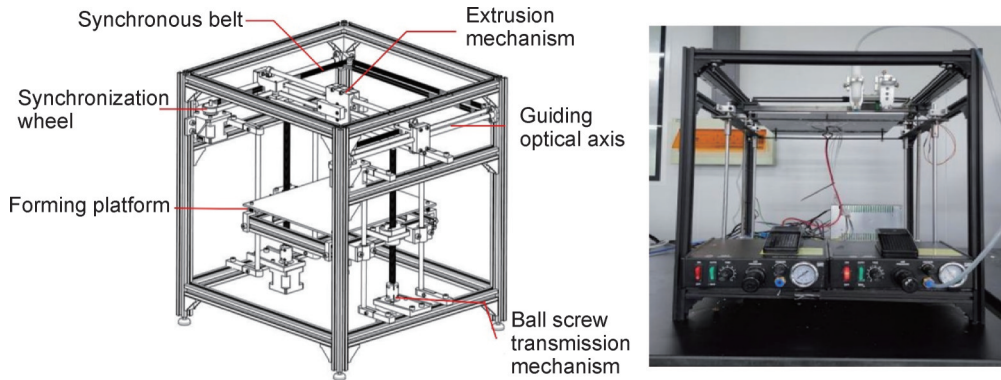


图 3 实验室自主研发的微挤出 3D 打印装置

Fig.3 Micro-extrusion 3D printing device self-developed by the laboratory

过滤装置及污水的配置:选取适量 320 目石英粉(纯度>99.5%,郑州翔宇铸造材料有限公司)加入去离子水中,超声分散 30 min,石英粉的理化参数见表 5,其过滤装置见图 4(a),包括过滤部分、抽滤部分和测试部分;配置的 200 NTU 的污水见图 4(b)。将多孔氧化铝基过滤陶瓷装夹在滤杯与收集装置之间,污水经过多孔陶瓷的滤过拦截、筛分作用,在三角瓶中被收集起来,随后将多次过滤的水溶液装入标准测定

瓶中,采用便携式浊度计(WGZ-1BW)对处理后水的浊度进行测定。

表 5 石英粉理化参数

Table 5 Physical and chemical parameters of quartz powder

SiO <sub>2</sub> /%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	Refractoriness/°C	Soil content/%	Homogeneous rate/%
≥99.5	<0.15	>1730	<0.3	90.70

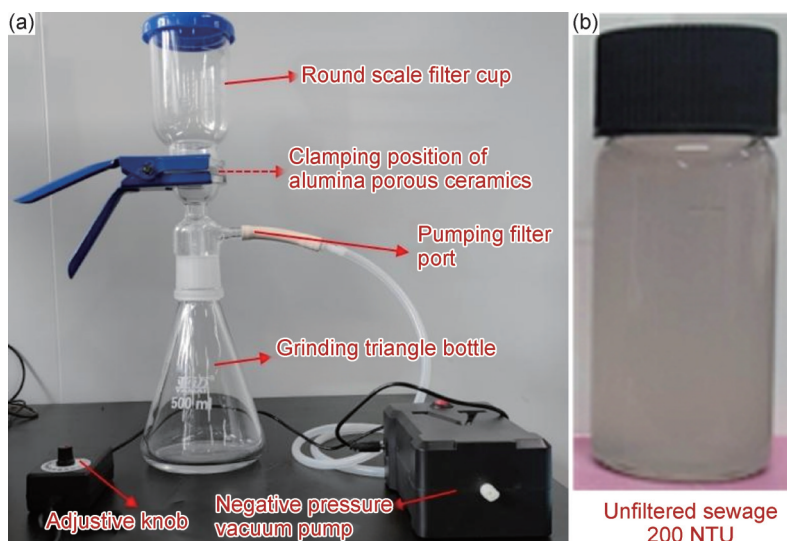


图 4 过滤装置图(a)和配置的污水(b)

Fig.4 Filtration device diagram(a) and configured sewage(b)

## 1.2 性能测试方法

烧结收缩率测试:采用超景深显微镜对具备微米级孔隙的多孔氧化铝基过滤陶瓷表面进行拍摄,通过Hirox RX-100软件中的尺寸进行标定功能,测量微米级别内部填充孔尺寸,采用式(1)计算内部设计孔和内部填充孔的烧结收缩率,每组样品测量5个值,并取平均值作为测定尺寸。

$$L_s = \frac{D_p - D_s}{D_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $L_s$ 为坯体尺寸与烧结体尺寸之间的收缩率,%; $D_p$ 为坯体尺寸, $\mu\text{m}$ ; $D_s$ 为烧结体尺寸, $\mu\text{m}$ 。

浊度测试:将过滤前后的水溶液装入浊度仪比色瓶中,用干净棉布将浊度仪比色瓶表面擦拭干净,并装入便携式浊度计中,待测量数值稳定后,记录当下水溶液浊度值为测定值。采用式(2)计算污水浊度去除效率,即过滤效率。

$$N = \frac{\eta_0 - \eta_1}{\eta_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $N$ 为浊度去除效率,%; $\eta_0$ 为过滤前污水浊度,NTU; $\eta_1$ 为过滤后水溶液浊度,NTU。

粒度分析:采用粒度分析仪(Malvern Mastersizer 2000)对氧化铝粉末进行分析,利用粉体颗粒对激光的散射特性来区分粉末尺寸大小。将陶瓷粉末在水中超声分散5~10 min,使粉料在水中分散均匀,以便测试时获得较好的效果。

SEM微观形貌分析:将样品直接粘到导电胶上,并使用溅射镀膜仪(Quorum SC7620)喷金45 s;随后

使用扫描电子显微镜(SEM,ZEISS GeminiSEM 300,德国)拍摄粉末形貌,拍摄倍数根据实际观察效果进行调整,尽可能选取不同区域进行拍摄,以获取准确的拍摄结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 多层交叉孔结构氧化铝基陶瓷的3D打印制备

为制备具有微米级孔径的多层交叉孔结构氧化铝基过滤陶瓷,基于微挤出3D打印技术快速无模成形的优势,通过改变填充角度和填充率的方法控制内部填充孔的形状和尺寸及内部孔道结构,制备了单层贯通孔、双层贯通孔和多层交叉孔结构。单层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷的孔形状包括正方形、等边三角形和六边形,如图5所示,分别采用Simplify 3D软件中的Rectilinear、Triangular和Full Honeycomb填充,填充角度分别为 $(45^\circ, -45^\circ)$ 、 $(0^\circ, 60^\circ, -60^\circ)$ 和 $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$ ,通过改变填充率50%、70%、90%,调节内部孔径。当填充率为50%时,成形的正方形孔、三角形孔和六边形孔形状良好(见图5和图6);当填充率逐渐增大到90%时,此时孔的形状发生了微小的变化,内部填充孔的边长尺寸分布较为分散,因此随机选取20个孔测量后计算出平均值作为最终测量值见表6,其平均边长为122.54、129.55、269.71  $\mu\text{m}$ 。随着填充率的增大,内部填充孔的孔径逐渐减小,当填充率为90%时,正方形孔和三角形孔的尺寸较小且形状较好,可以满足过滤工业污水的要求。

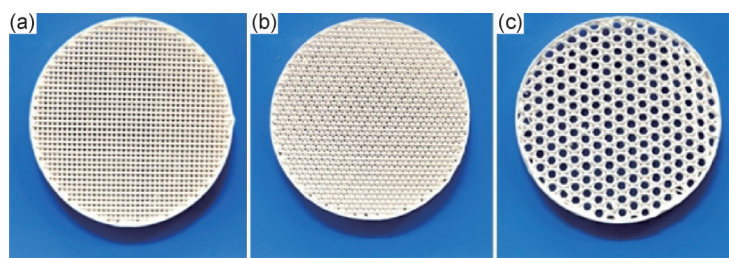


图5 填充率为50%时的不同形状内部填充孔的单层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷

(a)正方形;(b)三角形;(c)六边形

Fig.5 Single-layer through-hole alumina-based filtration ceramics with different shapes of internally filled holes when the filling rate was 50%

(a)square;(b)triangle;(c)hexagonal

当填充率过大时,不仅会导致多孔氧化铝基陶瓷的内部孔变形,还会进一步增大多孔陶瓷的致密度,降低其过滤效率。通过改变填充率制备的双层贯通孔过滤陶瓷,包括50%填充率的支撑层和90%填充率的过滤层,如图7所示。支撑层采用Rectilinear填充,填充角度为 $(45^\circ, -45^\circ)$ 方向填充,填充率为50%,厚度为3 mm,过滤层则采用与单层贯通孔过滤陶瓷同

样的填充方案制备出具有不同形状的孔结构,填充率为90%,厚度为1 mm。

多层交叉孔结构陶瓷通过逐层递增 $30^\circ$  ( $0^\circ, 30^\circ, \dots, 360^\circ, 30^\circ$ )的填充策略成形,如图8所示,通过改变填充率(50%、70%、90%)实现内部孔径调节如图9所示,同时制备了不同厚度(3~10 mm)多层级交叉孔氧化铝基过滤陶瓷。由于多层交叉孔过滤陶瓷

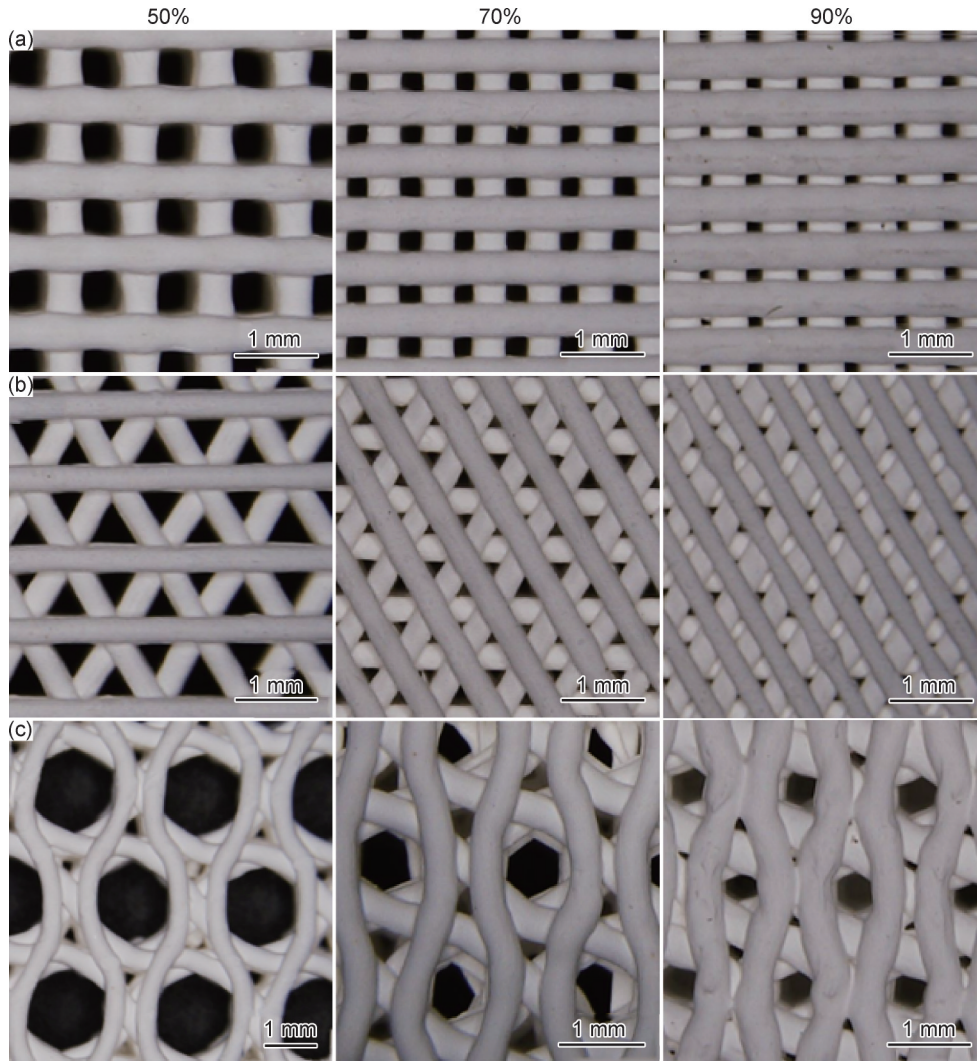


图 6 不同填充率下单层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷的内部填充孔分布

(a)正方形孔;(b)三角形孔;(c)六边形孔

Fig.6 Distribution of internal filling holes in single-layer through-hole alumina-based filtration ceramics under different filling rates  
(a)square holes;(b)triangular holes;(c)hexagonal holes

表 6 单层贯通孔过滤陶瓷内部填充尺寸结果

Table 6 Single-layer through-hole filtration ceramics internal filling size results

Hole shape	Filling factor/%	Body size/ $\mu\text{m}$	Sintered body size/ $\mu\text{m}$	Sintering shrinkage/%
Square holes	50	503.38	443.38	11.92
	70	280.64	244.41	12.91
	90	143.63	122.54	14.68
Triangular holes	50	581.22	493.32	15.12
	70	264.77	232.27	12.27
	90	158.26	129.55	18.14
Hexagonal holes	50	814.71	814.42	0.04
	70	405.88	420.57	-3.62
	90	253.5	269.71	-6.39

内部结构是不规则的,其交错分布的孔道可以对污水进行分流,能有效增大对污水的过滤面积,对污水中的杂质、颗粒等污染物有着更强的截留能力<sup>[25]</sup>。

## 2.2 多孔氧化铝基陶瓷污水过滤实验与机理分析

### 2.2.1 不同形状孔尺寸和孔道结构对污水过滤性能的影响

当填充率为 50%、70% 和 90% 时,正方形孔、三

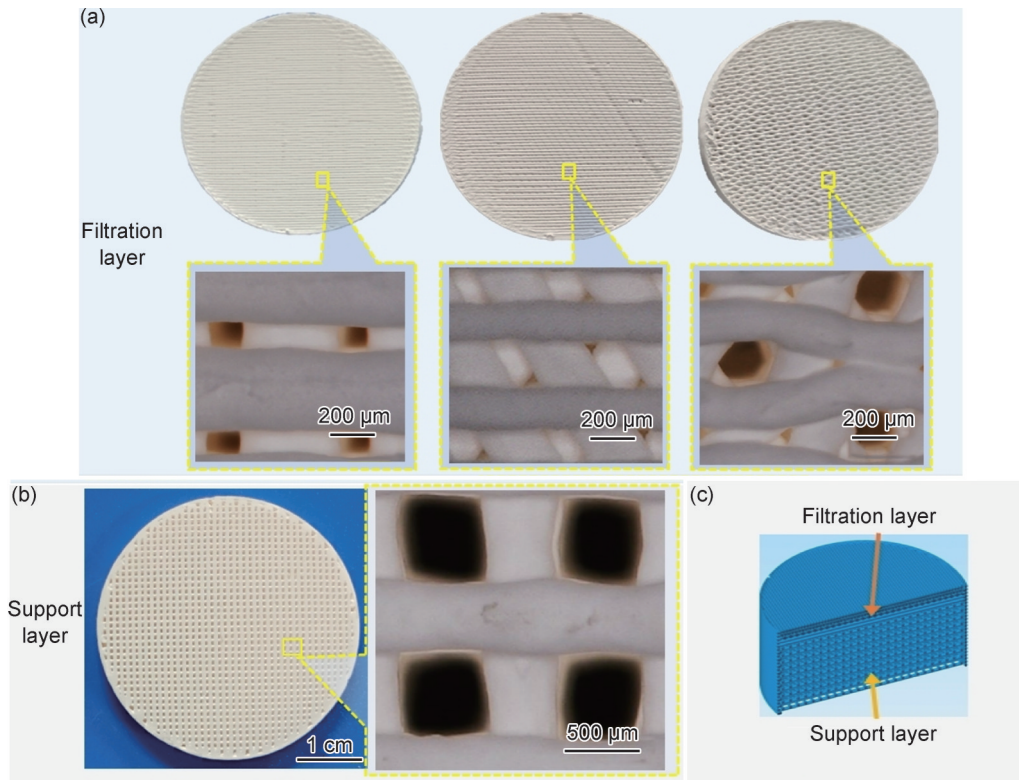


图7 双层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷结构  
(a)过滤层;(b)支撑层;(c)整体结构

Fig.7 Double-layer through-hole alumina-based porous filtration ceramics structure  
(a)filtration layer; (b)support layer; (c)integral structure

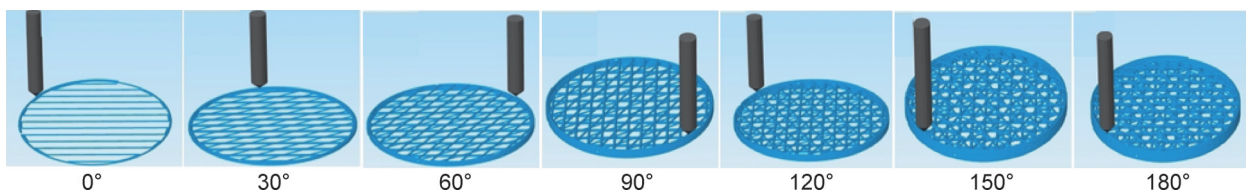


图8 多层交叉孔氧化铝基过滤陶瓷的制备过程

Fig.8 Preparation process of multi-layer cross-hole alumina-based filtration ceramics

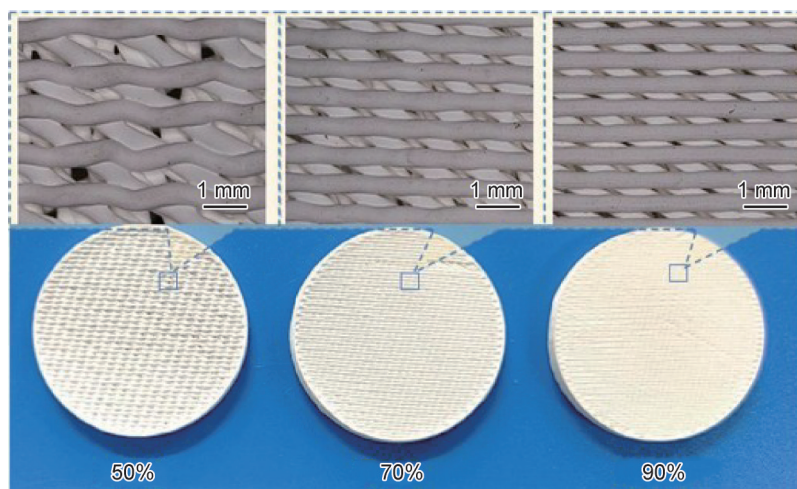


图9 多层交叉孔氧化铝基过滤陶瓷

Fig.9 Multi-layer cross-hole alumina-based filtration ceramics

角形孔和六边形孔三种单层贯通孔氧化铝基陶瓷的过滤性能结果如图 10 所示。

由图 10(a)可知,污水在经历循环过滤 25 次后,其浊度趋于稳定。当内部填充形状相同时,随着填充率的增大、其过滤效果变好。当内部填充为正方形孔、污水经过 25 次过滤后,随着填充率的增大,过滤后污水的浊度由 177.2 NTU 降低为 105.2 NTU,过滤效率从 11.4% 提升到 43.6%,过滤效率提升了 2.8 倍,过滤效果

显著增强。这是因为填充率越大,氧化铝基过滤陶瓷内部填充越紧密,所以内部填充孔径越小,可以拦截住更多的小颗粒杂质,因此提高了其过滤的效率。

由图 10(b)可知,不同形状的内部填充孔对污水的过滤效率影响具有显著差异性;当填充率相同时,具有三角形填充孔的陶瓷过滤膜具备更好的过滤效果。这是因为在相同的填充率下,其孔径较正方形孔径小,小颗粒杂质的阻挡效果更佳。

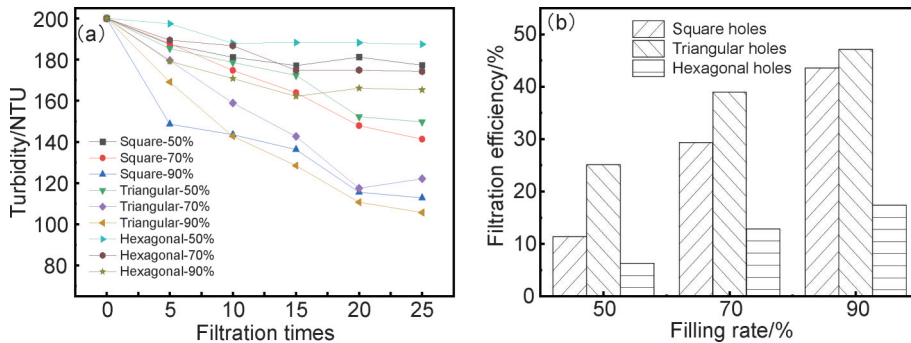


图 10 单层贯通孔氧化铝基陶瓷过滤污水结果

(a) 过滤后水浊度; (b) 过滤效率

Fig.10 Single-layer through-hole alumina-based porous ceramics filtration sewage results

(a) water turbidity after filtration; (b) filtration efficiency

小尺寸的孔径更有利于污水的处理,然而孔径越小,污水的渗透率越低。为提高氧化铝基过滤陶瓷的过滤效率,采用微挤出 3D 打印成形具有双层贯通孔道结构的氧化铝基陶瓷,双层贯通孔多孔陶瓷过滤结

果如图 11 所示,采用双层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷处理后的污水浊度最低可以降至 67.3 NTU,过滤效率达到 66.35%,因此,双层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷更有利于对污水的过滤。

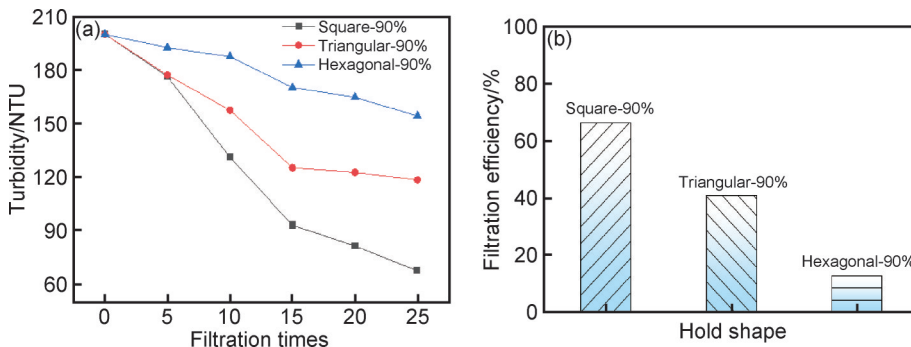


图 11 双层贯通孔氧化铝基陶瓷过滤结果

(a) 过滤后水浊度; (b) 过滤效率

Fig.11 Filtration results of double-layer through-hole alumina-based ceramics

(a) water turbidity after filtration; (b) filtration efficiency

具有交叉孔道结构的氧化铝基过滤陶瓷的过滤结果如图 12 所示。随着过滤次数的增加,过滤后的污水中杂质越少,随着过滤次数超过 20 次后,过滤后的污水浊度趋于稳定水平。当填充率为 70% 和 90% 时,污水经 25 次过滤后的浊度分别为 52.8 NTU 和 38.7 NTU,过滤效率分别为 73.6% 和 80.65%。

相比于贯通孔氧化铝基过滤陶瓷对污水的处理效果,具备交叉孔道的氧化铝基过滤陶瓷的过滤性能得到了显著提升(如表 7 所示)。当填充率均为 90%、过滤次数为 25 次时,单层和双层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷最佳的过滤效率分别为 47.15% 和 66.35%,而具备交叉孔道的氧化铝基过滤陶瓷的过滤效率为

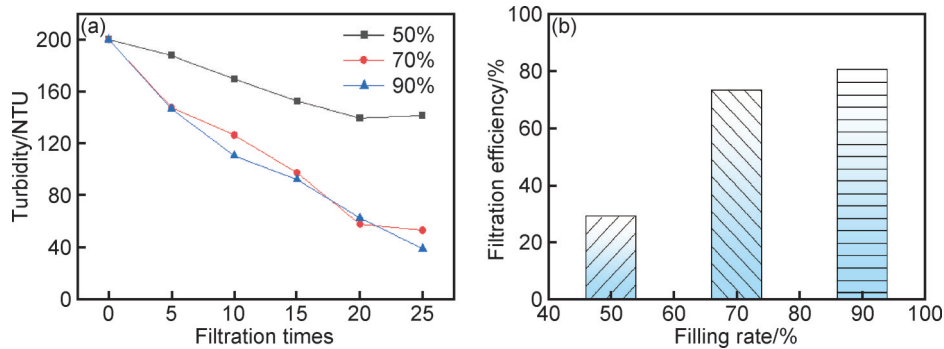


图12 多层交叉孔氧化铝基陶瓷的过滤结果

(a)过滤后水浊度;(b)过滤效率

Fig.12 Filtration results of multi-layer cross-hole alumina-based ceramics

(a)water turbidity after filtration;(b)filtration efficiency

80.65%，分别为单层和双层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷过滤效率的1.7倍和1.2倍，主要是因为内部交叉

孔道结构对污水中污染物的滤除效果具有较大的影响。

表7 不同孔结构过滤陶瓷的过滤效率对比

Table 7 Optimal filtration efficiency of different hole ceramics

Filter ceramics hole structure	Optimum filtration efficiency/%	Improvement rate of multi-layer cross-hole/times
Single-layer through-hole	47.15	1.7
Double-layer through-hole	66.35	1.2
Multi-layer cross-hole	80.65	1.0

### 2.2.2 过滤层厚度对污水过滤性能的影响

采用死端过滤的方式对污水进行处理，当污水流经具备交错孔结构的多孔陶瓷膜时，污水中的大颗粒被较小孔径的孔拦截，而小颗粒随着水流动到多孔过滤膜层中，一部分受布朗运动的作用，被陶瓷表面的微孔吸附，另外一部分则是随着水流出，导致过滤后的水仍然残留一些杂质。根据GB/T 14848—2017标准中对地下水的分类，参考生活用水、工业、农业用水质量要求，第Ⅳ类水（浊度 $\leq 10$  NTU）能满足农业及工业用水，经其他工艺处理后可用作生活饮用水。

交叉孔氧化铝基过滤陶瓷具备较好的污水处理能力，然而将污水的浊度降低到10 NTU以下仍然需要采取其他的优化过滤策略，即采用更厚的多层交叉孔氧化铝基过滤陶瓷，以此增大污水与多孔陶瓷表面的接触，从而提高其污水处理效果。以填充率为90%、填充角度为从 $0^\circ$ 开始、每层填充角度递增 $30^\circ$ 的填充方式制备不同厚度的多层交叉孔结构氧化铝基陶瓷膜。当过滤温度为 $20^\circ\text{C}$ 、污水的初始浊度为200 NTU，探究多孔过滤陶瓷厚度（3~10 mm）对污水浊度的处理能力的规律，以制出满足工业、农业所需用水。

不同厚度交叉孔陶瓷过滤膜污水处理效果如图13所示，当厚度为3 mm时，此时氧化铝基过滤陶瓷

的过滤效率仅为64.5%，过滤后水的浊度为71.1 NTU。然而，随着其厚度增加到8 mm时，其过滤效率超过90%，污水浊度小于20 NTU，表明交叉孔氧化铝基过滤陶瓷具有优异的过滤性能；当厚度为9 mm和10 mm时，其过滤后的水浊度均小于10 NTU，其过滤效率在95%以上，过滤后的水已经达到了第Ⅳ类水标准，可以用于农业、工业用水。由此可知，随着多孔陶瓷过滤膜厚度的增加，其过滤效率也逐渐增加。

### 2.2.3 多层交叉孔结构过滤陶瓷的过滤效果与机理分析

相比于具有贯通孔道结构的氧化铝基陶瓷，具有交叉孔道结构的氧化铝基过滤陶瓷对污水浊度的处理效果更加显著，主要是因为不同孔径、不同孔洞形态在三维空间中多层次构建而成的交叉孔道有效整合了各种孔结构带来的性能优势，使其兼具高渗透性、高比表面积、良好的力学性能及高气孔率等优异性能，提高了氧化铝基过滤陶瓷在污水处理方面的能力。多孔陶瓷在污水处理方面涉及的机制有吸附、筛分-滤饼-深床过滤机制<sup>[26]</sup>等，可以实现污水中杂质、污染物等的有效去除。多孔氧化铝基陶瓷的过滤过程类似于筛分-滤饼-深床过滤，因此可以把污水经过多孔氧化铝基陶瓷分为表面过滤和深层过滤阶段，污水通过贯通孔孔道与交叉孔孔道时的过滤模型如图14所示。

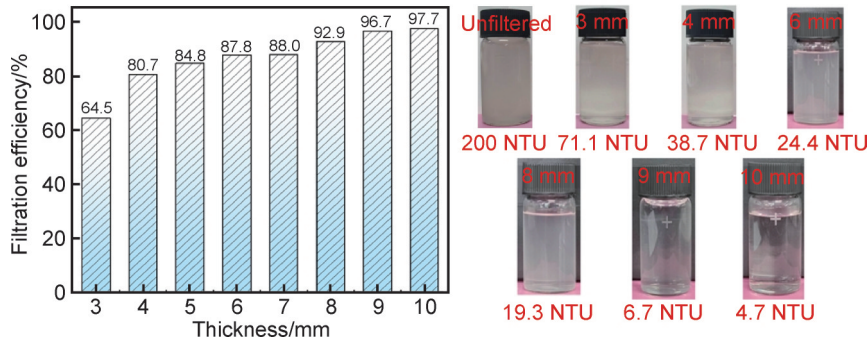


图 13 不同厚度交叉孔陶瓷过滤膜污水处理效果图

Fig.13 Sewage treatment effect of cross-hole ceramic filtration membrane with different thicknesses

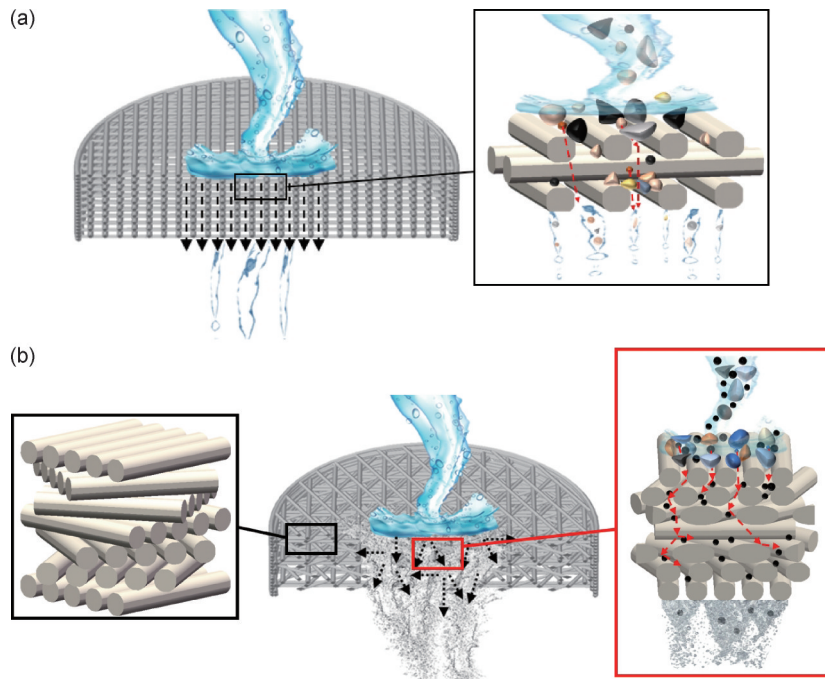


图 14 不同孔道结构的多孔氧化铝基陶瓷过滤机理模型

(a)贯通孔;(b)多层交叉孔

Fig.14 Filtration mechanism model of porous alumina-based ceramic with different pore structures

(a)through hole;(b)multi-layer cross-holes

表面过滤即污水通过多孔氧化铝基陶瓷表面阶段,主要包括吸附和筛分作用<sup>[27-28]</sup>。其中筛分作用是表面过滤最主要的过滤机制,适用于过滤较大颗粒。在这个阶段,粒径大于多孔陶瓷孔径的悬浮颗粒等杂质被拦截在表面,小于孔径的颗粒随水流渗透到多孔氧化铝基陶瓷内部,然而,部分小于孔径的颗粒与多孔陶瓷表面发生反应被截留在多孔陶瓷表面<sup>[29]</sup>。随着对污水过滤的循环次数变多,多孔陶瓷拦截的悬浮杂质较多,容易形成滤饼层,如图 14(a)和图 14(b)所示。在多孔陶瓷表面形成滤饼,滤饼层的形成不仅能截留较大的颗粒,还能通过进一步净化流体、拦截更小的颗粒,实现了对微小颗粒的二次筛分<sup>[30]</sup>。

深层过滤即污水在多孔氧化铝基陶瓷的内部孔

道的过滤阶段,主要包括吸附、沉降、捕捉等作用。不同的孔道结构的多孔氧化铝基过滤陶瓷的过滤效果不同,主要是因为受到内部结构的影响,孔道壁与污水接触面积各不相同<sup>[31]</sup>。如图 14(a)所示,污水在自身重力和抽滤吸力的作用下通过贯通孔结构多孔氧化铝基过滤陶瓷时,由于贯通孔孔隙均匀且直连,只可拦截直径大于孔径的固体颗粒、难以拦截较小的固体颗粒,导致过滤效果不太理想;如图 14(b)所示,当污水通过交叉孔孔道时,较大的固体颗粒在表面形成滤饼并阻止较大的固体颗粒进一步向下流动,而较小的固体颗粒因自身重力、水流的冲刷以及抽滤吸力的作用向下运动,由于其内部结构复杂,小粒径的固体颗粒在多孔陶瓷内部的复杂孔道四处流

窜,因多层交叉孔道更大的比表面积,增加了污水中微小颗粒与孔道壁面的碰撞接触机会。随着污水向下流动,微小的颗粒也逐渐被过滤到更深层次,最终实现高效的过滤去除,使得更多的微小颗粒被捕捉<sup>[32-33]</sup>。

因此,多层交叉孔氧化铝基过滤陶瓷凭借孔隙位置和孔隙尺寸分布的复杂性、孔隙的多层次性、多维度设计使得过滤陶瓷不仅具备良好的渗透性,还能在不同的孔径尺度下进行颗粒的分级过滤。较大的孔隙可以捕捉较大的颗粒,而较小的孔隙则拦截更微小的颗粒。基于多层级结构设计,多层交叉孔氧化铝基过滤陶瓷能够同时兼顾污水的渗透性和高效的过滤能力,尤其是在去除微米级和亚微米级的颗粒时,表现出优越的深床过滤效果。

该过滤机理模型的建立,可通过独特的结构设计直观地展示污水过滤过程,利于深入理解多层交叉孔污水过滤机理;优化的多层交叉结构设计,在过滤陶瓷功能和应用方面具有创新价值,为过滤技术发展提供新思路 and 方向。多层交叉孔氧化铝基过滤陶瓷对实验室自配污水的过滤效率较好,展现出了多层交叉孔结构对污水中微小颗粒的吸附和拦截作用,但是实验室配置的污水中的微小颗粒仅为石英粉,对于工业废水、生活污水等各种污水中的溶解性离子和油类物质的过滤效果还有待进一步的研究。

### 3 结论

(1)采用微挤出3D打印技术成功制备了具有不同孔道结构的多孔氧化铝基过滤陶瓷,其中以逐层递增 $30^\circ(0^\circ, 30^\circ, \dots, 360^\circ, 30^\circ)$ 填充角度成形方法,成功制备了孔径小于0.1 mm的多层交叉孔氧化铝基过滤陶瓷。

(2)交错分布的孔道可以对污水进行分流,增大污水的有效过滤面积,对污水中的杂质、颗粒等污染物的截留能力更强;较厚的多层级交叉孔氧化铝基过滤陶瓷处理污水的路径更长,污水中杂质、污染物颗粒被孔道壁吸附的可能性更大,有利于去除污水中的小分子颗粒。

(3)交叉孔道的氧化铝基过滤陶瓷的过滤效率为80.65%,分别为单层和双层贯通孔氧化铝基过滤陶瓷过滤效率的1.7倍和1.2倍;厚度超过8 mm的多层交叉孔氧化铝基陶瓷的污水浊度去除率超过90%,过滤后的污水浊度低于10 NTU。

#### 参考文献

[1] 和祥,黄千里,陈煜辉,等.多孔氧化铝陶瓷材料的制备工艺研

究进展[J].粉末冶金材料科学与工程,2021,26(6):483-491.

HE X, HUANG Q L, CHEN Y H, et al. Research progress on the fabrication technology of porous alumina ceramics[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2021, 26(6): 483-491.

[2] 张驰,刘富初,穆英朋,等.基于浆料直写成形的多孔氧化铝陶瓷孔隙率与抗弯强度的相关性研究[J].机械工程学报,2024,60(17):330-338.

ZHANG C, LIU F C, MU Y P, et al. Study on the correlation between porosity and flexural strength of porous alumina ceramic based on direct ink writing forming method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(17): 330-338.

[3] 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: 546-553.

[4] 刘岩松,李文博,刘永胜,等.3D打印陶瓷铸型研究与应用进展[J].材料工程,2022,50(7):18-29.

LIU Y S, LI W B, LIU Y S, et al. Research and application progress of 3D printing ceramic casting mould[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(7): 18-29.

[5] 蒋浩然,林硕,张康飞,等.ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>多孔陶瓷的制备与力学性能[J].材料工程,2021,49(5):157-162.

JIANG H R, LIN S, ZHANG K F, et al. Preparation and mechanical properties of ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> porous ceramics[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(5): 157-162.

[6] CUI W W, YANG Y R, DI L. Modeling and optimization for static-dynamic routing of a vehicle with additive manufacturing equipment[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 257: 108756.

[7] ABDELKADER M, PETRIK S, NESTLER D, et al. Ceramics 3D printing: a comprehensive overview and applications, with brief insights into industry and market[J]. Ceramics, 2024, 7(1): 68-85.

[8] GALASSI C. Processing of porous ceramics: piezoelectric materials[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26(14): 2951-2958.

[9] ZHANG B, HUANG H M, LU X L. Fabrication and properties of C/SiC porous ceramics by grinding-mould pressing-sintering process[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(5): 1775-1780.

[10] 高晨溪,陈健,黄常聪,等.陶瓷挤出成型3D打印技术研究与应用进展[J].陶瓷学报,2024,45(5):865-885.

GAO C X, CHEN J, HUANG C C, et al. Research and application progress of ceramic extrusion molding through 3D printing technology[J]. Journal of Ceramics, 2024, 45(5): 865-885.

[11] 杨彦安,李鹤,穆保霞.陶瓷3D打印技术研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(5):1600-1614.

YANG Y A, LI H, MU B X. Research progress of ceramic 3D printing technology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(5): 1600-1614.

[12] CESARANO J, SEGALMAN R, CALVERT P D. Robocasting provides moldless fabrication from slurry deposition[J]. Ceramic Industry, 1998, 148:94-102.

- [13] LEMMA E D, RANIERI V, CORICCIATI C, et al. Micro-extrusion-based 3D printing for the free-shape deposition of functional cellulose-based electronic materials [J]. *Cellulose*, 2025, 32(5): 3231-3243.
- [14] 王泽林, 周梦楠, 陈晔焱, 等. 微挤出发泡堆叠成型制备多孔聚酯弹性体器件及其性能研究[J]. *材料研究与应用*, 2024, 18(3): 387-396.  
WANG Z L, ZHOU M N, CHEN B C, et al. Study on the preparation and properties of porous polyester elastomer components *via* micro-extrusion foaming stacking [J]. *Materials Research and Application*, 2024, 18(3): 387-396.
- [15] LEWIS J A. Direct ink writing of 3D functional materials[J]. *Advanced Functional Materials*, 2006, 16(17): 2193-2204.
- [16] 王妙, 刘富初, 王毅, 等. 基于响应面法的微挤出3D打印氧化硅多孔陶瓷工艺参数优化[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(12): 68-81.  
WANG M, LIU F C, WANG Y, et al. Optimization of process parameters for micro-extrusion 3D printing of silica porous ceramics based on response surface methodology [J]. *Journal of Net-shape Forming Engineering*, 2024, 16(12): 68-81.
- [17] 穆英朋, 鲁一勤, 林雨霄, 等. 铸造用水溶性氧化钙陶瓷型芯3D打印工艺响应面优化研究[J]. *铸造技术*, 2023, 44(11): 1012-1019.  
MU Y P, LU Y Q, LIN Y X, et al. Optimization for the 3D printing process of water-soluble calcium ceramic cores for complex castings based on response surface methodology [J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(11): 1012-1019.
- [18] HUO W L, TERVOORT E, GANTENBEIN S, et al. 3D printing of hollow microspheres into strong hierarchical porous ceramics [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(15): 2300065.
- [19] MINAS C, CARNELLI D, TERVOORT E, et al. 3D printing of emulsions and foams into hierarchical porous ceramics[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(45): 9993-9999.
- [20] XU T T, WANG W. Effect of filling strategy on surface topography and strength of 3D-printed dense zirconia ceramics [J]. *Ceramics International*, 2025, 51(10): 13469-13477.
- [21] ZHANG C, LIU F C, MU Y P, et al. High-strength, high-porosity and low-shrinkage  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics prepared by flexible adjustment of  $\text{CaCO}_3$  size and content [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(4): 2304-2316.
- [22] 马宇, 张大海, 吴军, 等. 飞行器陶瓷基复合材料轻量化结构设计研究进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(4): 1-15.  
MA Y, ZHANG D H, WU J, et al. Research progress on aircraft lightweight design of ceramic matrix composites [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(4): 1-15.
- [23] 罗萌, 向阳, 彭志航, 等. 纤维多孔陶瓷的研究进展[J]. *材料工程*, 2022, 50(11): 63-72.  
LUO M, XIANG Y, PENG Z H, et al. Research progress of fibrous porous ceramic [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(11): 63-72.
- [24] 陈伟杰, 花开慧, 杨翔, 等. 环保型多孔陶瓷制备及其性能研究[J]. *材料研究与应用*, 2024, 18(1): 1-8.  
CHEN W J, HUA K H, YANG X, et al. Research on the preparation and performance of environmentally friendly porous ceramics [J]. *Materials Research and Application*, 2024, 18(1): 1-8.
- [25] JU Y J, ZHANG J W, CAI Q Y, et al. Rotary-angle 3D printing multilayer membrane dead-end filtration for rapid and highly efficient water treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 453: 139969.
- [26] 杨亚如. 基于增材制造的陶瓷过滤浇注系统整体制备研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.  
YANG Y R. Research on the integral preparation of ceramic filter casting system based on additive manufacturing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [27] LIU J, REN B, WANG Y, et al. Hierarchical porous ceramics with 3D reticular architecture and efficient flow-through filtration towards high-temperature particulate matter capture [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 504-512.
- [28] DONG B B, WANG G, YUAN B, et al. Fabrication and properties of porous alumina ceramics with three different pore sizes [J]. *Journal of Porous Materials*, 2017, 24(3): 805-811.
- [29] PRINTSYPAR G, BRUNA M, GRIFFITHS I M. The influence of porous-medium microstructure on filtration [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 861: 484-516.
- [30] QI T, CHEN X F, FAN Y Q, et al. Ceramic membrane technology for the separation and purification of bioactive compounds: a critical review of applications, diafiltration modeling, and fouling prevention [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 361: 131301.
- [31] HAMMEL E C, IGHODARO O L R, OKOLI O I. Processing and properties of advanced porous ceramics: an application based review [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(10): 15351-15370.
- [32] 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.
- [33] 丁凯东, 李响, 卢响, 等. 氧化锆增韧氧化铝陶瓷研究进展[J]. *材料工程*, 2025, 53(4): 75-90.  
DING K D, LI X, LU X, et al. Research progress in zirconia toughened alumina ceramics [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2025, 53(4): 75-90.

**基金项目:** 国家重点研发计划课题项目(2023YFB4605603, 2022YFB4602502); 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目(2024A1515013258, 2022A1515110323); 国家自然科学基金项目(52375395, 52302032); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费资助项目(2024XLB25, 2024XLB26); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202510491020, S202510491202)

**收稿日期:** 2025-02-27; **录用日期:** 2025-03-31

**通讯作者:** 刘富初(1987—), 男, 副教授, 工学博士/博士后, 研究方向为非金属增材制造, 联系地址: 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号中国地质大学西区教二楼(430074), E-mail: liufuchu@cug.edu.cn

(本文责编: 解 宏)