

光固化增材制造精铸用陶瓷过滤网的高固含量浆料设计及性能研究

张婷婷¹, 李乔磊^{1, 3}, 于孟阳², 纪 帅², 梁静静¹, PAOLO Colombo^{3, 4}, 李金国¹

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁沈阳 110016; 2. 博环新材料科技(辽宁)有限公司, 辽宁沈阳 110021; 3. 意大利帕多瓦大学工业工程系, 意大利帕多瓦 35131; 4. 美国宾夕法尼亚州立大学材料科学与工程系, 美国宾夕法尼亚 16802)

摘要: 高性能陶瓷过滤网对航空发动机与燃气轮机高温合金精密铸造至关重要, 但其传统制备工艺在实现可定制化孔隙结构方面存在局限, 而光固化增材制造技术为实现高精度、定制化的陶瓷过滤网制备提供了新的技术途径。在此制备工艺中, 陶瓷浆料的固含量是决定烧结体致密度、尺寸稳定性及最终力学性能的核心因素。本研究系统探究了树脂体系与颗粒级配两大关键材料因素对高固含量浆料性能的协同调控机制。结果表明: 通过调节低粘度阳离子树脂(TMPO)的比例, 可有效降低体系粘度, 从而为引入更高比例的陶瓷固相创造条件; 同时, 优化粗细颗粒级配(500 nm与1 μm)能够利用细颗粒填充粗颗粒间隙, 显著提高颗粒堆积密度与固相负载量, 是实现高固含量浆料的关键途径。基于上述机理, 通过材料粒径配比与打印工艺的协同优化, 最终成功制备出固含量55vol.%的浆料, 并最终得到高精度的孔隙结构(体积密度3.61 g/cm³, 开孔隙率1.35%)、力学性能优异(室温与高温弯曲强度分别为263.67 MPa和17.68 MPa)的陶瓷过滤网。本研究为光固化增材制造陶瓷过滤网设计了高固含量、高性能的陶瓷浆料, 实现了复杂孔隙结构可控的陶瓷过滤网制备。

关键词: 陶瓷过滤网; 增材制造; 浆料; 精密铸造; 陶瓷辅材; 颗粒级配; 力学性能

中图分类号: TQ174.6; TG249.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0587-08

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0078

Research on the Design and Properties of High-Solid-Loading Slurries for Ceramic Filters via Stereolithography for Investment Casting

ZHANG Ting-ting¹, LI Qiao-lei^{1,3}, YU Meng-yang², JI Shuai², LIANG Jing-jing¹,
PAOLO Colombo^{3,4}, LI Jin-guo¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 2. Bohuan New Materials Technology (Liaoning) Co., Ltd., Shenyang 110016, Liaoning, China; 3. Department of Industrial Engineering, University of Padova, Padova 35131, Italy; 4. Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, Pennsylvania 16802, the United States)

Abstract: High-performance ceramic filters are crucial for the precision casting of superalloys used in aero-engines and gas turbines. However, traditional fabrication processes face limitations in achieving complex and precise porous structures. Stereolithography-based additive manufacturing offers a novel technological pathway for producing ceramic filters with high precision and customizability. In this method, the solid loading of the ceramic slurry is the core factor determining the sintered body's density, dimensional stability, and final mechanical properties. Therefore, this study systematically investigates the synergistic regulation mechanism of two key material factors—the resin system and particle gradation—on the performance of high-solid-loading slurries. The results indicate that adjusting the proportion of low-viscosity cationic resin (TMPO) can effectively reduce the system viscosity, thereby providing conditions for introducing a higher proportion of ceramic solid phases. Simultaneously, optimizing the gradation of coarse and fine particles (500 nm and 1 μm) enables fine particles to fill the gaps between coarse particles, significantly improving particle packing density and solid loading, which is a key approach to achieving high-solid-loading slurries. Based on the above mechanisms, through the synergistic optimization of material particle size distribution and printing parameters,

基金项目: 国家自然科学基金(52402094); 博环新材料科技(辽宁)有限公司企业横向项目(技合2025-181号)。

收稿日期: 2026-01-30 收到初稿, 2026-03-13 收到修订稿。

作者简介: 张婷婷(1989-), 女, 工程师, 主要研究方向为光固化增材制造陶瓷浆料开发。E-mail: ttzhang24@imr.ac.cn

通信作者: 李乔磊, 男, 助理研究员。E-mail: qlli@imr.ac.cn

引用格式: 张婷婷, 李乔磊, 于孟阳, 等. 光固化增材制造精铸用陶瓷过滤网的高固含量浆料设计及性能研究[J]. 铸造, 2026, 75(6): 587-594.

ZHANG Tingting, LI Qiaolei, YU Mengyang, et al. Research on the design and properties of high-solid-loading slurries for ceramic filters via stereolithography for investment casting [J]. Foundry, 2026, 75(6): 587-594.

a slurry with 55vol.% solid loading was successfully prepared. This ultimately yielded a ceramic filter mesh with high-precision pore structure (bulk density of 3.61 g/cm³, open porosity of 1.35%) and excellent mechanical properties (room-temperature and high-temperature flexural strengths of 263.67 MPa and 17.68 MPa, respectively). This research designs a high-solid-loading, high-performance ceramic slurry for stereolithography-based additive manufacturing of ceramic filter meshes, enabling the fabrication of ceramic filters with controllable complex pore structures.

Key words: ceramic filter; additive manufacturing; slurry; precision casting; ceramic auxiliary materials; particle gradation; mechanical property

航空发动机和燃气轮机被誉为“工业皇冠上的明珠”，其高性能与高可靠性直接关乎国防安全与国民经济命脉^[1]。这类尖端动力装置的核心部件，如涡轮叶片、导向器等，都是通过高温合金熔模精密铸造成形^[2]。精铸过程中，熔融高温合金的纯净度是决定铸件性能、成率乃至服役安全的关键因素^[3]。微量的非金属夹杂物都可能成为应力集中源，导致铸件在极端高温、高应力的严苛工况下过早失效^[1, 4]。因此，在浇注系统中使用的陶瓷过滤网作为一道至关重要的“防线”，已成为高温合金精密铸造不可或缺的工艺环节。它不仅能有效拦截熔体中的宏观和微观夹杂，还能平稳金属液流，减少湍流和二次氧化，从而显著提升铸件的冶金质量和力学性能。传统的多孔陶瓷过滤网制备方法，如有机泡沫浸渍^[5]、物理起泡沫法^[6-7]、孔隙形成剂的添加^[8]以及溶胶-凝胶法^[9]，存在孔径不均匀、孔密度梯度不可控、力学性能差以及成形工艺复杂等缺点^[10-13]。因此，传统的制备方法难以满足现代工程应用需求。

增材制造技术（特别是光固化技术），为复杂结构陶瓷部件的快速成形提供了革命性的解决方案^[13]。将光固化增材制造技术成功应用于铸造用陶瓷过滤网的制备，其关键在于制备出高性能的陶瓷浆料。这种浆料需要满足高固含量（即较高的陶瓷粉末体积分数），较低固含量会导致烧结体致密度不足、收缩率大，进而引起陶瓷件开裂、变形等缺陷，严重影响其力学性能与可靠性，高固含量是保证烧结体获得高致密度、高强度、低收缩的基础^[13-15]。然而，提高固含量通常会导致浆料粘度过大、流动性变差^[16]，并加剧光散射^[17]，使固化质量恶化^[18]，影响烧结性能。为了提高浆料的固含量，众多研究者从粉体改性、配方优化及工艺参数等方面进行了系统的研究。早期的研究已关注到粉体形貌的影响，例如有研究表明，球形氧化铝粉体可有效降低浆料粘度，从而将固相含量提升至68vol.%^[19]。在此基础上，山东大学邹斌教授团队^[20]则从颗粒级配和材料体系入手，通过将微米级与纳米级氧化铝粉体混合，并对比油性与水性预聚物体系，配制出固含量达75vol.%的浆料，有效提升了打印坯体的致密性和力学性能。与此同时，M. Irfan Hussain等人另辟蹊径，专注于开发新型树脂体系，通过优化光敏树脂配方，成功制备了固含量高达62vol.%的浆料

^[21]，并利用DLP技术打印出具有优异综合性能（如弯曲强度247.23 MPa）的复杂结构陶瓷件，展示了高固含量浆料在高端应用中的潜力。这一系列工作通过粉体颗粒级配与树脂体系开发等核心策略，逐步解决了高固含量与低粘度、良好固化特性之间的矛盾，共同推动了光固化3D打印氧化铝陶瓷技术的发展。除了树脂体系组成与陶瓷颗粒级配外，打印过程中的工艺参数（如曝光强度、层厚、扫描速度）以及烧结工艺（特别是收缩与变形的控制）同样对最终产品的性能起着决定性作用。一个稳健的工艺窗口需要上述所有因素的协同匹配。

本文重点研究了树脂体系组成（阳离子/自由基树脂配比）与陶瓷颗粒级配（500 nm与1 μm颗粒比例），对光固化增材制造陶瓷过滤网专用浆料的流变性、固化特性、打印素坯质量以及烧结后构件力学性能的协同影响机制。通过调控上述关键材料因素，并适配扫描速度、曝光时间等工艺参数，本研究提出了高固含量浆料与高素坯强度的优化策略，成功制备出55vol.%固含量的陶瓷浆料并打印出高精度、高体积密度（3.61 g/cm³）、具有优异室温抗弯强度（263.67 MPa）与高温抗弯强度（17.68 MPa）的陶瓷过滤网，为光固化增材制造过滤网专用高性能陶瓷浆料设计与成形工艺开发奠定了理论基础。

1 试验方法与测试

1.1 试验材料及制备

光固化增材制造陶瓷过滤网浆料中基础粉体为Al₂O₃（粉体：上海岩投新材料科技有限公司，纯度99.55%，粒径：Al₂O₃为500 nm和1 μm），图1显示的是球形微米级氧化铝粉体的粒度和微观结构。粉体和无水乙醇加入球磨机中球磨分散（300 r/min，球磨12 h），然后在烘箱中干燥（180 °C/12 h）；光固化树脂使用三羟甲基丙烷三丙烯酸酯（TMPTA）、磷酸三甲酯（TMPO）、1, 6-己二醇二丙烯酸酯（HDDA）、光引发剂BASF819和分散剂BASF4608，其中TMPTA、TMPO与HDDA由天津天鸿新材料科技有限公司提供；光引发剂BASF819和分散剂BASF4608由上海巴斯夫化工有限公司提供。光固化陶瓷型芯浆料由交联剂、单体光引发剂、分散剂和混合粉末经机

械球磨12 h, 再进行真空脱泡获得, 浆料配方如表1所示。利用光固化3D打印机进行陶瓷素坯打印成形, 激

光功率为10 mW/cm², 单层曝光时间为8 s, 打印层厚为50 μm。

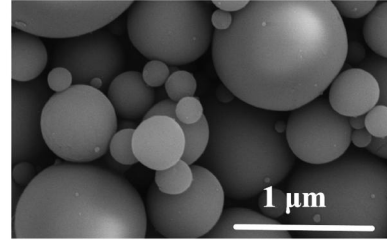
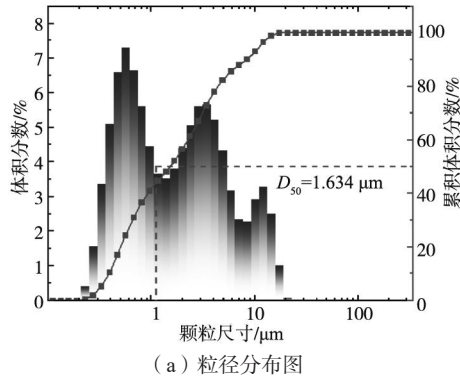


图1 球形微米级氧化铝粉的粒径分布图和SEM图像

Fig. 1 Particle size distribution diagram and SEM image of spherical micron-sized alumina powder

表1 浆料配方
Tab. 1 Slurry formulation

配方	粒度级配	交联剂	单体	分散剂	光引发剂
S1	500 nm : 1 μm=2 : 8	TMPO : TMPTA=3 : 7	HDDA	BASF4608	BASF819
	粉体: 55vol.%	33vol.%	10vol.%	1vol.%	1vol.%
S2	500 nm : 1 μm=2 : 8	TMPO : TMPTA=4 : 6	HDDA	BASF4608	BASF819
	粉体: 55vol.%	33vol.%	10vol.%	1vol.%	1vol.%
S3	500 nm : 1 μm=2 : 8	TMPO : TMPTA=5 : 5	HDDA	BASF4608	BASF819
	粉体: 55vol.%	33vol.%	10vol.%	1vol.%	1vol.%
S4	500 nm : 1 μm=2 : 8	TMPO : TMPTA=6 : 4	HDDA	BASF4608	BASF819
	粉体: 55vol.%	33vol.%	10vol.%	1vol.%	1vol.%
L1	500 nm : 1 μm=0.5 : 9.5	TMPO : TMPTA=5 : 5	HDDA	BASF4608	BASF819
	粉体: 55vol.%	33vol.%	10vol.%	1vol.%	1vol.%
L2	500 nm : 1 μm=1 : 9	TMPO : TMPTA=5 : 5	HDDA	BASF4608	BASF819
	粉体: 55vol.%	33vol.%	10vol.%	1vol.%	1vol.%
L3	500 nm : 1 μm=1.5 : 8.5	TMPO : TMPTA=5 : 5	HDDA	BASF4608	BASF819
	粉体: 55vol.%	33vol.%	10vol.%	1vol.%	1vol.%
L4	500 nm : 1 μm=2 : 8	TMPO : TMPTA=5 : 5	HDDA	BASF4608	BASF819
	粉体: 55vol.%	33vol.%	10vol.%	1vol.%	1vol.%

1.2 性能表征

对烧结后的过滤网进行微观结构、相组成、开孔隙率、体积密度、烧结收缩率和力学性能的测试和分析。采用阿基米德排水法测量样品的开孔隙率(π)和体积密度(ρ)。计算公式如下:

$$\pi = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_3} \times 100\% \quad (1)$$

$$\rho = \frac{M_1 \times \rho_{\text{water}}}{M_2 - M_3} \quad (2)$$

式中: π 为过滤网样品的开口气孔率(%); ρ 为陶瓷过滤网试样的体积密度(g/cm³), ρ_{water} 为去离子水的密度(g/cm³); M_1 是样品在烘箱中干燥4 h后的质量

(g), M_2 和 M_3 分别是样品开气孔中充满去离子水的湿重(g)和样品在去离子水中的浮重(g)。

使用游标卡尺测量脱脂烧结前后样品在X、Y、Z方向上的长度, 并且根据以下公式计算样品在三个方向上的收缩率(B):

$$B = \frac{L_a - L_b}{L_a} \times 100\% \quad (3)$$

式中: B 为过滤网样品的烧结收缩率(%), L_a 是烧结前过滤网样品的长度(mm), L_b 是烧结后过滤网样品的尺寸(mm)。

利用三点抗弯法测定样品的室温和高温抗弯强度, 高温抗弯强度在1 500 °C下保温15~30 min进行测

试。过滤网样品的抗弯强度根据以下公式计算。

$$R = \frac{3PL}{2ab^2} \quad (4)$$

采用场发射扫描电子显微镜 (Inspect F50, 美国赛默飞世尔科技公司) 对烧结后的过滤网微观结构进行表征。

2 结果与讨论

本试验从两方面优化光固化增材制造陶瓷过滤网浆料性能。一是树脂的选择与配比工艺, 二是粒度级配工艺。对浆料的流变性能、稳定性、固化性能和烧成的陶瓷过滤网性能进行分析。

2.1 树脂设计对浆料性能的影响

图2展示了四种不同树脂设计工艺浆料的粘度变化曲线。如图所示, 所有浆料均表现出粘度随剪切速率增加而降低的趋势, 符合典型的非牛顿流体剪切稀化行为。对比不同配方可见, 随着TMPO添加量的提高, 浆料粘度显著下降。其中, S4配方的陶瓷浆料粘度最低, 在剪切速率为 18.7 s^{-1} 时, 粘度值为 $1\,924.62 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (约 $1.9 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)。粘度的降低主要归因于树脂体系中阳离子/自由基组分配比的变化。由于阳离子基树脂TMPO本征粘度较低, 而自由基树脂TMPTA粘度较高, 随着TMPO添加比例的增加, 体系中低粘度组分占比上升, 高粘度组分相对减少, 从而有效降低了浆料整体粘度。较低的体系粘度有利于在维持良好流动性的同时容纳更多陶瓷颗粒, 为制备高固含量、高均匀性的陶瓷浆料奠定了基础。

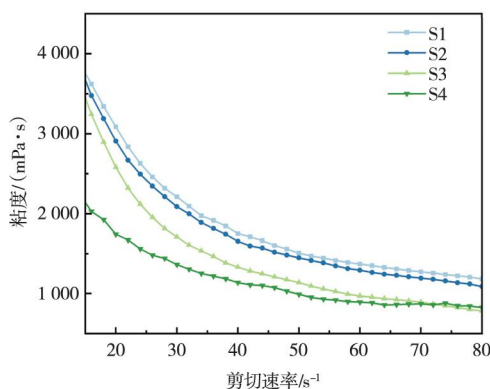


图2 不同树脂设计下过滤网浆料的流变性能

Fig. 2 Rheological properties of the filter mesh slurries under different resin formulations

图3展示了四种不同树脂设计工艺浆料的固化性能曲线。如图所示, 浆料的固化厚度随着扫描速度的增加而显著下降, 随着TMPO添加量的提高而下降。为获得足够的固化厚度以实现良好的层间粘结和结构完整性, 对打印参数进行补偿性调整至关重要。对于TMPO

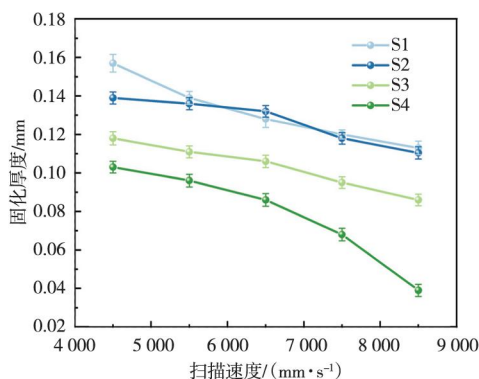


图3 不同树脂设计下过滤网浆料的固化性能图

Fig. 3 Curing performance diagram of the filter mesh slurries under different resin formulations

含量少的浆料 (如S1、S2), $7\,500 \text{ mm/s}$ 的激光扫描速度是可行的。然而, 对于TMPO含量多的浆料 (如S3、S4), 增强的光吸收和降低的固化厚度要求将扫描速度降至 $4\,500 \text{ mm/s}$ (或等效地增加单点曝光时间)。这种调整使得单位面积沉积的激光能量更多, 从而使光束能够穿透更厚的吸收层并达到所需的固化厚度。根据初步试验, 仍能提供适当固化深度的最大TMPO含量被确定为S3配方。超过这一含量后, 即使进行参数优化, 在安全操作窗口内实现符合成形要求的稳定固化厚度变得极其困难。

2.2 粒度级配对浆料性能的影响

图4展示了四种不同粒度级配陶瓷浆料的粘度随剪切速率变化曲线。如图所示, 所有浆料均表现出粘度随剪切速率增大而降低的趋势, 符合典型的非牛顿流体剪切稀化行为。对比不同配方可以发现, 随着细颗粒添加量的提高, 浆料粘度系统性上升。其中, L4配方因细颗粒占比最高 ($500 \text{ nm} : 1 \mu\text{m} = 2 : 8$), 其浆料粘度在所有体系中为最大, 在剪切速率 18.7 s^{-1} 下达到 $2\,671.87 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (约 $2.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)。这种粘度的变化主要

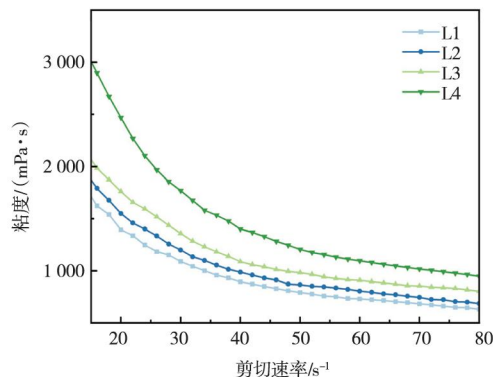


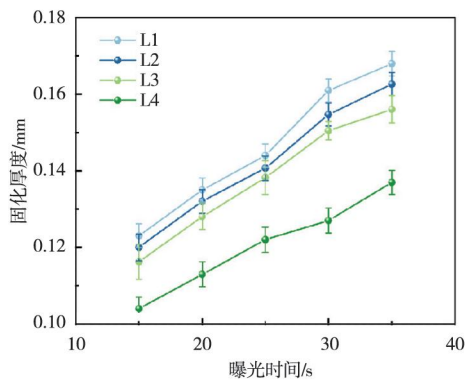
图4 不同粒度级配下过滤网浆料的流变性能

Fig. 4 Rheological properties of the filter mesh slurries under different graded particle sizes

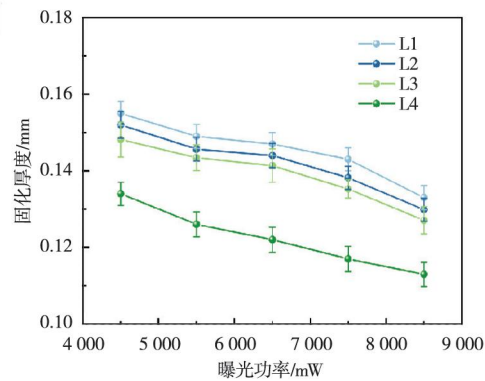
与颗粒级配引起的微观堆积结构和流变行为相关。小尺寸颗粒填充于粗颗粒间隙使堆积更紧密,从而在相同液相体积下有效提升固相负载量。然而,小尺寸颗粒比例增加同时加剧了颗粒间摩擦与流动阻力^[22],导致整体粘度升高。因此,通过合理调控颗粒级配,可在提升固含量的前提下优化浆料流变性能,为满足不同成形工艺的粘度要求提供依据。

图5显示的是不同粒度级配下过滤网浆料的固化性能图。图5(a)显示了不同粒度级配下不同曝光时间对过滤网浆料固化性能的影响。浆料的固化厚度随着曝光时间的增加而显著上升,随着细粉含量提高而逐步下降。曝光时间增加意味着浆料吸收的光能量增多,使得光引发剂产生更多活性自由基,从而促进单体的聚合交联反应,因此固化厚度显著上升。而细粉含量提高会导致浆料中颗粒总表面积增大,对光

线的散射作用增强,从而削弱光在浆料内部的穿透能力^[23],使得深层区域接收到的光能量减少,固化反应受到抑制,因此固化厚度随细粉含量增加而逐步下降。此外,细粉含量过高可能影响浆料的流变性与颗粒堆积结构,进一步制约固化过程的均匀性与最终固化深度。图5(b)显示不同曝光功率对过滤网浆料固化性能的影响。如图所示,浆料的固化厚度随曝光功率的增加而显著下降,随细粉含量提高而逐步下降。当曝光功率升高时,单位时间内浆料吸收的光能量增加,表层区域固化反应加速,导致固化前沿快速形成,光线穿透深度相对受限,使得深层区域受光不足,因而整体固化厚度减小^[24]。另一方面,细粉含量的提高会增强浆料对光的散射与吸收,进一步降低光在浆料内部的传播效率,从而减弱深层固化效果,使固化厚度随细粉含量增加而逐步下降。



(a) 不同曝光时间对固化性能的影响



(b) 不同曝光功率对固化性能的影响

图5 不同粒度级配下过滤网浆料的固化性能图

Fig. 5 Curing performance diagrams of the filter screen slurries under different particle size distributions

图6显示了不同粒度级配过滤网浆料的静态稳定性对比图片。如图所示,随着细粉质量分数的增加,浆料体系的稳定性逐渐提升。结合图6的固化性能分析可知,L3配比的浆料(500 nm : 1 μm=1.5 : 8.5)在稳定性与固化特性之间取得了较好的平衡。其稳定性显著优于粗颗粒占比高的配方,同时固化性能未出现明显下降。这种稳定性提升主要归因于细颗粒对体系沉降

行为的抑制作用^[25]。一方面,细颗粒粒径较小,布朗运动效应更为显著,有助于抵抗重力沉降,延缓颗粒分层;另一方面,细颗粒能够填充于粗颗粒间隙,形成更为密实、均匀的堆积结构,削弱颗粒在树脂中的局部迁移趋势。因此,在提高固含量的同时,浆料的整体均匀性与储存稳定性亦得到有效改善。

2.3 粒度级配对过滤网性能的影响

图7显示了采用不同粒度级配的过滤网浆料所打印素坯的白光干涉图像。从图中可以观察到,随着浆料中细粉含量的增加,素坯的表面粗糙度呈现先减小后增大的变化趋势。细粉含量适度增加时,表面粗糙度显著降低;然而,当细粉加入过多(如配方L4, 500 nm : 1 μm=2 : 8)时,粗糙度反而急剧上升。这是由于适量细粉的加入可有效填充粗颗粒间的空隙,优化颗粒级配,形成更密实、均匀的微观结构^[26],从而显著改善表面平整度,降低粗糙度。然而,当细粉



图6 不同粒度级配下过滤网浆料的稳定性图片

Fig. 6 Stability images of the filter screen slurries under different particle size distributions

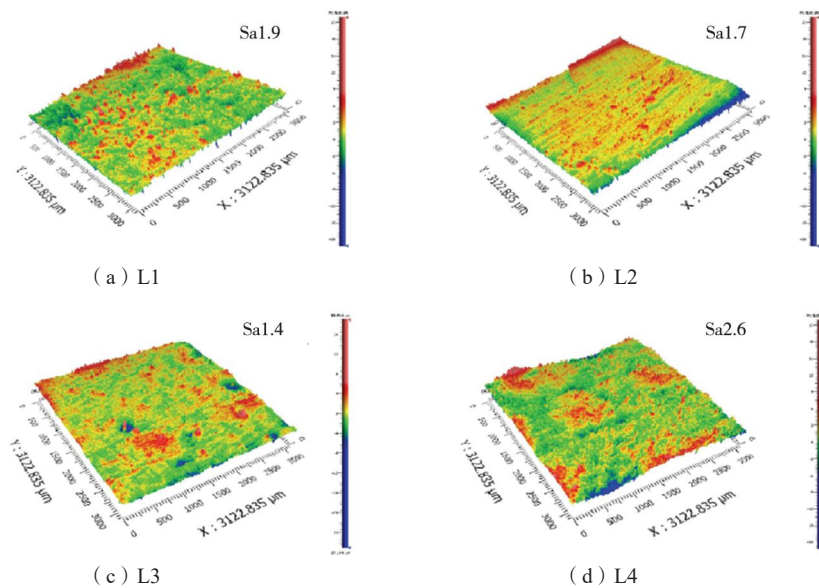


图7 不同粒度级配下过滤网浆料打印素坯的白光干涉图

Fig. 7 Images of printed green bodies obtained from filter slurries with different particle size gradings, captured by white light interferometry

含量过高时,浆料的比表面积大幅增加,浆料粘度上升、流动性下降,在打印过程中易因流平性变差而产生颗粒团聚、局部堆积不均等问题。

图8展示了不同粒度级配对过滤网素坯体积密度与开孔隙率的调控规律。试验结果表明,随着细粉比例的增加,材料结构呈现阶段性演变:当细粉的比例由初始配比提高至细粉:粗粉=1.5:8.5时,体积密度由 3.06 g/cm^3 增加至 3.61 g/cm^3 ,开孔隙率则由约6.36%下降至1.35%。然而,当细粉比例进一步增至2:8时,体积密度急剧下降为 2.60 g/cm^3 ,同时开孔隙率急剧升高为8.8%。这一变化规律源于颗粒级配与烧结致密化行为的协同作用。在细粉比例适度增加阶段(500 nm:1 μm =1.5:8.5),小尺寸颗粒有效填充粗颗粒骨架间隙,优化颗粒堆积密度,促进烧结初期颈部形成与物质迁移,从而提高体积密度、降低开孔隙率。当细

粉比例过高(2:8)时,体系比表面积显著增大,颗粒间摩擦与团聚加剧,导致素坯局部堆积不均、气孔分布集中,最终体积密度降低。

图9(a)显示了不同粒度级配的过滤网样条在室温和1500 $^{\circ}\text{C}$ 高温下的弯曲强度。结果表明,当细粉比例由L1(500 nm:1 μm =0.5:9.5)提高至L3(500 nm:1 μm =1.5:8.5)时,过滤网样条的室温弯曲强度最高为263.67 MPa,1500 $^{\circ}\text{C}$ 高温弯曲强度最高为17.68 MPa。当细粉比例进一步增至9:1时,过滤网样条的室温弯曲强度急剧下降至150.32 MPa,1500 $^{\circ}\text{C}$ 高温弯曲强度急剧下降至7.92 MPa。当细粉含量不断升高,粉体紧密堆积,细粉有效填充粗粉间隙,促进了烧结过程中均匀、快速的致密化,从而获得高强度的致密微观结构。然而,当细粉比例进一步增加时,体系的比表面积显著增大,颗粒间摩擦加剧,易发生团聚^[27],导致生坯中局部堆积不均、气孔分布集中。这些结构性缺陷在烧结后保留甚至进一步发展,最终导致抗弯强度的显著下降,该结果与图8中的体积密度分析相一致。图9(b)展示了最优配方L3级配下过滤网样条断面SEM图。红圈标示区域为细粉在颗粒间隙中填充并经烧结后形成的微观结构。该结构有效填充了基质中的孔隙,增强了颗粒间的结合力,从而显著提升了过滤网的抗弯强度。

图10对比了采用传统工艺与本研究提出的增材制造技术所制备的陶瓷过滤网。如图所示,传统方法制备的过滤网内部孔道结构往往随机分布、大小不一且连通性不可控,难以实现孔径的精确调节与结构的一致性。相比之下,本工作基于光固化增材制造技术制

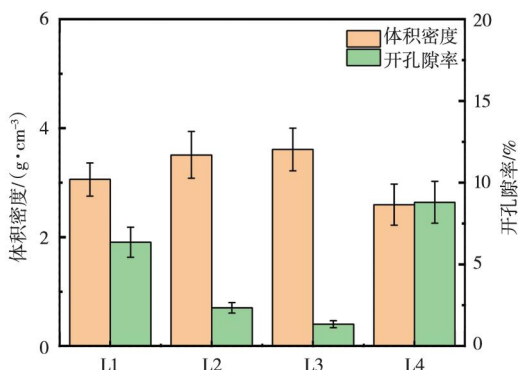
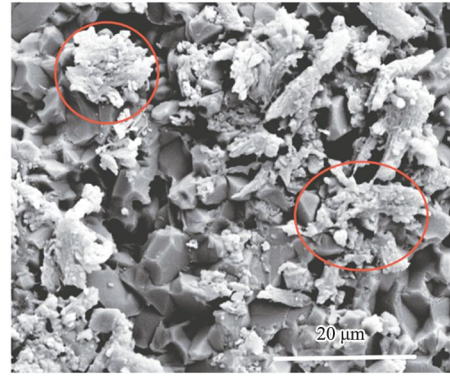
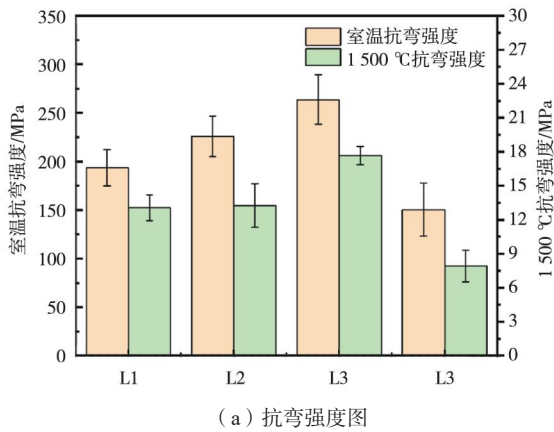


图8 不同粒度级配下过滤网浆料打印试样的体积密度和开孔隙率
Fig. 8 Bulk densities and open porosities of printed samples from filter slurries with different particle size distributions

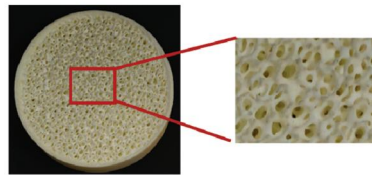


(a) 抗弯强度图

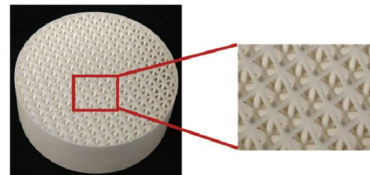
(b) 断面SEM图

图9 不同粒度级配下过滤网浆料打印试样的性能与微观结构图

Fig. 9 Performances and microstructure of printed filter mesh slurry samples with different particle size distributions



(a) 传统方法制备的陶瓷过滤网



(b) 增材制造方法制备的陶瓷过滤网 (本工作)

图10 不同方法制备的过滤网

Fig. 10 Ceramic filters prepared by different methods

备的过滤网展现出优异的结构可设计性与成形精度。通过对三维模型的数字化设计，可以精确控制过滤网的孔隙结构、孔径大小及空间分布，从而有效调控其过滤效率与流通能力。更重要的是，增材制造突破了传统模具的限制，使得具有复杂几何形状和多样化晶格结构的过滤网成为可能。探索不同晶格拓扑构型对过滤性能、机械强度及热物理场分布的影响，将是实现过滤网性能按需定制化设计的后续研究方向。

本研究通过对树脂体系和颗粒级配的系统调控，揭示了陶瓷浆料性能的优化规律与内在机制。在树脂设计中，增加阳离子树脂TMPO的比例能有效降低浆料粘度，有利于提高固含量，但需协同调整曝光参数以补偿其导致的固化厚度下降。同时，通过颗粒级配，适量添加细颗粒可填充空隙、提高堆积密度与浆料稳定性，并改善素坯表面质量与烧结致密度，从而提升最终制件的力学性能。然而，过高的细颗粒含量会因粘度上升、光散射增强及团聚问题而对流变性、固化行为和烧结结构产生负面影响。研究最终确定了以S3树脂配方和L3颗粒级配（500 nm: 1 μm=1.5 : 8.5）为代表的优化组合，该组合在低粘度、良好固化特性、高稳定性以及高致密度、高强度之间取得了最佳平衡。

3 结论

(1) 树脂组成是调控浆料工艺性的关键。本研究表明，增加低粘度的阳离子树脂TMPO比例可系

统性降低浆料粘度（粘度最低至1.9 Pa·s），有利于提升固含量与流动性。然而，TMPO会增强光吸收，显著降低单层固化厚度。因此，树脂设计需在“低粘度”与“可固化性”之间权衡。本研究发现，TMPO : TMPTA=5 : 5是实现此平衡的最优选择。对于高TMPO含量配方，必须辅以打印工艺补偿，如将扫描速度从7 500 mm/s降至4 500 mm/s，通过增加能量输入来保证足够的固化深度与层间结合力。

(2) 在陶瓷浆料的颗粒级配设计中，提高细颗粒比例能够通过填充粗颗粒间隙来提升堆积密度与浆料静态稳定性，但同时也必然引起体系粘度上升、光散射增强及固化能力下降。因此，最优级配的确定并非追求单一指标的极端值，而需在多因素相互制约中寻找综合性能的平衡点。在细粉与粗粉（1 μm）比例为1.5 : 8.5时，体系达到最优综合性能：浆料稳定性良好，固化性能未显著劣化，且所制备素坯表面粗糙度最低，烧结后体积密度最高（3.61 g/cm³），开孔隙率最低（1.35%），室温和高温弯曲强度分别达到263.67 MPa和17.68 MPa。细粉比例过高（如2 : 8）则会因团聚、流动性下降及结构不均导致各项性能恶化。

(3) 本研究树脂体系设计-粉末粒径级配设计-打印工艺协同优化，成功制备出适用于光固化成形的陶瓷浆料。核心策略是：以S3树脂体系提供“低粘度-良好可固化性”基础，与L3粒度级配提供的“高堆积密

度-良好稳定性”优势相结合，形成高性能浆料配方。在此基础上，根据具体配方的光学与流变特性，动态调整打印工艺参数（如针对高TMPO或高细粉含量配方，降低扫描速度或调整曝光参数），以补偿固化深

度，确保成形质量。这种“配方-工艺”协同优化模式，系统解决了陶瓷光固化中高固含量与良好成形性之间的矛盾，为制备复杂结构高性能陶瓷部件提供了可靠方法。

参考文献:

- [1] DAI Y, VOIGT C, STORTI E, et al. Open-cell ceramic foam filters for melt filtration: Processing, characterization, improvement and application [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 3402-3422.
- [2] 董加胜, 曲文生, 楼琅洪, 等. 新型陶瓷过滤器过滤净化对K417返回料组织性能的影响 [J]. *材料导报*, 2008, 22 (增刊2): 445-447.
- [3] ANEZIRIS C G, BIERMANN H. Multifunctional ceramic filter systems for metal melt filtration: towards zero-defect materials [M]. Springer Nature, 2024.
- [4] HAO Y, BO D, CHAO Y, et al. Progress in the preparation of ceramic foam filters for cast steel with polymer sponge replica technique [J]. *Journal of Ceramics*, 2023, 44 (4): 662-670.
- [5] LUO X, ZHANG Q, YE F, et al. Microstructure, mechanical, wave-transparent and heat insulation properties of Si_3N_4 foam ceramic by organic foam impregnation combined with CVI [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 1332-1346.
- [6] HE X, ZHOU X, SU B. 3D interconnective porous alumina ceramics via direct protein foaming [J]. *Materials Letters*, 2009, 63 (11): 830-832.
- [7] SCIAMANNA V, NAIT-ALI B, GONON M. Mechanical properties and thermal conductivity of porous alumina ceramics obtained from particle stabilized foams [J]. *Ceramics International*, 2015, 41 (2): 2599-2606.
- [8] WANG Y H, ZHANG Y, LIU X, et al. Microstructure control of ceramic membrane support from corundum-rutile powder mixture [J]. *Powder Technology*, 2006, 168 (3): 125-133.
- [9] WANG J, ZHAO J. Investigating the effect of SPRM on mechanical strength and thermal conductivity of highly porous alumina ceramics [J]. *Ceramics International*, 2017, 43 (18): 16430-16435.
- [10] LIU J, HUO W, REN B, et al. A novel approach to fabricate porous alumina ceramics with excellent properties via pore-forming agent combined with sol impregnation technique [J]. *Ceramics International*, 2018, 44 (14): 16751-16757.
- [11] WANG Q, CHEN Q, ZHU J, et al. Effects of pore shape and porosity on the properties of porous LNKCN ceramics as bone substitute [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 109 (2-3): 488-491.
- [12] ŽIVCOVÁ Z, GREGOROVÁ E, PABST W. Porous alumina ceramics produced with lycopodium spores as pore-forming agents [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42 (20): 8760-8764.
- [13] ZHANG G, ZOU B, WANG X, et al. The 3D-Printed building and performance of Al_2O_3 ceramic filters with gradient hole density structures [J]. *Ceramics International*, 2023, 49 (19): 31496-31508.
- [14] 缪新宇, 萍 陆, 刘双宇, 等. 光固化氧化铝陶瓷浆料流变性能研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42 (2): 708-718.
- [15] 郑江涛, 卢晶, 王胜佳, 等. ZTA陶瓷光固化3D打印浆料设计及理化性能研究 [J]. *陶瓷学报*, 2022, 43 (2): 227-235.
- [16] 缪新宇, 刘双宇, 陆萍, 等. 硅烷偶联剂对氧化铝陶瓷浆料流动性能和3D打印性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (3): 1058-1069.
- [17] SUN J, ZHANG J, ZHANG X, et al. High strength mullite-bond SiC porous ceramics fabricated by digital light processing [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2024, 13 (1): 53-62.
- [18] 侯雨轩, 李燕, 卢秉恒, 等. 熔融石英陶瓷浆料流变性能与光固化成型精度研究 [J]. *陶瓷学报*, 2024, 45 (2): 374-381.
- [19] 王琦, 崔巍, 葛一瑶, 等. 高固相含量氧化铝浆料的制备及其烧结性能研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42 (增刊1): 400-403.
- [20] 邹斌, 全涛, 张广旭, 等. 材料体系和孔隙率梯度增强结构对3D打印氧化铝多孔陶瓷的性能影响 [J]. *航空制造技术*, 2025, 68 (3): 22-29.
- [21] HUSSAIN M I, XIA M, REN X, et al. Microstructural evolution, enhanced mechanical properties, and complex shapes design in high solid content alumina ceramics through additive manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 129: 35-50.
- [22] JING L, OTTINO J M, UMBANHOWAR P B, et al. Drag force in granular shear flows: regimes, scaling laws and implications for segregation [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 948: A24.
- [23] STEFAN E, DIDRIKSEN T, SUNDE T O, et al. Effects of powder properties on the 3D printing of BaTiO_3 ceramic resins by stereolithography [J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2023 (6): 1641-1651.
- [24] GAO X, CHEN J, CHEN X, et al. How to improve the curing ability during the vat photopolymerization 3D printing of non-oxide ceramics: a review [J]. *Materials*, 2024, 17 (11): 2626.
- [25] RYU K, KIM J, CHOI J, et al. The 3D printing behavior of photocurable ceramic/polymer composite slurries prepared with different particle sizes [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12 (15): 2631.
- [26] 焦守政, 齐文, 陈松, 等. 分散剂及粉体粒径对光固化氧化铝陶瓷浆料粘度及制件性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39 (1): 260-265.
- [27] SHI Z A, WU J M, FANG Z Q, et al. Particle surface oxidation modification and particle gradation strategy for the preparation of high-strength SiC ceramics via Vat photopolymerization [J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 84: 104118.