

陶瓷光固化增材制造的缺陷机理与解决途径

赵宇辉^{1,3}, 王建文², 何振丰¹, 王志国¹, 周思雨², 贺晨¹, 赵吉宾¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 工艺装备与智能机器人研究室, 沈阳 110016;
2. 沈阳航空航天大学 机电工程学院, 沈阳 110136; 3. 广州工业智能研究院, 广州 511458)

摘要: 在利用陶瓷光固化 (vat photopolymerization, VPP) 增材制造技术制备复杂结构陶瓷零件时, 由于材料体系、逐层打印原理及后处理工艺的固有特性极易产生各类缺陷。为解决这些缺陷对零件成型精度、服役性能及技术推广造成的制约与阻碍, 系统研究了陶瓷光固化增材制造中缺陷的生成机理与控制策略。首先, 总结了陶瓷光固化增材制造中存在的两类缺陷: 形貌缺陷 (如尺寸偏差、形貌失真) 与结构缺陷 (如各向异性、孔隙等), 并揭示了其复杂的生成机制。然后, 总结了基于理论建模与数值模拟的缺陷分析手段。在缺陷控制与性能改进方面, 不仅总结了包括脱泡、浆料改进、优化脱脂烧结等传统优化方法, 还探讨了“微结构设计”等创新性策略。最后, 对未来值得关注的研究方向与发展重点进行了归纳与展望, 以为推动高性能陶瓷光固化增材制造技术的发展提供理论参考与实践指南。

关键词: 陶瓷光固化; 增材制造; 各向异性; 缺陷机理; 缺陷控制

中图分类号: TB321

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2026.04.002

Defect mechanisms and resolution approaches in ceramic vat photopolymerization additive manufacturing

ZHAO Yuhui^{1,3}, WANG Jianwen², HE Zhenfeng¹, WANG Zhiguo¹,

ZHOU Siyu², HE Chen¹, ZHAO Jibin¹

(1. Process Equipment and Smart Robotics Lab, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. College of Mechatronical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 3. Guangzhou Institute of Industrial Intelligence, Guangzhou 511458, China)

Abstract: During the preparation of complex-structured ceramic parts using ceramic vat photopolymerization additive manufacturing technology, various types of defects are readily generated due to the inherent attributes of the material system, the layer-by-layer printing principle, and the post-processing techniques. In order to resolve the constraints and damages caused by these defects to part forming accuracy, service performance, and technology promotion, a systematic investigation was conducted on the defect formation mechanisms and control strategies in ceramic vat

收稿日期: 2026-03-18 修回日期: 2026-04-11 接受日期: 2026-04-15

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (项目编号: 2023B0909020002); “兴辽英才计划”青年拔尖人才项目 (项目编号: XLYC2203154); 中央引导地方科技发展资金项目 (项目编号: 2025JH6/101100021); 辽宁省科技重大专项项目 (项目编号: 2025JH1/1170009); 辽宁省应用基础研究计划项目 (项目编号: 2025JH2/101330146, 2025JH2/101300026)。

作者简介: 赵宇辉 (1983—), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光增材与修复、仿真模拟与过程检测, E-mail: yzhao@sia.cn。

photopolymerization additive manufacturing. Firstly, two types of defects existing in ceramic vat photopolymerization additive manufacturing were summarized, namely morphology defects (such as dimensional deviation and morphological distortion) and structural defects (such as anisotropy and porosity), and their complex formation mechanisms were revealed. Then, defect analysis methods based on theoretical modeling and numerical simulation were summarized. In terms of defect control and performance improvement, not only were traditional optimization methods including degassing, slurry improvement, and optimization of debinding and sintering summarized, but also innovative strategies such as “microstructure design” were discussed. Finally, the research directions and development priorities worthy of future attention were summarized and prospected, with a view to providing theoretical reference and practical guidance for promoting the development of high-performance ceramic vat photopolymerization additive manufacturing technology.

Key words: ceramic vat photopolymerization; additive manufacturing; anisotropy; defect mechanism; defect control

一直以来,陶瓷基材料主要依赖减材制造技术,如铣削、金刚石磨削、激光烧蚀与超声加工等。这些方法基于材料去除原理,存在材料浪费严重、复杂结构成形精度低、加工周期长及成本高等缺点。而陶瓷增材制造(ceramic additive manufacturing, CAM)技术基于“离散-堆积”原理,依据三维模型切片信息逐层堆积粉末、浆料或素坯片,实现了复杂结构与多功能材料的快速制造。CAM技术不仅可以加工传统方法难以成型的复杂陶瓷结构,还能使陶瓷零件具备高精度、高耐磨等优异特性^[1]。

陶瓷增材制造技术包括黏结剂喷射、材料挤出、光固化成型等,其中光固化(VPP)成型是最早开发且应用最广的技术之一^[2]。VPP根据光源及固化方式不同,分为立体光刻(stereolithography, SLA)、数字光处理(digital light processing, DLP)、双光子聚合(two-photon polymerization, TPP)、连续液面制造(continuous liquid interface production, CLIP)和液晶屏曝光(liquid crystal display, LCD)等,它们在成形速度、精度和材料适应性上各具优势。然而,陶瓷光固化增材制造受工艺的局限,易产生孔隙、分层等缺陷,这限制了陶瓷零件的成形精

度和性能。

尽管光固化成形技术已在多个领域得到广泛应用,但目前对其固有成形缺陷仍缺乏系统性的总结与深入评述。为此,本文旨在系统梳理该领域关于典型缺陷的代表性研究成果,深入讨论光固化成形过程中存在的固有缺陷及其面临的主要挑战,并在此基础上总结当前研究现状、展望未来发展趋势,以期填补现有综述中的空白,为相关技术的优化与实际应用提供理论依据。

1 光固化陶瓷的典型缺陷

光固化增材制造陶瓷件的典型缺陷可分为两大类:其一为形貌缺陷,主要表现为因几何特征失真或消失、过固化、误固化及表面层纹等所导致的轮廓与尺寸偏差^[3];其二为结构缺陷,源于材料特性、光聚合反应及微观组织演化,表现为孔隙、裂纹、层间分离、各向异性收缩及力学方向性差异^[4]。结构缺陷不仅是应力集中点,更会显著劣化陶瓷件的最终力学性能与服役寿命。上述两类缺陷在陶瓷立体光刻增材制造过程中具有典型性和普遍性,图1为陶瓷立体光刻增材制造的缺陷类型^[5]。

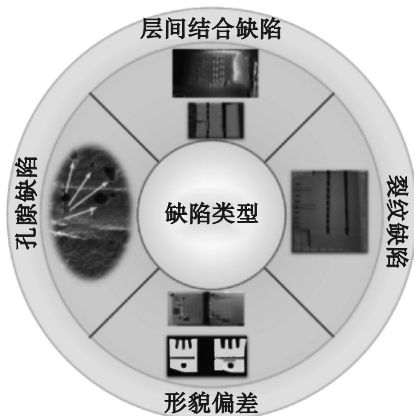


图1 陶瓷立体光刻增材制造的缺陷类型

尽管上述分类提供了清晰的框架,但每类缺陷的具体形成机制、影响因素及其对性能的制约关系仍有待深入剖析。例如,作为最常见结构缺陷的孔隙,其形态、尺寸与分布直接由固化与烧结动力学决定;因逐层制造原理固有的层状结构所导致的层间结合缺陷(表现为力学各向异性、层间分离等),是评估构件承载能力的关键。此外,由残余应力驱动的裂纹扩展,以及因光散射引发的形貌偏差(如误固化、尺寸失真),共同构成了多尺度的可靠性挑战。为此,下文将聚焦孔隙缺陷、裂纹缺陷、形貌偏差与层间结合缺陷这4类核心缺陷,系统阐述其成因、表征方法与控制策略。

1.1 孔隙缺陷

孔隙缺陷是光固化增材制造中最普遍的

缺陷类型,常引发裂纹与分层,并往往成为断裂的起始点,显著制约陶瓷零件的密度与力学性能。根据形成机制,孔隙可分为两类:一类是浆料制备与固化阶段残留的气孔,另一类是脱脂烧结过程中聚合物热解所形成的烧结气孔。浆料中的气泡在固化时易形成封闭孔洞,而脱脂阶段聚合物链断裂生成的气态产物若未能及时排出,则会形成压力孔洞。针对孔隙控制,已有文献报道了多种策略,包括真空/离心脱泡、优化脱脂升温速率、引入 MgO 或 TiO_2 等烧结助剂及调控陶瓷体积分数。然而,上述方法往往只能减少部分孔隙,难以有效控制纳米级微孔及闭孔。

1.2 裂纹缺陷

裂纹缺陷是立体光刻增材制造陶瓷过程中的另一类关键工艺缺陷,主要形成于生坯打印成型与脱脂烧结两个阶段。在光固化成形阶段,单体光聚合反应会引发局部体积收缩(通常为5%~15%),所产生的拉应力若超过材料的临界强度,将诱发微裂纹的形成与扩展^[4]。上述裂纹的形态与分布受多种工艺及材料因素影响,图2为不同浆料粒径、打印层厚、曝光时间下裂纹形态对比,图3为非光聚合成分对裂纹形态的影响^[6-7]。实验选用的有机单体包括1,6-己二醇二丙烯酸酯(HDEODA)、双三羟甲

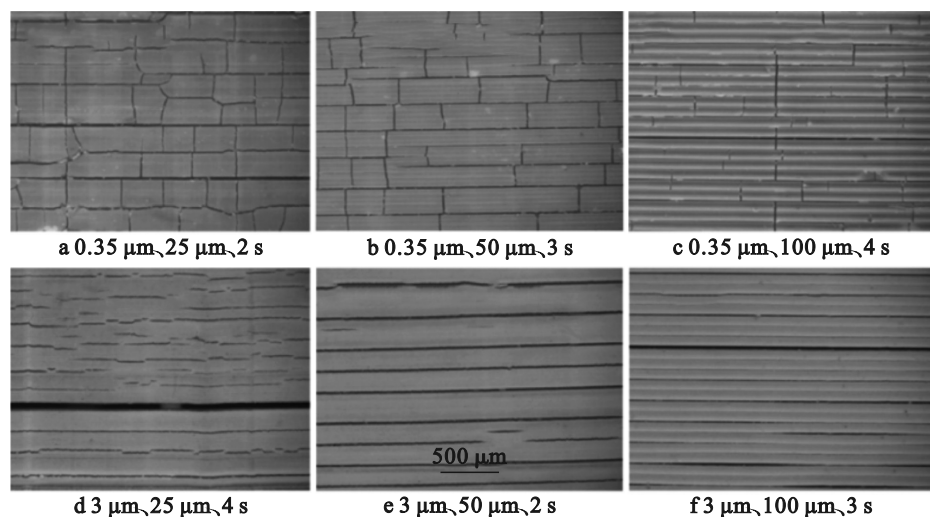
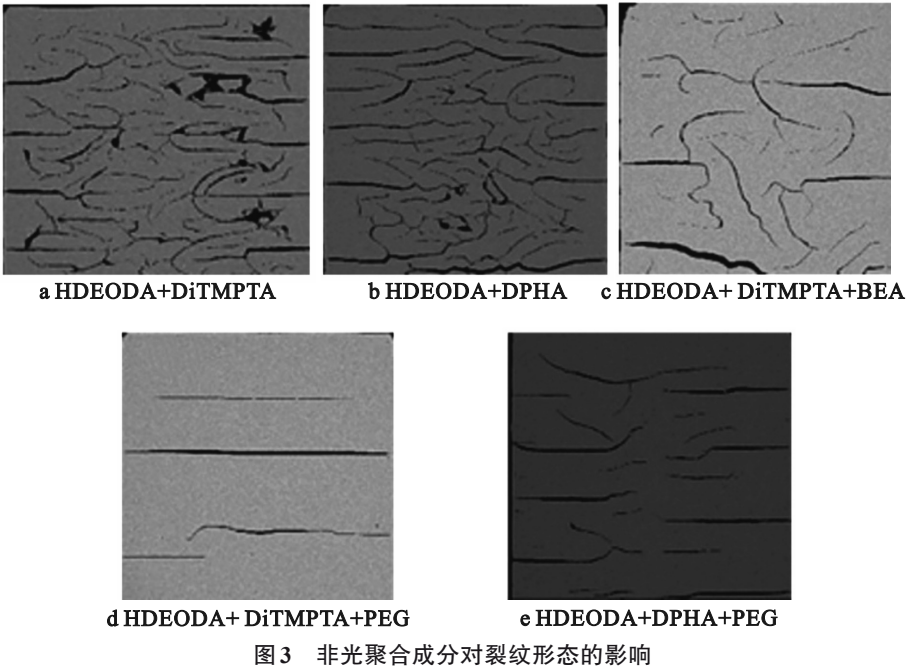
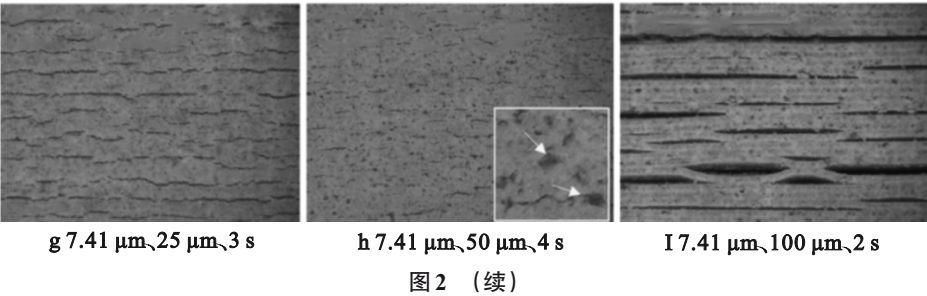


图2 不同浆料粒径、打印层厚、曝光时间下裂纹形态对比



基丙烷四丙烯酸酯(DiTMPTA)、双季戊四醇六丙烯酸酯(DPHA),稀释剂为乙氧基化双酚A二丙烯酸酯(BEA),增塑剂为聚乙二醇(PEG)。

进入脱脂烧结阶段后,聚合物黏结剂在高温下发生链断裂、解聚及热解反应,生成大量气态产物(如CO、CO₂、H₂O等)。若排气路径不畅或升温速率过快,气态产物在坯体内外形成压力梯度,成为宏观裂纹的主要驱动力。同时,有机物的热解为吸热过程,过快的升温速率易在坯体内部引发显著温度梯度,从而产生热应力诱发的裂纹。在微观层面,局部拉应力可能导致烧结颈断裂、晶粒异常长大或相变引起的体积突变,这些均是微裂纹的常见原因。近年来,研究者尝试通过优化工艺参数、添加功能性助剂及提高层间结合强度等方式抑制裂纹生成,但目前仍缺乏适用于复杂几何构件

的通用解决方案。

1.3 形貌偏差

陶瓷光固化增材制造技术中,利用紫外激光对光敏树脂浆料进行逐层扫描固化,可制得陶瓷素坯,随后经脱脂与烧结形成致密零件。尽管激光系统具备微米级分辨率,但浆料中的陶瓷颗粒会对紫外光产生明显的吸收与散射,使得光束能量在穿透浆料时随深度增加而逐渐衰减^[2]。这一现象会引起固化轮廓畸变、固化深度不均匀,以及过固化或欠固化区域的出现,进而导致形貌偏差(如尺寸偏差、轮廓失真、多余固化),严重制约成形精度。研究表明,陶瓷颗粒与树脂之间的折射率差异越大,光散射越强,误固化行为也越显著^[8]。此外,固化不均匀还会造成素坯密度分布差异,降低烧

结后零件的力学性能,并引入各向异性。

1.4 层间结合缺陷

陶瓷光固化技术虽以其卓越的几何设计灵活性而著称,但其烧结体在关键性能上表现出的各向异性——非均匀的尺寸收缩、差异化的力学强度及具有方向性特征的缺陷分布——严重限制了该技术的应用潜力。这种各向异性主要源于逐层制造工艺所导致的层状结构,使材料性能呈现出对方向的依赖性。层状结构本身并非缺陷,但其引发的层间结合弱化、层间分离及力学性能的方向性差异,构成了层间结合缺陷。研究表明,层间界面处残留的树脂富集区、气孔及未完全融合的陶瓷颗粒也会导致此类缺陷,而层间结合缺陷正是造成光固化陶瓷机械性能下降的主要原因^[9]。因此,优化层状结构、减少层间结合缺陷对提升

光固化陶瓷的性能具有重要意义。

2 缺陷调控与光聚合成型改进方法

2.1 针对陶瓷孔隙缺陷的优化工艺

在脱泡工艺方面,Gu等^[10]采用质量分数为0.5%的BYK-066N消泡剂,并采用真空环境下的行星式离心搅拌进行脱泡,使浆料中气泡的体积分数从1.570%降至0.244%;将陶瓷颗粒的体积分数(以 ϕ 表示)从45%提高至55%后,烧结件的显微硬度从14.01 GPa提升至17.92 GPa,层间结合致密,相对密度达99.4%。图4为脱模(a、b、c)和烧结(d、e、f)样品的表面微观形貌及不同固体负载量烧结样品的层间结合形貌(g、h、i),该协同优化策略有效控制了从浆料至烧结体过程中的孔隙演化。

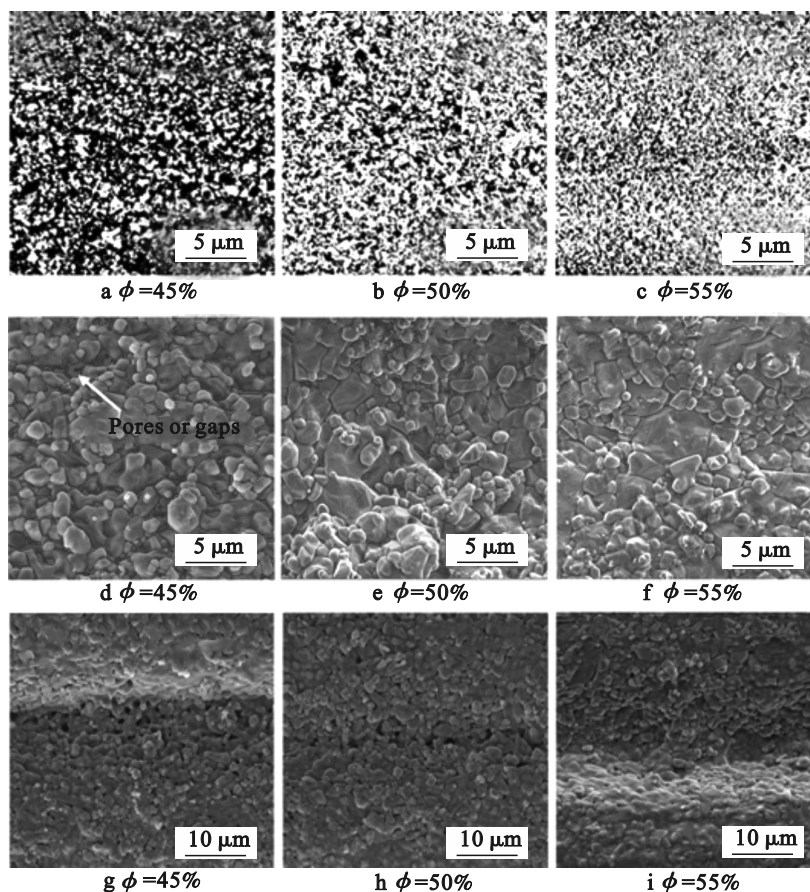


图4 脱模(a、b、c)和烧结(d、e、f)样品的表面微观形貌及不同固体负载量烧结样品的层间结合形貌(g、h、i)

在增加烧结工艺优化方面,Liu 等^[11]研究了不同烧结温度和保温时间对 $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合陶瓷的微观组织、硬度和断裂韧性的影响,发现增加保温时间能够增强烧结驱动力,促进晶粒生长,减少气孔率。烧结温度为 $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ 及保温时间为 60 min 时能获得最少孔隙缺陷的 $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷,其密度、硬度和断裂韧性分别达到 3.75 g/cm^3 、 14.1 GPa 和 $4.05\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。微观结构分析表明,优化后的烧结工艺使 ZrO_2

晶粒均匀分布在 Al_2O_3 晶界处,形成致密结合界面。断口形貌显示其断裂模式从晶间断裂转变为穿晶与沿晶混合断裂,ZTA 复合陶瓷在 $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结温度下不同保温时间的断裂面 SEM 微观照片如图 5 所示,这表明晶界结合强度显著提升。该方法通过调控烧结动力学过程,为实现低孔隙率、高性能陶瓷的增材制造提供了新思路。

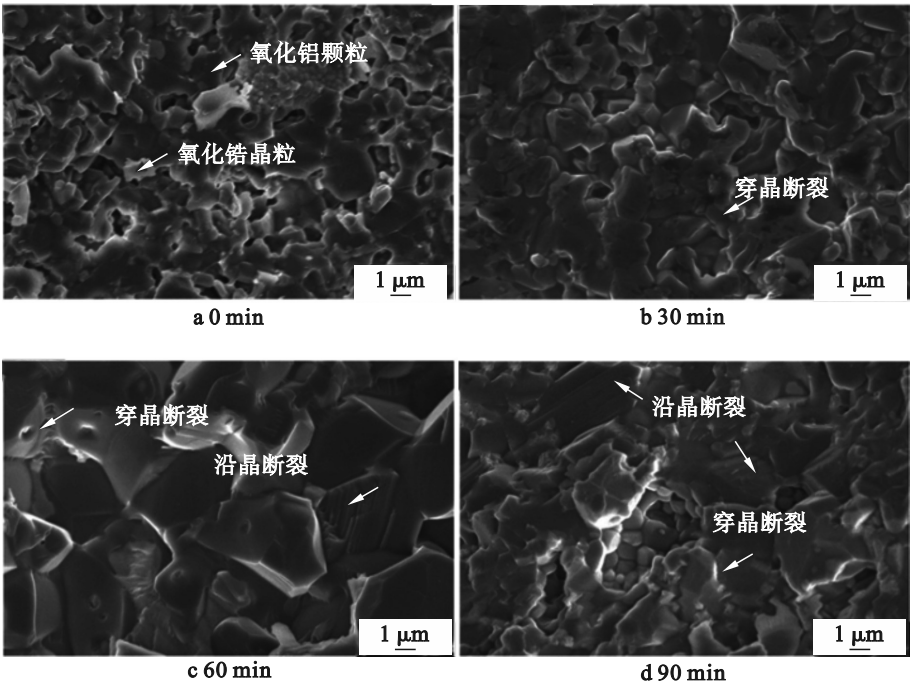


图5 ZTA 复合陶瓷在 $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结温度下不同保温时间的断裂面 SEM 微观照片

在烧结助剂调控方面,Zeng 等^[12]系统探究了固相(TiO_2)、液相(MgO-SiO_2)及固液复合相($\text{TiO}_2\text{-MgO-SiO}_2$)三类烧结助剂对光固化 3D 打印氧化铝陶瓷致密化行为与力学性能的影响,不同添加剂含量的 Al_2O_3 陶瓷的 SEM 图谱如图 6 所示,添加剂含量用质量分数表示。研究表明,添加适量烧结助剂可显著提升陶瓷烧结活性与显微结构均匀性,其中质量分数为 9% 的 MgO-SiO_2 液相烧结助剂在 $1\,600\text{ }^\circ\text{C}$ 下促使陶瓷弯曲强度提升至 $317\pm34\text{ MPa}$,维氏硬度达 $1\,250\pm102\text{ HV30}$;而复合助剂体系进一步将相对密度提高至 97.4%,展现出协同促进致

密化的优势。微观结构分析表明,液相烧结过程中 MgO 有效抑制晶粒异常长大, SiO_2 在晶界处形成低共熔相,共同促进孔隙消除与晶界致密化。这一结果说明通过多元助剂的合理配伍,可在降低烧结温度的同时实现氧化陶瓷强度与密度的同步提升,为高性能复杂结构陶瓷的增材制造提供了有效的材料设计策略。

2.2 针对陶瓷裂纹缺陷的优化工艺

为有效抑制裂纹与分层,除优化脱脂与烧结工艺外,调控材料体系同样关键。具体而言,采用高固含量浆料可减少有机相比比例,从而降低聚合收缩与热解产气量;添加适量烧结

助剂能促进致密化、增强晶界结合,进而缓解应力集中;而增大陶瓷粒径则有助于形成更稳定的颗粒骨架,提升热处理过程中的尺寸稳定性,这些措施均有助于减少裂纹的产生^[13]。Chen 等^[6]通过 DLP 工艺研究发现,原料粒径是调控裂纹的关键因素。较小粒径(如 $0.35\ \mu\text{m}$)虽能促进烧结致密化,但其较大的比表面积与聚合收缩应力会导致显著的裂纹网络;而较大粒径的坯体裂纹较少,却因烧结活性低、孔隙率高而使性能劣化。值得注意的是,烧结过程

对微裂纹具有一定的愈合效应,存在一个最优粒径($3\ \mu\text{m}$),可在烧结活性与裂纹抑制之间取得兼顾。Zhu 等^[14]通过优化脱脂工艺,制得表面完整、无裂纹的陶瓷样件。研究发现,在氩气氛下脱脂时,有机物热解产生的碳得以保留,这些碳分布于颗粒之间,并起到支撑骨架的作用,从而显著抑制开裂。利用惰性气氛调控热解产物的形态,是缓解脱脂应力、实现低缺陷陶瓷的有效技术路径。

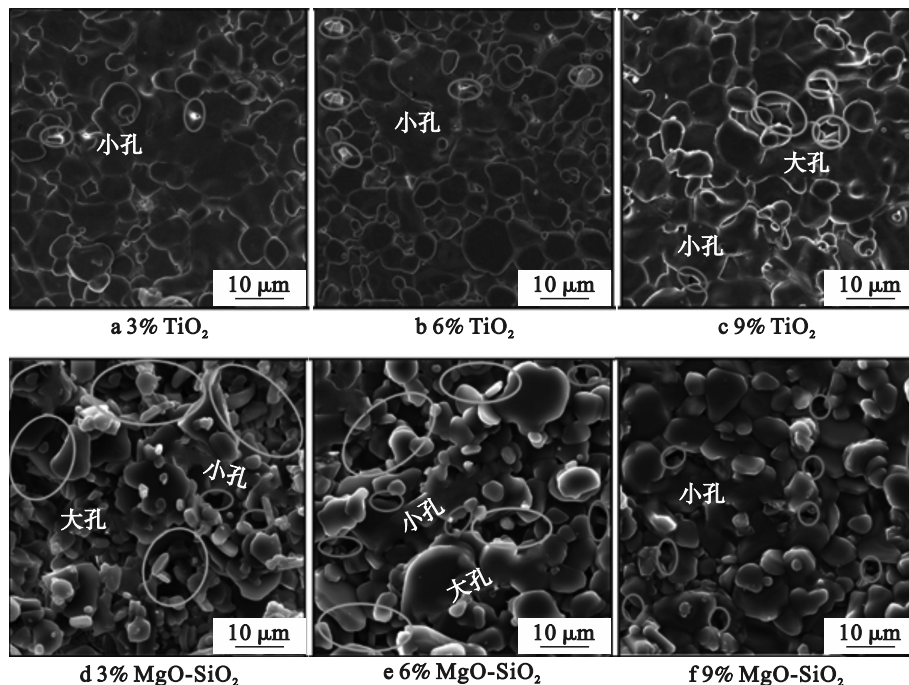


图 6 不同添加剂含量的 Al_2O_3 陶瓷的 SEM 图谱

2.3 针对陶瓷形貌偏差的光聚和调控

深入理解光固化过程,需考察固化转化率沿厚度方向的梯度变化及层内与层间的转化率差异^[15]。傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)虽常用于分析转化率与曝光参数的关系,但难以观测固化层内部,故理论计算与数值分析成为重要补充。Yu 等^[8]针对立体光刻工艺,建立了一个基于修正比尔-朗伯定律、考虑激光高斯能量分布与光散射效应的数学方程,能够精确描述陶瓷浆料光聚合的三维轮廓。该方程将固化深度、固化宽度与激光能量分布及浆料特性相关联,揭示了误

固化与层状缺陷的成因主要源于光散射导致轮廓展宽及层间重叠不充分。基于这一机制,该方程实现了对层状缺陷形貌及各向异性收缩的定量预测与主动调控,其一般形式为

$$C_d(x_e, y_e) = \frac{4S_d \ln(E_M/E_c)}{[W_{\text{beam}}^2 + 2S_w \ln E_0/E_w]} (x_e^2 + y_e^2) - S_d \ln(E_M/E_c) \quad (1)$$

该方程成功预测了光聚合区域呈三维抛物面形状。图 7 为能量剂量为 $989.49\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 时形成的固化轮廓形貌,图 8 为不同工艺参数对光固化线性固化尺寸的影响,图 9 为不同工艺参数下 oyz 和 oxz 截面固化轮廓实测与理论

预测对比。通过单点及单线扫描实验验证了该模型的准确性,该方程对实验数据的拟合度分别达到98.12%(深度)和85.34%(宽度)。这项工作将光聚合轮廓的描述从定性提升至定

量预测,为主动调控固化形貌奠定了理论基础。调控光聚合过程形成均匀的固化粉末分布,是减少误固化、降低内应力、抑制各向异性行为并保障陶瓷件结构完整性的重要途径。

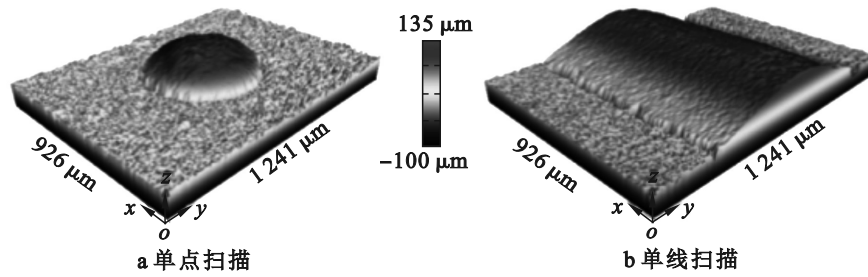


图7 能量剂量为989.49 mJ/cm²时形成的固化轮廓形貌

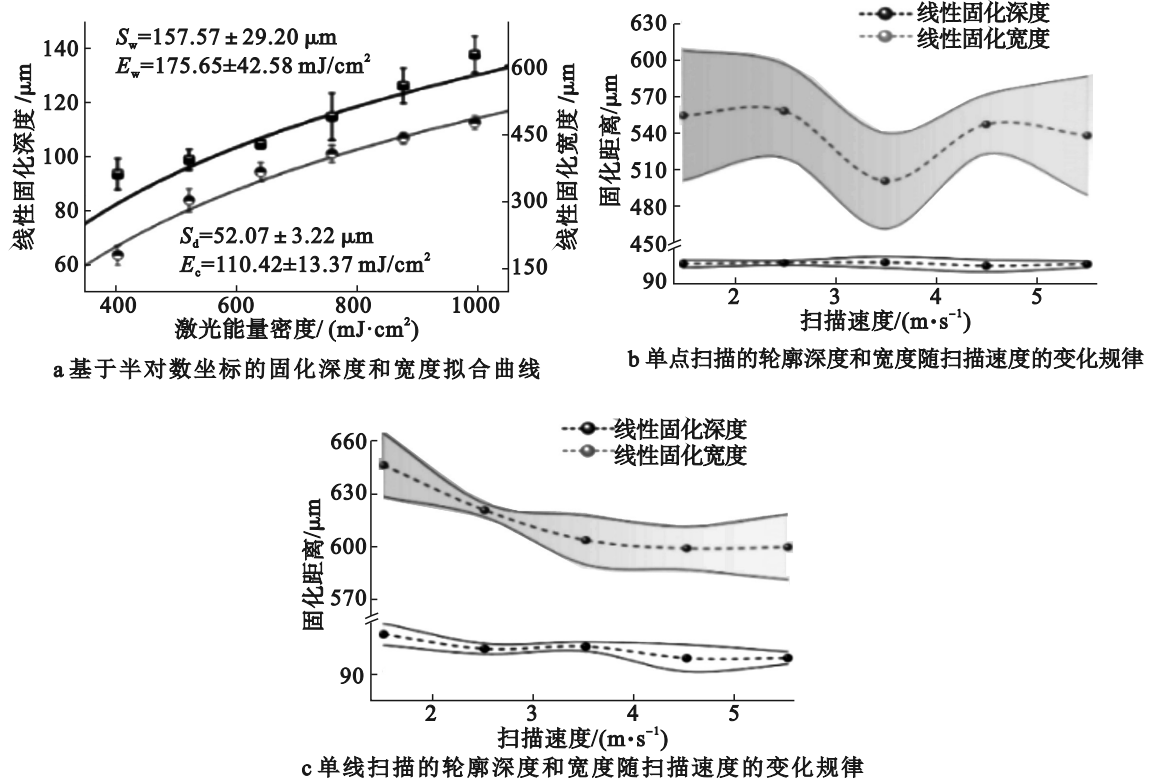
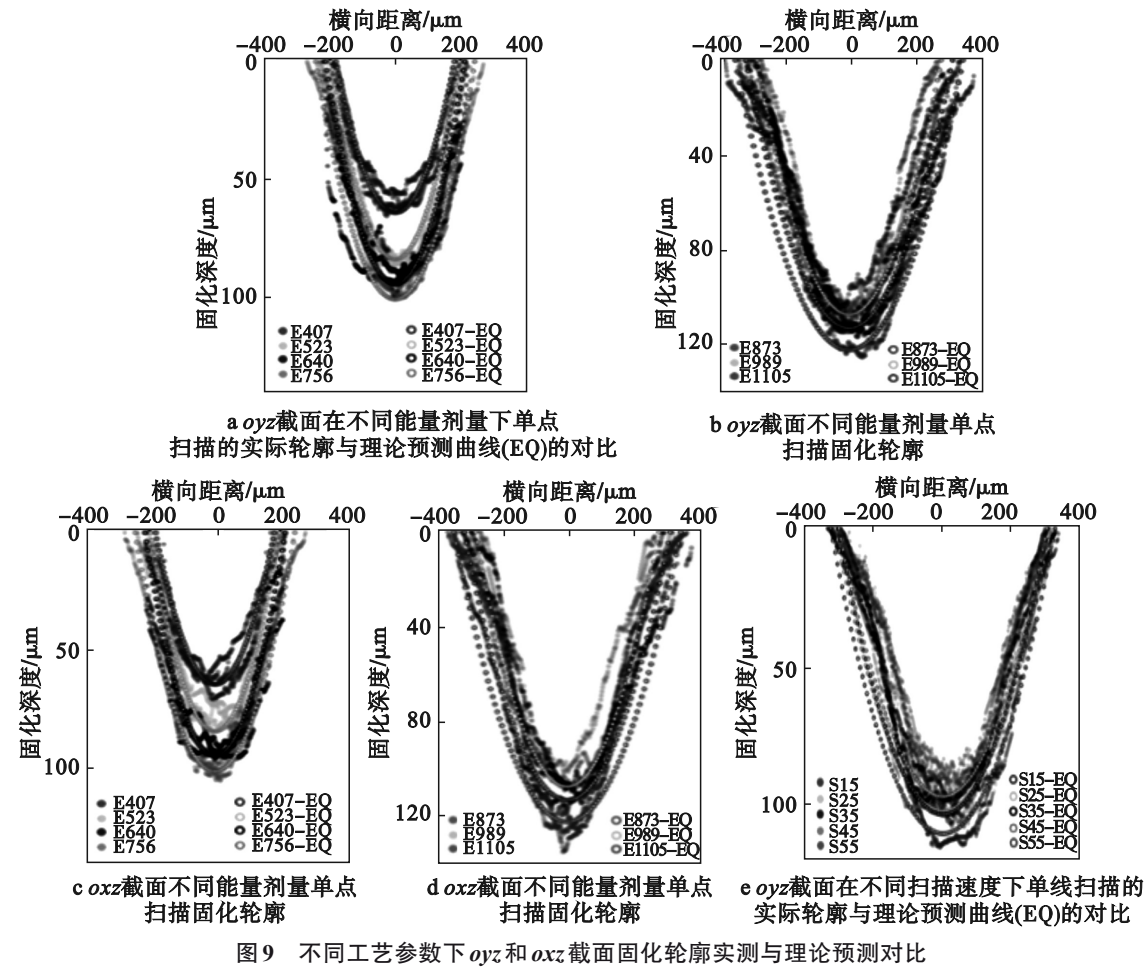


图8 不同工艺参数对光固化线性固化尺寸的影响

Konnunaho等^[16]通过系统研究,建立了能够精确预测陶瓷浆料光聚合过程中固化深度 C_d 与固化展宽 ω_{ex} 的数学模型,并对模型关键参数(如 D_p , E_c , S_w , E_w)进行了完整的实验标定。针对光散射导致的误固化(即固化展宽),此研究采用了准比尔-朗伯定律进行描述,公式为:

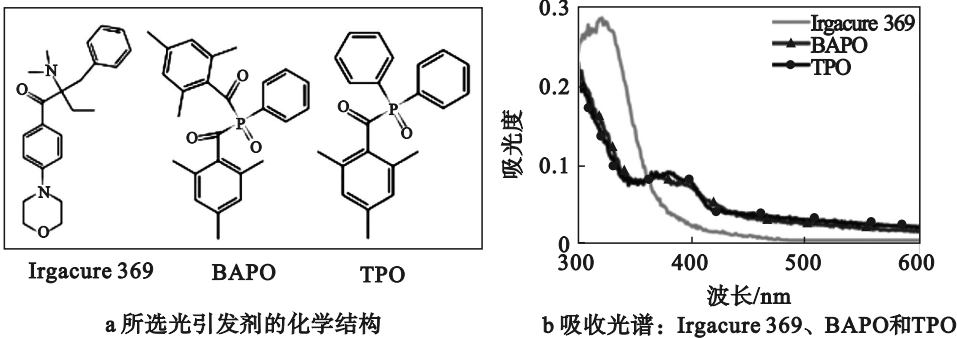
$$\omega_{ex} = S_w \ln(E_M/E_c) \quad (2)$$

通过详细的实验数据拟合,得到了不同树脂配方下的 D_p (深度敏感性)和 S_w (宽度敏感性)等关键参数。不同光引发剂的固化深度和展宽曲线显著不同,二苯基(2,4,6-三甲基苯甲酰基)氧化膦(TPO)和苯基双(2,4,6-三甲基苯甲酰基)氧化膦(BAPO)在405 nm处有更高的吸光度。图10为3种光引发剂化学结构



与紫外线吸收光谱, S_w 为光聚合宽度灵敏度系数(μm), E_w 为横向临界曝光量($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$); S_d 为纵向固化灵敏度(μm), E_c 为纵向临界曝光量($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$), BAPO 体系表现出比 Irgacure 369 更优的固化能力与更低的临界能量(E_c), 这直接

验证了方程的预测能力, 并将树脂的化学组成 (PI 类型、浓度) 与光聚合的物理行为建立了定量联系。该研究进一步引入了“展宽深度” (D_b) 的概念, 其公式定义为



$$D_b = D_p \ln \left(\frac{E_M}{E_c} \right) \quad (3)$$

该参数决定了在何种固化深度下会开始

产生显著的横向展宽。图 11 为不同染料含量下固化宽度及展宽深度的变化规律, 由图 11 可

知,增加颜料浓度可显著降低 D_b 和展宽速率 R_b (固化展宽随固化深度的增加而增大的速度),这意味着误固化在更小的深度就开始发生,但

其扩展速度更慢,从而在整体上实现了对微小特征尺寸的更精确控制。这一发现为主动抑制误固化提供了理论支撑。

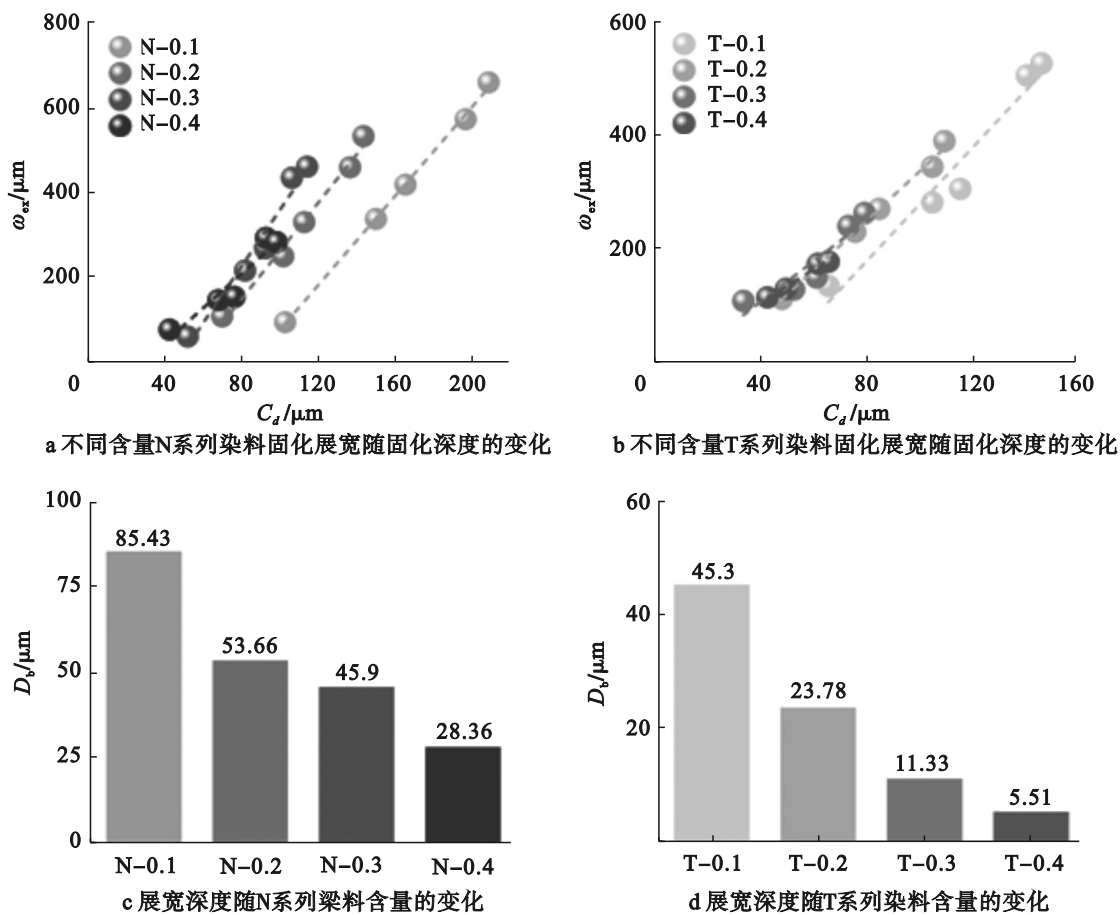


图11 不同染料含量下固化展度及展宽深度的变化规律

2.4 针对层状结构各向异性的调控策略

Li等^[9]揭示了光固化3D打印陶瓷中层状结构的形成机理。图12为不同打印模式下陶瓷型芯样件变曲后的断口形貌,图13为模式C打印陶瓷型芯样件断口表面SEM图像。如图12和图13所示,通过对不同打印模式下陶瓷型芯样件变曲后的断口形貌及断口表面的SEM分析发现,层间界面由细小陶瓷颗粒组成、致密且孔隙细小;层内区域则由粗大颗粒主导、孔隙大且分布分散。这种“界面致密、层内多孔”结构是性能各向异性的根本原因。图14为光固化3D打印过程中浆料的流动状态及层状结构的形成机理,如图14所示,通过CFD模拟

浆料在刮刀铺展过程中的流动状态发现,通过CFD模拟浆料铺展过程,图12为不同打印模式下挠曲后岩心样品的断裂形态,浆料中间层流速高于上下表面,导致细颗粒富集于层间界面、粗颗粒留在层内,固化后形成该层状结构。该工作首次通过仿真将工艺参数(如刮刀速度)与微观结构直接关联。

传统的层状结构控制方法,如优化浆料配方、调整工艺参数均致力于减轻层状结构。而Yu等^[17]研究出了一种创新性的“微结构设计”法,主动改变光固化陶瓷固有的层状结构,通过在设计阶段于陶瓷坯体内引入微米级空心矩形结构(MHRS),成功地将光固化增材制造

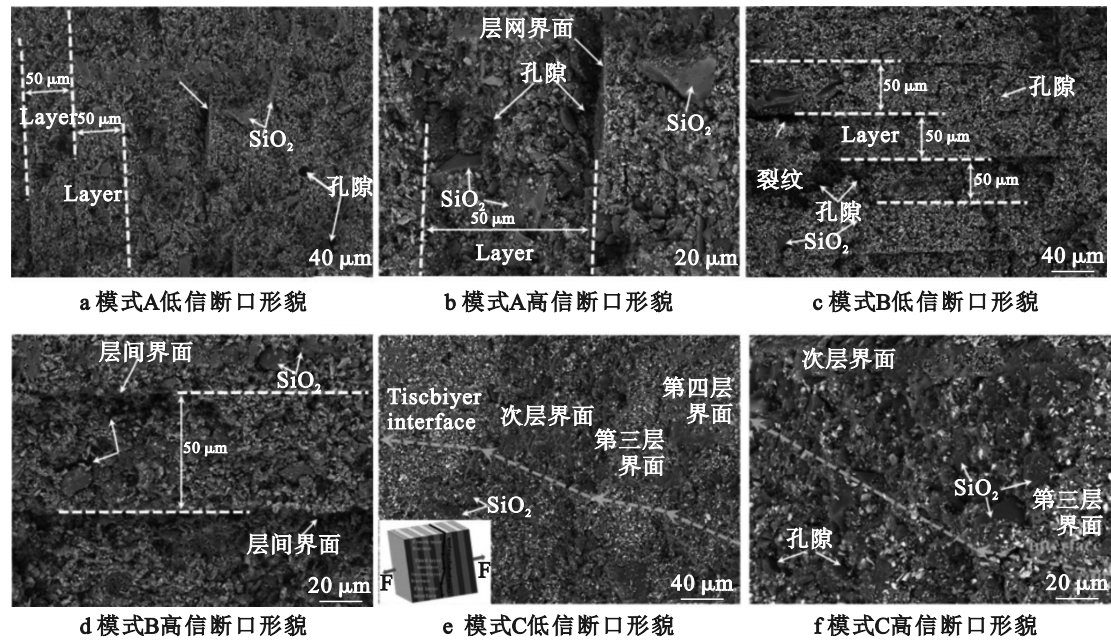


图 12 不同打印模式下陶瓷型芯样件变曲后的断口形貌

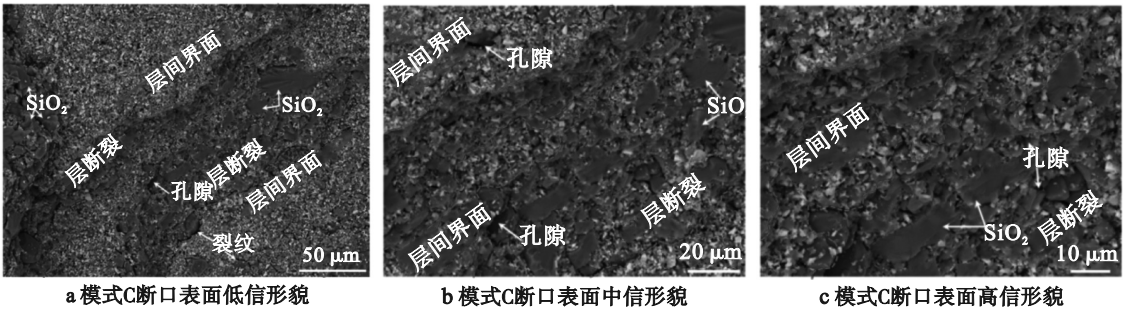


图 13 模式 C 打印陶瓷型芯样件断口表面的 SEM 图像

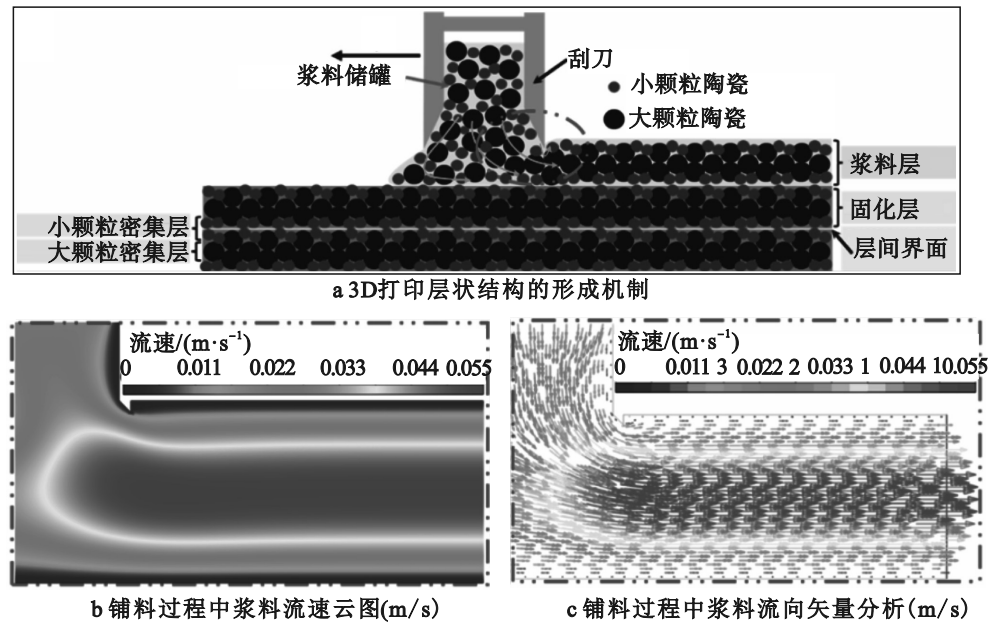


图 14 光固化 3D 打印过程中浆料的流动状态及层状结构的形成机理

中固有的、易导致性能各向异性的平行层状结构转变为交错结构。这种结构转变是提升性能的关键。该研究首先建立了一个新颖的光固化轮廓曲线方程来精确预测实际固化形貌,从而保证微结构设计的固化质量。

$$C_d(x_e, y_e) = \frac{4C_d}{W_{\text{cure}}} (x_e^2 + y_e^2) - C_d \quad (4)$$

该方程表明,单点扫描固化轮廓呈抛物面形状。基于此,通过有规律地排列这些抛物面单元,在制造过程中主动构造了T形结构。与标准样件的平行层结构相比,MHRS样件在受力时,裂纹扩展路径因T形结构而发生偏转和桥接,需要消耗更多能量,从而显著提高了材料的断裂韧性和强度。上述微观结构设计的有効性在图15—17中得到系统验证。图15为通

过微观结构设计改变立体光刻成型策略示意图总结了微观结构设计的成型策略,阐明了从被动适应层状缺陷到主动构建T形强化结构的范式转变。图16为光聚合曲线与控制方程曲线的比较,验证了固化轮廓预测模型的准确性。图17为不同加载方向和几何形状下单一裂纹的层结构、惯性矩及可能的扩展路径,揭示了交错结构提升断裂韧性的内在机制。这表明,该研究的意义远超单纯的工艺参数调整,其核心在于实现了一种根本性的范式革新:从被动适应光固化固有的层状缺陷,转变为主动设计与构建强化微结构。这一转变通过精准调控光聚合的能量分布路径,实现了从材料形成根源上对其本构关系的重新定义。

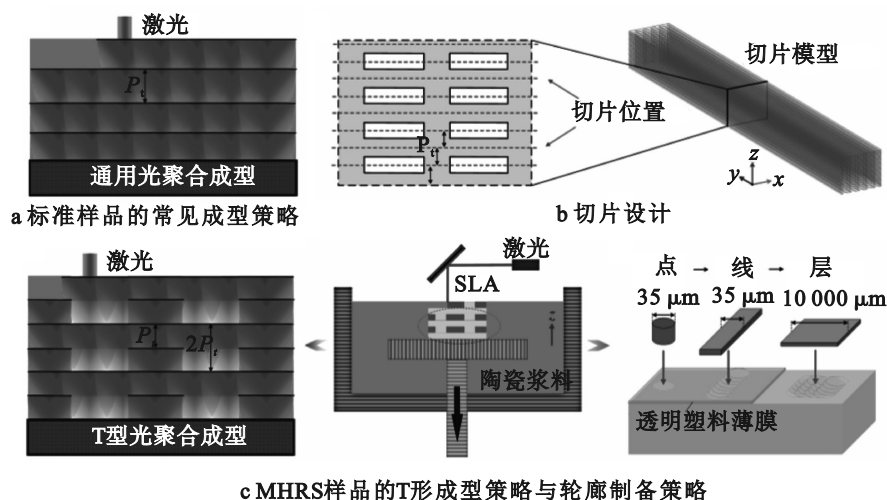


图15 通过微观结构设计改变立体光刻成型策略示意图

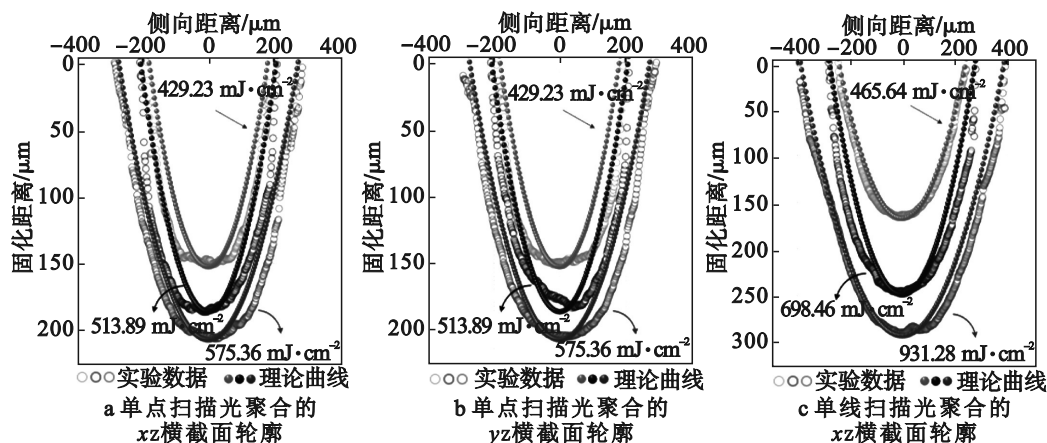


图16 光聚合曲线与控制方程曲线的比较

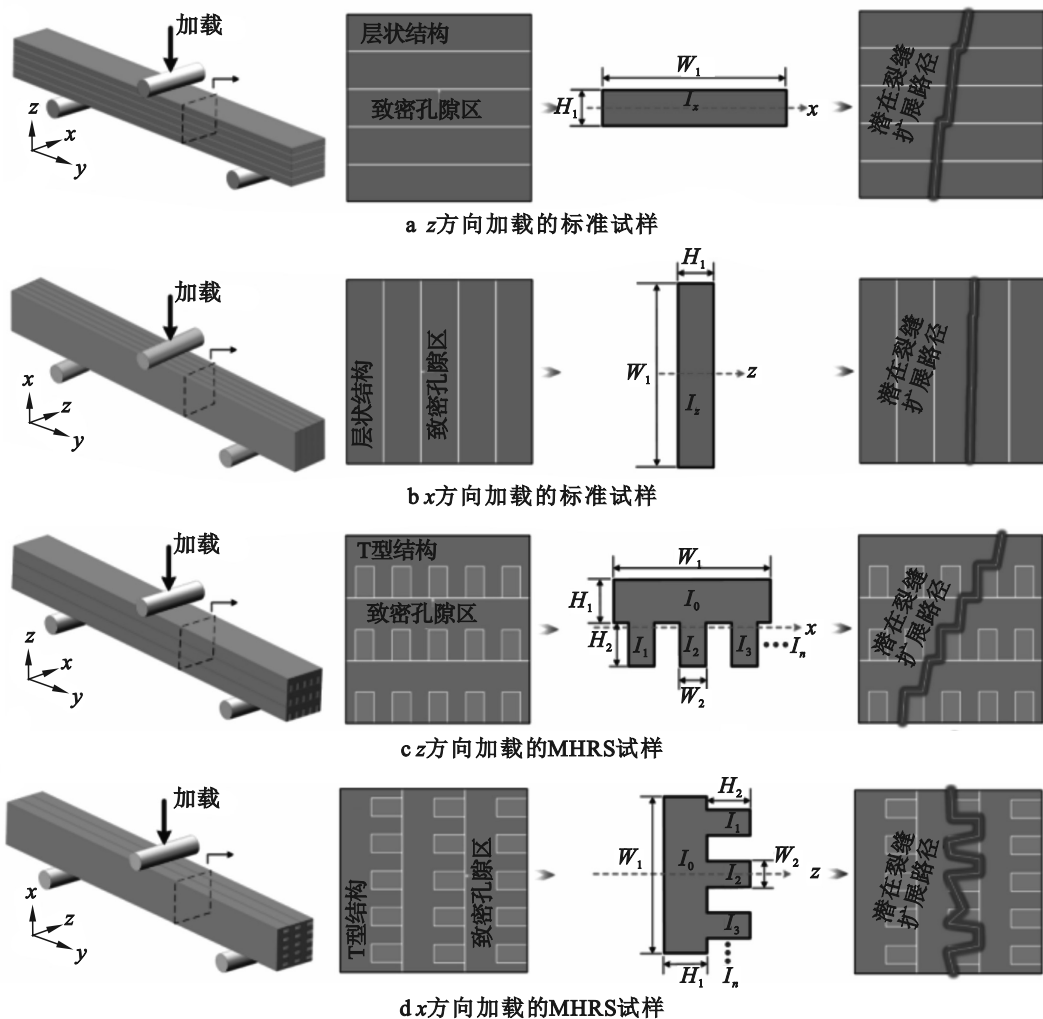


图17 不同加载方向和几何形状下单一裂纹的层结构、惯性矩及可能的扩展路径

3 总结与展望

本文系统探讨了陶瓷光固化增材制造中的缺陷科学问题,重点综述孔隙、裂纹、误固化及层状结构四类典型缺陷的形成机理与调控策略。各类缺陷之间相互耦合存在明显因果关联:光散射引发的误固化不仅造成尺寸偏差,其导致的固化不均还会弱化层间结合,诱发分层与裂纹;脱脂过程中产生的孔隙若分布于层间,则显著加剧各向异性收缩。这表明单一局部优化效果有限,需从系统角度综合调控。

未来推动陶瓷光固化技术走向成熟应用需攻克两大核心挑战:一是克服光固化固有特性(如光散射、聚合收缩)带来的技术瓶颈;二

是解决增材制造与传统陶瓷工艺衔接中的新问题,如界面结合、应力演化与致密化控制。今后研究将依赖跨学科协同创新,深度融合材料科学、光学工程、计算模拟与精密制造,针对航空航天、生物医疗、电子器件等应用场景,开发定制化材料与工艺方案,使该技术成为复杂结构陶瓷零件的可靠制造路线。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Qian C C, Hu K H, Li J H, et al. The effect of light scattering in stereolithography ceramic manufac-

- turing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(14): 7141–7154.
- [3] Zhang M T, Zhang L, Zhong K, et al. Fabrication process of large-dimensional alumina ceramic parts via stereolithography, joining, and infiltration techniques [J]. Ceramics International, 2025, 51(27): 52615–52627.
- [4] Nie G L, Li Y H, Sheng P F, et al. Microstructure refinement-homogenization and flexural strength improvement of Al_2O_3 ceramics fabricated by DLP-stereolithography integrated with chemical precipitation coating process[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2021, 10(4): 790–808.
- [5] Schwarzer E, Götz M, Markova D, et al. Lithography-based ceramic manufacturing (LCM)-Viscosity and cleaning as two quality influencing steps in the process chain of printing green parts [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(16): 5329–5338.
- [6] Chen Z W, Liu C B, Li J J, et al. Mechanical properties and microstructures of 3D printed bulk cordierite parts [J]. Ceramics International, 2019, 45(15): 19257–19267.
- [7] Zhou S X, Liu G Z, Wang C S, et al. Thermal debinding for stereolithography additive manufacturing of advanced ceramic parts: a comprehensive review[J]. Materials & Design, 2024, 238: 112632.
- [8] Yu X H, Zhao Y H, Wang Z G, et al. Response mechanisms for the photopolymerization profiles, microstructures, and properties in ceramics prepared by stereolithography[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(1): 116869.
- [9] Li Q L, Hou W Q, Liang J J, et al. Controlling the anisotropy behaviour of 3D printed ceramic cores: from intralayer particle distribution to interlayer pore evolution [J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103055.
- [10] Gu Q C, Wang H L, Gao W J, et al. Preparation of large-size alumina ceramic parts by DLP 3D printing using high-solid-loading paste and optimizing the debinding process [J]. Ceramics International, 2023, 49(17): 28801–28812.
- [11] Liu X Y, Zou B, Xing H Y, et al. The preparation of $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ composite ceramic by SLA-3D printing and sintering processing [J]. Ceramics International, 2020, 46(1): 937–944.
- [12] Zeng Y, Chen X F, Sun L J, et al. Effect of different sintering additives type on Vat photopolymerization 3D printing of Al_2O_3 ceramics [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 83: 414–426.
- [13] Zhang K Q, Meng Q Y, Zhang X Q, et al. Quantitative characterization of defects in stereolithographic additive manufactured ceramic using X-ray computed tomography [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 118: 144–157.
- [14] Zhu J Y, Zhang C, Luo Z Q, et al. Influence of debinding process on the properties of photopolymerization 3D printed cordierite ceramics [J]. Journal of Inorganic Materials, 2022, 37(3): 317.
- [15] Wu X Q, Xu C J, Zhang Z M, et al. Modeling and visualization of layered curing conversion profile in ceramic mask projection stereolithography process [J]. Ceramics International, 2020, 46(16): 25750–25757.
- [16] Konnunaho P, Zakeri S, Frankberg E J, et al. Investigation of resin composition and printing parameters on the dimensional accuracy of alumina components fabricated via ceramic vat photopolymerization [J]. Open Ceramics, 2025, 22: 100751.
- [17] Yu X H, Zhao Y H, Wang Z G, et al. Designing curing layer structures to manage the anisotropies of alumina ceramics manufactured by vat photopolymerization [J]. Additive Manufacturing, 2025, 104: 104763.

(责任编辑:陈素清 英文审校:侯宁)