

引用格式: 罗智聪, 张夏婷, 吴甲民, 等. 氮化硅陶瓷浆料的制备及其数字光处理成形工艺优化[J]. 材料工程, 2026, 54(2): 91-100.  
LUO Zhicong, ZHANG Xiating, WU Jiamin, et al. Slurry preparation and forming process optimization of silicon nitride ceramic with digital light processing technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(2): 91-100.

## 氮化硅陶瓷浆料的制备及其数字光 处理成形工艺优化

罗智聪<sup>1,2</sup>, 张夏婷<sup>1,2</sup>, 吴甲民<sup>1,2,3\*</sup>, 郭琳<sup>1,2</sup>, 史玉升<sup>1,2</sup>

(1 华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术全国重点实验室, 武汉 430074;

2 增材制造陶瓷材料教育部工程研究中心, 武汉 430074;

3 华中科技大学温州先进制造技术研究院微波通信材料与器件实验室, 浙江温州 325035)

**摘要:** 数字光处理(digital light processing, DLP)技术因无需模具,可快速成形复杂结构多孔氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )陶瓷而备受关注。然而,在陶瓷浆料流变性、稳定性和固化性能方面仍面临挑战。本工作通过优化多元光敏树脂配方、分散剂体系及光固化成形参数,成功提升了 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料流变与固化性能。研究表明,多元树脂体系HDDA、TMP3EOTA、ACMO按3:1:2质量比配制时性能最优,相比含IBOA体系,ACMO因无强共轭基团且吗啉环可稳定光引发剂自由基,实现了 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料固化深度95%的提升。引入分散剂Solsperse 41000后,浆料稳定性和流变性进一步提升,随着Solsperse 41000含量的增加, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料黏度先降低后升高,当含量为粉体质量的3%时,浆料黏度降至最低(0.16 Pa·s),而加入过量分散剂将出现粉体多层吸附及自身缠结现象,影响浆料流变性能。基于上述优化,调控激光功率和曝光时间分别为15 mW/cm<sup>2</sup>和7 s时,可同时满足固化深度与成形精度要求。最后,成功打印出复杂结构 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷素坯,并制得孔隙率为18.76%、抗弯强度为240.28 MPa的多孔 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷。本研究为高性能多孔 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷的制备提供实验依据。

**关键词:** 氮化硅陶瓷; 数字光处理技术; 流变性能; 固化深度

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000545 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000545

**中图分类号:** TQ174.7; TB32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)02-0091-10

## Slurry preparation and forming process optimization of silicon nitride ceramic with digital light processing technology

LUO Zhicong<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiating<sup>1,2</sup>, WU Jiamin<sup>1,2,3\*</sup>, GUO Lin<sup>1,2</sup>, SHI Yusheng<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and

Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2 Engineering Research

Center of Ceramic Materials for Additive Manufacturing, Ministry of Education, Wuhan 430074, China;

3 Wenzhou Key Laboratory of Microwave Communication Materials and Devices, Wenzhou

Advanced Manufacturing Institute of HUST, Wenzhou 325035, Zhejiang, China)

**Abstract:** Digital light processing (DLP) technology has attracted significant attention for its ability to quickly form complex structure porous silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ceramics without the need for molds. However, challenges still exist regarding the rheological properties, stability, and curing performance of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic slurry. This paper successfully enhances the rheology and curing performance of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  slurries by optimizing the multi-component photosensitive resin, dispersant system, and photocuring forming parameters. The results show that the multi-component resin system consisting of HDDA, TMP3EOTA, and ACMO at 3:1:2 mass ratio achieves optimal performance. Compared to the system containing IBOA, ACMO has no strong conjugated groups, and its morpholine ring can stabilize the free radicals of photoinitiators, achieving 95% increase in curing depth of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  slurry. After the introduction of the dispersant Solsperse 41000, the stability and rheological properties of the slurry are further improved.

As the content of Solsperse 41000 increases, the viscosity of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  slurry first decreases and then increases; when the dispersant content reaches 3% of the powder mass, the slurry viscosity drops to its minimum value (0.16 Pa·s). However, the addition of an excessive amount of dispersant will lead to multi-layer adsorption on the powder surface and self-entanglement of the dispersant itself, which impairs the rheological properties of the slurry. Based on the above optimizations, adjusting the laser power and exposure time to 15 mW/cm<sup>2</sup> and 7 s, respectively, can simultaneously meet the requirements for both curing depth and forming precision. Finally,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic green bodies with complex structures are successfully printed, and a porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic with porosity of 18.76% and flexural strength of 240.28 MPa is ultimately produced. This study provides an experimental basis for the preparation of high-performance porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics.

**Key words:**  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics; DLP technology; rheological property; curing depth

多孔氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )陶瓷具有抗烧蚀、耐高温、耐磨损、耐腐蚀以及高透波等特性,被作为关键材料广泛用于航空航天、电子通信和能源环境等领域<sup>[1-6]</sup>。然而,传统 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷制备工艺,如注浆成形、干压成形等静压成形,不仅受模具限制,而且在生产具有复杂内腔、精细网格等特殊结构的多孔 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷时存在局限性,导致难以制备出高性能多孔 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷<sup>[7-10]</sup>。为突破这一技术瓶颈,数字光处理(digital light processing, DLP)技术应运而生。DLP技术以紫外光固化为成形原理,通过逐层固化陶瓷浆料的成形方式可快速完成陶瓷素坯的打印成形,具有无需模具、设计自由度高、成形速度快、成形精度高和表面质量好等优势,受到科研人员的广泛关注,在高精尖领域制备复杂精密陶瓷构件时展现出显著优势<sup>[11-14]</sup>。

DLP技术的关键是浆料,浆料的流变性能、固化性能和稳定性能直接影响到陶瓷成形精度、表面质量以及最终的陶瓷力/热/电性能<sup>[15-16]</sup>。Wu等<sup>[17]</sup>研究了多元光敏树脂对 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料性能的影响,发现当HDDA:ACMO:POE质量比为5:2:3、固相含量为40%(体积分数)时,浆料黏度 $\leq 1900$  mPa·s、固化深度达38  $\mu\text{m}$ 。李萌<sup>[18]</sup>通过优化二元光敏树脂HDDA与TMP3EOTA质量比为3:1时,浆料表现出较好的流变性能和固化性能,单层固化深度达43.8  $\mu\text{m}$ 。Zhang等<sup>[19]</sup>通过对比不同类型分散剂对流变性能的影响,在KOS110分散剂含量为2%(质量分数,下同)时,成功制备出体积分数为57%、黏度为6 Pa·s的光固化陶瓷浆料。Zou等<sup>[20]</sup>探究了Solsperse和BYK系列分散剂对 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料流变及稳定性能的影响,发现Solsperse 85000效果最优,因其易吸附于粉体表面,通过空间位阻抑制颗粒团聚。综上所述,优化树脂体系与分散剂是实现高性能DLP陶瓷光固化浆料制备的关键途径之一。

此外,光固化成形参数的精确设置对陶瓷素坯成形精度和层间结合性能具有很大影响。研究表明,增

大激光功率或延长曝光时间均可提高 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料的固化深度,进而提高素坯层间结合力;但由此会出现过固化现象,直接导致光固化陶瓷素坯内应力大和成形精度超差等缺陷。基于此,通过成形参数正交实验优化,以协同调控激光功率和曝光时间来实现高固化深度、高成形精度和低内部应力是DLP成形工艺的重要手段,为后续排胶、烧结提供稳定的基础。苏海军等<sup>[21]</sup>通过调节光固化成形参数,在切片厚度为50  $\mu\text{m}$ 下,成功获得了精度高、缺陷少、力学性能优异的双相磷酸钙(biphase calcium phosphate, BCP)陶瓷。占丽娜等<sup>[22]</sup>通过调节曝光时间和脱脂参数,成功制备出单层固化深度为IT7级且无裂纹的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷素坯。因此,优化光固化成形参数有效缓解了浆料固化深度和陶瓷成形精度的矛盾,是制备精密复杂陶瓷构件的有效方法。

然而,现阶段研究内容多局限于树脂体系优化、分散剂选择或工艺参数调控等单一因素研究,缺少多因素协同关联分析,这将导致研究成果应用受限,不利于工业化推广。基于此,本工作采用DLP成形技术,系统探究了多元光敏树脂配方、分散剂种类及含量对 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料静态稳定性、流变性能和固化性能的协同影响,揭示了分散剂Solsperse 41000在浆料中的分散机理。此外,还通过调控激光功率和曝光时间等成形参数探究其对 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料固化深度的影响规律,最终,成功打印出复杂结构的多孔 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 原材料

本工作所用原料包括 $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ (纯度 $\geq 98.5\%$ ,天津硕科有限公司)、造孔剂聚苯乙烯微球(polystyrene, PS,  $D_{50} = 8 \mu\text{m}$ , 凯旋塑料有限公司)、光引发剂三甲基苯甲酰基-二苯基氧化膦(2,4,6-trimethylbenzoyldi-phenyl phosphine oxide, TPO, 德国BASF)、烧结助剂

$\text{Al}_2\text{O}_3$  (纯度  $\geq 99.99\%$ , 肴弋合金材料有限公司) 和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (纯度  $\geq 99.99\%$ , 科特新材料科技有限公司)。

选用 1,6-己二醇二丙烯酸酯 (HDDA, 成都四城光电有限公司)、乙氧基三羟甲基丙烷三丙烯酸酯 (TMP3EOTA, 成都四城光电有限公司)、双季戊四醇六丙烯酸酯 (DPHA, 上海引昌新材料有限公司)、三丙二醇二丙烯酸酯 (TPGDA, 上海引昌新材料有限公司)、丙烯酸异冰片酯 (IBOA, 成都四城光电有限公司) 和丙烯酰吗啉 (ACMO, 成都四城光电有限公司) 为光敏树脂单体, 以特定比例混合作为 DLP 用混合光敏树脂, 不同光敏树脂配比的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料配方详见表 1。采用 Solsperse 41000 (西班牙路博润公司)、DK-160 (上海荟研新材料有限公司)、BYK-163 (上海荟研新材料有限公司) 和 AG-102 (上海荟研新材料有限公司) 作为分散剂。

表 1  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料中不同光敏树脂配方

Table 1 Different photosensitive resin formulations in  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic slurry

Slurry	Photosensitive resin and formulation
C0	HDDA:TMP3EOTA:IBOA=3:1:2
C1	HDDA:TMP3EOTA=3:1
C2	HDDA:TMP3EOTA:TPGDA=3:1:2
C3	HDDA:TMP3EOTA:ACMO=3:1:2
C4	HDDA:TMP3EOT:DPHA=3:1:2

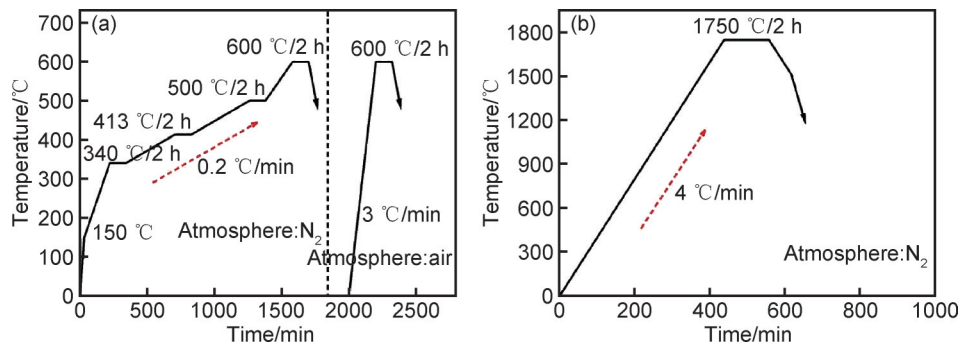


图 1 多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷素坯热处理曲线 (a) 脱脂曲线; (b) 烧结曲线

Fig. 1 Heat treatment curves of porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic green bodies (a) debinding curves; (b) sintering curve

## 1.4 性能表征

采用 Kinexus Pro + 型流变仪测试样品流变性能; 通过沉降实验评估陶瓷浆料稳定性; 利用螺旋测微计测定陶瓷浆料单层固化片固化深度; 借助 STA449F3 型热重-差热综合分析仪 (TG-DTA), 在氩气氛围中以  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的升温速率从室温升至  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , 对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷素坯进行热重分析; 利用 XRD-7000 型 X 射线衍射仪 (XRD) 表征陶瓷的物相组成, 其中, 扫描角度为  $10^\circ\sim 80^\circ$ ; 并通过 JSM-7600F 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的微观形貌; 采用阿基米

## 1.2 浆料制备

首先, 以乙醇为介质, 将  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  粉按 92:4:4 的质量比在行星式球磨机中以  $320\text{ r}/\text{min}$  的转速充分混合 8 h, 干燥、过筛后获得混合均匀的陶瓷粉<sup>[23-24]</sup>。接着, 将造孔剂 (粉体质量的 4%) 与光敏树脂、光引发剂 (树脂质量的 3%) 及分散剂 (粉体质量的 4%) 在真空搅拌机中以  $1500\text{ r}/\text{min}$  转速混合 10 min, 制得预混树脂。随后, 将上述陶瓷粉与预混树脂在真空搅拌机中以  $1800\text{ r}/\text{min}$  转速混合 20 min, 得到  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料。最后使用 Autocera-M 型 DLP 成形设备 (北京十维科技有限公司) 测试  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料的固化深度并打印出陶瓷素坯, 其中, 抗弯强度素坯模型设置为  $45\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。

## 1.3 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷制备

基于陶瓷素坯的热重曲线, 分别在有机物质开始分解以及分解速率最高的温度点处 ( $340$ 、 $413$ 、 $500\text{ }^\circ\text{C}$ ) 设置保温时间 (2 h), 获得了最合适的脱脂曲线 (见图 1(a)), 并在  $600\text{ }^\circ\text{C}$  下保温 2 h 完成脱脂, 脱脂过程在流通的  $\text{N}_2$  保护下进行。接着, 在空气氛围中, 以  $3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的升温速率从室温升至  $600\text{ }^\circ\text{C}$  并保温 2 h, 排除脱脂后的残炭。最终, 脱脂后的样品在  $\text{N}_2$  气氛及  $0.6\text{ MPa}$  气压条件下, 以  $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  升温速率, 在  $1750\text{ }^\circ\text{C}$  下烧结 2 h, 制得多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷样品<sup>[25-26]</sup>, 烧结曲线如图 1(b) 所示。

德排水法计算  $\text{Si}_3\text{N}_4$  样品开孔隙率, 所有测试均进行 3 次平行实验并取平均值。此外, 使用 E1000 型电子万能试验机对陶瓷样件进行三点弯曲测试以评估其抗弯强度, 其中, 压头下降速率为  $0.5\text{ mm}/\text{min}$ , 跨距为  $30\text{ mm}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 多元光敏树脂对 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料流变性能和固化性能的影响

多元光敏树脂对陶瓷浆料性能的影响是单体结

构-微观作用-宏观性能的多级联动过程,通过合理选择单体类型及配比,可实现流变性能与固化性能的协同优化<sup>[27-29]</sup>。本工作通过高速真空搅拌制备系列 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料(组号C0-C4),用于探究陶瓷浆料的流变性能和固化性能。

图2为不同树脂配方的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料的流变特性曲线。结果表明,5种配方浆料均呈现典型的剪切变稀行为,即随着剪切速率的增大,浆料黏度先急剧下降,随后趋于稳定。当剪切速率为 $40\text{ s}^{-1}$ 时,浆料黏度分别为 $0.33$ 、 $0.26$ 、 $0.45$ 、 $0.41$ 、 $0.46\text{ Pa}\cdot\text{s}$ (见图2局部放大图)。其中,C1组(HDDA与TMP3EOTA二元混合树脂)浆料设置为空白对照组,在剪切速率范围内表现出最低黏度值,其优异的流变性能归因于双官能度HDDA分子(分子量 $226\text{ g/mol}$ )中羟基对陶瓷粉体的化学吸附作用,及其自身低黏度特性,实现了粉体的均匀分散。而与HDDA相比,单官能度IBOA与AMCO虽具有相似的黏度,但其分子量相对较低,分别为 $208.3\text{ g/mol}$ 和 $141.17\text{ g/mol}$ ,在同等质量下IBOA和ACMO单体分子含量较多,黏度较大。相对地,C4组添加了DPHA单体的陶瓷浆料黏度最高,这主要源于六官能度DPHA的高黏度属性( $3000\sim 7000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ )以及长分子链特性,增加了分子链间缠绕的概率,进而提升了浆料体系的内摩擦阻力<sup>[30]</sup>。其余组添加了低官能度树脂单体的陶瓷浆料黏度均小于C4组,表现出良好的流动性。综合陶瓷浆料的流变性能分析,所有实验组浆料均表现出明显的非牛顿流体特性,且在 $40\text{ s}^{-1}$ 剪切速率下的黏度值均低于 $2\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,满足DLP用低黏度陶瓷浆料的成形要求。

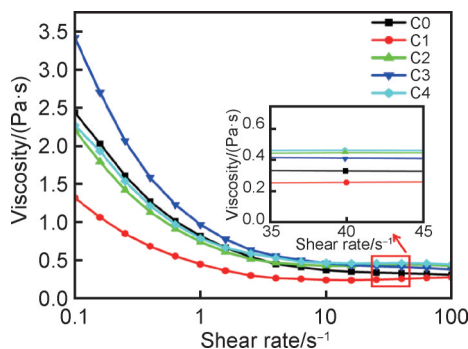


图2 不同树脂配方的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料流变特性曲线

Fig.2 Rheological property curves of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  slurries with different resin formulations

图3展示了不同光敏树脂配方的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料在激光功率和曝光时间分别为 $15\text{ mW/cm}^2$ 和 $7\text{ s}$ 下的单层固化深度。由图可见, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料单层固化深

度依次表现为 $\text{C3(含ACMO)} > \text{C4(含DPHA)} > \text{C2(含TPGDA)} > \text{C1(二元树脂)} > \text{C0(含IBOA)}$ 组。其中,C0组 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料固化深度最低,为 $18.2\text{ }\mu\text{m}$ ;C3组 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料固化深度最高,达 $35.5\text{ }\mu\text{m}$ ,较C0组提升约95%。这种差异主要归因于ACMO与IBOA分子的结构差异,ACMO分子中无强共轭基团,从而对紫外光的吸收系数更低,紫外光穿透浆料的深度显著提高;同时,吗啉环所具有的强供电子特性可稳定光引发剂分解所产生的自由基,从而降低聚合引发的能量阈值<sup>[31]</sup>。此外,C4组 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料固化深度为 $30.3\text{ }\mu\text{m}$ ,略低于C3组,这可能是由于六官能度单体DPHA双键密度较高,当 $405\text{ nm}$ 波长的紫外光照射到浆料表面,光引发剂快速分解引发链式反应,因交联固化反应过快易导致部分双键被固定在交联网络中未参与反应,从而限制了 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料固化深度的提升<sup>[32]</sup>。C2组 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料含有TPGDA树脂单体,TPGDA具有适中的流动性和官能度数量,在光固化过程中双键较易扩散,相较于C1(HDDA:TMP3EOTA)二元光敏树脂组,固化深度提升了18.9%,为 $27.7\text{ }\mu\text{m}$ 。然而,C0组含有IBOA树脂单体的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料固化深度仅为 $18.2\text{ }\mu\text{m}$ ,这主要与IBOA分子结构相关,IBOA分子由丙烯酸酯基团和异冰片基团通过单键(O—C键)相连形成共轭基团,对紫外光吸收率较大;其次,单官能度单体IBOA在发生交联固化反应时主要以线性链增长,无法通过交联网络进行固化,导致固化效率低,综合影响浆料固化深度提升。

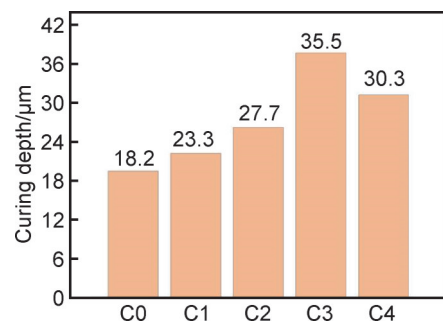


图3 不同 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料在 $7\text{ s}$ 曝光时间和 $15\text{ mW/cm}^2$ 激光功率下的单层固化深度

Fig.3 Single-layer curing depth of different  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic slurries under  $7\text{ s}$  exposure time and  $15\text{ mW/cm}^2$  laser power

## 2.2 分散剂对 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料流变性能和固化性能的影响

基于上述多元光敏树脂配方的研究结果,选用C3树脂配方(HDDA:TMP3EOTA:ACMO=3:1:2)进行后续实验, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料中仅设分散剂种类、添加量作为本研究的变量。图4为分别添加4种类别分散

剂的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料在不同剪切速率下的黏度曲线,通过改变剪切速率,进一步探究分散剂种类对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料流变性能的影响。结果表明,随着剪切速率的增加,浆料的黏度呈现先大幅下降后趋于稳定的趋势,表明分散剂在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料中的分散效果良好。这是由于在剪切力作用下,浆料内部的弱相互作用结构被破坏,从而减小流动阻力,出现剪切变稀行为。其中,含有 AG-102 分散剂的陶瓷浆料黏度最高,在剪切速率为  $40 \text{ s}^{-1}$  时,黏度依然高达  $5.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。当固定剪切速率为  $40 \text{ s}^{-1}$  时,含有分散剂 Solsperser 41000、BYK-163 或 DK-160 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料均表现出较低的黏度,分别为  $0.24$ 、 $0.27 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  和  $0.18 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,表明上述 3 种分散剂下粉体具有最佳的分散性,且浆料黏度  $< 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,满足 DLP 对浆料流变性能的要求。

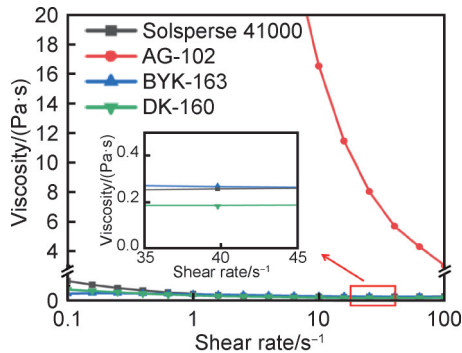


图 4 添加不同种类分散剂的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  浆料流变特性曲线  
Fig.4 Rheological property curves of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  slurries with different types of dispersants

分散剂对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料的稳定性具有重要的影响,其本质是稳定机制强度与适配性的差异。本工作设置静态沉降实验以探究不同分散剂的浆料稳定特性。图 5 展示了添加不同种类分散剂 (AG-102、Solsperser 41000、BYK-163 和 DK-160) 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料在静置 0 h 与 72 h 后的沉降情况。由图 5(a) 可知,AG-102 分散剂对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  粉体的分散效果最差,在相同实验条件下无法制备出可用于后续实验的浆料,这与图 4 中浆料的高黏度相互印证。其原因可能是 AG-102 的锚固基团与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  粉体表面的结合力较弱,导致分散剂难以有效吸附于粉体表面,进而削弱了分散作用。而其余 3 种分散剂 (Solsperser 41000、BYK-163、DK-160) 均能赋予  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料良好的流动性,且沉降实验显示,静置 72 h 后 3 种浆料均未出现明显沉降现象,表明其分散效果良好 (见图 5(b))。进一步,相比 BYK-163、DK-160 分散剂,含有 Solsperser 41000 分散剂的陶瓷浆料上清液比例更低,表明其具有更好的沉降稳定性。高分子型分散剂的主要稳定机制为空间位阻,这是由于较高的分子量使其能在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  颗粒表面形成较厚的空间位阻层,从而有效阻碍颗粒间的团聚,实现浆料高稳定性存在<sup>[33]</sup>。虽然添加 DK-160 分散剂的浆料表现出较低的黏度,但其稳定性低于添加 Solsperser 41000 分散剂的浆料,且 DK-160 还具有刺激性气味,或不适于特定实验人员使用。经综合考虑,选择稳定性和流变性都较好的分散剂 Solsperser 41000 进行后续实验。

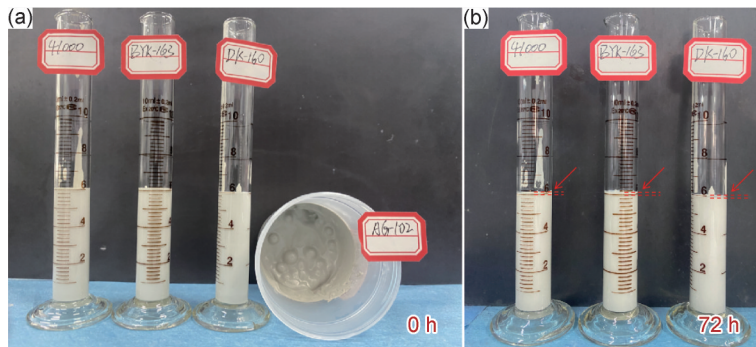


图 5 不同种类分散剂在 0 h (a) 和 72 h (b) 的沉降情况

Fig.5 Sedimentation behavior of different types of dispersants at 0 h (a) and 72 h (b)

图 6 为添加了不同含量分散剂 Solsperser 41000 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料流变曲线。由图可见,所有样品随着剪切速率的提升,浆料黏度呈现先大幅降低后趋于平稳的趋势,均符合剪切变稀行为。在  $40 \text{ s}^{-1}$  剪切速率下,随着分散剂 Solsperser 41000 含量的增加,浆料黏度先从  $0.25 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (2%) 降低至  $0.16 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (3%) 后增加至  $0.39 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (6%),表现出先减小后增大的趋势。这主

要与分散剂的性质和添加量有关,Solsperser 41000 是一种基于空间位阻稳定技术的超分散剂<sup>[33]</sup>,分散稳定机制如图 7 所示。当添加分散剂含量较低时 (图 7(a)), Solsperser 41000 分子无法完全覆盖  $\text{Si}_3\text{N}_4$  颗粒表面。此时,颗粒之间存在较多的未被覆盖区域,所形成的空间位阻屏障较弱,容易通过范德华力等相互作用发生团聚,导致  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料黏度偏高。当添加分散剂

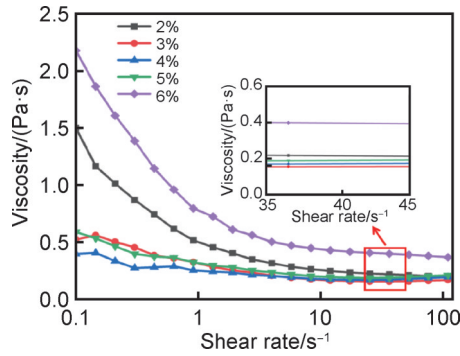


图6 不同含量分散剂 Solsperser 41000 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料在不同剪切速率下的黏度

Fig.6 Viscosity of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic slurries with different contents of dispersant Solsperser 41000 at different shear rates

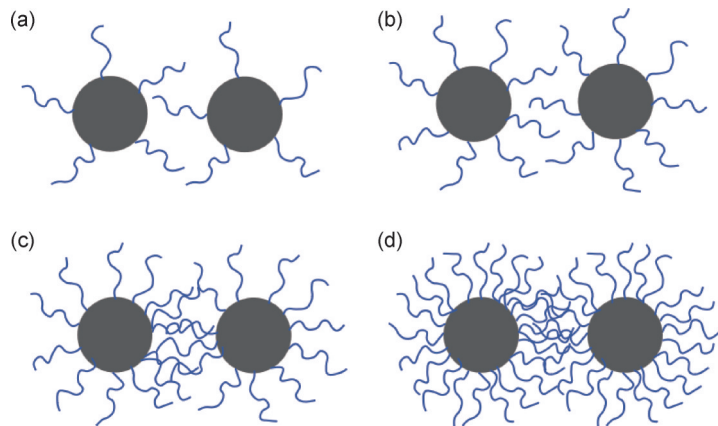


图7 不同 Solsperser 41000 分散剂含量下空间位阻稳定机制

(a)2%;(b)3%;(c)4%;(d)5%~6%

Fig.7 Steric hindrance stabilization mechanism under different contents of dispersant Solsperser 41000

(a)2%;(b)3%;(c)4%;(d)5%-6%

图8为不同含量 Solsperser 41000 分散剂下  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料单层固化深度曲线。由图可见,随着分散剂含量从粉体质量的2%增加至6%, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料的固化深度从32.23  $\mu\text{m}$ 先提高至36.75  $\mu\text{m}$ 后降低至33.22  $\mu\text{m}$ ,表现出先增加后降低的趋势。这一规律与分散剂对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  粉体分散状态密切相关。在光固化陶瓷浆料的制备过程中, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷粉体因具有较高的表面能,易于团聚,当添加分散剂含量不足时, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料中团聚颗粒含量较多,陶瓷颗粒团聚体不仅会锁住部分树脂或分散剂导致浆料黏度升高,还对紫外光具有显著的散射作用,导致紫外光能量在浆料内部快速衰减,影响固化深度增加。当分散剂用量处于适当值时,通过空间位阻分散机制使粉体均匀分散,此时浆料体系的光散射截面减小,入射光可穿透更深距离,从而直接增加固化深度。当分散剂用量过高时,过量的 Solsperser 41000 分子会在浆料中发生缠绕导致黏度回升,同时游离的分散剂分子还可能与光引发剂竞争吸收光能、阻碍光敏树脂单体的交联固化反

含量至粉体的3%时(图7(b)),Solsperser 41000分子逐渐在  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 颗粒表面形成完整且均匀的吸附层,这些吸附层中的高分子链段在浆料中充分伸展,形成有效的空间位阻屏障,这种空间位阻效应能够使颗粒间保持特定距离,从而达到在浆料中均匀分散的效果,有效提高了浆料的流动性。当分散剂含量增至4%~6%时(图7(c),(d)),过量的 Solsperser 41000 分子可能会在粉体表面堆叠吸附,或者在浆料中发生高分子链段自身缠结,引起颗粒的团聚,从而使  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 浆料黏度升高。综上,当分散剂添加量为粉体质量的3%时,陶瓷浆料中颗粒间成功实现了最优的空间位阻效应,具有最低的黏度(0.16  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,40  $\text{s}^{-1}$ )。

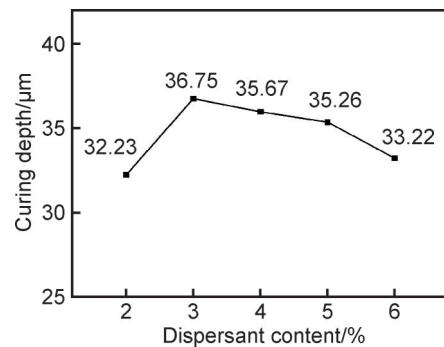


图8 不同 Solsperser 41000 分散剂含量下  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料单层固化深度

Fig.8  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic slurries single-layer curing depth under different contents of dispersant Solsperser 41000

应,最终造成固化深度下降。本工作通过实验优选 Solsperser 41000 分散剂添加量为粉体质量的3%时, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料获得最大的固化深度,为36.75  $\mu\text{m}$ 。

### 2.3 成形参数对 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷浆料固化性能的影响

前期研究结果表明,陶瓷素坯的成形质量和精度与 DLP 工艺中激光功率和曝光时间参数密切相关。当激

光功率或曝光时间过高时,将出现陶瓷浆料过固化现象,此时,不仅对陶瓷素坯精度产生影响,还会存在内部应力,在后处理过程中因应力释放会出现弯曲、裂纹等缺陷;当激光功率或曝光时间过低时,将导致浆料固化深度不足,容易出现打印掉件或分层现象,从而使陶瓷素坯成形困难。因此,调控DLP成形参数至关重要。

图9展示了在10~30 mW/cm<sup>2</sup>激光功率下,曝光时间对Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷浆料(3% Solsperse 41000分散剂)单层固化深度的影响曲线。从图中可以看出,由于多元光敏树脂配方差异,不同组别浆料固化深度及增长速率各不相同,而激光功率、曝光时间与Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷浆料固化深度呈正相关关系。以曝光时间为3 s的C1组为例(图9(a)),当激光功率从10 mW/cm<sup>2</sup>提升至20 mW/cm<sup>2</sup>时,浆料固化深度显著增加,其单层固化

深度从15.75 μm上升至24.5 μm,增幅达55.56%;而当激光功率继续增至30 mW/cm<sup>2</sup>时,固化深度进一步提升至25.68 μm,增加幅度下降至4.82%,增加速度较缓,此时的固化深度或接近最大值。这可以归因于Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷浆料在较低激光功率时,随着激光功率的升高,光引发剂吸收光能的效率提高,大量自由基快速生成,聚合反应在短时间内覆盖更大范围,从而表现为浆料固化深度快速增加<sup>[34]</sup>。而当激光功率较高时,光引发剂已接近完全分解,进一步增加激光功率,自由基数量增加缓慢,此时,若没有足够的时间来累积曝光能量很难再显著提高浆料固化深度。因此,将曝光时间提升为9 s时(图9(d)),C1组陶瓷浆料在10、20、30 mW/cm<sup>2</sup>下的固化深度分别为20.25、26.25 μm和28 μm,相比曝光时间为3 s的浆料固化深度,其增加幅度分别为28.57%、7.14%和9.03%。

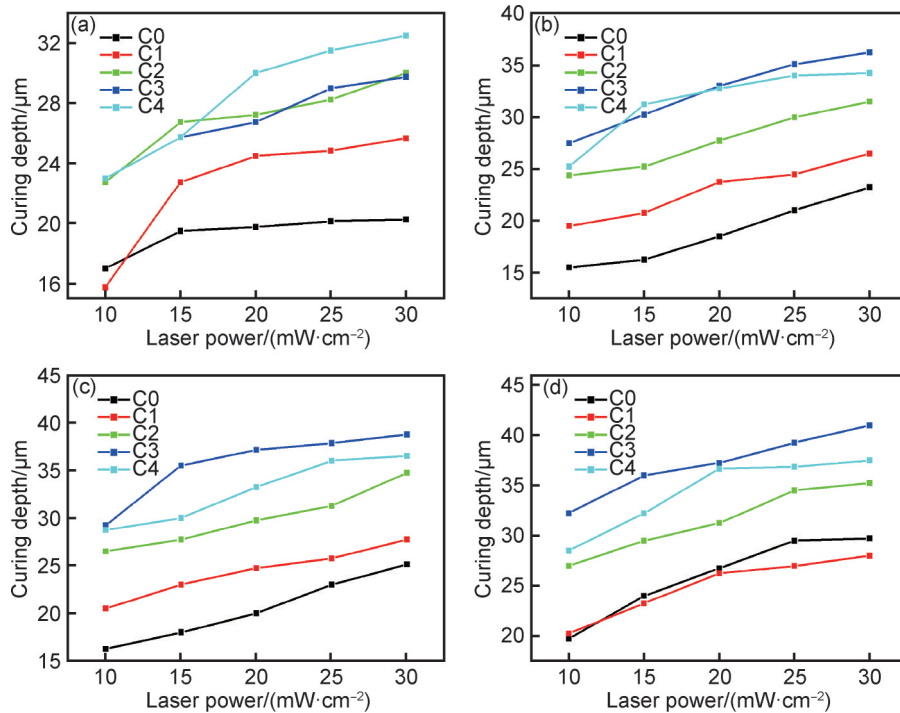


图9 曝光时间对Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷浆料固化深度的影响曲线

(a)3 s;(b)5 s;(c)7 s;(d)9 s

Fig.9 Effect of exposure time on curing depth of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic slurries

(a)3 s;(b)5 s;(c)7 s;(d)9 s

由于不同组别Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷浆料的树脂配方不同,所含有的官能度存在差异(即不饱和C=C双键数量不同),导致整体浆料固化深度有所差异,整体上看,在满足浆料固化性能要求条件下,固化深度从高到低依次为:C3>C4>C2>C1>C0(图9(c))。此外,单纯增大激光功率和曝光时间并不能无限增加固化深度,反而在超过适当值时出现过固化现

象,导致陶瓷素坯收缩应力大、成形精度低。当优化激光功率和曝光时间分别为15 mW/cm<sup>2</sup>和7 s时,Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷浆料固化深度为36.75 μm,在满足光固化成形所需固化深度要求的同时具有最高的成形精度。

基于上述对多元光敏树脂、分散剂以及成形参数对Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷浆料性质影响的研究,选择具有高流变性

能和固化性能的三元光敏树脂配方 HDDA:TMP3EOTA:ACMO=3:1:2 为混合树脂,优选添加量为粉体质量 3% 的 Solsperse 41000 为浆料分散剂,

并且,选用激光功率和曝光时间分别为  $15 \text{ mW/cm}^2$  和 7 s。最终,通过 DLP 成形出如图 10 所示的复杂结构  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷素坯。

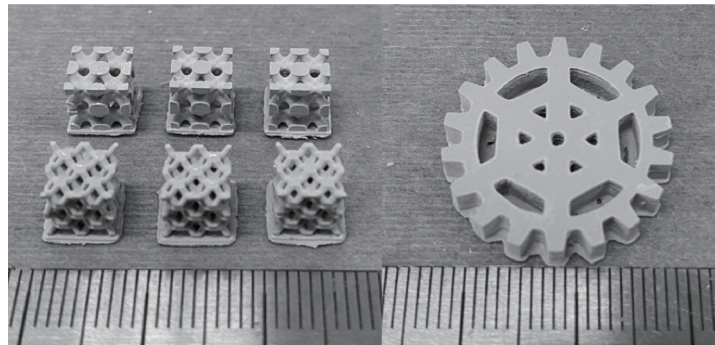


图 10 DLP 成形复杂结构  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷素坯

Fig.10 DLP-formed  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic green bodies with complex structures

通过两步排胶结合气压烧结工艺,成功制备出多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷。图 11 为该多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的 XRD 图谱,分析可知,陶瓷的主要物相为  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,同时存在少量玻璃相。这主要是由于在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  烧结助剂的帮助下粉体发生液相烧结,在此过程中, $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  发生相转变成成为  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  相,而 Al、Y 等元素以残余玻璃相形式少量存在。图 12 呈现了多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷断面的微观形貌。从图 12(a) 可以观察到,PS 经高温分解后留下的大孔洞在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷内部均匀分布,为陶瓷提供了充足的孔隙结构。与此同时, $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  在高温环境中经历了溶解-析出-晶粒长大的过程,由于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  具有各向异性生长特性,最终形成了长棒状的  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  晶粒。这些长柱状颗粒相互交错、搭接,使得陶瓷的断裂方式为穿晶断裂与沿晶断裂共同作用(图 12(b)),这种复合断裂方式在一定程度上有助于提升陶瓷的力学性能。

综上,通过上述工艺成功制备出综合性能良好的多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷,其孔隙率为 18.76%,抗弯强度达 240.28 MPa,综合性能优于国内外部分相关研究成果(见表 2<sup>[23,35-38]</sup>)。

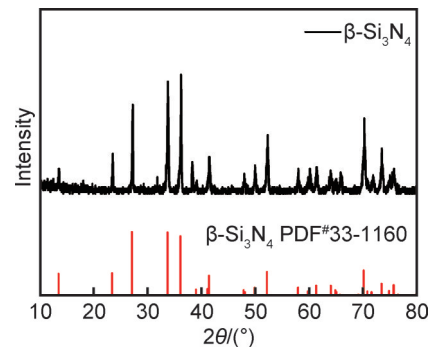


图 11 多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷 XRD 谱

Fig.11 XRD patterns of porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics

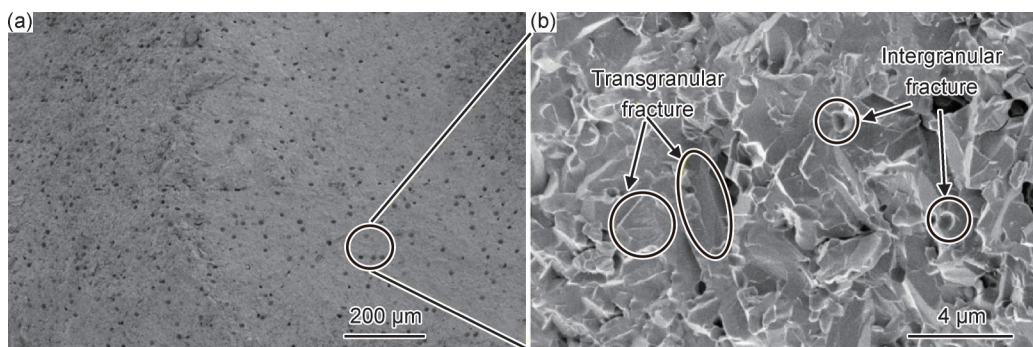


图 12 多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷断面微观形貌(a)及局部放大图(b)

Fig.12 Cross-sectional microstructure(a) and local magnified image(b) of porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic

### 3 结论

(1) 确定了多元光敏树脂基体,即采用 HDDA、TMP3EOTA 与 ACMO 树脂单体以质量比 3:1:2 进

行充分混合,所配制陶瓷浆料在  $40 \text{ s}^{-1}$  剪切速率下黏度低至  $0.26 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,并且在  $15 \text{ mW/cm}^2$  激光功率、7 s 曝光时间下单层固化深度达  $35.5 \mu\text{m}$ ,同比 IOBA 体系,浆料固化深度提升 95%,满足  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷复杂结构光固

表 2 DLP 成形  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷性能对比Table 2 Performance comparison of DLP-formed  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics

No.	Flexural strength/MPa	Porosity/%	Reference
1	234.0	13.23	[23]
2	149.2	14.6	[35]
3	184.88	12.6	[36]
4	210.08	16.2	[37]
5	114.05	14.25	[38]
6	240.28	18.76	This work

化成形要求。

(2) 优选了分散剂 Solspere 41000 及其含量(粉体质量 3%), 阐明了分散剂在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料中的空间位阻稳定机制, 实现浆料稳定性、流变性和固化性协同优化, 在剪切速率为  $40 \text{ s}^{-1}$  时, 浆料黏度仅为  $0.16 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 此时, 固化深度提升至  $36.75 \mu\text{m}$ 。

(3) 优化了光固化成形中激光功率和曝光时间, 由于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料的固化特性, 其单层固化深度随着曝光时间以及激光功率的升高表现出先快速后缓慢的上升趋势。当激光功率和曝光时间分别为  $15 \text{ mW}/\text{cm}^2$  和  $7 \text{ s}$  时,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料兼具高固化深度和成形精度。

(4) 选用质量比为 3:1:2 的 HDDA、TMP3EOTA 与 ACMO 三元混合树脂、粉体质量 3% 的 Solspere 41000 分散剂制备出  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷浆料, 在  $15 \text{ mW}/\text{cm}^2$  激光功率和  $7 \text{ s}$  曝光时间下, 成功制备出复杂结构  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷素坯, 最后, 通过两步排胶结合气压烧结工艺得到孔隙率为 18.76%, 抗弯强度为  $240.28 \text{ MPa}$  的多孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷。

### 参考文献

- [1] 滕家琛, 李乔磊, 梁静静, 等. 氮化硅陶瓷在航空航天领域的研究进展及应用[J]. 航空制造技术, 2025, 68(12): 106-120.  
TENG J C, LI Q L, LIANG J J, et al. Research progress and application of silicon nitride ceramics in aerospace field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(12): 106-120.
- [2] 刘胜, 刘文进, 满延进, 等. 氮化硅陶瓷材料高温抗热震性能及其衰减规律研究[J]. 现代技术陶瓷, 2023, 44(增刊 1): 451-460.  
LIU S, LIU W J, MAN Y J, et al. Study on thermal shock resistance and attenuation law of silicon nitride ceramic materials at high temperature[J]. Advanced Ceramics, 2023, 44(Suppl 1): 451-460.
- [3] GONG Z Y, XU Z K, ZHANG J, et al. The microstructure and mechanical properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}/\text{SiBCN}$  microcomposites fabricated by the PIP process[J]. Materials, 2024, 17(10): 2457.
- [4] XU H W, ZHAO L F, CHEN X X, et al. Efficient degradation of antibiotics by metal-free piezo-catalysts: kinetics, mechanism and toxicity assessment[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 294: 120085.
- [5] 周张燕, 洪梦金, 马北越, 等. 氮化硅添加量对氧化镁材料制备及性能影响[J/OL]. 耐火与石灰, 2025: 1-6. (2025-08-14). <https://link.cnki.net/doi/10.16425/j.cnki.1673-7792.20250814.001>.
- [6] ZHOU Z Y, HONG M J, MA B Y, et al. Effect of silicon nitride addition on preparation and properties of magnesia materials[J/OL]. Refractories & Lime, 2025: 1-6. (2025-08-14). <https://link.cnki.net/doi/10.16425/j.cnki.1673-7792.20250814.001>.
- [6] 唐艳东, 马北越. 氮化硅陶瓷烧结致密化的研究进展[J]. 耐火与石灰, 2021(5): 35-38.  
TANG Y D, MA B Y. Research progress on sintering densification of silicon nitride ceramic[J]. Refractories & Lime, 2021(5): 35-38.
- [7] ZHANG H Q, LIU Q, ZHANG B, et al. A comparative study on dielectric and mechanical properties of porous  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  ceramics by controlling porosity and microstructure[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42(3): 905-912.
- [8] ZHANG H, YAO D X, ZHU M, et al. Porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics with uniform microstructure fabricated by *in-situ* pre-gel casting combined with non-directional freeze-drying[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(10): 117369.
- [9] 崔雪峰, 许泽水, 姚远洋, 等. 颗粒级配对  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$  复合材料弯曲强度与介电性能的影响[J]. 材料工程, 2022, 50(10): 29-37.  
CUI X F, XU Z S, YAO Y Y, et al. Effect of particle gradation on flexural strength and dielectric property of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$  composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(10): 29-37.
- [10] 袁轶, 谭划, 杨廷旺, 等. 多孔陶瓷的制备方法及其研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2687-2701.  
YUAN Q, TAN H, YANG T W, et al. Preparation methods and research status of porous ceramics[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(8): 2687-2701.
- [11] XIAO T, CHEN Y, LI Q, et al. All digital light processing-3D printing of flexible sensor[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(2): 2201376.
- [12] 马北越, 张博文, 于景坤, 等. 3D 打印技术及先进应用研究进展[J]. 材料研究与应用, 2016, 10(4): 233-237.  
MA B Y, ZHANG B W, YU J K, et al. Research progress on 3D printing technologies and advanced applications[J]. Materials Research and Application, 2016, 10(4): 233-237.
- [13] LIU Y L, GENG W Z, WANG L N, et al. Designing MXene hydrogels for flexible and high-efficiency electromagnetic wave absorption using digital light processing 3D printing[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 505: 159489.
- [14] 陈张伟. 多孔陶瓷的增材制造及构性表征与关系研究[J]. 现代技术陶瓷, 2021, 42(1): 43-63.  
CHEN Z W. Additive manufacturing of porous ceramics, structure-property characterization and relationship[J]. Advanced Ceramics, 2021, 42(1): 43-63.
- [15] 顾薛芬, 殷杰, 崔崇, 等.  $\text{C}_f/\text{SiC}$  复合材料的原料高效改性及其 3D 打印制备研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2022, 43(4): 229-245.  
GU X S, YIN J, CUI C, et al. Research progress on efficient modification of  $\text{C}_f/\text{SiC}$  composites and 3D printing preparation[J]. Advanced Ceramics, 2022, 43(4): 229-245.
- [16] 陈舒怡, 陈双, 吴甲民, 等. 煤系高岭土光固化浆料的流变性能[J]. 材料工程, 2020, 48(3): 142-147.

- CHEN S Y, CHEN S, WU J M, et al. Rheological properties of photocurable coal-series kaolin slurry[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(3): 142-147.
- [17] WU X Q, XU C J, ZHANG Z M. Preparation and optimization of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic slurry for low-cost LCD mask stereolithography[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(7): 9400-9408.
- [18] 李萌. 基于粉体包覆改性的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷 DLP 成形及其性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- LI M. Preparation and properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics *via* digital light processing using  $\text{Si}_3\text{N}_4$  powder coated with sintering additives[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [19] ZHANG K Q, HE R J, XIE C, et al. Photosensitive  $\text{ZrO}_2$  suspensions for stereolithography[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(9): 12189-12195.
- [20] ZOU W J, YANG P, LIN L F, et al. Improving cure performance of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  suspension with a high refractive index resin for stereolithography-based additive manufacturing[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(9): 12569-12577.
- [21] DONG D, SU H J, LI X, et al. Influences of curing depth and layer thickness on forming accuracy and mechanical properties of biphasic calcium phosphate bioceramics fabricated by vat photopolymerization[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 124: 1227-1238.
- [22] 古丽娜, 刘耀, 胡文, 等. 光固化工艺参数对氮化硅陶瓷成型性能的影响[J]. *中国陶瓷工业*, 2024, 31(1): 6-10.
- ZHAN L N, LIU Y, HU W, et al. Effect of UV curing process parameters on molding properties of silicon nitride ceramics[J]. *China Ceramic Industry*, 2024, 31(1): 6-10.
- [23] WANG Q W, WU J M, TIAN C, et al. Preparation and properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics *via* vat photopolymerization using  $\text{Si}_3\text{N}_4$  powders coated with bowl-like boehmite[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 84: 104137.
- [24] MAO G X, WU J M, TIAN C, et al.  $\text{ZrO}_2$  reinforced porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -based ceramics with improved mechanical properties fabricated *via* vat photopolymerization (VPP)[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 91: 104327.
- [25] TIAN C, WU J M, WU Y R, et al. Effect of polystyrene addition on properties of porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics fabricated by digital light processing[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(16): 27040-27049.
- [26] LI W K, ZHANG R Z, WU J M, et al. Optimizing AlN hydrolysis process to fabricate coated modified powders for improving the properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiAlON}$  ceramics prepared by Vat Photopolymerization[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 94: 104460.
- [27] 肖明辉, 亓浩, 李庆党. 面向 DLP 增材制造氧化锆陶瓷构件的光敏树脂体系研究[J]. *陶瓷*, 2025(5): 25-30.
- XIAO M H, QI H, LI Q D. Research on photosensitive resin system for DLP additive manufacturing of zirconia ceramic components[J]. *Ceramics*, 2025(5): 25-30.
- [28] 夏子靖, 刘恒源, 韩平, 等. 陶瓷光固化成型技术及材料的研究进展[J]. *佛山陶瓷*, 2025, 35(4): 1-6, 10.
- XIA Z J, LIU H Y, HAN P, et al. Research progress of ceramic photocuring molding technology and materials[J]. *Foshan Ceramics*, 2025, 35(4): 1-6, 10.
- [29] MA H W, LI X Z, DING X, et al. Preparation and characterization of excellent performance photosensitive resin suitable for photocuring 3D printing[J]. *Journal of Polymer Science*, 2025, 63(16): 3456-3467.
- [30] SATHISSARAT J H, CHU L R, DANSO R, et al. Development of a difunctional oxirane and multifunctional acrylate interpenetrating polymer network composite system with antimicrobial properties[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(31): 50773.
- [31] OKORUWA L, TARAK F, SAMENI F, et al. Bridging experimentation and computation: OMSP for advanced acrylate characterization and digital photoresin design in vat photopolymerization[J]. *Polymers*, 2025, 17(2): 203.
- [32] 廖勇, 谭兵, 陈三林, 等. 多官能度光活性单体对塑胶 UV 光油性能影响研究[J]. *家电科技*, 2020(4): 54-56.
- LIAO Y, TAN B, CHEN S L, et al. Research on the effect of multifunctional photoactive monomer on the properties of plastic UV varnish[J]. *Journal of Appliance Science & Technology*, 2020(4): 54-56.
- [33] 周庆旋, 汪洋, 韩卓群, 等. 氮化硅陶瓷光固化 3D 打印成形研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(5): 1588-1599.
- ZHOU Q X, WANG Y, HAN Z Q, et al. Research progress of stereolithography 3D printing of silicon nitride ceramics[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(5): 1588-1599.
- [34] 李萌, 黄海露, 吴甲民, 等. 浆料固相含量对数字光处理成形  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷性能的影响[J]. *无机材料学报*, 2022, 37(3): 310-316.
- LI M, HUANG H L, WU J M, et al. Effect of solid loading of slurry on properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics formed by digital light processing[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2022, 37(3): 310-316.
- [35] LI M, HUANG H L, WU J M, et al. Preparation and properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics *via* digital light processing using  $\text{Si}_3\text{N}_4$  powder coated with  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  sintering additives[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 53: 102713.
- [36] 金波成. 氮化硅陶瓷的光固化 3D 打印制备及力学性能研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
- JIN B C. Digital light processing 3D printing of silicon nitride ceramic and its mechanical properties[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2022.
- [37] ZHOU F L, WU J M, TIAN C, et al. Effect of thermosetting resin coating modification on the properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics prepared by vat photopolymerization[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(13): 7465-7473.
- [38] 李俊生, 李端, 李学超, 等. 3D 打印天线罩技术研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(22): 80-89.
- LI J S, LI D, LI X C, et al. Technological advances in 3D printing of radomes[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(22): 80-89.

收稿日期: 2025-09-28; 录用日期: 2025-10-23

通讯作者: 吴甲民(1984—), 男, 教授, 博士, 研究方向为陶瓷增材制造及其应用, 联系地址: 湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学材料科学与工程学院(430074), E-mail: jiaminwu@hust.edu.cn

(本文责编: 齐书涵)