

增材制造 SiC 陶瓷反射镜的研究进展

李 伟^{1,2,3}, 张 舸^{1,2,3}, 崔聪聪^{1,2,3}, 包建勋^{1,2,3}, 郭聪慧^{1,2,3}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院应用光学国家重点实验室, 长春 130033;
3. 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

摘要:碳化硅陶瓷具有优异的力学性能和良好的热学性能,是制备空间光学反射镜的理想材料之一。传统成型技术制备的 SiC 陶瓷反射镜普遍存在轻量化程度低、制备周期长等问题,难以满足空间光学系统的发展需求。当前,增材制造技术展现了其在低成本、短周期制备超轻型反射镜方面的巨大潜力。本文首先对常见的反射镜材料特性进行了对比;然后,综述了 SiC 陶瓷反射镜增材制造成型技术的研究进展,并详细论述了 SiC 陶瓷反射镜制备过程的组分设计、制备工艺、致密化方法等,总结了增材制造技术制备 SiC 陶瓷反射镜的技术路线;最后,对 SiC 陶瓷反射镜增材制造制备技术的未来发展提出展望。

关键词:碳化硅; 反射镜; 增材制造; 力学性能; 热学性能; 轻量化结构

中图分类号:TQ174

文献标志码:A

文章编号:1001-1625(2024)07-2661-11

DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2024.07.028

Research Progress of Additive Manufacturing SiC Ceramic Mirror

LI Wei^{1,2,3}, ZHANG Ge^{1,2,3}, CUI Congcong^{1,2,3}, BAO Jianxun^{1,2,3}, GUO Conghui^{1,2,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. State Key Laboratory of Applied Optics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: SiC ceramics have excellent mechanical properties and good thermal properties, and are one of the ideal materials for preparing space optical mirrors. SiC ceramic mirrors prepared by traditional forming technology generally have problems such as low light weight and long preparation cycle, which are difficult to meet the development needs of space optical systems. At present, additive manufacturing technology shows its great potential in the preparation of ultra-lightweight mirrors with low cost and short cycle. In this paper, the material properties of common mirrors are compared firstly. Then, the research progress of additive manufacturing technology for SiC ceramic mirrors is reviewed. The component design, preparation process and densification method of SiC ceramic mirrors preparation process are discussed in detail, and the technical route of SiC ceramic mirrors prepared by additive manufacturing technology is summarized. Finally, the future development of additive manufacturing technology for SiC ceramic mirrors is prospected.

Key words: SiC; mirror; additive manufacturing; mechanical property; thermal property; lightweight structure

0 引 言

碳化硅(SiC)具有高弹性模量、高强度、高热导率、低密度等优异性能,成为制备空间光学反射镜的主要候选材料之一^[1]。随着空间遥感与测量技术的不断进步,光学系统向着轻质、灵巧、高分辨率方向发展。反射镜是光学系统的主要部件,实现反射镜的轻量化制备是提高光学系统性能的有效手段^[2-3]。凝胶注模成型、等静压成型、注浆成型等传统成型技术无法实现复杂结构陶瓷的制备,导致现有的拓扑结构、点阵结构、极小曲面结构等轻量化结构构型妥协于传统成型技术,无法充分发挥优质构型的设计优势。因此,研究碳化硅陶瓷的新型成型技术是十分必要的^[4-5]。

收稿日期:2024-02-29;修订日期:2024-04-10

基金项目:吉林省科技发展计划(20240602018RC;YDZJ202303CGZH024)

作者简介:李 伟(1993—),男,博士,助理研究员。主要从事增材制造制备碳化硅陶瓷的研究。E-mail:liwe199308@126.com

通信作者:张 舸,博士,研究员。E-mail:zhanggeciomp@126.com

相比于等材制造和减材制造等传统成型技术,增材制造摆脱了复杂结构陶瓷制备过程中对模具制备和机械加工的依赖,大幅提高了成型效率和结构复杂度。因此,增材制造技术广受关注,被称为新一代工业革命的驱动引擎^[6-8]。根据 ISO/ASTM 52900:2015 标准,增材制造技术被分为粉末床熔融成型 (powder bed fusion, PBF)^[9-12]、粘结剂喷射成型 (binder jetting, BJ)^[13-15]、直接能量沉积成型 (directed energy deposition, DED)^[16]、薄片层压成型 (sheet lamination, SHL)^[17-18]、材料喷射成型 (material jetting, MJT)^[19-21]、材料挤出成型 (material extrusion, MEX)^[22-25] 和光固化成型 (vat photopolymerization, VPP)^[26-29] 等七种类型。针对树脂材料、金属材料的增材制造成型技术研究,国内外学者已取得了重要进展,部分成果已实现产业化应用^[8]。然而,陶瓷材料的增材制造技术研究尚未成熟,特别是 SiC 陶瓷的增材制造制备技术研究仍属于本领域的前沿热点^[30]。

当前,基于增材制造技术制备 SiC 陶瓷反射镜的研究受到国内外科研院所与高校的广泛关注,相关研究报道主要包括 PBF、BJ、MEX 和 VPP 四大类增材制造成型技术,制备过程涉及粉体处理、复合粉体/浆料制备、强化化与致密化处理等多个工艺过程。需要注意的是,增材制造技术制备的 SiC 反射镜的性能、尺寸等与传统制备技术相比,仍存在较大的差距。

本文分析了增材制造成型方法的工艺特性,归纳了增材制造 SiC 陶瓷性能优化方法,详细阐述了基于增材制造技术制备 SiC 陶瓷反射镜的技术路径,并展望了 SiC 陶瓷反射镜增材制造制备技术的未来发展方向。

1 SiC 陶瓷材料特性

考虑到空间光学系统在力、热、光等多物理场耦合下的服役环境,光学反射镜需具备热尺寸稳定性好、比刚度高、抗辐照能力强等优点。常见的反射镜材料包括:金属铍、微晶玻璃、融石英、碳化硅陶瓷及其复合材料等,表 1 归纳和对比了几种典型的反射镜材料及性能参数^[31]。碳化硅陶瓷具有低线膨胀系数、高热导率、低密度、高弹性模量等优异性能,成为继玻璃材料、金属材料后的第三代空间光学反射镜材料^[31-33]。同时,光学系统中,SiC 既可以制备反射镜,又可以制备支撑结构,能够实现光机结构材料的一致性,有利于消除光学系统服役过程中的热差。由表 1 可以看出,SiC 材料具有高的比刚度和良好的热尺寸稳定性。高比刚度能够避免装备应力及发射过程的冲击振动等对镜面造成影响。同时,由于空间反射镜的装调和服役所受重力不同,高比刚度能够确保反射镜的“天地一致性”。良好的热尺寸稳定性是确保稳定焦距、高质量成像的关键。无论是空间光学反射镜还是地基望远镜,其服役环境较为恶劣,温差变化较大。材料的导热性能高、热膨胀系数低,能够使反射镜快速实现热平衡,减少反射镜在变温环境的热畸变^[31-33]。另外,与金属铍相比,SiC 具有无毒、低成本的优点。因此,SiC 陶瓷成为制作空间光学反射镜的理想材料之一。特别是采用增材制造技术制备 SiC 反射镜时,可有效解决 SiC 机械加工难、制备周期长的问题,是实现 SiC 反射镜短周期、轻量化制备的有效途径。

表 1 典型反射镜材料的性能^[31]
Table 1 Properties of typical mirror materials^[31]

Material	Density/ (g · cm ⁻³)	Elastic modulus/GPa	Specific stiffness/ (kN · mg ⁻¹)	Poisson ratio	Thermal conductivity/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Coefficient of thermal expansion/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)
SiC	3.21	391	121.81	0.14 ~ 0.21	150 ~ 300	2.2 ~ 3.5
ULE	2.21	67 ~ 73	30.32 ~ 33.03	0.17	1.31	0.03
Zerodur	2.53	91	35.97	0.24	1.64	0.05
Fused silica	2.19	72	32.88	0.17	1.4	0.5
Al	2.7	68	25.19	0.33	167	22.5
Be	1.85	287	155	0.043	216	11.4

2 增材制造技术成型 SiC 陶瓷的研究现状

2.1 光固化成型(VPP)技术

光固化成型技术原理如图 1 所示,刮刀将供料系统中的陶瓷浆料在工作台上铺展成一个薄层,在特定波段的光源照射下,陶瓷浆料中的光敏单体发生交联聚合,将陶瓷颗粒固定在聚合的有机物中,陶瓷浆料由液

态转变为固态,工作平台下降一定厚度,重复上述操作,即可实现三维实体的制造。与其他增材制造工艺相比,VPP 技术的成型精度最高,在制备点阵结构、拓扑结构、极小曲面等复杂结构方面更具有优势。

University of Michigan (美国)^[26]、University de Limoges (法国)^[25]、中国科学院空间应用技术与工程中心(简称“空间应用中心”)^[27]、北京理工大学^[28]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称“长春光机所”)^[29]等单位针对光固化技术制备陶瓷构件方面进行了大量的研究工作,结果表明光固化陶瓷浆料需具有高的固化深度、良好的流变学特性、稳定的悬浮性。影响固化深度的关键因素在于陶瓷浆料对光的吸收与折射,固化深度值反比于陶瓷颗粒吸光度,同时,陶瓷与光敏树脂间折射率差越小,固化深度越大。Ding 等^[28,34]针对陶瓷材料的光固化成型与致密化技术进行了相关研究工作,图 2(a)展示了光固化成型结合前驱体浸渍裂解工艺制备的 SiC 反射镜材料。研究表明,相较于氧化物陶瓷, SiC 具有更高的吸光度,在光固化成型过程中难度较大。中国科学院上海硅酸盐研究所的 Chang 等^[35]尝试采用氧化硅代替陶瓷浆料中部分 SiC,后续通过碳热还原法将氧化硅还原为 SiC,经反应烧结致密化后得到图 2(b)所示 SiC 反射镜材料。深圳大学、华中科技大学、西北工业大学等研究人员^[36-38]通过对 SiC 粉末进行氧化处理,在 SiC 表面原位生长出了均匀的 SiO₂ 壳层,该方法有效提高了光敏 SiC 浆料的固化深度。空间应用中心研究人员^[27]采用有机物聚合沉淀法对颗粒表面进行修饰,研究了颗粒与光敏树脂间的润湿行为,使浆料具有良好的流变学特性。Azuma 等^[24]研究了分散剂含量对浆料悬浮性的影响,研究结果表明添加 5% (质量分数) 的分散剂可使浆料满足成型需求。长春光机所张舸等^[29]针对光固化 SiC 陶瓷反射镜材料的制备进行了系统研究,研究了温度、气氛、压力等物理场耦合作用对 SiC 预制体宏/微观缺陷演化机制的影响,研究了碳源前驱体浸渍裂解法对 SiC 反射镜微观组织演化和宏观性能强化机制的影响,研究了碳源结晶度对反应烧结过程中碳和硅反应动力学行为的影响,将光固化 SiC 陶瓷强度、弹性模量等性能分别提升了 35% 和 50% 以上。图 2(c)展示了张舸团队制备的直径为 620 mm 的 SiC 反射镜材料,这是目前已公开报道的光固化技术制备的最大口径 SiC 反射镜材料。

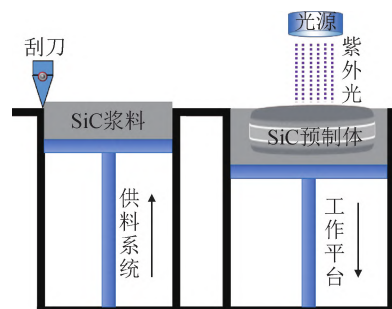


图 1 VPP 技术制备 SiC 陶瓷原理示意图

Fig. 1 Principle schematic diagram of SiC ceramics prepared via VPP technology

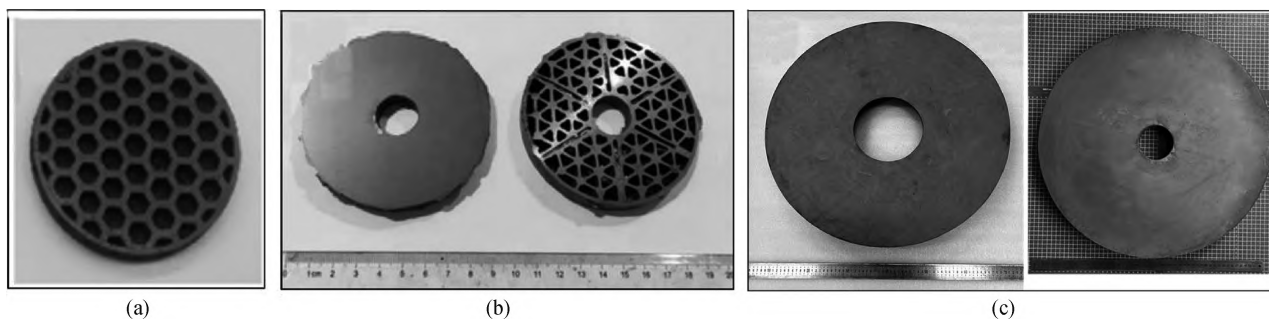


图 2 基于 VPP 技术制备的 SiC 构件。(a) VPP 结合前驱体浸渍裂解致密化的 SiC 陶瓷反射镜材料^[34]; (b) 粒级氧化硅与 SiC 颗粒制备的 SiC 陶瓷反射镜材料^[35]; (c) 620 和 500 mm 口径 SiC 陶瓷反射镜材料

Fig. 2 SiC components fabricated by VPP technology. (a) VPP combined with precursor impregnated pyrolysis densified SiC ceramic mirror material^[34]; (b) SiC ceramic mirror material prepared by grading silicon oxide and SiC particles^[35]; (c) 620 and 500 mm aperture SiC ceramic mirror material

综上所述,光固化技术制备 SiC 陶瓷反射镜材料的流程包括:原料制备、光固化成型、脱脂排胶、致密化烧结(前驱体浸渍裂解、化学气相渗透、反应烧结等),其中原料需具有长效稳定悬浮、高的光固化深度等特性。

2.2 粉末床熔融成型(PBF)

粉末床熔融成型技术指的是粉末在外部能量刺激下熔融并固化,按照预设定的路径促使粉末固化成型。选区激光烧结(selective laser sintering, SLS)是一种典型的 PBF 技术,在 SiC 陶瓷领域研究较为广泛。1986 年,美国 Texas 大学提出选区激光烧结技术,后经美国 DTM 公司、德国 EOS 公司先后将该思想转化,并推出 SLS 成型系统,该技术得以发展^[39]。SLS 是用激光器发出的激光束对陶瓷材料进行加工。SLS 工艺成型原理如图 3 所示。成型时,要预热工作平台,使温度略低于粉料熔点,供粉系统上升,将高于工作台的陶瓷复合粉末用压辊平铺在工作台上,形成一个很薄且平面的粉层;控制系统控制激光器使激光束根据截面的二维 CAD 路径在粉层上进行选择性扫描,使扫描到的粉末温度高于熔点,颗粒熔化粘结在一起,生成一定厚度的实体薄片;一层烧结完后,将新一层粉末平铺在已成型的薄片上,进行新一轮的扫描烧结,重复上述操作,最终得到三维实体模型。

SLS 技术按照原料类型可分为直接成型(D-SLS)和间接成型(I-SLS)。二者的主要区别在于 I-SLS 需借助聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、环氧树脂等固化实现 SiC 颗粒连接,随后进行高温脱脂烧结,特点在于该方法制备的 SiC 性能高,但制备周期长于 D-SLS。D-SLS 通常在树脂材料、金属材料中广泛使用,由于其具有较低的熔点,在特定输入激光能量后,自身融化凝固。Abdelmoula 等^[40]和 Montón 等^[41]采用 D-SLS 制备了 SiC。鉴于 SiC 烧结温度和分解温度差值约 400 K,采用 D-SLS 技术需严格控制 SiC 粉末表面的温度。通过扫描速率、激光功率、扫描时间、扫描间距等参数协同优化,最终制备了相对密度为 87% 的 SiC 陶瓷。同时,Abdelmoula 等^[40]指出基于 D-SLS 制备 SiC,仍需优化打印过程参数和粉末的流动性等以实现成型件的低缺陷、高精度制备。Wolfgang 等^[42]采用 CO₂ 激光器,在 100 W 功率下将部分 SiC 分解为 Si,活性 Si 与 SiC 粉末表面的 O 相互作用形成玻璃态 SiO₂,连接未分解或再结晶的 SiC 颗粒,制备了孔隙率小于 1%、直径为 120 mm 的 Si/SiC 反射镜材料,如图 4(a)所示。Meyers 等^[43]将 Si 粉和 SiC 粉末混合作为原料,以 Si 为低熔点第二相粘结 SiC 颗粒,直接成型了 Si/SiC 陶瓷。从上述研究可以看出,D-SLS 技术在制备 SiC 陶瓷过程中对激光器要求较高,并需严格控制成型温度。此外, SiC 预制体孔隙率高,导致 D-SLS 技术制备的 SiC 反射镜材料热导率、弹性模量、弯曲强度等性能较低,与在轨服役的 SiC 反射镜材料性能相比差距较大。

相比于 D-SLS 成型 SiC 陶瓷而言,I-SLS 的研究更为成熟。1995 年,Nelson 等^[8]以聚甲基丙烯酸甲酯包覆 SiC,研究了 SiC 陶瓷的 I-SLS 成型技术。经过近 30 年的不断发展,国内外研究学者验证了 I-SLS 制备 SiC 陶瓷构件的可行性。当前,该方法存在原料粉末密度低、成型件(预制体)孔隙率高、成型/烧结变形等问题。Huebner 等^[44]和 Yang 等^[13]均研究了雾化造粒制备球形 SiC 粉末,以提高 SiC 粉末的松装密度。Liu 等^[45]采用酚醛树脂包覆 SiC 粉末制备了含碳的 SiC 预制体,材料的弯曲强度达到 348 MPa。低熔点有机物的添加可有效降低激光器功率、降低扫描时间、提高扫描速度,具有低成本、高效率的优势。然而,在成型过程中有机物发生固化和脱脂烧结过程中有机物发生碳化,均会产生较大的收缩,不利于 SiC 陶瓷成型精度。为此,史玉升等开展了覆膜法制备低粘结剂含量的 SiC 陶瓷,改善 SiC 陶瓷成型/烧结变形的问题^[10]。Chen 等^[46]通过将酚醛树脂、短切 C_f 和 α -SiC 作为原料进行 I-SLS 试验,通过设计原料粉末的比例调控 SiC 性能,实现了直径约 150 mm、密度 2.75 g/cm³、强度 266 MPa 的 SiC 反射镜材料的研制,如图 4(b)所示。

综上所述,SLS 技术制备 SiC 反射镜材料涉及原材料制备、增材成型、致密化烧结等工艺流程。D-SLS 中原材料通常仅为 SiC,该过程需对扫描时间及速度进行严格控制以确保预制体的性能。I-SLS 需借助低熔点有机物实现 SiC 陶瓷的成型,低熔点有机物包括酚醛树脂、环氧树脂、PMMA 等。低熔点有机物与 SiC 粉末充分混合制备复合粉末,制备方法主要有机械混合和覆膜法,最后经过反应烧结、前驱体浸渍裂解、等静压处理等技术实现致密化和强化。

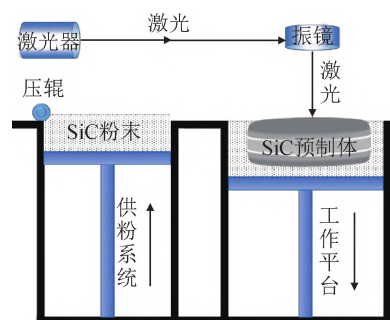


图 3 SLS 技术制备 SiC 陶瓷原理示意图

Fig. 3 Principle schematic diagram of SiC ceramics prepared via SLS technology

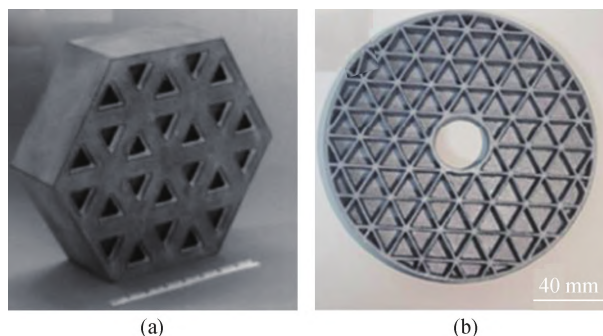


图4 SiC 陶瓷反射镜材料。(a)D-SLS 技术成型 SiC^[42]; (b)I-SLS 技术成型 SiC^[46]

Fig. 4 SiC ceramic mirror material. (a) Fabrication of SiC by D-SLS technology^[42]; (b) fabrication of SiC by I-SLS^[46]

2.3 粘结剂喷射成型 (BJ)

粘结剂喷射技术^[15],原理如图5所示。先在工作台上用压辊将陶瓷粉末平铺,喷头将按照特定轨迹将粘结剂喷射在陶瓷粉末上,使粉末粘在一起,将工作台降低一个层厚,重复进行上述操作,得到陶瓷三维成型件。剩余的陶瓷粉末可以重复使用。BJ 成型工艺的优点很多,例如取材广泛、成型过程短、工艺成本低、材料可重复利用。

与其他增材制造技术类似,BJ 技术理论上具有成型速率快、结构复杂度大的优势。Terrani 等^[18]采用 BJ 技术制备了具有极小曲面结构的 SiC 陶瓷,证明了复杂构型的可制造性;同时,采用化学气相渗透技术实现材料的致密化,如图6(a)所示。BJ 成型过程中,液态粘结剂在陶瓷粉末表面的润湿行为,将影响 SiC 预制体成型精度。Holman 等^[47]研究了粘结剂与粉末之间的相互作用,建立了粘结剂在陶瓷粉末表面铺展和渗透过程的动力学模型。Feng 等^[48]采用乙二醇降低酚醛粘结剂表面张力,改善粘结剂与粉末的润湿行为,结合反应烧结技术制备了直径为 100 mm 的 SiC 反射镜材料,尺寸误差仅为 1.2 mm,如图6(b)所示。BJ 法成型的 SiC 预制体孔隙率较高,导致反应烧结后 SiC 材料中残留的硅含量大。为提高 SiC 材料性能,Cramer 等^[16]对 BJ 成型的 SiC 预制体进行碳源前驱体浸渍裂解处理,以提高 SiC 预制体中碳的含量,该部分碳经反应烧结转变为 SiC,能够有效降低残留硅、提高 SiC 材料性能。以酚醛树脂为碳源前驱体进行浸渍裂解 2 次后,残留硅含量从 54% 降低至 35%,SiC 材料的弹性模量和强度分别为 300 GPa 和 517.6 MPa。Fleisher 等^[17]在 BJ 成型原料粉末中添加了 1% (质量分数) 的 B₄C 作为额外的碳源,并结合碳源前驱体浸渍裂解技术再次提高预制体中碳的含量,经反应烧结致密化后,残留硅含量降低至 15% 以下。图6(c)展示了 Fleisher 等采用 BJ 法制备了超轻型 SiC 反射镜材料,密度和面密度分别为 2.87 g/cm³ 和 16 kg/m²。

值得关注的是,2019 年 Zocca 等^[49]和 Diener 等^[50]提出使用 SiC 浆料代替 BJ 成型原料的 SiC 粉末。SiC 陶瓷浆料由水、陶瓷粉末、分散剂等添加剂组成,通过刮刀将均质 SiC 陶瓷浆料薄层平铺在工作台上,干燥处理蒸发掉薄层中的溶剂,再由打印喷头在薄层中按特定轨迹喷射粘结剂,该方法又称为分层浆料沉积 (layerwise slurry deposition, LSD) 法。LSD 的显著优势在于粉末的堆积密度大,并可引入级配粉末,在降低 SiC 预制体孔隙率、提高 SiC 材料性能方面具有较大的潜在优势。图7(a)为 LSD 法成型的 SiC 涡轮转子,该方法能够成型薄壁叶片结构。SiC 涡轮转子反应烧结后如图7(b)所示,该方法制备的陶瓷构件无明显缺陷。对反应烧结后的试样进行研磨抛光,其金相显微组织结构如图7(c)所示,该方法制备的 SiC 陶瓷构件具有均匀、致密的显微组织结构。与图7(c)对比,图7(d)展示了等静压技术成型结合反应烧结技术制备的 SiC 陶瓷的显微组织结构。从图7(c)和(d)显微组织结构上来看,该方法成型的 SiC 材料固含量与传统工

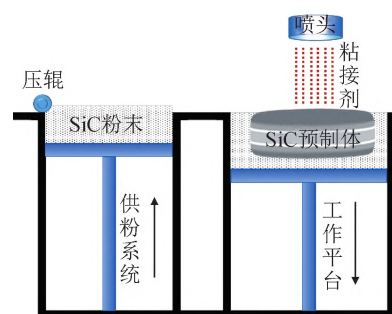


图5 BJ 技术制备 SiC 陶瓷原理示意图

Fig. 5 Principle schematic diagram of SiC ceramics prepared via BJ technology

艺制备的 SiC 材料相当,体现了 LSD 技术在提高增材制造 SiC 陶瓷固含量方面的潜在优势,该方法制备的 SiC 强度为 479 MPa,密度大于 3.05 g/cm^3 。

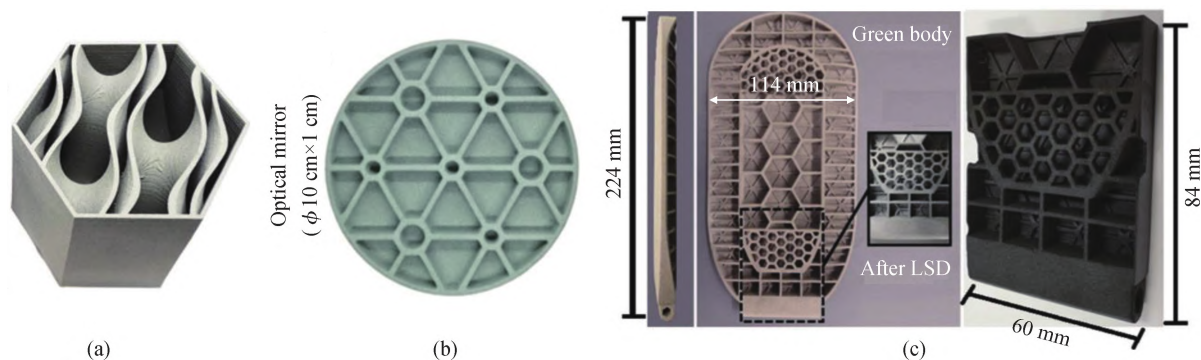


图6 BJ法制备的SiC构件。(a)复杂结构SiC材料^[18]; (b)直径为100 mm的SiC陶瓷反射镜^[48]; (c)超轻型SiC陶瓷反射镜^[17]

Fig.6 SiC components prepared by BJ method. (a) SiC material with complex structure^[18]; (b) SiC ceramic mirrors with diameter of 100 mm^[48]; (c) ultra-light SiC ceramic mirrors^[17]

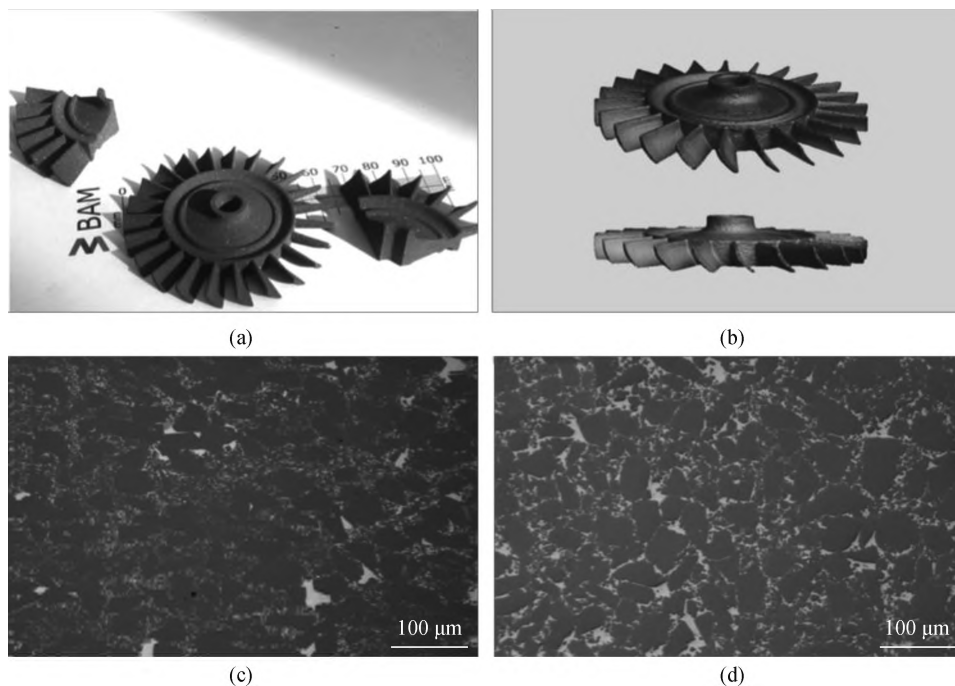


图7 LSD法与传统方法制备的SiC构件^[49]。(a)LSD技术成型的SiC预制体;(b)致密化处理后的SiC材料;(c)LSD法制备的致密SiC材料微观结构;(d)传统方法制备的SiC材料微观结构

Fig.7 SiC components prepared by LSD method and traditional method^[49]. (a) SiC preform formed by LSD technology; (b) SiC material after densification treatment; (c) microstructure of dense SiC material prepared by LSD method; (d) microstructure of SiC material prepared by traditional methods

综上所述, BJ法制备 SiC 反射镜材料的流程包括原料制备(粉末或浆料)、粘结剂喷射成型、致密化烧结(化学气相渗透、反应烧结等)。原料为 SiC 粉末时, 粘结剂喷射在 SiC 粉末上制备的 SiC 预制体孔隙率大, 需经前驱体浸渍裂解处理提高预制体中碳的含量, 再通过反应烧结工艺将裂解碳转变为 SiC。原料为 SiC 浆料时, 平铺一个薄层浆料后, 需进行溶剂蒸发处理, 得到高堆积密度粉末, 再进行粘结剂喷射和致密化烧结, 最终得到致密、高性能 SiC 材料。

2.4 材料挤出成型(MEX)

挤出成型与传统工艺陶瓷注射成型类似,原理示意图如图8所示。将石蜡、硬脂酸、聚乙烯等有机物作为粘结体系,与SiC粉末充分混合,得到MEX所需的原料粉末。将原料粉末置于图8所示的料筒中,在螺杆等送料系统作用下,将原料粉末经加热装置加热后由喷嘴挤出成型。该方法制备的SiC反射镜材料具有性能高、成本低的优势,同时也面临着精度低的问题。

近年来,长沙理工大学、中国科学院上海硅酸盐研究所、辽宁大学等机构相继报道了基于MEX技术制备SiC陶瓷部件的研究^[20-22]。胡祥芬等^[51]研究了料筒温度、喷嘴直径和打印层厚等工艺参数对SiC陶瓷表面形貌、微观结构及宏观性能的影响。当料筒温度、喷嘴直径和打印层厚分别为180℃、0.8和0.2mm时,制备得到了密度为3.18 g/cm³和强度为302 MPa的复杂结构SiC构件,如图9(a)所示。Niu等^[21]采用溶剂脱脂和热脱脂的复合技术实现陶瓷预制体中有机物的去除。Li等^[22]研究了原料粉末组分对SiC材料性能的影响,在原料粉末中添加38%~46%(质量分数)的炭黑,经气相渗硅和液相渗硅,最终制备得到了密度为3.12 g/cm³、弹性模量为425 GPa、直径为300 mm的SiC反射镜材料,如图9(b)所示。与上述研究不同的是,Chen等^[52]将原料粉末替换为聚碳硅烷、Si和SiC颗粒的混合粉末,通过调控原料粉末中Si和SiC的含量控制原料粉末在熔融态时的黏度,避免因黏度过高而堵塞喷头或因黏度过低而无法悬臂等。在1400℃下热处理成型后的预制体,一方面聚碳硅烷全部转变为SiC,另一方面聚碳硅烷裂解的碳与Si发生反应形成SiC,最终实现无残硅的SiC陶瓷反射镜的制备,如图9(c)所示。

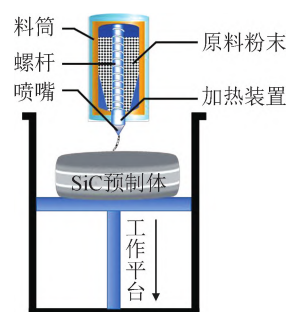


图8 MEX技术制备SiC陶瓷原理示意图

Fig. 8 Principle schematic diagram of SiC ceramics prepared via MEX technology

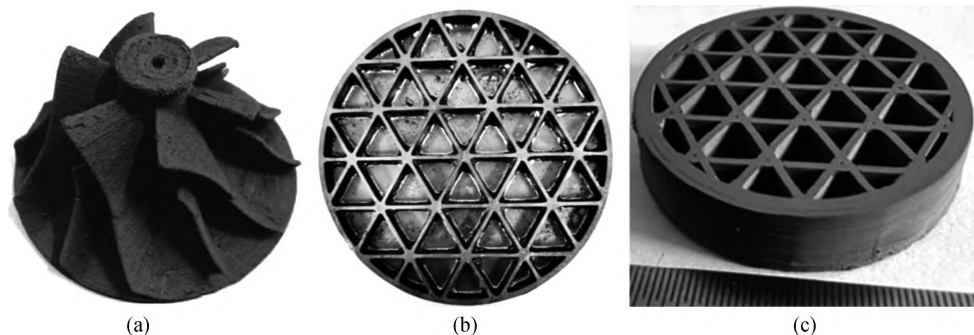


图9 MEX法制备的SiC构件。(a)涡轮转子^[21]; (b)直径为300 mm的SiC陶瓷反射镜材料^[22]; (c)无残硅的SiC陶瓷反射镜^[52]

Fig. 9 SiC components prepared by MEX method. (a) Turbine rotor^[21]; (b) SiC ceramic mirror material with diameter of 300 mm^[22]; (c) SiC ceramic mirrors without residual silicon^[52]

综上所述,MEX技术制备SiC反射镜材料的技术路线有两条:①原料粉末为硬脂酸、石蜡和SiC颗粒组成的混合粉末,经喷嘴挤出成型SiC预制体。对SiC预制体进行溶剂脱脂和热脱脂,实现有机物的排胶处理。最后,通过气相渗硅烧结、液相渗硅烧结等后处理技术实现SiC反射镜材料的致密化和强韧化;②原料粉末为聚碳硅烷、Si粉、SiC粉等,对MEX成型的SiC预制体进行高温热处理,高温下聚碳硅烷裂解形成SiC和C,同时C与特定比例的Si充分反应形成SiC,实现了SiC反射镜材料的制备。相较于技术路线①,技术路线②的制备周期短,但该路线制备的SiC陶瓷仍需对其进行致密化、强韧化等方面的机制机理研究。

2.5 增材制造SiC反射镜材料技术路线

由上述分析可知,国内外针对SLS、BJ、MEX和VPP技术在制备SiC反射镜材料方面均取得了一定的研究进展。在这些增材制造技术中,VPP的发展较为成熟,该方法制备的SiC反射镜具有弹性模量高、线膨胀

系数低、口径大等良好的综合性能。增材制造 SiC 陶瓷性能主要与预制体中 SiC 含量高低相关,成型原料为浆料态,相比于粉末态更易于实现高固含量预制体的制备。SiC 陶瓷反射镜的尺寸一方面与增材制造成型设备的发展相关,另一方面与预制体内部组分均匀性相关。大尺寸成型设备是制备大口径增材制造 SiC 反射镜的前提,均匀组分利于脱脂烧结过程中应力、变形的可控调节,是制备高质量增材制造 SiC 反射镜的保障。从增材成型工艺原理来看,VPP 采用陶瓷浆料成型,可通过颗粒级配、分散剂体系优化等组分设计实现高固含量 SiC 预制体制备。成型后的预制体显微组织均匀,在温度、压力、气氛等多物理场耦合下利于实现预制体的低应力、微变形脱脂。因此,在这些增材制造技术中,VPP 在制备 SiC 光学反射镜方面展现了较大的潜力与优势。

图 10 总结了增材制造技术制备 SiC 陶瓷反射镜的技术路线。一般情况下,增材制造技术制备 SiC 反射镜材料分为 5 个步骤:1)原料制备,增材制造 SiC 陶瓷所需原料一般为粉末或浆料。2)增材制造,经过相应的增材制造工艺成型后得到具有特定形状的 SiC 预制体。3)脱脂排胶,对 SiC 预制体进行脱脂排胶处理,预制体中的有机物裂解为气体和碳,气体逸出预制体,原位形成孔隙,得到多孔 SiC 预制体。4)前驱体浸渍,为提升增材制造 SiC 的性能,通常采用前驱体浸渍法提高 SiC 的含量,前驱体可分为碳前驱体和 SiC 前驱体。采取前驱体浸渍裂解(polymer impregnation and pyrolysis, PIP)技术,多次循环浸渍裂解 SiC 前驱体可以实现 SiC 反射镜材料的致密化,选用碳前驱体可有效提高多孔 SiC 预制体中裂解碳的含量。5)高温烧结,碳源前驱体浸渍裂解的碳经 RMI 技术转变为 SiC,得到致密的 SiC 反射镜材料。

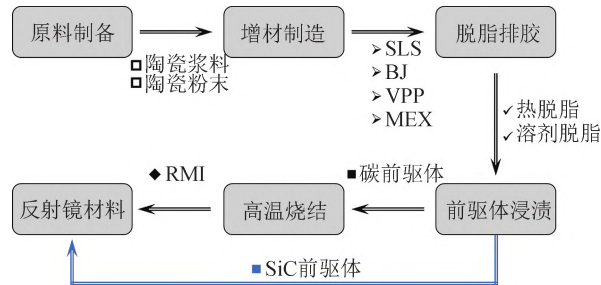


图 10 基于增材制造技术制备 SiC 陶瓷反射镜的技术路线图

Fig. 10 Technical roadmap for preparation of SiC ceramic mirrors based on additive manufacturing technology

表 2 总结和展示了各种增材制造技术制备的 SiC 反射镜材料性能。由表 2 可以看出,VPP 技术制备的 SiC 陶瓷反射镜具有良好的综合性能。随着成型装备、烧结工艺的不断发展,VPP 技术可制备直径 620 mm 的碳化硅陶瓷反射镜。值得注意的是,尽管增材制造 SiC 陶瓷材料的成型方式有多种,其致密化方法普遍采用 RMI 技术。这是由于 SiC 为强共价键化合物,烧结活性低,特别是增材制造 SiC 预制体具有高的孔隙率,极大地增加了热压烧结、热等静压烧结、放电等离子烧结等工艺的致密化难度。化学气相渗透、常压烧结、前驱体浸渍裂解和反应烧结技术是实现增材制造 SiC 陶瓷致密化的有效手段。其中,反应烧结技术具有低成本、短周期的特点,在制备高致密度的轻量化 SiC 反射镜方面具有明显优势。此外,增材制造 SiC 反射镜材料仍需进行加工、镀膜等光学制造工艺验证,在反射镜能够满足光学应用面型精度、粗糙度的情况下,进行全链路制备过程的迭代优化,实现超轻型 SiC 反射镜的制备,助力我国空间光学技术实现跨越式发展。

表 2 增材制造技术制备的 SiC 陶瓷反射镜性能

Table 2 Properties of SiC ceramic mirrors prepared by additive manufacturing technology

Sample	Molding method	Densification method	Bend strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Thermal conductivity/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Coefficient of linear expansion/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Density/(g · cm ⁻³)	Dimension/mm	Development department
1	SL	RMI	280.09	355.48	190	2.39	3.04	620	长春光机所
2	SL	PIP	165.2	—	—	—	—	<50	北京理工大学[34]
3	SL	RMI	268.66	242.02	—	—	2.759	<100	上海硅酸盐研究所[35]
4	SLS	RMI	195	225	70	4.0	2.65	120	德国弗劳恩霍夫研究所[42]

续表

Sample	Molding method	Densification method	Bend strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Thermal conductivity/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Coefficient of linear expansion/(10^{-6}K^{-1})	Density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Dimension/mm	Development department
5	SLS	RMI	266	—	80.15 ~ 92.48	4.29	2.749	150	上海硅酸盐研究所[46]
6	BJ	RMI	257	—	—	—	2.99	100	华中科技大学[48]
7	BJ	RMI	—	—	—	—	2.87	224	以色列金属研究所[17]
8	MEX	RMI	465	425	—	—	3.12	300	上海硅酸盐研究所[22]
9	MEX	—	47.2	163	—	—	—	<50	法国国立摩日大学[52]

3 结语与展望

1) 反射镜增材制造工艺对比方面:SLS、BJ、MEX、VPP 等技术均可实现 SiC 陶瓷反射镜材料的制备。SLS 技术固有循环加热-冷却的工艺特性,导致材料内部循环产生压缩-拉伸应力,控制大尺寸 SiC 预制体的应力分布是 SLS 技术的主要发展方向之一。BJ 技术的研究方兴未艾,其粘结剂成分、SiC 粉末处理技术等方面仍需进行系统深入研究。MEX 制备的 SiC 材料具有优异的力学性能,如何提高其成型精度将是 MEX 技术的主要发展方向之一。VPP 技术具有高的成型精度与效率,在制备复杂结构 SiC 陶瓷反射镜材料方面具有较大的潜力。

2) 增材制造 SiC 反射镜预制体性能方面:增材制造技术能够赋予 SiC 预制体以复杂结构,对 SiC 预制体进行脱脂烧结是制备反射镜的关键环节。针对增材制造 SiC 预制体而言, SiC 预制体中 SiC 固含量越高,脱脂烧结过程中的变形、应力等越小,利于制备高性能 SiC 陶瓷反射镜。受增材制造成型工艺限制, SiC 预制体的固含量与传统成型工艺仍存在较大差距。为实现增材制造 SiC 预制体低应力、微变形的可控脱脂烧结,研究增材制造原料的高固含量浆料或粉末体系设计,是未来的主要发展方向之一。

3) 反射镜显微组织的均匀化方面:增材制造技术成型原理为逐层堆叠成型,易导致层与层之间的显微组织结构不均匀,造成材料的各向异性。特别是,针对镜面为弧面的反射镜而言,其光学性能受层内和层间显微组织耦合影响。在温度变化过程中,反射镜镜面的不均匀变形将影响成像质量。为保证反射镜服役过程具有稳定的焦距,应对增材工艺进行系统优化,以提高层间的界面融合度,促进层内与层间的组织均匀化。

4) 增材制造 SiC 反射镜结构优化方面:成型复杂结构是增材制造技术的主要优势之一,当前点阵结构、拓扑结构、极小曲面结构等轻量化设计方案在金属、高分子等领域应用较多。增材制造成型的 SiC 陶瓷普遍为简单的几何结构,尚未充分发挥轻量化、一体化构型的优势。对 SiC 材料的组织演变行为、尺寸变化规律等进行系统化、量化研究,是未来的主要发展方向之一。

5) 增材制造 SiC 反射镜宏观尺寸方面:大口径反射镜的研制是空间光学系统的发展方向之一,当前增材制造技术制备的 SiC 反射镜材料尺寸较小。研究大尺寸 SiC 反射镜材料成型装备与工艺至关重要,增材制造成型技术主要面临着大尺寸与高质量难以兼顾的难题。SLS 过程引入的热应力、MEX 过程材料界面融合问题、VPP 的聚合收缩问题等均易产生孔洞、裂纹等缺陷,这部分缺陷在大尺寸构件成型过程中将逐步累积,最终造成预制体翘曲、变形,甚至开裂。因此,开发米级以上大尺寸的成型装备及缺陷实时监测与在线修复技术至关重要。

参 考 文 献

[1] 崔聪聪, 张 舸. 有机前躯体浸渍对凝胶注模 RBSiC 的弥散强化[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(增刊1): 188-192.
CUI C C, ZHANG G. Dispersion strengthening of RBSiC by impregnation of organic precursor in gel casting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(supplement 1): 188-192 (in Chinese).
[2] 赵汝成, 包建勋. 大口径碳化硅反射镜轻量化结构与镜坯成型[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(6): 65-69.
ZHAO R C, BAO J X. Lightweight structure and mirror blank formation of the SiC ceramic mirror with large caliber[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(6): 65-69 (in Chinese).
[3] 韩媛媛, 张宇民, 韩杰才, 等. 碳化硅反射镜轻量化结构优化设计[J]. 光电工程, 2006(8): 123-135.

- HAN Y Y, ZHANG Y M, HAN J C, et al. Optimum design of lightweight silicon carbide mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006(8): 123-135 (in Chinese).
- [4] ZENG C Q, WANG W, HAI K, et al. Lightweight airborne TPMS-filled reflective mirror design for low thermal deformation[J]. Composite Structures, 2024, 327: 117665.
- [5] JIN B J, LI S, ZHENG X Q, et al. Additive manufacturing C_f/SiC composites with high fiber content by stereolithography combined with precursor infiltration and pyrolysis[J]. Ceramics International, 2024, 50(2): 3982-3989.
- [6] 顾 玥, 王 功, 段文艳, 等. 陶瓷光固化成型技术的应用与展望[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(5): 867-877.
- GU Y, WANG G, DUAN W Y, et al. Application and prospect of photopolymerization technologies for ceramics[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(5): 867-877 (in Chinese).
- [7] 王长顺, 吴思琪, 闫春泽, 等. SiC 陶瓷增材制造技术的研究及应用进展[J]. 科学通报, 2022, 67(11): 1137-1154.
- WANG C S, WU S Q, YAN C Z, et al. Research and applications of additive manufacturing technology of SiC ceramics[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(11): 1137-1154 (in Chinese).
- [8] NELSON J C, VAIL N K, BARLOW J W, et al. Selective laser sintering of polymer-coated silicon carbide powders[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1995, 34(5): 1641-1651.
- [9] HUANG L Z, YIN J, CHEN X, et al. Selective laser sintering of SiC green body with low binder content[J]. Journal of Inorganic Materials, 2022, 37(3): 347.
- [10] 刘春磊, 郑 雯, 吴甲民, 等. 高性能陶瓷激光选区烧结成形技术研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2021, 42(增刊1): 64-73.
- LIU C L, ZHENG W, WU J M, et al. Research progress of laser selective sintering forming technology for high performance ceramics[J]. Advanced Ceramics, 2021, 42(supplement 1): 64-73 (in Chinese).
- [11] WANG K L, YIN J, CHEN X, et al. Advances on direct selective laser printing of ceramics: an overview[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 975: 172821.
- [12] WANG K L, YIN J, CHEN X, et al. Microstructure and properties of liquid phase sintered SiC ceramics fabricated via selective laser printing and precursor impregnation and pyrolysis[J]. Ceramics International, 2024, 50(3): 4315-4322.
- [13] YANG L X, WEN G Q, LIU T L, et al. Enhancing mechanical properties of selectively laser sintered SiC/Si composites printed using electrostatic spraying microspheres with fine particles[J]. Ceramics International, 2024, 50(2): 3556-3565.
- [14] PETERS A B, ZHANG D J, HERNANDEZ A, et al. Selective laser reaction synthesis of SiC, Si₃N₄ and HfC/SiC composites for additive manufacturing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(4): 1270-1283.
- [15] 熊鼎宇, 屈 飘, 朱中琪, 等. 陶瓷挤出和喷射增材制造技术研究进展[J]. 机械工程学报, 57(17): 253-262.
- XIONG D Y, QU P, ZHU Z Q, et al. Research progress on extrusion and jetting-based ceramic additive manufacturing technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 57(17): 253-262 (in Chinese).
- [16] CRAMER C L, ELLIOTT A M, LARA-CURZIO E, et al. Properties of SiC-Si made via binder jet 3D printing of SiC powder, carbon addition, and silicon melt infiltration[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104(11): 5467-5478.
- [17] FLEISHER A, ZOLOTARYOV D, KOVALEVSKY A, et al. Reaction bonding of silicon carbides by binder jet 3D-printing, phenolic resin binder impregnation and capillary liquid silicon infiltration[J]. Ceramics International, 2019, 45(14): 18023-18029.
- [18] TERRANI K, JOLLY B, TRAMMELL M. 3D printing of high-purity silicon carbide[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2020, 103(3): 1575-1581.
- [19] CHEN H H, WANG X F, XUE F D, et al. 3D printing of SiC ceramic: direct ink writing with a solution of preceramic polymers[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(16): 5294-5300.
- [20] KONG F L, CHEN X J, LI Y M, et al. A novel approach to prepare high density SiC ceramics by powder extrusion printing (PEP) combined with one-step sintering method[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(2): 626-634.
- [21] NIU F R, YANG X L, LI Y B, et al. Fused deposition modeling of Si₃N₄ ceramics: a cost-effective 3D-printing route for dense and high performance non-oxide ceramic materials[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42: 7369-7376.
- [22] LI F F, ZHU M, CHEN J, et al. High-strength and low-silicon SiC ceramics prepared by extrusion molding 3D printing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(2): 617-625.
- [23] FENG M Z, WANG Z W, WANG W Q, et al. Effect of bimodal particle size distribution on the performance of SiC slurry for maskless vat photopolymerization[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(16): 7296-7305.
- [24] AZUMA S, OBATA S, YOSHIDA M, et al. Preparation of silicon carbide slurry for UV curing stereolithography[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 16: 72-77.
- [25] BADEV A, ABOULIATIM Y, CHARTIER T, et al. Photopolymerization kinetics of a polyether acrylate in the presence of ceramic fillers used in stereolithography[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2011, 222(1): 117-122.
- [26] HALLORAN J W, TOMECKOVA V, GENTRY S, et al. Photopolymerization of powder suspensions for shaping ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(14): 2613-2619.
- [27] ZHANG Y B, LI S, LIU X D, et al. Additive manufacturing and characterization of microstructure evolution of Inconel 718 superalloy produced

- by vat photopolymerization[J]. Additive Manufacturing, 2023, 61: 103367.
- [28] DING G J, HE R J, ZHANG K Q, et al. Stereolithography-based additive manufacturing of gray-colored SiC ceramic green body[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(12): 7198-7209.
- [29] LI W, CUI C C, BAO J X, et al. Properties regulation of SiC ceramics prepared via stereolithography combined with reactive melt infiltration techniques[J]. Ceramics International, 2021, 47(24): 33997-34004.
- [30] HE R J, ZHOU N P, ZHANG K Q, et al. Progress and challenges towards additive manufacturing of SiC ceramic[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2021, 10(4): 637-674.
- [31] 韩媛媛, 张宇民, 韩杰才, 等. 国内外碳化硅反射镜及系统研究进展[J]. 材料工程, 2005, 33(6): 59-63.
- HAN Y Y, ZHANG Y M, HAN J C, et al. Development of the silicon carbide mirror and system in the world[J]. Journal of Materials Engineering, 2005, 33(6): 59-63 (in Chinese).
- [32] 国绍文, 王武义, 张广玉, 等. 空间光学系统反射镜轻量化技术综述[J]. 光学仪器, 2005, 27(4): 78-82.
- GUO S W, WANG W Y, ZHANG G Y, et al. Lightweight mirror technology for space optical systems[J]. Optical Instruments, 2005, 27(4): 78-82 (in Chinese).
- [33] CHARLES H. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography: US4575330A[P]. 1986-11-03.
- [34] DING G J, HE R J, ZHANG K Q, et al. Stereolithography 3D printing of SiC ceramic with potential for lightweight optical mirror[J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 18785-18790.
- [35] CHANG H T, TANG J, GUO X T, et al. Stereolithography-based additive manufacturing of RB-SiC ceramics by a two-step sintering method[J]. Ceramics International, 2023, 49(1): 1085-1091.
- [36] CAO J W, IDREES M, TIAN G Q, et al. Complex SiC-based structures with high specific strength fabricated by vat photopolymerization and one-step pyrolysis[J]. Additive Manufacturing, 2021, 48: 102430.
- [37] SHI Z A, WU J M, FANG Z Q, et al. Influence of high-temperature oxidation of SiC powders on curing properties of SiC slurry for digital light processing[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2023, 12(1): 169-181.
- [38] YANG D, LI H, YANG W Q, et al. Controllable reduction of absorbance and two-step reaction for 3D-printed SiC ceramics with micron-level periodic structure[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 477: 146915.
- [39] BAI P K, WANG W F. Selective laser sintering mechanism of polymer-coated molybdenum powder[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(3): 543-547.
- [40] ABDELMOULA M, KÜÇÜKTÜRK G, GROSSIN D, et al. Direct selective laser sintering of silicon carbide: realizing the full potential through process parameter optimization[J]. Ceramics International, 2023, 49(20): 32426-32439.
- [41] MONTÓN Z A, ABDELMOULA M, KÜÇÜKTÜRK G, et al. Process parameters investigation for direct powder bed selective laser processing of silicon carbide parts[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2022, 7(6): 1307-1322.
- [42] WOLFGANG L, REINHARD L. Rapid prototyping of complex-shaped parts of Si/SiC-ceramics by laser sintering[J]. Industrial Ceramics, 2000, 38: 6.
- [43] MEYERS S, DE LEERSNIJDER L, VLEUGELS J, et al. Direct laser sintering of reaction bonded silicon carbide with low residual silicon content[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(11): 3709-3717.
- [44] HUEBNER J, PFEIFFER S, RUTKOWSKI P, et al. Spray drying as a one-step production method of SiC-based granulates for direct reactive laser sintering of reaction bonded silicon carbide (RBSiC)[J]. Open Ceramics, 2023, 16: 100492.
- [45] LIU K, WU T, BOURELL D L, et al. Laser additive manufacturing and homogeneous densification of complicated shape SiC ceramic parts[J]. Ceramics International, 2018, 44(17): 21067-21075.
- [46] CHEN X, YIN J, HUANG L Z, et al. Microstructural tailoring, mechanical and thermal properties of SiC composites fabricated by selective laser sintering and reactive melt infiltration[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2023, 12(4): 830-847.
- [47] HOLMAN R K, CIMA M J, UHLAND S A, et al. Spreading and infiltration of inkjet-printed polymer solution droplets on a porous substrate[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 249(2): 432-440.
- [48] FENG K H, HU S D, LI L Y, et al. Preparation of low residual silicon content Si-SiC ceramics by binder jetting additive manufacturing and liquid silicon infiltration[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(13): 5446-5457.
- [49] ZOCCA A, LIMA P, DIENER S, et al. Additive manufacturing of SiSiC by layerwise slurry deposition and binder jetting (LSD-print)[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(13): 3527-3533.
- [50] DIENER S, SCHUBERT H, GÜNSTER J, et al. Ink development for the additive manufacturing of strong green parts by layerwise slurry deposition (LSD-print)[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2023, 106(5): 2752-2763.
- [51] 胡祥芬, 牛富荣, 周 哲, 等. 熔融沉积(FDM)工艺参数对 SiC 陶瓷微观结构和力学性能影响[J]. 硬质合金, 2021, 38(3): 201-210.
- HU X F, NIU F R, ZHOU Z, et al. Effect of fused deposition modeling (FDM) process parameters on microstructure and mechanical properties of SiC ceramics[J]. Cemented Carbide, 2021, 38(3): 201-210 (in Chinese).
- [52] CHEYPE M, PATELOUP V, BERNARD S. Straightforward design strategy toward 3D near-net-shape stoichiometric SiC parts[J]. Advanced Materials, 2024, 36(11): 2307554.