

文章编号 1004-924X(2023)23-3449-08

氧化时间对增材制造碳化硅性能提升的作用机制

李 伟^{1,2}, 张 舸^{1,2*}, 崔聪聪^{1,2}, 包建勋^{1,2}, 郭聪慧^{1,2},
徐传享^{1,2}, 张 巍^{1,2}, 朱万利^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室,
吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘要:增材制造结合反应烧结技术能够制备高度轻量化的碳化硅陶瓷反射镜,针对增材制造技术制备的碳化硅陶瓷存在抗弯强度低、弹性模量低等力学性能差的问题,开展高温氧化提升材料力学性能的研究。对基于增材制造的反应烧结碳化硅陶瓷试样在 850 °C 下进行高温氧化处理,研究氧化时间对材料成分及表面缺陷含量的影响,阐明氧化时间对材料性能的提升机制,揭示它对材料性能的影响规律。实验结果表明:当氧化时间为 2 h 时,材料表面原位生长一层致密的氧化硅膜层,该膜层能够使材料表面缺陷自愈合,有效降低陶瓷材料表面缺陷的含量,此时材料获得最佳的力学性能,抗弯强度和弹性模量分别为 263.9 MPa 和 384.75 GPa,分别提升 10.7% 和 14.4%。该方法具有高效率、低成本和易操作的优势,为增材制造碳化硅陶瓷的性能优化提供理论指导。

关键词:增材制造;反应烧结碳化硅;氧化时间;性能优化

中图分类号:TQ174.58 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20233123.3449

Mechanism analysis of oxidation time on performance improvement of additive manufacturing silicon carbide

LI Wei^{1,2}, ZHANG Ge^{1,2*}, CUI Congcong^{1,2}, BAO Jianxun^{1,2}, GUO Conghui^{1,2},
XU Chuanxiang^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, ZHU Wanli^{1,2}

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

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhanggeciomp@126.com

Abstract: Additive manufacturing combined with reactive sintering can be used to fabricate extremely lightweight silicon carbide ceramic mirrors. However, the mechanical properties of silicon carbide prepared by this method, such as flexural strength and elastic modulus, are low and insufficient. A novel

收稿日期:2023-06-15;修订日期:2023-07-24.

基金项目:中国科学院长春光机所创新基金资助项目(No. Y02020006742);长春市科技发展计划资助项目(No. 21ZY04)

method was proposed to improve the properties of silicon carbide by high temperature oxidation. First, silicon carbide prepared by additive manufacturing and reactive sintering was oxidized at 850 °C. Thereafter, the effect of oxidation time on material composition and surface defect content was studied. The enhancement mechanism of oxidation time on the properties of silicon carbide was elucidated. The results demonstrate that when the oxidation time is 2 h, a dense silica film is in-situ grown on the surface of the material, which can render the surface defects of the material to self-heal and effectively reduce their contents. In addition, the final body obtained the best comprehensive properties by this method, and the flexural strength and elastic modulus are 263.9 MPa and 384.75 GPa, with increments of 10.7% and 14.4%, respectively. This method has the advantages of high efficiency, low cost, and easy operation. The study provides theoretical guidance for improving the performance of additive manufacturing silicon carbide ceramics.

Key words: additive manufacturing; reaction-bonded silicon carbide; oxidation time; properties regulation

1 引言

反应烧结碳化硅陶瓷具有模量高、密度低、热导率大及线膨胀系数低的优异性能,是作为空间光学反射镜基体的理想材料^[1-2]。低面密度、轻量化的碳化硅光学反射镜是当前空间光学系统的主要研究方向之一,在确保反射镜的位置精度在地面装调和空间服役之间天地一致性的前提下,具有降低发射成本、提高探测器机动性的优势^[3]。这就要求碳化硅反射镜具有复杂的几何结构,在大幅度降低质量的同时不降低镜体的结构刚度。当前,碳化硅光学反射镜的制备主要包括等静压成型、凝胶注模成型等传统方法。然而,这些传统方法难以制备高度轻量化结构的碳化硅陶瓷,如拓扑结构、点阵结构等。因此,碳化硅陶瓷先进制造技术的研究对于超轻型光学反射镜的发展具有重要意义^[4]。

自 2016 年美国休斯研究实验室(HRL)发表了关于增材制造技术制备陶瓷材料的报道以来,迅速在国内外掀起基于增材制造技术制备轻量化碳化硅陶瓷的热潮^[5]。增材制造技术基于离散堆积原理,给复杂结构陶瓷的制备带来了颠覆性的技术变革。张星祥等通过增材制造技术制备了具有拓扑优化结构的反射镜,相比于传统制备方式轻量化率达 70%^[6]。然而,尽管国内外近年来对增材制造技术的研究较多,但由于材料属性和增材工艺的限制,基于增材制造的反应烧结碳化硅的弯曲强度和弹性模量普遍低于 250 MPa 和 300 GPa,与传统方式制备的反应烧结碳化硅性能仍存在较大差距,是限制该技术走向工程应

用的主要原因之一^[7-9]。

近年来,增材制造碳化硅陶瓷的性能优化逐渐成为研究热点。杨勇等^[10]通过优化增材制造浆料的组分提高反应烧结碳化硅陶瓷性能。崔聪聪等^[4]通过在反应烧结前进行前驱体浸渍裂解法提高烧结体中增强相的含量,上述方法均具有优化碳化硅性能的作用。然而,目前在提升增材制造碳化硅陶瓷性能方面,鲜有报道聚焦于降低烧结体的表面缺陷含量。根据 Ryskewitch-Duckworth 关系式可知,材料强度与表面缺陷含量呈负指数关系^[11]。反应烧结碳化硅本身具有极高的脆性,表面裂纹、孔洞等缺陷在外加载荷作用下迅速延伸并贯穿材料形成脆性断裂^[12-13]。反应烧结碳化硅表面的缺陷作为裂纹扩展源,缺陷的含量直接影响其服役性能。同时,碳化硅具有大量的共价键,滑移系少,裂纹扩展源存在应力集中,即使微量的裂纹扩展源也会严重降低材料的服役性能^[14-16]。因此,从根源上消除反应烧结碳化硅表面的裂纹扩展源是提升其力学性能的有效途径之一。

本文通过调控氧化处理时间在反应烧结碳化硅表面生长一层致密的氧化膜层,以消除材料表面的裂纹扩展源,达到提高陶瓷性能的目的。

2 实验

2.1 实验材料及制备方法

基于增材制造结合反应烧结技术制备 4 组碳化硅陶瓷样品。采用马弗炉对 3 组碳化硅陶瓷样品进行热氧化处理,升温速率为 3 °C/min,

加热至 850 °C 后保温 1, 2, 3 h 后随炉冷却至室温, 试样分别命名为 S1, S2 和 S3。最后 1 组试样作为对照组用于室温下的性能检测, 命名为 RT。

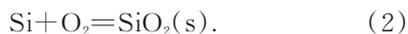
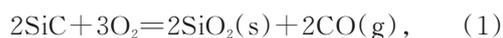
2.2 分析与测试

采用场发射透射电子显微镜 (Tecnai G2 F20 S-TWIN, 美国 FEI 公司) 对材料的组织及成分进行分析, 其中场发射电子枪 (200 kV) 的点分辨率为 0.24 nm, 线分辨率为 0.102 nm。进行透射电镜观察的样品用 M-bond610 对粘, 并双面研磨减薄至 20 μm 以下, 采用离子减薄仪 (Gatan691, 美国 Gatan 公司) 制作用于观察的薄区。采用 X 射线衍射仪 (D8 Focus, 德国布鲁克分析仪器公司) 进行烧结体的物相成分分析。根据 GB/T 4741-1999, 采用电子力学试验机进行三点弯曲强度测试, 每组样品取 5 个试样条, 测试结果取平均值, 样条尺寸为 3 mm×4 mm×36 mm, 跨距为 30 mm, 加载速率为 0.5 mm/min。依据国标 GB/T 10700-2006, 采用微机控制电子万能试验机 (CMT6503, 美特斯工业系统 (中国) 有限公司) 根据静态法原理进行弹性模量测试, 每组样品取 5 块试样, 测试结果取平均值, 样品尺寸为 125 mm×25 mm×5 mm。根据 GB/T 25995-2010, 利用阿基米德排水法测量烧结体的显气孔率。采用纳米压痕仪 (STRP500-MCT, Anton Paar) 测量样品的表面硬度。

3 结果与讨论

3.1 氧化处理对材料成分的影响

反应烧结碳化硅陶瓷 (Si/SiC) 的主要组分为碳化硅 (SiC) 和硅 (Si), 两者均可与氧气作用形成氧化硅, 如式 (1) 和式 (2) 所示:



研究高温氧化时间对 SiC 和 Si 的影响。通过 XRD 分析可以发现, 经过高温处理后, 反应烧结碳化硅中仅有 SiC 和 Si, 未出现其他晶相。然而, 对比 RT 和 S1 发现, 高温处理促使 Si ($2\theta = 28.4^\circ$) 的含量降低, 特别是保温时间延长至 2 h 后, Si 的衍射峰强度明显降低, 说明保温时间的延长能够促进 Si 的消耗, 在 Si 表面原位形成氧化膜层。当保温时间延长至 3 h 时, Si 的衍射峰强

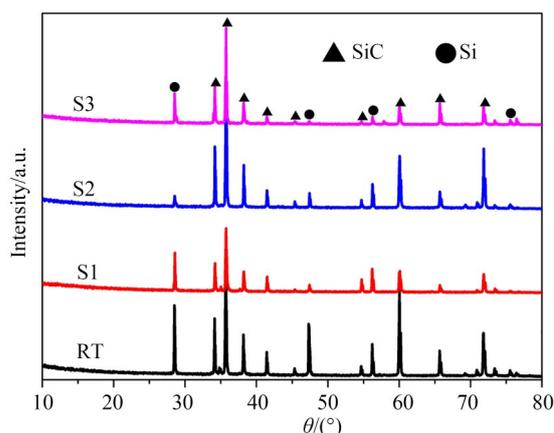


图 1 不同温度下对烧结体物相组成分析
Fig. 1 XRD image of RT, S1, S2 and S3

度变大, 说明氧化膜层发生分解或剥落, 被覆盖的 Si 再次浮现于材料表面, 提高了 Si 的衍射峰强度。XRD 结果说明氧化 2 h 时, 反应烧结碳化硅中 Si 的含量最低。

3.1.1 氧化时间对 SiC 含量的影响

为进一步确定高温处理后样品表面的反应状态, 采用透射电子显微镜对试样截面进行分析, 如图 2 所示。由图 2(a) 可知, 热处理 1 h 后, 试样表面生长了厚度约为 14.25 nm 的致密非晶膜层。由元素分布可以看出, 该膜层的主要成分为 Si 和 O, 与基体 SiC 之间界面清晰。根据式 (1) 推断, 该膜层为氧化硅相 (SiO_2)。氧元素的分布仅存在于膜层之中, SiC 与 SiO_2 之间几乎不存在其他杂质。膜层的晶型主要与热处理时间相关, 图 2(a) 所示的 SiO_2 取向杂乱, 为无定型结构。故本实验中保温时间尚未确保 SiO_2 的形核和长大, 导致 SiC 表面的膜层均为无定型结构。 SiO_2 厚度均匀, 约为 14.25 nm, 无明显的孔洞、裂纹等。经过高温处理, 在 SiC 颗粒表面生长了一层致密的 SiO_2 保护层。同时, 对比 S1, S2 和 S3 发现, 850 °C 下 SiC 随着保温时间的延长 SiO_2 膜层厚度无明显变化。SiC 的氧化过程通常是 O (分子或原子) 与 SiC 接触发生氧化反应, 随着反应的进行 SiO_2 膜层阻隔了 O 与 SiC 的接触, 此时反应过程受扩散机制控制, 符合菲克定律。氧化膜厚度增加, 导致氧扩散距离增加, 提高了扩散难度, 降低了 SiC 的氧化速率。因此, 850 °C 下 SiC 发生缓慢的惰性氧化, 该温度下延长保温时间不会明显改变 SiC 表面 SiO_2 的厚度。

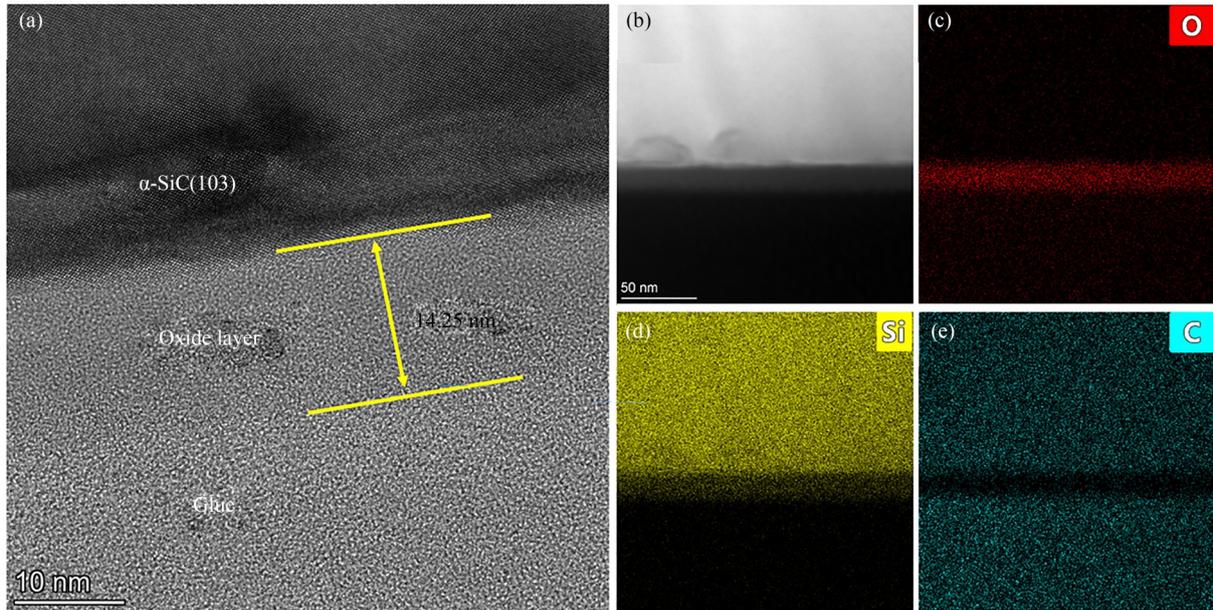


图2 S1试样截面组织分析。(a)截面TEM图;(b)S1截面的高角环形暗场像(HAADF)以及元素分布;(c)氧元素分布;(d)硅元素分布;(e)碳元素分布

Fig. 2 Analysis of cross-section structure of S1. (a) TEM image of the cross-section; (b) HAADF image and mapping analysis of S1; (c) Distribution of O; (d) Distribution of Si; (e) Distribution of C

3.1.2 氧化时间对Si含量的影响

基于增材制造成型的反应烧结碳化硅陶瓷中,出于成型工艺限制,烧结体中Si含量较高,通常体积分数大于40%。因此,热处理过程中除了SiC的氧化,还需考虑Si的氧化过程。与SiC相比,Si具有更高的氧化活性,在Si和O的相互作用过程中,假设厚度为 X_0 , 1 cm^2 的 SiO_2 体内所含的Si原子数为 $C_{\text{SiO}_2} \cdot X_0$,而这个数值应该与转变为 SiO_2 中的硅原子数 $C_{\text{Si}} \cdot X_1$ 相等,即:

$$C_{\text{SiO}_2} \cdot X_0 = C_{\text{Si}} \cdot X_1, \quad (3)$$

其中: C_{SiO_2} 为 SiO_2 中Si的原子密度,值为 $2.2 \times 10^{22}/\text{cm}^3$; C_{Si} 为Si晶体中的原子密度,值为 $5.1 \times 10^{22}/\text{cm}^3$; X_1 为硅晶体厚度。

与碳化硅氧化过程不同,Si与 O_2 的反应活性更高。由式(3)可知,Si与O相互作用形成氧化硅的过程中,伴随着2.32倍的体积膨胀。由此可知,相同条件下Si比SiC更易发生氧化反应,且氧化膜层的厚度变化更加明显。

通过观察RT,S1,S2和S3的截面组织发现,Si/SiC中Si表面 SiO_2 膜层厚度与保温时间成正比;当保温时间延长至3h时,S3表面 SiO_2 的膜层厚度达到121nm,是SiC表面膜层厚度的6~8

倍。为了表征氧化硅膜层的连续性,进行低倍模式下HAADF图的元素分布分析。如图3(a)所

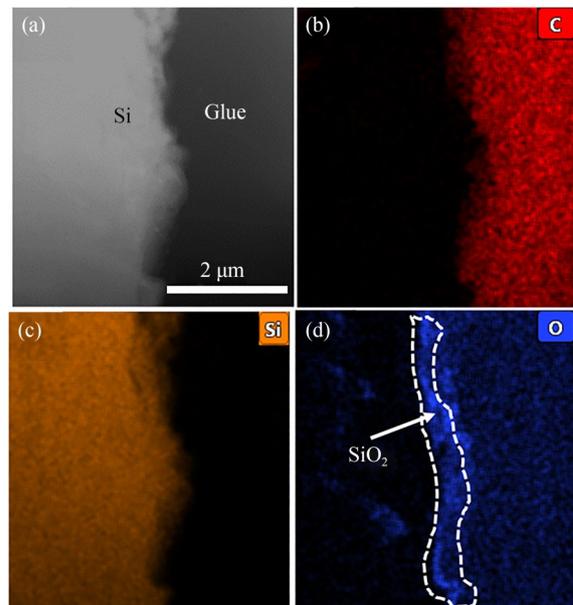


图3 S2截面结构及其元素分布。(a)S2截面的TEM图;(b)碳元素分布;(c)硅元素分布;(d)氧元素分布

Fig. 3 Analysis of cross-section structure and mapping of S2. (a) TEM image of the cross-section of S2; (b) Distribution of C; (c) Distribution of Si; (d) Distribution of O

示,在透射电子显微镜模式下观察 S2 截面,其中左侧为 Si 相,右侧为固定试样的胶水。对图 3(a) 进行元素分析,图 3(b)~3(d) 分别对应 C, Si 及 O 的分布情况。对比各元素分布可以发现,图 3(d) 虚线框标记处为 SiO_2 膜层,它在 Si 截面连续生长形成一层均匀、致密的保护层,有利于材料表面缺陷的自愈合和材料性能的提升。

图 4 展示了 S3 截面中 Si 表面 SiO_2 的生长状态,与图 3 中 S2 对比发现, S3 表面的 SiO_2 膜层出现不连续生长的现象,说明 S3 试样的氧化膜层发生了剥落,从而导致膜层不连续。Si 和 SiO_2 的线膨胀系数分别为 $2.6 \times 10^{-6}/\text{K}$ 和 $5.0 \times 10^{-7}/\text{K}$ ^[9,17-18]。氧化过程结束后,试样冷却过程中存在收缩现象,这种现象在 Si 中比 SiO_2 中更加明显。此时, SiO_2 膜层受到基体 Si 的压应力,基体 Si 受到 SiO_2 的拉应力。在 S1 和 S2 中,膜层厚度较薄,热应力较小。当膜层厚度增加时, Si/ SiO_2 界面处的热应力逐渐增大,导致 S3 样品中氧化膜层剥落,部分 Si 浮现于试样表面,该现象与图 1 中 XRD 图谱结果相一致。因此,保温时间为 2 h 时, Si/SiC 表面膜层最致密,有利于降

低材料表面缺陷的含量,从而达到提升性能的目的。

3.2 氧化时间对材料表面缺陷含量的影响

影响反应烧结碳化硅陶瓷性的因素包括固含量、晶粒尺寸以及表面缺陷等。陶瓷材料具有大量的共价键,与金属键不同的是,共价键具有方向性和饱和性,使晶体结构更为复杂,具有高的抵抗位错运动的能力。材料表面缺陷在外加载荷的作用下极易产生灾难性破坏。氧化处理法在反应烧结碳化硅(Si 和 SiC) 表面生长致密的 SiO_2 膜层,起到表面缺陷自愈合的作用,从而降低材料表面缺陷含量。

显气孔率是衡量材料表面缺陷含量的重要参数之一,通过阿基米德排水法测量 RT, S1, S2 和 S3 的显气孔率,如图 5 所示。反应烧结碳化硅具有高的硬度和脆性,试样条经过线切割、研磨和抛光等加工,其表面不可避免地产生少量的缺陷。对比 RT 和 S1 试样,经过高温处理后,这些表面缺陷能够产生自愈合效果。Si 和 SiC 表面产生的 SiO_2 薄膜对表面缺陷起弥合作用,因此,相比于 RT, S1 试样的显气孔率得到了明显降低。显气孔率的降低,有利于材料性能的提升。当保温时间增加至 2 h 时,随着反应烧结碳化硅与氧气的反应程度加深, SiO_2 膜层进一步的生长,在材料表面形成更加致密的保护层。反应烧结碳化硅材料的显气孔率达到最低,此时显气孔率为 0.008 1%,表面缺陷基本被消除。然而,当保温时间延长至 3 h 时, S3 试样的显气孔率出现上升,高于 S1 和 S2,略低于 RT。产生该现象的主要原因在于反应烧结碳化硅中 Si 表面 SiO_2 膜层的剥落。由图 4 可以看出, SiO_2 膜层局部出现剥落。残留的少量 SiO_2 膜层对缺陷含量仍有抑制作用,故 S3 的显气孔率仍低于 RT 试样。图 5 中 S3 试样的误差棒最大,可以推断 SiO_2 膜层的剥落增加了样品表面的不均匀性,4 个样品中 S3 的测量过程中偏差最大。因此,对比 RT, S1, S2 和 S3 可知,在 850 °C 下,经过 2 h 保温处理,反应烧结碳化硅陶瓷材料的表面缺陷含量最低,有利于提高基于增材制造的反应烧结碳化硅陶瓷的力学性能。

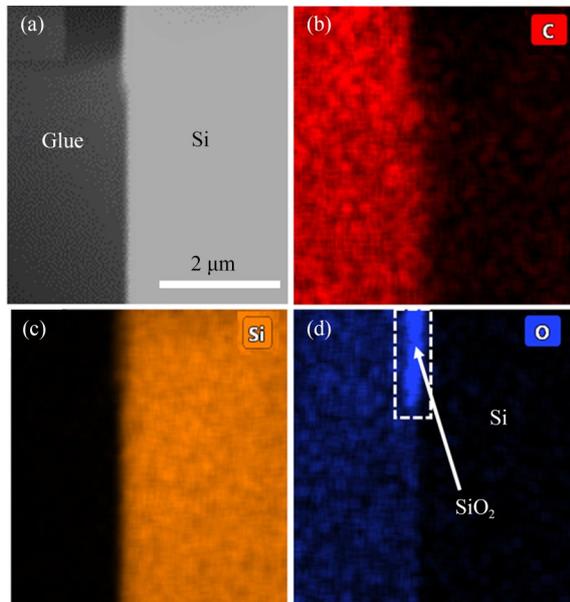


图 4 S3 截面结构及其元素分布。(a) S3 截面的 TEM 图;(b)碳元素分布;(c)硅元素分布;(d)氧元素分布

Fig. 4 Analysis of cross-section structure and mapping of S3. (a) TEM image of the cross-section of S3; (b) Distribution of C; (c) Distribution of Si; (d) Distribution of O

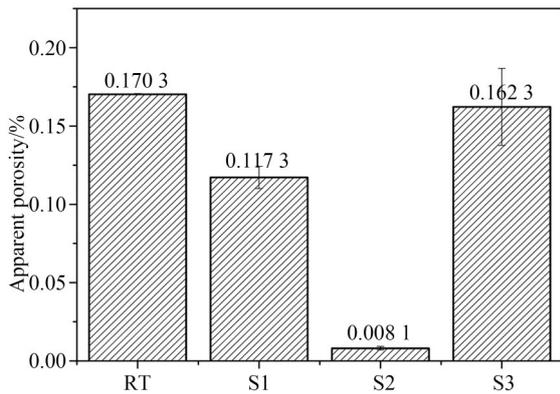


图5 氧化时间对反应烧结碳化硅显气孔率的影响

Fig. 5 Effect of oxidation time on apparent porosity of RT, S1, S2 and S3

3.3 氧化处理时间对材料性能的影响

反应烧结碳化硅陶瓷的氧化过程发生在材料表面,表征其表面硬度能够反映氧化程度。由上述分析可知,在Si/SiC中SiC表面的SiO₂膜层在保温3 h内变化不明显,氧化过程对Si的影响更大。本实验通过纳米压痕方法,在光学显微镜窗口下寻找Si的氧化层进行测量,硬度测量结果如图6所示。S2具有最高的纳米压痕硬度,说明氧化处理2 h时,Si表面SiO₂对基体的保护作用最强。

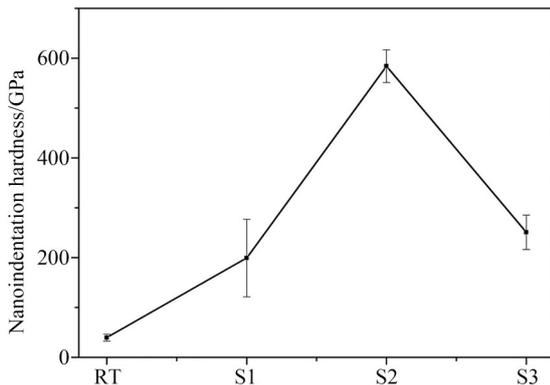


图6 氧化时间对RT,S1,S2和S3硬度的影响

Fig. 6 Effect of oxidation time on hardness of RT, S1, S2 and S3

抗弯强度是衡量陶瓷材料力学性能的重要参数之一。如图7所示,经过氧化处理2 h后,材料具有最高的弯曲强度,此时弯曲强度为263.9 MPa,相较于RT试样提升了10.7%。当氧化时

间增至3 h时,材料表面氧化膜层剥落,导致其显气孔率上升,强度值出现下降。S3的强度相较于RT仅提升1.4%,说明此时氧化膜层仅弥合少量表面缺陷。因此,氧化时间为2 h时,材料具有最大的抗弯强度。

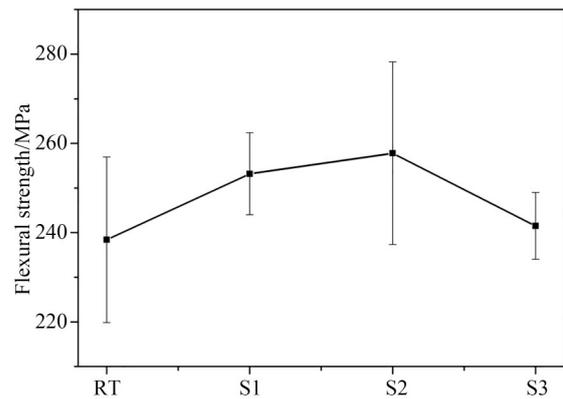


图7 氧化时间对RT,S1,S2和S3抗弯强度的影响

Fig. 7 Effect of oxidation time on flexural strength of RT, S1, S2 and S3

由上述分析可知,氧化处理2 h可以有效弥合反应烧结碳化硅陶瓷的表面缺陷,利于材料性能的提升。对于空间光学反射镜而言,碳化硅陶瓷的密度和弹性模量是影响镜体比刚度的重要参数。比刚度等于弹性模量与密度的比值,通常反射镜的比刚度越大,越有利于提高整体的轻量化率。图8展示了氧化处理2 h前后反应烧结碳化硅陶瓷弹性模量和密度的变化。氧化处理2 h后,材料的密度没有发生明显变化,一方面在于氧化膜层处于纳米级,体积和质量的变化率小;另一方面,Si的氧化过程导致材料质量增加,并

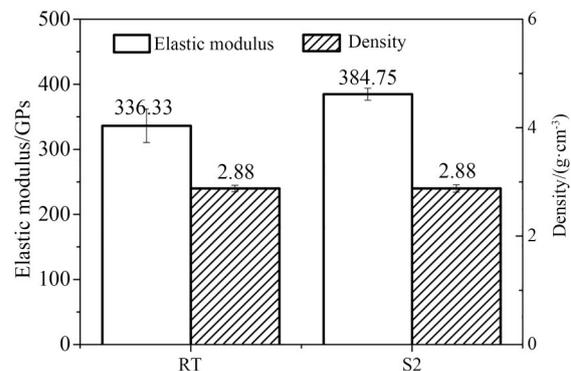


图8 RT和S2的弹性模量和体密度

Fig. 8 Elastic modulus and bulk density of RT and S2

伴随着体积的膨胀。因此,氧化处理 2 h 后,材料密度基本不变。由图 5 可知,当氧化处理 2 h 时,材料的显气孔率最低,材料表面缺陷含量最少。因此,相较于 RT 试样,S2 的模量得到了有效提升。

综上所述,高温氧化法赋予反应烧结碳化硅陶瓷表面一层致密的 SiO₂ 膜层,该膜层减少了材料表面缺陷的含量,有效提升了材料的力学性能。表 1 列举和对比了当前增材制造 SiC 陶瓷性能的优化方法。在反应烧结前引入碳源(包括树脂碳、碳纤维等)能够提升反应烧结碳化硅中增强相 SiC 的含量,是提升性能的有效手段。然而,树脂碳源的引入带来了制备周期长和环境污染的问题。此外,碳纤维昂贵的价格,增加了制备成本。本实验通过对反应烧结后的样品进行 2 h 的高温热处理,材料性能得到了明显提升,具有高性能、低成本、易操作的优势。

4 结 论

增材制造技术在制备复杂结构陶瓷方面具有传统工艺无法比拟的优势。本文针对增材制造成型的反应烧结碳化硅陶瓷面临着强度低、模量差的问题,开展高温氧化时间对材料性能提升

表 1 增材制造 SiC 性能优化方法对比

Tab. 1 Comparison of properties regulation methods for additive manufacturing silicon carbide

Specimens	Method	Flexural strength/MPa	Elastic modulus/GPa
Si/SiC	Phenolic resin ^[4]	244.17	—
Si/SiC	Phenolic resin ^[18]	—	285
Cf/SiC	Carbon fiber ^[10]	262.6	—
Si/SiC	Oxidation	263.94	384.75

影响的研究。通过研究氧化时间对材料成分的影响,探索氧化时间对材料表面缺陷的消除效果,揭示和总结高温氧化时间对基于增材制造的反应烧结碳化硅陶瓷性能优化的作用机制和影响规律。实验结果表明:850 °C 下,反应烧结碳化硅陶瓷中 Si 能够与氧气作用形成 SiO₂ 膜层,厚度大于 120 nm; SiO₂ 膜层能够有效降低反应烧结 SiC 表面的缺陷,降低裂纹扩展源的含量;当氧化时间为 2 h 时,显气孔率从 0.170 3% 降低至 0.008 1%,材料的力学性能最佳,其强度和模量分别为 263.9 MPa 和 384.75 GPa。该方法具有低成本、易操作的优势,能够为增材制造碳化硅陶瓷性能优化提供理论依据。

参考文献:

- [1] 张斌智,张舸,董德义. 反应连接 230 mm 口径 RB-SiC 反射镜[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11):2360-2364.
ZHANG B ZH, ZHANG G, DONG D Y. 230 mm aperture RB-SiC mirror by reaction-formed joint [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2360-2364. (in Chinese)
- [2] 张舸. 1.5 m 量级 SiC 陶瓷素坯凝胶注模成型工艺[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12):2989-2993.
ZHANG G. Gelcasting process of 1.5 m SiC ceramic green body[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):2989-2993. (in Chinese)
- [3] 凤良杰,成鹏飞,王炜. $\Phi 450$ mm 口径空间天文相机轻量化碳化硅主反射镜组件设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(2): 3788/IRLA20200175.
FENG L J, CHENG P F, WANG W. Design of lightweight silicon carbide primary reflector assem-

- bly for $\Phi 450$ mm space astronomical camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 3788/IRLA20200175. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] ECKEL Z C, ZHOU C Y, MARTIN J H, *et al.* Additive manufacturing of polymer-derived ceramics [J]. *Science*, 2016, 351(6268): 58-62.
- [6] 王上,张星祥,朱俊青. 空间相机全铝合金光机结构的设计与分析[J]. 红外技术, 2022, 44(4): 364-370.
WANG SH, ZHANG X X, ZHU J Q. Design and analysis of all aluminum alloy optical mechanical structure of space cameras [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(4): 364-370. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] LI F F, MA N N, CHEN J, *et al.* SiC ceramic mirror fabricated by additive manufacturing with material extrusion and laser cladding[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 58: 102994.
- [9] LI W, GUO C H, CUI C C, *et al.* Microstructure evolution and performance improvement of silicon carbide ceramics via impregnation method[J]. *Materials*, 2022, 15(5): 1717.
- [10] ZHANG H, YANG Y, HU K H, *et al.* Stereolithography-based additive manufacturing of lightweight and high-strength C_v/SiC ceramics[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101199.
- [11] 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.
- [12] OH J W, PARK J, NAHM S, *et al.* SiC-Si composite part fabrication via SiC powder binder jetting additive manufacturing and molten-Si infiltration[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, 101: 105686.
- [13] 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.
- [14] 耿林, 吴昆, 刘庆, 等. β -SiC 晶须的形貌和微观结构[J]. *硅酸盐学报*, 1991, 19(6): 543-548.
- GENG L, WU K, LIU Q, *et al.* Morphology and microstructure of β -SiC whisker[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1991, 19(6): 543-548. (in Chinese)
- [15] 王亚茹, 李英杰, 邹莱, 等. RB-SiC 金刚石磨粒柔性刻划材料去除及表面损伤行为[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(14): 1704-1715.
- WANG Y R, LI Y J, ZOU L, *et al.* Material removal and surface damage behavior of diamond grain for flexible scribing RB-SiC [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(14): 1704-1715. (in Chinese)
- [16] SONG M X, PENG K. Pre-oxidization of SiC on interfacial structure and mechanical properties of SiC_p/Al composites prepared by vacuum-pressure infiltration[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 6567-6577.
- [17] YANG L W, YE ZH Y, WANG CH Y, *et al.* Nanoindentation deformation and fracture mechanisms of SiC/SiO₂ thermally oxidized in plasma wind tunnel[J]. *Thin Solid Films*, 2023, 768: 139715.
- [18] MEYERS S, LEERSNIJDER L D, 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.

作者简介:



李 伟(1993—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2020年于北京科技大学获得硕士学位,主要从事轻量化碳化硅陶瓷的制备工作。E-mail: liwei199308@126.com

通讯作者:



张 舸(1980—),男,重庆荣昌人,博士,研究员,2008年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事空间用轻型碳化硅反射镜制备技术的研究。E-mail: zhanggeciomp@126.com