

先驱体转化法制备 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料研究进展

丁冬海, 刘 倩, 肖国庆, 张延杰

(西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 西安 710055)

摘 要:近年来,随着电子设备的快速发展,电磁污染问题日益严重, Si-O-C 陶瓷具有耐高温、抗氧化、机械强度高优点,已成为一种潜在的高温吸波材料。然而在制备 Si-O-C 陶瓷的众多方法中,先驱体转化法由于其工艺简单、基体组成调节范围广、转化率高优点被广泛应用。本文综述了先驱体转化法制备颗粒增强 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料、多孔 Si-O-C 陶瓷吸波材料及异质元素改性 Si-O-C 陶瓷吸波材料的研究现状,介绍了先驱体转化法制备纤维增强 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料,包括 C/Si-O-C 陶瓷、SiC/Si-O-C 陶瓷及氧化物纤维/Si-O-C 陶瓷,实现了结构功能一体化。相比于单一的 Si-O-C 陶瓷材料, Si-O-C 陶瓷复合材料不仅表现出优异的介电性能,同时能实现多重损耗机制和阻抗匹配的平衡,进而提高吸波性能,最后,展望了 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料未来的发展方向。

关键词:硅-氧-碳陶瓷; 先驱体转化法; 介电性能; 吸波性能; 吸波材料

中图分类号: TQ174.7 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)09-3242-12

网络出版时间: 2026-08-18



随着通信技术、电子设备的迅速发展以及雷达系统的广泛应用,电磁污染的问题日益严重,不仅威胁电子设备的正常运行,还对信息安全构成重大隐患。尤其在军事雷达隐身领域,为了降低军事装备被雷达探测到的概率并提升装备在复杂环境下的适应性,研制具有“薄、轻、宽、强”特征的高温吸波材料已成为亟须解决的关键科学问题^[1,2,3]。

电磁波入射到材料表面时,通常有 3 种路径:透过材料去往材料的另一面;在材料内部被吸收;在材料表面发生反射,如图 1 所示^[4]。具有优异吸波性能的材料应使电磁波尽可能多的被吸收掉,因此,对吸波材料的损耗能力提出了较高的要求^[5]。电磁波吸收能力由反射损耗(RL)决定,基于传输线理论,输入阻抗和 RL 的计算如以下方程^[6]所示:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tan h \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (1)$$

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_0 + Z_{in}} \right| \quad (2)$$

式中: Z_{in} 为输入阻抗; Z_0 为自由空间阻抗; f 为电

磁波的频率; d 为吸收体厚度; c 为光速。当 $Z_{in}=Z_0$ 时,电磁波不会在吸收材料的表面上反射,而是全部入射到吸收体内部,实现阻抗匹配^[7]。对于吸波材料,RL 值越小,则表明其对电磁波的吸收能力越强,当 RL 值小于 -10 dB 时,表明该材料可以吸收 90% 的电磁波,相对应的频率范围称为有效吸收带宽(EAB)^[8]。

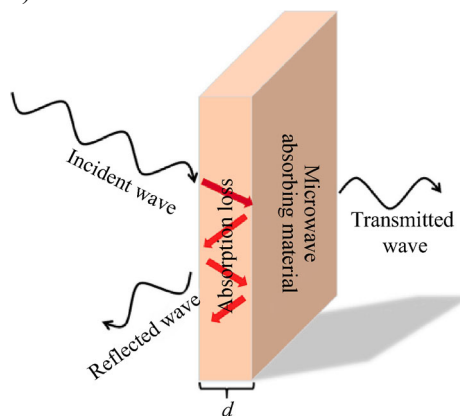


图 1 电磁波与吸收材料的相互作用^[4]

Fig. 1 Interaction of electromagnetic wave with absorbing material^[4]

收稿日期: 2025-11-19。 修订日期: 2025-12-20。

基金项目: 国家自然科学基金(52272027, 52372034); 陕西省重点研发计划(2023-YBGY-421, 2023-GHZD-51); 陕西省自然科学基金(2025JC-YBQN-480)。

第一作者: 丁冬海(1983), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-11-19. Revised date: 2025-12-20.

First author: DING Donghai (1983-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: dingdongxuat@163.com

电磁波的损耗方式主要分为介电损耗、电导损耗以及磁损耗,然而,磁性材料在高温环境下会失去磁性,丧失其对电磁波的损耗能力;以碳材料为主的电导损耗型材料长期暴露在空气中易氧化,使其导电性能降低,从而降低材料的吸波性能。因此,为应对复杂的高空作战环境,具有高机械强度、耐高温、耐腐蚀和抗氧化特征的多功能陶瓷基复合材料成为研究热点^[9,10]。其中, Si-O-C 陶瓷是一种由自由碳相和非晶 Si-O-C 玻璃相组成的具有开放式聚合物状网络结构的高温陶瓷,相较于 Si-C-N、Si-B-C-N 等其他多组元陶瓷所具有的独特的阴离子二氧化硅网络结构,这种结构有助于其保持化学和力学性能稳定性,并且成本较低、导电性较好,受到了广泛关注^[11-13]。聚硅氧烷(PSO)衍生 Si-O-C 陶瓷是由 $\text{SiO}_x\text{C}_{4-x}$ ($x=0, 1, 2, 3, 4$) 基本单元组成, C 以 sp^2C 和 sp^3C 2 种形式存在,其中, sp^2C 为自由 C, sp^3C 与 Si 成键^[14]。在较低温度下,自由 C 的尺寸很小,还有少量 H 以 C-H 形式存在^[15]。

Si-O-C 陶瓷的微波吸收性能主要源于 2 种损耗机制: 1) 裂解产生的游离碳相形成导电网络, 引发显著的电导损耗; 2) 游离碳与陶瓷相之间的异质界面诱导界面极化弛豫损耗。在高温下, 基体的相分离与碳热反应促使 SiC 结晶, 使得上述 2 种损耗机制得以协同增强^[16-17]。然而, 碳含量过高会导致材料整体电导率急剧上升, 引起阻抗失配, 使得入射波在材料表面被强烈反射而无法进入材料内部被吸收^[18]。

目前, 对于制备 Si-O-C 陶瓷的方法主要有化学气相沉积法^[19]、溶胶-凝胶法^[20]、3D 打印技术^[21]及先驱体转化法^[22]等。其中, 先驱体转化法是一种常用的先进陶瓷制备工艺, 首先, 通过化学合成获得聚合物先驱体, 利用其良好的流动性与可加工性进行成型处理, 再通过高温热解使其转化为目标陶瓷材料^[23]。充分利用有机化学合成的丰富手段, 合成所需组成与分子结构的陶瓷先驱体, 可对目标陶瓷的组成、结构与性能进行调控。先驱体转化法由于其制备温度低、灵活性高、能耗低、基体组成调节范围广等特点被广泛应用^[24]。其次, 在制备三元及三元以上组分的陶瓷时, 先驱体转化法不仅可以获得其他方法难以制备的亚稳相陶瓷, 还可以实现各组元在分子级甚至原子级水平上的均匀混合, 从而避免因化学成分和微观结构上的不均匀性而造成陶瓷性能上的缺陷, 其制备的 Si-O-C 陶瓷具有耐高温、抗氧化、耐腐蚀、力学和介电性能可设计等

优点^[25]。通过对 Si-O-C 先驱体进行分子修饰、调控热解温度与气氛, 可调节陶瓷的微观结构、电导率、介电性能与阻抗匹配, 从而增强其吸波性能, 实现结构功能一体化, 为构建轻量化、耐高温、强吸收且频带可调的 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料提供了有效途径。

本文首先综述了先驱体转化法制备颗粒增强 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料的研究现状, 包括惰性填料和活性填料; 其次, 综述了先驱体转化法制备多孔 Si-O-C 陶瓷以及异质元素改性 Si-O-C 陶瓷的研究现状; 最后, 按照不同纤维增强 Si-O-C 陶瓷进行分类, 总结了先驱体转化法制备纤维增强 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料的研究现状, 包括 $\text{C}_f/\text{Si-O-C}$ 陶瓷、 $\text{SiC}_f/\text{Si-O-C}$ 陶瓷及氧化物纤维/Si-O-C 陶瓷, 同时展望了 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料的未来研究方向。

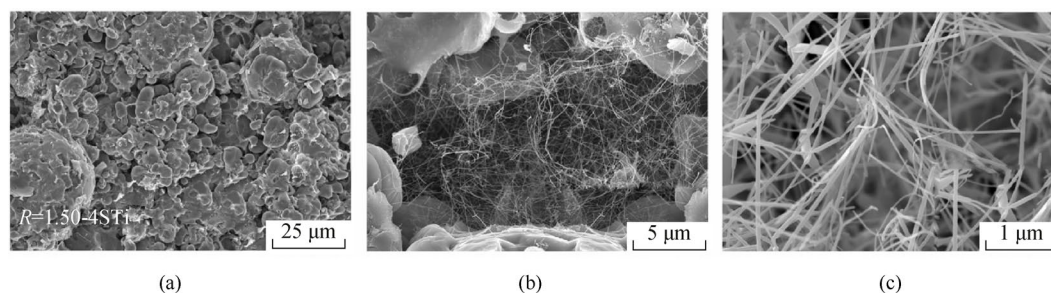
1 先驱体转化法制备颗粒增强 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料

1.1 惰性填料

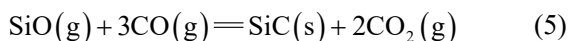
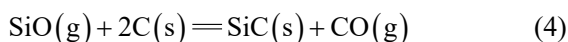
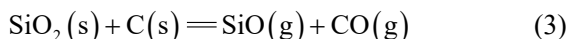
先驱体在裂解过程中会因小分子气体的逸出而发生一定的质量损失, 加入惰性填料在一定程度上可以提高陶瓷的产率, 抑制烧结产物的体积收缩, 常用的惰性填料有 SiC、BN、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 等。

Miao 等^[21]在 Si-O-C 陶瓷中加入 SiC 作为填料, SiC 的引入产生了新的相和异质界面, 增强了介电极化, 包括不同相之间的界面极化和电磁场中游离碳偶极极化, 相较于没有添加 SiC 的空白样品表现出优异的吸波性能。

SiO_2 相通常具有较低的介电常数和损耗角正切, 有助于调节整体介电性能, 使其更接近空气阻抗, 改善阻抗匹配, 让更多电磁波进入材料内部, 但过多 SiO_2 会降低整体损耗能力^[26]。Wang 等^[27]在 Si-O-C 陶瓷中加入 SiO_2 , 如图 2a 所示, 形成了由 SiO_2 颗粒构成的骨架结构, 该结构在热解过程中抑制了 Si-O-C 基体的收缩, 导致 Si-O-C 基体出现不连续性, 进而使 Si-O-C/ SiO_2 陶瓷中产生孔隙。大量孔隙为碳热还原反应提供了空间, 反应方程如式(3)~式(5)所示, 最终生成 SiC 纳米线, 如图 2b~图 2c 所示。未填充的 Si-O-C 陶瓷因预陶瓷热解时气体释放, 线性收缩率高达 32.14%, 易导致宏观开裂; 而加入 40%(体积分数) SiO_2 后, SiO_2 颗粒作为刚性骨架阻碍基体收缩, 使线性收缩率骤降至 6.50%, 同时陶瓷产率从 53.31% 提升至 81.4%。其次, SiO_2

图2 SiOC 陶瓷的微观结构: (a) SiO₂ 颗粒骨架; (b–c) SiC 纳米线^[27]Fig. 2 Microstructure of SiOC ceramics: (a) SiO₂ particle skeleton; (b–c) SiC nanowires^[27]

降低了 Si–O–C 基体的介电常数, 提高了阻抗匹配, 使电磁波更易进入材料内部。



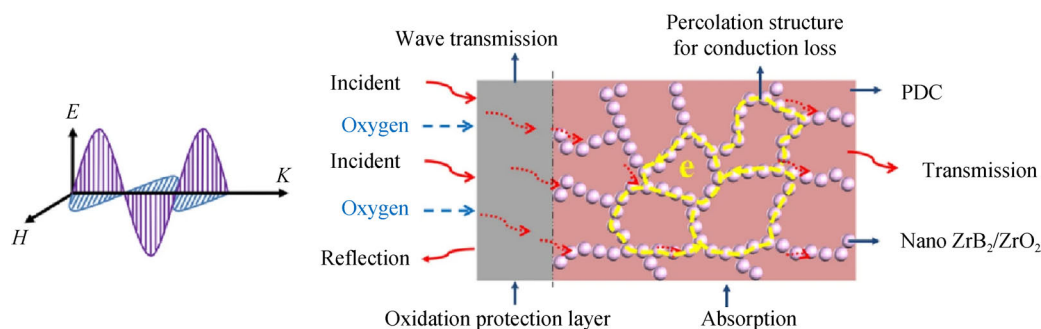
惰性颗粒增强 Si–O–C 陶瓷主要通过物理掺杂与结构调控提升材料吸波性能, 有效调节 Si–O–C 基体的介电常数、增加界面极化损耗、优化阻抗匹配, 同时通过颗粒分散与孔隙设计延长电磁波传播路径, 增强散射损耗。

1.2 活性填料

在 Si–O–C 陶瓷中加入活性填料不仅可以抑制收缩、改善孔隙结构, 而且在裂解过程中会产生新的相, 可以有效改善陶瓷的性能或者赋予新的功能

特性, 常用的活性填料有 Al、B、TiB₂、ZrB₂ 等。Si–O–C 陶瓷的电导率是影响其吸波性能的主要因素, 自由 C 含量及结晶形态越高, 导电性越好, 除了优化基体外, 还可以加入 TiB₂、ZrB₂ 等导电相填料来提高 Si–O–C 陶瓷的电导率, 产生电导损耗, 从而有效提高其吸波性能^[28]。

Feng 等^[29]利用 TiB₂ 弥补 PSO 热解的碳损耗、调控材料介电性能, 同时诱导 SiC 纳米线生长构建特殊微观结构, 实现高效电磁波吸收, 满足先进隐身材料需求。Jia 等^[30]以聚碳硅氧烷为先驱体制备 Si–O–C 基体, 添加经 1000 °C 氩气热处理的 ZrB₂ 纳米粉作为导电填料, 当电磁波入射到材料表面时, ZrB₂ 可在材料内部形成导电网络, 诱导电流通过网络路径流动, 进而通过欧姆加热效应将电磁能量转化为热能耗散, 图 3 为其高温氧化环境中电磁波吸收机理的说明。

图3 高温氧化环境中电磁波吸收机理的说明^[30]Fig. 3 Explanation of electromagnetic wave absorption mechanism in high-temperature oxidation environments^[30]

Deng 等^[31]在 Si–O–C 陶瓷中加入不同质量分数的 ZrB₂, ZrB₂ 纳米颗粒可以形成导电网络, 在交变电磁场下诱导电流, 将电磁能转化为热能, 形成电导损耗; 另一方面, ZrB₂ 与 ZrO₂/SiO₂ 纤维、Si–O–C 基体间可以形成大量异质界面, 引发界面极化, 同时其晶格缺陷会产生偶极极化, 二者共同提升电磁

损耗能力, 最终增强材料的微波吸收性能。随着 ZrB₂ 的质量分数由 10% 增加至 60%, 复合材料的介电常数实部和虚部整体呈升高趋势, 而孔隙率逐渐降低, 当 ZrB₂ 质量分数为 40% 时, 吸波性能最佳, 覆盖整个 X 波段。

活性填料的引入, 除了传统意义上的抑制收缩、

调控孔隙结构, 更关键的是通过高温裂解过程中的界面反应与相演变, 重构材料的微观结构, 赋予其新

的功能特性, 从而提高材料的吸波性能。表 1 总结了颗粒增强 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料的吸波性能。

表 1 颗粒增强 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料的吸波性能

Table 1 Microwave absorption properties of particle reinforced Si-O-C ceramic composite absorbing materials

Composites	Frequency range	Microwave absorbing properties			Reference
		RL _{min} /dB	EAB/GHz	Thickness/mm	
SiC	2.0–18.0	–36.0	2.0	3.5	[21]
SiO ₂	2.0–18.0	–28.1	6.4	2.3	[27]
TiB ₂	8.2–12.4	–55.1	4.2	3.6	[29]
ZrB ₂	26.5–40.0		13.5	2.9	[30]
ZrB ₂	8.2–12.4	–51.9	4.2	2.9	[31]
ZrB ₂	26.5–40.0	–29.3	13.5	3.0	[32]
TiC	26.5–40.0	–14.3	13.5	<1.0	[33]
SiC	8.2–12.4	–61.0	3.5	2.8	[34]

2 先驱体转化法制备多孔 Si-O-C 陶瓷吸波材料

Si-O-C 多孔陶瓷具有耐高温、抗热震、耐腐蚀等优异性能, 在高温气体、催化剂载体、绝热体等领域具有重要的应用价值^[35]。结合传统多孔陶瓷丰富、多样的造孔方法, 发挥先驱体转化法的成型技术优势并利用其裂解特性和结构特点, 可制备出不同成分、不同形态、不同孔结构的多孔 Si-O-C 陶瓷。陶瓷的孔隙可以使进入材料内部的电磁波进行多次反射, 延长传播路径, 增加能量被吸收的机会, 有助于改善阻抗匹配, 提升吸波性能, 但过高的孔隙率会影响材料的力学性能。

Tang^[36]等将 ZrC 分散到改性聚硅氧烷中, 制备了具有多孔层状结构的 ZrC/ZrO₂-SiOC 复合材料, ZrC 的引入对 Si-O-C 基体的层状结构产生破坏, 进而催生多孔特征, 且随着 ZrC 掺量的增加, 气孔率先升高后降低, 大尺寸气孔减少, 整体结构更加致密。在 900 °C 条件下, ZrC 含量为 5%(质量分数)

时, 具有较好的微波吸收性能, 在 13.0 GHz 下的 RL_{min} 为 –33.5 dB, EAB 为 7.8 GHz, 同时在 1200 °C 以下保持稳定, 质量减轻不到 2%。Zhu 等^[37]以聚氢甲基硅氧烷(PHMs)为先驱体、二乙烯基苯(DVB)为交联剂溶于环己烷溶剂, 加入铂基催化剂, 生成具有定向蜂窝状的 Si-O-C 陶瓷。Liu^[38]等采用先驱体转化法和模板法的结合制备了分级多孔 Si-O-C 陶瓷(HPSCs), 如图 4 所示。多孔结构能延长电磁波传播路径、改善微波散射, 满足先进微波吸收材料轻量化需求, HPSCs 的表面积为 51.4 m²/g, 在厚度为 2.3 mm 时的 RL_{min} 为 –47.9 dB, EAB 为 4.6 GHz。

图 5 为 2 种不同多孔 Si-O-C 陶瓷的 SEM 照片。由图 5 可见, Si-O-C 陶瓷具有定向蜂窝状结构的孔洞, 大小一致、均匀分布, 不同放大倍数下 HPSC 显示出大量具有分级多孔结构的孔隙, 尺寸约为 1.2 μm, 孔洞不规则, 对应先驱体热解过程中气体的逸出。由图 5 可观察到尺寸为 200 nm 左右的更均匀的孔, 这些孔主要由交联的碳纳米纤维构成。

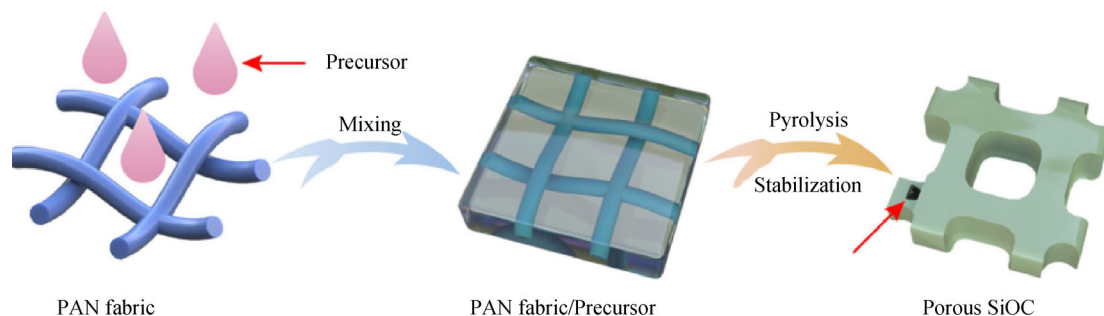


图 4 HPSCs 的制备^[38]

Fig. 4 Schematic illustration of fabrication of HPSCs^[38]

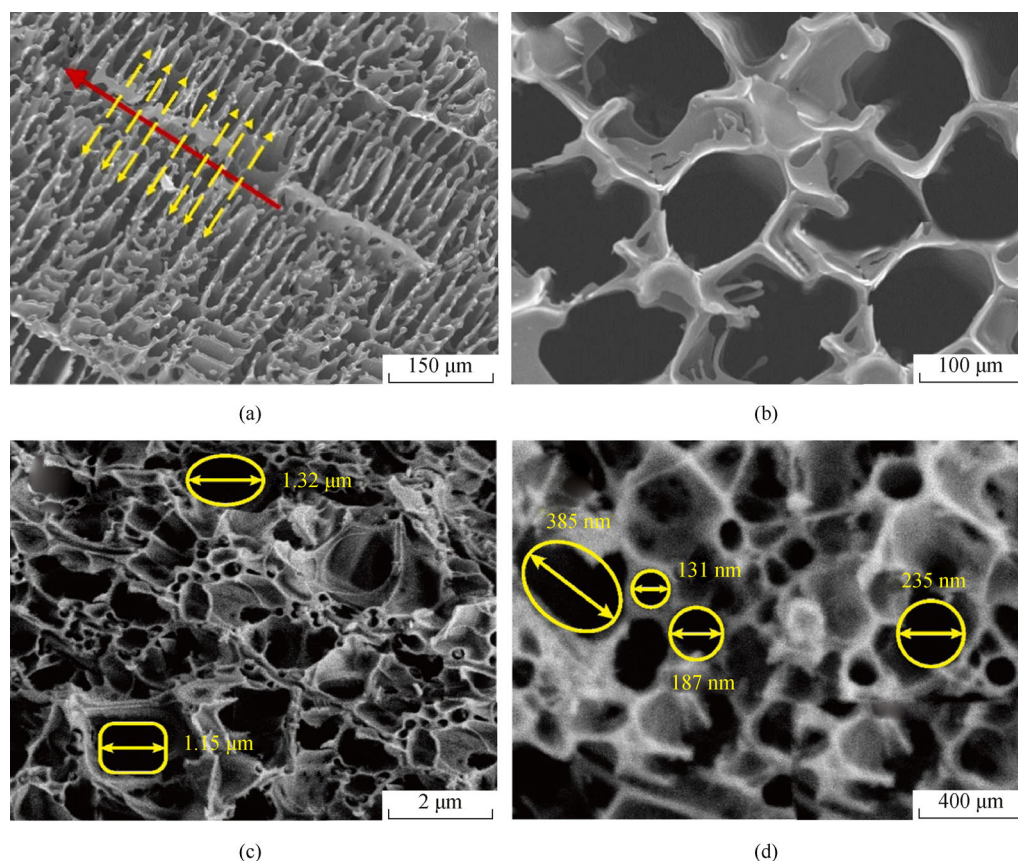


图5 2种不同多孔Si-O-C陶瓷的SEM照片: (a)~(b) 定向蜂窝状Si-O-C陶瓷的纵向及截面^[37]; (c)~(d) 不同放大倍数下的HPSC^[38]

Fig. 5 SEM of two different porous Si-O-C ceramics: (a)~(b) longitudinal direction and cross-section views of oriented honeycomb Si-O-C ceramics^[37]; (c)~(d) HPSC at different magnifications^[38]

过高的孔隙率虽有利于轻量化和阻抗匹配, 但会削弱材料的机械强度与耐久性, 因此, 当前研究的目标应是实现功能和结构的协同优化。

3 先驱体转化法制备异质元素改性Si-O-C陶瓷吸波材料

作为高温结构材料, PSO衍生Si-O-C陶瓷的长期服役温度不宜超过1250℃, 然而, 在PSO分子结构中引入异质元素M, 可以改变PSO的裂解行为以及Si-O-C陶瓷的分相和结晶行为, 从而影响耐高温性能, 提高Si-O-C陶瓷的热稳定性。目前, 研究较多的M元素主要是B、Al、Zr、Hf等。

B元素在Si-O-Si网络中以Si-O-B的形式存在, 这种结构一定程度上提高了SiBOC陶瓷的高温稳定性。Painuly等^[39]从甲基乙烯基硼硅烷预陶瓷聚合物溶液制备具有矩形棒状孔的SiBOC陶瓷泡沫。Xing等^[40]制备了一种掺杂镓铟合金(EGaIn)的SiBOC陶瓷, 该陶瓷具有独特的液态金属陶瓷特征,

在C-Ku波段内, 具有高达11.4 GHz的超宽有效吸收带, 如图6所示, 且其抗压强度达到158.77 MPa。

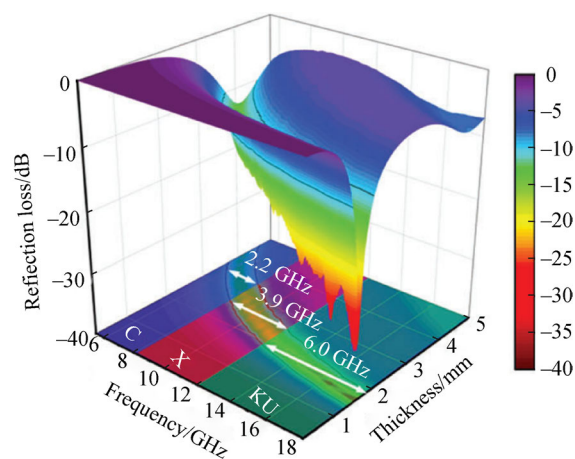


图6 具有不同厚度的SiBOC陶瓷(0.5% EGaIn, 在1000℃条件下热解)在室温下的RL图^[40]

Fig. 6 RL diagram of Si(GaIn)BOC ceramics (0.5% EGaIn, pyrolyzed at 1000 °C) at room temperature with different thicknesses^[40]

周演^[41]合成了含 Hf 元素的聚硅氧烷先驱体,发现有机 Hf 盐更易于与硅树脂发生缩合反应形成 Si-O-Hf 键, Hf 的引入明显改变了硅树脂的裂解行为。将含 Hf 聚硅氧烷 1000 °C 裂解得到的 SiHfOC 陶瓷在 1200~1600 °C 惰性气氛下进行热处理, Hf 的引入在高温下会析出纳米级 HfO₂ 晶粒, 可以阻碍体系内自由碳的扩散, 延缓碳热还原反应的发生, 从而在不同程度上提升了 Si-O-C 陶瓷的热稳定性。

Al 元素在先驱体中以 Si-O-Al 键形式存在, 在高温下 Si-O-Al 断键并与 SiO₂ 基体形成尖晶石或莫来石相, 抑制了 SiO₂ 的结晶, 从而提高材料的热稳定性。Ma 等^[42]通过在 1000 °C 热解掺铝的聚甲基硅氧烷制备 SiAlOC 陶瓷, 证实了 1400 °C 莫来石的产生及其在更高温度下的结晶。由于 SiAlOC 陶瓷中游离碳含量低和莫来石的形成, 碳热反应得到了有效抑制, 通过引入 Al 元素增强了 Si-O-C 陶瓷的热稳定性。

Huo 等^[43]将 Zr 元素引入 Si-O-C 陶瓷, 形成的

Si-O-Zr 键可以有效抑制碳热还原反应, 从而达到提高陶瓷高温稳定性的效果, 在材料内部形成大量异质界面, 同时 Zr 元素的引入增加了偶极子极化位点, 在厚度为 4.0 mm 时, RL_{min} 为 -40.4 dB, EAB 达 6.9 GHz。

Li 等^[44]采用先驱体转化法成功合成了 SiTiBOC 陶瓷, 阻抗匹配有效地增强到 Z≈1, 在 10.7 GHz 频率下的 RL_{min} 可达 -61.6 dB。通过雷达截面积(RCS)建模评估了 SiTiBOC 陶瓷的雷达隐身能力, 在 0° 时, RCS 降低了 10.15 dB·m², 在 -45° 时, 最小 RCS 值为 -55.2 dB·m²。

异质元素的引入并非简单的物理掺杂, 而是通过改变化学键实现对陶瓷微观结构、相组成及最终性能的设计与协同优化, 有效抑制了 Si-O-C 陶瓷高温劣化的碳热还原反应。高活性的异质界面, 可以引发强烈的界面极化, 显著增强了材料的介电损耗能力。表 2 总结了异质元素改性 Si-O-C 陶瓷吸波材料的吸波性能。

表 2 异质元素改性 Si-O-C 陶瓷吸波材料的吸波性能

Table 2 Microwave absorption properties of heterogeneous element modified Si-O-C ceramic absorbing materials

Type	Frequency range	Microwave absorbing properties			Reference
		RL _{min} /dB	EAB/GHz	Thickness/mm	
Si-B-O-C	5.4-18.0		11.4	10.0	[40]
Si-Zr-O-C	2.0-18.0	-40.4	6.9	4.0	[43]
Si-Ti-B-O-C	2.0-18.0	-61.6	1.2	7.6	[44]
Si-Fe-B-O-C	2.0-18.0	-47.90	4.4	1.6	[45]
Si-Ni-O-C	2.0-18.0	-55.6	3.9	1.3	[46]
Si-Fe-O-C	2.0-18.0	-47.6	3.7	4.5	[47]

4 先驱体转化法制备纤维增强 Si-O-C 陶瓷复合吸波材料

4.1 C/Si-O-C 陶瓷复合吸波材料

纤维增强陶瓷基复合材料广泛应用于航空航天领域, 兼具结构承载和吸收雷达波 2 种功能, 在 Si-O-C 陶瓷基体中引入具有特殊介电性能的陶瓷纤维, 通过纤维与陶瓷基体的界面极化、纤维本身的电导损耗等机制提升吸波性能^[48]。

早期常用的增强纤维为碳纤维, 其具有优异的高温稳定性、高孔隙率和良好的导电性能。然而, 单一的碳纤维与基体间的界面结合强度低, 难以在高载荷条件下稳定承载, 同时, 其较高的电损耗易导致材料阻抗失配, 使其无论作为结构材料还是吸波材料都表现不理想。通过将碳纤维

与先驱体陶瓷结合, 制备碳纤维增强陶瓷基复合材料, 可有效改善碳纤维密度不足、阻抗匹配差及介电常数偏高的难题^[49-50]。针对碳纤维在高温环境下易发生氧化的问题, 可通过在纤维表面引入保护层或在复合材料外部施加防护涂层的方式加以解决, 从而提升材料的抗氧化稳定性和服役可靠性。

Zhao 等^[51]通过先驱体浸透和热解工艺制备了 Si-O-C/CFs, 通过改变先驱体浸透热解循环次数有效地调节 Si-O-C 的含量, 从而改善复合材料的压缩强度和阻抗匹配特性, 增强其损耗能力, 从而提高复合材料的电磁波吸收性能。2 次循环后, 复合材料的压缩强度约为 4.4 MPa, 在厚度为 2.7 mm 时, 其 EAB 可达 14.7 GHz, RL_{min} 值可达 -62.9 dB。

然而, 仅采用碳纤维增强 Si-O-C 陶瓷基体难以实现复合材料综合性能的显著突破, 其在极端环

境下的应用仍面临严峻挑战。Zhao 等^[52]通过先驱体浸渍热解法将镍引入 $C_f/Si-O-C$ 复合材料的基体中, 如图 7 所示, 可见催化原位形成纳米结构, 包括碳纳米管、自由碳和 SiC 。基体中原位形成的纳米结构的存在提高了 $C_f/Si-O-C$ 复合材料的致密化和力学性能, 并显著提高了耐磨性。Qian 等^[53]通过

先驱体浸渍热解过程设计了分级 $Si-O-C/SiC_{nws}/C_f$ 复合材料, 在 14.4 GHz 下反射损耗最小为 -46.0 dB, 厚度为 1.6 mm, 有效吸收频带达到 4.3 GHz。其抗压强度在 z 和 x/y 方向分别达到 8.69 和 16.41 MPa, 这一贡献对碳纤维/陶瓷基复合材料在恶劣环境中的应用具有指导意义。

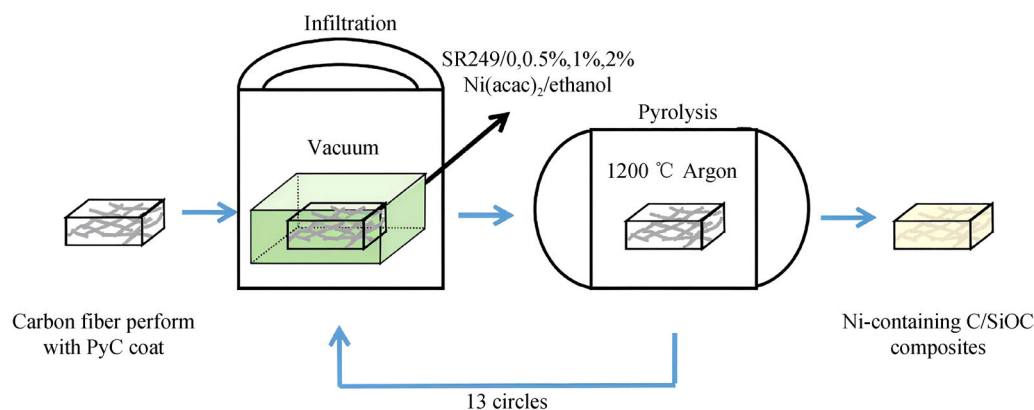


图 7 $C_f/Si-O-C$ 复合材料制备工艺示意图^[52]

Fig. 7 Schematic diagram of the fabrication process for $C_f/Si-O-C$ composites^[52]

Zeng^[54]等采用聚合物先驱体热解法制备了 $Si-O-C$ 陶瓷涂层改性碳纤维($C_f/Si-O-C$), $Si-O-C$ 陶瓷作为双功能涂层, 不仅将氧化温度从 415 °C 提高到 890 °C, 而且将微波吸收能力从 12.6 dB 大大提高至 47.5 dB。这归因于交联结构中的多次反射、各种极化弛豫过程和良好的阻抗匹配效应。 $Si-O-C$ 陶瓷涂层作为半导体可以抑制源自交联 C_f 网络的趋肤效应, 从而产生良好的阻抗匹配行为。

Sun 等^[55]聚焦含硼酚醛树脂衍生碳改性三维针刺碳纤维增强 $Si-O-C$ 复合材料, 三维针刺碳纤维预制体通过针刺工艺形成立体交织结构, 为复合材料提供了稳定的骨架支撑, 解决了传统短切碳纤维复合材料力学性能差的问题。碳纤维的立体交织结构形成了大量孔隙, 随着循环次数增加, $Si-O-C$ 先驱体逐渐填充碳纤维骨架间的孔隙, 使复合材料密度从原始的 0.28 g/cm³ 逐步提升至 3 次循环后的 0.88 g/cm³, 孔隙率从 84% 降至局部致密状态。碳纤维与含硼酚醛树脂衍生碳、 $Si-O-C$ 陶瓷之间存在显著的电导率差异, 形成大量异质界面, 引发界面极化效应, 促进电磁波能量耗散; 另一方面, 碳纤维作为导电相, 可与游离碳协同形成导电网络, 增强电导损耗, 进一步衰减电磁波。

先驱体转化法通过“骨架构建-界面调控-成分优化”的多维度设计, 实现了 $C_f/Si-O-C$ 复合材料力

学性能与吸波性能的同步提升, 为后续多元增强相协同改性指明了方向, 但其界面结合弱、高温易氧化仍待进一步解决。

4.2 $SiC_f/Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料

碳纤维长时间暴露于大气中时抗氧化性差, 极大地限制了其在高温结构构件领域的应用。相比之下, SiC 纤维增强陶瓷基复合材料因出色的高温稳定性、低密度、强抗氧化性等优势, 在微波吸收、航空航天等领域更具应用潜力。

Xing 等^[56]使用连续 SiC 纤维针刺毡作为增强体、聚硅氧烷作为先驱体, 通过先驱体浸渍热解制备了 $SiC_f/Si-O-C$ 陶瓷复合材料。图 8 为不同退火温度下 $SiC_f/Si-O-C$ 复合材料的 X 射线衍射谱。由图 8 可见, 随着退火温度的升高, $\beta-SiC$ 的衍射峰逐渐清晰、尖锐, 当退火温度升高到 1500 °C 时, 有效吸收带宽覆盖整个 X 波段, 在 4.0 mm 处的 RL_{min} 为 -32.8 dB。Liu 等^[57]制备了具有高性能的碳纳米线和 SiC 纳米线的双纳米线新型微波吸收 $Si-O-C$ 复合陶瓷, 增强了复合陶瓷的界面极化和偶极极化, 在 Ku 波段表现出优异的微波吸收性能, 在厚度为 1.9 mm 时, EAB 高达 4.8 GHz。

为了实现 $SiC_f/Si-O-C$ 复合材料的力学性能和吸波性能的平衡, Ren 等^[58]通过先驱体浸渍热解制备不同 SiO_2 填料含量的 $SiC_f/Si-O-C$ 陶瓷复合材料,

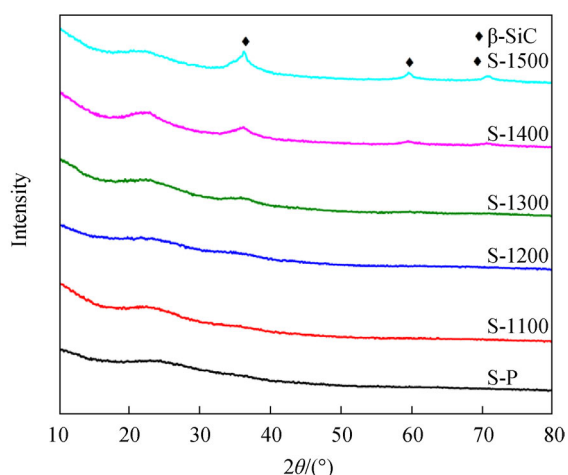


图 8 不同退火温度下 $\text{SiC}_f/\text{Si-O-C}$ 复合材料的 X 射线衍射谱^[56]

Fig. 8 X-ray diffraction patterns of $\text{SiC}_f/\text{Si-O-C}$ composites annealed at different temperatures^[56]

Si-O-C 陶瓷在 1000 °C 热解后主要为无定形 SiO_2 , 添加 SiO_2 填料使 SiO_2 特征峰半宽变窄, 表明填料均匀混入基质。 SiO_2 填料可以提高基体的密度, 减少基体的微裂纹。添加 5 g SiO_2 弯曲强度提升至 201.09 MPa, 添加 10 g SiO_2 实现了力学性能 (171.71 MPa) 与微波吸收性能 ($\text{RL} = -26.0 \text{ dB}$, $\text{EAB} = 3.2 \text{ GHz}$) 的平衡, 为多功能复合材料的设计提供了参考。在此基础上, Ren 等^[59]制备 $\text{SiC}_f/\text{Si-O-C}$ & 莫来石杂化陶瓷基复合材料, 10% PSO 时弯曲强度高达 301.94 MPa, 50% PSO 时 EAB 达 3.9 GHz。

Yang 等^[60]采用“化学气相渗透法+先驱体浸渍裂解法”交替工艺制备 $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiOC-Si}_3\text{N}_4$ 三明治结构复合材料, SiC_f 并非仅作为传统增强相, 而是同时具备力学支撑、微波吸收核心单元与结构骨架的多重功能。原始样品弯曲强度 308 MPa, 800~1200 °C 氧化后, 材料弯曲强度保留率 79.8%~93.5%, 全 X 波段 $\text{RL} < -9 \text{ dB}$ 。

$\text{SiC}_f/\text{Si-O-C}$ 陶瓷复合吸波材料通过微观结构调控与多相协同的精准性能设计, 强化界面结合、优化阻抗匹配, 但其因价格过高, 在实际使用中受到限制。

4.3 氧化物纤维/ Si-O-C 陶瓷复合吸波材料

以氧化物纤维作为增强体制备的氧化物陶瓷基复合材料具有高温力学性能好、抗氧化性好、相较于 SiC 纤维价格适宜等优点, 能够有效解决陶瓷基复合材料在特殊环境下易氧化的问题, 极大程度地拓宽了陶瓷基复合材料在航空航天领域中的应用。

Al_2O_3 纤维具有优良的透波性能和高温抗氧化性能, 可用于 1400 °C 以上的高温环境, 但在高温条件下其晶体相变、晶粒粗化以及玻璃相的蠕变均会导致纤维高温强度下降。郑周^[61]制备了氧化铝纤维增强陶瓷基复合材料, 氧化铝基体的熔点高、介电性能较好、烧结温度适中, 并且相对于其他氧化物基体, 氧化铝基体力学性能较好。Yang 等^[62]通过重复交联和热解设计了一种具有碳纤维梯度周期性结构的新型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si-O-C}$ 复合材料, 如图 9 所示。其

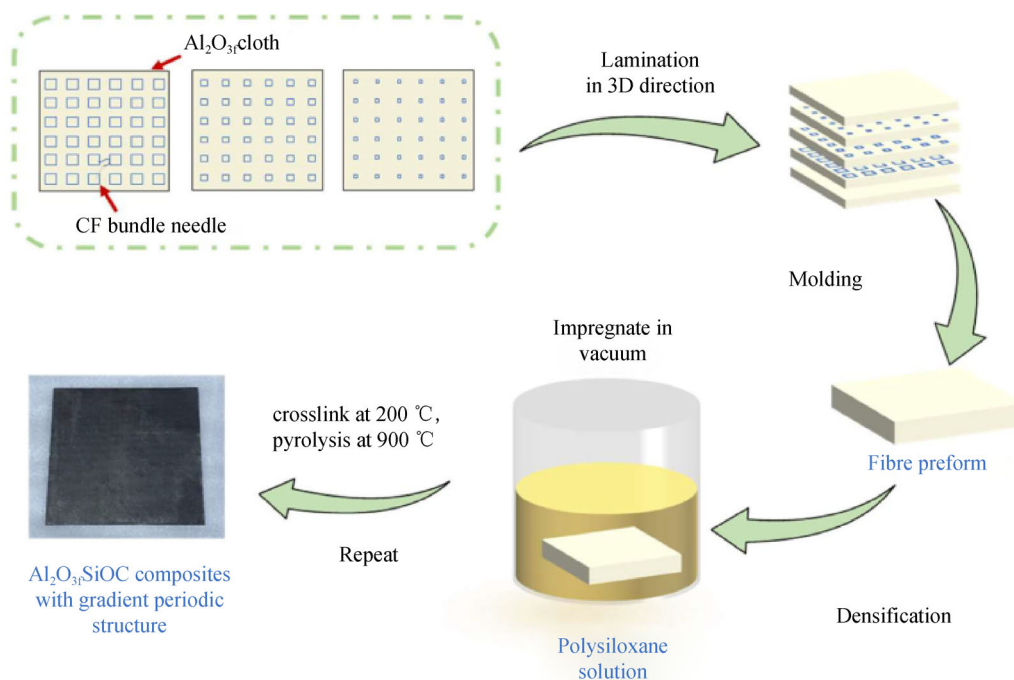


图 9 具有梯度周期性结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si-O-C}$ 复合材料的制备过程示意图^[62]

Fig. 9 Illustration of the preparation process of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si-O-C}$ composites with gradient periodic structure^[62]

在陶瓷基复合材料中实现 3D 梯度周期结构的原位构建,突破了传统 3D 周期结构陶瓷基复合材料制备难度大、厚度受限的问题。厚度为 9 mm 时,反射损耗 $RL < -8$ dB 的吸波带宽达 30.7 GHz (9.3 ~ 40 GHz),覆盖 X、Ku、K、Ka 等多个频段,并且可以适应高达 700 °C 的高温。纯 $Al_2O_3/Si-O-C$ 复合材料引入碳纤维梯度周期后,弯曲强度从 302 MPa 提升至 398 MPa,断裂韧性从 $9.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 提升至 $15.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,实现“超宽带吸波、高温稳定、力学增强”3 大特性。

Deng 等^[31]通过特定方式将 SiO_2 纤维构筑成网络状支撑骨架,与 ZrO_2 纳米纤维交替堆叠并经纵向

穿刺结合,构成周期性的纤维毡结构,这种结构作为 $Si-O-C$ 陶瓷的增强相,能有效抑制陶瓷基体在制备和服役过程中的裂纹扩展。 SiO_2 纤维本身具有低介电常数和低介电损耗,属于透波材料,能降低电磁波在材料表面的反射损失,引导更多入射波进入内部。

氧化物纤维的低介电性能与具有一定损耗能力的 $Si-O-C$ 基体相结合,优化了材料的阻抗匹配,显著降低电磁波在材料表面的反射,促使更多能量进入材料内部被耗散。表 3 对纤维增强 $Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料的吸波性能进行了总结。

表 3 纤维增强 $Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料的吸波性能

Table 3 Microwave absorption properties of fiber reinforced $Si-O-C$ ceramic composite absorbing materials

Type	Frequency range	Microwave absorbing properties			Reference
		$RL_{\min}/\text{dB}$	Band width/GHz	Thickness/mm	
$C_f/Si-O-C$	2.0–18.0	–62.9	14.7	2.7	[51]
	12.0–18.0	–46.0	4.3	1.6	[53]
	2.0–18.0	–24.3	4.9	1.2	[55]
	2.0–18.0	–65.5	4.9	2.9	[63]
	2.0–18.0	–48.2	3.1	3.6	[64]
	2.0–18.0	–57.0	3.7	1.3	[65]
$SiC_f/Si-O-C$	8.2–12.4	–32.8	4.2	4.0	[56]
	12.4–18.0	–24.5	4.8	1.9	[57]
	8.2–12.4	–26.0	3.2	3.0	[58]
	8.2–12.4	–62.8	3.9	3.1	[59]
	8.2–12.4	–27.1	4.1	2.9	[60]
	8.2–12.4	–56.9	4.2	3.0	[66]
Oxide fiber/ $Si-O-C$	4.0–40.0	–30.0	8.6	9.0	[62]
	8.2–12.4	–35.1	3.8	2.9	[67]

5 结论与展望

本文从多个方面对先驱体转化法制备 $Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料的近期研究进行了总结。颗粒增强 $Si-O-C$ 陶瓷抑制烧结产物的体积收缩,提高陶瓷的产率;多孔 $Si-O-C$ 陶瓷使进入材料内部的电磁波发生多次反射,延长传播路径,有助于改善阻抗匹配;在 $Si-O-C$ 陶瓷中引入异质元素 M,可以改变 $Si-O-C$ 陶瓷的分相和结晶行为,提高 $Si-O-C$ 陶瓷的热稳定性;纤维增强 $Si-O-C$ 陶瓷实现了结构功能一体化。

尽管先驱体转化法制备 $Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料目前具有广阔的应用前景,但其实际应用仍面临若干关键的科学难题与技术挑战,具体如下:

1) 复杂结构制造精度受限,传统机械加工难以实现复杂点阵结构的高精度成型,然而将先驱体

转化法与 3D 打印技术相结合制备的 $Si-O-C$ 陶瓷结构存在制备材料过小的问题,无法满足实际应用需求。

2) 多孔 $Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料面临结构与性能的平衡难题,且孔隙率难以精准调控,孔隙尺寸、形状及分布杂乱无章。如何实现孔洞分布均匀的多孔、高强度 $Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料是一个值得深思的问题。

3) 异质元素改性 $Si-O-C$ 陶瓷的界面结合与相分离问题较为突出,异质相之间化学性质差异大,易形成界面缺陷,因此提出一种中间相来减弱这种界面缺陷是十分有必要的。

4) 纤维增强 $Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料兼具结构承载与吸波功能,但对其在高温情况下外加荷载对吸波性能的影响研究较少,因此可为纤维增强 $Si-O-C$ 陶瓷复合吸波材料提供一个新思路。

参考文献:

- [1] RUIZ-PEREZ F, LÓPEZ-ESTRADA S M, TOLENTINO-HERNÁNDEZ R V, et al. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review[J]. J Sci Adv Mater Devices, 2022, 7(3): 100454.
- [2] LI W, YU Z J, WEN Q B, et al. Ceramic-based electromagnetic wave absorbing materials and concepts towards lightweight, flexibility and thermal resistance[J]. Int Mater Rev, 2023, 68(5): 487–520.
- [3] LV H L, YANG Z H, PAN H G, et al. Electromagnetic absorption materials: Current progress and new frontiers[J]. Prog Mater Sci, 2022, 127: 100946.
- [4] SHARMA S, PARNE S R, PANDA S S S, et al. Progress in microwave absorbing materials: A critical review[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2024, 327: 103143.
- [5] WANG L, LI X, SHI X F, et al. Recent progress of microwave absorption microspheres by magnetic–dielectric synergy[J]. Nanoscale, 2021, 13(4): 2136–2156.
- [6] FENG W X, LIU Y Y, BI Y X, et al. Recent advancement of magnetic MOF composites in microwave absorption[J]. Synth Met, 2023, 294: 117307.
- [7] ZENG X J, CHENG X Y, YU R H, et al. Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers[J]. Carbon, 2020, 168: 606–623.
- [8] ZHANG F, LI N, SHI J F, et al. Recent progress on carbon-based microwave absorption materials for multifunctional applications: A review[J]. Compos Part B Eng, 2024, 283: 111646.
- [9] XUE J M, GAO Y, LI F, et al. A novel oxide ceramic matrix composite with integrated high-temperature EMW absorption and mechanical performance[J]. J Alloys Compd, 2024, 1004: 175882.
- [10] XUE J M, LIU X L, WANG Y Q, et al. *In situ* growth of SiC_nws in Sc(NO₃)₃ modified polysiloxane-derived SiOC ceramics for enhanced microwave absorbing performance[J]. J Am Ceram Soc, 2025, 108(12): e70087.
- [11] DU B, QIAN J J, HU P, et al. Enhanced electromagnetic wave absorption of Fe-doped silicon oxycarbide nanocomposites[J]. J Am Ceram Soc, 2020, 103(3): 1732–1743.
- [12] MA Y J, YANG F, KOU S J, et al. Enhanced microwave absorption properties of Fe-doped SiOC ceramics by the magnetic-dielectric loss properties[J]. Ceram Int, 2021, 47(17): 24393–24402.
- [13] HOU F, MIN X, WU X W, et al. Recent research progress in modification strategies of silicon oxide-based anode materials for lithium-ion batteries[J]. J Energy Storage, 2025, 127: 117132.
- [14] MO P P, SHUI A Z, YU H L, et al. Synthesis and high electromagnetic wave absorption performance of carbon-enriched porous SiOC ceramics[J]. J Alloys Compd, 2025, 1010: 177120.
- [15] 马青松. 聚硅氧烷衍生陶瓷材料技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 15–19.
- [16] TANG H Q, WANG K W, REN K, et al. Microstructural evolution and microwave transmission/absorption transition in polymer-derived SiOC ceramics[J]. Ceram Int, 2023, 49(12): 20406–20418.
- [17] TANG H Q, REN K, WANG Y G. Polysiloxane encapsulating strategy to enhance the high-temperature electromagnetic wave absorption performance of carbon-rich SiOC ceramics[J]. Ceram Int, 2024, 50(23): 51392–51402.
- [18] DUAN W Y, YIN X W, LI Q, et al. Synthesis and microwave absorption properties of SiC nanowires reinforced SiOC ceramic[J]. J Eur Ceram Soc, 2014, 34(2): 257–266.
- [19] YU S, TU R, GOTO T. Preparation of SiOC nanocomposite films by laser chemical vapor deposition[J]. J Eur Ceram Soc, 2016, 36(3): 403–409.
- [20] LIU C, MENG X Y, ZHANG X H, et al. High temperature structure evolution of macroporous SiOC ceramics prepared by a Sol–gel method[J]. Ceram Int, 2015, 41(9): 11091–11096.
- [21] MIAO Y L, WANG G T, GONG H Y, et al. Direct ink writing of SiOC ceramics with microwave absorption properties[J]. Ceram Int, 2023, 49(8): 12710–12724.
- [22] DUAN W Y, YIN X W, LUO C J, et al. Microwave-absorption properties of SiOC ceramics derived from novel hyperbranched ferrocene-containing polysiloxane[J]. J Eur Ceram Soc, 2017, 37(5): 2021–2030.
- [23] DONG B B, LI H, ABADIKHAH H, et al. Controlled fabrication of porous SiOC ceramic bulks *via* precursor conversion combined with the emulsion method[J]. Ceram Int, 2025, 51(22): 37712–37718.
- [24] ZHENG L, SUN W L, MA Z J, et al. Effect of free cross-linking rate on the molding of bulk SiOC ceramics[J]. Materials, 2023, 16(6): 2446.
- [25] ZENG X J, LI E, XIA G H, et al. Silica-based ceramics toward electromagnetic microwave absorption[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 41(15): 7381–7403.
- [26] SU R Y, CHEN J Y, ZHANG X Q, et al. 3D printed SiOC architecture towards terahertz electromagnetic interference shielding and absorption[J]. Chem Eng J, 2024, 498: 155689.
- [27] WANG Z C, WANG C Y, TANG J, et al. Digital light processing and electromagnetic wave absorption performance tuning of SiOC/SiO₂ ceramics[J]. J Mater Res Technol, 2023, 27: 6538–6547.
- [28] YU Z J, CHEN T, DU H Z, et al. Single-source-precursor derived SiOC ceramics with *in-situ* formed CNTs and core–shell structured CoSi@C nanoparticles towards excellent electromagnetic wave absorption properties[J]. J Adv Ceram, 2023, 12(6): 1119–1135.
- [29] FENG P, WEI H J, XUE J M, et al. High-efficiency electromagnetic wave absorption of TiB₂–SiC_nws–SiOC synthesised using PDCs[J]. J Eur Ceram Soc, 2023, 43(12): 5207–5213.
- [30] JIA Y J, YANG N, XU S F, et al. Polymer-derived SiOC reinforced with core–shell nanophase structure of ZrB₂/ZrO₂ for excellent and stable high-temperature microwave absorption (up to 900 °C)[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 267.
- [31] DENG Y M, REN B, JIA Y J, et al. Layered composites made of polymer derived SiOC/ZrB₂ reinforced by ZrO₂/SiO₂ fibers with simultaneous microwave absorption and thermal insulation[J]. J Mater Sci Technol, 2024, 196: 50–59.
- [32] JIA Y J, CHOWDHURY M A R, ZHANG D J, et al. Wide-band tunable microwave-absorbing ceramic composites made of polymer-derived SiOC ceramic and *in situ* partially surface-oxidized ultra-high-temperature ceramics[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(49): 45862–45874.
- [33] YANG N, XU S F, ZHANG D J, et al. Super-wideband electromagnetic absorbing TiC/SiOC ceramic/glass composites derived from polysiloxane and titanium isopropoxide with low thickness (<1 mm)[J]. Adv Eng Mater, 2023, 25(9): 2201508.
- [34] DUAN W Y, YIN X W, YE F, et al. Synthesis and EMW absorbing properties of nano SiC modified PDC–SiOC[J]. J Mater Chem C, 2016, 4(25): 5962–5969.
- [35] 覃枫, 张军战, 张颖, 等. 成孔工艺和 SiC 纳米线对 SiOC 多孔陶瓷结构与性能的影响[J]. 稀有金属, 2023, 47(8): 1178–1185.
- QIN Feng, ZHANG Junzhan, ZHANG Ying, et al. Chin J Rare Met,

- 2023, 47(8): 1178–1185.
- [36] TANG L, CHEN S Y, WANG D H, et al. Zirconium carbide modified SiOC composites with porous lamellar structures for broadband microwave absorption and thermal stability[J]. *Ceram Int*, 2024, 50(20): 39243–39252.
- [37] ZHU W X, WANG H, JI H M, et al. Lightweight aerogel-like silicon oxycarbide ceramics with directionally honeycomb-like structure for high temperature environments[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2024, 44(6): 4027–4035.
- [38] LIU Y N, ZENG S F, TENG Z, et al. Carbon nanofibers propped hierarchical porous SiOC ceramics toward efficient microwave absorption[J]. *Nanoscale Res Lett*, 2020, 15(1): 28.
- [39] PAINULY A, GEORGE B K, PRABHAKARAN K. SiBOC foams from methylvinylborosiloxane using urea crystals as a pore template and ethylenediamine as a gelling agent[J]. *J Aust Ceram Soc*, 2023, 59(4): 935–946.
- [40] XING R Z, XU G X, QU N, et al. 3D printing of liquid-metal-in-ceramic metamaterials for high-efficient microwave absorption[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(31): 2307499.
- [41] 周演. 异质元素 Hf 改性聚硅氧烷衍生 SiOC 陶瓷的影响因素研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
ZHOU Yan. Study on the influencing factors of Hf modified polysiloxane derived SiOC ceramics with heterogeneous elements[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.
- [42] MA Q S, XU T H. High-temperature evolution behavior of polymer-derived SiAlOC ceramics under inert atmosphere[J]. *J Alloys Compd*, 2017, 723: 17–20.
- [43] HUO Y S, ZHAO K, MIAO P, et al. Microwave absorption performance of SiC/ZrC/SiZrOC hybrid nanofibers with enhanced high-temperature oxidation resistance[J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2020, 8(28): 10490–10501.
- [44] LI J, YANG Y, YANG X J, et al. Multiphase synergistic enhancement of single-source precursor SiTiBOC ceramics for highly efficient tunable microwave absorption[J]. *J Alloys Compd*, 2025, 1035: 181601.
- [45] LI J, PAN L Y, ZHANG Q, et al. Electromagnetic synergistic enhancement of SiFeBOC ceramics prepared by the polymer-derived ceramic method by Fe₃Si and SiO₂ nanowires for tunable microwave absorption[J]. *Ceram Int*, 2025, 51(24): 42126–42138.
- [46] CHEN J P, SHUI A Z, YU H L, et al. Polymer-derived porous SiNiOC ceramics with enhanced electromagnetic wave absorption performance[J]. *Int J Appl Ceram Technol*, 2026, 23(1): e70097.
- [47] 钱俊杰, 马丹丹, 税安泽, 等. 先驱体转化法制备 SiFeOC 陶瓷及其吸波性能研究[J]. *材料研究与应用*, 2025, 19(1): 107–117.
QIAN Junjie, MA Dandan, SHUI Anze, et al. *Mater Res Appl*, 2025, 19(1): 107–117.
- [48] JIA X L, ZHOU Z H, GUO D H, et al. Low-density, large-sized SiCnw/SiOC composite aerogels with excellent thermal insulation, microwave absorption, and thermostability[J]. *Ceram Int*, 2024, 50(18): 33315–33324.
- [49] 施巧英, 李静丹, 甘念渝, 等. 连续吸波 SiC 纤维增强 SiOC 陶瓷基复合材料的高温吸波性能[J]. *材料工程*, 2025, 53(1): 81–90.
SHI Qiaoying, LI Jingdan, GAN Nianyu, et al. *J Mater Eng*, 2025, 53(1): 81–90.
- [50] 钱俊杰. SiOC/CF 陶瓷基复合材料的制备与电磁波吸收性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
QIAN Junjie. Preparation and electromagnetic wave absorption properties of SiOC/CF ceramic matrix composite materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [51] ZHAO X G, DONG S, HONG C Q, et al. Precursor infiltration and pyrolysis cycle-dependent microwave absorption and mechanical properties of lightweight and antioxidant carbon fiber felts reinforced silicon oxycarbide composites[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2020, 568: 106–116.
- [52] ZHAO Y H, GUO L, MA Q S. Effects of *in situ* formed nanostructures on the structure and properties of C/SiOC composites[J]. *J Am Ceram Soc*, 2024, 107(8): 5338–5351.
- [53] QIAN J J, DU B, HE C, et al. Multiscale SiCnw and carbon fiber reinforced SiOC ceramic with enhanced mechanical and microwave absorption properties[J]. *J Am Ceram Soc*, 2022, 105(5): 3456–3468.
- [54] ZENG S F, FENG W L, PENG S Y, et al. Dual-functional SiOC ceramics coating modified carbon fibers with enhanced microwave absorption performance[J]. *RSC Adv*, 2019, 9(53): 30685–30692.
- [55] SUN Y, SUN Y G. Strong and thermostable boron-containing phenolic resin-derived carbon modified three-dimensional needled carbon fiber reinforced silicon oxycarbide composites with tunable high-performance microwave absorption properties[J]. *Appl Sci*, 2020, 10(6): 1924.
- [56] XING B Y, DING D H, XIAO G Q, et al. Preparation of SiC_f/Si–O–C composites by impregnation pyrolysis of polysiloxane and its electromagnetic wave absorption properties[J]. *Int J Appl Ceram Technol*, 2023, 20(3): 1681–1691.
- [57] LIU X L, XUE J M, REN F Y, et al. Enhanced microwave-absorption properties of polymer-derived SiC/SiOC composite ceramics modified by carbon nanowires[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(13): 20742–20750.
- [58] REN Z W, ZHOU W C, QING Y C, et al. Microwave absorption and mechanical properties of SiC_f/SiOC composites with SiO₂ fillers[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(6): 8478–8485.
- [59] REN Z W, ZHOU W C, QING Y C, et al. Simultaneously improving mechanical and microwave absorption properties of a novel SiC_f/SiOC & mullite hybrid ceramic matrix composite[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2021, 41(15): 7560–7571.
- [60] YANG F, XUE J M, MA Y J, et al. Sandwich structure SiC_f/Si₃N₄–SiOC–Si₃N₄ composites for high-temperature oxidation resistance and microwave absorption[J]. *Ceram Int*, 2022, 48(17): 24803–24810.
- [61] 郑周. 氧化铝纤维增强陶瓷基复合材料的制备及力学性能研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
ZHENG Zhou. Preparation and mechanical properties of alumina fiber-reinforced ceramic matrix composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [62] YANG F, XUE J M, WANG C X, et al. *In-situ* construction of carbon fiber gradient periodic structure in Al₂O₃/f/SiOC composites for ultra-broadband and high-temperature electromagnetic wave absorption[J]. *J Mater Sci Technol*, 2024, 194: 87–97.
- [63] YANG D D, DONG S, CUI T Y, et al. Multifunctional carbon fiber reinforced C/SiOC aerogel composites for efficient electromagnetic wave absorption, thermal insulation, and flame retardancy[J]. *Small*, 2024, 20(23): e2308145.
- [64] QIAN J J, SHUI A Z, HE C, et al. Multifunction properties of SiOC reinforced with carbon fiber and *in situ* SiC nanowires[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(6): 8004–8013.
- [65] QIAN J J, MA D D, LIANG Y, et al. Multiscale SiC nanowires and carbon fiber with hydrothermal carbon coating reinforced SiOC ceramic with improved mechanical and electromagnetic wave

absorption properties[J]. *Ceram Int*, 2025, 51(19): 28401–28409.

- [66] YANG F, XUE J M, MA Y J, et al. Impedance matching optimization of SiC_f/Si₃N₄-SiOC composites for excellent microwave absorption properties[J]. *Ceram Int*, 2022, 48(2): 1889–1897.
- [67] JIA X L, WANG X Q, GUO D H, et al. Lightweight mullite fiber-reinforced SiC_{nf}/SiOC composites for efficient insulation and electromagnetic wave absorption[J]. *Ceram Int*, 2025, 51(10): 12387–

12395.

作者贡献声明:

丁冬海: 论文构思, 项目资助, 审阅与修订

刘 倩: 背景分析, 初稿撰写, 绘制图表

肖国庆: 提供资源, 项目资助, 审阅与修订

张延杰: 论文构思, 监督指导, 审阅与修订

Research Progress on Preparation of Si—O—C Ceramic Composite Microwave-Absorbing Materials *via* Precursor Conversion Method

DING Donghai, LIU Qian, XIAO Guoqing, ZHANG Yanjie

(College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Extended Abstract

In recent years, with the rapid development of electronic devices, electromagnetic pollution has become increasingly severe, threatening the normal operation of electronic equipment and posing significant risks to information security. In the field of military radar stealth, the development of high-temperature absorbing materials with "thin, light, wide, and strong" characteristics along with high mechanical strength, heat resistance, corrosion resistance, and oxidation resistance becomes a critical scientific challenge urgently requiring resolution to reduce radar detection capabilities against military equipment and enhance adaptability in complex environments.

However, magnetic materials lose their magnetism in high-temperature environments, thereby reducing their ability to dissipate electromagnetic waves. Conductive loss-type materials, primarily composed of carbon, are prone to oxidation when exposed to air for extended periods, which diminishes their conductivity and consequently weakens their wave-absorbing performance. Si—O—C ceramics are a type of high-temperature ceramic with an open polymeric network structure composed of free carbon phases and amorphous Si—O—C glass phases. These ceramics exhibit some advantages such as high-temperature resistance, oxidation resistance, and excellent mechanical strength, making them a potential candidate for high-temperature wave-absorbing materials. Among the various methods for preparing Si—O—C ceramics, the precursor conversion method is widely used due to its simple process, broad range of matrix composition adjustments, and high conversion efficiency.

This review represents the preparation of particle-reinforced Si—O—C ceramic composite microwave absorbing materials, porous Si-O-C ceramic absorbing materials, and hetero-element modified Si—O—C ceramic absorbing materials *via* the precursor conversion method. It introduces the fabrication of fiber-reinforced Si—O—C ceramic composite absorbing materials, including C_f/Si—O—C ceramics, SiC_f/Si—O—C ceramics, and oxide fiber/Si—O—C ceramics, achieving a structural-functional integration. Compared to single-phase Si—O—C ceramic materials, Si—O—C ceramic composites exhibit superior dielectric properties and balance multiple loss mechanisms and impedance matching, thereby enhancing microwave absorption performance. In addition, the future development directions of Si—O—C ceramic composite absorbing materials are also discussed.

Summary and prospects This review summarizes recent research on the preparation of Si—O—C ceramic composite absorbing materials by a precursor conversion method from multiple aspects. Particle reinforced Si—O—C ceramics suppress the volume shrinkage of sintered products and improve the yield of ceramics. Porous Si—O—C ceramics cause multiple reflections of electromagnetic waves entering the interior of the material, prolonging the propagation path and helping to improve impedance matching. Introducing heterogeneous element M into Si—O—C ceramics can alter the phase separation and crystallization behavior, and improve the thermal stability of Si—O—C ceramics. Fiber reinforced Si—O—C ceramics achieve a structural and functional integration. However, the manufacturing accuracy of complex structures is limited, and traditional mechanical processing is difficult to achieve high-precision forming of complex lattice structures. Porous Si—O—C ceramic composite absorbing materials face a challenge of balancing structure and performance, and the porosity is difficult to accurately control, with pore size, shape, and distribution being disordered. The interface bonding and phase separation problems of heterogeneous element modified Si—O—C ceramics are prominent, and interface defects are easily formed between heterogeneous phases due to significant differences in chemical properties. Fiber reinforced Si—O—C ceramic composite absorbing materials have both structural load-bearing and absorbing functions, but there is a limited research on the effect of external loads on their absorbing performance at high temperatures.

Keywords silicon-oxygen-carbon ceramics; precursor conversion method; dielectric properties; microwave absorption performance; microwave-absorbing material