

SiC 纤维及其复合材料吸波性能研究进展

俞婷友, 金 丹, 尹洪峰, 汤 云, 任小虎, 袁蝴蝶, 孙可为

(西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 西安 710055)

摘 要: 研发适用于不同复杂环境的高性能吸波材料对于军事和民用领域均具有重要意义。SiC 纤维具有高强度、高模量、耐高温、耐腐蚀和电导率可调节等优点, 且在极端环境下也能保持良好的性能, 在吸波领域具有巨大应用潜力。本综述阐述了 SiC 纤维的吸波机理, 综合评述了改善 SiC 纤维吸波性能的 4 种途径, 介绍了 SiC 纤维增强吸波复合材料的研究进展。在此基础上, 对 SiC 纤维及其复合材料在吸波领域的发展进行了展望。

关键词: 碳化硅纤维; 吸波性能; 阻抗匹配; 电磁损耗; 纤维增强复合材料

中图分类号: TQ343+.6 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)06-2131-17

网络出版时间: 2024-05-28



随着电子信息技术的的发展和 5G 时代的来临, 基于电磁波发射、传递和处理的无线电通讯技术及相关产品得到迅速发展和应用。然而, 随之产生的电磁辐射和干扰问题日益严重, 成为损害身体健康和生活品质的新型污染源^[1]。同时, 由于现代战争中雷达探测技术的不断发展, 武器装备的生存、突防能力也需不断提升。因此, 应尽可能降低军用武器装备对雷达反射截面以达到电磁隐身的效果^[2-4]。可见, 在军事和民用领域的双重需求下, 开发适用于不同复杂环境的高性能吸波材料势在必行。

SiC 纤维以其低密度、高强度、高模量、耐高温、抗氧化和耐腐蚀等优异性能, 被广泛应用于航天航空、兵器、核能和热机等领域^[5-10]。除此之外, SiC 纤维还具有电阻率可调节的特点, 这为其在吸收电磁波方面的功能化应用提供了可能性。上述特性使得 SiC 纤维表现出了作为高性能吸波材料的巨大应用潜力。吸波材料需满足质量轻、吸收强、厚度薄、频带宽的吸波要求, 然而, 由于阻抗失配和损耗机制单一等问题, 普通 SiC 纤维未能表现出良好的电磁波吸收效果。因此, 如何提高 SiC 纤维的吸波性能, 并保持其原有性能优点是亟待解决的关键问题。并且, SiC 纤维通常作为复合材料增强体

进行应用, 因而对 SiC 纤维增强复合材料的吸波性能开展系统研究也是值得关注的重要问题。

本文从 SiC 纤维的吸波机理入手, 综述了 SiC 纤维吸波性能的改善途径和 SiC 纤维增强复合材料吸波性能的相关研究进展。在此基础上, 对 SiC 纤维及其复合材料吸波性能的未来发展进行了展望。

1 SiC 纤维吸波机理

当电磁波到达吸收器时将分为 3 部分: 反射部分、吸收部分和透射部分。吸波材料想要实现对电磁波的高效吸收需要满足 2 个基本条件: 一是减少反射部分, 保证入射波尽可能多地进入材料内部, 这要求材料阻抗和自由空间阻抗相匹配; 二是减少透射部分, 保证入射波进入材料后能够被快速损耗吸收, 这就要求材料对电磁波有较强的损耗吸收能力。

1.1 SiC 纤维阻抗匹配

根据传输线理论, 材料阻抗和自由空间阻抗匹配度通常用反射系数 R 来表示,

$$R = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1)$$

其中: Z_{in} 为吸波材料的阻抗(Ω); Z_0 为自由空间阻抗(Ω)。 Z_{in} 和 Z_0 的表达式如下:

收稿日期: 2023-08-13。 修订日期: 2023-11-06。

第一作者: 俞婷友(1999-), 女, 硕士研究生。

通信作者: 尹洪峰(1965-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-08-13. Revised date: 2023-11-06.

First author: YU Tingyou (1999-), female, Master candidate.

E-mail: yutingyou51@xauat.edu.cn

Correspondent author: YIN Hongfeng (1965-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yinhongfeng@xauat.edu.cn

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (2)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi df}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right) \quad (3)$$

其中： μ_0 、 ε_0 为真空磁导率和介电常数； μ_r 、 ε_r 分别为吸波材料的复磁导率和复介电常数； c 为真空中光的速度； f 为电磁波频率； d 为吸波层的厚度。当 $\mu_r = \varepsilon_r$ 时， $Z_{in} = Z_0$ ，即 $R=0$ ，表明电磁波全部进入材料内部，不发生反射。

对于非磁性 SiC 纤维，其复磁导率 $\mu_r = 1 - 0j$ 。因此，当 SiC 纤维的复介电常数 ε_r 接近 $1 - 0j$ 时，阻抗匹配程度达到最高，电磁波能够最大限度地进入材料内部。

1.2 SiC 纤维电磁损耗

材料的电磁损耗能力可以由下式进行表达，

$$\tan \delta = \tan \delta_e + \tan \delta_\mu = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} + \frac{\mu''}{\mu'} \quad (4)$$

其中： $\tan \delta$ 为损耗角正切值； $\tan \delta_e$ 为介电损耗角正切值； $\tan \delta_\mu$ 为磁损耗角正切值； μ' 和 ε' 分别为复磁导率和复介电常数的实部，代表材料对于磁能和电能的存储能力； μ'' 和 ε'' 分别为复磁导率和复介电常数的虚部，代表材料对于磁能和电能的消耗能力。从电磁波衰减角度进行分析，复磁导率和复介电常数的虚部越大，损耗角正切值越大，对电磁波的损耗吸收能力越强。然而，考虑到阻抗匹配问题，材料的阻抗要接近自由空间的阻抗，复磁导率和复介电常数虚部不宜太大(SiC 纤维复介电常数虚部接近 0 时，阻抗匹配度最高)。因此，为了提高材料的吸波性能，需要综合对电磁参数 μ' 、 μ'' 和 ε' 、 ε'' 进行合理调整。

根据损耗机制的不同，吸波材料可以分为介电损耗型、电阻损耗型和磁损耗型，SiC 纤维属于介电损耗型吸波材料。根据 Debye 理论，介电损耗(ε'')包括极化损耗和导电损耗，用如下公式描述^[11]：

$$\varepsilon'' = \varepsilon_p'' + \varepsilon_c'' \quad (5)$$

$$\varepsilon_p'' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (6)$$

$$\varepsilon_c'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (7)$$

其中： ε_p'' 为极化损耗； ε_c'' 为导电损耗； σ 为电导率； τ 为弛豫时间； ω 为角频率； ε_0 、 ε_s 以及 ε_∞ 是自由空间的介电常数($\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m)、静态介电常数和光学频率介电常数。

极化损耗是当外场频率较低时，电子和偶极子有足够时间响应电磁场的变化而在外场频率逐渐增加的过程中，极化率不能保持而产生的弛豫过程所引起的^[12]。极化损耗主要包括偶极极化、缺陷极化和界面极化。SiC 极性分子在 SiC 纤维中起着电偶极子的作用，在电磁场变化时会导致偶极极化及其弛豫过程；SiC 相和游离碳中的缺陷位点可以捕获载流子，打破电荷分布平衡，从而导致缺陷极化；SiC、游离碳、 SiO_xC_y 和孔洞之间异质界面引起的介电特性和电导率的差异，引起了电荷的重新分布，从而导致界面极化。

导电损耗是由于电磁波在吸收器中传播形成传导电流，电流传输产生 Joule 热而引起的。SiC 纤维中高导电性游离碳(尤其对于第一代和第二代 SiC 纤维)含有大量的自由电子，自由电子作为载流子，在交变电磁场中可于 SiC 纤维内部产生传导电流^[13]。并且，纤维之间相互连接或接触产生了三维导电网络，为传导电流传输提供了路径，促进电子迁移和跳跃，从而导致导电损耗^[14]。

1.3 吸波性能评价

材料的吸波性能一般通过反射损耗(R_L)参数进行评价：

$$R_L = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (8)$$

当 R_L 值达到 -10 dB 时，代表 90%的电磁能量被吸波材料吸收；当 R_L 值达到 -20 dB 时，代表 99%的电磁能量被吸波材料吸收。通常将 R_L 值小于等于 -10 dB 所对应的频段定义为吸波材料的有效吸收带宽(EAB)。

2 改善 SiC 纤维吸波性能的途径

如前所述，SiC 纤维主要依靠电介质产生的介电损耗来衰减电磁波，但普通型 SiC 纤维的电阻率较高(一般为 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ^[15])，导致其介电性能较差，吸波性能不佳。目前，通常从以下 2 个方面改善 SiC 纤维的吸波性能：一是调节 SiC 纤维的电阻率，增强介电损耗，优化阻抗匹配；二是引入新的损耗机制，增加电磁波衰减路径。基于这 2 点提出的改善 SiC 纤维吸波性能的主要途径有元素掺杂、表面涂层设计、结构设计和微结构热处理调控。

2.1 元素掺杂

元素掺杂是通过化学反应或物理掺混将特定元

素引入材料中改善其性能的途径。在吸波领域中,元素掺杂可以调控材料的电磁参数,改善阻抗匹配,增强电磁损耗。元素掺杂具体可分为金属元素掺杂和非金属元素掺杂 2 种。

2.1.1 金属元素掺杂 金属元素具有良好的导电特性,将其掺入 SiC 纤维中可以形成导电相,进而降低 SiC 纤维的电阻率,提高其电损耗,从而改善吸波性能。国外对于 SiC 纤维金属掺杂改性研究起步较早,并已开展实际应用。20 世纪 80 年代,日本的宇部兴产公司通过向先驱体中加入含有金属元素的聚合物,再经纺丝、不熔化处理及高温烧结,开发出了含 Ti、Zr、Al 的 Tyranno 系列 SiC 纤维,其电阻率在 $10^{-1} \sim 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 范围内连续可调,且具有优异的力学性能^[16-20]。法国 Alcore 公司将 Tyranno 纤维与玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维混杂,制造了法国第 1 架大量使用陶瓷纤维复合材料的无人驾驶隐身飞机^[21]。

20 世纪 90 年代,国防科技大学在中国国内率先开始了 SiC 纤维金属掺杂改性的研究工作。王军等^[22-25]利用超声技术分别将金属纳米颗粒 Ti、Fe、Co 和 Ni 分散在聚碳硅烷(PCS)中,使用聚合物衍生转化法制得了金属颗粒掺混型 SiC 纤维。金属掺混降低了纤维电阻率,并提高了纤维的介电常数和磁导率,纤维的电磁损耗也随之增大。但是,金属掺混方法存在显著缺点:一方面,掺入金属颗粒使得 PCS 纺丝困难,且纺丝后原丝直径较粗;另一方面,金属颗粒在纤维表面及内部造成大量缺陷和界面,导致纤维力学性能明显下降。因此,目前金属颗粒直接掺混相关研究已基本停滞。

使用金属化合物与聚硅烷合成含金属聚合物先驱体,再通过聚合物衍生转化法制备含金属元素的 SiC 纤维是目前较为常用的方式。王亦菲等^[26]以 $\text{Ti}(\text{OBu})_4$ 与低分子量聚硅烷(LPS)为原料合成了具有可纺性的聚钛碳硅烷,再经聚合物衍生转化法制备出了力学性能良好的含 Ti 的 SiC 纤维。Ti 元素以 TiC 的形式存在于杂化纤维中,而 TiC 具有极好的导电性,是杂化纤维的主要导电相。因此,随着 Ti 含量的增加,纤维的电阻率逐渐降低(见表 1)。

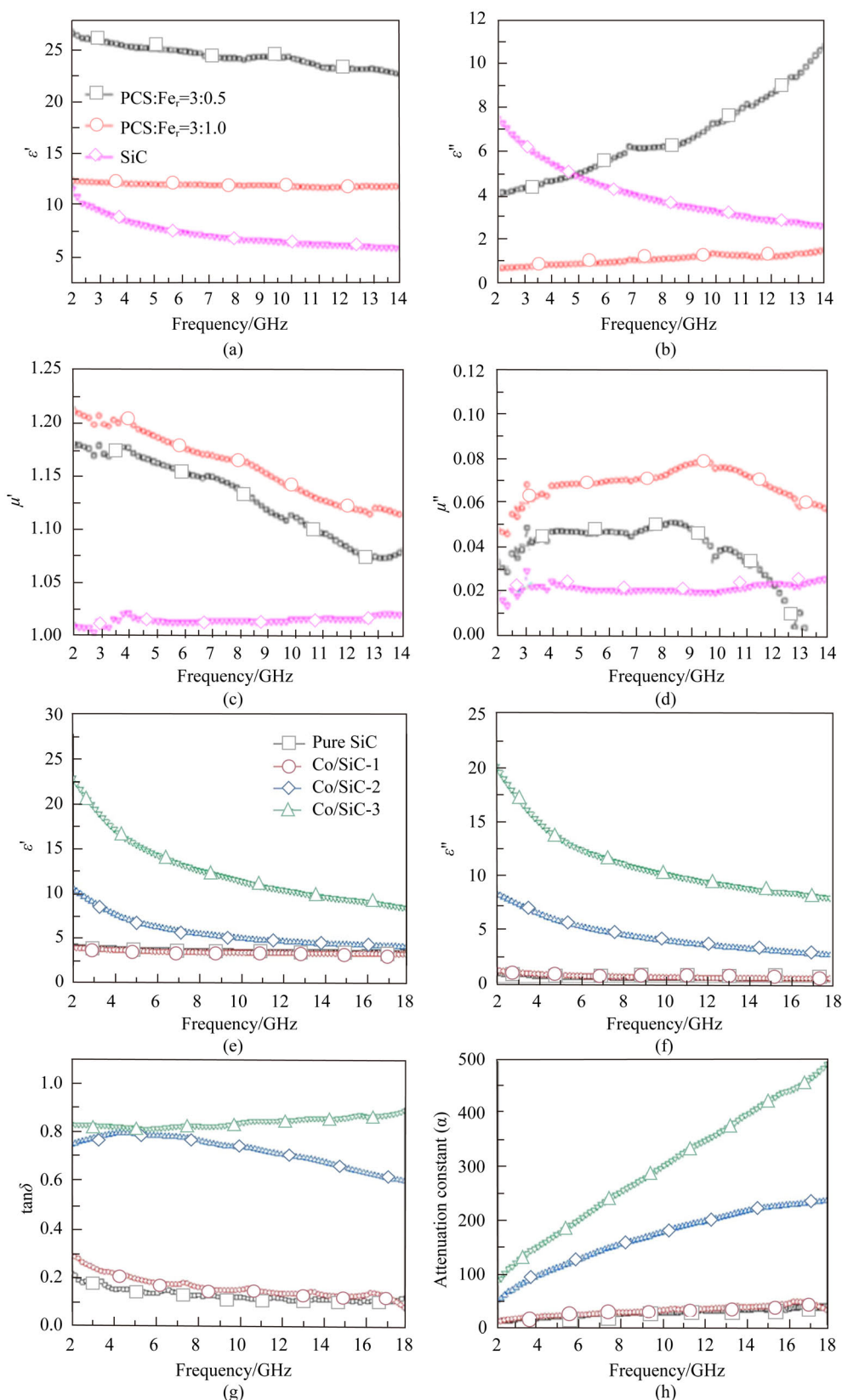
表 1 Ti 含量 C_{Ti} 对电阻率 ρ 的影响^[26]

Table 1 Effect of content (C_{Ti}) of Ti on the resistivity ρ ^[26]

$C_{\text{Ti}}/\%$	0	1.35	3.5	4.0
$\rho/(\Omega \cdot \text{cm})$	1.00×10^6	1.96×10^5	4.35×10^3	2.98×10^3

此外,静电纺丝技术也是目前制备金属元素掺杂 SiC 纤维的常见方法,该技术可使得金属化合物均匀分散在聚合物溶液中,简单有效地实现在纳米纤维中掺入不同含量的金属^[27-29]。Hou 等^[30-31]通过聚合物衍生转换法结合静电纺丝技术分别制备了 Fe/SiC 和 Co/SiC 杂化纤维。经过高温热解后,在 SiC 纤维中分别生成 Fe_3Si 和 CoSi 金属化合物。相比于 SiC 相, Fe_3Si 和 CoSi 相具有更高的极化率和导电性,并且具有一定磁性。因此, Fe/SiC 和 Co/SiC 杂化纤维的复介电常数($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)和复磁导率($\mu_r = \mu' - j\mu''$)高于纯 SiC 纤维(如图 1 所示)。这使得杂化纤维表现出更强的电磁波衰减能力和更优异的吸波性能, Fe/SiC 杂化纤维吸收体(35% 纤维,质量分数)厚度为 2.25 mm 时,反射损耗 R_L 最小为 -46.3 dB (6.4 GHz 处),有效吸收带宽 EAB 最宽为 4 GHz (4~8 GHz)。Co/SiC 纤维垫吸收体厚度为 2.80 mm 时,有效吸收带宽 EAB 高达 8 GHz (10~18 GHz)。

2.1.2 非金属元素掺杂 非金属元素掺杂同样可以有效调控 SiC 纤维的电阻率,提高介电损耗。与金属元素掺杂相比,非金属元素掺杂更易满足吸波材料轻量化的要求(常用的金属和非金属掺杂元素密度如表 2 所示)。其中,非金属元素碳及其同素异形体优异的电性能使得富碳的吸波材料有望成为轻质高效电磁波吸收剂^[32-34]。Huo 等^[35]通过静电纺丝和高温热解合成了富有无定型碳的 SiC/C 杂化纳米纤维。无定型碳的存在明显提高了 SiC/C 纤维的电导率,并引起了界面极化和偶极极化。因此, SiC/C 纤维表现出较高的介电损耗和优异的吸波性能: SiC/C 纤维吸收体厚度为 1.50 mm 时,有效吸收带宽 EAB 达到 4.1 GHz,可以覆盖大部分的 Ku 波段。Zhang 等^[36]将碳纳米管(CNTs)分散在聚合物先驱体中制备了柔性 CNTs 负载 SiC 纤维垫。CNTs 嵌入 SiC 纤维中可以形成导电网络增加电导率并起到增强作用以确保高柔性。由于 SiC 纤维和 CNTs 协同作用产生的导电损耗和极化弛豫损耗消耗了电磁能量,纤维垫在 3.50 mm 的厚度下表现出 -61 dB 低的反射损耗。Wang 等^[37]使用高温退火的方法在 SiC 纤维内部原位生成石墨。石墨具有良好的晶体结构和介电性能,杂化纳米纤维获得了优异的电磁波吸收性能(吸收体厚度为 1.70 mm 时,有效吸收带宽 EAB 覆盖 8~18 GHz)。3 种形式碳的存在方式如图 2 所示。



ϵ' : Real part of dielectric constant; ϵ'' : Imaginary part of dielectric constant; μ' : Real part of magnetic permeability; μ'' : Imaginary part of magnetic permeability; $\tan\delta$: dielectric loss tangent.

图 1 (a~d) Fe/SiC 杂化纤维的电磁性能(PCS—SiC 前驱体, Fe—Fe 元素)^[30]; (e~h) Co/SiC 杂化纤维的电磁性能(Co/SiC-1: Co 含量低的 SiC 纤维, Co/SiC-3: Co 含量高的 SiC 纤维)^[31]

Fig. 1 (a~d) Electromagnetic properties of Fe/SiC hybrid fibers (PCS—Precursor of SiC, Fe—Fe element)^[30]; (e~h) Electromagnetic properties of Co/SiC hybrid fibers (Co/SiC-1: SiC fibers with low Co content, Co/SiC-3: SiC fibers with high Co content)^[31]

表 2 SiC 纤维常用掺杂元素的密度

Table 2 Density of commonly used dopant elements in SiC fiber

Element		Density/(g·cm ⁻³)
Metallic	Non-metallic	
Ti		4.51
Zr		6.49
Al		2.70
Fe		7.86
Co		8.90
Ni		8.90
	C	1.98–2.30
	B	2.34
	N	1.25

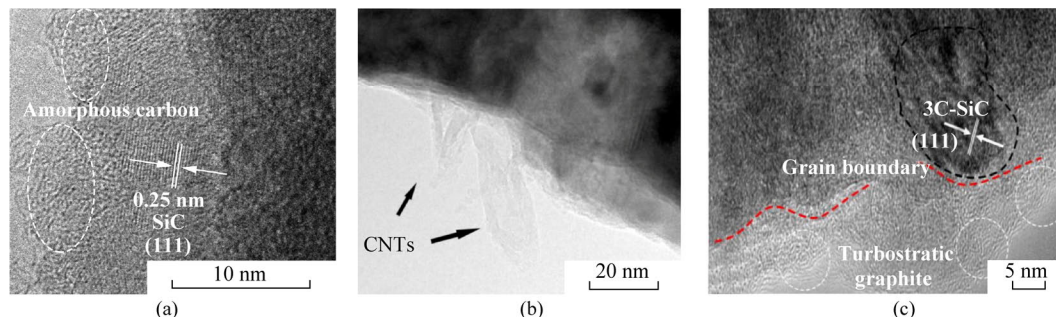


图 2 富碳 SiC 纤维 TEM 照片: (a) 富含无定型碳的 SiC 纤维^[35]; (b) 富含 CNTs 的 SiC 纤维^[36]; (c) 富含石墨的 SiC 纤维^[37]
 Fig. 2 TEM images of carbon-rich SiC fibers: (a) SiC fiber with amorphous carbon^[35]; (b) SiC fiber with CNTs^[36]; (c) SiC fiber with graphite^[37]

综上所述, 元素掺杂是减小 SiC 纤维电阻率和提高电磁衰减能力的有效途径, 表 3 展示了部分元素掺杂 SiC 纤维的吸波性能结果。不仅如此, 将 Ti、Zr、Al、Fe、B 及 N 等元素掺入 SiC 纤维中还可以起到烧结助剂的作用, 提高纤维的致密性, 使其具有良好力学性能和高温抗氧化性能^[40–45]。然而, 对于元素掺杂 SiC 纤维, 中国国内目前的基础研究及工业化应用水平与国外还存在较大差距, 并且综合考虑力学、高温抗氧化、耐腐蚀与吸波性能的报道较少。

类似地, B、N 等非金属元素也具有调节 SiC 纤维介电性能和阻抗匹配的效果。Chen 等^[38]通过碳热还原法制备了 B–SiC 纳米纤维, 发现 B 掺杂后 SiC 纤维载流子浓度增加, 电导率提高, 介电性能得到有效改善。B–SiC 纤维在 2~18 GHz 频率范围内表现出比未掺杂时明显更高的电磁波衰减能力。Li 等^[39]通过静电纺丝法结合聚合物衍生陶瓷(PDC)方法设计制备了一种富含导电网络和异质界面的 Si–C–N 纳米纤维, 其多相结构包含 SiC 相、Si₃N₄ 结晶、碳相和无定形 Si–O–C–N 相, 纤维显示出良好的取向度。N 元素掺杂有效提高了该纳米纤维的介电损耗、优化了阻抗匹配, 使得纤维展现出较低的 R_L 值(–54.0 dB)和较宽的有效吸收带宽 EAB (8.93 GHz)。

2.2 表面涂层设计

在材料表面设计并涂覆涂层是提高其性能的重要途径。通过在吸波材料表面设计涂层可以调节其电磁参数, 优化材料阻抗匹配, 增加电磁波损耗机制以衰减电磁波。相比于元素掺杂, 表面涂覆的工艺略为复杂, 但是其不受纺丝工艺及原料流变性的限制, 并且不会减弱纤维自身力学性能。对于吸波型 SiC 纤维, 常用的表面涂层有磁性材料、碳材料和陶瓷材料等。

表 3 元素掺杂 SiC 纤维的吸波性能

Table 3 Wave absorption properties of element-doped SiC fiber

Dopant elements	Minimal R_L /dB	D_m /mm ($R_L < 10$ dB)	Freq band/GHz ($R_L < 10$ dB)	Mass fraction of fiber/%	Reference
Ti/B	/	3.48	4.2	35	[46]
Al	–25.4	2.40	2.0	20	[47]
Ni/Mn	–16.8	2.80	3.1	20	[48]
Fe	–54.7	2.25	5.6	35	[49]
Co	/	2.80	8.0	10	[31]
C	–22.0–61.0	1.70–3.50	2.9–10.0	8–35	[34–37]
B	–37.9	1.50	3.5	50	[38]
N	–54.2	2.30	8.9	10	[39]

R_L —Reflection loss; D_m —Minimum thickness of absorber; Freq band—Frequency bandwidth.

2.2.1 磁性材料涂层 磁性材料具有优异的电磁性能, 与磁性金属元素掺杂相类似, 磁性材料涂覆不仅可以优化 SiC 纤维的阻抗匹配, 同时还可以提供磁损耗。1998 年, 程海峰等^[50–51]研究了 SiC 纤维表面化学镀钴、镍及铁钴合金对其电磁参数的影响。结果表明, 镀钴、镍及铁钴合金可以有效地调节 SiC 纤维的复介电常数, 但其还不能显著提高其复磁导率。之后, 黄小忠等通过磁控溅射法在 SiC 纤维上分别单层涂覆了磁性 FeCo^[52] 以及双层涂覆了磁性及介电材料 FeNi-C^[53] 和

FeNi-SiO₂^[54]。经 3 种涂覆 SiC 纤维的电磁性能均显著提高, 吸波性能得到有效改善, 同时磁控溅射法也有效保持了纤维强度。在 3 种涂层中, FeNi-SiO₂ 对 SiC 纤维吸波性能改善效果最为显著, 结果如图 3a 所示(吸收体厚度为 2.50 mm 时, 最佳反射损耗 R_L 为 -55.2 dB; 厚度为 2.00 mm 时, 有效吸收带宽 EAB 为 6.84 GHz)。其优异的吸波性能主要归因于 FeNi 合金提供了磁损耗, SiO₂ 提供了介电损耗, 并且二者协同作用实现了良好的阻抗匹配, 其吸波机理如图 3b 所示。

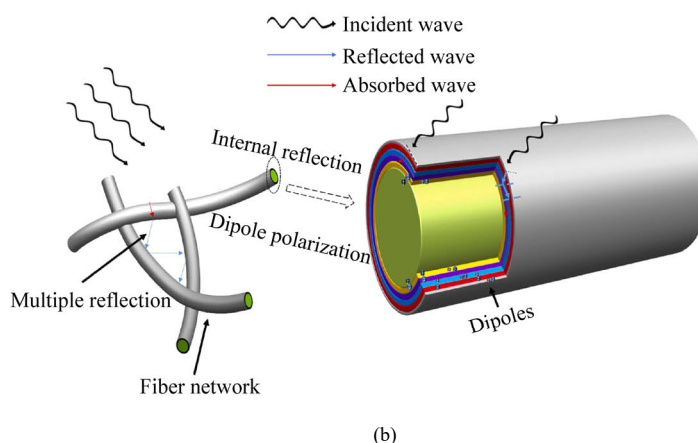
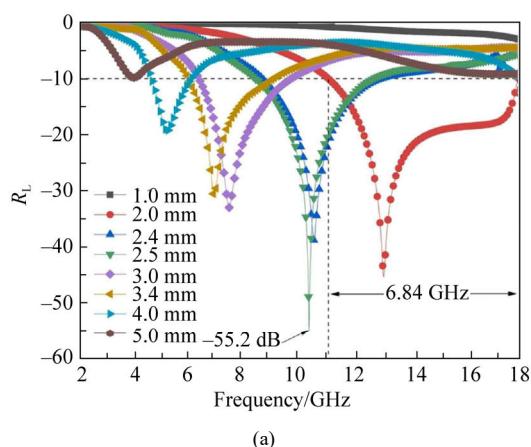


图 3 (a) SiC/FeNi-SiO₂ 复合纤维的反射损耗; (b) SiC/FeNi-SiO₂ 复合纤维吸波机理示意图^[54]

Fig. 3 (a) Reflection loss of SiC/FeNi-SiO₂ composites; (b) Schematic of SiC/FeNi-SiO₂ composites absorption mechanisms^[54]

2.2.2 碳材料涂层 碳材料作为一种新型电磁波吸收剂, 具有密度低、结构稳定以及电导率高的特点, 是涂覆在 SiC 纤维表面提升其介电性能和结构稳定性的理想材料。其中, 碳纳米管涂层可利用其均匀的一维结构和与 SiC 纤维基体形成的界面效应, 产生大量电子散射损耗, 从而提高 SiC 纤维复合材料的电磁波吸收性能。而石墨烯作为二维材料, 可在 SiC 纤维表面形成大量界面极化效应, 并且可通过调控石墨烯层中电子能隙的大小, 优化其电子传输性能, 使涂覆有石墨烯的 SiC 纤维复合材料实现宽频带的电磁波吸收效果。例如, Xu 等^[55]利用二茂铁作为碳源和催化剂, 在 SiC 纤维上制备了碳纳米管(CNTs)。该 CNTs/SiC 复合纤维在含有 0.72% CNTs 的情况下, 4 mm 厚度的复合吸收体实现了 -62.5 dB 的反射损耗 R_L 以及 8.8 GHz 的有效吸收带宽; 而 Wang 等^[56]制备了表面涂有涡层碳和还原氧化石墨烯(rGO)纳米片的 SiC 纳米纤维, 获得了 -56.3 dB 的最佳反射损耗 R_L 以及覆盖 12.2~18.0 GHz 整个 Ku 波段的宽频带吸波效果。

此外, 将具有高介电性能的碳材料与适宜介电性能的导电聚合物结合涂覆, 可以在优化 SiC 纤维

介电性能的同时满足阻抗匹配。Xu 等^[57]利用聚吡咯(PPy)与碳结合涂覆 SiC 纤维。吸波性能测试结果如图 4 所示, SiC@C 和 SiC@C@PPy 均具有比纯 SiC 纤维更高的电磁波衰减性能, 但其中 SiC@C@PPy-4 复合纤维的 $|Z|=|Z_{in}/Z_0|$ 最接近于 1 (阻抗匹配度更高), 因此 SiC@C@PPy-4 复合纤维表现出了最优的吸波性能: 厚度为 2.78 mm 的复合纤维吸收体有效吸收带宽 EAB 最大可达 8.4 GHz。

2.2.3 陶瓷材料涂层 三元陶瓷具有低密度、良好的导电性、优异的力学性能和高温抗氧化性, 被认为是一种有效改善 SiC 纤维在高温下吸波性能的涂层。Zhou 等^[58]采用熔盐法在中国第三代 KD-SA-SiC 纤维表面原位合成了新型三元层状陶瓷 Y₃Si₂C₂ 来提高电磁波吸收能力。由于界面极化和导电性的增强, 涂覆 Y₃Si₂C₂ 层后 SiC 纤维的复介电常数和吸波性能明显提高: 20%复合纤维负载的吸收体, 厚度为 2.19 mm 时, 其最小反射损耗 R_L 为 -16.97 dB; 厚度为 2.64 mm 时, 有效吸收带宽 EAB 为 5.44 GHz。相比于纯 Y₃Si₂C₂ 涂层, Ti₃SiC₂ 与轻质导电材料相结合的涂层, 既能形成界面效应, 又具备优异导电性, 实现电磁损耗和阻抗匹配的双重

调控, 因此表现出了更为优异的吸波性能。Zou 等^[59]将熔盐法和浮式催化化学气相沉积法相结合, 制备了 Ti_3SiC_2 和 CNTs 双涂覆的 SiC 纤维。与纯 SiC 纤维和 Ti_3SiC_2 单层涂覆的 SiC 纤维相比, 经 Ti_3SiC_2 和 CNTs 双层涂覆的 SiC 纤维在厚度更薄时表现出更低的反射损耗和更宽的有效吸收带宽(如图 5 所示)。负载 10% 双包覆 SiC 纤维厚度为 3.8 mm 的吸

收体, 其最小反射损耗 R_L 为 -53 dB, 有效吸收带宽 EAB 为 6.57 GHz。Yang 等^[60]通过熔盐法在 SiC 纤维表面制备了 $\text{Ti}-\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ 梯度杂化界面涂层, 同样表现出了强电磁吸收效果: 负载 10% 双包覆 SiC 纤维的吸收体厚度为 4 mm 时, 其最小反射损耗 R_L 为 -34.75 dB; 厚度为 3 mm 的吸收体, 有效吸收带宽 EAB 为 7.36 GHz。

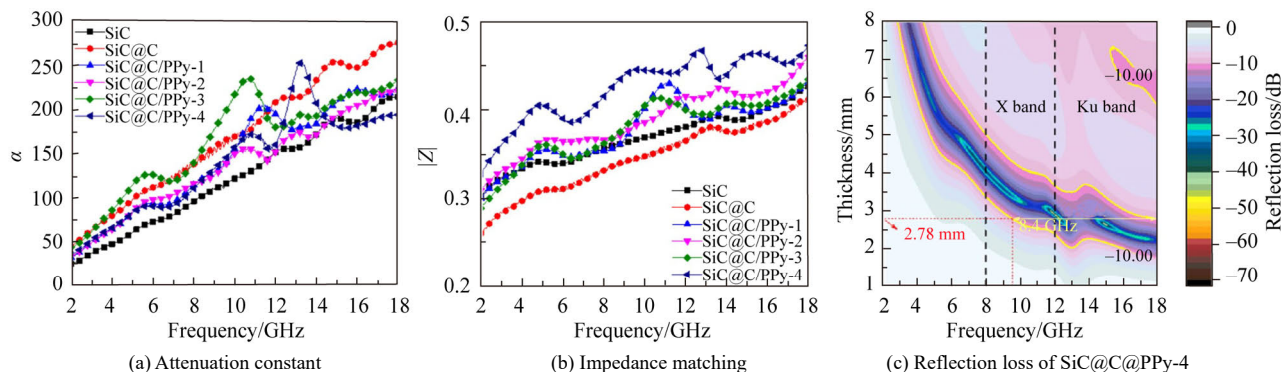
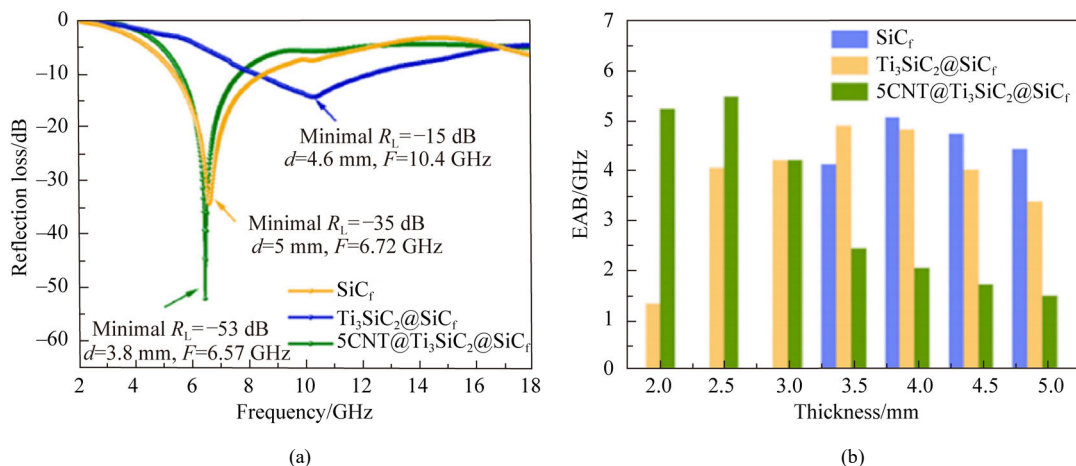


图 4 纤维负载量为 15% 复合材料的吸波性能^[57]

Fig. 4 Wave absorption properties of composite loaded with 15% fibers^[57]



EAB: Effective absorption bandwidth.

图 5 (a) 3 种 SiC 纤维样品的频率相关反射损耗; (b) 3 种样品在不同厚度下吸收带宽的比较^[59]

Fig. 5 (a) Frequency dependence of the optimized reflection loss for the three SiC samples; (b) the comparison of EAB for the three samples at different thicknesses^[59]

2.2.4 二维材料涂层 近年来, 除传统的磁性材料、碳材料和陶瓷材料外, 新型二维材料也被尝试用于 SiC 纤维表面涂覆, 以利用其独特的二维结构和物理力学性质改善 SiC 纤维的吸波性能。其中, WS_2 具有独特的二维层状结构、较高的电导率以及界面极化效应, 被涂覆在 SiC 纤维表面时, 可明显提升 SiC 纤维对电磁波的介电损耗, 从而改善复合材料的电磁波吸收性能^[61]。MXene 材料同样具有二维层状结构和优异的电导率, 涂覆在 SiC 纤维表面可有效平衡 SiC 纤维自身的介电性能, 并与 SiC 纤维基体产生协同的导电损耗和界面极化损耗, 显

著提升 SiC 纤维复合材料的电磁波吸收性能^[62]。另外, BN 具有较低的介电常数, 涂覆在 SiC 纤维上可优化 SiC 纤维的阻抗匹配, 有助于电磁波进入材料内部而不反射回去, 因此也可改善 SiC 纤维复合材料的电磁波吸收性能^[63]。

表 4 对部分表面涂覆 SiC 纤维的吸波性能进行了总结。发现多层涂覆比单层涂覆对 SiC 纤维吸波性能的改善效果更为显著。主要原因如下: 一方面, 双层或多层涂覆可在 SiC 纤维表面形成更多的界面效应, 产生大量缺陷极化损耗; 另一方面, 不同种类涂层材料的复合可使阻抗匹配达到更佳。

表 4 表面涂覆 SiC 纤维的吸波性能

Table 4 Wave absorption properties of surface-coated SiC fiber

Coating material	Minimal R_L /dB	D_m /mm ($R_L < 10$ dB)	Freq band/GHz ($R_L < 10$ dB)	Mass fraction of fiber/%	Reference
Ni	-32.3	2.5	4.5	10	[64]
FeCo	-25.5	3.0	6.0	50	[52]
FeNi/C	-26.2	5.0	/	15	[53]
FeNi/SiO ₂	-55.2	2.0	6.8	10	[54]
CNTs	-62.5	4.0	8.8	20	[55]
C/rGO	-56.3	1.9	6.2	35	[56]
C/PPy	/	2.8	8.4	15	[57]
Y ₃ Si ₂ C ₂	-17.0	2.6	5.4	20	[58]
Ti ₃ SiC ₂ /TiC	-34.8	3.0	7.4	10	[60]
Ti ₃ SiC ₂ /CNTs	-53.0	2.5	5.6	10	[59]
WS ₂	-72.8	2.8	7.7	15	[61]
MXene	-70.9	2.63	6.3	8	[62]
BN	-16.41	3.5	/	25	[63]

因此, 未来的研究可继续深入开发新型涂覆材料, 优化涂覆工艺参数、设计梯度或多组分涂覆结构, 以获得性能更优异的 SiC 纤维电磁波吸收材料。

2.3 结构设计

电磁波吸收能力在很大程度上取决于材料的尺寸和结构。通过对吸波材料进行结构设计可以使更多电磁波进入到材料内部, 并利用结构特点增加电磁波的传输距离和多重反射, 有效衰减电磁波, 改善材料的吸波性能。

2.3.1 异形截面设计 异形截面纤维是指非圆形截面的纤维, 与圆形截面 SiC 纤维相比, 异形截面 SiC 纤维具有比表面积大、表面曲率不均的特点, 这伴随着特殊的极化损耗, 使 SiC 纤维在 8~18 GHz 具有较好的吸波性能^[65]。关于异形截面 SiC 纤维的研究主要集中于中国, 国外的报道较少。王应德等^[66]采用三叶型喷丝孔经熔融纺丝制得了具有良好的吸波性能三叶型 SiC 纤维, 其在 11.6~18.0 GHz 范围内的反射损耗 $R_L < -10$ dB, 最大反射损耗 R_L 约为 -20 dB。并且, 与相同当量直径的圆形纤维相比, 三叶形 SiC 纤维的抗拉强度提高了约 30%。之后, 刘旭光等在此基础上制备了三折叶形^[67]、五叶形^[68]、条形^[69]、C 形^[70]和十字形^[71] SiC 纤维(异形截面 SiC 纤维形貌如图 6 所示), 并测量了电磁参数。结果表明, 异形截面 SiC 纤维具有良好的力学性能, 并且其电磁参数具有较大调整空间, 这使异形截面 SiC 纤维可以作为结构吸波材料应用。

中空纤维是一种特殊的异形截面纤维, 具有比表面积大、质量轻、密度小的优点, 其形貌如图 7 所示。中空结构材料与空气介质的接触面积大, 可以增强界面极化和电磁波的多重反射损耗, 并优化阻抗匹配, 有利于电磁波的吸收^[73-74]。Xiao 等^[75]

通过去模板化设计方法制备了中空管状 SiC, 提高了 SiC 纤维的电磁波吸收带宽。该中空管状 SiC 由 SiC、C 和非晶 SiO₂ 层组成, C 颗粒嵌入 SiC 颗粒中改善了中空管状 SiC 的导电损耗。此外, 中空管状 SiC 独特的结构显著促进了电磁波的多次反射和散射, 材料的最小反射损耗 R_L 为 -25.7 dB, 有效吸收带宽 EAB 为 5 GHz (12.9~17.9 GHz)。Tian 等^[76]通过单喷嘴静电纺丝技术结合热处理制备了具有均匀内部结构的超细中空 SiC 纤维, 该 SiC 纤维的高温抗氧化性能优异, 具有作为高温吸波材料的潜力。

2.3.2 仿生结构设计 仿生结构是指模仿生物肌体的构造而设计的相似结构。仿生结构往往具有丰富的界面和孔隙, 有利于极化损耗和阻抗匹配, 同时实现电磁波的多次反射和散射增强电磁波的衰减, 从而改善材料的吸波性能。Zhu 等^[77]制备了花生壳状 SiC 纤维(纤维表面出现平均尺寸为 89 nm 的花生壳状孔洞, 如图 8a 所示), 厚度为 2.53 mm 的吸收体最佳反射损耗 R_L 在 11.1 GHz 时可达 -48 dB。SiC 纤维在 X 波段优异的电磁波吸收能力源于花生壳状仿生结构造成了电磁波的多次反射、散射和 Debye 弛豫。Lan 等^[78]采用化学镀 Fe 和碳热还原相结合的方法合成了具有树枝状结构的 SiC 纳米纤维, 如图 8b 所示。因为树枝状结构改善了纤维的界面极化和极化弛豫过程, 与线性结构的 SiC 纳米纤维相比, 树枝状 SiC 纳米纤维显示出更加优异的吸波性能。Li 等^[79]通过聚合物热解结合化学气相沉积的方法合成了具有高微波吸收性能的竹状 β -SiC 纳米纤维, 该纤维具有正常直径茎和大直径节相间分布的竹状结构, 如图 8c 所示。与茎段相比, 节点表现出丰富的堆垛层错, 有利于电磁波的损耗。

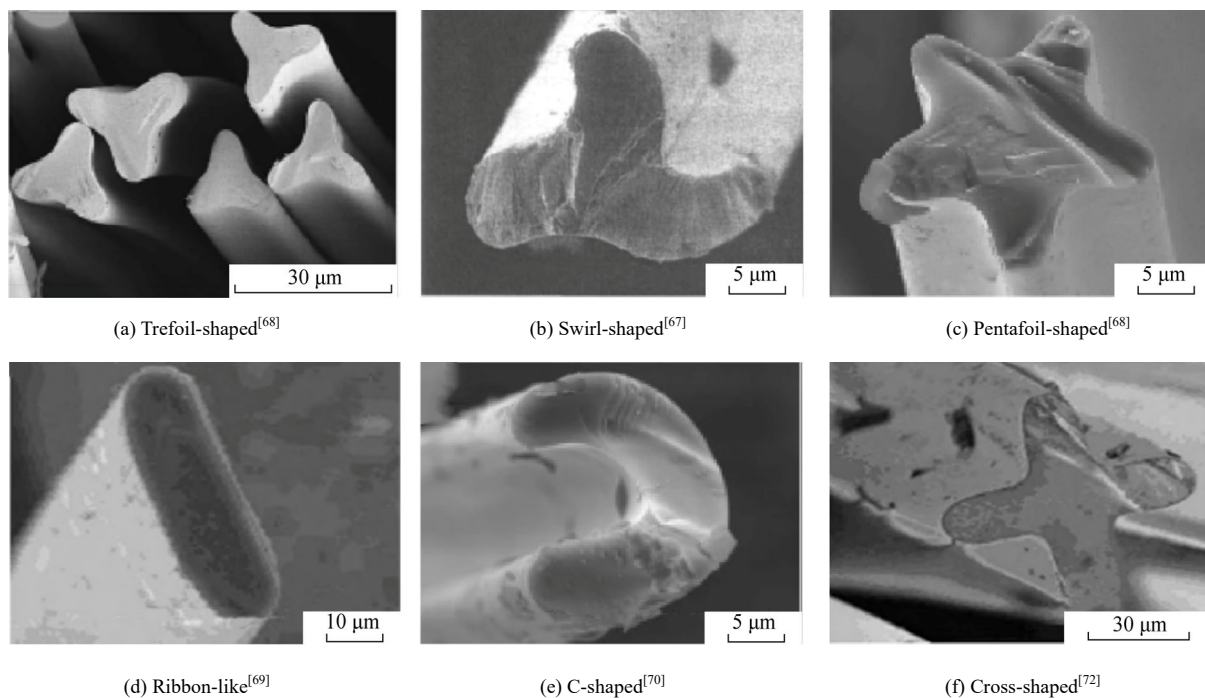


图 6 常见异形截面 SiC 纤维
Fig. 6 Several typical non-circular SiC fibers

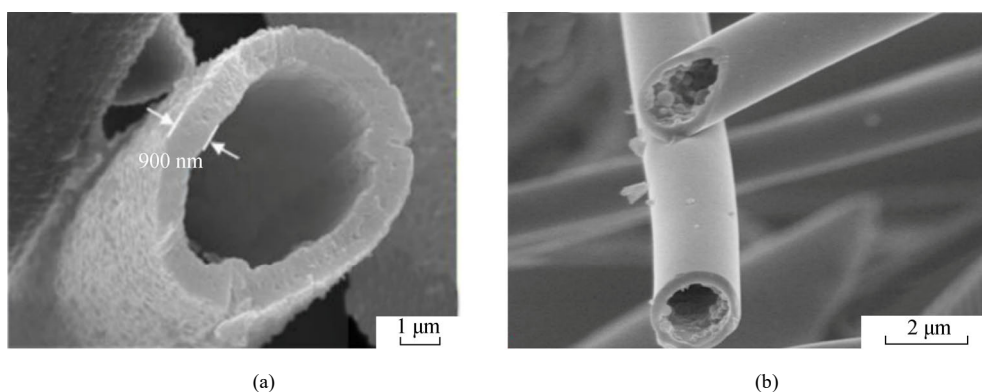


图 7 (a) 去模板法所制备的中空 SiC 纤维^[75]; (b) 单喷嘴静电纺丝所制备的中空 SiC 纤维^[76]
Fig. 7 (a) Hollow SiC fibers prepared by template removal method^[75]; (b) Hollow SiC fibers prepared by single nozzle electrospinning^[76]

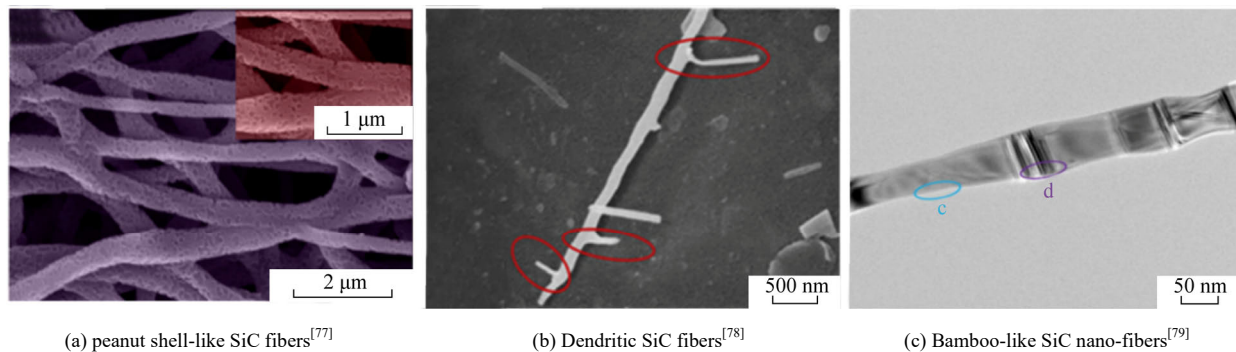


图 8 仿生结构 SiC 纤维 SEM 照片
Fig. 8 SEM photographs of biomimetic structured SiC fibers

综上所述,丰富的界面和孔隙以及不光滑的表面结构更有利于消耗衰减电磁波。因此,设计多孔、

多界面和凹凸的结构是改善 SiC 纤维吸波性能的有效途径。

2.4 微结构热处理调控

热处理可以调控 SiC 纤维的组分和微晶尺度(微结构),引起纤维电阻率和电磁参数的改变,进而改善 SiC 纤维的吸波性能。Ye 等^[80]研究了因为热解条件不同生成不同氧含量 SiC 纤维,从而导致其介电性能及吸波性能的差异。结果发现,2 种 SiC 纤维在组分上存在明显区别,具体数值见表 5。低氧含量的 SiC 纤维中 β -SiC 相的体积分数较高且晶粒较大(4.2 nm),而高氧含量的 SiC 纤维中 β -SiC 相晶粒尺寸较小(2.1 nm),且富含石英相。由于 β -SiC 相具有更高的极化能力和电导率,与石英相比较,其对电磁波的散射损耗更大。因此,相比高氧含量的 SiC 纤维,低氧含量的 SiC 纤维表现出了更优异

的介电性能以及更好的电磁波吸收性能。然而,若是 SiC 纤维织物外层富有高电导率物质,会使得阻抗失配,电磁波无法进入材料内部。Ding 等^[81]针对 KD-I 型 SiC 纤维织物外层富碳导致其电导率过高而无法有效吸收电磁波的问题,对 SiC 纤维进行了热氧化处理,使 SiC 纤维中的游离碳挥发,破坏了碳的导电网络,因此 SiC 纤维织物的复介电常数实部和虚部均呈下降趋势。研究表明,随着热氧化时间和温度的变化,可有效调控 SiC 纤维织物的介电性能,从而改善其吸波性能。在 500 °C 氧化 30 min 的 SiC 纤维织物样品获得了最佳的电磁波吸收效果,其最低反射损耗 R_L 在 10.3 GHz 处可达 -25.4 dB,有效吸收带宽 EAB 为 4 GHz。

表 5 2 种不同含氧量 SiC 纤维的特性^[80]

Table 5 Characteristics of two SiC fibers with different oxygen content^[80]

Materials	$d_{(111)}$ of β -SiC/nm	L_c of β -SiC/nm	L_c of quartz/nm	$\mu/(\Omega \cdot \text{cm})$	$\sigma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$
Low oxygen	0.245	4.20	83.20	0.42	238.00
High oxygen	0.248	2.10	124.30	89.97	1.11

$d_{(111)}$ —Spacing of the (111) plane; L_c —Average structural parameter; μ —Average resistivity; σ —Electrical conductivity.

热处理可以简单高效地调节 SiC 纤维的电阻率,这为设计电阻率梯度结构、进而优化 SiC 纤维吸波材料性能提供了便利^[6]。Tan 等^[82]通过对 SiC 纤维在空气中进行热处理,使纤维发生局部氧化形成 SiO_2 相,造成了 SiC 纤维电导率的下降。此外,他们通过设计低电导率 SiC 纤维和高电导率 SiC 纤维的堆叠结构,既改善了阻抗匹配,又满足了电磁衰减效能,实现了复合 SiC 纤维织物更佳的电磁波吸收效果。

3 SiC 纤维增强吸波复合材料

3.1 SiC 纤维增强陶瓷基吸波复合材料

SiC 纤维增强陶瓷基复合材料(SiC-CMC)保留了陶瓷材料耐高温、耐腐蚀、高强度、耐磨损等性能优点,并且随着 SiC 纤维的加入改善了单体陶瓷脆性大、应用可靠性差的致命缺点^[83]。SiC-CMC 被誉为是航天航空和核能等重要领域最为理想的高温结构材料^[84–86]。与此同时,由于特殊领域对电磁隐身的需求(例如,战斗机和巡航导弹等机载武器的尾喷管、鼻锥帽等),研制具有高效电磁波吸收能力的 SiC-CMC 具有重要战略意义。美国的 PW 公司已将 SiC_f/SiC 调节片和密封片用于第四代战机 F22 的发动机—F119,以实现良好的减重和隐身效果^[87]。据报道,美国 F-35 隐身战机也采用了 SiC-CMC 制备的轴对称喷管,大幅减少了喷管的红外信号和雷

达信号^[88]。

近年来,中国学者为了提升 SiC-CMC 的电磁吸收性能和力学性能,对 SiC-CMC 的纤维、界面及其基体进行了多尺度设计,取得了一系列研究成果。

3.1.1 SiC-CMC 纤维设计 在 SiC-CMC 复合材料中, SiC 纤维不仅可用作增强相提升复合材料的力学性能,还可用作吸收剂使其实现电磁波吸收功能。研究表明,除 SiC 纤维自身的吸波性能外, SiC 纤维的含量、长度及其编织方式也会影响复合材料的吸波性能。Huang 等^[89]研究了 SiC 纤维含量和长度对 SiC_f/LAS 玻璃陶瓷复合材料介电性能和力学性能的影响。发现随着复合材料中的纤维含量从 0 增加到 30%,在 8.2 GHz 下其 ϵ' 从 12 增加到 35, ϵ'' 从 18 增加到 120。另外,当 SiC 纤维含量为 30%时,将纤维长度从 2 mm 增加到 4 mm,在 8.2 GHz 下复合材料的 ϵ' 从 32 增加到 65, ϵ'' 从 100 增加到 120。可见,复合材料的复介电常数可以通过选择合适的纤维含量和长度来调节。并且, SiC 纤维的加入显著提高了 LAS 基体的抗弯强度和断裂韧性,30%纤维含量时抗弯强度和断裂韧性最高。Han 等^[90]比较了三维四向(3D-4)和三维五向(3D-5)编织 SiC 纤维增强 SiC 基复合材料的介电和吸波性能。3D-5 复合材料相比 3D-4 复合材料具有更高的纤维表面积和更小更多的孔隙(如图 9 所示),因此 3D-5 复合材料表现出更为优异的介电和吸波性能。

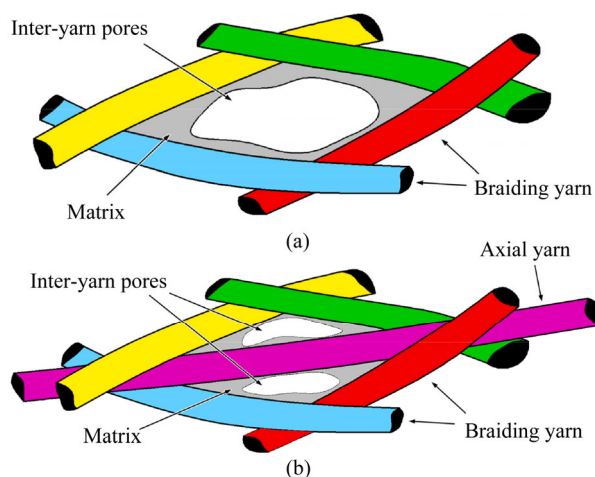


图 9 2 种样品微观结构示意图: (a) 3D-4 复合材料; (b) 3D-5 复合材料^[90]

Fig. 9 Schematic of the pore microstructures of the two samples: (a) 3D-4 composites; (b) 3D-5 composites^[90]

3.1.2 SiC-CMC 界面设计 作为 SiC-CMC 的关键组成部分, 界面不仅具有传递载荷和调控力学性能的作用, 还能影响纤维与基体间的电荷传输和极化弛豫过程。因此, 为获得优异的力学性能和电磁波吸收性能, 合理设计和精确控制 SiC-CMC 的界面组成与结构尤为重要。SiC-CMC 常见的界面相有热解碳(PyC)和 BN。

采用热解碳 PyC 作为界面相的 SiC-CMC 复合材料, 具有良好的力学性能^[91]。但是, 由于 PyC 具有较高的电导率, 导致 SiC-CMC 复合材料的阻抗与自由空间阻抗失配, 吸波性能并不理想。并且,

随着 PyC 界面厚度的增加, 复合材料的电磁屏蔽效能增加, 吸收效能减少^[92]。与 PyC 不同, BN 具有相对较低的电导率, 可以实现较好的阻抗匹配, 但仅引入 BN 界面相, 复合材料的介电性能提升并不明显^[93]。Mu 等^[94]制备了含有 BN/SiC 双层界面 SiC_f/SiC 复合材料。该复合材料中的界面层、基体与纤维相互协同, 形成弛豫极化和导电网络, 显著提高了复合材料的复介电常数(30–22j 增加到 45–32j), 增加了极化损耗和导电损耗。同时, 与不包含 BN/SiC 双层界面的 SiC_f/SiC 复合材料相比, 双层界面结构 SiC_f/SiC 复合材料的抗弯强度和断裂位移均有显著提高。

此外, 引入具有可调节介电性能的 SiC 纳米线(SiC_{nw})和 SiC 作为界面相, 能提高复合材料的吸波性能, 同时提升力学性能。Fan 等^[95]将 SiC_{nw} 生长在 SiC 纤维(SiC_f)/Si₃N₄ 复合材料的界面上。SiC_{nw} 的引入优化了 SiC_f 与 Si₃N₄ 基体之间的界面结合, 抗弯强度达到(333±29)MPa。与此同时, SiC_{nw} 中存在的各种缺陷结构, 如层错、孪晶界以及非均质界面等, 增加了界面极化损耗, 进而使复合材料获得了良好的吸波性能(吸波机理如图 10 所示)。当复合材料厚度为 2.8 mm 时, 最小反射损耗 R_L 为 -31.1 dB, 有效吸收带宽 EAB 为 3.5 GHz。Gao 等^[96]采用前驱体热解法在 SiC 纤维增强莫来石复合材料(SiC_f/Mu)中制备了 SiC 界面相, SiC 界面相含量随着 PCS/二甲苯浓度的提高而增加, 使得纤维的电磁损耗能力得到显著提高(如图 11 所示)。

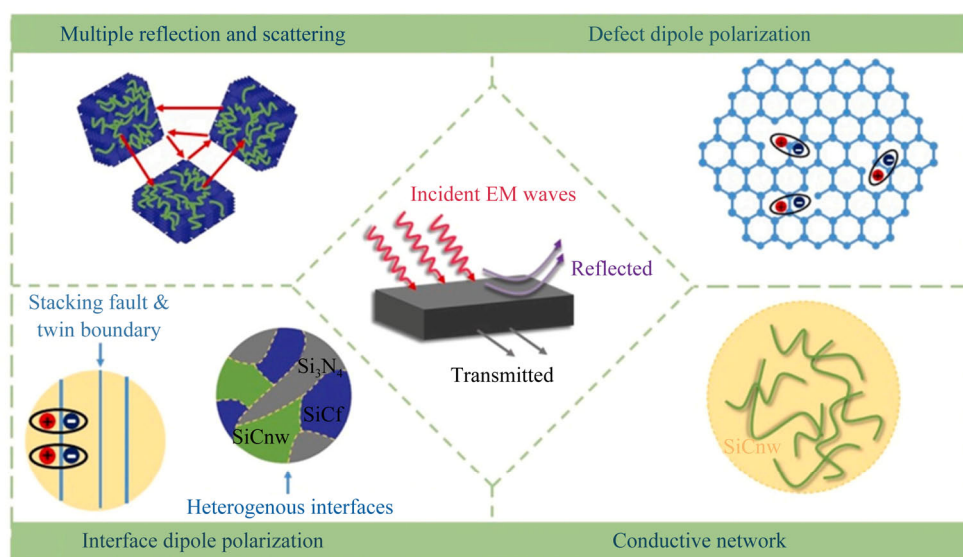
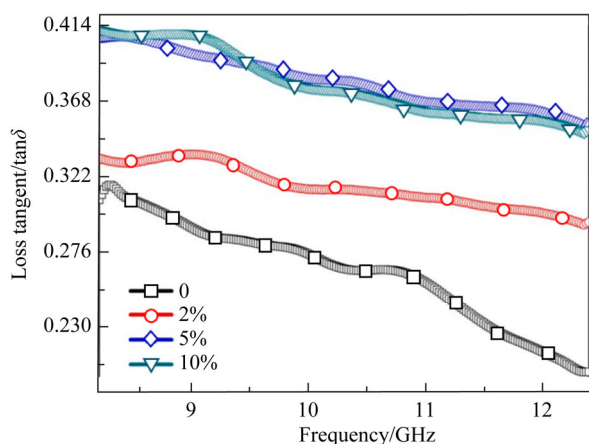


图 10 SiC_f/SiC_{nw}/Si₃N₄ 复合材料吸波机理示意图^[95]

Fig. 10 Schematic illustration for EMW absorption mechanisms of the SiC_f/SiC_{nw}/Si₃N₄ composites^[95]



Four curves show different PCS/xylene contents.

图 11 包含 SiC 界面相的 SiC_f/SiC/Mu 复合材料的损耗正切值^[96]

Fig. 11 Loss tangent of SiC_f/SiC/Mu composites containing SiC interfacial phase^[96]

3.1.3 SiC-CMC 基体设计 SiC-CMC 的基体材料主要有 SiC、AlPO₄、Si₃N₄、SiO₂、Al₂O₃、BN 和莫来石等，其中，大多材料属于透波材料。因此，SiC-CMC 复合材料对电磁波的吸收主要依赖于 SiC 纤维与界面结构产生的损耗。为提高 SiC-CMC 的电磁波吸收性能，一些学者通过向陶瓷基体中添加吸波剂或活性填料来调节复合材料的介电特性。

Gao 等^[97]在 SiC 纤维增强莫来石基 (SiC_f/Mu) 复合材料基体中添加 15% 的 SiC 和 10% 的 Ti₃SiC₂，SiC_f/Mu 复合材料的力学和吸波性能均有显著改善。厚度为 2.9 mm 的复合材料获得了 3.3 GHz 的有效吸收带宽 (9.0~12.3 GHz)，在 8.64 GHz 处的最小反射损耗 R_L 为 -53 dB。Wan 等^[98]采用多壁碳纳米管 (MWNCTs) 作为吸波剂添加进 AlPO₄ 基体中，并用 BN 涂覆的 SiC 纤维作为增强体。MWNCTs 的加入改善了复合材料的吸波性能，当 MWNCTs 含量为 1.5% 时，厚度为 3.1 mm 的复合材料反射损耗 R_L 在整个 x 波段都小于 -8 dB。Duan 等^[99]采用 Ti 粉末作为活性填料，改善了 SiC_f/SiC 复合材料的电磁波吸收性能。Ti 含量为 5% 时，厚度为 2.5 mm 的 SiC_f/SiC 复合材料获得最佳吸波性能 (最小反射损耗 R_L 值为 -37 dB，有效吸收带宽 EAB 为 3.28 GHz)。

3.2 SiC 纤维增强树脂基吸波复合材料

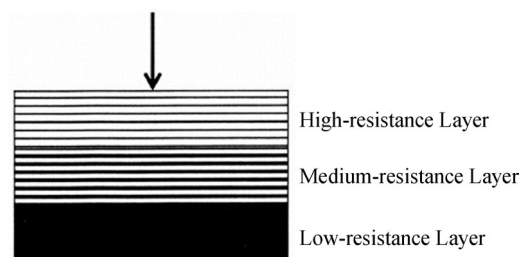
SiC 纤维增强树脂基复合材料具有密度低、成本低、韧性强、易加工、可设计性强等优点。相比于 CMC-SiC 适用于高温部件，如发动机尾喷管等，而 SiC 纤维增强树脂基复合材料具有更适合应用于飞机机身、潜艇外壳等对耐高温要求低且用量大的

部件^[100]。自 20 世纪 80 年代起，SiC 纤维增强树脂基复合材料在吸波领域逐渐得到关注。1988 年，一项日本专利首次报道了叠层 SiC 纤维增强环氧树脂复合材料的结构设计方法，制得的厚度为 4 mm 的三层阻抗渐变式复合材料在 8~16 GHz 的反射损耗 R_L 均低于 -10 dB^[101]。美国海军采用 SiC 混杂纤维 PEEK 树脂结构隐身材料制造潜艇艇身，具有良好的电磁吸收和屏蔽效果^[102]。

目前，中国对于 SiC 纤维增强树脂基吸波复合材料的研究较少。已有研究主要集中在吸波剂与树脂基体进行混合，以及对于结构设计以增强力学性能和电磁波吸收能力 2 方面^[103–104]。

3.2.1 吸波剂研究方面 Wang 等^[105]以导电炭黑 (CB) 为吸波剂，填充了 SiC 纤维/环氧树脂复合材料。发现复合材料的复介电常数随着 CB 含量的增加而增加，对于单层结构，当 CB 含量为 7.5% 时，复合材料具有良好的吸收性能，在 8.2~11.5 GHz 范围内反射损耗 R_L 值低于 -9 dB。与单层吸波材料相比，双层吸波材料具有更好的吸波性能，在 x 波段反射损耗 R_L 值低于 -10 dB。Zheng 等^[106]使用碳热还原工艺和催化剂诱导法合成 SiC 粉末 (SiC_p) 和 SiC 纤维 (SiC_f) 吸波剂。将这 2 种吸波剂加入到具有不同质量浓度的环氧树脂 (ER) 中，通过热压成型工艺得到 ER/SiC_p/SiC_f 三元复合材料。研究发现，SiC_p 与 SiC_f 合理配比使复合材料具有良好的吸波性能，该复合材料在 x 波段的最小反射损耗 R_L 为 -63.91 dB。同时，引入机械强度优异的 SiC_p/SiC_f，可显著提高 ER 相减的抗拉强度和抗弯强度，具有良好的增韧效果。

3.2.2 结构研究方面 多层结构是最为常见的 SiC 纤维增强吸波复合材料的设计结构，结构示意图如图 12 所示^[100, 103]。Guo 等^[107]基于双层层压板优化了 SiC 纤维增强树脂基复合材料的结构。在这一结构中，表层 (电磁波入射面) 由高电阻率纤维 ($\rho=6.5 \times 10^5 \Omega \cdot m$) 作为匹配层，旨在促进阻抗匹配；底层由低电阻率纤维 ($\rho=109.7 \Omega \cdot m$) 作为吸收层，以吸收电磁波。匹配层和吸收层的结合明显提高了 SiC 纤维树脂基复合材料的吸波性能，在整个 x (8.2~12.4 GHz) 和 Ku (12.4~18 GHz) 波段中反射损耗 R_L 可低于 -13.3 dB。Liu 等^[108]采用了具有 Si—C—O 表面层高电阻率 SiC 纤维和具有热解碳表面层低电阻率 SiC 纤维，设计了一种三明治电磁波吸收结构 (SSMAS)。结果表明，SSMAS 具有良好的宽带电磁波吸收性能，有效吸收带宽 EAB 可达 11.6 GHz。

图 12 多层结构吸波材料示意图^[101]Fig. 12 Schematic diagram of multi-layer structure absorbing materials^[101]

4 总结与展望

SiC 纤维作为高性能增强体和吸波材料具有广泛应用前景，是关键的国防战略材料。本文对 SiC 纤维及其复合材料吸波性能研究进展进行了详细的总结和分析。从阻抗匹配、电磁损耗 2 个方面阐述了 SiC 纤维的吸波机理，总结了改善 SiC 纤维吸波性能的 4 种途径：元素掺杂、表面涂层设计、结构设计和微结构热处理调控。这 4 种方法均可在一定程度上改善 SiC 纤维的吸波性能，由于作用机理的不同，其改善效果存在差异。最后，文章介绍了 SiC 纤维增强陶瓷基和树脂基复合材料的吸波性能研究进展，并指出可通过对纤维、界面、基体和结构开展多尺度设计，进一步优化复合材料的力学性能和电磁性能。

目前，虽然对于 SiC 纤维及其增强复合材料吸波性能的研究取得了诸多成果，但仍需在以下方面开展深入研究：

1) 加强对于 SiC 纤维及其复合材料的吸波作用机理和损耗机制研究，准确分析不同成分和结构对于性能提升的贡献，不只是模糊赋予其协同效应。

2) 加强复杂环境下结构-功能一体化的高性能 SiC 纤维研究，综合考虑 SiC 纤维的力学、高温、耐腐蚀及吸波性能，使其可在复杂环境下实现功能化应用。

3) 加强不同尺度结构单元协同设计，实现 SiC 纤维增强复合材料结构-吸波以及其他使用性能协同提高。

4) 加强 SiC 纤维增强吸波复合材料使用环境下结构与性能演变研究，对性能进行综合评价，为实用化奠定基础。

参考文献:

[1] LIU H G, WU S Q, YOU C Y, et al. Recent progress in morphological engineering of carbon materials for electromagnetic interference

shielding[J]. Carbon, 2021, 172: 569–596.

- [2] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave material processing—a review[J]. AICHE J, 2012, 58(2): 330–363.
- [3] KALLUMOTTAKKAL M, HUSSEIN M I, IQBAL M Z. Recent progress of 2D nanomaterials for application on microwave absorption: A comprehensive study[J]. Front Mater, 2021, 8: 633079.
- [4] WANG C, MURUGADOSS V, KONG J, et al. Overview of carbon nanostructures and nanocomposites for electromagnetic wave shielding[J]. Carbon, 2018, 140: 696–733.
- [5] 向宇, 余金山, 王洪磊, 等. 碳化硅纤维高温抗氧化性研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3234–3242.
- XIANG Yu, YU Jinshan, WANG Honglei, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2022, 41(9): 3234–3242.
- [6] GOU Y Z, WANG H, JIAN K, et al. Preparation and characterization of SiC fibers with diverse electrical resistivity through pyrolysis under reactive atmospheres[J]. J Eur Ceram Soc, 2017, 37(2): 517–522.
- [7] CAO Y, XIANG D P, LI H, et al. Rapid preparation of SiC fibers by spark plasma assisted vapor silicon infiltration[J]. J Alloys Compd, 2018, 740: 836–843.
- [8] HAY R S. SiC fiber strength after low pO₂ oxidation[J]. J Am Ceram Soc, 2018, 101(2): 831–844.
- [9] HUANG Q, LEI G H, LIU R D, et al. Microstructure, hardness and modulus of carbon-ion-irradiated new SiC fiber (601-4)[J]. J Nucl Mater, 2018, 503: 91–97.
- [10] WING B L, HALLORAN J W. Subsurface oxidation of boron nitride coatings on silicon carbide fibers in SiC/SiC ceramic matrix composites[J]. Ceram Int, 2018, 44(14): 17499–17505.
- [11] WEN B, CAO M S, HOU Z L, et al. Temperature dependent microwave attenuation behavior for carbon-nanotube/silica composites[J]. Carbon, 2013, 65: 124–139.
- [12] 黄威, 王轩, 李永清, 等. 微波吸收材料电磁特性响应规律及影响因素研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(7): 15–25.
- HUANG Wei, WANG Xuan, LI Yongqing, et al. Mater Rep, 2023, 37(7): 15–25.
- [13] 叶昉. 结构吸波型 SiC_p/Si(B)CN 的设计/制备基础与性能优化[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- YE Fang. Design, preparation and performance optimization of wave-absorbing SiC_p/Si(B)CN composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [14] MO R, YIN X W, LI M X, et al. Relationship between microstructure and electromagnetic properties of SiC fibers[J]. J Am Ceram Soc, 2020, 103(8): 4352–4362.
- [15] MUTO N, MIYAYAMA M, YANAGIDA H, et al. Infrared detection by Si—Ti—C—O fibers[J]. J Am Ceram Soc, 1990, 73(2): 443–445.
- [16] YAMAMURA T, ISHIKAWA T, SHIBUYA M, et al. Development of a new continuous Si—Ti—C—O fibre using an organometallic polymer precursor[J]. J Mater Sci, 1988, 23(7): 2589–2594.
- [17] SUZUKI K, KUMAGAWA K, KAMIYAMA T, et al. Characterization of the medium-range structure of Si—Al—C—O, Si—Zr—C—O and Si—Al—C Tyranno fibers by small angle X-ray scattering[J]. J Mater Sci, 2002, 37(5): 949–953.
- [18] KAGAWA Y, IMAHASHI Y, IBA H, et al. Effect of electrical resistivity of Si—Ti—C—O fiber on electromagnetic wave penetration depth of short fiber-dispersed composites[J]. J Mater Sci Lett, 2003, 22(2): 159–161.
- [19] ISHIKAWA T, KOHTOKU Y, KUMAGAWA K. Production mechanism of polyzirconocarbo-silane using

- zirconium(IV)acetylacetonate and its conversion of the polymer into inorganic materials[J]. J Mater Sci, 1998, 33(1): 161–166.
- [20] FISCHBACH D B, LEMOINE P M, YEN G V. Mechanical properties and structure of a new commercial SiC-type fibre (Tyranno)[J]. J Mater Sci, 1988, 23(3): 987–993.
- [21] 赵东林, 沈曾民. 吸波 C_f 和 SiC_f 的制备及其微波电磁特性[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(1): 4–9.
- ZHAO Donglin, SHEN Zengmin. Aerosp Mater Technol, 2001, 31(1): 4–9.
- [22] 王军, 宋永才, 冯春祥. 含钛碳化硅纤维的制备及其微波吸收特性[J]. 材料研究学报, 1998, 12(4): 419–422.
- WANG Jun, SONG Yongcai, FENG Chunxiang. Chin J Mater Res, 1998, 12(4): 419–422.
- [23] 王军. 含过渡金属的碳化硅纤维的制备及其电磁性能[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1997.
- WANG Jun. Preparation and Electromagnetic Properties of Silicon Carbide Fibers Containing Transition Metals[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1997.
- [24] 王军, 宋永才, 冯春祥, 等. 含镍碳化硅纤维的制备及其雷达波吸收特性[J]. 国防科技参考, 1997, 18(4): 57–60.
- WANG Jun, SONG Yongcai, FENG Chunxiang, et al. Natl Def Technol, 1997, 18(4): 57–60.
- [25] 王军, 宋永才, 冯春祥. 具有微波吸收功能的掺混型碳化硅纤维的研制[J]. 功能材料, 1997, 28(6): 619–622.
- WANG Jun, SONG Yongcai, FENG Chunxiang. J Funct Mater, 1997, 28(6): 619–622.
- [26] 王亦菲, 冯春祥, 宋永才. 电阻率可调的含钛碳化硅纤维的制备与性能研究[J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(1): 28–31.
- WANG Yifei, FENG Chunxiang, SONG Yongcai. Aerosp Mater Technol, 1999, 29(1): 28–31.
- [27] XU H Z, YAGI S, ASHOUR S, et al. A review on current nanofiber technologies: Electrospinning, centrifugal spinning, and electro-centrifugal spinning[J]. Macro Mater Eng, 2023, 308(3): 2200502.
- [28] YU G S, LI T S, XU M, et al. Fabrication of nickel-YSZ cermet nanofibers via electrospinning[J]. J Alloys Compd, 2017, 693: 1214–1219.
- [29] LI J, RUI J M, LI Y J, et al. Zr-doped SiOC ceramics fibers and the high-temperature thermal performance[J]. Int J Appl Ceram Technol, 2023, 20(4): 2438–2448.
- [30] HOU Y, CHENG L F, ZHANG Y N, et al. Electrospinning of Fe/SiC hybrid fibers for highly efficient microwave absorption[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(8): 7265–7271.
- [31] HOU Y, YANG Y, DENG C R, et al. Implications from broadband microwave absorption of metal-modified SiC fiber mats[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(28): 31823–31829.
- [32] YU Z J, LV X, MAO K W, et al. Role of *in situ* formed free carbon on electromagnetic absorption properties of polymer-derived SiC ceramics[J]. J Adv Ceram, 2020, 9(5): 617–628.
- [33] LI F, DU H Z, CHEN T, et al. Dielectric properties and electromagnetic wave absorbing performance of single-source-precursor-derived carbon-rich NbC–SiC–C nanocomposites[J]. Int J Appl Ceram Technol, 2023, 20(2): 1090–1102.
- [34] WANG P, CHENG L F, ZHANG L T. One-dimensional carbon/SiC nanocomposites with tunable dielectric and broadband electromagnetic wave absorption properties[J]. Carbon, 2017, 125: 207–220.
- [37] WANG P, CHENG L F, ZHANG Y N, et al. Electrospinning of graphite/SiC hybrid nanowires with tunable dielectric and microwave absorption characteristics[J]. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2018, 104: 68–80.
- [35] HUO Y S, ZHAO K, XU Z L, et al. Electrospinning synthesis of SiC/Carbon hybrid nanofibers with satisfactory electromagnetic wave absorption performance[J]. J Alloys Compd, 2020, 815: 152458.
- [36] ZHANG Y N, ZHAO Y J, CHEN Q, et al. Flexible SiC–CNTs hybrid fiber mats for tunable and broadband microwave absorption[J]. Ceram Int, 2021, 47(6): 8123–8132.
- [37] WANG P, CHENG L F, ZHANG Y N, et al. Electrospinning of graphite/SiC hybrid nanowires with tunable dielectric and microwave absorption characteristics[J]. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2018, 104: 68–80.
- [38] CHEN J H, LIU M, YANG T, et al. Improved microwave absorption performance of modified SiC in the 2–18 GHz frequency range[J]. CrystEngComm, 2017, 19(3): 519–527.
- [39] LI Z C, YE F, CHENG L F, et al. Synthesis of Si–C–N aligned nanofibers with preminent electromagnetic wave absorption in ultra-broad band[J]. J Mater Chem C, 2021, 9(47): 16966–16977.
- [40] LI Y W, NIE H B, XUE S K, et al. Abnormal grain growth in iron-containing SiC fibers[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 41(4): 2306–2311.
- [41] ZHANG B J, LIU Y, LI X L, et al. Closed-cell ZrO_2 /SiC-based composite nanofibers with efficient electromagnetic wave absorption and thermal insulation properties[J]. J Alloys Compd, 2022, 927: 167036.
- [42] SHA J J, HINOKI T, KOHYAMA A. Microstructural characterization and fracture properties of SiC-based fibers annealed at elevated temperatures[J]. J Mater Sci, 2007, 42(13): 5046–5056.
- [43] 许慈, 张力, 陆雪川, 等. 先驱体转化法制备含硼 SiC 纤维[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(8): 1260–1267.
- XU Han, ZHANG Li, LU Xuechuan, et al. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(8): 1260–1267.
- [44] TIAN Y, LONG X, SHAO C W, et al. SiC nanograins stabilized Si–C–B–N fibers with ultrahigh-temperature resistance[J]. J Am Ceram Soc, 2023, 106(3): 1981–1992.
- [45] LONG X, SHAO C W, WANG S S, et al. Nanochannel diffusion-controlled nitridation of polycarbosilanes for diversified SiCN fibers with interfacial gradient-SiC_xN_y phase and enhanced high-temperature stability[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(13): 12993–13002.
- [46] WANG B W, LI H M, XU L M, et al. Fine-diameter microwave-absorbing SiC-based fiber[J]. RSC Adv, 2017, 7(20): 12126–12132.
- [47] KUANG J L, JIANG P, RAN F Y, et al. Conductivity-dependent dielectric properties and microwave absorption of Al-doped SiC whiskers[J]. J Alloys Compd, 2016, 687: 227–231.
- [48] KUANG J L, XIAO T, ZHENG Q F, et al. Dielectric permittivity and microwave absorption properties of transition metal Ni and Mn doped SiC nanowires[J]. Ceram Int, 2020, 46(9): 12996–13002.
- [49] CHEN S H, DONG X C, YAO X J, et al. Fabrication, microstructural evolution and excellent EMW absorbing properties of SiC fibers with high iron content[J]. J Mater Chem C, 2021, 9(38): 13509–13519.
- [50] 程海峰, 陈朝辉, 李永清, 等. 碳化硅短切纤维电磁特性改进研究[J]. 宇航材料工艺, 1998, 28(2): 55–59.
- CHENG Haifeng, CHEN Zhaohui, LI Yongqing, et al. Aerosp Mater Technol, 1998, 28(2): 55–59.

- [51] 程海峰, 陈朝辉, 李永清, 等. 碳化硅纤维表面化学镀改性研究[C]//第三届中国功能材料及其应用学术会议论文集. 重庆, 1998: 411-414.
- [52] WEI Y S, YUE J L, TANG X Z, et al. Enhanced microwave-absorbing properties of FeCo magnetic film-functionalized silicon carbide fibers fabricated by a radio frequency magnetron method[J]. *Ceram Int*, 2017, 43(18): 16371-16375.
- [53] GUO T, HUANG B, LI C G, et al. Magnetic sputtering of FeNi/C bilayer film on SiC fibers for effective microwave absorption in the low-frequency region[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(4): 5221-5226.
- [54] HUANG B, HU H L, LIM S, et al. Gradient FeNi-SiO₂ films on SiC fiber for enhanced microwave absorption performance[J]. *J Alloys Compd*, 2022, 897: 163204.
- [55] XU J M, XIA L, LUO J H, et al. High-performance electromagnetic wave absorbing CNT/SiC_f composites: Synthesis, tuning, and mechanism[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(18): 20775-20784.
- [56] WANG P, LI Z C, CHENG L F, et al. SiC/rGO core-shell nanowire as a lightweight, highly efficient gigahertz electromagnetic wave absorber[J]. *ACS Appl Electron Mater*, 2020, 2(2): 473-482.
- [57] XU C, WU F, DUAN L Q, et al. Dual-interfacial polarization enhancement to design tunable microwave absorption nanofibers of SiC@C@PPy[J]. *ACS Appl Electron Mater*, 2020, 2(6): 1505-1513.
- [58] ZHOU W, ZHANG Y T, LI Y, et al. *In-situ* synthesis of ternary layered Y₃Si₂C₂ ceramic on silicon carbide fiber for enhanced electromagnetic wave absorption[J]. *Ceram Int*, 2022, 48(2): 1908-1915.
- [59] ZOU Y J, HUANG X Z, FAN B H, et al. Constructing hierarchical Ti₃SiC₂ layer and carbon nanotubes on SiC fibers for enhanced electromagnetic wave absorption[J]. *Ceram Int*, 2023, 49(5): 8048-8057.
- [60] YANG H T, LI Y R, LUO H, et al. *In situ* construction of TiC-Ti₃SiC₂ gradient hybrid interphase coated SiC fibers for suppression of specular reflection and non-specular scattering[J]. *Materials*, 2022, 16(1): 292.
- [61] ZHAO Z X, DU Z J, HUANG X Z, et al. 1D-2D heterostructured silicon carbide fibers@WS₂ with high efficiency and broad bandwidth for microwave absorption performance[J]. *Ceram Int*, 2023, 49(6): 9916-9923.
- [62] LI H H, YUAN X Y, ZHAO P H, et al. A synergistic strategy for SiC/C nanofibers@MXene with core-sheath microstructure toward efficient electromagnetic wave absorption and photothermal conversion[J]. *Appl Surf Sci*, 2023, 613: 155998.
- [63] YE F, ZHANG L T, YIN X W, et al. The improvement of wave-absorbing ability of silicon carbide fibers by depositing boron nitride coating[J]. *Appl Surf Sci*, 2013, 270: 611-616.
- [64] HUO Y S, TAN Y J, ZHAO K, et al. Enhanced electromagnetic wave absorption properties of Ni magnetic coating-functionalized SiC/C nanofibers synthesized by electrospinning and magnetron sputtering technology[J]. *Chem Phys Lett*, 2021, 763: 138230.
- [65] 王军, 宋永才, 王浩, 等. 先驱体转化法制备碳化硅纤维[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [66] 王应德, 冯春祥, 王娟, 等. 具备吸收雷达波功能的三叶型碳化硅纤维研制[J]. *复合材料学报*, 2001, 18(1): 42-45.
WANG Yingde, FENG Chunxiang, WANG Juan, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2001, 18(1): 42-45.
- [67] 刘旭光, 王应德, 薛金根, 等. 三折叶形截面碳化硅纤维的制备及其电磁性能[J]. *功能材料*, 2009, 40(5): 739-741.
LIU Xuguang, WANG Yingde, XUE Jingen, et al. *J Funct Mater*, 2009, 40(5): 739-741.
- [68] 刘旭光. 异形截面碳化硅纤维制备及其吸波性能[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
LIU Xuguang. Preparation and microwave-absorbing properties of non-circular section silicon carbide fibers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [69] 刘旭光, 王应德. 条形碳化硅纤维的制备与性能[J]. *固体火箭技术*, 2008, 31(6): 642-645.
LIU Xuguang, WANG Yingde. *J Solid Rocket Technol*, 2008, 31(6): 642-645.
- [70] 刘旭光, 王应德, 姜勇刚, 等. C形碳化硅纤维制备及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(增刊 1): 395-398.
LIU Xuguang, WANG Yingde, JIANG Yonggang, et al. *Rare Met Mater Eng*, 2008, 37(S1): 395-398.
- [71] LIU X G, WANG Y D, WANG L, et al. Preparation and microwave electromagnetic properties of cross-shaped SiC fibers[J]. *J Inorg Mater*, 2010, 25(4): 441-444.
- [72] 杨连, 黎阳, 洪流, 等. 功能化碳化硅纤维研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(5): 1397-1403.
YANG Lian, LI Yang, HONG Liu, et al. *J Synth Cryst*, 2016, 45(5): 1397-1403.
- [73] 赵琳. 静电纺丝技术制备纳米吸波材料的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
ZHAO Lin. Nano absorbign materials prepared *via* electrospinning[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [74] 甄霞丽. 聚铝碳硅烷纤维在臭氧气氛中的交联动力学及中空 SiC 纤维形成机理[D]. 上海: 上海大学, 2019.
ZHEN Xiali. Crosslinking kinetics of polyalumi-nocarbosilane fiber in ozone atmosphere and the formation mechanism of hollow SiC fiber[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019.
- [75] XIAO T, KUANG J L, PU H, et al. Hollow SiC microtube with multiple attenuation mechanisms for broadband electromagnetic wave absorption[J]. *J Alloys Compd*, 2021, 862: 158032.
- [76] TIAN Q, WU N, WANG B, et al. Fabrication of hollow SiC ultrafine fibers by single-nozzle electrospinning for high-temperature thermal insulation application[J]. *Mater Lett*, 2019, 239: 109-112.
- [77] ZHU B, CUI Y, LV D F, et al. Synthesis and electromagnetic wave absorption properties of peanut shell-like SiC fibers[J]. *Mater Lett*, 2020, 263: 127288.
- [78] LAN X L, QIU Z C, YAN B, et al. Growing dendritic SiC on 1D SiC nanowire: Enhancement of electromagnetic wave absorption performance[J]. *J Phys Chem Solids*, 2020, 136: 109124.
- [79] LI B B, MAO B X, HUANG H Q, et al. Synthesis and microwave absorption properties of bamboo-like β -SiC nanowires[J]. *Int J Appl Ceram Technol*, 2020, 17(4): 1869-1881.
- [80] YE F, ZHANG L T, YIN X W, et al. Dielectric and electromagnetic wave absorbing properties of two types of SiC fibres with different compositions[J]. *J Mater Sci Technol*, 2013, 29(1): 55-58.
- [81] DING D H, LUO F, SHI Y M, et al. Influence of thermal oxidation on complex permittivity and microwave absorbing potential of KD-I SiC fiber fabrics[J]. *J Eng Fibres Fabr*, 2014, 9(2): 155892501400900.
- [82] TAN E, KAGAWA Y, DERICIOGLU A F. Electromagnetic wave absorption potential of SiC-based ceramic woven fabrics in the GHz range[J]. *J Mater Sci*, 2009, 44(5): 1172-1179.
- [83] 阳海棠, 黄小忠. SiC 纤维及其陶瓷基复合材料[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2020.

- YANG Haitang, HUANG Xiaozhong. SiC fiber and ceramic composites[M]. Changsha: Central South University Press, 2020.
- [84] 刘海韬, 程海峰, 王军, 等. 高温结构吸波材料综述[J]. 材料导报, 2009, 23(19): 24–27.
- LIU Haitao, CHENG Haifeng, WANG Jun, et al. Mater Rev, 2009, 23(19): 24–27.
- [85] 裘镜蓉. 多功能复合材料发展现状[J]. 宇航材料工艺, 1990, 20(4): 59–63.
- QIU Jingrong. Aerosp Mater Technol, 1990, 20(4): 59–63.
- [86] 徐剑盛, 周万城, 罗发, 等. 雷达波隐身技术及雷达吸波材料研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(9): 46–49.
- XU Jiansheng, ZHOU Wancheng, LUO Fa, et al. Mater Rev, 2014, 28(9): 46–49.
- [87] 刘巧沐, 黄顺洲, 何爱杰. 碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用需求及挑战[J]. 材料工程, 2019, 47(2): 1–10.
- LIU Qiaomu, HUANG Shunzhou, HE Aijie. J Mater Eng, 2019, 47(2): 1–10.
- [88] 杜昆, 陈麒好, 孟宪龙, 等. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 107–125.
- DU Kun, CHEN Qihao, MENG Xianlong, et al. J Propuls Technol, 2022, 43(2): 107–125.
- [89] HUANG Z B, KANG W B, QING Y C, et al. Influences of SiC_f content and length on the strength, toughness and dielectric properties of SiC_f/LAS glass-ceramic composites[J]. Ceram Int, 2013, 39(3): 3135–3140.
- [90] HAN T, LUO R Y, CUI G Y, et al. Effect of fibre directionality on the microwave absorption properties of 3D braided SiC_f/SiC composites[J]. Ceram Int, 2019, 45(6): 7797–7803.
- [91] WU H T, CHEN M W, WEI X, et al. Deposition of BN interphase coatings from B-trichloroborazine and its effects on the mechanical properties of SiC/SiC composites[J]. Appl Surf Sci, 2010, 257(4): 1276–1281.
- [92] DING D H, SHI Y M, WU Z H, et al. Electromagnetic interference shielding and dielectric properties of SiC_f/SiC composites containing pyrolytic carbon interphase[J]. Carbon, 2013, 60: 552–555.
- [93] LIU H T, TIAN H. Mechanical and microwave dielectric properties of SiC_f/SiC composites with BN interphase prepared by dip-coating process[J]. J Eur Ceram Soc, 2012, 32(10): 2505–2512.
- [94] MU Y, ZHOU W C, LUO F, et al. Effects of BN/SiC dual-layer interphase on mechanical and dielectric properties of SiC_f/SiC composites[J]. Ceram Int, 2014, 40(2): 3411–3418.
- [95] FAN Y T, YANG D, MEI H, et al. Tuning SiC nanowires interphase to improve the mechanical and electromagnetic wave absorption properties of SiC_f/SiC_{nw}/Si₃N₄ composites[J]. J Alloys Compd, 2022, 896: 163017.
- [96] GAO H, LUO F. Effect of SiC interphase on the mechanical, high-temperature dielectric and high-temperature microwave absorption properties of the SiC_f/SiC/Mu composites[J]. Ceram Int, 2022, 48(13): 18567–18578.
- [97] GAO H, LUO F, NAN H Y, et al. Improved mechanical and microwave absorption properties of SiC fiber/mullite matrix composite using hybrid SiC/Ti₃SiC₂ fillers[J]. J Alloys Compd, 2019, 791: 51–59.
- [98] WAN F, YAN J H, XU H M. Improved mechanical and high-temperature electromagnetic wave absorption properties of SiC_f/BN/AlPO₄ composites with absorber multiwalled carbon nanotubes[J]. Compos Interfaces, 2020: 1–18.
- [99] DUAN S C, ZHU D M, ZHOU W C, et al. Mechanical and microwave absorption properties of Ti-filled SiC_f/SiC composites via precursor infiltration and pyrolysis[J]. J Mater Sci Mater Electron, 2020, 31(3): 2634–2642.
- [100] 李华展. 碳化硅纤维/环氧树脂复合材料的制备及吸波性能研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015.
- LI Huazhan. Preparation and microwave absorbing properties of silicon carbide fiber/epoxy resin composites[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015.
- [101] ISHIKAWA T, ICHIKAWA H, IMAI Y, et al. Electromagnetic wave absorbers of silicon carbide fibers: US4507354[P]. 1985-03-26.
- [102] 黄科, 冯斌, 邓京兰. 结构型吸波复合材料研究进展[J]. 高科技纤维与应用, 2010, 35(6): 54–58.
- HUANG Ke, FENG Bin, DENG Jinglan. Hi Tech Fiber Appl, 2010, 35(6): 54–58.
- [103] CHOI J H, NAM Y W, JANG M S, et al. Characteristics of silicon carbide fiber-reinforced composite for microwave absorbing structures[J]. Compos Struct, 2018, 202: 290–295.
- [104] 闫海超. 树脂基陶瓷吸波材料专利技术分析[J]. 现代经济信息, 2020(12): 148–149.
- YAN Haichao. Mod Econ Inf, 2020(12): 148–149.
- [105] WANG H Y, ZHU D M. Design of radar absorbing structure using SiC_f/epoxy composites for X band frequency range[J]. Ind Eng Chem Res, 2018, 57(6): 2139–2145.
- [106] ZHENG W J, WEI B, YAO Z J, et al. Study on mechanical properties and X-band microwave absorption properties of ER/SiC_p/SiC_f ternary composites[J]. J Magn Magn Mater, 2021, 540: 168450.
- [107] GUO K S, ZHANG W X, ZHANG S N, et al. Optimization of the microwave absorptivity of SiC_f/Resin composites in the GHz range[J]. Ceram Int, 2021, 47(13): 18262–18273.
- [108] LIU H T, CHENG H F, TIAN H. Design, preparation and microwave absorbing properties of resin matrix composites reinforced by SiC fibers with different electrical properties[J]. Mater Sci Eng B, 2014, 179: 17–24.

Research Progress on Wave Absorption Properties of SiC Fiber and Its Composites

YU Tingyou, JIN Dan, YIN Hongfeng, TANG Yun, REN Xiaohu, YUAN Hudie, SUN Kewei

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

Extended Abstract

With the rapid development of electronic information technology and the 5G, wireless electronic communication technologies and related products based on electromagnetic wave emission, transmission, and processing become popular. However, the

consequent electromagnetic radiation and interference are serious, affecting human-being health and environment. Also, the survival and penetration capabilities of weapon systems require minimizing radar cross-sections to achieve electromagnetic stealth with the continuous advancement of modern warfare radar detection technologies. The adoption of electromagnetic wave-absorbing materials currently represents the most effective and feasible approach to mitigate electromagnetic pollution and realize electromagnetic invisibility goals. For the dual needs of civil and defense applications, the development and production of high-performance electromagnetic wave absorbents becomes a hot research topic. Moreover, high-performance absorbing materials meet the basic requirements for traditional absorbents of "light weight, strong absorption, thin thickness, and wide band", and possess properties like high-temperature resistance, corrosion resistance, etc., to adapt to different complex environments.

SiC fibers have attracted extensive attention due to their superior properties of low density, high strength, high modulus, high-temperature resistance, oxidation resistance, and corrosion resistance. SiC fibers have a tremendous application value in various extreme environments, including nuclear reactors, aeroengines, aircraft nozzles, etc.. Moreover, as a wide bandgap semiconductor material, SiC fibers also possess the advantage of tunable electrical resistivity, providing possibilities for their functional application in electromagnetic wave absorption. However, the electromagnetic absorption performance of conventional SiC fibers is far from ideal due to the presence of some issues such as single loss mechanism and impedance mismatch. It is thus necessary to improve the electromagnetic wave absorption capabilities of SiC fibers. To enhance the absorption performance of SiC fibers, efforts could be made in the following two aspects, *i.e.*, tuning the electrical resistivity of SiC fibers to augment dielectric loss and optimize impedance matching, and introducing new loss mechanisms to increase electromagnetic wave attenuation paths. This review represented four approaches and underlying mechanisms to improve the electromagnetic wave absorption performance of SiC fibers, namely, elemental doping, surface coating design, structural design, and microstructure manipulation through thermal treatment. Furthermore, from the perspective of fibers, interface, matrix, and their structures, the related research progress on the electromagnetic wave absorption capabilities of SiC fiber-reinforced ceramic matrix and polymer matrix composites was summarized. The electromagnetic wave absorption properties could be effectively enhanced *via* the rational design of the SiC fibers and composites in multiple length scales.

Summary and prospects The mechanisms underlying the four approaches to improve the electromagnetic wave absorption performance of SiC fibers are not entirely the same. Element doping can form conductive phases, magnetic loss phases, and heterogeneous interfaces inside SiC fibers to increase their electromagnetic losses, thus improving the electromagnetic wave absorption performance. Surface coating design can increase electromagnetic wave loss mechanisms, while optimizing impedance matching to attenuate electromagnetic waves. Structural design enables more electromagnetic waves to enter the interior of SiC fibers and utilizes structural features to increase electromagnetic wave transmission distance and multiple reflections, effectively attenuating electromagnetic waves and improving absorption performance. Thermal treatment can regulate the composition and crystallite size (microstructure) of SiC fibers, causing changes in fiber electrical resistivity and electromagnetic parameters, thereby improving electromagnetic wave absorption. For SiC fiber-reinforced composites, the multidimensional design of SiC fibers, interface, matrix, and their structures can enhance absorption performance. However, despite many achievements in the research of electromagnetic wave absorption properties of SiC fibers and their composites, studies on the synergistic improvement of structure absorption and other functional properties of SiC fiber-reinforced composites are still scarce. It is thus necessary for the functional application of SiC fibers in complex environments to strengthen the synergistic design of SiC fiber structural units in different scales and the research on structure-property evolution of SiC fiber reinforced electromagnetic wave absorbing composites under service conditions.

Keywords silicon carbide fiber; wave absorption properties; impedance matching; electromagnetic loss; fiber-reinforced composites