

## SiC复合吸波材料的研究进展

邢原铭 杨涛 王恩会 刘成 侯新梅

## Research progress of SiC composite microwave absorbing materials

XING Yuanming, YANG Tao, WANG Enhui, LIU Cheng, HOU Xinmei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230428.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 铁氧体及其复合吸波材料的研究进展

Research progress of ferrite and its composite absorbing materials

复合材料学报. 2020, 37(11): 2684–2699 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200727.002>

#### 吸波超材料研究进展

Research progress in metamaterial absorber

复合材料学报. 2021, 38(1): 25–35 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200921.004>

#### 新型碳基磁性复合吸波材料的研究进展

Research progress of new carbon based magnetic composite electromagnetic waveabsorbing materials

复合材料学报. 2020, 37(12): 3004–3016 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200825.002>

#### 增强改性SiO<sub>2</sub>气凝胶复合材料的研究进展

Research progress of reinforced SiO<sub>2</sub> aerogel composites

复合材料学报. 2020, 37(11): 2674–2683 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200615.001>

#### Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@锂铝硅微晶玻璃/还原氧化石墨烯复合材料的制备和吸波性能

Preparation and microwave absorbing properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@lithium aluminum silicate glass ceramic/reduced graphene oxide composite

复合材料学报. 2019, 36(11): 2651–2664 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181224.002>

#### 钩针工艺之于活性碳纤维/环氧树脂电路屏吸波复合材料的设计

Crochet process in design of activated carbon fibers/epoxy circuit screen composites with high microwave absorbing

复合材料学报. 2017, 34(1): 47–52 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160322.006>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

## SiC 复合吸波材料的研究进展

邢原铭<sup>1</sup>, 杨涛<sup>\*1</sup>, 王恩会<sup>1</sup>, 刘成<sup>2</sup>, 侯新梅<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 碳中和研究院, 北京 100083; 2. 马鞍山钢铁股份有限公司 技术中心, 马鞍山 243003)



分享本文

**摘要:** 为了防治日益严重的电磁干扰问题, 吸波材料的研发越来越引起人们的重视。SiC 作为一种介电性能优秀的吸波材料, 还具有出众的稳定性、高强度、耐腐蚀等优点, 但也有着阻抗匹配不佳、吸波机制单一的缺点。将 SiC 与其他材料复合是进一步提高 SiC 材料吸波性能的重要手段。本文简要介绍了 SiC 的结构、吸波机制及影响因素, 详细综述了不同维度的 SiC 复合材料的吸波性能, 包括 SiC 纳米颗粒、SiC 纳米线、三维 SiC 材料与金属材料、碳材料、陶瓷材料、高分子材料等不同种类材料复合, 相比于单一的 SiC 材料, 复合材料可以提高其介电性能、丰富吸收机制、优化阻抗匹配, 进而提高吸波性能。最后展望了 SiC 基复合吸波材料的发展方向。

**关键词:** 吸波; 复合材料; 碳化硅; 纳米颗粒; 纳米线; 气凝胶

**中图分类号:** TB332; TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)09-4880-13

## Research progress of SiC composite microwave absorbing materials

XING Yuanming<sup>1</sup>, YANG Tao<sup>\*1</sup>, WANG Enhui<sup>1</sup>, LIU Cheng<sup>2</sup>, HOU Xinmei<sup>1</sup>

(1. Institute for Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Technical Center, Ma'an Shan Iron and Steel CO., LTD., Ma'an Shan 243003, China)

**Abstract:** In order to prevent the increasingly serious electromagnetic interference problem, the research and development of microwave absorbing materials has attracted more and more attention. As a microwave absorbing material with excellent dielectric properties, SiC also has the advantages of excellent stability, high strength and corrosion resistance. But it also has the disadvantages of poor impedance matching and single microwave absorbing mechanism. Compounding SiC with other materials is an important means to further improve the microwave absorbing properties of SiC materials. The structure, microwave absorbing mechanism and influencing factors of SiC were briefly introduced in the paper. Then the microwave absorbing properties of SiC composites with different dimensions were summarized in detail, including SiC nanoparticles, SiC nanowires, three-dimensional SiC materials with different kinds of materials such as metallic materials, carbon materials, ceramic materials, and polymer materials. Compared with a single SiC material, the composite materials can improve their dielectric properties, enrich the absorption mechanism, optimize the impedance matching, and then improve the microwave absorption ability. Finally, the development direction of SiC based composite microwave absorbing materials was prospected.

**Keywords:** microwave absorbing; compound material; silicon carbide; nanoparticles; nanowires; aerogel

吸波材料作为防雷达探测、电磁干扰和电磁污染<sup>[1]</sup>的有效屏障, 不仅应用在隐身、航空航天等军事领域, 在通信、个体防护等民用领域也得到广泛应用<sup>[2]</sup>。吸波材料与其他隐身技术相结合,

可以使一架飞机的雷达反射截面降低到  $0.1 \text{ m}^2$  以下, 大大增加空中优势<sup>[3]</sup>; 许多新建筑的修建也开始采用吸波材料作为幕墙以防止电磁干扰<sup>[4]</sup>。目前已开发出的常见吸波材料主要包括磁性金属

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-03-31; 录用日期: 2023-04-21; 网络首发时间: 2023-04-28 14:46:08

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230428.001>

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (52025041); 国家自然科学基金 (51902020; 51974021; 52250091)

National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (52025041); National Natural Science Foundation of China (51902020; 51974021; 52250091)

通信作者: 杨涛, 博士, 特聘教授, 博士生导师, 研究方向为冶金电化学与无机非金属材料的功能化 E-mail: [yangtaoustb@ustb.edu.cn](mailto:yangtaoustb@ustb.edu.cn)

引用格式: 邢原铭, 杨涛, 王恩会, 等. SiC 复合吸波材料的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(9): 4880-4892.

XING Yuanming, YANG Tao, WANG Enhui, et al. Research progress of SiC composite microwave absorbing materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(9): 4880-4892(in Chinese).

微粉、铁氧体、碳材料、导电高聚物及陶瓷材料<sup>[5]</sup>。但是这些吸波材料仍有一些不足,如金属类材料易被氧化、不耐腐蚀,碳材料的高温性能不佳等,难以满足越来越高的应用需求。因此,研发综合性能更加优异的吸波材料成为了研究热点。

性能优异的吸波材料应兼具“厚度薄、质量轻、吸收频带宽、吸收能力强”的特点。SiC 材料是一种应用广泛的高温吸波材料,具有优良的力学性能、化学稳定性、高温稳定性及较低的密度( $3.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),其在  $800^\circ\text{C}$  以上的耐高温性能显著优于铁磁和碳基吸波材料。近年来研究者还发现 SiC 的吸波性能随着温度的升高而逐步增强,使其成为潜在的耐高温吸波材料。SiC 主要依靠介电损耗来吸收电磁波,但本身复介电常数和损耗角正切不高,而且导电损耗低,几乎不具备磁损耗能力,这些导致 SiC 的电磁波吸收性能低于很多金属基和碳基吸波材料。由此,研究者探索了多种方法包括构建堆垛缺陷,形貌调控、掺杂及复合等方式提高 SiC 材料的吸波性能。

王志江等<sup>[6]</sup>通过升高制备温度来调控 SiC 材料的堆垛层错密度与生长方向,使材料中 C 未占据能态密度增加,提高吸波能力;米越珊等<sup>[7]</sup>通过氮化处理 SiC,改变 SiC 生长的形貌,提高其介电损耗性能。但是经过堆垛缺陷、形貌调控、掺杂改性处理的 SiC 仍然没有改变根本的吸波机制,吸波机制单一、阻抗匹配不佳的不足仍没有得到改善。相比这些方法,材料复合是一种通过将两种或多种理化性质不同的材料复合,以增强材料的吸波性能和实现功能多样化的一种可控的、易于提高性能的方法。通过将两种或多种理化性质不同的材料复合,以增强材料的吸波性能和实现功能多样化是一种可控、易于提高性能的方法。在复合的过程中不仅会引入一些新的物理性质和功能,并且其表面与界面效应也将对材料的性质和功能产生影响。而研究者根据吸波材料的使用环境的严苛要求,如耐高温、耐腐蚀及吸波性能强的需求,可对材料进行有选择性的复合<sup>[8]</sup>。由于材料复合可以将多种材料的优点相结合,实现吸波性能和其他性能的协同增强,故进行材料复合是目前最有效构建综合性能优异的 SiC 基吸波材料的方法。

基于此,本文对 SiC 复合吸波材料的研究现状进行了综述,分为两个部分:(1) SiC 的结构、性能、吸波机制、吸波性能的影响因素、吸波性

能的改善方法;(2) SiC 纳米颗粒、SiC 纳米线、三维 SiC 材料与金属材料、碳材料、陶瓷材料、高分子材料等不同种类材料复合而成的吸波材料研究现状。

1 SiC 吸波材料

1.1 SiC 的结构与性能

SiC 的基本组成单元是 Si、C 原子组成的四面体结构,其四面体结构为每个 C(或 Si)原子被 4 个 Si(或 C)原子所包围形成<sup>[9]</sup>。原子间的 Si—C 共价键长度为  $0.189\text{ nm}$ ,键能达到  $347\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,故 SiC 具有优异的稳定性和力学性能,机械莫氏硬度达 9 级,弹性模量达到  $460\text{--}480\text{ GPa}$ 。虽然 Si—C 键较稳定,但 SiC 的堆叠层错能只有  $2.5\text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,因此很容易形成层错,这决定了 SiC 晶体有多种结构。SiC 目前已知的多形体结构已经达到 250 余种,C 和 Si 原子层在一个周期内堆叠的顺序差异造成了晶体结构的不同。立方闪锌矿结构的 SiC 沿着 C 轴每 3 个 Si—C 双原子层重复一次即 ABC,故称 3C-SiC,也称  $\beta$ -SiC,是唯一的纯立方晶型结构。其具有最窄的带隙( $2.37\text{ eV}$ ),导电性最好,介电损耗最高,应用广泛<sup>[10]</sup>。 $\alpha$ -SiC 为六方(H)和斜方(R)晶型结构,常见的堆叠顺序有 ABCB 的 4H-SiC 和 ABCACB 的 6H-SiC 等,如图 1 所示。不同构型的 SiC 物理性质有一定的差异。 $\beta$ -SiC 是低温稳定相, $\alpha$ -SiC 为高温稳定相,二者相互转化的温度约为  $1\,600^\circ\text{C}$ 。

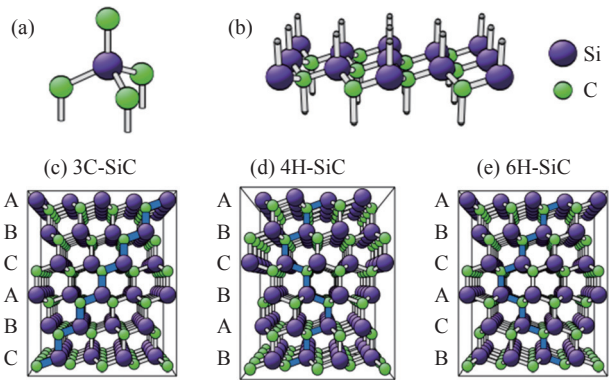


图 1 ((a),(b)) SiC 原子结构; ((c)~(e)) 常见的 SiC 结构示意图<sup>[9]</sup>  
Fig. 1 ((a),(b)) Atomic structure of SiC; ((c)-(e)) Schematic diagram of common SiC structure<sup>[9]</sup>

SiC 的化学性质稳定,有抗氧化和抗腐蚀的能力<sup>[11]</sup>。当材料处于高温氧化气氛时, SiC 表面易于形成  $\text{SiO}_2$  薄层防止其进一步氧化。此外 SiC 具有热稳定性好、热导率高、饱和电子迁移率高等

特点。SiC具有良好的吸波性能，特别是在高温环境下相比其他吸波材料有着更好的吸波效果，可以实现轻质薄层宽频带吸收。

1.2 SiC的吸波机制

吸波材料吸收电磁波的基本条件是满足阻抗匹配和强吸收。当电磁波入射到吸波材料表面时，通过电磁场与材料的分子和电子结构的相互作用会发生能量损耗，并将电磁能转化为热能或其他形式的能量消耗掉，如图2所示。材料对电磁波的损耗能力与磁损耗、导电性和介电损耗有关。可以根据传输线理论计算出测试材料在不同样品厚度下的反射损耗值，即电磁波吸收性能评价可以用反射损耗(RL)来表示，计算公式如下：

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

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z - 1}{Z + 1} \right|$$
 (2)

其中：Z代表的是电磁波吸收材料相对于自由空间的输入阻抗；Z<sub>0</sub>代表自由空间的阻抗，Z<sub>in</sub>代表的是电磁波吸收材料的输入阻抗，f代表电磁波频率(Hz)；d代表吸波材料样品的厚度(mm)；c代表真空中的光速(3×10<sup>8</sup> m·s<sup>-1</sup>)。对于一种吸波材料来说其RL值越小，则表明其对电磁波的吸收越好；当其RL值小于-10 dB时，表明该材料可以达到90%的吸波效果，相对应的频率范围称为有效吸收带宽(EAB)；当RL值小于-20 dB时，表明该材料可以达到99%的吸波效果，可以达到商用范围的阈值。

吸波材料对电磁波有较强的衰减能力只能表明该材料具有很大应用潜力，仍需满足良好的阻

抗匹配才能说明其能最大程度的吸收入射电磁波。除了直接计算反射率，常用|Z-1|与测试频率的关系图来表征吸波材料的匹配阻抗程度。|Z-1|数值越趋近于0，其阻抗匹配效果越好。总而言之，影响吸波材料吸波效果的两大因素，即：(1)匹配特性，吸波材料能使入射电磁波尽可能不反射而最大限度地进入材料内部；(2)衰减特性满足强吸收，即电磁波进入材料内部后，能够迅速消耗几乎全部入射电磁波，不造成透射及二次反射。

SiC是一种典型的无磁损耗介质材料。因此，SiC吸波材料主要依赖于介电损耗，介电损耗包括介电弛豫损耗、谐振损耗和其他形式的损耗。SiC吸收体的微波衰减主要归因于介电弛豫损耗<sup>[12]</sup>。介电弛豫损耗是由介电传导和极化的滞后效应导致的。当外加电场频率较高时，极化速度很难跟上电场的变化，导致介电弛豫损耗。极化包括热离子极化、偶极子极化和电位移极化。偶极子极化在大多数介质极化过程中起主导作用。可以通过增加缺陷含量和表面积来增强。由原子、离子或电子的共振效应引起的共振损失也有利于吸收性能。此外，SiC的导电性不佳，因此导电损耗在SiC材料吸波方面的贡献较低。

1.3 SiC吸波性能的影响因素

影响SiC吸波性能的主要因素主要有内部缺陷、SiC材料界面和表面、SiC材料厚度和温度等。

SiC的内部缺陷往往作为极化中心在交变电磁场作用下引起极化弛豫，并随着缺陷密度的增加SiC材料的介电常数会有提高。如SiC中的层错密度主要通过增强的偶极损耗机制影响其介电常数；掺杂是提高SiC颗粒介电常数的一种有效途径，Kuang等<sup>[13]</sup>制备掺杂Fe的SiC纳米线，发现其具有内层错，介电常数高于仅存在层错的未掺杂SiC纳米线。故将SiC缺陷密度提高到适当的值，可以获得较高的介电损耗。

SiC材料的表面与界面密切影响其界面极化效应，增大材料的比表面积，将使在界面上集聚更多的电荷以形成偶极子，从而促进偶极子极化。Jin等<sup>[14]</sup>通过测定不同孔径的SiC陶瓷复合材料的吸波性能，发现骨架孔径减小时，SiC纳米线由直变弯，这大大增加了材料的比表面积，使其更多通过多次散射和反射增加对电磁波的吸收和衰减<sup>[15]</sup>。

适当厚度的吸收体有助于减少外部微波反射，

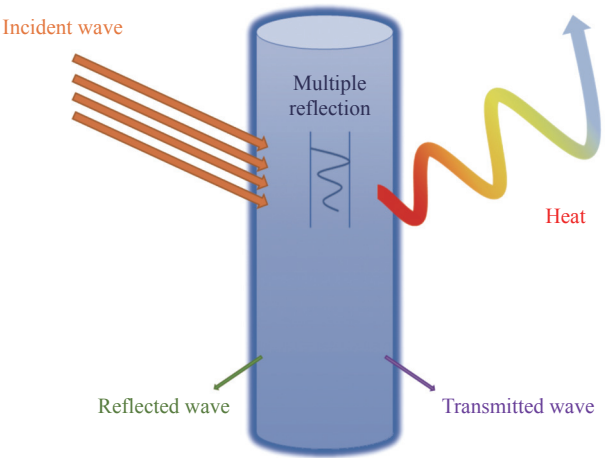


图2 吸波材料的基本机制  
Fig. 2 Basic mechanism of absorbing materials



理论上当吸收体厚度为 1/4 波长的奇数倍时会产生干涉进而减小反射。吸收体厚度的不同对 SiC 材料的吸波性能有较大的影响。Hou 等<sup>[16]</sup>对不同厚度的 SiC-Fe<sub>3</sub>Si-碳纳米管 (CNTs) 陶瓷的吸波性能进行测试,当复合材料的成分相同时,吸波材料的最小反射损耗值  $RL_{min}$  值随着厚度的提升呈先上升后下降的趋势,且在 2 mm 厚度时获得了最低的  $RL_{min}$  和 EAB。

复介电常数的实部和虚部是温度的函数,随热处理时间延长和热处理温度升高, SiC 纤维 (SiC<sub>f</sub>) 电阻率不断降低,对电磁波吸收率逐渐提高。SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料<sup>[17]</sup>在 25℃ 时的  $RL_{min}$  为 -10.2 dB,当温度提高到 600℃ 时,  $RL_{min}$  降低到了 -28.3 dB。这说明 SiC 吸波材料有在高温环境进行服役的潜力。

1.4 SiC 吸波性能的改善方法

为了克服 SiC 材料磁损耗能力差、阻抗匹配不佳等不足,提高吸波性能,需要对碳化硅进行处理,常用的方法有掺杂改性和形成含 SiC 复合材料两类。

对 SiC 掺杂改性可以调节其载流子浓度,使其适用于微波频段的吸收。按掺杂类型可分为两类: N 型掺杂主要是氮掺杂, P 型掺杂主要是铝、硼等元素掺杂。如在 SiC 纳米颗粒中掺杂 N<sup>[18]</sup>,可通过调节掺杂氮的 SiC 纳米颗粒的含量,改变材料的复介电常数,这归因于 N 掺杂和空位缺陷引起的偶极子极化弛豫;经 N 改性后 SiC 的结构更加多样化,可提高吸收电磁波的能力。又如在 SiC 材料中引入 B<sup>[19]</sup>,硼的引入促进了 β-SiC 的结晶,形成了受主掺杂的碳化硅固溶体,增加了稳定性。随着硼的加入,材料的复介电常数实部虚部表现为先下降后升高的规律。

SiC 与其他材料的复合,可以降低电磁波在材料表面的强反射,使电磁波进入材料内部并吸收,达到阻抗匹配。与单一吸波剂相比,将不同物理性能的吸波剂复合,不仅能灵活地调整电磁参数,优化阻抗匹配,还能充分发挥各自的优点,丰富损耗机制,从而提高对电磁波的吸收强度,拓宽有效吸收带宽。将 SiC 与其他材料复合对吸波性能进行改善,根据损耗类型,大概分为两类:将 SiC 与高介电材料复合,以提高介电损耗<sup>[20]</sup>;将 SiC 与磁性材料复合,以增加磁损耗<sup>[21]</sup>。

2 SiC 复合材料作为吸波材料的研究进展

如前所述, SiC 与其他材料复合作为复合吸波

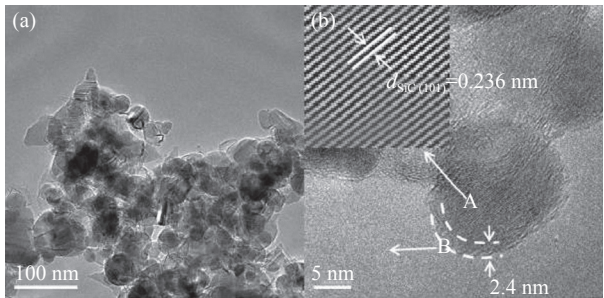
材料,其吸波性能会有较大的提升。下文将分别综述不同维度的 SiC 与导电材料、介电材料、磁性材料复合而成的吸波材料研究进展。

2.1 SiC 纳米颗粒复合吸波材料

粉体吸波剂具备吸收频带宽、更抗氧化、更耐高温等优点。当 SiC 粉体达到纳米尺寸时, SiC 吸波剂的电磁特性得到了有效改善。SiC 粉体的制备方法较成熟,但是单纯的 SiC 纳米颗粒吸波性能并不理想。经过溶胶-凝胶和碳热还原法法制备的粒径 10~60 nm 的纳米颗粒<sup>[22]</sup>,当材料匹配厚度为 3 mm 时,在 8~13 GHz 范围内  $RL_{min}$  只有 -8.91 dB。目前,提高 SiC 纳米颗粒自身吸波性能的常用方法是改性处理,即进行晶格掺杂。

SiC 纳米颗粒与导电材料复合,可以丰富损耗机制、优化阻抗匹配。使用 SiC 纳米颗粒 (粒径为 0.05~0.5 μm) 填充 CNTs<sup>[23]</sup>,适量 SiC 颗粒的加入可以增加电磁能的损耗,调节阻抗;在 SiC 纳米颗粒填充量为 6wt% 时,其吸波效果达到最佳, EAB 达到 7.04 GHz,  $RL_{min}$  达到 -27.3 dB。通过前驱体裂解法制备碳纳米管/纳米 SiC 复合材料<sup>[24]</sup>,其中纳米 SiC 的晶粒尺寸为 10~40 nm,复合材料介电常数的虚部和介电损耗较高,在 16.4 GHz 处得到最大的介电损耗角正切值,吸波性能较理想。利用直流电弧法制备 SiC@C 核壳型纳米粒子<sup>[25]</sup>,当其匹配厚度为 8 mm,频率为 9.49 GHz 时,  $RL_{min}$  达到 -27 dB。SiC 中的 C 空位 (VC) 和 Si 空位 (VSi) 产生的偶极子发生弛豫过程和 SiC 缺陷带来的电导率变化是影响介电性能的关键因素。这种核壳结构作为近零维材料,在吸波领域也有着广阔的应用前景。如图 3 所示,通过在纳米颗粒表面进行包覆,可以提高热力学稳定性,并可以增加极化、提高阻抗匹配等。

SiC 纳米颗粒与陶瓷材料复合,进一步提高了材料的介电损耗能力。Yuan 等<sup>[26]</sup>制备了具有有序内填充结构的 SiC/SiO<sub>2</sub> 复合陶瓷,其中 SiC 颗粒作为吸收剂以有序的棒状阵列的形式并入有序介孔 SiO<sub>2</sub> 的纳米通道中,显著地增加了复合材料的比表面积,使其在 X 波段 (8.2~12.4 GHz) 具有良好的电磁吸收性能。聚合物衍生 SiBCN 陶瓷 (PDCs-SiBCN)<sup>[27]</sup>在氮气气氛中退火,非晶态 SiBCN 形成纳米 SiC 晶粒。如图 4 所示,随着退火温度的升高, SiC 的含量和晶化程度逐渐增强, PDCs-SiBCN 的介电常数、介电损耗和电导率随着



$d_{\text{SiC}(101)}$ —Lattice stripe spacings correspond to the SiC (101) planes

图 3 纳米 SiC@C 复合粒子的 TEM 图像 (a) 和高倍率 TEM 图像 (b)<sup>[25]</sup>

Fig. 3 TEM images (a) and high magnification TEM images (b) of SiC@C composite nanoparticles<sup>[25]</sup>

温度的升高而逐渐增大。SiC 作为偶极子的含量增加及 SiC 纳米颗粒与非晶态 SiBCN 相界面的增加导致了更高的极化能力和更高的介电损耗。Zhang 等<sup>[28]</sup> 采用真空烧结法制备了一种吸波材料  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -SiC 复合陶瓷, 研究了 SiC 粉体含量对复合陶瓷性能的影响。结果表明随着 SiC 粉含量的增加, 复合材料的相对密度和强度降低, 平均相对介电常数 (从 7.878 至 13.88) 与平均介电损耗 (从  $5.6 \times 10^{-3}$  至 0.7869) 均有显著增加, 其优异的吸波性能归因于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  与 SiC 界面和 SiC 纳米晶晶界的界面极化。以液态聚硅氧烷和纳米 SiC 为原料, 采用热解法制备平均粒径为 30 nm 的纳米 SiC 改性 SiC/SiOC 陶瓷<sup>[29]</sup>。退火温度为 1 400℃ 时, 复合材料中各相之间的界面会引起界面散射增强吸波性能,  $\text{RL}_{\min}$  在 8.6 GHz 处达到 -61 dB; 在 X 波段的 EAB 达到 3.5 GHz。图 4(c) 为匹配厚度为 3 mm 的 SiOC、n-SiC/SiOC 在不同温度下的吸收系数。

SiC 纳米颗粒与磁性材料复合, 使材料具有磁损耗特性, 丰富了吸收机制, 提高了吸波性能。Hou 等<sup>[16]</sup> 以含铁聚硅乙炔 (PSA) 为原料, 通过一种简单的聚合物衍生陶瓷 (PDC) 合成了新型高温抗氧化 SiC/ $\text{Fe}_3\text{Si}$ /CNTs 复合材料。其微观结构是由球形  $\text{Fe}_3\text{Si}$  纳米粒子和碳纳米管的 SiC 陶瓷颗粒组成的, 此结构增大材料的比表面积增强界面极化, 同时提高材料的介电性能和磁性能, 优化阻抗匹配。通过调整复合材料的匹配厚度可以获得可调谐的吸波性能, 样品 EAB 达 13.5 GHz; 匹配厚度为 2 mm 时, 10.5 GHz 处  $\text{RL}_{\min}$  达到 -41.2 dB; 匹配厚度仅为 1.5 mm 时, EAB 接近 4 GHz。此外, 在空气中经过 800℃ 的氧化处理后, 该吸收体保持了主体结构, 并表现出良好的高温抗氧化性能, 并维持一定的吸波效果。通过二次水热法合成的

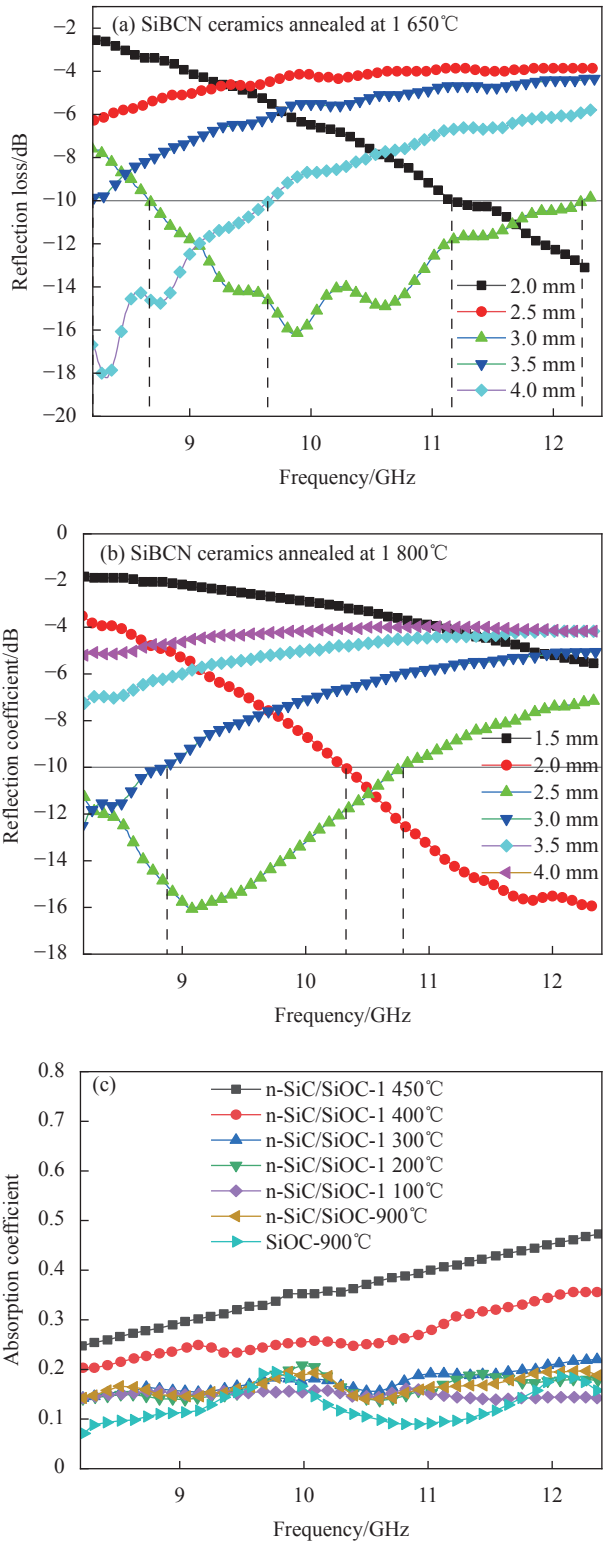


图 4 退火温度为 1 650℃ (a) 和 1 800℃ (b) 时, 匹配厚度为 2 或 1.5~4 mm 的范围内, 退火态硅硼碳氮 (SiBCN) 的吸波性能和反射系数 (RC)<sup>[27]</sup>; (c) 匹配厚度为 3 mm 的 SiOC 和 n-SiC/SiOC 的吸收系数<sup>[29]</sup>

Fig. 4 Reflection coefficient (RC) of the as-annealed siliconboron carbonitride (SiBCN) at 1 650℃ (a) and 1 800℃ (b) as a function of frequency at a matching thickness range of 2 or 1.5~4 mm<sup>[27]</sup>; (c) Absorption coefficients of SiOC and n-SiC/SiOC with a matching thickness of 3 mm<sup>[29]</sup>

SiC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/氧化还原石墨烯 (rGO) 复合材料<sup>[30]</sup>, 其中 SiC 纳米颗粒 (粒径达 600 nm) 的添加显著提高了复合材料的吸波性能, 其电磁损耗机制主要为界面极化、涡流损耗和自然共振。如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 当复合材料的匹配厚度为 2 mm 时, 呈现的 RL<sub>min</sub> 为 -30.3 dB; 当其匹配厚度为 1.5 mm 时, EAB 超过 6.65 GHz, 具有良好的吸波性能; 同时可以观察到, 随着厚度的提升, 材料在低频的吸波性能有所提升。

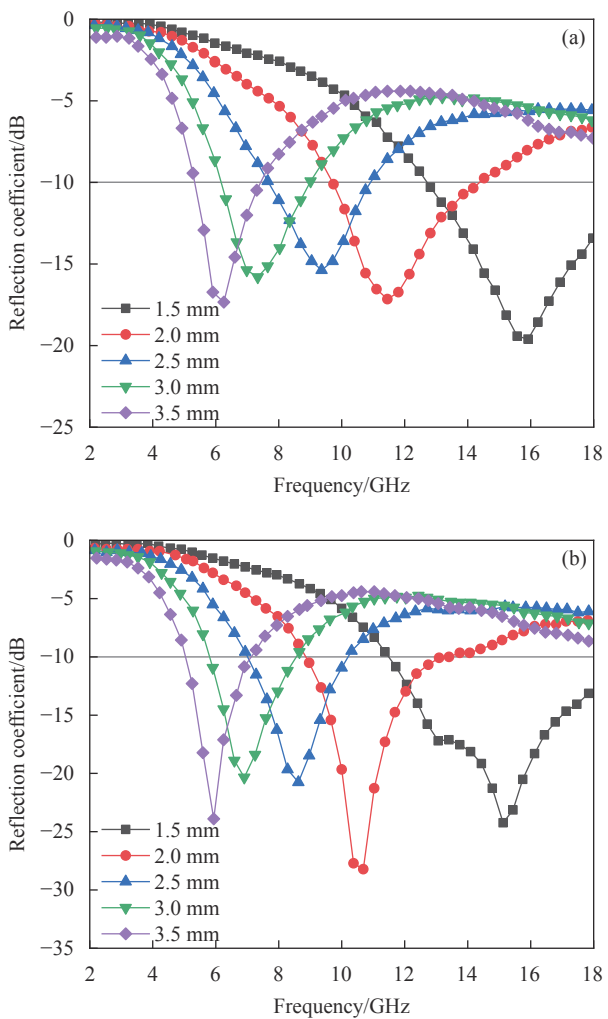


图5 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/氧化还原石墨烯 (rGO) 复合材料 (a) 与 SiC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO 复合材料 (b) 吸波性能的对比<sup>[30]</sup>

Fig. 5 Comparison of absorbing properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/reduced graphene oxide (rGO) (a) and SiC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO (b)<sup>[30]</sup>

2.2 SiC 纳米线复合吸波材料

SiC 纳米线复合吸波材料是目前研究的热点领域。SiC 纳米线具有一维结构、较大的比表面积和较高的极化损耗, 吸波性能更佳。

纯 SiC 纳米线的吸波性能, 目前一般通过控

制合成方法、条件等方式来控制其形貌进而提高其吸波性能。Kuang 等<sup>[31]</sup> 研究了 SiC 纳米线长度对其吸波性能的影响, 发现较长的 SiC 纳米线由于更易交联从而提高了导电性, 也形成更完整的传导损耗网络, 增强其吸波性能。Guo 等<sup>[32]</sup> 采用原位合成法, 制备了具有交联结构的各向同性 SiC 纳米线预制体, 所制备的高纯度 SiC 纳米线能够自发地、均匀地分布在三维空间。SiC 纳米线预制体在 X 波段实现了全吸收, 比微波吸收性能超过 45.18 dB·cm<sup>-2</sup>·g<sup>-1</sup>, 此外还有其具有低密度 (0.1 g·cm<sup>-3</sup>) 和优异的热性能。如图 6 所示, 通过高聚物热解化学气相沉积法合成的竹节状 β-SiC 纳米线<sup>[33]</sup>, 利用不同的温度区域造成的反应气体浓度差进而生成节段的 SiC 形貌, 更有利于微波的损耗; 其在 18 GHz 处获得了 -35.47 dB 的 RL<sub>min</sub>, 匹配厚度为 2.0 mm 时 EAB 为 3.22 GHz。

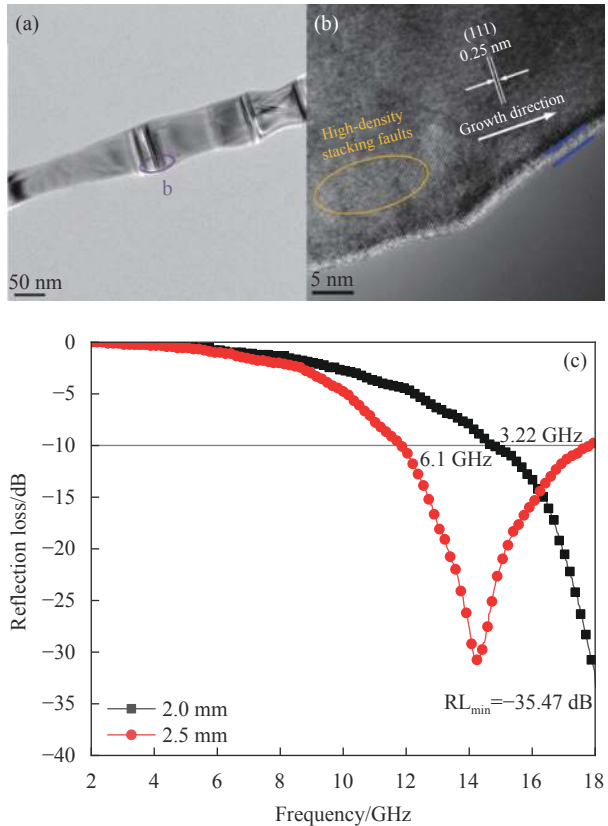


图6 (a) 单个竹节状 SiC 纳米线 TEM 图像; (b) 竹节处对应的 HRTEM 图像; (c) 匹配厚度为 2.0 mm 和 2.5 mm 时材料的反射损耗 (RL) 值<sup>[33]</sup>

Fig. 6 (a) TEM images of a single nanowire; (b) HRTEM image of bamboo joint region; (c) Reflection loss (RL) values of nanowires-paraffin composite with the matching thickness of 2.0 mm and 2.5 mm<sup>[33]</sup>

直接向 SiC 中加入磁性金属元素, 即可改善其吸波性能<sup>[34]</sup>。如在 SiC 晶须表面通过化学镀钴的方式制备 SiC<sub>w</sub>-Co 复合材料<sup>[35]</sup>, 得到 -20.12 dB



的  $RL_{min}$  和 3 GHz 的 EAB; Co 元素存在于材料中, 呈现无序分散而较均匀分散, 对复合吸波材料的磁损耗能力的提高具有直接作用。

SiC 纳米线与导电材料复合是增强 SiC 纳米线吸波性能的常用方法。作为最常见的导电材料, 碳材料<sup>[36]</sup>与 SiC 纳米线复合可以显著提高其吸波性能。在相对较低温度 (1 200℃) 下, 采用熔融盐辅助化学气相沉积法, 在碳纤维表面直接生长大规模的 SiC 纳米线阵列<sup>[37]</sup>, 提高了介电性能, 在 7.7 GHz 处的  $RL_{min}$  为 -21.5 dB, 图 7(a)~7(e) 为 SiC 纳米线的显微结构。Qian 等<sup>[38]</sup>采用一步化学气相渗透工艺制备的 SiC 纳米线与碳纤维复合材料,  $RL_{min}$  达到了 -36.5 dB。Wang 等<sup>[39]</sup>通过 SiC 纳米线包覆石墨制备可调谐电磁吸收材料, 采用静电纺丝和高温退火的方法制备石墨/SiC 杂化纳米线。通过控制退火温度在 1 300℃ 下退火的杂化纳米线在 16.8 GHz 处的  $RL_{min}$  为 -22 dB, 最小匹配厚度为 1.7 mm, EAB 为 8~18 GHz。其优异的电磁性能归因于石墨和 SiC 的缺陷、石墨和 SiC 之间的界面及纳米线表面的悬垂键所产生的介电损耗。Han 等<sup>[40]</sup>采用冷冻干燥和碳热还原法制备了由 rGO 和原位生长 SiC 纳米线组成的三维柔性泡沫。其复合材料在整个 X 波段表现出较好的吸波性能, 同时材料具有较好的热稳定性。SiC 纳米线中丰富的层错、孪晶界面和桥接结, 与石墨烯网络的复合增强了吸波性能。通过高聚物热解法制备另一种石墨烯/SiC 纳米线复合材料<sup>[41]</sup>, 其在聚硅氧烷基 SiO<sub>2</sub> 陶瓷基体中形成了二维石墨烯和一维 SiC 纳米线的层次网络结构, 在 10.55 GHz 处, 匹配厚度为 2.35 mm 时  $RL_{min}$  达到 -69.3 dB, EAB 达到 3.9 GHz。垂直取向的石墨烯包覆 SiC 纳米线<sup>[42]</sup>同样采用化学气相沉积法制备, 其在匹配厚度为 2.5 mm 时具有 -16.2 dB 的  $RL_{min}$ , 和 2.64 GHz(9.5~12.14 GHz) 的 EAB; 其吸收性能的提高主要源于复合导电网络和垂直生长的石墨烯在 SiC 纳米晶上形成的众多界面, 有利于入射微波的多次散射和吸收, 其显微图像与吸波性能如图 7(f)~7(j) 所示。Xiao 等<sup>[43]</sup>通过微波快速加热的方法制备了由 SiC、碳颗粒和非晶态 SiO<sub>2</sub> 组成的近一维 SiC 空心微管, 其独特的中空结构促进了电磁波的反射, 碳颗粒有助于提高材料的导电损耗, 匹配厚度为 2 mm 的复合材料在 14.9 GHz 处达到了 -25.7 dB 的  $RL_{min}$ 。此外, 区别于在测试时充当基体的透波

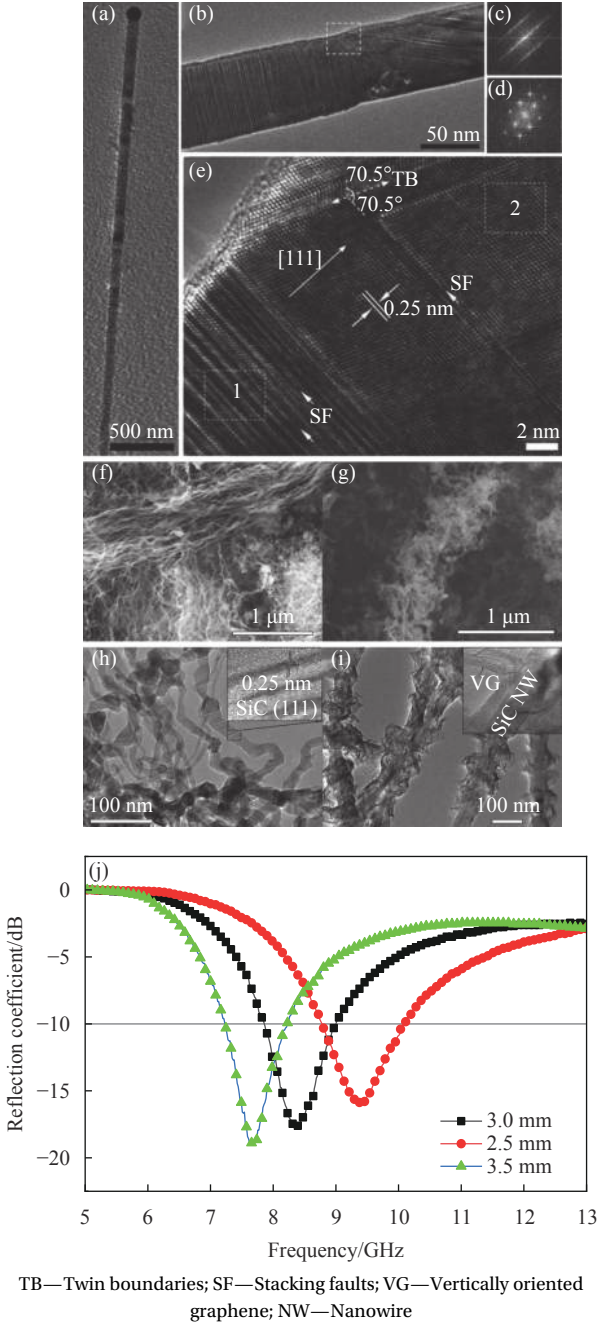


图 7 SiC 纳米线低放大 TEM 图像 (a)、高放大 TEM 图像 (b); (c) 为图 (b) 中划出区域的 HRTEM 图像; ((d), (e)) 对应 (c) 中含缺陷 1 和无缺陷 2 区的 FFT 衍射图<sup>[37]</sup>; SiC 纳米线 (NWs) (f) 和 SiC@石墨烯 (g) 的 SEM 图像、SiC NWs (h) 和 SiC@石墨烯 (i) 的 TEM 图像 (插图为相应的 HRTEM 图像); (j) 不同厚度 SiC@石墨烯的  $RL$  值<sup>[42]</sup>

Fig. 7 SiC nanowires low-magnified TEM image (a), high-magnified TEM image (b) showing high-density stacking faults and micro-twins within nanowires; (c) HRTEM image recorded from the white square area in Fig.(b); ((d), (e)) Corresponding the FFT diffraction patterns obtained from defect-containing (1) and defect-free (2) regions in (c), respectively<sup>[37]</sup>; SEM images of nanowires (NWs) (f) and SiC@graphene (g); TEM images of SiC NWs (h) and SiC@graphene (i) (insets are corresponding HRTEM images); (j)  $RL$  values of SiC@graphene with various thicknesses<sup>[42]</sup>



材料,如环氧树脂、石蜡等聚合物,导电聚合物多用来包覆 SiC 以提高吸波性能,且其具有密度低、电阻率范围宽、模量高等优点,有利于吸波材料综合性能的提升。通过化学聚合方法将导电聚合物聚吡咯 (PPy) 包覆在核鞘结构的 SiC 纳米线 (在碳纤维表面生长)<sup>[44]</sup>,在 14.2 GHz 处  $RL_{min}$  达到 -50.19 dB, EAB 为 6.2 GHz。

SiC 纳米线可以与多种介电材料复合以提高吸波性能。以竹炭为碳源,在惰性气氛条件下碳热还原  $SiO_2$ <sup>[45]</sup>,制备念珠状 SiC/ $SiO_2$  纳米线,这种形貌可以增加材料中的缺陷,增加极化作用;同时引入更多界面,增加比表面积,使电磁波在界面上被更多地消耗,其形貌如图 8(a) 所示。当匹配厚度为 1.80 mm 时,复合材料的 EAB 为 2.32 GHz,  $RL_{min}$  达到 -46.58 dB。Duan 等<sup>[46]</sup>采用聚氧硅烷热解法制备原位生长的 SiC 纳米线,用以增强 SiOC 陶瓷的吸波性能,实验中二茂铁的加入可以使 SiC 纳米晶的含量增加。SiOC 陶瓷颗粒被 SiC 纳米线连接,复合材料导电性因此提高。随着 SiC 纳米线含量的增加, SiOC 陶瓷  $RL_{min}$  从 -1.22 dB 降低到 -20.01 dB。Dong 等<sup>[47]</sup>采用先驱体渗透热解法 (PIP) 制备了一种新型 SiC 纳米线增强  $SiO_2/3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  多孔陶瓷。弯曲的 SiC 纳米线形成了具有适当纳米异质结构的三维网络,从而消耗了微波能量。而通过 PIP 循环次数可以调节 SiC 纳米线的含量,从而改善并控制复合材料的吸波性能。当 SiC 纳米线含量为 23.9%(PIP5) 时,复合陶瓷具有最好的吸波性能,其  $RL_{min}$  在 10.0 GHz 处为 -30 dB,匹配厚度为 5 mm 时有效吸收带宽可以覆盖整个 X 波段。Zhong 等<sup>[48]</sup>通过在化学气相沉积过程中引入微量水蒸气高效地制备 SiC/ $SiO_2$  核壳纳米线。SiC/ $SiO_2$  核壳纳米线在 2.0~18.0 GHz 表现出优异的微波吸收性能,在匹配厚度为 3.0 mm 的情况下,在 13.84 GHz 频率下的  $RL_{min}$  达到 -32.72 dB。核壳结构可以增强 SiC 纳米线的界面极化,提高吸波性能,其结构和与吸波机制如图 8(b) 所示。Peng 等<sup>[49]</sup>采用静电纺丝和  $N_2$  气氛高温退火的方法制备了由 SiC、游离碳和 SiN 组成的纳米线。纳米线具有良好的柔韧性,其  $RL_{min}$  为 -53.1 dB, EAB 覆盖整个 Ku 波段 (12.4~18.0 GHz) 时最小匹配厚度为 1.95 mm;纳米线优异的电磁性能归因于 3 种组分的缺陷及异质结界面之间的协同效应而产生的介电极化;且纳米线具有良好的柔韧性,碳骨架的插入使纳米线进一

步增韧,提高了复合材料在恶劣环境下的工作能力。向  $Si_3N_4$  陶瓷中添加 SiC,随着 SiC 纳米线含量的增加,复合材料的吸波性能有的明显的提高:采用 3D 打印和 PIP 技术制备的 SiC 纳米线增强的多孔  $Si_3N_4$  陶瓷<sup>[50]</sup>,具有高导电性的单晶 SiC 纳米线的形成使其  $RL_{min}$  降低至 -57 dB。采用凝胶注模法制备 SiC 纳米纤维改性  $Si_3N_4$  陶瓷<sup>[51]</sup>,在 X 波段, 25~800℃ 范围内有效提高了陶瓷的介电性能和微波吸收性能。自连接 SiC 纳米纤维导电路径上电荷迁移率的增加及 SiC 纤维、 $Si_3N_4$  晶粒和微孔组成的多尺度网状结构是介电性能提高的主要原因。电磁吸收性能优异的二维少层  $Ti_3C_2T_x$  (MXene) 材料与 SiC 复合,可以进一步提高吸波性能:Li 等<sup>[52]</sup>采用自组装和双向冷冻的方法合成了低密度 f- $Ti_3C_2T_x$ /SiC 纳米线杂化泡沫,片层 MXene 包裹 SiC 纳米线形成的异质界面和孔隙不仅强化了力学性能,也增强了极化损耗,优化了阻抗匹配,在约  $0.029\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的低密度下,其  $RL_{min}$  达到 -55.7 dB。

2.3 三维 SiC 复合吸波材料

近来,三维 SiC 复合吸波材料的研究多是多

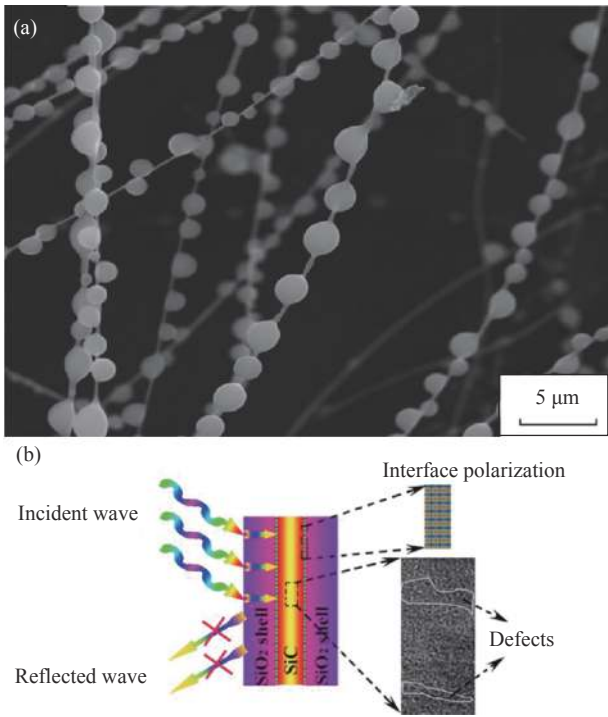


图 8 (a) SiC 纳米线上珠状  $SiO_2$  的 SEM 图像<sup>[45]</sup>; (b) SiC/ $SiO_2$  核壳纳米线结构和吸波机制图<sup>[48]</sup>

Fig. 8 (a) SEM image of beaded  $SiO_2$  on SiC nanowires<sup>[45]</sup>; (b) Structure and wave absorption schematic diagram of SiC/ $SiO_2$  core-shell nanowires<sup>[48]</sup>

孔网络材料。多孔网络结构可以通过不同的实验方法来实现，诸如 3D 打印、静电纺丝、冷冻干燥等不同的方法。SiC 多孔陶瓷<sup>[53]</sup>比实心材料的吸波性能几乎提高了 2 倍以上，这种吸波性能的改善主要来自网眼结构对电磁波产生的反射、散射及干涉作用引起的衰减。

多孔 SiC 复合陶瓷多是 SiC 与碳材料和陶瓷材料复合形成。由于碳材料形貌多种多样，以其为基底或模板制备的 SiC 材料同样可以具有多种形貌，再通过反应气氛调节可以引入氮元素等，形成其他陶瓷，这不仅提高了材料的导电损耗，也提高了介电损耗。如图 9(a)~9(b) 所示，以 Si 粉、竹炭 (BC) 为原料，采用包埋法制备具有类蜂窝结构的 BC/SiC 复合材料<sup>[54]</sup>，复合材料呈蜂巢状多孔结构，孔内壁分布着直径不同、相互熔结连接的 SiC 三维聚集体结构层。BC/SiC 复合材料形成的两相界面，提高了 BC/SiC 复合材料的吸波性能：介电常数实部最大值为 9.14，虚部最大值为 2.06；在匹配厚度为 2.5 mm 时，在 10.7 GHz 处  $RL_{min}$  为 -10.16 dB。用  $Si_3N_4$  和 SiC 改性碳泡沫<sup>[55]</sup>，提高其电磁波吸收性能，通过对所制备的杂化泡沫进行热处理，可以将碳膜的结晶度从非晶态碳调整为石墨状碳纳米片。与原始碳泡沫相比，原位生成  $Si_3N_4$  和 SiC 的多尺度混合碳泡沫可以获得更强的微波吸收性能，在 4.7 GHz 和 5.0 mm 处的  $RL_{min}$  为 -43.2 dB，厚度为 2.0 mm 时，EAB 可达 4 GHz (11.8~15.8 GHz)。图 9(c) 为 3 种样品 (经 1 300℃、1 400℃、1 500℃ 热处理的 3 种样品分别记为 S-1300、S-1400、S-1500) 电磁波吸收特性的三维显示。同时其热性能较好，扩大了使用的范围。

Hou 等<sup>[56]</sup>采用化学气相渗透 SiC 和催化剂辅助化学气相沉积碳纳米管的方法，在 rGO 泡沫的三维层状结构上制备了一种新型复合陶瓷 rGO/SiC/CNTs，产生了稳定的宽带吸收特性。rGO 层与 SiC 纳米颗粒、SiC 和 CNTs 网络之间的双异质纳米界面导致了偶极极化和界面极化的显著增加。由于独特的三维多尺度层次多孔结构，该材料具有非常低的密度 (约  $0.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。Wang 等<sup>[57]</sup>以葡萄糖、Si 粉、碳纤维 ( $C_f$ ) 为原料，采用化学镀结合高温烧结两步法制备具有 SiC 阵列改性涂层的新材料 SiC/ $C_f$  复合材料。碳纤维表面包覆大量均匀、结合紧密、垂直表面向外生长的 SiC 阵列，这可以改善材料的阻抗匹配，且生成的网状结构有利

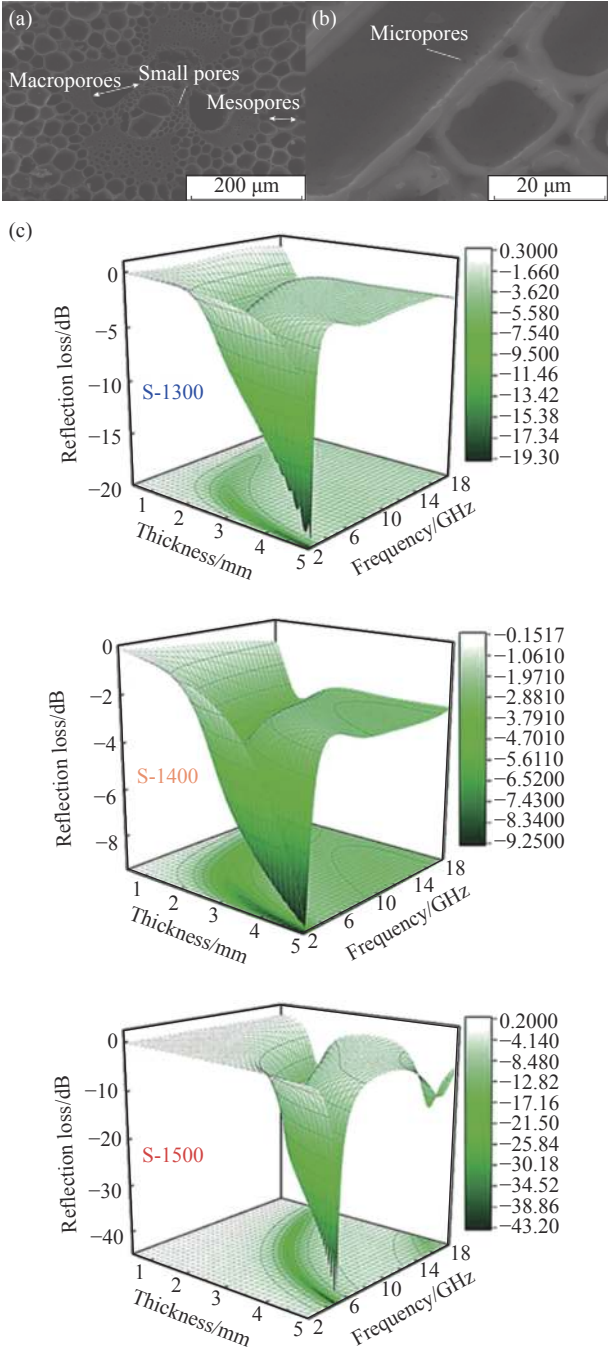


图 9 ((a),(b)) 包埋法制备的 BC/SiC 复合材料的 SEM 图像<sup>[54]</sup>; (c) 经 1 300℃、1 400℃、1 500℃ 热处理的 3 种样品 (S-1300、S-1400、S-1500) 的 RL 三维表征<sup>[55]</sup>

Fig. 9 ((a),(b)) SEM images of BC/SiC composites by investing method; (c) Three-dimensional presentations of RL of 3 kinds of samples were heat treated at 1 300℃, 1 400℃ and 1 500℃ (S-1300, S-1400, S-1500)<sup>[55]</sup>

于多次反射电磁波及形成感应电流，增加导电损耗。当复合材料匹配厚度为 1.8 mm 时，在 8.31 GHz 下的  $RL_{min}$  为 -40.65 dB，EAB 为 1.11 GHz；当匹配厚度为 1.5 mm 时，EAB 可达 2.42 GHz。

SiC 基气凝胶作为吸波材料也得到了十足的发展。一方面可以通过不同的实验方法,制备不同形貌的 SiC 气凝胶<sup>[58]</sup>;另一方面可以将 SiC 与碳材料、陶瓷材料相复合,使其具有更优异的吸波性能<sup>[59]</sup>。

SiC 气凝胶可以通过多种方式合成。采用聚碳硅烷前驱体转化的方式,通过冷冻干燥,可以制备轻质而多孔的 SiC 陶瓷气凝胶<sup>[60]</sup>。高比表面积的气凝胶同时具有合适的介电常数,在匹配厚度为 2.5 mm 时可以达到-26.5 dB 的  $RL_{min}$  和 5.4 GHz 的 EAB。采用氧化石墨烯作为 SiC 的前体,通过碳热还原法制备 SiC,是一种新的制备 SiC 气凝胶的路线<sup>[61]</sup>。同时,氧化石墨烯也是 SiC 气凝胶的模板,产物 SiC 继承了来自氧化石墨烯的多孔结构,使 SiC 气凝胶达到了  $4\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$  的超低密度。SiC 气凝胶可以通过调整厚度调节吸波性能,满足在 5~17 GHz 的使用需求,其中最大 EAB 到了 5.5 GHz。

图 10 展示了两种不同组成的 SiC 气凝胶的微观结构。Cai 等<sup>[62]</sup>将 SiC 和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  通过堆叠的方法制备了交替多层的复合气凝胶。气凝胶具有  $8\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$  的超低密度,室温下可以达到-45 dB 的  $RL_{min}$  和 8.4 GHz 的 EAB。同时,在高达 1 000℃ 时仍有优异的电磁波吸收特性,这归因于复合材料的特殊结构和原材料优异的热稳定性。通过溶胶-凝胶法和碳热还原法,简单制备的石墨烯/SiC 纳米片气凝胶<sup>[63]</sup>,通过大量的连结,提高了孔隙度,优化了阻抗匹配。石墨烯/SiC 纳米片气凝胶在匹配厚度为 3.5 mm 下,达到了-65.08 dB 的  $RL_{min}$ 。

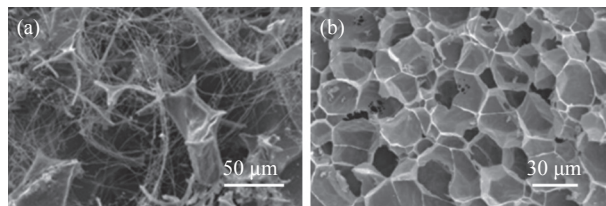


图 10 两种不同组分气凝胶的微观结构: (a) SiC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  复合气凝胶<sup>[64]</sup>; (b) SiC/C 复合气凝胶<sup>[65]</sup>

Fig. 10 Microstructure of two aerogels with different components: (a) SiC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  composite aerogels<sup>[64]</sup>; (b) SiC/C composite aerogel<sup>[65]</sup>

### 3 结论与展望

综述了 SiC 复合吸波材料的最新研究进展,简要介绍了 SiC 材料的结构、吸波机制及影响因素,并对不同维度的 SiC 复合材料的吸波性能进行了总结。不同形貌的 SiC 材料均表现出良好的

吸波性能和潜力,通过与其他材料复合可以进一步 SiC 吸波材料的阻抗匹配、提高电导率。SiC 复合吸波材料增强吸波能力的基本思路,主要有改变 SiC 自身形貌、引入高密度缺陷、增大界面与比表面积、形成异质结构等。这些因素则可以通过引入其他不同类材料、优化合成方法来调控。与 SiC 相复合的材料种类,涵盖了金属材料、碳材料、陶瓷材料、高分子材料等等;在制备方法上,除了传统的 CVD 法、先驱体渗透热解法(PIP)和碳热还原法等,冷冻干燥和 3D 打印等新方法可以更好地设计出多孔等有利于增强吸波性能的结构。

关于 SiC 复合吸波材料的研究方向,仍然集中以下方面:

- (1) 为优化阻抗匹配、提高电磁吸收能力而寻求合适的与 SiC 复合的材料与创新的实验方法;
- (2) 提高 SiC 基复合吸波材料在其他方面如力学、热学性能,发挥 SiC 自身的优势,增强吸波材料在高温等恶劣环境下的适应性与稳定性;
- (3) 拓宽 SiC 基复合吸波材料的吸收频带,特别是增强其在低频区的吸波性能;
- (4) 提高 SiC 基复合吸波材料的实用性与经济性,使其从实验室走向生产和生活,发挥实际的作用。

### 参考文献:

[1] REPACHOLI M H. Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: Health effects and research needs[J]. *Bioelectromagnetics*, 1998, 19(1): 1-19.

[2] 张卫东,冯小云,孟秀兰. 国外隐身材料研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2000(3): 1-4, 10.

ZHANG Weidong, FENG Xiaoyun, MENG Xiulan. Status and development of foreign study on new stealthy materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2000(3): 1-4, 10(in Chinese).

[3] BALAJI ANANTH P, ABHIRAM N, HARI KRISHNA K, et al. Synthesis of radar absorption material for stealth application[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47: 4872-4878.

[4] GUAN H, LIU S, DUAN Y, et al. Investigation of the electromagnetic characteristics of cement based composites filled with EPS[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(1): 49-54.

[5] LIU L, DUAN Y, MA L, et al. Microwave absorption properties of a wave-absorbing coating employing carbonyl-iron powder and carbon black[J]. *Applied Surface Science*,



- 2010, 257(3): 842-846.
- [6] 王志江, 梁彩云. 堆垛层错对SiC纳米线吸波性能的影响机制[C]//中国国际复合材料科技大会. 杭州: 中国复合材料学会, 2017: 481-488.
- WANG Z J, LIANG C Y. Influence mechanism of stacking faults on microwave absorbing properties of SiC nanowires[C]//China International Congress on Composite Materials. Hangzhou: Chinese Society of Composite Materials, 2017: 481-488(in Chinese).
- [7] 米越姗, 陈咏, 郑占申. 氮改性多结构SiC吸波材料的研究[J]. *中国陶瓷*, 2020, 56(9): 24-30.
- MI Y S, CHEN Y, ZHENG Z S. Research on N-modified SiC absorbing materials with multiple structures[J]. *China Ceramics*, 2020, 56(9): 24-30(in Chinese).
- [8] LAN X, WANG Z. Efficient high-temperature electromagnetic wave absorption enabled by structuring binary porous SiC with multiple interfaces[J]. *Carbon*, 2020, 170: 517-526.
- [9] STARKE U, BERNHARDT J, SCHARDT J, et al. SiC surface reconstruction: Relevancy of atomic structure for growth technology[J]. *Surface Review and Letters*, 1999, 6(6): 1129-1141.
- [10] DONG H, FANG Z, YANG T, et al. Single crystalline 3 C-SiC whiskers used for electrochemical detection of nitrite under neutral condition[J]. *Ionics*, 2016, 22(8): 1493-1500.
- [11] SHEN Z, CHEN J, LI B, et al. Recent progress in SiC nanowires as electromagnetic microwaves absorbing materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 815: 152388.
- [12] LAN X, QIU Z, YAN B, et al. Growing dendritic SiC on 1D SiC nanowire: Enhancement of electromagnetic wave absorption performance[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2020, 136: 109124.
- [13] KUANG J, JIANG P, LIU W, et al. Synergistic effect of Fe-doping and stacking faults on the dielectric permittivity and microwave absorption properties of SiC whiskers[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(21): 212903.
- [14] JIN Y, ZHANG B, ZHANG H, et al. Effects of skeleton pore size on the microstructure and electromagnetic absorbing property of the SiC nanowires/SiC composites[J]. *Materials Letters*, 2021, 295: 129867.
- [15] CAI Z, SU L, WANG H, et al. Hydrophobic SiC@C nanowire foam with broad-band and mechanically controlled electromagnetic wave absorption[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(7): 8555-8562.
- [16] HOU Y, XIAO B, SUN Z, et al. High temperature anti-oxidative and tunable wave absorbing SiC/Fe<sub>3</sub>Si/CNTs composite ceramic derived from a novel polysilylacetylene[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(13): 16369-16379.
- [17] HAN T, LUO R, CUI G, et al. Effect of SiC nanowires on the high-temperature microwave absorption properties of SiC<sub>f</sub>/SiC composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(5): 1743-1756.
- [18] ZHANG D D, ZHAO D L, ZHANG J M, et al. Microwave absorbing property and complex permittivity and permeability of graphene-CdS nanocomposite[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 589: 378-383.
- [19] LU X, DONG C, GUO X, et al. Effect of B, Al, Ga doping on the electronic structure and optical property of 4 H-SiC system by the first principles calculation[J]. *Modern Physics Letters B*, 2021, 35(5): 2150091.
- [20] REN F, XUE J, LIU X, et al. In situ construction of CNWs/SiC-NWs hybrid network reinforced SiCN with excellent electromagnetic wave absorption properties in X band[J]. *Carbon*, 2020, 168: 278-289.
- [21] ZHANG M, LI Z, WANG T, et al. Preparation and electromagnetic wave absorption performance of Fe<sub>3</sub>Si/SiC@SiO<sub>2</sub> nanocomposites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 619-627.
- [22] 梁飞. 碳化硅纳米颗粒的吸波性能研究[J]. 渭南师范学院学报, 2013, 28(9): 137-140.
- LIANG Fei. Research on absorbing EMW properties of SiC nanoparticles[J]. *Journal of Weinan Normal University*, 2013, 28(9): 137-140(in Chinese).
- [23] 陈兆晨, 冯振宇, 杨倩一, 等. 碳化硅颗粒填充的碳纳米管/环氧树脂复合材料的吸波性能[J]. *功能材料与器件学报*, 2011, 17(3): 258-261.
- CHEN Zhaochen, FENG Zhenyu, YANG Qianyi, et al. Microwave absorbing properties of carbon nanotubes/epoxy resin composites with SiC particles[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2011, 17(3): 258-261(in Chinese).
- [24] 张磊, 赵东林, 沈曾民. 碳纳米管/纳米碳化硅复合材料的制备及其微波电磁特性[C]//2008全国功能材料科技与产业高层论坛论文集. 天津: 中国仪器仪表学会, 2008: 639-641.
- ZHANG L, ZHAO D L, SHEN Z M. Preparation and microwave electromagnetic properties of carbon nanotube/nano silicon carbide composites[C]//Proceedings of 2008 National High Level Forum on Functional Materials Technology and Industry. Tianjin: China Instrument and Control Society, 2008: 639-641(in Chinese).
- [25] 卓绝, 黄昊, 丁昂. 直流电弧法制备SiC@C核壳型纳米粒子及吸波性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2016, 39(6): 78-82.
- ZHUO J, HUANG H, DING A. Microwave absorbing properties of SiC@C core/shell nanoparticles prepared arc discharge method[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2016, 39(6): 78-82(in Chinese).

- [26] YUAN X, CHENG L, ZHANG L. Electromagnetic wave absorbing properties of SiC/SiO<sub>2</sub> composites with ordered inter-filled structure[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 680: 604-611.
- [27] YE F, ZHANG L, YIN X, et al. Dielectric and EMW absorbing properties of PDCs-SiBCN annealed at different temperatures[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, 33(8): 1469-1477.
- [28] ZHANG P P, WANG H S, LI L, et al. Preparation and properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC radar wave-absorbing nanocomposites[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 697: 462-466.
- [29] DUAN W, YIN X, YE F, et al. Synthesis and EMW absorbing properties of nano SiC modified PDC-SiOC[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(25): 5962-5969.
- [30] 王玉江, 黄威, 黄玉炜, 等. SiC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO复合材料的制备及吸波性能[J]. *材料导报*, 2019, 33(10): 1624-1629.  
WANG Y J, HUANG W, HUANG Y W, et al. Preparation and microwave absorbing properties of SiC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO composite materials[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(10): 1624-1629(in Chinese).
- [31] KUANG J, JIANG P, HOU X, et al. Dielectric permittivity and microwave absorption properties of SiC nanowires with different lengths[J]. *Solid State Sciences*, 2019, 91: 73-76.
- [32] GUO C, CHENG L, YE F. Synthesis of multifunctional foam-like isotropic high volume fraction SiC nanowires preform via a simple method[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(7): 9569-9577.
- [33] LI B, MAO B, HUANG H, et al. Synthesis and microwave absorption properties of bamboo-like β-SiC nanowires[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2020, 17(4): 1869-1881.
- [34] LIANG C, QIN W, WANG Z. Cobalt doping-induced strong electromagnetic wave absorption in SiC nanowires[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 781: 93-100.
- [35] 李敏, 刘宏达, 乔宁, 等. SiCw-Co复合材料的制备及吸波性能的研究[J]. *中国陶瓷*, 2020, 56(3): 39-44.  
LI M, LIU H D, QIAO N, et al. Research on preparation and absorbing properties of SiCw-Co composite materials[J]. *China Ceramics*, 2020, 56(3): 39-44(in Chinese).
- [36] KUANG J, HOU X, XIAO T, et al. Three-dimensional carbon nanotube/SiC nanowire composite network structure for high-efficiency electromagnetic wave absorption[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5): 6263-6267.
- [37] WU R, YANG Z, FU M, et al. In-situ growth of SiC nanowire arrays on carbon fibers and their microwave absorption properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 687: 833-838.
- [38] QIAN J, DU B, CAI M, et al. Preparation of SiC nanowire/carbon fiber composites with enhanced electromagnetic wave absorption performance[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(10): 5100434.
- [39] WANG P, CHENG L, ZHANG Y, et al. Electrospinning of graphite/SiC hybrid nanowires with tunable dielectric and microwave absorption characteristics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 104: 68-80.
- [40] HAN M, YIN X, HOU Z, et al. Flexible and thermostable graphene/SiC nanowire foam composites with tunable electromagnetic wave absorption properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(13): 11803-11810.
- [41] HAN M, YIN X, DUAN W, et al. Hierarchical graphene/SiC nanowire networks in polymer-derived ceramics with enhanced electromagnetic wave absorbing capability[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36(11): 2695-2703.
- [42] ZHAO D, YUAN X, LI B, et al. Silicon carbide nanowire covered by vertically oriented graphene for enhanced electromagnetic wave absorption performance[J]. *Chemical Physics*, 2020, 529: 110574.
- [43] XIAO T, KUANG J, PU H, et al. Hollow SiC microtube with multiple attenuation mechanisms for broadband electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 862(1): 158032.
- [44] YAN L, HONG C, SUN B, et al. In situ growth of core-sheath heterostructural SiC nanowire arrays on carbon fibers and enhanced electromagnetic wave absorption performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(7): 6320-6331.
- [45] 郑海康, 武志红, 张路平, 等. 念珠状碳化硅/二氧化硅纳米线的制备及电磁波吸收性能[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(1): 8-14.  
ZHENG H K, WU Z H, ZHANG L P, et al. Synthesis and electromagnetic wave absorption properties of beaded silicon carbide/silica nanowires[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(1): 8-14(in Chinese).
- [46] DUAN W, YIN X, LI Q, et al. Synthesis and microwave absorption properties of SiC nanowires reinforced SiOC ceramic[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 34(2): 257-266.
- [47] DONG Y, FAN X, WEI H, et al. Enhanced electromagnetic wave absorption properties of a novel SiC nanowires reinforced SiO<sub>2</sub>/3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> porous ceramic[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(14): 22474-22481.
- [48] ZHONG B, SAI T, XIA L, et al. High-efficient production of SiC/SiO<sub>2</sub> core-shell nanowires for effective microwave absorption[J]. *Materials & Design*, 2017, 121: 185-193.
- [49] WANG P, CHENG L, ZHANG L. Lightweight, flexible SiCN ceramic nanowires applied as effective microwave ab-

- sorbers in high frequency[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 338: 248-260.
- [50] DUAN W, YIN X, CAO F, et al. Absorption properties of twinned SiC nanowires reinforced  $\text{Si}_3\text{N}_4$  composites fabricated by 3D-printing[J]. *Materials Letters*, 2015, 159: 257-260.
- [51] ZHOU W, YIN R M, LONG L, et al. Enhanced high-temperature dielectric properties and microwave absorption of SiC nanofibers modified  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics within the gigahertz range[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 12301-12307.
- [52] LI X, YIN X, XU H, et al. Ultralight MXene-coated, interconnected SiCnws three-dimensional lamellar foams for efficient microwave absorption in the X-band[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(40): 34524-34533.
- [53] 朱新文, 江东亮, 谭寿洪. 碳化硅网眼多孔陶瓷的微波吸收特性[J]. *无机材料学报*, 2002(6): 1152-1156.  
ZHU X W, JIANG D L, TAN S H. Microwave absorption characteristics of silicon carbide mesh porous ceramics[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2002(6): 1152-1156(in Chinese).
- [54] 武志红, 李好婕, 张聪, 等. 竹炭/SiC复合材料结构及其吸波性能[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(1): 150-155.  
WU Z H, LI Y J, ZHANG C, et al. Structure and microwave absorption properties of bamboo charcoal/SiC composites[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(1): 150-155(in Chinese).
- [55] DONG S, HU P, ZHANG X, et al. Carbon foams modified with in-situ formation of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and SiC for enhanced electromagnetic microwave absorption property and thermostability[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(6): 7141-7150.
- [56] HOU Z, XUE J, WEI H, et al. Tailorable microwave absorption properties of RGO/SiC/CNT nanocomposites with 3D hierarchical structure[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(11): 18160-18167.
- [57] WANG Y, ZHANG L, ZHANG G, et al. Microwave absorbing properties of novel SiC/ $\text{C}_f$  composites containing SiC array modified coating[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2021, 36(3): 306-312.
- [58] LAN X, HOU Y, DONG X, et al. All-ceramic SiC aerogel for wide temperature range electromagnetic wave attenuation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(13): 15360-15369.
- [59] DAI D, LAN X, WU L, et al. Designed fabrication of lightweight SiC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  aerogels for enhanced electromagnetic wave absorption and thermal insulation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 901: 163651.
- [60] LIU D, ZHOU Z, WANG Y, et al. Preparation and characterization of polymer-derived SiC ceramic aerogels toward excellent electromagnetic wave absorption properties[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19: 507-519.
- [61] WANG Z, ZHAO H, DAI D, et al. Ultralight, tunable monolithic SiC aerogel for electromagnetic absorption with broad absorption band[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(18): 26416-26424.
- [62] CAI Z, SU L, WANG H, et al. Alternating multilayered  $\text{Si}_3\text{N}_4$ /SiC aerogels for broadband and high-temperature electromagnetic wave absorption up to 1000°C[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(14): 16704-16712.
- [63] SONG L, CHEN Y, GAO Q, et al. Low weight, low thermal conductivity, and highly efficient electromagnetic wave absorption of three-dimensional graphene/SiC-nanosheets aerogel[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 158: 106980.
- [64] ZENG G, LI X, WEI Y, et al. Significantly toughened SiC foams with enhanced microwave absorption via in situ growth of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nanowires[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 131745.
- [65] DAI D, LAN X, WANG Z. Hierarchical carbon fiber reinforced SiC/C aerogels with efficient electromagnetic wave absorption properties[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 248: 110376.