

本文引用格式:邓小妹,蒋肖,黄俊,等. 一维碳化硅纳米材料的制备及其电磁波吸收应用进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(2): 232-250.

Citation format: DENG Xiaomei, JIANG Xiao, HUANG Jun, et al. Progress in preparation and electromagnetic wave absorption application of one-dimensional silicon carbide materials[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(2): 232-250.

文章编号 1672-6634(2025)02-0232-19

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024070017

一维碳化硅纳米材料的制备及其电磁波吸收应用进展

邓小妹, 蒋肖, 黄俊, 曾小军

(景德镇陶瓷大学 材料科学与工程学院, 先进陶瓷材料研究所, 江西 景德镇 333403)

摘要 信息安全和目标隐身的迫切需求使得电磁波吸收材料的研究成为热点之一。具有高纵横比的一维碳化硅(SiC)纳米材料因其良好的介电损耗和耐高温性能, 被广泛应用于高温电磁波吸收领域。本文综述了一维 SiC 材料的制备方法(静电纺丝法、模板法、水热法、化学气相沉积法), 阐述关键工艺参数对材料组分和结构的影响规律, 重点关注 SiC 复合材料(一维 SiC 复合碳基材料、磁性材料以及 MXene 材料)的组分、结构与其电磁参数之间关联性, 从而阐明一维 SiC 材料的电磁波吸收机制和应用。最后, 提出了一维 SiC 材料在电磁波吸收领域的应用前景与挑战。

关键词 一维碳化硅; 阻抗匹配; 介电损耗; 磁损耗; 电磁波吸收

中图分类号 TB383.1; TQ163.4

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Progress in Preparation and Electromagnetic Wave Absorption Application of One-Dimensional Silicon Carbide Materials

DENG Xiaomei, JIANG Xiao, HUANG Jun, ZENG Xiaojun

(School of Materials Science and Engineering, Advanced Ceramic Materials Research Institute,
Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333403, China)

Abstract The urgent need for information security and target stealth has made the research on electromagnetic wave (EMW) absorbing materials one of the research hotspots. One-dimensional silicon carbide (SiC) nanomaterials with high aspect ratios are widely used in the field of high-temperature electromagnetic wave absorption due to their excellent dielectric loss and high temperature resistance. In this work, the preparation methods of one-dimensional SiC materials (electrospinning, template, hydrothermal, and chemical vapor deposition) are reviewed, and the influences of key process parameters on the composition and structure of the materials are expounded. The correlation between the composition and structure of

收稿日期: 2024-07-28

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20224BAB214021); 景德镇市陶瓷产业重大产学研协同攻关和成果转化项目(2023ZDGG002)资助

通信作者: 曾小军, 男, 汉族, 博士, 教授, 博士生导师, 江西省主要学科学术和技术带头人, 研究方向: 纳米材料, E-mail: zengxiaojun@jcu.edu.cn.

SiC composites (one-dimensional SiC composite carbon-based materials, magnetic materials, and MXene materials) and their electromagnetic parameters was focused, so as to elucidate the mechanism and application of one-dimensional SiC materials in the field of EMW absorption. Finally, the application prospects and challenges of one-dimensional SiC materials in the field of EMW are proposed.

Key words one-dimensional SiC; impedance matching; dielectric loss; magnetic loss; electromagnetic wave absorption

0 引言

随着 5G/6G 通信技术的快速发展,电子设备被广泛用于工业、医疗、军事、无线电通信等人类生活的方方面面。然而这些技术在给人类带来便利的同时,也向外辐射电磁波造成电磁污染,不仅对精密电子仪器造成干扰,对人体健康也产生一定影响,而且在国防军事领域还会构成极大威胁^[1,2]。此外,在现代战争中,雷达隐身技术的高低逐渐成为各国军事实力比拼的重要环节。其中,关键性雷达隐身材料的开发是军事装备全方位隐身的关键^[3,4]。因此,开发高性能电磁波吸收(吸波)材料在日常生活和国防军事等方面至关重要。

电磁波吸收材料可以通过吸收大部分电磁波,并将其转化为其他形式的能量并耗散掉,从而解决电磁污染问题。在过去的几十年里,传统的电磁波吸收材料在低密度、强吸收方面已经取得了很大进步,技术也相对成熟^[5,6]。然而,这些材料仍难以实现薄匹配厚度和宽有效吸收带宽,这阻碍了其实际应用。随着高精密武器的快速发展,对在复杂的军事电磁环境下(海洋、高温、超音速等)服役的军事装备的隐身需求激增,这为电磁波吸收材料的发展带来新的挑战。为此,研究人员致力于开发轻薄和多频段兼容的高性能、多功能的电磁波吸收材料^[7-9]。通常,电磁波吸收材料可分为碳基材料(石墨、石墨烯、碳纤维、碳纳米管等)、磁性材料(Fe、Co、Ni 及其合金等)、聚合物材料(聚丙烯腈、聚吡咯等)等。然而,由于单一材料固有的不足阻碍了其在某些领域的广泛应用,例如传统的导电聚合物材料的高温导电性差和高温耐氧化差等问题,使其在航空航天领域的应用受到限制^[10];此外,这些材料在高温环境下容易出现严重的氧化、分解、磁性能衰减等问题,因此该类材料在高温环境下难以应用。相比之下,金属碳化物陶瓷基材料因高温稳定、强度高等优点,在高温电磁波吸收领域得到广泛关注。其中,碳化硅(SiC)由于其热膨胀小、抗热震性好、强度高、化学惰性好,被认为是高温电磁波吸收材料的潜力候选材料^[11]。

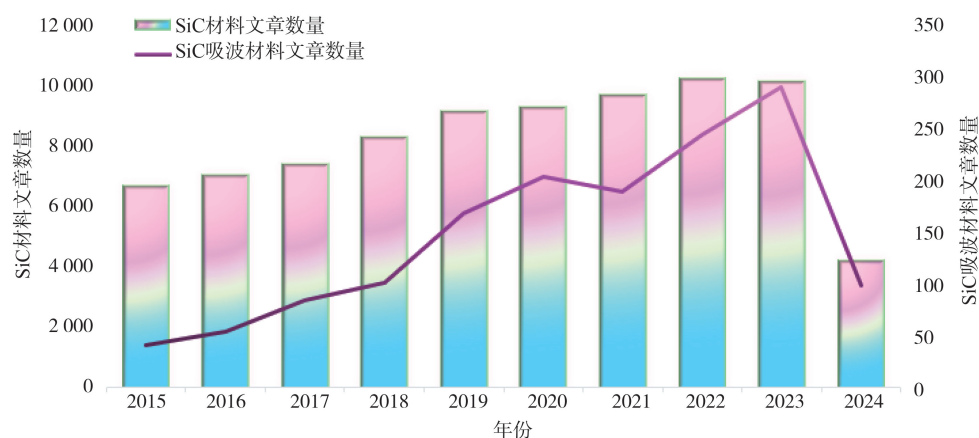


图1 2015—2024年发表SiC材料的文章统计数据,2024年的数据截止到2024年6月(数据来自Web of Science)

Fig. 1 Statistical data of articles published on SiC materials from 2015 to 2024, and the data for the year 2024 is up to June 2024 (Data from Web of Science)

当前,一维纳米材料因其独特的纵横比和各向异性、大的比表面积和简单的制造工艺而成为电磁波吸收材料的研究热点之一^[12,13]。其中,一维SiC材料[SiC纳米管(CNT)、SiC纳米线(SiC_{nw})、SiC纳米纤维(CF)等]由于其优异的热稳定性和化学稳定性、宽的带隙、高的机械强度、良好的耐磨性和高击穿场强^[14-16],使他们广泛应用在传感器^[17]、纳米机电器件^[18]、场发射体^[19]、超级电容器^[20]、场效应晶体管^[21]、电磁波吸收材

料^[22]等领域。如图 1 所示,2015~2024 年的 SiC 材料相关文章发表数量呈现增长趋势,其中折线表示 SiC 吸波材料相关的文章数量,可以看出对于 SiC 吸波材料的研发尤为关注。目前,一维 SiC 吸波材料的制备方法主要有静电纺丝法、模板法、水热法、化学气相法、熔盐法和微波加热法等。研究人员通过合理的结构设计,如多孔、管状、网状和核壳结构等,来构筑异质界面和多级结构,进而有效调节电磁参数,优化阻抗匹配和电磁损耗能力^[23]。尽管在过去的十年里,一维 SiC 材料的制备方法取得了重大进展,满足了大多数电磁波吸收性能的要求。然而,其制造成本仍然过高,这阻碍了其在低成本应用领域的使用。此外,传统方法在制备一维 SiC 材料时,反应条件苛刻,步骤繁琐,且产率较低,这严重限制了一维 SiC 材料在电磁波吸收领域的应用^[24]。因此,深入解析一维 SiC 吸波材料中的关键制备工艺、实验参数(硅源浓度、反应温度、时间等)与其组分、结构之间的关系,明晰其吸波性能和机制,对高性能一维 SiC 吸波材料的制备和设计至关重要。

基于上述内容,本文对一维 SiC 吸波材料进行了全面综述。首先,介绍了一维 SiC 的制备方法,重点关注制备过程中的关键工艺参数对材料组分和结构的影响规律。随后,深入解析 SiC 复合材料的组分、结构与其电磁参数之间关联性,阐明材料介电损耗、磁损耗、阻抗匹配的演化规律,进一步揭示复合材料的电磁损耗机制。最后,对一维 SiC 吸波材料目前面临的关键挑战进行了阐述,并对一维 SiC 吸波材料的未来发展方向提出见解。

1 一维 SiC 材料的制备方法

1.1 静电纺丝法

静电纺丝法是一种利用电场生产直径可小到纳米级的超细纤维的有效方法。在静电纺丝过程中,将纺丝流体连接到高压电源上,通过增加流体的静电势来产生电场力。当电场力增加到一定值时,液滴由球形变为圆锥形,形成一种称为“泰勒锥”的结构,然后从尖端延伸形成细丝,这些细丝在收集器上形成纤维膜^[25]。通过选择适当的实验装置,并调节制备条件,可得到不同形貌的纤维,如核-壳纤维,纳米线,空心纤维等。

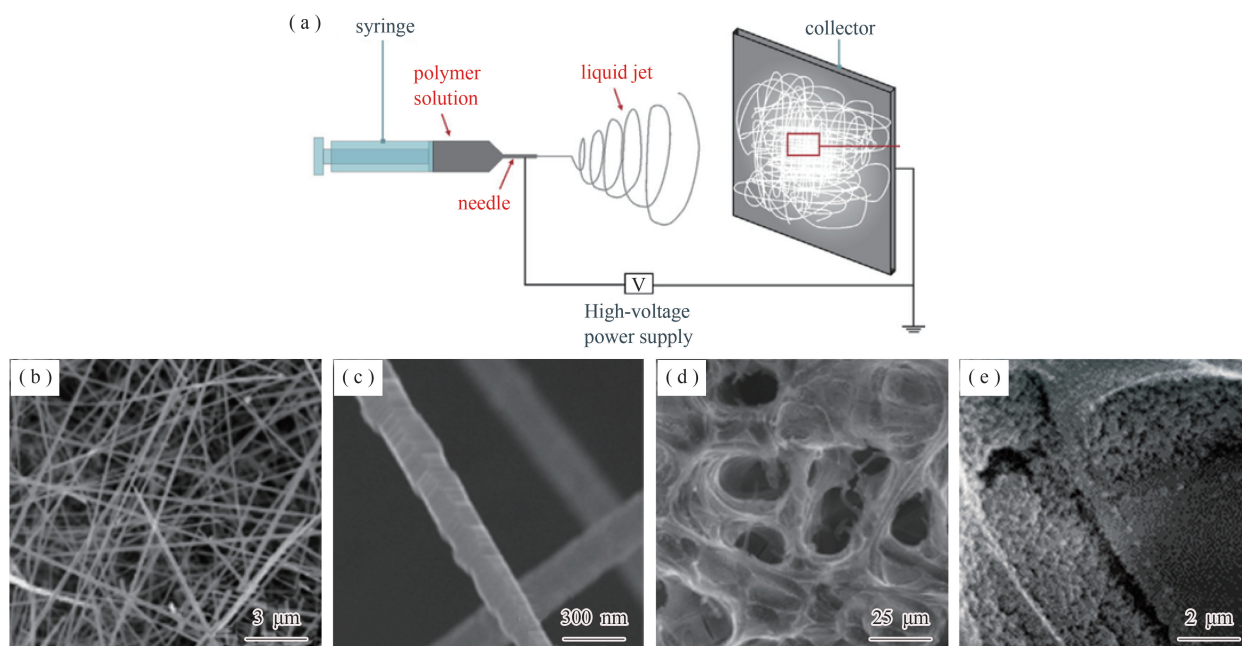


图 2 (a) 静电纺丝法制备纳米纤维的工艺示意图^[31];热解产物在不同放大倍数以及不同 PSN 含量下的 SEM 图像:(b, c) PSN 质量分数为 12%,(d, e) PSN 质量分数为 60%^[33]

Fig. 2 (a) Schematic diagram of basic electrospinning equipment^[31]; SEM images of pyrolysis products at different magnifications and PSN mass contents of (b, c) 12% and (d, e) 60%^[33]

静电纺丝工艺具有操作方便、制备周期短等优点。将静电纺丝法结合热处理工艺可制备各种一维纳米材料,因其制备方法简单、成本低、生产率较高而被广泛采用^[26-29],其缺点是通常采用强腐蚀性或高剧毒性的有机溶剂,易造成环境污染,也对操作人员的健康产生不利影响。通过将功能性添加剂掺入所得纤维,可

调整纤维表面的物理化学特征,使得用静电纺丝法制备材料时具有可扩展性,因此静电纺丝法在电磁波吸收领域有广泛的应用^[25,30]。最简单的静电纺丝装置由3个主要组件组成:一个注射器;末端有一个小直径的移液器或针头(也称为喷丝器),连接到高压直流电源;一个导电的接地收集屏[图2(a)]^[31]。

由于静电纺丝技术的简单性和通用性,以及随后的碳热还原技术的辅助,致密SiC纤维毡的制备已经取得很大的成功。最近,为了满足轻质、高比表面积和独特结构的要求,人们越来越关注通过静电纺丝技术制备纳米多孔SiC纤维,通过增加比表面积和孔隙率来增强其电磁波吸收性能。Liu等人^[32]使用静电纺丝和高温热解工艺制备了中孔3C-SiC中空纤维。所得纤维由单晶3C-SiC纳米颗粒组成,比表面积为21.75 m²/g,平均孔径约为34 nm。通过调整初始溶液中原料的比例可以实现SiC纤维直径大小的调控。然而,具有可调结构的多孔纤维的合成仍然是一个重大挑战。Hou等人^[33]利用静电纺丝工艺制备出介孔SiC纤维,从样品的扫描电子显微镜(SEM)图像可以看出:当原料中聚脲硅烷(PSN)质量分数为12%时,只能得到独立的竹状致密SiC_{mw}[图2(b,c)]。随着PSN含量的增加,得到的热解产物存在蜂窝状的三维介孔结构[图2(d,e)],所以低的PSN含量有利于制造具有纤维形状的SiC。

1.2 模板法

模板法是一种通过物理或化学方法将相关材料沉积到模板的孔或表面,再将模板移除以获得纳米材料的工艺。其中,牺牲模板法中使用的模板包括:胶体晶体模板^[34]、聚合模板(凝胶浇铸)^[35]、成孔剂模板(转化孔剂)^[36]、相转化模板^[37]和冰模板(冷冻浇铸)^[38]等。与其他方法相比,模板法操作简单,对制备条件不敏感,可以通过选择合适的模板材料来控制形貌和结构^[24]。其中,牺牲模板法是控制孔隙度特征最合适的方法之一,因为其可以通过选择牺牲模板或易分解性材料来控制孔隙度的大小、孔隙形状和孔隙率^[39]。图3(a)为使用可热解成孔剂制备多孔结构的示意图^[39]。目前,人们主要通过研究不同类型的可热解催化剂作为牺牲模板,以获得不同形状和大小的孔隙^[40]。

在众多牺牲模板法类别中,冷冻铸造法通过平面方向排列填料引起了广泛的关注,近年来被广泛用于制造导热复合材料。Yao等人^[41]通过冷冻铸造纳米线悬浮水溶液,然后采用热烧结处理来巩固垂直排列和互连的纳米线,最后呈现出蜂窝状SiC纳米线层排列的分层结构(SiC_{mw}网络),图3(b)为SiC_{mw}网络的合成示意图。之后,用环氧树脂渗透SiC_{mw}网络,成功制备了具有超高热导率的三维SiC_{mw}/环氧复合材料。该复合材料的优异热性能是由于有序的SiC_{mw}网络作为热传输的高效路线。然而,昂贵且复杂的冷冻铸造条件严重制约了其大规模应用。研究发现预烧结可以有效降低SiC的烧结温度,有利于生成SiC_{mw}。Qin等人^[42]研究了石墨烯作为模板在不同的烧结条件下对SiC_{mw}形成的影响。当微波烧结前进行低温预处理,烧结产物表现为纯度较高的SiC单一特征峰,石墨烯的特征峰完全消失。此外,模板法也可以用于制备分层结构的电磁波吸收材料。Lü等人^[43]报道了一种具有“球上线”分层结构的SiC_{mw}/SiC晶须(SiC_w)泡沫,表现出优异的电磁波吸收性能。该方法主要是通过喷雾干燥法将SiC组装成多孔SiC球,然后将SiC球用3D打印的方式打印成SiC泡沫,并作为SiC_{mw}生长的模板。最后,SiC_{mw}在SiC_w球上径向生长,形成“球上线”结构[图3(c,d)],从而形成丰富的导电网络,增强了材料的电磁波吸收能力。

近年来模板法被广泛用于一维纳米材料的合成,然而随着模板法的广泛使用,问题也逐渐暴露出来。第一,通过模板法制备的样品结构相对单一;第二,模板的去除通常会破坏所需的结构,难以达到实验最终效果;第三,目前已知的作为合成一维SiC材料的模板材料来源有限,限制了其进一步应用。

1.3 水热法

水热法是在高温高压下利用化学反应制备材料的一种方法。在特定的温度和压力下,将合适的前驱体溶解在水溶液中,通过热力学效应,诱导前驱体在水热环境中发生反应,不需要预干燥就可以得到目标产物^[25,44]。水热法具有反应条件温和、简单、可控性高、适用材料范围广等优点,进一步结合溶剂热法、共沉淀法等多种方法可以合成结构丰富的一维材料^[45,46]。通过控制溶液组成、调整反应参数以及选择合适的前驱体,可以实现对一维材料的组成、结构和形貌等的调控^[25]。然而水热法制备一维SiC材料存在不可忽视的问题,如无法观察SiC合成的具体过程、很难在结构上得到纯的SiC纳米材料,需要通过不同方法来纯化SiC纳米材料,例如:将样品溶液在浓硫酸(H₂SO₄)中长时间加热回流去除杂质;通过溴仿重复提取分离SiC

和 C;将产品在空气下低温热处理一段时间等^[47]。Ju 等人^[48]开发了一种硫辅助还原工艺,将硅粉、硫粉、四氯乙烯和金属钠作为反应物放入反应釜中,加热至 130 °C,并保温 40 h,得到平均直径为 30 nm 的 SiC_{nw} 。该方法将 SiC_{nw} 的合成温度从 270 °C 降至 130 °C,通过硫的辅助降低了 SiC_{nw} 的生产成本。

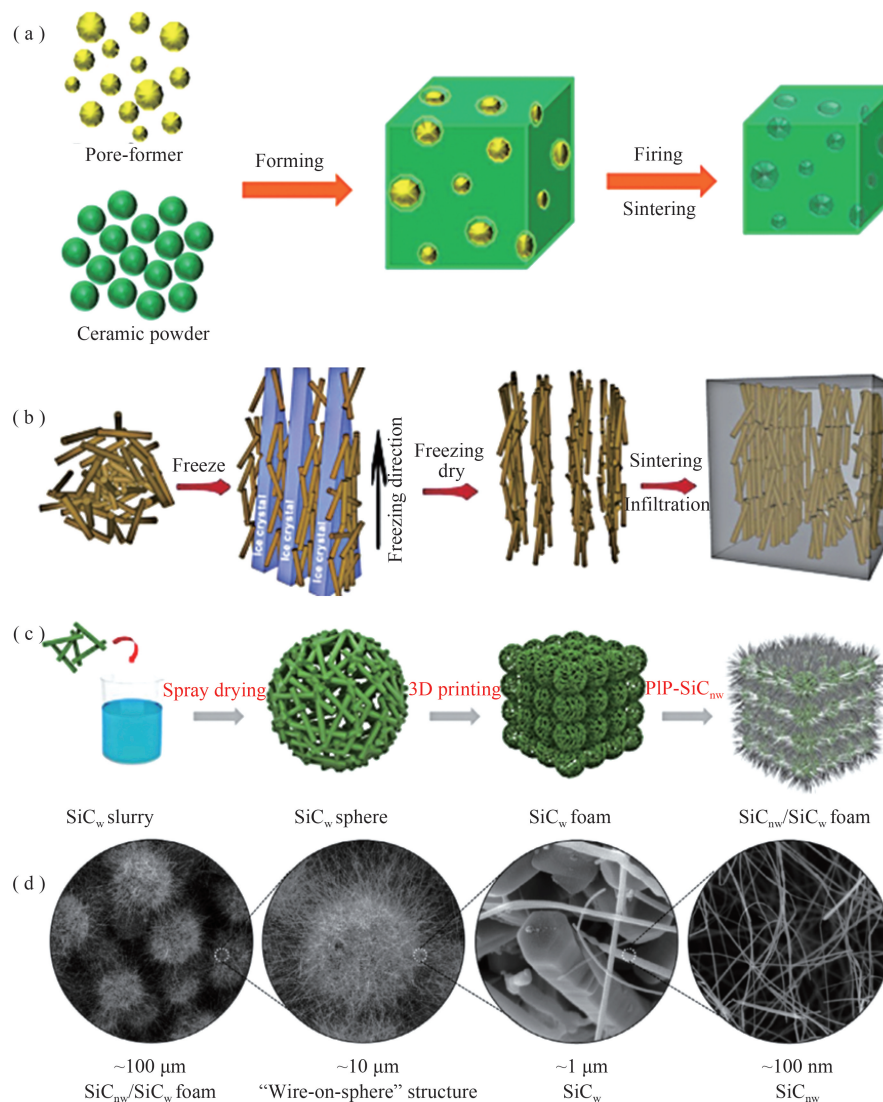


图 3 (a) 用可热解成孔剂制备大孔微观结构材料的示意图^[39]; (b) 采用冷冻铸造法形成 SiC_{nw} 网络的示意图^[41]; (c) $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{SiC}_{\text{w}}$ 泡沫的制备工艺流程图^[43]; (d) $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{SiC}_{\text{w}}$ 泡沫的“球上线”分层结构^[43]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the preparation of macroporous microstructure materials by pyrolytic pore former^[39]; (b) Schematic diagram of the formation of SiC_{nw} network by freeze casting method^[41]; (c) Process flow chart of $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{SiC}_{\text{w}}$ foam preparation^[43]; (d) “Wire-on-sphere” hierarchical structure of $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{SiC}_{\text{w}}$ foam^[43]

1.4 化学气相沉积法

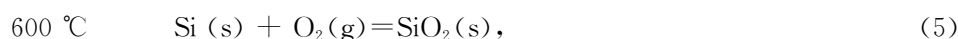
气相沉积法是制备纳米管和纳米线等一维碳基材料的常用方法,其原理是:在适当的温度和气氛条件下,将碳源气体(如甲烷、乙烷等)引入反应室中,在基体表面反应,沉积出碳原子并逐渐形成一维碳结构^[49-51]。采用化学气相沉积法(CVD)制备的一维碳基材料具有规模大、成本低、产品纯度高的优点,还可以通过调节反应温度和气氛组成控制产品的生长速度和微观形貌。其缺点是沉积层均匀性较差,沉积速率较慢,影响整体生产效率。化学气相沉积法衍生的复合材料通常具有优异的力学性能和烧蚀性能,因此化学气相沉积法也被广泛用于制备先进低维 SiC 材料^[25,53]。采用化学气相沉积法制备 SiC 通常以 SiCl_4 、 SiH_4 、 SiO_2 等作为硅源,以 CH_4 和 C_2H_4 作为碳源^[52],将两者在反应室内相互接触混合,然后在基体表面进行化学反应和扩散,得到一维 SiC 材料。化学气相沉积法制备 SiC_{nw} 通常有两种机制来解释其生长过程,即气-固

(VS)机制和气-液-固(VLS)机制^[54]。其中 SiC_{nw} 的 VS 生长机制过程如^[55]



石墨和硅与系统中残余的 O₂ 反应生成 CO 和 SiO, 见(1)和(2)式, 之后 SiO 与 CO 和残余 C 反应, 导致大量的 SiC_{nw} 在硅颗粒表面析出, 如(3)和(4)式所示。

在过去的几十年里, 利用过渡金属或合金作为催化剂制备碳基材料得到了广泛的研究, 主要是因为金属催化剂可以降低反应的活化能。同时, 采用催化剂辅助可以合成结晶度好、直径均匀的 SiC_{nw}。在化学气相沉积工艺中常被用做催化剂的有有机催化剂(如甲基氯硅烷^[56])、金属催化剂(如镍^[57,58]、铁^[59,60]、铜^[61])等。VLS 机制是在催化剂的参与下, 催化剂液滴附着在体系的尖端或中间, 促进一维纳米结构的生长。SiC_{nw} 的 VSL 生长机制过程如^[62]



在有铁作为催化剂的 VLS 机制中, Si 和 SiO₂ 在 1 100 °C 左右发生反应, 形成 SiO 蒸气, 如式(6)所示。SiO 蒸汽与准液态铁接触, 形成 Fe-Si-O 体系, 提供活性位点。小碳分子被吸收, 形成晶核。SiO 蒸汽与吸收的碳分子发生反应, 在晶核的基础上生成 SiC_{nw}, 见(8)和(10)式。

为了降低生产成本, 在使用经济型氧化铁或铁的催化下, VLS 生长模式主导了 SiC 的结晶和 SiC 纳米线的生长。Sun 等人^[62]以经济型活性炭、硅、二氧化硅为原料, 通过一步碳热还原工艺合成了直径为 40 nm 的 SiC_{nw}, 发现几乎每个 SiC 纳米棒的尖端或中间都存在许多突出的纳米颗粒, 纳米颗粒主要由 SiO₂ 纳米球组成, 这符合 VLS 生长机制; Giovanni 等人^[59]报道了在常压下, 以丙烷和硅烷为前驱体, 氢气为承载气体, 沉积在硅表面的薄层铁作为催化剂, 采用 CVD 技术在硅衬底上生长 SiC 纳米线, 证明铁可以作为沉积在硅衬底上的催化剂来促进 SiC 纳米线生长。

1.5 其他方法

制备一维 SiC 的方法除了以上介绍的静电纺丝法、模板法、水热法、化学气相沉积法外, 还有熔盐法、微波加热法等。熔盐法制备纳米线具有工艺简单、反应温度低、产物化学成分均匀等优点^[63]。Wu 等人^[64]采用熔盐法辅助化学气相沉积工艺, 在较低温度下(1 200 °C)在碳纤维表面直接生长出大规模的 SiC_{nw} 阵列; Zhang 等人^[65]利用熔盐法和碳热还原法(CR), 采用硅灰和廉价的酚醛树脂制备了一种简单而经济的 SiC 纳米线, 提出熔盐介质的使用可以有效降低 SiC 晶体的合成温度。研究发现在 1 450 °C 下, 可通过熔盐介质辅助表面碳热还原法制备出 3C-SiC 纳米线。而未使用熔盐介质时, 方石英向 3C-SiC 的晶体转变缓慢且困难。另外, 传统制备 SiC_{nw} 的方法通常需要在 1 100 °C 以上的高温下进行, 相比之下采用微波加热工艺可以在超低温、短时间内原位生长出 SiC_{nw}。Yuan 等人^[66]在聚合物衍生的 SiCNO 陶瓷气凝胶中原位生长 SiC_{nw}, 制备了 SiC_{nw}/SiCNO 复合气凝胶。图 4(a)为在 SiC_{nw}/SiCNO 复合气凝胶中一维 SiC 的形成机理图。图 4(b)和 4(c)分别为未经过微波处理的 SiCNO 气凝胶和在 800 °C 微波处理后的 SiC_{nw}/SiCNO 复合气凝胶电磁波吸收性能反射损耗值(R_L)的 2D 图。

目前, 大量的研究表明采用静电纺丝法结合热解法^[31]、化学气相沉积法^[62]、熔盐法^[65]等可以在 1 000 °C 以上合成纯的 SiC_{nw}。而低温制备 SiC 材料的方法, 如水热法^[47]很难在结构上得到纯的 SiC_{nw}。在化学气相沉积过程中, 使用催化剂可以改变一维 SiC 的生长机理, 调节反应温度和气氛组成控制 SiC 的生长速度^[59]。采用模板法制备一维 SiC 材料可以通过选择合适的模板材料来控制 SiC 材料的结构。

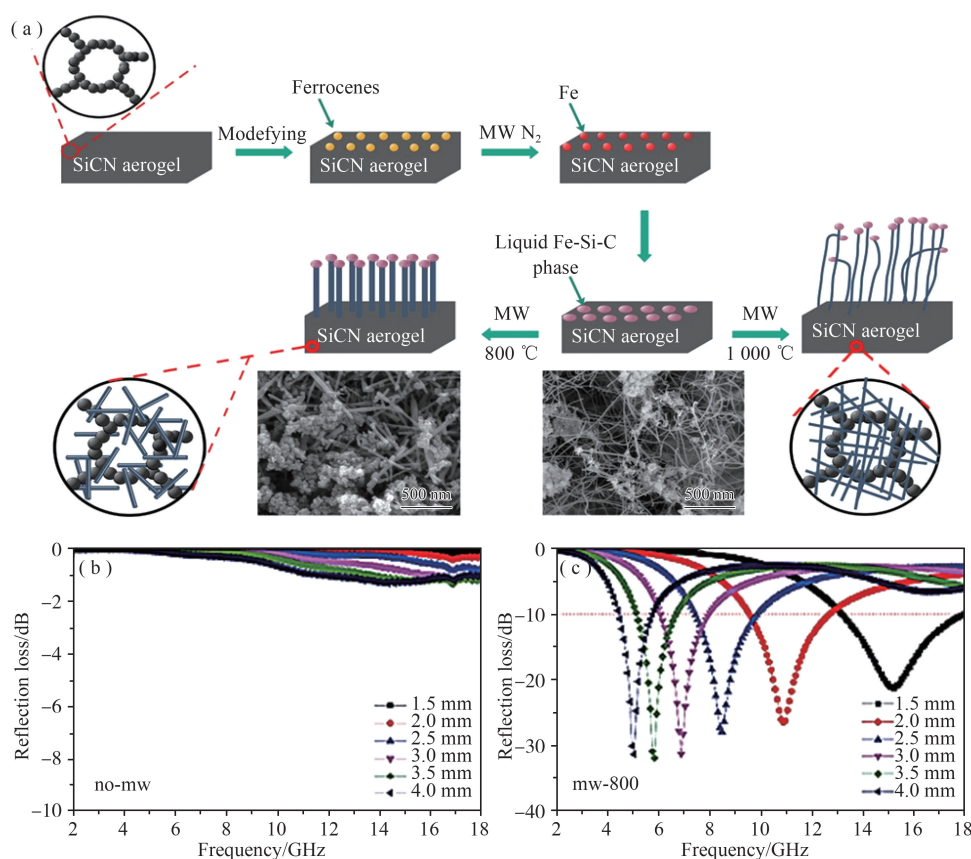


图 4 (a) $\text{SiC}_{\text{mw}}/\text{SiCNO}$ 复合气凝胶中一维 SiC 的形成机理示意图; (b) SiCN 气凝胶电磁波吸收性能的 $2\text{D } R_L$;

(c) $800\text{ }^\circ\text{C}$ 微波加热制备的 $\text{SiC}_{\text{mw}}/\text{SiCNO}$ 复合气凝胶电磁波吸收性能的 $2\text{D } R_L$ [66]

Fig. 4 (a) Schematic of the formation mechanism of one-dimensional SiC in $\text{SiC}_{\text{mw}}/\text{SiCNO}$ composite aerogels; $2\text{D } R_L$ diagram of electromagnetic wave absorption performance for (b) SiCN aerogel and (c) $\text{SiC}_{\text{mw}}/\text{SiCNO}$ composite aerogel prepared by microwave heating at $800\text{ }^\circ\text{C}$ [66]

2 一维 SiC 基吸波材料

2.1 一维 SiC 吸波材料

与零维材料相比,一维材料具有大的比表面积,可以延长电磁波的传导和耗散路径,增强电磁波衰减特性^[67-69]。一维结构由于其各向异性容易产生互穿的导电网络,这有助于微电流的形成和电磁波的多次反射和散射^[70]。SiC 材料由于其介电性能和耐高温性能使其能够在恶劣环境中发挥令人满意的效果^[71-74]。将一维 SiC 材料与零维、二维材料复合得到的多维材料,可以构建出利于电子跃迁和迁移的导电网络而具备高电导率,因此被广泛用作电磁波吸收材料^[75]。

虽然一维 SiC 材料有诸多优点,但是由于本征 SiC 材料的极化单一和低电导率,无法满足当今社会和军事上的应用。到目前为止,通过不同的制备方法或不同的反应条件可以制备出不同微观结构的一维 SiC 材料,以强化其电子极化与界面极化效应。因此,结构设计已被证明是提高电磁波衰减能力和增强阻抗匹配性能的重要手段^[71,76]。目前常见的 SiC 吸波材料的微观形态包括:纤维、纳米线等;主要微观结构包括:多孔结构、核壳结构等。

中空和多孔结构不仅进一步降低了电磁波吸收材料的重量,还增强了材料的衰减能力,改善阻抗匹配特性^[76,77]。目前在制备多孔、介孔的 SiC 材料过程中,通常采用热分解有机聚合物的工艺来实现。Zhen 等人^[78]采用扩散控制臭氧氧化交联法,交联的氧元素主要分布在臭氧交联聚碳硅烷(PCS)纤维的外层(O-PCS_f),许多微孔和中孔是 O-PCS_f 未交联核心部分降解产物的主要逸出路径,从而形成连续中空 SiC 纤维;同时,以往研究表明仿生结构设计可以提高材料的电磁波吸收性能^[79,80]。Zhu 等^[81]制备了多孔花生壳状

SiC 纤维。在 SiC 纤维表面合成了平均尺寸为 89 nm 的花生壳状孔。图 5(a)为花生壳状 SiC 纤维的电磁波吸收机理示意图。当吸收体厚度为 2.53 mm 时,其在 11.1 GHz 下的最佳反射损耗值高达 -48 dB。SiC 纤维在 X 波段具有良好的电磁波吸收能力,这是由于纤维的仿生结构具有丰富的孔和界面,从而导致了电磁波的多次反射、散射以及界面极化。

研究发现核壳结构中的不同材料发挥着协同作用,产生偶极极化、界面极化和其他相关极化弛豫,因此核壳结构材料具有优异的介电损耗和高效的电磁波吸收能力。Liang 等人^[82]采用界面原位聚合物包埋和碳化相结合的方法,合成了以碳化硅为芯、碳为壳的纳米线(SiC@C)。通过调整间苯二酚与 SiC 纳米线的比例,碳壳的厚度可以从 4 nm 调节到 20 nm。通过该方法可以实现 12 GHz 下的最小反射损耗值为 -50 dB,有效吸收带宽(EAB)为 8 GHz($R_L < -10$ dB)。

在传统的制备 SiC 纤维的过程中,通常会形成 SiC_xO_y 相,而 SiC_xO_y 相的分解比较强烈,通常会在纤维的表面和横截面上出现一些较大的孔隙缺陷,导致 SiC 纤维的力学性能较差^[83,84]。有研究发现 Cansas-II SiC 纤维随着温度的升高,会导致 SiC_xO_y 相的显著分解、游离碳有序化、纳米孔诱导应力集中效应以及游离碳层和临界缺陷的进一步生长,使得 Cansas-II SiC 纤维的平均强度下降^[83]。为了解决这一问题,Kang 等人^[84]在烧结 SiC 纤维的制备过程中引入非均相元素(Ti,B,Al 等),这些非均相元素主要起到烧结助剂的作用,通过抑制 β -SiC 晶粒的异常生长来实现致密化的微观结构,并在烧结后转化为高结晶 SiC(B,Ti)纤维[图 5(b)]。在 12.05 GHz 下,当匹配厚度为 1.8 mm 时,该材料最小反射损耗值为 -55.82 dB。SiC(B,Ti)纤维同时表现出优异的耐高温性(2 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上)和出色的电磁波吸收性能,这个工作为制备和研究既耐高温又具有优异电磁波吸收性能的 SiC 吸波材料提供了重要理论依据。

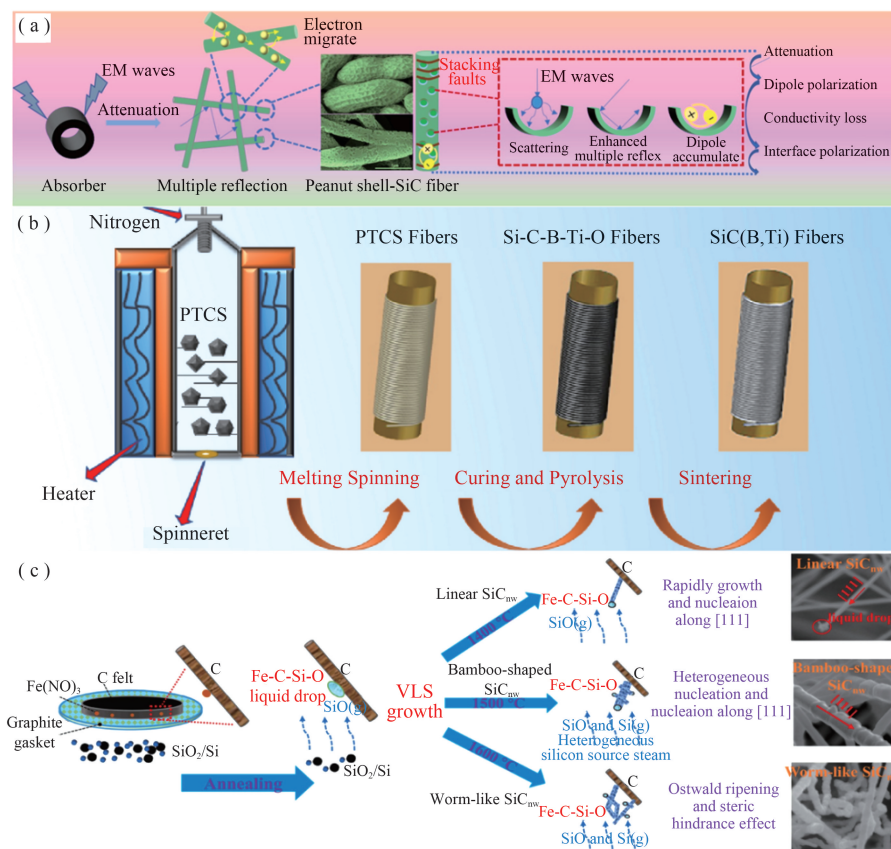


图 5 (a) 花生壳状 SiC 纤维的电磁波吸收机理示意图^[81]; (b) SiC(B,Ti) 纤维的制备工艺示意图^[84]; (c) SiC_{nw} 在不同温度下的生长示意图^[88]

Fig. 5 (a) Schematic diagram of the microwave absorption mechanism of peanut shell-like SiC fibers^[81]; (b) Schematic diagram of the preparation process of SiC(B,Ti) fiber^[84]; (c) Schematic diagram of the growth of SiC_{nw} at different temperatures^[88]

SiC 纳米线作为碳化硅材料常见的一类形貌,在电磁波吸收领域得到了广泛的研究^[85,86]。不同形貌(珠状、线状、竹状等)的 SiC 纳米线可作为具有不同损耗机制的介电吸收载体来调节电磁波吸收能力。Dou 等人^[87]在 1 400 °C 下合成了由缺陷处过饱和的 SiO 蒸汽反应生成的 SiO₂ 微珠封装的珠状 SiC_{nw},发现珠状 SiC_{nw} 最大有效吸收宽度为 1.84 GHz,最大反射损耗为 -16.03 dB,与传统的圆柱形 SiC_{nw} 相比,串珠状 SiC_{nw} 具有优越的电磁吸收性能。另外,有研究发现保温温度对形成 SiC_{nw} 的形貌也有一定的影响。发现随着保温温度的升高, SiC 纳米线的直径变大,其微观形貌也由絮状变为曲线状,最后变为线性纳米线^[55]。

图 5(c)为研究人员得到的 SiC_{nw} 在不同温度下生长成不同形貌的示意图,研究发现竹形 SiC_{nw} 具有较高的介电常数和导电损耗,其丰富的异质界面可以改善低频范围内的界面极化,并对入射电磁波产生多重散射和反射,从而提高对低频电磁波的吸收能力^[88]。此外,还可以通过调节 SiC_{nw} 的长度来提高材料的电磁波吸收性能^[89]。其中较长的 SiC_{nw} 可以提高电磁波吸收材料的导电性,这可能是由于较长的纳米线更容易相互连接,从而有助于在基体中构建更完整的导电网络。Kuang 等人^[89]采用加热 SiO₂-C 前驱体和湿法球磨法制备了长度为 1~100 μm 和长度大于 100 μm 的 SiC_{nw}。测试结果表明,较长的 SiC_{nw} 具有较大的电导率和较高的介电常数。与短 SiC_{nw} 相比,长 SiC_{nw} 的最小反射损耗和有效吸收带宽分别可达到 -21.39 dB 和 3.5 GHz,表现出更优异的电磁波吸收能力。

综上所述,尽管研究人员针对纯 SiC 材料开展了一系列相关研究,如通过结构和形貌的调控来增强单一 SiC 材料的电磁波吸收性能,但其有效吸收频段主要集中在高频区,对于低频区的研究欠缺,这限制了其在电磁波吸收领域中的应用范围。另外,单一的 SiC 材料有效吸收带宽很窄,相较于其他电磁波吸收材料仍有很大差距。因此,近年来开发轻薄、宽频、多频段兼容的高性能、多功能的新型 SiC 基复合吸波材料受到广泛的关注。

2.2 一维 SiC 基复合吸波材料

2.2.1 一维 SiC 复合碳基吸波材料。 SiC 由于其特殊的介电性能,常被用作碳基复合电磁波吸收材料的填料。碳基材料具有低密度、良好的导电性和较强的介电损耗性能等特点,与 SiC 结合可强化吸收性能与拓宽有效吸收带宽^[76]。常见的与 SiC 材料结合的碳基材料有石墨(C)、氧化石墨烯(GO)、碳纳米纤维等。

将石墨和 SiC 进行结合形成复合材料后,可以调节 SiC 材料的介电损耗性能,使 SiC 复合材料具有优异的电磁波吸收性能^[90]。Wang 等人^[90]采用静电纺丝和高温退火法制备了 C/SiC 复合材料。退火温度在 1 300 °C 时,C/SiC 复合材料在 16.8 GHz 处的最小反射损耗值为 -22 dB,匹配厚度仅为 1.7 mm,有效吸收带宽高达 10 GHz($R_L < -10$ dB)。通过该方法可以将石墨嵌入到 SiC 纳米线内部,从透射电子显微镜(TEM)图像[图 6(a)]可以看出,制备的纳米线含有层错、缺陷和涡层石墨;Hao 等人^[91]采用化学气相反应的方法,以 Si/SiO₂ 混合粉末为硅源,在膨胀石墨上均匀地生长 SiC_{nw}。所得复合材料在 6.91 GHz 处的最小反射损耗值为 -52.76 dB,这为实现低频段(C 波段)优异的电磁波吸收性能的探索提供了借鉴。

还原氧化石墨烯(rGO)具有丰富的残余氧官能团,大比表面积,高机械灵活性,中等导电性和独特的二维结构,可为复合材料实现良好的电磁波衰减提供协助^[92]。Wang 等人^[93]以柠檬酸作为交联剂和还原剂,制备了 rGO/m-SiC_{nw} 复合气凝胶。与 GO 气凝胶相比,复合气凝胶最小反射损耗达到 -42.23 dB,有效吸收带宽为 7.47 GHz,且该复合气凝胶能够在 800 °C 的高温下保持稳定的性能,这说明了 rGO/m-SiC_{nw} 气凝胶可在高温环境下用于电磁波吸收。Han 等人^[94]采用冷冻干燥和碳热还原法制备了三维柔性 rGO/SiC_{nw} 泡沫复合材料。与纯的 rGO 泡沫相比,rGO/SiC_{nw} 泡沫复合材料实现了整个 X 波段的有效吸收,匹配厚度减小到 3 mm。这主要是因为该复合材料在产生导电损耗后,桥接的 SiC_{nw} 中会发生电子跃迁,以及二维 rGO 和一维 SiC 纳米线的高比表面积所导致的界面电荷积累,增强了界面极化。图 6(b)为桥接的 SiC_{nw} 的 TEM 图像。为了进一步研究多维 SiC 复合材料具有优异的电磁波吸收性能的损耗机制,Han 等人^[95]采用聚合物热解工艺在陶瓷基体上构建了由二维 GO 和一维 SiC 纳米线组成的分层结构。且复合材料在 10.55 GHz 时的最小反射损耗值为 -69.3 dB,匹配厚度为 2.35 mm。GO 的加入降低了 SiC_{nw} 的结晶温度,促进了非均相成核。由于 SiC_{nw} 中的层错和连接点、GO 中的缺陷和残余官能团以及良好的导电网络,导致这种

分层结构具有良好的电磁波衰减能力。由于缺陷和氧气的引入,与石墨烯相关的材料,如氧化石墨烯、还原氧化石墨烯和石墨烯气凝胶(GA),具有非常低的导电性。聚吡咯(PPy)作为一种轻质导电聚合物在电磁波吸收领域受到了广泛关注^[96-98]。Cheng 等人^[99]将 SiC_{nw} 和导电聚合物聚吡咯通过化学气相渗透和简单的化学聚合法固定到石墨烯气凝胶中,得到 $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{GA-PPy}$ 吸波材料。图 6(c)为 $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{GA-PPy}$ 泡沫电磁波吸收机理示意图。当 PPy 质量分数为 66% 时, $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{GA-PPy}$ 的有效吸收范围为 8.2~14.6 GHz,且匹配厚度仅为 2.32 mm。这归因于 $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{GA-PPy}$ 吸波材料中,界面极化、电子偶极极化的协同作用调控了电磁波吸收性能。因此,可以通过与 SiC_{nw} 和石墨烯泡沫复合来实现优异的电磁波吸收性能^[97,98]。

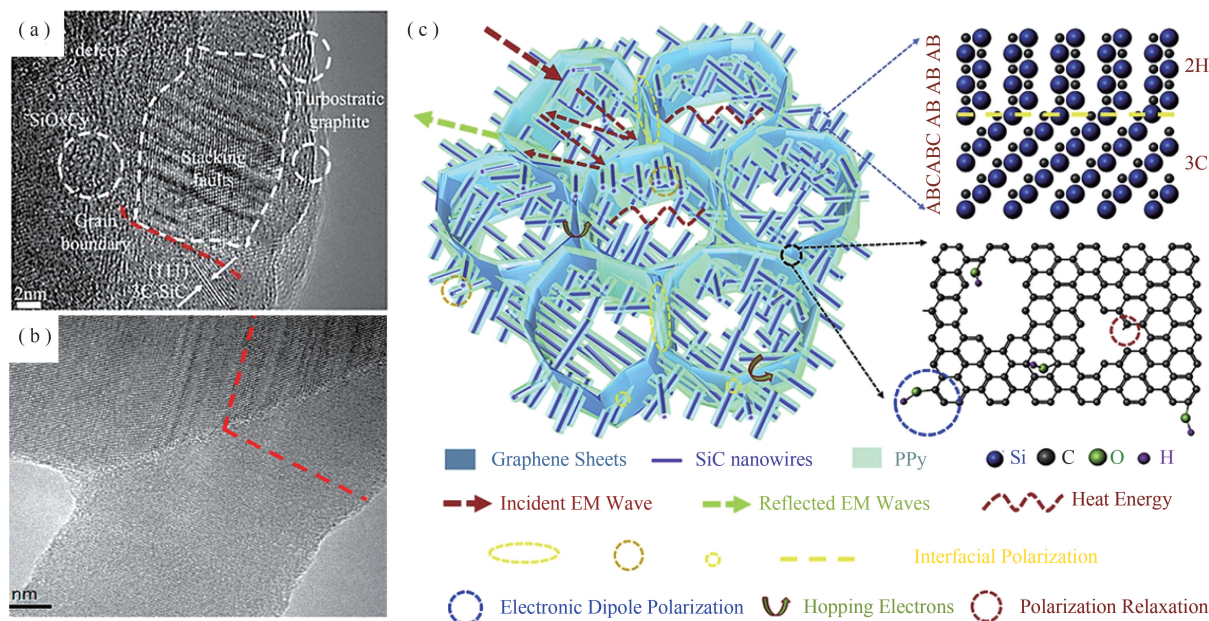


图 6 (a) C/SiC 复合材料的 TEM 图像^[90]; (b) 相应的桥接的 SiC 纳米线的 TEM 图像^[94];
(c) $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{GA-PPy}$ 泡沫吸附机理示意图^[99]

Fig. 6 (a) TEM image of C/SiC composite material^[90]; (b) TEM image of the corresponding bridging SiC nanowires^[94];
(c) Schematic diagram of the adsorption mechanism of $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{GA-PPy}$ foam^[99]

有研究表明单组分碳纳米纤维由于其固有的高复介电常数,不能满足良好的阻抗匹配,限制了其电磁波吸收性能。而 SiC 纳米线具有偶极极化、界面极化,以及与具有良好导电损耗的碳纤维形成复合材料后具有多种损耗机制^[100],有利于提高电磁波吸收性能。Qian 等人^[101]以 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 作为催化剂,采用前驱体渗透和热解工艺制备 $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{CF}$ 复合材料,当 SiC_{nw} 在 CF 表面原位生长时,含有低质量分数的 SiC_{nw} 和残余非晶 SiOC 陶瓷的 $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{CF}$ 复合材料具有优异的电磁波吸收性能,其最小反射损耗值为 -18.3 dB。Qian 等人^[102]将化学气相渗透过程的温度提升至 1 500 °C,制备了 $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{CF}$ 复合材料。发现在 1 500 °C 下制备的 $\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{CF}$ 复合材料的最小反射损耗值为 -36.5 dB,有效吸收带宽为 5.5 GHz,匹配厚度仅为 1.88 mm,而且还发现这种复合材料的力学性能与纯的 SiC 纤维相比明显提高。

综上所述,纯 SiC 与碳基材料复合之后可以改善其电磁波吸收性能。在石墨和 SiC 复合材料中, SiC 纳米线的引入,可增强其偶极极化与界面极化,改善阻抗匹配。而氧化石墨烯的加入降低了 SiC 纳米线的结晶温度,促进了非均相成核。原位生长的 SiC 纳米线随机嵌入互连的氧化还原石墨烯网络中,可增强复合材料的热稳定性和电磁波吸收能力,同时将具有丰富的桥接和层错的 SiC 纳米线增强碳纤维的复合材料可能成为陶瓷基复合隐身材料的候选材料。

2.2.2 一维 SiC 复合磁性吸波材料。传统的磁性材料(单一磁性铁、钴、镍金属;磁性氧化物;磁性金属合金等)已被广泛研究并用于电磁波吸收领域。SiC 与磁性材料的复合可以成为构建高性能电磁波吸收材料的有效途径。磁性材料的引入可以通过生成大量界面和磁畴微结构来改善阻抗匹配^[25]。但是磁性材料也存在一些不可避免的缺点,如铁磁特性、不稳定性和高密度等。这将导致磁性金属合金的化学成分随着时间

的推移而退化,这限制了其工业化应用,特别是在航空航天领域的应用。因此,重量轻、耐热性好、结构稳定、吸收能力强、宽有效吸收带宽的电磁波吸收材料已经成为目前研发的重点^[103]。

纳米磁性金属颗粒通常被均匀分散于聚合物纤维中,以增强聚合物纤维的导电性,其中铁、钴、镍等具有双重特性的金属还可以增加材料的磁损耗,与 SiC 材料的介电损耗协同作用,优化 SiC 材料的阻抗匹配和电磁波衰减能力。Kuang 等人^[104]在 1 500 °C 下微波加热 30 min,制备了 $M_x\text{SiC}_{1-x}$ ($M=\text{Ni}, \text{Mn}$) 纳米线。当纳米线填充质量分数为 20% 时, $\text{Ni}_{0.01}\text{SiC}_{0.99}$ 纳米线在 8.8 GHz 下的最小反射损耗值为 -11.1 dB [图 7(a)]。其中, Ni 作为催化剂降低了 SiC 纳米线的层错密度,但会增加其导电性并产生新的杂质缺陷。因此, Ni 的掺杂可以有效改善 SiC 纳米线的介电损耗和阻抗匹配特性,但复合材料仍然几乎没有磁损耗能力,表现出较差的电磁波吸收性能。为了研究 SiC 磁性金属复合材料中磁性材料对复合材料损耗的影响机制,研究人员将磁性金属 Co 和 Fe 引入 SiC 材料中,并展开深入研究,发现 Co 由于其固有的共振特性,复合材料表现出明显的磁损耗能力^[105]。Hou 等人^[106]采用静电纺丝工艺制备了 Co/SiC 杂化纤维。在加入适量 Co 的情况下,匹配厚度为 2.8 mm 时的有效吸收带宽约为 8 GHz (10~18 GHz)。其中, Co/SiC 杂化纤维的多孔结构和表面粗糙是由反应过程中 Co 的释放导致。图 7(b) 为 1 400 °C 热解后, $\text{Co}(\text{acac})_3$ 加入量为 1 g 的 Co/SiC-3 复合纤维的 SEM 图; Huo 等人^[107]采用静电纺丝和高温 (1 300 °C) 热解法制备了 Fe/SiC 杂化纤维。在 SiC 中掺入适量的 Fe 不仅促进了 SiC 纤维表面非晶纳米线的生长,而且提高了纤维的介电常数和磁导率,导致反射损耗峰向低频段偏移。其中,当 PCS 和 Fe 的质量比为 3 : 0.5 时, Fe/SiC 杂化纤维在 6.4 GHz 处的最小反射损耗值为 -46.3 dB,且服从 $\lambda/4$ 模型 [图 7(c)]。与已报道的一维 SiC 复合材料相比, Fe/SiC 杂化纤维在整个 C 波段 (4~8 GHz) 可实现有效吸收,证明了 Fe/SiC 杂化纤维是 C 波段高效轻质吸收材料的理想候选材料。

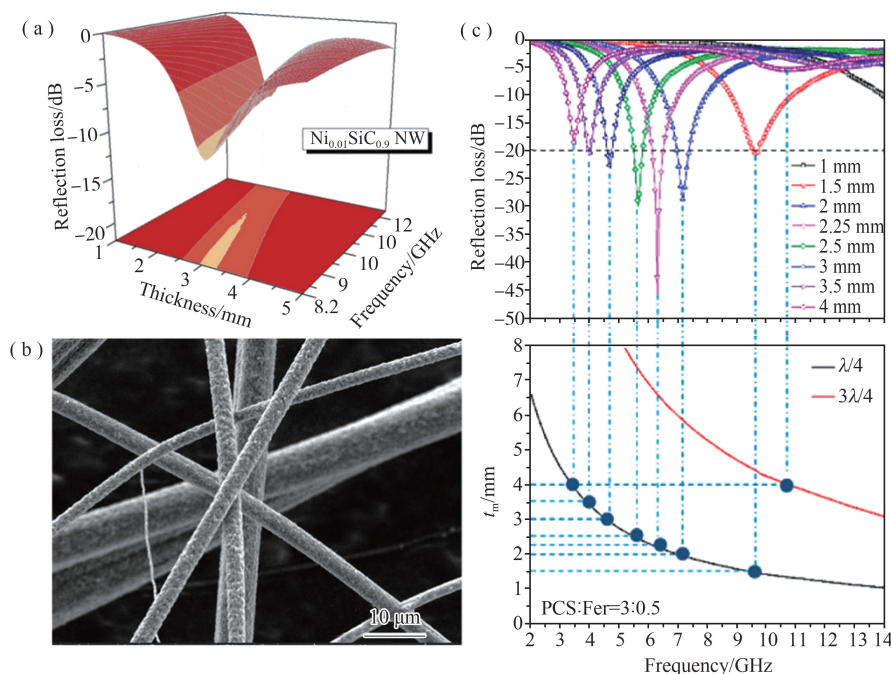


图 7 (a) $\text{Ni}_{0.01}\text{SiC}_{0.99}$ 纳米线的 3D R_L 图^[104]; (b) 在 1 400 °C 热解后, Co/SiC-3 复合纤维的 SEM 图^[106]; (c) 1 300 °C 热解下的 Fe/SiC 杂化纤维电磁波吸收性能的 2D R_L 图 (右上) 以及 $\lambda/4$ 和 $3\lambda/4$ 随频率的变化关系图 (右下)^[107]

Fig. 7 (a) 3D patterns of reflection loss of $\text{Ni}_{0.01}\text{SiC}_{0.99}$ nanowires^[104]; (b) SEM images of Co/SiC-3 composite fibers after pyrolysis at 1 400 °C, (c) 2D R_L diagram of electromagnetic wave absorption performance (top right)^[106]; $\lambda/4$ and $3\lambda/4$ versus frequency image (lower right) for Fe/SiC hybrid fibers pyrolysis at 1 300 °C^[107]

除了纳米磁性金属掺杂外,磁性氧化物(包括:金属磁性氧化物、铁氧体等)和磁性金属合金的引入也能有效提高电磁波吸收性能^[25]。与铁氧体相比,磁性金属容易氧化和腐蚀,而 Fe_3O_4 自旋极化强,兼容性好,具有高化学稳定性和高居里温度,常与介电材料结合增加磁损耗能力^[108-110]。Liang 等人^[111]采用多元醇法

以 SiC 纳米线为核心, Fe_3O_4 纳米颗粒为外壳合成了具有介电-磁协同效应的复合纳米线。通过改变前驱体的重量比来调节 Fe_3O_4 纳米颗粒的覆盖密度。与未处理的 SiC 纳米线相比, SiC- Fe_3O_4 纳米线的磁损耗能力得到增强,并改善了其阻抗匹配。通过该方法合成的 SiC- Fe_3O_4 纳米线在 8.6 GHz 时的最小反射损耗值达到了 -51 dB。SiC 晶须和 SiC 纳米线都具有独特的形貌、较大的比表面积和量子尺寸效应。Dong 等人^[112]通过简单的溶剂热法成功地构建了锚定在 SiC 晶须上的 Fe_3O_4 纳米颗粒(FSWs)。通过调整乙酰丙酮铁的初始加入量来有效控制材料形貌和电磁波吸收性能。FSWs 在 12.22 GHz、匹配厚度为 2.55 mm 时的最小反射损耗值低至 -72.33 dB,有效吸收带宽范围为 10.16~16.22 GHz。

磁性金属合金(FeCo, CoNi, FeCoNi 合金等)与纯金属相比,其强度、延展性和高温稳定性都有所提高,在电催化和电磁波吸收领域得到广泛研究^[113,114]。Wei 等人^[115]在低温高真空下,在 SiC 纤维(SiC_f)上制备了 FeCo 磁性薄膜。与 SiC 纤维相比,FeCo/ SiC_f 复合材料在 2~18 GHz 范围内具有优异的电磁波吸收性能,其最佳反射损耗从 -5.03 dB 提高到 -25.51 dB。这种优异的性能可能是由于磁性 FeCo 薄膜和 FeCo/ SiC_f 同轴结构(SiC_f 为内芯,FeCo 为外膜)所产生的磁损耗和介电损耗之间的协同作用,使得 FeCo/ SiC_f 复合材料具有优异的电磁波吸收性能。

上述研究成果表明, SiC 复合磁性材料可以有效实现磁损耗和介电损耗之间的互补。比如,与磁性金属复合后可以实现宽有效吸收带宽以及增强其在低频范围内的吸收性能;在 SiC 中引入 Fe_3O_4 后会产生多界面,促进复合材料产生磁共振。一方面,磁性材料的引入可以通过生成大量界面和磁畴微结构来有效改善阻抗匹配^[25]。另一方面,电磁波损耗过程更加多样化,存在多种损耗机制。因此, SiC 与磁性材料的复合可以成为构建高性能电磁波吸收材料的有效途径。

2.2.3 一维 SiC 复合 MXene 基吸波材料。 近年来,由于具有高导电性、大比表面积和丰富的表面官能团,二维 MXene 作为一种前沿的二维材料在电磁波吸收和屏蔽领域得到了广泛关注^[116-119]。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 作为具有代表性的层状导电材料,其中 T_x 代表表面官能团($-\text{OH}$, $=\text{O}$, $-\text{F}$)^[120],其与一维 SiC(SiC 纳米线、SiC 纤维等)桥接构建的三维导电网络,可以得到丰富的界面和导电通路,改善 SiC 材料的复介电常数,因此,采用 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 作为掺杂剂改善 SiC 的介电性能是合理的。Wang 等人^[121]采用直接吸滤技术制备了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 复合串珠状 SiC_{nw} 膜(M-SiC_{nw}膜),其在匹配厚度为 1.58 mm 时,有效吸收带宽为 3.36 GHz,最小反射损耗值为 -41.7 dB。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 的掺入和缺陷形成了多个非均质界面,并提供了高导电性的电子传输途径,提高电导率,从而改善复合材料的电磁波吸收能力。M-SiC_{nw} 薄膜的电磁波吸收机理如图 8(a)所示。少层 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 的高导电性和少/单层结构使其成为电磁波吸收领域中很有前途的一类材料。Li 等人^[120]首次采用自组装和双向冷冻相结合的方法,合成了具有超低密度的有序层状(少层 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 记为 f- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)f- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /SiC_{nw} 复合泡沫材料。当 f- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /SiC_{nw} 复合泡沫的样品厚度在 3.5~3.8 mm 之间时,有效吸收带宽能够覆盖整个 X 波段,在密度仅为 0.029 g/cm³ 时,最小反射损耗值为 -55.7 dB。该复合泡沫具有优异的电磁波吸收性能,优于目前大多数基于泡沫的同类材料,f- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /SiC_{nw} 吸波机理如图 8(b)所示。该复合泡沫的合成成为探索少层的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 复合 SiC 材料的电磁波吸收材料奠定了基础。

另外,聚偏二氟乙烯(PVDF)具有优异的化学稳定性、耐热性和高极化等特点^[122],可被用于制备耐高温电磁波吸收材料。而二维 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片与一维 SiC 纳米线的协同作用在聚合物基体中可以产生许多非均相界面,增强复合材料的界面极化^[123]。Ma 等人^[123]在 PVDF 基体上,通过静电自组装、溶液浇铸和热压工艺制备了 PVDF/SiC_{nw}/MXene 复合材料。图 8(c,d)为 PVDF/SiC_{nw}(其中 SiC_{nw} 质量分数为 20%)复合材料和 PVDF/SiC_{nw}@MXene(其中 SiC_{nw}@MXene 质量分数为 20%,且 SiC_{nw} 和 MXene 的质量比为 7:1)复合材料电磁波吸收性能的 3D R_L 图。PVDF/SiC_{nw}/MXene 复合材料经过优化后,在 Ku 波段实现 5.0 GHz 的有效吸收带宽。在 1.45~1.5 mm 的匹配厚度范围内,最小反射损耗值为 -75.8 dB。该实验证明了一维 SiC 纳米线和二维 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 在聚合物基体中的协同效应,并为开发高性能柔性电磁波吸收材料提供了理论依据。

MXene 的表面化学活性和丰富的亲水性官能团,可以极大地促进材料的表面改性和基于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MX-

ene 的导电多功能复合材料的合成。另外,聚合物具有可调的介电性能,使得复合材料可以形成丰富的异质界面。引入 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 材料和聚合物可调节 SiC 材料的复介电常数,改善阻抗匹配,使得复合材料具有优越的电磁波吸收性能。

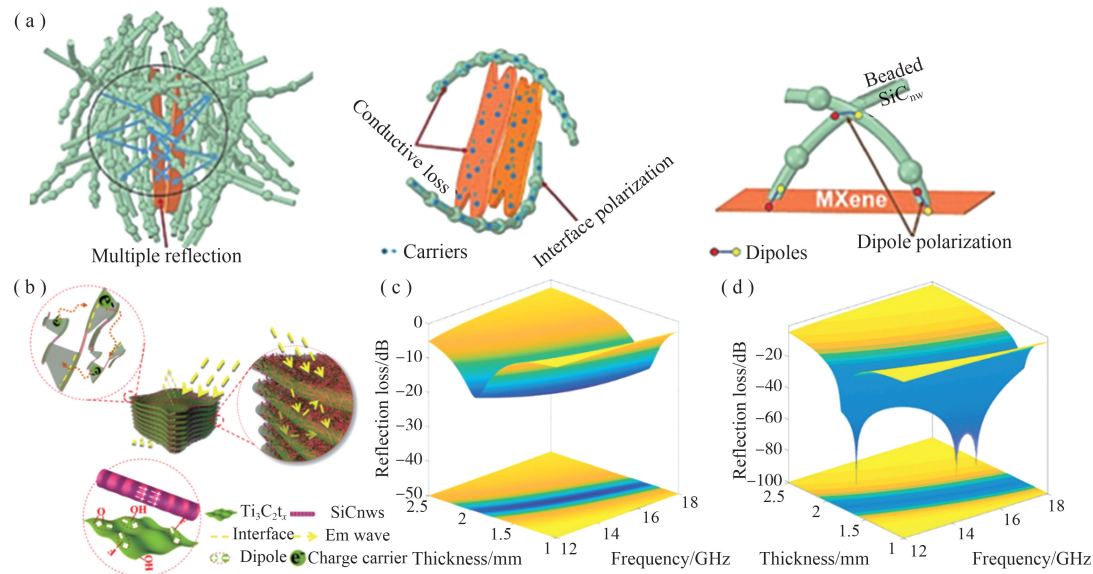


图 8 (a) M-SiC_{nw} 薄膜电磁波吸收机理示意图^[121]; (b) f-Ti₃C₂T_x/SiC_{nw} 的电磁波吸收机理图^[120]; (c) PVDF/SiC_{nw} 和 (d) PVDF/SiC_{nw}@MXene 的电磁波吸收性能的 3D R_L 图^[123]

Fig. 8 (a) Schematic diagram of the microwave absorption mechanism of M-SiC_{nw} thin film^[121]; (b) Electromagnetic wave absorption mechanism diagram of f-Ti₃C₂T_x/SiC_{nw}^[120]; 3D R_L diagrams of electromagnetic wave absorption performance for (c) PVDF/SiC_{nw} and (d) PVDF/SiC_{nw}@MXene^[123]

表 1 近年来一维 SiC 复合材料在电磁波吸收中的应用

Tab. 1 Application of 1D SiC composites in EMW absorption in recent years

Materials	Key methods	EMW absorption performance			Ref.
		R_L /dB	EAB/GHz	Thickness/mm	
SiC _{nw} /SiC	3D printing process	-49.01	5.1	2.2	22
SiC _{nw} /SiC _w foam	pray drying/3D printing processes	-57	4		43
SiC@C nanowires	in situ polymer encapsulation	-50	12		82
C/SiC _{nw}	electrospinning process	-27.8	4.7	1.7	90
rGO/SiC _{nw} foam	freeze-drying process	-19.6	4.2	3	94
SiC _{nw} /GA-PPy foams	chemical vapor infiltration process	-53.5	6.4	2.32	99
Co/SiC fiber mat	electrospinning process		8	2.8	106
FSWs	solvothermal process	-72.33	6.06	2.55	112
f-Ti ₃ C ₂ T _x /SiC _{nw} hybrid foams	self-assembly/bidirectional	-55.7	0.3		120
	freezing processes				
M-SiC _{nw} film	vacuum filtration process	-41.7	3.36	1.58	121
PVDF/SiC _{nw} /MXene	electrostatic self-assembly/solution	75.8	5		123
nanocomposites	casting/hot pressing processes				
	hydrothermal process	-63.71	7.48	3.1	125
Ni/C@SiC	precursor infiltration pyrolysis	-25.87		5	127
CNT/SiC _f	a short-time induction heating process	-62.5	8.8	4	128
SiC _{nw} /CF	carbonizing process	-55.27	2.08	3.11	129
NiFe ₂ O ₄ /SiC@SiO ₂	sol-gel method	-32.26	2.1	3	130

综上所述, SiC 材料已被研究作为介电损耗型电磁波吸收材料, 通常与介电或导电材料复合^[124]。SiC 与碳基材料、磁性材料、MXene 的二元复合, 可以在不同组分之间形成异质界面, 带来丰富的界面极化和较强的介电损耗能力, 还可以进一步强化材料的磁损耗能力, 从而优化本征 SiC 材料的电磁波吸收性能。除了二元复合外, 研究人员还研究了三元及以上的 SiC 基复合材料用于电磁波吸收, 例如: 三元 SiC@C-Fe₃O₄^[125]、SiC@SiO₂@Fe₃O₄^[126]、Ni/C@SiC^[127]等。不同一维 SiC 基复合电磁波吸收材料的性能比较见表 1。然而, 一味追求更高的介电损耗容易导致电磁波吸收材料出现阻抗失配现象, 而降低吸收性能。总之, 电磁波吸收性能不仅需要考虑材料的衰减能力, 还需要考虑阻抗匹配对材料的影响。因此, 通过提高 SiC 的导电性和合理引入多种损耗机制来改善 SiC 的电磁波吸收性能非常必要。

3 结论与展望

SiC 材料由于其优异的介电性能、热稳定性和化学稳定性, 被广泛用作高温电磁波吸收材料。然而, 纯 SiC 材料由于其损耗机制的单一性, 以及其固有的高复介电常数, 使得单组分的 SiC 材料不能满足良好的阻抗匹配, 在一定程度上限制了 SiC 材料在电磁波吸收领域的应用。目前, 改善 SiC 材料的吸收性能的方法主要有: 一是通过结构设计(多孔结构、核壳结构等)和形貌调控的方式, 强化电子极化与界面极化效应, 提高 SiC 材料的电磁波衰减能力, 增强阻抗匹配性能; 二是与碳基材料、磁性材料和导电损耗材料进行多元复合, 通过形成大量异质界面、磁畴微结构, 调节复介电常数来有效改善阻抗匹配和衰减能力, 实现吸收性能的增强和有效吸收带宽的拓宽。

虽然一维 SiC 吸波材料的电磁波损耗能力已有较大提高, 但是其仍然面临一些亟需解决的问题。首先, 合成一维 SiC 材料的方法丰富多样, 但合成过程中工艺复杂, 收率低, 溶剂有毒, 形状不可控, 制造过程中有毒气体排放等问题, 使得 SiC 的商业化生产面临着重大挑战。其次, 通过结构、形貌调控以及材料复合虽然可以优化 SiC 材料的电磁波吸收性能, 朝着“薄、轻、宽、强”的发展方向发展, 但对材料的损耗机制了解并不深入, 且大多研究集中在材料的中高频段, 很少有关于 SiC 吸波材料在低频段吸收的理论依据。最后, SiC 复合材料在电磁波吸收领域展示了优异的一面, 但如何进一步发展一维 SiC 材料的多功能性, 以应对恶劣的环境仍具有重要研究意义。

基于以上存在的问题和挑战, 今后主要的研究方向可能会包括 3 个方面: (1) 开发新的方法以合成质量更好、更稳定的 SiC 纳米材料, 或优化现有的方法, 降低生产成本, 实现大规模合成环境友好、高产、低能耗的 SiC 纳米材料。(2) 通过单一形貌和单一组分的 SiC 难以满足实际需求, 在对 SiC 材料的结构调整和形貌调控研究中, 需要加强对机理的研究。基于本征 SiC 材料的吸波机理, 充分发挥 SiC 复合材料的结构和功能优势。加强复合材料制备、机理分析和仿真计算方面的自主研究和协同开发, 充分利用材料模拟计算、材料信息学与实验验证等手段, 构建材料成分-结构-性能关系模型, 以此为基础进行相关的材料设计与制备, 从而获得反射损耗值小于 -50 dB、匹配厚度小于 2 mm、宽有效吸收带宽 10 GHz 的 SiC 吸波材料。低频段的电磁波吸收性能仍然是 SiC 吸波材料的发展方向之一, 为实现低频段吸收, 需要重点关注低频段吸收背后的机理, 从机理出发将有望制备出应用于 5G/6G 通讯技术中的低频段电磁波吸收材料。(3) 研发具有柔性、可穿戴、超疏水、光响应和耐高温等性能的多功能一维 SiC 吸波材料, 更好地实现其在复杂环境中的应用, 扩大其在不同领域中的应用, 来满足日益增长的实际需求。通过合理的组分控制、结构设计和材料复合, 可以挖掘一维 SiC 材料在电磁波衰减方面的潜力, 以应对复杂的军事电磁环境下(海洋、高温、超音速)服役的军事装备的隐身要求, 并朝着多功能性、兼容性和环保性发展, 为超薄、超轻、高效的雷达隐身材料的大规模生产和应用提供可能。

参 考 文 献

- [1] ZENG X, JIANG X, NING Y, et al. Construction of dual heterogeneous interface between zigzag-like Mo-MXene nanofibers and small CoNi@NC nanoparticles for electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2023, 12(8): 1562-1576.
- [2] ZENG X, ZHAO C, JIANG X, et al. Functional tailoring of multi-dimensional pure MXene nanostructures for significantly accelerated e-

- lectromagnetic wave absorption[J]. *Small*, 2023, 19(41): 2303393.
- [3] ZENG X, JIANG X, NING Y, et al. Constructing built-in electric fields with semiconductor junctions and Schottky junctions based on Mo-MXene/Mo-metal sulfides for electromagnetic response[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(1): 213-218.
- [4] WU Y, TAN S, ZHAO Y, et al. Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 135: 101088.
- [5] ZENG X, ZHAO C, NIE T, et al. Construction of 0D/1D/2D MXene nanoribbons-NiCo@NC hierarchical network and their coupling effect on electromagnetic wave absorption[J]. *Materials Today Physics*, 2022, 28: 100888.
- [6] ZENG X, PENG X, NING Y, et al. 3D multifunctional porous pine carbon aerogels coupled with highly dispersed CoFe nanoparticles for robust electromagnetic wave response[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 192: 6-18.
- [7] WANG H, ZHANG H, CHENG J, et al. Building the conformal protection of VB-group VS₂ laminated heterostructure based on biomass-derived carbon for excellent broadband electromagnetic waves absorption[J]. *Journal of Materiomics*, 2023, 9(3): 492-501.
- [8] ZENG X, NIE T, ZHAO C, et al. In situ exsolution-prepared solid-solution-type sulfides with intracrystal polarization for efficient and selective absorption of low-frequency electromagnetic wave[J]. *Advanced Science*, 2024, 11: 2403723.
- [9] ZENG X, LI E, XIA G, et al. Silica-based ceramics toward electromagnetic microwave absorption[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(15): 7381-7403.
- [10] ZHANG Y, LI J H, GE M, et al. Transparent PVDF-based electrolyte enabled by lipophilic lithium magnesium silicate for solid-state lithium batteries[J/OL]. *Rare Metals*, 2024, [2024-08-19]. <https://doi.org/10.1007/s12598-024-02858-8>.
- [11] 阿拉腾沙嘎, 陈星, 陈冠宏. 冷冻铸造法制备仿生梯度层状结构 SiC 多孔陶瓷[J]. *陶瓷学报*, 2022, 43(1): 90-99.
- [12] LV H, YANG Z, PAN H, et al. Electromagnetic absorption materials: current progress and new frontiers[J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 127: 100946.
- [13] ZOU Z, NING M, LEI Z, et al. 0D/1D/2D architectural Co@C/MXene composite for boosting microwave attenuation performance in 2-18 GHz[J]. *Carbon*, 2022, 193: 182-194.
- [14] WU R, ZHOU K, YUE C Y, et al. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 72: 1-60.
- [15] ZHANG Y, HAN X, ZHENG K, et al. Direct observation of super-plasticity of beta-SiC nanowires at low temperature[J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(17): 3435-3440.
- [16] 王逸民, 宋华平, 胡正发, 等. 4H-SiC 外延层中 BPD 向 TED 转化的深度及分布特征[J]. *材料研究与应用*, 2023, 17(2): 342-345.
- [17] LI C, CAI Y, HU J, et al. SiC/graphene film by laser CVD as an implantable sensor material for dopamine detection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(22): 27399-27410.
- [18] YANG R, QIAN J, FENG P X L. Electrodynamics force, Casimir effect, and stiction mitigation in silicon carbide nanoelectromechanical switches[J]. *Small*, 2020, 16(51): 2005594.
- [19] CHEN S, SHANG M, WANG L, et al. Superior B-doped SiC nanowire flexible field emitters: ultra-low turn-on fields and robust stabilities against harsh environments[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(40): 35178-35190.
- [20] Zou X, Ji L, Hsu H Y, et al. Designed synthesis of SiC nanowire-derived carbon with dual-scale nanostructures for supercapacitor applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(26): 12724-12732.
- [21] LI Z, LI J, WANG W, et al. Near zero-threshold voltage p-n junction diodes based on super-semiconducting nanostructured Ag/Al arrays[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(13): 2210612.
- [22] WANG C, WU S, LI Z, et al. 3D printed porous biomass-derived SiCnw/SiC composite for structure-function integrated electromagnetic absorption[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 17(3): 718-733.
- [23] WANG X, HUANG L, LIU T, et al. Reduced graphene oxide-Ni@multiscale carbon nanofibers with core-shell porous structure for microwave absorption performance[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 173: 107621.
- [24] WANG Y, ZHU L, HAN L, et al. Recent progress of one-dimensional nanomaterials for microwave absorption: a review[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(9): 7107-7122.
- [25] DING C, SHAO C, WU S, et al. A review of 1D carbon-based materials assembly design for lightweight microwave absorption[J]. *Carbon*, 2023, 213: 118279.
- [26] HOU Y, CHENG L, ZHANG Y, et al. High temperature electromagnetic interference shielding of lightweight and flexible ZrC/SiC nanofiber mats[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 404: 126521.
- [27] HOU Y, CHENG L, ZHANG Y, et al. SiC nanofiber mat: a broad-band microwave absorber, and the alignment effect[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(49): 43072-43080.
- [28] GUO Y, PAN L, YANG X, et al. Simultaneous improvement of thermal conductivities and electromagnetic interference shielding performances in polystyrene composites via constructing interconnection oriented networks based on electrospinning technology[J]. *Compos-*

- ites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 124: 105484.
- [29] HUANG L, LI J, LI Y, et al. Lightweight and flexible hybrid film based on delicate design of electrospun nanofibers for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(17): 8616-8625.
- [30] 王喜花, 刘涛, 黄丽, 等. 静电纺丝技术制备复合纳米纤维电磁屏蔽及吸波材料的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1300-1310.
- [31] SHEPA I, MUDRA E, DUSZA J. Electrospinning through the prism of time[J]. *Materials Today Chemistry*, 2021, 21: 100543.
- [32] LIU Y, HOU H, HE X, et al. Mesoporous 3C-SiC hollow fibers[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1893.
- [33] HOU H, GAO F, WEI G, et al. Electrospinning 3C-SiC mesoporous fibers with high purities and well-controlled structures[J]. *Crystal Growth & Design*, 2012, 12(1): 536-539.
- [34] ZHANG N, LI J, LI W, et al. High performance three-dimensionally ordered macroporous composite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells[J]. *RSC Advances*, 2012, 2(3): 802-804.
- [35] TALLON C, FRANKS G V. Recent trends in shape forming from colloidal processing: a review[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2011, 119(1387): 147-160.
- [36] HUANG H, LIN J, WANG Y, et al. Facile one-step forming of NiO and yttrium-stabilized zirconia composite anodes with straight open pores for planar solid oxide fuel cell using phase-inversion tape casting method[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 274: 1114-1117.
- [37] LIU T, WANG Y, ZHANG Y, et al. Steam electrolysis in a solid oxide electrolysis cell fabricated by the phase-inversion tape casting method[J]. *Electrochemistry Communications*, 2015, 61: 106-109.
- [38] FUKASAWA T, DENG Z Y, ANDO M, et al. Pore structure of porous ceramics synthesized from water-based slurry by freeze-dry process[J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36: 2523-2527.
- [39] HEDAYAT N, DU Y, ILKHANI H. Review on fabrication techniques for porous electrodes of solid oxide fuel cells by sacrificial template methods[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77: 1221-1239.
- [40] SCHMIDT C G, HANSEN K K, ANDERSEN K B, et al. Effect of pore formers on properties of tape cast porous sheets for electrochemical flue gas purification[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36(3): 645-653.
- [41] YAO Y, ZHU X, ZENG X, et al. Vertically aligned and interconnected SiC nanowire networks leading to significantly enhanced thermal conductivity of polymer composites[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(11): 9669-9678.
- [42] QIN Q, CHEN J, SONG M, et al. Preparation of SiC nanowires based on graphene as the template by microwave sintering[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 910: 164746.
- [43] LÜ X, YE F, CHENG L, et al. 3D printing "wire-on-sphere" hierarchical SiC nanowires/SiC whiskers foam for efficient high-temperature electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 109: 94-104.
- [44] BYAMBAA B, KIM E J, SEID M G, et al. Synthesis of N-doped sludge biochar using the hydrothermal route-enabled carbonization method for the efficient degradation of organic pollutants by peroxymonosulfate activation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 456: 141037.
- [45] WU Z, WANG L, WANG Y, et al. A novel hydrothermal method to synthesize brookite titanium dioxide nanosquares for efficient pollutant degradation[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(6): 3071-3076.
- [46] YEWALE M A, KUMAR V, KADAM R A, et al. Wrapped nanochain microstructures of $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$ nanoparticles for supercapacitor applications using the hydrothermal method[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73: 109005.
- [47] GUO C, TANG Y, PEI L, et al. Silicon carbide nanotubes with special morphology prepared by super critical hydrothermal method and photoluminescence character[J]. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 2011, 15(6): 538-541.
- [48] JU Z, XING Z, GUO C, et al. Sulfur-assisted approach for the low-temperature synthesis of β -SiC nanowires[J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2008(24): 3883-3888.
- [49] LIU D, ZHANG C, XUE Y. Chemical vapor deposition derived ultralong SiC nanofibers: structural characterization and growth mechanism[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2023, 20(3): 1617-1623.
- [50] REINA A, JIA X, HO J, et al. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(1): 30-35.
- [51] LI X, CAI W, JUNG I H, et al. Synthesis, characterization, and properties of large-area graphene films[J]. *ECS Transactions*, 2009, 19(5): 41.
- [52] 汪涵, 尹珑龙, 郭晴, 等. 纳米碳化硅的制备与应用研究进展[J]. *广东化工*, 2022, 49(8): 84-86.
- [53] WANG J, REN Z, HOU Y, et al. A review of graphene synthesis at low temperatures by CVD methods[J]. *New Carbon Materials*, 2020, 35(3): 193-208.
- [54] COCERA N, DE ESPARZA N R, OCANA I, et al. Oxidation resistance of highly porous CVD-SiC coated Tyranno fiber composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31(6): 1155-1164.

- [55] HU L, ZOU Y, LI C H, et al. Preparation of SiC nanowires on graphite paper with silicon powder[J]. *Materials Letters*, 2020, 269: 127444.
- [56] CHOI H J, SEONG H K, LEE J C, et al. Growth and modulation of silicon carbide nanowires[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 269(2-4): 472-478.
- [57] KANG B C, LEE S B, BOO J H. Growth of β -SiC nanowires on Si (100) substrates by MOCVD using nickel as a catalyst[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 464: 215-219.
- [58] ZELLER P, WEINL M, SPECK F, et al. Single crystalline metal films as substrates for graphene growth[J]. *Annalen der Physik*, 2017, 529(11): 1700023.
- [59] ATTOLINI G, ROSSI F, NEGRI M, et al. Growth of SiC NWs by vapor phase technique using Fe as catalyst[J]. *Materials Letters*, 2014, 124: 169-172.
- [60] XUE Y, WU B, GUO Y, et al. Synthesis of large-area, few-layer graphene on iron foil by chemical vapor deposition[J]. *Nano Research*, 2011, 4: 1208-1214.
- [61] SUN X, LIN L, SUN L, et al. Graphene: low-temperature and rapid growth of large single-crystalline graphene with ethane[J]. *Small*, 2018, 14(3): 1870011.
- [62] SUN Z G, WANG S J, QIAO X J, et al. Synthesis and microwave absorbing properties of SiC nanowires[J]. *Applied Physics A*, 2018, 124(12): 802.
- [63] WEI J, ZHANG Y, LI X, et al. Recent progress in synthesis, growth mechanisms, and electromagnetic wave absorption properties of silicon carbide nanowires[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(24): 35966-35985.
- [64] 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.
- [65] ZHANG J, LI W, JIA Q, et al. Molten salt assisted synthesis of 3C-SiC nanowire and its photoluminescence properties[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(10): 12614-12620.
- [66] YUAN K, HAN D, LIANG J, et al. Microwave induced in-situ formation of SiC nanowires on SiCNO ceramic aerogels with excellent electromagnetic wave absorption performance[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, 10: 1140-1151.
- [67] GARNETT E, MAI L, YANG P. Introduction: 1D nanomaterials/nanowires[J]. *Chemical Reviews*, 2019, 119(15): 8955-8957.
- [68] 袁宝国, 张德宾, 徐国芬, 等. 聚苯胺纳米纤维/还原氧化石墨烯复合吸波材料的制备与性能[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(6): 43-49.
- [69] GU W, LV J, QUAN B, et al. Achieving MOF-derived one-dimensional porous ZnO/C nanofiber with lightweight and enhanced microwave response by an electrospinning method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 806: 983-991.
- [70] HUANG H, LI B, ZHAO C, et al. Construction of strong coupling interface between CoZn@NC and CuS for ultrathin electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Ceramics*, 2024, 45(1): 89-96.
- [71] CHEN S, LI W, LI X, et al. One-dimensional SiC nanostructures: designed growth, properties, and applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 104: 138-214.
- [72] LI X, LI W, LIU Q, et al. Robust high-temperature supercapacitors based on SiC nanowires[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(8): 2008901.
- [73] 李俊怡, 王军凯, 韩磊, 等. 以 Fe 为催化剂低温碳化反应合成 SiC 粉体[J]. *陶瓷学报*, 2017, 38(5): 722-725.
- [74] LAN X, LI Y, WANG Z. High-temperature electromagnetic wave absorption, mechanical and thermal insulation properties of in-situ grown SiC on porous SiC skeleton[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 397: 125250.
- [75] LIU J, WANG Z, HAO H, et al. Nanopore construction in SiC aerogels for continuous dual-peak electromagnetic wave absorption with full Ku-band coverage[J]. *Carbon*, 2024, 224: 119096.
- [76] 夏元佳, 陈国兵, 赵爽, 等. 碳化硅基材料在电磁波吸收领域的研究进展[J]. *化学进展*, 2024, 36(1): 145-158.
- [77] LIU N, DOU Y, ZHANG X, et al. Design of porous FeNi-carbon nanosheets by a double-effect synergistic strategy for electromagnetic wave absorption[J]. *Carbon*, 2022, 190: 125-135.
- [78] ZHEN X, PEI X, WANG Y, et al. Crosslinking kinetics of polycarbosilane precursor in ozone atmosphere and the formation mechanism of continuous hollow SiC fiber[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(6): 2028-2035.
- [79] GUO L, AN Q D, XIAO Z Y, et al. Inherent N-doped honeycomb-like carbon/ Fe_3O_4 composites with versatility for efficient microwave absorption and wastewater treatment[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(10): 9237-9248.
- [80] LIU D, DU Y, XU P, et al. Waxberry-like hierarchical Ni@C microspheres with high-performance microwave absorption[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(17): 5037-5046.
- [81] ZHU B, CUI Y, LV D, et al. Synthesis and electromagnetic wave absorption properties of peanut shell-like SiC fibers[J]. *Materials Letters*, 2020, 263: 127288.

- [82] LIANG C, WANG Z. Controllable fabricating dielectric-dielectric SiC@C core-shell nanowires for high-performance electromagnetic wave attenuation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(46): 40690-40696.
- [83] CHEN X, SUN Z, NIU X, et al. Evolution of the structure and mechanical performance of Cansas-II SiC fibers after thermal treatment [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(19): 27217-27229.
- [84] KANG W, ZHANG Q, GOU Y. Fabrication of highly crystalline titanium-containing SiC fibers with different boron contents exhibiting excellent electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(7): 2739-2756.
- [85] 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.
- [86] LIU D, SHI B, WANG C, et al. Polymer-derived SiC ceramic aerogels with in-situ growth of SiC nanowires[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(7): 9157-9163.
- [87] DOU Q, ZHANG X H, WANG Y, et al. Structure control and growth mechanism of beaded SiC nanowires with microwave absorption properties[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2023, 296: 116657.
- [88] ZHANG B, ZHONG Z, TANG J, et al. Ultra-light 3D bamboo-like SiC nanowires felt for efficient microwave absorption in the low-frequency region[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(4): 6368-6377.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] HAO B, TAO Z, YAN X, et al. Synthesis and wave absorption characterization of SiC nanowires/expanded graphite composites[J]. *Carbon*, 2022, 196: 540-551.
- [92] ZHANG Y, HUANG Y, ZHANG T, et al. Broadband and tunable high-performance microwave absorption of an ultralight and highly compressible graphene foam[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(12): 2049-2053.
- [93] WANG Z, LI R, LIU H, et al. Reduced graphene oxide/SiC nanowire composite aerogel prepared by a hydrothermal method with excellent thermal insulation performance and electromagnetic wave absorption performance[J]. *Nanotechnology*, 2024, 35(13): 135703.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] YAN L, HONG C, SUN B, et al. In situ growth of cor-sheath heterostructural SiC nanowire arrays on carbon fibers and enhanced electromagnetic wave absorption performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(7): 6320-6331.
- [97] WU F, XIE A, SUN M, et al. Reduced graphene oxide (RGO) modified spongelike polypyrrole (PPy) aerogel for excellent electromagnetic absorption[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(27): 14358-14369.
- [98] ZHANG K, SUN M, JIANG W, et al. A core-shell polypyrrole@silicon carbide nanowire (PPy@SiC) nanocomposite for the broadband elimination of electromagnetic pollution[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(49): 43056-43059.
- [99] CHENG Y, HU P, ZHOU S, et al. Achieving tunability of effective electromagnetic wave absorption between the whole X-band and Ku-band via adjusting PPy loading in SiC nanowires/graphene hybrid foam[J]. *Carbon*, 2018, 132: 430-443.
- [100] ZHANG Q, LAN D, DENG S, et al. Constructing multiple heterogeneous interfaces in one-dimensional carbon fiber materials for superior electromagnetic wave absorption[J]. *Carbon*, 2024, 226: 119233.
- [101] QIAN J, SHUI A, DU B, et al. Synthesis and tunable electromagnetic shielding and absorption performance of the three-dimensional SiC nanowires/carbon fiber composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(10): 4154-4161.
- [102] 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): 2100434.
- [103] ZHAO C, ZENG X, HUANG J, et al. MXene-derived titanate heterojunctions with lightweight and heat-resistant properties for electromagnetic wave absorption[J]. *Carbon*, 2024, 228: 119422.
- [104] KUANG J, XIAO T, ZHENG Q, et al. Dielectric permittivity and microwave absorption properties of transition metal Ni and Mn doped SiC nanowires[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(9): 12996-13002.
- [105] HAN M G, GUO W, DENG L J. Microwave permeability of single cobalt nanotube studied by micromagnetics simulations and generalized Snoek's law[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57: 254-258.
- [106] HOU Y, YANG Y, DENG C, et al. Implications from broadband microwave absorption of metal-modified SiC fiber mats[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(28): 31823-31829.
- [107] HOU Y, CHENG L, ZHANG Y, et al. Electrospinning of Fe/SiC hybrid fibers for highly efficient microwave absorption[J]. *ACS Ap-*

- plied Materials & Interfaces, 2017, 9(8): 7265-7271.
- [108] QIAO M, LEI X, MA Y, et al. Application of yolk-shell Fe_3O_4 @N-doped carbon nanochains as highly effective microwave-absorption material[J]. Nano Research, 2018, 11: 1500-1519.
- [109] SAJID M, SHUJA S, RONG H, et al. Size-controlled synthesis of Fe_3O_4 and Fe_3O_4 @ SiO_2 nanoparticles and their superparamagnetic properties tailoring[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2023, 33(1): 116-119.
- [110] LI N, HUANG G, XIAO H, et al. Investigations on structure-dependent microwave absorption performance of nano- Fe_3O_4 coated carbon-based absorbers[J]. Carbon, 2019, 144: 216-227.
- [111] LIANG C, LIU C, WANG H, et al. SiC- Fe_3O_4 dielectric-magnetic hybrid nanowires: controllable fabrication, characterization and electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(39): 16397-16402.
- [112] DONG S, CHEN Y, HONG C. Synergetic impedance matching and loss ability towards efficient microwave absorption of Fe_3O_4 nanoparticles anchored on SiC whiskers via a simple solvothermal method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 838: 155558.
- [113] ZENG X, NIE T, ZHAO C, et al. Coupling between the 2D "ligand" and 2D "host" and their assembled hierarchical heterostructures for electromagnetic wave absorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(36): 41235-41245.
- [114] ZENG X, ZHANG Q, JIN C, et al. Fe-induced electronic transfer and structural evolution of lotus pod-like CoNiFeP_x @P, N-C heterostructure for sustainable oxygen evolution[J]. Energy & Environmental Materials, 2024, 7(3): e12628.
- [115] WEI Y, YUE J, TANG X, et al. Enhanced microwave-absorbing properties of FeCo magnetic film-functionalized silicon carbide fibers fabricated by a radio frequency magnetron method[J]. Ceramics International, 2017, 43(18): 16371-16375.
- [116] ZENG X, ZHAO C, YIN Y, et al. Construction of NiCo_2O_4 nanosheets-covered $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene heterostructure for remarkable electromagnetic microwave absorption[J]. Carbon, 2022, 193: 26-34.
- [117] PAN F, WU X, BATALU D, et al. Assembling of low-dimensional aggregates with interlaminar electromagnetic synergy network for high-efficient microwave absorption[J]. Advanced Powder Materials, 2023, 2(2): 100100.
- [118] ZENG X, DUAN D, ZHANG X, et al. Doping and interface engineering in a sandwich $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{MoS}_{2-x}\text{P}_x$ heterostructure for efficient hydrogen evolution[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2022, 10(11): 4140-4147.
- [119] 曾小军, 张祖梁, 金初龙. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米带/ MoCoP_x 异质结构的构筑及其高效电催化 OER 性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 190-197.
- [120] 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.
- [121] WANG Y, DOU Q, JIANG W, et al. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene beaded SiC nanowires for efficient microwave absorption[J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(7): 9209-9222.
- [122] GUO R, LUO H, ZHAI D, et al. Ultrahigh energy density in dielectric nanocomposites by modulating nanofiller orientation and polymer crystallization behavior[J]. Advanced Powder Materials, 2024, 3(5): 100212.
- [123] MA L, HAMIDINEJAD M, LIANG C, et al. Enhanced electromagnetic wave absorption performance of polymer/SiC-nanowire/MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) composites[J]. Carbon, 2021, 179: 408-416.
- [124] ZHANG K, XU Z, CHENG S, et al. Ambient synthesis of one-dimensional core-shell nanocomposites by encapsulating SiC nanowires with layered double hydroxide nanosheets for high-performance microwave absorption application[J]. Materials Today Physics, 2024, 40: 101289.
- [125] DUAN L, DAI X, WU F, et al. Controllable Fabrication of SiC@C- Fe_3O_4 hybrids and their excellent electromagnetic absorption properties[J]. Nanomaterials, 2021, 11(12): 3438.
- [126] ZHOU P, CHEN J, LIU M, et al. Microwave absorption properties of SiC@ SiO_2 @ Fe_3O_4 hybrids in the 2-18 GHz range[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2017, 24: 804-813.
- [127] YE X, ZHANG J, CHEN Z, et al. Microwave absorption properties of Ni/C@SiC composites prepared by precursor impregnation and pyrolysis processes[J]. Defence Technology, 2023, 21: 94-102.
- [128] XU J, XIA L, LUO J, et al. High-performance electromagnetic wave absorbing CNT/SiC_f composites: synthesis, tuning, and mechanism[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(18): 20775-20784.
- [129] LI H, DENG W, LI T, et al. Construction of SiCnws/carbon foam composites with multiple loss mechanisms for excellent electromagnetic wave absorption[J]. Synthetic Metals, 2022, 291: 117207.
- [130] WANG P, LIU P A, YE S. Preparation and microwave absorption properties of Ni(Co/Zn/Cu) Fe_2O_4 /SiC@ SiO_2 composites[J]. Rare Metals, 2019, 38: 59-63.

(责任编辑:蒲锡鹏)