

含 SiC 阵列改性涂层的新型 SiC/C_f 复合材料吸波性能研究

武志红¹, 邓悦¹, 蒙真真¹, 张国丽¹, 张路平^{1,2}, 王宇斌³

(1. 西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 西安 710055; 2. 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 先进耐火材料国家重点实验室, 洛阳 471039; 3. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 西安 710055)

摘要: 以葡萄糖、Si 粉、碳纤维为原料, 采用化学镀结合高温烧结两步法制备了具有 SiC 阵列改性涂层的新型 SiC/C_f 复合材料。采用不同手段表征 SiC/C_f 复合材料的相组成、微观结构和吸波特性。结果表明: 碳纤维表面包覆大量结合紧密、垂直表面向外生长的 SiC 阵列, 且阵列分布均匀, 高度约为 1.4 μm。当 SiC/C_f 复合材料厚度在 1~2 mm 范围内时, 随厚度增加, 最小反射损耗(RL_{\min})由高频向低频移动; 当厚度为 1.8 mm 时, 在 8.31 GHz 下的 RL_{\min} 为 -40.653 dB, 有效吸收带宽为 1.11 GHz ($RL < -10$ dB); 当厚度为 1.5 mm 时, 有效吸收带宽可达 2.42 GHz, 且厚度为 1.3~1.8 mm 时, RL_{\min} 均小于 -20 dB。SiC 阵列改性碳纤维新型 SiC/C_f 复合材料有望成为一种轻质高效的电磁波吸收材料。

关键词: 碳纤维; 阵列; SiC; 吸波性能

中图分类号: TB332 文献标识码: A

Microwave Absorbing Properties of Novel SiC/C_f Composites Containing SiC Array Modified Coating

WU Zhihong¹, DENG Yue¹, MENG Zhenzhen¹, ZHANG Guoli¹, ZHANG Luping^{1,2}, WANG Yubin³

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Refractories, Sinosteels Luoyang Institute of Refractories Research Co., Ltd., Luoyang, 471039, China; 3. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A novel SiC/C_f composite with SiC array modified coating was prepared by electroless plating combined with high temperature sintering using glucose, Si powder and carbon fiber as raw materials. The phase composition, microstructure and absorbing properties of SiC/C_f composites were characterized by different methods. The results show that the surface of the carbon fiber is coated with a large amount of SiC arrays, which grows outward on the surface of the carbon fiber. The SiC arrays are uniformly distributed and approximately 1.4 μm in height. When the thickness of SiC/C_f composite is about 1~2 mm, with the thickness increasing, the minimum reflection loss (RL_{\min}) moves from high frequency to low frequency. When the absorber thickness is 1.8 mm, the RL_{\min} reaches -40.653 dB at 8.31 GHz and the effective absorption bandwidth ($RL < -10$ dB) is 1.11 GHz. When the thickness is 1.5 mm, the minimum effective absorption bandwidth can reach 2.42 GHz. Additionally, the RL_{\min} is less than -20 dB when the

收稿日期: 2020-07-01; 收到修改稿日期: 2020-08-01; 网络出版日期: 2020-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(51974218); 先进耐火材料国家重点实验室开放基金(SKLR201905); 西安建筑科技大学基础研究基金(JC1496)

National Natural Science Foundation of China (51974218); Fund for the Opening of State Key Laboratory of Advanced Refractories (SKLR201905); Foundation of Basic Research of Xi'an University of Architecture and Technology (JC1496)

作者简介: 武志红(1974-), 男, 博士, 副教授. E-mail: zhihong@xauat.edu.cn

WU Zhihong(1974-), male, PhD, associate professor. E-mail: zhihong@xauat.edu.cn

absorber thickness ranges from 1.3 to 1.8 mm. This new SiC/C_f composite modified by SiC array is expected to be a lightweight and efficient electromagnetic absorbing material.

Key words: carbon fiber; array; SiC; microwave absorbing property

近年来,随着无线通讯和电子设备的广泛使用,电磁辐射污染日益严重,恶化的电磁环境会干扰电子仪器设备的正常工作,甚至引起设备的损坏^[1]。特别是在军事上,新型雷达、探测器相继问世,军事空中防御能力日益增强,使得飞机、导弹、舰艇、坦克等作战武器所面临的威胁越来越大。随着美国 B-2 隐形轰炸机、F-22 隐形战斗机、我国歼-20 和歼-31 隐形战斗机等新型武器的出现,作为提高战争中的生存能力、防卫能力和攻击能力的吸波材料,更加受到世界各国的高度重视^[2-7]。

理想的电磁波吸收材料应具有低密度、宽频带、强吸收、良好的热稳定性、抗氧化性和抗腐蚀性等特点^[8-10]。与传统的电磁波吸收材料(包括金属氧化物或硫化物)相比,碳基材料具有优异的物理化学性质,如良好的耐腐蚀性、重量轻、热稳定性好、吸收频带宽等,引起了人们的广泛兴趣^[11-12]。碳纤维(C_f)密度低、强度大、热膨胀系数小,适合作为电磁波吸收材料的基体^[13-15]。然而 C_f 的电阻率小,在电磁场作用下易形成较大的连续传导电流,对雷达波的反射较强;而且 C_f 表面缺乏活性官能团,表面活性低,界面结合性差。因此必须对碳纤维做改性处理,如用碳纳米管和 Ni 纳米颗粒改性的活性中空碳纤维(CNTs-Ni-ACHF),厚度为 2.0 mm 时在 13.1 GHz 的最小反射损耗(RL_{\min})为-43.4 dB,与 Ni-ACHF 和 ACHF 样品相比具有优异的微波吸收性能^[5]。吕晓艳等^[16]通过化学气相沉积(CVD)工艺在碳纤维(C_f)表面生成厚度约为 0.7 μm 的 α-Fe 膜,其有效吸收带宽增加 4.2 GHz,明显改善了电磁波吸收性能。LIU 等^[13]通过热氧化法合成了钴氧化物/碳纤维(CoO_x/C_f)复合材料,当厚度为 1.50 mm 时,13.41 GHz 下的 RL_{\min} 为-45.16 dB,具有优异的吸波性能。目前,改性 C_f 的研究焦点大多集中于涂层改性,特别是 SiC 涂覆 C_f 引起人们的广泛关注。WU 等^[17]通过熔盐辅助的化学气相沉积工艺在 C_f 表面生长大规模的 SiC 纳米线,长度可达数十微米,直径为 50~100 nm。制备的 SiC 纳米线/碳纤维

(SiC_{nw}/C_f)复合材料在 7.7 GHz 下 RL_{\min} 达-21.5 dB。ZHOU 等^[18]在碳纤维表面原位生长碳化硅纳米纤维(SiCNFs),直径为 20~50 nm,长径比为 100~150。当样品的厚度为 2 mm 时, RL_{\min} 可接近-19.9 dB。因此, SiC 的形貌和结构对其吸收性能有重要影响。

目前, C_f 表面涂覆 SiC 涂层的研究主要集中于纳米纤维、纳米线等,对 SiC 阵列涂层的研究相对较少。本研究采用化学镀结合高温烧结两步法制备了具有 SiC 阵列改性涂层的新型 SiC/C_f 复合材料,并研究其性能,期待独特的 SiC 阵列涂层结构可有效改善吸波性能。

1 实验方法

1.1 实验过程

将短切的 C_f (长约 3 mm, 直径约 7 μm, 纯度 >95%, TORAY T300)浸入无水乙醇中超声分散 24 h,除去表面油脂和杂质后,用去离子水洗涤。然后将其浸入浓度 10wt%的 NaOH 溶液中 30 min,然后通过离心收集短切纤维,并用去离子水洗涤至中性,在 90 °C 烘箱中干燥 10 h。

将预处理后的 C_f 放在 0.13 mol/L 的氯化亚锡和 5 mol/L 盐酸溶液中浸泡 5 min 后用去离子水洗涤,然后置于银氨溶液(13.33 mol/L 氨水和 0.35 mol/L 硝酸银)中浸泡 5 min 后用去离子水洗涤。最后,在 C_f 表面上进行化学镀 Ni, 镀液基本成份和工艺条件如表 1 所示。将制得的 C_f/Ni 0.35 mol/L 复合材料置于 5 mol/L 葡萄糖溶液中浸泡 12 h 后,倒掉上清液并在 90 °C 烘箱中干燥 10 h。然后将 6.7 g Si 粉与 1 g FeCl₃ 粉均匀混合并铺于石墨坩埚底部,将前面干燥的产物均匀铺在混合粉末上部,同时盖上石墨坩埚盖。最后,将样品放在通氮气的管式炉中 1450 °C 烧结并保温 1 h,制得 SiC/C_f 复合材料。

1.2 性能表征

通过 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 Advance 衍射仪)(Cu Kα 辐射, 波长为 0.15415 nm)在 $2\theta=5^\circ\sim90^\circ$

表 1 镀液基本成分和工艺条件

Table 1 Basic composition and process conditions of plating solution

| Composition | NaH ₂ PO ₄ / (mol·L ⁻¹) | C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ ·2H ₂ O/ (mol·L ⁻¹) | NiSO ₄ / (mol·L ⁻¹) | NH ₄ Cl/ (mol·L ⁻¹) | H ₂ O/mL | Temperature/°C | pH |
|--------------------|--|--|---|---|---------------------|----------------|-----|
| Process conditions | 0.38 | 0.26 | 0.15 | 1.87 | 200 | (90±2) | 8-9 |

范围内分析样品的相组成。采用带能量色散 X 射线光谱仪(EDS)的扫描电子显微镜(SEM)测试样品的元素分布和微观结构。将制备的 SiC/C_f 复合材料与石蜡以 3:7 的质量比混合均匀, 压制成 22.86 mm×10.16 mm×2.0 mm 的介电试样, 采用矢量网络分析仪(Agilent N5230A)在 X 波段(8.2~12.4 GHz)测定每个样品的相对介电常数 $\epsilon_r(\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'')$ 和相对磁导率 $\mu_r(\mu_r = \mu' - j\mu'')$ 等电磁参数, 最后, 利用传输线理论对微波吸收性能进行评价。不同厚度的 RL 值可由以下公式推导^[19]:

$$RL = 20 \lg |(Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)| \quad (1)$$

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

其中: Z_{in} 为吸收体的输入阻抗, Z_0 为自由空间阻抗, μ_r 、 ϵ_r 分别代表吸收体的相对磁导率和相对介电常数, f 代表入射电磁波的频率, c 代表真空中的光速, d 代表吸收体的厚度。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图 1 为 SiC/C_f 复合材料的 XRD 图谱。从图 1 中可以看出, 在 $2\theta=35.7^\circ$ 、 41.45° 、 60.05° 、 71.82° 和 75.38° 处具有明显的衍射峰, 与 SiC 标准卡片(PDF#29-1129)对比, 上述衍射峰分别对应立方 SiC(3C-SiC) 的(111)、(200)、(220)、(311)和(222)晶面, 且标准卡片三强峰对应的衍射峰较强, 表明生成了 SiC, 并具

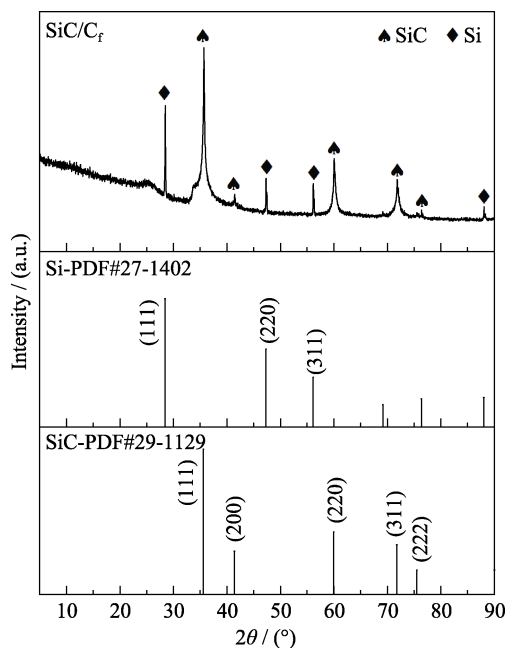


图 1 SiC/C_f 复合材料的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of SiC/C_f composite

有良好的结晶度。在 $2\theta=26^\circ$ 处观察到一个宽的衍射峰, 对应碳的馒头峰, 说明碳的石墨化程度低, 呈非晶态结构。除此之外还检测到 Si 的衍射峰, 这是由于在烧结过程中 Si 未完全转化为 SiC。

2.2 微观结构分析

为进一步了解 SiC/C_f 复合材料样品的显微结构, 分别在不同放大倍数下进行 SEM 观察, 结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, C_f 表面紧密包裹大量 SiC, 均匀分布于 C_f 表面, 且垂直其表面向外生长, 有序排列, 形成高度约为 1.4 μm 的 SiC 阵列。这些阵列结构使复合材料具有更大的比表面积, 而且各 SiC 阵列之间存在大量孔隙, 有助于丰富微波传输、衰减通道, 增强多重散射和吸收^[20]。这种阵列结构也有利于界面极化, 产生更好的微波吸收性能。在 SiC 阵列的表面还分布着少量呈弯曲状、相互交织的光滑 SiC 纳米线, 长度可达 1~10 μm , 形貌和直径较为均匀。

2.3 吸波性能分析

根据电磁能量转换理论, 材料的吸波性能受相对介电常数($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)和相对磁导率($\mu_r = \mu' - j\mu''$)影响。 ϵ' 、 μ' 分别为相对介电常数和相对磁导率的实部, 代表材料存储电能和磁能的能力; ϵ'' 、 μ'' 分别为相对介电常数和相对磁导率的虚部, 代表材料消耗电能和磁能的能力。SiC/C_f 复合材料在 X 波段的电磁参数(ϵ' 、 ϵ'' 、 μ' 、 μ'')如图 3 所示。

从图 3(a,b)中可以看出, ϵ' 值在 22.16~24.80 范围内波动, 并随频率的增大呈下降趋势, 这是由于复合材料在外加电磁场作用下, 随机偶极子的方向平行于外加电磁场, 引起偶极子极化, 但偶极子重排

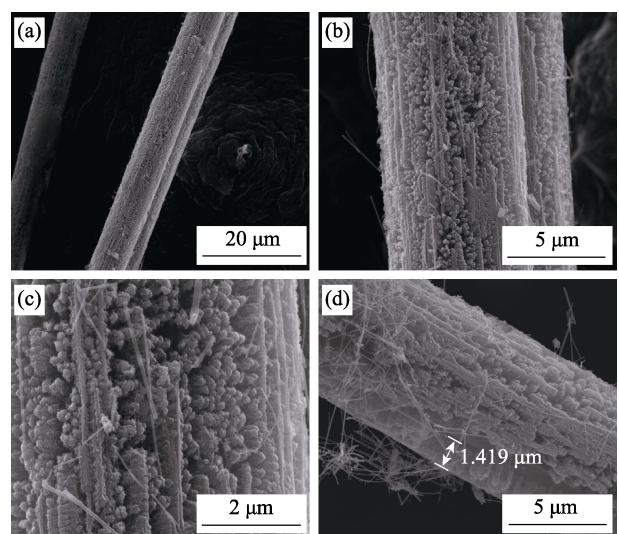


图 2 SiC/C_f 复合材料的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of SiC/C_f composite

(a) SiC tightly wrapped on the C_f; (b) SiC uniformly distributed; (c) SiC orderly arranged and insulated; (d) A few SiC nanowires distributed

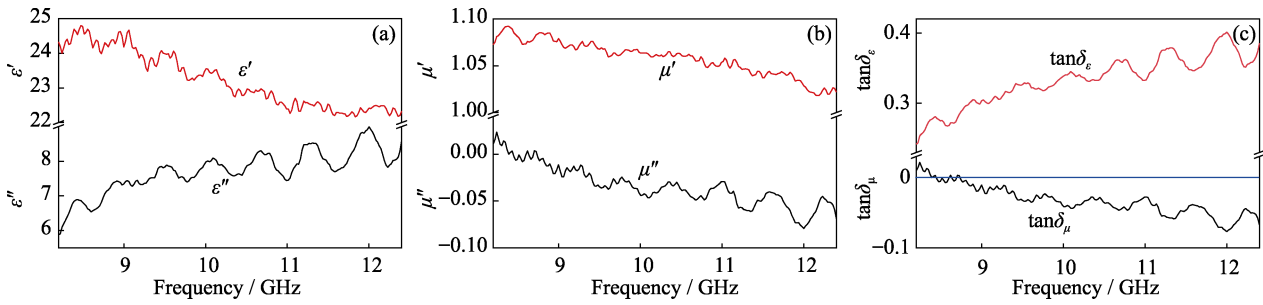


图 3 SiC/C_f 复合材料电磁参数

Fig. 3 Electromagnetic parameters of SiC/C_f composite

(a) Real part (ϵ') and imaginary part (ϵ'') of relative permittivity; (b) Real part (μ') and imaginary part (μ'') of relative permeability; (c) Dielectric loss tangent ($\tan\delta_\epsilon$) and magnetic loss tangent ($\tan\delta_\mu$)

不能与电磁波的频率增加相匹配, 因此, ϵ' 随频率增大呈现下降趋势^[21-23]; 而 ϵ'' 在 5.88~8.99 GHz 范围内波动, 并随频率的增大呈波动上升趋势。 μ' 的变化趋势与 ϵ' 相似; ϵ'' 随频率增大呈波浪式下降趋势, 其中, 当频率大于 8.39 GHz 时, μ'' 为负值, 这可归因于高频时增强的反向磁场^[24]。根据 ϵ' 、 ϵ'' 、 μ' 、 μ'' , 利用公式 $\tan\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$ 和 $\tan\delta_\mu = \mu''/\mu'$ 计算可以获得介电损耗角正切和磁损耗角正切的曲线(图 3(c))。介电损耗角正切的变化趋势与 ϵ'' 相似, 在 X 波段, 介电损耗角正切随频率的增大呈波浪式上升趋势; 磁损耗角正切的曲线趋势与 μ'' 相同。

通常, 相对介电常数的 ϵ' 和 ϵ'' 可利用以下等式(3)和(4)表示^[25]:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) / [1 + (2\pi f)^2 \tau^2] \quad (3)$$

$$\epsilon'' = 2\pi f \tau (\epsilon_s - \epsilon_\infty) / [1 + (2\pi f)^2 \tau^2] \quad (4)$$

其中, f 是电磁波的频率, τ 是弛豫时间, ϵ_s 代表静态介电常数, ϵ_∞ 是无限频率下的相对介电常数。根据公式(3)和(4), ϵ' 和 ϵ'' 之间的关系可以表达为^[26]:

$$[\epsilon' - (\epsilon_s + \epsilon_\infty) / 2] + (\epsilon'')^2 = [(\epsilon_s - \epsilon_\infty) / 2]^2 \quad (5)$$

如果上述表达式的曲线形成一个半圆, 则说明发生了一个弛豫过程, 半圆越多, 弛豫过程越复杂, 其吸波性能可能越好。在图 4 所示的 Cole-Cole 图

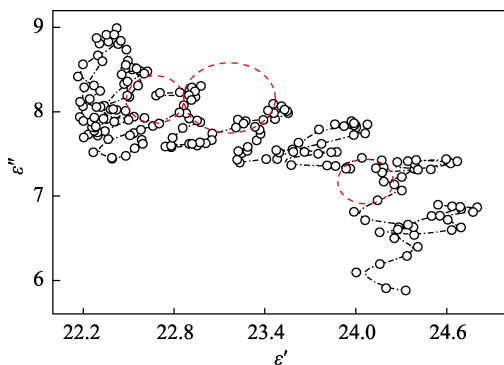


图 4 SiC/C_f 复合材料的 Cole-Cole 图

Fig. 4 Cole-Cole diagram of SiC/C_f composite

中存在多个半径较小的半圆, 说明复合材料发生了多重弛豫, 有利于电磁波的吸收。

图 5 为制备的 SiC/C_f 复合材料在不同厚度下的 RL 随频率的变化。当 $RL < -10$ dB 时, 表示材料可衰减超过 90% 的电磁波, 其对应的频率宽度称为有效吸收带宽。从图 5(a) 可知, SiC/C_f 复合材料的厚度为 1 和 2~5.5 mm 时, 在 8~12.4 GHz 波段的 RL 均大于 -10 dB, 吸波效果较弱。如图 5(b, c), 在 1.2~2 mm 范围内, RL_{min} 均小于 -10 dB, 且随厚度增大, RL_{min} 向低频移动。厚度为 1.8 mm 时, 在 8.31 GHz 处 RL 值可达 -40.653 dB, 吸收带宽仅有 1.11 GHz; 而当厚度为 1.5 mm 时, 在 10.38 GHz 处 RL 值为 -25.16 dB, 有效吸收带宽达 2.42 GHz (图 5(d))。

吸收剂的微波吸收性能受阻抗匹配和衰减系数影响, 分别用公式(6)和(7)计算。阻抗匹配 ($|Z_{in}/Z_0|$) 值越接近 1, 说明电磁波更容易进入吸波材料内部, 有助于电磁波吸收^[27-28]。SiC/C_f 复合材料在厚度为 1.1~2.0 mm 范围内的阻抗匹配和衰减系数的频率依赖性如图 6 所示。

由图 6(a) 可知, 衰减系数随着频率的增加而增加, 衰减能力增强, 这对于吸波材料来说, 在高频下具有优异的吸波性能。根据图 5, SiC/C_f 复合材料在 X 波段 $RL < -10$ dB 的试样厚度在 1.2~2.0 mm 范围内, 进一步推导出其阻抗匹配 ($|Z_{in}/Z_0|$) 值的范围如图 6(b), 由图可知, $|Z_{in}/Z_0|$ 值大都位于 0.9 附近, 接近于 1, 说明复合材料在 1.1~2.0 mm 范围内的阻抗匹配良好, 能使电磁波尽可能多地进入复合材料内部, 从而进一步发生能量转化而消耗。因此, SiC/C_f 复合材料具有较好的阻抗匹配特征。

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}\pi f}{c} \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') + \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2 + (\mu'\epsilon'' - \mu''\epsilon')^2}} \quad (6)$$

$$\frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \tan h \left(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \right) \quad (7)$$

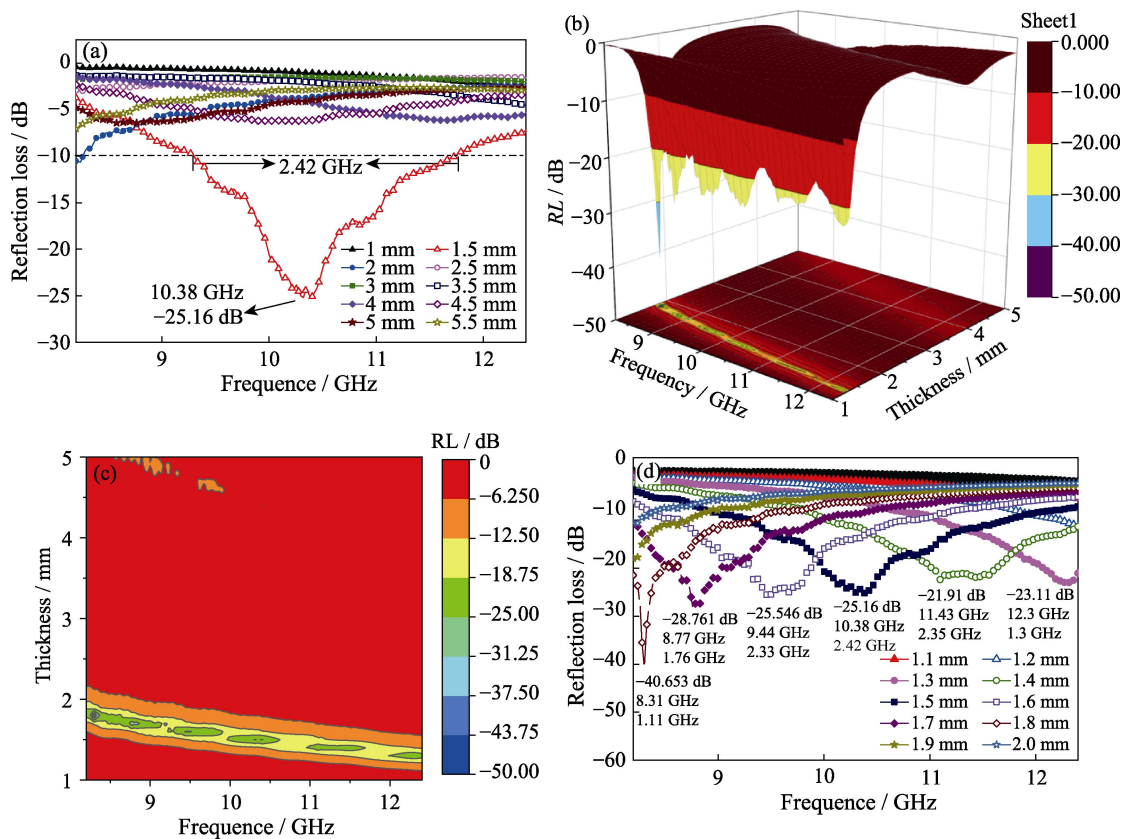


图 5 SiC/C_f复合材料的 RL 图

Fig. 5 RL diagrams of SiC/C_f composite material

RL value (a), 3D display RL value (b) and 3D RL value projection (c) with a thickness of 1–5.5 mm; RL value with thickness of 1.1–2.0 mm (d)

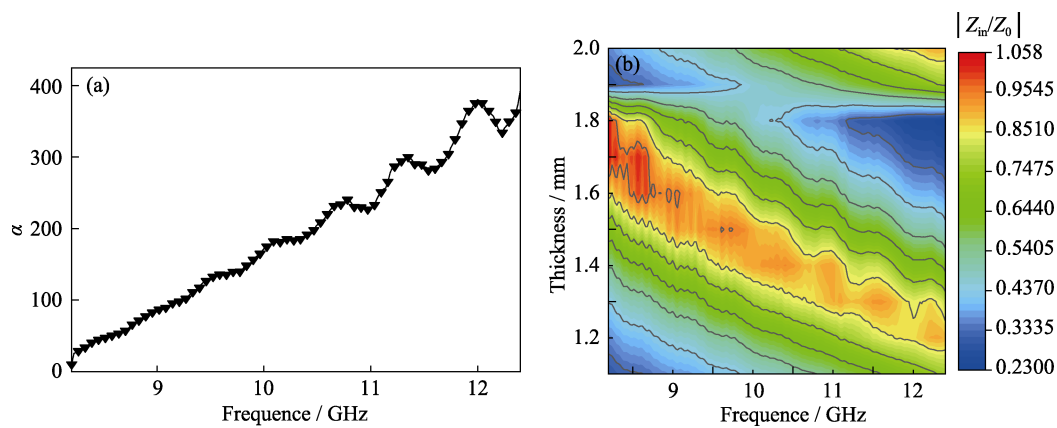


图 6 SiC/C_f复合材料的衰减系数(a)和阻抗匹配(b)

Fig. 6 Attenuation coefficient (a) and impedance matching (b) diagram of SiC/C_f composite

表 2 SiC/C_f复合材料与其他同类不同结构材料的对比

Table 2 Comparison between SiC/C_f composite and other similar structural materials

| Absorbent material | Thickness/mm | RL _{min} /dB | Frequency/GHz | Effective absorption bandwidth/GHz | Ref. |
|--|--------------|-----------------------|---------------|------------------------------------|-----------|
| SiC _{NW} | 3.00 | -17.40 | 11.20 | 2.50 | [29] |
| SiC _{NW} /C _f | 2.00 | -21.50 | 7.70 | 2.40 | [30] |
| SiC _{NW} -C _f /LAS | 3.00 | -37.80 | 7.20 | <2.00 | [31] |
| ZnO/C _f | 4.35 | -33.00 | - | 5.10 | [32] |
| NiZn ferrite/BC | 2.00 | -11.00 | - | - | [33] |
| HPC/Fe ₃ O ₄ | 5.50 | -20.10 | 11.76 | ~2.00 | [34] |
| SiC/C _f | 1.50 | -25.16 | 10.38 | 2.42 | This work |
| SiC/C _f | 1.80 | -40.66 | 8.31 | 1.11 | This work |

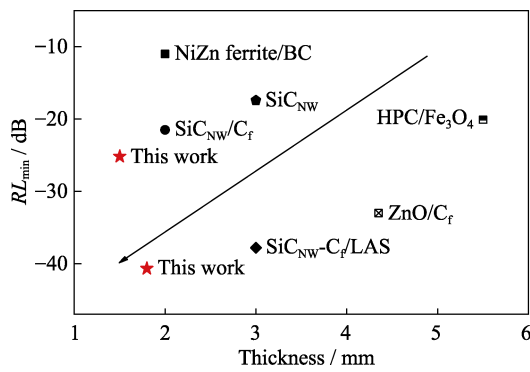


图7 与其他同类不同结构材料的对比图

Fig. 7 Comparison with other similar structural materials

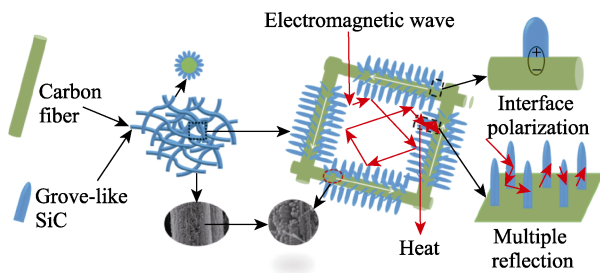


图8 复合材料的吸波机制

Fig. 8 Absorbing mechanism of composite materials

其中, Z_{in} 是吸收剂的输入阻抗, Z_0 是自由空间阻抗, ϵ_r 是相对介电常数, μ_r 是相对磁导率, c 是真空中光速, d 是吸收体的厚度, f 是电磁波的频率。

表2和图7给出了不同结构复合材料的厚度、 RL_{min} 和有效带宽的比较。与其他材料相比, SiC 阵列涂覆的新型改性 SiC/C_f 复合材料可在更薄的厚度下使其 RL 依然较强, 吸收带更宽。结果表明, 制备的具有 SiC 阵列涂层的新型改性 SiC/C_f 复合材料是一种高效、轻质的电磁波吸收材料。

图8总结了 SiC/C_f 复合材料具备优异吸波性能的主要机制: 首先, C_f 表面形成的 SiC 阵列改善了复合材料的阻抗匹配, 使得电磁波更容易进入复合材料内部; 其次, C_f 之间形成导电网络, 有利于形成感应电流。当复合材料处于电磁场中时, 导电网络在变化的电磁场中产生感应微电流形成导电损耗, 消耗了电磁波能量^[35-36]。此外, 电磁波进入 C_f 形成网络状结构后, 可在纤维内部形成多次反射, 衰减一部分电磁波。最后, C_f 表面上生长的 SiC 阵列在材料中形成大量的固-空界面。复合材料和空气的电导率不同, 可使电子在固-空界面处积累, 产生更强的界面极化和更多的能量耗散^[24,37]。

3 结论

1) 通过化学镀结合高温烧结两步法合成了含

SiC 阵列改性涂层的 SiC/C_f 复合吸波材料。

2) 碳纤维表面紧密包裹大量有序排列、高度约为 1.4 μm 和分布均匀且垂直于碳纤维表面向外生长的 SiC 阵列。在 SiC 阵列的表面还分布着少量 SiC 纳米线, 部分呈弯曲状, 相互交织。这有利于改善复合材料的阻抗匹配及入射电磁波的损耗。

3) SiC 阵列改性涂层的新型 SiC/C_f 复合材料厚度为 1.3~1.8 mm 时, RL 均小于 -20 dB, 最小值为 -40.653 dB, 最大有效吸收带宽可达 2.42 GHz, 是较有前途的电磁波吸收材料。

参考文献:

- [1] YE X L, CHEN Z F, AI S F, *et al.* Novel three-dimensional SiC/melamine-derived carbon foam-reinforced SiO₂ aerogel composite with low dielectric loss and high impedance matching ratio. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, **7(2)**: 2774-2783.
- [2] 赵灵智, 胡社军, 李伟善, 等. 吸波材料的吸波原理及其研究进展. *现代防御技术*, 2007(1): 27-31.
- [3] LIANG X H, ZHANG X M, LIU W, *et al.* A simple hydrothermal process to grow MoS₂ nanosheets with excellent dielectric loss and microwave absorption performance. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4(28)**: 6816-6821.
- [4] JIANG Y, CHEN Y, LIU Y J, *et al.* Lightweight spongy bone-like graphene@SiC aerogel composites for high-performance microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **337**: 522-531.
- [5] QIU J, WU X Y, QIU T T. High electromagnetic wave absorbing performance of activated hollow carbon fibers decorated with CNTs and Ni nanoparticles. *Ceramics International*, 2016, **42(4)**: 5278-5285.
- [6] 武志红, 李好婕, 张聪, 等. 竹炭/SiC 复合材料结构及其吸波性能. *硅酸盐学报*, 2018, **46(1)**: 150-155.
- [7] 刘丹莉, 刘平安, 杨青松, 等. 吸波材料的研究现状及其发展趋势. *材料导报*, 2013(17): 77-81.
- [8] LI W W, CHEN M J, ZENG Z H, *et al.* Broadband composite radar absorbing structures with resistive frequency selective surface: optimal design, manufacturing and characterization. *Composites Science and Technology*, 2017, **145**: 10-14.
- [9] CHOI W, KIM C. Broadband microwave-absorbing honeycomb structure with novel design concept. *Composites Part B-Engineering*, 2015, **83**: 14-20.
- [10] LI W C, LI C S, LIN L H, *et al.* All-dielectric radar absorbing array metamaterial based on silicon carbide/carbon foam material. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019 (**781**): 883-891.
- [11] YE W, SUN Q L, ZHANG G Y. Effect of heat treatment conditions on properties of carbon-fiber-based electromagnetic-wave-absorbing composites. *Ceramics International*, 2019, **45(4)**: 5093-5099.
- [12] ADEBAYO L L, SOLEIMANI H, YAHYA N, *et al.* Recent advances in the development of Fe₃O₄-BASED microwave absorbing materials. *Ceramics International*, 2020, **46(2)**: 1249-1268.
- [13] LIU Y, ZHANG Z Q, XIAO S T, *et al.* Preparation and properties of cobalt oxides coated carbon fibers as microwave-absorbing materials. *Applied Surface Science*, 2011, **257(17)**: 7678-7683.
- [14] SONG Z M, LIU X F, SUN X, *et al.* Alginate-templated synthesis of CoFe/carbon fiber composite and the effect of hierarchically porous structure on electromagnetic wave absorption performance. *Carbon*, 2019, **151**: 36-45.
- [15] CHEN X G, YE Y, CHENG J P. Recent progress in electromagnetic

- wave absorbers, *Journal of Inorganic Materials*, 2011, **26(5)**: 449–457.
- [16] 吕晓艳, 田玉平, 魏云, 等. 镍/碳纳米纤维复合物的制备及其吸波性能. *化学研究*, 2016, **27(6)**: 756–759.
- [17] WU R B, YANG Z H, FU M S, *et al.* In-situ growth of SiC nanowire arrays on carbon fibers and their microwave absorption properties. *Journal of Alloys & Compounds*, 2016, **687**: 833–838.
- [18] ZHOU W, LONG L, XIAO P, *et al.* Silicon carbide nano-fibers in-situ grown on carbon fibers for enhanced microwave absorption properties. *Ceramics International*, 2017, **43(7)**: 5628–5634.
- [19] WU Z H, ZHENG H K, ZHANG G L, *et al.* Synthesis of diameter-fluctuating silicon carbide nanowires for excellent microwave absorption. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, **244**: 122648.
- [20] FU M, ZHU Z, ZHOU Y, *et al.* Multifunctional pompon flower-like nickel ferrites as novel pseudocapacitive electrode materials and advanced absorbing materials. *Ceramics International*, 2020, **46(1)**: 850–856.
- [21] LIANG C Y, WANG Z J. Eggplant-derived SiC aerogels with high-performance electromagnetic wave absorption and thermal insulation properties. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **373**: 598–605.
- [22] DUAN Y, LIU Z, JING H, *et al.* Novel microwave dielectric response of Ni/Co-doped manganese dioxides and their microwave absorbing properties. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, **22(35)**: 18291–18299.
- [23] DONG S, ZHANG X H, HU P T, *et al.* Biomass-derived carbon and polypyrrole addition on SiC whiskers for enhancement of electromagnetic wave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **359**: 882–893.
- [24] HU P, DONG S, LI X, *et al.* A low-cost strategy to synthesize MnO nanorods anchored on 3D biomass-derived carbon with superior microwave absorption properties. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, **7(30)**: 9219–9228.
- [25] ZHANG X J, LI S, WANG S W, *et al.* Self-supported construction of three-dimensional MoS₂ hierarchical nanospheres with tunable high-performance microwave absorption in broadband. *Journal of Physical Chemistry C*, 2016, **120(38)**: 22019–22027.
- [26] LIANG H S, LIU J L, ZHANG Y, *et al.* Ultra-thin broccoli-like SCFs@TiO₂ one-dimensional electromagnetic wave absorbing material. *Composites Part B Engineering*, 2019, **178**: 107507.
- [27] NING M Q, LU M M, LI J B, *et al.* Two-dimensional nanosheets of MoS₂: a promising material with high dielectric properties and microwave absorption performance. *Nanoscale*, 2015, **7(38)**: 15734–15740.
- [28] ZHOU X F, JIA Z R, FENG A L, *et al.* Synthesis of fish skin-derived 3D carbon foams with broadened bandwidth and excellent electromagnetic wave absorption performance. *Carbon*, 2019, **152**: 827–836.
- [29] WU R B, ZHOU K, YANG Z H, *et al.* Molten-salt-mediated synthesis of SiC nanowires for microwave absorption applications. *CrystEngComm*, 2013, **15(3)**: 570–576.
- [30] ZHANG W D, ZHANG X, WU H J, *et al.* Impact of morphology and dielectric property on the microwave absorbing performance of MoS₂-based materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **751**: 34–42.
- [31] XIA L, ZHANG X Y, YANG Y N, *et al.* Enhanced electromagnetic wave absorption properties of laminated SiC_{NW}-C/lithium-aluminum-silicate (LAS) composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **748**: 154–162.
- [32] WANG X X, YU M X, ZHANG W, *et al.* Synthesis and microwave absorption properties of graphene/nickel composite materials. *Applied Physics A*, 2015, **118(3)**: 1053–1058.
- [33] WU K H, TING T H, LIU C I, *et al.* Electromagnetic and microwave absorbing properties of Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄/bamboo charcoal core-shell nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2008, **68(1)**: 132–139.
- [34] LIU Z, LV Y X, FANG J Y, *et al.* A new method for an efficient porous carbon/Fe₃O₄ composite based electromagnetic wave absorber derived from a specially designed polyimide. *Composites Part B-engineering*, 2018, **155**: 148–155.
- [35] LIU L L, ZHANG S, YAN F, *et al.* Three-dimensional hierarchical MoS₂ nanosheets/ultralong N-doped carbon nanotubes as high-performance electromagnetic wave absorbing material. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10(16)**: 14108–14115.
- [36] ZHAO H, CHENG Y, LV H, *et al.* Achieving sustainable ultralight electromagnetic absorber from flour by turning surface morphology of nanoporous carbon. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, **6(11)**: 15850–15857.
- [37] QIU X, WANG L X, ZHU H L, *et al.* Lightweight and efficient microwave absorbing materials based on walnut shell-derived nano-porous carbon. *Nanoscale*, 2017, **9(22)**: 7408–7418.