

模板法制备 MoSi₂/竹炭复合材料及吸波性能

Absorbing performance of MoSi₂/BC composites using bamboo charcoal template

尚 楷, 武志红, 张路平, 王 倩, 郑海康

(西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 西安 710055)

SHANG Kai, WU Zhi-hong, ZHANG Lu-ping,

WANG Qian, ZHENG Hai-kang

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

摘要: 以竹材炭化的多孔竹炭(BC)为模板,金属间化合物二硅化钼(MoSi₂)为吸收剂,采用包埋硅(Si)粉固相烧结工艺制备 MoSi₂/BC 多孔复合吸波材料。利用 XRD、SEM 和矢量网络分析仪对 MoSi₂/BC 复合材料的物相组成、显微结构、介电和吸波性能进行表征。结果表明:在氩气(Ar)保护气氛下,1450℃烧结制备的 MoSi₂/BC 复合材料主要含物相 MoSi₂、SiC 及无定型碳。BC 基体孔隙内除分布有 MoSi₂ 外,还布满排列无序、尺寸长短不一、相互交叉呈网状的碳化硅晶须(SiC_w),SiC_w 的存在可有效提高复合材料电磁波吸收性能。在 8.2~12.4GHz 频率范围内,与环氧树脂混合后,复合材料反射率随 MoSi₂/BC 含量增加而逐渐减小。MoSi₂/BC 含量为 50%(质量分数)时,随试样厚度增加反射率降低,且最小反射率向高频方向移动;在 11.87GHz 处最低反射率为 -13dB,反射损耗小于 -10dB 带宽约达 1.0GHz,具有良好的吸波性能。

关键词: 复合材料; MoSi₂/竹炭吸波材料; 模板法; 介电性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000107

中图分类号: TM25 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2019)05-0122-07

Abstract: Using the bamboo charcoal(BC) material as the template, the metallic chemical compound MoSi₂ as the absorption catalyst, the MoSi₂/BC porous composite materials were fabricated by the embedded solid reaction sintering method. The components, microstructure and dielectric constant of the MoSi₂/BC composite material were detected by XRD, SEM and vector network analyzer respectively. The results show that in the argon protective atmosphere (Ar), at the sintering temperature of 1450℃, the phase composition of MoSi₂/BC composite material primarily consists of MoSi₂, SiC and amorphous carbon. In the pores of the bamboo charcoal, the SiC whiskers(SiC_w) are distributed in an irregular way with different size and length, furthermore to form an intersecting network except MoSi₂ particles. The existence of SiC_w can significantly improve the wave absorption ability. At the range of 8.2-12.4GHz, after mixed with epoxy resin, the reflection losses of the composites of MoSi₂/BC are gradually decreased with the increase of MoSi₂/BC content. With the increase of sample thickness at the MoSi₂/BC 50%(mass fraction) content, the minimum absorption peak of reflection loss is moving to the low frequency. The composites' lowest reflection loss is -13dB at 11.87GHz, and the reflection bandwidth value below -10dB is around 1.0GHz. This indicates that the MoSi₂/BC composites possess perfect microwave absorbing performance.

Key words: composites; bamboo charcoal/MoSi₂ microwave absorbing materials; template mould method; dielectric property

随着各种新型雷达和先进探测器的问世,各国防空和反导系统能力日益增强,现代战争中的武器系统

越来越受到严重威胁。对工作在 2~18GHz 范围内雷达的隐身技术,尤其是与之相关的吸波材料,成为现阶段

段世界各国的研究重点。除军事领域,吸波材料也是微波暗室、电磁信息泄漏防护、电磁辐射防护等民用领域中的关键材料^[1]。由于外形设计的诸多局限性,促使吸波材料研究成为隐身技术发展的重点,以满足隐身材料“薄、轻、宽、强”等要求^[2-4]。

碳系材料,如碳纤维、多壁碳纳米管和石墨烯等,已被广泛应用于多种复合吸波材料中^[5-7]。轻质多孔碳材料密度低、介电性能可调,其自身结构对电磁波的吸收和衰减有很大作用。由成本低、来源广的竹材炭化而成的竹炭作为多孔碳材料的一种,具有孔隙结构特殊、电导率大和比表面积高($300\text{m}^2/\text{g}$)等优点,在电子与通讯、航空航天等领域应用前景广阔^[8-9]。研究表明,多孔竹炭(BC)具有承载和吸波的双重功能,可用来制备功能结构一体化的优良吸波材料。刘金明等^[10]以生物竹材为载体,制备出多孔碳化硅陶瓷,在低频波段具有较好的电磁波吸收性能。王欢等^[11]利用制备出的碳多孔骨架作为碳模板与硅源反应,生成具有竹炭多孔骨架结构的 SiC 多孔材料。此外,本课题组李好婕等^[12]以 Si 粉、竹炭为原料,制备出性能优异的竹炭/SiC 复合吸波材料。SiC 具有化学性能稳定、电阻率高、密度低等优点^[13-14],其微波电磁特性可调,可改善试样表面与自由空间的阻抗匹配,提高吸波性能与抗氧化性。

目前吸收剂的研究大都集中在铁氧体型、金属微粉、多晶铁纤维等传统材料^[15-16],这些吸波材料因存在密度较大、高温稳定性差等缺点,而使用范围受限。二硅化钼(MoSi₂)是成分固定的道尔顿型金属间化合物,熔点高(2030°C)、高温韧性优异(弹性模量 440 GPa)、电热传导性好(电导率 $4.39 \times 10^2 \text{S}/\text{cm}$,热传导率 $25\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)以及高温抗氧化性好等优点^[17]。本课题组张聪等^[18]在不同气氛下制备出 MoSi₂/Al₂O₃ 复合材料,并对其显微结构与介电性能进行研究。本研究以竹材炭化的多孔 BC 为模板,MoSi₂ 为吸收剂,采用包埋 Si 粉固相烧结技术,制得含有 SiC 晶须的 MoSi₂/BC 复合材料,并对其结构、化学矿物

组成、X 波段内介电性能进行研究,以期得到质轻、抗高温氧化及吸波性能优良的多孔 MoSi₂/BC 复合吸波材料。

1 实验材料与方法

1.1 原料

天然毛竹,产地江西宜丰,直径为 15cm;超细硅(Si)粉,由长沙天九金属材料有限公司生产,纯度均≥99% (质量分数,下同),平均粒径为 $2\mu\text{m}$;超细 MoSi₂ 粉,由鑫盾合金焊材喷涂有限公司生产,纯度均≥99%,平均粒径为 $0.5\mu\text{m}$;无水乙醇,由西安国华科技有限责任公司生产,纯度为 95%;过氧化钠为天津大沽化工股份有限公司生产,纯度为 92.5%;环氧树脂(型号 E44),西安树脂厂。

1.2 试样制备

1.2.1 竹炭模板制备与表征

选取 5 年以上的毛竹加工成 $50\text{mm} \times 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 竹片,置于电热鼓风干燥箱(型号为 BDW1-DZF-6050)中 120°C 下干燥 24h 后取出;放入氩气(Ar)保护高温管式炉(型号为 STGK-40-12),升温至 120°C (升温速率为 5°C/min),恒温 0.5h;然后继续升温至 800°C (升温速率为 3°C/min)进行炭化处理,保温 1h 后降至室温,获得竹炭。

图 1 为 800°C 烧结后的竹炭模板 SEM 图及 XRD 图谱。由图 1(a),(b) 可看出竹材炭化后继承了原始竹材的微观组织构造以及竹材的各向异性特征。BC 具有特殊发达的孔隙系统,大孔侧壁上分布着很多微孔,通过这些微孔使得大孔与其周围的中孔和小孔相连,中孔和小孔由竹质隔膜隔断并有微孔连通的空腔,整个竹炭形成错综复杂相互连通的孔道网状结构。在 800°C 炭化后形成的竹炭骨架结构,为制备具有 BC 多孔结构吸波材料提供了基础。由图 1(c) XRD 分析可知,衍射峰呈宽化现象,无明显的晶体衍射特征峰,为非晶态结构,以无定型碳为主。

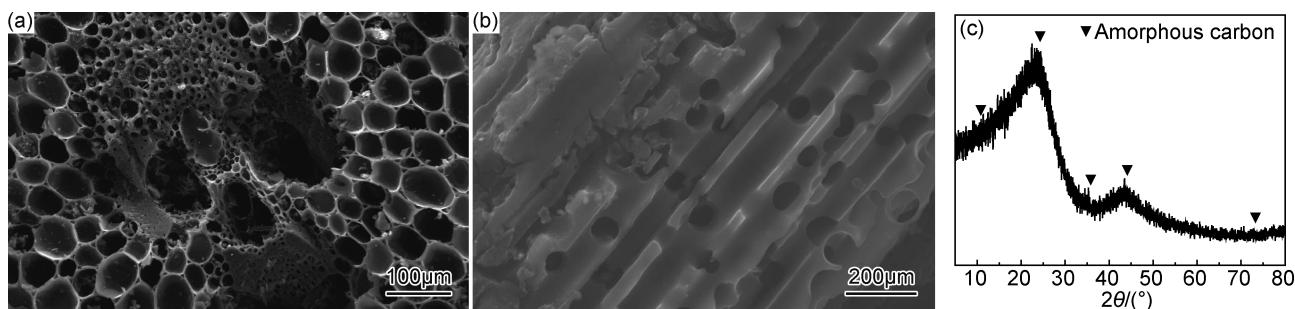


图 1 BC 横截面(a)和纵截面(b) SEM 图及 BC 的 XRD 图谱(c)

Fig. 1 SEM image of BC cross section (a), longitudinal section(b) and XRD pattern of BC(c)

1.2.2 复合材料制备

以烧制好的 BC 为模板, 放入 5 mol/L 的 NaOH 溶液中扩孔处理 24 h, 然后加入少量浓度为 4 mol/L 的浓盐酸进行中和, 考虑到竹炭内部孔洞酸残余, 使用超声波清洗仪(KQ-50DB 型数控超声波清洗器)对 BC 清洗 30 min, 将装有 BC 和 MoSi₂-无水乙醇悬浊液的烧杯放入真空压力浸渍设备中真空浸渍 30 min。最后, 放入以 Ar 为保护气的高温管式炉中, 用 Si 粉包埋后在升温至 1450 ℃下保温 1 h 进行烧结, 得到具有多孔结构 MoSi₂/BC 复合材料。

1.3 检测

采用 D8-ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)对试样进行物相分析; 采用 S-4700 型扫描电子显微镜(SEM)观察样品的微观结构; 采用 HP8510B 网络矢量分析仪测定样品在 8.2~12.4 GHz(X 频段)内的复介电常数。本实验将制备的 MoSi₂/BC 复合材料研磨成平均粒径为 80 目(178 μm)的粉末颗粒, 然后以环氧树脂作为黏结剂, 按质量比(粉末颗粒: 环氧树脂)为 1:1(MoSi₂/BC 复合材料含量 50%), 1:2(MoSi₂/BC 复合材料含量 33.3%), 1:3(MoSi₂/BC 复合材料含量 25%)分别进行混合, 加热搅拌均匀后制成尺寸为 22.86 mm × 10.16 mm × (3~4.5) mm 介电试样, 不同厚度对照组的介电试样 MoSi₂/BC 复合材料含量均为 50%, 厚度分别为 3, 3.5, 4, 4.5 mm。

2 结果与分析

2.1 物相分析

图 2 为 MoSi₂/BC 复合材料的 XRD 图谱。由图可知, 1450 ℃烧后, MoSi₂/BC 复合材料主要由无定型碳、SiC、MoSi₂ 等物相组成, 其中 MoSi₂ 与 SiC 含量分别约为 6.37% 及 6.59%。衍射图中碳峰明显且呈现宽化, 为非晶态。在 2θ 为 36°、60° 和 72° 处, 都出现明显的 SiC 特征衍射峰, 峰形尖锐, 表明 MoSi₂/BC 复合材料中 SiC 结晶较好。这是由于在多孔竹炭熔融 Si 渗透过程中, 烧结温度(1450 ℃)超过 Si 粉熔点(1410 ℃), 液相 Si 在 BC 薄壁组织上微孔毛细管作用下, 渗透能力增强。由于 C 与 Si 的反应是放热过程, Si 在 BC 中的溶解度随温度升高而增大, 从而进一步促进 SiC 晶体的形成。在 2θ 为 30°、40° 和 45° 处, 有较强的 MoSi₂ 特征衍射峰, 说明加入的 MoSi₂ 在高温下被保护得较好。此外, 衍射峰组成无其他杂相, 纯度较高, 说明包埋 Si 粉工艺能有效防止试样高温氧化。

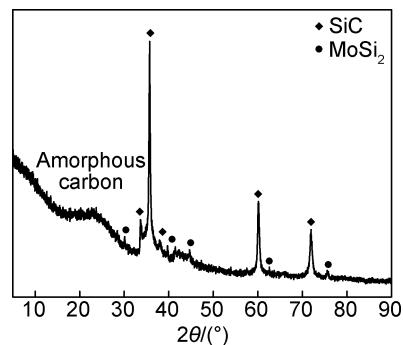


图 2 MoSi₂/BC 复合材料的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of MoSi₂/BC composites

2.2 微观形貌分析

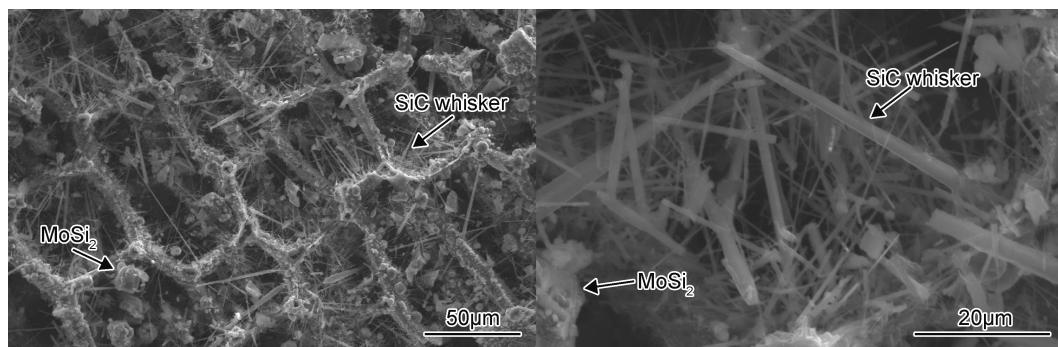
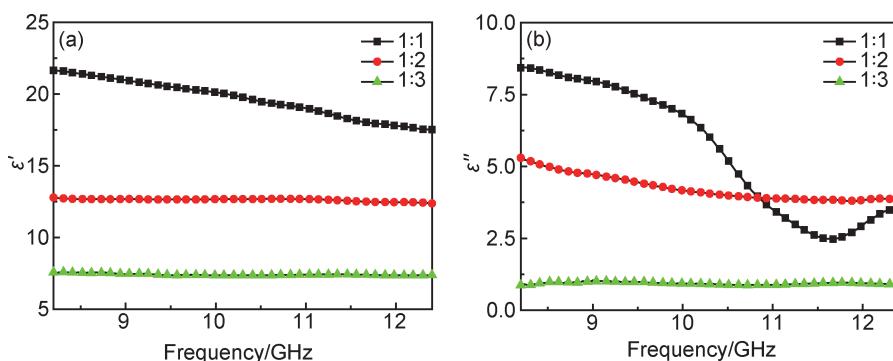
图 3 为 MoSi₂/BC 复合材料的 SEM 图。结合图 2 的 XRD 图谱, 从图 3 中可看出, MoSi₂/BC 复合材料中有大量不同形态的 SiC_w, 这些 SiC_w 布满 BC 内部孔洞, 且每个孔洞的腔体及孔与孔之间的竹质隔膜上都分布着 MoSi₂ 颗粒。由试样放大图可看出生成的 SiC_w 排列无序, 尺寸长短不均, 最大长度约为 50 μm。SiC_w 增强复合材料具有优异的雷达波吸收性能, 可作为发动机燃烧器、火箭和导弹的高温部位隐身结构材料^[19-20]。BC 基体中生成的具有高长径比 SiC_w, 在外电场作用下, 内部电子会发生定向移动并聚集于 SiC_w 顶端, 可等效为微观电偶极子极化状态, 有利于电磁波能量损耗, 具有结构吸波一体化优点。

2.3 电磁参数分析

2.3.1 介电常数

材料电磁性能取决于它的复介电常数(ϵ)和复磁导率(μ)。复介电常数实部(ϵ')表示材料对电磁波的存储能力, 虚部(ϵ'')表示材料对电磁波的损耗能力。根据自由电子理论: $\epsilon'' = \sigma / 2\epsilon_0 \pi f$, 其中 σ 为电导率; ϵ_0 为真空介电常数; f 为入射电磁波的频率; 可知 ϵ'' 与电子运动形成的电导 σ 有关^[21]。根据介电常数测试结果, 在整个 x 波段内, MoSi₂/BC 复合材料相对磁导率实部值(μ')约为 1, 相对磁导率虚部值(μ'')约为 0, 可判断该材料损耗机理主要为介电损耗, 几乎不具有磁损耗, 故此处对 μ 不予探讨。

图 4(a), (b) 分别为不同质量比 MoSi₂/BC 复合材料 ϵ' 与 ϵ'' 随频率的变化曲线。在 8.2~12.4 GHz 频段内, 当 MoSi₂/BC 与环氧树脂的质量比为 1:3 时, 复合材料含量较少, ϵ' 和 ϵ'' 曲线变化幅度相似, 基本为一条平行于横轴的直线; 当 MoSi₂/BC 与环氧树脂的质量比为 1:2 时, ϵ' 曲线变化幅度依然平缓, 而 ϵ'' 曲线呈现下降趋势; 当 MoSi₂/BC 与环氧树脂的质量比为 1:1 时, 复合材料含量达到 50%, ϵ' 和 ϵ'' 曲线波动

图 3 MoSi₂/BC 复合材料的 SEM 图Fig. 3 SEM images of MoSi₂/BC composites图 4 不同质量比 MoSi₂/BC 复合材料的复介电常数随频率的变化关系(a)介电常数实部(ϵ')；(b)介电常数虚部(ϵ'')Fig. 4 Complex permittivity with frequency curve of MoSi₂/BC composites at different mass ratio(a)real part of the dielectric constant(ϵ') ; (b)imaginary part of the dielectric constant(ϵ'')

明显,此时 ϵ' 呈下降趋势,而 ϵ'' 则先减小后增加。这是由于 MoSi₂/BC 含量较小时,在交变电磁场作用下,界面处电荷交替聚集分散概率小,故 ϵ' 和 ϵ'' 曲线变化幅度不大。随着 MoSi₂/BC 含量的增加,复合材料内形成的异相界面增多,如 MoSi₂/BC, SiC_w/BC, SiC_w/SiC_w 及 SiC_w 与自由空间等,导致试样表面曲率半径减小,更易聚集电荷。不同界面处存在的多重偶极电荷引起界面极化,对材料 ϵ 影响较大, ϵ' 和 ϵ'' 曲线波动明显,并呈现频散特性。当频率小于 10GHz 时,材料电导损耗占主导地位,界面极化作用较小,随着频率的上升,界面极化作用逐渐显现,复合材料对电磁能的储存能力下降,从而 ϵ' 曲线呈下降趋势。随极化作用增强,电磁波损耗能力增大, ϵ'' 值下降,在频率为 11.5GHz 处达到最大。MoSi₂/BC 复合材料内部偶极子极化出现的惯性或滞后性,以及在不同频率电场中偶极子极化来不及响应电场变化的特性,有利于提高吸波性能^[22]。

2.3.2 Cole-Cole 图

复介电常数柯尔-柯尔(Cole-Cole)图常用来分析复合材料介电损耗机制,曹茂盛等^[23-24]就利用其分析

了石墨烯基复合材料,并探讨其吸波性能。据 Debye 弛豫定律,MoSi₂/BC 复合材料 ϵ' 和 ϵ'' 存在如式(1)关系:

$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{2}\right)^2 + (\epsilon'')^2 = \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}\right)^2 \quad (1)$$

式中: ϵ_s 为静态介电常数; ϵ_∞ 为在高频限制内的相对介电常数。图 5 为不同质量比 MoSi₂/BC 复合材料 ϵ'' 随 ϵ' 的变化曲线,可明显看出图中 Cole-Cole 半圆弧。据电介质物理知识可知,当弛豫极化损耗占主导地位时,Cole-Cole 图为一个完整的半圆弧;而当有电导损耗产生时,Cole-Cole 图不再是一个完整的半圆,而在低频端明显上翘。随着 MoSi₂/BC 复合材料含量增加,圆的半径不断发生变化,当 MoSi₂/BC 复合材料和环氧树脂的质量比为 1:3 时,曲线在 11~12.4GHz 内出现近似的小圆圈,其他坐标点无规律分布在周围,主要为电导损耗,此时的 ϵ' 和 ϵ'' 最小;当 MoSi₂/BC 复合材料和环氧树脂质量比为 1:2 时,曲线在 8.2~10.7GHz(低频段)出现较为明显的圆弧且末端有上翘趋势,说明此时的介电损耗除弛豫极化外,还存在由弛豫极化逐渐向电导损耗的转变;当 MoSi₂/BC 复合材料和环氧树脂质量比为 1:1 在整个频段内主要分

布着两个较大的半圆弧趋势,且末端(低频端)和首段(高频端)上翘最明显,此时 ϵ' 和 ϵ'' 最大,说明由电导损耗和弛豫损耗共同作用。以上可得,当MoSi₂/BC复合材料含量较大时,不同界面之间的粒子内正负电荷中心易发生分离形成电偶极子,电场中偶极子转向不易跟上电场周期性变化,从而形成偶极子极化,自身存在高比表面积及多孔结构使表面极化和各向异性,产生弛豫极化损耗^[25],故吸收剂含量高时对电磁波的电导损耗也随之增加。

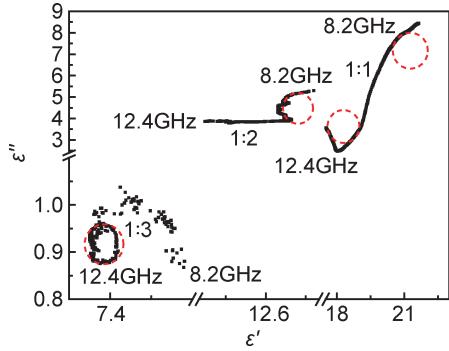


图 5 不同质量比 MoSi₂/BC 复合材料的柯尔-柯尔图

Fig. 5 Cole-Cole image of MoSi₂/BC composites at different mass ratios

2.4 吸波性能分析

反射率(R_L)是表征吸波材料的重要指标,它表示吸波材料对电磁波吸收能力的大小。根据电磁波传输理论,单层吸波材料的反射率 R_L (dB)的计算公式为^[26]:

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

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (3)$$

$$Z_{in}(d) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \text{th}\gamma d \quad (4)$$

$$\gamma = j \frac{2f\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (5)$$

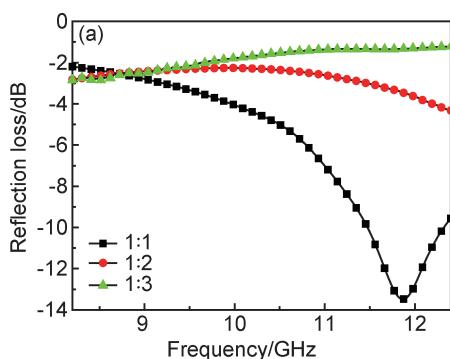


图 6 MoSi₂/BC 复合材料的反射率曲线 (a)4.5mm 厚度时不同质量比;

Fig. 6 Reflection losses curves of MoSi₂/BC composites (a)different mass ratios with 4.5mm thickness;

(b)mass ratios at 1:1 with different thickness

式中: ϵ_0 为真空介电常数; μ_0 为磁导率; d 为厚度; γ 为电磁波在吸波材料中的传播常数; f 为入射电磁波的频率; c 为电磁波在自由空间的传播速率(即光速); j 为虚数单位; $Z_{in}(d)$ 为吸波材料表面的输入阻抗; Z_0 为自由空间的波阻抗。通过矢量网络分析仪可测得 ϵ_r 等值,利用矩形波导法公式(2)~(5)可计算出一定涂层厚度 d 时复合材料在频率为 f 时电磁波的反射率 R_L ,从而对其吸波性能进行评估。

图 6 为 8.2~12.4GHz 频段内反射率变化曲线,图 6(a)为不同质量比 MoSi₂/BC 复合材料与环氧树脂混合后在厚度均为 4.5mm 的反射率,图 6(b)为 1:1 质量比下 MoSi₂/BC 复合材料不同厚度的反射率。由图 6(a)可知,随着 MoSi₂/BC 复合材料含量增加,其反射率逐渐减小,当 MoSi₂/BC 复合材料和环氧树脂的质量比为 1:1 时反射率最低,在 11.87GHz 处最大反射损耗为-13dB,反射损耗小于-10dB 带宽约达 1.0GHz,由此可见 MoSi₂/BC 复合材料含量为 50% 时对电磁波损耗效果最为显著,且与 Cole-Cole 图分析结果一致。由图 6(b)可知,随着试样厚度的增加,反射率逐渐减小,且最小反射率向高频方向移动。在 BC 基体上复合 MoSi₂ 和 SiC_w 后,增加了电磁波在吸收介质中的传播距离及多重散射概率,且入射到试样表面的电磁波与 SiC_w 及 MoSi₂ 颗粒间电磁耦合增强,从而引起能量的损耗使反射率降低。由此可见,以 BC 多孔结构为模板,MoSi₂ 与 SiC_w 共同作为吸收剂,对电磁波的吸收起到协同作用。

3 结论

(1)采用包埋 Si 粉工艺,以生物模板 BC 作为基体、MoSi₂ 为吸收剂,固相烧结制备的 MoSi₂/BC 复合吸波材料主要含有物相无定型碳、MoSi₂ 及 SiC。

(2)MoSi₂/BC 复合材料基体孔隙内布满大量的

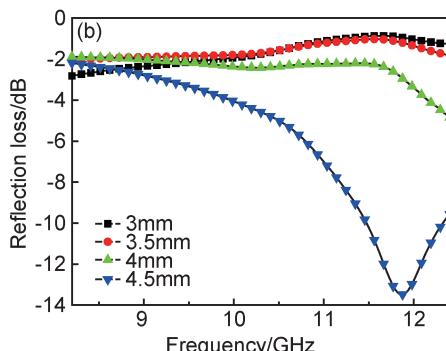


图 6 MoSi₂/BC 复合材料的反射率曲线 (a)4.5mm 厚度时不同质量比;

Fig. 6 Reflection losses curves of MoSi₂/BC composites (a)different mass ratios with 4.5mm thickness;

(b)mass ratios at 1:1 with different thickness

网状结构 SiC_w, 晶须排列无序, 尺寸长短不均, 最大长度可达 50 μm, SiC_w 的存在可有效提高电磁波吸收性能。

(3) 当 MoSi₂/BC 复合材料质量分数为 50% 时, 反射率最低, 最大反射损耗为 -13dB, 有效吸收频带宽度约达 1.0GHz。随着试样厚度的增加, 反射率最小值向高频方向移动。随着 MoSi₂/BC 复合材料含量的增加, 电导损耗和弛豫损耗共同作用, 衰减效果显著, 吸波性能良好。

参考文献

- [1] 王晓磊, 包秀坤, 关银燕, 等. C/Co 核壳亚微米复合物的吸波性能 [J]. 材料研究学报, 2017, 31(4): 241-247.
- WANG X L, BAO X K, GUAN Y Y, et al. Microwave absorption properties of submicro-composites of core-shell C/Co[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(4): 241-247.
- [2] 礼嵩明, 蒋诗才, 望咏林, 等.“超材料”结构吸波复合材料技术研究 [J]. 材料工程, 2017, 45(11): 10-14.
- LI S M, JIANG S C, WANG Y L, et al. Study on metamaterial structural absorbing composite technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(11): 10-14.
- [3] WEN B, CAO M S, HOU Z L, et al. Temperature dependent microwave attenuation behavior for carbon-nanotube/silica composites[J]. Carbon, 2013, 65: 124-139.
- [4] ZHANG H, YAN Q, ZHENG W, et al. Tough graphene polymer microcellular foams for electromagnetic interference shielding [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2011, 3(3): 918-924.
- [5] WEN B, CAO M S, LU M M, et al. Reduced graphene oxides: light-weight and high-efficiency electromagnetic interference shielding at elevated temperatures[J]. Advanced Materials, 2014, 26(21): 3484-3489.
- [6] CAO M S, SONG W L, HOU Z L, et al. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/silica composites[J]. Carbon, 2010, 48(3): 788-796.
- [7] 赵晓明, 刘元军. 铁氧体/碳化硅/石墨三层涂层复合材料介电性能 [J]. 材料工程, 2017, 45(1): 33-37.
- ZHAO X M, LIU Y J. Dielectric properties of ferrite/silicon carbide/graphite three-layer composite coating materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(1): 33-37.
- [8] WU K H, TING T H, WANG G P, et al. Synthesis and microwave electromagnetic characteristics of bamboo charcoal/polyaniline composites in 2-40GHz [J]. Synthetic Metal, 2008, 158(17/18): 688-694.
- [9] 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 [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(1): 132-139.
- [10] 刘金明, 陈晓红, 宋怀河, 等. 竹材制备 SiC 多孔陶瓷及吸波性能研究 [J]. 炭素技术, 2008, 27(5): 31-36.
- LIU J M, CHEN X H, SONG H H, et al. Preparation and wave-adsorption properties of porous SiC ceramic from bamboo-based materials[J]. Carbon Techniques, 2008, 27(5): 31-36.
- [11] 王欢. SiC 多孔材料的制备及其抗压性能和吸波性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- WANG H. Preparation and compressive and microwave absorbing performance of SiC porous materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] 李好婕, 武志红, 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): 1-6.
- LI H J, WU Z H, ZHANG C, et al. Structure and microwave absorption properties of bamboo charcoal/SiC composites[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2018, 46(1): 1-6.
- [13] WEI Y S, YUE J L, TANG X Z, et al. Enhanced microwave-absorbing properties of FeCo magnetic film functionalized silicon carbide fibers fabricated by a radio frequency magnetron method [J]. Ceramics International, 2017, 43: 16371-16375.
- [14] 穆阳, 邓佳欣, 李皓, 等. 填料法制备 SiC_f/SiC 复合材料的力学性能和高温介电性能 [J]. 航空材料学报, 2018, 38(3): 31-39.
- MU Y, DENG J X, LI H, et al. Mechanical and high-temperature dielectric properties of SiC_f/SiC composites with SiO₂ filler [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(3): 31-39.
- [15] 王永辉, 赛义德, 黄昊, 等. 铁纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料的制备和吸波性能 [J]. 材料研究学报, 2015, 29(2): 81-87.
- WANG Y H, SAI Y D, HUANG H, et al. Fabrication and electromagnetic microwave absorbing properties of Fe-nanoparticles/carbon fibers/epoxy resin based composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(2): 81-87.
- [16] 周远良, 赛义德, 张黎, 等. 树脂基 Fe 纳米粒子及碳纤维复合吸波平板的制备与性能 [J]. 材料工程, 2018, 46(3): 41-47.
- ZHOU Y L, SAI Y D, ZHANG L, et al. Preparation and performance of resin-based Fe nanoparticles/carbon fibers microwave absorbing composite plates[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(3): 41-47.
- [17] ZHANG H A, WU H J, GU S Y. Preparation and properties of MoSi₂ based composites reinforced by carbon nanotubes[J]. Ceramics International, 2013, 39: 7401-7405.
- [18] 张聪, 武志红, 李好婕, 等. 不同气氛制备的 MoSi₂/Al₂O₃ 复合材料显微结构与介电性能 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(6): 765-770.
- ZHANG C, WU Z H, LI Y J, et al. Microstructure and dielectric properties of MoSi₂/Al₂O₃ composites prepared in different atmospheres[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2017, 45(6): 765-770.
- [19] SUN H, CHE R, YOU X, et al. Cross-stacking aligned carbon-nanotube films to tune microwave absorption frequencies and increase absorption intensities [J]. Advanced Materials, 2014, 26(48): 8120-8125.
- [20] 梁彩云, 王志江. 耐高温吸波材料的研究进展 [J]. 航空材料学报, 2018, 38(3): 1-9.
- LIANG C Y, WANG Z J. Research progress of high temperature microwave absorption materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(3): 1-9.
- [21] LV H L, GUO Y H, YANG Z H, et al. A brief introduction to the fabrication and synthesis of graphene based composites for

- the realization of electromagnetic absorbing materials[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(3): 491-512.
- [22] CAO M S, HAN C, WANG X X, et al. Graphene nanohybrids: excellent electromagnetic properties for the absorbing and shielding of electromagnetic waves[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(17): 4586-4602.
- [23] MA J R, WANG X X, CAO W Q, et al. A facile fabrication and highly tunable microwave absorption of 3D flower-like Co_3O_4 -rGO hybrid-architectures [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 339(1): 487-498.
- [24] ZHANG Y L, WANG X X, CAO M S. Confinedly implanted NiFe_2O_4 -rGO: cluster tailoring and highly tunable electromagnetic properties for selective-frequency microwave absorption [J]. Nano Research, 2018, 11(3): 1426-1436.
- [25] CAO M S, WANG X X, CAO W Q, et al. Ultrathin graphene: electrical properties and highly efficient electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(26): 6589-6599.
- [26] CAO M S, HAN C, WANG X X, et al. Temperature dependent microwave absorption of ultrathin graphene composites [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(38): 10017-10022.

基金项目:国家自然科学基金项目(51502236);西安建筑科技大学基础研究基金(JC1496);先进耐火材料国家重点实验室开放基金(201602)

收稿日期:2018-01-25; **修订日期:**2018-07-10

通讯作者:武志红(1974—),男,副教授,博士,研究方向为高温结构材料及功能复合材料,联系地址:西安建筑科技大学材料科学与工程学院(710055),E-mail:zhihong@xauat.edu.cn

(本文责编:解 宏)