

碳化硅陶瓷复合材料的制备及吸波性能研究

赵艾洋, 耿志挺*, 郭昊宸, 吴昊晖

清华大学材料学院, 北京

收稿日期: 2025年9月5日; 录用日期: 2025年9月30日; 发布日期: 2025年10月15日

摘要

吸波材料作为防电磁干扰和电磁污染的有效屏障, 广泛应用于军事隐身、航空航天、个体防护等领域。本研究在不同温度下烧结不同镍含量的碳化硅样品, 并用网络分析仪对样品的吸波性能进行测试。结果显示, 含镍量越高的样品对于透射波和反射波的吸收性能越好。在1200°C下烧结的样品具有较好的对透射波的吸收性能, 1000°C具有最差的对反射波的吸收性能。本研究对于掺镍碳化硅材料的制备有重要指导意义, 进一步的研究可划分更细的温度梯度和镍含量梯度, 有望找到最合适的烧结温度和掺镍量, 为新型吸波材料的制备提供思路。

关键词

吸波材料, 碳化硅, 复合材料, 反射率

Preparation and Wave Absorption Performance Research of Silicon Carbide Ceramic Composites

Aiyang Zhao, Zhiting Geng*, Haocheng Guo, Haohui Wu

School of Material Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing

Received: September 5, 2025; accepted: September 30, 2025; published: October 15, 2025

Abstract

As an effective barrier against electromagnetic interference and pollution, absorbing materials are widely used in fields such as military stealth, aerospace, and personal protection. This study sintered silicon carbide samples with different nickel contents at different temperatures and tested their microwave absorption properties using a network analyzer. The results show that samples with higher

*通讯作者。

文章引用: 赵艾洋, 耿志挺, 郭昊宸, 吴昊晖. 碳化硅陶瓷复合材料的制备及吸波性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(10): 1837-1843. DOI: 10.12677/ms.2025.1510195

nickel content have better absorption performance for transmitted and reflected waves. The sample sintered at 1200°C has good absorption performance for transmitted waves, while 1000°C has the worst absorption performance. This study has important guiding significance for the preparation of nickel doped silicon carbide materials. Further research can be divided into finer temperature gradients and nickel content gradients, and it is expected to find the most suitable sintering temperature and nickel doping amount, providing ideas for the preparation of new absorbing materials.

Keywords

Microwave Absorbing Material, SiC, Composite, Reflection Loss

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

吸波材料作为防电磁干扰和电磁污染的有效屏障，广泛应用在军事隐身、航空航天、个体防护等领域[1]。铁镍磁性金属是传统的吸波材料，具备良好的磁性、低毒性、高相容性和强自旋极化性，但是，铁镍磁性金属的缺点同样显著，比如其密度大、高温稳定性差[2] [3]。这些缺点使其在吸波领域的应用受到了很大限制。

为了克服传统吸波材料的缺点，科研人员发展了许多新型吸波材料，碳化硅材料具有吸波性能可调、密度小、耐高温、强度大等优点，有望实现轻质、薄层等优良特性，因而成为近年来的研究热门[3] [4]。碳化硅的主要吸波机理为介电损耗，即通过介电材料在交变电磁场下的反复电子极化、离子极化等，将电磁波能量转化为热能损耗[5] [6]。但是因其与空气的阻抗匹配程度较低，高纯碳化硅在微波频段的吸波性能表现并不突出，难以发挥其吸波作用[7] [8]。为了提高碳化硅材料的吸波性能，本研究将碳化硅材料与铁镍磁性金属相结合，使其同时具备磁损耗机制和电损耗机制，从而提升其吸波性能。

2. 实验设计

2.1. 材料制备

2.1.1. 制备陶瓷结合剂

根据陶瓷结合剂成分比例，共配制 30 g 备用，称重后干磨混料、过筛(见表 1)。

上述十二份样品每份总质量均为 30 g，按照表 1 称量好各组分后，反复搅拌混合物，直至几乎无颗粒状物质残留，然后将混合物均匀涂覆在玻璃皿上并压实固化。待样品完全固化后，用切割机、磨床和砂纸加工样品至符合吸波性能测试时要求的样品标准尺寸：大块 22.86 mm × 10.16 mm × 2 mm (8.2~12.4 GHz 的波导测试)，小块 15.799 mm × 7.899 mm × 2 mm (12.4~18 GHz 的波导测试)。

Table 1. Composition proportion table of ceramic binder

表 1. 陶瓷结合剂成分比例表

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₃ BO ₄	Na ₂ CO ₃	K ₂ CO ₃	Li ₂ CO ₃	H ₂ O
质量分数	52.9	11.3	6.1	14.6	10.2	4.8	2

2.1.2. 制备陶瓷复合材料

配置分别含有 5%、10%、15% Ni 的 SiC，每份 30 g 备用。将 SiC-Ni 与陶瓷结合剂按质量比 4:1 进行称量，每组总重 30 g，即 24 g SiC-Ni 与 6 g 陶瓷结合剂。将配好的样品进行混料湿磨，干燥后再加入 5~8 wt% 浓度为 5 wt% 的 PVA 造粒，干压成型后放入管式炉内进行烧成。

总共做五组对照实验，分别为 5% Ni、1000℃；10% Ni、1000℃，15% Ni、1000℃；10% Ni、1200℃；10% Ni、1350℃。

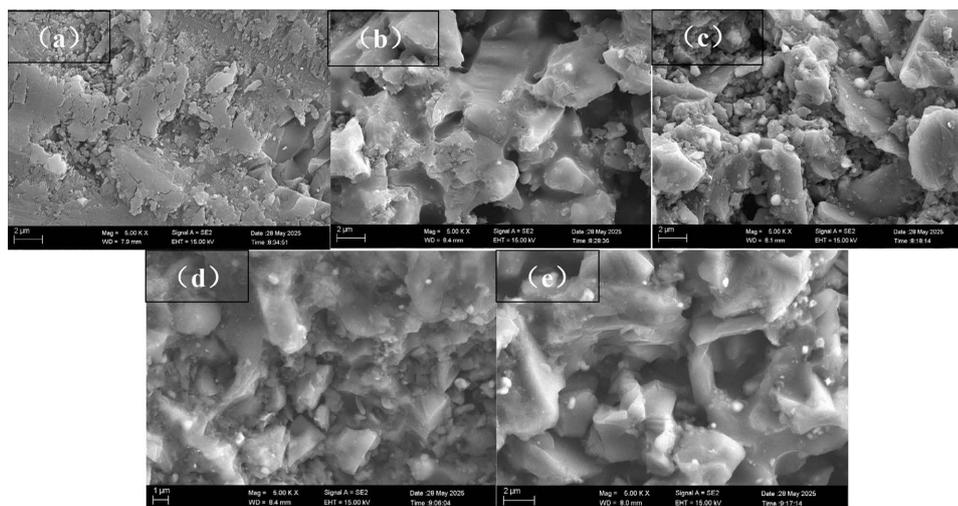
2.2. 性能测试和结构表征

吸波性能利用中电科 3656D 矢量网络分析仪(VNA)，采用波导传输法测试陶瓷复合材料的电磁参数 [9]-[11]。材料结构表征则采用 Rigaku 的 X 射线衍射分析仪确定复合材料的物相组成；使用 Phenom Pure 扫描电镜(SEM)观察复合材料的表面形貌，借助 Zeiss 扫描电镜(SEM)做 X 射线能谱分析(EDS)确定表面形貌的具体信息 [12] [13]。样品烧成时管式炉内的气体条件为真空环境，升温速率 10℃/min，保温 1 h。烧成后将样品打磨至所需尺寸(22.86 mm × 10.16 mm × 2 mm)。

3. 结果与讨论

3.1. 表面形貌

从五组碳化硅陶瓷复合材料样品表面形貌测试结果可以清晰地看到 Ni 颗粒较均匀地分布在样品表面，因而样品的掺镍效果良好(见图 1)。



注：(a) 5%~1000℃样品的表面形貌；(b) 10%~1000℃样品的表面形貌；(c) 15%~1000℃样品的表面形貌；(d) 10%~1200℃样品的表面形貌；(e) 10%~1350℃样品的表面形貌。

Figure 1. Surface morphology of ceramic composites

图 1. 陶瓷复合材料表面形貌

3.2. 成分测试

经过研磨、烧结、打磨加工后的样品存在 Ni 的损耗，且原本所含镍百分数越多的样品，损耗越多。其原因归结为两点：球磨时间不够，导致 Ni 并未完全分散开，烧结后打磨时 Ni 部分聚集在表面，因此打磨过程中会损失部分 Ni；烧结过程中氧气混入与 Ni 反应使得 Ni 聚集于偏表面位置。虽然镍含量有损失，但是含镍量仍然呈现递增趋势，因此有比较吸波性能的意义。EDS 能谱分析结果如表 2 所示：

Table 2. The percentage of nickel content in samples with different temperatures/compositions
表 2. 不同温度/成分样品的镍含量百分比

温度 \ 成分	5%	10%	15%
1000°C	3.94	5.03	8.48
1200°C		3.88	
1350°C		4.07	

3.3. 物相分析

根据 X 射线衍射图谱可知, 样品主要含 SiC 相, 部分 Ni₂Si 相, 以及少量的 SiO₂ 相, 因此基本得到了期望的物相组成(见图 2)。

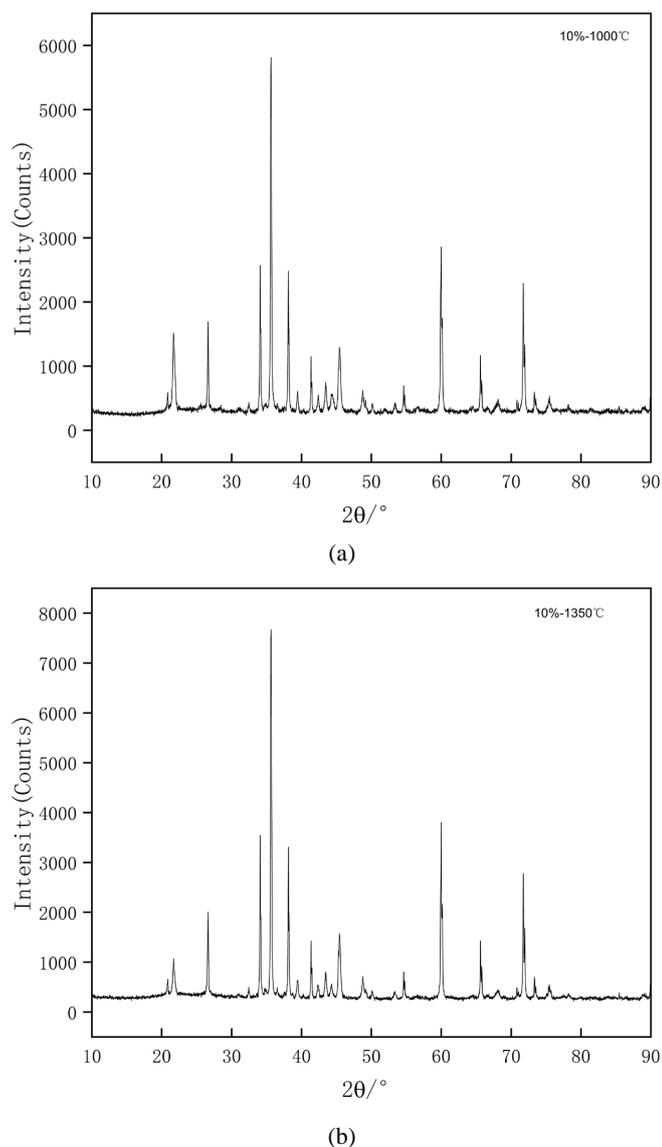


Figure 2. X-ray diffraction patterns of samples at 1000°C (a) and 1200°C (b)
图 2. (a) 1000°C 样品的 X 射线衍射图谱; (b) 1200°C 样品的 X 射线衍射图谱

3.4. 电磁参数测试

吸波材料性能优劣的一个重要参数是反射率 RL (Reflection Loss)，数值为负[14] [15]。材料的反射率越小，表明材料对电磁波吸收能力越强。对于本实验，通过使用矢量网络分析仪测试材料的电磁参数，用波导传输法测得 S_{11} 和 S_{21} 参数[16] [17]，两个参数与反射率，透射率的关系如下：

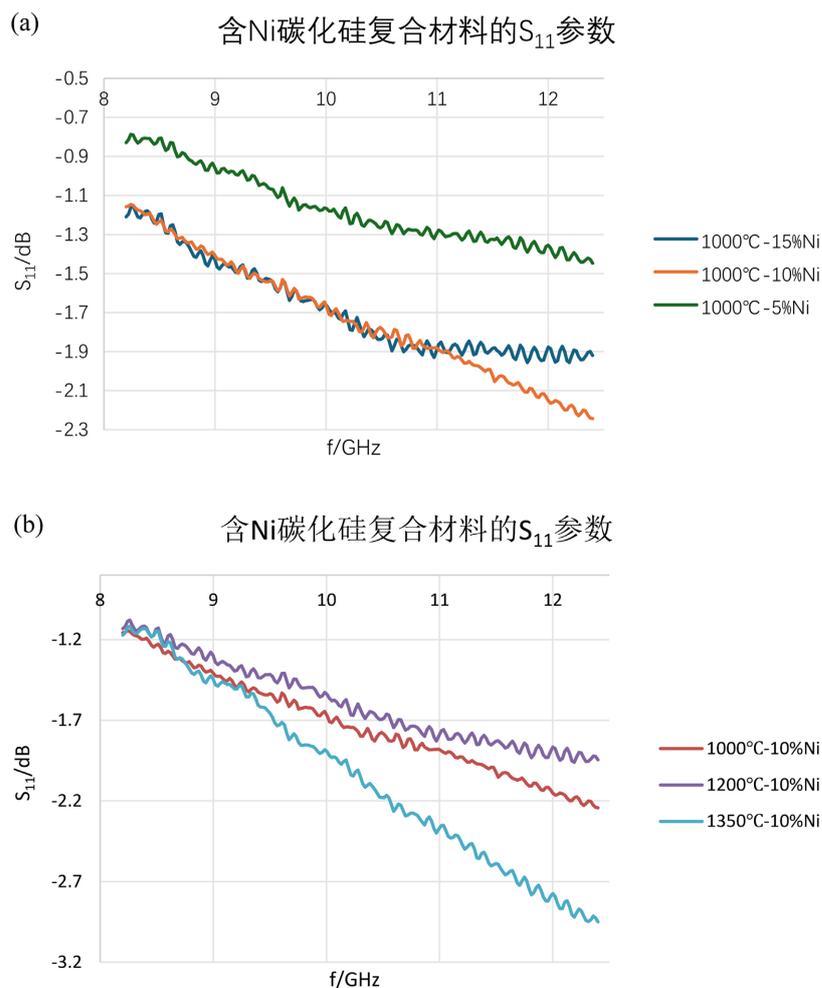
$$RL = -20 \lg |S_{11}|$$

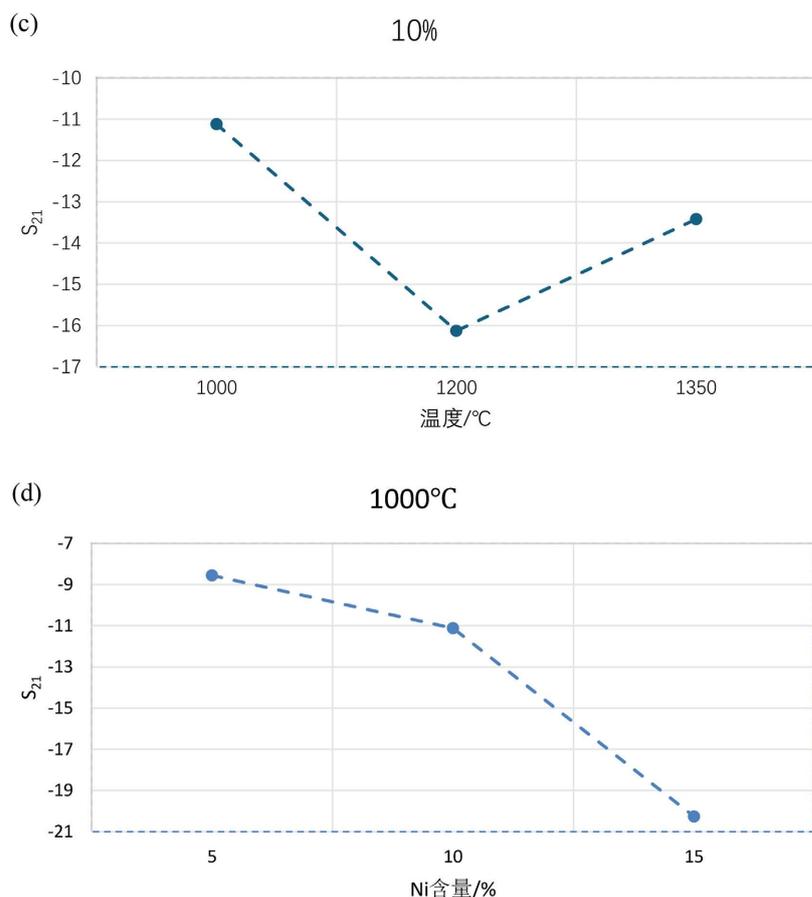
$$S_{11} (dB) = 10 \lg \left| \frac{\text{反射功率}}{\text{入射功率}} \right|$$

$$S_{21} (dB) = 10 \lg \left| \frac{\text{透射功率}}{\text{入射功率}} \right|$$

因此可以看出，测出的 S_{11} 的值越小，说明材料对反射波的吸收性能越好；测出的 S_{21} 的值越小，说明材料对透射波的吸收性能越好。

电磁参数测试结果如图 3 所示，根据实验结果我们可以得到：对于反射波的吸收，含镍浓度越高的样品吸收效果越好，1350℃的样品的吸收效果最优，1200℃的样品的吸收效果最差；对于透射波的吸收，含镍浓度越高的样品吸收效果越好，1200℃的样品的吸收效果最优，1000℃的样品的吸收效果最差。





注：(a) 不同含镍量样品的 S_{11} 参数值；(b) 不同烧成温度样品的 S_{11} 参数值；(c) 不同含镍量样品的 S_{21} 参数值；(d) 不同烧成温度样品的 S_{21} 参数值。

Figure 3. Microwave absorption properties of samples with different nickel contents/temperatures
图 3. 不同镍含量/温度样品的吸波性能

4. 结论

本研究在不同温度下烧结不同镍含量的碳化硅样品，并用网络分析仪对样品的吸波性能进行测试，得到结论如下：

(1) 含镍量越高的样品对于透射波和反射波的吸收性能越好；

(2) 1200°C的烧成温度为转折温度，在此温度下烧结的样品具有最优的对透射波的吸收性能，1000°C具有最差的对反射波的吸收性能。

本研究对于掺镍碳化硅复合材料的制备有重要指导意义，进一步的研究可通过划分更细的温度梯度和镍含量梯度，有望找到最合适的烧结温度和掺镍量，为新型吸波材料的制备提供思路。

基金项目

清华大学实践教学教改研究项目(DX07-02)。

参考文献

[1] 范跃农, 龚荣洲. 陶瓷吸波材料的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2010, 31(1): 538-541.

- [2] 曾东海, 陈阳如, 熊国宣. 无机吸波材料的研究进展[J]. 无机盐工业, 2007, 39(5): 4-7+28.
- [3] 杨会静. 典型电介质材料的微波介电及吸波性能研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [4] 刘继鹏. SiC 基核壳复合材料的制备及吸波性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [5] 肖卫要, 徐晋勇, 高成, 高波. 吸波涂层材料的研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(5): 53-56+61.
- [6] 于永涛, 王彩霞, 刘元军, 赵晓明. 吸波复合材料的研究进展[J]. 丝绸, 2019, 56(12): 50-58.
- [7] 吴建廷. SiC 基纳米粒子的制备与吸波性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [8] C. 基泰尔. 固体物理导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 455.
- [9] 崔若鹏, 耿志挺, 王琪, 赵宁, 慎庸仲. 碳化硅材料吸波性能的研究[J]. 材料科学, 2021, 11(5): 593-600.
- [10] 孙晶晶, 李建保, 张波, 翟华璋, 孙格靛. 陶瓷吸波材料的研究现状[J]. 材料工程, 2003(2): 43-47.
- [11] 邹桂真, 曹茂盛, 张亮, 金海波, 宿辉, 王正平. 化学镀制备 Ni 包覆纳米 SiC 核壳颗粒及其介电响应[J]. 无机材料学报, 2006, 21(4): 797-802.
- [12] 程涛, 李铁虎, 李莎莎, 赵廷凯, 程有亮, 侯翠岭. 吸波材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(8): 50-52+63.
- [13] 李海燕, 张世珍, 桂林, 孙春龙. 新型纳米吸波材料研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2010, 13(7): 25-27+33.
- [14] 葛凯勇, 王群, 张晓宁, 毛倩瑾, 周美玲. 碳化硅吸波性能改进的研究[J]. 功能材料与器件学报, 2002, 8(3): 263-266.
- [15] 魏红. 高介电环氧树脂复合材料的制备及性能研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [16] 李华展, 李永财, 兰琳, 李思维, 陈立富, 丁马太. 单向碳化硅纤维/环氧树脂复合材料吸波性能的研究[J]. 功能材料, 2016, 47(4): 4006-4010.
- [17] 葛凯勇, 王群, 张晓宁, 毛倩瑾, 周美玲. 超细镍粉制备及其在吸波材料中的应用[C]//中国材料研究学会. 纳米材料和技术应用进展——全国第二届纳米材料和技术应用会议论文集(下卷). 2001: F59-F62.