

(SiC)_p 表面修饰及吸波性能研究

宿辉¹, 曹茂盛²

(1.黑龙江工程学院 材料与化学工程学院, 哈尔滨 150050;
2.北京理工大学 材料科学与工程学院, 北京 100081)

摘要: 目的 提高(SiC)_p的吸波性能。方法 采用低成本、环保型的化学镀镍方法对(SiC)_p表面进行修饰,设计了氧化、亲水、敏化、活化系列增强前处理工艺,确定了(SiC)_p表面修饰的最佳工艺流程。用 SEM、EDS、XRD 等分别表征了修饰前后(SiC)_p形貌、成分、物相的改变,采用波导法测定了修饰后碳化硅复合粉体的介电性能,并以其为吸波剂在铝板上制备了吸波材料。结果 修饰后,获得了镀层连续、无光滑(SiC)_p裸露的较高质量的碳化硅复合粉体(简写为(Ni/SiC)_p)。(Ni/SiC)_p较原粉(SiC)_p,其形貌、组成、结构发生了明显改变,且介电常数、介电损耗、吸波性能明显增强,其中,介电常数的实部增强约为 22%,虚部增强约为 20%。涂覆 1 层(Ni/SiC)_p涂料,在 17.12 GHz 时,RL=−15.47 dB,大于涂敷 2 层原粉(SiC)_p涂料的吸收效果。涂覆 2 层(Ni/SiC)_p涂料,在 16.11 GHz 时,RL=−23.51 dB。**结论** 采用低成本、环保型方法实现了(SiC)_p表面高质量修饰,修饰后,复合颗粒(Ni/SiC)_p的介电性能及吸波性能均明显提高。

关键词: (SiC)_p; 表面修饰; 介电性能; 吸波性能; 化学沉积; 镀镍

中图分类号: TQ153.1; TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)02-0081-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.010

Surface Modification and Microwave Absorption Properties of (SiC)_p

XU Hui¹, CAO Mao-sheng²

(1. College of Materials and Chemical Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the microwave absorption performance of (SiC)_p. The surface of (SiC)_p was modified by low-cost and eco-friendly electroless nickel plating method. The oxidized, hydrophilic, sensitized and activated series enhanced pretreatment process was designed to determine the best surface modification flow of (SiC)_p. The morphology, composition and phase of (SiC)_p before and after plating were characterized by SEM, EDS and XRD. The dielectric properties of the modified (SiC)_p powder were measured by waveguide method. On an aluminum substrate, the obtained sample was made into the wave absorbing material. A high-quality modified silicon carbide composite powder with a continuous coating and no smooth (SiC)_p bareness was obtained ((Ni/SiC)_p). After modification, the morphology, composition and structure of (SiC)_p were

收稿日期: 2019-08-17; 修订日期: 2020-01-06

Received: 2019-08-17; Revised: 2020-01-06

基金项目: 哈尔滨市应用技术与开发项目(2016RAXXJ043)

Fund: Harbin Application Technology and Development Project (2016RAXXJ043)

作者简介: 宿辉(1971—),女,博士,教授,主要研究方向为材料表面技术。

Biography: XU Hui (1971—), Female, Doctor, Professor, Research focus: material surface technology.

通讯作者: 曹茂盛(1961—),男,博士,教授,主要研究方向为电磁概念材料。邮箱: caomaosheng@bit.edu.cn

Corresponding author: CAO Mao-sheng (1961—), Male, Doctor, Professor, Research focus: electromagnetic functional material. E-mail: caomaosheng@bit.edu.cn

引文格式: 宿辉, 曹茂盛. (SiC)_p 表面修饰及吸波性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 81-87.

XU Hui, CAO Mao-sheng. Surface modification and microwave absorption properties of (SiC)_p[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 81-87.

significantly changed, and the dielectric constant, dielectric loss and absorbing properties had an obvious improvement. Among them, the real permittivity increased by 22% and the imaginary permittivity increased by 20%. When one-layer (Ni/SiC_p) was coated on the sample, the reflection loss (RL) reached -15.47 dB at 17.12 GHz, which was more than absorption performance of two-layer (SiC_p) coating. After two-layer (Ni/SiC_p) was coated, the RL of absorber reached -23.51 dB at 16.11 GHz. High quality modification of (SiC_p) surface can be achieved by low cost and environmental protection method. After modification, the dielectric properties and wave absorption performance of (Ni/SiC_p) particles are significantly improved.

KEY WORDS: (SiC_p); surface modification; dielectric properties; absorbing performance; chemical deposition; nickel plating

(SiC_p)是一种性能优良的非氧化物陶瓷材料^[1-4],具有高强度、抗氧化、耐磨、耐腐蚀等优点,其电阻率在 $10^{-2}\sim 10^6 \Omega\cdot\text{cm}$ 之间,并随制造工艺改变连续可调,因而又是一种重要的微波材料。近年来,(SiC_p)作为介电和微波等功能材料使用受到关注^[5-10]。高温下,(SiC_p)制备的吸波材料电磁性能稳定,具有较宽的吸收频带,尤其对毫米、厘米波段吸收效果良好,是制备多波段吸波材料吸收剂的良好材料。

但研究发现,以原粉(SiC_p)作为吸波剂,其介电损耗及微波响应特性还不能满足应用要求,且(SiC_p)直接加入基体中,(SiC_p)与金属基体之间化学键的差别会导致界面润湿性能很差等,这些不足严重限制了(SiC_p)的应用^[11-18]。Min 等人^[12]通过微波湿刻蚀、离子沉积技术实现了(SiC_p)表面修饰。Yuan 等人^[13]优化了(SiC_p)表面修饰效果,提高了金属镍的沉积率,研究了 Ni 修饰 SiC 粉体的高温介电性能及微波吸收性能。研究表明,经金属镍修饰后的碳化硅,可以增强其微波吸收能力。Yang 等人^[14-15]采用化学沉积和氧化方法,在 SiC 粉末表面制备了环状的 NiO 纳米颗粒,形成了 $\text{NiO}@\text{SiC}$ 。介电性能测试表明, $\text{NiO}@\text{SiC}$ 较纯 SiC 介电常数虚部和损耗角正切值均明显提高,具有较好的微波吸收能力。Liu 等人^[16-20]研究了三维镍链网络下的高温电磁特性及可调谐微波吸收,结果显示,吸波性能得到了提高。

本文采用简单、环保的工艺方法,实现了磁性金属镍对(SiC_p)的表面修饰、改性,通过表面涂覆金属镍,改善了(SiC_p)的界面润湿性、介电性能及吸波性能等,进一步拓展了(SiC_p)的应用领域。

1 实验

1.1 试剂与原料

实验所用的主要化学试剂包括次亚磷酸钠($\text{NaH}_2\text{PO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$)、柠檬酸钠($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、硫酸镍($\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、乳酸、氯化亚锡等,均为分析纯。实验所用(SiC_p)为生产过程中产生的粗料。

1.2 试样制备

1.2.1 (SiC_p)的前处理

为了提高修饰效果,(SiC_p)改性前需要进行前处

理^[19]。前处理主要包括以下步骤:

1) 氧化处理。将(SiC_p)置于石英舟(或坩埚)中,在加热至 800 °C 的电阻炉中保温 $1\sim 2$ h,以除去(SiC_p)表面的有机杂质,同时增加 Ni 在(SiC_p)表面的形核几率。

2) 亲水处理。将氯化后的(SiC_p)加入 HCl、HF 混合溶液中,先超声分散,再机械搅拌。亲水性溶液中的 HF 可与(SiC_p)表面氧化部分发生反应,从而提高(SiC_p)与水溶液的界面润湿性,使(SiC_p)表面均匀分布一层水膜,为敏化处理做准备。

3) 敏化处理。此过程在 SnCl_2 与 HCl 的水溶液中进行,将亲水处理后的(SiC_p)加入到该溶液中,超声分散后,再机械搅拌、过滤、清洗、干燥。敏化处理使 Sn^{2+} 吸附在(SiC_p)表面,为活化处理打下基础。

4) 活化处理。此过程在 PdCl_2 与 HCl 水溶液中进行。将敏化后的(SiC_p)加入到该溶液中,超声分散后再进行机械搅拌、过滤,并用蒸馏水清洗数次,室温下干燥。活化处理使溶液中的 Pd^{2+} 与(SiC_p)表面所吸附的 Sn^{2+} 发生反应,沉积在(SiC_p)表面,作为镍的形核点。

1.2.2 (SiC_p)的修饰工艺

称取一定质量经前处理后的(SiC_p),加入镀液中修饰,镀液配方见表 1。(SiC_p)表面修饰过程流程图如图 1 所示。修饰温度为 45 °C, pH 值约为 9.0。

表 1 化学镀液的主要组成
Tab.1 Main composition of electroless plating solution

Composition	Component/(mol·L ⁻¹)
$\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.55
$\text{NaH}_2\text{PO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.45
NH_4Cl	1.64
$\text{Na}_2\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.25
$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	2.5×10^{-3}

1.2.3 表征方法

用 S2570 型扫描电子显微镜观察修饰前后碳化硅的形貌,用 KYKY 型能量分散仪表征修饰前后碳化硅的成分,用 DPmas2rB 型 X-Ray 射线仪表征修饰前后碳化硅的物相。采用 HP8722ES 型矢量网络分析仪测试试样的介电性能,测试方法为波导法。将待测颗粒加入熔融的石蜡中,压入外径 7.00 mm、内径

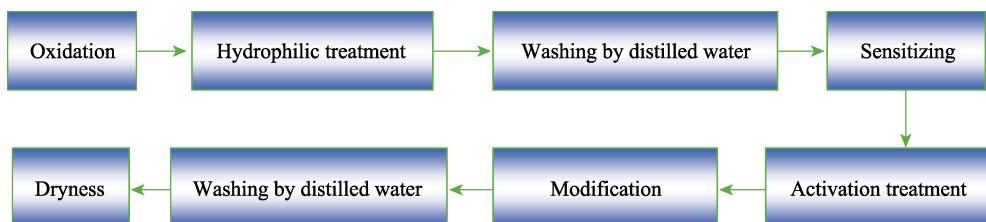


图 1 $(\text{SiC})_p$ 表面修饰过程
Fig.1 Process of modification for $(\text{SiC})_p$

3.00 mm、厚 2.00 mm 的环状模具中制成试件，在室温下冷却后，对其进行 X 波段电磁参数的测量。

2 结果及分析

2.1 Ni 纳米晶的沉积及 Ni 修饰前后 $(\text{SiC})_p$ 的结构表征

2.1.1 Ni 纳米晶的沉积

图 2 为 Ni 纳米晶沉积 $(\text{SiC})_p$ 表面的过程示意图^[20]。首先， $(\text{SiC})_p$ 经前处理后，表面吸附了一定数量的 Sn^{2+} 、 Pd^{2+} 。二者在 $(\text{SiC})_p$ 表面上形成了 Pd-Sn 催化核，充当 Ni 沉积的种子。其次，将具有 Pd-Sn 催化

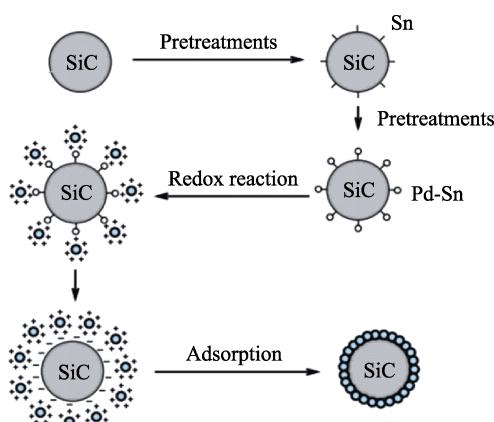


图 2 镍纳米晶沉积 $(\text{SiC})_p$ 过程示意图
Fig.2 Deposition of Ni nanocrystal on $(\text{SiC})_p$

核的 $(\text{SiC})_p$ 加入化学镀液时，其表面将发生氧化还原反应（以催化 Pd-Sn 催化核）， Ni^{2+} 被还原为金属镍。金属镍引发 $(\text{SiC})_p$ 表面的自催化氧化还原反应，最终形成了 Ni 沉积的 $(\text{SiC})_p$ 。如前所述，在反应过程中， NiSO_4 提供 Ni^{2+} ， NaH_2PO_2 充当还原剂。因此，Ni 的沉积过程实际上是 Ni^{2+} 与 H_2PO_2^- 的化学反应过程^[20]。

2.1.2 实物比较

实验发现，修饰前后 $(\text{SiC})_p$ 的颜色发生了明显变化，如图 3 所示。图 3a 为修饰前 $(\text{SiC})_p$ ，颜色为灰白色。图 3b 为修饰后的 $(\text{SiC})_p$ ，其颜色为灰黑色，这表明 $(\text{SiC})_p$ 的表面组成发生了改变。

2.1.3 形貌及成分

为了进一步分析 $(\text{SiC})_p$ 形貌与成分的变化，对修饰前后样品进行了 SEM、EDS 测试。图 4 为修饰前后碳化硅的 SEM 像。由图 4a 可见，原粉 $(\text{SiC})_p$ 形状不规则，有条形、三角形等，表面光滑，无颗粒沉积。由图 4b 可见，修饰后 $(\text{SiC})_p$ 表面均匀地沉积了衬度较高的其他物质，沉积层毗连，无光滑 $(\text{SiC})_p$ 裸露。涂层厚度一般为 $0.01\sim0.1 \mu\text{m}$ ^[20]。

图 5 为修饰前后碳化硅的 EDS 谱。原粉 $(\text{SiC})_p$ 的 EDS 谱中只有明显的 Si 峰，无 Ni 峰，说明沉积层的主要成分为硅；修饰后 $(\text{SiC})_p$ 的 EDS 谱中存在明显的 Ni 峰，说明修饰后， $(\text{SiC})_p$ 表面沉积了较多的金属镍，简写为 $(\text{Ni/SiC})_p$ 。

2.1.4 物相分析

图 6a 为原粉 $(\text{SiC})_p$ 的 XRD 图谱，结果显示：实

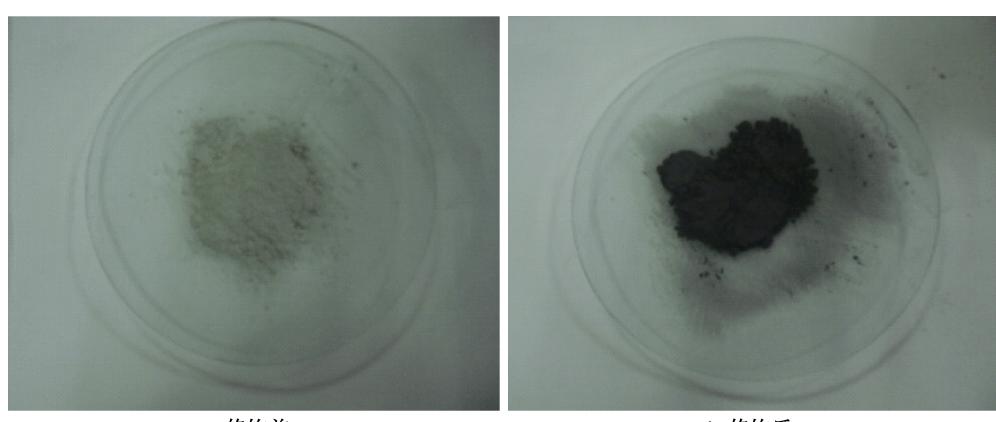


图 3 $(\text{SiC})_p$ 修饰前后的颜色变化
Fig.3 Color change (a) before and (b) after $(\text{SiC})_p$ modification

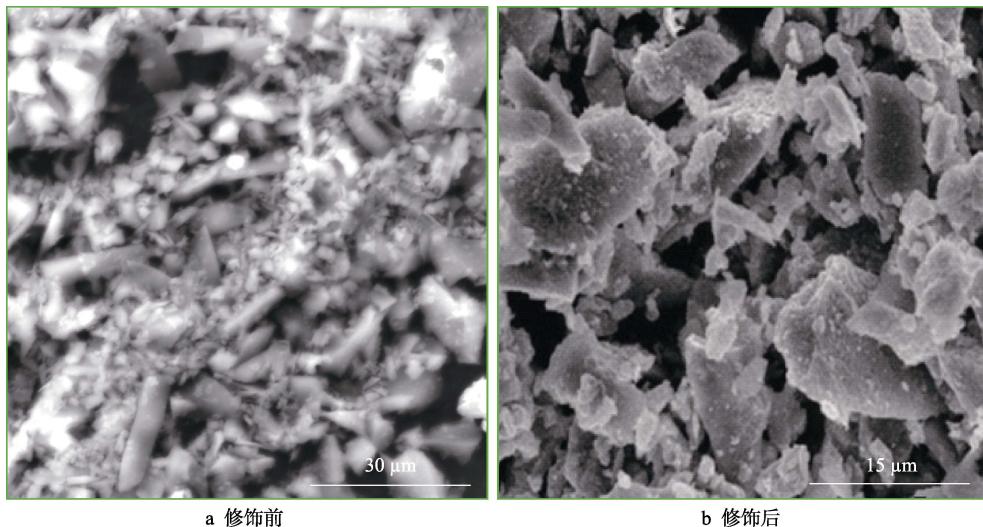


图4 (SiC)_p修饰前后的SEM
Fig.4 SEM of (SiC)_p (a) before and (b) after modification

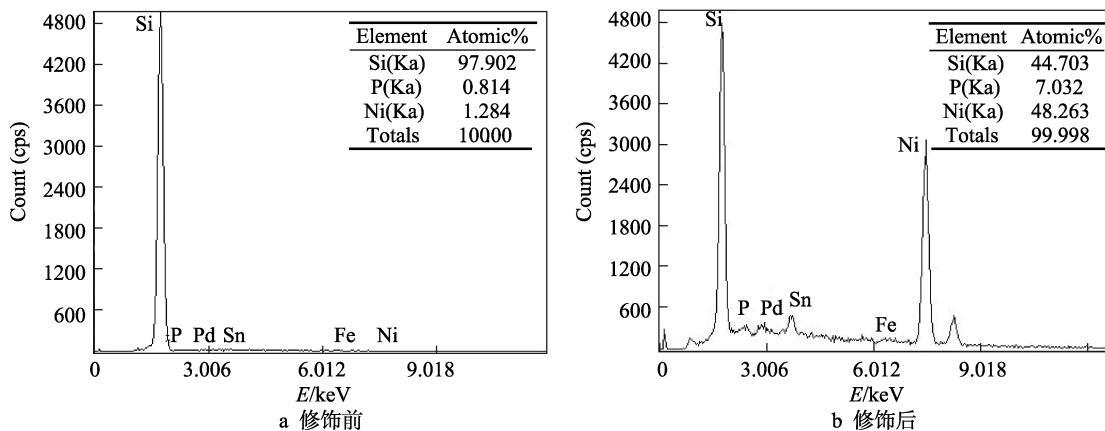


图5 (SiC)_p修饰前后的EDS
Fig.5 EDS of (SiC)_p before (a) and after (b) modification

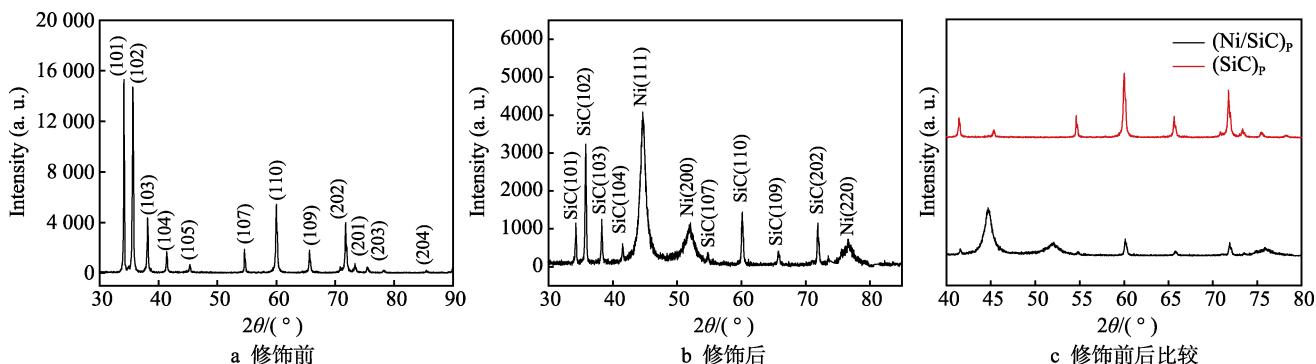


图6 (SiC)_p修饰前后的XRD图谱
Fig.6 XRD patterns of (SiC)_p before/after modification: a) before modification; b) after modification; c) comparison before/after modification

验所用(SiC)_p为 α -(SiC)_p, 图谱中除了SiC的衍射峰外, 没有观察到其他衍射峰。图6b为修饰后(SiC)_p的XRD图谱, 图中存在SiC和Ni的衍射峰。由图6b还可观察到镍的衍射峰宽化, 这表明(Ni/SiC)_p表面镍颗粒尺寸较小, 为非晶态。图6c为相同区间下, 修饰前后碳化硅的XRD图谱比较, 可见在 $2\theta=45^\circ$ 、

52° 、 76° 附近, 修饰前无吸收峰, 修饰后出现明显的镍吸收峰, 即修饰前后(SiC)_p的物相发生了明显改变。

2.2 修饰前后(SiC)_p的性能分析

2.2.1 涂层制备

依次将(Ni/SiC)_p与丙酮、环氧树脂、固化剂等混

合, 超声分散再机械搅拌, 制得吸波涂料, 密封待用。用无水乙醇清洗铝板 ($160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$), 烘干后将吸波涂料涂覆在铝板上, 并置于烘箱中略烘, 再涂覆、烘干, 自然固化一周, 完成一层涂覆。

2.2.2 $(\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的介电性能

采用 HP8722ES 型矢量网络分析仪在 8~12 GHz

范围内对原粉($\text{SiC})_p$ 和($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的介电性能进行测试, 如图 7 所示, 图 7a、b 分别为原粉($\text{SiC})_p$ 和($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的介电常数实部、虚部随频率的变化曲线。由图 7 可见: 在 X 波段 (8~12 GHz), ($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的介电常数较原粉($\text{SiC})_p$ 明显增强, 其中, 介电常数实部的增强幅度约为 22%, 虚部的增强幅度约为 20%。

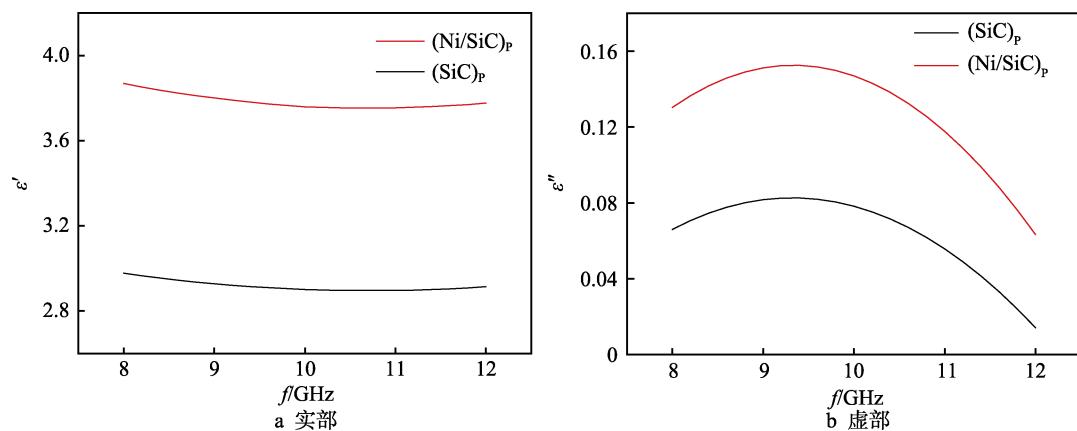


图 7 介电常数随频率的变化曲线
Fig.7 Curve of permittivity with frequencies: a) real part; b) imaginary part

图 8 为原粉($\text{SiC})_p$ 和($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的介电损耗随频率的变化曲线。由图 8 可见, 在 X 波段, ($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的介电损耗均较原粉($\text{SiC})_p$ 明显增强, 介电损耗的增强幅度约为 39%, 且在整个 X 波段范围内呈均匀增强趋势。图 8 中右上角为($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的等效电路图模型, 由等效电路图可见, 随频率增加, 阻抗增大, 损耗增大, 预示涂料具有较好的吸波性能。

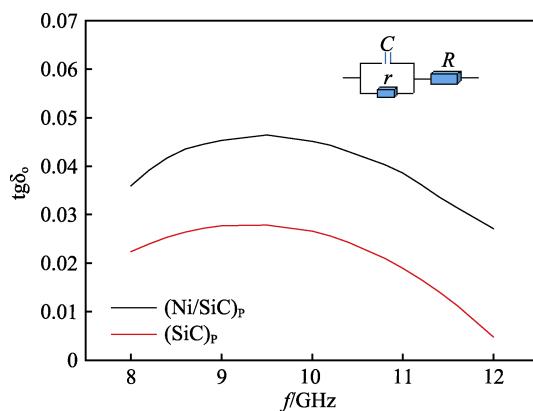


图 8 介电损耗随频率的变化曲线
Fig.8 Curve of dielectric loss with frequencies

2.2.3 $(\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的吸波性能

不同吸波涂料的吸波性能测试见表 2。由表 2 中数据可知, 当吸波剂含量为 10% 时, 不同吸波剂涂料的吸波性能不同。在 4~18 GHz 频率范围内, 以原粉($\text{SiC})_p$ 为吸波剂所制得涂料对电磁波的反射率为 -3.72 dB , 达不到 $>8 \text{ dB}$ 的要求。以($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 为吸波剂所制得涂料的吸波性能有显著改善, 涂覆 1 层

($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的涂料在 17.12 GHz 时, RL 为 -15.47 dB , 大于涂敷 2 层原粉($\text{SiC})_p$ 涂料的吸收效果。涂覆 2 层($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的涂料在 16.11 GHz 时, RL 为 -23.51 dB , 吸波性能良好。

图 9 为 1、2、3 号吸波涂料的 R - F 曲线 (插图为($\text{Ni}/\text{SiC})_p$ 的 SEM 像)。由图 9 可见, 和 1 号吸波涂

表 2 涂料的吸波性能参数

Tab.2 Parameters of microwave absorption of the paints

No	Absorber	Absorber content/%	Number of coating layers	Absorbing properties
1	$(\text{SiC})_p$	10	2	18.34 GHz, -3.72 dB
2	$(\text{Ni}/\text{SiC})_p$	10	1	17.12 GHz, -15.47 dB
3	$(\text{Ni}/\text{SiC})_p$	10	2	16.11 GHz, -23.51 dB

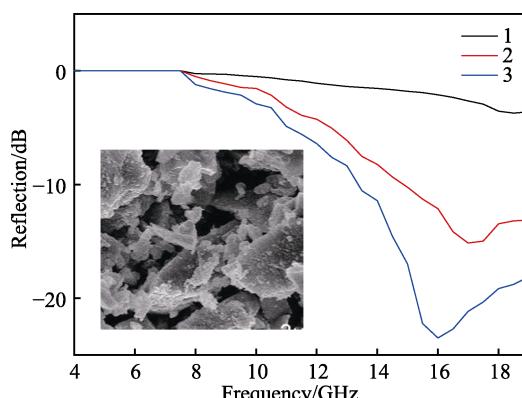


图 9 吸波涂料的 R - F 曲线
Fig.9 R - F curves of microwave absorbing paints

料的吸波性能相比，2号吸波涂料的吸收性能有所提高，3号吸波涂料的吸收性能最好，即以 $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ 为吸波剂所制得涂料的吸波性能优良，且相对于1、2号吸波涂料，有逐渐宽化、低频的趋势。

2.2.4 $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ 的介电增强机理分析

根据电介质理论，修饰后 $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ 的介电损耗主要来源于， Ni 纳米晶和 SiC 晶体内部缺陷导致的介电极化损耗及异质材料的界面极化损耗。另外，在交变电场下，载流子迁移形成的电导损耗对介电损耗也有一定的贡献，如图10所示^[14-15]。

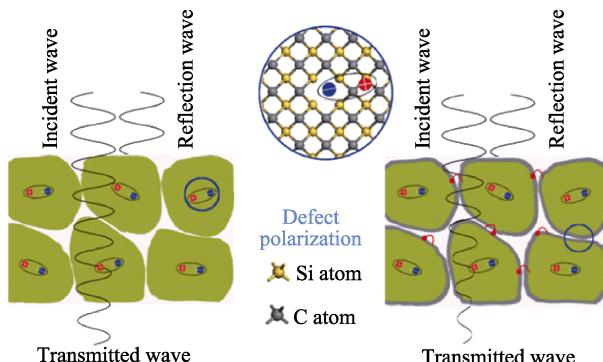


图10 碳化硅和镍内部的多重极化示意^[14]

Fig.10 Schematic illustrations of multiple polarization in SiC and Ni^[14]

事实上，化学修饰后的 $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ ，由于镍磁性纳米晶引入碳化硅表面，在电磁场作用下，有磁损耗，其来源于镍纳米晶，物理机制是自然共振。另外，在交变电磁场下，镍纳米晶可能还会有一定的磁涡流损耗，其物理机制是电磁场作用下的镍纳米晶内部的磁共振和微涡流损耗^[16-17]。

从微波吸收机理角度分析， $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 属于电损耗型吸波材料，材料的电导率对吸波性能有很大的影响。化学修饰后， $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ 可视为无数个由 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 和金属镍组成的复合结构。复合材料兼具二者的优点： $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 可以吸收特定频率的电磁波；金属磁性超细镍粉磁导率、介电常数大，电磁损耗大。二者混合后，复合材料产生了多种新的吸波损耗机制，使其吸波性能出现明显改变。超细镍粉比表面积大，吸附作用强，表面原子比例高，其修饰在 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 表面能在加强材料导电、导磁作用的同时，衰减电磁波强度；又由于金属镍的磁性，使得其衰减电磁波的本领进一步增强。

综上所述，从微观上讲，复合结构单元使每个颗粒兼备了电损耗和磁损耗的特点；从宏观上讲，相对于原粉 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ ，复合颗粒 $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ 的吸波性能有了明显提高，更益于达到“轻”、“薄”、“宽”、“强”的目标，有着广阔的发展前景。

3 结论

本文采用低成本、环保型的绿色化学沉积方法，

对工程粗料 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 进行表面修饰，制备出复合颗粒 $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ ，并得到如下结论：

1) 修饰前后 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 的颜色、形貌、成分、物相均发生了明显变化，颜色由灰白色变成灰黑色。SEM像显示，其表面沉积了衬度较高的其他物质。EDS显示，沉积物质为金属镍。XRD图谱中可见明显的宽化镍峰。综合可知，修饰后得到了沉积层连续且无光滑 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 裸露的高质量复合颗粒 $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ 。

2) 采用波导法测定了修饰前后 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 的介电性能，并分别以其为吸收剂制备了吸波涂料，测试、比较了吸波性能。结果显示， $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ 的介电常数、介电损耗、吸波性能均较原粉 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 明显提高。其中，介电常数实部的增强幅度约为22%，虚部的增强幅度约为20%。涂覆1层 $(\text{Ni}/\text{SiC})_{\text{P}}$ 为吸收剂的涂料在17.12 GHz时， $RL = -15.47 \text{ dB}$ ，吸收效果优于涂敷2层原粉 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 为吸收剂的涂料。

参考文献：

- [1] ZHANG N L, YANG J F, DENG Y C. Preparation and properties of reaction bonded silicon carbide (RB-SiC) ceramics with high SiC percentage by two-step sintering using compound carbon sources[J]. Ceramics International, 2019, 45(8): 15715-15719.
- [2] BANNYKH A, UTKIN N, BAKLANOVA S. The peculiarities in oxidation behavior of the ZrB_2 - SiC ceramics with chromium additive[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2019, 84(11): 1050231.
- [3] MASASHI K, NAOTO I, YOSHITAKA N. Characterisation of defects in p-type 4H-, 6H- and 3C-SiC epilayers grown on SiC substrates[J]. Materials letters, 2019, 254(11): 96-98.
- [4] 宿辉, 张兆国, 尹志娟. 镍基纳米 $(\text{SiC})_{\text{P}}$ 化学复合镀层的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(2): 55-57.
- [5] XU Hui, ZHANG Zhao-guo, YIN Zhi-juan. Study on electroless nickel based nano $(\text{SiC})_{\text{P}}$ composite coating[J]. Surface technology, 2010, 39(2): 55-57.
- [6] 宿辉, 邹桂真, 曹茂盛. SiC 纳米/微米粒子表面修饰、涂覆的研究进展[J]. 材料工程, 2004(10): 57-60.
- [7] XU Hui, ZOU Gui-zhen, CAO Mao-sheng. Research progress on SiC nanometer/micron particle surface decorating coating[J]. Journal of materials engineering, 2004(10): 57-60.
- [8] ZOU G Z, CAO M S. A nanoscale core-shell of β - $\text{SiC}_{\text{P}}\text{-Ni}$ prepared by electroless plating at lower temperature[J]. Surface and coatings technology, 2006, 201(12): 108-112.
- [9] ZHOU Y, KANG Y Q, FANG X Y, et al. Mechanism of enhanced dielectric properties of SiC/Ni nano-composites [J]. Chinese physics letters, 2008, 25(5): 1902-1904.
- [10] ZHANG H J. The preparation and microwave properties of SiC ferrite by citrate sol-gel process[J]. Mater eng, 2001,

- 84: 252-257.
- [9] LIU J R, MASAHIRO I, KEN-ICHI M. Magnetic and electromagnetic wave absorption properties of α -Fe/Z α -Fe/Z-type Ba-ferrite nanocomposites[J]. *Appl phys lett*, 2006, 88(6): 062503.
- [10] NIU Z X, CAO F H, WANG G W. Electrodeposition of Ni-SiC nanocomposite film[J]. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 2007, 17(1): 9-15.
- [11] 邹桂真, 曹茂盛, 张亮, 等. 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.
ZOU Gui-zhen, CAO Mao-sheng, ZHANG Liang, et al. Preparation of Ni-coated SiC core-shell nanoparticles by electroless plating and their dielectric response[J]. *Journal of inorganic materials*, 2006, 21(4): 797-802.
- [12] KANG M, KIM J M, KIM J W. Simple and fast ion sediment microwave-enhanced wet etching of SiC particles for electroless Ni-P plating[J]. *Surface and coatings technology*, 2002, 161(1): 79-85.
- [13] YUAN J, YANG H J, HOU Z L, et al. Ni-decorated SiC powders: Enhanced high-temperature dielectric properties and microwave absorption performance[J]. *Powder technology*, 2013, 237: 309-313.
- [14] YANG H J, CAO M S, LI Y, et al. Enhanced dielectric properties and excellent microwave absorption of SiC powders driven with NiO nanorings[J]. *Advanced optical materials*, 2014, 2(3): 214-219.
- [15] YANG H J, CAO W Q, ZHANG D Q, et al. NiO hierarchical nanorings on SiC: Enhancing relaxation to tune microwave absorption at elevated temperature[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, 7(13): 7073-7077.
- [16] LIU J, CAO M S, LUO Q, et al. Electromagnetic property and tunable microwave absorption of 3D Nets from nickel chains at elevated temperature[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, 8(34): 22615-22622.
- [17] CAO M S, WANG X X, ZHANG M, et al. Electromagnetic response and energy conversion for functions and devices in low-dimensional materials[J]. *Advanced functional materials*, 2019, 29(25): 1807398.
- [18] VAEZIM R, SADRNEHAADS K, NIKZAD L. Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics[J]. *Colloids and surfaces A: Physicochem eng aspects*, 2008, 315(5): 176-180.
- [19] 宿辉, 曹茂盛, 王正平. SiC_p 表面修饰及结构表征[J]. 材料工程, 2005(2): 37-40.
XU Hui, CAO Mao-sheng, WANG Zheng-ping. Surface decoration and characterizations on silicon carbide particles based on electroless plating[J]. *Material engineering*, 2005(2): 37-40.
- [20] XU H, KANG Y Q, ZHANG L, et al. Deposition behavior and mechanism of Ni nanoparticles on surface of SiC particles in solution systems[J]. *Chinese physics letters*, 2010, 27(5): 058103.

(上接第 80 页)

- [12] QING Y, ZHOU W, LUO F, et al. Titanium carbide (MXene) nanosheets as promising microwave absorbers [J]. *Ceramics international*, 2016, 42: 16412-16416.
- [13] ZHANG X, WANG H, HU R, et al. Novel solvothermal preparation and enhanced microwave absorption properties of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene modified by insitu coated Fe_3O_4 nanoparticles[J]. *Applied surface science*, 2019, 484: 383-391.
- [14] NAGUIB M, MOCHALIN V N, BARSOUM M W, et al. 25th anniversary article: MXenes: A new family of two-dimensional materials[J]. *Advanced materials*, 2014, 26: 992-1005.
- [15] HE P, CAO M S, SHU J C, et al. Atomic layer tailoring titanium carbide MXene to tune transport and polarization for utilization of electromagnetic energy beyond solar and chemical energy[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, 11: 12535-12543.
- [16] CAO M S, CAI Y Z, HE P, et al. 2D MXenes: Electroma-

- netic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding[J]. *Chemical engineering journal*, 2019, 359: 1265-1302.
- [17] 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: 4586-4602.
- [18] TANG M, ZHANG J, BI S, et al. Ultrathin topological insulator absorber: unique dielectric behavior of Bi_2Te_3 nanosheets based on conducting surface states[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, 11: 33285-33291.
- [19] ZHAO J, LIU L, JIANG R, et al. Dielectric relaxation and magnetic resonance in microwave absorption performance of $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) nanocrystals[J]. *Ceramics international*, 2019, 45: 18347-18355.
- [20] ZHAO J, ZHANG H, OU X. Tailoring the shape and size of Fe_3O_4 nanocrystals by oxidation-precipitation processes for microwave absorption enhancement[J]. *Journal of materials science: Materials in electronics*, 2019, 30: 4943-4952.