引文格式： *刘杨登科，王晓猛，陈义，等. 钛掺杂硼改性聚碳硅烷制备及其衍生陶瓷电磁性能研究[J]. 航空制造技术，2026，69(21)：26020300.*

LIU Yangdengke, WANG Xiaomeng, CHEN Yi, et al. Preparation of titanium-doped boron-modified polycarbosilane and electromagnetic properties of its derived ceramics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(21): 26020300.

钛掺杂硼改性聚碳硅烷制备及其衍生陶瓷电磁性能研究

刘杨登科，王晓猛，陈　义，徐俊杰，刘烨锟，王　岭，陈明伟，邱海鹏

（中国航空制造技术研究院复合材料技术中心，北京 101300）

[摘要]　针对传统微波吸收材料高温性能不可逆衰减、纯碳化硅陶瓷介电损耗能力不足等问题，本文以硼改性聚碳硅烷（BP45）为前驱体，采用二氯二茂钛进行茂金属改性，制备了不同钛含量的硼钛改性聚碳硅烷（Ti-BP45）前驱体，经1500 ℃惰性气氛高温裂解获得SiCBTi衍生陶瓷。采用试验测试与仿真模拟相结合的方法研究了Ti-BP45的分子结构、衍生陶瓷相组成、微观形貌以及对应的陶瓷电磁性能与微波吸收机理。结果表明，Ti以化学结合的方式成功嵌入BP45分子骨架，经高温裂解后均匀分布于陶瓷基体中，原位生成TiC相；随着Ti含量升高，衍生陶瓷复介电常数实部、虚部均提升，损耗机制由单一极化损耗主导逐渐向界面极化与电导损耗协同转变。得益于多重损耗机制的协同作用，衍生陶瓷在薄厚度下实现了优异的微波吸收性能，其中质量分数10% Ti样品在1.4 mm厚度下反射损耗达−46.16 dB，质量分数3% Ti样品有效吸收带宽可达4.5 GHz。本研究通过前驱体分子结构设计实现了对SiC基陶瓷电磁性能的调控，揭示了Ti掺杂调控介电损耗的规律，为航空航天领域新一代微波吸收材料的研发提供了新思路与有益参考。

关键词： 钛掺杂硼改性聚碳硅烷；前驱体转化法；介电性能；微波吸收机理；电磁仿真

中图分类号： V25；TB332　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.16080/j.issn1671-833x.26020300



刘杨登科

硕士研究生，研究方向为微波吸收材料。

碳化硅（SiC）陶瓷具备高强度、高硬度、优异的耐高温氧化性能、耐腐蚀性及良好的热稳定性，在航空航天、核能等极端环境高技术领域发挥着至关重要的作用[1−3]。聚碳硅烷（PCS）作为制备SiC材料最常用且高效的前驱体，可通过前驱体转化法实现从有机聚合物到无机陶瓷的结构演变，其高陶瓷产率、灵活的分子可设计性及良好的工艺性能，使其成为研发高性能、复杂构型SiC基材料的核心原料[4−6]。

随着现代电子信息技术与军事低可探测性技术的飞速发展，对能够在高温环境下长期稳定服役的宽频、高效微波吸收材料的需求日益迫切[7−9]。然而，传统微波吸收剂体系存在显著的高温应用短板：铁氧体类微波吸收剂居里温度较低，高温下磁损耗性能会发生不可逆的严重衰减[10−11]；碳系材料（如碳纳米管、石墨烯）虽介电损耗能力强，但高温抗氧化性差、易烧蚀的固有缺陷，难以在高热流、强氧化的极端服役环境中应用[11−12]。因此，兼具耐高温性能和耐腐蚀性的SiC基材料，被视为

收稿日期： 2026−07−07；**退修日期：** 2026−07−24；**录用日期：** 2026−08−11

通信作者： 邱海鹏，研究员，博士，长期从事国产高性能陶瓷纤维应用、陶瓷基和碳基复合材料的研究。

极具潜力的高温微波吸收材料[13–15]。然而，由纯PCS经高温裂解得到的SiC陶瓷通常电阻率高，介电损耗能力弱，难以满足高效电磁波衰减的性能要求[4,16]。为此，对PCS前驱体进行分子结构设计与异质元素掺杂改性，成为调控其裂解产物微观结构、相组成及电磁性能的关键途径[5,17–18]。

目前，PCS的改性研究主要通过引入异质元素来优化其裂解陶瓷的性能[5,18–19]。可改性的异质元素主要分为两类：(1)硼(B)、氮(N)等非金属元素，可优化PCS的裂解行为、提高陶瓷产率，以及增强材料的高温抗氧化与抗蠕变性能[5,19–20]；(2)过渡金属元素，旨在赋予材料可调的电、磁及催化等功能特性[18,21]。其中，硼(B)元素已被广泛证实可以有效抑制SiC晶粒高温粗化，促进保护性硼硅酸盐玻璃相形成，显著提升SiC基材料的高温抗氧化性能[5,19–20]。研究表明，引入过渡金属元素是提升SiC基材料电磁损耗能力的有效手段[9–11]。其中，钛(Ti)元素的引入展现出独特优势。在PCS裂解过程中，Ti不仅能促进β-SiC晶粒的形核与生长，更易与体系中的自由碳反应生成碳化钛(TiC)等高导电相[11,17,21]。这些导电相的生成，可有效调控复合材料的电导率，优化其阻抗匹配，并通过引入显著的电导损耗来增强对电磁波的衰减[11,21]。

本研究以实验室研制的硼改性聚碳硅烷为原料，选取二氯二茂钛为“钛源”，制备出一系列不同Ti含量的钛掺杂硼改性聚碳硅烷衍生SiC基陶瓷。采用同轴法测试出衍生陶瓷粉体的电磁参数，依托CST电磁仿真软件，对其所制备涂层的微波吸收性能进行模拟预测。同时，结合理论分析和仿真结果，系统研究了钛掺杂调控下聚合物衍生陶瓷粉体的电磁参数变化规律，为后续SiC基材料性能优化和微波吸收效果提升提供理论依据。本研究可为兼具强电磁波衰减、宽频吸收特性与优异高温服役稳定性的新型碳化硅(SiC)基微波吸收材料研发，提供全新的设计思路与技术参考。

1 试验与仿真

1.1 原材料

固态硼改性聚碳硅烷(BP45)为中国航空制造技术研究院复合材料技术中心生产；二甲苯(分析纯)由中国化工集团有限公司生产；二氯二茂钛(Cp_2TiCl_2，纯度98%)由安徽泽升科技股份有限公司生产；高纯氩气由北京普莱克斯实用气体有限公司提供。

1.2 硼钛改性聚碳硅烷及其衍生陶瓷制备方法

硼钛改性聚碳硅烷制备方法如图1所示。首先，将一定质量的BP45加入圆底烧瓶中，加入相同质量的二甲苯，通过搅拌器进行充分搅拌，使BP45充分溶解；之后，在上述二甲苯溶液中加入一定比例的Cp_2TiCl_2，于室温下搅拌5~10 min至完全溶解；最后，于150 ℃下进行3~3.5 h抽真空去除溶剂，获得红褐色多孔状固体(Ti–BP45)，将其研磨为粉末并置于容器中。

硼钛改性聚碳硅烷衍生陶瓷制备方法如下：将一定量的Ti–BP45粉体装入刚玉坩埚，置于管式炉中，抽真空至10 Pa后用氩气进行置换，以5 ℃/min的升温速率升至1500 ℃后，保温2 h，随炉冷却，整个试验过程均采用流动的氩气气氛(图2)。Ti质量分数为1%、2%、3%、5%、10%的样品，分别记为1、2、3、5、10号样，纯BP45记为0号样。

1.3 理化性能表征

红外光谱(IR)测试选用Nicolet IS50仪器，试样通过KBr压片法制样，扫描波数范围为4000~400 cm^{-1}。利用X射线衍射仪(XRD)完成物相分析。采用搭载OXFORD X–Max能谱仪的Quanta 450 FEG型场发射环境扫描电子显微镜分析样品的微观形貌和微区元素组成，放大倍数为50x~1000000x，加速电压为200 V~30 kV。

1.4 电磁参数测量

采用同轴法测试衍生SiC基陶瓷粉末样品的电磁参数，包括2~18 GHz内的相对复介电常数($\varepsilon_r=\varepsilon'-j\varepsilon''$)和复磁导率($\mu_r=\mu'-j\mu''$)，制样方式：粉体质量分数80%，混合石蜡制备，压制成环形样品(外径φ7 mm、内径φ3 mm、厚度2 mm)。为评估其电磁波吸收能力，可根据ε_r和μ_r参数计算反射损耗(RL)值[22]。

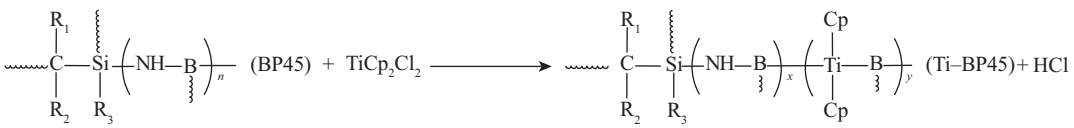
$$Z_{in}=\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tanh\left(j\frac{2\pi}{c}\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}\,fd\right) \quad (1)$$

$$RL=20\lg\left|\frac{Z_{in}-1}{Z_{in}+1}\right| \quad (2)$$

式中，f为测试频率；d为材料厚度；c为光速；Z_{in}为材料的相对阻抗。

1.5 CST电磁仿真

对于一般的微波吸收材料，在CST中，反射损耗(RL)由式(1)和式(2)计算。利用CST微波工作室分析粉体衍生涂层微波吸收性能的仿真流程如下：选择工作流和求解器→测



注：R_1、R_2、R_3为甲基或氢，Cp为环戊二烯。

图1 硼钛改性聚碳硅烷的合成路径

Fig.1 Synthesis route of boron-titanium modified polycarbosilane

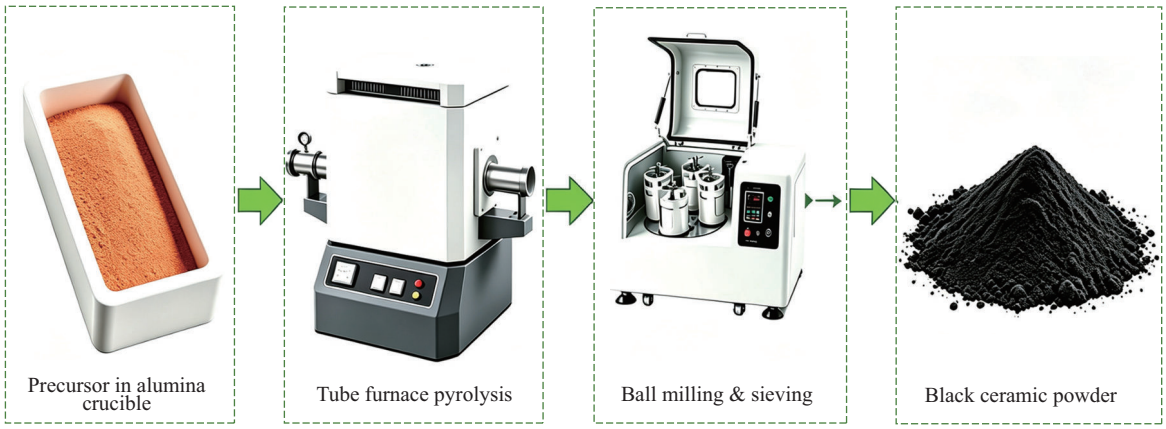


图2　衍生陶瓷制备流程

Fig.2　Preparation process of derived ceramic

试范围设置→导入材料电磁参数→模型构建/导入→设置边界条件→设置场监视器→进行网格划分→启动求解器→进行参数扫描→后处理模板。在仿真过程中，涂层材料参数为粉体的实测介电常数，求解器选择频域求解器，仿真频率设置为2~18 GHz，网格划分选择四面体网格划分。

2　结果与讨论

2.1　物相与结构分析

为表征前驱体的分子结构，首先对纯BP45及不同Ti含量的Ti–BP45前驱体进行FT-IR分析，如图3所示。约2100 cm^{-1}处的吸收峰归属于Si—H，随着原料配比中Cp_2TiCl_2的增加，其强度先增加后降低再增加，但质量分数10% Ti时峰强度仍低于纯BP45，这说明Si—H参与了和Cp_2TiCl_2的反应。约3400 cm^{-1}和1175 cm^{-1}处的吸收峰归属于N—H键；1400 cm^{-1}附近的宽峰对应前驱体中的B—N振动峰，其强度在较高Ti含量下会下降，表明BP45中的B—N也参与了和Cp_2TiCl_2的反应（图1），Ti可能会抢占N的位点和B以化学键相连。

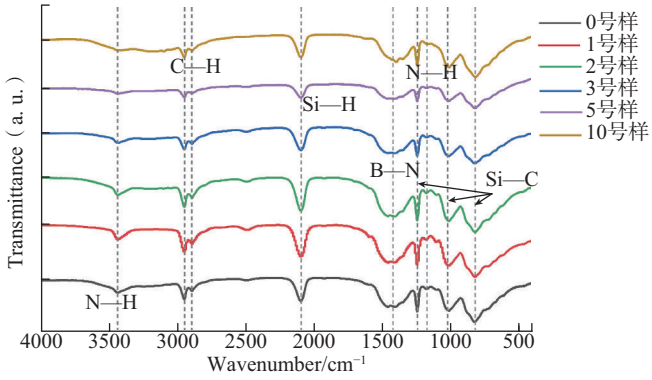


图3　前驱体的红外图谱

Fig.3　FT-IR spectra of precursors

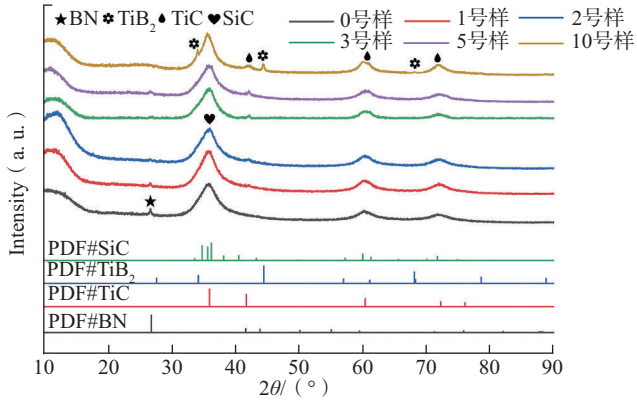


图4　SiCBTi衍生陶瓷的XRD图谱

Fig.4　XRD patterns of SiCBTi-derived ceramics

SiCBTi衍生陶瓷的XRD图谱如图4所示。纯BP45陶瓷的主要晶相为SiC与BN，在图谱中36°、60°和72°对应SiC衍射峰，27°对应BN衍射峰。当Ti质量分数为1%时，27°处的BN衍射峰开始减弱，在42°处出现TiC衍射峰；随着Ti含量的增加，42°处的TiC衍射峰逐渐增强，在61°和72°处出现TiC衍射峰且随Ti含量增加愈发明显，27°处的BN衍射峰逐渐减弱并于Ti质量分数达10%时消失，同时，在34°、44°和68°处出现TiB_2衍射峰。

为表征SiCBTi衍生陶瓷的微观形貌与元素分布，采用场发射扫描电子显微镜SEM及配套能谱仪EDS进行分析，结果如图5所示。EDS面扫描结果表明，Si、Ti元素在陶瓷基体中呈现均匀分布，无明显局部富集或偏析现象。说明Ti元素在前驱体阶

段已通过化学结合的方式嵌入聚合物分子骨架，经高温热解后未发生团聚，均匀分散于SiC陶瓷基体中。该制备方法避免了传统物理掺杂法易出现的分布不均问题，为后续复相陶瓷电磁性能的均匀性与稳定性提供了结构保障。

2.2 电磁性能分析

采用同轴法测试了2~18 GHz频率范围内不同Ti含量样品的复介电常数（$\varepsilon_r=\varepsilon'-j\varepsilon''$）及介电损耗角正切（$\tan\delta_\varepsilon=\varepsilon''/\varepsilon'$），结果如图6所示。

与纯BP45衍生陶瓷相比，Ti的引入显著提升了材料的介电常数。当Ti质量分数从1%增加至3%时，10 GHz处的ε'从约8.0增至9.2，ε''从约3.2增至4.3；当Ti质量分数进一步提升至5%和10%时，10 GHz处的ε'分别增至约14.7和32.6，ε''分别增至约5.8和8.1。该现象可能源于：Ti在裂解过程生成高导电性TiC相[11,17,21]，增强了载流子的迁移与传导能力，增强了电导损耗；新引入的TiC相与基体中的SiC、BN相产生更多相界，增加了界面极化；当Ti质量分数为10%时，生成了另一种高导电性TiB_2相，进一步提升了电导损耗。

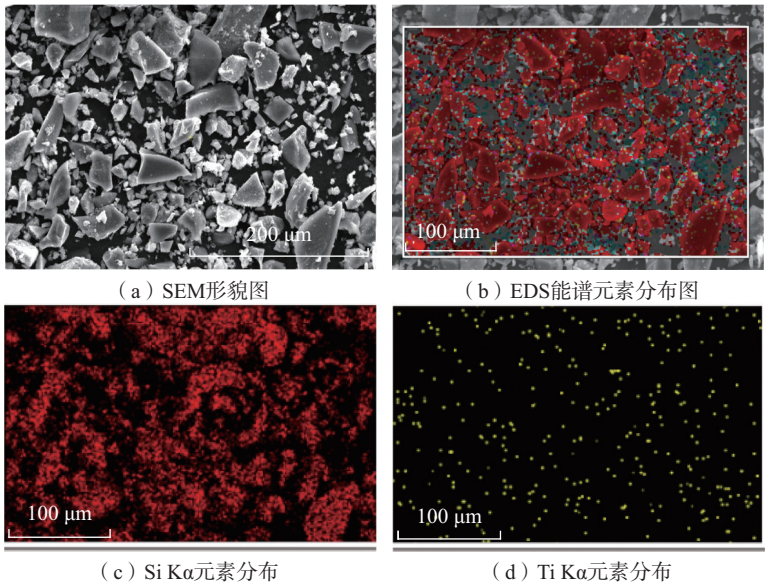
10号样品在10~14 GHz频段出现了显著的介电常数突变峰（图6），实部ε'与虚部ε''同时呈现急剧上升后下降的特征。该现象可能源于：在多相复合体系中，当高导电相（TiC、TiB_2）分散于低导电基体（SiC、BN）中时，由于两相电导率存在数量级差异（表1），自由电荷会在相界面积累，形成Maxwell–Wagner–Sillars（MWS）界面极化（一类界面型空间电荷极化）[23]。

为进一步探究Ti含量对介电损耗机制的调控规律，基于实测复介电常数数据绘制了不同Ti质量分数样品的Cole–Cole曲线（ε'–ε''），如图7所示。根据德拜弛豫理论，ε'与ε''之间的关系可表示为[24]

$$\left(\varepsilon'-\frac{\varepsilon_s+\varepsilon_\infty}{2}\right)^2+(\varepsilon'')^2=\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{2}\right)^2 \tag{3}$$

式中，ε_s为静态介电常数；ε_∞为光频介电常数。

Cole–Cole半圆可表征德拜弛豫，每一个半圆对应一个德拜弛豫过程，曲线末端的直线段长尾代表电导损耗[25]。如图7所示，纯BP45出现一个半圆和末端长尾，表明存在单一德拜弛豫过程和电导损耗；1号样出现3个半圆，表明随着Ti的引入，单一德拜弛豫过程转变为多重德拜弛豫过程，新增的两个半圆可能分别对应TiC/SiC界面极化、TiC内部缺陷极化；2号样和3号样其曲线仍保持1%时的特征（图7中第3个半圆由于半径太大并未标出），半圆直径随Ti含量增加略有增大，表明界面极化随Ti含量增加而增强；当Ti质量分数为5%时，出现两个半圆，表明存在双重德拜弛豫过程，且曲线上存在一条斜率为负的直线，如图6（b）所示，5号样的ε''随着频率增加而增加，不同于低Ti含量样品，这是典型的电导损耗特征，表明此时电导损耗已超越极化损耗成为主要的介电损耗机制，即

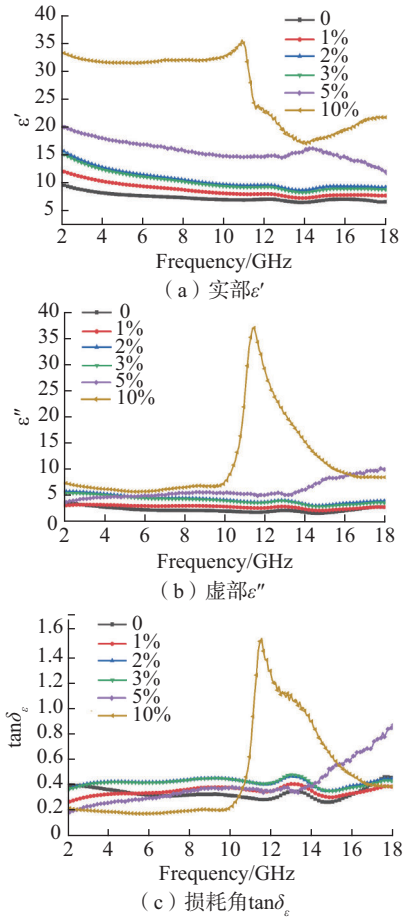


（a）SEM形貌图　（b）EDS能谱元素分布图

（c）Si Kα元素分布　（d）Ti Kα元素分布

图5 SiCBTi陶瓷的SEM图像及EDS能谱元素分布图

Fig.5 SEM images and EDS elemental mapping of SiCBTi ceramics



（a）实部ε'

（b）虚部ε''

（c）损耗角$\tan\delta_\varepsilon$

图6 不同Ti质量分数样品的相对复介电常数随频率变化曲线

Fig.6 Frequency dependence of complex relative permittivity of samples with different Ti mass fractions

表1　不同物相的理论电导率值与导电属性

Table 1　Theoretical conductivity values and conductive properties of various phases

物相	理论电导率值 σ/(S/m)	导电属性
BN	10^{-12}~10^{-14}	绝缘相
SiC	10^{-4}~10^{0}	半导体相
TiC	10^{4}~10^{6}	高导电相
TiB_2	10^{5}~10^{7}	高导电相

Ti质量分数为5%的样品可能为介电损耗机制主导因素变化的关键转折Ti含量；当Ti质量分数为10%时，其整体曲线呈现一个近似“几”字的形状，出现两个半圆和一条末端长尾，两个半圆分别对应TiC/SiC和TiB_2/SiC两类主要界面的弛豫过程，长尾表明存在电导损耗，源于高导电相TiC和TiB_2。

基于实测电磁参数，利用CST微波工作室对不同厚度和不同Ti含量样品的微波吸收涂层反射损耗（RL）进行仿真计算，结果如图8所示。反射损耗曲线符合四分之一波长理论[26-27]，如式（4）所示。随着涂层厚度增加，吸收峰逐渐向低频移动，且反射损耗峰值与有效吸收带宽（RL<–10 dB）先增大后趋于稳定。

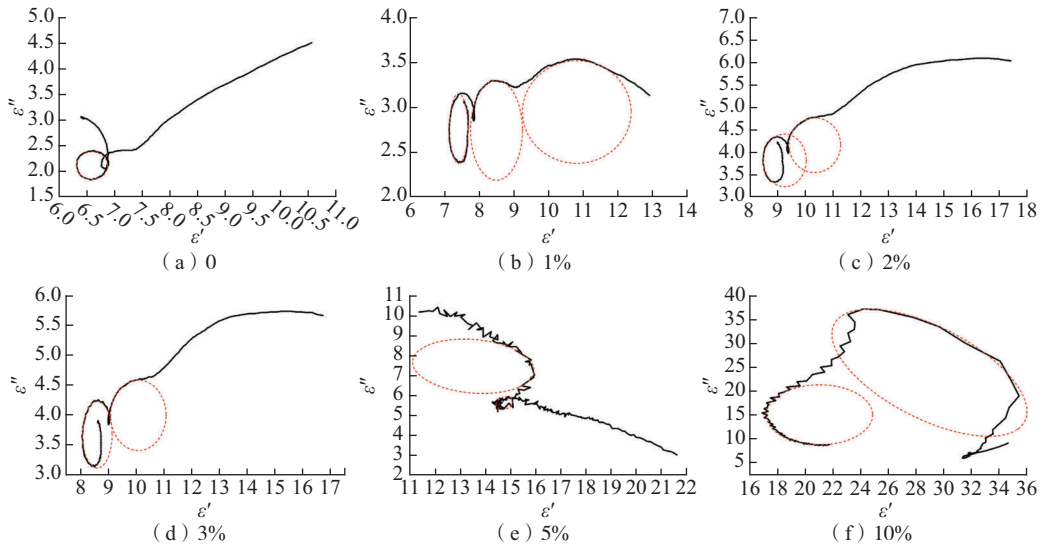
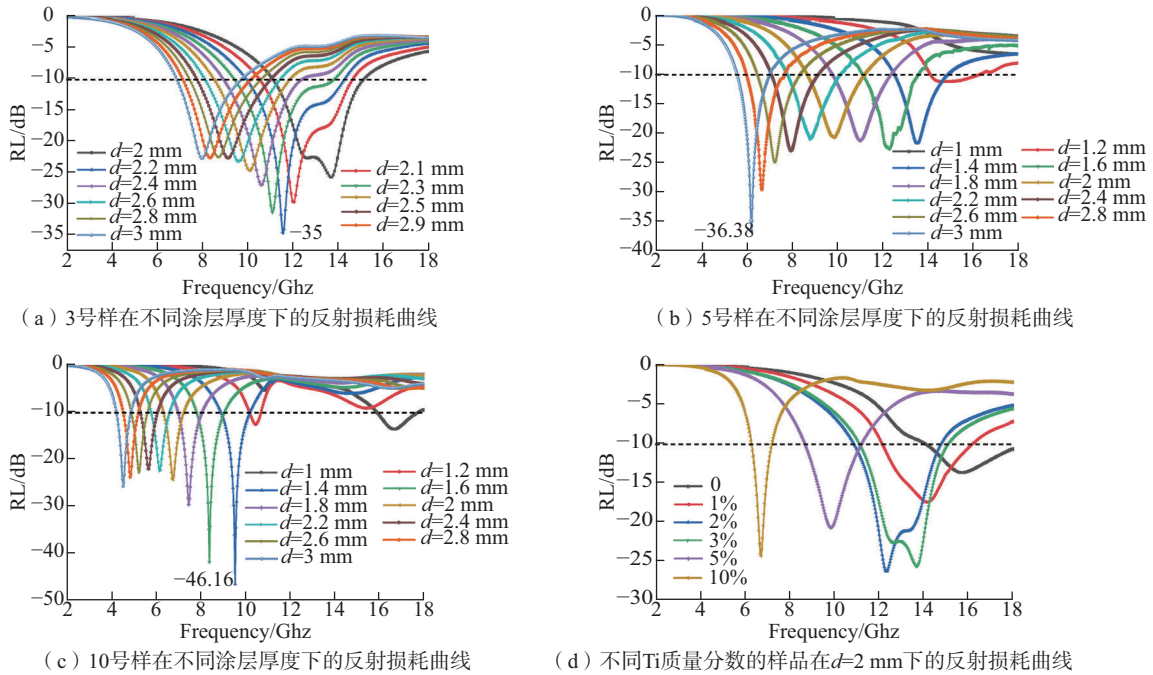


图7　不同Ti质量分数样品的Cole–Cole曲线

Fig.7　Cole–Cole curves of samples with different Ti mass fractions



（a）3号样在不同涂层厚度下的反射损耗曲线

（b）5号样在不同涂层厚度下的反射损耗曲线

（c）10号样在不同涂层厚度下的反射损耗曲线

（d）不同Ti质量分数的样品在d=2 mm下的反射损耗曲线

图8　不同Ti质量分数样品的反射损耗曲线

Fig.8　Reflection loss curves of samples with different Ti mass fractions

表2 SiCBTi陶瓷与其他陶瓷材料在X波段下的电磁波吸收性能

Table 2 Electromagnetic wave absorption performance of SiCBTi ceramics and other ceramic materials in the X-band

陶瓷体系	ε'	ε''	$\tan\delta_\varepsilon$	厚度/mm	有效吸收带宽/GHz	最大反射损耗/dB	参考文献
SiC	约7.5	约6.5	0.8~0.9	2.75	—	−9.97	[28]
SiC/C	约38.9	约39.6	0.9~1.2	3.2	—	—	[29]
SiOC	约10.72	约12.17	1.05~1.2	3.3	1.9	−20.01	[30]
SiCN(Fe)	约12.5	约4.2	0.3~0.45	4.0	—	−5.0	[31]
3号样	约9.0	约4.0	约0.42	2.5	2.75	−25.0	本文
5号样	约15.0	约6.0	约0.38	2	2.5	−20.0	本文
10号样	21.0~35.0	6.0~37.5	0.2~1.55	1.4	1.5	−46.16	本文

$$d_m = \frac{n\lambda}{4} = \frac{nc}{4f\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} \quad (n = 1, 3, 5.....) \tag{4}$$

式中，λ表示对应电磁波的波长；d_m为对应频率下四分之一波长的奇数倍。

对于3号样(图8(a))，当涂层厚度为2.2 mm时，在11.2 GHz处达到最大反射损耗−35 dB，有效吸收带宽约4.5 GHz，展现出优异的宽频吸收特性；对于5号样(图8(b))，当涂层厚度为2 mm时，在9.9 GHz处达到最大反射损耗−20 dB，有效吸收带宽约2.5 GHz(8.7~11.2 GHz)，厚度减少的同时有效吸收波段落于X波段，但有效吸收带宽收窄；对于高Ti含量的10号样(图8(c))，在涂层厚度仅为1.4 mm时，于9.5 GHz处实现了−46.16 dB的强吸收，有效吸收带宽约1.5 GHz，能在较薄厚度下实现强吸收，但过高的复介电常数实部与损耗角正切值导致阻抗匹配变差，使有效吸收带宽减小。

图8(d)对比了不同Ti质量分数样品在2 mm厚度下的微波吸收性能。结果表明，Ti掺杂显著提升了材料的微波吸收能力，吸收峰随Ti含量升高向低频移动，但有效吸收带宽收窄。这与介电常数的变化规律一致：随着Ti含量增加，材料的复介电常数增大，使材料在更薄的厚度下即可满足四分之一波长匹配条件，实现低频吸收，但也导致阻抗匹配特性恶化，有效吸收带宽收窄。

此外，本文总结了近年来采用前驱体转化法制备的陶瓷在X波段的电磁吸收性能，见表2[28−31]。与其他陶瓷体系相比，本文的SiCBTi陶瓷在材料厚度、有效吸收带宽和反射损耗上存在较大提升。

3 结论

(1) 本文采用化学方式成功地将钛元素引入硼改性聚碳硅烷骨架。傅里叶变换红外光谱(FT−IR)分析表明，Cp_2TiCl_2与BP45中的Si—H、B—N发生反应，XRD图谱表明，Ti在衍生陶瓷中以TiC和TiB_2形式存在(TiB_2仅在Ti含量高时存在)，能谱(EDS)元素面扫描结果证实，钛元素在陶瓷基体中均匀分布，无明显局部偏析现象。

(2) 通过控制Ti含量能调控陶瓷衍生粉体的电磁参数：随着Ti含量的增加，样品的复介电常数实部、虚部及损耗角正切值均增加，Ti的掺杂引入了新的TiC相，引入了新的界面，在Cole−Cole曲线中能明显观察到两个及以上的半圆，Ti质量分数5%可能是其电导损耗主导机制的关键转折含量，10% Ti时高导电相TiC和TiB_2贡献了显著的电导损耗。

(3) 微波吸收性能：CST微波工作室仿真结果显示，BP45+3% Ti在2.2 mm厚度下，获得最佳有效吸收带宽(RL<−10 dB)达4.5 GHz，在11.2 GHz处达到−35 dB的最优反射损耗；BP45+5% Ti在2 mm厚度下，于9.9 GHz处获得−20 dB反射损耗，于X波段有效吸收带宽约2.5 GHz；BP45+10% Ti在1.4 mm厚度下实现了−46.16 dB的最大反射损耗，有效吸收带宽约1.5 GHz。

参 考 文 献

[1] Diaz O G, Axinte D A, Butler-Smith P, et al. On understanding the microstructure of SiC/SiC ceramic matrix composites (CMCs) after a material removal process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 1–11.

[2] Zhu D M. Aerospace ceramic materials: Thermal, environmental barrier coatings and SiC/SiC ceramic matrix composites for turbine engine applications: NASA/TM – 2018 – 219884[R]. National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 2018.

[3] 焦健, 杨金华, 徐海跃, 等. 航空领域用陶瓷基复合材料研究进展[J]. 航空制造技术, 2026, 69(9): 28–42.

Jiao Jian, Yang Jinhua, Xu Haiyue, et al. Research progress on ceramic matrix composites for aviation applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(9): 28–42.

[4] Wang X L, Gao X D, Zhang Z H, et al. Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: A focused review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(9): 4671–4688.

[5] 陈义, 邱海鹏, 陈明伟, 等. SiC/SiC复合材料基体硼改性方法及其力学性能研究[J]. 无机材料学报, 2025, 40(5): 504–510.

Chen Yi, Qiu Haipeng, Chen Mingwei, et al. SiC/SiC composite: Matrix boron modification and mechanical properties[J]. Journal of Inorganic Materials, 2025, 40(5): 504–510.

[6] 邱海鹏, 王晓猛, 陈明伟, 等. 层合结构吸波陶瓷基复合材料设计及性能研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(23/24): 34–42.

Qiu Haipeng, Wang Xiaomeng, Chen Mingwei, et al. Study on design and properties of layered absorbing ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67 (23/24): 34–42.

[7] 李泽钦, 宋梓诚, 张锐聪, 等. 动态调控电磁吸收材料研究进展[J]. 航空制造技术, 2026, 69(1/2): 98–116.

Li Zeqin, Song Zicheng, Zhang Ruicong, et al. Progress in dynamically modulated electromagnetic absorbing materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(1/2): 98–116.

[8] 徐俊杰, 王岭, 王晓猛, 等. 耐高温吸波材料的研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2024, 45(3): 189–205.

Xu Junjie, Wang Ling, Wang Xiaomeng, et al. Research progress of high temperature absorbing materials[J]. Advanced Ceramics, 2024, 45(3): 189–205.

[9] Qi Q, Li T, Yang H, et al. Recent advances in structural engineering of ceramic microwave absorption materials: From nano/micro architectures to macroscale design[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2025, 14(12): 9221205.

[10] 施巧英, 李静丹, 甘念渝, 等. 连续吸波SiC纤维增强SiOC陶瓷基复合材料的高温吸波性能[J]. 材料工程, 2025, 53(1): 81–90.

Shi Qiaoying, Li Jingdan, Gan Nianyu, et al. High temperature absorption properties of SiOC ceramic matrix composite reinforced by continuous microwave-absorbing SiC fibers[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(1): 81–90.

[11] 王军, 宋永才, 冯春祥. 含钛碳化硅纤维的制备及其微波吸收特性[J]. 材料研究学报, 1998, 12(4): 419–422.

Wang Jun, Song Yongcai, Feng Chunxiang. Premration of SiC fibers containing Ti and its microave-absorbing properties[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1998, 12(4): 419–422.

[12] 魏子涵, 彭雨晴, 康治伟, 等. 聚碳硅烷转化碳化硅陶瓷吸波性能的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(4): 547–559.

Wei Zihan, Peng Yuqing, Kang Zhiwei, et al. Progress in polymer-derived silicon carbide ceramics for microwave absorbing applications[J]. Journal of Ceramics, 2021, 42(4): 547–559.

[13] 俞婷友, 金丹, 尹洪峰, 等. SiC纤维及其复合材料吸波性能研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(6): 2131–2147.

Yu Tingyou, Jin Dan, Yin Hongfeng, et al. Research progress on wave absorption properties of SiC fiber and its composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(6): 2131–2147.

[14] Li Y, Zhang M Y, Chen J N, et al. Ceramic-based electromagnetic interference shielding materials: Mechanisms, optimization strategies, and pathways to next-generation applications[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2025, 14(12): 9221194.

[15] 石梓欣, 董铁男, 胡恒铭, 等. SiC基复合陶瓷力学性能和电磁性能及其一体化改性研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2025, 46(2): 145–170.

Shi Zixin, Dong Tienan, Hu Hengming, et al. Developments in the integrated modification of mechanical and electromagnetic characteristics of SiC-based ceramics[J]. Advanced Ceramics, 2025, 46(2): 145–170.

[16] 史毅敏, 罗发, 丁冬海, 等. 预氧化聚碳硅烷先驱体转化法制备SiC陶瓷介电和吸波性能研究[J]. 功能材料, 2017, 48(2): 2153–2157.

Shi Yimin, Luo Fa, Ding Donghai, et al. Dielectric and microwave absorbing properties of SiC ceramics fabricated by pre-oxidized polycarbosilane precursor conversion method[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(2): 2153–2157.

[17] Yu Z J, Min H, Zhan J Y, et al. Preparation and dielectric properties of polymer-derived SiCTi ceramics[J]. Ceramics International, 2013, 39(4): 3999–4007.

[18] Wu Z M, Huang J, Tan Y N, et al. Transition/rare earth metal co-modified SiC for low-frequency and high-temperature electromagnetic response[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2025, 14 (12): 9221164.

[19] 马爱洁, 罗瑞盈, 杨晶晶, 等. 含硼聚碳硅烷的制备及热解行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(4): 110–115.

Ma Aijie, Luo Ruiying, Yang Jingjing, et al. Preparation and Ryrolysis beharior of boron-containing Polycarbosilane[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(4): 110–115.

[20] 邱海鹏, 关星宇, 徐俊杰, 等. 基体改性对SiC/SiC复合材料高温抗氧化性能的影响[J]. 现代技术陶瓷, 2023, 44(3): 183–192.

Qiu Haipeng, Guan Xingyu, Xu Junjie, et al. Influence of matrix modification on the oxidation resistance of SiC/SiC composites[J]. Advanced Ceramics, 2023, 44(3): 183–192.

[21] Wei H J, Yang S Q, Feng P, et al. Optimization of Ti with modified SiC ceramics for electromagnetic absorption properties[J]. Materials Characterization, 2023, 198: 112761.

[22] Zhou W, Zhang Y T, Li Y, et al. In-situ synthesis of ternary layered $Y_3Si_2C_2$ ceramic on silicon carbide fiber for enhanced electromagnetic wave absorption[J]. Ceramics International, 2022, 48(2): 1908–1915.

[23] Samet M, Kallel A, Serghei A. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: Scaling laws and applications[J]. Journal of Composite Materials, 2022, 56(20): 3197–3217.

[24] Hakiki F, Lin C P. Broadband complex permittivity spectra: Cole-Cole vs circuit models[J/OL]. ACS Measurement Science Au, 1–15. [2025–03–15]. https://doi.org/10.1021/acs.measuresciau.5c00065.

[25] Liu J K, Jia Z R, Zhou W H, et al. Self-assembled MoS_2/magnetic ferrite $CuFe_2O_4$ nanocomposite for high-efficiency microwave absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132253.

[26] 王敏. 掺杂$BaFe_{12-x}M_xO_{19}$(M=Zr/Ti/Nb)陶瓷的制备、电磁性能及低电场介电可调性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

Wang Min. Preparation, electric, magnetic properties and dielectric tunability under low electric field of doped $BaFe_{12-x}M_xO_{19}$(M=Zr/Ti/Nb) ceramics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[27] 刘桂平, 郭萍, 彭志华, 等. 铁磁性粒子填充碳纳米管的改进型交换共振模型[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(6): 27–30.

Liu Guiping, Guo Ping, Peng Zhihua, et al. Modified exchange resonance model of ferromagnetic particles-filled carbon nanotubes[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(6): 27–30.

[28] Li Q, Yin X W, Duan W Y, et al. Electrical, dielectric and microwave-absorption properties of polymer derived SiC ceramics in X band[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 565: 66–72.

[29] Li Q, Yin X W, Duan W Y, et al. Improved dielectric and electromagnetic interference shielding properties of ferrocene-modified polycarbosilane derived SiC/C composite ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(10): 2187–2201.

[30] Duan W Y, Yin X W, Li Q, et al. Synthesis and microwave absorption properties of SiC nanowires reinforced SiOC ceramic[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(2): 257–266.

[31] Feng Y, Guo X, Gong H, et al. Microwave absorption performance of PDCs–SiCN(Fe) ceramics with negative imaginary permeability[J]. Ceramics International. 2018, 44(9): 10420–10425.

Preparation of Titanium-Doped Boron-Modified Polycarbosilane and Electromagnetic Properties of Its Derived Ceramics

LIU Yangdengke, WANG Xiaomeng, CHEN Yi, XU Junjie, LIU Yekun, WANG Ling, CHEN Mingwei, QIU Haipeng

(Composite Technology Center, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] To address the issues of irreversible degradation of high-temperature performance in conventional microwave absorbing materials and insufficient dielectric loss capability of pure silicon carbide ceramics, boron-modified polycarbosilane (BP45) was employed as the precursor and modified via a metallocene approach using titanocene dichloride, yielding boron-titanium co-modified polycarbosilane (Ti−BP45) precursors with varying titanium contents, from which SiCBTi-derived ceramics were obtained through high-temperature pyrolysis at 1500 ℃ in an inert atmosphere. The molecular structure of Ti−BP45 precursors, as well as the phase composition, microstructure, electromagnetic properties, and microwave absorption mechanism of the derived ceramics, were systematically investigated by combining experimental characterization with numerical simulation. The results demonstrate that titanium is chemically incorporated into the molecular backbone of BP45 and uniformly distributed in the ceramic matrix after pyrolysis, forming in-situ TiC phases. With increasing Ti content, both the real and imaginary parts of the complex permittivity increase, and the dominant loss mechanism gradually evolves from single polarization loss to a synergistic combination of interfacial polarization and conduction loss. Benefiting from the cooperative action of multiple attenuation mechanisms, the as-prepared derived ceramics exhibit excellent microwave absorption performance at small matching thicknesses: The sample with a mass fraction of 10% Ti achieves a reflection loss of −46.16 dB at a thickness of 1.4 mm, while the sample with a mass fraction of 3% Ti exhibits an effective absorption bandwidth of 4.5 GHz. This work realizes the tunable electromagnetic properties of SiC-based ceramics via precursor molecular engineering, reveals the regulation mechanism of Ti doping on dielectric loss, and provides new insights for the development of next-generation microwave absorbing materials for aerospace applications.

Keywords: Titanium-doped boron-modified polycarbosilane; Precursor conversion; Dielectric properties; Microwave absorption; Electromagnetic properties

（责编　七七）