

碳化硅/石墨复合吸波材料改性沥青胶浆 微波响应机制研究

赵昕^{1*}, 董刚¹, 李扬¹, 郭豪彦²

(1.陕西省交通规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;
2.长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710018)

摘要:为提高沥青胶浆的微波加热效果,采用高温固相合成法制备碳化硅(SiC)/石墨(GP)复合吸波微粉,系统研究其物相组成、电磁参数及其在沥青胶浆中的微波响应特性。结果表明,高温固相合成法制得的SiC/GP复合吸波材料中, SiC与GP之间仅发生物理混合,彼此穿插分布。SiC与GP质量比为5:5时(S5G5S)吸波性能最优,其微波损耗机制主要以界面极化与偶极极化为主。采用S5G5S制备的沥青胶浆微波加热速率大幅提升,且升温均匀性良好,微波加热60 s后,沥青胶浆表面平均温度相较于基质沥青提高了3.14倍。

关键词:沥青胶浆;复合吸波材料;碳化硅;石墨;微波响应

中图分类号:TQ917;U414

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)10-0195-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.032

Study on microwave response mechanism of asphalt mastic modified by silicon carbide/graphite microwave-absorbing composites

ZHAO Xin^{1*}, DONG Gang¹, LI Yang¹, GUO Hao-yan²

(1.Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China;
2.School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract:To enhance the microwave heating performance of asphalt mastic, silicon carbide (SiC)/graphite (GP) composite microwave absorbing micro-powder was prepared via a high-temperature solid-phase synthesis method, and its phase composition, electromagnetic parameters, as well as its microwave response characteristics in asphalt mastic were systematically investigated. The results indicate that only physical mixing occurs between SiC and GP in the SiC/GP composite microwave-absorbing micro-powder prepared via the high-temperature solid-phase synthesis method, with the two components interspersed and interpenetrated with each other. When the mass ratio of SiC to GP is 5:5 (denoted as S5G5S), the composite exhibits the optimal microwave-absorbing performance, whose microwave loss mechanism is dominated primarily by interfacial polarization and dipole polarization. The asphalt mastic prepared with S5G5S exhibits a significantly enhanced microwave heating rate and excellent temperature rise uniformity. After 60 s of microwave heating, the average surface temperature of the modified asphalt mastic is 3.14 times higher than that of the base asphalt.

Key words: asphalt mastic; microwave-absorbing composites; silicon carbide; graphite; microwave response

微波加热技术作为一种高效、可控的加热方式,在沥青道路养护与修复等方面展现出良好的应用前景^[1-2]。然而,普通沥青混合料主要由沥青、集料和矿粉等微波非敏感性材料拌合而成。沥青对微波能利用效果较差^[3],集料和矿粉为石质材料,微波吸收能力也较为有限,不易将电磁能转换为热能^[4],严重制约了该技术在沥青道路修复领域的工程化应用。

在吸波沥青/沥青混合料的制备过程中,一般需要添加吸波材料提高微波吸收能力。Zhao等^[5]发现碳化硅粉末(SiC)可提升沥青混合料的微波吸收性能以及沥青胶浆的初始愈合温度。Phan等^[6]发

现随着钢丝绒含量的增加,沥青混合料的自愈合性能得到显著提高。陈星鸿等^[7]发现羰基铁粉可大幅提高沥青混合料的加热速率。Xu等^[8]发现纳米氧化石墨烯显著提升了沥青的微波吸收能力。目前,高温烧结技术也被应用于制备复合吸波材料,徐莎莎^[9]通过静电纺丝和惰性气氛烧结石墨处理相结合的方法,制备了Co₃Fe₇/C复合纳米纤维,验证了多孔结构在调节阻抗匹配和增大吸波带宽、提高吸波性能方面的优势。Wang等^[10]采用通过溶胶-凝胶法和高温固相烧结法合成了一系列BaLa_xCe_xFe_{12-2x}O₁₉吸波材料。然而,现有相关研究仍存在两处核心不

收稿日期:2026-05-07;修回日期:2026-08-06

基金项目:陕西省交通厅科研项目(24-75k);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2024QCY-KXJ-020)

作者简介:赵昕(1982-),女,博士,正高级工程师,研究方向为道路结构与材料,通讯联系人,67091223@qq.com。

足:其一,直接采用商用吸波材料改性沥青,对其微波加热效率的提升效果较为有限,难以满足实际工程应用需求;其二,针对 SiC 与 GP 复合吸波微粉在沥青基体中的微波吸收机制与加热增效原理,目前尚未形成明晰的研究结论。

因此,本文基于高温固相合成法,采用 SiC 和 GP 制备出一系列复合吸波微粉,系统探究其物相、形貌、电磁特性,明确复合吸波微粉沥青胶浆的微波加热特性,旨在为高性能路用微波吸收材料的设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

研究采用 90# 基质沥青,购自山东京博石油化工有限公司,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025),测得沥青的关键指标如表 1 所示。

表 1 90# 沥青关键指标

指标	测试结果	测试方法
针入度(25℃,100 g,5 s;0.1 mm)	92	T 0604
延度(15℃,5 cm/min;cm)	>100	T 0605
软化点/℃	47.0	T 0606
密度/(g·cm ⁻³)	1.023	T 0603
闪点/℃	295	T 0611

吸波材料为 SiC(粉体,国药集团)和 GP(粉体,国药集团),松装密度分别为 1.220 g/cm³ 与 2.258 g/cm³。同时选择聚乙烯醇(PVA,国药集团),聚合度 1750±50,作为吸波微粉的粘结剂,基本信息如表 2 所示。

表 2 PVA 基本信息

含量/%	氢氧化钠/%	挥发物/%
≥99.0	≤0.2	≤9.0

1.2 样品制备方法

1.2.1 吸波微粉

按 SiC 与 GP 质量比为 1:9、3:7、5:5、7:3、9:1 设计 5 组实验,分别称量对应配比的 SiC 与 GP 粉体,同时加入占上述两种粉体总质量 5% 的 PVA 作为粘结剂;将各组物料分别置于球磨机中,以 300 r/min 转速研磨 2 h 后,于 120℃ 条件下烘干 2 h,制得复合吸波微粉基料。

将复合吸波微粉基料置于坩埚中,采用埋碳热解工艺,放入马弗炉内进行高温热处理。升温程序

设定为:先从室温以 2℃/min 的升温速率升至 550℃,保温 2 h;再以 5℃/min 的升温速率升至 800℃,保温 30 min;热处理完成后随炉冷却至室温,制得复合烧结块体。将块体碾碎,过 100 目筛网,最终制得复合吸波微粉。对应 SiC 与 GP 质量比为 1:9、3:7、5:5、7:3、9:1 的样品,依次命名为 S1G9S、S3G7S、S5G5S、S7G3S、S9G1S。

1.2.2 沥青胶浆

参照 Li 等^[11]的方法,设定吸波微粉掺量为沥青体积用量的 10%;取上述制得的复合吸波微粉与沥青混合,采用高速剪切机以 4 500 r/min 的转速剪切搅拌 1 h,确保吸波微粉在沥青基体中均匀分散,最终制得沥青胶浆。

1.3 测试方法

1.3.1 X 射线衍射测试

采用 AXS D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)对吸波微粉进行测试,在 20~80°(2θ)范围内连续扫描吸波微粉粉末样品,扫描速度为 5°/min,测试结果通过 JADE 软件进行分析处理。

1.3.2 形貌观察

采用 Hitachi S-4800 型冷场发射扫描电子显微镜(SEM)对吸波微粉的微观形貌进行观测分析,测试前对样品进行喷金处理。

1.3.3 电磁参数测定

按 1:1 的质量比将吸波材料与石蜡混合,制备 22.86 mm×10.16 mm×1.5 mm 的波导法测试样品。采用 Ceyear 3672B 型号矢量网络分析仪(VNA),通过波导法测试吸波微粉的电磁参数。

以介电损耗因子、磁损耗因子表征吸波微粉的电磁损耗特性;采用波导法测试样品的复数介电常数与复数磁导率,经式(1)~式(4)计算得到对应损耗因子^[12-13]。

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2)$$

$$\tan\delta_\varepsilon = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (3)$$

$$\tan\delta_\mu = \mu''/\mu' \quad (4)$$

式中, ε' 为复介电常数实部, ε'' 为复介电常数虚部; $\tan\delta_\varepsilon$ 为介电损耗因子,代表材料的介电损耗能力; μ' 为复磁导率实部, μ'' 为复磁导率虚部; $\tan\delta_\mu$ 为磁损耗因子,代表材料的磁损耗能力^[14-16]。

1.3.4 微波加热效果测试

制备含沥青体积比 10% 吸波微粉的沥青胶浆,开展微波加热试验,总微波加热时长设定为 60 s,在加热过程中每隔 20 s 采集一次样品的表面温度。

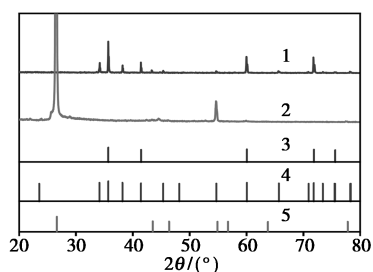
微波加热试验所用加热设备为额定功率 700 W 的微波炉。采用 Fluke TiS75 型红外热成像仪进行温度采集,该仪器温度灵敏度为 0.08℃,测温误差范围为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。最终采用 Smart View 4.3 软件对采集的红外热成像数据进行处理,获得吸波微粉与沥青胶浆的表面平均温度。

2 结果与讨论

2.1 吸波微粉物相分析

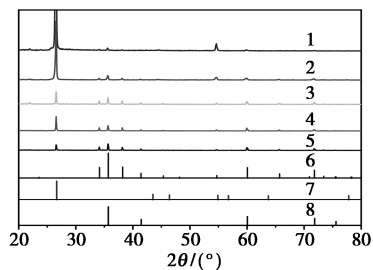
图 1 为两种吸波材料以及复合吸波微粉的 XRD 图谱。由图 1(a)可知,SiC 在 35.65、59.98、71.77°处的特征峰与 3C SiC 完全匹配,证实其主晶相为立方相碳化硅;其在 30~40°区间的峰位与 6H SiC 标准卡片的特征峰精准对应,表明实验所用 SiC 是 3C SiC 与 6H SiC 的多晶混合物。GP 在 26.61°处出现强且尖锐的特征衍射峰,其余角度无明显杂峰,说明 GP 为高结晶度的石墨相碳材料。

图 1(b)显示,所有复合样品的衍射峰均对应 3C SiC、6H SiC 及石墨相的特征峰,未出现新的衍射峰或杂质峰。复合样品中 6H SiC 特征峰的峰位、相对强度占比与 SiC 保持一致;而石墨在 26.61°处的特征峰强度随其含量降低逐渐减弱。这一现象表



1—SiC;2—GP;3—3C SiC(PDF#74—2307);4—6H SiC(PDF#74—1302);5—Graphite powder(PDF#75—2078)

(a) SiC 和 GP 的 XRD 图谱



1—S1G9S;2—S3G7S;3—S5G5S;4—S7G3S;5—S9G1S;
6—3C SiC(PDF#74—2307);7—6H SiC(PDF#74—1302);
8—Graphite powder(PDF#75—2078)

(b) 吸波微粉的 XRD 图谱

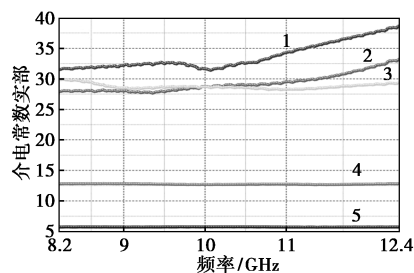
图 1 2 种吸波材料以及复合吸波微粉的 XRD 图谱

明,6H SiC 为 SiC 自带的固有晶相,在 800℃埋碳热解的条件下,SiC 与 GP 之间仅发生物理混合,未发生化学反应生成新物相,原材料的晶相组成在复合过程中得到完整保留。

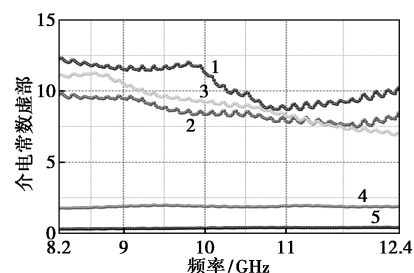
2.2 复合吸波微粉电磁参数分析

图 2 给出了复合吸波微粉的电磁参数图。由图 2(a)、(b)可知,随着 SiC 质量比从 10% 增加到 90%, ϵ' 和 ϵ'' 值显著降低。这是因为 GP 具有高电导率和强极化能力,因此 GP 含量越高,体系的界面极化、偶极极化及电导损耗越强,导致 ϵ' 和 ϵ'' 值增大。在图 2(e)中, $\text{tg}\delta\epsilon$ 的变化规律与 ϵ'' 基本一致,S1G9S、S3G7S 和 S5G5S 的 $\text{tg}\delta\epsilon$ 明显高于 S7G3S 和 S9G1S。这表明石墨是提升体系介电损耗能力的核心贡献相,通过调控 SiC 与 GP 的质量比可有效调节介电损耗水平。随着 GP 含量的增加,介电损耗角正切的曲线不再平坦,出现了明显的波动,这是非线性谐振行为的典型特征^[17],源于 SiC 和 GP 之间的界面协同作用。

从图 2(c)、(d)可以看出, μ' 值整体在 0.8~1.1 之间波动,且随频率升高整体缓慢下降。随着 SiC 含量增加, μ'' 值逐渐降低。S1G9S 和 S3G7S 的 μ'' 值相对较高,并在 9~10 GHz 频段出现明显峰值。SiC 通常不具备磁损耗能力,在微波频段几乎不贡献磁损耗,因此该体系的磁响应主要源于复合材料的界面效应,而非 SiC 的本征磁性。在图 2(f)中, $\text{tg}\delta\mu$ 的变化趋势与 μ'' 高度一致。磁损耗因子在低频处出现波动,这是由自然共振引起的磁能转换^[18],而在大于 12 GHz 的高频范围内的波动则来自交换共振,



(a) 介电常数实部



(b) 介电常数虚部

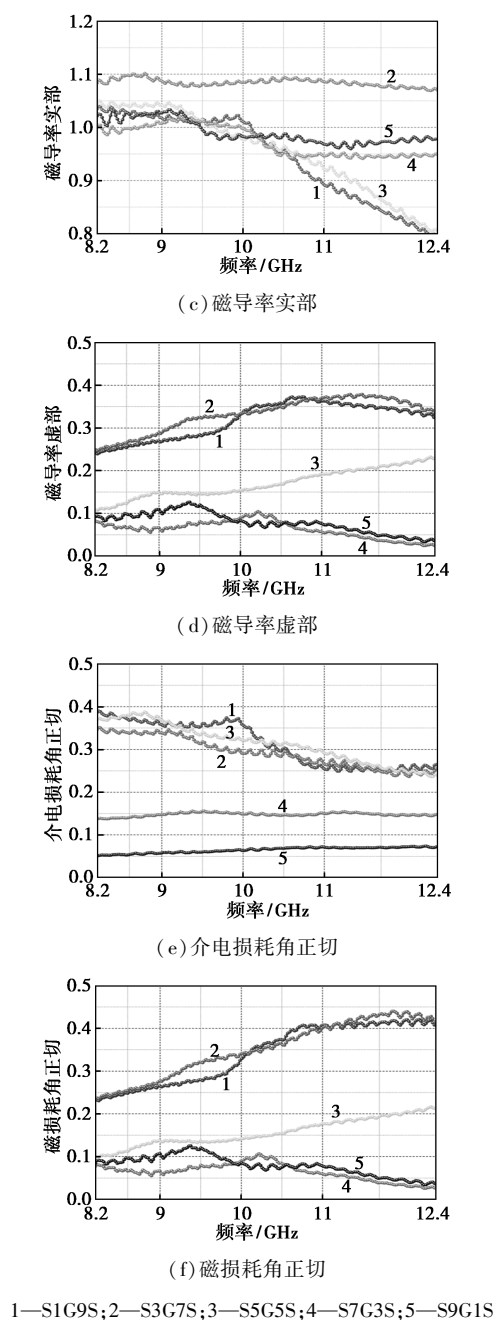


图2 复合吸波微粉电磁参数图

此处吸波微粉的磁损耗机制为异质界面引起的自然共振。

2.3 吸波微粉吸波性能分析

反射损耗 RL 可反映材料吸收微波的能力, 材料的 RL 小于 -10 dB 时可认为其微波吸收效率可以达到 90% 以上。通常根据电磁参数计算吸波材料对电磁波的反射损耗率。复合吸波微粉的反射损耗率 RL 根据公式(5)、(6)计算^[19-20]。

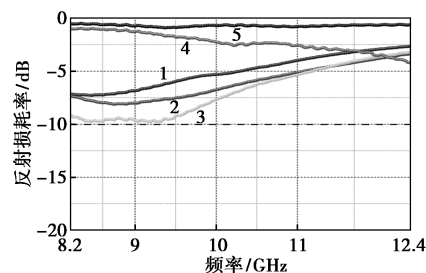
$$RL(\text{dB}) = 20\log\left[\left|(Z_{\text{in}} - Z_0)/(Z_{\text{in}} + Z_0)\right|\right] \quad (5)$$

$$Z_{\text{in}} = Z_0 \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tanh[j(2\pi fd/c) \sqrt{\mu_r\epsilon_r}] \quad (6)$$

式中, Z_{in} 、 Z_0 、 ϵ_r 、 μ_r 、 f 、 d 、 c 、 ϵ_0 和 μ_0 分别为材料的输

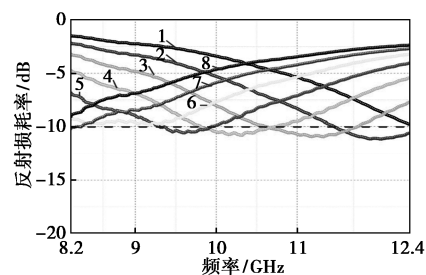
入阻抗、自由空间的特性阻抗、材料的复介电常数、材料的复磁导率、电磁波的频率、吸波材料的厚度、光速、自由空间的介电常数和自由空间的磁导率。

图3为复合吸波微粉的反射损耗 RL 图和 SEM 图。图3(a)为不同 SiC/GP 质量比的复合吸波微粉样品的反射损耗测试结果。其中 S1G9S 虽具有较高的介电常数虚部与介电损耗角正切, 但吸波性能不佳; S5G5S 的介电损耗特性略低于 S1G9S, 展现出全组最低的反射损耗, 吸波性能最优。图3(b)为不同厚度 S5G5S 样品的反射损耗曲线。随样品厚度的增加, 反射损耗极值对应的特征频率逐渐向高频偏移。其中, 1.1、1.2、1.4、1.5 mm 厚度样品的反射损耗极值均低于 -10 dB。图3(c)、(d)为 S5G5S 的 SEM 图, 可见片状 GP 穿插于块状 SiC 之间。适量 GP 可调控样品整体电导率, 2种组分的异质结构可引入丰富的界面极化, 协同提升吸波性能, 使 S5G5S 表现出最优吸波效果。



1—S1G9S; 2—S3G7S; 3—S5G5S; 4—S7G3S; 5—S9G1S

(a) 同一厚度下吸波微粉反射损耗图



1—1.0 mm; 2—1.1 mm; 3—1.2 mm; 4—1.4 mm;

5—1.5 mm; 6—1.6 mm; 7—1.7 mm; 8—1.8 mm

(b) S5G5S 在不同厚度下反射损耗图

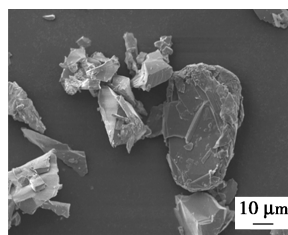
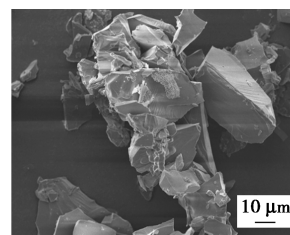
(c) S5G5S 的不同厚度下
反射损耗的 SEM 图(d) S5G5S 的不同厚度下
反射损耗的 SEM 图

图3 复合吸波微粉的电磁参数图和 SEM 图

材料对电磁波的损耗主要包括介电损耗和磁损耗。其中,介电损耗又可分为界面极化损耗、偶极子极化损耗和电导损耗。为了进一步分析极化弛豫行为,根据德拜理论,相关的极化弛豫行为可通过科尔-科尔(Cole-Cole)半圆模型来表示^[21],如式(7)、(8)所示。

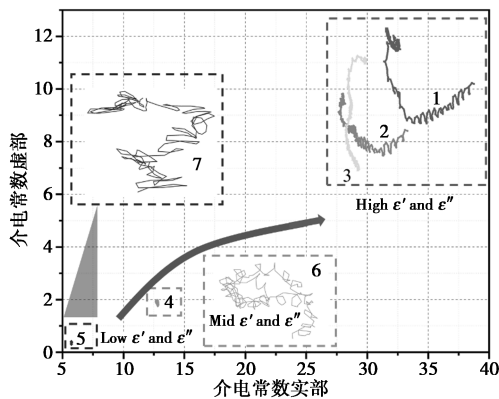
$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) / [1 + (\omega\tau)^2] \quad (7)$$

$$\varepsilon'' = [\omega\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})] / [1 + (\omega\tau)^2] \quad (8)$$

$$[\varepsilon' - (\varepsilon_s + \varepsilon_{\infty})/2]^2 + (\varepsilon'')^2 = [(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})/2]^2 \quad (9)$$

其中, ε_s 和 ε_{∞} 分别为静态介电常数和高频极限介电常数; f 为频率,Hz; τ 为极化弛豫时间,s; σ 为电导率,S/m。在Cole-Cole图中,每出现一个半圆就表明该材料发生一种弛豫。

图4给出了复合吸波微粉的二维Cole-Cole图像。吸波微粉的Cole-Cole图出现了明显的半圆形状,说明其出现多种损耗机制。5条曲线均未出现明显拖尾,说明传导损耗并不明显。高 ε' 区域对应多个Cole-Cole半圆,说明SiC与GP界面的大量缺陷和异质结引发了界面极化、偶极极化,且通过弛豫过程消耗电磁能。对于中低 ε' 区域,其Cole-Cole图还存在不规则的部分,不规则曲线表明材料的偏振损失来源于偶极极化和介电极化^[22]。



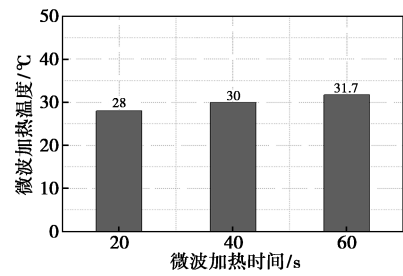
1—S1G9S;2—S3G7S;3—S5G5S;4—S7G3S;5—S9G1S;

6—S7G3S的放大Cole-Cole图;7—S9G1S的放大Cole-Cole图

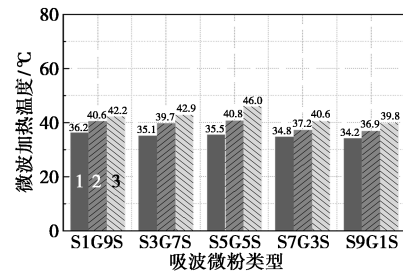
图4 复合吸波微粉的Cole-Cole图

2.4 沥青胶浆微波加热效果分析

图5为基质沥青和含吸波微粉沥青胶浆的微波加热平均温度。含吸波微粉的沥青胶浆微波加热温度相较基质沥青明显提升,其中含S5G5S的沥青胶浆在微波加热60 s后,表面平均温度为46.0℃,较基质沥青提高了3.14倍。以上结果说明,S5G5S实现了电损耗、适度磁损耗与低反射损耗的协同,使得S5G5S在沥青中表现出最优微波加热效果。



(a) 基质沥青

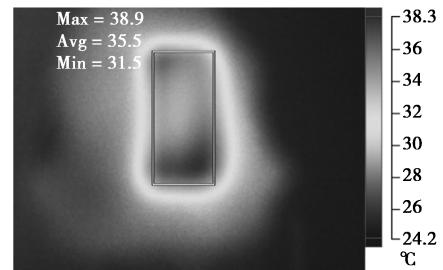


(b) 含吸波微粉的沥青胶浆

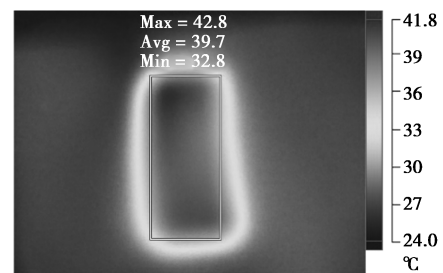
1—20 s;2—40 s;3—60 s

图5 沥青胶浆微波加热平均温度图

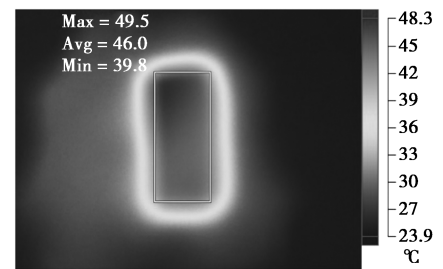
由图6的红外热成像图可见,含复合吸波微粉



(a) 20 s



(b) 40 s



(c) 60 s

图6 S5G5S 沥青胶浆在不同微波辐射时间下的红外热成像图

的沥青胶浆样品具有较均匀的温度分布情况,表明 SiC 和 GP 在沥青中形成了较为均匀的导电网络,使 S5G5S 吸波微粉的电磁损耗性能与微波加热效率均表现良好。

3 结论

本文通过高温固相合成法制备了不同 SiC 与 GP 质量比的复合吸波微粉,系统研究了其物相结构、微观形貌、电磁性能及其在沥青胶浆中的微波加热行为。主要结论如下。

(1) 球磨与烧结工艺有效促进了 SiC 与 GP 的均匀复合,但 SiC 与 GP 之间仅发生物理混合,未生成新物相,两种吸波材料的晶相组成在复合过程中得到完整保留,2 种材料在微观上穿插分布。

(2) S5G5S 表现出最低的反射损耗和最优的吸波性能,样品厚度为 1.1、1.2、1.4、1.5 mm 时其最低反射损耗均小于 -10 dB,有效吸收带宽在 1 GHz 附近波动,较好地实现了介电损耗和磁损耗的平衡。

(3) 复合吸波微粉的微波损耗机制以界面极化与偶极极化为主, SiC 与 GP 界面的大量缺陷会引发界面极化,同时存在一定的磁损耗,损耗机制为复合材料界面效应引发的自然共振。

(4) 含有 S5G5S 的沥青胶浆微波加热能力大幅提升,微波加热 60 s 后其表面平均温度较基质沥青提高了 3.14 倍;含吸波微粉的沥青胶浆样品同时具有较均匀的温度分布,表明 SiC 和 GP 在沥青中形成了较为均匀的导电网络。

参考文献

- [1] 李迪杰.绿色养护技术在公路路面中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2026,(3):188-190.
- [2] 董素芬,宋泽轩,张文辉,等.热诱导自愈合沥青混凝土研究综述:一种可持续路面材料[J].材料导报,2024,38(22):23080062-12.
- [3] Trigos L, Gallego J, Escavy J I, et al. Dielectric properties versus microwave heating susceptibility of aggregates for self-healing asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123475.
- [4] 唐杰,赵华,高红成.碳化硅粉填充沥青混合料微波自愈合性能及合理掺量[J].材料导报,2024,38(20):23080070-10.
- [5] Zhao H, Tang J, Zhong H. Rheological properties of silicon carbide powder-modified asphalt mastic and microwave heating application[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(9): 04024280.
- [6] Phan T M, Park D W. Crack healing performance of hot mix asphalt containing steel slag by microwaves heating[J]. Construction and Building Materials, 2018, 180: 503-511.
- [7] 陈星鸿,杨梦.碳基铁粉掺量对沥青混合料微波加热自愈合效率的影响研究[J].西部交通科技,2026,(1):16-19.
- [8] Xu H, Liu S, Xu T. Self-healing mechanism of nano-graphene oxide modified asphalt induced by microwave-targeted heating[J]. Construction and Building Materials, 2026, 514: 145580.
- [9] 徐莎莎.梯度多孔宽频吸波结构设计及性能研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2025.
- [10] Wang J, Xu Y, Ke S, et al. The effect of La/Ce co-doping on the structure, magnetic characteristic and microwave absorbing performance of barium ferrite[J]. Ceramics International, 2026, 52(6): 7500-7519.
- [11] Li C, Wu S, Chen Z, et al. Improved microwave heating and healing properties of bitumen by using nanometer microwave-absorbers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 757-767.
- [12] Zimmerle B, Wu M, Liu J, et al. The microwave absorption performance of candle soots[J]. Carbon, 2023, 212: 118124.
- [13] Ye X, Xu J, Li S, et al. The microwave absorption properties variation with temperature of RF/SiO₂ and improved microwave absorption by periodic structure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 968: 171905.
- [14] Zhang Z, Cai Z, Zhang Y, et al. The recent progress of MXene-Based microwave absorption materials[J]. Carbon, 2021, 174: 484-499.
- [15] Yu L, Zhu Y, Fu Y. Waxberry-like carbon @ polyaniline microspheres with high-performance microwave absorption[J]. Applied Surface Science, 2018, 427: 451-457.
- [16] 邢原铭,杨涛,王恩会,等.SiC 复合吸波材料的研究进展[J].复合材料学报,2023,40(9):4880-4892.
- [17] Dong S, Zhang W, Zhang X, et al. Designable synthesis of core-shell SiCw@C heterostructures with thickness-dependent electromagnetic wave absorption between the whole X-band and Ku-band[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 354: 767-776.
- [18] Zhang W L, Zhang J M, Wu P, et al. Parallel aligned nickel nanocone arrays for multiband microwave absorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(12): 23340-23346.
- [19] Salem M M, Kenawy E R, Zakaly H M H, et al. Electrospun PVDF/Barium hexaferrite fiber composites for enhanced electromagnetic shielding in the X-band range[J]. Results in Physics, 2023, 53: 106975.
- [20] Liu H, Xu Z, He Z, et al. Engineering heterointerface and composition for ultrathin broadband microwave absorbers based on high entropy oxide/alloy heterostructured composites[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(33): 27512-27523.
- [21] Guo L, An Q, Xiao Z, et al. Performance enhanced electromagnetic wave absorber from controllable modification of natural plant fiber[J]. RSC Advances, 2019, 9(29): 16690-16700.
- [22] Liao Y, Wang D, Zhu W, et al. C/Co₃O₄/diatomite composite for microwave absorption[J]. Molecules, 2024, 29(18): 4336. ■