

CCB/ Al_2O_3 /PDMS 吸波涂层织物的 制备与性能研究

关哲¹ 王妮^{1,2} 关福旺³

1. 东华大学 a. 上海市现代纺织前沿科学研究基地, b. 纺织学院, 上海 201620;
2. 河北省纤维材料创新技术中心, 河北 石家庄 050035;
3. 泉州师范学院 纺织与服装学院, 福建 泉州 362000

摘要: 采用物理共混法制备导电炭黑(CCB)/氧化铝(Al_2O_3)复合吸波剂, 并利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)将复合吸波剂整理至织物表面, 制得 CCB/ Al_2O_3 /PDMS 吸波涂层织物。系统探讨了复合吸波剂的质量分数对织物表面形貌、导电性、电磁参数、吸波性能及疏水性能的影响。结果表明: CCB 颗粒在 Al_2O_3 之间形成了异质界面与导电网络, 涂层结构与织物基材结合紧密, 表面连续性良好。当 CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂在 PDMS 溶液中质量分数为 25% 时, 吸波涂层织物的吸波性能最优, 涂层织物厚度为 2.1 mm 时反射损耗最小(为 -54.41 dB), 厚度为 2.5 mm 时吸波宽带最大(为 5.44 GHz, 即从 9.92 GHz 到 15.36 GHz)。同时, 随着 CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂质量分数的提升, 静态接触角显著升高, 吸波涂层织物表现出较强的疏水性能。研究结果可为疏水吸波织物的设计与性能调控提供实践参考。

关键词: 导电炭黑; 氧化铝; 物理共混法; 涂层法; 导电性; 吸波性能; 疏水性能

中图分类号: TS 195.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)03-0032-11

Study on preparation and performance of CCB/ Al_2O_3 /PDMS microwave-absorbing coated fabrics

Guan Zhe¹, Wang Ni^{1,2}, Guan Fuwang³

1. a. Shanghai Frontiers Science Center of Advanced Textiles, b. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Technology Innovation Center of Hebei for Fiber Material, Shijiazhuang 050035, Hebei, China;
3. College of Textiles and Apparel, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, Fujian, China

Abstract: Conductive carbon black (CCB)/alumina (Al_2O_3) composite microwave-absorbing agents were prepared by using physical blending method, and the composite microwave-absorbing agents were applied onto the surface of fabrics through polydimethylsiloxane (PDMS) treatment, resulting in CCB/ Al_2O_3 /PDMS microwave-absorbing coated fabrics. The effect of mass fraction of composite microwave-absorbing agents on fabric surface morphology, electrical conductivity, electromagnetic parameters, microwave-absorbing performance and hydrophobic properties were

基金项目: 山东省重点研发计划资助(2024TSGC0977); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(25S10105/004); 福建省自然科学基金面上项目(2023J01906)

收稿日期: 2025-05-28

作者简介: 关哲, 女, 2001 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为吸波功能纺织品, 1243786966@qq.com

通信作者: 王妮, 教授, 主要研究方向为材料结构、性能与应用, wangni@dhu.edu.cn

systematically investigated. The results showed that the CCB particles formed heterogeneous interfaces and conductive networks among Al_2O_3 particles, with the coating structure tightly bonded to the fabric substrate and exhibited excellent surface continuity. Optimal microwave-absorbing performance was achieved when the mass fraction of CCB/ Al_2O_3 composite microwave-absorbing agents in PDMS solution reached 25%, the coated fabric demonstrated a minimum reflection loss of -54.41 dB at a coated fabric thickness of 2.1 mm and a maximum absorption bandwidth of 5.44 GHz (from 9.92 GHz to 15.36 GHz) at a coated fabric thickness of 2.5 mm. Meanwhile, as the mass fraction of the CCB/ Al_2O_3 composite microwave-absorbing agents increased, the static contact angle significantly increased, indicating strong hydrophobic properties. These findings can provide practical references for the design and performance optimization of hydrophobic microwave-absorbing fabrics.

Keywords: conductive carbon black; alumina; physical blending method; coating method; electrical conductivity; microwave-absorbing performance; hydrophobic property

电磁技术的快速发展为工业与军事提供了充足的动力,同时也引发了对电磁波污染处理和雷达波隐身防护的高需求^[1-3]。因此,高效宽频带的微波吸收材料亟待开发。将吸波性能融入织物,构建高效轻质柔性吸波材料,如吸波涂层织物^[4]、吸波浸渍织物^[5]及结构型三维吸波织物^[6]等,可有效拓宽吸波材料的应用。其中,吸波涂层织物相较于其他 2 类吸波织物,具有厚度薄、质量小、可控性高及工艺稳定等优势,在雷达隐身军事伪装、电子设备电磁干扰屏蔽、5G 天线罩等场景中应用前景广阔^[7-8]。因此,研究开发“轻、廉、强、宽”的吸波涂层织物,在民用和军用领域均具有重要的学术和应用价值。Sun 等^[9]制备了铜钴镍铁氧体/氧化石墨烯/聚苯胺三组分复合吸波剂,并以水性聚氨酯为黏结剂,将其涂覆到棉织物表面。发现,当复合吸波剂质量分数为 40%、整体厚度为 2.0 mm 时,涂层织物在低频段表现出良好的吸波性能,其最小反射损耗达 -47 dB。

相较于传统的金属吸波剂,碳材料密度低、比表面积大、耐腐蚀性与化学稳定性良好、成本低且可控性强,因而引起了大量研究者的关注,并随着研究的深入获得了广泛的应用^[10]。碳材料中,导电炭黑 (conductive carbon black, CCB) 具有较高的介电常数,能够提供有效的介电损耗,同时生产工艺成熟稳定,质轻且易于加工成复合材料^[11]。但 CCB 填充量较大时,其高导电性易引发趋肤效应,进而导致阻抗失配。因此,为提升吸波性能、拓宽吸波频带,并

改善分散性、力学性能及阻抗匹配特性,CCB 常与低介电常数吸波剂复合使用。如 Zong 等^[12]利用机械共混的方法将 CCB 和镍渣衍生的 Fe_3O_4 (NSD- Fe_3O_4) 掺入天然橡胶中制备复合材料,发现当 CCB 质量分数为 50%、材料厚度为 1.5 mm 时,复合材料的反射损耗 (R_L) 达到最小(为 -35.3 dB),有效宽带为 3.8 GHz。氧化铝 (Al_2O_3) 具有耐高温、耐化学腐蚀等特点,通常被用作吸波材料的基体。有研究表明, Al_2O_3 可以通过界面极化、离子极化等机制提供额外的介电损耗^[13]。此外, Al_2O_3 还能够有效调控复介电常数,优化阻抗匹配,改善吸波剂和涂层的结合力,进而提升涂层的力学性能、耐磨性及耐候性。且相较于磁性成分, Al_2O_3 更为轻质,能在保持良好吸波性能的前提下减轻涂层的质量。

本文旨在综合 CCB 和 Al_2O_3 的优点,采用物理共混的方法将 CCB 和 Al_2O_3 粉末制备成复合吸波剂,并以聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 为黏接剂,使用刮涂法制备多功能吸波涂层织物,探究 PDMS 溶液中复合吸波剂的质量分数对吸波涂层织物电磁参数和吸波性能的影响,以期拓宽吸波材料的应用范围、实现吸波织物的规模化生产提供参考。

1 试验部分

1.1 试验材料

CCB,购自上海耐澄生物科技有限公司; Al_2O_3 , α 晶型,购自国药集团化学试剂有限公司;涤纶平纹机

织物,厚度为 0.52 mm,经纬纱线密度为 (29.8×2) tex 和 (29.5×2) tex,经纬纱密度为 267 根/(10 cm) 和 184 根/(10 cm),面密度为 300 g/m^2 ,由山东阳信华龙纺织科技有限公司提供;无水乙醇,购自国药集团化学试剂有限公司;PDMS 预聚物(Sylgard[®] 184 型)及固化剂,购自美国道康宁公司。

1.2 样品的制备

1.2.1 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂的制备

采用物理共混法制备 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂,具体步骤如下:首先,将适量的 CCB 粉末与 Al₂O₃ 粉末置入 60 ℃ 的电鼓风干燥箱中预干燥 2 h;其次,将 CCB 粉末与 Al₂O₃ 粉末按照 1:1 的质量比加入 50 mL 的无水乙醇中,使用磁力搅拌器(转速 600 r/min,搅拌时间 30 min)使之初步分散;然后,将得到的溶液放入超声槽中超声分散 2 h;最后,将溶液放入 60 ℃ 的电鼓风干燥箱中干燥 8 h,得到粉末状的 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂。

1.2.2 织物预处理

将基材涤纶平纹机织物裁剪成 5 cm×5 cm 的

规格,放入乙醇溶液中超声清洗 30 min,以去除织物表面的杂质和油污;随后,用去离子水漂洗,并在 60 ℃ 的电鼓风干燥箱中干燥 2 h,得到预处理后的织物。

1.2.3 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的制备

采用刮刀涂覆法制备 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物。首先,将 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂加入 PDMS 预聚物中,分别控制 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量占 PDMS 溶液(含固化剂与复合吸波剂)总质量的 10%、15%、20%、25%、30%,使用玻璃棒搅拌 30 min。其次,加入 PDMS 预聚物质量 10% 的固化剂,继续搅拌 30 min,得到 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂料。然后,使用刮刀将所得涂料匀速、多次地刮涂在预处理后的织物表面,完成后室温下静置 30 min,以消除气泡。最后,将织物放入 80 ℃ 的真空干燥箱中固化 2 h,确保涂层完全交联成膜,得到的 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物分别简记为 CA-10、CA-15、CA-20、CA-25、CA-30。CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的具体制备流程如图 1 所示。

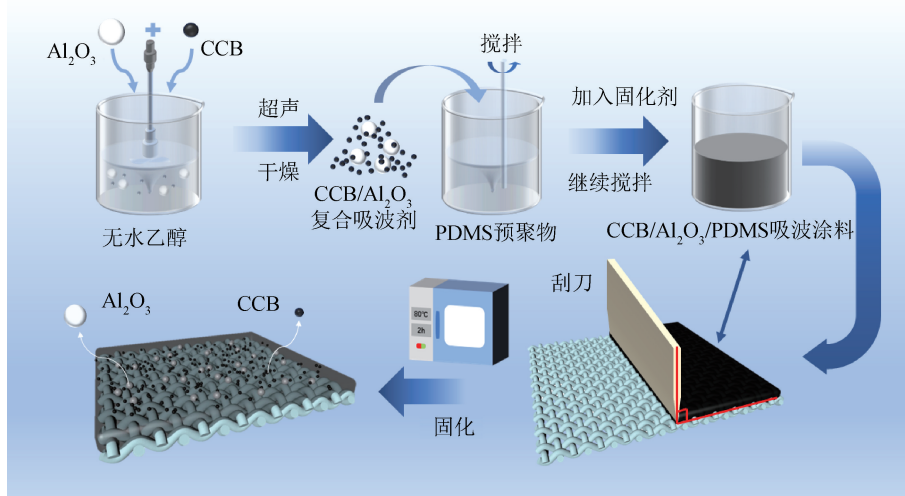


图 1 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的制备流程

Fig. 1 Fabrication process of CCB/Al₂O₃/PDMS microwave-absorbing coated fabrics

1.3 测试与表征

使用扫描电子显微镜(SEM)对样品的表面形貌进行表征。根据 GB/T 12703.4—2010《纺织品静电性能的评定 第 4 部分:电阻率》,利用 DEM12 数字万用表(德力西集团),采用探针法测量吸波涂层织物的电阻,然后计算电阻率。测试方法如图 2

所示,2 根铜条充当电极置于织物之上,其长度大于织物长度。将吸波涂层织物加工成外径为 7.00 mm、内径为 3.04 mm 的同心环,使用 ZNB43 型矢量网络分析仪(罗德与施瓦茨公司),采用同轴空气线法测量织物在 2.00~18.00 GHz 频率范围内的等效电磁参数(如复介电常数、复磁导率等),并

基于计算分析织物的吸波性能。使用接触角测量仪对织物的疏水性能进行表征。

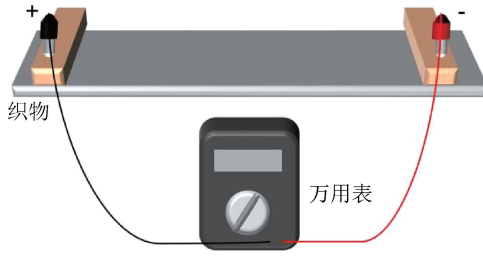


图 2 织物电阻测试方法示意
Fig. 2 Schematic illustration of fabric resistance testing method

2 结果与讨论

2.1 样品表面形貌

图 3 展示了 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂及 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的微观形貌。图 3a) 为

CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂的微观形貌照片,可以看出,CCB 颗粒分布于 Al₂O₃ 典型的片状结构之间,CCB 颗粒之间形成了致密的网络,构建了丰富的微观导电路径。图 3b) 是 CA-25 样品的横截面照片,可以看出,若干纤维从涂层中凸出,且未形成较大的宏观裂缝,表明 PDMS 部分渗入了织物内部,涂层整体具有良好的附着性与覆盖连续性,能够与织物基材形成紧密的结合。图 3c) 和 d) 分别是 CA-10 和 CA-25 样品的表面形貌照片,可以看出:CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂在涂层表面表现为点状凸起,未形成明显的大尺寸团聚体、气泡或沉积区域,表明 CCB 与 Al₂O₃ 在 PDMS 溶液中分散较好;随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加,CA-25 样品表面相较于 CA-10 样品凸起显著增多,吸波涂层织物表面变得更加粗糙,同时表面的 CCB 颗粒间距减少,这有利于形成导电网络,增加导电损耗。

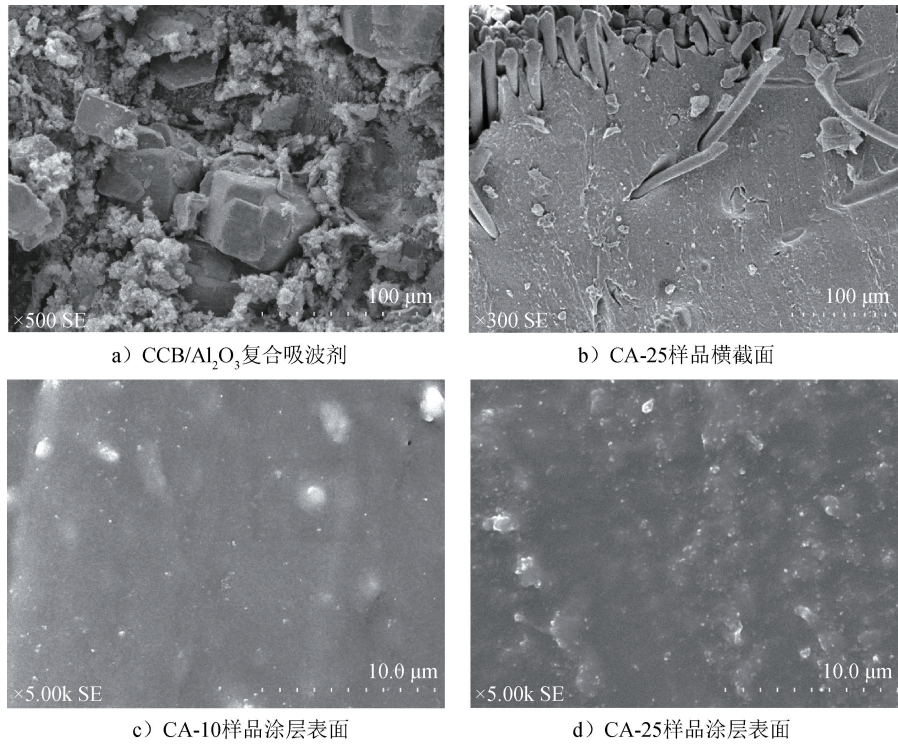


图 3 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂及 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的微观形貌
Fig. 3 Micromorphology of CCB/Al₂O₃ composite microwave-absorbing agents and CCB/Al₂O₃/PDMS microwave-absorbing coated fabrics

2.2 导电性

对 5 种吸波涂层织物进行电阻 (R, Ω) 的测量,并通过式(1)计算出电导率 ($\sigma, S/m$),结果如表 1 所示。

$$\sigma = \frac{L}{RWd} \quad (1)$$

式中: L, W, d 分别为铜条之间织物的长度 (m)、宽度 (m) 和厚度 (m)。

表 1 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的电导率及其标准差
Tab.1 Electrical conductivity and its standard deviation of CCB/Al₂O₃/PDMS microwave-absorbing coated fabrics

样品	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	标准差
CA-10	2.356×10^{-6}	8.077×10^{-8}
CA-15	7.541×10^{-6}	3.554×10^{-7}
CA-20	4.737×10^{-3}	1.066×10^{-4}
CA-25	0.293	5.165×10^{-3}
CA-30	0.992	0.037

由于 PDMS、Al₂O₃ 及涤纶机织物均为绝缘材料,故 CCB 是本研究制备的吸波涂层织物电导率的主要贡献者,其质量分数直接影响吸波涂层织物的导电性能。由表 1 可知,当 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数较小时,如 CA-10、CA-15、CA-20 样品,其电导率几乎为 0,表现为绝缘性质。产生这种现象的原因是,涂层中 CCB 颗粒较少且被绝缘的 PDMS 隔离,故较难形成连续的导电路径。根据渗滤理论,当导电粒子在绝缘基体中的填充量达到渗滤阈值

后,其电导率会急剧增加^[14]。表 1 中,CA-25 和 CA-30 织物的电导率分别为 0.293 S/m 与 0.992 S/m,表明随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的持续增加,当 CCB 填充量达到并超过渗滤阈值后,涂层中的导电网络将得到完善并增强。理论上,继续增加 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂的质量分数,吸波涂层织物的电导率可能会进一步提升,只是增幅会明显减缓。但过高的电导率易引发材料输入阻抗与空气阻抗严重失配,导致电磁波更易被反射而非被吸收。此外,过高的 CCB 填充量还可能造成涂层流动性与黏附性变差,最终造成固化困难、界面结合不良等问题。

2.3 电磁参数

材料的电磁参数包括复介电常数($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)和复磁导率($\mu_r = \mu' - j\mu''$),它们是决定材料吸波性能的关键参数^[15]。图 4 反映了 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的电磁参数。

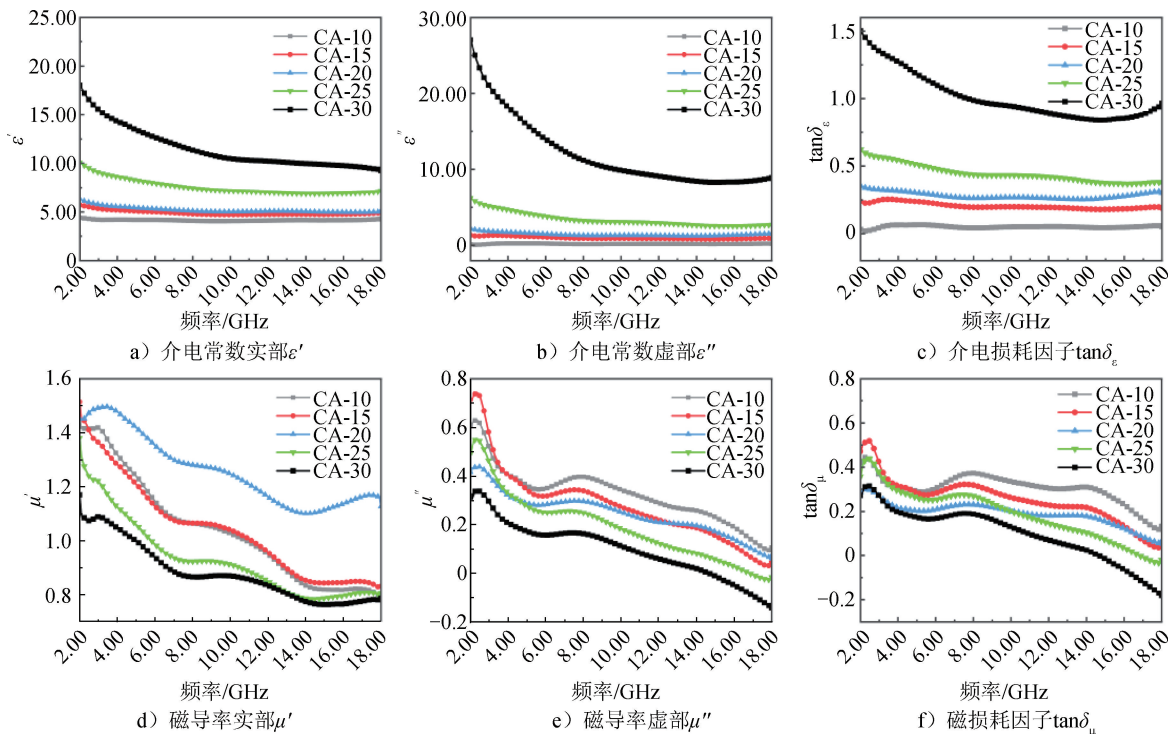


图 4 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的电磁参数

Fig. 4 Electromagnetic parameters of CCB/Al₂O₃/PDMS microwave-absorbing coated fabrics

ϵ' 为介电常数实部,表征材料能够被极化的程度,反映了材料储存电荷的能力,其主要受材料导电性与极化机制的影响。从图 4a)可以看出:随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加, ϵ' 呈现上

升的趋势,这与增加的 CCB 颗粒在 PDMS 体系中形成了更多连续的导电网络,载流子更易迁移有关;除此之外, ϵ' 还随着频率的增加而逐渐下降,这符合介电色散效应,即高频场下极化响应削弱。 ϵ'' 为介电

常数虚部,代表材料损耗能量的能力。由图 4b) 可见, ϵ'' 同样随 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加而增加,这一方面是由于导电网络的连续导致导电损耗增加,另一方面是由于 Al₂O₃ 为绝缘体,外加电场的作用使其内部正负电荷重排,产生了介电极化,且 Al₂O₃ 颗粒的增多会导致介电极化增强,极化弛豫损耗增加。

μ' 为磁导率实部,反映了材料的磁储能能力。CCB 和 Al₂O₃ 均为非磁性材料,CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的磁导率实部主要取决于样品内部的界面效应,以及所形成的微观电流环引起的等效磁响应。从图 4d) 可以看出,随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加,CA-20 的 μ' 达到最高,之后 CA-25、CA-30 样品的 μ' 持续降低,这是因为 CCB 具有高导电性,其易产生强涡流,导致微观电流环存在的区域缩小,磁导率实部下降。 μ'' 为磁导率虚部,能反映磁偶极矩在电磁场中重新排列导致的能量损耗。从图 4e) 可以看出,CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加会导致 μ'' 减小,这与涡流损耗降低导致磁损耗降低有关。介电损耗因子 ($\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$) 和磁损耗因子 ($\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'}$) 可表征材料将电磁波能量转化为热能并耗散的能力。从图 4c) 和 f) 可以看

出,随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加,介电损耗逐渐取代磁损耗并占据主导地位。

由于 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物中存在大量的接触界面,这便导致介电损耗与磁损耗机制较为复杂。为进一步分析介电损耗机制,本研究通过 Cole-Cole 曲线对材料中存在的多种极化损耗进行验证^[16]。图 5 为不同样品的 Cole-Cole 曲线。从图 5a) 与 b) 可以看出,当 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数较低时,Cole-Cole 曲线中出现了多个明显的弛豫环且环的弯曲度较大,较符合界面极化所表现出的弛豫环特征。这是由于 CCB 颗粒较少时其尚未形成导电网络,此时 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂和 PDMS 基体之间形成了较多的界面,而多相之间介电常数的差异有助于引发界面极化与电荷积聚行为,导致界面极化损耗占主导地位^[17]。随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的逐渐提高,弛豫环的数量减少、弯曲度降低,曲线逐渐呈现出光滑、单调的上升趋势,这意味着材料主要的介电损耗机制逐渐由界面极化损耗向偶极子极化损耗、再向导电损耗过渡,原因与 CCB 颗粒本身具有局部极化的能力有关,CCB 颗粒吸附水分子等极性基团后会产生偶极极化,且增加 CCB 颗粒不仅会使颗粒之间的间距减小,导致偶极极化更加明显,同时也使导电路径更为连续、导电损耗持续增加^[18]。总之,CA-10 与 CA-

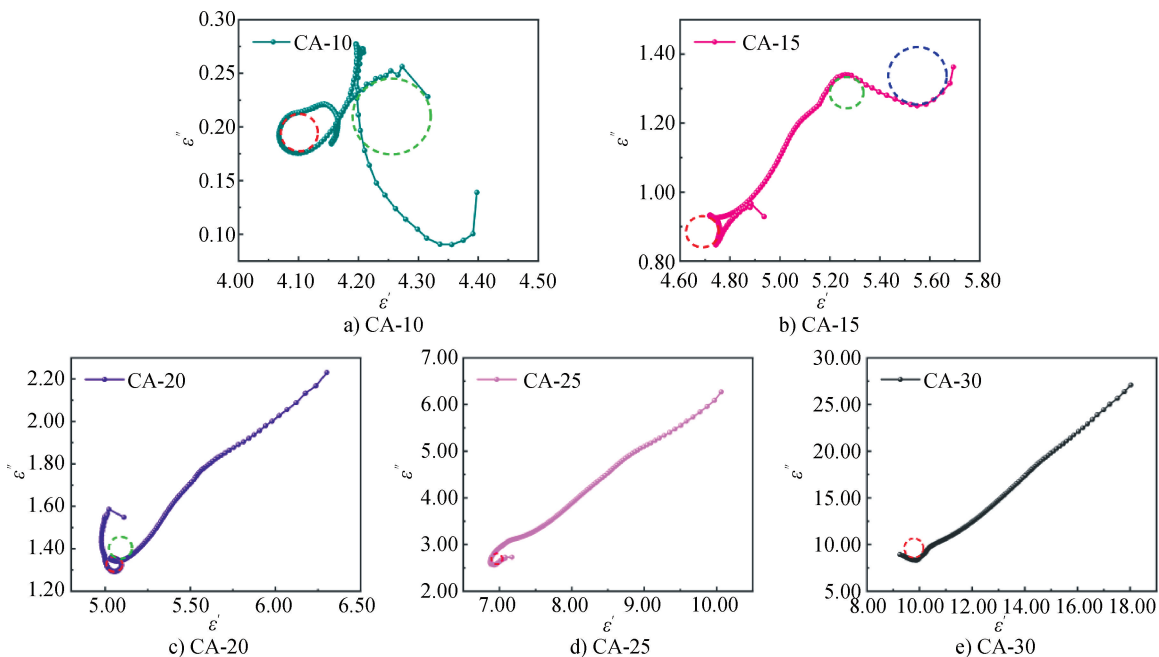


图 5 不同样品的 Cole-Cole 曲线
Fig. 5 Cole-Cole curves of different samples

15 样品虽然具有多个明显的极化机制,但弛豫环弯曲度较大、损耗较低,且易互相干扰,电磁响应不均匀;CA-30 具有过高的导电损耗,易导致阻抗失配;CA-20 与 CA-25 样品的曲线上升平稳,且仍保持有一定直径的弛豫环,其损耗机制相对平衡。

CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂不含磁性成分,故不存在磁性介质特有的共振损耗和磁滞损耗等损耗机制,但由于 CCB 具有高导电性,其在电场和磁场的耦合作用下会诱导出一定的磁响应,从而产生涡流损耗。涡流损耗(C_0)可通过式(2)^[19]计算,其是以电流在整个厚度方向上均匀分布为假设前提的:

$$C_0 = \mu''(\mu')^{-2} f^{-1} = \frac{2}{3} \pi \mu_0 h^2 \sigma \quad (2)$$

式中: f 、 μ_0 、 h 、 σ 分别为入射电磁波频率、真空磁导率、样品厚度和样品电导率。图 6 展示了不同 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物样品的涡流损耗曲线,可以看出,随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加,涡流损耗在高频范围内大致呈现递减的趋势,这验证了磁导率虚部的变化。产生这种现象的原因是,当频率升高、CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数增加时,趋肤效应会使电流大量集中到材料表面,导致内部感应涡流急剧减少,涡流损耗受到抑制^[20]。

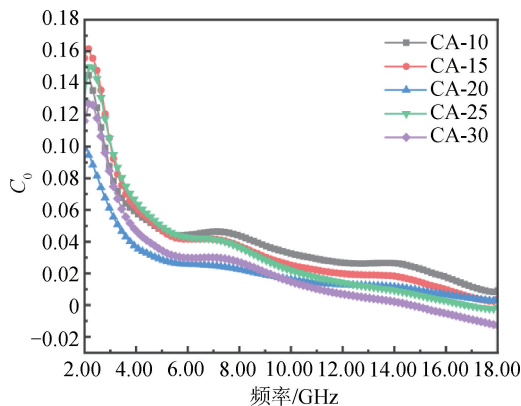


图 6 不同样品的涡流损耗曲线
Fig. 6 Eddy current loss curves of different samples

2.4 吸波性能分析

2.4.1 吸波性能分析

材料的吸波性能主要从最小反射损耗($R_{L, \min}$)和有效吸收宽带(B_A)这两方面进行评价,单位分别为分贝(dB)和吉赫兹(GHz)^[21]。图 7 显示了各样品在不同样品厚度和频率下的反射损耗值。由图 7a)可知,CA-10 样品在其厚度为 2.8 mm、频率

为 14.00 GHz 时反射损耗最小(为 -11.48 dB),在其厚度为 3.0 mm 时有效吸收宽带最大(为 2.96 GHz,即从 11.36 GHz 到 14.32 GHz,这意味着在此频段内超过 90%的电磁波被材料吸收并损耗掉)。当 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数低于 25% 时,随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加,CCB 颗粒增多并逐渐形成导电网络,电偶极极化损耗与导电损耗增强,同一厚度下的吸收峰整体呈现向低频偏移的趋势,且吸收峰的强度持续增加、吸收宽带逐渐变宽,吸波能力增强。由图 7d)可知,CA-25 样品在其厚度为 2.1 mm 时,最小反射损耗为 -54.41 dB,吸收宽带为 4.48 GHz;当样品厚度为 2.5 mm 时,吸收宽带达到最大(为 5.44 GHz,即从 9.92 GHz 到 15.36 GHz,这意味着在此条件下多种损耗机制达到最佳协同,吸波性能最强)。对于 CA-30 样品,图 7e)表明,其在 2.00~18.00 GHz 的频率范围内没有形成良好的电磁波吸收,反射损耗均低于 -10 dB,这与 CCB 质量分数增加导致导电性过高,大部分电磁波被反射而非被吸收有关。

为进一步分析不同 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物样品吸波性能的变化,引入衰减常数(α)与阻抗匹配系数(Z_m)进行研究。 α 与 Z_m 的计算式^[22]分别如下:

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \times$$

$$\sqrt{(\epsilon''\mu'' - \epsilon'\mu') + \sqrt{(\epsilon''\mu'' - \epsilon'\mu')^2 + (\epsilon'\mu'' + \epsilon''\mu')^2}} \quad (3)$$

$$Z_m = |Z_{in}/Z_0| = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \tanh\left(j \frac{2fd\pi}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r \mu_r}\right)} \quad (4)$$

式中: Z_{in} 、 Z_0 分别为输入阻抗和自由空间阻抗; c 为光速。

理想的吸波材料其 Z_m 应尽可能地接近 1,这意味着输入阻抗与自由空间阻抗近乎相等,此时入射波几乎完全进入材料内部,同时衰减常数越大,进入材料内部的电磁波越容易被转化成热能损耗掉。图 8 展示了不同样品在 2.1 mm 厚度时的衰减常数曲线,图 9 为不同样品的阻抗匹配系数曲线。由图 8 和图 9 可知,随着 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数的增加, α 整体呈明显的增加趋势,其中 CA-30

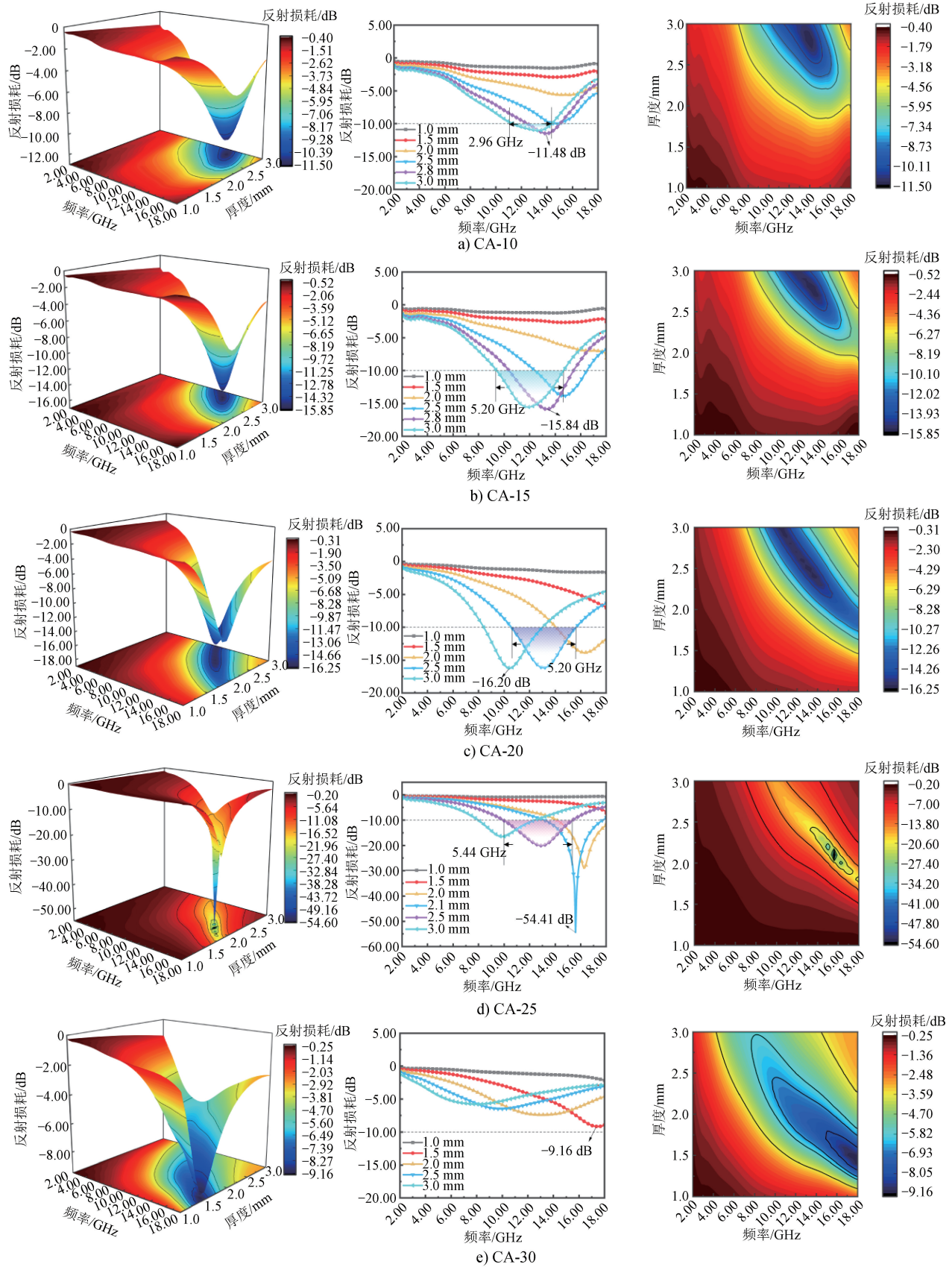


图 7 不同样品的三维反射损耗图、反射损耗曲线及反射损耗等高线

Fig. 7 3D reflection loss maps, reflection loss curves, and reflection loss contour maps of different samples

的衰减常数最大,但其阻抗匹配系数在 2.00 ~ 18.00 GHz 频率范围内远低于 1.0,这将造成其界面反射严重,大部分电磁波不能进入材料内部,故其吸波性能最差;CA-25 样品的 Z_m 在 15.28~16.00 GHz 频率范围内逼近 1.0,同时具有较高的衰减常数,其在损耗与阻抗间实现了优良的平衡,具有最优的吸波性能。值得注意的是,CA-25 样品的衰减常数在高频范围内略低于 CA-20 样品,这是涡流损耗随 CCB/Al₂O₃ 复合吸波剂质量分数升高而在高频范围内被抑制的结果。

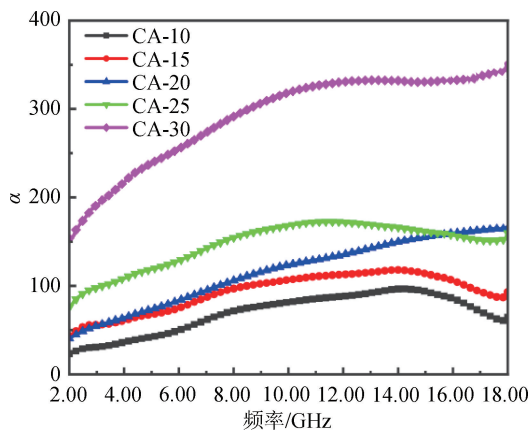


图 8 不同样品在 2.1 mm 厚度时的衰减常数曲线
Fig. 8 Attenuation constant curves for different samples at a thickness of 2.1 mm

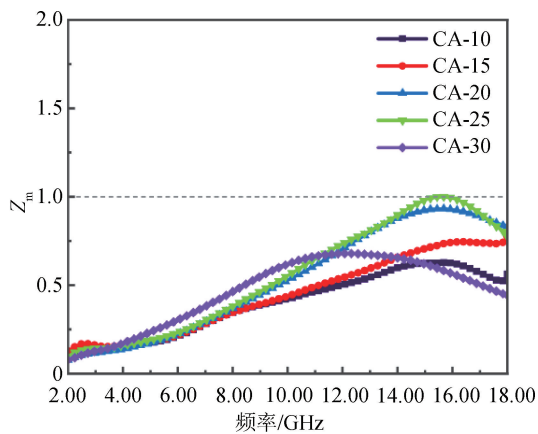


图 9 不同样品的阻抗匹配系数曲线
Fig. 9 Impedance matching coefficient curves for different samples

2.4.2 吸波机制

根据传输线理论,理想的吸波材料需同时满足以下 2 个条件:(1)最大程度地使入射电磁波进入吸波材料内部,减少界面反射;(2)吸波材料尽可能地电磁波进行充分地损耗,减少透射。图 10 以具

备最佳吸波性能的 CA-25 样品为例,展示了其吸波机制:由于低介电常数的 Al₂O₃ 与 PDMS 的阻抗调节作用,在 15.00~17.00 GHz 频段内,样品表面输入阻抗与空气阻抗匹配较好,这使得该频段的大部分电磁波能够顺利进入材料内部,界面反射被有效抑制。而在其他未能形成良好阻抗匹配的频段内,少部分电磁波进入材料内部,大部分电磁波被反射回空气介质中。

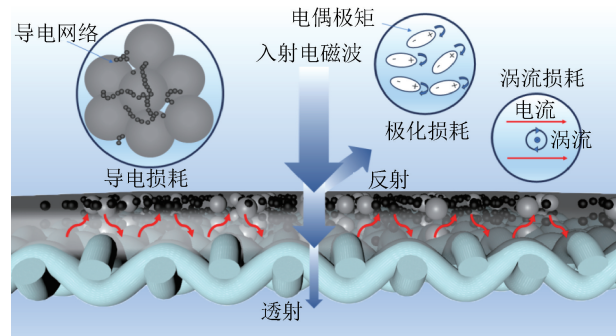


图 10 吸波机制示意
Fig. 10 Illustration of electromagnetic absorption mechanism

电磁波进入材料内部后会形成多次反射与干涉,并通过不同的损耗机制转化为热能而被耗散掉。CA-25 样品对电磁波的有效衰减主要归因于以下几方面:(1)CCB 因点接触而在交变电场中形成锁链式导电通路,载流子迁移产生微电流,并在电阻的作用下将能量转化为热能,形成导电损耗;(2)CCB、Al₂O₃ 与 PDMS 的介电特性存在差异,故界面两侧电荷分布不均,进而产生电偶极矩,且电偶极矩在外加电场的作用下转动滞后,最终形成界面极化损耗;(3)高导电性促使电磁波激发局部电流,诱导弱磁响应,并引发少量涡流损耗,进而提升了材料的吸波性能。

表 2 列举了部分研究制备的吸波材料的吸波性能,可见本研究制备的 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物综合性能优异,其在材料厚度、最小反射损耗和有效吸收宽带等方面表现均较好,展现出较大的应用潜力。

2.5 疏水性

利用静态接触角对 CCB/Al₂O₃/PDMS 吸波涂层织物的疏水性能进行表征,具体如图 11 所示。从图 11 可以看出,CA-10、CA-15、CA-20、CA-25 和 CA-30 样品的静态接触角分别为 100.83°、103.65°、

表 2 部分吸波材料的吸波性能

Tab. 2 Absorption performance of some microwave-absorbing materials

材料	$R_{L, \min}$ /dB	B_A /GHz	材料厚度/mm	参考文献
CCB/ Al_2O_3 /PDMS 涂层织物	-54.41	4.48	2.10	本研究
MoS_2 /RGO/PDMS 涂层织物	-42.81	2.08	3.50	[5]
CCB/NSD- Fe_3O_4 橡胶	-35.30	3.80	1.50	[12]
RGO@ Al_2O_3 涂层织物	-14.20	5.00	2.00	[13]
MXene/ Fe_3O_4 涂层织物	-27.00	4.00	1.50	[23]
PET@RGO 涂层织物	-24.53	3.20	3.70	[24]

注:RGO 为还原氧化石墨烯;PET 为聚对苯二甲酸乙二醇酯。

110.04°、116.84°和 125.08°,均表现为疏水性,这主要归功于 PDMS 分子结构中含有低表面能的甲基基团,它们为复合涂层提供了良好的疏水基础,而 CCB 与 Al_2O_3 则在此基础上进一步调节了涂层织物的表面性能。此外图 11 中,随着 CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂质量分数的增加,静态接触角呈现出明显的上升趋势,表明涂层织物的疏水性在逐渐增强。具体原因与 CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂质量分数增加,涂层的表面粗糙度持续增加有关。根据 Wenzel 模型,粗糙度的提升将增强本征疏水材料的疏水性^[25]。因此,当 CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂质量分数处于较高水平(25%~30%)时,涂层表面结构更加均一且粗糙,此时更利于水滴维持较大的接触角状态。

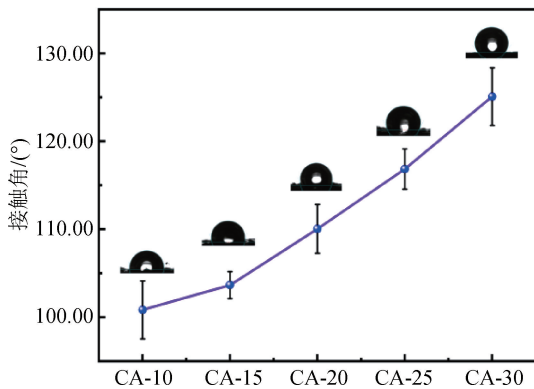


图 11 不同样品的静态接触角

Fig. 11 Static contact angles of different samples

3 结论

(1) 本研究先通过物理共混法构建了 CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂,再结合织物基材制备了吸波涂层织物。研究发现,CCB 与 Al_2O_3 在经过物理共混后形成了明显的异质界面和导电网络,且涂层与织

物结合紧密,材料之间形成的多尺度结构可赋予材料良好的吸波性能与疏水性能。研究所用原料来源广泛且成本低,工艺流程与常规工业化纺织涂层制备方法兼容,产业转化能力良好。

(2) CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂在 PDMS 溶液中的质量分数对吸波涂层织物的电导率、电磁参数及吸波性能等影响显著。随着 CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂质量分数的增加,涂层织物的电导率、衰减常数均增加。其中,CA-30 样品具备最高的电导率与损耗能力,但其会造成阻抗失配;CA-25 样品因多种损耗机制的平衡而具有最佳的阻抗匹配与吸波性能,实现了最小的 $R_{L, \min}$ (-54.41 dB)及最大的 B_A (5.44 GHz)。

(3) CCB 和 Al_2O_3 的复合提升了涂层表面的粗糙度,再结合 PDMS 的低表面特性,CCB/ Al_2O_3 /PDMS 吸波涂层织物拥有良好的疏水性能,静态接触角随 CCB/ Al_2O_3 复合吸波剂质量分数的增加而增加,最高达 125.08°。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] GUAN C L, SU S H, WANG B, et al. Electromagnetic stealth technology: a review of wave-absorbing structures [J]. Materials & Design, 2025, 253: 113891.
- [2] XING X C, WU L L, TIAN X Y, et al. Multifunctional metamaterials with ultrawideband wave absorption and thermal camouflage [J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(16): 2300389.
- [3] FIONOV A, KRAEV I, YURKOV G, et al. Radio-absorbing materials based on polymer composites and

- their application to solving the problems of electromagnetic compatibility [J]. *Polymers*, 2022, 14 (15): 3026.
- [4] 李淑静, 张梦欣, 李亮, 等. 石墨烯/铜粉复合涂层的电磁特性与吸波性能 [J]. *印染*, 2023, 49(6): 49-54.
- [5] 赵诗怡, 徐丽慧, 蔡央芳, 等. 基于花状 MoS_2/RGO 自清洁吸波纺织品的制备 [J]. *印染*, 2024, 50(6): 1-5.
- [6] GAO S, DENG X Y, QI X M, et al. Nanometer-sized carbon black and Fe_3O_4 nanoparticles incorporated into polyamide-66 composite fibers and woven into three-dimensional fabrics for electromagnetic absorption [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(6): 6525-6535.
- [7] YIN J J, MA W S, GAO Z B, et al. A review of electromagnetic shielding fabric, wave-absorbing fabric and wave-transparent fabric [J]. *Polymers*, 2022, 14 (3): 377.
- [8] WANG H H, LIU Y J, ZHAO X M. Flexible and firm multilayer $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{GO}$ coated composite fabric for high-performance electromagnetic shielding and wave absorption [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 195: 108676.
- [9] SUN J, WANG L M, YANG Q, et al. Preparation of copper-cobalt-nickel ferrite/graphene oxide/polyaniline composite and its applications in microwave absorption coating [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 141: 105552.
- [10] KIM S H, LEE S Y, ZHANG Y L, et al. Carbon-based radar absorbing materials toward stealth technologies [J]. *Advanced Science*, 2023, 10(32): 2303104.
- [11] 黄巨龙, 周亮, 陈萌, 等. 碳基材料吸波性能研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2020, 39(2): 138-145.
- [12] ZONG H X, LONG J, ZHENG J H, et al. Preparation of nickel slag-derived $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{conductive carbon black}/\text{natural rubber}$ composites and enhanced microwave absorption [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, 35(2): 157.
- [13] XIA Q S, HUANG Z Y, WANG X T, et al. Microwave absorbing performance of reduced graphene oxide @ alumina fabricated by atomic layer deposition method [J]. *Ceramics International*, 2024, 50(12): 21334-21341.
- [14] HA D Y, KANG J H, KIM T, et al. Improved elasticity and conductivity in a Ni@Ag/silicone rubber composite due to lowered percolation threshold via magnetic-field-induced alignment [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(12): 5809-5815.
- [15] 司甜甜. 玄武岩纤维表面电磁功能化及其吸波性能研究 [D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2023.
- [16] 张恒宇. MXene 基柔性高效吸波纺织材料研究 [D]. 上海: 东华大学, 2024.
- [17] LI S Y, TIAN X X, WANG J F, et al. Design and synthesis of composite films with excellent microwave absorption performance using polydimethylsiloxane as flexible frame [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, 33(10): 3447-3454.
- [18] LI B, RANDALL C A, MANIAS E. Polarization mechanism underlying strongly enhanced dielectric permittivity in polymer composites with conductive fillers [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2022, 126 (17): 7596-7604.
- [19] ZUO D Q, JIA Y Q, XU J H, et al. High-performance microwave absorption materials: theory, fabrication, and functionalization [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(37): 14791-14817.
- [20] 李琪. 低维金属硫化物吸波材料的设计制备与性能调控研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [21] YIN P F, LAN D, LU C F, et al. Research progress of structural regulation and composition optimization to strengthen absorbing mechanism in emerging composites for efficient electromagnetic protection [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 204: 204-223.
- [22] WANG Y F, ZHU L, HAN L, et al. Recent progress of one-dimensional nanomaterials for microwave absorption: a review [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6 (9): 7107-7122.
- [23] 孟雅鑫, 张仲, 侯宪广, 等. MXene/ Fe_3O_4 改性织物的制备及吸波性能研究 [J]. *棉纺织技术*, 2023, 51(5): 19-24.
- [24] FU W W, HE Z M, WANG H Y, et al. Flexible and stretchable polyester@reduced graphene oxide composite fabric for tunable electromagnetic absorption [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 108171.
- [25] 肖阳阳, 石佩玉, 孙冰冰, 等. 消防服外层疏水涂层织物的制备及耐酸碱性能研究 [J]. *消防科学与技术*, 2024, 43(12): 1719-1725.