用于电磁波宽频吸收的1D/2D亚纳米基元复合气凝胶材料的制备

白宝强,张 涛,陈 佳,付 蕊,赛华征*
(内蒙古科技大学化学与化工学院(硅业学院),内蒙古 包头 014010)

摘要:为解决电磁波污染问题,以1D GdOOH亚纳米线与2D CuO-PMA亚纳米片为前驱体,按不同质量比(1∶1、2∶1和3∶1)进行机械混合,并结合冷冻铸造、真空干燥及后续热处理工艺,成功制备出1D/2D复合亚纳米片气凝胶。通过扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)及矢量网络分析仪等手段,系统表征了材料的微观结构与电磁波吸收性能。结果表明,所得气凝胶呈现典型的蜂窝状多孔结构,经热处理后密度为90 mg/cm^3。在电磁波吸收性能方面,该材料最小反射损耗可达-68.1 dB,最大有效吸收带宽为8.4 GHz。本研究为开发具备“薄、轻、宽、强”特性的微波吸收材料提供了可行的材料设计思路与制备途径。

关键词:亚纳米线;亚纳米片;冷冻铸造;微波吸收
中图分类号:TQ427.26 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0102-05
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.018

Fabrication of 1D/2D sub-nanometer unit composite aerogel materials for broadband electromagnetic wave absorption

*BAI Bao-qiang, ZHANG Tao, CHEN Jia, FU Rui, SAI Hua-zheng**
(School of Chemistry and Chemical Engineering (Silicon Industry), Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: To address the issue of electromagnetic wave pollution, this study utilized 1D GdOOH sub-nanowires and 2D CuO-PMA sub-nanosheets as precursors. These were mechanically mixed at different mass ratios (1∶1, 2∶1, and 3∶1) and processed through freeze-casting, vacuum drying, and subsequent heat treatment to successfully fabricate 1D/2D composite sub-nanosheet aerogels. The microstructure and electromagnetic wave absorption properties of the materials were systematically characterized using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and a vector network analyzer. The result illustrates that the prepared aerogel exhibits a typical honeycomb-like porous structure, with a density of 90 mg/cm^3 after heat treatment. In terms of electromagnetic wave absorption performance, the minimum reflection loss (RL_{min}) reaches -68.1 dB, and the maximum effective absorption bandwidth (EAB_{max}) is 8.4 GHz. This study provides a feasible material design strategy and preparation route for developing microwave absorbing materials with the characteristics of being “thin, light, wide, and strong.”

Key words: sub-nanowires; sub-nanosheets; freeze-casting; microwave absorption

随着第5代移动通信(5G)、物联网及军事隐身技术的飞速发展,日益复杂的电磁环境在带来便利的同时,也引发了严峻的电磁波污染与干扰问题[1]。过量的电磁辐射不仅干扰电子设备的正常运行,更对生物体健康构成潜在威胁[2]。因此,开发能够高效衰减与转化电磁波能量的高性能吸波材料,已成为当前材料科学、物理及信息工程领域的研究前沿与迫切需求[3]。

理想的吸波材料需满足“薄、轻、宽、强”的综合要求,即在较小厚度与密度下,具备强反射损耗与宽吸收带宽。传统块体材料与微米级材料因阻抗匹配性差、损耗机制单一等固有局限,难以同时满足上述指标[4]。近年来,低维纳米材料,如一维纳米线与二维纳米片,因其独特的几何结构、可调的电子特性及丰富的界面效应,为设计新型吸波体提供了全新思路[5]。特别是亚纳米材料,其结构尺寸进一步逼近物理极限,不仅继承了纳米材料的优异特性,更因极大的比表面积和接近原子尺度的结构特征,能够暴露更多的活性位点,诱导更强的量子限域效应与表面效应,展现出作为高性能吸波基元的巨大潜力[6]。

异质界面的构筑被认为是提升性能的关键策略。当2种不同电、磁性质的纳米材料复合时,在其接触界面处会因费米能级差异而形成局域电场,促

收稿日期:2026-01-26;**修回日期**:2026-08-15
基金项目:国家自然科学基金地区项目(22466028,52164013)
作者简介:白宝强(1997-),男,硕士生,研究方向为气凝胶材料,2506937252@qq.com;赛华征(1990-),男,博士,教授,研究方向为气凝胶材料及固废资源化,通讯联系人,saihuazheng@163.com。

进界面电荷的积累与迁移,从而引发显著的界面极化(也称 Maxwell-Wagner-Sillars 效应)。这种极化弛豫过程是消耗电磁波能量的高效途径[7-8]。此外,丰富的异质界面还有利于优化材料的整体阻抗,改善其与自由空间的阻抗匹配,使更多电磁波能够进入材料内部被耗散,而非被表面反射。因此,通过合理的组分与结构设计,在材料内部构建大量、紧密的异质界面,已成为提升吸波性能的核心指导思想[9-10]。

然而,常规纳米材料中的异质界面密度受限于其自身尺寸,界面效应的最大化利用面临瓶颈。亚纳米材料的出现为突破这一瓶颈提供了契机。其“更小尺度”的本质意味着在相同体积或质量内,能够容纳更多数量的异质结单元,从而极大增加异质界面的总面积与密度[11-12]。这种高密度的界面网络,不仅能极大强化界面极化损耗,还能通过延长电磁波的多重散射与反射路径,协同提升导电损耗与极化弛豫,有望实现电磁波吸收性能的跨越式提升[13-14]。

本研究聚焦于一维(1D)与二维(2D)亚纳米材料的可控复合,旨在探索通过构筑高密度异质界面来设计高性能吸波材料的新途径。我们以具有特殊结构的 GdOOH 亚纳米线与 CuO-PMA 亚纳米片为模型基元,通过精确调控其复合比例与微观架构,系统研究其异质界面效应与电磁波吸收性能之间的构效关系,以期为开发下一代“薄、轻、宽、强”的先进吸波材料提供理论依据与实验基础。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

实验用到的主要原材料及生产厂家见表 1。

表 1　主要原料和试剂

主要原料和试剂	化学式	规格	生产厂家
三水硝酸铜	$Cu(NO_3)_2\cdot 3H_2O$	分析纯	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
磷钼酸水合物	$H_3P(Mo_3O_{10})_4\cdot xH_2O$	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
氯化钆六水合物	$GdCl_3\cdot 6H_2O$	分析纯	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
油胺	$C_{18}H_{37}N$	分析纯	北京百灵威科技有限公司
无水乙醇	C_2H_6O	分析纯	天津渤化化学试剂有限公司
环己烷	C_6H_{12}		天津渤化化学试剂有限公司
正己烷	C_6H_{14}		天津渤化化学试剂有限公司

1.2　仪器设备

本实验过程用到的实验仪器和设备见表 2。

表 2　实验仪器和设备

仪器名称	型号	生产厂家
磁力搅拌器	MS-M-S10	美国赛洛捷克公司
高温管式炉	GSL-1600X	合肥科晶材料有限公司
分析天平	ME204/A	梅特勒托利多科技(中国)有限公司
热重分析仪	TGA 2(LF)	梅特勒托利多科技(中国)有限公司
恒温鼓风干燥箱	ZXRD-B5110	上海智城分析仪器制造有限公司
10 通道磁力搅拌器	MS-H-S10	大龙兴创实验仪器(北京)股份公司
冻干机	SCIENTZ-10ND/A	新芝生物科技股份有限公司
场发射扫描电镜(SEM)	赛默飞 Apreo 2C	赛默飞世尔科技公司
X 射线衍射仪	D8 ADVANCE	布鲁克 AXS 公司
矢量网络分析仪	N5222A	美国安捷伦公司

1.3　GdOOH 亚纳米线/CuO-PMA 亚纳米片复合气凝胶的制备

CuO-PMA 亚纳米片的制备:提前配制浓度为 0.05 mol/L 的 $Cu(NO_3)_2$ 的乙醇溶液。用分析天平准确称量 0.054 g 磷钼酸,将其放于反应釜内衬中,再向其中加入 6 mL 的 0.05 mol/L 的 $Cu(NO_3)_2$ 的乙醇溶液。继续向内衬中加入 4.634 1 g 油胺以及 18 mL 正己烷,随后向反应釜内衬中加入磁转子,置于磁力搅拌器上搅拌 10 min。随后,取出转子,将内衬与反应釜装配整齐,放入鼓风干燥箱中,设置 140℃加热 4 h。反应完全后将内衬中的上清液与沉淀分离,使其分散于环己烷中保存。

GdOOH 亚纳米线的制备:(1)用分析天平准确称取 0.8 g 氯化钆六水合物($GdCl_3\cdot 6H_2O$)于烧杯中,依次加入 1 mL H_2O 和 12 mL 乙醇。将烧杯放于超声机中 15 min。(2)向反应釜内衬中加入 4 mL 油胺与 2 mL 油酸,并向内衬中放入磁转子,置于磁

力搅拌器上调至 3 档搅拌 6~8 min。在超声和搅拌均结束后,将(1)加入(2)中,再次搅拌 10 min,随后,取出转子,将内衬与反应釜装配整齐,放入鼓风干燥箱中,设置 170℃加热 4 h。反应完全后将内衬中的上清液与沉淀分离,使其分散于环己烷中保存。

CuO-PMA 亚纳米片/GdOOH 亚纳米线复合气凝胶的制备:(1)称取 1.827 g CuO 亚纳米片,分散于环己烷中。(2)分别称取 0.914、1.218、1.370 25 g GdOOH 亚纳米线和 0.914、0.609、0.456 75 g CuO 亚纳米片。将其一一对应混合分散于环己烷中(质量比分别为 1∶1、2∶1、3∶1)。将上述 3 种复合溶液分别进行冷冻铸造、真空干燥得到气凝胶样品。将得到的复合气凝胶进行热处理,最后,对得到的碳基气凝胶进行测试(图 1)。

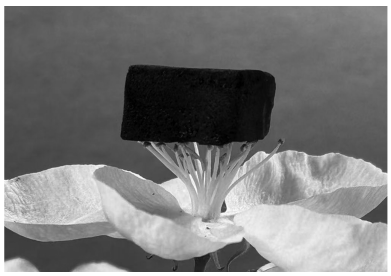


图 1 热处理后的 GdOOH 亚纳米线/CuO-PMA 亚纳米片气凝胶

1.4 材料分析与表征

1.4.1 扫描电子显微镜分析(SEM)

通过场发射扫描电子显微镜(美国 Thermo Scientific Apreo Ⅱ型)对气凝胶粉末的表面形貌结构进行表征,表征前对气凝胶表面进行喷金预处理以增强其导电性。

1.4.2 矢量网络分析(同轴法)

首先将样品置于石蜡中进行浸渍,之后将其压成 3 mm 左右的圆环,之后采用矢量网络分析仪(型号:N5234B PNA-X,安捷伦公司)在 2~18 GHz 的频率范围内测量了 CuO-PMA 亚纳米片/GdOOH 亚纳米线复合气凝胶(Gd-PnwA)的电磁参数。

1.4.3 傅里叶变换红外光谱分析(FT-IR)

采用傅里叶变换红外光谱仪对气凝胶样品进行 FT-IR 检测,分析样品的特征峰,扫描范围在 500~4 000 cm^{-1},分辨率为 4 cm^{-1}。

1.4.4 热重分析(TGA)

本文采用德国耐驰公司 STA449F3 的热重分析测试仪对实验样品进行测试,首先,称取大约 8 mg 的样品并将样品置于陶瓷锅中,在 30~800℃的温度范围内,在常压下以 10℃/min 的速度加热。

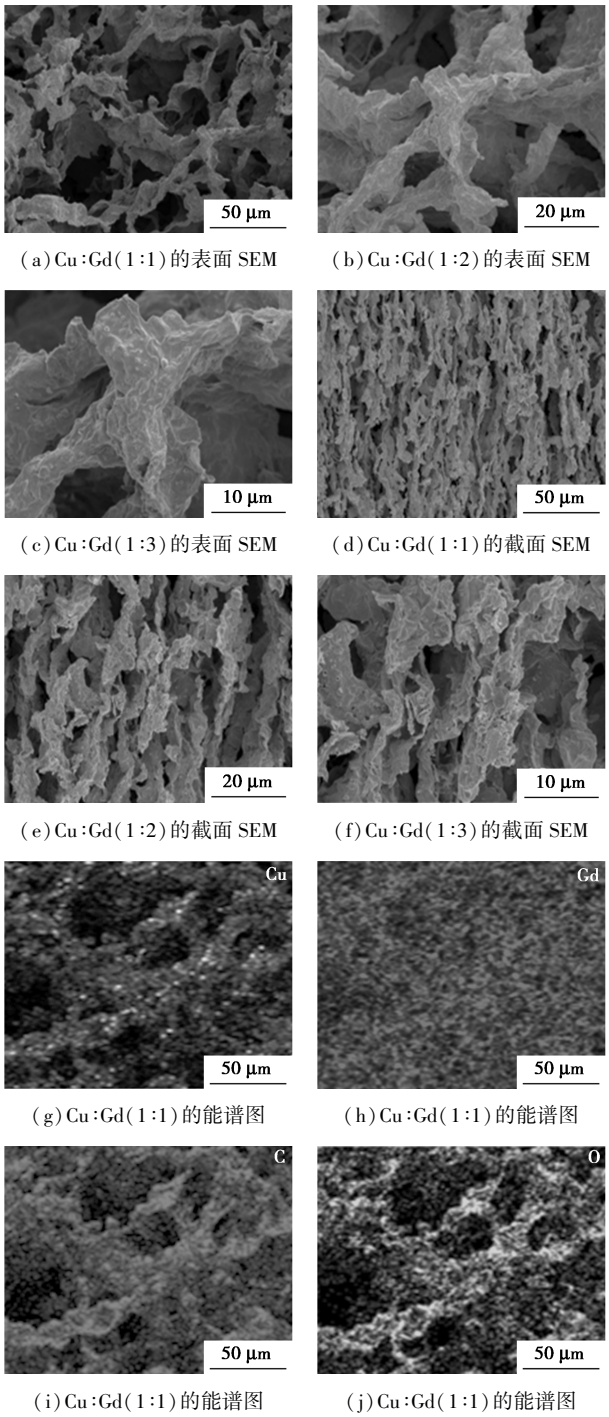
1.4.5 XRD 分析

将块状样品研磨成均匀粉末后,取适量置于玻璃载玻片上,平整压实,随后将其放入 XRD 衍射仪样品台中,在 10~90°的范围内进行扫描测试。

2 结果与分析

2.1 SEM 分析

从图 2 中可以清晰地观察到,经过冷冻铸造后,



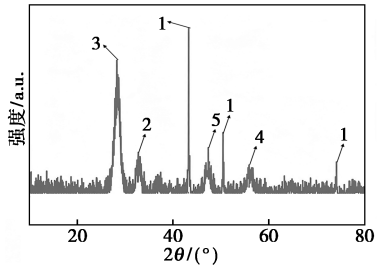
(a)Cu∶Gd(1∶1)的表面 SEM (b)Cu∶Gd(1∶2)的表面 SEM
(c)Cu∶Gd(1∶3)的表面 SEM (d)Cu∶Gd(1∶1)的截面 SEM
(e)Cu∶Gd(1∶2)的截面 SEM (f)Cu∶Gd(1∶3)的截面 SEM
(g)Cu∶Gd(1∶1)的能谱图 (h)Cu∶Gd(1∶1)的能谱图
(i)Cu∶Gd(1∶1)的能谱图 (j)Cu∶Gd(1∶1)的能谱图

图 2 GdCu 复合气凝胶的 SEM 图和能谱图

CuO-PMA 亚纳米片/GdOOH 亚纳米线复合气凝胶呈现出高度有序的三维网络结构,该结构的出现主要归因于铸造过程中冰晶的定向生长,在冰晶生长过程中产生的挤压力促使亚纳米片和亚纳米线在三维空间中进行自组装。此外,在后续的热处理过程中,复合材料的内部骨架保持稳定,没有发生坍塌,最终形成连续贯通孔道的蜂窝网状结构,这种独特的结构为后续的电磁波的吸收奠定了结构基础。由元素分布能谱图可知,Cu、Gd、C、O 这 4 种元素在三维空间中呈现均匀分布,表明了 CuO-PMA 亚纳米片和 GdOOH 亚纳米线充分混合。

2.2　XRD 分析

通过对 CuO 亚纳米片/GdOOH 亚纳米线复合气凝胶进行 XRD 物相分析,如图 3 所示,该复合材料中含有 Gd、Gd_2CuO_4、Cu、Cu_5P 和 Gd_2O_3 这 5 种物相。在高温处理过程中 GdOOH 亚纳米线和 CuO-PMA 亚纳米片之间发生了反应。其中,CuO 中的部分 Cu^{2+}被还原为 Cu,而 GdOOH 中的部分 Gd^{3+}被还原为 Gd。此外,在处理过程中还生成了 Gd_2CuO_4 和 Gd_2O_3 等新物相。这些反应使得材料内部形成了多种异质界面,这些异质界面的存在显著增强了材料的极化损耗能力。这些化学反应和异质界面的形成,为复合气凝胶展现出优异的电磁屏蔽性能奠定了坚实的基础。

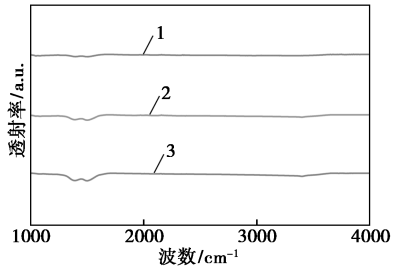


1—Cu;2—Gd_2CuO_4;3—Gd;4—Cu_5P;5—Gd_2O_3

图 3　GdCu 复合气凝胶的 XRD 图

2.3　傅里叶变换红外光谱分析

如图 4 所示,在红外光谱分析中,未观察到明显的吸收峰,这表明在碳化过程中,材料内部的有机成分已被充分去除,未留下任何残留。这一结果有力地证实了碳化过程的成功实施,从而成功制备出 GdOOH 亚纳米线/CuO-PMA 亚纳米片复合气凝胶。

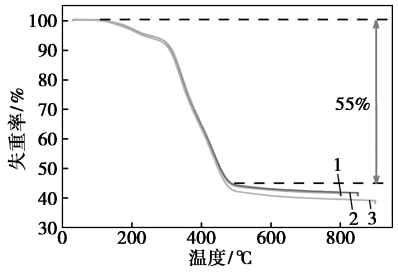


1—Cu:Gd(1:1);2—Cu:Gd(1:2);3—Cu:Gd(1:3)

图 4　GdCu 复合气凝胶的傅里叶红外光谱

2.4　热重曲线分析

如图 5 所示,在热重分析中,当温度升至 180℃时,CuO-PMA 亚纳米片/GdOOH 亚纳米线复合气凝胶开始发生分解;至 450℃时,分解过程完成。分解前后,材料的固含量相差 55%,这表明材料中初始含有 55%的有机组分。进一步观察发现,当温度达到 850℃时,热重曲线进入平台期,而这一温度恰好与我们设定的碳化温度一致,这有力地说明在 850℃时样品已被充分碳化,有机组分完全转化为碳结构。

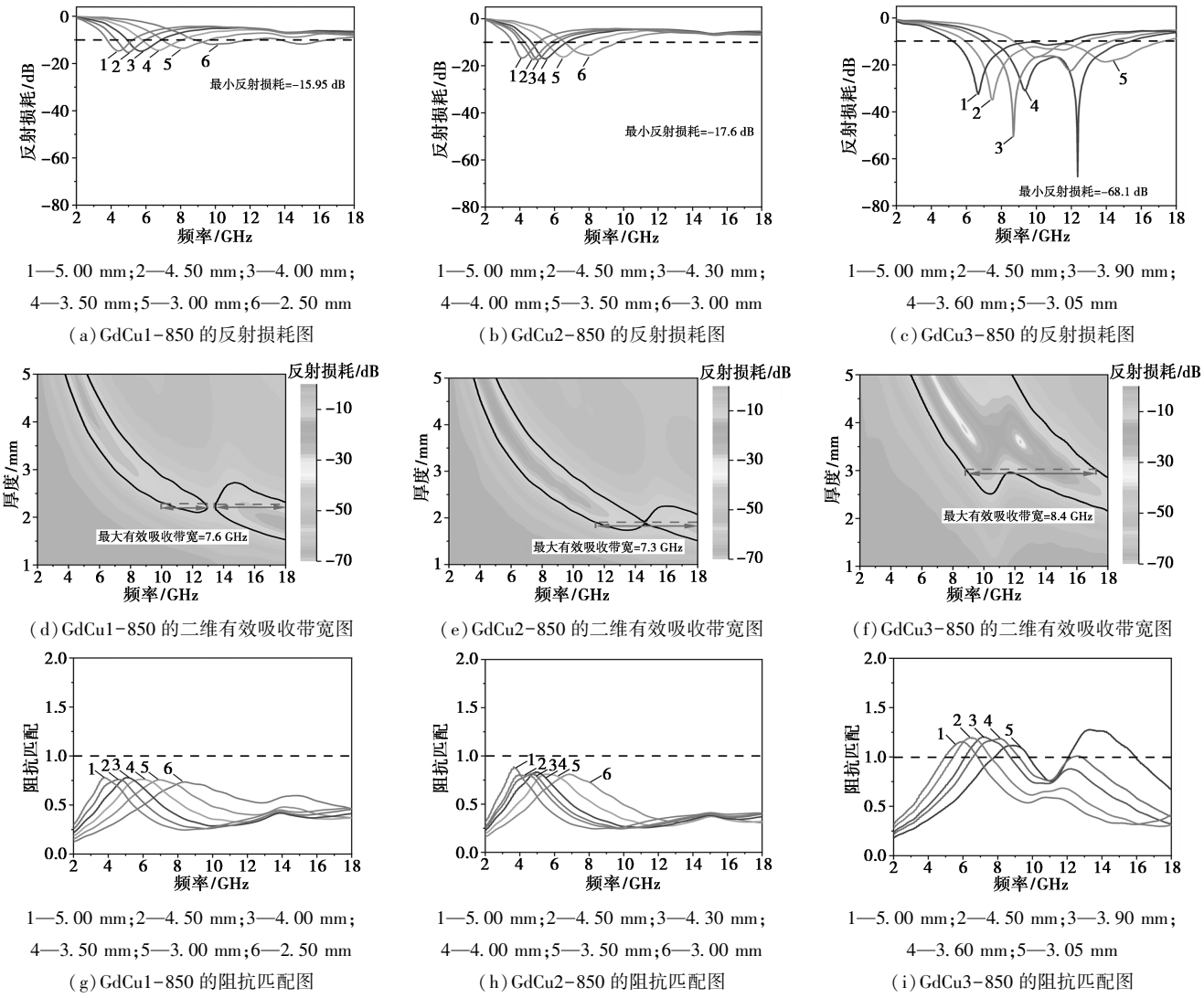


1—Cu:Gd(1:1);2—Cu:Gd(1:2);3—Cu:Gd(1:3)

图 5　GdCu 复合气凝胶的热重曲线

2.5　电磁性能分析

为了深入探究材料的电磁波吸收性能,如图 6 所示,利用矢量网络分析仪对样品进行了测试。测试结果显示,当 CuO-PMA 亚纳米片 GdOOH 亚纳米线复合碳基气凝胶的混合比例为 1:1时,GdCu1-850 的最大有效吸收带宽(EAB_{max})达到了 7.6 GHz,表明其具有较宽的吸收频段。然而,其最小反射损耗(RL_{min})仅为-15.95 dB,这证实 GdCu1-850 的带宽虽宽,但其整体吸波性能并不理想。另外,GdCu2-850 的 EAB_{max}为 7.3 GHz,RL_{min}为-17.6 dB,性能较差。相比之下,GdCu3-850 的 EAB_{max}为 8.4 GHz,RL_{min}为-68.1 dB,这表明其电磁波吸收性能显著优于比例为 1:1和 1:2的样品。这一结果表明,随 GdOOH 亚纳米线添加量的增加,材料的吸波性能呈现逐渐增强的趋势。性能提升归因于 GdOOH 亚纳米线的引入,在气凝胶内部形成了大量异质界面和缺陷结构。这些结构增加了材料内部的极化损耗,从而显著提升了其电磁波吸收性能。



1—5.00 mm;2—4.50 mm;3—4.00 mm;4—3.50 mm;5—3.00 mm;6—2.50 mm

(a) GdCu1-850 的反射损耗图

1—5.00 mm;2—4.50 mm;3—4.30 mm;4—4.00 mm;5—3.50 mm;6—3.00 mm

(b) GdCu2-850 的反射损耗图

1—5.00 mm;2—4.50 mm;3—3.90 mm;4—3.60 mm;5—3.05 mm

(c) GdCu3-850 的反射损耗图

(d) GdCu1-850 的二维有效吸收带宽图

(e) GdCu2-850 的二维有效吸收带宽图

(f) GdCu3-850 的二维有效吸收带宽图

1—5.00 mm;2—4.50 mm;3—4.00 mm;4—3.50 mm;5—3.00 mm;6—2.50 mm

(g) GdCu1-850 的阻抗匹配图

1—5.00 mm;2—4.50 mm;3—4.30 mm;4—4.00 mm;5—3.50 mm;6—3.00 mm

(h) GdCu2-850 的阻抗匹配图

1—5.00 mm;2—4.50 mm;3—3.90 mm;4—3.60 mm;5—3.05 mm

(i) GdCu3-850 的阻抗匹配图

图 6　GdCu 复合气凝胶的吸波性能图

如图 6(g)~(i)所示,我们对样品进行了阻抗匹配特性分析,结果显示,GdCu3-850 归一化阻抗匹配($|Z_{in}/Z_0|$)在 Ku 波段(12~18 GHz)趋于 1。这一结果表明,该样品在 Ku 波段的电磁阻抗与空气介质实现了理想匹配。解释了该样品在 3 组不同比例中反射损耗峰值最低的原因。综上所述,GdCu3-850 样品通过多重损耗机制的协同作用,在阻抗匹配与能量耗散方面达到了最优平衡,从而展现出最佳的电磁波吸收性能。

3　结论

本研究通过冷冻铸造和热处理相结合制备出三维结构 CuO-PMA 亚纳米片/GdOOH 亚纳米线复合气凝胶(GdCu)。基于电磁波吸收性能的差异,重点研究 GdCu1-850、GdCu2-850 和 GdCu3-850 这 3 种材料,并借助 XRD、SEM 以及矢量网络分析仪等手段,系统分析了气凝胶的化学组成、微观结构及吸波性能。主要结论如下。

(1)制备的 CuO-PMA 亚纳米片/GdOOH 亚纳米线复合气凝胶,经高温热处理后,亚纳米线转变为颗粒均匀附着于片层表面,显著增加了异质相界面与内置电场的有效作用面积。

(2)GdCu3-850 表现出更优异的电磁波吸收性能。其中,GdCu3-850 的 RL_{min} 为-68.1 dB,EAB_{max} 为 8.4 GHz。吸波机制主要由于 Cu 相关氧化物/碳化物与 Gd_2O_3 之间的偶极极化、界面极化以及三维互联导电网络的协同作用。

(3)制备的三维 CuO-PMA 亚纳米片/GdOOH 亚纳米线复合气凝胶具备良好的结构稳定性,可作为吸波基材或复合材料的增强骨架。此外,基于其高比表面积与表面褶皱结构,该气凝胶还有望作为负载纳米吸波粒子的三维多孔载体。

(下转第 113 页)

[6] Liu X J, Lin F K, Guo Z J, *et al*. Diatomite porous ceramic-based phase change materials with $Ti_3C_2T_x$ coating for efficient solar-thermal energy conversion[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 107: 114967.

[7] Zhou S L, Zhang Q Y, Liu H, *et al*. A facile eutectic strategy for scalable, leakage-free thermochromic phase-change composites enabling smart temperature labels and secure data encryption[J]. Advanced Science, 2025, 13(5): e19934.

[8] Shi H, Yang X M, Mo J, *et al*. Cross-linked polyrotaxane based aerogel as supporter for leakage-proof phase change materials with high enthalpies[J]. Materials Today Communications, 2025, 44: 112092.

[9] Wu C L, Wang Q, Sun S P, *et al*. Comprehensive thermal properties of ternary eutectic molten salt/nanoparticles composite phase change materials for high-temperature thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 261: 112531.

[10] Li C, Han L, Leng G Y, *et al*. Nitrate salt-halloysite nanotube (HNT) composite phase change materials for thermal energy storage: The feasibility of material fabrication by using HNT as skeleton substance and its thermal properties[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 263: 112565.

[11] Gregoire B, Ma H K, Palacios A, *et al*. Sodium nitrite-sodium nitrate eutectic based composite phase change material (CPCM) for medium-temperature thermal energy storage (TES): Exploring the relationship between microstructures and thermal properties[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 101: 113922.

[12] Xiong Y X, Yang Y, Zhang A T L, *et al*. Investigation on low-carbon shape-stable phase change composite by steel slag and carbide slag for solar thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 76: 109736.

[13] Galotta A, Giust E, Bortolotti M, *et al*. Cold sintering of diatomaceous earth[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104(9): 4329-4340.

[14] Liu M, Jin Q, Shen P. Cold sintering of $NaNO_3$/MgO heat-storage composite[J]. Ceramics International, 2020, 46(18): 28955-28960.

[15] Luo J, Chen Y, Zhang X, *et al*. Microwave-induced preparation of MgO-loaded N-rich porous biochar from marine biomass for efficient CO_2 capture and mechanism exploration via theoretical calculation[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 405: 136915.

[16] Jiang Y, Sun Y, Bruno F, *et al*. Thermal stability of Na_2CO_3-Li_2CO_3 as a high temperature phase change material for thermal energy storage[J]. Thermochemical Acta, 2017, 650: 88-94.

[17] 李钰颖,魏雯珍,李琦,等.可用于低中温热能储存的四元硝酸盐/埃洛石/石墨定型复合材料的制备与研究[J].储能科学与技术,2022,11(3):1044-1051.

[18] Li C, Han L, Li Q, *et al*. Development and investigation of salt based composite phase change material containing diatomite as skeleton substance by cold sintering technology for medium and high temperature thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 271: 112821.

[19] Li Q, Cong L, Zhang X, *et al*. Fabrication and thermal properties investigation of aluminum based composite phase change material for medium and high temperature thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 211: 110511.■

(上接第 106 页)

参考文献

[1] Wang X X, Liao S Y, Wan J Y, *et al*. Electromagnetic interference shielding and absorption materials: Current status and future perspectives[J]. Materials Today Physics, 2023, 32: 101008.

[2] Wu N, Guo H, Zhang Q Q, *et al*. Electromagnetic wave pollution and its biological effects: A review[J]. Environmental Research, 2022, 204: 112068.

[3] Cao M S, Chen H Y, Zhang L J, *et al*. Toward the application of high-performance electromagnetic wave absorption by designing nanostructures[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(21): 2110194.

[4] Quan L, Cui J, Cui M J, *et al*. A review of porous lightweight composite materials for electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 214: 108744.

[5] Liang C, Guo Z H, Tian S Y, *et al*. Recent advances in 1D and 2D nanostructures for microwave absorption[J]. Nano Research, 2021, 14(7): 2045-2062.

[6] Ni B, Shi Y, Wang X, *et al*. Sub-nanometer materials: Synthesis, properties, and applications[J]. Advanced Materials, 2020, 32(18): 1904246.

[7] Pan F, Cai L, Shi Y, *et al*. Heterointerface engineering in electromagnetic wave absorbing materials[J]. Advanced Materials Interfaces, 2022, 9(10): 2101960.

[8] Zhao B, Fu H, Chen B, *et al*. The role of interfacial defects in enhancing polarization loss for electromagnetic wave absorption[J]. Carbon, 2021, 173: 1050-1060.

[9] Lv H, Miao J J, Zhao J Y, *et al*. An interface engineering strategy to construct core-shell heterostructures for high-performance microwave absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 415: 129052.

[10] Liu P, Li F, Luo S H, *et al*. Interfacial polarization dominant CNTs/Polyvinylidene fluoride composite with excellent electromagnetic wave absorption[J]. Composites Science and Technology, 2022, 218: 109184.

[11] Chen W, Weng X L, Zheng J, *et al*. Atomic-scale interface engineering for electromagnetic wave absorption[J]. Science Bulletin, 2023, 68(5): 512-520.

[12] Li X, Chen C, Luo H, *et al*. Enhanced dielectric loss and interfacial polarization in sub-1nm heterogeneous structures[J]. Nano Letters, 2021, 21(9): 3809-3816.

[13] Feng A, Zhai J J, Lei X Y, *et al*. Constructing multiple heterogeneous interfaces in sub-nano composites toward ultrabroadband microwave absorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(12): 14601-14611.

[14] Wang G, Li Q, Zhang Y, *et al*. Ultrathin heterostructures with maximized interfaces for superior electromagnetic energy dissipation[J]. Advanced Science, 2021, 8(15): 2100470.■