http://pmse.scu.edu.cn

基于聚二甲基硅氧烷基体的液态金属/空心玻璃微球协同网络实现高效微波吸收

李 博[1], 李亚龙[1], 刘雨杭[1], 刘大炜[1], 徐伟伟[1], 邬祚强[1], 宋志梅[1], 谢 康[2], 陈 枫[2]
(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092; 2. 四川大学 高分子科学与工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 高分子基电磁波吸收材料轻质、柔性、可设计性强,在航空航天等领域备受关注。然而,传统磁性填料密度大、吸收带宽窄,难以满足下一代装备对轻量化和宽频吸收的需求。为此,文中以聚二甲基硅氧烷(PDMS)为基体,通过简单机械研磨使液态金属(LM)均匀包覆空心玻璃微珠(HGS),构筑了 LM@HGS 核-壳颗粒,将其与 PDMS 复合,制备出多异质界面弹性体。性能测试表明,该材料在厚度 2.99 mm 时,最小反射损耗达到−64.56 dB;当厚度降至 2.14 mm 时,有效吸收带宽(RL≤−10 dB)可覆盖 5.92 GHz,呈现出优异的电磁波吸收能力。机理分析显示,偶极极化与界面极化协同放大了介电损耗,而核-壳及孔隙结构为电磁波提供了多重传播路径,促使波在内部经历反复反射与散射,两者共同造就了材料的高效吸收性能。依托 PDMS 的柔韧性与 LM 包覆 HGS 的轻质特性,提出了一条简洁高效的非磁性吸波材料设计思路,为其在微波隐身与器件集成等领域的应用奠定了基础。

关键词: 聚二甲基硅氧烷;液态金属;空心玻璃球;电磁波吸收;电损耗;极化损耗
中图分类号: TB34 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)02-0113-10

随着无线通信技术的迅猛发展,社会智能化水平呈指数级攀升。各类电子与电气设备虽显著提升了生活品质与生产效率,却进一步加剧了电磁干扰(EMI)和辐射污染[1]。过量的电磁辐射不仅可能导致设备故障和信息泄漏,还会对人体健康构成潜在威胁。因此,开发兼具宽频衰减能力和低环境负荷的电磁兼容材料已成为关键课题[2]。

电磁吸波材料的核心原理在于将入射电磁能迅速耗散为热能等其他形式的能量,这一过程依赖微观结构与吸波组分的协同优化。高磁导率金属(Fe, Co, Ni)及其合金(NiFe, FeCo)和铁氧体(如 Fe_3O_4)长期用作微波吸收剂[3~5],尽管磁性金属及其复合材料在微波吸收领域获得了广泛应用,但传统磁性吸波材料普遍存在以下突出局限性:其一,密度较大,导致材料整体质量高,不利于轻量化应用需求,特别是在航空航天等对载荷敏感的领域;其二,吸收带宽通常较窄,难以覆盖复杂电磁环境中的宽频干扰;其三,在高频段易出现涡流损耗,导致吸收效率下降;其四,匹配厚度大,材料设计灵活性受限。此外,磁性材料还存在化学稳定性差、易团聚等问题,进一步限制了其应用场景的拓展。针对上述问题,近年来研究者尝试通过结构设计和组分调控来提升性能,但仍难以实现兼具轻质、宽带和高效吸波的理想目标[6]。为克服以上不足,通常采用 2 种经典策略来增强电磁波吸收性能。首先,通过将磁性颗粒修饰在高活性位点、多孔结构与低密度的碳基材料或 MXene 上,提升介电损耗并改善阻抗匹配,从而增强材料的吸波能力[7]。例如,CoNi/C 复合材料的最小反射损耗可达−61.02 dB,Ni@MXene 复合材料的强反射损耗达−52.6 dB,并具备 3.7 GHz 的有效吸收带

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0029
收稿日期: 2025-02-11
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFA1205200)
通讯联系人: 陈枫, 主要从事纳米复合材料研究, E-mail: fengchen@scu.edu.cn

宽,MXene/FeCo 薄膜也展现出了优异且可调的吸波性能[8]。其次,通过设计核壳结构,利用组分间的协同作用及异质界面损耗,进一步消耗微波。例如,$CoNi@SiO_2@TiO_2$ 核壳结构可实现−58.2 dB 的高效吸波性能[9]。然而,磁性材料固有的化学稳定性较差、易团聚等缺陷依然阻碍了其进一步推广[10]。近年来,磁性双金属氧化物因在结构调控方面展现出优异性能和丰富可塑性逐渐得到关注[11]。值得注意的是,金属或金属氧化物中的晶格失配及缺陷往往提供了大量偶极位点与异质界面,可显著增强偶极极化、介电极化及界面极化对微波的衰减作用[12]。镓基液态金属(Ga,GaIn,GaInSn,GaInZn 等)因在室温具有液态流动性、高蒸气压与低毒性等优点,受到研究者的青睐,然而,其表面易氧化,对大多数金属具腐蚀性[13],在应用中需特别关注。一般做法是向液态金属中加入 Cu,Ni,Fe 等金属颗粒增稠,再涂覆到基体材料上制作电路或电磁干扰屏蔽层[14]。但当材料以屏蔽方式发挥作用时,大部分电磁波会被反射回环境,引发二次污染,这不利于电磁污染的根本削减。例如,LM/Ni 涂层能提供 75 dB 的屏蔽效能,但其反射占比高达 45 dB[15]。据报道,Wilson 等[16,17]研究了液态金属通过研磨的方式在金属表面包覆的机理,结果表明,在接触氧气时会迅速形成氧化壳,影响材料的润湿性和黏附性,实验证明,通过研磨可以形成纳米氧化物,这使得钨颗粒与液态金属形成糊状的结合。基于此,本文提出一种液态金属-空心玻璃球(LM@HGS)核-壳结构的非磁性吸波体系。空心玻璃球提供超低密度支撑框架,液态金属在其表面原位生成稳定的 Ga_2O_3 壳层,构成多级异质界面,显著提高界面极化和整体介电损耗。该策略兼顾轻量化与宽带高效吸收,突破了传统磁性材料的密度与化学稳定性瓶颈,为设计新型柔性吸波复合材料提供了理论依据与实践路径。

在本文中,首先通过机械研磨法在空心玻璃球表面原位涂覆镓基液态金属,制得非磁性 LM@HGS 核-壳颗粒,然后将其均匀分散于聚二甲基硅氧烷(PDMS)中,构筑柔性微波吸收复合体。研磨过程中,液态金属外层的 Ga 自发氧化生成致密 Ga_2O_3 壳层,既将液态金属牢固锚定于玻璃壳面,又形成了 LM/Ga_2O_3/玻璃的多级异质界面。该层级界面产生显著的界面极化,而液态金属内部的可移动电荷增强了偶极极化,两者协同能显著提升整体介电损耗。由于体系不含磁性组分,微波衰减主要源于上述介电机制;当电磁波穿过含核-壳和多重异质结的颗粒时,能量在内部经历多次散射与耗散,从而实现高效吸收。实验结果表明,复合材料在 2.99 mm 厚度下的最小反射损耗达到−64.56 dB;在 2.14 mm 厚度下仍可获得 5.92 GHz 的有效吸收带宽(RL≤−10 dB)。综合空心核的超低密度、液态金属壳的高介电损耗及 PDMS 的柔韧可加工性,所制备弹性体兼具轻量化、高效电磁波吸收与可形变等优势,为航空航天等对轻质和多功能材料要求苛刻的领域提供了新的材料解决方案。

1 实验部分

1.1 原料及设备

液态金属(GaInSn):湖南中材盛特新材料科技有限公司,GaInSn 的质量组成为 68.5% Ga,21.5% In 和 10% Sn;空心玻璃微球:IM16K,美国 3M 公司;聚二甲基硅氧烷(PDMS):SYLGARD184,道康宁有机硅有限公司。其他试剂均为市面易得材料。所有原材料在使用之前未进行任何提纯手段。

X 射线衍射仪(XRD):Ultima IV 型,日本理学株式会社(Rigaku);扫描电子显微镜(SEM):Inspect F50 型,美国 FEI 公司;X 射线光电子能谱仪(XPS):PHI 5000 Versaprobe Ⅲ型,日本爱发科(Ulvac-Phi);矢量网络分析仪(VNA):N5234B 型,是德科技(中国)有限公司(Keysight)。

1.2 液态金属包覆空心玻璃球吸收剂的制备

将空心玻璃球(HGS)与一定量的液态金属(LM)在研钵中混合,使用玛瑙研杵研磨 20 min(如 Fig.1 所示),制备得到液态金属包覆的空心玻璃球(HGS@LM)。混合物中 LM 质量分数分别为 5%,10%,15% 和 20%。

1.3 液态金属包覆空心玻璃球弹性体复合吸波材料的制备

如 Fig.1 所示,首先将 PDMS 组分 A(基胶)与组分 B(固化剂)按质量比 7∶1 充分混合,制得 PDMS 前驱体;随后在 HGS@LM 填料质量分数为 70% 的条件下,将该前驱体与 HGS@LM 颗粒置于涡旋混合器

中高速均质 5 min,对所得浆料进行 30 s 真空脱泡以去除夹带气泡;之后将脱泡后的浆料倒入预定模具,在 100 ℃固化 6 h,得到柔性液态金属包覆空心玻璃球弹性体(HGS@LM-PDMS)。为考察液态金属含量的影响,LM 的质量分数分别设定为 5%,10%,15% 和 20%,对应样品记为 LM-5,LM-10,LM-15 和 LM-20。

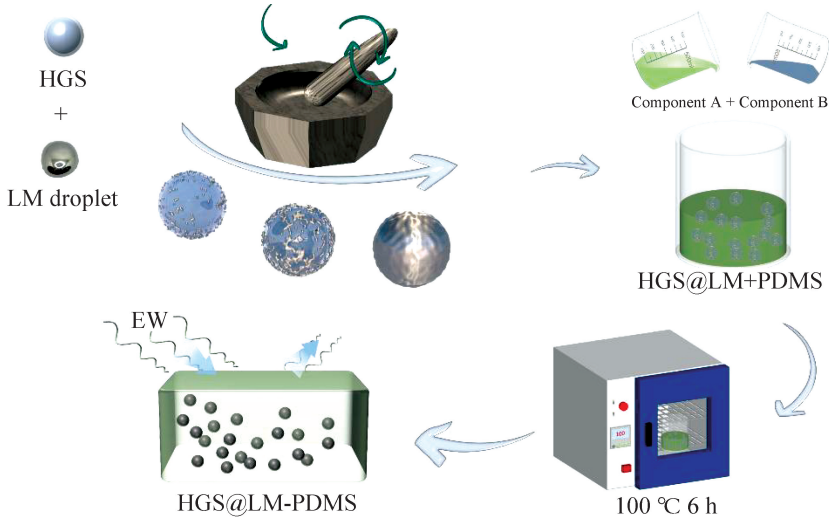


Fig. 1　Preparation flow chart of the sample

1.4　测试与表征

1.4.1　*晶体结构与物相分析*:液态金属与空心玻璃球的结晶形态通过 X 射线衍射进行表征。使用 CuKα 作为入射源,扫描步进速率为 10(°)/min。

1.4.2　*微观形貌与元素分布表征*:样品粉末黏附在导电胶上,块状吸波样品通过液氮脆断处理以暴露出内部截面。为增加样品的导电性并消除充电效应,测试前对样品进行了表面喷金处理。随后利用扫描电子显微镜在 5 kV 的加速电压下进行形貌观察及元素分布分析,并配合能量色散 X 射线光谱仪(EDS)检测样品的微区化学成分。

1.4.3　*表面化学成分及价态分析*:样品的元素组成及官能团含量通过电子能谱进行表征。采用 Al Kα 作为入射源以检测 Ga 和 O 元素的分谱及全谱,分析材料表面的化学结合状态。

1.4.4　*电磁参数及吸波性能测试*:2~18 GHz 波段的电磁参数通过矢量网络分析仪进行测量。测试前,将弹性体复合材料裁切为内径约 3 mm、外径约 7 mm 的同心圆环,随后依据传输线理论计算吸波材料的反射损耗等性能指标[6]。

2　结果与讨论

2.1　不同还原程度吸收剂的制备

Fig.2(a)和 Fig.2(b)分别展示了 HGS 的外表面与内部分层结构。Fig.2(a)显示,纯 HGS 颗粒表面

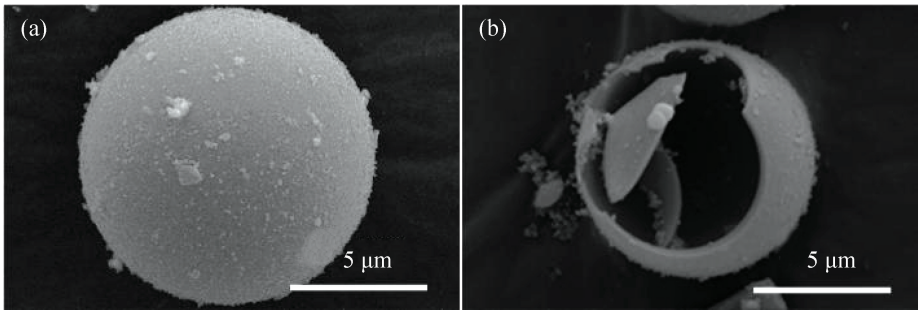


Fig. 2　SEM images of (a) complete hollow glass sphere and (b) broken hollow glass sphere

整体呈圆形,形貌规则,平均直径约为 10 μm;Fig.2(b)揭示了破裂 HGS 的空腔截面,再次证明了其典型的中空特征。

为研究 HGS 涂覆液态金属后的微观结构与形貌演变,利用扫描电子显微镜对 HGS@LM 系列样品进行了表征。如 Fig.3(a~d)所示,随着 LM 质量分数由 5% 递增至 20%,HGS 表面呈现由“点状附着”到“连续包覆”再到“局部团聚”的依次变化:LM-5 仅出现零星 LM 斑点,而 LM-20 已形成完整涂层并伴随轻微团聚。可见,涂层厚度和团聚程度均随 LM 含量增加而提高。结合 SEM 和能谱分析,可明确 LM 的组成与分布(Fig.3(e~e3))。结果表明,Si 信号覆盖整个颗粒外层;Ga,In 与 Sn 在壳层中分布均匀,证实 HGS 成功被 LM 包覆并构筑了核-壳结构。这种多异质界面为后续微波吸收性能的提升奠定了基础。为了评估核壳结构在聚二甲基硅氧烷(PDMS)基体中的分散性及界面结合情况,应用 SEM 对 HGS@LM-PDMS 的横截面进行了成像,并对其元素分布进行了分析(Fig.3(f~f2))。可以看到,颗粒在 PDMS 基体中分布均匀,且填料-基体界面致密无孔洞,说明二者具有良好相容性。

如 Fig.3(g) 所示,X 射线衍射结果显示,HGS 与 LM 均呈非晶态。通过 X 射线光电子能谱对 LM-15 表面的电子价态进行表征(Fig.3(h))。从光谱可检测到 Si,Ga,In,Sn 及 O 等元素。Fig.3(i)中高分辨 Ga 2p 光谱的主峰位于 1144.05 eV(Ga $2p_{1/2}$)和 1117.48 eV(Ga $2p_{3/2}$),两者分裂值约 26.57 eV,与 Ga 2p 的结合能能级相吻合,确认了氧化镓(Ga^{3+})的存在。Fig.3(j) 中 O 元素的子峰进一步表明样品中存在 Si—O 和 Ga—O 键,说明形成的壳层得益于氧化镓带来的强附着力,增强了壳层在材料表面的稳定性与功能性。进一步验证了 Wilson 等提出的通过

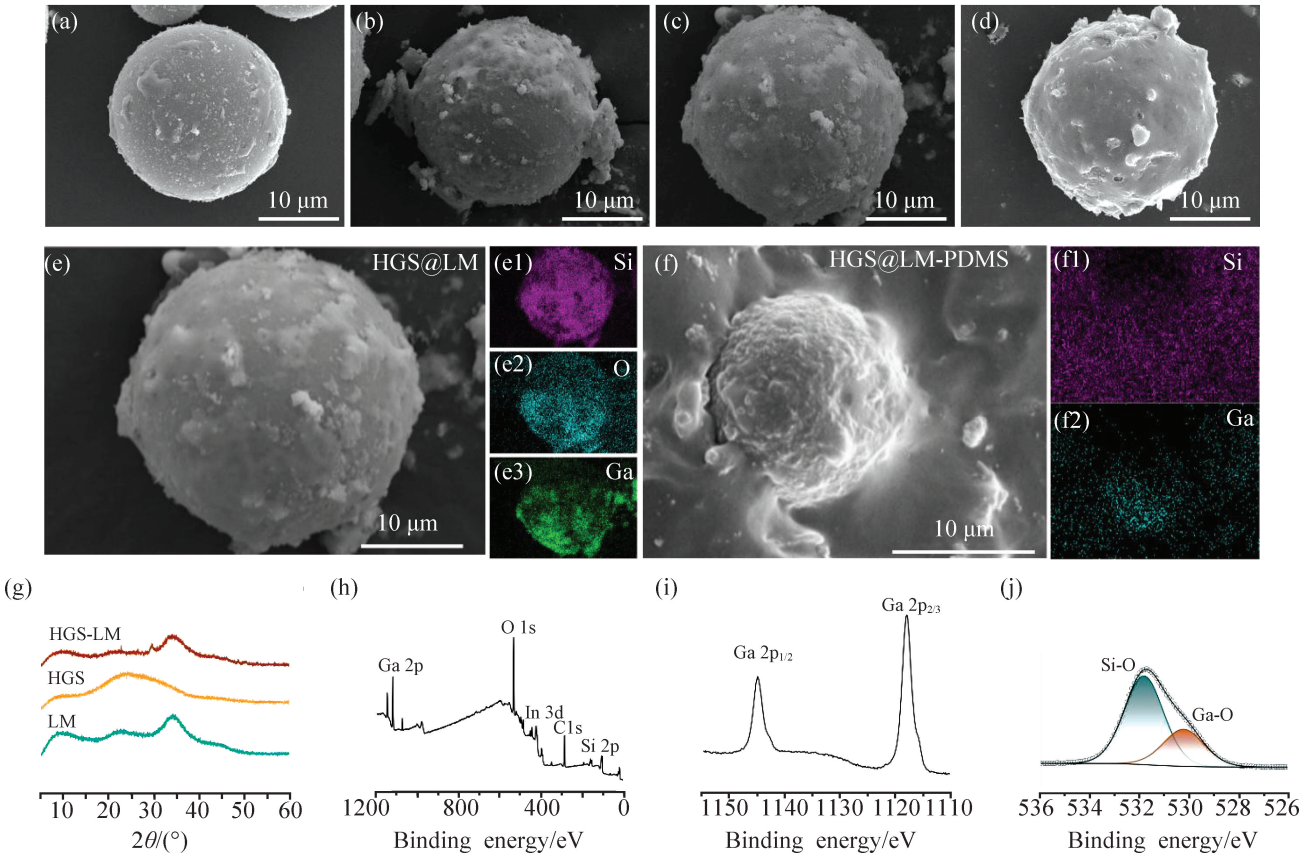


Fig. 3 (a~d) SEM images of LM-5, LM-10, LM-15 and LM-20; (e~e3) HGS@LM SEM images of microstructure and element distribution; (f~f2) HGS@LM-PDMS SEM images of microstructure and element distribution; (g) XRD patterns of LM, HGS and LM-15; (h~j) XPS spectra of LM-15, Ga 2p and O 1s of LM-15

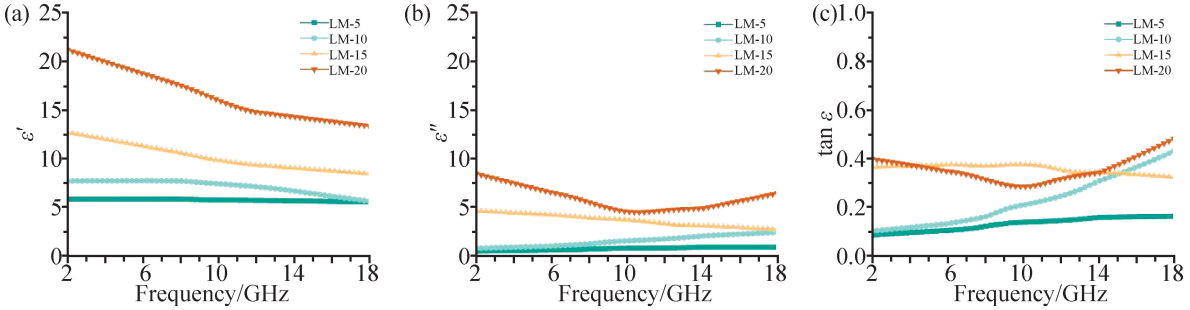


Fig. 4　(a) Real part of the dielectric constant, (b) imaginary part of the dielectric constant, and (c) tangent of the dielectric loss angle of HGS @LM-PDMS composites

研磨的方式就可以使得液态金属包覆固态颗粒的工艺方式,结果表明,GaO 氧化壳的存在是包覆层能够均匀分布的重要影响因素。

2.2　吸波复合材料电磁参数

根据 Debye 理论,弛豫过程可通过复介电常数(ε_r)的表达式(1)进行描述[15]

$$\varepsilon_r=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{1+j2\pi f\tau}=\varepsilon'-j\varepsilon'' \tag{1}$$

式中:ε_∞ 与 ε_s——分别代表高频极限介电常数与静态介电常数;τ——极化弛豫时间。进而,可将 ε_r 分解为实部 ε'和虚部 ε'',ε'和 ε''介电常数分量由式(2,3)给出[16]

$$\varepsilon'=\varepsilon_\infty\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{1+(2\pi f)^2\tau^2} \tag{2}$$

$$\varepsilon''=\frac{(2\pi f)\tau(\varepsilon_s-\varepsilon_\infty)}{1+(2\pi f)^2\tau^2}+\frac{\sigma}{2\pi f\varepsilon_0} \tag{3}$$

式中:σ——材料导电特征;ε_0——真空绝对介电常数。如 Fig.4(a)和 Fig.4(b)所示,HGS@LM-PDMS 复合材料在 2~18 GHz 频率内展示出显著的复介电系数频散行为,其实部(ε')与虚部(ε'')的演化规律解释了界面极化与传导损耗的协同机制。结果显示,随着 LM 含量增加,ε'和 ε''均呈上升趋势:在 10 GHz 时,ε'依次为 5.76,7.42,9.82 和 15.98;而 ε''分别为 0.80,1.56,3.69 和 4.56。Fig.4(c)中,损耗角正切($\tan\varepsilon$)呈现类似趋势,但在 LM-15 和 LM-20 之间,$\tan\varepsilon$ 的差异较小。这表明,液态金属的增加提升了材料的电导率和极化率,进而增强了介电性能,并通过界面极化效应进一步增加了 ε''。$\tan\varepsilon$ 和 ε''的变化共同证实 HGS@LM 样品具有较高的介电损耗能力。

2.3　复合材料的吸波性能

通过线传输理论计算发射损耗(式(4))[6]

$$Z_{in}=Z_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tan h\left(j\frac{2\pi fd\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}{c}\right) \tag{4}$$

式中:Z_{in}——试样的入射阻抗,Ω;Z_0——自由空间阻抗,取 377 Ω;μ_r——相对复磁导率,$\mu_r=\mu'-j\mu''$,无量纲;ε_r——相对复介电常数,$\varepsilon_r=\varepsilon'-j\varepsilon''$,无量纲;$f$——工作频率,Hz;$d$——试样厚度,m,本文中以 mm 给出,1 mm = 1×10^{-3} m;c——真空光速,3.00×10^8 m/s;j——虚数单位,$j^2=-1$;tan h 双曲正切函数,其自变量$(2\pi fd/c)\sqrt{(\mu_r\varepsilon_r)}$已满足无量纲要求。

基于传输线理论,入射阻抗(Z_{in})与空气阻抗(Z_0)满足上述数学关系式。电磁波能量衰减性能以最低反射损耗(Minimum reflection loss,RL_{min})量化表征,RL_{min} 负值越大表明吸收能力越强。当 RL 低于−10 dB 时,材料对入射能量的耗散效率超过 90%,本文计算了不同复合材料在 2~18 GHz 下的电磁波吸收曲线。Fig.5(a~g)以三维及二维等值线图展示了层厚为 0~5.0 mm 的 HGS@LM-PDMS 吸收体的 RL 分布。结果显示,随着 LM 含量增加,样品的 RL_{min} 先降低后增大:LM-5 表现出较弱吸收(在 5 mm 厚度时 RL_{min} 为−10.0 dB);添加 10% LM 使 RL_{min} 降至−49.08 dB,具有显著提升;对于 LM-15 样品,在 1.96 mm 厚时 RL_{min} 达到−65.94 dB,表明其具有最佳电磁波吸收性能(EMWA)。而 LM 含量进一步增加,RL_{min} 向低频及高匹配厚度方向移动,显示出电磁波吸收性能下降。这表明,初期 LM 涂层可提高吸收效果,但过高的 LM 含量会因阻抗失配而削弱吸收性能。因此,控制复合材料中 LM 的含量对优化电磁波吸收性能至关重要。

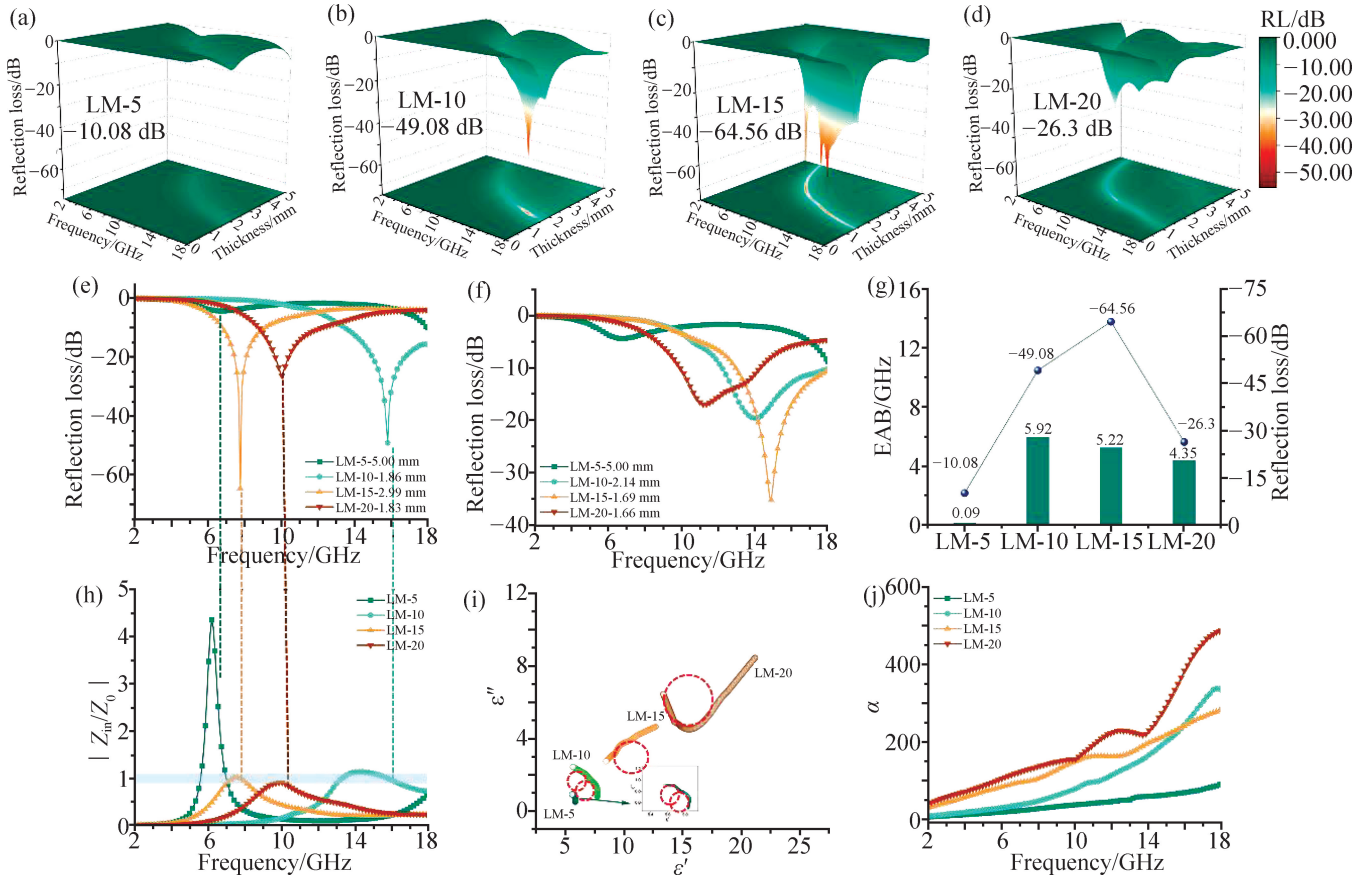


Fig. 5 (a~d) Electromagnetic wave absorption characteristics of LM5, LM-10, LM-15, and LM-20 as depicted by three-dimensional and two-dimensional reflection loss RL_{min} plots; (e) RL_{min} and corresponding thickness; (f) effective absorption bandwidth (EAB) and corresponding thickness; (g) line charts and bar charts; (h) impedance matching $|Z_{in}/Z_0|$; (i) Debye semicircle of the sample; (j) attenuation constant of the samples

为了更好地理解样品的阻抗匹配,使用式(5)计算了各种样品的 RL_{min} 相关的 Z 曲线[10]

$$Z=\left|\frac{Z_{in}}{Z_0}\right|=\left|\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tan h\left[j\left(\frac{2\pi fd}{c}\right)\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}\right]\right| \quad (5)$$

当 Z 值介于 0.8 与 1.2 之间时,表明系统在衰减和阻抗匹配之间取得了较好平衡。由 Fig.5(h)可见,随着 LM 含量增加,各样品的阻抗匹配先改善后恶化,这也是吸收性能变化的关键原因。

在 ε'-ε''图中,Cole-Cole 半圆用于描述 Debye 弛豫过程。Fig.5(i)显示,在 2~18 GHz 下,随 LM 含量增加,半圆数量增多,表明 LM 与 HGS 界面极化效应增强。HGS@LM 中的界面极化主要源于系统中多个界面(即 HGS 与 LM 以及 HGS@LM 与 PDMS 之间)的存在,导致空间电荷分布不均匀,进而增强了极化并产生了介电损耗。与此同时,导电损耗也是由于载流子的迁移和定向运动产生的漏电流引起,将部分电磁能转化为焦耳热。值得注意的是,Fig.5(i)还表明,在 LM 含量达到 20% 之前,ε'-ε''曲线未出现长尾,说明前 3 种样品中电导损耗贡献较小,相对于界面极化损耗并不显著。

所有样品的衰减常数(α)可使用式(6)计算[11]

$$\alpha=\frac{\sqrt{2}\pi f}{c}\times\sqrt{(\mu''\varepsilon''-\mu'\varepsilon')+\sqrt{(\mu''\varepsilon''-\mu'\varepsilon')^2+(\mu'\varepsilon''+\mu''\varepsilon')^2}} \quad (6)$$

Fig.5(j)展示了衰减常数曲线。可以看出,随着 LM 含量增加,曲线斜率逐渐增大。尽管 LM-20 的 α 值最高,但由于阻抗匹配不理想,其吸波效果较差。

Fig.6 是 RL_{min} 和 EAB_{max} 对应的反射损耗曲线以及定量数据与其他材料对比图。由 Fig.6 和 Tab.1 可知,LM-15 材料能够在某一频段内表现出−64.56 dB

Tab. 1　Comparison of the reported electromagnetic wave absorbers RL_{min} and EAB_{max}

Sample name	RL_{min}/dB	EAB_{max}/GHz	Ref.
Ni/ZnS	−42.40	4.30	[18]
RGO-Fe_3O_4	−26.50	2.80	[19]
$NiFe_2O_4$@PPy	−51.30	6.80	[20]
$CoFe_2O_4$/rGO	−57.70	5.80	[21]
$MnFe_2O_4$/RGO	−29.00	4.88	[22]
Fe/C	−22.60	5.30	[23]
PPy/Fe_3O_4	−45.48	6.16	[24]
FeSiAl/graphite	−23.20	2.40	[25]
This work	−64.56	5.99	This work

note:RL_{min} represents the minimum reflection loss; EAB_{max} represents the maximum effective absorption bandwidth

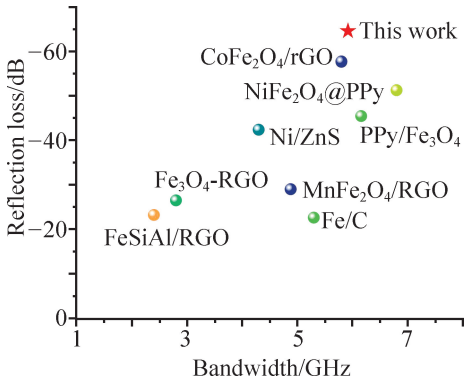


Fig. 6　Comparison chart with the research of other electromagnetic absorption materials

的最低反射损耗,即其在该频段可对电磁波实现极强的衰减和吸收。而 LM-10 材料在测试频段中展现了最优的 EAB_{max},为 5.99 GHz,表明其在更为宽泛的频率范围内保持了良好的吸收能力。这种“极限吸收性能”与“最优带宽”不尽相同的现象,体现了这 2 种材料在吸波机理或微观结构方面的差异,综合来看,总体相较于其他相关研究仍有一定优势(见 Tab.1)。

2.4　吸波损耗机制

如 Fig.7 所示,HGS@LM-PDMS 体系在 2 ~ 18 GHz 范围内实现了高效的电磁波吸收,其本质来源于多尺度极化与导电损耗协同、渐变阻抗调控及多重干涉等综合作用。首先,液态金属在空心玻璃球

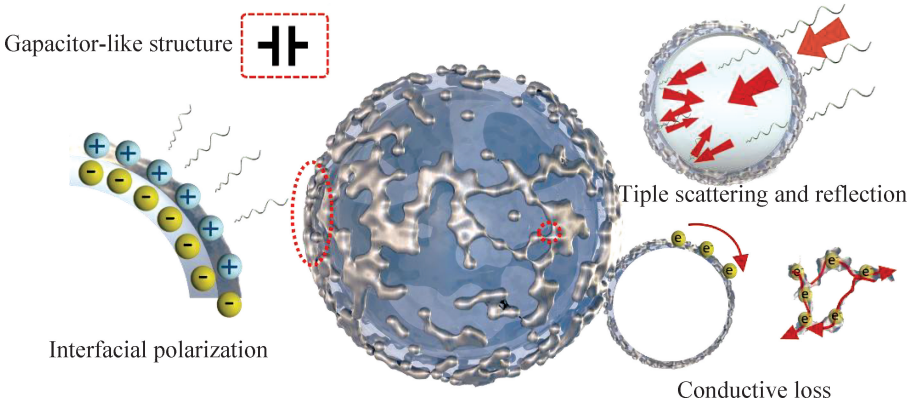


Fig. 7　Microwave attenuation mechanism of binary hierarchical HGS@LM-PDMS composites

外壁原位生成 Ga_3O_3 壳层,构筑了由 LM、Ga_3O_3 和玻璃组成的三相异质界面,并引入大量缺陷偶极。当电磁波入射时,界面极化(Maxwell-Wagner 机制)和缺陷偶极取向极化分别在 2~18 GHz 区间驰豫,形成分散的介电损耗,实现有效拓宽带宽。其次,液态金属连续相在复合体中形成曲折导电网络,提供电导损耗,并与介电损耗共同提高衰减常数,同时避免过高电导造成的阻抗失配;空心玻璃核的低介电常数则用于稀释整体 ε'。二者协同构成“低-高-低”梯度介电层,显著改善入射面阻抗匹配(Z_{in} 逼近 Z_0),确保各频段电磁波能够顺利耦入内部。再次,核壳几何通道促使波束在颗粒间经历多次反射和散射,延长传播路径并不断累积损耗;当样品厚度 d 满足 $\lambda/(4n)$ 等相位条件时,反射波产生破坏性干涉,进一步降低反射损耗。上述极化驰豫分布、导电与阻抗协同及多重干涉共同作用,使复合材料成功实现轻质且宽频的微波吸收目标。

3 结论

本文采用简便方法将液态金属均匀包覆于空心玻璃球表面,并将其 PDMS 基体复合,制备出具有多异质结和空心核壳结构的弹性复合材料。结果表明,在 2.99 mm 的厚度下,该材料的最小反射损耗达到−64.56 dB;在 2.14 mm 厚度时,其最大有效吸收带宽高达 5.92 GHz,展现出卓越的电磁波吸收性能。高效吸收的根本机制在于:特殊的空心核壳结构和多界面异质结大大增强了偶极极化、界面极化和介电损耗,同时,多次反射和散射有效延长了电磁波在材料中的传播路径,进一步提升了吸收效果。与传统磁性吸波材料相比,本文提出的非磁性吸收体不仅克服了磁性材料密度高和带宽有限的不足,还满足了新一代对高强度和宽带吸收的要求。此外,PDMS 作为柔性高分子基体,不仅改善了材料的可加工性与环境稳定性,还为航空航天等领域实现轻量化和高性能微波吸收提供了更广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 邹海仲, 万炜涛. 复合粉体制备导热吸波材料及其表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(2): 136-140.
Zou H Z, Wang W T. Preparation and property of thermal absorbing materials via aluminum oxide and carbonyl iron[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(2): 136-140.

[2] 徐伟伟, 刘雨杭, 文友谊, 等. 聚乙烯/大片层石墨烯复合材料吸波性能研究[J]. 塑料工业, 2023, 51(9): 135-142.
Xu W W, liu Y H, Wen Y Y, *et al*. Study on the absorbing properties of polyethylene/large sheet graphene composites[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(9): 135-142.

[3] 赵鹏飞, 宋喜梅, 张海琛, 等. 碳纳米管与二硫化钼协同增强丁腈橡胶复合材料吸波性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(4): 174-181.
Zhao P F, Song X M, Zhang H C, *et al*. Synergistic effects of molybdenum disulfide and multiwalled carbon nanotubes on the microwave absorbing performance of nitrile butadiene rubber composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(4): 174-181.

[4] Li C, Sui J, Jiang X, *et al*. Efficient broadband electromagnetic wave absorption of flower-like nickel/carbon composites in 2-40 GHz[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 385: 123882.

[5] Jiang Q R, Li H, Cao Z, *et al*. Synthesis and enhanced electromagnetic wave absorption performance of amorphous CoxFe10-x alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 726: 1255-1261.

[6] Qiu S, Lyu H, Liu J, *et al*. Facile synthesis of porous nickel/carbon composite microspheres with enhanced electromagnetic wave absorption by magnetic and dielectric losses[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8: 20258-20266.

[7] Liu Q H, Cao Q, Bi H, *et al*. CoNi@SiO_2@TiO_2 and CoNi@Air @ TiO_2 microspheres with strong wideband microwave absorption[J]. Advanced Materials, 2015, 28: 486-490.

[8] Li X, Wen C, Yang L, *et al*. MXene/FeCo films with distinct and tunable electromagnetic wave absorption by morphology control and magnetic anisotropy[J]. Carbon, 2021, 175: 509-518.

[9] Bhattacharjee Y, Bose S. Core-shell nanomaterials for microwave absorption and electromagnetic interference shielding: a review[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4: 949-972.

[10] Wen J M, Hui S, Chang Q, *et al*. Enhancement of electromagnetic wave attenuation through polarization loss induced by hybridization of rare-earth 4f and Mo-4d orbitals in liquid plasma[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34: 2410447.

[11] Oh E, Kim T, Yoon J, *et al*. Highly reliable liquid metal-solid metal contacts with a corrugated single-walled carbon nanotube diffusion barrier for stretchable electronics[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28: 1806014.

[12] Guo R, Wang X, Chang H, *et al*. Ni-GaIn amalgams enabled rapid and customizable fabrication of wearable and wireless

healthcare electronics[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20: 1800054.

[13] Wang G, Ong S J H, Zhao Y, *et al*. Integrated multifunctional macrostructures for electromagnetic wave absorption and shielding[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8: 24368-24387.

[14] Hajalilou A, Parvini E, Majidi C. Sustainable liquid metal composites for soft electronics and e − waste reduction[J]. Advanced Materials, 2026, 38(5): e12968.

[15] Wu C, Wang J, Zhang X, *et al*. Hollow gradient-structured iron-anchored carbon nanospheres for enhanced electromagnetic wave absorption[J]. Nano-Micro Letters, 2023, 15: 7.

[16] Kong W, Wang Z, Wang M, *et al*. Oxide-mediated formation of chemically stable tungsten-liquid metal mixtures for enhanced thermal interfaces[J]. Advanced Materials, 2019, 31: 1904309.

[17] Doudrick K, Liu S, Mutunga E M, *et al*. Different shades of oxide: from nanoscale wetting mechanisms to contact printing of gallium-based liquid metals[J]. Langmuir, 2014, 30: 6867-6877.

[18] Zhao B, Shao G, Fan B, *et al*. Facile synthesis of crumpled ZnS net-wrapped Ni walnut spheres with enhanced microwave absorption properties[J]. RSC Advances, 2015, 5: 9806-9814.

[19] Liu M, Liu Y, Guo H, *et al*. A facile way to enhance microwave absorption properties of rGO and Fe_3O_4 based composites by multi-layered structure[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 146: 106411.

[20] Li Z, Ye M, Han A, *et al*. Preparation, characterization and microwave absorption properties of $NiFe_2O_4$ and its composites with conductive polymer[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27: 1031-1043.

[21] Zhu T, Chang S, Song Y F, *et al*. PVP-encapsulated $CoFe_2O_4$/rGO composites with controllable electromagnetic wave absorption performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 373: 755-766.

[22] Wang Y, Wu X, Zhang W, *et al*. One-pot synthesis of $MnFe_2O_4$ nanoparticles-decorated reduced graphene oxide for enhanced microwave absorption properties[J]. Materials Technology, 2017, 32: 32-37.

[23] Yang P, Deng W, Ruan H, *et al*. Amorphous/graphitic carbon phase engineering of corrosion-resistant Fe @ C core-shell nanowires for optimized dipole polarization and enhanced microwave absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 492: 152253.

[24] Yang X, Fan B, Tang X, *et al*. Interface modulation of chiral PPy/Fe_3O_4 planar microhelixes to achieve electric/magnetic-coupling and wide-band microwave absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 132747.

[25] Sun J, Xu H, Shen Y, *et al*. Enhanced microwave absorption properties of the milled flake-shaped FeSiAl/graphite composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 548: 18-22.

High-Efficiency Microwave Absorption Enabled by a Polydimethylsiloxane-Based Liquid Metal/Hollow Glass Microsphere Synergistic Network

Bo Li[1], Yalong Li[1], Yuhang Liu[1], Dawei Liu[1], Weiwei Xu[1], Zuoqiang Wu[1], Zhimei Song[1], Kang Xie[2], Feng Chen[2]

(*1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd, Chengdu 610092, China;*

2. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: Polymer-based electromagnetic (EM) absorbers have attracted considerable interest in aerospace and related fields owing to their low density, mechanical flexibility and high structural tunability. Conventional magnetic fillers, however, suffer from high mass density and narrow absorption bandwidth, limiting their applicability to next-generation lightweight, broadband devices. In this study, polydimethylsiloxane (PDMS) was chosen as matrix, while liquid metal (LM) was uniformly coated onto hollow glass microspheres (HGSs) via a simple mechanical grinding process to form LM@HGS core-shell particles, which were subsequently embedded in PDMS to construct a multi-heterointerface elastomer. Electromagnetic characterization revealed a minimum reflection loss of −64.56 dB at a thickness of 2.99 mm; even when the thickness is reduced to 2.14 mm, the effective absorption bandwidth (RL ≤ −10 dB) still spans 5.92 GHz, demonstrating outstanding broadband performance. Mechanistic analysis indicates that dipolar and interfacial polarizations act synergistically to enhance dielectric loss, while the core-shell architecture and inherent porosity afford multiple propagation paths that induce repeated internal reflection and scattering of incident microwaves, jointly accounting for the high absorption efficiency. Leveraging the intrinsic flexibility of PDMS and the low density of LM-coated HGSs, this work presents a concise and effective design strategy for non-magnetic EM absorbing materials, thereby providing a solid foundation for applications such as microwave stealth and on-chip device integration.

Keywords: polydimethylsiloxane; liquid metal; hollow glass microspheres; electromagnetic wave absorption; dielectric loss; polarization loss