

MoS₂ 改性黏接层对 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料磁发射性能的增强机制*

尤世越¹⁾ 秦智²⁾ 马亮²⁾ 石登财¹⁾ 沈杰²⁾ 金伟^{1)†} 周静^{2)‡}

1) (武汉理工大学材料科学与工程学院, 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室, 武汉 430070)

2) (武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

(2025 年 4 月 15 日收到; 2025 年 5 月 17 日收到修改稿)

针对传统低频电天线存在的体积庞大与高功耗问题, 基于压电谐振原理的磁电天线展现出显著的优势. 然而, 磁电复合材料中的黏接层与压电相、铁磁相之间的声学阻抗失配现象, 严重阻碍了磁-机-电耦合过程中的应力传递效率, 进而限制了磁电复合材料的磁辐射强度. 为提升磁发射性能, 本文设计了一种高界面应力传递特性的磁电复合材料, 其具有类三明治的结构, 由 Pb(Zr, Ti)O₃ 压电纤维复合材料 (macro fiber composite, MFC) 压电层、均匀填充 MoS₂ 的环氧树脂黏接层, 以及 FeBSi (Metglas) 磁致伸缩层组成. 通过向黏接层引入二维填料 MoS₂, 有效改善了黏接层与铁电相、铁磁相之间的声阻抗匹配特性. 系统研究了 MoS₂ 填充量对 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料磁发射强度的影响规律. 实验结果表明, 当 MoS₂ 填充质量分数为 1% 时, 该复合材料在最佳偏置磁场条件下的磁发射强度达到了 331 μ T, 相较于未填充 MoS₂ 的磁电复合材料提升了 1.5 倍; 在距离发射源 1 m 处, 磁发射强度可达 2.7 nT. 结合声阻抗匹配理论, 深入探讨了电-机-磁耦合过程中的应力传递机制. 此外, 通过采用幅移键控调制技术, 验证了基于 MoS₂ 改性的 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料在信号无损传输方面的有效性. 本研究提出的黏接层优化方法, 为通过增强应力传递效率提升磁电响应性能提供了一种简便高效的技术途径, 同时为低频水下通信、地下传感以及分布式无线网络等小型通信系统的发展提供了新的技术方案与理论支撑.

关键词: PZT MFC/Metglas 磁电复合材料, 磁发射强度, 应力传递, 声阻抗

PACS: 75.85.+t, 43.38.Fx, 43.38.Ct, 43.40.Yq

DOI: 10.7498/aps.74.20250482

CSTR: 32037.14.aps.74.20250482

1 引言

随着电磁场与电磁波理论研究的持续深化, 无线通信技术已广泛渗透至智能手机、广播电台、雷达等诸多领域, 射频技术已成为现代社会不可或缺的关键支撑^[1-3]. 然而, 受限于电磁波在高导电介质中显著的路径损耗特性, 传统无线通信在水下、地

下等特殊环境中应用面临严峻挑战^[4-6]. 在此背景下, 甚低频 (very low frequency, VLF, 3—30 kHz) 电磁波因其低频特性赋予的强信号穿透力, 被认为是解决上述场景通信难题的有效方案^[7]. 但传统电天线受限于天线尺寸与辐射效率的制约关系 (需满足天线尺寸大于电磁波工作波长的十分之一)^[8,9], 难以实现小型化与高效能的统一. 基于压电材料的低频机械天线为突破这一困境提供了新方向, 其凭

* 海南省自然科学基金创新研究团队项目 (批准号: 524CXTD431) 和湖北隆中实验室开放基金 (批准号: 2024KF-04, 2024KF-14) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jinwei@whut.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhoujing@whut.edu.cn

借小型化、低功耗优势,成为研究热点^[10,11]. 该类天线通常采用三明治复合结构,由压电层、磁致伸缩层及中间黏接层构成^[12]. 近年来,诸多研究已证实此类机械天线的性能优势. 例如,Chang等^[13]开发的压电陶瓷/铁磁异质结构的机械天线,在天线体积显著减小的同时,磁发射效率相较于传统环形线圈天线提升5000倍;Dong等^[14]等设计的铅钛酸铅/非晶态磁性合金层压甚低频通信系统,较传统电小天线实现了1—2个数量级的小型化. 其工作原理在于,谐振状态下压电层通过黏接层将应力应变传递到磁致伸缩层,触发逆磁电耦合效应,实现机械能向磁发射的转化. 然而,黏接层的引入却成为制约磁电耦合效应与磁发射强度提升的关键因素^[15].

为了降低界面损耗并提升应力传递效率,Hwang等^[16]通过理论模拟证实,黏接层的厚度和杨氏模量对磁电复合材料的应力传递效率具有显著影响,不良的黏接层特性会导致大量的界面能量耗散,降低磁电耦合效果;Kim等^[17]亦指出压电材料和磁致伸缩金属层间的机电耦合性能高度依赖于黏接层的机械性能.Silva等^[15]表明磁电复合材料的黏接层显著地影响压电传感器的磁电响应.Wong等^[18]认为声学匹配层是决定压电换能器性能的关键部件,声阻抗匹配决定了声波能量的传递效率. 尽管现有研究已明确黏接层的重要性,但改善磁电复合材料界面能量传递性能的研究仍相对匮乏. 其中,黏接层与压电相、铁磁相的声阻抗不匹配问题尤为突出,其不仅导致振动模式的不连续性,严重削弱应变介导的能量转移过程,还显著降低磁通量的产生效率,加剧界面能量损失. 已有研究表明,采用

高杨氏模量填料填充可有效提升复合材料的机械性能^[18]. MoS₂ 凭借其高比表面积、高机械强度,已广泛应用于多功能聚合物复合材料的增强^[19]. 其二维片层结构赋予 MoS₂ 与钢相当的平面强度(约270 GPa)及约23 GPa的断裂强度,远高于聚合物基体的模量,具备承受高应力的能力.

基于上述研究现状,本研究通过在黏接层中填充 MoS₂, 构建具有高界面应力传递特性的 PZT/MFC/Metglas 磁电复合材料,旨在增强其磁发射强度. 本文系统地讨论 MoS₂ 填充量对磁电复合材料的机械性能和磁发射性能的影响规律,并结合声阻抗匹配理论深入分析磁发射强度增强机理. 研究进一步验证了改性后磁电复合材料在数字信号无损传输方面的应用潜力,为甚低频通信技术发展提供理论与技术支撑.

2 实验部分

磁电复合材料为三明治结构,由压电层、铁磁层和黏接层构成. 其中,压电相选用尺寸为100 mm×20 mm×0.3 mm的压电纤维复合材料(macro fiber composite, MFC),该材料参照前期研究^[20]制备工艺完成,其内部PZT-5 H纤维的尺寸为100 mm×0.6 mm×0.3 mm;铁磁相采用日本日立公司生产的FeSiB合金(Metglas, 2605SA),尺寸为100 mm×20 mm×0.025 mm. 黏接层由MoS₂粉末(粒径≤2 μm,中国国药公司)、环氧树脂(105/206,美国西部系统公司)混合制成. 具体制备流程(图1)如下:将不同填充质量分数(0.5%, 1%, 1.5%, 2%)的MoS₂加入到环氧树脂(105)中,

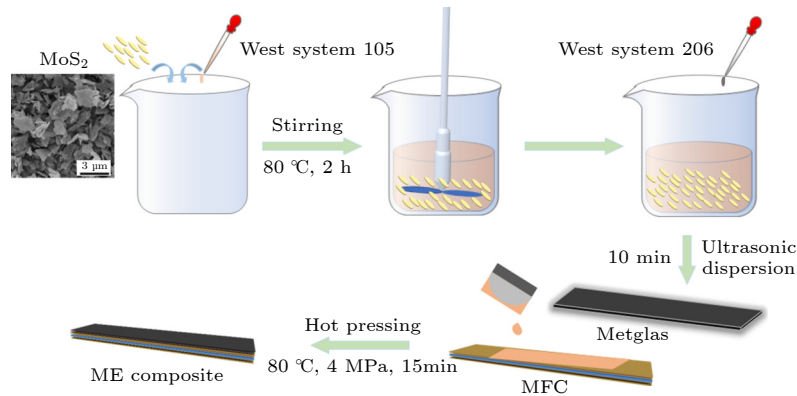


图1 MoS₂ 填充环氧树脂黏接层及磁电复合材料的制备流程图

Fig. 1. Schematic of the preparation of MoS₂-filled epoxy adhesive layer and the synthesis process of the magnetoelectric (ME) composite.

在 80 °C 下持续搅拌 2 h, 以降低黏度并促进 MoS₂ 粉末均匀分散; 随着加入胺类固化剂 (206), 经 10 min 超声处理后, 将 MoS₂/环氧树脂混合物刮涂于 MFC 与 Metglas 上, 并将二者黏合. 最后, 将 Metglas/MFC 片置于热压机中, 在 4 MPa 压力及 80 °C 条件下固化 15 min, 制得磁电复合材料.

材料表征与性能测试采用以下方法: 利用 X 射线衍射仪 (XRD, RIGAKU, 日本) 对 MoS₂/树脂黏接层物相结构进行分析; 使用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR, Nexus, 日本) 在 4000—400 cm⁻¹ 中红外波长范围内开展化学结构表征; 通过扫描电子显微镜 (SEM, JSM-5610LV, 美国) 观察材料微观形貌; 采用阿基米德排水法测量材料密度; 运用储能模量由动态力学分析仪 (DMA, DMA8000, America) 在 0—200 °C 温度区间、2 °C/min 升温速率及空气氛围下, 对材料储能模量进行表征; 通过差示扫描量热仪 (DSC, DSC8500, 美国), 在 40—300 °C 温度区间、5 °C/min 升温速率及空气氛围下, 测定材料的玻璃化转变温度 (T_g); 利用热重分析 (TGA, STA449F3, 中国) 在 30—800 °C 温度区间, 5 °C/min 升温速率及空气条件下, 测试材料的质量变化; 采用电子万能试验机 (HLD HLT, Instron 5967, 中国), 以 10 mm/min 拉伸速率评估复合材料的拉伸性能.

磁电性能测试方面, 采用锁相放大器 (LIA, SR830, 美国) 在固定交流磁场 (H_{AC}) 条件下测量磁电复合材料的磁场强度随直流偏置场 (H_{DC}) 的变化曲线. 其中, H_{DC} 由直流电流源 (DC, KEPCO, 中国) 驱动亥姆霍兹线圈产生, H_{AC} 由锁定放大器驱动的螺线管提供. 使用标定线圈作为远距离接收器采集磁辐射信号, 磁电复合材料由功率放大器 (PA, ATA-3090, 中国) 和信号发生器 (SG, DG1022,

美国) 供电. 使用信号分析仪 (DSA, Agilent 35670A, 中国) 对幅移键控 (amplitude shift keying, ASK) 调制模式下的辐射信号进行分析处理.

3 结果与讨论

3.1 MoS₂ 改性黏接层的结构与性能分析

图 2(a) 为 MoS₂ 改性前后黏接层的 XRD 图谱. 20°附近的宽衍射峰对应环氧树脂无序、无定形的结构特征. 在 MoS₂ 改性黏接层的 XRD 图谱中, 可清晰观察到 MoS₂ 的特征衍射峰, 这表明 MoS₂ 成功引入至环氧树脂基体中. 图 2(b) 为 MoS₂ 改性前后黏接层的 FTIR 光谱. 3402 cm⁻¹ 处的宽带谱峰主要源于水的 O—H 伸缩振动以及胺类化合物的 N—H 伸缩振动. 3033 cm⁻¹ 与 2917 cm⁻¹ 处的特征吸收峰分别对应环氧的 C—H 伸缩振动与甲基 (CH₃) 的 C—H 不对称拉伸. 2865 cm⁻¹ 处的吸收带对应于 CH₂ 的 C—H 对称伸缩振动. 1611 cm⁻¹ 与 1510 cm⁻¹ 处的谱带分别对应芳香环 C=C 伸缩振动与 C—C 拉伸振动的特征峰. 1248 cm⁻¹ 与 829 cm⁻¹ 的吸收带则与环氧结构中的 C—O—C 伸缩振动相关. 1036 cm⁻¹ 的谱带对应于 C—O—C 的拉伸振动, 而 754 cm⁻¹ 附近的谱带则归因于 C—H 键的弯曲振动. 对比纯环氧树脂与 MoS₂ 改性树脂的 FTIR 光谱发现, 两者特征峰位置与强度基本吻合, 这表明 MoS₂ 与环氧树脂之间以非共价相互作用为主, 且 MoS₂ 的添加未对环氧树脂的交联聚合过程产生显著影响. 通过热重分析 (TGA) 对不同填充量的 MoS₂ 改性黏接层进行热性能研究, 结果如图 2(c) 所示. 在 800 °C 时, 黏接层的残留物含量与 MoS₂ 的填充量呈正相关趋势. 这一结果

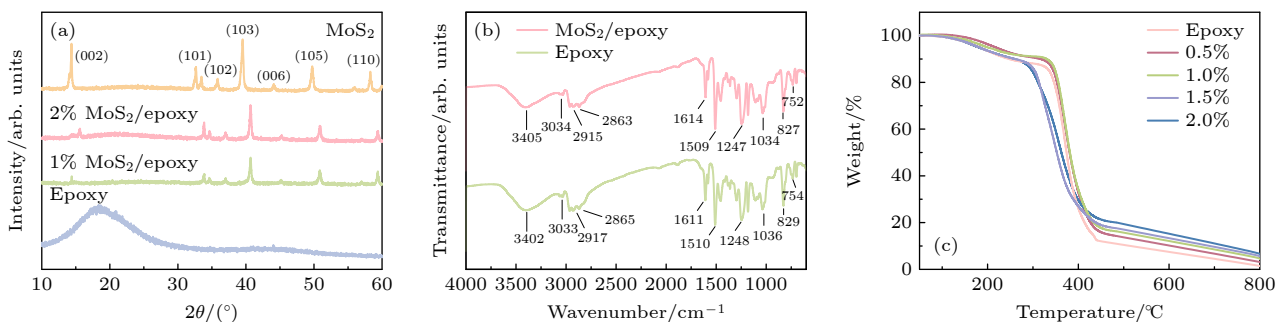


图 2 (a) 不同 MoS₂ 填充量黏接层的 XRD 图谱; (b) 填充前后黏接层 FT-IR 光谱图; (c) 不同 MoS₂ 填充量黏接层的 TGA 曲线
Fig. 2. (a) XRD patterns of the adhesive layers with different filling contents of MoS₂; (b) FT-IR spectrograms of the adhesive layer before and after filling; (c) thermogravimetric curves of the adhesive layers with different filling contents of MoS₂.

进一步证实, MoS₂ 的引入未引发黏接层树脂的化学结构变化与化学键合作用, 为后续基于声阻抗匹配理论的力学性能分析及杨氏模量计算奠定了基础.

图 3 为 MoS₂ 改性前后黏接层的 SEM 断面图. 从图 3(a) 可以清晰地观察到, 纯环氧树脂的断裂面呈现出光滑的特性. 当 MoS₂ 填充量较低时, MoS₂ 能够在环氧树脂基体中均匀分散, 此时颗粒的钉扎效应可以有效阻止裂纹的扩展. 随着 MoS₂ 填充质量分数增加至 1% 时 (图 3(c)), 钉扎位点显著增多, 裂纹钉扎效果得到了进一步增强, 限制了裂纹的进一步扩展^[21]. 然而, 当 MoS₂ 填充质量分数达到 1.5% 时 (图 3(d)), 颗粒出现了团聚现象, 导致钉扎失效, 进而引发了微裂纹的产生, 并且在裂纹扩展过程中, MoS₂ 颗粒会从基体中被拔出. 当 MoS₂ 填充质量分数继续增加至 2% 时 (图 3(e)), 界面结合状况进一步恶化. 由此可见, MoS₂ 填充量对材料力学性能具有显著影响, 在低填充量下, 钉扎效应能够有效发挥, 而高填充量可能导致颗粒团聚, 进而对材料的力学性能产生不利影响.

由于黏接层的机械性能对磁电复合材料的磁

发射强度有着重要影响, 因此对纯环氧树脂以及不同 MoS₂ 填充量黏接层进行了拉伸应力-应变测试, 结果如图 4(a) 所示. 测试数据表明, 黏接层的杨氏模量随着 MoS₂ 填充量的增加呈现出先增大后减小的趋势. 当 MoS₂ 填充质量分数为 1% 时, 黏接层的杨氏模量达到最大值, 为 5.56 GPa. 这种杨氏模量的增强效应, 主要源于环氧基体中 MoS₂ 的固有刚度对聚合物链迁移率的约束, 进而在基体中构建了一个渗透网络. 该网络通过填充矩阵之间的相互作用, 能够有效地实现机械应力的传输^[21]. 但当 MoS₂ 填料量较高 (超过 1.5%) 时, MoS₂ 片层之间的距离变得非常接近, 由于范德瓦耳斯力的作用, MoS₂ 片层倾向于团聚并重新堆叠在一起, 这种聚集状态会破坏基体结构的完整性. 这些结果表明, 1% 的 MoS₂ 填充量是在提升材料刚度和保证分散效果之间的最佳配比.

为了深入地探究黏接层模量增强的内在机制, 对不同 MoS₂ 填充量黏接层的玻璃化转变温度 (T_g) 进行了系统分析. 如图 5(a) 所示, 纯环氧树脂的 T_g 为 129 °C, 而加入质量分数分别为 0.5%, 1%, 1.5% 和 2% MoS₂ 的黏接层的 T_g 分别提升至

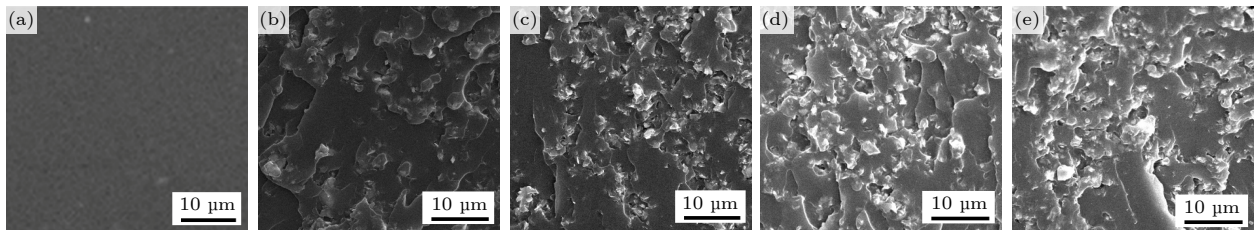


图 3 不同 MoS₂ 填充质量分数黏接层的断面 SEM 图像 (a) 0%; (b) 0.5%; (c) 1%; (d) 1.5%; (e) 2%

Fig. 3. SEM of fracture surface of MoS₂/epoxy composite with different weight percent of MoS₂: (a) Pure epoxy; (b) 0.5%; (c) 1%; (d) 1.5%; (e) 2%.

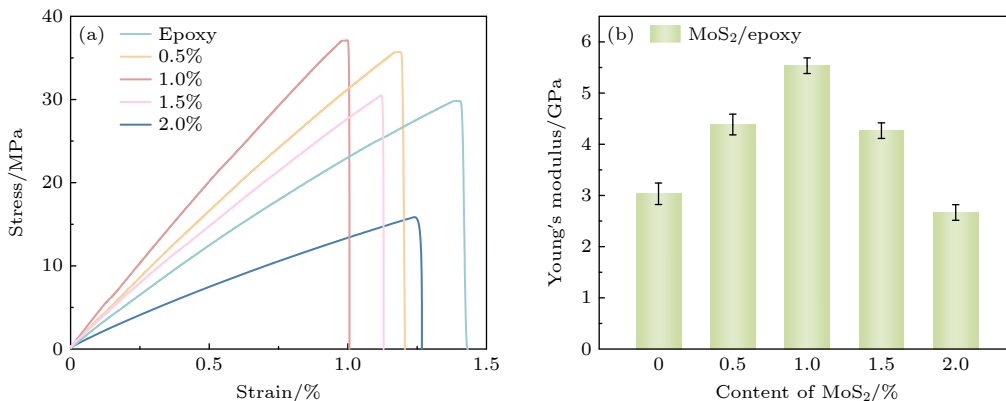


图 4 不同 MoS₂ 填充量黏接层 (a) 应力-应变曲线; (b) 杨氏模量

Fig. 4. Adhesive layers with different filling contents of MoS₂: (a) Stress-strain curves; (b) Young's modulus.

135 °C, 143 °C, 136 °C 和降低至 125 °C. T_g 的升高可以归因于 MoS_2 的存在降低了环氧树脂基体分子链的迁移率. 然而, 随着 MoS_2 填料的进一步增加, 黏接层的 T_g 反而降低, 这可能由以下两个原因导致: 1) 纯 MoS_2 填料在添加过程中发生团聚现象; 2) 由于 MoS_2 的阻隔效应, 环氧树脂基体的交联密度降低.

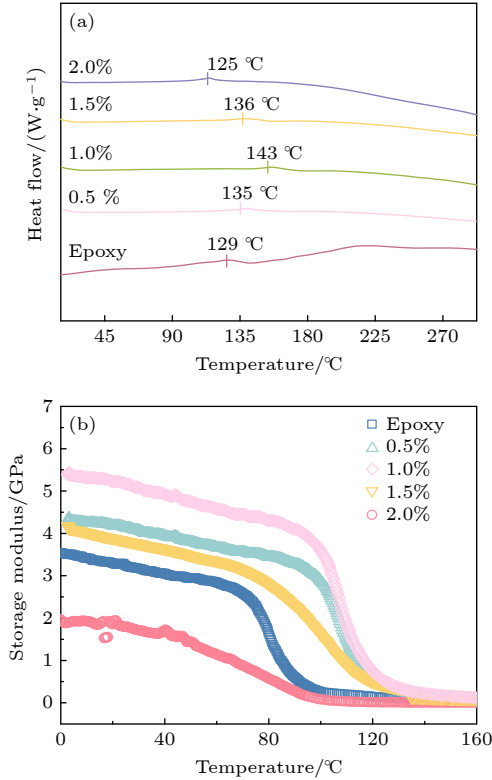


图 5 不同 MoS_2 填充量的黏接层 (a) DSC 曲线; (b) 储能模量曲线

Fig. 5. Adhesive layers with different filling contents of MoS_2 : (a) DSC curves; (b) storage modulus curves.

此外, 通过动态力学分析仪 (DMA) 测得的复合材料储能模量如图 5(b) 所示, 储能模量随着 MoS_2 填充量的增加呈现出非线性变化. 当 MoS_2 填充质量分数为 1% 时, 黏接层的储能模量达到最大值, 为 5.48 GPa, 这表明填充后体系的刚性得到增强, 环氧树脂分子链的运动受到阻碍, 从而使材料的力学性能得到提升. 但当 MoS_2 填料质量分数达到 1.5% 时, 储能模量出现下降, 这说明存在一种由填料聚集所引发的应力集中主导的相互竞争机制.

综上所述, MoS_2 填料浓度通过在增强效应和相不均匀性之间寻求平衡, 以非线性的方式对材料的机械性能进行调节, 而这一调节过程对磁发射应用中的磁弹能量转换效率有着直接的影响.

3.2 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料磁发射性能分析

为确定磁电复合材料的最佳工作参数, 对 MoS_2 改性的 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料开展不同外界偏置条件下的磁电扫频测试. 如图 6 所示, 实验结果表明, 该复合材料的最佳偏置电流为 1 A, 由 MFC 伸缩振动激发的谐振频率约为 12 kHz. 在该谐振频率下, 复合材料可产生最大磁发射强度, 验证了谐振条件对磁电转换效率的关键作用.

进一步对比改性前后磁电复合材料的磁发射性能, 图 7(a) 为磁发射扫频曲线. 结果显示, 相较于未填充 MoS_2 的磁电复合材料, 填充后的样品呈现出更强的磁辐射能力. 图 7(b) 定量展示了最佳偏置磁场下磁电复合材料磁发射强度随 MoS_2 含量的变化规律, 当 MoS_2 填充质量分数为 1% 时, 磁发射强度达到 331 μT , 较未填充样品提升 1.5 倍. 图 7(c) 探究了最佳偏置下驱动电压对磁发射强度的影响. 数据表明, 在 0—200 V 电压区间内, 磁发射强度随电压升高呈快速增长趋势; 超过 200 V 后, 增长速率显著减缓, 至 400 V 时基本达到饱和状态. 这一现象归因于 MFC 振动幅度的物理限制以及界面能量损耗的累积效应^[4]. 此外, 在相同电压条件下, 磁电复合材料的磁发射强度随 MoS_2 填充量增加呈现先升后降的趋势, 质量分数为 1% 的 MoS_2 填充的样品表现出最优磁发射性能. 当填料量超过质量分数为 1% 后, 磁发射强度下降, 这与前文观察到的黏接层力学性能劣化现象密切相关.

3.3 磁发射性能增强机理

为揭示磁发射强度增强的本质机制, 基于声阻抗匹配原理对界面应力传递过程展开分析. 图 8(a) 为应力应变实验所测试的黏接层杨氏模量, 图 8(b) 为阿基米德法测试的黏接层密度. 结果显示, 随着 MoS_2 含量增加, 黏接层密度呈现出单调递增趋势, 而杨氏模量 (E) 则呈现非线性变化.

根据数学阻抗公式 $Z = \rho c = \rho \sqrt{E/\rho} = \sqrt{\rho E}$ (其中 ρ 为密度, E 为杨氏模量, c 为声速)^[22], 计算得到黏接层声学阻抗随 MoS_2 填充量的变化曲线 (图 8(c)). 结果表明, 黏接层声阻抗随填充量增加先增大后减小, 在 MoS_2 的质量分数为 1% 时达到峰值. 当磁电换能器采用单层匹配层结构时, 声波总透射率 T 可由 (1) 式计算:

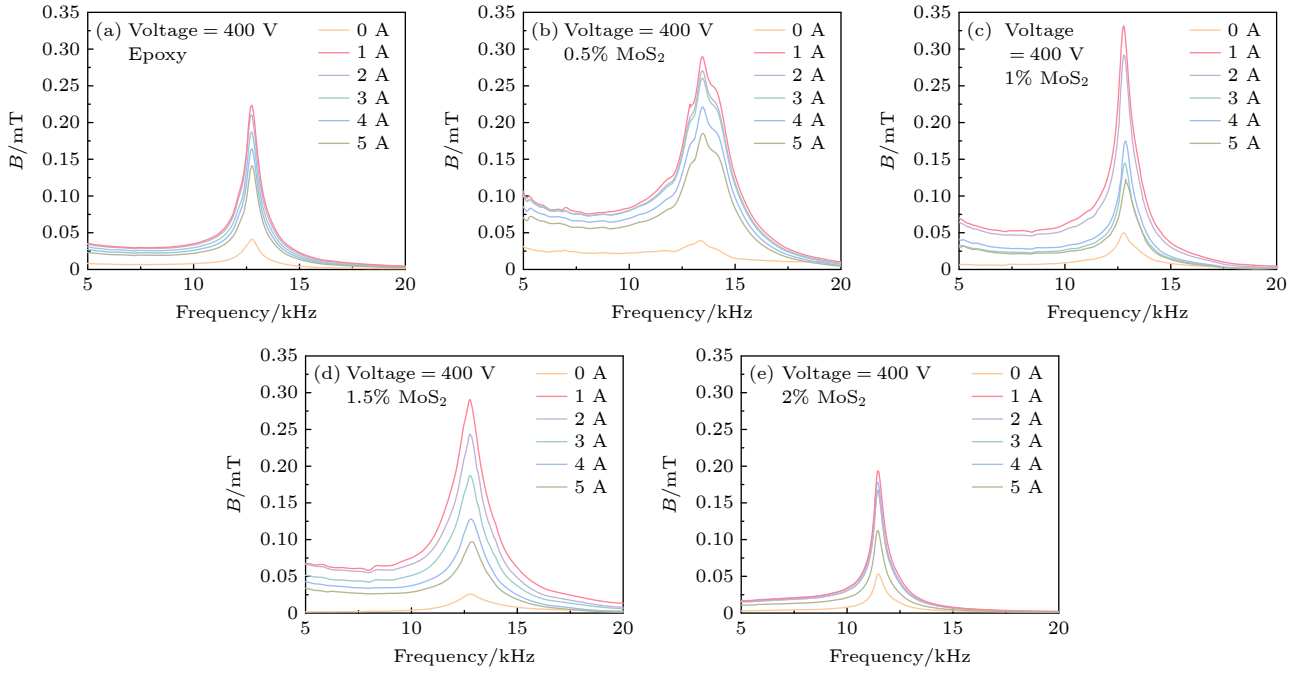


图 6 不同质量分数的 MoS₂ 填充电磁复合材料在不同偏置下的磁发射性能扫频曲线 (a) 环氧树脂; (b) 0.5%; (c) 1%; (d) 1.5%; (e) 2%
 Fig. 6. Sweep frequency curves of the magnetic emission intensity of ME composite with different MoS₂ filling contents (weight percent) under different bias conditions: (a) Pure epoxy; (b) 0.5%; (c) 1%; (d) 1.5%; (e) 2%.

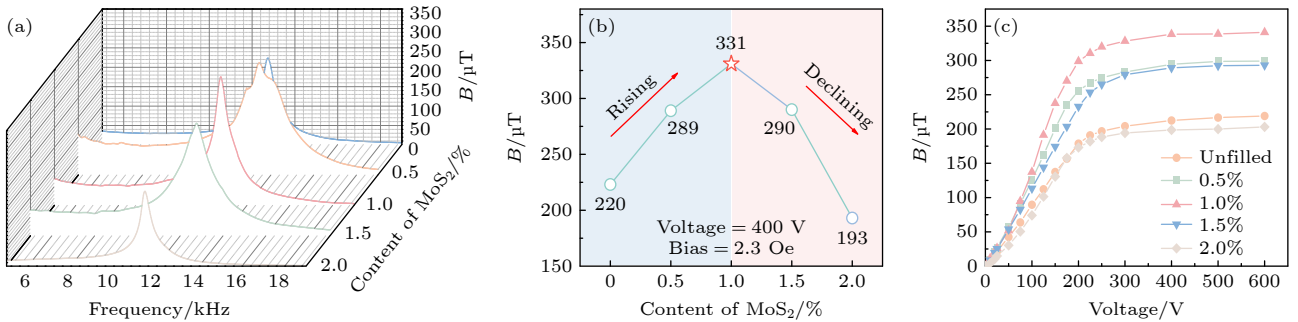


图 7 (a) 最佳偏置下不同 MoS₂ 填充量的磁电复合材料扫频曲线; (b) 最佳偏置下磁电复合材料的磁发射强度随 MoS₂ 填充量的变化; (c) 不同 MoS₂ 填充量磁电复合材料在最佳偏置下的磁发射强度随电压的变化
 Fig. 7. (a) Sweep frequency curves of ME composites with different MoS₂ filling contents under optimal bias conditions; (b) variation of magnetic emission intensity of ME composite with different MoS₂ filling contents under optimal bias conditions; (c) variation of magnetic emission intensity of ME composite with voltage under optimal bias conditions.

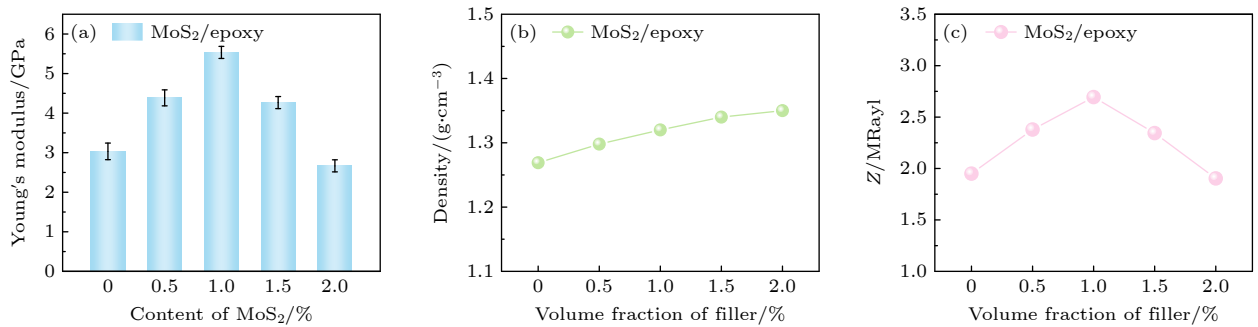


图 8 (a) 黏接层杨氏模量随 MoS₂ 填充量的变化; (b) 黏接层密度随 MoS₂ 填充量的变化; (c) 黏接层声学阻抗随 MoS₂ 填充量的变化
 Fig. 8. (a) Young's modulus curves of the adhesive layers with different MoS₂ filling contents; (b) density curves of the adhesive layers with different MoS₂ filling contents; (c) acoustic impedance curves of the adhesive layers with different MoS₂ filling contents.

$$T = \frac{4Z_1 Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2} \frac{4Z_3 Z_2}{(Z_3 + Z_2)^2}, \quad (1)$$

其中 Z_1, Z_2, Z_3 分别为压电相、铁磁相及黏接层的声阻抗. 表 1 汇总了不同 MoS_2 填充量下的计算结果, 填充质量分数为 1% 的黏接层有最高声学透射系数 ($T = 0.132$), 表明该条件下应力传播过程中的能量耗散最小. 透射系数的显著提升, 有效促进了应变从压电相到磁致伸缩层的高效传递, 通过优化应变介导的能量转移路径, 最终实现磁电耦合效应的增强.

表 1 不同 MoS_2 填充量黏接层的密度、杨氏模量、声阻抗、声学透射系数

Table 1. Density, Young's modulus, acoustic impedance, and acoustic transmission coefficient of adhesive layers with different filling contents.

Samples (epoxy/ MoS_2)	Density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Young's modulus /GPa	Z /MRayls	T
epoxy	1.26	3.01	1.95	0.077
0.5%	1.29	4.36	2.38	0.107
1%	1.32	5.56	2.70	0.132
1.5%	1.34	4.12	2.34	0.101
2%	1.35	2.70	1.90	0.074
PZT-5H	7.61	56	20.63	
Metglas	7.82	100	27.93	

3.4 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料通信应用

在确定质量分数为 1% MoS_2 填充的 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料具备优异综合性能的基础上, 进一步对其方向性及磁场传输能力展开测试. 图 9(a) 展示了该填充量下磁电复合材料在 40 cm 距离处的近场辐射性能. 结果表明, 填充后的磁电复合材料在各个方向上的磁发射强度均有显著增强, 其中在 0° 和 180° 方向上磁发射强度达到最强. 这一特性为该复合材料在特定方向通信应用中的优化设计提供了重要依据.

图 9(b) 呈现了填充前后磁电复合材料的辐射磁场强度随距离的衰减曲线. 实验数据显示, 在距离磁电复合材料 1 m 处, 发射的磁场强度可达 2.7 nT. 磁电式机械天线的磁发射强度与距离间的衰减关系已经过理论推导和实验验证^[23-26], 同时由于实际最远测试距离受到环境噪音和传感器灵敏度的影响, 因此通常使用等效外推来推断磁电天

线的磁发射距离. 本文基于磁偶极子的辐射衰减模型进行理论推断^[13,25-27], 在 100 m 的距离处, 该复合材料可产生约 40 fT 的磁场强度. 这一结果预示着该磁电复合材料具备实现 100 m 以上范围跨介质磁通信的潜力, 为其在水下、地下等特殊环境中的应用提供了有力支撑.

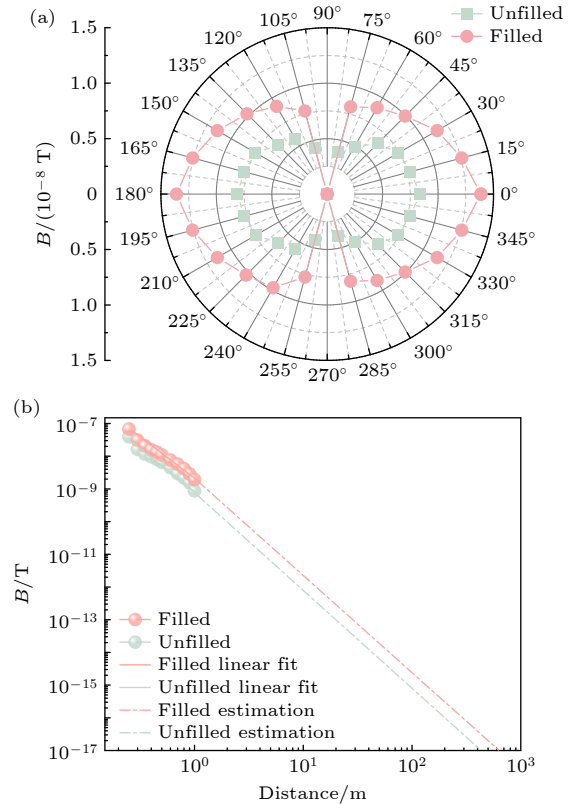


图 9 最佳偏置下 MoS_2 填充前后磁电复合材料 (a) 近场辐射特性; (b) 磁场强度随实测距离的变化

Fig. 9. Magnetoelectric composites before and after MoS_2 filling under the optimal bias: (a) Near-field radiation characteristics; (b) variation of the magnetic field intensity with the measured distance.

ASK 作为一种广泛应用的信号调制技术, 其原理是通过改变信号幅值来实现数据调制. 图 10(a) 为 ASK 调制示意图, 直观地展示了二进制信号“10101010”的调制传递过程. 在该调制过程中, 信号幅值较高的部分代表数字“1”, 幅值较低的部分代表数字“0”. 图 10(b) 展示了输入信号的调制情况, 实验结果表明: 在信号段对应“1”的区域, 磁信号幅值变化明显; 而在信号段对应“0”的区域, 磁信号幅值变化微弱或基本保持不变. 这一现象充分证明了 ASK 调制技术能够通过幅值变化有效传递数字信息.

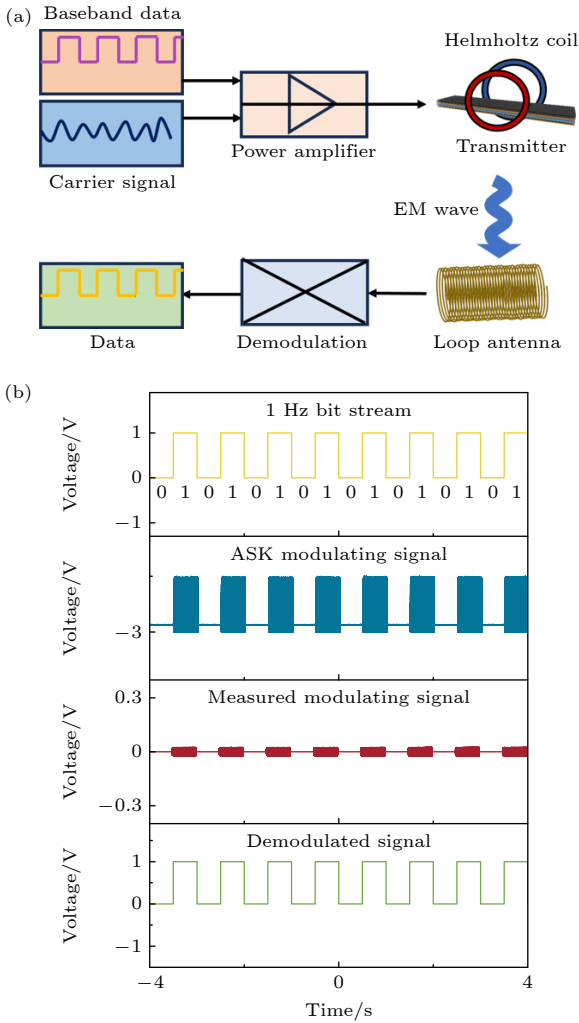


图 10 (a) 磁电复合材料调制测量装置的示意图; (b) 通过 ASK 方法调制 1 Hz 比特流

Fig. 10. (a) Schematic diagram of the measurement setup for digital data transmission; (b) 1 Hz bit stream modulated by ASK method.

通过对实验数据进行深入解析与优化处理, 最终成功恢复出与原始信号一致的信息流. 这一结果表明, 经 MoS₂ 填充优化黏接层后的 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料, 能够借助 ASK 信号调制

实现数字“0”和“1”的有效转换, 进而实现可靠的无损信号传输. 上述研究成果充分揭示了该磁电复合材料在数字信息通信领域的巨大应用潜力, 有望为低频水下通信、地下传感以及分布式无线网络等通信系统的发展提供新的技术解决方案. 表 2 展示了这项工作与小型化天线领域最先进成果之间的定性比较. 显然, 本工作所提出的磁电机天线展现出相对更小的尺寸、更低的工作频率以及单位体积更好的辐射能力.

4 结 论

本研究围绕磁电复合材料在特殊环境通信中的应用, 通过 MoS₂ 改性界面黏接层, 显著提升了 PZT MFC/Metglas 磁电复合材料性能. 结构与性能表征显示, 质量分数为 1% 的 MoS₂ 可均匀分散于环氧树脂基体, 有效地发挥钉扎效应提升力学性能; 过量填充 (>1.5%) 则引发颗粒团聚, 导致性能下降. 磁电性能测试表明, 该填充量下复合材料在 12 kHz 谐振频率、1 A 偏置电流时, 磁发射强度达 331 μT, 较未改性样品提升 1.5 倍. 基于声阻抗匹配理论证实, 此配比使黏接层声阻抗最优, 应力波传递损耗最小, 显著增强磁电耦合效率. 通信应用测试验证了其实际效能: 近场辐射显示各向强度增强, 1 m 处磁场强度达 2.7 nT, 理论支持 100 m 跨介质通信; 通过 ASK 调制实现数字信号无损传输.

本研究为低频特殊环境通信提供了技术路径, 后续将深化材料优化与实际应用研究. 本研究提出的 MoS₂ 改性界面黏接层方法, 为提升磁电复合材料性能提供了有效策略, 同时为低频水下通信、地下传感等特殊环境的无线通信技术发展提供了理论依据与技术参考.

表 2 本工作与已报道的磁电天线辐射性能比较

Table 2. Comparison of the radiation performance of this work with the reported ME antennas.

年份	材料体系	发射器体积/cm ³	工作频率/kHz	辐射能力	单位体积辐射能力
2020 ^[23]	PZT	50.3	33.23	40 fT at 6 m	0.8 fT/cm ³ @6 m
2022 ^[24]	PZT/Metglas	0.45	6.3	1 nT at 0.4 m	2.2 nT/cm ³ @0.4 m
2023 ^[25]	PZT/Metglas	69	22.23	6 pT at 5.5 m	0.09 pT/cm ³ @5.5 m
2020 ^[14]	PZT/Metglas	0.33	23.95	10 fT at 120 m	30 fT/cm ³ @120 m
2023 ^[26]	PZT/Metglas	0.56	17.9	1 nT at 1.4 m	1.79 nT/cm ³ @1.4 m
2024 ^[27]	PZT/Ni/Metglas	0.16	24.47	2.4 pT at 3 m	15 pT/cm ³ @3 m
本工作	PZT-5H/Metglas	0.07	12.51	2.7 nT at 1 m	38.6 nT/cm³ @1 m

参考文献

- [1] Cui Y, Wu M, Song X, Huang Y P, Jia Q, Tao Y F, Wang C 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 208401 (in Chinese) [崔勇, 吴明, 宋晓, 黄玉平, 贾琦, 陶云飞, 王琛 2020 物理学报 **69** 208401]
- [2] Yang S, Geng J, Zhou H, Wang K, Zhao X, Lu J, Zhao R, Tang X, Zhang Y, Su D, Zhang A, Li H, Jin R 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 2082
- [3] Yang N N, Chen X, Wang Y J 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 157508 (in Chinese) [杨娜娜, 陈轩, 汪尧进 2018 物理学报 **67** 157508]
- [4] Song K X, Min S G, Gao J Q, Zhang S J, Mao Z N, Shen Y, Chu Z Q 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 247502 (in Chinese) [宋凯欣, 闵书刚, 高俊奇, 张双捷, 毛智能, 沈莹, 褚昭强 2022 物理学报 **71** 247502]
- [5] Nie C W, Wu H Z, Wang S H, Cai Y Y, Song S, Sokolov O, Bichurin M I, Wang Y J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 247501 (in Chinese) [聂长文, 吴瀚舟, 王书豪, 蔡园园, 宋树, Sokolov Oleg, Bichurin, 汪尧进 2021 物理学报 **70** 247501]
- [6] Chu Z, Yu C, Dan W, Jiang S, Ren Y, Dong K, Dong S 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 072901
- [7] Li W, Li D, Zhou K, Fu Q, Yuan X, Zhu X 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 263
- [8] Cheng Z, Zhou J, Wang B, Wu Q, Ma L, Qin Z, Shen J, Chen W, Peng W, Chang J, Ci P, Dong S 2024 *Adv. Sci.* **11** 2403746
- [9] Cui Y, Wang C, Song X, Wu M, Zhang Q, Yuan H, Yuan Z 2023 *iScience* **26** 105832
- [10] Niu Y, Ren H 2022 *IEEE Sens. J.* **22** 14008
- [11] Liu K, Qin Z, Shen J, Cheng Z, You S, Ma L, Zhou J, Chen W 2024 *Nano Res.* **17** 6630
- [12] Xiao N, Wang Y, Chen L, Wang G, Wen Y, Li P 2023 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **22** 34
- [13] Chang J, He Z, Xu S, Zheng X, Peng W, Ci P, Wang B, Zhang C, Dong S 2024 *Adv. Mater.* **36** 2309159
- [14] Dong C, He Y, Li M, Tu C, Chu Z, Liang X, Chen H, Wei Y, Zaeimbashi M, Wang X, Lin H, Gao Y, Sun N X 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 398
- [15] Silva M, Reis S, Lehmann C S, Martins P, Lanceros Mendez S, Lasheras A, Gutiérrez J, Barandiarán J M 2013 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **5** 10912
- [16] Hwang G T, Palneedi H, Jung B M, Kwon S J, Peddigari M, Min Y, Kim J W, Ahn C W, Choi J J, Hahn B D, Choi J H, Yoon W H, Park D S, Lee S B, Choe Y, Kim K H, Ryu J 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 32323
- [17] Kim S H, Thakre A, Patil D R, Park S H, Listyawan T A, Park N, Hwang G T, Jang J, Kim K H, Ryu J 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 19983
- [18] Wong C M, Chan S F, Wu W C, Suen C H, Yau H M, Wang D Y, Li S, Dai J Y 2021 *Ultrasonics* **116** 106506
- [19] Madeshwaran S R, Jayaganthan R, Velmurugan R, Gupta N K, Manzhurov A V 2018 *J. Phys. Conf. Ser.* **991** 012054
- [20] Zhou J, Zhou J, Chen W, Tian J, Shen J, Zhang P 2022 *Compos. Struct.* **299** 116019
- [21] Liang J Z 2013 *Composites Part B.* **51** 224
- [22] Krautkrämer J, Krautkrämer H 2013 *Ultrasonic Testing of Materials* (New York: Springer Science & Business Media)
- [23] Hassanién A E, Breen M, Li M H, Gong S 2020 *Sci. Rep.* **10** 17006
- [24] Hu L, Zhang Q, Wu H, You H, Jiao J, Luo H, Wang Y, Duan C, Gao A 2022 *J. Phys. Condens. Matter* **34** 414002
- [25] Du Y, Xu Y, Wu J, Qiao J, Wang Z, Hu Z, Jiang Z, Liu M 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 2167
- [26] Fu S, Cheng J, Jiang T, Wu H, Fang Z, Jiao J, Sokolov O, Ivanov S, Bichurin M, Wang Y 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 262901
- [27] Leung C M, Zheng H, Yang J, Wang T, Wang F 2024 *Sensors* **24** 694

Enhancement mechanism of magnetic emission performance of PZT MFC/Metglas magnetoelectric composites by MoS₂-modified adhesive layer*

YOU Shiyue¹⁾ QIN Zhi²⁾ MA Liang²⁾ SHI Dengcai¹⁾
SHEN Jie²⁾ JIN Wei^{1)†} ZHOU Jing^{2)‡}

1) (*State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

2) (*School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

(Received 15 April 2025; revised manuscript received 17 May 2025)

Abstract

The magnetoelectric (ME) antenna based on the piezoelectric resonance principle can solve the problems of large size and high power consumption of traditional low-frequency electrical antennas. However, the acoustic impedance mismatch between the adhesive layer in the magnetoelectric composite and the piezoelectric and ferromagnetic phases significantly hinders the stress transfer in the magneto-mechanical-electric coupling process, ultimately limiting the magnetic radiation intensity of the magnetoelectric composite. To improve the magnetic emission performance of the PZT MFC/Metglas magnetoelectric composite, in this work, the two-dimensional filler MoS₂ is adopted to fill and modify the adhesive layer of the PZT MFC/Metglas magnetoelectric composite, aiming to improve the acoustic impedance match between the adhesive layer and the ferroelectric and ferromagnetic phases. The influence of the MoS₂ content on the magnetic emission intensity of the PZT MFC/Metglas magnetoelectric composite is systematically studied. The results show that when the filling weight percent of MoS₂ is 1%, the magnetic emission intensity of the PZT MFC/Metglas magnetoelectric composite can reach 331 μ T under the optimal bias, which is 1.5 times higher than that of the magnetoelectric composite without MoS₂ filling. At a distance of 1 m, the magnetic emission intensity can reach 2.7 nT. The stress wave transfer mechanism in the electro-mechanical-magnetic coupling is discussed in conjunction with acoustic impedance matching theory. In addition, the amplitude shift keying modulation method demonstrates the lossless signal transmission capability of the magnetoelectric antenna composed of MoS₂-modified PZT MFC/Metglas magnetoelectric composite. This method of optimizing the interfacial adhesive layer is simple and effective to expand the magnetoelectric response by increasing the stress wave transfer efficiency. Meanwhile, it provides a feasible solution for communication systems such as low-frequency underwater communication, underground sensing, and distributed wireless networks.

Keywords: PZT MFC/Metglas magnetoelectric composite, magnetic emission intensity, stress transfer, acoustic impedance

PACS: 75.85.+t, 43.38.Fx, 43.38.Ct, 43.40.Yq

DOI: [10.7498/aps.74.20250482](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250482)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250482](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250482)

* Project supported by the Natural Science Foundation Innovation Research Team of Hainan Province, China (Grant No. 524CXTD431) and the Open Fund of Hubei Longzhong Laboratory, China (Grant Nos. 2024KF-04, 2024KF-14).

† Corresponding author. E-mail: jinwei@whut.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhoujing@whut.edu.cn

MoS₂改性黏接层对PZT/MFC/Metglas磁电复合材料磁发射性能的增强机制

尤世越 秦智 马亮 石登财 沈杰 金伟 周静

Enhancement mechanism of magnetic emission performance of PZT/MFC/Metglas magnetoelectric composites by MoS₂-modified adhesive layer

YOU Shiyue QIN Zhi MA Liang SHI Dengcai SHEN Jie JIN Wei ZHOU Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 157501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250482

CSTR: 32037.14.aps.74.20250482

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250482>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于嵌入式粗糙颈亥姆霍兹共振器的低频宽带通风消声器

A low-frequency wideband ventilation muffler based on an embedded rough-necked Helmholtz resonator

物理学报. 2023, 72(22): 224301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231047>

谐振型自偏置磁电换能器的建模与性能研究

Modeling and performance analysis of resonant self-biased magnetoelectric transducers

物理学报. 2024, 73(14): 147502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240615>

基于2-2型压电复合材料的新型宽频带径向振动超声换能器

A new broadband radial vibration ultrasonic transducer based on 2-2 piezoelectric composite material

物理学报. 2021, 70(1): 017701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201352>

应力对磁声发射和磁畴运动特性的影响

Influence of stress on magneto-acoustic emission and magnetic domain motion characteristics

物理学报. 2025, 74(14): 145101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250376>

激光辐照含铜软木制备LIG/CuO复合材料及场发射性能

Preparation and field emission properties of LIG/CuO composites from laser irradiated copper-containing cork

物理学报. 2025, 74(13): 136102 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250378>

磁电电压可调电感器的理论设计与可调性优化

Theoretical model and tunability optimization of magnetoelectric voltage tunable inductor

物理学报. 2021, 70(24): 247501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210899>