

文章编号: 1673-3193(2025)03-0278-07

J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2025, 46(3): 278-284.

# 碳纤维增强环氧电磁屏蔽材料层间互锁结构的构筑与性能调控

杨忠伟, 王壮壮, 段宏基, 赵贵哲, 刘亚青

(中北大学材料科学与工程学院, 功能高分子复合材料山西省重点实验室, 山西太原 030051)

**摘要:** 为了提高碳纤维(CF)增强环氧(EP)复合材料层间韧性的同时实现其电磁特性调控, 利用取向冷冻技术在碳纤维层间生长了负载电磁功能粒子的定向聚乙烯醇(PVA)多孔互穿结构, 与纤维形成层间互锁增韧网络; 系统研究了互锁层间结构对复合材料电磁屏蔽性能与力学性能的影响。结果表明, 引入电磁功能粒子的取向PVA多孔互穿结构能在碳纤维层间构建有效的电磁增韧网络, 从而赋予碳纤维环氧复合材料优异的屏蔽性能与层间韧性, 复合材料在X波段内的电磁屏蔽效能可达80 dB, 且能获得一定的电磁波吸收性能(平均吸收效率达到0.16); 层间互锁结构能将复合材料的层间剪切强度提高20%, 拉伸强度提升9%。

**关键词:** 碳纤维增强环氧复合材料; 电磁屏蔽; 层间互锁结构; 层间增韧; PVA互穿网络

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.09.0047

**引用格式:** 杨忠伟, 王壮壮, 段宏基, 等. 碳纤维增强环氧电磁屏蔽材料层间互锁结构的构筑与性能调控[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(3): 278-284.

YANG Zhongwei, WANG Zhuangzhuang, DUAN Hongji, et al. Construction of interlayer interlocking structure in carbon fiber reinforced epoxy electromagnetic shielding material and its property regulation [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2025, 46(3): 278-284.

## Construction of Interlayer Interlocking Structure in Carbon Fiber Reinforced Epoxy Electromagnetic Shielding Material and Its Property Regulation

YANG Zhongwei, WANG Zhuangzhuang, DUAN Hongji, ZHAO Guizhe, LIU Yaqing

(School of Materials Science and Engineering, Key Laboratory of Functional Polymer Composites of Shanxi Province, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to improve the interlayer toughness of carbon fiber (CF) reinforced epoxy (EP) composite materials while achieving the regulation of electromagnetic property, a porous interpenetrating structure of polyvinyl alcohol (PVA) loaded with electromagnetic functional particles was constructed between the carbon fiber layers by the means of directional freezing-casting approach to form an interlayer interlocking toughening network with CF fibers. The influence of interlocking interlayer structure on the electromagnetic shielding

收稿日期: 2024-09-15

基金项目: 山西省基础研究计划自然科学研究面上项目(20210302123015; 20210302123035); 国家重点研发计划(2022YFE0204200); 中国-白俄罗斯电磁环境效应“一带一路”联合实验室开放基金项目(ZBKF2022030301)

作者简介: 杨忠伟(2000-)男, 硕士生, 主要从事碳纤维增强环氧电磁屏蔽材料的研究。

通信作者: 段宏基(1983-)男, 副教授, 博士, 主要从事柔性导电聚合物复合材料成型、结构性能调控及其电磁屏蔽应用的研究。

E-mail: duanhongji@nuc.edu.cn.

performance and mechanical properties of composite materials were systematically studied. The results indicate that the introduction of electromagnetic functional particles into the oriented PVA porous interpenetrating structure can construct an effective electromagnetic toughening network between carbon fiber layers, thereby endowing the carbon fiber epoxy composite materials with excellent shielding performance and interlayer toughness. The electromagnetic shielding efficiency of the composite in the X-band can reach to as high as 80 dB with certainly improved electromagnetic wave absorption performance (average absorption efficiency can reach to 0.16), and the interlayer shear strength and tensile strength of the composite can be simultaneous increased by 20% and 9% due to the presence of interlayer interlocking structure, respectively.

**Key words:** carbon fiber reinforced epoxy composite; electromagnetic shielding; interlayer interlocking structure; interlayer toughening; PVA interpenetrating network

## 0 引言

碳纤维轻质高强、耐高温、耐腐蚀、导电性能优异<sup>[1]</sup>,是设计制备高性能电磁屏蔽复合材料首选的纤维增强材料。但是,碳纤维固有的高电导率致使碳纤维增强聚合物(CFRP)电磁屏蔽复合材料具有高反射特征,不可避免地造成了电磁波的二次污染。对碳纤维增强层进行功能粒子掺杂往往难以有效调控复合材料的电磁响应特征<sup>[2-3]</sup>,且会劣化CFRP复合材料的层间韧性,从而导致CF/EP复合材料易发生层间断裂,大大降低了CF/EP复合材料的综合性能<sup>[4]</sup>。

为提高CF/EP复合材料的层间断裂韧性,在碳纤维层间构筑多级微-纳尺度有序连接结构成为当前研究的前沿热点。Zhou等<sup>[5]</sup>通过二维层状碳化钛 $Ti_3C_2T_x$ /PVA气凝胶形成的三维骨架与碳纤维形成紧密的自互锁网络,有效提高了CF/EP复合材料的层间断裂韧性。Pan等<sup>[6]</sup>通过冰模板辅助策略在环氧树脂内构建了垂直排列的碳化硅纳米线/氮化硼多孔网络,从而通过气凝胶结构实现环氧导电、导热性能和电磁性能的有效调控,显示出气凝胶骨架结构在电磁功能调控中优异的可设计性。

受此启发,本文将碳纤维层间气凝胶互穿增韧网络的构筑与气凝胶网络的电磁功能调控相结合,利用定向冷冻在碳纤维布层间构筑PVA取向网络贯穿垂直方向并与碳纤维形成互锁增韧网络,将厚度与面内方向上的纤维相结合形成一个整体,减少纤维错位,并通过PVA网络内电磁功能粒子的引入实现其电磁响应特征与层间韧性的同时调控。本文系统研究了互锁层间结构对碳纤维增强环氧复合材料屏蔽性能与力学性能的影响,并着重讨论了层间互锁结构对CF/EP复合材料电磁屏蔽性能与力学性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

碳纤维(CF): T300, 3K, 双向编织布光威复合材料股份有限公司; 双酚A型环氧树脂(E51), 南通星辰合成材料有限公司; 固化剂1, 2-环己二甲酸酐(HHPA)和促进剂2, 4, 6-三(二甲氨基甲基)苯酚(DMP-30), 中国上海阿拉丁股份有限公司; 纳米芳纶纤维(ANF), 由实验室通过溶剂置换法自行制得<sup>[7]</sup>; 石墨烯负载四氧化三铁( $rGO@Fe_3O_4$ ), 由实验室通过水热共还原法自行制得<sup>[8]</sup>; 多壁碳纳米管(CNTs), 平均直径为20~30 nm, 长度为10~30  $\mu m$ , 成都中科时代纳米材料有限公司; 聚乙烯醇(PVA), 聚合度为1 799, 上海麦克林生化科技股份有限公司。

### 1.2 CF复合材料制备

$rGO@Fe_3O_4$ /CNT/AP/CF/EP复合材料的制备流程如图1所示。先将10 g PVA、0.3 g ANF与适量去离子水混合, 水浴加热90  $^{\circ}C$ , 磁力搅拌3 h得到质量分数为10%的AP溶液(AP溶液代表ANF与PVA的混合溶液)。将AP溶液分别与适量 $rGO@Fe_3O_4$ 和碳纳米管溶液混合, 再超声搅拌20 min, 得到 $rGO@Fe_3O_4$ 、CNT质量分数不同的 $rGO@Fe_3O_4$ /AP与CNT/AP溶液。根据 $rGO@Fe_3O_4$ 与CNT的负载量, 命名为 $rGO@Fe_3O_4$ -20、 $rGO@Fe_3O_4$ -60( $rGO@Fe_3O_4$ 在AP/ $rGO@Fe_3O_4$ 中的质量分数为60%)、CNT-10、CNT-28(CNTs在AP/CNT中的质量分数为28%)的质量分数为3%的AP(AP在混合溶液中的质量分数为3%)混合溶液。随后采用手糊法用上述溶液对碳纤维布进行逐层涂刷浸渍(下面四层涂CNT/AP溶液, 上面两层涂 $rGO@Fe_3O_4$ /AP溶液), 而后将浸渍涂刷后的纤

维布置于冷台上用液氮定向冷冻成型后, 随将其放入  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ Pa}$  冷冻干燥机中  $48\text{ h}$ , 得到  $\text{rGO}@Fe_3O_4$ - $20/\text{CNT}$ - $10/\text{AP}/\text{CF}$  与  $\text{rGO}@Fe_3O_4$ -

$60/\text{CNT}$ - $28/\text{AP}/\text{CF}$  前驱体, 对两种复合材料冷干前后称重可知碳纤维布上  $\text{CNT}/\text{AP}$  与  $\text{rGO}@Fe_3O_4/\text{AP}$  的负载量分别为  $8\%$  与  $10\%$ 。

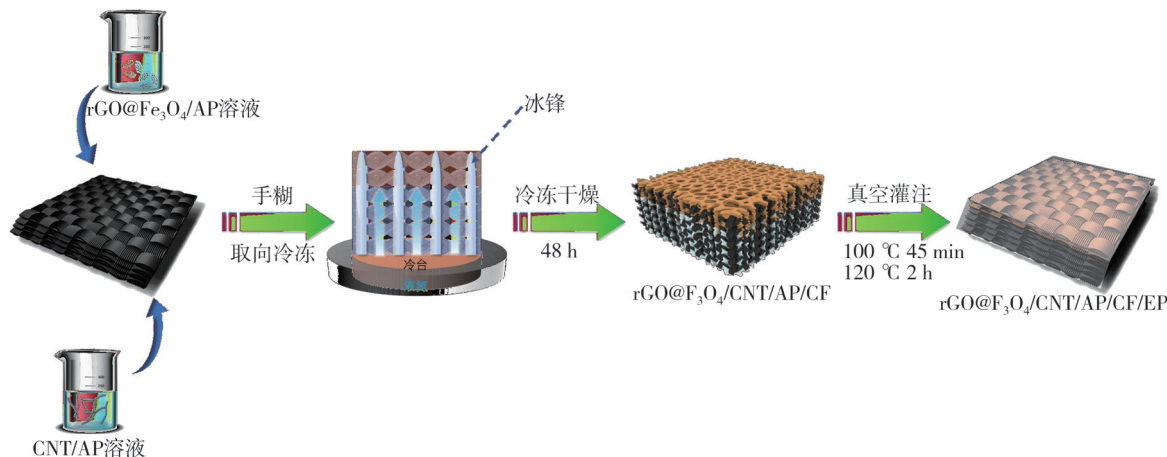


图1  $\text{rGO}@Fe_3O_4/\text{CNT}/\text{AP}/\text{CF}/\text{EP}$  复合材料的制备过程

Fig. 1 Preparation process of  $\text{rGO}@Fe_3O_4/\text{CNT}/\text{AP}/\text{CF}/\text{EP}$  composites

将环氧树脂与 EP、HHPA、DMP-30 按 100:79.6:5.4 的质量比进行混合。采用真空辅助树脂灌注法浸润前驱体。再经过  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  常压预热  $45\text{ min}$ ,  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  固化  $2\text{ h}$ , 在真空负压下获得厚度为  $1.5\text{ mm}$  的一系列  $\text{CF}/\text{EP}$  复合材料, 最后通过雕刻机将复合材料雕刻成  $200\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 、 $12\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 、 $22.86\text{ mm}\times 10.16\text{ mm}$  三种大小的样条分别进行拉伸、层间剪切、电磁性能测试。

### 1.3 性能测试与表征

采用 SU8010 场发射扫描电子显微镜 (Hitachi, 日本) 对 AP 泡沫、AP 复合泡沫及 CF 复合材料脆断面的微观形貌结构进行观察分析; 采用 AI-7000-SGD 电子万能试验机 (高铁仪器) 测试 CF 复合材料室温下的拉伸性能与层间剪切性能, 拉伸速率  $2\text{ mm}/\text{min}$ ; 采用矢量网络分析仪 (VNA, Agilent N5232A) 的波导校准 (HD-100VNAWKS) 测试 CF 复合材料在  $8.2\sim 12.4\text{ GHz}$  微波范围内 (X 波段) 的电磁参数与性能; 采用 X 射线衍射仪 (XRD, 2700B, 丹东浩元) 对  $\text{rGO}@Fe_3O_4$  和  $\text{rGO}@Fe_3O_4/\text{AP}$  组分进行分析, 扫描范围为  $5^{\circ}\sim 90^{\circ}$ , 并采用振动样品磁强计 (VSM, Microsense FCM-10) 测量其室温下的磁性能; 采用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR, Nicolet IS50, 美国) 对 AP、PVA 和 ANF 进行结构分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 层间网络的形态与结构表征

AP 泡沫及 AP 复合泡沫的微观形貌结构如图 2

所示。如图 2(a) 所示的 AP 泡沫具有垂直取向泡孔结构, 其合适的孔径尺寸有利于环氧体系的灌注, 而孔道内可以明显看到 ANF 贯穿孔道的网状结构。特殊的网状结构可以与 CF 构建贯穿整个体系的增韧互锁网络。在质量分数  $28\%$  的 CNT 粒子填充下的 AP 泡沫如图 2(b) 所示, 由红色虚线中可以看出, 泡孔内的网状结构分布变得更加密集, 且 CNT 分散在 AP 网络时还与 ANF 形成良好的缠结, 相当于在 ANF 表面覆盖了一层 CNT 导电网络, 能够在增强泡沫力学性能的同时形成贯穿孔道的导电网络, 而完善的导电网络能够赋予 CF/EP 复合材料更优异的导电性能和损耗能力, 从而获得更加优异的电磁屏蔽效能。在质量分数  $60\%$  的  $\text{rGO}@Fe_3O_4$  磁性粒子填充下的 AP 泡沫如图 2(c) 所示, 由橙色虚线框中可以看出, 孔道内形成了均匀且密集的磁性颗粒层,  $\text{rGO}@Fe_3O_4/\text{AP}$  可以通过磁损耗对电磁波进行有效衰减, 且定向多孔结构能够有效减少电磁波的反射<sup>[9]</sup>。如图 2(d) 所示, 在 FTIR 光谱中可以发现 AP 与 ANF ( $\text{C}=\text{O}\ 1\ 647\text{ cm}^{-1}$ ,  $\text{C}-\text{N}\ 1\ 541\text{ cm}^{-1}$  和  $\text{C}=\text{C}\ 1\ 513\text{ cm}^{-1}$ ) 和 PVA ( $\text{O}-\text{H}\ 3\ 303\text{ cm}^{-1}$ ,  $\text{C}-\text{H}\ 2\ 945\text{ cm}^{-1}$  和  $\text{C}-\text{O}\ 1\ 088\text{ cm}^{-1}$ ) 的拉伸振动模式红外特征吸收峰相对应, 证明 AP 泡沫成功制备。如图 2(e) 所示,  $\text{rGO}@Fe_3O_4/\text{AP}$  在  $30.10^{\circ}$ 、 $35.42^{\circ}$ 、 $43.05^{\circ}$ 、 $56.94^{\circ}$ 、 $62.52^{\circ}$ 、 $73.95^{\circ}$  处, 分别与  $Fe_3O_4$  的 (220)、(311)、(400)、(422)、(511) 和 (440) 晶面对应。结果证实了  $\text{rGO}@Fe_3O_4$  存在于  $\text{rGO}@Fe_3O_4/\text{AP}$  泡沫。如图 2(f),  $\text{rGO}@Fe_3O_4$  磁饱和和强度高达  $65\text{ emu}/\text{g}$ ,  $\text{rGO}@Fe_3O_4/\text{AP}$  磁饱和强度降低至

17 emu/g, 但磁滞回线仍显示出顺磁性特征, 这表 明其很容易对磁场做出响应, 更有利于微波吸收。

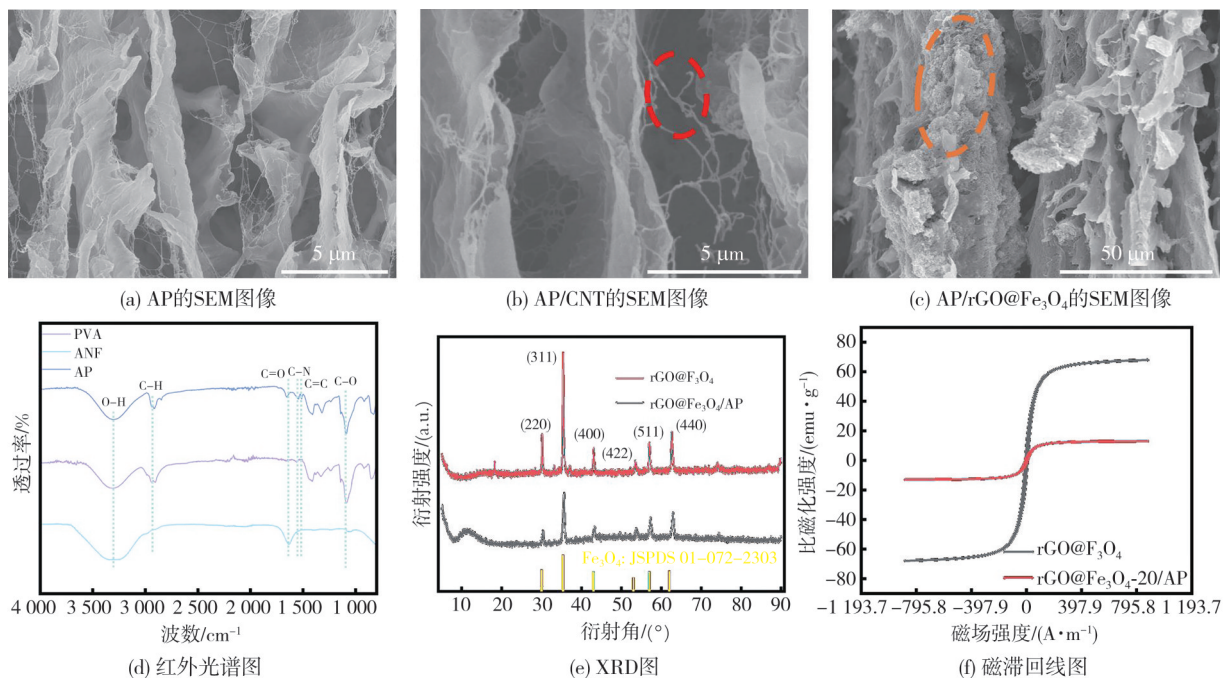


图 2 AP 复合泡沫的结构表征

Fig. 2 Structural characterization of AP composite foam

### 2.2 复合材料的形态与结构表征

CF 层间互锁网络的微观形貌结构如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可以看出, CF 与 CNT/AP 基质界面的结合良好, 并且复合泡沫与 CF 互锁形成贯穿的导电网络更有利于外部能量的耗散。此外, AP 复合泡沫穿过并桥接纤维间隙构成的互锁网络起到了“缝合线”的作用, 从而使厚度与面内方向上的纤维结合形成了一个整体, 减少了纤维错位<sup>[5]</sup>, 进而改善了 CF 复合材料层间结合差的问题。如图 3(a) 高分辨率 SEM 图像所示, CF 层间的增韧网络仍然保持着取向结构, 垂直的泡孔结构可以贯穿整个碳纤维布进而加强纤维布厚度方向的结合。优异的结构与电磁功能化策略使得 CF 层间的互锁结构能够实现电磁屏蔽调控与层间增韧。

CF/AP/CNT-28/EP 断裂的微观形貌结构如图 3(b)~图 3(c) 所示。由图 3(b) 可以看出, 断裂表面并不平整, 而是有许多裂纹和塑性变形, 这表明裂纹在层间扩展的过程中发生了多次偏转, 可以有效吸收断裂能。此外, 复合材料中的 CF 几乎完全被基质覆盖, 表明内聚破坏占主导地位。如图 3(c) 所示, PVA 增韧网络能促进阶梯裂纹的产生, 但更重要的是阶梯状裂纹增加了树脂基体的表面积, 导致基体的塑性变形也更加剧

烈<sup>[10-13]</sup>。在基体粗糙的断裂表面能够观察到一些微裂纹和拉出气凝胶骨架形成的孔洞<sup>[12]</sup>。所有独特的断裂形貌都可以耗散更多断裂能, 从而实现了基体的有效增韧, 进而提高了复合材料的层间结合。

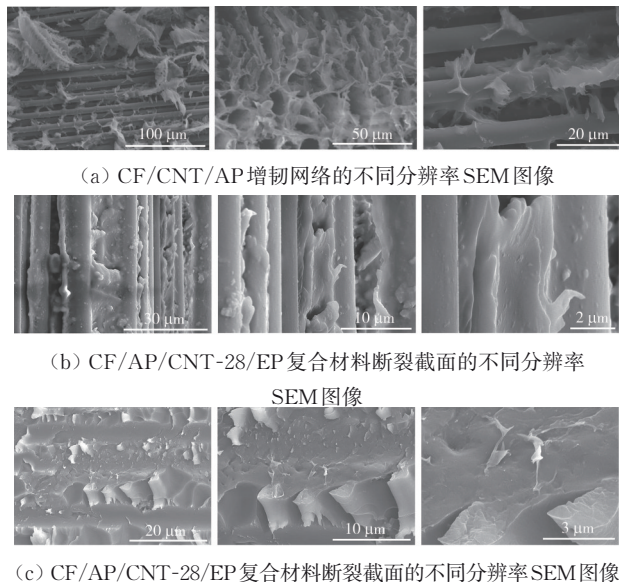


图 3 CF 复合材料的 SEM 图像

Fig. 3 SEM image of CF composite material

### 2.3 复合材料的电磁性能

为了进一步分析电磁增韧网络对 CF 复合材

料电磁屏蔽性能的影响,对不同CF复合材料在X波段内的总屏蔽效能及其吸收、反射、透过率进

行计算分析,并测试表征其介电性能和磁导率参数,结果如表1与图4所示。

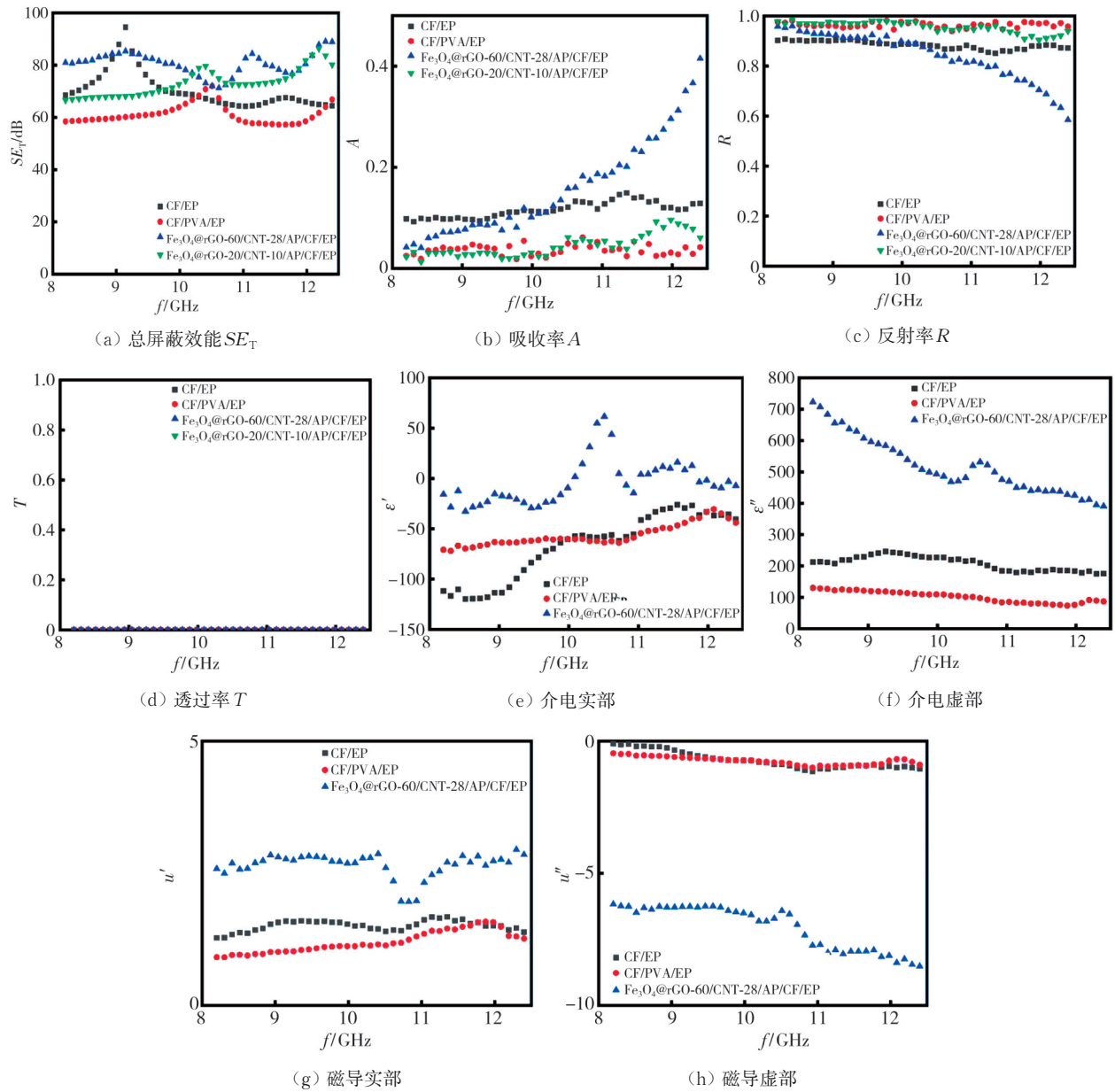


图4 不同CF复合材料在X波段的电磁性能对比

Fig. 4 Comparison of electromagnetic properties of different CF composites in X-band

表1 不同碳纤复合材料的电磁性能对比

Tab. 1 Comparison of electromagnetic properties of different carbon fiber composites

CF 复合材料	$SE_T/\text{dB}$	吸收率 $A$	反射率 $R$
CF/EP	70.42( $\pm 6.93$ )	0.12( $\pm 0.01$ )	0.88( $\pm 0.02$ )
CF/PVA/EP	61.10( $\pm 3.73$ )	0.04( $\pm 0.01$ )	0.96( $\pm 0.01$ )
rGO@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -20/CNT-10/AP/CF/EP	73.10( $\pm 5.11$ )	0.04( $\pm 0.02$ )	0.96( $\pm 0.02$ )
rGO@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -60/CNT-28/AP/CF/EP	80.49( $\pm 4.27$ )	0.16( $\pm 0.09$ )	0.84( $\pm 0.09$ )

由表1与图4(a)~图4(d)可见,碳纤维本身优异的导电性使其对电磁波具有极高的反射效率,

因而保证了CF复合材料优异的屏蔽性能,CF/EP的平均屏蔽效能可达70 dB;对CF层间构筑增韧网络后,由于PVA基质与CF结合良好,CF表面被包裹了一层绝缘层导致整体导电性能变弱,但平均屏蔽效能仍能达到60 dB,仍然满足常规商用电磁屏蔽材料的最低屏蔽效能( $>20$  dB)要求。

通过对CF层间AP增韧网络的电磁功能化设计形成了导电通路,使得低粒子含量的rGO@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -20/CNT-10/AP/CF/EP相较于CF/PVA/EP与CF/EP具有更高的电磁屏蔽效能,从而能够更有效地阻挡

电磁波穿透。高粒子含量所形成的电磁增韧网络可以通过磁滞损耗与介电损耗对电磁波进行有效衰减, rGO@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-60/CNT-28/AP/CF/EP 复合材料在 X 波段内的平均屏蔽效能最终可达 80 dB, 平均 A 值达到了 0.16(最高可达 0.4), 而吸收率 A 值随频率增大的原因是由于 rGO@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 在高频涡流损耗与介电损耗的协同作用下增强了复合材料对电磁波的衰减能力, 从而提升了高频吸收性能。通过对比不同粒子含量的 CF 复合材料的屏蔽效能可知, 碳纤维布上电磁粒子的负载量越多越有利于复合材料对电磁波的吸收和损耗, 相较于 CF/EP 的电磁性能, 电磁增韧网络能够一定程度上调控复合材料电磁响应特征。

为了进一步证明 CF 复合材料的耗散机制, 如图 4(e)~图 4(h)所示, 由于 CF 复合材料的高导电性, 导致测试时介电常数的实部与磁导率虚部为负值, 但可以看到 CF/EP 和 CF/PVA/EP 复合材料几乎不存在有效的磁滞损耗能力, 因而对入射电磁波损耗的形式主要为电阻损耗, 而 rGO@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-60/CNT-28/AP/CF/EP 具有明显的磁滞损耗能力, 因此能够通过磁滞损耗和电阻损耗两种形式对入射电磁波进行耗散吸收<sup>[14]</sup>。

### 2.4 复合材料力学性能

由表 2 与图 5(a) 可以看出, 得益于碳纤维层间的增韧网络, CF/PVA/EP 与 CF/AP/CNT-28/EP 的层间剪切强度相较于 CF/EP 提升了 20% 左右, 说明贯穿纤维布层间的泡孔网络能够有效提升碳纤维增强环氧复合材料的层间结合, 进而改善 CF 复合材料原本薄弱的层间韧性。

表 2 不同碳纤维复合材料的力学性能对比

Tab. 2 Comparison of mechanical properties of different carbon fiber composites

CF 复合材料	层间剪切强度/MPa	拉伸强度/MPa
CF/EP	38.30	513.88
CF/PVA/EP	46.91	592.62
CF/AP/CNT-28/EP	46.08	562.37

由表 2 与图 5(b) 可以看出, CF/PVA/EP 与 CF/AP/CNT-28/EP 的拉伸强度相较于 CF/EP 分别提升了 15% 和 9%, 说明了利用定向冷冻调控 PVA 在 CF 层间构筑取向增韧网络以改善层间韧性和通过在 PVA 增韧网络内调控电磁粒子以实现电磁功能化的方案的可行性, 此方案能在不降低甚至小幅提升 CF/EP 复合材料面内力学强度的情况下改善层间结合, 并实现其电磁特性调控。

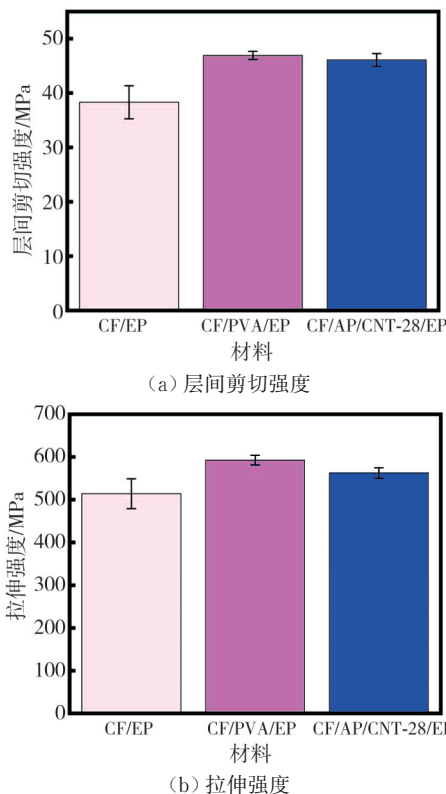


图 5 不同 CF 复合材料的力学性能对比  
Fig. 5 Comparison of mechanical properties of different CF composites

### 3 结 论

1) 利用取向冷冻在 CF 层间定向生长了 PVA 多孔互穿结构, 其与纤维形成了层间互锁增韧网络; 通过在 PVA 互穿网络内引入电磁功能粒子实现了层间互锁增韧网络的电磁功能调控; 最后通过环氧真空灌制备了 rGO@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNT/AP/CF/EP 复合材料, 实现了 CF/EP 复合材料层间互锁结构的构筑与电磁功能的有效调控。引入电磁功能粒子的取向 PVA 多孔互穿结构可以在碳纤维层间构建有效的电磁增韧网络, 从而赋予碳纤维环氧复合材料优异的屏蔽性能与层间韧性。复合材料在 X 波段内的平均电磁屏蔽效能可达 80 dB, 且能获得一定的电磁波吸收性能(平均 A 值可达 0.16); 层间互锁结构能将复合材料的层间剪切强度提高 20%, 拉伸强度提升 9%。

2) CF 层间构筑的电磁互锁网络能赋予 CF/EP 更加优异的导电能力与屏蔽性能, 其原因在于: ① CF 与 CNT/AP 基质界面的良好结合, 并且 AP 复合泡沫与 CF 互锁形成了贯穿的导电网络, 而完善的导电网络能够赋予 CF/EP 复合材料更加优异的导电性能和损耗能力, 从而获得更加优异的电磁屏蔽效能; ② 具有磁滞损耗与介电损耗能力的 AP 电磁网络能对入射电磁波进行有效的吸收, 从而有效提升了复

合材料的屏蔽性能。

3) CF层间构筑的AP增韧互锁网络使CF在厚度方向上成为一个整体,能在促进阶梯裂纹产生的同时增强界面的塑性变形与裂纹偏转,进而耗散更多的断裂能,实现了对基体的有效增韧,并且能在不降低甚至小幅提升CF复合材料面内力学强度的同时有效改善材料层间的结合。

#### 参考文献:

- [1] 张春艳,任焜,常英杰,等. 多层纤维增强环氧树脂复合材料结构设计与电磁屏蔽效能预测模型[J]. 塑料科技, 2023, 51(1): 7-13.  
ZHANG Chunyan, REN Xuan, CHANG Yingjie, et al. Structural design and electromagnetic shielding efficiency prediction model of multi-layer fiber reinforced epoxy resin composite[J]. *Plastics Science and Technology*, 2023, 51(1): 7-13. (in Chinese)
- [2] CHANG Y, HAO R, YANG Y, et al. Progressive conductivity modular assembled fiber reinforced polymer composites for absorption dominated ultraefficient electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 260: 110766.
- [3] REN X, HAO R, YANG Y, et al. A facile and green strategy to achieve metallized woven carbon fiber through the triple roles of dopamine in in-situ thermal reduction of Ag[J]. *Composites Communications*, 2023, 40: 101585.
- [4] 刘新,陈铎,何辉永,等. 热塑性颗粒-无机粒子协同增韧碳纤维增强环氧树脂复合材料[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1904-1910.  
LIU Xin, CHEN Duo, HE Huiyong, et al. Synergistic toughening of thermoplastic particles-inorganic particles to carbon fiber reinforced epoxy resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 1904-1910. (in Chinese)
- [5] ZHOU Z, ZHENG N, SUN W. Self-interlocked MXene/polyvinyl alcohol aerogel network to enhance interlaminar fracture toughness of carbon fibre/epoxy composites[J]. *Carbon*, 2023, 201: 60-70.
- [6] PAN D, YANG G, ABO-DIEF H M, et al. Vertically aligned silicon carbide nanowires/boron nitride cellulose aerogel networks enhanced thermal conductivity and electromagnetic absorbing of epoxy composites[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 118.
- [7] YANG B, WANG L, ZHANG M Y, et al. Timesaving, high-efficiency approaches to fabricate aramid nanofibers[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(7): 7886-7897.
- [8] SHENG A, REN W, YANG Y, et al. Multilayer WPU conductive composites with controllable electro-magnetic gradient for absorption-dominated electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 129: 105692.
- [9] XU Y, LIN Z, YANG Y, et al. Integration of efficient microwave absorption and shielding in a multistage composite foam with progressive conductivity modular design[J]. *Materials Horizons*, 2022, 9(2): 708-719.
- [10] 段裕熙,张凯,徐伟芳,等. 碳纤维复合材料力学性能研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(21): 36-45.  
DUAN Yuxi, ZHANG Kai, XU Weifang, et al. Research progress on mechanical property of carbon fiber composites[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(21): 36-45. (in Chinese)
- [11] ZHU H, FU K, HUANG T, et al. Highly conductive CFRP composite with Ag-coated T-ZnO interlayers for excellent lightning strike protection, EMI shielding and interlayer toughness[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 279: 111448.
- [12] 李超,颜春,王翔,等. 连续碳纤维增强环氧树脂基复合材料增韧改性的研究进展[J]. 塑料科技, 2016, 44(4): 100-105.  
LI Chao, YAN Chun, WANG Xiang, et al. Research progress of toughening modification of continuous carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2016, 44(4): 100-105. (in Chinese)
- [13] QIU B, QIU B, SUN T, et al. Constructing a multiscale rigid-flexible interfacial structure at the interphase by hydrogen bonding to improve the interfacial performance of high modulus carbon fiber reinforced polymer composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 229: 109672.
- [14] 褚文雷,王莹,王亚辉,等. 柠檬酸盐衍生 $Fe_xCo_y/C$ 复合材料吸波性能研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 572-578.  
CHU Wenlei, WANG Ying, WANG Yahui, et al. Absorption properties of citrate derived  $Fe_xCo_y/C$  composites[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2018, 39(5): 572-578. (in Chinese)