

3D石墨烯气凝胶复合吸波材料的研究现状

乔明涛 齐靖泊 王佳妮 史金轩 李祥 雷琬莹 魏剑

Recent progress on 3D graphene aerogel based microwave absorbing materials

QIAO Mingtao, QI Jingbo, WANG Jiani, SHI Jinxuan, LI Xiang, LEI Wanying, WEI Jian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230815.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纳米管-石墨烯气凝胶的制备与性能

Preparation and properties of CNTs-graphene aerogel

复合材料学报. 2017, 34(10): 2296-2303 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161129.002>

新型碳基磁性复合吸波材料的研究进展

Research progress of new carbon based magnetic composite electromagnetic waveabsorbing materials

复合材料学报. 2020, 37(12): 3004-3016 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200825.002>

石墨烯/酞菁铁复合材料的制备与吸波性能

Preparation and wave absorption properties of graphene/iron phthalocyanine composites

复合材料学报. 2019, 36(1): 39-50 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180524.002>

不同氧化程度氧化石墨烯/聚乙烯醇气凝胶对亚甲基蓝的吸附

Adsorption of methylene blue by graphene oxide/polyvinyl alcohol aerogels with different oxidation degrees

复合材料学报. 2021, 38(9): 2795-2802 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201203.002>

纤维素纳米纤维-还原氧化石墨烯/聚苯胺气凝胶柔性电极复合材料的制备与性能

Preparation and properties of cellulose nanofiber-reduced graphene oxide/polyaniline composite aerogels as flexible electrodes

复合材料学报. 2019, 36(7): 1583-1590 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181121.001>

聚合物基电磁屏蔽复合材料的结构设计性能研究进展

Research progress of structure design and performance of polymer-based electromagnetic shielding composites

复合材料学报. 2021, 38(5): 1358-1370 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201208.003>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

3D 石墨烯气凝胶复合吸波材料的研究现状

乔明涛*, 齐靖泊, 王佳妮, 史金轩, 李祥, 雷琬莹, 魏剑

(西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 西安 710055)



分享本文

摘要: 随着信息技术的发展, 电磁污染问题日益严重, 开发具有“薄、轻、宽、强”特性的高性能吸波材料成为当务之急。石墨烯高电导率、高比表面积、低密度的优良特性受到研究人员的广泛关注。为解决单一石墨烯材料易引起的阻抗失配及损耗机制单一问题, 引入其他组分制备多元复合材料, 改善阻抗匹配、创造多样化的损耗机制是通用的设计方案。本文简要讨论了吸波机制, 分述了介电型、磁复合型、有序型、压力诱导型 4 个类别, 并通过材料选择(金属、陶瓷、铁氧体、导电聚合物、生物质材料等)、结构设计、机制分析等角度, 结合领域内近年来的研究成果, 总结了石墨烯基气凝胶吸波材料的研究进展, 并对未来研究方向进行展望。

关键词: 石墨烯; 气凝胶; 吸波; 结构设计; 阻抗匹配; 电磁污染

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)02-0548-13

Recent progress on 3D graphene aerogel based microwave absorbing materials

QIAO Mingtao*, QI Jingbo, WANG Jiani, SHI Jinxuan, LI Xiang, LEI Wanying, WEI Jian

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: With the development of information technology, electromagnetic pollution has become increasingly severe. Therefore, the development of high-performance microwave absorbing materials with "thin, light, wide, and strong" characteristics has become a top priority. Graphene's excellent properties, such as high conductivity, high specific surface area, and low density, have attracted widespread attention from researchers. To solve the problem of impedance mismatch and single loss mechanism caused by single graphene material, other components are introduced to prepare multi-component composite materials, which improve impedance matching and create diverse loss mechanisms, making it a common design solution. This paper briefly discusses the absorption mechanism, describing four categories: Dielectric type, magnetic composite type, ordered type, and pressure-induced type. Through material selection (metals, ceramics, ferrites, conductive polymers, biomass materials, etc.), structural design, mechanism analysis, and combining with recent research results in the field, the research progress of graphene aerogel based microwave absorbing materials is summarized, and future research directions are also proposed.

Keywords: graphene; aerogel; microwave absorption; structure design; impedance matching; electromagnetic pollution

随着电子通信技术的广泛应用, 特别是卫星通信、宽带雷达、无线网络及多波段、大功率电子设备的普及, 便利了人们的生活, 但同时导致

了严峻的电磁干扰问题, 不仅对高度敏感的电子设备造成损坏, 而且对人的身体健康也有显著的负面影响^[1]。设计和制造新型高性能微波吸收材

收稿日期: 2023-06-12; 修回日期: 2023-07-19; 录用日期: 2023-07-29; 网络首发时间: 2023-08-15 17:29:36

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230815.001>

基金项目: 陕西省教育厅重点科学研究计划项目 (22 JY037; 22 JY039)

Key Scientific Research Program of Shaanxi Provincial Department of Education (22 JY037; 22 JY039)

通信作者: 乔明涛, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为核壳结构电磁复合纳米材料的构筑与功能性研究、MOF 基衍生材料的结构设计及其在锂离子电池正极材料方面的应用研究 E-mail: mtqiao@xauat.edu.cn

引用格式: 乔明涛, 齐靖泊, 王佳妮, 等. 3D 石墨烯气凝胶复合吸波材料的研究现状 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 548-560.

QIAO Mingtao, QI Jingbo, WANG Jiani, et al. Recent progress on 3D graphene aerogel based microwave absorbing materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2): 548-560(in Chinese).

料以保护电子设备和人类免受电磁干扰和辐射污染已成为当代社会关注的重要问题。与此同时,电磁发射频率范围的扩展及对集成智能和多功能的电子器件的需求不断增加,进一步推动了宽吸收带、轻量化、低成本、高热稳定性和耐腐蚀性的微波吸收材料的发展^[2-3]。传统吸波材料由于自身特性,在应用中均存在一定的局限性^[4]。金属材料通常具有较高的电导率,但其作为吸波材料,阻抗匹配较差,电磁损耗形式单一,吸波性能不够理想。陶瓷基吸波材料耐腐蚀性好,力学强度高,损耗机制也较丰富,但密度大、生产工艺复杂等缺点,限制了陶瓷基材料的大规模制备。铁氧体有着较好的吸波性能和吸收带宽,在行业内有着广泛的应用。然而随着人们对吸波材料要求的不断提高,其匹配厚度大、耐腐蚀差等问题也日渐凸显。于是各种纳米材料,特别是碳基复合材料,作为传统吸波材料的替代候选,已经被成功制备并表现出优异的微波吸收性能。其中,石墨烯气凝胶凭借高电导率、结构可调、耐腐蚀性好等特点,获得诸多学者青睐,被认为是极具竞争力的高性能吸波材料。石墨烯气凝胶是一种由石墨烯构成的三维多孔结构材料,极高的孔隙率(最高可达 90% 以上)赋予了其超低的密度(0.16 mg/mL)^[5]。同时入射电磁波在气凝胶内部多次反射,延长了反射路径,有利于吸波性能的提高。此外,不同类型的气凝胶有着不同的吸波性能及应用环境,本文结合了领域内近年来的研究成果,通过对介电型、磁复合型、有序型、压力诱导型 4 种类别的分析讨论,总结了石墨烯基气凝胶吸波材料的研究进展。

1 石墨烯气凝胶吸波机制及应用

1.1 吸波机制

研究电磁吸波性能实质就是研究材料对电磁波的吸收及耗散作用。当入射电磁辐射冲击吸波材料时,一部分电磁波被反射,一部分被材料耗散,其余的电磁波会透过材料^[6]。根据经典电磁学理论,电磁波的反射取决于界面处的两种材料的波阻抗的差异大小,电磁波的损耗取决于材料对电磁波的介电损耗和磁损耗能力^[7]。相对复介电常数 $\epsilon_r(\epsilon_r = \epsilon' - i\epsilon'')$ 和相对复磁导率 $\mu_r(\mu_r = \mu' - j\mu'')$ 中^[8], ϵ' 和 μ' 分别为介电常数和磁导率的实部,与能量的存储相关; ϵ'' 和 μ'' 分别为介电常数和磁导

率的虚部,与能量耗散相关, i 、 j 分别为介电和磁部分的虚部向量。介电损耗正切 $\tan \delta_e(\tan \delta_e = \epsilon''/\epsilon')$ 和磁损耗正切 $\tan \mu_m(\tan \mu_m = \mu''/\mu')$ 分别表示吸波材料的介电损耗和磁损耗能力。介电损耗能力主要来自于电导损耗和极化损耗,极化损耗又可分为离子极化、电子极化、偶极定向极化和界面极化^[9]。磁损耗主要通过畴壁共振、自然铁磁共振、涡流损耗和磁滞损耗来实现^[10]。

吸收型和干涉型是微波吸收中两种常见的机制。吸收型机制是指当微波能量通过材料时被吸收并转化为其他形式的能量,如热能。这种机制通常涉及材料中微观粒子的运动。吸收材料通常具有一定的电导率和磁导率,能够吸收微波能量并将其耗散。干涉型吸波材料通常采用多层或复合结构,通过特定的材料选取和结构设计,使电磁波在传播过程中发生干涉现象,从而提高吸波性能,减少反射。电磁波的反射由表面反射和多次反射组成,入射微波能通过电磁场与材料内部结构的相互作用在材料内部产生加热,将入射电磁波转化为热能,导致能量耗散。多次反射延长了电磁波的传播路径,进一步增强了吸波剂的电磁吸收能力^[11]。因此,促进电磁波吸收的基本方法有两种,一种是通过调节电磁参数,增强电磁波吸收能力;另一种是通过调节吸收剂的纳米结构,如孔隙、多层、多组分等,增加电磁波在吸收剂中的传播路径。

1.2 石墨烯气凝胶在吸波领域的应用

石墨烯是一种新型的二维碳纳米材料,碳原子通过 sp^2 杂化紧密排列形成蜂巢状晶体结构^[12]。在石墨烯结构中存在着丰富 π 键, π 键共轭后会形成一个共轭大 π 键,石墨烯中的共轭体系有利于电子迁移,使其具有优异的电导特性^[13]。得益于极大的比表面积(2 630 m²/g)、力学强度(弹性模量 1 TPa)和优异的载流子迁移率[200 000 cm²/(V·s)]^[14],石墨烯自问世以来,便受到广泛关注。许多学者对石墨烯的微波吸收特性进行了详细的研究。Zhang 等^[15]通过冷冻干燥制备了石墨烯泡沫(GF)并对其性能进行了表征。不同压缩应变下 GF 的反射损耗(R_f)曲线如图 1 所示,无添加的 GF 基本可以覆盖 C(4~8 GHz)、X(8~12 GHz)、Ku(12~18 GHz)波段,覆盖了测试波段的 80% 以上,最大反射损耗(R_f)值约为-28 dB。此外,GF 有着良好的压缩应变能力。随着压应变的增大,内部孔隙形貌发

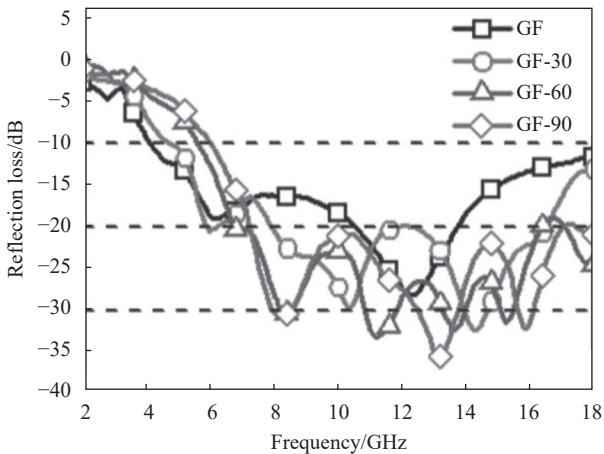


图 1 不同压缩应变下石墨烯泡沫 (GF) 的反射损耗 (R_L) 曲线^[15]

Fig. 1 Reflection loss (R_L) curves of graphene foam (GF) under different compressive strains^[15]

生改变, 基体密度增大, 相应的吸波性能 (MA) 也得到了不同程度提升。大多数石墨烯是用化学氧化还原法制备的。用该方法制备的石墨烯具有许多结构缺陷和残留的含氧官能团。这些缺陷和官能团产生了缺陷极化弛豫和官能团电子偶极极化弛豫, 一定程度上有利于提高石墨烯的吸波性能^[16]。根据电磁能量转换原理, 介电损耗和磁损耗之间的匹配决定了电磁波吸收器的反射和衰减特性。然而, 石墨烯是非磁性的, 其电磁波吸收性能主要归因于介电损耗。此外, 石墨烯材料的高导电性也会限制其对电磁波的吸收^[3]。

为了解决单一石墨烯材料的界面阻抗失配问题, 引入其他有损耗材料已被广泛研究, 作为提高其 MA 性能的必要解决方案。提高石墨烯基复合材料吸波能力的关键是调节其电磁特性, 改善阻抗匹配, 创造多样化的损耗机制^[17]。石墨烯气凝胶具有高孔隙率、大的比表面积等特点, 使其可以作为基体, 与其他材料 (如金属、铁氧体、聚合物等) 进行复合, 复合材料与石墨烯气凝胶相结合形成导电网络, 可以提高材料的电导率, 增强电导损耗^[18], 石墨烯气凝胶宏观图片和电磁波吸收机制示意图如图 2 所示; 此外, 多组分复合形成了大量非均质界面, 在外电场的作用下, 电子或离子易在界面处聚集, 加强了界面极化^[19], 有效提高了材料的吸波能力, 改善阻抗匹配。同时, 其独特的三维多孔网状结构, 可使电磁波在空腔中进行多次反射^[20], 延长了电磁波的反射路径, 进一步提高了材料的电磁损耗能力, 这也是石墨烯气凝胶区别于其他吸波材料的主要结构优

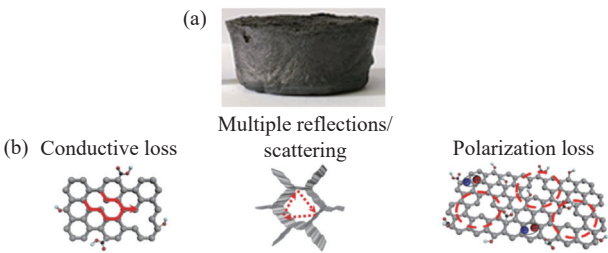


图 2 石墨烯气凝胶 (GA) 宏观图片 (a) 和电磁波吸收机制示意图 (b)^[18]

Fig. 2 Macroscopic pictures (a) and schematic diagram of electromagnetic wave absorption mechanism (b) of graphene aerogel (GA)^[18]

势, 在吸波领域有着广阔的应用前景。本文主要围绕介电型、磁组分复合型、有序型、压力诱导型 4 个方面进行论述, 总结了 3D 石墨烯气凝胶复合吸波材料的研究进展。

2 石墨烯基气凝胶吸波材料

石墨烯气凝胶有着高电导率、高比表面积等优良特性, 可以吸收从微波到红外线的各种频段的电磁波。其吸波性能也可通过调节其孔径、厚度等参数来进行优化。除此之外, 低密度与良好的高温耐受性使其具有广泛的应用前景^[21]。相应地, 石墨烯气凝胶自身无磁性、阻抗匹配差等特性也对其应用有所局限。作为纳米材料, 其在低频范围的吸波性能也不尽如人意。因此, 将石墨烯与其他介电组分或磁性组分结合, 制备复合气凝胶材料是该领域学者的常用方法。阻抗匹配的优化和更多损耗机制的引入, 可大幅提高石墨烯气凝胶的吸波能力^[22]。此外, 层状有序型气凝胶和压力诱导型气凝胶进一步丰富了石墨烯气凝胶的应用场景。通过冰模板法制备的有序气凝胶具有多孔结构和高比表面积, 可以实现对某一方向电磁波的高效吸收; 压力诱导型气凝胶可以通过调节外加压力的大小和周期来调控气凝胶的孔径、孔隙度等结构参数, 从而实现对其吸波性能的调控。

2.1 介电组分复合石墨烯气凝胶吸波材料

介电损耗与电极化有关, 外加电场的快速转换使介质反复极化, 从而产生“摩擦”, 使电能转化为热能, 进而对电磁波进行耗散^[23]。介损会产生德拜弛豫、电子原子共振和界面电荷极化引起界面弛豫。电导损耗是电流由于载流子的存在而引起的, 电导损耗与材料的导电性有关。电导率越高, 损耗越大, 但电导率过大也会引起阻抗失配^[24]。

Li 等^[25]通过快速冷冻配合经典纺丝路线合成了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@氧化石墨烯杂化气凝胶微球

(M@GAMS) (图 3(a))。基于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 与氧化石墨烯 (Graphene oxide, GO) 的电导率差异, 复合材料产生了大量的异质界面和丰富的表面基团, 有效强化了其界面极化能力, 改善了阻抗匹配。独特的叠层多孔结构赋予了吸收器轻质的特点, 还延长了电磁波的反射路径。优化后的 M@GAMS 在 14.2 GHz、厚度仅为 1.2 mm 时的反射损耗 (R_L) 为 -49.1 dB, 填充量为 10.0wt%。更重要的是, 厚度为 5.0 mm 的 M@GAMS 在 2.1 GHz 时, R_L 达到 -38.3 dB, 在低频下表现出了良好的吸波性能。

Wang 等^[26] 通过水热法和原位聚合技术合成了由共价键结合增强的聚苯胺/石墨烯气凝胶

(Polyaniline/graphene aerogel, PANI/GA) (图 3(b))。PANI/GA 的比表面积可达 $803.8\text{ m}^2/\text{g}$, 平均孔径约为 40.4 nm。GA 的高孔隙率有助于防止石墨烯的积累, 加速电子传导路径的扩展和电荷转移; 另一方面, PANI/GA 的阻抗匹配和协同效应的改善导致了电磁波的强吸收; 此外, PANI 纳米棒均匀垂直生长在 GA 表面, 与多孔 GA 之间的内部空隙会导致多次反射和界面极化增强, 这些都有利于增强电磁波吸收能力。在匹配厚度为 3 mm 的情况下 PANI/GA 在 11.2 GHz 的 R_L 最强, 为 -42.3 dB, 对应的吸收带宽 (EAB) 为 3.2 GHz (8.7~11.9 GHz)。

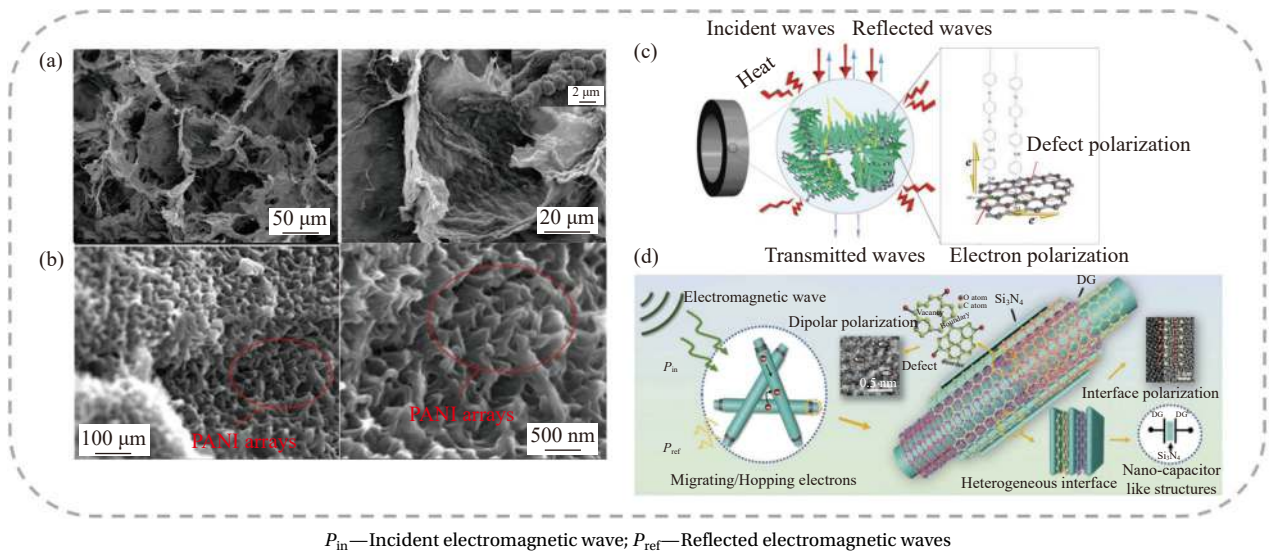


图 3 复合气凝胶的 SEM 图像及其微波吸收机制示意图: (a) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@氧化石墨烯杂化气凝胶微球 (M@GAMS)^[25]; (b), (c) 聚苯胺 (PANI)/GA^[26]; (d) 石墨烯芯 (DG)/ Si_3N_4 气凝胶^[27]

Fig. 3 SEM images of composite aerogel and schematic diagram of its microwave absorption mechanism: (a) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@graphene oxide (M@GAMS)^[25]; ((b), (c) Polyaniline (PANI)/GA^[26]; (d) Defect-engineered chemical vapor deposition graphene (DG)/ Si_3N_4 aerogel^[27]

Liang 等^[27] 基于化学气相沉积 (CVD) 技术设计的多层核壳交替纳米结构, 以缺陷工程制备的石墨烯芯 (Defect-engineered CVD graphene, DG) 作为损耗相, Si_3N_4 层作为阻抗匹配层, 交变多层构型形成纳米电容器结构 (图 3(d))。通过优化 DG/ Si_3N_4 单元的交替数量, 强化了材料的界面极化和介电常数的频散行为, 从而提高了电磁波的存储及损耗能力, 最低反射损耗可达 -77.3 dB。二元杂化材料在厚度为 2.7 mm 时达到了 8.0 GHz 的 EAB。此外, DG/ Si_3N_4 还具有良好的热稳定性和耐酸碱性能。

介电组分的引入, 提高了材料的电导损耗。丰富的异质界面, 增强了空间电荷极化作用, 有

利于材料吸波能力的提升^[28]。此外, 部分纤维、导电聚合物等组分, 在与石墨烯复合过程中, 可像“桥梁”般附着在石墨烯片层上或搭接在片层间, 完善了石墨烯三维导电网络^[29], 使复合材料表现出优异的性能。

2.2 磁性组分复合石墨烯气凝胶吸波材料

众所周知, 阻抗匹配对吸波材料的性能有着重要影响。石墨烯自身有着很高的电导率, 复合介电材料更进一步提高了材料的介电损耗能力。但过高的电导率易导致阻抗失配, 对电磁波造成大量的反射, 影响吸波性能^[30]。因此, 将石墨烯与介电损耗和磁损耗组分结合, 不仅有利于阻抗匹配、增加界面极化, 而且可以提高电磁损耗能

力。磁性金属(如 Fe、Co、Ni 及其相关合金)和金属氧化物(如 γ - Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、NiO、 CoFe_2O_4)等,通常具有大的饱和磁化强度、高的斯诺克极限、兼容的介电损耗,使其能够满足高性能吸波材料的设计要求^[31]。因此,近年来报道了大量具有高 MA 性能的石墨烯基磁性复合材料。

Xu 等^[32]通过水热法和原位热解相结合的方法,制备了 GA@Ni 复合材料,该材料具有低密度、吸波能力强的优良特性。石墨烯的存在降低了 Ni 纳米颗粒的饱和磁化强度,复合材料的剩磁和矫顽力均接近于 0,表现出超顺磁行为。裸 Ni 纳米晶和 GA 的吸收能力较弱,不能作为理想的微波吸收体。当超顺磁 Ni 纳米颗粒修饰 GA 时,GA@Ni 复合材料的 MA 容量显著提高。这可以归因于磁损耗和介电损耗的协同作用。复合材料增强的协同效应取决于多个因素,包括超细 Ni 纳米晶的磁损耗、石墨烯薄片的介电损耗及石墨烯薄片与 Ni 纳米晶之间的界面极化等。在频率为 11.9 GHz、样品厚度为 3.0 mm 的情况下,GA@Ni 的最小反射损耗(R_{Lmin})值可达 -52.3 dB。有效吸收带宽在 2.6 mm 处可达 6.5 GHz (11.3~17.8 GHz)。

Zhang 等^[33]采用二茂铁作为碳源和铁源,通

过溶剂热法和退火处理合成了 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C}$ /还原氧化石墨烯($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C/rGO}$)纳米复合材料(图 4)。在溶剂热反应过程中,二茂铁通过铁原子的氧化分解,在氧化石墨烯载体上生长出磁铁矿纳米颗粒。同时,二茂铁中环戊二烯环原位热解生成的富碳大分子有机基质完全包裹了磁铁矿纳米颗粒。最后,在退火处理下,富碳有机基质和氧化石墨烯分别转化为无机碳和还原氧化石墨烯。rGO 与 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C}$ 、 Fe_3O_4 与碳壳之间形成异质界面产生界面极化,使吸收体存在较大的表面积、众多的官能团和缺陷,会产生包括界面极化和偶极极化损失在内的极化损失,增强 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C/rGO}$ 纳米复合材料的微波吸收性能。在多种微波吸收机制的协同作用下, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C/rGO}$ 纳米复合材料具有显著的微波吸收性能,在 3.57 mm 厚度下, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C/rGO-20}$ (GO 用量为 20 mg)的 R_{Lmin} 值为 -59.23 dB, EAB 为 6.72 GHz。结果表明,通过多组分材料的组合,可以合成具有较强吸收率和宽带吸收率的吸附剂。

Wang 等^[34]以尿素为 N 源,设计了氮掺杂的还原氧化石墨烯(N-rGO)气凝胶,将 CoFe_2O_4 纳米颗粒嵌入到石墨烯基质中,通过简便的溶剂热

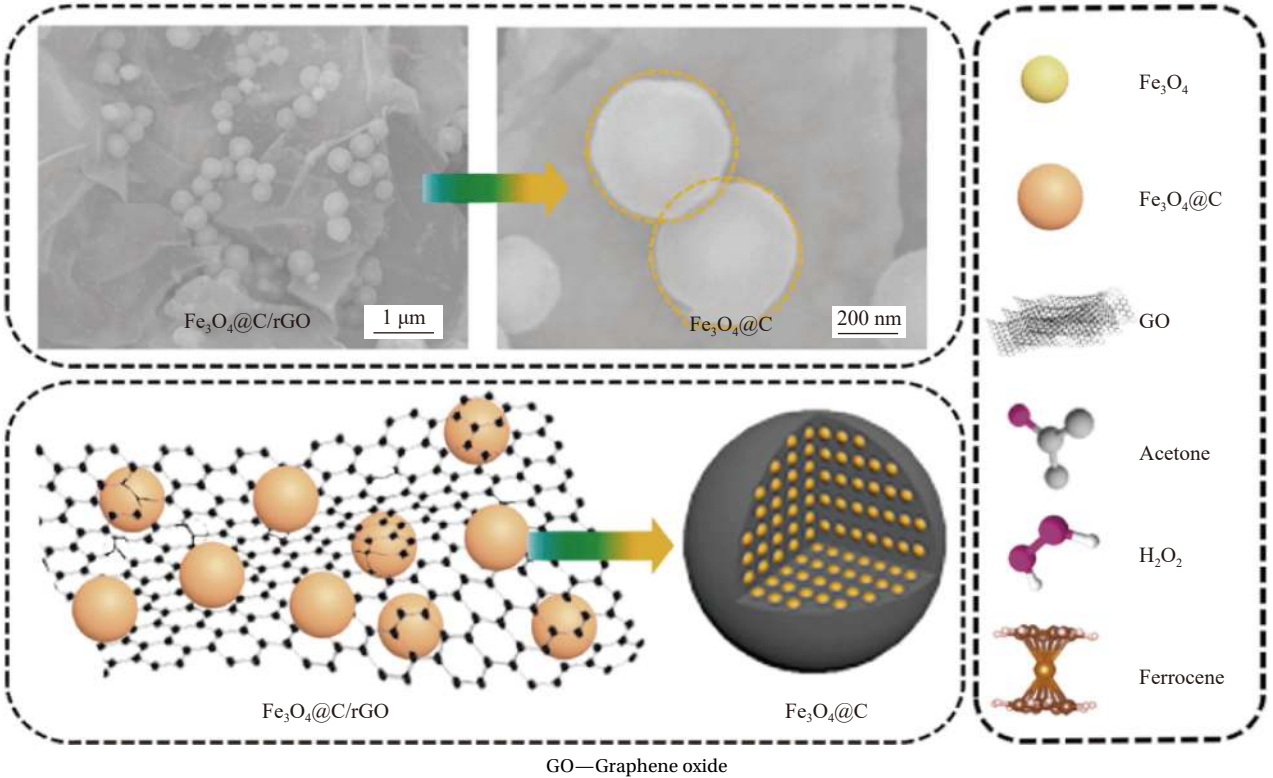


图 4 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C}$ /还原氧化石墨烯($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C/rGO}$)纳米复合材料的微观示意图^[33]

Fig. 4 Microscopic schematic diagram of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C}$ /reduced graphene oxide ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@C/rGO}$) nanocomposite material^[33]

法形成三维多孔结构(图 5(a))。N 掺杂还原氧化石墨烯气凝胶为粘附 CoFe_2O_4 纳米颗粒提供了较大的表面积,从而产生了丰富的界面、残基和缺陷,从而诱发了界面极化、偶极极化和缺陷极化,这些极化弛豫有利于提高介质损耗。在 2~18 GHz 频率范围内,吸波体的磁损耗主要表现为自然共振、涡流损耗和交换共振。复合材料在 14.4 GHz 下的 R_L 最小为 -60.4 dB,填料加载率为 20wt%,匹配厚度薄至 2.1 mm。同时,在此厚度下,有效吸收带宽可达 6.48 GHz (11.44~17.92 GHz)。

Meng 等^[35]以 GO 和 FeCl_3 为原料,通过静电纺丝和冷冻干燥制备了具有大量开口和层叠连接径向微通道的 $\text{GA}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 气凝胶微球 (AMs)(图 5(b))。通过调节 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的含量,可以很容易地控制 AMs 的形态和大小。由于其微型化和几何结构,

所制备的 AMs 表现出优于 $\text{GA}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 粉末和气凝胶整体的优异电磁波性能。当 GO 与 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 质量比为 1 : 1 时,样品的阻抗匹配度最高。在 9.2 GHz 处、厚度为 4.0 mm 的情况下, $R_{L\min}$ 为 -51.5 dB,有效吸收带宽可达到 6.5 GHz。在此基础上,以 GO/FeCl_3 混合溶液为核心层, SiO_2 前驱体为壳层,采用同轴电纺-冷冻干燥-煅烧相结合的方法制备了 $\text{GA}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ “芯”和 SiO_2 “壳”组成的新型核壳型 AMs。引入的 SiO_2 壳层进一步影响了电磁波吸收特性, $\text{GA}/\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$ AMs 的最小 R_L 值在 17.6 GHz 时达到 -50.3 dB,厚度为 2.5 mm,为高频下的电磁吸收提供了参考。此外,该工艺的简单性和多功能性可以扩展到制造各种独特的基于石墨烯的结构,用于功能设计和应用。

研究表明,随着磁性组分(金属、合金、铁氧

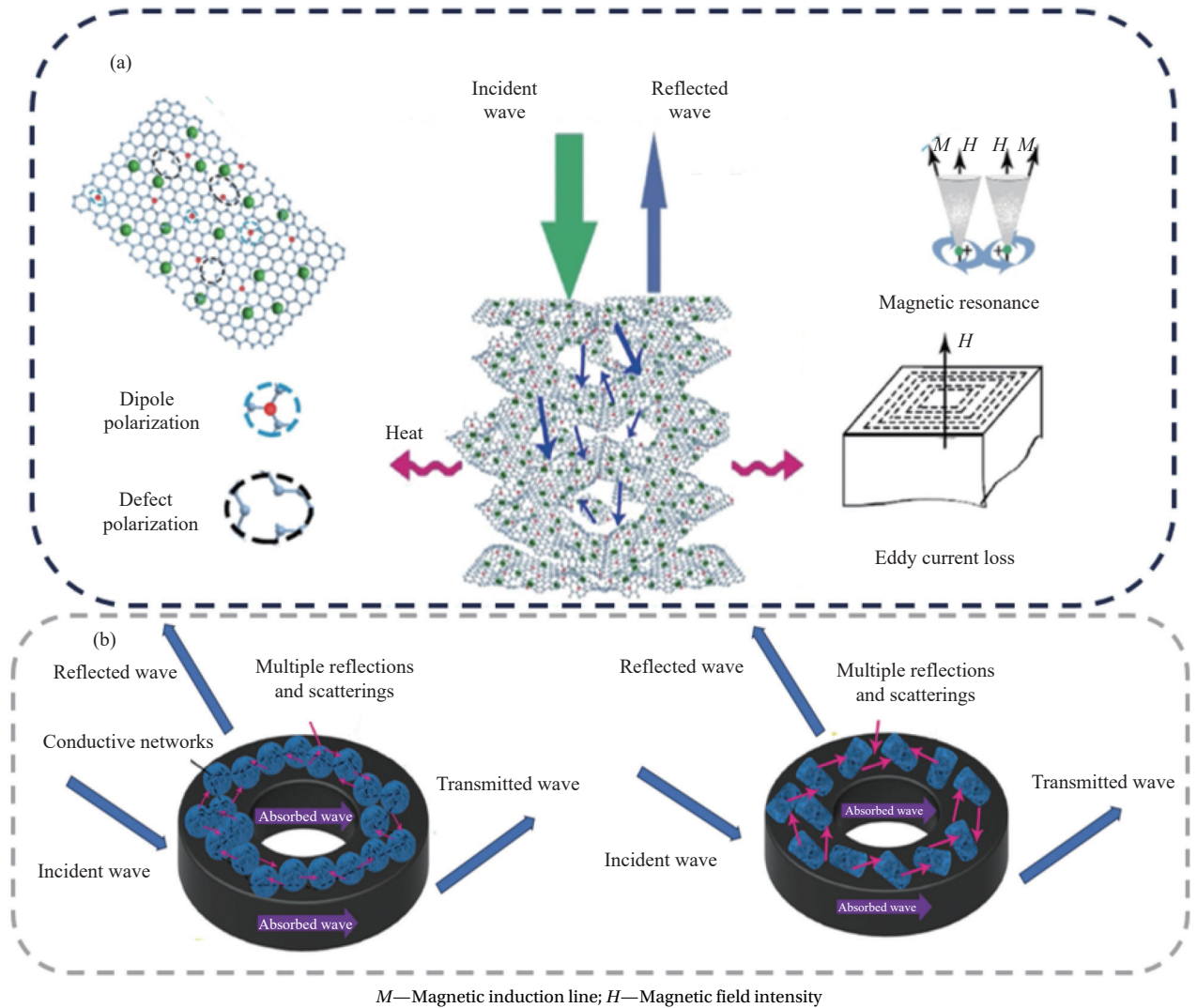


图 5 气凝胶微波吸收机制示意图: (a) CoFe_2O_4 /氮掺杂的 rGO ^[34]; (b) $\text{GA}/\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$ ^[35]

Fig. 5 Schematic diagram of microwave absorption mechanism of aerogel: (a) CoFe_2O_4 /N-doped rGO ^[34]; (b) $\text{GA}/\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$ ^[35]

体等)的引入,其宽频带、高兼容性等优势得以利用,有效优化了复合材料的电磁性能,石墨烯的导电机制和磁性组分的磁损耗机制相结合,进一步提高材料的吸波性能。

2.3 有序型石墨烯气凝胶复合吸波材料

冰模板法在构筑取向结构方面有着天然的优势,通过单向冰晶生长的排斥作用,可以获得定向良好的晶胞结构^[36]。在相互连接的导电网络中,电磁波在垂直方向上的传输路径可以通过多次散射和反射得到最大限度的延伸,直到完全衰减。因此,垂直方向的气凝胶往往可以获得比平行方向上更高的相对复介电系数和复磁导率^[37]。

Liang等^[38]通过定向冻结法和肼蒸汽还原工艺制备了镍纳米链修饰的Ti₃C₂T_xMXene还原氧化石墨烯气凝胶(Ni/MXene/rGO)(图6(a))。由于单向冰晶生长的排斥作用,垂直方向的Ni/MXene/rGO气凝胶比平行方向表现出较高的相对复介电常数和复磁导率。在由MXene、Ni纳米链和rGO组成的多个细胞壁中,协同介质损耗(多个异质界面极化、偶极极化和传导损耗)和磁损耗(磁共

振、磁耦合效应、涡流损耗等)共同作用,对电磁波进行有效耗散。超轻Ni/MXene/rGO气凝胶(6.45 mg·cm⁻³)可实现R_{Lmin}为-75.2 dB、最大EAB为7.3 GHz的高MA性能。此外,优异的结构鲁棒性和力学性能及高疏水性和隔热性能(接近空气),保证了Ni/MXene/rGO气凝胶的结构稳定性和良好的环境适应能力。

Xu等^[39]以GO和壳聚糖等为原料,通过定向冷冻及后续炭化方法,成功制备了密度轻(0.017 g·cm⁻³)、阻燃性能强、力学强度高、电磁波吸收性能好的Co@C/GA多功能气凝胶(图6(b))。在炭化过程中,Co离子在还原气体气氛中被还原为Co纳米颗粒。由于Co纳米粒子的活性很高,壳聚糖被催化转化为石墨烯外壳。复合气凝胶具有良好的抗压性能,在纵向上的压缩模量为1 411 kPa(80%压缩应变),在横向上的压缩模量为420 kPa(80%压缩应变)。纵向压缩模量越大,说明沿冰模板方向气凝胶的力学强度更大。气凝胶在纵向上具有排列有序的结构,更有利于抗应力。将气凝胶放置于加热到100℃的加热平台30 min,对应温度逐渐升

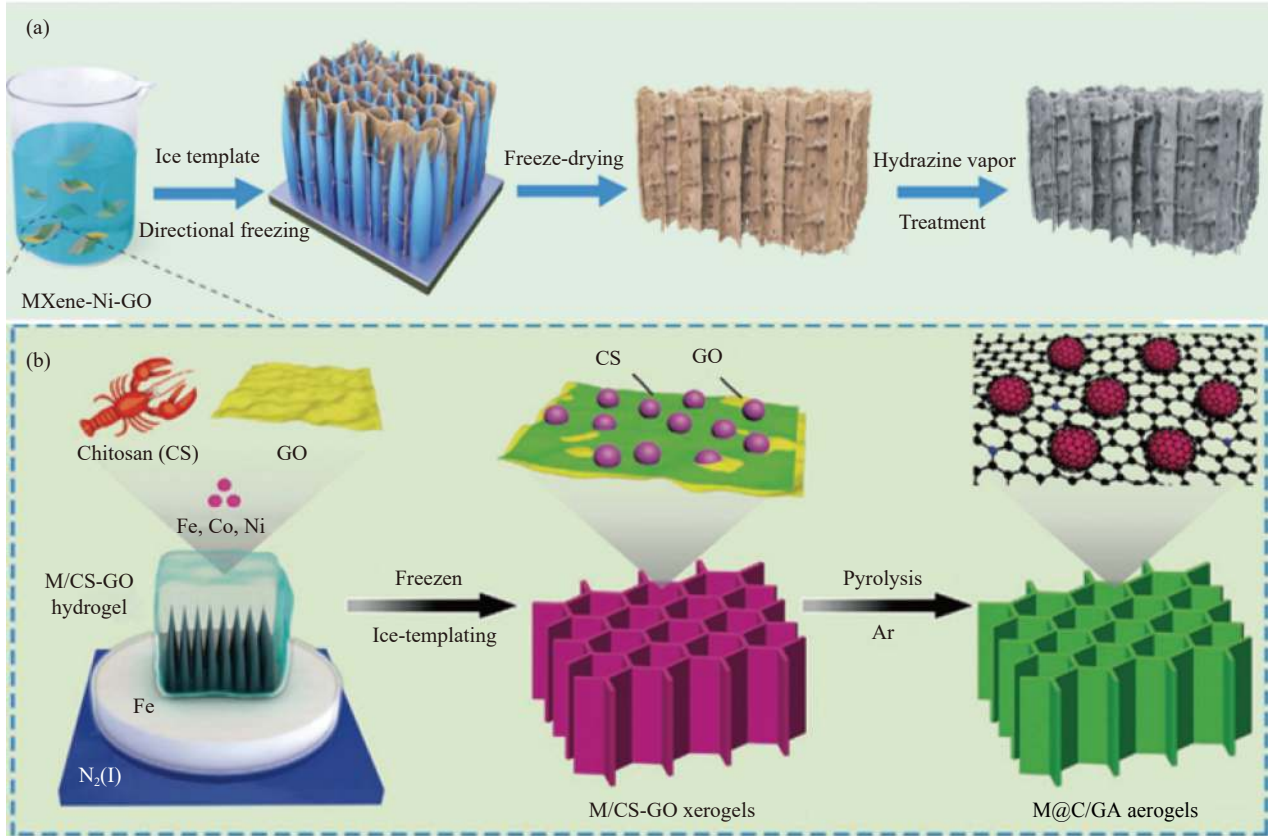


图6 有序型GA制备流程示意图: (a) Ni/MXene/rGO^[38]; (b) M(Fe,Co,Ni)@C/石墨烯(M@C/GA)气凝胶^[39]

Fig. 6 Schematic diagram of preparation process for ordered GA: (a) Ni/MXene/rGO^[38]; (b) M(Fe,Co,Ni)@C/graphene (M@C/GA) aerogel^[39]

高至 42.9~48.5℃。这种缓慢上升的趋势直接说明了 Co@C/GA 气凝胶具有良好的隔热性能。气凝胶在吸收膜厚度仅为 1.5 mm 的情况下，在频率为 14.88 GHz 时其反射损耗超过 -45 dB，有效吸收带宽可达 4.02 GHz。

定向冷冻过程会诱导形成排列整齐的冰晶，升华后为样品提供了丰富的孔隙结构^[40]，有利于延长电磁波在样品中的反射路径。研究表明，气凝胶中石墨烯壁结构的形态和尺寸来源于冰晶成核、多晶生长和石墨烯组装的综合作用^[41-42]，通过调控冷冻条件，有望进一步优化材料结构，强化其吸波性能。

2.4 压力诱导型石墨烯气凝胶复合吸波材料

具有取向结构的石墨烯气凝胶通常有较好的压缩回弹性能，此外化学还原或热处理都能够赋予气凝胶较好的导电性^[43-44]，因此各向异性的石墨烯气凝胶也能够用于制备压阻式传感器^[45]。通

过机械压缩改变复合材料的应变，可调节其吸波范围和吸收值。使其具有更宽的吸收频带，拓宽材料的使用范围。

Cao 等^[46]将经碱性处理的聚丙烯腈 (Alkaline treated polyacrylonitrile, aPAN) 纳米纤维超声分散在氧化石墨烯水溶液中，再通过水热还原和冷冻干燥制备了纳米纤维增强石墨烯气凝胶 (aPANF/GA)(图 7)。三维互联的 rGO 网络与纳米纤维构成的导电通路保证了气凝胶良好的导电性和力学性能，同时增强了气凝胶的压阻性，从而提高了其传感能力。当作为压阻传感器时，aPANF/GA 气凝胶具有良好的抗压回弹性、响应时间快 (≈37 ms)；传感器的灵敏度 S 在 0~14 kPa 的压力范围内为 28.62 kPa^{-1} ，呈线性灵敏度。此外，复合材料具有良好的结构稳定性，经过 2 600 次循环后，电流信号值保留率可达 91.57%。通过机械压缩改变复合材料的应变，可调节其吸波范

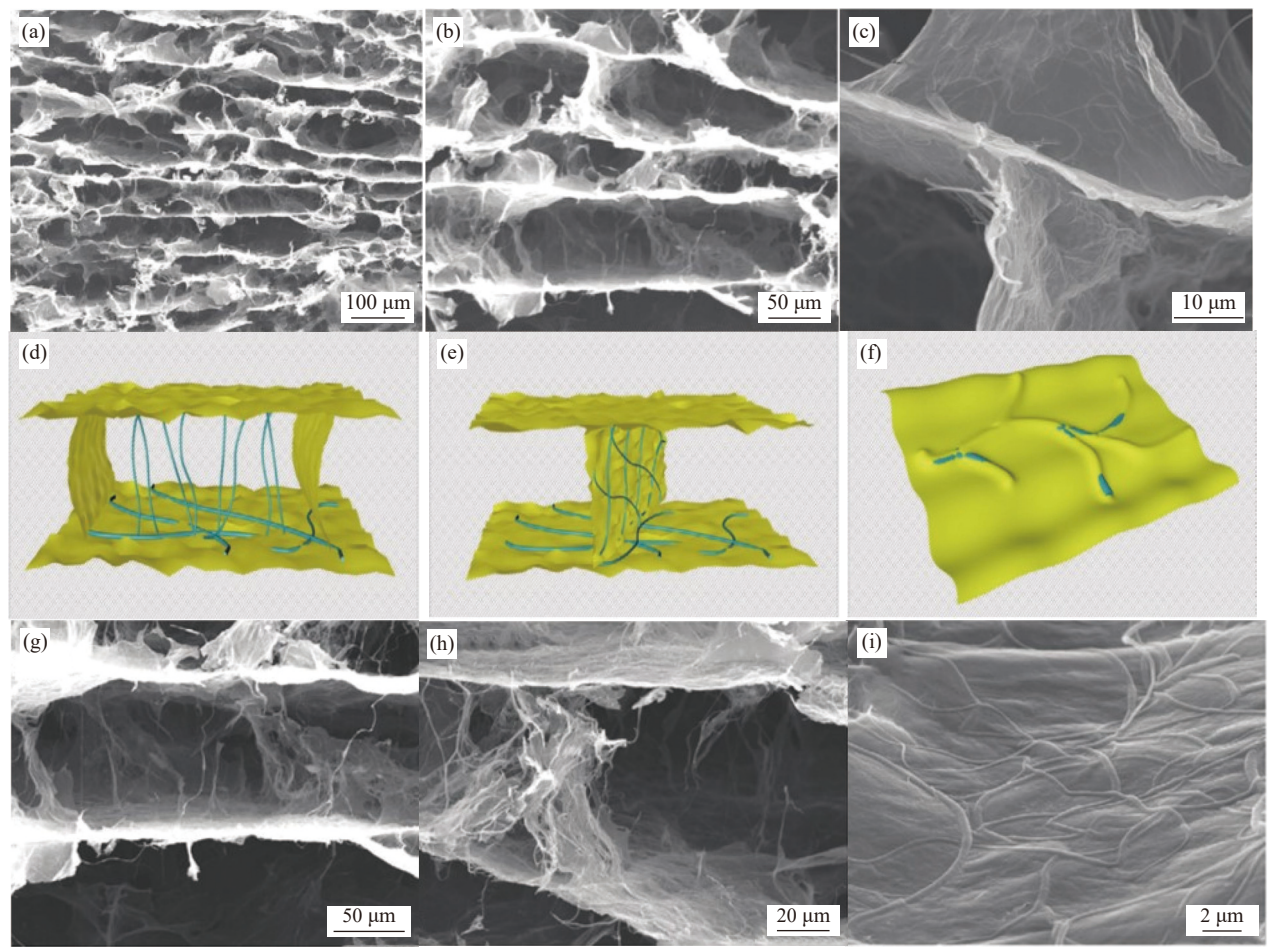


图 7 碱处理聚丙烯腈纤维复合石墨烯气凝胶的 SEM 图像 ((a)-(c), (g)-(i)) 和层间及层内结构图 ((d)-(f))^[46]

Fig. 7 SEM images ((a)-(c), (g)-(i)) and schematic diagram of interlayer and intralayer structure ((d)-(f)) of alkaline treated polyacrylonitrile fibre/graphene aerogel^[46]

围和吸收值。

Wang 等^[47]通过原位自组装和热退火工艺，成功制备了超轻密度、高压缩性的多孔石墨烯气凝胶。高孔隙率的交联三维结构赋予了还原氧化石墨烯气凝胶良好的压缩性，卸去压力后还原氧化石墨烯可快速恢复体积。同时，当压缩应变从 0% 增加到最大可回复应变 (ϵ)75% 时，电导率的变化大约增加了一个数量级，表明其作为大规模应变传感器具有较高的灵敏度。此外，通过简单的机械压缩可以有效地调节石墨烯气凝胶的微波吸收性能。当压缩应变控制在 30% 时，样品的最佳吸收值为 -61.09 dB，有效吸收带宽为 6.30 GHz，材料厚度为 4.81 mm(图 8)。

Bai 等^[48]以生物质细菌纤维素 (BC) 为碳源，通过冷冻干燥和退火技术，制备了具有单向细胞结构的弹性轻质(最大压缩应变可达 80%) C/rGO 气凝胶。该材料表现出典型的还原氧化石墨烯加载量和压缩应变依赖的微波吸收性能。当施加

70% 压缩应变时，C/rGO-10 (10wt% 还原氧化石墨烯加载) 的吸波能力相比 30% 和 50% 时显著提高，在 2.70 mm 厚度下， R_{Lmin} 为 -46.11 dB，有效吸收带宽 (EAB) 为 5.8 GHz。

各向异性的存在，赋予了石墨烯气凝胶更加全面的特性。例如优异的回弹性和导电性、高孔隙率及三维多孔网络结构，使其成为集快速响应的压阻传感性能、吸波性能和隔热性能于一体的理想材料。

表 1 列出了复合材料相关信息及其最佳微波吸收性能，包括厚度、最小 R_L 值、有效带宽和部分负载量(基体大多为石蜡或聚二甲甲基硅氧烷)。容易看到，不同的材料选择、结构设计及工艺流程制备出的复合材料有着各自不同的微波吸收机制，也就导致了不同的吸波性能。

Wang 等^[47]制备的石墨烯气凝胶，通过施加应变调控内部孔隙结构，在不掺加其他损耗材料的情况下便得到了较好的吸波性能。而以相对性

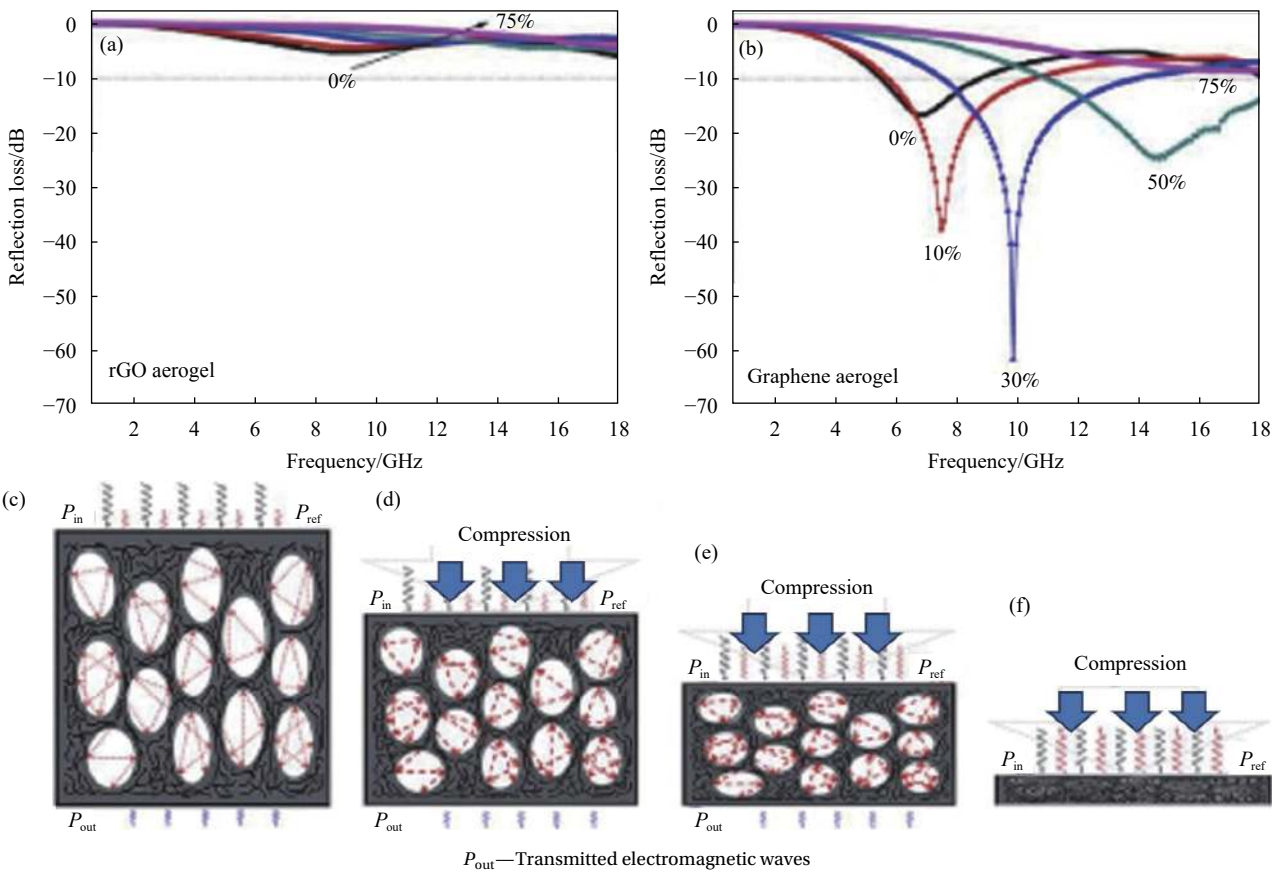


图 8 rGO 气凝胶 (6.91 mm) (a) 和 GA (6.87 mm) (b) 在不同压缩应变下在 0.5~18 GHz 的频率范围内的微波 R_L 曲线；((c)-(f) GA 在不同压缩应变下的微波吸收机制示意图^[47]

Fig. 8 Microwave R_L curves in the frequency range of 0.5-18 GHz at different compression strains for rGO aerogel (6.91 mm) (a) and GA (6.87 mm) (b); ((c)-(f) Schematic illustration of microwave absorption mechanism of GA under different compression strains^[47]

表 1 不同吸波剂性能对比
Table 1 Comparison of performance for different absorber

Sample	Filling ratio/wt%	R_{Lmin} /dB	EAB/GHz	Thickness/mm	Ref.
M@GAMS	10	-49.1	2.9 (12.9-15.8)	1.2	[25]
PANI/GA	—	-42.3	3.2 (8.7-11.9)	3.0	[26]
DG/Si ₃ N ₄	—	-77.3	7.4 (10.6-18.0)	2.7	[27]
GA@Ni	4.25	-52.3	6.5 (11.3-17.8)	3.0	[32]
Fe ₃ O ₄ @C/rGO	—	-59.23	6.72 (-)	3.57	[33]
CoFe ₂ O ₄ /N-rGO	20	-60.4	6.48 (11.44-17.92)	2.1	[34]
GA/Fe ₃ O ₄ @SiO ₂	5	-51.5	6.5 (6.2-12.7)	4.0	[35]
Ni/MXene/rGO	0.64	-75.2	7.3 (-)	2.2	[38]
Co@C/GA	—	-45.0	4.0 (13.1-17.1)	1.5	[39]
GA	—	-61.09	6.3 (7.5-13.8)	4.81	[47]
C/rGO	0.8	-46.11	5.8 (12.2-18.0)	2.70	[48]

Notes: R_{Lmin} —Minimum reflection loss; EAB—Effective absorption bandwidth.

能最优的 DG/Si₃N₄ 及 Ni/MXene/rGO 为例，前者通过 CVD 制造了大量的异质界面，强化了界面极化，Si₃N₄ 的优良阻抗匹配特性也减少了入射波的反射。交变多层结构导致 DG/Si₃N₄/DG 形成纳米电容器结构^[49]，可以增强 Si₃N₄ 的极化，从而提高入射波的存能力和衰减能力。Ni/MXene/rGO 采用定向冷冻的制备方法，使其在纵向上具有良好的吸波性能，Ni 纳米链的添加增强了材料内部的磁耦合作用，提高了磁损耗^[50]。同时反射损耗最低处符合 1/4 波长理论，即利用了干涉型吸收机制^[51]。此外，二者内部的三维网络结构均有利于电子的迁移和跳变，提高了电导损耗^[52]，因而表现出了优秀的吸波能力。

3 总结与展望

石墨烯及石墨烯基复合材料在微波吸收领域的应用已经越来越广泛，大量研究表明，构建三维结构是调节阻抗匹配、提高微波吸收性能的有效策略，石墨烯气凝胶的三维多孔结构给予了其广阔的应用前景。同时，与各种金属、铁氧体、聚合物等复合构成二元或多元材料对吸波性能具有重要影响。石墨烯与其他组分的复合往往会产生优良的协同效应和互补行为，例如加入介电组分或磁性组分，优化材料的阻抗匹配，强化吸收能力。不同的组分，也引入了更丰富的吸收机制，如各种极化弛豫等。此外，通过冰模板法调控气凝胶内部结构，制备压力诱导型石墨烯气凝胶，进一步提高了材料的吸波能力和吸收范围。

近年来，随着研究不断深入，石墨烯基复合吸波材料的各方面性能都有所提升，但仍在以下

方面有待发展：(1) 现有的研究中，选择的吸波范围大多是 2~18 GHz 的厘米波，随着信息技术的发展，吸波材料应兼容更大范围的电磁辐射，以便与毫米波、红外等兼容，拓展其应用，开发出多功能、宽频带的新型材料；(2) 新开发的吸波材料应具有耐热耐寒、抗腐蚀、高疏水等特性，使其可以在部分极端环境下正常使用；(3) 目前大多数电磁吸波材料的类型主要为粉末和薄膜，在其他体系中进行探索，创新出更多类型和结构的新型吸波材料不失为一个好的选择；(4) 应进一步深入研究电磁波在材料表面及内部的反射、折射、透射过程，探究吸波材料衰减吸收规律。

参考文献：

[1] 黎昌金,陈琦,李建龙. 电磁辐射的危害与防护探讨[J]. 内江科技, 2018, 39(9): 108-110.
LI Changjin, CHEN Qi, LI Jianlong. Discussion on the hazard and protection of electromagnetic radiation[J]. Neijiang Science and Technology, 2018, 39(9): 108-110(in Chinese).
[2] SUN X, HE J, LI G, et al. Laminated magnetic graphene with enhanced electro-magnetic wave absorption properties[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2013, 1(4): 765-777.
[3] XIA Y, GAO W, GAO C, et al. A review on graphene-based electromagnetic functional materials: Electromagnetic wave shielding and absorption[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(42): 2204591.
[4] WANG P, WANG G, ZHANG J, et al. Excellent microwave absorbing performance of the sandwich structure absorber Fe@B₂O₃/MoS₂/Fe@B₂O₃ in the Ku-band and X-band [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382: 122804.
[5] HU K, SZKOPEK T, CERRUTI M. Tuning the aggregation of

- graphene oxide dispersions to synthesize elastic, low density graphene aerogels[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(44): 23123-23130.
- [6] 许亚丽. 石墨烯纤维及其复合材料结构设计与电磁屏蔽性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- XU Yali. Structure design and electromagnetic shielding performance of graphene fibres and their composites[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).
- [7] 席嘉彬. 高性能碳基电磁屏蔽及吸波材料的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- XI Jiabin. Carbon-based materials for high-performance electromagnetic interference shielding and microwave absorption[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).
- [8] LIU D, DU Y, XU P, et al. Rationally designed hierarchical N-doped carbon nanotubes wrapping waxberry-like Ni@C microspheres for efficient microwave absorption[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(8): 5086-5096.
- [9] HOU T, JIA Z, WANG B, et al. MXene-based accordion 2D hybrid structure with $\text{Co}_9\text{S}_8/\text{C}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ as efficient electromagnetic wave absorber[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 414: 128875.
- [10] LYU H, ZHANG H, ZHAO J, et al. Achieving excellent bandwidth absorption by a mirror growth process of magnetic porous polyhedron structures[J]. *Nano Research*, 2016, 9: 1813-1822.
- [11] WANG J, GAO C N, JIANG Y N, et al. Ultra-broadband and polarization-independent planar absorber based on multilayered graphene[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(11): 114102.
- [12] 王兰喜, 何延春, 卯江江, 等. 真空退火对氧化石墨烯纸的还原特性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 186-193.
- WANG Lanxi, HE Yanchun, MAO Jiangjiang, et al. Study on the reduction characteristics of oxygenated graphene paper by vacuum[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(10): 186-193(in Chinese).
- [13] CAO Y, FATEMI V, FANG S, et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices[J]. *Nature*, 2018, 556(7699): 43-50.
- [14] GUAN Z J, JIANG J T, YAN S J, et al. Sandwich-like cobalt/reduced graphene oxide/cobalt composite structure presenting synergetic electromagnetic loss effect[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 561: 687-695.
- [15] ZHANG Y, HUANG Y, ZHANG T, et al. Broad-band and tunable high-performance microwave absorption of an ultralight and highly compressible graphene foam[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(12): 2049-2053.
- [16] CHEN C, XI J, ZHOU E, et al. Porous graphene microflowers for high-performance microwave absorption[J]. *Nano-micro Letters*, 2018, 10: 1-11.
- [17] 王军军, 王贤明, 吴连锋, 等. 石墨烯基复合吸波材料研究进展[J]. 中国涂料, 2019, 34(12): 1-7, 11.
- WANG Junjun, WANG Xianming, WU Lianfeng, et al. Research progress on graphene-based composite absorbing materials[J]. *China Coatings*, 2019, 34(12): 1-7, 11(in Chinese).
- [18] HUANG X, YU G, ZHANG Y, et al. Design of cellular structure of graphene aerogels for electromagnetic wave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 131894.
- [19] LIU B, LI J, WANG L, et al. Ultralight graphene aerogel enhanced with transformed micro-structure led by polypyrrole nano-rods and its improved microwave absorption properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 97: 141-150.
- [20] ZHANG K L, ZHANG J Y, HOU Z L, et al. Multifunctional broadband microwave absorption of flexible graphene composites[J]. *Carbon*, 2019, 141: 608-617.
- [21] SUN Y, HAN X, GUO P, et al. Slippery graphene-bridging liquid metal layered heterostructure nanocomposite for stable high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(13): 12616-12628.
- [22] WANG B X, XU C, DUAN G, et al. Review of broadband metamaterial absorbers: From principles, design strategies, and tunable properties to functional applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(14): 2213818.
- [23] 李俊. Fe基磁性金属及其石墨烯复合吸波材料研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- LI Jun. Study on Fe-based magnetic metal and its graphene composite absorbing materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019(in Chinese).
- [24] LIU Y, LU Q, WANG J, et al. A flexible sandwich structure carbon fiber cloth with resin coating composite improves electro-magnetic wave absorption performance at low frequency[J]. *Polymers*, 2022, 14(2): 233.
- [25] LI Y, MENG F, MEI Y, et al. Electrospun generation of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@graphene oxide hybrid aerogel microspheres for tunable high-performance microwave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 391: 123512.
- [26] WANG Y, GAO X, FU Y, et al. Enhanced microwave absorp-

- tion performances of polyaniline/graphene aerogel by covalent bonding[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 169: 221-228.
- [27] LIANG J, YE F, CAO Y, et al. Defect-engineered graphene/Si₃N₄ multilayer alternating core-shell nanowire membrane: A plainified hybrid for broadband electromagnetic wave absorption[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(22): 2200141.
- [28] TIAN Y, ZHI D, LI T, et al. Graphene-based aerogel microspheres with annual ring-like structures for broadband electromagnetic attenuation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 464: 142644.
- [29] ZHONG W, LI B, MA Z, et al. Double salt-template strategy for the growth of N, S-codoped graphitic carbon nano-frames on the graphene toward high-performance electromagnetic wave absorption[J]. *Carbon*, 2023, 202: 235-243.
- [30] WANG G, GAO Z, WAN G, et al. High densities of magnetic nanoparticles supported on graphene fabricated by atomic layer deposition and their use as efficient synergistic microwave absorbers[J]. *Nano Research*, 2014, 7: 704-716.
- [31] MENG F, WANG H, HUANG F, et al. Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 137: 260-277.
- [32] XU D, YANG S, CHEN P, et al. Synthesis of magnetic graphene aerogels for microwave absorption by in-situ pyrolysis[J]. *Carbon*, 2019, 146: 301-312.
- [33] ZHANG H, JIA Z, FENG A, et al. In situ deposition of pitaya-like Fe₃O₄@C magnetic microspheres on reduced graphene oxide nanosheets for electromagnetic wave absorber[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 199: 108261.
- [34] WANG X, LU Y, ZHU T, et al. CoFe₂O₄/N-doped reduced graphene oxide aerogels for high-performance microwave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 388: 124317.
- [35] MENG F, WANG H, WEI, et al. Generation of graphene-based aerogel microspheres for broadband and tunable high-performance microwave absorption by electrospinning-freeze drying process[J]. *Nano Research*, 2018, 11: 2847-2861.
- [36] 刘鹏飞. 冰模板法构筑各向异性石墨烯三维结构及其应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- LIU Pengfei. The construction of three-dimensional anisotropic graphene aerogels by ice-templating method and their applications[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021(in Chinese).
- [37] PAN D, YANG G, ABODIEF 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.
- [38] LIANG L, LI Q, YAN X, et al. Multifunctional magnetic Ti₃C₂T_x MXene/graphene aerogel with superior electromagnetic wave absorption performance[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6622-6632.
- [39] XU J, ZHANG X, ZHAO Z, et al. Lightweight, fire-retardant, and anti-compressed honeycombed-like carbon aerogels for thermal management and high-efficiency electromagnetic absorbing properties[J]. *Small*, 2021, 17(33): 2102032.
- [40] CHENG J B, ZHAO H B, CAO M, et al. Banana leaflike C-doped MoS₂ aerogels toward excellent microwave absorption performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(23): 26301-26312.
- [41] YANG C, ZHU X, WANG X, et al. Phase-field model of graphene aerogel formation by ice template method[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(11): 111901.
- [42] HUANG J, WANG H, LIANG B, et al. Oriented freeze-casting fabrication of resilient copper nanowire-based aerogel as robust piezoresistive sensor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 364: 28-36.
- [43] WANG S, MENG W, LYU H, et al. Thermal insulating, lightweight and conductive cellulose/aramid nanofibers composite aerogel for pressure sensing[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 270: 118414.
- [44] HU Y, CAO M, XU J, et al. Thermally insulating and electroactive cellular nanocellulose composite cryogels from hybrid nanofiber networks[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140638.
- [45] 于泓轩. 石墨烯气凝胶柔韧及传感特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- YU Hongxuan. Study of graphene aerogel flexibility and sensing properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021(in Chinese).
- [46] CAO X, ZHANG J, CHEN S, et al. 1D/2D nanomaterials synergistic, compressible, and response rapidly 3D graphene aerogel for piezoresistive sensor[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(35): 2003618.
- [47] WANG Z, WEI R, GU J, et al. Ultralight, highly compressible and fire-retardant graphene aerogel with self-adjustable electromagnetic wave absorption[J]. *Carbon*,

- 2018, 139: 1126-1135.
- [48] BAI T, GUO Y, WANG D, et al. A resilient and lightweight bacterial cellulose-derived C/rGO aerogel-based electro-magnetic wave absorber integrated with multiple functions[J]. [Journal of Materials Chemistry A](#), 2021, 9(9): 5566-5577.
- [49] HADI J M, AZIZ S B, MUSTAFA M S, et al. Role of nano-capacitor on dielectric constant enhancement in PEO: NH₄SCN: xCeO₂ polymer nano-composites: Electrical and electrochemical properties[J]. [Journal of Materials Research and Technology](#), 2020, 9(4): 9283-9294.
- [50] ZHENG Y, LI C, ZHAO Y, et al. Engineering of magnetic coupling in nanographene[J]. [Physical Review Letters](#), 2020, 124(14): 147206.
- [51] 杨晴. 陶瓷基干涉型吸波材料的制备和性能研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.
- YANG Qing. Preparation and performance study of ceramic-based interference absorbing material[D]. Yantai: Yantai University, 2022(in Chinese).
- [52] SHU R, WAN Z, ZHANG J, et al. Synergistically assembled nitrogen-doped reduced graphene oxide/multi-walled carbon nanotubes composite aerogels with superior electromagnetic wave absorption performance[J]. [Composites Science and Technology](#), 2021, 210: 108818.