

# 碳基气凝胶吸波材料的制备及其应用

张娜<sup>1</sup>,张绪纪<sup>1</sup>,王依山<sup>1</sup>,张学谦<sup>1\*</sup>,黄小萧<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学材料科学与工程学院,山东 淄博 255000; 2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 随着电子科学和信息技术的迅猛发展,电磁污染问题日益严峻,已成为全球亟待解决的问题之一。电磁波会对环境造成污染,以及对人体健康构成潜在威胁,因此学术界和工业界提出了多种应对策略。由于电磁波吸波材料能够有效吸收并消耗电磁能量,所以成为解决电磁污染问题的关键手段。碳基气凝胶作为一种新兴的纳米复合材料,具有三维多孔结构、超低密度、高比表面积和优异的导电性等特点,在电磁波吸收领域中展现了巨大的应用潜力。为此,详细介绍了碳基气凝胶吸波材料的多种制备方法,如冷冻干燥法、化学气相沉积法、真空浸渍法和金属离子辅助交联法等,并探讨了这些方法对材料性能的影响。同时,分析了碳基气凝胶在不同环境中的应用前景,如高温环境中的热稳定性、潮湿环境中的防潮能力、强电磁辐射环境下的吸波性能,以及腐蚀环境中的抗氧化性能。碳基气凝胶吸波材料在电磁波吸收、储能、建筑保温和电磁防护等多个领域中展现了重要的应用前景,其未来的研究方向应集中于通过功能化改性和结构优化进一步提升性能方面,以推动在更多高技术领域中的应用。(专精特新·电磁波吸收与屏蔽用新型材料的研究进展专辑十二之四)

**关键词:** 电磁波吸收;碳基气凝胶;冷冻干燥;化学气相沉积;真空浸渍;金属离子辅助交联;工业应用

中图分类号:TB34

文献标志码:A

文章编号:1673-9981(2025)01-0050-09

**引文格式:**张娜,张绪纪,王依山,等. 碳基气凝胶吸波材料的制备及其应用[J]. 材料研究与应用,2025,19(1):50-58.

ZHANG Na,ZHANG Xuji,WANG Yishan,et al. Preparation of Carbon-Based Aerogel Wave-Absorbing Materials and Their Applications[J]. Materials Research and Application,2025,19(1):50-58.

## 0 引言

随着电子科学和信息技术的迅猛发展,电磁波作为信息传递的主要载体被广泛应用于通信、电子设备等各个领域。然而,随着电子设备的普及和应用的不断增加,电磁污染问题愈加严重,成为亟待解决的全球性挑战<sup>[1]</sup>。电磁波不仅对环境造成了污染,还对人类身体健康构成了极大的潜在风险<sup>[2-3]</sup>。电磁波对人体的影响主要分为电磁波的热效应和非热效应。热效应指的是,当人体吸收电磁波后体内的局部温度会上升,从而引发高温生理反应,可能导致神经系统损伤、免疫功能下降等健康问题,严重时甚至会引发神经衰弱、白细胞减少等病变。而非热效应则是,当电磁波在长时间作用于人体时,逐渐累积产生生理改变,例如心率不齐、血压波动等,并且还可能导致失眠、健忘等症状,特别是在孕妇和胎儿身上电磁波的非热效应影响更为显著,可能导致胎儿畸形、发育异常,甚至流产等严重后果。世界卫生组织

已经将极低频电磁场列为可疑致癌物,与其他已知致癌物(如苯乙烯、汽车尾气等)归为一类,进一步凸显了电磁污染的严峻性<sup>[4]</sup>。

为了有效减少电磁污染,学术界和工业界均提出了多种解决方案,其中最主要方法是使用电磁屏蔽材料和电磁波吸收材料(吸波材料)<sup>[5]</sup>。电磁屏蔽材料是通过反射电磁波来达到屏蔽的效果,但反射的电磁波可能会引发二次污染,不能从根本上消除电磁污染问题<sup>[6-7]</sup>。相比之下,吸波材料是通过吸收入射的电磁波,并将其能量转化为热能或其他形式的能量进行消耗,是更为有效的防护手段<sup>[8-10]</sup>。理想的吸波材料应具备薄厚度、轻质量、宽吸收频带和高吸收强度的特点,即在尽可能轻薄的情况下,具备宽频范围内的高效电磁波吸收能力。此外,吸波材料还需要具有优异的机械性能、耐热性、抗氧化性和耐腐蚀性,以应对复杂环境中的长期使用需求。材料的耐久性、抗老化能力和环境适应性也是吸波材料研究中的重要方向。

收稿日期:2024-09-18

作者简介:张娜,本科生,研究方向为碳基气凝胶吸波材料。E-mail:2838323051@qq.com。

通信作者:张学谦,博士,讲师,研究方向为电磁波吸收材料。E-mail:zhangxueqian@sdut.edu.cn。

传统吸波材料(如铁氧体材料,陶瓷材料,碳材料等),尽管在某些应用中表现良好,却存在一些局限性,如电磁波损耗机制较为单一及过高的导电性,使其在阻抗匹配方面表现不佳,导致电磁波的吸收效率较低<sup>[7,11]</sup>。为了克服这些问题,研究人员逐渐将目光转向碳基复合吸波材料<sup>[12-14]</sup>。碳基材料,尤其是碳纳米材料,具有优异的介电性能和特殊的微观结构,通过与磁性金属、金属氧化物或陶瓷等材料的复合,可以有效提高材料的介电性能及引入磁损耗机制,进而增强材料的吸波性能。碳基复合吸波材料的内部异质界面能够改变材料的能带排列、空间电荷分布、晶格缺陷等微观结构,进一步提升吸波效果<sup>[15-16]</sup>。与传统磁性金属粉末不同,碳基复合材料不仅能实现优异的吸波性能,还可大大减轻材料的质量,具备更广泛的应用前景<sup>[17-18]</sup>。

近年来,多孔电磁波吸收材料的研究取得了重要进展,特别是碳基气凝胶在电磁波吸收方面展现出巨大的潜力<sup>[19,20]</sup>。碳基气凝胶为三维多孔网络结构材料,具有超低的密度、高比表面积及良好的导电性<sup>[21]</sup>,其多孔结构不仅能够有效吸附和传导电磁波,还能通过界面极化损耗进一步增强吸波能力。碳基气凝胶材料通常由有机聚合物转化而来,制备过程中通过不同的方法可以形成微观到宏观的多重结构,这些结构能够优化材料的阻抗匹配,减少电磁波的反射并增强能量吸收。王等<sup>[22]</sup>开发出一种双向MXene/聚酰亚胺复合气凝胶,通过引入二维材料MXene,极大提高了电磁波吸收性能,该复合材料不仅在微观结构上具有良好的有序性,而且在宏观结构上通过多层设计解决了阻抗匹配和能量损失之间的冲突,展现出优异的宽频吸波性能。除了吸波性能外,碳基气凝胶还具备隔热、耐压、抗腐蚀等多种特性,使其在电磁防护、建筑保温、储能设备等领域也展现出广泛的应用潜力。随着新型二维材料(如石墨烯和MXene)的加入,碳基气凝胶的性能得到了进一步提升。石墨烯等材料不仅能够提高气凝胶的导电性,还能通过调控电学性能来优化阻抗匹配,使电磁波更容易进入材料内部并进行有效衰减。研究表明,这类复合材料在储能、传感器、环保等领域也有巨大的应用前景。

本文主要介绍了碳基气凝胶吸波材料的制备及其应用。系统地介绍了4种制备方法,分别是冷冻干燥法、化学气相沉积法、真空浸渍法、金属离子辅助交联法,同时简要地阐述了制备条件和过程,以及4种方法下制备出的气凝胶的优良特征。总结了碳基气凝胶吸波材料在高温、潮湿、腐蚀和强电磁波的

环境中的应用,展现出气凝胶材料的优异吸波性能。

## 1 碳基气凝胶的制备方法

近年来,碳基气凝胶的研究受到人们的大量关注,特别是碳基气凝胶在吸收电磁波方面的应用。目前,常见的碳基气凝胶制备方法有冷冻干燥法、化学气相沉积法、真空浸渍法、金属离子辅助交联法等。

### 1.1 冷冻干燥法

冷冻干燥法是一种高效的制备三维多孔材料的技术,尤其在碳基气凝胶的制备中得到了广泛应用。该方法在低温低压条件下进行,首先将含有溶质的液体溶剂与固体颗粒组成的前体在模具中冷冻为固体,随后通过升华过程使固化的溶剂晶体逐渐消失,使液-气界面被转化为固-气界面,从而获得在宏观上保持原始体积和结构的气凝胶材料。冷冻干燥法可以有效地形成具有大比表面积和三维多孔结构的气凝胶,并赋予其优异的物理特性。Zhu等<sup>[23]</sup>介绍了一种通过定向冷冻干燥法制备MXene/还原氧化石墨烯(RGO)/纤维素纳米晶体(CNCs)气凝胶的策略,以设计三维结构来加强MXene与RGO片层之间的相互作用,定向结构和CNCs的加入有利于结构的稳定性,同时通过形成完美的阻抗匹配和多极化效应,实现了优越的吸收性能。MXene/RGO/CNCs(MRC-20)气凝胶最小反射损耗值为-72.32 dB、有效吸收带宽为4.96 GHz,此外通过调整CNCs的含量,MRC-20气凝胶在70%的压缩应变下表现出最高的应力(37.2 KPa),证明了压缩循环的稳定性。

冷冻干燥与碳化工艺的结合是一种有效的技术,广泛应用于制备碳基气凝胶。该技术首先通过冷冻干燥将材料的前体在低温低压下制备为多孔结构,然后在控制气氛下进行碳化处理,热解去除有机成分,并发生碳化反应,形成具有独特结构的碳基材料<sup>[24-25]</sup>。碳化过程对最终产品的性能起到了决定性作用,特别是在调控孔隙率、表面化学性质以及材料的导电性等方面。Wan等<sup>[26]</sup>通过将纤维素与氧化石墨烯(GO)复合,结合冷冻干燥和高温碳化工艺,成功制备了纤维素/石墨烯气凝胶,然而该三维多孔材料在力学性能方面存在较大的局限性,特别是气凝胶往往表现出较差的力学强度和较脆的特性。为了解决该问题,他们开发了一种原位冷冻干燥法,该法是将纤维素基材料(CA)原位生长于聚氨酯开孔泡沫(PUF)结构中,形成CA/PUF复合材料,该复合材料不仅具有优异的回弹性能,还展现了优越的

吸波性能,在Ku波段的吸波测试中吸波损耗最高可达-20 dB,表明其在电磁屏蔽和隐身材料方面具有潜在的应用价值,使得CA/PUF复合材料在未来的高性能材料领域中具有广阔的发展前景。Wang等<sup>[27]</sup>通过定向冷冻干燥和碳化过程,成功制备了一种蜂窝状多孔钴/碳基气凝胶,并在碳骨架上原位生长了丰富且均匀分布的钴颗粒,该材料在电磁波吸收性能方面表现出色,在低填充量条件下吸波强度达到了-75.8 dB,并具有8.53 GHz的宽带有效吸收,在电磁屏蔽和吸波材料方面表现出巨大的应用潜力。总体而言,冷冻干燥与碳化工艺的结合不仅能够制备出结构复杂、性能优异的碳基气凝胶,还能够通过优化碳化条件调控材料的微观结构和功能特性,从而拓展其在能量存储、电磁屏蔽、吸波等领域的应用。

除了常规的冷冻干燥制备方法外,单向冷冻干燥法和双向冷冻干燥法是两种新兴的冷冻干燥技术。单向冷冻干燥法是通过在一个方向上施加冷冻,从而在材料内部形成具有方向性的孔隙结构。相比于传统的多向冷冻干燥,单向冷冻干燥法能精确地控制孔隙的排列,赋予材料各向异性的物理特性,在制备碳/石墨烯复合气凝胶和碳纤维/硅橡胶复合材料等方面得到了广泛应用。例如,将聚胺酸铵盐与氧化石墨烯悬浮液进行单向冷冻,然后依次进行冷冻干燥、热亚胺化和碳化处理,形成具有沿冻结方向排列的管状孔结构,该结构不仅提高了气凝胶的热绝缘性能,还优化了其电磁波吸收性能。Liang等<sup>[28]</sup>利用单向冷冻法结合化学还原技术合成了镍/二维碳化钛/石墨烯气凝胶复合材料,该材料通过单向取向结构形成了异质介电/磁性界面,展现出优异的阻抗匹配性能及电磁波吸收能力,其具有的独特多极化和电磁耦合损耗机制,使得该复合材料在电磁屏蔽和吸波应用中具有很大的潜力。双向冷冻干燥法则结合了冷冻干燥与超临界干燥的优点,进一步提升了气凝胶的结构稳定性和功能性。在双向冷冻干燥过程中,材料经历低温下的冻结和溶剂升华处理,以及随后的超临界干燥,从而使材料具有三维多孔结构。该方法能够有效防止材料在干燥过程中出现坍塌现象,确保气凝胶结构的完整性。Kong等<sup>[29]</sup>采用双向冷冻干燥法,制备了具有分层结构的弹性碳纳米管(CNTs)/碳纳米纤维(CNF)-聚氨酯复合气凝胶(CNTs/CNF-WPU),该材料的最低反射损耗达到了-77.3 dB,且有效吸收带宽覆盖了整个X波段,在60%的应变条件下能够保持至少100次循环的结构稳定性,其不仅在电磁波吸收性

能上表现出色,还展现了良好的机械性能和长时间稳定性。

总体来看,单向冷冻干燥法和双向冷冻干燥法为材料的微观结构设计提供了更多可能性,能够根据应用需求调控材料的孔隙排列和取向结构,从而大幅提升材料的物理性能和功能特性。这些技术不仅在电磁屏蔽、吸波材料的制备中发挥了重要作用,还为在其他领域(如能量存储、热管理材料等)提供了新的发展方向。

## 1.2 化学气相沉积法(CVD)

化学气相沉积(CVD)法,是制备气凝胶的一种重要技术手段,尤其在碳基气凝胶的制备过程中起到关键作用。气凝胶因独特的多孔结构、高比表面积、低密度和轻质等优异特性,被广泛应用于能源存储、电磁屏蔽、催化剂载体和隔热材料等领域。CVD法是将含碳气体(如甲烷、乙炔等)在高温下热解,形成碳纳米颗粒,并通过自组装形成三维网络结构。采用CVD法在气凝胶中沉积碳纳米管,气凝胶的电导率、机械强度及导电性能均得到显著提高,在能量存储设备中应用前景巨大。有研究人员采用CVD方法高效制备炭黑气凝胶(CBA)。他们以丙烷(99.6%)为碳源、氩气(99.9%)为载气,以密度为 $0.19 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的碳毡缝成的顶部用板密封的圆柱体为基材,在工作温度约 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 下沉积CBA,混合气体从气缸底部进料并被迫通过碳毡,这为CBA的形成提供了合适的环境。CBA作为一种新型的碳基气凝胶,具有高度发达的碳空间网络支链结构,以及低密度( $0.12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )、高抗压强度( $0.543 \text{ MPa}$ )、极低的导热系数( $0.049 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )超疏水和吸油性能,在自清洁、油水分离、绝缘材料等领域中的应用潜力巨大。

## 1.3 真空浸渍法

真空浸渍法是一种制备气凝胶的有效技术,通过将气凝胶前体材料(如溶胶)置于真空环境中,并利用压力差使气体进入材料内部,形成具有高度孔隙率的气凝胶结构。在真空环境下,该法能够使气体有效渗透到材料的微小孔隙中取代液相,形成独特的气凝胶网络结构。Zhang等<sup>[30]</sup>采用单向冷冻干燥法和CVD法,制备了具有单向取向结构的碳纳米管/氧化石墨烯/壳聚糖(CNT/GO/CS)碳基气凝胶(CA),并在此基础上利用真空浸渍法,将CA置于未固化的PDMS中,在 $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中静置48 h,再在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下固化15 min,得到具有优异导电性和各向异性的CA/PDMS复合气凝胶材料。该材料对KA

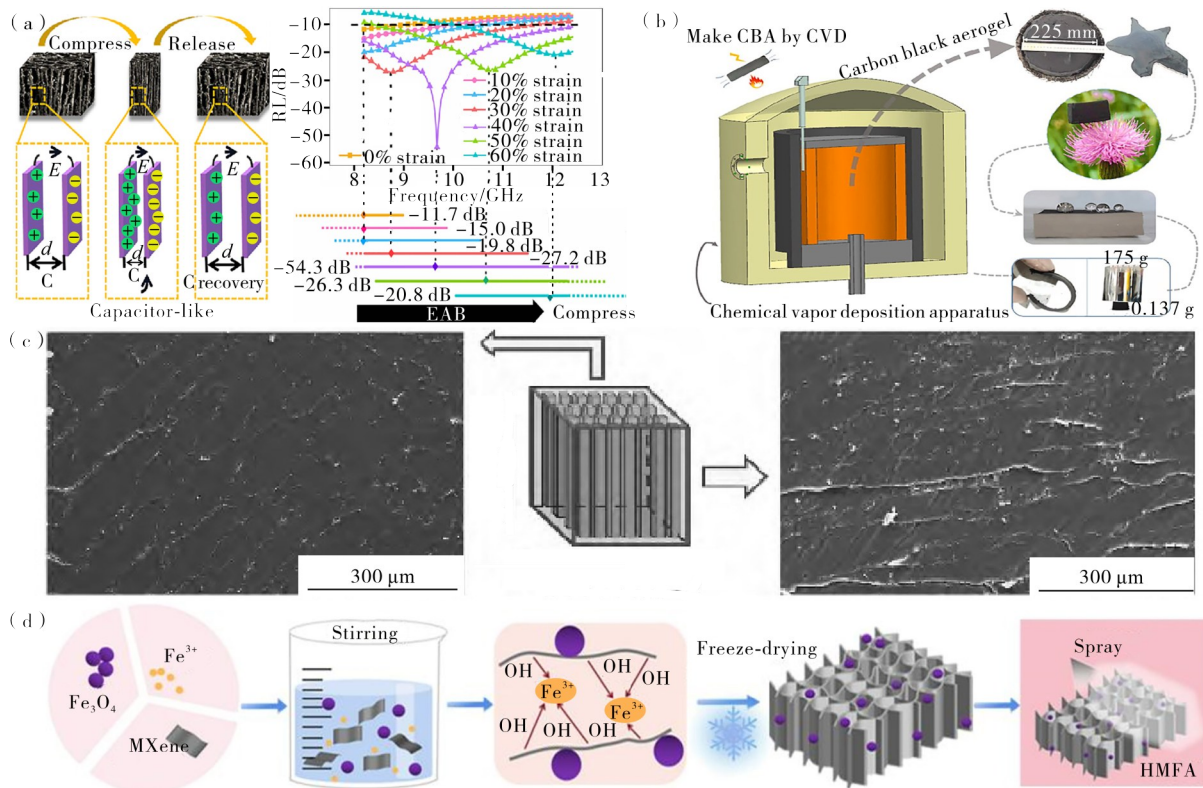


波段的电磁波具有显著的吸收作用,在 26.5—40 GHz 频率范围内吸收损耗均高于 30 dB,最高可达 37.8 dB。真空浸渍法不仅适用于制备纯的气凝胶,还能够应用于制备有机-无机杂化气凝胶,从而实现材料性能的多样化和功能化。通过将有机和无机材料结合,可以制备出具有优异机械性能、热稳定性以及电磁波吸收性能的气凝胶材料。

#### 1.4 金属离子辅助交联法

金属离子辅助交联法,利用金属离子的特性,即金属离子可以与聚合物分子中的功能基团(如羧基、羟基等)发生络合反应,形成金属-有机配合物,这种配合物能够在聚合物分子之间形成交联点,来辅助

气凝胶的形成和结构优化。该方法通常涉及将金属离子引入气凝胶的前驱体溶液中,通过金属离子与前驱体分子之间的相互作用,促进气凝胶的三维网络结构的形成。金属离子的引入不仅可以影响气凝胶的微观结构,还可以通过调节气凝胶的物理化学性质(如比表面积、孔径分布和化学稳定性等)来优化性能。图 1 为碳基气凝胶的制备方法及其性能<sup>[31]</sup>。He 等<sup>[32]</sup>采用金属离子辅助交联法制备了  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MXene}$  复合气凝胶,  $\text{SiO}_2/\text{MXene}/\text{Fe}_3\text{O}_4$  气凝胶具有磁电协同效应和多孔结构,以及优异的电磁波吸收性能,在极薄的 1 mm 厚度下的吸收带宽可达 8.8 GHz。



(a)—冷冻干燥法;(b)—CVD法;(c)—真空浸渍法;(d)—金属离子辅助交联法。

(a)—aerogels preparation by freeze-drying;(b)—CVD;(c)—vacuum impregnation;(d)—metal ion assisted cross-linking method.

图 1 碳基气凝胶的制备方法及其性能<sup>[31]</sup>

Figure 1 Preparation of carbon-based aerogels and their properties

综上所述,4种制备方法各有优劣。冷冻干燥法制备的气凝胶具有大比表面积及三维多孔结构等优点,缺点是力学强度较差。改进后的原位冷冻干燥法,可使材料具有优异的回弹性能和吸波性能。化学气相沉积法,可提高气凝胶的电导率、机械强度和导电性能,但是缺点是制备过程需要在高温下进行,造成很多基底材料无法承受。真空浸渍法,其优点是可使气体有效渗透到孔隙里,从而提高气凝胶的孔隙率,但是该法制造成本高、工艺复杂,难以

进行大规模的应用。金属离子辅助交联法,是依靠金属离子的引入来调控气凝胶的微观结构及物理化学性质,最终调节气凝胶材料的各项性能。

## 2 气凝胶在不同环境中的应用

### 2.1 高温环境

碳基气凝胶吸波材料具有良好的热稳定性,在高温下能保持一定的结构稳定性,不易分解或变形,可在较高温度范围内发挥吸波作用,因此在高温环

境下有一定的应用潜力。例如,具有多孔结构的多功能 Co/Nb<sub>2</sub>CT<sub>x</sub>/carbon 气凝胶由竹源碳基气凝胶组成,由二维 Nb<sub>2</sub>CT<sub>x</sub>、ZIF-67 衍生的 Co 纳米颗粒、竹纤维素和少层 Nb<sub>2</sub>CT<sub>x</sub> MXene 构建三维气凝胶,再通过化学沉积法将 ZIF-67 均匀锚定在气凝胶碳骨架上,该衍生的轻质碳基气凝胶不仅具有隔热和阻燃的高性能,还延长了 EMW 的多次反射和散射,改善了介电损耗,并在 1.67 mm 的超薄厚度和

质量分数 10% 的超低填充含量下实现了出色的反射损耗 (−60.25 dB) 和广泛的有效吸收带宽 (4 GHz),雷达截面(RCS)衰减值可达 31.24 dB·m<sup>−2</sup>,该吸波材料可以有效降低目标被雷达探测器探测到的概率(见图 2)<sup>[33]</sup>。多孔结构工程策略,为设计具有隔热性能和阻燃性能的生物基电磁波吸收材料提供了指导。

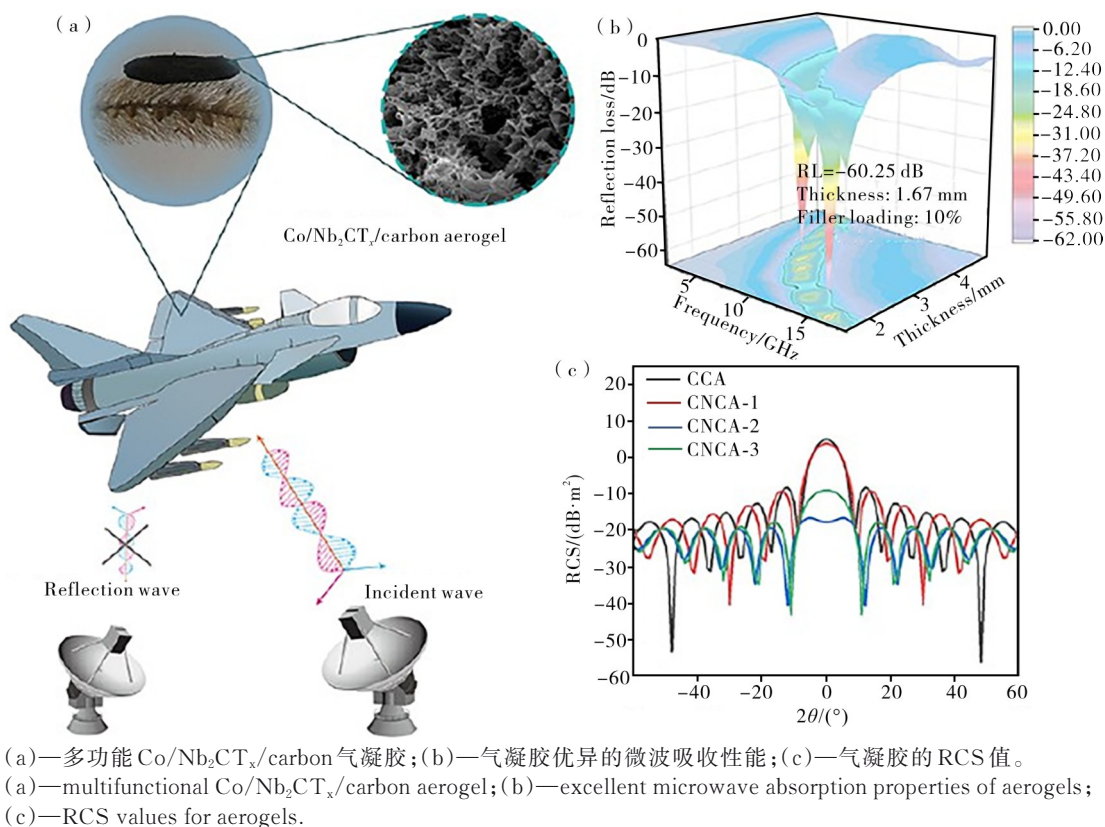


图 2 多功能 Co/Nb<sub>2</sub>CT<sub>x</sub>/carbon 气凝胶<sup>[33]</sup>

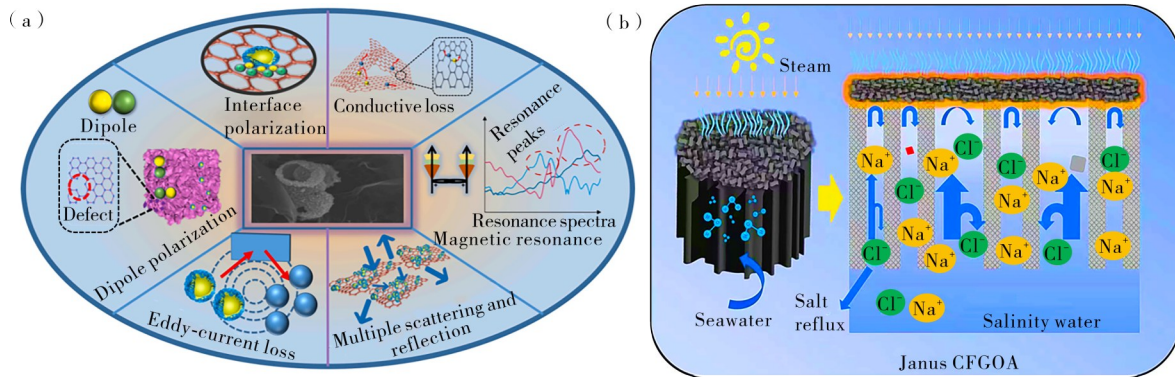
Figure 2 Multifunctional Co/Nb<sub>2</sub>CT<sub>x</sub>/carbon aerogel

## 2.2 潮湿环境

碳基气凝胶在潮湿环境中应该具有防潮与隔热的性能,部分碳基气凝胶吸波材料还具有一定的疏水性能,能够在一定程度上抵御潮湿环境中的水分侵蚀,降低材料因吸水而导致的性能下降。在潮湿的(如地下室、卫生间等)环境中,碳基气凝胶吸波材料可用于减少电磁辐射。例如,可将碳基气凝胶吸波材料添加到建筑涂料中,其既能吸收电磁波,又能起到一定的防潮作用,降低因潮湿导致的电气设备受电磁干扰的风险,同时避免因湿气引起的材料强度降低、霉菌生长等问题。Wang 等<sup>[34]</sup>合成了一种具有多种组分的气凝胶基微波吸收材料,其中石墨烯片相互连接形成 3D 框架,而 ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 空心微球均匀分布在整個石墨烯气凝胶中(见图 3(a))。

值得注意的是,气凝胶的微波吸收特性导致了超宽带宽(9.1 GHz)和强吸收(反射损失为 −65.2 dB),特别是其比反射损耗明显高于当前具有类似元件的磁介质吸收材料。此外,由于该气凝胶的多孔结构,其表现出很强的疏水性和优异的隔热性能。Gan 等<sup>[35]</sup>通过制备一种独特的 Janus 分层多孔结构碳石墨烯复合气凝胶(CFGOA)(见图 3(b)),并证明了该气凝胶具有疏水性。CFGOA 集成了顶部疏水性光吸收 rGO 层和底部亲水性多孔碳层。另外,石墨烯复合气凝胶具有超低的密度、优异的导电性能、大比表面积、三维多孔网络结构等特征。将石墨烯复合气凝胶的疏水性和吸波性能相结合可以使用于潮湿多水的环境中,在军事方面可以用于水中电磁波吸收以防追踪。





(a)—ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>空心微球石墨烯气凝胶;(b)—碳石墨烯复合气凝胶(CFGOA)。  
 (a)—ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> hollow microspheres graphene aerogel;(b)—carbon-graphene composite aerogel (CFGOA)。

图3 碳基气凝胶在潮湿环境中的应用<sup>[34]</sup>

Figure 3 Carbon-based aerogel capable of being used in humid environments

### 2.3 强电磁辐射环境

电磁辐射在数据中心、医疗设备室、高精度加工车间、电磁兼容性测试实验室、通信基站房等许多地方充斥着,对人们的身体产生着巨大的危害。Lv等<sup>[36]</sup>采用一种简便的原位水热法和冷冻干燥方法,制备出新型的碳纳米管/还原型氧化石墨烯复合气凝胶(CNTs/GA)吸波材料(见图4)。将一定量的碳纳米管(CNT)均匀地分散在氧化石墨烯(GO)溶液中,经水热使GO和CNT构成的纳米片组装成气凝胶,再冷冻干燥后得到CNTs/GA气凝胶,该气凝胶具有多孔的三维网络结构,这不仅大大增强了电磁波吸收能力,而且有助于形成超低密度和导电渗透阈值。将该气凝胶与聚二甲基硅氧烷(PDMs)基质混合制成吸收层,并测试其电磁波吸收性能,结果表明:将质量分数为4%的CNTs@GA气凝胶分散到PDMs基质中时,当厚度为1.7 mm时最小反射损耗值在22.4 GHz时达到-31.0 dB,有效吸收带宽覆盖了整个频率范围(18—26.5 GHz)。CNT/石墨烯复合气凝胶具有强吸收、宽吸收频带,轻薄的性能,使其在电磁波吸收材料中具有很好的应用前景。除此之外,有研究人员<sup>[37]</sup>通过单向循环冻融交联纤维素纳米纤维(CNF)和碳纳米管(CNT),构建了具有优异吸波性能的各向异性气凝胶孔壁纳米管,利用CNF和CNT的单分散性建立了可持续的衍生双网络互穿策略,从而创建了疏水/亲水纳米纤维的混合双网络,成功制备出具有可调超低密度(0.026 2—0.029 6 g·cm<sup>-3</sup>)、高机械性能(75%应变下样品应力高达329.8 kPa)和低收缩率(约10%)的气凝胶,其直径可达9.24 cm,具有大规模生产的前景。该气凝胶在13.012 GHz时最小反射损耗(RL<sub>min</sub>)可达-60.22 dB,在7.46 mm的薄厚度下具有2.163—

18 GHz(15.84 GHz)的宽有效吸收带宽(EAB),覆盖几乎所有的S、C、X和Ku波段,该气凝胶表现出良好的阻抗匹配和适度的介电损耗能力。基于碳基气凝胶在吸波方面的重要性能,在军舰、飞机等军用装备上的电子设备舱需要在强电磁辐射环境下工作,同时还要防止被敌方探测。碳基气凝胶吸波材料可以作为电子设备舱的内衬材料,吸收内部设备产生的电磁辐射,降低对外的电磁信号特征,提高装备的隐身性能。

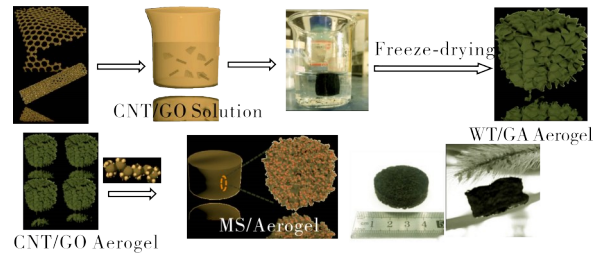


图4 CNTs/GA气凝胶<sup>[36]</sup>

Figure 4 CNTs/GA aerogel

### 2.4 腐蚀环境

碳基气凝胶吸波材料在腐蚀环境中具有一定的应用潜力,研究人员为了增强碳基气凝胶复合材料(C/CAs)的抗氧化能力<sup>[38]</sup>,用碳化硅(SiCO)前驱体溶胶浸渍数次。在胶凝、老化、溶剂交换、常温干燥和热解后, SiCO前驱体溶胶渗透到纳米多孔C/CA中,制备出具有SiCO陶瓷内涂层的抗氧化碳基气凝胶复合材料(C/CA-SiCO)。结果发现,材料的密度随着进行浸渍和热解的次数而增加,沉积不同次数的SiCO涂层的力学性能和抗氧化性能得到显著改善,弯曲强度从2.2 MPa增加到10.8—32.3 MPa,抗压强度从0.4 MPa增加到3.64 MPa。所制备的复合材料在空气环境中,在1 600 °C下加热60 min

后的重量损失仅为7.6%，面内收缩率小于2%。表明，该复合材料的抗氧化性能与吸波性能相结合，可用于海洋装备如船舶、潜艇等的表面涂层，或者用于需要长期暴露在空气中的吸波设备，这样既能吸收电磁波防止电磁污染，又能在一定程度上抵御空气的腐蚀，降低设备被腐蚀的速率，延长其使用寿命。

### 3 总结与展望

碳基气凝胶作为一种极具前景的电磁波吸波材料，凭借其独特的三维多孔结构、低密度、高比表面积及优异的导电性和机械强度，在多个领域展示出广泛的应用潜力。本文详细综述了碳基气凝胶材料的制备工艺，包括冷冻干燥法、化学气相沉积法、真空浸渍法等，探讨了各类制备方法对材料微观结构及吸波性能的影响。通过这些方法制备的碳基气凝胶材料表现出卓越的电磁波吸收能力，能够有效吸收和衰减入射的电磁波，尤其在高频段吸波性能表现出色。碳基气凝胶的独特结构不仅为其吸波性能提供了支持，还赋予了材料一系列优异的物理化学特性，如隔热、抗压、耐腐蚀、耐高温等，这些特性使其在各种复杂环境（如高温、潮湿、强电磁辐射及腐蚀）中得以应用。在高温环境中，碳基气凝胶的热稳定性使其能够在较高温度下保持材料结构的完整性并持续发挥吸波作用；在潮湿环境中，碳基气凝胶的疏水性则有效地防止了水分侵蚀材料，从而确保其吸波性能不受影响。此外，在强电磁辐射环境下，碳基气凝胶通过其良好的阻抗匹配和强吸波能力，可以显著减少电磁辐射对设备及人体的危害，广泛应用于数据中心、通信基站、电子设备屏蔽等领域；在腐蚀环境下，经过改性的碳基气凝胶材料展示了优异的抗腐蚀性，延长了材料的使用寿命，使其在海洋装备和腐蚀性气氛下的应用前景广阔。

此外，随着新型二维材料（如石墨烯、MXene等）的引入，碳基气凝胶的性能将得到进一步优化。这些材料能够增强气凝胶的导电性、阻抗匹配和磁损耗性能，使得材料在更广泛的频段上表现出更加优异的吸波能力。未来，开发具备智能响应和多功能化特性的碳基气凝胶材料，将为其在新兴技术领域的应用打开更多的可能性。此外，随着材料科学、化学和物理等学科的不断交叉融合，碳基气凝胶吸波材料在电磁波吸收、能量储存、红外隐身等多方面的应用将持续扩展。碳基气凝胶将在民用和军用领域的高技术装备中扮演不可替代的角色。

尽管碳基气凝胶材料展现了出色的吸波性能和多功能特性，但在实际应用中仍然存在一些问题亟待解决：(1)碳基气凝胶的吸波剂内部传输路径较

短，限制了其对电磁波的吸收效率，尤其在宽频吸收的能力上仍需改进；(2)碳基气凝胶的电磁波损耗机制较为单一，电磁波损耗能力相对较弱，导致部分电磁波未能被完全吸收；(3)在实际应用中，涂层材料厚度过大，可能限制其在某些轻量化应用场景中的使用。因此，未来的研究应着重于优化碳基气凝胶的微观结构，通过合理设计材料的多重介电损耗和磁损耗机制，进一步提升材料的吸波性能和宽频吸收能力。

展望未来，碳基气凝胶吸波材料在材料科学和工程技术中的地位将愈发重要。随着低碳节能理念的不断推广，碳基气凝胶因其轻质、高效、可持续等特点，有望在多个领域取得突破性进展。例如，在军事领域，碳基气凝胶可用于隐身材料和电子设备屏蔽，减少电磁信号的外泄，提高装备的隐身能力。在民用领域，碳基气凝胶可应用于建筑保温、电磁兼容性防护和储能设备中，提供更加安全、环保的解决方案。未来的研究将集中于通过纳米材料的复合和功能化改性，进一步提升碳基气凝胶的电磁波吸收能力和结构稳定性，探索其在更加苛刻和多变的环境下的应用潜力。

### 参考文献：

- [1] 李琪. 低维金属硫化物吸波材料的设计制备与性能调控研究[D]. 北京:北京科技大学, 2023.
- [2] SHU J C, CAO M S, ZHANG Y L, et al. Heterodimensional structure switching multispectral stealth and multimedia interaction devices[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(26): 2302361.
- [3] CHEN S, MENG Y, WANG X, et al. Hollow tubular  $\text{MnO}_2/\text{MXene}$  ( $\text{Ti}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{C}$ , and  $\text{V}_2\text{C}$ ) composites as high-efficiency absorbers with synergistic anticorrosion performance[J]. *Carbon*, 2024, 218: 118698.
- [4] XIA Y, GAO W, GAO C. A review on graphene-based electromagnetic functional materials: Electromagnetic wave shielding and absorption. *advanced functional Materials* [J]. 2022, 32(42): 2204591.
- [5] ZHANG X, ZHANG X, LIU D, et al. Advances in carbon microsphere-based nanomaterials for efficient electromagnetic wave absorption[J]. *Langmuir*, 2024, 40(36): 18857-18881.
- [6] ZHENG S, WANG Y, WANG X, et al. Research progress on high-performance electromagnetic interference shielding materials with well-organized multilayered structures [J]. *Materials Today Physics*, 2024, 40: 101330.
- [7] XIONG X, ZHANG H, LV H, et al. Recent progress

- in carbon-based materials and loss mechanisms for electromagnetic wave absorption [J]. *Carbon*, 2024, 219: 118834.
- [8] MA L, HAMIDINEJAD M, WEI L, et al. Absorption-dominant EMI shielding polymer composite foams: Microstructure and geometry optimization [J]. *Materials Today Physics*, 2023, 30: 100940.
- [9] MA Z, ZHANG Y, CAO C, et al. Attractive microwave absorption and the impedance match effect in zinc oxide and carbonyl iron composite [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2011, 406(24): 4620-4624.
- [10] LU J, WANG Y, WANG L, et al. Polyvinylpyrrolidone-assisted building of slice-like bread  $\text{SnO}_2$  for microwave absorption and radar cloaking [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 686: 133391.
- [11] LIU C, LIN J, WU N, et al. Perspectives for electromagnetic wave absorption with graphene [J]. *Carbon*, 2024, 223: 119017.
- [12] ZHANG S, CHENG B, GAO Z, et al. Two-dimensional nanomaterials for high-efficiency electromagnetic wave absorption: An overview of recent advances and prospects [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 893: 162343.
- [13] HAN Y, RUAN K, GU J. Multifunctional thermally conductive composite films based on fungal tree-like heterostructured silver nanowires@boron nitride nanosheets and aramid nanofibers [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(5): e202216093.
- [14] LIU Y, JIA Z, ZHAN Q, et al. Magnetic manganese-based composites with multiple loss mechanisms towards broadband absorption [J]. *Nano Research*, 2022, 15(6): 5590-5600.
- [15] SHU J C, CAO W Q, CAO M S. Diverse metal-organic framework architectures for electromagnetic absorbers and shielding [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(23): 2100470.
- [16] MUNIR A. Microwave radar absorbing properties of multiwalled carbon nanotubes polymer composites: A review [J]. *Advances in Polymer Technology*, 2017, 36(3): 362-370.
- [17] ZHOU X, ZHANG J, WU H, et al. Reducing graphene oxide via hydroxylamine: A simple and efficient route to graphene [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, 115(e24): 11957-11961.
- [18] ZHANG Y, HUANG Y, ZHANG T, et al. Broadband and tunable high-performance microwave absorption of an ultralight and highly compressible graphene foam [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(12): 2049-2053.
- [19] LIU C, WU N, PAN F, et al. Graphene/carbon nanotube aerogels with ultralow filling ratio through perfect cross-linking interface for efficient microwave absorption [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 287: 111835.
- [20] QIAO J, SONG Q, ZHANG X, et al. Enhancing interface connectivity for multifunctional magnetic carbon aerogels: An in situ growth strategy of metal-organic frameworks on cellulose nanofibrils [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(19): 2400403.
- [21] GEDLER G, ANTUNES M, VELASCO J I, et al. Enhanced electromagnetic interference shielding effectiveness of polycarbonate/graphene nanocomposites foamed via 1-step supercritical carbon dioxide process [J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 906-914.
- [22] 罗祖云. 磁性石墨烯气凝胶复合材料的制备及其性能研究 [J]. *现代化工*, 2024, 44(07): 175-179.
- [23] ZHU L, CAO Y, JIANG B, et al. Compressible, elastic and 3D porous  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene/RGO/CNCs composite aerogel for electromagnetic wave absorbing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 969: 172117.
- [24] LEE C, WEI X, KYSAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene [J]. *Science*, 2008, 321(5887): 385-388.
- [25] 郑舒方. 具有三维连续网络结构的聚合物基导热复合材料研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(12): 6528-6544.
- [26] WAN Y J, ZHU P L, YU S H, et al. Ultralight, super-elastic and volume-preserving cellulose fiber/graphene aerogel for high-performance electromagnetic interference shielding [J]. *Carbon*, 2017, 115: 629-639.
- [27] WANG S, ZHANG X, TANG Y, et al. Facile fabrication of biomass chitosan-derived magnetic carbon aerogels as multifunctional and high-efficiency electromagnetic wave absorption materials [J]. *Carbon*, 2024, 216: 118528.
- [28] LIANG L, LI Q, YAN X, et al. Multifunctional magnetic  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene/graphene aerogel with superior electromagnetic wave absorption performance [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6622-6632.
- [29] KONG L, ZHANG S, LIU Y, et al. Flexible CNTs/CNF-WPU aerogel for smart electromagnetic wave absorbing with tuning effective absorption bandwidth [J]. *Carbon*, 2023, 207: 13-22.
- [30] 张春梅, 李小龙, 王宇柔, 等. 碳基气凝胶/聚二甲基



- 硅氧烷复合材料的制备及其在Ka波段的吸波性能[J]. 塑料工业, 2022, 50(12): 122-126.
- [31] ZHOU X, WANG Y, XIAO L, et al. Preparing carbon black aerogel quickly by chemical vapor deposition [J]. *Composites Communications*, 2023, 37: 101460.
- [32] HE J, LI J, ZHANG J, et al. Metal ions-assisted construction of  $\text{SiO}_2/\text{MXene}/\text{Fe}_3\text{O}_4$  aerogel as multifunctional electromagnetic wave absorbing material[J]. *Carbon*, 2023, 214: 118266.
- [33] CUI C, GENG L, JIANG S, et al. Architecture design of a bamboo cellulose/ $\text{Nb}_2\text{CT}_x$  MXene/ZIF-67-derived lightweight  $\text{Co}/\text{Nb}_2\text{CT}_x$ /carbon aerogel for highly efficient electromagnetic wave absorption, thermal insulation, and flame retardant [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(21): 8297-8311.
- [34] WANG W, WANG Y, LU Z, et al. Hollow  $\text{ZnO}/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  microspheres anchored graphene aerogels as a high-efficiency microwave absorber with thermal insulation and hydrophobic performances [J]. *Carbon*, 2023, 203: 397-409.
- [35] GAN Z, SUN W, ZHAO S, et al. Hierarchical porous structure salt-resistance carbon-based aerogel for efficient solar-driven interfacial steam generation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 495: 153694.
- [36] LV H, LI Y, JIA Z, et al. Exceptionally porous three-dimensional architectural nanostructure derived from CNTs/graphene aerogel towards the ultra-wideband EM absorption [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 196: 108122.
- [37] HUANG Z, QIN R, ZHANG H, et al. Ambient-drying to construct unidirectional cellulose nanofibers/carbon nanotubes aerogel with ultra-lightweight, robust, and superior microwave absorption performance [J]. *Carbon*, 2023, 212: 118150.
- [38] LI X, FENG J, JIANG Y, et al. Anti-oxidation performance of carbon aerogel composites with SiCO ceramic inner coating [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(8): 9704-9711.

## Preparation of Carbon-Based Aerogel Wave-Absorbing Materials and Their Applications

ZHANG Na<sup>1</sup>, ZHANG Xuji<sup>1</sup>, WANG Yishan<sup>1</sup>, ZHANG Xueqian<sup>1\*</sup>, HUANG Xiaoxiao<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** With the rapid development of electronic science and information technology, the problem of electromagnetic pollution has become increasingly serious, and has become one of the urgent challenges to be solved globally. The potential risk of electromagnetic waves for the environment and human health has prompted academia and industry to propose a variety of coping strategies, among which electromagnetic wave-absorbing materials have become the key means to solve the electromagnetic pollution problem due to their ability to effectively absorb and consume electromagnetic energy. Carbon-based aerogel, as an emerging nanocomposite material, shows great potential in the field of electromagnetic wave absorption due to its three-dimensional porous structure, ultra-low density, high specific surface area and excellent electrical conductivity. This paper systematically introduces a variety of preparation methods for carbon-based aerogel wave-absorbing materials, including freeze-drying, chemical vapour deposition, vacuum impregnation and metal ion-assisted cross-linking, and explores the effects of these methods on the material properties. Meanwhile, this paper analyses the application prospects of carbon-based aerogels in different environments, such as thermal stability in high-temperature environments, moisture resistance in humid environments, wave-absorbing properties in strong electromagnetic radiation environments, and antioxidant properties in corrosive environments. Overall, carbon-based aerogel wave-absorbing materials show important application prospects in many fields such as electromagnetic wave absorption, energy storage, building thermal insulation and electromagnetic protection, etc. Future research will focus on further improving their performance through functionalization modification and structural optimization in order to promote their application in more high-tech fields.

**Keywords:** electromagnetic wave absorption; carbon-based aerogels; freeze drying; chemical vapour deposition; vacuum impregnation; metal ion assisted cross-linking; industrial applications

(学术编辑:常成)