



高性能气凝胶电磁波吸收材料的研究进展

罗静园[†], 严今滢[†], 吕欣铜[†], 罗煜祺, 冯钊波, 刘崇波*, 邓春健

(南昌航空大学环境与化学工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 电磁波吸收材料是将电磁波能量转化为热能或其他形式能量的一类功能材料。随着5G技术、无线通信技术和高功率电子设备的普及,电磁污染日趋严重,已经成为了仅次于空气、水、噪声污染的第4大污染。因此,开发实用有效的电磁波吸收材料成为当务之急。气凝胶是一种具有三维多孔结构的材料,具有高比表面积、高孔隙率、低密度、大的传输路径等特点。气凝胶材料内部独特的高孔隙率、高比表面积能显著降低材料的有效介电常数及优化阻抗匹配,大的传输路径能延长电磁波的传输路径,增强对电磁波衰减能力。因此,气凝胶材料在电磁波吸收领域中受到了广泛关注。为此,对电磁波吸收材料的损耗机制(如导电损耗、极化损耗、涡流损耗等),以及气凝胶的常规合成策略(如冷冻干燥、超临界干燥、常压干燥等)进行了总结,归纳分析了气凝胶的种类(如碳基气凝胶、陶瓷基气凝胶、磁性气凝胶),探讨了气凝胶复合材料潜在的电磁波吸收机理,最后指出了气凝胶电磁波吸收材料的发展方向,以及在保温、隔热、疏水性、阻燃性等智能方面的应用潜力。尽管气凝胶材料在实验室的研究已经取得了显著的进展,但是在实际生产中仍然面临巨大挑战,为制备出多功能气凝胶电磁波吸收材料,需要进一步优化制备工艺和设备。本研究旨在为高性能气凝胶电磁波吸收材料的研究提供参考。(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三)

关键词: 气凝胶;电磁波吸收;吸波机制;制备方法;分类;多功能;综述;展望

中图分类号:TB34

文献标志码:A

文章编号:1673-9981(2025)01-0037-13

引文格式: 罗静园,严今滢,吕欣铜,等. 高性能气凝胶电磁波吸收材料的研究进展[J]. 材料研究与应用,2025,19(1):37-49.
LUO Jingyuan, YAN Jinxi, LV Xintong, et al. Research Progress of High Performance Electromagnetic Wave Absorption Aerogel[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(1): 37-49.

0 引言

随着无线电通讯技术的高速发展,电子产品在国防、军事、医疗、民生等领域得到了广泛的应用,这些设备在为人们的生活带来便利的同时也产生了大量的电磁波(EMW)。电磁波所导致的电磁污染,如在射频电磁场下人体会吸收辐射能量,从而激活原癌基因而诱发癌症,危害人体健康;大功率的电磁波在区域环境中会互相产生干扰,导致通信系统受损,使信息失误、控制失灵、通讯不畅等,成为了继水污染、大气污染和噪声污染后,对人类生活环境和身体健康构成威胁的又一重大污染^[1-2]。此外,雷达跟踪系统对传统战斗武器的进攻和防御能力提出了巨大的挑战^[3-4]。近年来,电磁波吸收材料(EMWAMs)受到研究者的广泛关注,因其能够将电磁波转化为热能或其他形式的能量,达到衰减电

磁波的效果^[5-6]。因此,设计和制造新型高性能电磁波吸收材料已成为当代社会关注的焦点。

本文对气凝胶在电磁波吸收领域的最新研究进展进行了归纳和总结,简单介绍了电磁波吸收的基础理论,着重阐述了气凝胶的制备方法及研究现状,介绍了气凝胶材料未来的发展方向和面临的挑战。

1 电磁波吸收的基础理论

1.1 电磁波吸收机理

电磁波入射到材料表面时(见图1),会发生入射、反射和透射。入射电磁波一部分在材料表面被反射,一部分进入材料内部被损耗,一部分会透射通过材料^[7]。

高效的电磁波吸收材料,应具备将绝大多数入射电磁波吸收至其内部,进而使入射电磁波尽可能

收稿日期:2024-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22265021);航空科学基金项目(2020Z056056003)

作者简介:罗静园,本科生,研究方向为电磁波吸收材料。E-mail:2273314049@qq.com;

严今滢,本科生,研究方向为电磁波吸收材料。E-mail:179450548@qq.com;

吕欣铜,本科生,研究方向为电磁波吸收材料。E-mail:3304762152@qq.com。

通信作者:刘崇波,博士,教授,研究方向为电磁功能材料。E-mail:cbliu2002@163.com。

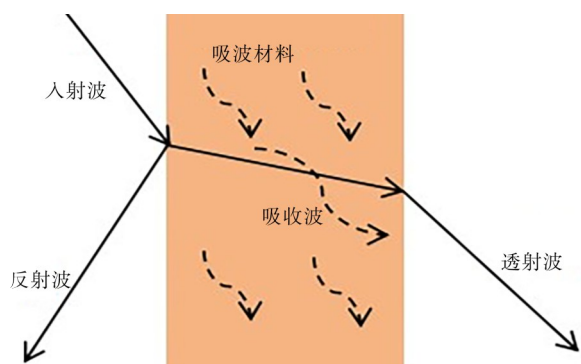
图1 电磁波射入材料表面的情况^[7]

Figure 1 Cases of electromagnetic wave injection into the surface of materials

地被耗散的特性。气凝胶材料因具有多孔结构、大的传输路径等特点,能让更多的电磁波进入到其内部而有效地耗散电磁波,同时多孔结构能提高阻抗匹配。气凝胶复合材料的不同组分之间,由于电荷分布的不均匀会产生偶极子和缺陷极化,且组分之间的界面还存在界面极化,这些都大大提高了材料的损耗能力,其介电组分能产生介电损耗、导电组分能诱导导电损耗、磁性颗粒能引发磁损耗,三者协同作用可有效地将电磁能转化为热能而耗散掉。图2为气凝胶的电磁波吸收机理图^[6]。

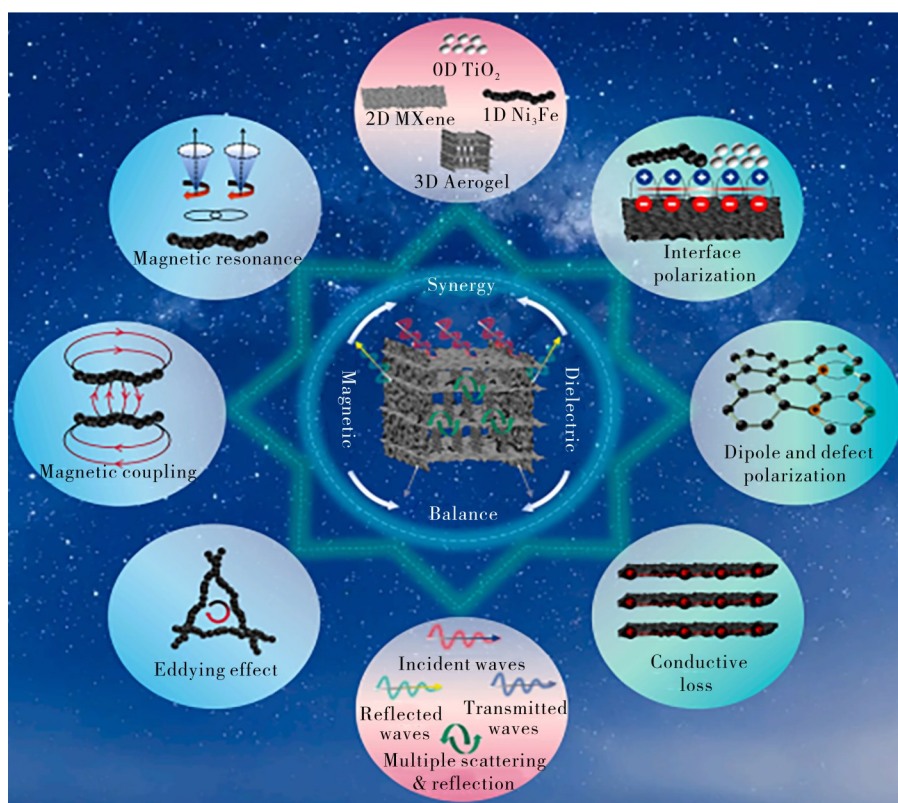
图2 气凝胶的电磁波吸收机理图^[6]

Figure 2 Schematic of the Electromagnetic wave absorption mechanism of aerogels

1.2 电磁波的损耗类型

电磁波的损耗类型主要分为介电和磁损耗。其中,介电损耗以极化和传导损耗为主,磁损耗又分为涡流损耗、自然和交换共振。

1.2.1 介电损耗

介电损耗是指在电磁波传播过程中,由介质中电场能量的转化和耗散引起的能量损耗。介电损耗角正切值($\tan\delta_e$)用于描述吸波材料的介电损耗能力(见式(1)),主要取决于材料的介电常数。式中: ϵ' 为介电常数的实部,表示材料在电场中的存储电荷的能力,是介电响应的主要指标,衡量材料在电场作用下的极化程度; ϵ'' 为介电常数的虚部,表示材料对

电场能量的吸收和损耗,与材料的电导率相关。

$$\tan \delta_e = \epsilon'' / \epsilon' \quad (1)$$

极化损耗是由极化弛豫过程中价电子或原子核发生相对位移,造成电荷的重新分布所引起的能量损耗。目前,一般用德拜弛豫理论解释极化弛豫过程(见式(2))^[8]。式(2)中, ϵ_s 和 ϵ_∞ 分别是频率为 ∞ 时的静态介电常数和介电常数,分别描述材料对低频电场和低频电场的响应。传导损耗主要是电磁波在传导过程中产生电流所引起的能量耗散,电导率(σ)与介电常数的虚部(ϵ'')的关系可用自由电子理论表示(见式(3))^[9]。式(3)中, ϵ_0 为真空的介电常数、 f 为频率。从式(3)可以看出,电导率越高, ϵ'' 也

越大,引起的传导损耗也越强。

$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{2}\right)^2 + (\epsilon'')^2 = \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}\right)^2 \quad (2)$$

$$\epsilon'' \approx \sigma / 2\pi\epsilon_0 f \quad (3)$$

1.2.2 磁损耗

磁损耗是指在电磁波传播过程中磁性材料经历磁化或反磁化过程时,外界对其所作的功转换成热的现象。当电磁波通过材料时,材料中的磁场会引起磁化效应,从而导致磁场能量的转化和耗散。磁损耗角正切($\tan\delta_\mu$)用作描述磁损耗能力(见式(4))^[10]。式中: μ'' 为磁导率的虚部,用于描述磁材料对磁场的吸收或放射能力,决定磁材料对磁场的吸收或放射程度; μ' 为磁导率的实部,用于描述磁场在磁材料中传播时的耗散现象,反映磁材料在磁化的过程中既有磁能的储存能力。

$$\tan \delta_\mu = \mu'' / \mu' \quad (4)$$

涡流损耗是指磁性材料在交变磁场中,产生涡流所引起的能量损耗(见式(5))^[11]。式中, μ_0 为真空磁导率、 d 为吸波材料厚度、 C_0 表示吸波材料在一定厚度区间内随频率变化而变化的常数。

$$C_0 = \mu'' (\mu')^{-2} f^{-1} = 2\pi\sigma\mu_0 d^2 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{2} \pi f}{c} \times \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') + \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2 + (\mu'\epsilon'' + \mu''\epsilon')^2}} \quad (8)$$

2 气凝胶的制备方法

根据气凝胶的成分,可将其分为无机气凝胶、有机气凝胶和有机-无机杂化气凝胶等。尽管气凝胶的制备工艺截然不同,但都经过溶胶-凝胶和湿凝胶干燥两个过程(见图3)^[16]。湿凝胶的干燥过程是将

1.3 吸波性能的计算方法和公式

吸波材料的吸波性能取决于吸波材料的电磁参数。首先按比例将待测样与石蜡混合,随后将混合物放入模具中压成一个外径7.0 mm、内径3.04 mm、厚度2.5 mm左右的圆环。使用矢量网络分析仪(Vector network analyzer)计算磁导率和相对介电常数,根据传输线理论(见式(6)和式(7)),计算得出反射损耗(RL)^[7,12-15]。当 $RL \leq -10$ dB时,代表了有90%以上的电磁波被衰减,频率为有效吸收宽带(EAB)。式中, Z_{in} 为输入阻抗、 Z_0 是自由空间的阻抗、 j 是虚部单位、 ϵ_r 是相对介电常数、 μ_r 是渗透率、 c 是电磁波在自由空间中的速度、 f 是电磁波频率、 d 是样品的厚度。

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (6)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right], \left(Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \right) \quad (7)$$

α 为电磁波在材料内部的衰减系数,可以用式(8)表述。从衰减系数公式看,衰减常数与吸波材料的衰减能力呈正相关,材料的衰减常数越大,其衰减能力越强。若 μ'' 和 ϵ'' 同时为0,则 α 为0,表示进入到材料内部的电磁波没有被衰减掉,材料变为透波材料。

其网络孔隙中反应后残留的溶剂(醇类及少量的水和催化剂)去除,并且使凝胶的固体骨架仍保持原有的网络多孔结构,最终得到性能优异的固体气凝胶材料。目前,常用的干燥方法主要包括冷冻干燥、常压干燥和超临界干燥^[17-18]。

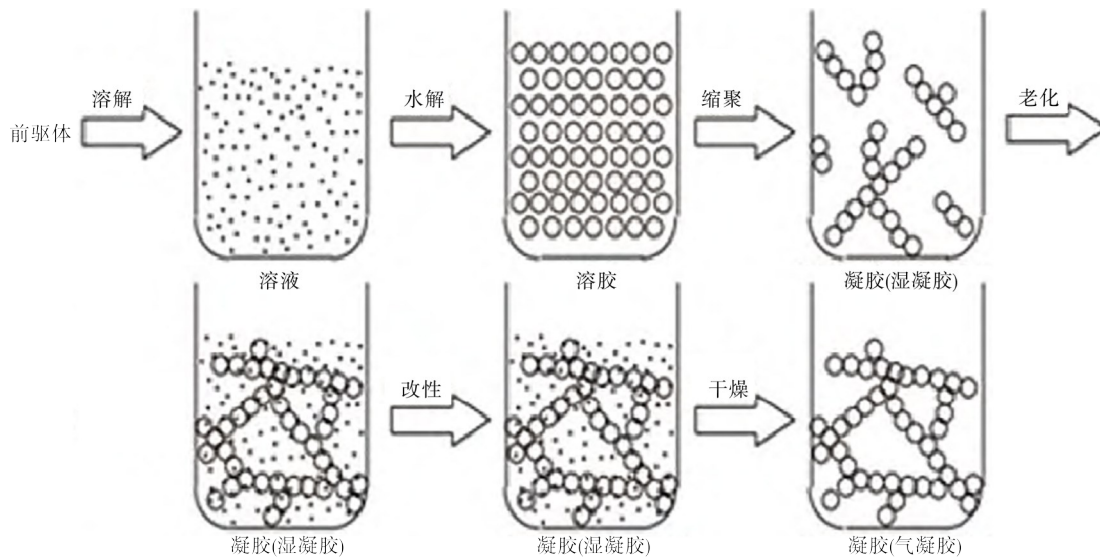


图3 气凝胶制备工艺过程图^[16]

Figure 3 The preparation of aerogels

2.1 冷冻干燥法

冷冻干燥法(亦称升华干燥法),首先将液体溶剂和溶质颗粒的前驱体在模具中冷冻成固态,然后在低温低压环境下固态的溶剂晶体(主要是水)经历升华,使液-气界面转变为固-气界面。该过程避免了液相的形成,有效地阻止了孔隙干燥过程中产生的毛细管压力,防止了孔洞塌陷,从而使材料保持原始的结构形态。近几年来,冷冻干燥法已成为制备三维多孔材料的一种有效方法^[19]。在冷冻干燥制备气凝胶的过程中,冷冻步骤至关重要,冷冻速度、溶质的性质等因素能显著影响冰晶的形成和微观形貌,因此可以利用控制冰晶的生长方向来控制气凝胶的微观结构。冷冻干燥法常用于制备具有特殊孔隙结构的气凝胶。

2.2 常压干燥法

常压干燥法是指在常压条件下,对湿凝胶进行干燥的技术。该技术具有反应条件易控制、安全性高且操作简单、工艺成熟等特点,可实现连续、大规模生产。常压干燥法的原理是溶剂将湿凝胶内部液体完全替换,然后在常压条件下加热或自然干燥,使湿凝胶孔道内溶剂蒸发从而得到气凝胶。然而,由于溶剂蒸发过程中毛细管力的存在,通常会导致凝胶尺寸收缩或凝胶骨架破坏和坍塌。一般情况下,可以通过增强湿凝胶网络骨架结构、改善凝胶中的孔洞的大小及其均匀性,以及采用低表面张力溶剂替换凝胶孔洞内高表面张力溶剂,或是对凝胶表面进行修饰处理等方法,以达到减少气凝胶的收缩和开裂的目的,从而获得性能优异的气凝胶。

2.3 超临界干燥法

超临界干燥法作为一种制备气凝胶的传统且高效的技术,具有独特的优势。在超临界状态下,由于气体和液体间不存在明显的界面,因此不会产生毛细管力,这使得湿凝胶能够在不收缩、不破坏结构的情况下干燥,形成完整的块状气凝胶。1931年,Kistler首次采用超临界干燥技术,在不破坏凝胶网络框架结构的情况下,将凝胶中的溶剂脱出,制得硅气凝胶。

3 电磁功能化气凝胶

3.1 碳基气凝胶

碳材料因具有轻质、高稳定性和优越的损耗特性而备受青睐,但是其过高的介电损耗往往会导致阻抗失配,无法实现宽带电磁波吸收,从而限制了其实际应用。碳基气凝胶材料结合了碳材料和气凝胶材料的优点,具有多孔、轻质、形状可变、超大比表面积等特性,使入射电磁波能在材料内部的孔洞内进

行多次反射和散射,有效降低材料的有效介电常数,提高阻抗匹配,是一种新型的多功能吸波材料。碳基气凝胶材料,按照碳源大致分为合成型和衍生型。合成型碳基气凝胶材料主要包括石墨烯、碳纳米管等,通常以合成或氧化还原方式制备,合成过程虽然复杂,但是所得材料的性能优异;衍生型碳基气凝胶主要是通过废弃生物质/组分可控的有机物碳化制备,价格相对低廉^[20]。

单一组分的碳基气凝胶材料,由于其损耗机制单一而限制了发展。因此,碳基气凝胶材料通常与其他材料复合,而得到的复合气凝胶材料具有丰富的异质界面,可以有效增加极化损耗类型,极大地提高了材料的整体性能^[21]。

3.1.1 石墨烯基气凝胶

石墨烯是一种二维的碳纳米材料,碳原子以 sp^2 杂化键合,形成六边形蜂窝晶格结构。石墨烯片层间的 π - π 相互作用使石墨烯容易发生堆积团聚,严重影响介电性能。若要利用单层石墨烯的优异介电性质,需将二维石墨烯转变为具有三维结构的组装体,在这一结构设计中气凝胶表现出巨大的潜力。石墨烯基气凝胶具有独特的三维多孔结构、高孔隙率、大比表面积、低密度、可压缩、优异的阻抗匹配等特性,在电磁波吸收领域运用广泛。

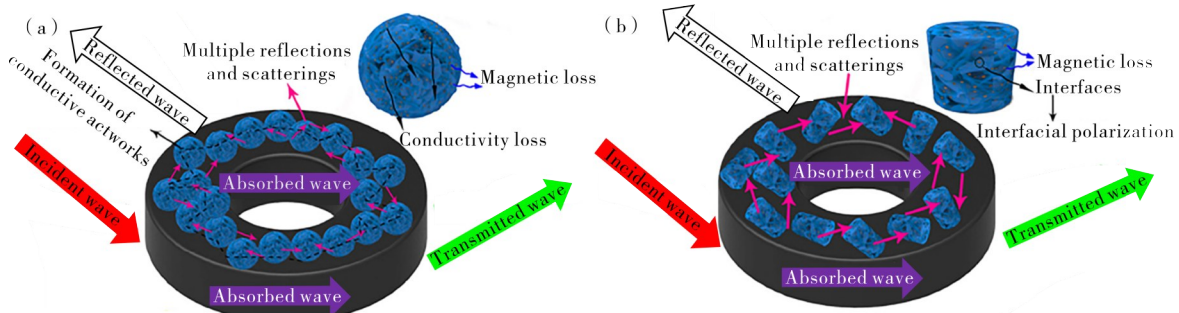
将二维的石墨烯与其他损耗类型材料复合,如磁性金属、金属氧化物、导电聚合物等可以增加偶极极化、界面极化和磁损耗的材料,从而改善阻抗匹配和增强电磁波衰减。介电吸波材料可以通过调节电导率来控制介电损耗^[22]。根据自由电子理论可知,材料的本征电导率越高,导电损耗越大。因此,在设计高性能吸波材料时,对材料电导率的选择尤为关键。电导率过低,无法实现有效吸收;电导率过高,会产生趋肤效应,导致阻抗失配,使得电磁波难以入射到材料内部进行能量耗散,进而影响吸波性能。石墨烯基气凝胶由于高导电性,导致电磁波难以与其形成良好的阻抗匹配,往往在其表面就被反射掉,难以进入孔隙内部^[23]。Zhao等^[24]采用一步退火技术制备了轻质甲基铵碘化铅/还原氧化石墨烯(MAPbI₃/rGO)复合气凝胶,其中低介电材料MAPbI₃作为极化中心主导了介质极化损耗,而rGO的引入提高了导电损耗和极化损耗。MAPbI₃修饰的rGO可适当降低过高的电导率,优化阻抗匹配,同时MAPbI₃和rGO的介电性质不同而形成的多界面进一步影响了吸波剂的电磁响应,改变原料比例可协同调节不同厚度下的多重损耗机制和干涉相位抵消效应。结果表明,MAPbI₃/rGO复合气凝胶在厚度2.08 mm时的最小反射损耗(RL_{min})为-64.35 dB,厚度为2.22 mm时的EAB_{max}为6.2 GHz。Chen

等^[25]制备的碳化硅晶须/还原氧化石墨烯(SiCW/rGOA)气凝胶,与纯的rGO相比,SiCW的加入优化了自由空间与吸收材料之间的界面阻抗,大大提升了材料的吸波性能。在SiCW/rGOA的原位生长中,SiCW与rGO之间的C-Si异质结界面的形成增强了在低频(2—6 GHz)时的极化损耗。材料的RL_{min}在厚度为2.00 mm时达到了-60.05 dB,EAB可达6.72 GHz,能够覆盖整个Ku波段。

组装不同维度的石墨烯基复合气凝胶材料,可以实现更加优异的吸波性能。Meng等^[26]采用静电纺丝方法,制备了石墨烯基气凝胶微球(AMs),该微球具有宽带、可调谐和高性能的吸波能力,其与石墨烯/Fe₃O₄气凝胶吸收机制对比(见图4)发现,通过电纺丝-冷冻干燥及煅烧工艺,可获得具有大量开口且具有分层连接的径向微通道的石墨烯/Fe₃O₄微

球。在石墨烯与Fe₃O₄的质量比一定条件下,将单块或粉末形状的气凝胶改变为微球体后,能产生独特的电磁波响应特性。当石墨烯/Fe₃O₄比为1:1时,在9.2 GHz时RL_{min}达到-51.5 dB,EAB_{max}达到了6.5 GHz。

石墨烯气凝胶常用的制备方法为水热还原法、化学还原法、模板法(包含化学气相沉积技术、冰模板法)等。Ye等^[27]通过简单的化学气相沉积技术路线,仅以甲醇为前驱体,在多孔氮化硅陶瓷中直接生长成具有定制结构和可调介电性能的富边缘石墨烯(ERG),其生长过程见图5。结果表明,ERG具有优越的电磁波吸收性能,远远超过传统的化学气相沉积法(CVD法)制备的石墨烯和还原氧化石墨烯基材料,在厚度为3.75 mm时EAB为4.2 GHz,覆盖整个X波段。



(a)—石墨烯/Fe₃O₄气凝胶微球;(b)—石墨烯/Fe₃O₄气凝胶。
(a)—graphene/Fe₃O₄ aerogel microspheres;(b)—graphene/Fe₃O₄ aerogel.

图4 石墨烯/Fe₃O₄气凝胶微球与石墨烯/Fe₃O₄气凝胶吸收机制对比示意图^[26]

Figure 4 Schematic comparison of the absorption mechanisms of graphene/Fe₃O₄ aerogel microspheres and graphene/Fe₃O₄ aerogel

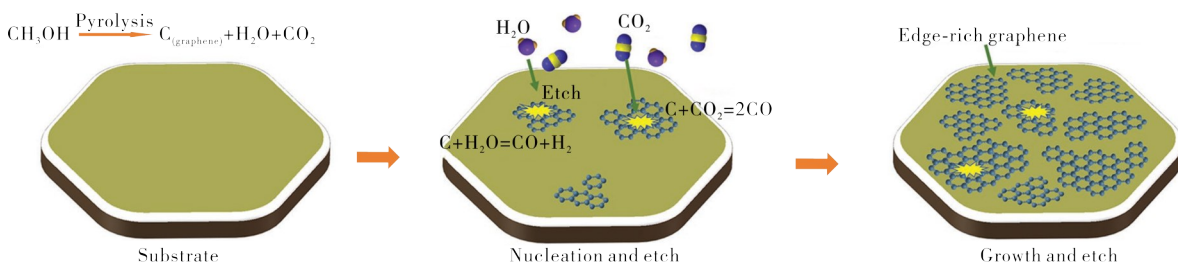


图5 ERG制备示意图^[27]

Figure 5 The preparation of ERG

3.1.2 生物质衍生碳气凝胶

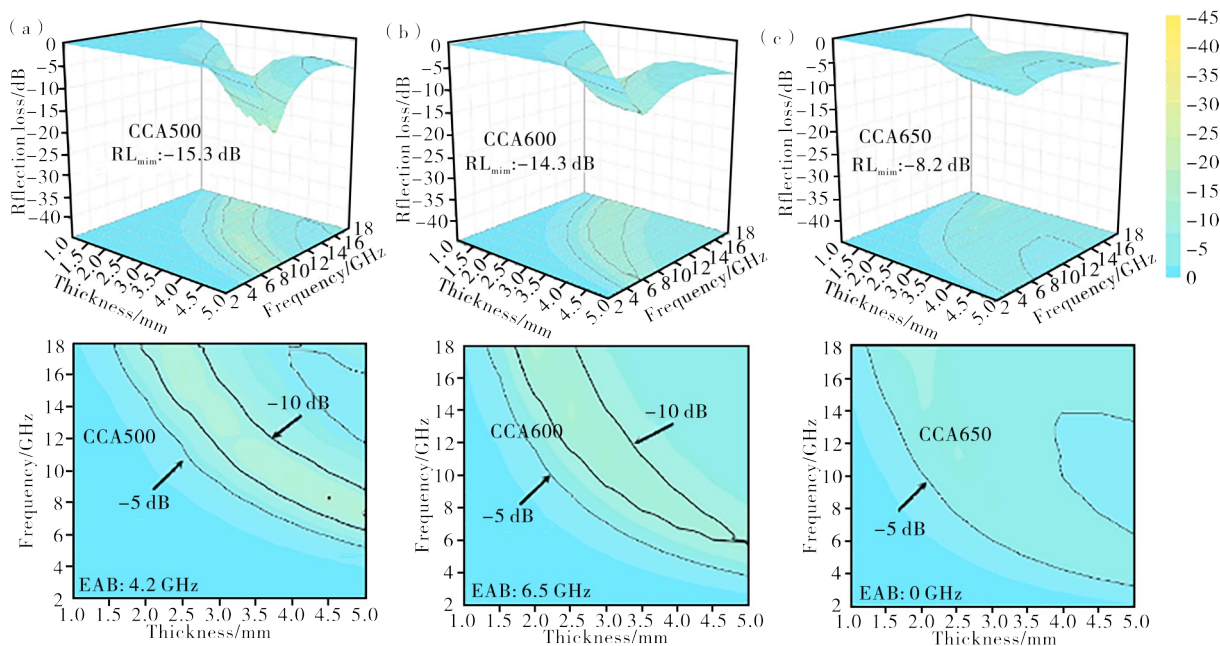
以碳纳米管和石墨烯为代表的碳纳米材料备受关注。但是,由于这一类型的材料制备工艺复杂、成本较高,难以被广泛应用。因此,迫切的需要一种由廉价原料制备的新型碳基材料作为吸波材料,生物质衍生的碳材料由此产生。生物质碳材料是在保护气体或封闭无氧环境下,通过高温热解而获得的,它不仅具有多孔碳结构,还具有气凝胶的单元结构。生物质衍生的碳气凝胶具有原料丰富易得、可再生、导电性能好、比表面积高和制备过程简单、环境友好

等特点,因而成为研究热点^[28-29]。

生物质材料按照碳源可大致分为4类,即真菌界类、植物界类、原生生物界类和动物类^[30]。在各类生物质材料中,纤维素作为自然界中分布最广、含量最多的一种多糖,可再生且廉价易得,具有良好的生物相容性和生物降解性,是制备碳基气凝胶的理想材料。Tian等^[31]以碳化细菌纤维素(CBC)为原料,制备了一种由碳纳米纤维框架上分散Cu和TiO₂纳米颗粒组成的新型碳基气凝胶。基于碳气凝胶本身的多孔性和导电性,Cu纳米颗粒的加入

和设计的三维网络结构,使CBC/Cu气凝胶显示出显著的介电损耗能力,而TiO₂纳米颗粒的加入又进一步增强了极化损耗和频散行为。在多重散射、导电网络损耗、界面极化损耗和偶极化弛豫的协同损耗机制下,合成的碳基CBC/Cu/TiO₂气凝胶具有良好的电磁波吸收性能,EAB为8.32 GHz。Gu等^[32]用柚子皮作为碳源,采用冷冻干燥技术将新鲜的柚子皮干燥,在Ar的保护下经煅烧处理得到生物质气凝胶。在冷冻干燥过程中,水升华产生的大量气孔增加了偶极子的数量和偶极极化,且高孔隙率使材料具有轻质特性。同时,简单的冷冻干燥方法,保证了生物质气凝胶完整的三维骨架结构,使其具有良好的导电性,有助于提升介电损耗。柚子皮衍生的碳气凝胶在X波段的RL_{min}为-29.50 dB,在1.7 mm的厚度下EAB为5.80 GHz。Wu等^[33]以废稻壳为原料,通过碳化和氢氧化钾碱活化工艺合成了鳄鱼皮状生物质分层多孔碳(BHPC)材料,在填充比为10%(质量分数)时,BHPC-10复合材料的RL_{min}达到-47.46 dB,在2.8 mm厚度下X波段的EAB可达3.40 GHz。

生物质碳气凝胶的制备通常按照前驱体凝胶化-干燥-碳化-后处理/活化的过程进行^[34],此过程涉及到有机组分在高温下热分解。然而,碳化温度会对材料的性质产生不同程度的影响。Wang等^[35]设计了一种低温碳化的方法制备高性能碳纳米管(CNT)/纤维素气凝胶,同时还检测了碳气凝胶在不同碳化温度下的电磁波吸收性能(见图6)。结果表明,CNT的掺入使材料具有了更好的介电损耗,碳纳米管与碳骨架间形成了丰富的界面,进一步改善了介电损耗,更好地提升了电磁波吸收性能。碳气凝胶在500℃下碳化2 h后,样品(CCA500)的RL_{min}为-15.3 dB、EAB为4.2 GHz;在600℃碳化温度下,碳化样品(CCA600)的RL_{min}为-14.3 dB、EAB为6.5 GHz;当碳化温度达到650℃时,合成的碳气凝胶(CCA650)表现出较弱的吸波性能,其中RL_{min}为-8.2 dB,说明简单地提高碳化温度并不能提高电磁波吸收性能。众所周知,较高的碳化温度能够导致较高的介电损耗,但是过高的介电损耗会导致阻抗失配。



(a)—CCA500的三维和二维微波反射损耗图;(b)—CCA600的三维和二维微波反射损耗图;(c)—CCA650的三维和二维微波反射损耗图。

(a)—three dimensional and two dimensional counter map of the microwave reflection losses of CCA500;(b)—three dimensional and two dimensional counter map of the microwave reflection losses CCA600;(c)—three dimensional and two dimensional counter map of the microwave reflection losses CCA650.

图6 不同碳化温度下材料的电磁波吸收性能表征^[35]

Figure 6 Electromagnetic wave absorption properties of materials at different carbonization temperatures

3.1.3 聚合物衍生碳气凝胶

聚合物衍生的碳气凝胶,是指以有机高分子为前驱体和支撑骨架,对其进行改性或负载功能填料,再经过碳化处理后得到的碳气凝胶。聚合物衍生碳

气凝胶相对于生物质气凝胶,在制备方法上具有组分可控、方法简便、性质稳定等特点,同时还具备质量轻、孔隙率高、可机械压缩和良好的结构稳定性等多种优异特性,在吸波材料领域得到了广泛的应用,

满足轻量化、高效化的发展趋势。在聚合物衍生气凝胶组分可控的基础上,还发展出苯酚、壳聚糖、芳胺类、聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯等为基质的衍生碳气凝胶。Xu等^[36]以壳聚糖为软模板,以苯酚和甲醛为碳源,以乙酸为催化剂,合成了酚类气凝胶。结果表明,在碳化温度700℃、填料质量分数为15%时,在频段12.24 GHz下碳气凝胶的 RL_{\min} 为-41 dB,在厚度2.5 mm时EAB可达到5.24 GHz。Shao等^[37]采用湿法纺丝技术,制备了具有独特皮芯结构的芳纶纳米纤维衍生的硬碳纳米纤维气凝胶微球(CNFAMs)。结果表明,相邻微球之间存在的大尺度孔隙和微球内部存在的微尺度孔隙改善了阻抗匹配,促进了电磁波反射和散射,该材料优化后在0.97%(质量分数)的超低填充比下显示出9.62 GHz的优越吸收带宽。

3.2 陶瓷基气凝胶

3.2.1 MXene基气凝胶

MXene是一种二维无机材料,由几个原子层厚度的过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物构成,是近年来新兴的一种材料。由于MXene材料表面存在羟基或末端氧,这一特性使其具有优良的导电性,同时还具有大比表面积、可调电子结构、优异的机械强度等优点^[38]。MXene材料吸波能力主要取决于介电损耗,刻蚀方法会增加二维表面缺陷和-OH、-O和-F等基团,这在一定程度上会影响导电性,但缺陷可以作为极化中心而引入极性基团,以此增加偶极极化位点,提高介电损耗^[2]。同时,也可通过引入磁性材料来增加磁损耗。MXene基气凝胶大致可分为MXene-聚合物气凝胶、MXene-金属气凝胶、MXene-无机非金属气凝胶等。MXene-金属气凝胶常用的制备方法主要包括化学还原法、无压烧结法、同步自还原和氧化方法等^[39]。首先将纳米级无机材料引入MXene中,与MXene表面形成强界面相互作用,构建具有增强稳定性的多面网络结构,再将MXene纳米片掺入聚合物水凝胶网络中,通过水热技术、冷冻干燥或化学发泡技术形成MXene气凝胶^[40]。

3.2.2 SiO₂基气凝胶

SiO₂气凝胶是一种隔热和吸波性能都非常好的轻质纳米多孔非晶固体材料,也是最早被人类所发明使用的气凝胶材料。由于大部分SiO₂气凝胶为全透明或半透明状,因此其折射率与空气折射率大致相当。此外,SiO₂气凝胶还具有高比表面积、高孔隙率和极低的室温导热系数(0.012 W·m⁻¹·K⁻¹)等优点^[41]。SiO₂气凝胶的介电常数与其孔隙率有关,

孔隙率越高介电常数越低。1931年,Dorcheh^[42]开始研究SiO₂气凝胶,最初采用的方法是先将硅酸钠水溶液酸性浓缩,再用超临界水溶解二氧化硅,然后用乙醇交换孔隙中的水,最后利用超临界流体干燥技术进行干燥,所制备出的气凝胶呈现透明、低密度、高孔隙率。由于超临界干燥过程非常耗能且危险,因此目前采用常压干燥法制备SiO₂基气凝胶。常压干燥法,首先是将湿凝胶老化和洗涤,然后使用环己烷进行表面改性,取代湿凝胶孔中的溶剂,以降低环境干燥过程中的表面张力,此法在保证安全的同时还大大降低了能耗^[41]。

3.3 磁性复合材料气凝胶

磁性气凝胶是一种具有磁响应性能的气凝胶材料,其具有气凝胶的特性(如低密度、高孔隙率、高比表面积等),因而应用前景广阔^[43]。一般情况下,在磁性气凝胶的制备过程中,需将磁性纳米颗粒进行物理分散,或是化学接枝方法镶嵌到气凝胶基体中^[44]。磁性纳米颗粒包括Fe、Co、Ni及其相关合金及金属氧化物(包括 γ -Fe₂O₃、Fe₃O₄、NiO、CoFe₂O₄等),其具有大的饱和磁化强度、高的Snoek极限、兼容的介电损耗和较高的磁导率^[45]。由于碳基气凝胶过高的导电率会导致阻抗失配,因此将磁性材料与碳基气凝胶复合有利于阻抗匹配、增加界面极化,可以有效地实现电磁波吸收,是开发宽带强吸波材料的一种很有前途的方法^[46]。其中,Fe₃O₄因优异的磁性能和较为成熟的制备工艺,常被用作磁损耗材料来制备磁性气凝胶。

3.3.1 磁性金属复合气凝胶

磁性材料的磁损耗可以赋予材料更大的磁导率,使材料能够在更薄的厚度下实现宽频吸收^[47]。Ni与其他磁性金属(Fe、Co)相比,其制备成本低、制备工艺简单及抗氧化性能好,因此得到了广泛应用。Tang等^[48]通过水热法和煅烧工艺,制备了超轻的纳米Ni修饰的3D N-掺杂还原石墨烯气凝胶。其中,乙二胺四乙酸(EDTA)的使用,不仅可以螯合纳米Ni,还有助于形成三维石墨烯结构;而引入杂原子掺杂,可改善界面极化和偶极极化;三维多孔结构有利于电磁波进行多次反射和散射,降低有效介电常数,提高匹配阻抗;N掺杂和残余含氧官能团导致了大量缺陷的生成,提供了大量的偶极子,改善了极化损耗;此外,在石墨烯片上修饰磁性纳米Ni颗粒可以诱导产生磁共振、交换共振和涡流损耗,从而有效地衰减电磁波;磁损耗和介电损耗的协同作用,有利于增强电磁波损耗能力。研究结果表明,600℃退火温度下制备的材料性能最好,在13.7 GHz时最大反射损耗为-60.8 dB,在厚度2.1 mm时EAB为

5.1 GHz。Cao等^[49]采用水热、冷冻干燥、退火等一系列处理方法制备了超轻Co-rGO-PVP气凝胶,该材料的三维多孔结构促进了电磁波的反射和散射,同时电子的迁移引起了传导损耗。此外,氧化石墨烯的官能团和缺陷导致的偶极极化与非均质界面产生的界面极化共同增强了极化弛豫,除介电损耗外,磁损耗包括磁性金属Co引起的涡流损耗和磁共振损耗。在800℃下退火的材料具有优异的电磁波吸收性能,当填充量仅为4%时,在厚度为2.0 mm时强吸收达-40.57 dB,在厚度2.5 mm时EAB达7.12 GHz,覆盖了整个Ku波段和四分之一的X波段。

低温退火衍生的碳纳米纤维素气凝胶不仅最大程度地继承了纳米纤维素的优点,还增强了缺陷、非均相界面的介电损耗。Wang等^[50]利用冷冻干燥技

术结合低温退火方法,成功合成了具有梯度多孔结构的多维磁性Ni/碳纳米纤维素气凝胶(CNCA)复合材料。Ni链的引入,不仅使缺陷和空位增加,还增强了偶极极化;Ni/CNNA、Ni/CNNA/Air等非均质界面的形成,使界面处电荷重新分配,还在多相非均质界面形成类似电容器的结构,极大增强了界面极化;含磁性的Ni纳米链的各向异性结构,可以有效地提高磁导率,使材料表现出强烈的磁共振,将电磁波转换为热能,从而产生有效的磁损耗。值得一提的是,Ni/CNCA复合材料在2.0 mm处的 RL_{\min} 为-62.0 dB,EAB为6 GHz,覆盖了整个Ku频段(见图7)。相比之下,CNCA的 RL_{\min} 为-28.1 dB,Ni链的 RL_{\min} 为-18.9 dB。此外,该复合材料还具有优异的机械适应性、疏水性和耐腐蚀性,为电磁波吸收材料在恶劣条件下的应用开辟了新方向。

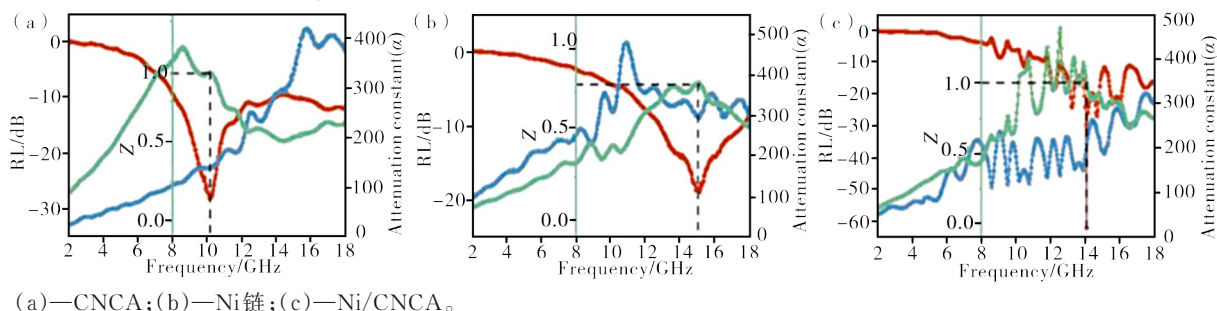


图7 CNCA、Ni链和Ni/CNCA的RL值^[50]

Figure 7 The RL values of CNCA, Ni chain, and Ni/CNCA

3.3.2 磁性合金复合气凝胶

磁性合金具有更高的饱和磁化强度,使得其表现出了更优异的磁损耗^[51]。一般来说,传统方法制备的磁性气凝胶中的磁性颗粒容易团聚,而金属有机骨架(MOF)的衍生物具有均匀的结构,磁性颗粒不会积聚。Li等^[52]以金属有机凝胶(MOG)为前驱体,通过溶胶-凝胶与凝胶相结合开发出磁性氮掺杂碳(NC)气凝胶。FeCo/NC气凝胶在5%的超低负载下具有-85 dB的超强电磁波吸收,该气凝胶在1.59 mm的超薄厚度下实现了7.44 GHz的超宽吸收,同时还表现出优异的隔热性能。Zhao等^[53]通过原位溶剂热和碳化工艺制备了CoNi/还原氧化石墨烯(rGO)气凝胶,该气凝胶具有多层次结构和高比表面积,且CoNi纳米球均匀地装饰在氧化石墨烯片表面,使得气凝胶样品具有适度的介电损耗(界面极化损耗和电导率损耗)和磁损耗(自然共振、涡流损耗和交换共振),能够有效地将电磁能转化为热能,衰减电磁波。另外,CoNi纳米球的引入可以有效地调节阻抗匹配,提高电磁波吸收,减少反射。同时该气凝胶的多孔结构也有助于提高界面极化和增加散

射点,从而增强电磁波吸收。研究表明,在CoNi纳米球的质量分数为7%和0.8 mm厚度时,CoNi/rGO气凝胶的 RL_{\min} 为-53.3 dB,EAB>3.5 GHz。Lin等^[54]通过溶剂热、静电组装、碳胺缩合反应及退火工艺制备出超轻TiO₂/Ni₃Fe/MXene/C(NFMC)气凝胶,并且还制备了无Ni₃Fe气凝胶(MC)、MXene-free气凝胶(NFC)、负载Ni₃Fe纳米颗粒气凝胶(PNF)。结果表明,通过改变厚度,样品可获得相对理想的EAB值(见图8)。在700℃时,MC、NFC样品的EAB值分别为5.44和6.48 GHz;而以PNF为基通过上述手段制得的particle-Ni₃Fe/MXene/C(NFMC)在2.03 mm厚度时 RL_{\min} 仅为-12.8 dB,在2.06 mm厚度时EAB最大值为5.36 GHz。相比之下,NFMC拥有最佳的电磁波吸收性能。在厚度3.00 mm和波段11.2 GHz时,NFMC的 RL_{\min} 为-61.6 dB;在厚度2.77 mm时,NFMC的EAB最大值为8.16 GHz、RL值为-61.6 dB。这是由于多维、多组分的协同作用,以及介质损耗和磁损耗的增强,改善了NFMC的电磁波吸收性能。

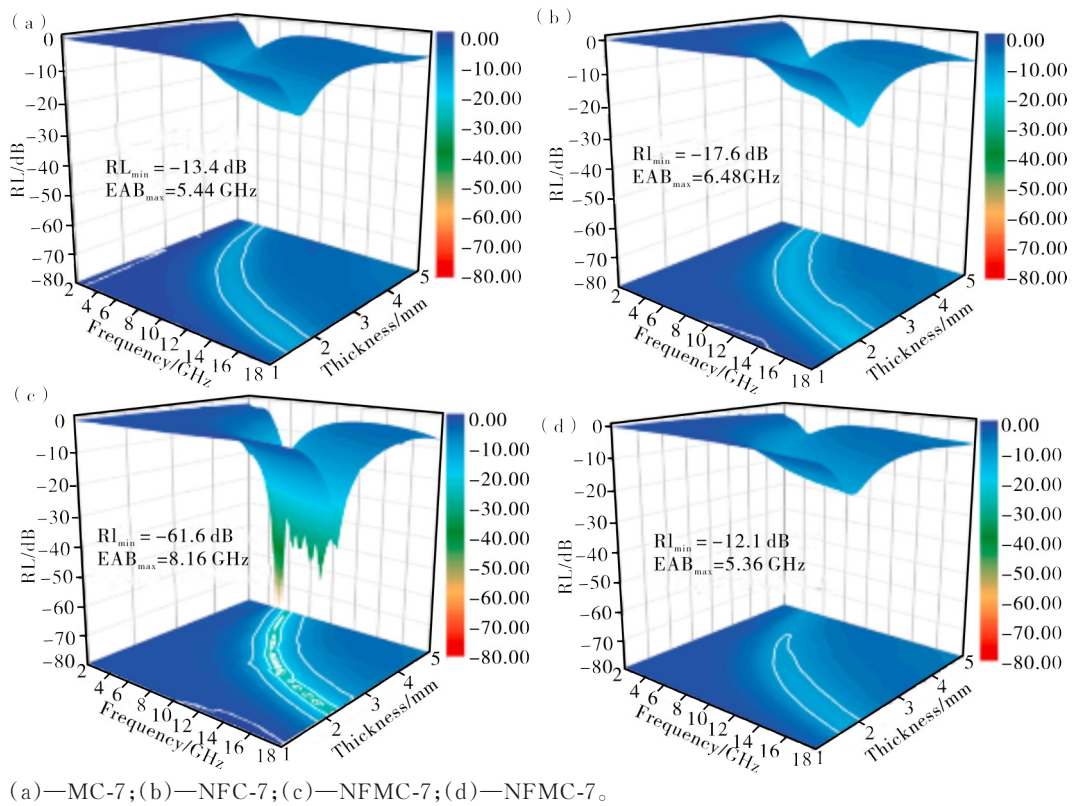


图8 磁性合金复合气凝胶的三维RL图^[54]

Figure 8 The three-dimensional RL diagram of a magnetic alloy composite aerogel

3.3.3 铁氧体复合气凝胶

尖晶石结构的 MFe_2O_4 ($\text{M}=\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}$)及其复合材料,因其高磁损耗、低成本和优异的电化学性能而被广泛用作电磁波吸收剂^[55]。但是,铁氧体吸波材料存在吸收频带窄和密度大等缺点。将铁氧体与其他碳材料、高分子材料、MXene材料进行复合,是提高铁氧体材料综合吸收性能的有效方式之一^[56]。Wang等^[57]通过简单的溶剂热法和冷冻干燥技术,合成了具有三维多孔结构的 CoFe_2O_4 (CFO)/N-rGO气凝胶。N掺杂rGO气凝胶提供了较大的表面积以黏附CFO纳米颗粒,并产生了丰富的界面、残基和缺陷,从而导致界面极化、偶极极化和缺陷极化,在2—18 GHz频率范围内磁损耗主要表现为自然共振、涡流损耗和交换共振。通过调整CFO纳米颗粒的添加量,可以极大的改善CFO/N-rGO气凝胶的电磁参数,当GO与CFO的质量比为1:2时,电磁波吸收性能最佳。当CFO纳米颗粒填充量为20%时,CFO/N-rGO气凝胶(CNGA-2)在2.1 mm处的 RL_{min} 为-60.4 dB,在厚度为2.2 mm时EAB达6.48 GHz,在厚度为3 mm时可以覆盖整个X波段(见图9)。

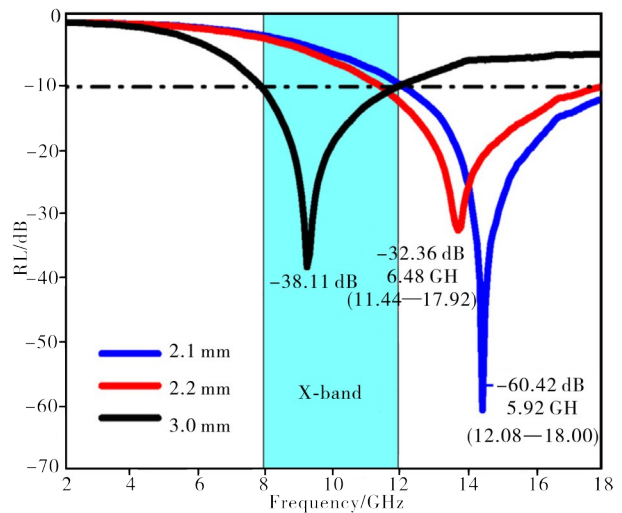


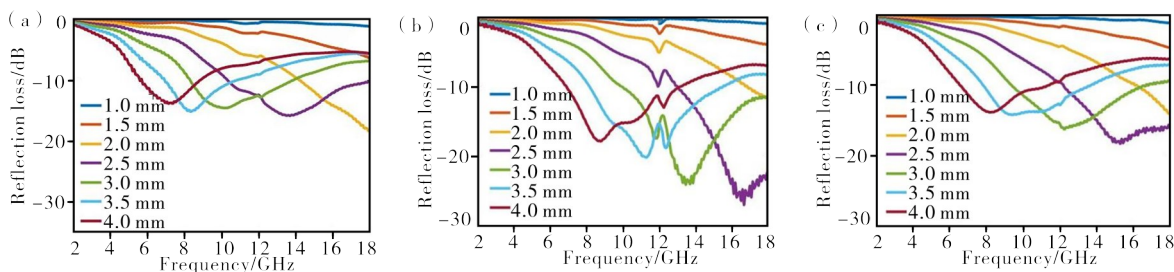
图9 不同厚度CFO/N-rGO气凝胶的RL值^[57]

Figure 9 RL values of CFO/N-rGO aerogels of different thicknesses

Wan等^[58]采用溶剂热-水热自组装法制备氮掺杂石墨烯/中空钴铁氧体复合气凝胶,该材料的特殊结构能够使电磁波的传输距离得到提高,使电磁波转换成热量而进一步耗散。这是由于rGO表面本身具有许多缺陷,加上在交变电磁场环境下N掺杂

使得大量C-N偶极在高频电磁场下会不停地旋转而产生偶极极化,此外中空结构使电磁波进入后发生多重反射,进而发生介电损耗。氮掺杂石墨烯外层和负载在上面的中空钴铁氧化物微球都可以提供大量的异质界面,多余空间电荷聚集在界面上而形成汉堡包结构,进而产生界面极化损耗,对入射电磁波进行强力衰减。同时,中空钴铁氧化物微球能够形成自然共振,也使电磁波衰减。结果发现,当中空钴铁氧化物微球质量分数为15%时,在厚度为1.8 mm的复

合气凝胶有良好的吸波性能,其 RL_{\min} 为-24.8 dB、EAB达5.2 GHz。Wu等^[59]以磁性四氧化三铁作为功能性掺杂颗粒,通过水热还原和冷冻干燥法制备了 Fe_3O_4 /石墨烯复合气凝胶,该复合气凝胶的吸波反射损耗系数随着磁性纳米 Fe_3O_4 颗粒含量的增加而先增加后减小。在磁性纳米 Fe_3O_4 颗粒的质量分数为10%时,复合气凝胶的 RL_{\min} 为-18 dB左右;在质量分数为20%时, RL_{\min} 为-27 dB左右,在质量分数为50%时, RL_{\min} 为-20 dB左右(见图10)。



(a)— Fe_3O_4 质量分数为10%;(b)— Fe_3O_4 质量分数为20%;(c)— Fe_3O_4 质量分数为50%。
(a)— Fe_3O_4 mass fraction is 10%;(b)— Fe_3O_4 mass fraction is 20%;(c)— Fe_3O_4 mass fraction is 50%。

图10 Fe_3O_4 /GA复合气凝胶的反射损耗^[59]

Figure 10 Reflection loss of Fe_3O_4 /GA composite aerogel

4 结语

近年来,随着人们对电磁波吸收材料研究的逐渐深入,气凝胶凭借其独特的多孔结构、低密度、高孔隙率等优点,成为一种良好的吸波材料,被广泛应用于电磁波吸收领域,其中碳基气凝胶材料占主导地位。本文综述了气凝胶材料应用于电磁波吸收领域的背景和气凝胶的主要制备方法。

气凝胶在制备方面,尽管目前实验室研究已经取得了显著的进展,但是气凝胶材料在实际生产中仍然面临挑战。例如,复合气凝胶的制备工艺复杂,需要进一步优化制备工艺和设备。除此之外,气凝胶的智能化设计也有着巨大的应用潜力,能否设计出能够根据外界环境对自身的结构进行变换调节的气凝胶吸波材料,使其电磁波吸收特性能够在不同的环境下实现最佳响应,值得研究者关注。

气凝胶的各种物理化学性能,由于气凝胶具有独特的结构,因此其常常会存在一些显著的缺陷。例如:石墨烯气凝胶的力学性能非常依赖于表面气孔的数量,这导致石墨烯气凝胶在低密度属性下无法实现良好的耐久性和导电性^[60];当石墨烯气凝胶作为骨架与其他有损材料结合时,可能会造成三维结构的损坏,加入的其他功能基团也可能对材料产生负面影响,如导电性降低、稳定性变差,从而影响材料的整体性和可靠性。因此,设计更优良的制备方法,以调整复合气凝胶的微观结构(孔径大小、

孔隙分布和孔隙率),以及优化各组分的包容性和协同作用,是使其性能良好的关键,这一问题的研究极具现实意义。

未来,电磁波吸收气凝胶材料将朝多功能化方向发展,这要求材料不单具有优良的电磁波吸收性能,同时还应兼具保温、隔热、疏水性、阻燃性等性能。多功能的气凝胶材料将会具有更加广泛的应用,且使用寿命会更长。保温隔热功能好的材料作为涂层,能够很好的保护机体免受高温侵袭,并且实现红外隐身;具有疏水性的材料能够应用于更多极端天气,发挥其电磁波吸收性能的同时延长材料的使用寿命。

参考文献:

- [1] 赵聪园. 电磁辐射污染监测及污染治理对策[J]. 资源节约与环保, 2023(5): 109-112.
- [2] 任英浩. 电磁辐射的危害及环境污染防护策略[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(7): 90-92.
- [3] XIE A, SUN M, ZHANG K, et al. In situ growth of MoS_2 nanosheets on reduced graphene oxide (RGO) surfaces: Interfacial enhancement of absorbing performance against electromagnetic pollution [J]. Phys Chem Chem Phys, 2016, 18(36): 24931-24936.
- [4] LIANG X, ZHANG X, LIU W, et al. A simple hydrothermal process to grow MoS_2 nanosheets with excellent dielectric loss and microwave absorption performance [J]. J Mater Chem C, 2016, 4(28): 6816-

- 6821.
- [5] SROGI K. Microwave-assisted sample preparation of coal and coal fly ash for subsequent metal determination [J]. *Anal Lett*, 2007, 40(2): 199-232.
- [6] ZHANG X, QIAO J, WANG F, et al. Tailoring electromagnetic absorption performances of TiO₂/Co/carbon nanofibers through tuning graphitization degrees [J]. *Ceram Int*, 2020, 46(4): 4754-4761.
- [7] 刘雄飞, 王壮, 吴尧尧, 等. 电磁吸波结构研究进展 [J]. *材料导报*, 2023, 37(22): 22020147-22020148.
- [8] COFFEY W T, RYBARSCH C, SCHRÖER W. Inertial effects in the debye theory of dielectric relaxation at high field strengths [J]. *Chem Phys Lett*, 1983, 99: 31-34.
- [9] 陈晖辉, 田强. 介电函数虚部与电导率的关系 [J]. *大学物理*, 2009, 28(6): 47-47.
- [10] DOBAK S, BEATRICE C, TSAKALOUDI V, et al. Magnetic losses in soft ferrites [J]. *Magnetochemistry*, 2022, 8: 60.
- [11] XUE S, FENG J, GUO S, et al. A new iron loss model for temperature dependencies of hysteresis and eddy current losses in electrical machines [J]. *IEEE Trans Magn*, 2018, 54(1): 1-10.
- [12] 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.
- [13] WANG K, CHEN Y, TIAN R, et al. Porous Co-C core-shell nanocomposites derived from Co-MOF-74 with enhanced electromagnetic wave absorption performance [J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2018, 10(13): 11333-11342.
- [14] SHU R, ZHANG G, WANG X, et al. Fabrication of 3D net-like MWCNTs/ZnFe₂O₄ hybrid composites as high-performance electromagnetic wave absorbers [J]. *Chem Eng J*, 2018, 337: 242-255.
- [15] ZHANG J, SHU R, WU Y, et al. Facile fabrication and enhanced microwave absorption properties of reduced graphene oxide/tin dioxide binary nanocomposites in the X-band [J]. *Synth Met*, 2019, 257: 116157.
- [16] 魁尚文. 常压干燥法制备基于甲基三甲氧基硅烷前驱体的气凝胶研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [17] LU P, ZHAO H, LIU X, et al. Preparation of silica aerogel via ambient pressure drying [J]. *J Mater*, 2012, 31(4): 22-26.
- [18] DAI S, JU Y, GAO H, et al. Preparation of silica aerogel using ionic liquids as solvents [J]. *Chem Commun*, 2000, 3: 243-244.
- [19] ZHANG R, GU H, HOU X, et al. High-temperature resistant Y₂SiO₅-TiO₂ aerogel composite for efficient thermal insulation [J]. *J Porous Mater*, 2021, 28: 57-64.
- [20] 王彦清. 碳基复合相变材料的制备及其性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [21] QIAN T, LI J, MIN X, et al. Enhanced thermal conductivity of PEG/diatomite shape-stabilized phase change materials with Ag nanoparticles for thermal energy storage [J]. *J Mater*, 2015, 3(16): 8526-8536.
- [22] 俞婷友, 金丹, 尹洪峰, 等. SiC 纤维及其复合材料吸波性能研究进展 [J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(6): 2131-2147.
- [23] 张贤慧. 碳基磁性吸波材料的制备及其吸波性能研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2024.
- [24] ZHAO X, SUN X, WU W, et al. rGO aerogel embedded with organic-inorganic hybrid perovskite for lightweight broadband electromagnetic wave absorption [J]. *Nano Res*, 2024, 17(11): 10196-10207.
- [25] CHEN J, JIA H, LIU Z, et al. Construction of C-Si heterojunction interface in SiC whisker/reduced graphene oxide aerogels for improving microwave absorption [J]. *Carbon*, 2020, 164: 59-68.
- [26] MENG F, WANG H. Generation of graphene-based aerogel microspheres for broadband and tunable high-performance microwave absorption by electrospinning-freeze drying process [J]. *Nano Res*, 2018, 11: 2847-2861.
- [27] YE F, SONG Q, ZHANG Z, et al. Direct growth of edge-rich graphene with tunable dielectric properties in porous Si₃N₄ ceramic for broadband high-performance microwave absorption [J]. *Adv Funct Mater*, 2018, 28(17): 1707205.
- [28] 王中奇, 李普旺, 李乐凡, 等. 橡胶吸波材料的研究进展 [J]. *应用化工*, 2017, 46(12): 2476-2479.
- [29] 黄巨龙, 周亮, 陈萌, 等. 碳基材料吸波性能研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2020, 39(2): 138-145.
- [30] 武志红, 任安文, 刘一军, 等. 生物质衍生碳基复合吸波材料的分类、吸波机制与研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(8): 3910-3934.
- [31] TIAN X, ZHANG H, LI H, et al. Multifunctional bacterial cellulose-derived carbon hybrid aerogel for ultrabroad microwave absorption and thermal insulation [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2025, 677: 804-815.
- [32] GU W, SHENG J, HUANG Q, et al. Environmentally friendly and multifunctional shaddock peel-based carbon aerogel for thermal-insulation and microwave absorption [J]. *Nano-Micro Lett*, 2021, 13: 1-14.
- [33] WU Z, YAO C, MENG Z, et al. Biomass-derived crocodile skin-like porous carbon for high-performance microwave absorption [J]. *Adv Sustainable Syst*, 2022, 6(6): 2100454.

- [34] 张佳彬, 高丹丹, 张展硕. 生物质碳气凝胶的研究现状及发展趋势[J]. 现代化工, 2024, 44(1): 59-62.
- [35] WANG Y, ZHOU Z, ZHU J, et al. Low-temperature carbonized carbon nanotube/cellulose aerogel for efficient microwave absorption [J]. *Compos Part B—Engineering*, 2021, 220: 108985.
- [36] XU J. Three dimensional carbon aerogel for microwave absorption from chitosan [J]. *Synth Met*, 2023, 295: 117352.
- [37] SHAO G, XU R, CHEN Y, et al. Miniaturized hard carbon nanofiber aerogels: From multiscale electromagnetic response manipulation to integrated multifunctional absorbers [J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(48): 2408252.
- [38] HARRIS K J. Direct measurement of surface termination groups and their connectivity in the 2D MXene V_2CT_x using NMR spectroscopy [J]. *J Phys Chem C*, 2015, 119: 13713-13720.
- [39] CHEN Z, FU X, LIU R, et al. Fabrication, performance, and potential applications of MXene composite aerogels [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13: 2048.
- [40] KHAN M U, DU L, FU S, et al. Preparations and applications of MXene-metal composites: A review [J]. *Coatings*, 2022, 12: 516.
- [41] ZHANG H, QIAO Y, ZHANG X, et al. Structural and thermal study of highly porous nanocomposite SiO_2 -based aerogels [J]. *J Non-Cryst Solids*, 2010, 356(18-19): 879-883.
- [42] DORCHEH A, ABBASI M. Silica aerogel: Synthesis, properties and characterization [J]. *J Mater Sci-Mater El*, 2008, 199(1-3): 10-26.
- [43] 裴梓帆, 王雪, 唐寅涵, 等. 磁性气凝胶材料的应用研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(S1): 470-475.
- [44] 唐祥龙, 崔升, 张鑫, 等. 磁性气凝胶的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2016, 35(12): 937-942.
- [45] MENG F, WANG H, HUANG F, et al. Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective [J]. *Compos Part B—Engineering*, 2018, 137: 260-277.
- [46] YU J, LUO H, WANG Z, et al. Construction of multi-interface magnetic FeMnC modified carbon/graphene aerogels for broadband microwave absorption [J]. *J Alloys Compd*, 2024, 1002: 175499.
- [47] QIU S, LYU H, LIU J, et al. Facile synthesis of porous nickel/carbon composite microspheres with enhanced electromagnetic wave absorption by magnetic and dielectric losses [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(31): 20258-20266.
- [48] TANG J, LIANG N, WANG L, et al. Three-dimensional nitrogen-doped reduced graphene oxide aerogel decorated with Ni nanoparticles with tunable and unique microwave absorption [J]. *Carbon*, 2019, 152: 575-586.
- [49] CAO K, YANG X, ZHANG Y, et al. Preparation of magnetic three-dimensional porous Co-rGO aerogel for enhanced microwave absorption [J]. *Carbon*, 2023, 208: 111-122.
- [50] WANG B, NAN K, RAO H, et al. Integrated design of multifunctional lightweight magnetic cellulose-based aerogel with 1D/2D/3D hierarchical network for efficient microwave absorption [J]. *Compos Commun*, 2024, 49: 101987.
- [51] YU J, LUO H, WANG Z, et al. Construction of multi-interface magnetic FeMnC modified carbon/graphene aerogels for broadband microwave absorption [J]. *J Alloys Compd*, 2024, 1002: 175499.
- [52] LI X, HU R, XIONG Z, et al. Metal-organic gel leading to customized magnetic-coupling engineering in carbon aerogels for excellent radar stealth and thermal insulation performances [J]. *Nano-Micro Lett*, 2024, 16(1): 42.
- [53] ZHAO H, CHENG J, ZHU J, et al. Ultralight CoNi/rGO aerogels toward excellent microwave absorption at ultrathin thickness [J]. *J Mater Chem C*, 2019, 7(2): 441-448.
- [54] LIN S, LIN J, XIONG Z, et al. Micro-helical Ni_3Fe chain encapsulated in ultralight MXene/C aerogel to realize multi-functionality: Radar stealth, thermal insulation, fire resistance, and mechanical properties [J]. *Chem Eng J*, 2024, 492: 152248.
- [55] XU D, REN Y, GUO X, et al. Three-dimensional magnetic functionalized graphene composite aerogels for microwave absorption: A review [J]. *ACS Appl Nano Mater*, 2022, 5(10): 14133-14146.
- [56] 王欣欣, 李凌, 张啸锟, 等. $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x@rGO$ 复合材料吸波性能研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(6): 302-308.
- [57] WANG X, LU Y, ZHU T, et al. $CoFe_2O_4/N$ -doped reduced graphene oxide aerogels for high-performance microwave absorption [J]. *Chem Eng J*, 2020, 388: 124317.
- [58] 万宗理. 钴/铜铁氧体修饰氮掺杂石墨烯磁性复合气凝胶的制备及其微波吸收性能研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [59] 吴浩. 纳米四氧化三铁/碳气凝胶制备与吸波性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [60] ANTONIETTI M, FECHLER N, FELLINGER T. Carbon aerogels and monoliths: Control of porosity and nanoarchitecture via sol-gel routes [J]. *Chem Mater*, 2014, 26(1): 196-210.

Research Progress of High Performance Electromagnetic Wave Absorption Aerogel

LUO Jingyuan[†], YAN Jinxi[†], LV Xintong[†], LUO Yuqi, FENG Zhaobo, LIU Chongbo^{*}, DENG Chunjian
(School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Electromagnetic wave (EMW) absorbing materials are a class of functional materials that convert EMW energy into heat or other forms of energy. With the popularization of 5G technology, wireless communication technology and high-power electronic devices, electromagnetic pollution is becoming more and more serious, and has become the fourth largest pollution after air, water and noise pollution, so it is imperative to develop practical and effective EMW absorbing materials. Aerogel is a material with three-dimensional porous structure, which has attracted much attention because of its high specific surface area, high porosity, low density, and large transmission path. The unique high porosity and high specific surface area inside the aerogel material can significantly reduce the effective permittivity and further optimize the impedance matching; the large transmission path can prolong the EMW transmission path and enhance the EMW attenuation ability, therefore it has received much attention in the field of EMW absorption. The loss mechanisms of EMW absorbing materials are summarized, such as conductive loss, polarization loss, eddy current loss, etc.; while the conventional synthesis strategies of aerogels are summarized, such as freeze-drying, supercritical drying, atmospheric pressure drying, etc.; the types of aerogels are also analyzed, such as carbon-based aerogels, ceramic-based aerogels, magnetic aerogels, and the potential EMW absorbing mechanisms of the aerogels are deeply discussed. Finally, the multifunctionality of aerogel materials are outlined, such as thermal insulation, heat insulation, hydrophobicity, and flame retardancy, etc., which is a great potential for aerogel application in EMW absorbing field. Although aerogel materials have made significant progress in the laboratory research, challenges still remain in mass production, which requires further optimization of the preparation process of aerogels.

Keywords: aerogels; electromagnetic wave absorption; absorption mechanism; preparation methods; classification; multifunctionality; review; expectation

(学术编辑:常成)