

综 合 评 述

纳米吸波剂改性水泥基材料研究进展

张秀芝¹, 郑沛祺¹, 陶文宏¹, 闫孝伟², 黄京立¹, 王嘉伟¹, 翟云芳¹

(1. 济南大学材料科学与工程学院, 济南 250022; 2. 山东正珩新材料科技有限责任公司, 济南 250014)

摘 要: 水泥基吸波材料可以有效缓解电磁波辐射对人们日常生活的影响。传统吸波剂所制备的水泥基吸波材料因其有效带宽窄、吸波效率低和体积厚重等缺点, 限制了其在工程中的应用。与之相比, 纳米吸波剂具有量子尺寸效应、宏观量子隧道效应和界面效应等特点, 因此纳米吸波剂改性水泥基材料为电磁辐射防护提供了一个新途径。根据纳米吸波剂种类的不同, 从碳纳米管水泥基吸波材料、石墨烯水泥基吸波材料和磁性纳米颗粒水泥基吸波材料 3 个方面总结了国内外相关研究成果, 并对未来该领域的发展进行了展望。

关键词: 水泥基材料; 吸波材料; 纳米吸波剂; 吸波性能

中图分类号: TQ172 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)05-1363-10

网络出版时间: 2023-02-28



Research Progress on Nano-absorber Modified Cement-Based Wave Absorbing Material

ZHANG Xiuzhi¹, ZHENG Peiqi¹, TAO Wenhong¹, YAN Xiaowei², HUANG Jingli¹, WANG Jiawei¹, ZHAI Yunfang¹

(1. Material Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Shandong Zhengheng New Material Technology Company Limited, Jinan 250014, China)

Abstract: Cement-based wave absorbing materials can effectively alleviate the impact of electromagnetic radiation in daily life. However, the conventional absorbent cannot be widely used in engineering due to its narrow effective band, low absorption efficiency and heavy mass. Nano-absorbers have the unique characteristics of quantum size effect, macroscopic quantum tunneling effect and interface effect. Therefore, the use of nano-absorbers cement-based modified wave absorbing materials can provide an effective approach for electromagnetic radiation protection. This review summarized recent studies on carbon nanotube cement-based wave absorbing materials, graphene cement-based wave absorbing materials and magnetic nano-metal cement based wave absorbing materials. In addition, the future research direction in this field was also discussed.

Keywords: cement-based material; wave absorbing material; nano absorber; wave absorbing capacity

随着无线电通信和电子工业的快速发展, 各种电子设备应运而生, 包括计算机网络、无线电和雷达系统、工业和医疗设备等。尽管大量的电子设备给工业生产和人类生活带来便利, 但随之而来的是电磁波污染日益严重^[1-4]。这不仅在军事方面造成负面影响, 还会危及人类的健康, 增加人类患重大疾病的概率^[5]。因此, 研究具有电磁波吸收性能的材料, 在改善人类生活、加强国防建设和科技发展方面具有重大意义。

水泥基材料因其优异的力学性能和耐久性而被

广泛应用于工程建设。然而, 水泥基材料水化后结构致密, 使大部分入射电磁波会在材料表面反射。另外, 其自身电磁波衰减能力也较弱, 导致水泥基材料的电磁防护能力不能满足需求。为了解决这一问题, 学者们在水泥基材料中引入吸波剂, 如炭黑^[6]、铁氧体^[7]、金属纤维^[8]、碳纤维^[9]等, 用于改善建筑物对电磁波的防护能力。由于传统吸波剂仅在特定的频率范围内表现出一定的电磁波吸收能力, 有效吸收带宽(反射率小于一定值的频率宽度)较窄^[10-11], 这是导致传统吸波剂未能在实际工程中

收稿日期: 2022-10-10。 修订日期: 2022-10-27。

基金项目: 国家自然科学基金(52178211); 济南市新高校 20 条项目(2021GXRC087)。

第一作者: 张秀芝(1974—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2022-10-10. Revised date: 2022-10-27.

First author: ZHANG Xiuzhi (1974—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: mse_zhangxz@ujn.edu.cn

广泛应用的原因之一。此外,微米级以上的吸波剂掺量一般在 10%~20%,且不参与水泥颗粒的水化反应,过多的掺量会降低水泥材料的工作性能,导致黏结强度不足^[12-13]。纳米吸波剂是在纳米尺度上有吸波能力的物质,由于本身具有量子尺寸效应、宏观量子隧道效应和界面效应等特有的性质^[4, 14],不仅能够一定程度上改善水泥基材料的吸波性能,而且少量纳米吸波剂可以在一定程度上起到诱导水化和密实填充的作用,增强水泥基材料的机械强度^[15]。综上所述,考虑到吸波效率、机械性能和耐久性,纳米吸波剂在水泥基吸波材料中具有优异的发展前景。根据所掺入纳米吸波剂种类的不同,可以分为碳纳米管水泥基吸波材料、石墨烯水泥基吸波材料和磁性纳米颗粒水泥基吸波材料。本文总结并讨论了国内外纳米吸波剂改性水泥基材料的研究成果,对该领域以后的研究工作及应用进行了展望。

1 吸波原理和吸波材料设计

吸波材料是指能够将入射电磁能量转换为热能或者其他形式的能量,实现对入射电磁波的有效吸收的材料。其中吸波材料对电磁波能量的吸收遵守能量守恒定律。能量守恒公式可表示为:

$$W_i = W_t + W_r + W_a \quad (1)$$

其中: W_i 表示入射波能量; W_t 表示透射波能量; W_r 表示总反射能量; W_a 表示吸收的能量。

此外,总反射能量 W_r 由入射电磁波在材料表面反射的能量与经吸波材料内部损耗后反射出材料外的能量组成,作为评判吸波材料性能的标准之一,常用反射率(R)进行表征。

若要实现吸波材料对入射电磁波的良好吸收,就需要让入射电磁波尽可能地进入吸波材料内部,并且在吸波材料内部尽可能地被消耗掉。因此,在设计过程中需要满足阻抗匹配特性和能量损耗特性 2 个方面的基本要求。

阻抗匹配特性是指入射电磁波在吸波材料表面的反射情况^[16]。若自由空间阻抗和界面处波阻抗相等时,可表示为吸波材料达到零反射的理想状态,入射电磁波可完全进入到吸波材料内部,即此吸波材料的波阻抗与自由空间波达到了最佳阻抗匹配。反之,入射电磁波在吸波材料表面造成反射,导致吸波材料的吸波效率降低。

能量损耗特性是指吸波材料具有优异的电磁损耗性能^[17],即进入吸波材料内部的电磁波能量通过电损耗或磁损耗等方式被迅速衰减损耗^[18]。电磁损

耗性能可由材料的电磁参数进行表征^[4]:

$$\epsilon_r = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (2)$$

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' \quad (3)$$

其中: ϵ_r 代表材料相对于真空的复数介电常数; μ_r 代表材料相对于真空的复数磁导率。 ϵ' 和 μ' 是实部,其物理意义是电场和磁场中的极化和磁化程度。而 ϵ'' 和 μ'' 是虚部,代表电偶极矩和磁偶极矩的重排能量耗尽程度。当 ϵ'' 和 μ'' 都等于 0 时,电磁波能量没有损失,而电磁波的吸收随着 ϵ'' 和 μ'' 的增加而增加。

综上所述,要提高材料对电磁波的吸收能力,在材料设计的过程中要综合考虑吸波材料的能量损耗特性和阻抗匹配特性,以实现更好的电磁波吸收效果。

2 碳纳米管水泥基吸波材料

在众多导电吸波剂中,碳纳米管由于具有大量的内部缺陷和表面吸附官能团,在交变电场中会产生大量的极化损耗^[19],近年来受到研究人员的青睐。此外,在碳纳米管所形成的导电 3D 网络中,电磁波会产生相对分散和混乱的相位差,从而导致聚合和偏移^[20]。因而,碳纳米管在水泥基吸波材料中有着良好的发展前景。然而,碳纳米管的对称性以及尺寸变化都会对水泥基吸波材料的吸波性能造成影响。

2.1 碳纳米管的对称性影响

碳纳米管可看成是石墨烯片层卷曲而成的中空圆柱体。在碳纳米管形成的过程中,手性角的不同,会影响碳纳米管的对称性。根据手性角的不同可以分为扶手梯形纳米管、锯齿形纳米管和手性纳米管^[21]。当手性角为 30° 时,碳纳米管称为扶手椅形纳米管;当手性角为 0° 时,碳纳米管称为锯齿形纳米管,这 2 种碳纳米管具有几何对称结构。当手性角在 0~30° 时,碳纳米管与其镜像不存在几何对称性,因而将其称为手性纳米管。相较于前 2 种碳纳米管,手性碳纳米管的手性结构使碳纳米管的电场和磁场相互耦合,为吸波材料的设计提供了新的可能性。Fakharpour 等^[22]在相同样品厚度的情况下,对比了扶手梯形纳米管、锯齿形纳米管和手性纳米管对水泥基材料吸波性能的影响。实验结果对比显示,厚度为 3 mm 的情况下,添加手性碳纳米管的水泥样品在 9.3 GHz 处达到 -2.8 dB 的吸收峰值,总体上比扶手梯形样品和锯齿形样品的吸波效率高 12.5%。这可能是由于手性碳纳米管具有不对称的结构,使

其具有更高的介电常数。Herrera-Carbajal 等^[23]的研究表明, 手性碳纳米管拥有更多的屈服表面, 相邻层随机堆叠的界面散射, 导致手性碳纳米管的声子热导率降低, 更适用于热电领域应用。由于手性材料的研究仍缺乏足够的理论和实验数据, 还有很多技术难点有待突破, 因此手性碳纳米管应用在水泥基吸波材料领域还有很大的研究空间。

2.2 碳纳米管的尺寸影响

碳纳米管的尺寸也会影响水泥基材料的吸波性能, 长管和大管径的碳纳米管在电场作用下的极化程度和电偶极距重排引起更多的介电损耗^[24-25]。崔霞^[24]探究了不同尺寸的多壁碳纳米管对水泥基材料吸波性能的影响。实验结果显示, 外径为 20~30 nm 的多壁碳纳米管水泥基样品在 0.8% 掺量的情况下, 在 14~16 GHz 的频率范围内反射率可达到 -23.1 dB, 较外径小于 8 nm 的多壁碳纳米管水泥基样品反射率低 28.4%, 表明在同一掺量下, 长管且管径较大

的多壁碳纳米管水泥基复合材料的吸波性能更好, 而长管碳纳米管有利于发挥桥连作用, 更好地抑制裂缝发展。经力学性能测试, 掺入 0.1% 的 20~30 nm 碳纳米管复合水泥基材料 7 d 抗折强度较未掺碳纳米管的高 55.2%。Zhang 等^[26]探究了不同直径和长度的碳纳米管与水泥基材料吸波性能的关系, 如图 1 所示, Control-10 表示厚度为 10 mm 的空白样品, 且每组对应的参数如表 1 所示。可以看出, 掺入长管和大管径的碳纳米管的水泥基材料吸波性能更为优异。

表 1 多壁碳纳米管的性质^[26]

Table 1 Properties of multi walled carbon nanotubes^[26]

Types of MWCNTs	OD/nm	Length/ μm
SM1	<8	0.5~2.0
SM2	20~30	0.5~2.0
M1	<8	10~30
M5	20~30	10~30

OD is external diameter.

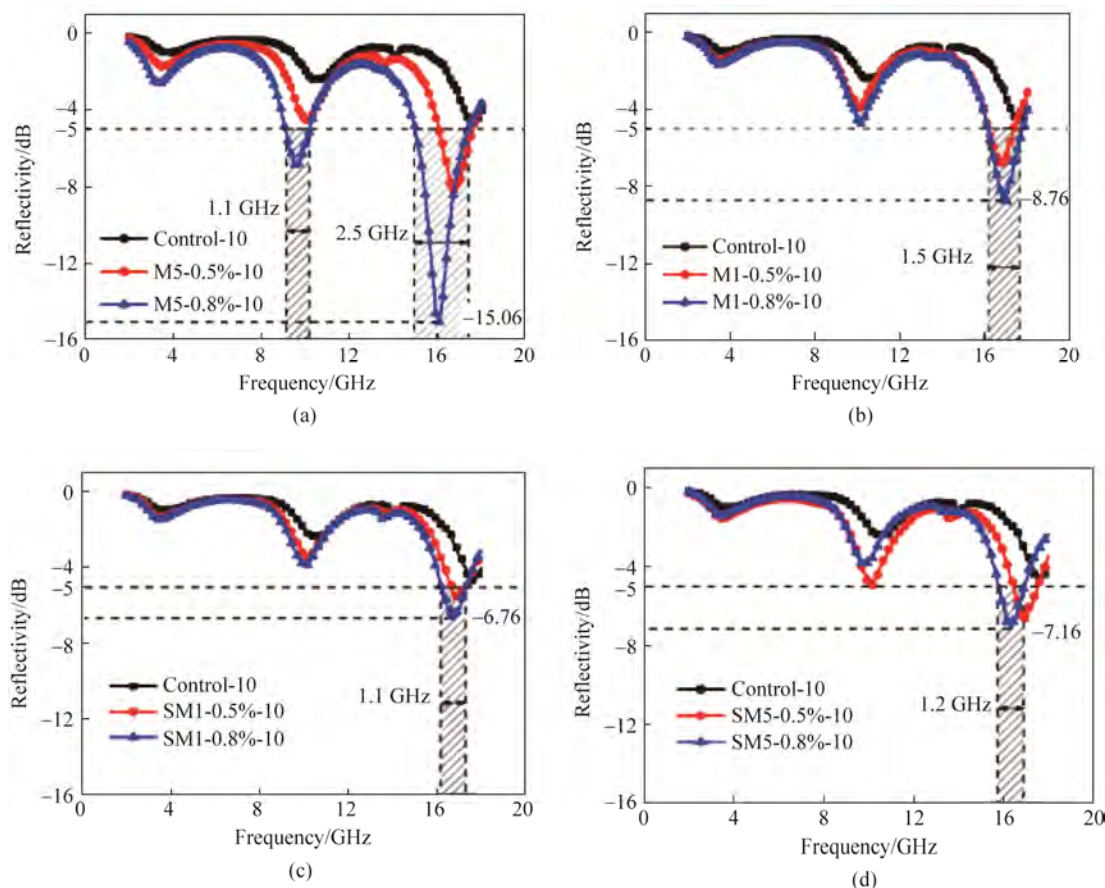


图 1 不同尺寸多壁碳纳米管对水泥基材料吸波性能的影响^[26]

Fig. 1 Effect of multi walled carbon nanotubes with different sizes on the microwave absorption properties of cement-based materials^[26]

2.3 碳纳米管的分散性影响

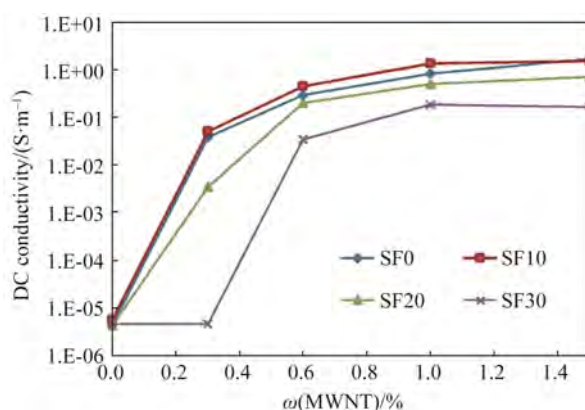
虽然上述研究都表明碳纳米管具有轻质、兼容

性好、频带宽等优点, 但是由于 van der Waals 力的作用, 碳纳米管会自发的形成团簇, 一定程度上影

响吸波性能。Fakharpour 等^[22]的研究中,通过 SEM 测试可以观察到断口中因团聚而形成的碳纳米管团块。郭志强^[27]的研究也表明,在相同管长管径情况下,0.6%掺量的碳纳米管可以显著吸收在反射率峰值附近的电磁波,并且 0.3%掺量的碳纳米管水泥基材料 28 d 抗压强度可达 87 MPa,远高于未掺入碳纳米管的水泥样品(70 MPa),这是由于少量碳纳米管的加入改善了水泥基体的孔隙结构,并阻止了水泥砂浆中微裂缝的形成。但当碳纳米管的掺量超过 0.9%之后,碳纳米管的团聚导致样品的吸波强度和力学强度反而呈现下降的趋势。针对这种情况,部分学者探究了多壁碳纳米管的分散性对水泥基材料吸波性能的影响。Kim 等^[28]研究了硅灰对水泥/碳纳米管复合材料力学和电学性能的影响。在碳纳米管掺量(质量分数)为 0.3%的复合材料中,当硅灰添加量从 0%增加到 30%时,电阻从 108 Ω 下降到 104 Ω 。研究指出少量硅灰通过机械方式将聚集的碳纳米管分散开,有助于碳纳米管形成导电网络。Nam 等^[29]研究了硅灰掺量对多壁碳纳米管(MWCNT)水泥基复合材料直流电导率的影响,如图 2 所示。由图 2 可以看出,在相同碳纳米管掺量时,加入 10% 硅灰的碳纳米管水泥样品可以增加样品的直流电导率。但随着硅灰量逐渐增加,材料的直流电导率下降。这可能是由于过量掺入绝缘的硅灰会阻碍碳纳米管导电网络的形成。Al-Dahawi 等^[30]探究了 8 种不同的混合方法对碳纳米管水泥基材料电性能的影响,发现在相同时间和相同碳纳米管掺量的情

况下,将所有干原料和水用 3 000 r/min 转速进行混合的电阻率比将干原料用 100 r/min 混合后再加水要低。这主要是因为混合的转速越高,碳纳米管在水泥浆体中的分散越均匀,从而导电网络形成的越完整。

表 2 展示了碳纳米管水泥基吸波材料的吸波性能。可以得出结论,样品的厚度和吸波剂的掺量都影响着水泥基吸波材料的吸波性能,而碳纳米管水泥基吸波材料的最大吸收峰大部分集中在 9~16 GHz 范围内,且在 Yue 等^[31]的研究中,双层结构的碳纳米管水泥基吸波材料展现出了更高的有效带宽,比单层结构的样品宽 5.2 GHz。



ω is mass fraction.

图2 硅灰含量对碳纳米管水泥基复合材料电导率的影响^[29]
Fig. 2 Effect of silica fume content on electrical conductivity of carbon nanotube cement matrix composites^[29]

表 2 碳纳米管水泥基吸波材料的吸波性能

Table 2 Microwave absorption properties of some carbon nanotube cement-based microwave absorbing materials

Filler	Sample structure	w(Filler)/%	Frequency range/GHz	Thickness/mm	Wave absorbing capacity			Reference
					$R_{\min}$ /dB	Frequency of $R_{\min}$ /GHz	Bandwidth/GHz	
Multi-walled carbon nanotubes	Single-layer	0.6	2–18	25	–28.0	2.9	8.7 (<–8 dB)	[32]
		0.9		25	–13.0	16.8	7.1 (<–10 dB)	
Multi-walled carbon nanotubes	Single-layer	0.086	5.8–8.2; 8–12.4; 12–18	20	–13.6	5.8	9.8 (<–10 dB)	[31]
Multi-walled carbon nanotubes	Double-layer	0.8	5.8–8.2; 8–12.4; 12–18	20	–32.9	11.0	12.7 (<–10 dB)	
				30	–47.3	11.1	14.0 (<–10 dB)	
Multi-walled carbon nanotubes	Single-layer	0.8	2–18	20	–23.12	14.5	4.2 (<–10 dB)	[26]
Multi-walled carbon nanotubes, Hollow glass microsphere	Single-layer	1.0	1–18	20	–15.85	15.9	8.0 (<–10 dB)	[33]
Multi-walled carbon nanotubes, Silica fume	Single-layer	0.6	7–11.5	25	–28	9.4	3.2 (<–10 dB)	[29]

虽然碳纳米管为水泥基吸波材料的设计提供了多种可能性,然而水泥基吸波材料的工作性与碳纳

米管和水泥基体的界面粘结强度密切相关,两者结合太强或太弱都不利于复合材料性能的提高^[34]。同

时碳纳米管昂贵的价格限制了其在工程中的应用。如何提高碳纳米管在水泥基材料中的分散性和根据实际使用情况设计碳纳米管水泥基吸波材料的结构形式仍是未来研究的一个方向。

3 石墨烯水泥基吸波材料

石墨烯是一种以 sp^2 杂化连接的碳原子紧密堆积成单层二维蜂窝状晶格结构的纳米新材料^[35]。在室温下的载流子迁移率约为 $15\ 000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 电阻率只有大约 $10^{-8}\ \Omega/\text{m}$, 是目前电阻率最小的材料。同时, 石墨烯还有优异的导热性能, 高纯度石墨烯的导热系数甚至远高于单壁碳纳米管和多壁碳纳米管^[36]。且石墨烯具有轻质、高比表面积的特性, 表面悬挂的化学键一方面在电磁场的作用下容易因石墨烯外层电子的极化弛豫而使电磁波衰减, 另一方面让石墨烯容易进行改性^[37-38]。因此, 石墨烯在吸波材料领域中具有优异的发展前景。本小节主要介绍石墨烯的形貌和结构对水泥基材料吸波性能的影响。

3.1 层状石墨烯

自 2004 年通过机械剥离成功制备单层石墨烯以来, 有关层状石墨烯的研究和相应论文逐年增加。层状是指 1 层或 3~10 层, 厚度在 5 nm 以下以六角形蜂巢结构周期性紧密堆积的碳原子构成的二维碳材料。而单层石墨烯制备困难, 且电阻率小于多层石墨烯, 所以大部分学者都选用多层石墨烯作为纳米吸波剂。Goracci 等^[39]依据介电质光谱学, 探究了石墨烯水泥基材料在 $10^{-2}\sim 10^6\text{ Hz}$ 频率范围内的电磁特性。研究发现加入多层石墨烯后, 在频率高于 40 Hz 时, 室温下样品的电阻从 8.9 k Ω 降低到 3.9 k Ω , 表明电荷传输特性得到改善。Sun 等^[40]使用多层石墨烯和锰锌铁氧体作为吸收剂, 设计了双层水泥基吸收材料, 测试结果显示, 在 2~18 GHz 的范围内, 反射率可达 -14.1 dB, 反射率小于 -7 dB 的有效带宽可达 16 GHz。同时, 添加了石墨烯的上层水泥样品的 7 d 和 28 d 抗压强度分别较未添加纳米吸波剂的水泥样品高 30.3% 和 32.7%, 可以应用于军事设施和至关重要的民用设施。Cui 等^[41]的实验表明, 通过加入 5% 的多层石墨烯, 水泥基复合材料的电磁波反射率比对照组降低了 38%。Deng 等^[42]制备的石墨烯水泥基吸波材料在 10~18 GHz 范围内反射损耗均小于 -8 dB。Khushnood 等^[43]的实验结果也证明了通过将多层石墨烯分散到水泥基体中来提高电磁干扰性能的有效性。

上述研究都证明了石墨烯在水泥基吸波材料领域中的可行性, 但是由于石墨烯有极高的电导率, 易在材料表面形成电磁波的强反射, 导致石墨烯水泥基吸波材料的阻抗匹配变差。针对这种情况, 部分学者将多孔结构和石墨烯相结合, 以提高材料的吸波性能。多孔结构在水泥基材料中引入多个空腔, 一方面能够改善水泥基体与自由空间的阻抗匹配性, 另一方面为入射电磁波提供了更多的散射和反射途径, 以此增加材料对电磁波能量的损耗。Lv 等^[44]制备了石墨烯和中空玻璃微球增强水泥复合吸波材料, 并研究了样品的电磁波吸收性能。如图 3 所示, 中空玻璃微球的含量显著影响石墨烯水泥复合吸波材料的吸波性能。在 2~18 GHz 范围内, 最大吸收峰为 -36.8 dB, 且反射率为 -5 dB 以下的带宽有 14.8 GHz。程祥珍^[45]制备了石墨烯发泡聚苯乙烯水泥基复合材料, 在厚度为 30 mm、石墨烯掺量为 3% 的情况下, 在 12 GHz 处反射率可达 -13.8 dB。除了在水泥基材料中引入多孔骨料以外, 由于石墨烯的吸附能力很强, 因此也适用于泡沫混凝土。与水泥浆体混合成型时, 能够吸附在泡沫内壁上形成石墨烯薄膜层, 增加了电磁波在气孔内部反射和散射的次数^[46], 在一定程度上改善了水泥基吸波材料的吸波性能。吕兴军^[47]提出了泡沫装载水泥基吸波材料, 并探究了气孔率和样品厚度对该水泥基复合材料吸波性能的影响。测试结果发现样品对电磁波的吸收有向低频移动的趋势。样品在 2~18 GHz 的频率范围内, 反射率低于 -10 dB 的有效带宽均大于 13 GHz, 28 d 抗压强度可达 15.7 MPa, 在微观上比未添加石墨烯的泡沫水泥基多孔材料更加密实, 且式(4)说明了在多孔水泥基复合材料中因增加了电磁波消耗路径的作用, 有助于理解电磁波在泡沫装载石墨烯水泥复合材料的损耗方式。

$$I_{(y)} = I_0 \exp \left(-n \frac{k^4 |x|^2}{6\pi} \cdot y \right) \quad (4)$$

式中: I_0 为入射电磁波的强度; $I_{(y)}$ 为距离电磁波入射表面 y 处的电磁波强度; k 为电磁波在介质中的传播常数; n 为单位体积内的球体数量; x 为极化率。

3.2 石墨烯泡沫

近几年, 石墨烯泡沫也备受学者们的关注, 石墨烯泡沫的高孔隙率可以降低材料的密度, 改善材料的阻抗匹配。同时, 由于吸收基体中的官能团、离子空间等缺陷产生的极化效应以及吸收基体之间的电子跃迁, 可以进一步提高吸收体的高衰减和宽

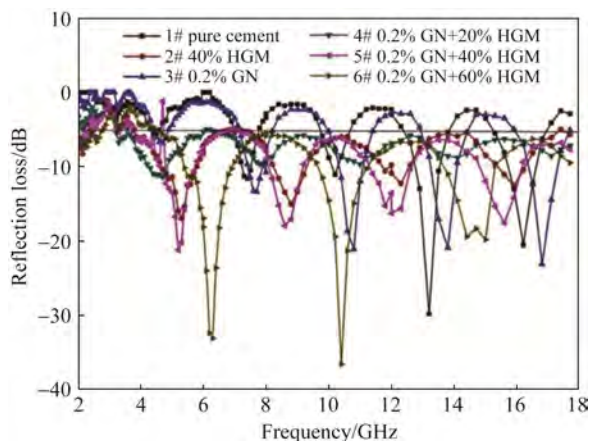


图3 中空玻璃微球石墨烯水泥复合材料的吸波效率^[44]

Fig. 3 Microwave absorption efficiency of graphene cement composites with hollow glass microspheres^[44]

带电磁波吸收特性。Liu 等^[48]研制了网状结构的氮掺杂石墨烯泡沫吸波材料，当样品体积密度为 11.6 mg/cm^3 时，样品的最大反射损耗高达 -53.9 dB ，且小于 -10 dB 的有效带宽为 4.6 GHz ，研究分析表明这种石墨烯泡沫高效的电磁吸收性能主要来源于界面极化、表面多次散射、导电结构以及阻抗匹配的平衡。Zhang 等^[49]研究表明，石墨烯泡沫内部高度复杂的三维网状结构在宽频带范围内与更多的时变电磁场耦合，从而消耗更多的电磁能量。虽然石墨烯泡沫作为一种新型材料在电磁吸收材料领域有很好的发展前景，但是目前制备石墨烯泡沫的工艺仍然十分繁杂，在水泥生产上难以广泛应用。随着对水泥基吸波材料需求的增加，繁杂的生产流程不能保证稳定输出，另一方面，在实际生产中需要考虑到成本、环保等各个方面，目前将石墨烯泡沫引入市售水泥是不现实的。因此，如何将工艺简化，并使得石墨烯泡沫的尺寸和分散性更可控将会是该方向的未来研究重点。

综上所述，石墨烯所具有的轻质、高电导率等特点，让石墨烯在水泥基吸波材料领域展现出了优异的性能。相比于单一地将石墨烯掺入至水泥中，同时引入多孔结构的石墨烯水泥基吸波材料的性能更为突出。虽然多孔结构导致水泥基材料的强度有所下降，不利于其在工程上作为结构材料使用，但可以适用于一些特定领域，如混凝土结构的表面涂覆、墙体的夹板或者喷浆砂浆等。目前，石墨烯水泥基吸波材料的有效带宽大部分集中在高频($10\sim 16 \text{ GHz}$)范围内。想要实现高带宽吸收，一方面要考虑提高水泥基复合材料的阻抗匹配，一方面可以考虑将石墨烯和磁性纳米颗粒相结合^[42]。

4 磁性纳米颗粒水泥基吸波材料

4.1 纳米 Fe_3O_4

近几年，由于纳米 Fe_3O_4 具有高磁性、高饱和磁化强度和低成本等优点^[50]，被广泛用于磁性纳米吸波剂的研究。纳米 Fe_3O_4 主要依靠磁损耗对电磁波进行衰减，磁化或反磁化过程中，将外界对其所作的功转换成热，此过程包含磁滞损耗、涡流效应和自然共振 3 类^[51]。在低频段范围内，磁滞损耗起主要作用，而在高频段范围内，涡流效应和自然共振起主导作用。高婷婷^[52]通过低温水溶液法合成的纳米 Fe_3O_4 ，在 5.4 GHz 处出现了 -22.5 dB 的最大吸收峰。何朋^[53]对比了 Fe_3O_4 纳米颗粒、 Fe_3O_4 纳米管和 Fe_3O_4 纳米环的电磁参数，结果表明在 50% 和 4.1 mm 厚度的情况下， Fe_3O_4 纳米环的有效带宽可达 1.9 GHz ，比纳米颗粒宽 1.4 GHz 。但由于现阶段仍然缺乏相关理论基础和表征手段，不同形态纳米 Fe_3O_4 电磁吸收能力的机理还有待深入研究。

在水泥基材料应用方面，纳米 Fe_3O_4 的掺量、分散性、形态都是影响水泥基吸波材料吸波性能的因素。袁迪^[54]和何永佳等^[55]探究了纳米 Fe_3O_4 的掺量对水泥基材料吸波性能的影响，均发现了在水泥基材料中掺入一定质量分数的纳米 Fe_3O_4 可以有效提升水泥基材料的吸波性能，且存在一个最佳值，当掺量高于最佳值，吸波性能反而有所下降。这可能是由于掺入过多的纳米 Fe_3O_4 会导致水泥基复合材料的阻抗匹配不良，表面反射率增加。基于上述研究，He 等^[56]制备了分散在油酸钠表面活性剂中的纳米 Fe_3O_4 磁流体，通过背散射电子图像分析发现纳米 Fe_3O_4 磁流体在水泥浆体中的分散性明显优于纳米 Fe_3O_4 粉体，在 3% 时，纳米 Fe_3O_4 磁流体水泥基复合材料的反射率为 -34.8 dB ，比同掺量下的纳米 Fe_3O_4 粉体水泥基复合材料的反射率低 22.3 dB ，这是由于纳米 Fe_3O_4 粉体更倾向于团聚成大颗粒，导致吸波性能较差。同时，由于纳米 Fe_3O_4 磁流体的分散性优于纳米 Fe_3O_4 粉体，纳米 Fe_3O_4 磁流体对水泥基材料早期强度的改善效果更为明显，在 1 d 和 7 d 时的抗压强度分别提高了 2.7% 、 24.5% 和 7.3% 。然而，由于纳米 Fe_3O_4 在密度大且潮湿环境中易被氧化，会导致水泥基材料的耐久性下降^[57]。因而通过对纳米 Fe_3O_4 表面包裹纳米 SiO_2 可以改善其易被氧化的问题。Wang 等^[58]通过 XPS 光谱分析 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 的表面化学元素价态，实验数据拟合分析结果表明，纳米 SiO_2 作为外壳可以有效保

护纳米 Fe_3O_4 内部不被氧化。经测试发现样品的反射率在 37 GHz 可达 -18.4 dB。此外, 纳米 SiO_2 还容易与水泥基材料中的水化产物氢氧化钙进一步发生反应, 形成 C-S-H 凝胶, 使水泥基材料强度及耐久性增加^[59-60]。但是目前大部分学者使用共沉淀法制备 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 核壳结构, 该方法不能精准控制纳米 SiO_2 外壳的厚度, 并且核壳结构之间的电磁波传导机制仍然缺乏深入研究。由此可见, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 结构在水泥基吸波材料中的应用是一个很有前瞻性的课题。

4.2 纳米铁氧体

铁氧体是由铁族元素和其他适当的金属元素组成的复杂化合物, 通常具有较高的磁性和一定的介电性能, 因此被广泛应用于吸波材料领域^[61]。根据晶体结构的不同可划分为尖晶石型、磁铅石型和石榴石型 3 种^[62]。相比于石榴石型, 尖晶石型和磁铅石型铁氧体的磁损耗更大, 是较为常用的吸波材料^[63]。然而, 由于铁氧体密度大, 且在水泥基材料中的掺入量多, 故不适用于轻质建筑材料的制备。因此, 学者们逐渐将目光放在微米级, 甚至纳米级的铁氧体的研究中。本小节将从纳米尖晶石铁氧体和纳米磁铅石型铁氧体 2 方面进行综述。

4.2.1 纳米尖晶石铁氧体 尖晶石铁氧体具有与镁铝尖晶石相同的晶体结构, 其结构通式为 MeFe_2O_4 , 式中 Me 为 2 价阳离子, 如 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 等, 这些金属阳离子占据晶体结构中的 8 个四面体空位和 32 个八面体空位, 通过氧离子发生超交换作用, 产生亚铁磁性^[64]。近年来, 学者们通过试验研究了磁晶各向异性对尖晶石铁氧体吸波性能的影响。金属离子按照半径的不同会占据不同的 A 位和 B 位, 因而不同的金属离子按照化合价和离子半径相互置换可构成各种形式的复合铁氧体。Jahan 等^[65]用反磁性 Al^{3+} 取代 Ni-Zn-Co 铁氧体, 并对样品的阳离子分布进行了结构分析。研究表明, 反磁性 Al^{3+} 的取代导致 A 位中的 Fe^{3+} 数量增加, 且 Co^{2+} 和一小部分 Zn^{2+} 从四面体迁移到八面体位, 样品的晶体结构发生改变。Hosseini 等^[66]基于 Mn^{2+} 取代, 采用溶液燃烧法制备了 $(\text{CoNiCuZn})_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 尖晶石铁氧体, 结果表明, Mn^{2+} 的加入使晶格常数增加, 并且当 $x=0.3$ 时, 样品的磁化强度达到了 $70 \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。Yoo 等^[67]研究了 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ -环氧树脂复合材料在 1~18 GHz 范围内的电磁波吸收性能, 研究发现随着 Ni^{2+} 含量的增加, 样品在 0~4 GHz 和 8~14 GHz

频率范围内最低反射峰逐渐向高频移动, 当 $x=0.6$ 时, 在 12.6 GHz 处反射率可达 -37.47 dB。

在水泥基材料的应用方面, 纳米尖晶石铁氧体可通过内掺或表面涂层的形式赋予水泥吸波性能。Li 等^[68]表明, $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米复合材料的引入可以有效改善水泥基材料的阻抗匹配性, 并显著提高水泥基涂层的电磁波吸收性能。特别是掺杂了 3% 的 $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米复合材料的涂层, 其最小反射率为 -34.4 dB, 有效吸收带宽达到 9 GHz。Shi 等^[69]研究了 Mn-Zn 铁氧体的水泥基复合材料的电磁波吸收性能, 实验结果表明当样品厚度为 11.5 mm 时, 含 Mn-Zn 铁氧体的水泥基材料的反射率和平均反射率分别降低了 101.3% 和 13.2%, 且低于 -10 dB 的有效带宽从 1.8 GHz 增加到 2.6 GHz。此外, 力学测试亦证实该胶凝复合材料的抗压强度足够(高于 33 MPa), 可满足大部分建筑应用的要求。

4.2.2 纳米磁铅石型铁氧体 相比于尖晶石结构, 六角晶系磁铅石结构的晶格常数 c 远大于 a , 且对称性低, 因此应用十分广泛^[70]。按照晶体结构的不同, 可以分为 M、W、X、Y、Z 和 U 6 种^[71], 对应的分子式请参照表 3。其中 Z 型和 Y 型磁铅石型铁氧体的共振频率较低, 一般小于 2 GHz, 同时 M 型磁铅石铁氧体具有较高的饱和磁化强度和工作频带, 因此更加适用于吸波材料领域的应用。Mohammadian 等^[72]制备了 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ -NiO/环氧树脂/石墨烯纳米复合材料, 样品在 8~12 GHz 的频率范围内有小于 -20 dB 的反射损耗。Shepherd 等^[73]采用共沉淀法制备了 M 型钡铁氧体, 测试结果显示样品的相对磁导率为 1.3, 表明合成的铁氧体具有高频磁特性。但由于现阶段纳米磁铅石型铁氧体的制备工艺复杂、化学组成难以控制和成本过高等, 还停留在实验研究阶段, 无法运用在工程领域中。

表 3 不同种类磁铅石型铁氧体的分子式
Table 3 Molecular formulas of magnetite type ferrites

Types	Formula	Shorthand
M	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	M
W	$\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$	M_2W
X	$\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{28}\text{O}_{16}$	M_2X
Y	$\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$	M_2Y
Z	$\text{Ba}_3\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$	M_2Z
U	$\text{Ba}_4\text{Me}_2\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$	M_2U

Me is divalent cation.

5 结束语与展望

本文从纳米吸波剂对水泥基材料吸波性能的影响角度,通过对碳纳米管水泥基吸波材料、石墨烯水泥基吸波材料和磁性纳米颗粒水泥基吸波材料 3 个方面的研究情况和结果进行了总结与系统分析,结论如下:

1) 在现阶段的研究中,以电损耗为主要电磁波损耗机制的碳纳米管水泥基吸波材料和石墨烯水泥基吸波材料在高频段表现出优异的电磁波吸收能力。其中手性碳纳米管的不对称结构更有利于电磁波的吸收,但是仍需要理论和模型的支撑才能更加深入了解其吸波机理。

2) 以磁损耗为主要电磁波损耗机制的磁性纳米颗粒水泥基吸波材料也表现出优异的电磁波吸收能力和物理性能,其中纳米 Fe_3O_4 在水泥基材料中容易被氧化,需要进行表面处理。磁性吸波材料如果以细粉的形式加入,容易聚集在一起,这不利于其在水泥浆体中的均匀分布,从而影响材料的力学及电磁波吸收性能。同时,为了达到有效吸波的阈值,吸波剂的质量分数可能高达水泥质量的 10%~30%,这不仅不利于新拌合水泥浆体的和易性,而且不可避免地会损害水泥基复合材料的力学性能。纳米铁氧体复杂的晶体结构为水泥基吸波材料的设计提供了新思路,但未来要在水泥基吸波材料中广泛应用仍需优化制备工艺和降低成本。

3) 纳米尺寸的吸波剂由于分散困难,在水泥基材料中使用应该根据实际需求着重考虑其掺量和分散方法,以求在电磁波吸收性能和机械强度之间取得平衡。

使用纳米吸波剂赋予水泥基材料吸波性能是一个重要的研究方向,但是纳米材料的掺入需同时考虑水泥基材料的吸波性能、工作性能以及耐久性。为进一步推进水泥基吸波材料的设计和研究,许多工作仍然需要深入开展,以下 4 个方面是该领域的发展方向:

1) 大部分学者都是通过在水泥基材料中掺入吸波剂来赋予水泥基材料高吸波性能,而混凝土中水泥浆体体积含量仅为 30%左右,具有电磁波吸收功能的组分只存在于水泥浆体中,通常不能均匀分散。因此电磁波在混凝土中的损耗是有限的,而骨料的体积含量通常超过 60%,可考虑用功能骨料代替普通骨料,在水泥基材料中引入适当的吸波骨料以增加其对电磁波的损耗,例如含 TiO_2 改性复合吸

波轻质骨料。

2) 目前大部分的水泥基吸波材料的研究主要是针对普通混凝土,而对高性能混凝土、轻骨料混凝土、碱激发混凝土等有良好前景的绿色低碳混凝土仍然缺乏相应的研究。

3) 3D 打印技术的发展为构建复杂结构铺平了道路,但水泥基材料与 3D 打印技术相结合对材料本身挤出性、流动性、成型性、稳定性等多方面提出了更高的要求。因此,探讨纳米吸波剂对水泥基吸波材料流变特性、机械性能和吸波性能兼顾,以满足良好的打印适应性是一个挑战。3D 打印技术与电磁波技术相结合,无论是从材料探索还是建筑制造的角度,都可以带来诸多优势,是一个前瞻性的研究方向。

4) 不仅要关注吸波剂对水泥基材料吸波性能的影响,还要考虑其对水泥基材料工作性能、力学性能及耐久性能的影响。深入探讨吸波剂对水泥水化、结构形成以及吸波性能与水化性能相协调的关系。

参考文献:

- [1] 韩敏阳,韦国科,周明,等. 低频雷达吸波材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(4): 1363–1377.
HAN Minyang, WEI Guoke, ZHOU Ming, et al. Act Mater Compos Sin (in Chinese), 2022, 39(4): 1363–1377.
- [2] 李华伟,林翱翔,林进益,等. 水泥基吸波材料结构设计的研究进展[J]. 建材世界, 2021, 42(4): 1–3.
LI Huawei, LIN Aoxiang, LIN Jinyi, et al. World Build Mater (in Chinese), 2021, 42(4): 1–3.
- [3] 赵佳,姚艳青,杨煊赫,等. 铁氧体及其复合吸波材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 2684–2699.
ZHAO Jia, YAO Yanqing, YANG Xuanhe, et al. Act Mater Compos Sin(in Chinese), 2020, 37(11): 2684–2699.
- [4] MA G, SUN J, ASLANI F, et al. Review on electromagnetic wave absorbing capacity improvement of cementitious material[J]. Constr Build Mater, 2020, 262: 120907.1–120907.15.
- [5] WANG D. A dynamic optimization on economic energy efficiency in development: A numerical case of China[J]. Energy, 2014, 66: 181–188.
- [6] LI B, JI Z, XIE S, et al. Electromagnetic wave absorption properties of carbon black/cement-based composites filled with porous glass pellets[J]. J Mater Sci: Mater Electron, 2019, 30(13): 12416–12425.
- [7] 张秀芝,张国栋,周志亮,等. 双层水泥基吸波材料制备及性能研究[J]. 功能材料, 2016, 47(6): 6113–6118.
ZHANH Xiuzhi, ZHANG Guodong, ZHOU Zhiliang, et al. J Funct Mater(in Chinese), 2016, 47(6): 6113–6118.
- [8] ZHANG X, SUN W. Electromagnetic shielding and absorption properties of fiber reinforced cementitious composites[J]. J Wuhan Univ Technol-Mater Sci Ed, 2012, 27(1): 172–176.
- [9] HAN B, ZHANG L, ZHANG C, et al. Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2016, 125: 479–489.

- [10] 陆建兵, 李东旭. 水泥基电磁屏蔽材料的研究进展[C]//第五届全国商品砂浆学术交流会议论文集(5th NCCM), 北京, 中国, 2013: 53–57.
LU Jianbing, LI Dongxu. Research progress of the cement-based electromagnetic shielding materials[C]//5th NCCM, Beijing, China, 2013: 53–57.
- [11] 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.
HUANG Julong, ZHOU Liang, CHEN Meng, et al. Mater Chin (in Chinese), 2020, 39(2): 138–145.
- [12] 王振军, 李克智, 王闯, 等. 羧基铁粉-碳纤维水泥基复合材料的吸波性能[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 69–74.
WANG Zhenjun, LI Kezhi, WANG Chuang, et al. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(1): 69–74.
- [13] 赵彦波, 刘顺华, 管洪涛. 水泥基多孔复合材料吸波性能[J]. 硅酸盐学报, 2006(2): 225–228.
ZHAO Yanbo, LIU Shunhua, GUAN Hongtao. J Chin Ceram Soc, 2006(2): 225–228.
- [14] 徐鹏, 张轩翰, 明高林, 等. 纳米改性水泥基材料功能化研究进展[J/OL]. 材料导报, 2023(16): 1–19.
XU Peng, ZHANG Xuanhan, MING Gaolin, et al. Mater Rep (in Chinese), 2023(16): 1–19.
- [15] 牛荻涛, 何嘉琦, 傅强, 等. 碳纳米管对水泥基材料微观结构及耐久性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 705–717.
NIU Ditao, HE Jiaqi, FU Qiang, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(5): 705–717.
- [16] LI L, DONG S, DONG X, et al. Electromagnetic wave shielding/absorption performances of cementitious composites incorporating carbon nanotube metamaterial with helical chirality[J]. J Compos Mater, 2020, 54(25): 3857–3870.
- [17] LIU T-T, CAO M-Q, FANG Y-S, et al. Green building materials lit up by electromagnetic absorption function: A review[J]. J Mater Sci Technol, 2022, 112: 329–344.
- [18] 庞建峰, 马喜君, 谢兴勇. 电磁吸波材料的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(2): 7–12, 16.
PANG Jianfeng, MA Xijun, XIE Xingyong. Electron Compon Mater (in Chinese), 2015, 34(2): 7–12, 16.
- [19] KIM G M, PARK S M, RYU G U, et al. Electrical characteristics of hierarchical conductive pathways in cementitious composites incorporating CNT and carbon fiber[J]. Cem Concr Compos, 2017, 82: 165–175.
- [20] BASMACI A N. Behaviors of electromagnetic wave propagation in double-walled carbon nanotubes[J]. Materials (Basel), 2021, 14(15): 4069.
- [21] BARROS E B, JORIO A, SAMSONIDZE G G, et al. Review on the symmetry-related properties of carbon nanotubes[J]. Phys Rep, 2006, 431(6): 261–302.
- [22] FAKHARPOUR M, KARIMI R. Electromagnetic wave absorption properties of MWCNTs-COOH/cement composites with different shapes of chiral, armchair and zigzag[J]. Fullerenes, Nanotubes Carbon Nanostruct, 2020, 29(5): 386–393.
- [23] HERRERA-CARBAJAL A, RODRIGUEZ-LUGO V, HERNANDEZ-AVILA J, et al. A theoretical study on the electronic, structural and optical properties of armchair, zigzag and chiral silicon-germanium nanotubes[J]. Phys Chem Chem Phys, 2021, 23(23): 13075–13086.
- [24] 崔霞. 多功能碳纳米管水泥基材料的性能与改性机理[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
CUI Xia. Properties and mechanisms of multifunctional cementitious composites with carbon nanotubes (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [25] MICHELI D, PASTORE R, VRICELLA A, et al. Electromagnetic characterization and shielding effectiveness of concrete composite reinforced with carbon nanotubes in the mobile phones frequency band[J]. Mater Sci Eng: B, 2014, 188: 119–29.
- [26] ZHANG W, ZHENG Q, WANG D, et al. Electromagnetic properties and mechanisms of multiwalled carbon nanotubes modified cementitious composites[J]. Constr Build Mater, 2019, 208: 427–443.
- [27] 郭志强. 碳纳米管水泥基复合材料吸波性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
GUO Zhiqiang. Study on the electromagnetic wave absorbing properties of multi-walled carbon nanotube/cement composites (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [28] KIM H K, NAM I W, LEE H K. Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume[J]. Compos Struct, 2014, 107: 60–69.
- [29] NAM I W, CHOI J H, KIM C G, et al. Fabrication and design of electromagnetic wave absorber composed of carbon nanotube-incorporated cement composites[J]. Compos Struct, 2018, 206: 439–447.
- [30] AL-DAHAWI A, ÖZTÜRK O, EMAMI F, et al. Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials[J]. Constr Build Mater, 2016, 104: 160–168.
- [31] YUE L, YANG Y, ZHOU Q, et al. Broadband electromagnetic wave absorbing performance by designing the foam structure and double-layer for cement-based composites containing MWCNTs[J]. Cem Concr Compos, 2022, 131: 104595.
- [32] WANG B, GUO Z, HAN Y, et al. Electromagnetic wave absorbing properties of multi-walled carbon nanotube/cement composites[J]. Constr Build Mater, 2013, 46: 98–103.
- [33] LIU X, WANG N, WANG Z. Effects of the absorber, thickness and surface roughness on the electromagnetic wave absorption characteristics of magnesium phosphate cement[J]. Constr Build Mater, 2022, 344: 128149.
- [34] 马颖, 王丹, 王晴. 多壁碳纳米管水泥基复合材料的制备与力学性能研究[J]. 混凝土, 2014(6): 72–74, 77.
MA Ying, WANG Dan, WANG Qing. Concrete (in Chinese), 2014(6): 72–74, 77.
- [35] 曾纪军, 高占远, 阮冬. 氧化石墨烯水泥基复合材料的性能及研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(S1): 198–205.
ZENG Jijun, GAO Zhanyuan, RUAN Dong. Mater Rep (in Chinese), 2021, 35(S1): 198–205.
- [36] 徐凯丽. 石墨烯—水泥基复合材料的制备及其功能性研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
XU Kaili. Preparation and investigation on functional properties of graphene-cement composites (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2018.
- [37] 张婷婷, 王荣政, 孔祥清, 等. 石墨烯及其衍生物对水泥基复合材料性能的影响研究进展[J/OL]. 混凝土与水泥制品, 2022(11): 1–5.
ZHAN Tingting, WANG Rongzheng, KONG Xiangqing, et al. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2022(11): 1–5.
- [38] 吕生华, 张佳, 罗潇倩, 等. 氧化石墨烯/水泥基复合材料的微观结构和性能[J]. 材料研究学报, 2018, 32(3): 233–240.
LV Shenghua, ZHANG Jia, LUO Xiaoqian, et al. Chin J Mater Res (in Chinese), 2018, 32(3): 233–240.
- [39] GORACCI G, J S D. Elucidation of conduction mechanism in graphene nanoplatelets (GNPs)/cement composite using dielectric spectroscopy[J]. Materials (Basel), 2020, 13(2): 275.
- [40] SUN Y, ZHOU T, PENG Y, et al. Design and performance research on dual layer cement based absorber reinforced with graphene nanosheets and manganese-zinc ferrite[J]. Mater Sci, 2021, 27(4): 477–482.
- [41] CUI X, SUN S, HAN B, et al. Mechanical, thermal and electromagnetic properties of nanographite platelets modified

- cementitious composites[J]. Compos Part A: Appl Sci Manuf, 2017, 93: 49–58.
- [42] DEND S, AI H, WANG B. Research on the electromagnetic wave absorption properties of GNPs/EMD cement composite[J]. Constr Build Mater, 2022, 321: 126398.
- [43] KHUSHNOOD R A, AHMAD S, SAVI P, et al. Improvement in electromagnetic interference shielding effectiveness of cement composites using carbonaceous nano/micro inerts[J]. Constr Build Mater, 2015, 85: 208–216.
- [44] LV X, DUAN Y, CHEN G. Electromagnetic wave absorption properties of cement-based composites filled with graphene nano-platelets and hollow glass microspheres[J]. Constr Build Mater, 2018, 162: 280–285.
- [45] 程祥珍. 石墨烯/EPS 颗粒填充水泥的宽频吸波性能[J]. 安全与电磁兼容, 2019(3): 60–64, 83.
CHENG Xiangzhen. Safety EMC (in Chinese), 2019(3): 60–64, 83
- [46] 周学军, 咸国栋, 王振, 等. 氧化石墨烯泡沫混凝土性能及作用机理研究[J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(1): 1–7.
ZHOU Xuejun, XIAN Guodong, WANG Zhen, et al. J Shandong Jianzhu Univ (in Chinese), 2022, 37(1): 1–7.
- [47] 吕兴军. 石墨烯/水泥基复合材料制备与吸波性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
LV Xingjun. Preparation and microwave absorbing properties of graphene/cement-based materials (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [48] LIU P, ZHANG Y, YAN J, et al. Synthesis of lightweight N-doped graphene foams with open reticular structure for high-efficiency electromagnetic wave absorption[J]. Chem Eng J, 2019, 368: 285–298.
- [49] ZHANG Y, HUANG Y, CHEN H, et al. Composition and structure control of ultralight graphene foam for high-performance microwave absorption[J]. Carbon, 2016, 105: 438–447.
- [50] JIAO D, LESAGE K, YARDIMCI M Y, et al. Structural evolution of cement paste with nano-Fe₃O₄ under magnetic field-Effect of concentration and particle size of nano-Fe₃O₄[J]. Cem Concr Compos, 2021, 120: 104036.
- [51] ADEBAYO L L, SOLEIMANI H, YAHYA N, et al. Recent advances in the development OF Fe₃O₄-BASED microwave absorbing materials[J]. Ceram Int, 2020, 46(2): 1249–1268.
- [52] 高婷婷. 纳米四氧化三铁复合吸波材料的制备与性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
GAO Tingting. Preparation and Performance of Nano Fe₃O₄ Composite Absorbing Materials (in Chinese, dissertation). Taiyuan: North University of China, 2017.
- [53] 何朋. 四氧化三铁纳米复合材料吸波性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
HE Peng. Study on microwave absorbing properties of Fe₃O₄ nanocomposites (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [54] 袁迪. 石墨烯-四氧化三铁水泥基材料的基础特性及吸波性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
YUAN Di. Study on basic properties and microwave absorbing properties of graphene-Fe₃O₄ cement based materials (in Chinese, dissertation). Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [55] 何永佳, 肖培浩, 李广锋, 等. 纳米Fe₃O₄水泥基复合材料的制备和吸波性能[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(10): 7–11.
HE Yongjia, XIAO Peihao, LI Guangfeng, et al. J Wuhan Univ Technol (in Chinese), 2015, 37(10): 7–11.
- [56] HE Y, LU L, SUN K, et al. Electromagnetic wave absorbing cement-based composite using Nano-Fe₃O₄ magnetic fluid as absorber[J]. Cem Concr Compos, 2018, 92: 1–6.
- [57] FLOREZ R, COLORADO H A, ALAJO A, et al. The material characterization and gamma attenuation properties of Portland cement-Fe₃O₄ composites for potential dry cask applications[J]. Prog Nucl Energy, 2019, 111: 65–73.
- [58] WANG D, YANG P, HOU P, et al. Cement-based composites endowed with novel functions through controlling interface microstructure from Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles[J]. Cem Concr Compos, 2017, 80: 268–276.
- [59] LAND G, STEPHAN D. Controlling cement hydration with nanoparticles[J]. Cem Concr Compos, 2015, 57: 64–67.
- [60] HORSZCZARUK E, ALEKSANDRZAK M, CENDROWSKI K, et al. Mechanical properties cement based composites modified with nano-Fe₃O₄/SiO₂[J]. Constr Build Mater, 2020, 251: 118945.
- [61] LI Q, PANG J, WANG B, et al. Preparation, characterization and microwave absorption properties of barium-ferrite-coated fly-ash cenospheres[J]. Adv Powder Technol, 2013, 24(1): 288–294.
- [62] 岳振星, 周济, 张洪国, 等. 柠檬酸盐凝胶的自燃烧与铁氧体纳米粉合成[J]. 硅酸盐学报, 1999(4): 84–88.
YUE Zhenxing, ZHOU Ji, ZHANG Hongguo, et al. J Chin Ceram Soc, 1999(4): 84–88.
- [63] 纪箴, 陈珂, 张一帆, 等. 铁氧体磁性材料吸波性能研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2015, 33(5): 378–381, 387.
JI Zhen, CHEN Ke, ZHANG Yifan, et al. Powder Metall Technol (in Chinese), 2015, 33(5): 378–381, 387.
- [64] 阎鑫, 胡小玲, 岳红, 等. 纳米级尖晶石型铁氧体制备进展[J]. 材料导报, 2002(8): 42–44.
YAN Xin, HU Xiaoling, YUE Hong, et al. Mater Rep (in Chinese), 2002(8): 42–44.
- [65] JAHAN N, KHANDAKER J I, LIBA S I, et al. Structural analysis through cations distributions of diamagnetic Al³⁺ ions substituted Ni-Zn-Co ferrites[J]. J Alloys Compd, 2021, 869: 159226.
- [66] HOSSEINI MOHAMMADABADI F, MASOUDPANAH S M, ALAMOLHODA S, et al. High-performance microwave absorbers based on (CoNiCuZn)_{1-x}Mn_xFe₂O₄ spinel ferrites[J]. J Alloys Compd, 2022, 909: 164637.
- [67] YOO J-E, KANG Y-M. Electromagnetic wave absorbing properties of Ni-Zn ferrite powder-epoxy composites in GHz range[J]. J Magnet Magnet Mater, 2020, 513: 167075.
- [68] LI Y, GUAN H, BAO Y, et al. Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄/Ti₃C₂T_x nanocomposite modified epoxy resin coating for improved microwave absorption and impermeability on cement mortar[J]. Constr Build Mater, 2021, 310: 125213.
- [69] SHI Y, JING H, LIU B, et al. Electromagnetic (EM) wave absorption properties of cementitious building composites containing MnZn ferrite: Preferable effective bandwidth and thickness via iron and graphite addition[J]. J Magn Magn Mater, 2022, 560: 169555.
- [70] 胡王凯, 李锦, 娄广辉, 等. 钡铅石型铁氧体材料的研究进展[J]. 国外建材科技, 2004(5): 19–22.
HU Wangkai, LI Jin, LOU Guanghui, et al. Sci Technol Overseas Build Mater (in Chinese), 2004(5): 19–22.
- [71] 卓长平, 张雄, 王雪梅, 等. 纳米六角晶系铁氧体吸波材料的制备方法 & 研究进展[J]. 材料导报, 2005(4): 109–112.
ZHUO Changping, ZHANG Xiong, WANG Xuemei, et al. Mater Rep (in Chinese), 2005(4): 109–112.
- [72] MOHAMMADIAN R, RAHMANI S, SEYED DORRAJI M S, et al. Microwave absorption properties of GO nanosheets-BaFe₁₂O₁₉-NiO nanocomposites based on epoxy resin: optimization using Taguchi methodology[J]. J Mater Sci: Mater Electron, 2017, 29(6): 4583–4595.
- [73] SHEPHERD P, MALLICK K K, GREEN R J. Magnetic and structural properties of M-type barium hexaferrite prepared by co-precipitation[J]. J Magn Magn Mater, 2007, 311(2): 683–692.