

文章编号:1007-9629(2023)12-1237-10

钢丝网增强复合石墨烯-铁氧体水泥 砂浆电磁防护性能

魏胜斌¹, 谢建斌^{1,2,*}, 管洪涛³, 王大富¹, 郭再斌¹

(1. 云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明军龙岩土工程有限公司, 云南 昆明 650214; 3. 云南大学 材料与能源学院, 云南 昆明 650500)

摘要:通过宏观性能测试、微观结构测试和数值模拟研究了钢丝网增强复合石墨烯(GR)-锰锌铁氧体(MFO)水泥砂浆(简称复合砂浆)在1~18 GHz频率下的电磁波吸收性能,并揭示了电磁波防护机理.结果表明:30.00%掺量的MFO因团聚导致的稀释效应降低了复合砂浆强度,而GR因促进水泥水化增加了复合砂浆强度;结合材料的电磁参数测试和时域有限差分法数值模拟复合砂浆电磁波吸收性能可知,复掺GR和MFO的钢丝网增强复合砂浆电磁波吸收性能最优,且存在最佳匹配层厚度;当砂浆总厚度为25 mm时,掺0.10% GR和30.00% MFO的钢丝网增强复合砂浆的电磁波有效吸收小于-10.00 dB,吸收带宽为1.68~4.34 GHz,且对3.23 GHz的电磁反射损耗可达-22.13 dB.因MFO有较好的磁损耗性能,GR有良好的介电损耗性能,加之水泥砂浆有多孔材料优异的反射特性,三者结合后能够成为具有建筑功能的电磁波吸收材料.

关键词:石墨烯;铁氧体;钢丝网;水泥砂浆;电磁防护

中图分类号:TU528.35

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.12.001

Electromagnetic Protection Performance of Steel Wire Mesh Reinforced Composite Graphene-Ferrite Cement Mortar

WEI Shengbin¹, XIE Jianbin^{1,2,*}, GUAN Hongtao³, WANG Dafu¹, GUO Zaibin¹

(1. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Kunming Junlong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Kunming 650214, China;

3. School of Materials and Energy, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: The electromagnetic wave absorption performance of steel wire mesh reinforced composite graphene (GR)-manganese-zinc ferrite (MFO) cement mortar (referred to as composite mortar) was investigated at 1–18 GHz through macroscopic performance tests, microstructural tests, and numerical simulations to reveal its electromagnetic wave protection mechanism. The results show that 30.00% of MFO reduces the strength of composite mortar due to the dilution effect caused by agglomeration, while GR increases the strength of composite mortar by promoting cement hydration. Combined with the electromagnetic parameter tests of the materials and numerical simulation of mortar electromagnetic wave absorption performance by the time-domain finite-difference method, it can be seen that the steel wire mesh reinforced composite mortar with compound doping of GR and MFO has the optimal electromagnetic wave absorption, and there exists an optimal matching layer thickness. When the total thickness

收稿日期:2023-04-13;修订日期:2023-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11862024,51264037);云南省教育厅科学研究基金项目(2022Y063);云南大学校级重点科研创新项目(2021Z17)

第一作者:魏胜斌(1997—),男,山东日照人,云南大学硕士生.E-mail:2641989633@qq.com

通讯作者:谢建斌(1973—),男,浙江台州人,云南大学教授,博士生导师,博士.E-mail:kmxiejb@sina.com

of mortar is 25 mm, the wire mesh reinforced mortar doped with 0.10% GR and 30.00% MFO has an effective electromagnetic wave absorption of less than -10.00 dB, with an absorption bandwidth of 1.68-4.34 GHz and an electromagnetic reflection loss of -22.13 dB for the electromagnetic wave of 3.23 GHz. The reflection loss of 3.23 GHz can reach -22.13 dB. Because MFO has good magnetic loss properties, GR has good dielectric loss properties, and cement mortar has excellent reflection properties of porous materials, the combination of the three can become an electromagnetic wave absorbing material with building functions.

Key words: graphene; ferrite; steel wire mesh; cement mortar; electromagnetic protection

随着信息技术的高速发展,电子仪器和无线通信设备的广泛应用给人类工作生活带来了极大便利,但同时电磁辐射也对人体健康和电子设备造成不良影响^[1-4]。目前,防电磁污染的方法主要有电磁屏蔽和电磁吸收^[5-6],其中建筑物吸收电磁波是实现信息防护和防电磁辐射的重要途径之一,因此研究一种既满足物理力学性能又兼备电磁防护性能的水泥基材料具有重要意义。

Hu等^[7]在综述水泥基材料吸收电磁波性能研究现状时,将吸波方式划分为磁损耗、电损耗和电磁耦合损耗3种。Guan等^[8]研究了碳系和金属填充水泥基材料的电磁屏蔽性能,发现水泥基材料掺入超细金属粉、纤维和金属氧化物后可有效改善其电磁波吸收性能。目前,提高水泥基材料吸波性能的方法主要是将吸波材料进行多组分复合,通过调整各组分的比例,优化介电/磁损耗及调整材料的厚度,来获得优异的匹配层和吸收层。

石墨烯(GR)具有较好的导电特性,表面存在的含氧基团(-OH)和较大的比表面积能够促进水泥水化反应进程,将其掺入水泥基材料中可提高导电性能。但由于GR对电磁波的吸收损耗仅为电阻型损耗,且具有较高的相对介电常数实部 ϵ' ,导致单掺GR的水泥基复合材料对入射电磁波的阻抗匹配较差^[9]。此外,锰锌铁氧体(MFO)兼具磁损耗和介电损耗特性,在水泥基材料内双掺GR和MFO可调节材料的电磁参数,从而实现对电磁波良好的阻抗匹配^[10-12]。

针对目前水泥基电磁防护材料存在吸波剂单一

和吸波材料最佳匹配厚度的问题,本文首先以水泥砂浆为基体,制备能够满足建筑材料力学性能的GR-MFO复合砂浆,测试其微结构;然后分别测试GR、MFO和GR-MFO复合砂浆的电磁参数和导电参数;接着采用FDTD软件模拟钢丝网增强GR-MFO复合砂浆对1~18 GHz电磁波的吸收性能;最后对钢丝网增强GR-MFO复合砂浆的屏蔽电磁波过程进行机理分析,旨在为设计建筑工程用水泥基电磁防护材料提供思路。

1 试验

1.1 原材料

水泥(PC)为P·MH 42.5抗硫酸盐硅酸盐水泥;GR为多层石墨烯,掺量(质量分数,文中涉及的掺量、组成等均为质量分数)分别为0.05%、0.10%和0.20%,其中的分散剂为羧甲基纤维素钠(SCC);MFO由江苏省昆山市誉华磁性材料有限公司生产,掺量为30.00%;减水剂为聚羧酸高效减水剂(SP),掺量为0.50%;砂为标准砂,由厦门艾思欧生产;水为普通自来水;钢丝网所用钢丝直径为6 mm,网格尺寸为50 mm×50 mm。GR和MFO的扫描电镜(SEM)照片见图1;PC、GR和MFO的X射线衍射(XRD)图谱和粒径分布见图2、3。由图2可见:PC主要由硅酸三钙(C_3A)、硅酸二钙(C_2A)、铝酸三钙(C_3A)和铁铝酸四钙(C_4AF)组成;GR在24°~27°处有较强的衍射峰;MFO有较多的衍射峰,其中35°处衍射峰峰值最强。由图3可见:PC、GR和MFO的最

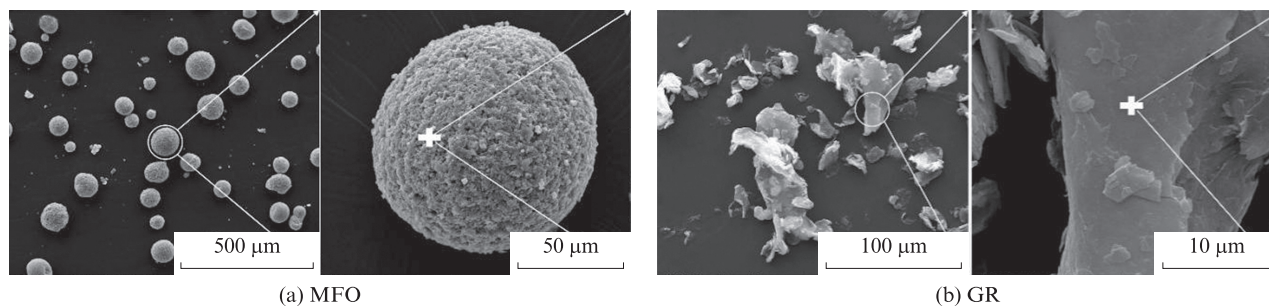


图1 MFO和GR的SEM照片
Fig. 1 SEM images of MFO and GR

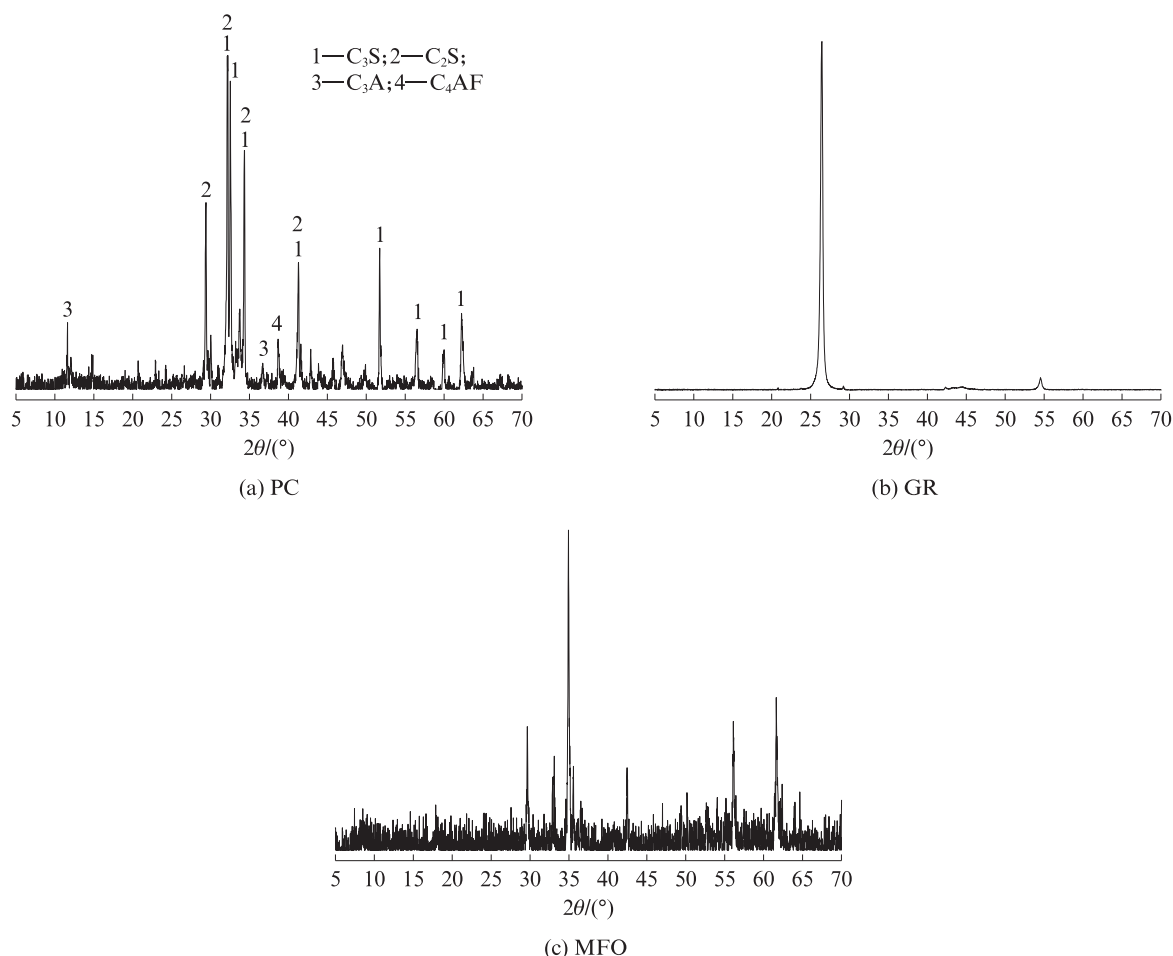


图2 PC、GR和MFO的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of PC, GR and MFO

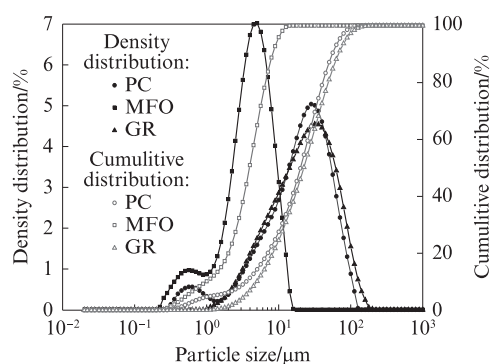


图3 PC、GR和MFO的粒径分布

Fig. 3 Particle size distributions of PC, GR and MFO

大粒径分别为126.191、224.404、17.825 μm ,分布最多的粒径大小分别为28.251、35.566、5.637 μm 。

1.2 试样制备

水泥砂浆试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,其中 $m(\text{水泥}):m(\text{标准砂}):m(\text{水})=1.0:1.5:0.3$,复合砂浆配合比见表1。首先,量取称量好的一部分拌和水,先将SCC溶于水,再将称取好的GR倒入溶液中充分搅拌静置24 h,制成GR混合溶液;然后依次将另一部分拌和水和粉体SP倒入砂浆

搅拌锅中,手动搅拌60 s;最后将PC、MFO和砂子倒入搅拌锅中慢速搅拌,再将预分散的GR混合溶液倒入,搅拌均匀。每组配合比制作6个试件。各试件在标准养护7、28 d后进行宏观性能和微观结构测试。

1.3 测试方法

XRD测试采用德国布鲁克公司D8 Discover高分辨衍射仪,其中配备LynxEye阵列探测器。测试参数:电压4 kV,电流30 mA, $\text{CuK}\alpha$ 射线,索拉夹缝 0.3° ,扫描步长(2θ) 0.02° 。

SEM测试采用美国FEI公司3D FEG SEM,其中配备AMETEK公司的EDAX OCTANE PLUS能谱仪。SEM测试时,电压为20 kV,探测器选择二次电子,分辨率为 1024×943 ,工作距离为10~12 mm。

复合砂浆7、28 d抗折强度和抗压强度依据GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行测试。

基于同轴传输/反射法,采用Keysight P5004A

表1 复合砂浆配合比
Table 1 Mix proportions of composite mortars

Specimen No.	PC	MFO	GR	Sand	Water	SP	SCC
M0	100.00	0	0	150.00	30.00	0.50	0
M-F	70.00	30.00	0	150.00	30.00	0.35	0
M-GR	99.90	0	0.10	150.00	30.00	0.50	0.50
M-GR05-F	69.95	30.00	0.05	150.00	30.00	0.35	0.25
M-GR10-F	69.90	30.00	0.10	150.00	30.00	0.35	0.50
M-GR20-F	69.80	30.00	0.20	150.00	30.00	0.35	1.00

矢量网络分析仪测试样品的复相对介电常数 $\epsilon(\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'', j^2 = -1)$ 和复相对磁导率 $\mu(\mu = \mu' - j\mu'')$. 测试前,先取适量样品烘干,研磨成粉末并过48 μm (300目)筛;再将其与石蜡按质量比1:1混合后进行水浴加热融化,充分混合均匀后,将粉末与石蜡融化物放至同轴模具中压制成外径为7.00 mm、内径为3.04 mm、厚度为2.00 mm的同轴圆环测试样品.

采用Quantum Design公司综合物性测量系统测试试样的电阻率. 试样尺寸为10.0 mm $\times$ 2.5 mm $\times$ 1.5 mm. 测试前将试样在60 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥5 h,以充分释放其内部水分.

2 结果与讨论

2.1 抗压强度和抗折强度

图4为复合砂浆标准养护7、28 d后的抗折强度和抗压强度. 由图4可见:(1)当MFO掺量为30.00%时,试件M-F的7、28 d抗折强度分别为7.1、7.9 MPa,较基准试件M0分别降低13.6%和30.7%,这是由于MFO的团聚效应,以及MFO替代部分水泥后试件需要更多的水泥浆体所致;试件M-F的7、28 d抗压强度分别为65.8、75.0 MPa,较基准试件M0分别降低20.5%和17.0%.(2)单掺GR,

且GR掺量为0.10%时,试件M-GR的28 d抗折强度较基准试件M0仅提高了5.0%,28 d抗压强度与M0持平;试件M-GR20-F的28 d抗折强度和抗压强度分别为8.4、76.8 MPa,较试件M-F的抗折强度和抗压强度有一定的提升. 这是因为GR具有较大的比表面积,且表面存在的含氧基团($-\text{OH}$)为水泥的水化产物生长提供了成核位点,水化反应进行加快,水化产物填充了水泥砂浆中的裂缝,使水泥基体内部更加致密^[13-14].

2.2 物相分析

图5为复合砂浆标准养护28 d的XRD图谱. 由图5可见:各复合砂浆与普通砂浆一样,除掺入的MFO以外,其矿物相主要由氢氧化钙(CH)、钙矾石(Aft)、石英(SiO_2)和未水化水泥物相构成;MFO和GR均不会与水泥基体发生水化反应生成新的矿物相;GR的掺入使得CH衍射峰值显著提高. 这是因为适当掺量的GR具有微晶成核作用,GR表面的含氧基团为水泥水化提供反应位点,促进水泥矿物相的水化,从而显著提高了硬化水泥浆体的力学性能;但当GR掺量过大时,分散效果变差,产生团聚现象,导致GR容易发生卷曲,比表面积减小,活性基团数量相对减少,使水化作用减弱^[15].

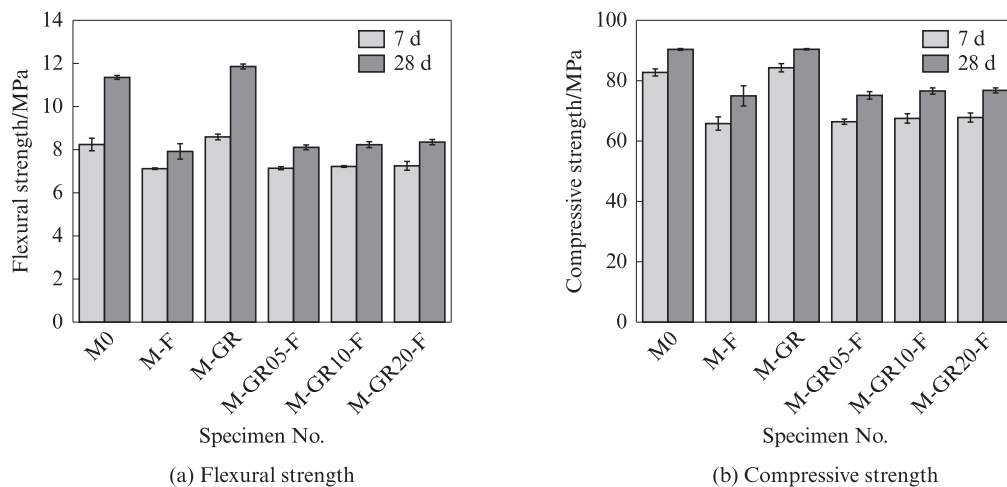
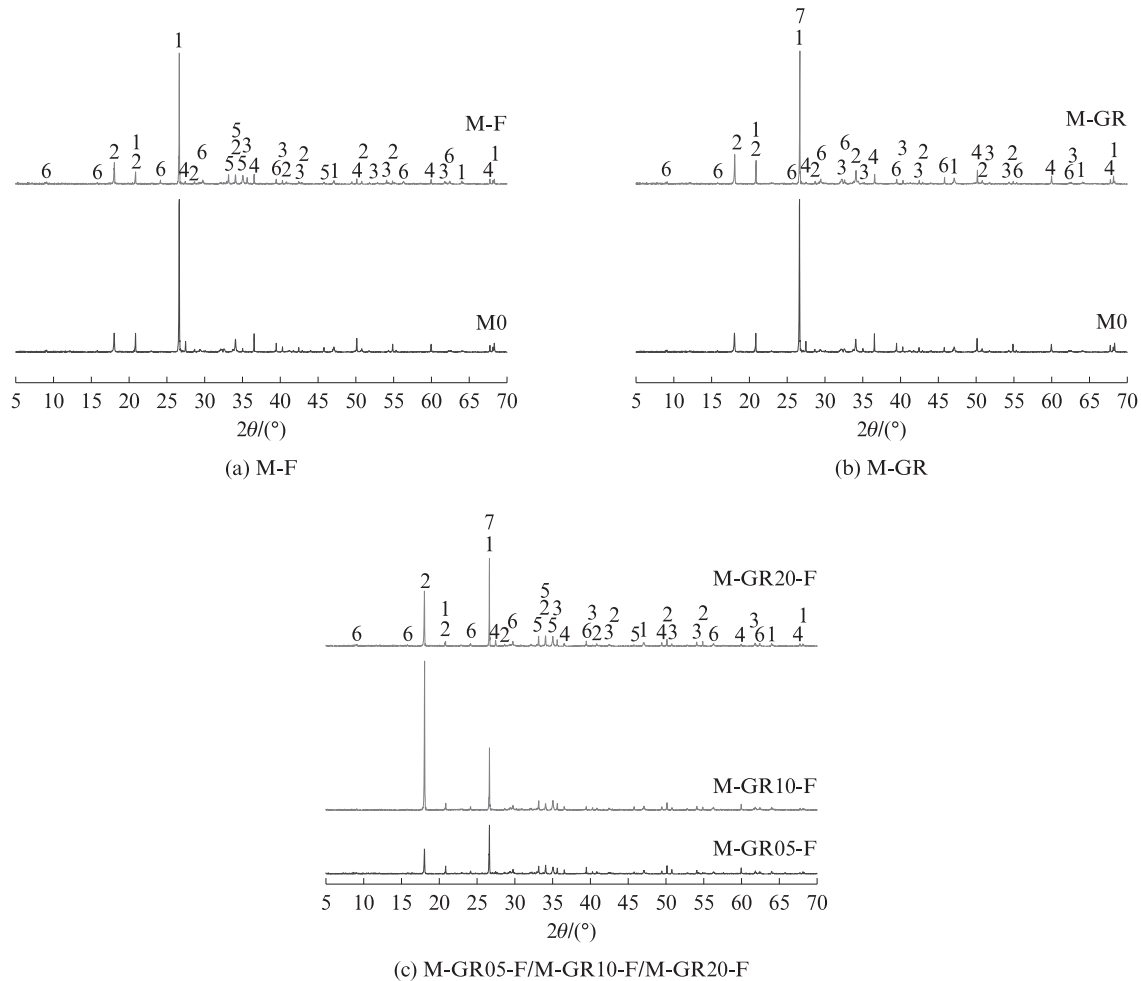


图4 复合砂浆的抗压强度和抗折强度

Fig. 4 Compressive and flexural strengths of composite mortars



1—SiO₂; 2—CH; 3—C₂S; 4—C₃S; 5—MFO; 6—AFt; 7—GR

图5 复合砂浆标准养护28 d的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of composite mortars of standard curing for 28 d

2.3 微观形貌

图6为试件M-GR20-F标准养护28 d时内部矿物相的微观形貌.由图6可见,复合砂浆内部矿物相由网状水化硅酸钙(C-S-H)(图6(a))、针棒状AFt(图6(b))、板片状CH(图6(c))及球状MFO(图6(d))构成.通过MFO粒径分布测试可知,虽然其粒径(5 μm)小于水泥颗粒(30 μm),但由于MFO的团聚效应,其在复合砂浆内呈现较大尺寸的球状形貌.MFO一方面因不参与水泥水化反应导致稀释作用明显;另一方面,较大尺寸的球状MFO与水化水泥基体的黏结界面薄弱,最终导致掺入MFO后复合砂浆的强度有所降低.但水泥浆体材料多孔,且孔中填充有大量的针棒状AFt和板状CH,可以增加电磁波反射,从而达到吸收电磁波的功能.

2.4 电磁参数

图7为MFO和GR电磁参数随频率的变化.由图7(a)、(b)可知:MFO的相对介电常数实部 ϵ' 在3.14~3.39之间,虚部 ϵ'' 在0.12~0.36之间;MFO的

相对磁导率实部 μ' 在0.96~1.44之间,虚部 μ'' 在0~0.38之间;MFO的介电损耗角正切值 $\tan \delta_e$ 在0.03~0.11之间,磁损耗角正切值 $\tan \delta_\mu$ 在0~0.31之间.这表明,MFO在2~18 GHz频率范围内介电损耗很小,磁损耗较大,对于低频段电磁波有较好的铁磁性,能够产生一定的涡流损耗、磁滞损耗和磁后效损耗,进而达到电磁波吸收目的.由图7(c)、(d)可知,GR的相对介电常数实部 ϵ' 在3.16~89.22之间,虚部 ϵ'' 在46.16~133.67之间,有利于提升电磁波吸收性能;GR相对磁导率的实部 μ' 在0.27~0.60之间,虚部 μ'' 在0~0.38之间;GR的介电损耗角正切值 $\tan \delta_e$ 在0.81~15.15之间,磁损耗角正切值 $\tan \delta_\mu$ 在0~0.74之间.综上所述,MFO有较好的磁损耗性能,GR有良好的介电损耗性能,二者结合后能够实现较好的电磁波吸收功能.

图8为复合砂浆电磁参数随频率的变化.由图8可见,试件M0的相对介电常数实部 ϵ' 基本不随电磁波频率变化,稳定在5.28左右;由于MFO的相对介

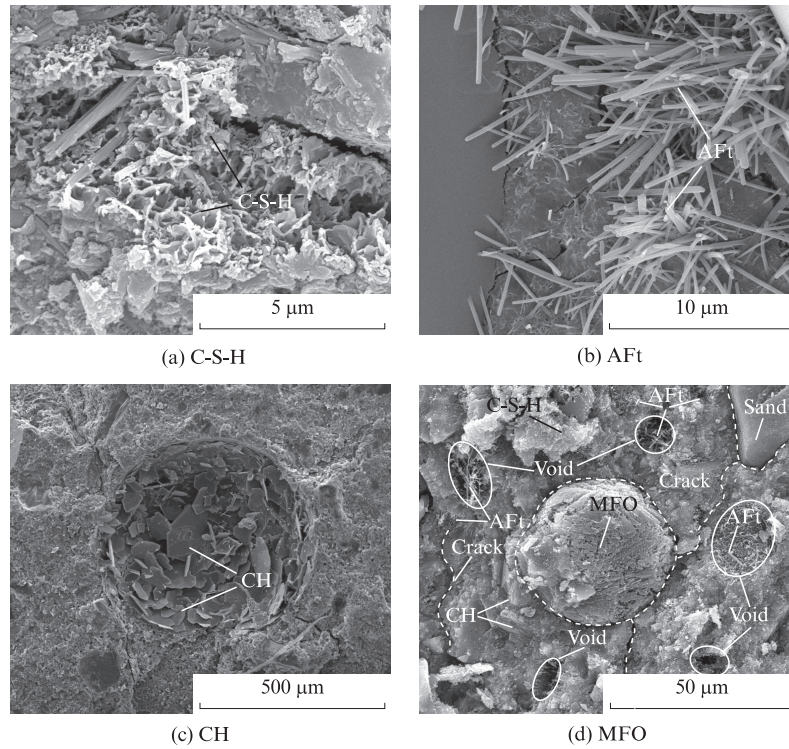


图6 试件M-GR20-F标准养护28 d时物相的微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of phases in specimen M-GR20-F of standard curing for 28 d

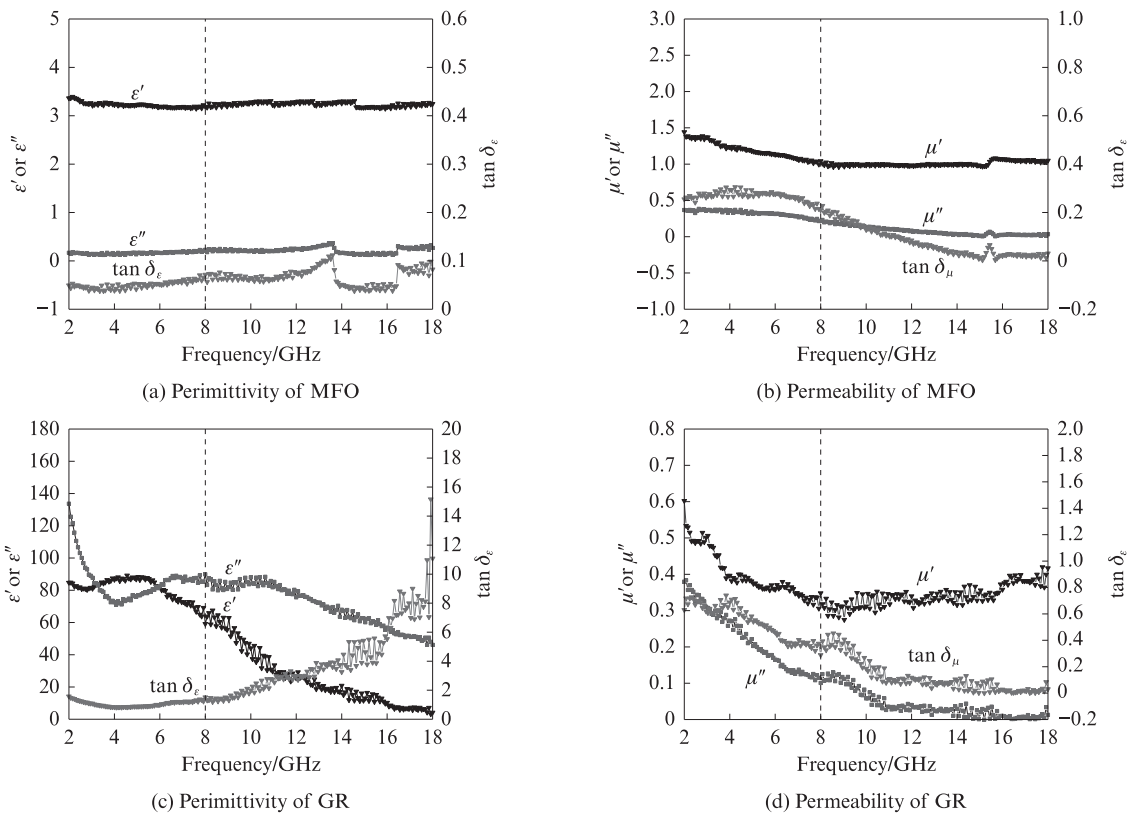


图7 MFO和GR电磁参数随频率的变化

Fig. 7 Variation of electromagnetic parameters of MFO and GR with frequency

电常数低于纯砂浆,将MFO掺入纯砂浆后,试件M-F的相对介电常数实部 ϵ' 比纯砂浆低33.7%;GR的相对介电常数较大,虽对复合砂浆介电常数有所

提升,因其掺量较少,试件M-GR05/10/20-F的相对介电常数实部 ϵ' 在3.50~4.00之间,该规律也符合有效介质理论.

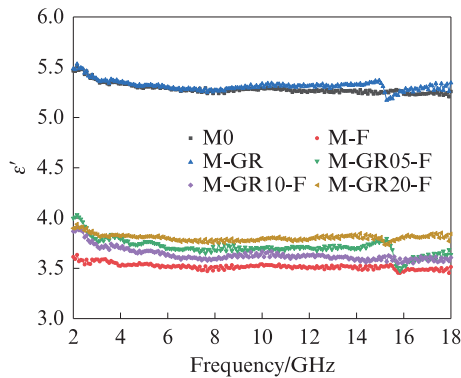


图8 复合砂浆电磁参数随频率的变化

Fig. 8 Variation of electromagnetic parameters of composite mortars with frequency

复合水泥基材料等效介电常数 ϵ_{eff} 计算表达式为:

$$\ln \epsilon_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n (p_i \ln \epsilon_i) \quad (1)$$

式中: p_i 为第 i 组分的体积分; ϵ_i 为第 i 组分的相对介电常数.

2.5 导电特性

表2列出了标准养护28 d后复合砂浆的电阻 R 、电阻率 ρ 和电导率 γ .

表2 复合砂浆的电阻、电阻率及电导率
Table 2 Resistance, resistivity and conductivity of composite mortars

Specimen No.	R/Ω	$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	$\gamma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$
M0	2.53×10^{10}	9.52×10^6	1.05×10^{-7}
M-F	9.20×10^9	3.45×10^6	2.90×10^{-7}
M-GR	2.08×10^{10}	7.81×10^6	1.28×10^{-7}
M-GR05-F	7.17×10^9	2.69×10^6	3.72×10^{-7}
M-GR10-F	5.81×10^9	2.18×10^6	4.59×10^{-7}
M-GR20-F	5.76×10^9	2.16×10^6	4.63×10^{-7}

由表2可知:与试件M0相比,试件M-F的电导率提升了约176%,这是因为分散均匀的MFO在砂浆中形成导电搭接网络,降低了电阻率;试件M-GR的电导率提升约22%,这是由于GR均匀分散在砂浆中形成导电链和导电网络,内部电子依靠GR快速传导,使材料的电阻率下降^[16];在水泥基中双掺MFO和GR后,极大提升了复合砂浆的电导率,试件M-GR05-F、M-GR10-F和M-GR20-F的电导率分别提升254%、337%和341%,表明随着GR掺量的增加,复合砂浆的电导率呈现增加趋势,但电导率增幅有所下降.这是由于GR掺加较多时,会出现导电渗滤阈值现象,当GR掺量超过导电渗滤阈值时,GR-MFO复合砂浆的电阻率降低幅度不大.

2.6 电磁波吸收性能及机理

由电磁波传输理论^[17]可知,对于单层平面介质

材料,电磁波从自由空间入射到材料界面的归一化输入阻抗 Z_{in} 为:

$$Z_{\text{in}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh \left(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{\epsilon \mu} \right) \quad (2)$$

式中: λ 为电磁波的波长; d 为材料的厚度.

平面介质材料对电磁波的吸收效果一般采用反射损耗 $R(\text{dB})$ 表示,计算表达式如下:

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_{\text{in}} - 1}{Z_{\text{in}} + 1} \right| \quad (3)$$

通常,当 R 小于 -5 dB 时,认为介质材料具有电磁波吸收性能;当 R 小于 -10 dB 时,认为介质材料可有效吸收电磁波.

采用电磁波时域有限差分法建立钢丝网增强复合砂浆吸波材料模型,来模拟其对电磁波的吸收性能,该计算模型示意图如图9所示.模拟时依次添加复合砂浆和钢筋网、边界条件、划分网格、添加电磁波光源和监视器.其中,钢丝网增强复合砂浆总厚度 d 取为15、20、25、30 mm;电磁波入射方向从模型左侧平面垂直进入,入射区域为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,入射电磁波频率范围为 $1 \sim 18 \text{ GHz}$.

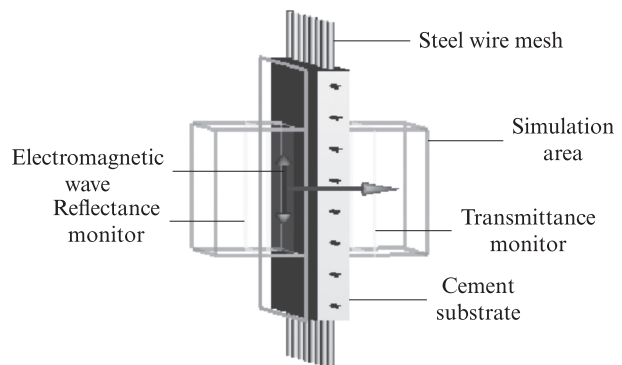


图9 钢丝网增强复合砂浆电磁波吸收计算模型

Fig. 9 Calculation model for electromagnetic wave absorption of steel wire mesh reinforced composite mortar

模拟过程中,沿电磁波入射方向采用完全匹配层(PML)吸收边界条件,垂直电磁波入射方向采用周期边界条件;模型左侧和右侧平面分别设置反射率和透射率监视器,用来监测电磁波的反射率和透射率.复合砂浆电磁参数采用图8中各曲线的平均值,试件M0、M-F、M-GR、M-GR05-F、M-GR10-F和M-GR20-F的相对介电常数分别为5.28、3.57、5.31、3.71、3.63和3.81,各试件相应电导率参数见表2,钢丝的相对介电常数和电导率分别取14.2和 $9.93 \times 10^6 \text{ S/m}$.

图10为数值模拟复合砂浆厚度为15、20、25、30 mm时钢丝网增强复合砂浆的电磁波反射损耗.

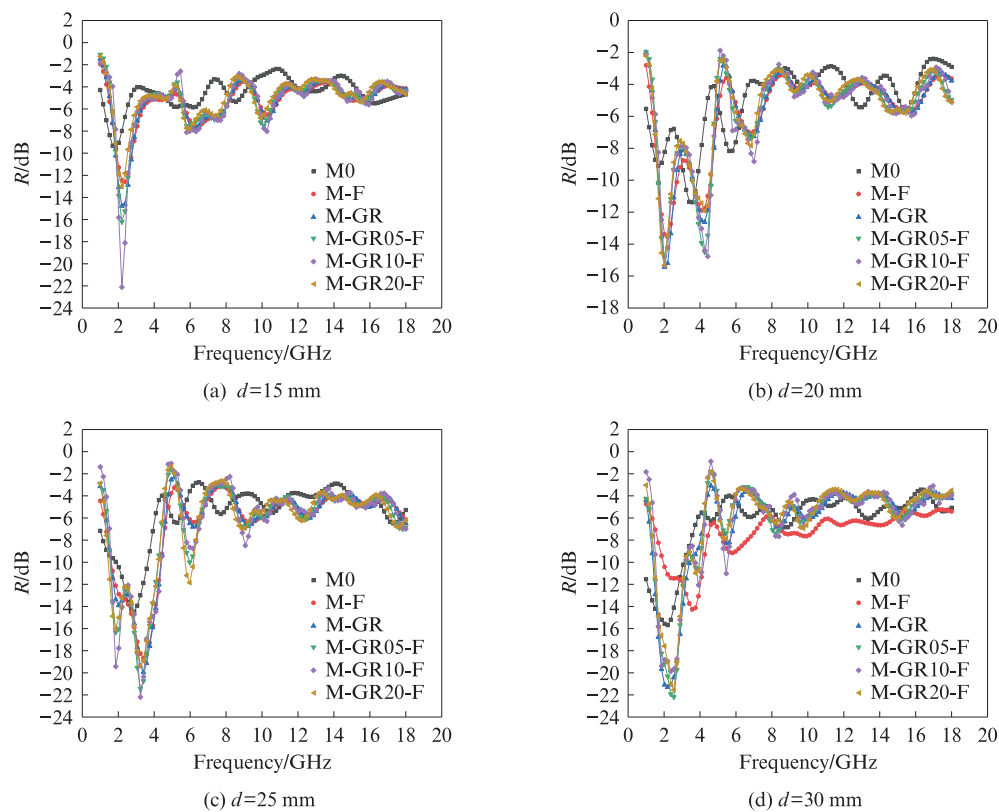


图10 4种厚度钢丝网增强复合砂浆的电磁波反射损耗
Fig. 10 Reflection loss of steel reinforced composite mortar with four thicknesses

由图10可见:(1)4种厚度的钢丝网增强复合砂浆反射损耗基本在 -16 dB以上,随着砂浆总厚度的增加,吸收峰逐渐向低频移动,吸波效果增强。当砂浆总厚度为 20 mm时,钢丝网增强复合砂浆电磁反射率出现多个干涉吸收峰值,吸波效果较好;当砂浆总厚度为 30 mm时,在 2.2 GHz出现最大吸收峰,反射损耗达到 -15.68 dB。(2)单掺MFO的钢丝网增强复合砂浆的反射损耗小于 -10 dB,可有效吸收电磁波,且砂浆总厚度为 20 mm时有2个干涉吸收峰值,分别在 2.03 、 4.09 GHz处存在最大有效吸收峰值,分别为 -13.38 、 -11.92 dB;砂浆总厚度为 25 mm时,存在最大有效吸收峰值,反射损耗为 -18.66 dB。(3)单掺GR的钢丝网增强复合砂浆对电磁波吸收效果较好,在4种厚度情况下均呈现较好的电磁波吸收性能;砂浆总厚度为 25 mm时,最大反射损耗为 -19.93 dB,有效吸收带宽为 $1.68\sim 4.26$ GHz;试件M-GR10-F的有效电磁波吸收能力最优,在 3.23 GHz处存在最大吸收峰值,最大反射损耗为 -22.13 dB,有效吸收带宽为 $1.68\sim 4.34$ GHz。(4)随着GR掺量的增加,钢丝网增强复合砂浆的电磁波吸收效果呈先增后降趋势,这可能是由于GR掺量增加造成了钢丝网增强复合砂浆表面阻抗不匹配,进而增加了电磁波在材料表面上

的反射。

采用电磁波时域有限差分法数值模拟,得到钢丝网增强砂浆三维电磁波反射损耗云图,如图11所示。图11显示,模拟结果与图8相一致,试件GR-MFO在电磁波频段为 $2\sim 4$ GHz时吸波效果最好,且试件的最佳匹配厚度为 $20\sim 30$ mm,其中钢丝网增强复合砂浆厚度为 25 mm时,吸波效果最好。

由此可见:当砂浆总厚度为 25 mm时,钢丝网增强复合砂浆对电磁波吸收效果最佳,其吸收电磁波时存在一最佳匹配层厚度;试件M-GR10-F的吸收电磁波性能最佳;砂浆总厚度较薄的钢丝网增强复合砂浆反射率曲线在低频段电磁波处出现因电磁波干涉引起的较明显峰值波动。这是由于当电磁波垂直入射到复合材料中时,除了一部分电磁波(第一反射波)被反射外,另一部分电磁波则会入射到材料内并在材料内部产生来回反射,当来回反射波穿出材料后与第一反射波处于同一偏振面上,即厚度 d 满足 $d = n\lambda/4$ ($n = 1, 3, 5, \dots$)时,就会产生电磁波干涉,进而减小了总反射波;材料厚度越大,干涉越小,反射损耗曲线波动就越小,故调节材料厚度可有效吸收特定频段的电磁波。其机理示意图如图12所示。由图12可见:(1)石墨烯对电磁波的损耗来源于电传导和热转化,在电场作用下,正负电荷被分离并转化为

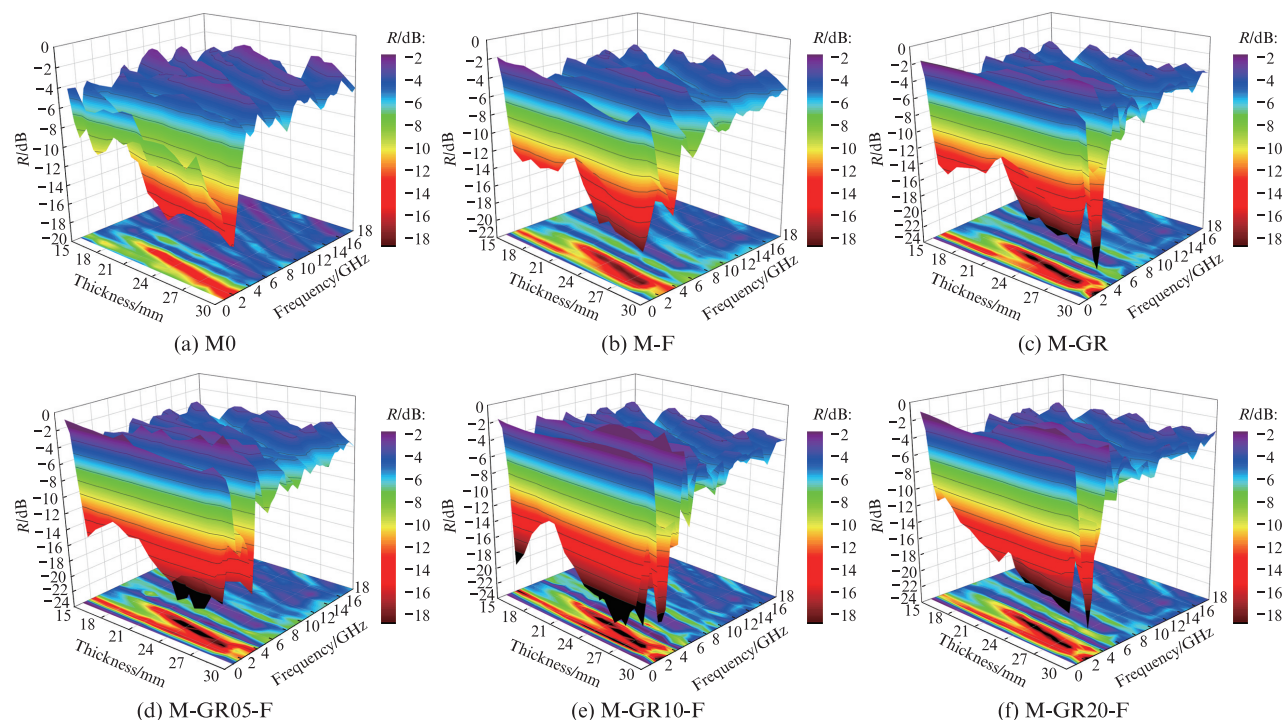


图 11 不同厚度钢丝网增强复合砂浆三维电磁波反射损耗云图

Fig. 11 3D reflection loss plots of steel reinforced mortar with different thicknesses

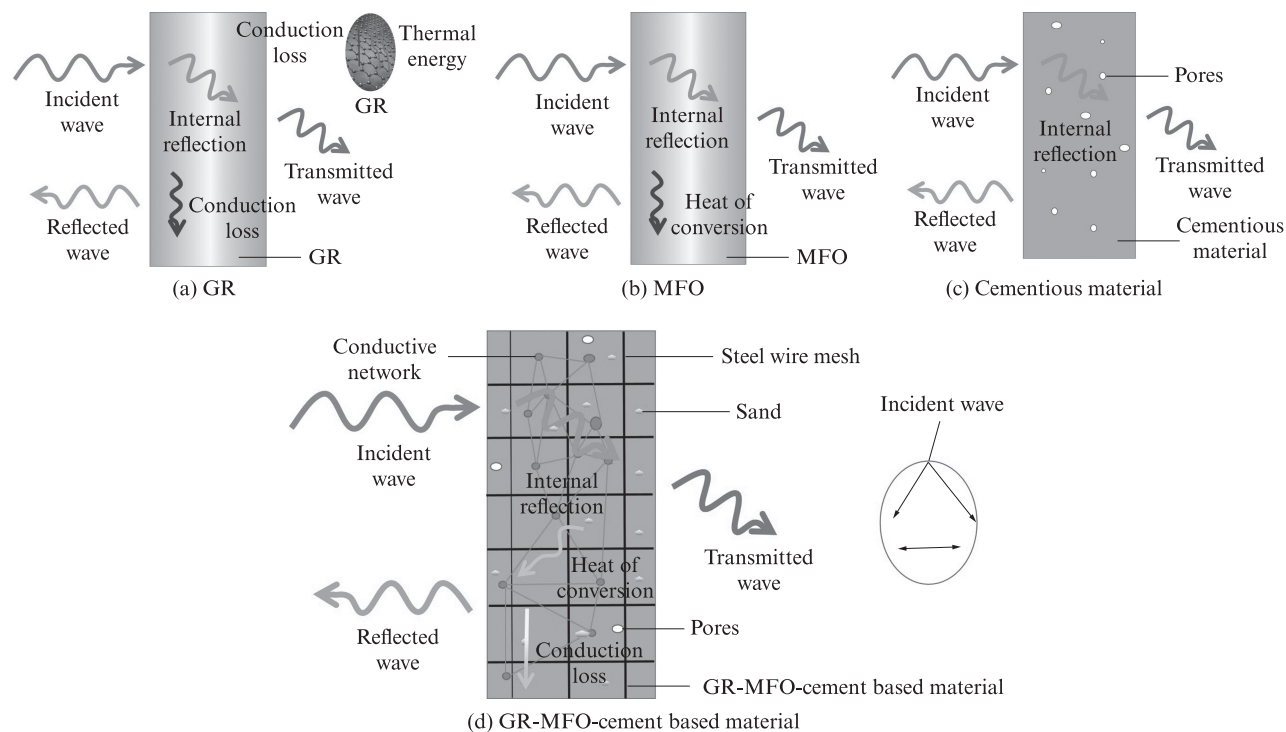


图 12 钢丝网增强复合砂浆电磁吸波机理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of electromagnetic absorption mechanism of steel reinforced composite mortar

偶极子.由于电场的反复变化,介质反复极化,正负电荷重心反复变化产生摩擦,将电磁能转化为热能.

(2)铁氧体对电磁波的损耗来源于磁畴旋转、磁畴壁位移和磁畴自然共振,在磁场中产生共振吸收.

(3)钢丝网在水泥基中交叉搭接而成,形成多个导电

回路,产生感应电流,一部分由于电阻作用消耗部分电磁波能量,另一部分环状感应电流会产生磁偶极矩消耗部分电磁波能量.(4)此外,在水泥基内部形成多个孔洞和封闭裂缝,电磁波在内部产生多重反射.

3 结论

(1)掺量为30.00%的锰锌铁氧体(MFO)因稀释效应降低了水泥砂浆力学强度;而掺量为0.10%的石墨烯(GR)为水泥水化产物生长提供了成核位点,水化反应加快,水化产物填充了水泥砂浆中的裂缝,使水泥基体内部更加致密,从而提高了砂浆的力学强度;因此,通过掺加MFO和GR来制备复合砂浆能够有效保证砂浆强度。

(2)因MFO有较好的磁损耗性能,GR有良好的介电损耗性能,加之纯水泥砂浆多孔材料优异的反射特性,三者结合后水泥砂浆在保证强度的同时能够实现较好的电磁波吸收性能。

(3)结合材料电磁参数测试和时域有限差分法数值模拟砂浆电磁波吸收性能可知,复掺GR和MFO的钢丝网增强水泥砂浆的电磁波吸收性能最优,且存在电磁波吸收最佳匹配层厚度。当砂浆总厚度为25 mm时,掺0.10% GR和30.00% MFO的钢丝网增强水泥砂浆对电磁波的有效吸收小于-10 dB,吸收带宽为1.68~4.34 GHz,且对3.23 GHz的反射损耗可达-22.13 dB。

参考文献:

- [1] CHEN J, ZHAO D, GE H Y, et al. Graphene oxide-deposited carbon fiber/cement composites for electromagnetic interference shielding application[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84(1):66-72.
- [2] ZHANG Z L, CHEN X Q, WANG Z L, et al. Carbonyl iron/graphite microspheres with good impedance matching for ultra-broadband and highly efficient electromagnetic absorption[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(11):3319-3331.
- [3] BALMORI A. Electromagnetic pollution from phone masts. Effects on wildlife[J]. Pathophysiology, 2009, 16(2/3):191-199.
- [4] 王一帆,朱琳,韩露,等.电磁吸波材料的研究现状与发展趋势[J].复合材料学报,2023,40(1):1-12.
WANG Yifan, ZHU Lin, HAN Lu, et al. Research status and development trend of electromagnetic absorbing materials[J]. Acta Materials Compositae Sinica, 2023, 40(1):1-12. (in Chinese)
- [5] 熊国宣,邓敏,徐玲玲,等.水泥基复合材料的吸波性能[J].硅酸盐学报,2004,32(10):1281-1284.
XIONG Guoxuan, DENG Min, XU Lingling, et al. Wave absorption properties of cement-based composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(10):1281-1284. (in Chinese)
- [6] COSTA F, MONORCHIO A, MANARA G. Theory design and perspectives of electromagnetic wave absorbers[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2016, 5(2):67-74.
- [7] HU J H, LIU Y Y, JIANG J L, et al. Development of electromagnetic microwave absorbers in cementitious materials[J]. Composite Structures, 2023, 312:116886.
- [8] GUAN H T, LIU S H, DUAN Y P, et al. Cement based electro-magnetic shielding and absorbing building materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(5):468-474.
- [9] DU S M, CHEN H Y, HONG R Y. Preparation and electromagnetic properties characterization of reduced graphene oxide/strontium hexaferrite nanocomposites[J]. Nanotechnology Reviews, 2020, 9(1):105-114.
- [10] 熊国宣,叶越华,左跃,等.锰锌铁氧体水泥基复合材料吸波性能的研究[J].建筑材料学报,2007,10(4):469-472.
XIONG Guoxuan, YE Yuehua, ZUO Yue, et al. Study on absorption properties of cement-based composite materials by doping Mn-Zn ferrite[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4):469-472. (in Chinese)
- [11] 午丽娟,沈国柱,徐政,等.铁氧体及碳纤维填充水泥基复合材料吸波性能[J].建筑材料学报,2006,9(5):603-607.
WU Lijuan, SHEN Guozhu, XU Zheng, et al. Wave absorption properties of ferrite and carbon fiber filled cement matrix composites[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(5):603-607. (in Chinese)
- [12] YADAV R S, KUITKA I, JVLÁKOVÁ. Cement/concrete-based nanocomposites[G]. Advanced Spinel Ferrite Nanocomposites for Electromagnetic Interference Shielding Applications:Micro and Nano Technologies, 2021:175-183.
- [13] 吕生华,周庆芳,孙婷,等.GO纳米片层对水泥水化晶体及胶砂力学性能的影响[J].建筑材料学报,2014,17(5):749-754.
LÜ Shenghua, ZHOU Qingfang, SUN Ting, et al. Effect of graphene oxide nanosheets on cement hydration crystal and mechanical properties of mortar[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5):749-754. (in Chinese)
- [14] 何威,许吉航,焦志男.少层石墨烯对水泥净浆流动性能及力学性能的影响[J].复合材料学报,2022,39(11):5637-5649.
HE Wei, XU Jihang, JIAO Zhinan. Effect of few-layer graphene on the fluidity and mechanical properties of cement paste[J]. Acta Materials Compositae Sinica, 2022, 39(11):5637-5649. (in Chinese)
- [15] 董健苗,邹明璇,周铭,等.石墨烯及氧化石墨烯对水泥基材料水化过程及强度的影响研究[J].材料导报,2022,36(24):1-14.
DONG Jianmiao, ZOU Mingxuan, ZHOU Ming, et al. Effects of graphene and graphene oxide on hydration process and strength of cement-based materials[J]. Materials Reports, 2022, 36(24):1-14. (in Chinese)
- [16] 蒋林华,白舒雅,金鸣,等.石墨烯水泥基复合材料的电导率研究[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(3):601-606.
JIANG Linhua, BAI Shuya, JIN Ming, et al. Electrical conductivity of graphene/cement composites[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(3):601-606. (in Chinese)
- [17] 葛德彪,魏兵.电磁波理论[M].北京:科学出版社,2011:185-187.
GE Debiao, WEI Bing. Electromagnetic wave theory [M]. Beijing:Science Press, 2011:185-187. (in Chinese)