

文章编号:1007-9629(2024)04-0291-08

## 硫氧镁泡沫水泥吸波材料的制备及性能

崔宝栋, 刘军\*, 李思琪, 李瑶, 邓永刚

(沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110159)

**摘要:**采用具有优良吸波性能的铁氧体和碳化硅来改性硫氧镁水泥泡沫板,研究了铁氧体和碳化硅掺量对改性硫氧镁水泥吸波性能的影响,并通过X射线衍射及扫描电子显微镜分析了其影响机理.结果表明:在3.95~18.00 GHz目标频段下,掺加5%碳化硅改性硫氧镁水泥的最低反射率出现在8.40 GHz处,为-15.9 dB;掺加15%铁氧体改性硫氧镁水泥的最低反射率出现在7.04 GHz处,为-17.3 dB;铁氧体和碳化硅按照一定比例掺加到硫氧镁水泥基体中,均表现出良好的吸波性能.

**关键词:**硫氧镁水泥;碳化硅;铁氧体;吸波性能

中图分类号:TQ172

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.04.002

## Preparation and Properties of Magnesium Oxysulfide Foam Cement Microwave Absorbing Material

CUI Baodong, LIU Jun\*, LI Siqi, LI Yao, DENG Yonggang

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** Ferrite and silicon carbide with excellent electromagnetic microwave absorption performance were used to modify magnesium oxysulfide cement foam plate. The influence of different doping amount of ferrite and silicon carbide on the microwave absorbing performance of modified magnesium oxysulfate cement was studied. The effect mechanism was analyzed by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results show that in the target frequency band of 3.95–18.00 GHz, 5% silicon carbide can make the material reach the lowest reflectivity, which is -15.9 dB at 8.40 GHz. 15% ferrite can make the material reach the lowest reflectivity, which is -17.3 dB at 7.04 GHz. The modified magnesium oxysulfide cement has good microwave absorbing performance when ferrite and silicon carbide were added to the magnesium oxysulfide cement matrix at a certain proportion.

**Key words:** magnesium oxysulfide cement; silicon carbide; ferrite; microwave absorbing performance

在电磁污染日益严重的今天,着眼于人民群众的日常生活,水泥基吸波材料在日常建筑领域内有着十分广泛的应用前景.中国蕴含丰富的菱镁矿资源,为镁质胶凝材料的广泛应用提供了丰富的原材料<sup>[1]</sup>.镁水泥具有广泛的应用价值和巨大的市场,但其本身的吸波性能比较低,限制了镁水泥本身的发展.实际上,在水泥材料中加入一定的添加剂进行改性,可以实现对电磁辐射的屏蔽和吸收<sup>[2-4]</sup>.其中,吸波材料比较常见的是碳素类和金属类<sup>[5-7]</sup>.镁水泥中

目前使用最多的是氯氧镁水泥,但其具有吸潮反卤、抗水性差和变形等缺点<sup>[8-9]</sup>.因此,硫氧镁水泥作为后起之秀,具有广泛的应用场景,已经占据了镁质胶凝材料应用的半壁江山.

硫氧镁水泥是由轻烧氧化镁和一定浓度的硫酸镁水溶液组成的MgO-MgSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O三元胶凝体系<sup>[10-13]</sup>,与其他水泥相比,硫氧镁水泥制品具有质轻、碱度低、耐火等优点<sup>[14]</sup>.近年来,随着研究的深入<sup>[15-18]</sup>,人们在硫氧镁水泥中发现了

收稿日期:2023-05-23; 修订日期:2023-09-14

基金项目:国防基础科研计划项目

第一作者:崔宝栋(1995—),男,辽宁辽阳人,沈阳理工大学博士生.E-mail:cuibaodong@163.com

通讯作者:刘军(1963—),女,辽宁沈阳人,沈阳理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:lj@sylyu.edu.cn

517 晶相 ( $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )。Runčevski 等<sup>[19]</sup>和张占福<sup>[20]</sup>认为,517相是硫氧镁水泥的主要强度相,并解析了改性硫氧镁水泥中517相的晶体结构,利用517相生长于孔径内并和对应孔径内的吸波剂相结合,可以达到良好的吸波效果。

本文选取较为常用的铁系吸波材料(铁氧体)以及陶瓷系吸波材料(碳化硅),将其分散于硫氧镁水泥基体中,再利用多孔结构,使电磁波在内部折射,以比对2种材料的吸波效果。并选取常用波段(G波段(3.95~5.85 GHz)、J波段(5.85~8.20 GHz)、X波段(8.20~12.40 GHz)、P波段(12.40~18.00 GHz))的测试效果进行分析研究,以期在雷达、卫星通信和微波着陆系统等应用中发挥积极的作用。

## 1 试验

### 1.1 原材料

轻烧氧化镁粉由辽宁营口某有限公司提供,粒径为 $75\ \mu\text{m}$ (200目),其化学组成(质量分数,文中涉及的组成、含量等除特别说明外均为质量分数)见表1,并采用水合法<sup>[21]</sup>检测其氧化镁活性为63.2%。七水硫酸镁由天津市大茂化学试剂厂提供,分析纯;柠檬酸由天津市大茂化学试剂厂提供,分析纯;镍锌铁氧体粉末由天津市大茂化学试剂厂提供,分析纯;碳化硅由天津市大茂化学试剂厂提供,分析纯;稳泡剂采用硫酸钠,由天津市大茂化学试剂厂提供,分析纯;发泡剂采用质量分数为25%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液。

表1 轻烧氧化镁的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of light burned magnesium

Unit: %					
MgO	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	IL
79.96	1.72	0.59	0.70	10.40	6.63

### 1.2 硫氧镁水泥泡沫板吸波材料的制备

制备硫氧镁水泥泡沫板吸波材料所用的发泡剂为 $\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液,其反应机理为: $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$ 。由此可知,当 $\text{H}_2\text{O}_2$ 加入到水泥体系中时,可以释放出大量的氢氧根,加快过氧化氢的分解过程,从而产生大量的氧气,同时分解反应放热,能够加快硫氧镁水泥的水化反应进程,也可以加快反应速率,同时降低氧气在水泥中的饱和量<sup>[22]</sup>。

硫氧镁水泥基吸波材料的配合比如表2所示。

首先,称取吸波剂粉末分散在去离子水中,超声剥离30 min后,按比例分散于配置好的硫酸镁溶液

表2 硫氧镁水泥基吸波材料的配合比

Table 2 Mix proportions of magnesium oxysulfide cement based absorbing materials

Sample	$n(\text{MgO}):n(\text{MgSO}_4):n(\text{H}_2\text{O})$	$w(\text{silicon carbide})/\%$	$w(\text{ferrite})/\%$
A0	10:1:20	0	0
F5	10:1:20	5	0
F10	10:1:20	10	0
F15	10:1:20	15	0
S5	10:1:20	0	5
S10	10:1:20	0	10
S15	10:1:20	0	15

中;然后,按照表2配合比,将各种物料混合倒入搅拌机中,加入氧化镁含量1%的柠檬酸作为改性剂,而后置于模具中成型,经短时间静置发泡达到理想高度后,置于 $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(70 \pm 5)\%$ 的条件下养护28 d后进行吸波性能检测( $180\ \text{mm} \times 180\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$ )。

此处选择建材类内墙夹层最常用的厚度为30 mm的板材作为检测样品(强度为1 MPa,体积密度为 $800\ \text{kg}/\text{m}^3$ ),更为贴合实际应用。

### 1.3 矿相及微观结构检测

将破碎样品放入烘箱中经 $60^\circ\text{C}$ 烘干2 h后研磨成粉末,采用荷兰帕纳科公司生产的X'Pert Powder型X射线衍射仪(XRD)分析其相组成;采用ZELSS公司 $\Sigma$ IGMAHD型扫描电镜(SEM)及能谱仪(EDS)分析观察样品的种类、晶体形貌,加速电压为0.02~30.00 kV;使用弓形法在矢量网络分析仪(HP8510B型)上测试吸波材料在3.95~18 G.00Hz频率范围内的反射率。

### 1.4 吸波性能检测

单层平板材料是结构最简单的吸波材料,如图1所示。

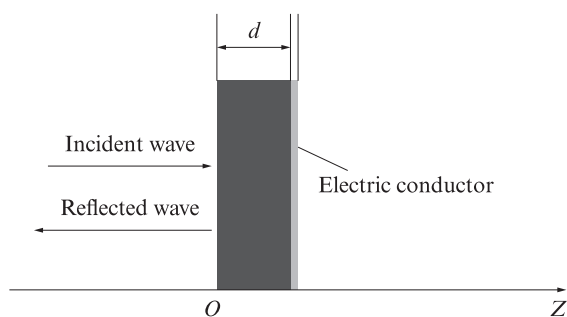


图1 单层平板材料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the single-layer plate material

电磁波垂直入射在单层平板材料表面的路径并不复杂。电磁波在单层材料的两个表面发生多次反

射,单层有耗材料的反射率曲线常含多个干涉吸收峰<sup>[23-25]</sup>,吸收峰的大小与电磁波波长及材料的电磁参数性质有关:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left( j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right) \quad (1)$$

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

式中: $Z_m$ 为有效阻抗; $Z_0$ 为自由空间阻抗,其值为 $120\pi \approx 377\ \Omega$ ;  $f$ 为电磁波频率,Hz; $\epsilon$ 和 $\mu$ 分别为复介电常数和复磁导率; $\epsilon_r$ 和 $\mu_r$ 分别为相对复介电常数和相对复磁导率; $d$ 为样品厚度,mm; $c$ 为光速; $\epsilon'$ 和 $\mu'$ 分别为相对复介电常数实部和相对复磁导率实部; $\epsilon''$ 和 $\mu''$ 分别为相对复介电常数虚部和相对复磁导率虚部,体现了电损耗和磁损耗的能力.

电磁波垂直入射到单层平板有耗材料表面时,如果反射率曲线中的吸收峰是相干峰,则吸收峰的匹配频率( $f_m$ )可以从材料厚度推出.从相邻峰的频率间隔接近的现象近似推导出波速( $V_m$ )的近似值为:

$$V_m = 2d\Delta f_m \quad (4)$$

式中: $\Delta f_m$ 为匹配频率的差值,Hz.

从而,复合材料的折射率( $n_r$ )为:

$$n_r = c/V_m = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} = c/2d\Delta f_m \quad (5)$$

输入阻抗可由介质的电磁参数进行计算.忽略磁损耗且假设 $\mu_r = \mu' = 1$ 时,输入阻抗值可以转化为:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

由折射率 $n_r = \sqrt{\epsilon_r}$ ,可得:

$$Z_{in} = \frac{Z_0}{n_r} \quad (7)$$

在吸波材料中的波长( $\lambda_m$ )可以推得:

$$\lambda_m = V_m/f = 2d\Delta f_m/f \quad (8)$$

由图1可知,每个样品的反射率曲线都有几个吸收峰,图中每条曲线都有多个明显的相干峰.当材料的透波性能增强后,电磁波更容易进入和穿透材料,穿透材料的电磁波受金属背板的反射又从材料表面透射出,出现二次反射波,与一次反射波发生干涉,在反射率曲线上出现明显的相干吸收峰,而吸收峰的反射率是由2次反射波的幅值和相位差决定的.

图2为弓形法测试反射率示意图,并将材料厚度定在30 mm,对G波段(3.95~5.85 GHz)、J波段(5.85~8.20 GHz)、X波段(8.20~12.40 GHz)和P波段(12.40~18.00 GHz)4个波段内测试.

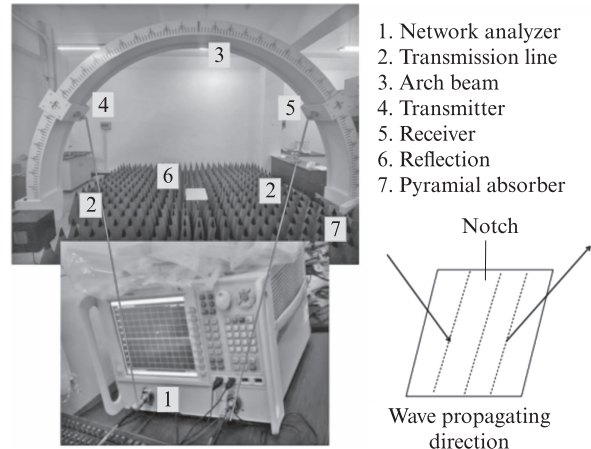


图2 弓形法测试反射率示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of reflectivity measurement by bow method

## 2 结果与分析

### 2.1 XRD分析

图3为不同硫氧镁水泥的XRD图谱.由图3可见:硫氧镁水泥水化产物主要由517相和 $Mg(OH)_2$ 组成,还包含未反应的少量氧化镁等;碳化硅或铁氧体对硫氧镁水泥的主要水化产物并没有太大影响;没有任何新的产物水化产生,说明碳化硅和铁氧体只为新的矿物晶体坯提供了通用界面,而没有参与水泥的水化反应,不会影响水泥水化产物的组成.

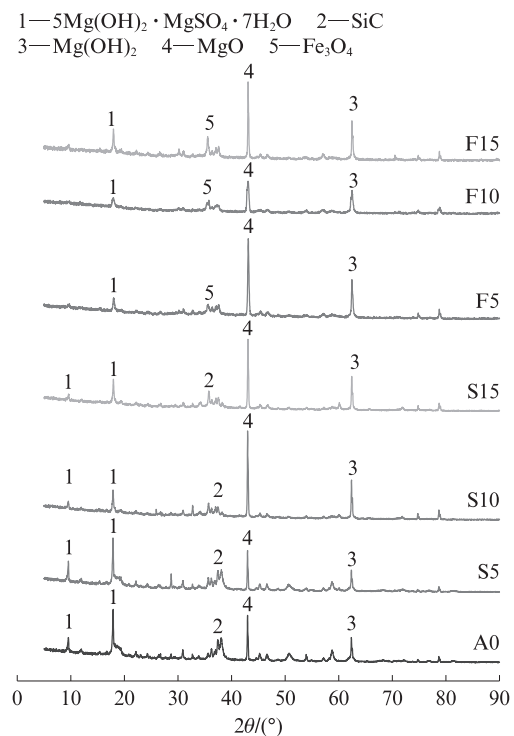


图3 不同硫氧镁水泥的XRD图谱  
Fig. 3 XRD patterns of different magnesium thioxide cements

2.2 SEM分析

图4为样品S5的SEM图片、机理分析和元素分布.图5为样品F15的SEM图片、机理分析和元素分布.从图4、5中可以看出,在有孔洞的水泥基体中,相较于致密的水泥基体,内部含有的大量孔洞,会结合自身的储放电能力,提高水泥基材料与空气介质中的电磁波阻抗匹配,提高硫氧镁水泥基发泡板中导电介

质损耗电磁波能量的损耗效率,减少阻抗过渡层表面的趋肤效应,有利于电磁波的人射.

通过反射损耗可以知道,碳化硅可以改善硫氧镁水泥泡沫板的介电常数和电阻率,提高机体对电磁波的介电损耗和电阻损耗能力.根据麦克斯韦方程中的法拉第定律,外加的交变磁场会改变铁磁体内的磁通量,同时使磁感应强度产生变化,从而在铁

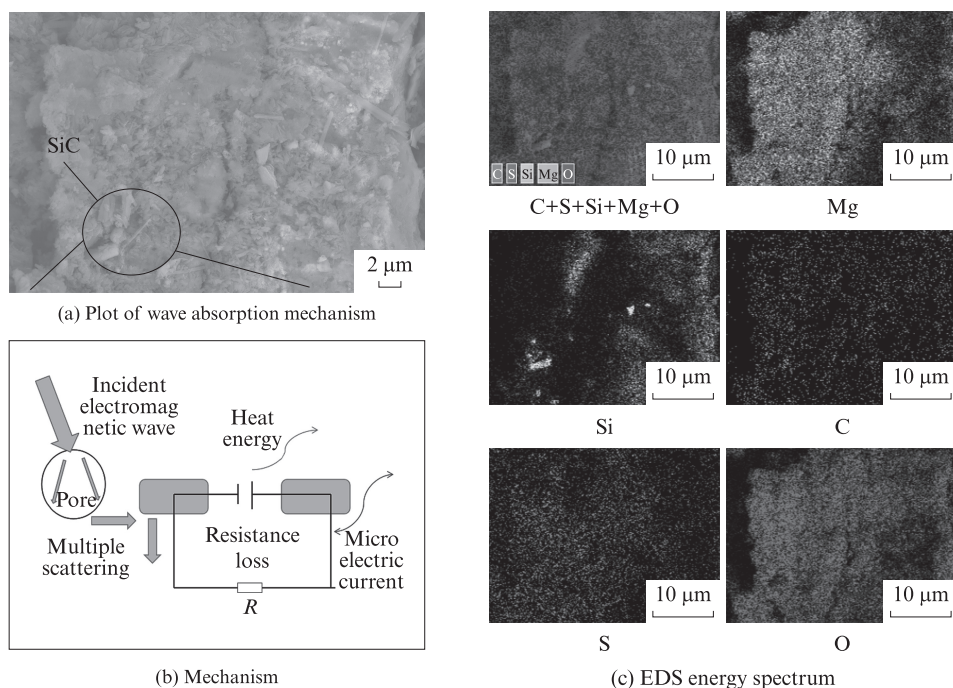


图4 样品S5的SEM图片、机理分析和元素分布  
Fig. 4 SEM images, mechanism and element distributions of sample S5

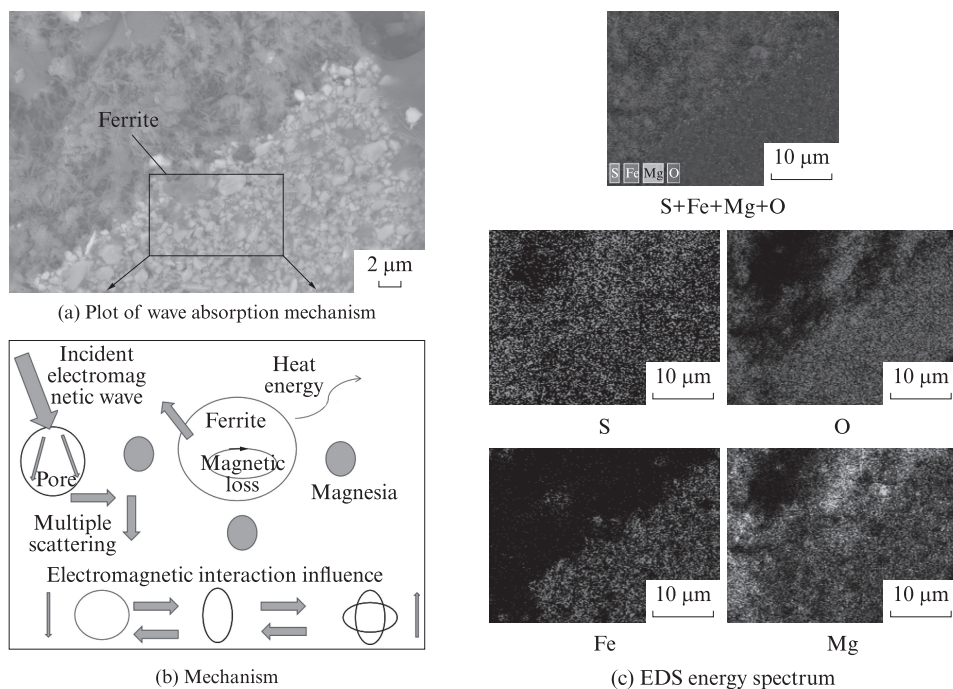


图5 样品F15的SEM图片、机理分析和元素分布  
Fig. 5 SEM images, mechanism and element distributions of sample F15

氧体材料中引发涡旋电流,而这种涡旋电流同时又将激发一个新的磁场来阻止外加磁场引起的磁通量的变化,此时水泥基体内部的磁场由外加的交变磁场以及由涡旋电流产生的感应磁场共同组成.铁氧体可以改善水泥基中的磁导率并提高基体对电磁波的电磁交互能力以及涡流损耗能力.加入铁氧体后,水泥基体的形态改变,517相分布更密集,铁氧体颗粒分布在相应的孔隙和表面,最终使铁氧体与517相互依赖、协作,实现了良好的微波吸收.

### 2.3 吸波性能分析

#### 2.3.1 吸收特性的机制

吸收特性的机制包括介电损耗、相干衰减和散射衰减<sup>[26]</sup>,如图6所示.当电磁波入射到材料表面时,一部分电磁波被反射,另一部分传输到材料中.部分传输到材料内部的电磁波到达材料的底部,并被底部反射.这部分电磁波再次经过材料内部时未被完全损耗,剩余部分透过表面并与表面反射的电磁波相干涉,产生相干吸收峰.发泡材料内部掺入的铁氧体和碳化硅有导电性,介电损耗大,在电磁波的激励下,会发生极化或引起感应电流,将电磁能转化为热

能,产生介电损耗.界面的不匹配阻抗导致波在颗粒之间发生散射和反射.电磁波在散射和反射过程中会产生相干衰减.因此,吸波材料的电磁参数和材料的内部结构都将影响材料的吸波性能.

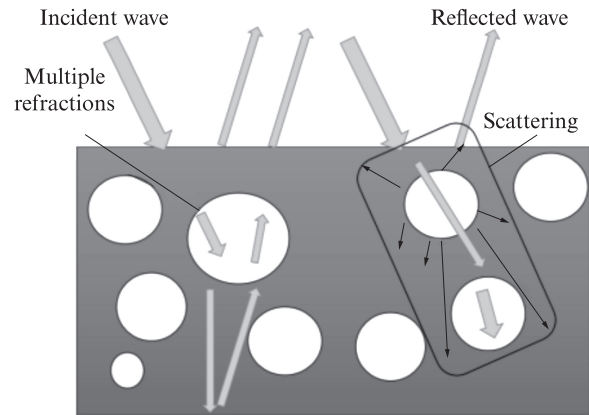


图6 泡沫板材料吸波机理图

Fig. 6 Plot of wave absorption mechanism of foam plate material

#### 2.3.2 吸波测试

图7、8分别为不同碳化硅、铁氧体掺量硫氧镁水泥泡沫板的吸波性能.

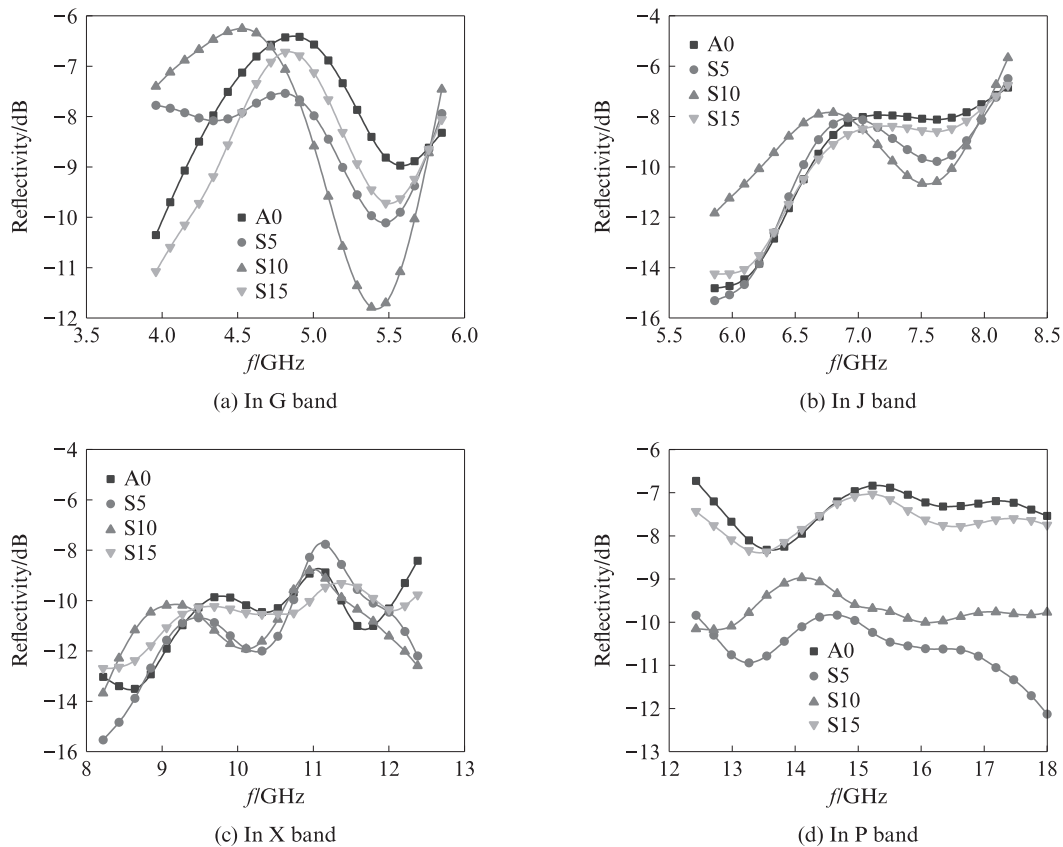


图7 不同碳化硅掺量硫氧镁水泥泡沫板的吸波性能

Fig. 7 Wave absorption properties of magnesium thiooxide cement foam plate with different silicon carbide contents

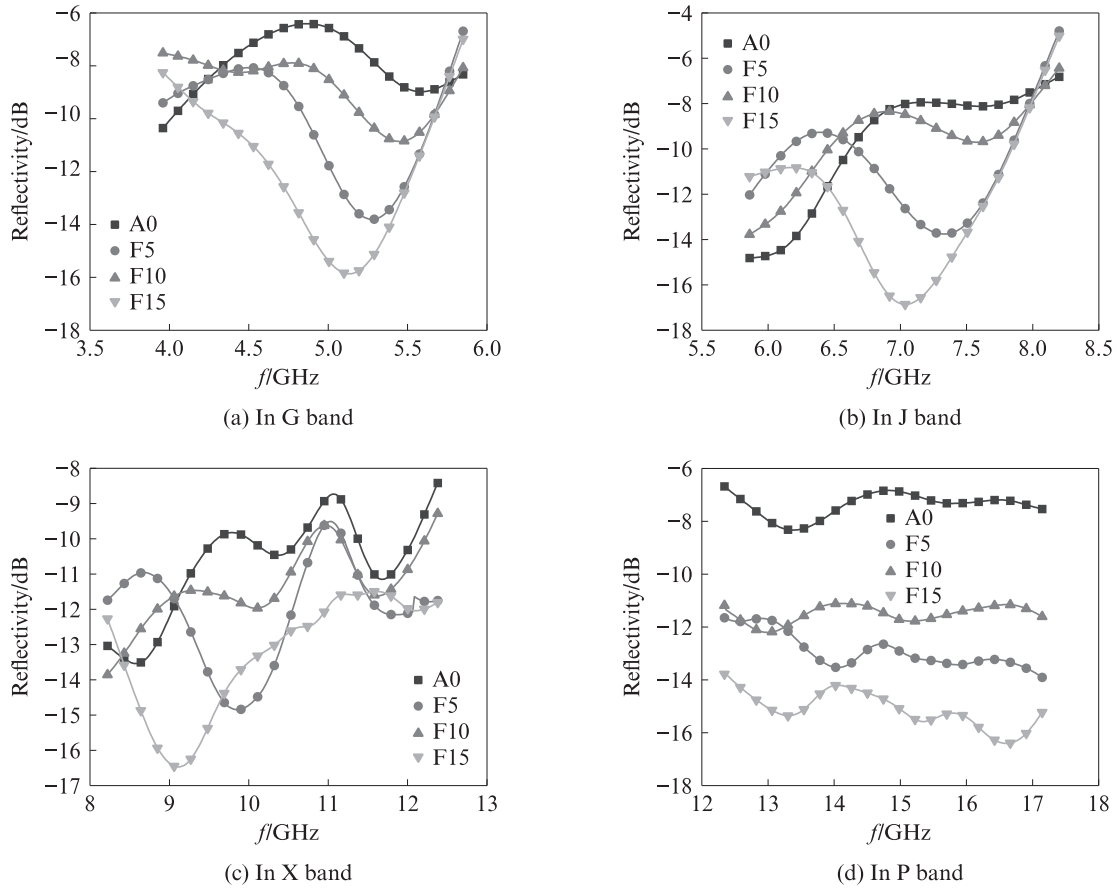


图8 不同铁氧体掺量硫氧镁水泥泡沫板的吸波性能

Fig. 8 Wave absorption properties of the cement foam plate with different ferrite contents

采用1.4中的分析方法,通过式(4)、(5)计算样品F15中的电磁波波速,结果见表3.由表3可见,波速平均值为 $1.21 \times 10^8$  m/s.

电磁波更容易穿透填充有少量铁氧体的改性硫氧镁水泥基泡沫吸波板,掺加5%碳化硅改性硫氧镁水泥基泡沫吸波板的最低反射率出现在8.40 GHz处,为-15.3 dB,全频段平均反射率-11.3 dB;掺加15%铁氧体使材料的最低反射率出现在7.10 GHz处,为-17.7 dB,全频段平均反射率-13.9 dB.当铁氧体掺量增多时,会引起较强的内部能量消耗,进而提高对应的吸波能力.

根据阻抗匹配原理,提高材料与自由空间的阻抗匹配程度可以降低材料表面的电磁波反射,并改善材料的吸波性能,增强吸波能效.随着铁氧体掺量的增加,当电磁波入射到材料表面时,一部分电磁波

被反射,另一部分传输到材料中.部分传输到材料内部的电磁波利用铁氧体的电磁交互能力产生涡流损耗,以达到吸收电磁波的效果.

在3.95~18.00 GHz目标频段下,掺加5%碳化硅改性硫氧镁水泥基泡沫吸波板的最低反射率出现在X波段的8.40 GHz处,为-15.9 dB,且在P波段全频段的平均反射率小于-10 dB,所有频段的平均反射率-8.3 dB;掺加15%铁氧体改性硫氧镁水泥基泡沫吸波板的最低反射率出现在7.04 GHz处,为-17.3 dB,在J波段的平均反射率小于-14.4 dB,在X波段平均反射率小于-12 dB,在P波段平均反射率小于-14 dB,所有频段的平均反射率-11.3 dB,且出现多个吸收峰,具有良好的吸波效果.铁氧体和硫氧镁水泥泡沫基体组成了阻抗匹配.

表3 样品F15中的电磁波波速  
Table 3 Electromagnetic wave velocity in sample F15

Peak frequency/GHz	3.90	5.52	6.28	7.87	12.82	14.65	16.52	18.00
Frequency spacing of adjacent peak/GHz		1.62	0.76	1.59	4.95	1.83	1.87	1.48
$V_m \times 10^{-8}/(m \cdot s^{-1})$		0.97	0.46	0.95	2.96	1.10	1.12	0.89

### 3 结论

(1)碳化硅可以改善硫氧镁水泥泡沫板的介电常数和电阻率,提高基体对电磁波的介电损耗和电阻损耗能力;铁氧体可以改善水泥基体的磁导率并提高基体对电磁波的电磁交互能力以及涡流损耗能力。

(2)在有孔洞的硫氧镁水泥基体中,相较于致密的水泥基体,内部大量孔洞可以提高水泥基材料与空气介质的电磁波阻抗匹配,提高硫氧镁水泥基发泡板中导电介质损耗电磁波能量的损耗效率。

(3)在3.95~18.00 GHz目标频段下,掺加5%碳化硅改性硫氧镁水泥基泡沫吸波板的最低反射率出现在8.20~12.40 GHz的8.40 GHz处,为-15.9 dB,掺加15%铁氧体改性硫氧镁水泥基泡沫吸波板的最低反射率出现在7.04 GHz处,为-17.3 dB。

#### 参考文献:

- [1] 崔宝栋,关岩,毕万利,等.不同矿物掺料对硫氧镁水泥耐热性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(2):428-434.  
CUI Baodong, GUAN Yan, BI Wanli, et al. Effect of different mineral admixtures on heat resistance of magnesium oxysulfide cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2): 428-434. (in Chinese)
- [2] 张雄,习志臻.建筑吸波材料及其开发利用前景[J].建筑材料学报,2003,6(1):72-75.  
ZHANG Xiong, XI Zhizhen. Building absorbing materials and their development and utilization prospects[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(1):72-75. (in Chinese)
- [3] 张月芳,郝万军,刘顺华.频率选择表面对PET水泥基材料吸波性能的影响[J].建筑材料学报,2018,21(1):117-123  
ZHANG Yuefang, HAO Wanjun, LIU Shunhua. Effect of frequency-selective surfaces on the absorbing properties of PET cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1):117-123. (in Chinese)
- [4] 田焜,丁庆军,胡曙光.新型水泥基吸波材料的研究[J].建筑材料学报,2010,13(3):295-299.  
TIAN Kun, DING Qingjun, HU Shuguang. Research on new cement-based absorbing materials[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(3):295-299. (in Chinese)
- [5] 石南南,高培伟,李小燕.吸波材料在现代建筑中的应用研究[J].山东建材,2007(4):4-6.  
SHI Nannan, GAO Peiwei, LI Xiaoyan. Research on the application of microwave absorbing materials in modern architecture[J]. Shandong Building Materials, 2007(4):4-6. (in Chinese)
- [6] 左跃,叶越华.水泥基电磁屏蔽与吸波材料的研究进展[J].硅酸盐通报,2007,26(2):311-315.  
ZUO Yue, YE Yuehua. Research progress of cement-based electromagnetic shielding and absorbing materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2007, 26(2):311-315. (in Chinese)
- [7] 窦丹若,张雄.水泥基电磁生态环境材料的工程应用[J].建筑材料学报,2007,10(5):557-560.  
DOU Danruo, ZHANG Xiong. Engineering application of cement based electromagnetic environmental materials[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5):557-560. (in Chinese)
- [8] CUI B D, GUAN Y, BI W L. Non-isothermal kinetic analysis on the thermal decomposition of the phase 517 from hydration product of magnesium sulfide cement[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2023, 38(2): 374-380.
- [9] 文静,余红发,吴成友,等.氯氧镁水泥水化历程的影响因素及水化动力学[J].硅酸盐学报,2013,41(5):588-596.  
WEN Jing, YU Hongfa, WU Chengyou, et al. Influencing factors and hydration kinetics of magnesium oxochloride cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(5): 588-596. (in Chinese)
- [10] 房卉,毕万利,张婷婷,等.铝酸盐水泥对硫氧镁水泥强度和耐水性的影响[J].建筑材料学报,2022,25(4):367-374.  
FANG Hui, BI Wanli, ZHANG Tingting, et al. Effect of aluminate cement on the strength and water resistance of magnesium sulfur oxygen cement[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):367-374. (in Chinese)
- [11] 靳凯戎,许星星,陈啸洋,等.花岗岩石粉对硫氧镁水泥抗压强度和耐水性的影响[J].建筑材料学报,2022,25(8):767-772,780.  
JIN Kairong, XU Xingxing, CHEN Xiaoyang, et al. Effect of granite powder on compressive strength and water resistance of magnesium cement[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8):767-772, 780. (in Chinese)
- [12] 胡智淇,关岩,毕万利.含镁碳酸盐矿物对硫氧镁水泥耐水性的影响[J].建筑材料学报,2022,25(2):184-190.  
HU Zhiqi, GUAN Yan, BI Wanli. Effect of magnesium-containing carbonate minerals on the water resistance of MSO cement[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):184-190. (in Chinese)
- [13] URWONGSE L, SORRELL C A. Phase relationships in magnesium oxysulfate cements[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1980, 63(3):523-526.
- [14] WU C Y, CHEN W H, ZHANG H F, et al. The hydration mechanism and performance of modified magnesium oxysulfate cement by tartaric acid[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144:516-524.
- [15] TAN Y S, YU H F, BI W L, et al. Hydration behavior of magnesium oxysulfate cement with fly ash via electrochemical impedance spectroscopy[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(10):04019237.
- [16] XU X, XU Y Y, DUAND L. Effect of fineness and components of CFBC ash on performance of basic magnesium sulfate cement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170:801-811.
- [17] GUO T, WANG H F, YANG H J, et al. The mechanical properties of magnesium oxysulfate cement enhanced with 517 phase magnesium oxysulfate whiskers[J]. Construction and

- Building Materials, 2017, 150:844-850.
- [18] WU C Y, YU H F, ZHANG H F, et al. Effects of phosphoric acid and phosphates on magnesium oxysulfate cement [J]. Materials and Structures, 2015, 48(4):907-917.
- [19] RUNČEVSKI T, WU C Y, YU H F, et al. Structural characterization of a new magnesium oxysulfate hydrate cement phase and its surface reactions with at magnesium thiooxide cement pheric carbon dioxide[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2013, 96(11):3609-3616.
- [20] 张福占. 发泡混凝土的特点及应用[J]. 建筑与工程, 2008(23):146. ZHANG Fuzhan. Characteristics and application of foamed concrete [J]. Architecture and Engineering, 2008(23):146. (in Chinese)
- [21] 董金美, 余红发, 张立明. 水合法测定活性MgO含量的试验条件研究[J]. 盐湖研究, 2010, 18(1):38-41. DONG Jinmei, YU Hongfa, ZHANG Liming. Study on test conditions for determination of active MgO content by hydration method[J]. Salt Lake Research, 2010, 18(1):38-41. (in Chinese)
- [22] KIM H K, JEON J H, LEE H K. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29:193-200.
- [23] 刘宏伟, 彭海龙, 高培伟, 等. 水泥基吸波材料的性能研究及微观分析[J]. 功能材料, 2015, 46(12):12150-12152. LIU Hongwei, PENG Hailong, GAO Peiwei, et al. Study on properties and microscopic analysis of cement-based microwave absorbing materials[J]. Functional Materials, 2015, 46(12):12150-12152. (in Chinese)
- [24] 李宝毅, 段玉平, 刘顺华. 多孔集料砂浆的吸波特性[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(10):1682-1686. LI Baoyi, DUAN Yuping, LIU Shunhua. Wave absorbing characteristics of porous aggregate mortar [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(10):1682-1686. (in Chinese)
- [25] PHANG S W, DAIK R, ABDULLAH M H. Poly (4, 4'-diphenylene diphenylvinylene) as a non-magnetic microwave absorbing conjugated polymer[J]. Thin Solid Films, 2005, 477(1/2):125-130.
- [26] LI B, JI Z J, XIE S, et al. Electromagnetic wave absorption properties of carbon black/cement-based composites filled with porous glass pellets[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(13):12416-12425.