

水泥基材料隐身性能改性试验与数值模拟

谢卫红^{1,2}, 申海峰^{1,2}, 李顺才³, 刘宏伟^{1,2}

(1. 军队“2110 工程”防护材料重点实验室, 江苏 徐州 221000; 2. 徐州空军学院机场工程系, 江苏 徐州 221000;
3. 徐州师范大学机电学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:以水泥为基体, 添加硅灰和粉煤灰、石墨和碳纤维、纳米 TiO_2 和钢纤维为吸波剂的试样, 对 8~18 GHz 频段内的隐身性能进行了试验分析, 结果表明, 硅灰和粉煤灰、纳米 TiO_2 和钢纤维与水泥复合制成的吸波材料具有良好的隐身性能, 石墨和碳纤维与水泥复合制成的吸波材料的隐身性较差, 掺合材对水泥基材料吸波性能的影响必须综合考虑, 并不是越多越好, 掺合材超过一定极限后, 材料的透波能力增强, 吸波性能便会下降. 在设计时对试件实验数据进行计算机模拟仿真, 得到水泥基复合吸波材料, 材料的电导率、复介电常数、复磁导率、介质损耗角正切等是评价吸波材料的主要参数. 当掺合材作为复合吸波剂应用时, 两种材料的介电损耗共同发挥衰减作用, 可以明显提高试件的吸波性能, 而且可以拓宽频段, 比单一吸波剂的添加有着明显的优势.

关键词:水泥基材料; 改性材料; 隐身性能; 弓形法测试试验; 电磁场仿真

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)01-0114-06

目前为防止民用大型建筑物电磁污染, 减轻人类受电磁波辐射的危害, 对建筑物采取电磁屏蔽等措施也显得非常的重要, 而研究水泥基复合吸波材料是解决电磁波辐射危害的一种有效途径之一. 因而通过改性使其具有电磁屏蔽功能的水泥基复合材料研究越来越受到关注^[1-3].

水泥材料是工程建设中最常用的建筑材料之一, 但水泥本身的电磁屏蔽效能和吸波性能都较低, 通过对水泥材料加入一定的添加剂进行改性来达到对电磁辐射的屏蔽和吸收是一种简单可行的方法^[4]. Cao 等对焦炭填充水泥复合材料的吸波性能的研究表明, 水泥基体中添加部分焦炭粉末之后, 材料在 1.0~1.5 GHz 频段内其屏蔽性能则可达 -43 dB^[5]. 英国的 Walker Wave Technology 公司生产的水泥基 MAC8101 型产品吸波性能在 500~5 000 MHz 频段内都优于 -15 dB, 而其厚度仅为 6.4 mm^[6]. 日本的大成建筑技术研究所开发了一种以 Mn-Zn 和 Mg-Zn 铁氧体为吸波剂的混凝土幕墙材料, 在 90~450 MHz 电磁波的吸收可以达到 -5 dB^[7]. 杨海燕等^[8]对直径为 0.7~1.0 mm, 长度 2~8 cm 的钢纤维增强水泥混凝土材料的吸波测试结果表明, 31 mm 厚度的试样在 2~18 GHz 频率范围内的最大吸收为 -9.8 dB, 吸收优于 -4 dB 的带宽可达 15.28 GHz, 且随纤维长径比的增加而增大. 现有对水泥基吸波性能的研究结果表明, 加入纳米材料可以提高其吸波性能, 将纳米 TiO_2 粉体掺入水泥净浆中制成 10~15 mm 厚的试样, 发现其在 2~18 GHz 频段内具有较好的吸收性能^[9-12]. 本文对水泥基材料进行电磁波吸收效能改性实验研究和 ANSYS 有限元仿真分析, 该研究对全面提高混凝土结构等建筑物的隐身特性, 将具有重要学术价值.

1 实 验

1.1 实验材料

对水泥基材料进行吸波性能改性的掺加材是粉煤灰和硅灰、石墨和碳纤维及纳米 TiO_2 和钢纤维. 粉煤灰利用火电厂排放出来的烟道灰, 硅灰为成都卓越四方环境科技有限公司生产, 石墨为青岛新泰碳

收稿日期: 2011-05-23 修改稿日期: 2011-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50974107)

作者简介: 谢卫红(1962-), 女, 江西赣州人, 教授, 研究生导师, 博士, 从事伪装与防护工程及其土木工程材料研究.

素有限公司生产的 XT300-99.99 型高纯石墨,短切碳纤维为吉林市吉研高科技纤维有限公司生产.选用甘肃文县美迪林纳米材料开发有限公司生产的纳米 TiO₂,钢纤维为鞍山市昌宏钢纤维厂生产的 RPC 微丝平直性钢纤维材料.如图 1 所示为试验所用水泥基改性材料.由于研究与测试的需要,实验样品中未掺加石子和标准砂.

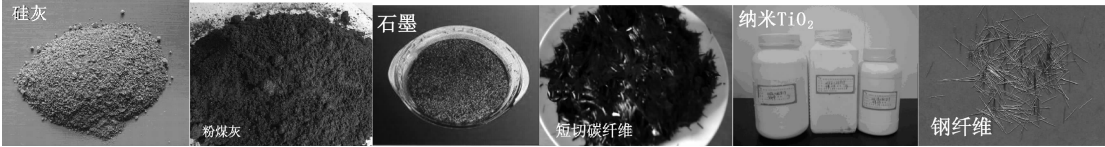


图 1 试验用改性材料

Fig. 1 Modified material in the experiment

1.2 实验设计及设备

在本试验中,试样大小取为 180 mm×180 mm×20 mm,试验中每个试件制作三个同样的样品,并在测试后,取各样品数据的平均值,得到一组有效数据.试验设备用信号源(HP83751)、标量网络分析仪(HP8757D 型,美国 Hewlett-Parkard(HP)公司生产),测试天线系统,如图 2 所示.

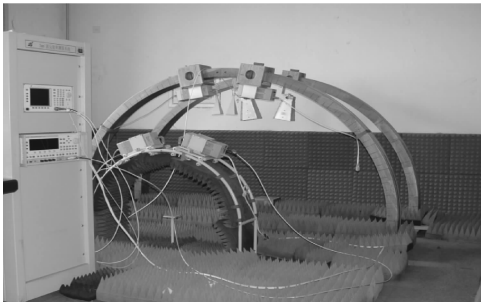


图 2 弓形法测试系统

Fig. 2 Testing system by arch method

1.3 水泥基材料隐身性能改性实验

把水泥基材料吸波性能改性实验分成三大族,掺有硅灰和粉煤灰(10%、20%、30%、40%)、

石墨和碳纤维(2%、4%、6%、8%)和纳米 TiO₂ 和钢纤维(2%、4%、6%、8%)的水泥基试样吸波性能试验.将试样放入测试系统后,得到掺有石墨和碳纤维的试验数据如表 1 所示.注:由于篇幅所限,文中只列出网格扫描的部分节点反射率,其他数据并未列出.同理,可以得到掺有石墨和碳纤维(2%、4%、6%、8%)和掺有纳米 TiO₂ 和钢纤维(2%、4%、6%、8%)的试验数据,由于篇幅所限,这里没有列出.

表 1 石墨和碳纤维实验数据表

Tab. 1 Test data of graphite and carbon fibers

Frequency /GHz	8.00	9.20	10.00	15.00
Reflectivity of S&.T1 /dB	−5.267	−5.271	−5.136	−6.730
Reflectivity of S&.T2 /dB	−5.135	−5.495	−5.816	−7.865
Reflectivity of S&.T3 /dB	−4.582	−4.568	−4.653	−5.873
Reflectivity of S&.T4 /dB	−4.401	−4.652	−4.743	−5.016

2 掺合材对水泥基材料隐身性能实验结果影响

(1)分析数据可知,石墨的加入可使试样对电磁波的某些频带产生一定吸波效果,但吸波效能随着石墨加入量的增加而减少,添加 2%石墨的试样即出现了最大吸收值.而碳纤维的加入对试样的电磁波吸收效果有一定程度的降低,资料显示其吸波效果均低于同样含量的碳纤维

单组分样品 4dB 左右,这说明此组试样对电磁

波有一定的吸收能力,但总体来说并不能达到理想的效果.

(2)由吸波理论可知,要改善水泥基材料吸波性能,必须提高材料的磁损耗和介电损耗,并使之匹配,同时掺合材要具有较好的相容性.从纳米 TiO₂ 和钢纤维的试验数据可看出,随着纳米 TiO₂ 和钢纤维用量的增加,试样的吸波性能有一定程度的提高.

电磁波的能量公式为: $E=h\times f$ (1)

式中: h 为普朗克常数, f 为电磁波频.

以雷达常用频段 8~18 GHz 计算,其微波能量为 $E=7.45 \times 10^{-5} \sim 3.31 \times 10^{-6} \text{ eV}$

根据久保理论,得到相邻电子能级间距和颗粒大小的关系公式:

$$\delta = \left(\frac{3}{4}\right) \times \left(\frac{E_F}{N}\right) \propto V^{-1} \quad (2)$$

式中: N 为一个纳米粒子的总导电电子数, V 为纳米粒子的体积, E_F 为费米能级:

$$E_F = (3\pi^2 n)^{2/3} \times \left(\frac{h^2}{2m}\right) \quad (3)$$

式中: n 为电子密度, m 为电子质量, h 为普朗克常数.

由于量子尺寸效应引起的纳米粒子、尤其是直径较大的纳米粒子的电子能级分裂间距 δ 处于微波的能量范围内,这有利于纳米吸波材料对电磁波的吸收.而其吸波性能的改善主要是由纳米 TiO_2 的小尺寸效应和纳米 TiO_2 粒子的电子分裂的能级间隔正好处于电磁波的能量范围而形成新的吸波通道引起的.而钢纤维与纳米 TiO_2 复合后,水泥基复合材料的吸波性能比单一纳米 TiO_2 试样有所提高,其原因可能是纳米 TiO_2 与钢纤维的电磁性相容和配比制备的水泥基复合材料的电磁性能匹配而减少了电磁波在试样表面的反射,使其吸波性能比单一的纳米 TiO_2 与水泥复合材料有所提高.

(3) 从试验数据可以看出,在水泥基材料中加入掺合材料,其吸波效能得到增强,在相同条件下,8~12.5 GHz 频段内,掺硅灰和粉煤灰的吸波效能较好,在 9.0 GHz 时为 -8.7 dB,为素水泥试样吸波效能的 170%,比掺纳米 TiO_2 和钢纤维的水泥基材料低 0.4 dB;在 12.5~18 GHz 频段内,掺纳米 TiO_2 和钢纤维的吸波效能更占优势,在 18 GHz 时达到了 -14.6 dB.在 12.5 GHz 后,掺硅灰和粉煤灰水泥基材料吸波效能对比掺纳米 TiO_2 和钢纤维水泥基材料开始下降.其原因还不清楚,可能为掺硅灰和粉煤灰的水泥基材料的电阻率最高,随着频率增加吸收相对来说较弱.因此,在水泥基材料中掺纳米 TiO_2 和钢纤维,其吸波效能较高,但会使材料成本增加.在水泥基材料中同时掺入硅灰和粉煤灰,不但可以实现废物回收利用,还可能得到吸波效能高、强度也高的水泥基吸波材料,是今后发展的一个新趋势.

3 数值模拟与结果分析

3.1 模型假设与建立

设块水泥基材料矩形板,有一平面电磁波入射到该水泥板上,求解水泥板对入射电磁波在不同磁场强度 H 下的雷达有效散射截面积和反射率与频率之间的关系.

几何参数:1/4 水泥板的长与宽均为 $D=L=0.045 \text{ m}$;

激励荷载:入射角为 90° ,入射频率为 8~18 GHz;

设空气的相对磁导率为 1,相对介电常数为 1;设掺硅灰和粉煤灰试件的相对磁导率为 0.97,相对介电常数为 8.03;掺石墨和碳纤维试件的相对磁导率为 0.99,相对介电常数为 7.79;掺纳米 TiO_2 和钢纤维试件的相对磁导率为 0.98,相对介电常数为 8.86.

考虑到对称性,仅对水泥板的 1/4 进行建模.在求解过程中做如下假设:辐射体周围为一假想激励源(实际上仅在它的表面上假想激励荷载),依次向外为内部区域和外部区域,内部区域与辐射体的过渡区,外部区域为完全匹配层(Perfectly matched layers, PML),PML 对透入入射电磁波强烈吸收.

整个模型的激励荷载为外加平面电磁波,假定该外加平面波的电场极化方向为总体坐标系的 x 方向,传播方向沿总体坐标的 z 轴负方向,频率为 8~18 GHz.在模型的 $x=0$ 的对称面上加电壁约束,其他对称面为自由面.在外层空气层的外表面上,施加无限远表面标志.

3.2 模拟结果与试验结果比较分析

从利用 ANSYS 软件仿真模拟水泥基吸波复合材料的吸波性能效果来看,进一步验证了实验数据的合理性,虽然仿真数据和真实的实验数据有一定的偏差,但是在总体效果和对材料的吸波效能模拟上达到了一定的相似性.如图 3 所示为硅灰和粉煤灰实验曲线和仿真曲线比较.

从图中可看出,两曲线的吸收峰出现的频率点位置几乎没有改变,当反射率小于 -10 dB 时,仿真曲线的连续带宽达到了 4.9 GHz,大于实验曲线,说明在真实的实验过程中有许多不确定的因素干扰试

样达到理想的效果。

仿真曲线在 16.7 GHz 时出现了一个吸收峰,峰值达到了 -12.6 dB,最小反射率为 -12.6 dB,最大反射率为 -7.0 dB,而且在 Ku 频段的吸波效能也基本符合理论值,这也说明了计算机仿真模拟运算不仅能验证实验结论的正确性,而且还可以辅助校正真实实验过程中出现的数据偏差和误差值。

分析石墨和碳纤维试验数据可看出,随着石墨和碳纤维掺量由 2% 增加到 6%,试样的吸波效能明显减弱,由于碳纤维是一种电损耗型吸波剂,石墨和碳纤维掺量的提高将导致材料的介电损耗增大,故掺 4% 石墨和碳纤维试样的吸波性能更好。从图 4 的仿真曲线上看吸波效能要好于实验曲线反射率 < -7 dB 的带宽达到了 3.2 GHz,最小反射率为 -7.6 dB,最大反射率为 -4.7 dB,这可能是在制样过程中,受到水灰比的限制,掺 2% 以上碳纤维很难全部分散成单根细丝,分散效果不理想。中间部位存在碳纤维的堆积,而利用 ANSYS 软件仿真只是单纯的输入相对磁导率和相对介电常数,这也说明了理论设计的情况在实际的实验中有时会很难达到预期的效果,水泥基材料中靠提高碳纤维掺量或其它磁损耗型吸波剂复合(本文选用石墨)来改善其吸波性能是比较困难,而应对其改性或制成多层吸波材料才有可能提高其吸波性能。

图 5 为纳米 TiO_2 和钢纤维数据图,从图中可看出:在 8~12.5 GHz 频率范围内,仿真曲线和实验曲线走向几乎相同,基本成平缓的坡度增加,在 8~10 GHz 略有波动,但不太明显,反射率变化也不大。但在 12.5~18 GHz 频率范围内仿真曲线变化较大,反射率在 16.8 GHz 附近出现拐点,有明显的吸收峰,其峰值为 -13.9 dB,出现最小反射率。仿真曲线反射率的最小值为 -13.9 dB,最大值为 -8.5 dB,反射率 < -10 dB 的频段 6.3 GHz,连续带宽几乎覆盖整个 Ku 频段,但在 17 GHz 以后仿真曲线反射率有一个突然升高的过程。具体原因还不清楚,但仿真曲线总体上比实验曲线向低频移动,表现出更好的频带兼容性。这也进一步表明在 8~18 GHz 频率内纳米 TiO_2 和钢纤维有更好的吸波性能。

水泥基复合材料对电磁波的吸收是由介电损耗、电磁损耗和材料对电磁波的干涉作用组成。其电损耗来源于导电损耗和介电损耗两部分,可用下式表达:

$$\tan\delta_e = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{\epsilon''_1(\omega)}{\epsilon'(\omega)} + \frac{\sigma}{\omega\epsilon'(\omega)}$$

式中的 $\tan\delta_e$ 为电损耗角正切, $\epsilon'(\omega)$ 为复介电常数实部, $\epsilon''(\omega)$ 为复介电常数虚部,为介电损耗部分, σ 为电导率, ω 为角频率。右边第一项来源于介电损耗,其随频率变化而改变,大小视具体材料和波段而不同;第二项来源于导电损耗。当材料的电导率 $\sigma < 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$ 时,材料无明显的电磁波吸收特性;当电导率介于 $10^{-3} \text{ Sm}^{-1} < \sigma < 10^0 \text{ Sm}^{-1}$ 时,材料呈半导体特性,有一定的吸波性能;当 $\sigma > 10^0 \text{ Sm}^{-1}$

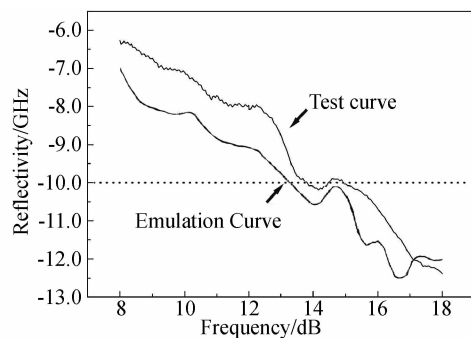


图3 硅灰和粉煤灰吸波性能实验曲线和仿真曲线比较

Fig. 3 Comparison of curves of numerical simulation and experiment of silica fume and pulverized fuel ash's microwave-absorbing performance

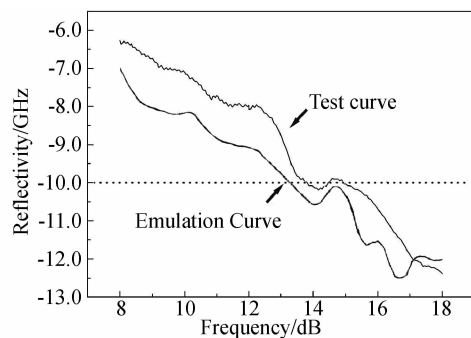


图4 石墨和碳纤维实验曲线和仿真曲线比较

Fig. 4 Comparison of curves of numerical simulation and experiment of graphite and carbon fibers' microwave-absorbing performance

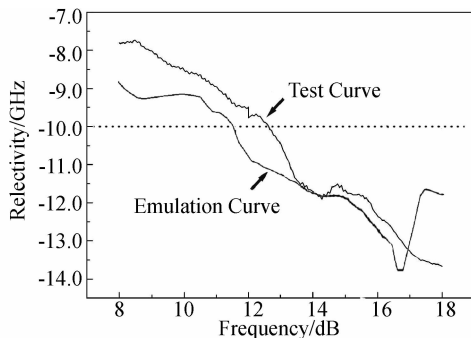


图5 纳米 TiO_2 和钢纤维实验曲线和仿真曲线比较

Fig. 5 Comparison of curves of numerical simulation and experiment of nano- TiO_2 and steel fibers' microwave-absorbing performance

时,材料呈金属特性,具有电磁屏蔽效应.当掺合材用量增加时,与水泥复合材料的复介电常数实部和虚部增大,吸波效能增强,而使用其介电损耗、磁损耗和复合材料对电磁波的干涉作用,会消除实际情况中其它对实验不利因素的干扰和人为的误差,进而使其反射率降低,吸波性能相对提高;这也是仿真曲线普遍比实验曲线反射率较低的原因.也说明磁导率、介电常数是衡量材料吸波效能的主要因素,当掺量提高时,试样的介电损耗角正切值增大,且复磁导率虚部和磁损耗角正切值相对增大,而复介电常数、磁损耗角和复磁导率对电磁波的损耗起主要作用,其值越大,对电磁波的损耗也大,故其吸波性能相对较好.所以纳米 TiO_2 和钢纤维相对于其它掺合材有更高的介电常数和磁导率,无论是在实际实验中还是在 ANSYS 软件仿真模拟中都有良好的表现.

4 结 论

本文对硅灰和粉煤灰、石墨和碳纤维、纳米 TiO_2 和钢纤维三组掺合材与普通硅酸盐水泥进行复合,实验研究了水泥基复合材料的隐身性能,对试验结果进行数值模拟分析,主要结论为:

(1) 在 8~18 GHz 的测试频段内,硅灰和煤

灰、纳米 TiO_2 和钢纤维与水泥复合制成的吸波材料具有良好的吸波效能,其吸波效能随掺合材的含量增加而增大,但有一极限值.而石墨和碳纤维与水泥复合制成的吸波材料的吸波效能较差.

(2) 当硅灰和粉煤灰、纳米 TiO_2 和钢纤维

为复合吸波剂应用时,两种材料的介电损耗共同发挥衰减作用,可以明显提高试件的吸波性能,而且可以拓宽频段,比单一吸波剂的添加有着明显的优势.

(3) 通过用 ANSYS 软件对试件进行计算机

模拟仿真,得到水泥基复合吸波材料在设计时,材料电导率、复介电常数、复磁导率、介质损耗角正切等是评价吸波材料的主要参数.在设计水泥基复合吸波材料时,添加的掺合材要尽可能使材料的磁导率虚部和介电常数虚部较大,提高材料的磁损耗和介电损耗,同时要考虑匹配特性,即磁导率实部尽可能接近介电常数实部.

参考文献 References

- [1] 司 琼,董发勤.掺短碳纤维和石墨混凝土的低频电磁屏蔽性能[J].硅酸盐学报,2005,33(7):916-920.
SI Qiong, DONG Fa-qin. Effectiveness of low frequency electromagnetic shielding concrete with short carbon fibers and graphite[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2005,33(7):916-920.
- [2] 张 雄,刁志臻.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, DIAO Zhi-zhen. Building electromagnetic wave absorber and its application on the environment protection of habitation[J]. Journal of Building Materials, 2003,6(1):72-75.
- [3] 李凤生,杨 毅,马振叶等.造福人类的电磁屏蔽和吸波材料[J].物理与工程,2003,6:25-29.
LI Feng-sheng, YANG Yi, MA Zheng-ye, et al. Introduction about the materials for screening electromagnetic radiation and absorbing microwave[J]. Physics and Engineering, 2003,6:25-29.
- [4] 张小辉,康 青,徐守彬.钢纤维混凝土电磁屏蔽性能实验研究[J].功能材料,2007(38):2978-2980.
ZHANG Xiao-hui, KANG Qing, XU Shou-bing. Experimental research on electromagnetic shielding properties of steel-fiber concrete[J]. Journal of Functional Materials, 2007(38):2978-2980.
- [5] CAO Jing-yao, CHUNG D D L. Colloidal graphite as an admixture in cement and as a coating on cement for electromagnetic interference shielding[J]. Cement and Concrete Research, 2003,33(12):1737-1740.
- [6] 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 Guo-xuan, DENG Min, XU Ling-ling, et al. Absorbing electromagnetic wave properties of cement-based composites[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2004,32(10):1281-1284.
- [7] 钱海霞,熊惟皓.纳米复合隐身材料的研究进展[J].宇航材料工艺,2002(2):8-11.
QIAN Hai-xia, XIONG Wei-hao. Research on nanocomposite stealthy materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002(2):8-11.
- [8] 杨海燕,李 劲,叶齐政,等.钢纤维混凝土的吸波性能研究[J].功能材料,2002,33(3):341-343.

- YANG Hai-yan, LI Jin, YE Qi-zheng, et al. Research on absorbing EMW properties of steel-fiber concrete[J]. Journal of Functional Materials, 2002,33(3):341-343.
- [9] 熊国宣,邓敏,徐玲玲,等.隐身材料和隐身混凝土的研究现状与趋势[J].功能材料与器件学报,2003(9):486-492.
- XIONG Guo-xuan, DENG Min, XU Ling-ling, et al. Research current status and future trends of stealthy materials and stealthy concrete[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2003(9):486-492.
- [10] 姜明连,阚涛.复合磁介质吸波材料[J].磁性材料及器件,2002,33(5):13-15.
- LOU Ming-lian, KAN Tao. EM wave absorption construction materials containing magnetic media[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2002,33(5):13-15.
- [11] ZHANG Hai-jun, LIU Zhi-chao, MA Chen-liang, et al. Preparation and microwave properties of Co and Tdoped barium ferrite by citrate sol-gel process[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003(80):129-134.
- [12] ZOUGHBI R. Microwave and millimeter wave non-de-structive testing [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1995(53):461-462.

Numerical simulation and modified test research on stealth performance of cement-based material

XIE Wei-hong^{1,2}, SHEN Hai-feng^{1,2}, LI Shun-cai³, LIU Hong-wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Protective Materials, The Military 2110 Project, Xuzhou 221000, China;

2. Department of Airport Engineering, Xuzhou Airforce College, Xuzhou 221000, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The absorbing performance has been tested and analyzed by taking cement as matrix, blending material silica fume and culver zed fuel ash, graphite and carbon fibers, nano-TiO₂ and steel fibers for absorbing agent trial Sample, in the 8~18 GHz frequency band, the results indicate that silica fume and culver zed fly ash, nano-TiO₂ and steel fiber and composite cement which is made of absorbing material have good stealth performance. Graphite and carbon fiber and cement composite made effective absorbing materials. Blending material to absorb properties of cement-based materials, the impact must be considered together. When blending material exceeds a certain threshold, enhance its ability of wave-transparent enhance while stealth performance will be reduced finally. By using ANSYS software for computer simulation of the specimen to test experimental data, the issue to be cement-based composite absorbing material in design, the electrical conductivity, complex permittivity, complex permeability, dielectric loss tangent, etc of the material are all the main parameters of evaluate absorbing materials. When blending material is used as a composite wave-absorbing agent applications, two kinds of material's dielectric loss plays an attenuation role in common. It can significantly improve the absorbing properties of the specimen, and also broaden the band, which is more advantage ous than adding a single wave-absorbing agent.

Key words: cement-based material; modified materials; stealth performance; measuring test by arch method; electromagnetic field emulation