

涂层球体混合体系的等效介电常数计算及应用

刘顺华[†] 崔晓冬 赵彦波

(大连理工大学材料科学与工程学院,大连 116024)

(2005 年 7 月 14 日收到,2006 年 2 月 28 日收到修改稿)

采用一定的包覆工艺制备了炭黑包覆发泡型聚苯乙烯(EPS)颗粒,用包覆的颗粒作为填料制备了环境适应性强的吸波材料.将涂层球体混合体系作为密实整体考虑,计算了炭黑含量 1% 时的等效介电常数,并用计算结果预测了吸波性能.与实验值对比表明,计算值是基本准确的,可以应用于新型微波暗室用吸波材料的设计和优化.

关键词:炭黑,吸波材料,等效介电常数,吸波性能

PACC: 1340

1. 引言

现行的 EMC 微波暗室用吸波材料基本上是尖劈形或锥形浸碳材料,这种浸碳型吸波材料直接与空气接触,在吸潮现象严重的长江以南地区,吸湿后的吸波体由于电性能发生改变,导致微波暗室测试环境发生变化,使得同一试样在不同湿度下的测试结果不一致.将吸波剂包覆在基体颗粒表面,用包覆的颗粒填充透波材料做成的锥体或填充平板外壳制备的吸波材料已有研究^[1],其优点是环境适应性好,电性能相对稳定,且高度相同的填充材料在吸波性能上优于浸碳材料.但是此类吸波材料的混合体系较为复杂,其不同形状下的吸波性能一般要通过大量的实验测试获得,耗时耗力.本文通过包覆工艺使炭黑成功包覆在发泡型聚苯乙烯(expanded

polystyrene, EPS)颗粒表面,用包覆颗粒填充平板外壳制备吸波材料.对涂层球体混合体系等效介电常数进行了计算,并对其吸波性能进行了预测.与实验值对比表明,涂层球体混合体系的等效介电常数的计算结果基本准确,可以用来进行微波暗室用吸波材料的设计和优化.

2. 试样制备及测试

2.1. 样品制备

实验中所用炭黑的粒径为 30—40nm,散密度为 $3\text{g}/\text{cm}^3$,逾渗值^[2](Vol%) 4.5—5;EPS 粒径 3—4mm.

在空心 EPS 颗粒表面涂敷一层炭黑,具体包覆工艺如图 1 所示.将包覆的 EPS 颗粒填充至透波材料做成的截面积为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的外壳里,压实,

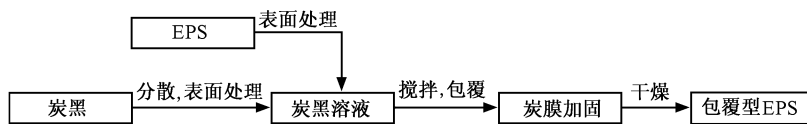


图 1 EPS 包覆流程示意图

然后在微波暗室中用反射法测试其吸波性能.

2.2. 炭黑含量的确定

本实验对炭黑体积含量 η_c 采用下式进行确定:

$$\eta_c = \frac{M_2 - M_1}{\rho} \times 100\%, \quad (1)$$

M_2 为单位体积包覆后 EPS 质量, M_1 为单位体积原始 EPS 质量, ρ 为炭黑的散密度. 通过多次测量取

[†] E-mail: liush@dlut.edu.cn

平均值, η_c 的实测值约为 1%。

3. 等效电磁参数计算

3.1. 涂层球体等效介电常数模型推导

电磁波在单一均匀介质材料中传播时,用介电常数表示其电特性,而对于混合体系均匀介质材料,可以用等效介电常数 ϵ_{eff} 描述它的电特性。对于等效介电常数的计算公式,已经有诸多的研究,并且发展了各自的理论,用的比较广泛的包括 Maxwell-Garnett 理论、有效介质理论(effective media theory)、Bruggeman 理论和 QCA-CPA 理论等等^[3-7]。它们一般规定体系内颗粒为球状且随机无序分布、体系内粉体颗粒直径远远小于电磁波的波长、相互作用可忽略等,在吸收剂的体积含量较小时,能够很好的预测多组分体系的等效电磁参数。在具体应用时,要根据实际情况采用合适的理论进行计算。

本实验中的吸波材料是一个 n 种涂层球体的混合体系,由于球体颗粒直径不是绝对相等,颗粒整体分布可以达到较为密集的程度,涂层球体实际占空比可以达到 90% 的量级^[8]。且 EPS 颗粒的介电常数与空气相近,因此,为简化模型,我们忽略颗粒间隙的空气含量,将整个颗粒分散体系看成只有炭黑层和 EPS 球体组成,根据多组分的 Bruggeman 公式^[9-11]

$$\sum_{p=1}^n \frac{\epsilon_p - \epsilon_g}{\epsilon_p + 2\epsilon_g} f_p = 0, \quad (2)$$

可得 n 种涂层球体组成的混合物的等效介电常数混合公式

$$\sum_{p=1}^n \frac{\epsilon_{\text{cs}}^{(p)} - \epsilon_g}{\epsilon_{\text{cs}}^{(p)} + 2\epsilon_g} f_p = 0, \quad (3)$$

ϵ_g 为涂层球体混合体系的等效介电常数, f_p 为第 p 种物质的体积分数, $\epsilon_{\text{cs}}^{(p)}$ 为相应涂层球体单体的等效介电常数。如果使第 p 种单球内层球体的体积分数为 η_p , 考虑以下简单模型:假设混合体系中所有球体都具有相同 η , 对所有的 $p=1, 2, 3, \dots, n$, 有 $\eta_p = \eta$ 。因此,对所有的 p , 有 $\epsilon_{\text{cs}}^{(p)} = \epsilon_{\text{cs}}$ 。代入(3)式可推出 $\epsilon_g = \epsilon_{\text{cs}}$, 所以 n 种涂层球体混合体系的等效介电常数可由单个涂层球体的介电常数来近似表达。由 Maxwell-Wagner 公式^[12], 单个涂层球体的等效介电常数可以表达为

$$\epsilon_{\text{cs}} = \epsilon_i \left[\frac{\epsilon_m + 2\epsilon_i + 2\eta(\epsilon_m - \epsilon_i)}{\epsilon_m + 2\epsilon_i - \eta(\epsilon_m - \epsilon_i)} \right]. \quad (4)$$

由于各个涂层球体颗粒半径不全相等,加上实际工艺原因,炭黑涂层厚度也不全相等,为了更真实表达球体的占空比,我们将球体体积分数 η 用整个体系的球体占空比 η_{ave} 来代替,即

$$\eta_{\text{ave}} = 1 - \eta_c, \quad (5)$$

η_c 为整个体系炭黑的体积含量。 η_{ave} 的引入,是将颗粒分散体系按一个整体进行考虑,减小了计算误差。

3.2. 计算结果

EPS 的相对介电常数取 1.03, 磁导率为 1, 在 8—18GHz 内可以认为其相对介电常数和磁导率不随频率变化^[13]。炭黑为介电损耗介质,其复磁导率为 $1-0i$, 所以混合体系的复磁导率也为 $1-0i$ 。由(4)式对炭黑包覆的 EPS 球体颗粒混合体系的等效介电常数进行了计算,计算结果如图 2 3 4 所示。

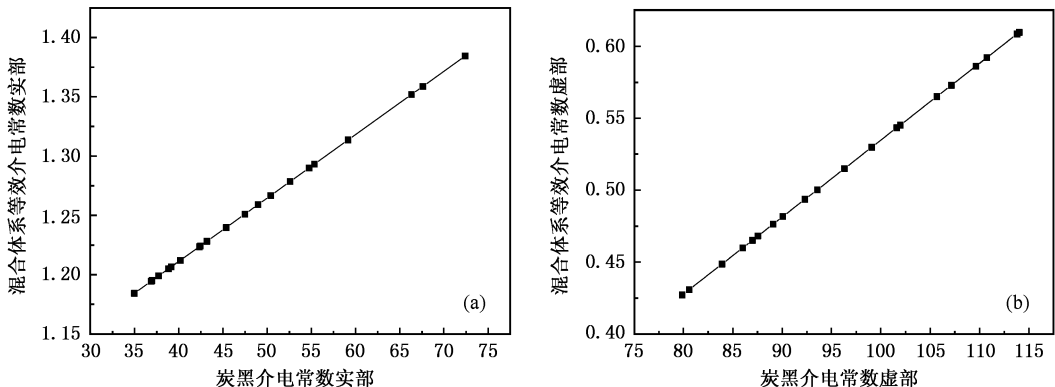


图 2 混合体系等效介电常数与炭黑介电常数的关系

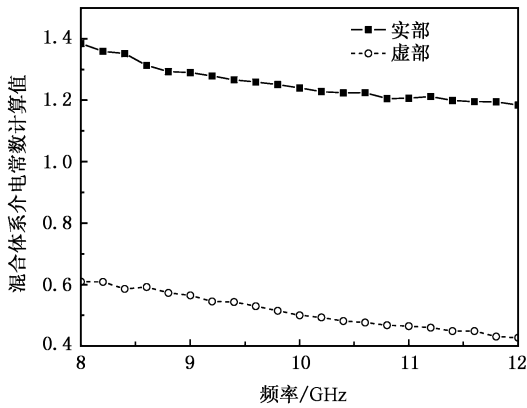


图3 计算所得混合体系的等效介电常数

文献 [14, 15] 指出:有耗蜂窝材料和核壳型颗粒复合材料的等效介电常数与基体损耗材料的介电常数呈线性关系. 具有炭黑涂层的 EPS 颗粒填充体系是一种蜂窝结构,其等效介电常数与炭黑介电常数的关系如图 2 所示,从图中可以看出其等效介电常数与炭黑的介电常数也基本呈线性关系.

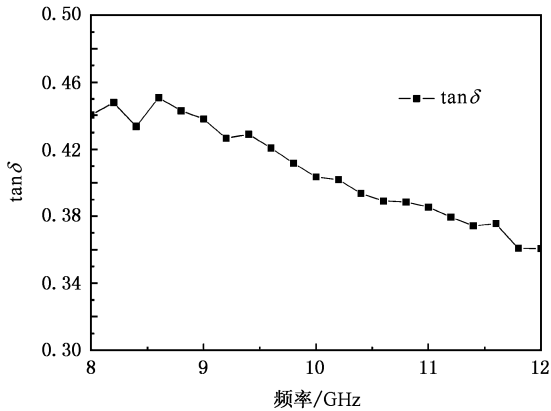


图4 涂层球体混合体系的损耗角正切

从图 3 和图 4 可以看出:混合体系的等效介电常数实部和虚部均随频率的增加而减小,虚部减小的速度更快,导致损耗角正切随频率呈下降趋势,这对于电磁波的吸收是比较有利的.

4. 吸波性能计算及预测

复介电常数 ϵ 、复磁导率 μ 和介质损耗角正切 $\tan\delta$ 等是表征材料原始组分或整个材料电磁性能的重要参数. 当底层为金属反射板时,单层结构吸

波材料的电磁波吸收理论公式^[16]可表达为

$$R = 20 \log_{10} \left| \frac{Z - 1}{Z + 1} \right|, \quad (6)$$

$$Z = \frac{Z_{in}}{z_0} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \tanh\left(j \frac{2\pi d}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right)}, \quad (7)$$

Z_0 为自由空间的波阻抗, ϵ_r, μ_r 为材料的相对介电常数和相对磁导率, d 为厚度. 从(6)(7)式可以看出材料的吸波性能主要由复介电常数 ϵ 、复磁导率 μ 决定,对于混合体系表现为等效电磁参数 $\epsilon_{eff}, \mu_{eff}$ 决定.

我们计算了厚度分别为 25mm, 35mm, 50mm 和 60mm 的涂层球体填充的平板型吸波材料的吸波性能,其中混合体系的等效介电常数 ϵ_{eff} 由(4)式计算得到, μ_{eff} 取 $1 - 0i$, 与实测值对比结果如图 5 所示.

从图 5 中可以看出:材料厚度在 20—40mm 之间时,测试值与计算值基本相符;厚度大于 40mm 时,测试值明显优于计算值,即材料的实际性能比计算值要好. 这是由于计算是在将颗粒体系作为一个整体的基础上进行的,颗粒之间不能达到绝对的紧实;另外,填充后的平板试样表面不能达到绝对的平整,这些都导致了测试与计算之间的偏差. 从图中还可以看出,厚度对材料的吸波性能影响很大,但是厚度大于 40mm 时,材料的吸波性能随厚度的增加提高不明显,在厚度值大于 60mm 时,吸波性能反而有下降的趋势. 这说明此类吸波材料在厚度大于 40mm 时,厚度的增加无益于其吸波性能的增加. 在对厚度的敏感性上,测试值与计算值均表现出相同的变化趋势,这说明,对于涂层球体混合体系等效介电常数的计算结果基本准确. 通过计算得到材料的等效电磁参数,再限定厚度范围和频率范围,即可利用计算机对材料的吸波性能进行计算和预测. 由此可确定材料的匹配厚度范围,确定材料的工作频率,逆向指导吸波材料的设计,减少了实验量.

我们限定厚度范围在 0—50mm,频率范围在 8—18GHz 内计算了材料的吸波性能,其等高线如图 6 所示. 由图 6 可以看出,厚度在 20—30mm 时,反射率等高线比较密集,而且均在 -20dB 以下;厚度大于 30mm 时,吸波性能反而有下降的趋势,说明厚度并非越大越好,这与测试值符合得很好,也证明了对于涂层球体混合体系介电常数的计算是基本准确的.



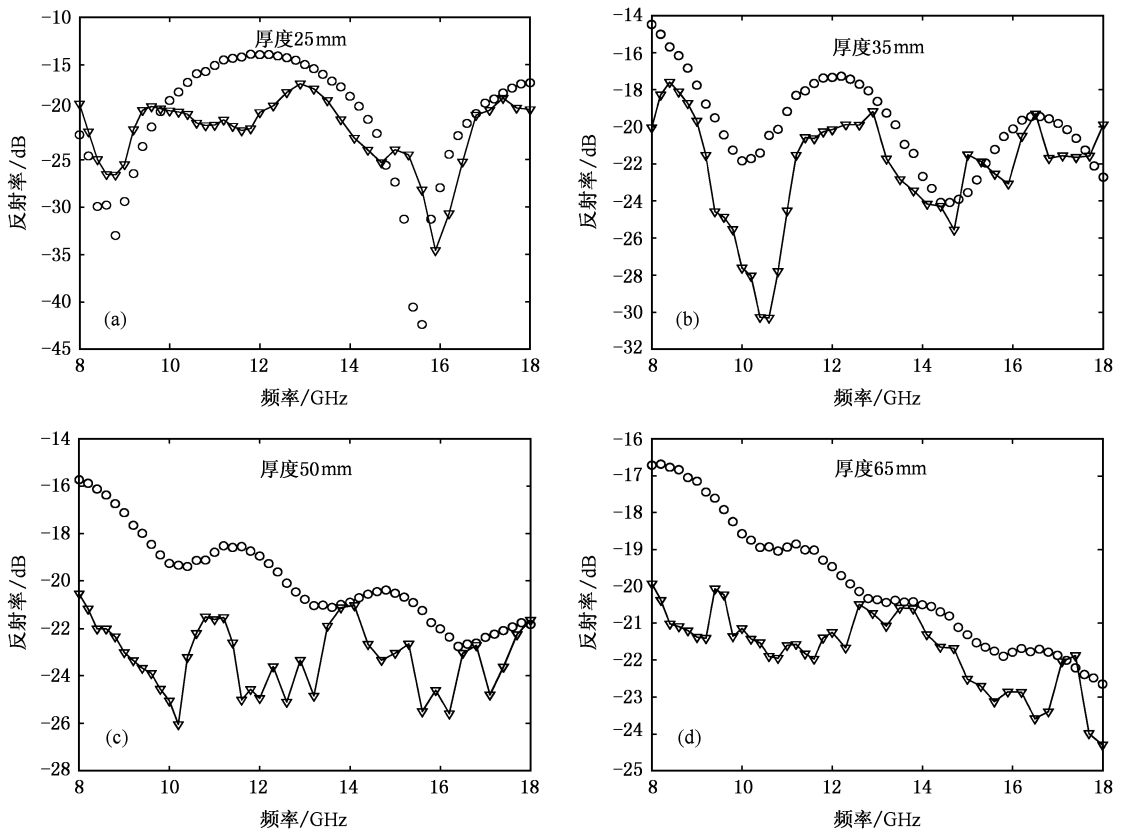


图 5 不同厚度下的吸波性能计算值与实测值对比 ∇ 为实验值 \circ 为计算值

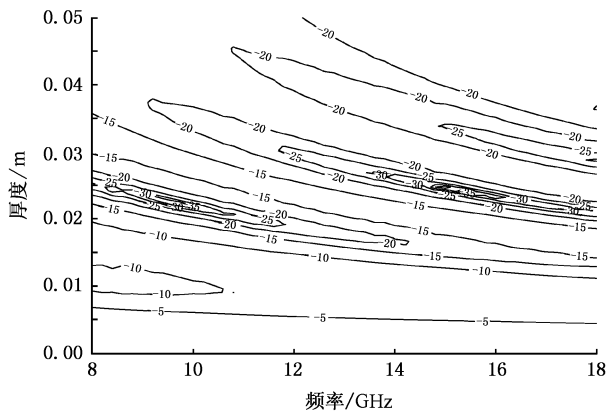


图 6 8—18GHz 内不同厚度吸波材料的反射率等高线图

5. 结 论

用炭黑包覆的 EPS 颗粒作为填料制备了环境适应性强的吸波材料, 炭黑体积含量 1% 时, 吸波材料的最佳吸收厚度在 20—30mm 之间. 炭黑体积含量较少时, 可用单体涂层球球体的电磁参数近似计算包覆颗粒混合体系的等效介电常数, 混合体系的介电常数与原始损耗材料的介电常数基本呈线性关系.

[1] Wang X Y , Zhu H F , Qian J 2001 *Chinese Journal of Radio Science* **16** 41 (in Chinese) [王相元、朱航飞、钱 鉴 2001 电波科学学报 **16** 41]
 [2] Brosseau C , Boulic F , Queffelec P , Bourbigot C , Mest L Y , Loaec J 1997 *Appl. Phys.* **81** 882
 [3] Merrill W M , Diaz R E , LoRe M M , Squires M C , Alexopoulos N

G 1999 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **47** 142
 [4] Sihvola A H 1989 *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **27** 403
 [5] Gao Z J , Cao M S , Zhu J 2004 *Aerospace Material and Processing Technology* **4** 12 (in Chinese) [高正娟、曹茂盛、朱 静 2004 宇航材料工艺 **4** 12]

- [6] He H H , Wu M Z , Zhao Z S 1999 *Acta Physica Sinica* (suppliment) **48** 139 (何华辉、吴明忠、赵振声 1999 物理学报 (增刊) **48** 139)
- [7] Qu W X , Yu W , Xu Z Z 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 666 (in Chinese)(屈卫星、余 玮、徐至展 1997 物理学报 **46** 666]
- [8] Rose L A , Asher W , Reising S C , Gaiser P W , Germain K M St , Dowgiallo D J , Horgan K A , Farquharson G , Knapp E J 2002 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* p2619
- [9] Wu J 2003 *Electromagnetic wave theory* 505 (in Chinese)[Jin Au Kong 著 吴季译 2003 电磁波理论(北京 : 电子工业出版社) 505]
- [10] Chew W C , Friedrich J A , Geiger R 1990 *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* . **28** 207
- [11] Huining W , Arslan A N , Pulliainen J , Hallikainen M 1999 *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2000 Proceedings . IGARSS 2000 IEEE International* **4** 1736
- [12] Scaife B K P 1989 *Principles of Dielectrics* (Clarendon Press. Oxford) 86
- [13] Xu A S , Zhou D 2004 *Engineering Electromagnetics* 398 (in Chinese)[William H. Hayt , Jr. John A. Buck 著 徐安士 周东译 2004 工程电磁学 398 (北京 : 电子工业出版社)]
- [14] Smith F C 1999 *IEE Proc. -Microw. Antennas Propag* **146** 55
- [15] Peng Z J 2004 *Master dissertation of Wuhan University of Technology* 23 [彭志军 2004 武汉理工大学硕士学位论文 23]
- [16] Kim K Y , Kim W S , Hong S Y 1993 *IEEE Transactions on Magnetics* **29** 2134

Study on the electromagnetic and absorption properties of the mixture filled with carbon coated EPS

Liu Shun-Hua[†] Cui Xiao-Dong Zhao Yan-Bo

(*Material Science and Engineering Department , Dalian University of Technology , Dalian 116023 , China*)

(Received 14 July 2005 ; revised manuscript received 28 February 2006)

Abstract

Using the carbon coated expanded polystyrene (EPS) beads as filling admixture , the electromagnetic (EM) wave absorber more moistureproof and environment adaptive than the conventional absorber used in anechoic chamber was fabricated . The effective permittivity of the mixture with carbon volume content 1% was calculated by the strong fluctuation theory combining with Maxwell-Wagner theory ; and the EM wave absorbing property of a laminated model filled with carbon coated EPS beads was predicted through calculation . Comparison with the experiment indicated that the results of calculation accorded with the experiment closely , and can be used for the design of the moistureproof EM wave absorber .

Keywords : carbon black , absorber , effective permittivity , absorbing property

PACC : 1340

[†] E-mail : liush@dlut.edu.cn