

·光电器件与材料·

利用等效电容计算复合材料的有效介电常数

唐厚超, 吕绪良, 吴超, 贾其

(解放军理工大学, 江苏 南京 210007)

摘要:为克服经典理论不适合计算高占空比复合材料的情况,提出了一种利用等效电容计算复合材料的有效介电常数的方法。对于颗粒弥散型复合材料,将其看成是电容器内的填充介质。通过求解电容器的等效电容,进一步导出复合材料有效介电常数的计算公式。将此模型与MG模型以及EMA模型对比,其计算结果非常接近,表明这种方法原理正确、适应性强,并且在高占空比的时候与文献给出的实验值吻合得更好。

关键词:复合材料;等效电容;有效介电常数

中图分类号: E951.4; O482.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)01-0044-03

Algorithm for Effective Permittivity of Composite Materials Using Equivalent Capacitance

TANG Hou-chao, LV Xu-liang, WU Chao, JIA Qi

(PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Classic theory is not suitable for the calculation of composite materials with high duty factor, an algorithm of the effective permittivity of composite materials using the equivalent capacitance is presented. The packing mediums in the capacitor are the particle dispersion type composite materials. By solving the equivalent capacitance of the capacitor, the formulas of effective permittivity are derived. By comparing the model with MG model and EMA model, the results are very similar, so this algorithm is correct and adaptable, the results are matched with the experimental values given in the literatures under the case of high duty factor.

Key words: composite materials; equivalent capacitance; effective permittivity

在微波吸收材料设计中,复合材料的应用越来越广泛。但是在具体理论分析的时候,又需要将微观复杂的复合材料作为宏观均匀的物质来处理,因此,复合材料有效介电常数的计算就显得尤为重要。

最早用于计算混合物有效介电常数的方法是Maxwell-Garnett(MG)理论^[1],它是假定极少量的金属微粒分散于介质基体中,微粒之间的距离较大,微粒之间无相互作用,所以它只适用于颗粒体积分数较低的情况。对于体积分数较高,甚至是两种材料体积相当时,Bruggeman提出了有效介质近似(EMA)模型和微分有效介质近似(DEM)模型^[2],其

中EMA模型应用较多。但是,EMA模型也是一个近似得出的公式,它假定材料由很多晶粒组成,并且要求晶粒是球型的,晶粒的尺寸很小。

文中提出了一种利用等效电容计算复合材料有效介电常数的方法。将复合材料作为电容器内的填充介质,通过求解电容器的等效电容,进一步求解复合材料的有效介电常数。与MG模型及EMA模型相比,这种方法不用考虑颗粒之间的相互影响,并且它是一种积分算法,对于典型的立方体单元包含颗粒球的复合模型,它能得到更精确的计算结果。通过与MG模型和EMA模型对比,表明这

收稿日期:2010-12-25

作者简介:唐厚超(1986-),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为物理与化学材料技术。

种方法原理正确,具有很强的适应性,其计算结果与文献给出的实验数据吻合得很好。

1 等效电容的计算

文中以典型的颗粒弥散型复合材料为研究对象,假定介电常数为 ϵ_2 的颗粒球均匀的分散于介电常数为 ϵ_1 的介质基体中。由混合定律(mixing law)可知,对于具有周期结构的混合介质,可以将问题简化为对一个单元结构的研究,如图1所示^[3]。

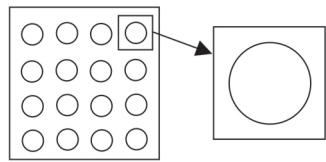


图1 等效单元结构

假设立方体单元的边长为 L ,内嵌的颗粒球半径为 r 。由此,建立平板电容器模型。即电容器的极板面积 $S=L^2$,极板间距离为 L 。在极板间取一小段 dz ,如图2所示,其中 r' 为

$$r' = \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2} - z\right)^2} \quad (1)$$

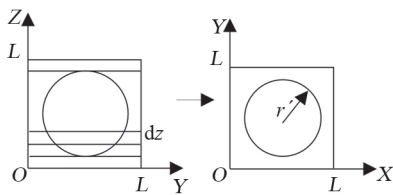


图2 微电容模型

截下的这一小段可以认为是极板面积为 L^2 ,极板间距为 dz ,中间填充了介电常数为 ϵ_1 的圆柱型介质,其余部分的介电常数为 ϵ_2 的微电容,其电容为

$$dC = \frac{\epsilon_1 \left[L^2 - \pi r'^2 \right] + \epsilon_2 \pi}{dz} = \frac{\epsilon_1 L^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \pi \left[r^2 - \left(\frac{L}{2} - z \right)^2 \right]}{dz} \quad (2)$$

则中间包含颗粒球部分的电容为

$$C_1 = \frac{1}{\int_{\frac{L}{2}-r}^{\frac{L}{2}+r} \frac{1}{\epsilon_1 L^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \pi \left[r^2 - \left(\frac{L}{2} - z \right)^2 \right]} dz} \quad (3)$$

两端不包含颗粒球的部分可以认为是填充了均匀介质的电容器,其电容为

$$C_2 = \frac{\epsilon_1 L^2}{\frac{L}{2} - r} \quad (4)$$

根据电容的串联关系,整个电容器的电容为

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1}} = \frac{1}{\frac{2\left(\frac{L}{2}-r\right)}{\epsilon_1 L^2} + \int_{\frac{L}{2}-r}^{\frac{L}{2}+r} \frac{1}{\epsilon_1 L^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \pi \left[r^2 - \left(\frac{L}{2} - z \right)^2 \right]} dz} \quad (5)$$

2 有效介电常数的计算

介电常数是材料的固有属性,当材料作为电容器的填充介质时,介电常数直接影响了电容器的电容值^[4]。要将复合材料等效为一种均匀的介质材料,认为当将复合材料和等效均匀材料同时作为电容器的填充介质时,得到的电容值是一样的。根据上面的分析,只需将图1中的一个单元作为研究对象。假设其等效的均匀介质的介电常数为 ϵ_e ,将其填充到平板电容器中,其电容为

$$C_e = \frac{\epsilon_e L^2}{L} = \epsilon_e L \quad (6)$$

由 $C_e=C$,得其有效介电常数的计算公式为

$$\epsilon_e = \frac{1}{\frac{L-2r}{\epsilon_1 L} + L \int_{\frac{L}{2}-r}^{\frac{L}{2}+r} \frac{1}{\epsilon_1 L^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \pi \left[r^2 - \left(\frac{L}{2} - z \right)^2 \right]} dz} \quad (7)$$

设基体介质的介电常数为 $10\epsilon_0$,颗粒介电常数为 $6\epsilon_0$, ϵ_0 为自由空间的介电常数。则由MG模型、EMA模型及文中模型计算的有效相对介电常数随体积分数的变化如图3,其中体积分数 $q = \frac{4\pi r^3}{3L^3}$ 。

取颗粒的相对介电常数 $\epsilon_r=3.15$,基体的介电常数为 ϵ_0 ,则3种方法的计算结果与实验数据^[5]的比较如图4。

从图3及图4可以看出,这种等效电容模型与MG模型、EMA模型以及实验数据都吻合得很好,说明通过计算复合材料的等效电容,进而求得其有效介电常数的方法是可行的,并且在高占空比时

候,这种方法的计算结果与实验值更加接近。

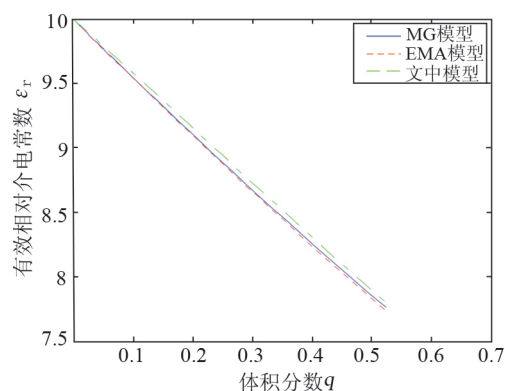


图3 等效电容法与典型方法的对比

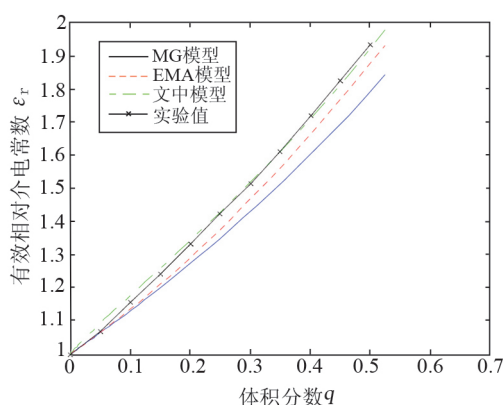


图4 三种方法与实验数据的比较

3 结论与展望

提出了一种计算复合材料等效电容,进而导出有效介电常数的模型。这种模型基于电容的串并联原理以及积分原理,物理概念清晰,是一种较为

精确的计算方法。应用这种模型,通过等效电感和等效电阻的方法,还可以进一步求解复合材料的有效磁导率以及电导率。

实际的颗粒弥散型复合材料,其颗粒大小不能完全一样,颗粒的形状也不会是标准的球形,并且颗粒中心不一定和立方体单元的中心重合。为了得到更符合实际的计算结果,可以借助蒙特卡罗方法,同样先计算一个单元的电容,再利用电容串并联原理及电容等效,通过大量模拟,求解整块复合材料的有效介电常数。另外,对于那些颗粒表面包裹薄膜的复合材料,这种积分的方法可以很方便地完成计算。而一些有限元等数值方法,如果要计算薄膜,则需要进一步细分单元,这样运算量会大得惊人,难以实现。

文中是在恒定电场下求解颗粒弥散型复合材料的有效介电常数,对于有效介电常数在不同频率下的响应情况,需要进一步研究。

参考文献

- [1] Maxwell-Garnett J C. Colours in metal glasses and in metal films[J]. Trans Roy Soc Lond, 1904,203:385-420.
- [2] 孙大明,孙兆奇.金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用[M].北京:科学出版社,2004:121-133.
- [3] 梁成升.平行板类电容器电容的计算[J].物理与工程,2009,19(1):58-60.
- [4] 谢处方,饶克谨.电磁场与电磁波[M].4版.北京:高等教育出版社,2006:95-100.
- [5] Riuri M E, Sihvola A H, et al. The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies[J]. IEEE J Ocean Eng, 1984,9(5):377-382.

(上接第35页)

的回波随着正离焦量的增大先汇聚,功率密度达到峰值以后才开始发散。同一猫眼系统,位于不同的探测距离上,或者不同的猫眼目标位于同一探测距离上时,回波光斑功率密度的峰值对应的准直系统透镜间距不同;通过改变准直系统透镜间距控制探测光束参数可增强猫眼回波强度。

参考文献

- [1] 孙晓泉,吕跃广.激光对抗原理与技术[M].北京:解

放军出版社,2000:116-117.

- [2] 赵延伸,孙华燕,宋丰华,等.离焦量对“猫眼效应”反射特性的影响[J].激光技术,2008,32(1):71-74.
- [3] 卞学丽.“猫眼”系统中离焦量的变化对回波功率的影响[J].中国测试技术,2007,33(2):84-86.
- [4] 张博,牛燕雄,张雏,等.“猫眼”目标回波功率的影响因素分析[J].红外与激光工程,2009,38(3):420-423.
- [5] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等.激光原理[M].5版.北京:国防工业出版社,2007.