

# 复合吸波材料等效电磁参数计算的研究进展

高正娟<sup>1</sup> 曹茂盛<sup>2</sup> 朱静<sup>3</sup>

(1 上海大学化学系,上海 200436)

(2 北京理工大学材料学院,北京 100078)

(3 清华大学材料科学与工程系,北京 100084)

**文摘** 介绍了复合材料等效电磁参数计算的 Maxwell-Garnett 公式、Bruggeman 公式等经典理论,着重介绍了实现 Maxwell-Garnett 公式的 T-矩阵法思想,并对国内外关于复合吸波材料等效电磁参数计算的研究现状作了总结和评价。

**关键词** 复合吸波材料,等效电磁参数,T-矩阵法

## Development in Study of Effective Electromagnetic Parameters of Absorbing Composite

Cao Zhengjuan<sup>1</sup> Cao Maosheng<sup>2</sup> Zhu Jing<sup>3</sup>

(1 Department of Chemistry, Shanghai Univ., Shanghai 200436)

(2 College of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100078)

(3 Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua Univ., Beijing 100084)

**Abstract** This paper introduces some classical theories, such as Maxwell-Garnett formula, Bruggeman formula, etc., and emphatically introduces T-matrix method of Maxwell-Garnett formula to be completed. Moreover, the present research on effective electromagnetic (EM) parameters of absorbing materials at home and abroad is summarised and reviewed.

**Key words** Absorbing composite, Effective EM parameter, T-matrix method

### 1 前言

复合材料电磁性能,特别是复合吸波材料的电磁性能的研究一直是工业生产和国防建设的重点。西方发达国家最初为实现军事领先的目的,先后投入巨资在吸波材料领域里进行了广泛的研究<sup>[1~3]</sup>。随着电信业的飞速发展,吸波材料的应用已突破了军事隐形范畴,深入到通讯抗干扰、电子信息保密、环保及人体防护等诸多领域。材料设计的不断发展要求准确快速地设计出预期的材料,从而减少投资和试验的盲目性。研究吸波材料的电磁性能主要就是从复介电常数 $\epsilon$ 和复磁导率 $\mu$ 出发计算出材料的等效电磁参数,从而预测其电磁性能。

计算复合材料的等效电磁参数一直是光、电、磁等领域重要且难以解决的问题之一。对理想复合材

料等效电磁参数的计算,有 Maxwell-Garnett (即 Lorenz-Lorentz 或 Clausius-Mossotti 方程)<sup>[4]</sup>、Bruggeman<sup>[5]</sup>、QCA-CPA<sup>[6]</sup> (准晶近似-相干势近似)等经典公式。它们一般规定体系内颗粒为球状且随机无序分布、相互作用可忽略等。同时在经典公式的基础上形成了如 T-矩阵法<sup>[4,5]</sup>、二阶微扰法<sup>[7]</sup>等算法来研究结构较为复杂的材料。本文主要介绍等效电磁参数的经典计算公式,并对国内外针对不同特点的复合吸波材料等效电磁参数设计研究的现状予以总结。

### 2 等效电磁参数计算的经典理论

利用各组分的本征电磁参数来计算复合材料的等效电磁参数,这种思想被称为有效媒质理论(即 Effective Medium Theory)<sup>[5]</sup>。它是一种自洽的平均场理论,基本思想是:对某二组分复合材料,假

收稿日期:2003-06-02;修回日期:2004-02-06

高正娟,1979年出生,硕士,主要从事吸波材料的设计和制备工作

定组分一(填料)和组分二(基体)对材料的贡献等效,无论填料颗粒(  $\epsilon_i, \mu_i$  )还是基体颗粒(  $\epsilon_m, \mu_m$  ),都认为悬浮在有效背景媒质(  $\epsilon_{\text{eff}}, \mu_{\text{eff}}$  )基底上,则等效电磁参数可由各组分的电磁参数及相应的体积比算出。

球形颗粒复合体系的等效电磁参数,根据其体积分数选用 Maxwell-Garnett 公式、Bruggeman 公式或 QCA-CPA 公式来计算<sup>[8~10]</sup>。将这几个公式用一个简单的方程统一表示为:

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_h}{\epsilon_{\text{eff}} + 2\epsilon_h} = f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_h}{\epsilon_i + 2\epsilon_h} + f_m \frac{\epsilon_m - \epsilon_h}{\epsilon_m + 2\epsilon_h} \quad (1)$$

式中,  $f_i, f_m$  分别为填料和基体的体积分数;  $\epsilon_i, \epsilon_m$  表示介电常数;  $\epsilon_h$  为一引入参量,其值不同,公式形式不同。

当  $\epsilon_h = \epsilon_{\text{eff}}$  时,为 Bruggeman 公式。对二组分材料,  $f_m = 1 - f_i$ , 公式为:

$$f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_i + 2\epsilon_{\text{eff}}} + (1 - f_i) \frac{\epsilon_m - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_m + 2\epsilon_{\text{eff}}} = 0 \quad (2)$$

该公式适用于吸收剂含量较高的吸波材料,它可成功预测铁氧体吸波材料的等效电磁参数<sup>[6~8]</sup>。

$\epsilon_h = \epsilon_m$  时,为 Maxwell-Garnett 公式,表示为:

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_m}{\epsilon_{\text{eff}} + 2\epsilon_m} = f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m} \quad (3)$$

该公式常用来预测吸收剂含量较低的吸波材料。它有三个严格的限制条件:1) 体积分数  $f_i$  需满足  $f_i \ll \epsilon_i / (\epsilon_i + 2\epsilon_m) / (\epsilon_i - \epsilon_m)$ , 即忽略了吸收剂之间的相互作用;2) 吸收剂尺寸与电磁波长相当;3) 仅适用球形颗粒。

Maxwell-Garnett 公式也可以用 T-矩阵法计算材料中颗粒的极化因子,从而根据颗粒在电场中响应的性质求出  $\epsilon_{\text{eff}}$ <sup>[4]</sup>。对均匀电场中的单个球形电介质研究,如图 1 所示。

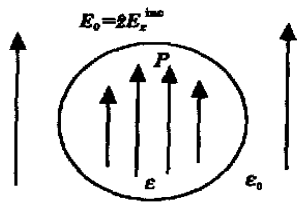


图 1 均匀电场中的球形电介质

Fig. 1 Spherical dielectric in even electric field

球体内的极化强度值为:

宇航材料工艺 2004 年 第 4 期

$$P = (\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_0) E = 3 \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) / (\epsilon_r + 2) E_0 \quad (4)$$

若颗粒的入射场和散射场相同,  $P_z = P_z / V_c$ , 其中  $V_c$  表示颗粒所在区域的体积,  $V_c = a^3$ ,  $a$  为颗粒半径。均匀入射电场值为  $E_0 = \epsilon_0 E_z^{\text{inc}}$ , 则可求得:

$$\epsilon_{r,\text{eff}} = 1 + 3(\epsilon_r / 3 - \epsilon_0 V_c E_z^{\text{inc}}) / (1 - \epsilon_r / 3 - \epsilon_0 V_c E_z^{\text{inc}}) \quad (5)$$

若忽略颗粒间的相互作用,图中单个球体的感应电场极化因子为:

$$P_{z,\text{isolated}} = 4 \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) / (\epsilon_r + 2) a^3 E_z^i \quad (6)$$

这里  $\epsilon_r$  为相对介电常数。则得单组分材料的等效介电常数:

$$\epsilon_{r,\text{eff}} = 1 + 3f \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} / \left( 1 - f \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \quad (7)$$

由此可见单组分材料结构对电磁参数的影响。对二组分体系,则得到形如 Maxwell-Garnett 的公式如下:

$$\epsilon_{r,\text{eff}} = 1 + 3f \frac{\epsilon_r - \epsilon_m}{\epsilon_r + 2\epsilon_m} / \left( 1 - f \frac{\epsilon_r - \epsilon_m}{\epsilon_r + 2\epsilon_m} \right) \quad (8)$$

此外,T-矩阵法还可以准确地解释椭球体系等复合材料等效电磁参数的计算<sup>[9]</sup>。

### 3 国内外研究现状

最早, Rayleigh 对完美简单立方点阵材料体系复合材料的电导率给出了比较精确的解<sup>[4]</sup>。后来 McPhedran 和 McKenzie 两人对他的算法进行修正,可以计算出体心立方、面心立方等其他点阵结构复合材料的等效电磁参数<sup>[4]</sup>。经典的 Maxwell-Garnett 公式、Bruggeman 公式、QCA-CPA 等可以初步预测复合材料的等效电磁参数,然而不同材料或者不同结构的复合材料其电磁性能的预测在同一经典公式的基础上往往要做不同的修正。对于不同的材料体系,国内外研究人员针对性地形成了不同的思想。

#### 3.1 国内研究现状

国内主要针对目前应用较广泛的羰基铁粉、铁氧体、多晶铁纤维等展开了研究,其中对羰基铁粉的实验和理论研究较为成熟<sup>[11~21]</sup>。电子科技大学刘述章等<sup>[11~14]</sup>主要研究了椭球状金属粒子的混合随机媒质的等效电磁参数,在一定程度上解决了含有金属粒子等强散射场混合随机媒质问题,理论计算值与实际测量数据吻合较好。主要在考虑了偶极子间的弱相互作用后,将广义多重散射公式推广到含

有  $N$  种不同粒子的混合随机媒质的情况,得到了较为适用的广义多重散射公式。他给出了  $N$  种随机分布的椭球粒子的混合随机媒质的等效介电常数的公式为:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\frac{1}{3} \sum_{j=1}^N f_j(\epsilon_j - \epsilon_h) / [\epsilon_h + L_{ji}(\epsilon_j - \epsilon_h)]}{1 - \frac{1}{3} \sum_{j=1}^N f_j(\epsilon_j - \epsilon_h) L_{ji} / [\epsilon_h + L_{ji}(\epsilon_j - \epsilon_h)]} \quad (9)$$

式中,  $L_{ji}$  为第  $i$  种粒子的去极化因子。磁导率的计算公式和上式相同。金属粒子的形状非常强烈地影响复合随机媒质的电磁特性,可根据该粒子的性质和形状选择  $\epsilon_h$  的表现形式,从而计算出接近真实材料的等效电磁参数。文献[13]中图6给出了羰基铁类随机混合媒质的等效介电常数计算值和实验值的情况,可见羰基铁粉体积分数较低时可以进行计算预测且较为准确。南京大学王相元等<sup>[15]</sup>给出了羰基铁粉类复合材料等效电磁参数计算的体积经验公式,其计算结果和实验值也符合较好。

华中理工大学吴明忠等人<sup>[6,16]</sup>研究了层状多晶铁纤维吸波材料等效电磁参数的计算。提出层状多晶铁纤维的电磁参数有别于羰基铁粉和铁氧体,有明显的形状各向异性,其轴向磁导率大于径向磁导率,轴向介电常数大于径向介电常数。他们从麦克斯韦方程出发,考虑了多晶铁纤维电磁参数的各向异性及多晶铁纤维之间强相互作用,建立了层状多晶铁纤维吸波材料等效电磁参数理论模型,导出了等效电磁参数的计算公式,并讨论了长径对电磁参数的影响,提出应优选亚微米级铁纤维,并提出电导率对轴向影响较大。此外还进行实验验证说明了 Bruggeman 公式和 QCA-CP 可以很好地预测铁氧体吸波材料的等效电磁参数。

此外,高雷等人<sup>[17~20]</sup>对非线性复合介质的光学效应作了比较深入地研究,不仅针对线性/非线性、非线性/非线性两种情况,而且考虑了温度、形状变化及分布规律等对复合材料光学性能的影响,这对复合介质电磁响应的研究有着重要的借鉴意义。

### 3.2 国外研究现状

美、德、日、俄罗斯、以色列等国家在吸波材料方面作了很多研究,但由于吸波课题与国防息息相关,国外公开的文献讨论较少。研究主要在 Maxwell-Garnett、Bruggeman、有效媒质近似等经典公式上展

开,对单纯体系的介电常数、电导率、磁导率等参数计算的报道较多<sup>[4,5,7~10,22~31]</sup>。

美国 Akhlesh Lakhtakia 等人根据强扰动理论推出了一个公式来研究各向同性非线性复合体系介电常数的计算<sup>[7,8,22]</sup>。包括对一种线性介质和一种非线性介质组成的两相体系,主要研究非线性介质对体系性能的影响,并对该公式和 Bruggeman 公式的计算进行比较,指出强扰动理论推导出的公式可以预测散射损失引起的衰减,但较少体现出非线性因素的作用。同时指出,如果体系中掺杂更多的非线性影响因素,需对该公式进一步修正,添加非线性影响的作用项。他们对于非线性介质对电磁性能的影响研究比较透彻,对实际材料的设计很有效。

加拿大 Petr Chylek 等人和美国合作研究比较了 Maxwell-Garnett、Bruggeman、扩展有效媒质近似 (EEMA) 计算颗粒复合吸波散射效率、吸收效率的准确性,指出 EEMA 在吸波颗粒尺寸接近波长时,计算最准确,但随着颗粒的增大,计算结果偏差也会增大<sup>[10,23]</sup>。此外,Keith W. Whites 等及 Ludmila Kolokolova 等也对颗粒体系的等效电磁参数计算作了相应的研究<sup>[24,25]</sup>。

乌克兰 A. V. Goncharenko 研究小组对三种颗粒形状分布体系的等效介电常数进行了研究,指出颗粒团聚对等效电磁参数计算的影响;并且对颗粒复合体系中较小颗粒的非球形形态对线性和非线性光学性能的影响作了研究,重在指出其影响作用在介电常数比较小时影响反而比较大<sup>[26,27]</sup>。芬兰 Ari H. Sihvola 等人提出了一个新的经验混合公式,得到的结果符合实验,并指出若复合体系中颗粒含量较少即相互作用可忽略时,该公式接近 Maxwell-Garnett 模型。若体系中颗粒含量较多时,传统意义上可用 Bruggeman 公式来计算,若团聚成簇,则不适用<sup>[28~30]</sup>。

## 4 结语

理论上计算并预测材料的性能参数是材料设计发展的必然趋势。复合材料电、磁、光等性能参数的计算,主要在综合考虑各类材料结构特点的前提下围绕 Rayleigh 解、Maxwell-Garnett 公式、Bruggeman 公式等经典计算公式展开。

复合吸波材料  $\epsilon_{\text{eff}}$  和  $\mu_{\text{eff}}$  直接体现了吸波性能的优劣。国内对于吸收剂单一的涂层类吸波材料特别是羰基铁粉类混合材料的等效电磁参数研究比较

成熟,但对同时添加两种吸收剂的吸波材料,由于其电磁参数并非各组分电磁参数的简单叠加,计算较为困难,目前主要还是以实验研究为主。由于吸波材料在军事上的应用仍占主导地位,目前对吸波材料实验和理论研究的报道都比较保守,尤其是 $\epsilon_{\text{eff}}$ 和 $\mu_{\text{eff}}$ 计算的报道多限于理想的体系。因此,复合介质光学响应的研究对吸波材料的电磁性能研究有着重要的借鉴意义。

### 参考文献

- 1 吴明忠,赵振声,何华辉. 隐身与反隐身技术的现状和发展. 上海航天, 1996;(3):36~42
- 2 Stonier R A. Stealth aircraft & technology from world war to the Gulf Part . SAMPE Journal, 1991; 27(4): 9~17
- 3 Stonier R A. Stealth aircraft & technology from world war to the Gulf Part . SAMPE Journal, 1991; 27(5): 9~18
- 4 Weng Cho Chew, Friedrich J A, Robert Geiger. A multiple scattering solution for the effective permittivity of a sphere mixture. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1990; 28(2):207~214
- 5 Gordano Stefano. Effective medium theory for dispersions of dielectric ellipsoids. Journal of Electrostatics, 2003;58: 59~76
- 6 Wu M Z,Zhang H J ,Yao X et al. Microwave characterization of ferrite particles. J. Phys. D:Appl. Phys. ,2001;34:889~895
- 7 Lakhtakiab A. Application of strong permittivity fluctuation theory for isotropic, cubically nonlinear composite mediums. Optics Communications,2001;192:145~151
- 8 Mackaya T G,Lakhtakiab A , Weiglhofer W S. Homogenization of isotropic, cubically nonlinear, composite mediums by the strong permittivity fluctuation theory: third-order considerations. Optics Communications,2002;204:219~228
- 9 Adrian Doicu, Thomas Wriedt. T - matrix method for electromagnetic scattering from scatters with complex structure. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2001; 70: 663~673
- 10 Chylek P, Videen G. Scattering by a composite sphere and effective medium approximations. Optics Communications, 1998;146:15~20
- 11 贾宝富,刘述章,林为干. 颗粒媒质等效电磁参数的研究. 电子科学学刊, 1990;(9): 503~512
- 12 邱才明,刘述章,林为干. 含强散射体的随机混合媒质的等效电磁参数. 电子学报,1993;21(6):6~13
- 13 刘述章,邱才明,林为干. 羰基铁类随机混合吸波材料等效电磁参数的计算. 电子学报,1994; 22(9):104~108
- 14 刘述章,邱才明. 含涂层椭球粒子随机混合媒质的等效电磁参数的计算. 应用科学学报, 1996; 14(1):67~73
- 15 王相元,盛玉宝,钱鉴等. 吸波材料电磁参量与吸收剂百分体积关系. 南京大学学报, 1992;(10): 554~557

- 16 吴明忠,赵振声,何华辉. 层状多晶纤维吸波材料的等效电磁参数. 磁性材料及器件,1997;29(1):31~38
- 17 Gao L, Li Z Y. Temperature dependence of nonlinear optical response in metal/ dielectrics composite media. Solid State Communications, 1998; 107(12):751~755
- 18 Gao L, Wan Jones T K, Yu K W et al. Effective nonlinear optical properties of metal-dielectric composites of spheroidal particles. J. Phys. : Condens. Matter ,2000;12:6 825~6 836
- 19 Gao L, Gu J Z. Effective dielectric constant of a two-component material with shape distribution. J. Phys. D: Appl. Phys. ,2002; 35:267~271
- 20 Gao L, Gu L P, Huang Y Y. Effective medium approximation for optical bistability in nonlinear metal-dielectric composites. Solid State Communications,2004;129:593~598
- 21 郭琳,张明,洪伟,章文勋. FF/ FB 媒质等效电磁参数的数值计算. 电波科学学报, 1996;16(1):1~5
- 22 Lakhtakiab A, Slepyan G Y, Maksimenko S A. Effective medium theory of the microwave and the infrared properties of composites with carbon nanotube inclusions. Carbon, 1998; 36(12): 1 833~1 839
- 23 Videen G, Chylek P. Scattering by a composite sphere with an absorbing inclusion and effective medium approximations. Optics Communications,1998;158:1~6
- 24 Whites K W, Wu F. Effects of particle shape on the effective permittivity of composite materials with measurements for lattices of cubes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002; 50(7):1 723~1 729
- 25 Kolokolova L, Gustafson Bo A S. Scattering by inhomogeneous particles: microwave analog experiments and comparison to effective medium theories. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,2001;70:611~625
- 26 Goncharenko I A V, Lozovski V Z, Venger E F. Effective dielectric response of a shape-distributed particle system. J. Phys. : Condens. Matter, 2001;13:8 217~8 234
- 27 Goncharenko I A V, Popelnukh V V, Venger E F. Effective of weak non sphericity on linear and nonlinear optical properties of small particle composites. J. Phys. : Appl. Phys. ,2002;35: 1 833~1 838
- 28 Sihvola A, Alanen E. Studies of mixing formulae in the complex plane. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1991;29(4):679~687
- 29 Sihvola A, Kong J A. Effective permittivity of dielectric mixtures. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing,1998;26:420~429
- 30 Sihvola A. Electromagnetic mixing formulas and applications. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999:56~62
- 31 Chiang H P, Leung P T, Tse W S. Optical properties of composite materials at high temperatures. Solid State Communications, 1997;101(1): 45~50