

高浓度纤维增强材料介电特性计算方法

廖意 蔡昆 张元 王晓冰

An approach to characterize dielectric properties of fiber-reinforced composites with high volume fraction

Liao Yi Cai Kun Zhang Yuan Wang Xiao-Bing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024102 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

左手介质对谐振腔谐振频率的影响

[Influence of left-handed material on the resonant frequency of resonant cavity](#)

物理学报.2015, 64(12): 124103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124103>

高增益相对论速调管放大器相位特性的模拟与实验研究

[Simulation and experimental study of phase characteristics in high-gain relativistic klystron amplifier](#)

物理学报.2015, 64(8): 084102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084102>

介质涂覆位置对双S弯排气系统电磁散射特性影响研究

[Electromagnetic scattering characteristics of double S-shape exhaust nozzle with different coating medium parts](#)

物理学报.2015, 64(2): 024103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024103>

开孔矩形腔体电磁泄漏特性的解析研究

[Analytical formulation for electromagnetic leakage from an apertured rectangular cavity](#)

物理学报.2014, 63(21): 214103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214103>

含泡沫面元模型的海面电磁散射研究

[Research on the facet model of electromagnetic scatterings from rough sea surface with foams](#)

物理学报.2014, 63(21): 214104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214104>

高浓度纤维增强材料介电特性计算方法^{*}廖意[†] 蔡昆 张元 王晓冰

(上海无线电设备研究所, 上海市航空航天器电磁环境效应重点实验室, 上海 200090)

(2015年5月10日收到; 2015年9月18日收到修改稿)

针对复合材料的微观结构非均匀和各向异性特点带来的数值方法计算慢、内存消耗大的问题, 利用均匀化方法计算纤维增强复合材料的等效电磁参数. 采用了纤维低体积添加比至高体积添加比的迭代方法, 同时提出了一个描述材料微观结构的修正的特征长度, 将现有的均匀化方法推广至非准静态(微波频段)条件下高纤维浓度情况. 提出的修正的均匀化模型可直接用于反射系数、屏蔽效能等计算, 其屏蔽效能与实际微观结构复合材料的数值仿真结果进行了对比, 验证了提出的等效电磁参数计算公式的有效性和频率适用范围.

关键词: 等效介电常数, 均匀化, 屏蔽效能, 纤维增强复合材料

PACS: 41.20.-q, 77.22.Ch, 77.84.Lf

DOI: 10.7498/aps.65.024102

1 引言

纤维增强复合材料因其高强度、耐腐蚀、抗疲劳等优异性能而被广泛应用于现代航空和航天等工业领域. 以碳纤维/碳纳米管材料等作为增强体的复合材料具有较高的电导率, 经常替代贵重的金属材料, 用于飞机、卫星等结构体的电磁屏蔽性能^[1,2]. 现有的数值计算软件一般能够精确地计算复合材料的电磁特性如反射系数、透射系数等. 然而, 纤维增强复合材料具有复杂的微观几何构型, 且表现出非均匀各向异性特点^[3], 在数值计算过程中需要考虑内部精细结构的网格剖分, 往往产生巨大的未知数, 求解过程漫长甚至无法求解^[4].

为了有效解决纤维增强复合介质电磁特性的求解难题, 均匀化方法(homogenization methods)引起广泛的关注, 通过采用宏观的等效电磁参数来描述复合材料. 最为经典的等效电磁参数计算公式有Maxwell-Garnell (MG) 公式和Bruggeman公式^[5,6], 它们一般适用于准静态情况, 要求计算的复合材料内部掺杂物的尺寸远远小于波长. 此外, 基

于强扰动理论的等效电磁参数计算方法也被提出, 虽然避免了数值电磁计算的复杂性, 但是仅适用于长波长近似条件^[7]. 采用数值反演的计算方法虽然能给出精确的宽频带的等效电磁参数, 但是仍然依赖数值计算结果^[8]. 近期, Preault 等基于掺杂物问题(inclusion problem)的等效电磁参数研究, 通过引入描述纤维结构的特征长度, 进行了纤维在截面上呈正方形排列时复合材料等效电磁参数的计算, 将准静态下均匀化方法推广至微波频段, 但是其建立的理论公式只适用于体积添加比低于20%的材料^[9].

本文重点研究长纤维增强的两相复合材料, 将均匀化方法应用于高体积添加比的复合材料. 首先在不考虑纤维间相互作用情况下, 利用基于MG公式的迭代方法, 计算得到了高浓度纤维复合材料的等效介电常数, 进而估算材料内电磁波传播波长; 然后, 考虑纤维间的互耦效应, 提出了一个与体积分数有关的经验的特征长度, 从而给出了修正的均匀化模型; 最后, 利用传输线理论将均匀化模型用于复合材料的屏蔽效能计算, 其结果与实际纤维增强复合材料的数值仿真的精确解进行了对比, 表明

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61302036)、上海市优秀学科带头人计划(B类)(批准号: 14XD1423100)和上海市自然科学基金(批准号: 14ZR1439400)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lycle21@buaa.edu.cn

提出的等效电磁参数计算公式不仅适用于非准静态(微波频段),而且能应用于任意纤维浓度的情况.

2 均匀化模型与屏蔽效能

均匀化方法是通过定义一个相同尺寸的统一介质来代替非均匀的复合材料,宏观上均匀介质电磁特性与复合材料的特性相同. 本文重点讨论长导电纤维置于介质基体内的两相材料,纤维在截面上呈正方形排列,如图1所示. 基体材料(如环氧树脂)的介电常数、电导率和磁导率分别为 ε_1 , σ_1 和 μ_1 ,纤维材料的参数分别为 ε_2 , σ_2 和 μ_2 ,两组分材料都是均匀且各向同性. 这里只考虑介电材料情况,即 $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ (μ_0 为空气的磁导率).

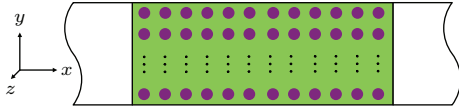


图1 纤维增强复合材料二维截面

Fig. 1. 2D square microstructure of fiber reinforced composite.

2.1 等效介电常数计算

掺杂物问题的均匀化方法是利用准静态近似,假设混合材料中的每一组分在宏观上是均匀的且置于无限大介质中,无限大均匀介质的介电常数为 ε_∞ . 对于两相复合材料而言,在方向 u 的等效介电常数可以表示为^[9]

$$\varepsilon_u = \left[\varepsilon_1 \frac{f_1}{\varepsilon_\infty + N_u(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)} + \varepsilon_2 \frac{f_2}{\varepsilon_\infty + N_u(\varepsilon_2 - \varepsilon_\infty)} \right] \times \left[\frac{f_1}{\varepsilon_\infty + N_u(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)} + \frac{f_2}{\varepsilon_\infty + N_u(\varepsilon_2 - \varepsilon_\infty)} \right]^{-1}, \quad (1)$$

其中, f_1 和 f_2 分别为基体和纤维材料的体积分, N_u 是退极化因子张量 $\mathbf{N}$ 在 u 方向上的投影,可表示为

$$N_u = \frac{a_x a_y a_z}{2} \int_0^\infty \left[(a_u^2 + s) \times \sqrt{(a_x^2 + s)(a_y^2 + s)(a_z^2 + s)} \right]^{-1} ds, \quad (2)$$

其中, a_u 是椭球面半轴; u 在直接坐标中取 x , y 和 z 方向.

图1中长纤维按 z 方向平行排列,利用(2)式可以得到直角坐标系下退极化因子张量 $\mathbf{N}$,

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

分别将(3)式中各个方向上的退极化因子代入(1)式,可以得到纤维径向和轴向的等效介电常数 $\varepsilon_\perp$ 和 $\varepsilon_\parallel$:

$$\varepsilon_\perp = \frac{\varepsilon_1 \frac{f_1}{\varepsilon_\infty + \varepsilon_1} + \varepsilon_2 \frac{f_2}{\varepsilon_\infty + \varepsilon_2}}{\frac{f_1}{\varepsilon_\infty + \varepsilon_1} + \frac{f_2}{\varepsilon_\infty + \varepsilon_2}}, \quad (4a)$$

$$\varepsilon_\parallel = f_1 \varepsilon_1 + f_2 \varepsilon_2. \quad (4b)$$

当 ε_∞ 选取不同的值时,利用(4a)式可以推导得出一些经典的等效电磁参数计算公式. 如 $\varepsilon_\infty = \varepsilon_1$ 时,(4a)式变为MG公式:

$$\varepsilon_\perp = \varepsilon_1 + 2f_2 \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - f_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}. \quad (5)$$

当 $\varepsilon_\infty = \varepsilon_\perp$ 时,(4a)式则变为Bruggeman公式.

这些经典公式在低频范围内具有较好的精度,随着频率升高,精度逐渐降低. 文献[9]通过引入描述纤维的特征长度 γ ,给出了 ε_∞ 的一个经验公式为

$$\varepsilon_\infty = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \left(\frac{\gamma}{\lambda} \right)^2, \quad (6)$$

式中, λ 是电磁波在等效均匀介质中的波长. 当纤维在基体材料中成正方形排列时, γ 取值为纤维直径 d .

将(6)式代入(4a)式,得到动态均匀化模型(dynamic homogenization model, DHM),该模型能适用于更高的频率范围如微波频段. 但是, DHM仍然只适用于低体积分数情况(f_2 小于 20%)^[9].

2.2 修正的均匀化模型

在提出的基于掺杂物问题的动态均匀化模型中,对 λ 的估算是利用(5)式得到的等效相对介电常数计算得出. 但是,在高体积添加比情况下,直接使用MG公式会带来较大误差. 本文采用一种基于MG公式的迭代方法,在不考虑纤维间的相互作用情况下,从低体积添加比复合材料逐渐迭代至高体积添加比,从而得到估计的相对介电常数,再用于 λ 的计算,对原有的传播波长进行了修正.

图2为提出的迭代方法的示意图, 首先考虑体积为1的基体材料(介电常数为 ε_1), 然后往基体材料中加入体积为 δv 的纤维材料, 并采用MG公式计算等效介电常数 $\varepsilon_{\text{eff}1}$, 再以体积为 $1 + \delta v$ 的混合介质作为基体材料(介电常数为 $\varepsilon_{\text{eff}1}$), 加入体积为 δv 的纤维材料, 仍然用MG公式求解新的介电常数 $\varepsilon_{\text{eff}2}$, 体积增量 δv 足够小以保证满足低体积添加比要求. 如此反复迭代, 直至纤维体积分数最终满足

实际取值. 最后得到的等效介电常数为 ε_{ite} , 用于计算高体积添加比复合材料中的电磁波传播波长 λ_{ite} ,

$$\lambda_{\text{ite}} = \frac{c}{f \sqrt{\text{Re}(\varepsilon_{\text{ite}})/\varepsilon_0}}, \quad (7)$$

式中, c 为真空中电磁波传播速度, f 为电磁波的频率, ε_0 为空气的介电常数.

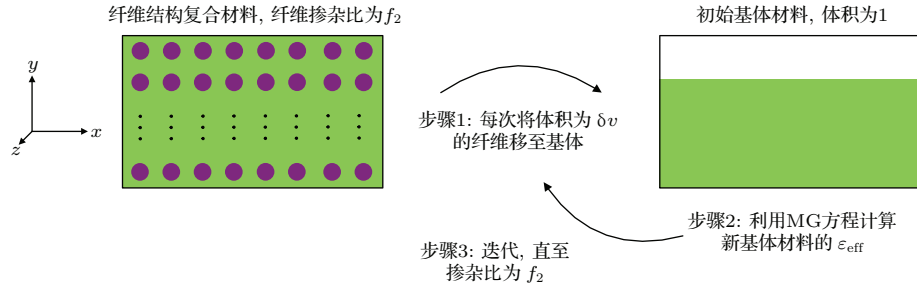


图2 迭代方法示意图

Fig. 2. The schematic diagram of iterative technique.

提出的迭代方法中未考虑纤维间的相互作用, 实际上, 随着体积分数的提高, 高导电的纤维间互耦效应增强. 图3所示为电磁波垂直入射情况下材料内部主要的电流路径示意图^[10]. 其中一条为在纤维内部形成的环路电流, 另一条为纤维间通过互容建立的流电路径, 以相隔最近的纤维间流动为主. 随着纤维浓度的提高, 纤维间的互容增大, 导致每一根纤维会与附近多个纤维形成复杂的电流流电路径.

数 f_2 的经验公式, 用来修正(6)式中的特征长度

$$\gamma = \left(1 - \frac{f_2}{2}\right)d. \quad (8)$$

因此, 结合迭代方法和修正的特征长度, 无限大介质的介电常数表示为

$$\varepsilon_{\infty} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \left(\frac{(1 - f_2/2)d}{\lambda_{\text{ite}}} \right)^2. \quad (9)$$

最终得到的径向等效介电常数为

$$\varepsilon_{\perp} = \left[\varepsilon_1 \frac{f_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \left(\frac{(1 - f_2/2)d}{\lambda_{\text{ite}}} \right)^2} + \varepsilon_2 \frac{f_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \left(\frac{(1 - f_2/2)d}{\lambda_{\text{ite}}} \right)^2} \right] \times \left[\frac{f_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \left(\frac{(1 - f_2/2)d}{\lambda_{\text{ite}}} \right)^2} + \frac{f_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \left(\frac{(1 - f_2/2)d}{\lambda_{\text{ite}}} \right)^2} \right]^{-1}. \quad (10)$$

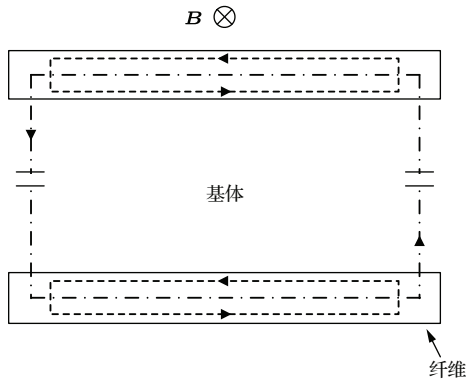


图3 外部场照射下纤维增强复合材料内部主要的电流环路

Fig. 3. The main paths of currents in the fiber reinforced composites under wave illumination.

本文通过对不同频率下大量高体积添加比复合材料进行仿真实验, 得到了一个考虑纤维体积分

2.3 均匀介质材料的屏蔽效能

当平面波照射无限大均匀介质时, 入射电磁波一部分被反射回来, 一部分在介质材料里被吸收, 还有一部分透射通过均匀介质, 屏蔽效能 S_E 定义为透射波电场 E_t 与入射波电场 E_i 比值:

$$S_E = -20 \lg \left(\frac{|E_t|}{|E_i|} \right). \quad (11)$$

在特定条件下, 如电磁波垂直照射无限大均匀材料, 屏蔽效能可以采用解析公式求得. 图4所示为电磁波垂直入射下均匀介质材料的坐标示意图, 平面电磁波 $+y$ 方向垂直入射, 均匀材料厚度为 l , 电场 E_i 沿 x 方向, $y < 0$ 和 $y > l$ 的区域都为空气.

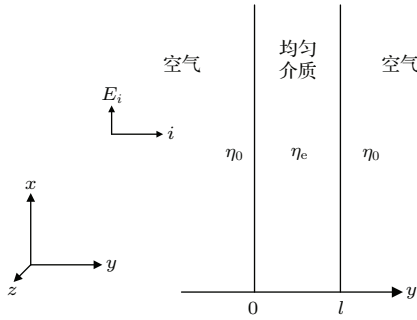


图4 平面波垂直入射无限大均匀介质

Fig. 4. Infinite homogeneous sheet illuminated by a perpendicular plane wave.

根据传输线理论^[11], 在分界面 $y = l$ 处的反射系数 R_l 和透射系数 T_l 分别为

$$R_l = \frac{\eta_0 - \eta_e}{\eta_0 + \eta_e}, \quad (12a)$$

$$T_l = \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta_e}, \quad (12b)$$

式中, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 为空气波阻抗, $\eta_e = \sqrt{\mu_0/\epsilon_e}$ 为均匀材料波阻抗, ϵ_e 为均匀材料的复介电常数.

在分界面 $y = 0$ 处的反射系数 R_0 和透射系数 T_0 分别为

$$R_0 = \frac{Z_{in0} - \eta_0}{Z_{in0} + \eta_0}, \quad (13a)$$

$$T_0 = \frac{1 + R_0}{e^{\gamma_e l} + R_l e^{-\gamma_e l}}, \quad (13b)$$

式中, $\gamma_e = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_e}$ 为均匀材料的复传播常数, Z_{in0} 为分界面 $y = 0$ 处的输入阻抗,

$$Z_{in0} = \eta_e \frac{\eta_0 + \eta_e \tanh(\gamma_e l)}{\eta_e + \eta_0 \tanh(\gamma_e l)}. \quad (14)$$

屏蔽效能可由总的透射系数计算得出

$$S_E = -20 \lg \left(\frac{|E_t|}{|E_i|} \right) = -20 \lg(|T_l \times T_0|). \quad (15)$$

除了上述解析公式以外, 利用数值仿真软件建立复合材料的周期结构电磁模型(模拟无限大情况), 采用数值算法如有限元、矩量法等进行计算, 可以得到精确的屏蔽效能.

3 仿真实验验证

选取了三块无限大的高导电纤维增强复合材料平板, 用于验证提出的均匀化模型. 复合材料平板A的厚度 $l = 7.2$ mm, 纤维直径 $d = 1$ mm, 基体材料的相对介电常数 $\epsilon_{1r} = 5$, 电导率 $\sigma_1 = 0$ S/m, 纤维材料的相对介电常数 $\epsilon_{2r} = 1$, 电导率 $\sigma_2 = 100$ S/m. 复合材料平板B的纤维直径 $d = 0.5$ mm, 其他参数与复合材料平板A相同. 复合材料平板C的厚度 $l = 2$ mm, 纤维直径 $d = 0.07$ mm, 基体材料的相对介电常数 $\epsilon_{1r} = 5$, 电导率 $\sigma_1 = 0$ S/m, 纤维材料的相对介电常数 $\epsilon_{2r} = 1$, 电导率 $\sigma_2 = 1000$ S/m. 外部电磁波垂直于平板入射, 且电场方向与纤维排列方向垂直. 由于纤维在基体材料中以正方形排列(如图1), 采用不同纤维间距 s , 即可调整纤维体积分数的值, 如表1所列.

表1 复合材料平板中纤维的体积分数
Table 1. Various amount of fiber volume fraction.

复合材料	d/mm	s/mm	$f_2/\%$
平板 A	1	2.4	13.6
	1	1.44	37.9
	1	1.2	54.5
平板 B	0.5	1.2	13.6
	0.5	0.72	37.9
	0.5	0.6	54.5
平板 C	0.07	0.2	9.62
	0.07	0.1	38.5
	0.07	0.08	60.1

利用(10)式计算纤维径向的等效介电常数 $\epsilon_{\perp}$, 并根据传输线理论公式计算复合材料平板的屏蔽效能. 同时, 为了验证提出的均匀化模型, 利用数值仿真软件建立了外部电磁波照射下无限大复合材料平板的电磁仿真模型, 采用矩量法进行求解, 计算后的屏蔽效能如图5至图7所示.

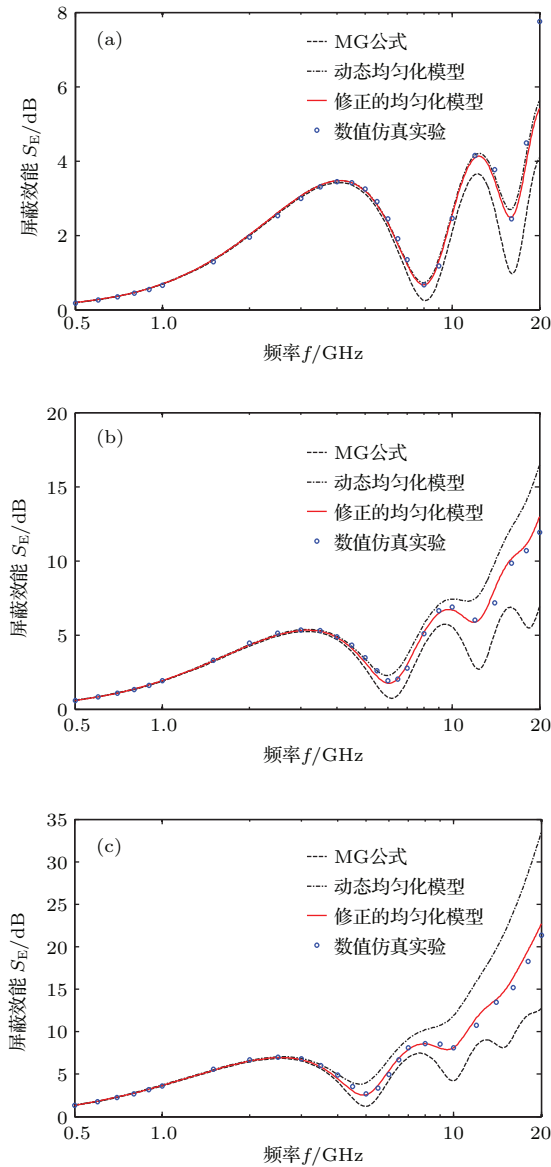


图5 (网刊彩色) 复合材料平板A的屏蔽效能 (a) 纤维体积分数 f_2 为 13.6%; (b) 纤维体积分数 f_2 为 37.9%; (c) 纤维体积分数 f_2 为 54.5%

Fig. 5. (color online) Shielding effectiveness of the infinite sheet A with various amount of fiber volume fraction: (a) $f_2 = 13.6\%$; (b) $f_2 = 37.9\%$; (c) $f_2 = 54.5\%$.

图中虚线为采用MG公式计算的结果, 点虚线为DHM计算的结果, 实线为本文提出的修正均匀化模型结果, 点圆为采用数值仿真软件计算的精确结果.

可以看出, 经典的MG公式受限于准静态情况, 计算得到的屏蔽效能在频率较高时误差较大. 另外, 从图5和图6可以看出, MG公式在 f_2 保持一致而 d 取不同值的情况下, 却给出了相同的结果, 其只与纤维体积分数有关, 而不考虑纤维直径. 文

献[9]提出的动态均匀化模型由于考虑了纤维内部微观结构, 能够描述纤维直径变化带来的影响, 且适用于更高的微波频率范围, 但是随着纤维体积分数提高, 误差越来越大. 本文提出的修正的均匀化模型在低体积添加比时与文献[9]的结果基本一致, 在高体积添加比情况下, 由于引入修正的传播波长和纤维结构特征长度, 保证了模型的精度, 将均匀化模型推广至任意纤维浓度.

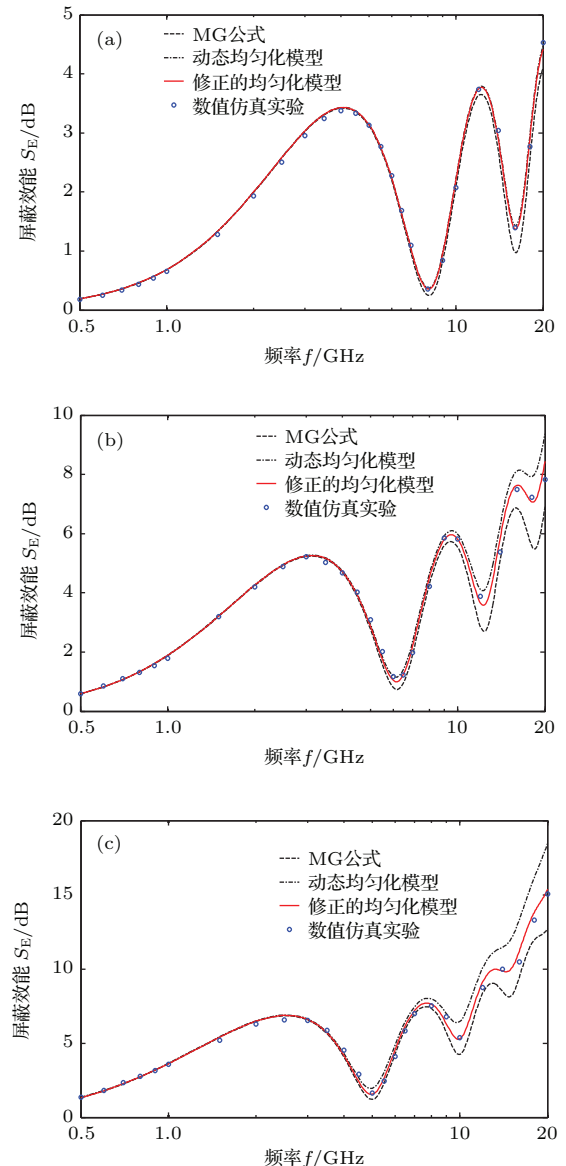


图6 (网刊彩色) 复合材料平板B的屏蔽效能 (a) 纤维体积分数 f_2 为 13.6%; (b) 纤维体积分数 f_2 为 37.9%; (c) 纤维体积分数 f_2 为 54.5%

Fig. 6. (color online) Shielding effectiveness of the infinite sheet B with various amount of fiber volume fraction: (a) $f_2 = 13.6\%$; (b) $f_2 = 37.9\%$; (c) $f_2 = 54.5\%$.

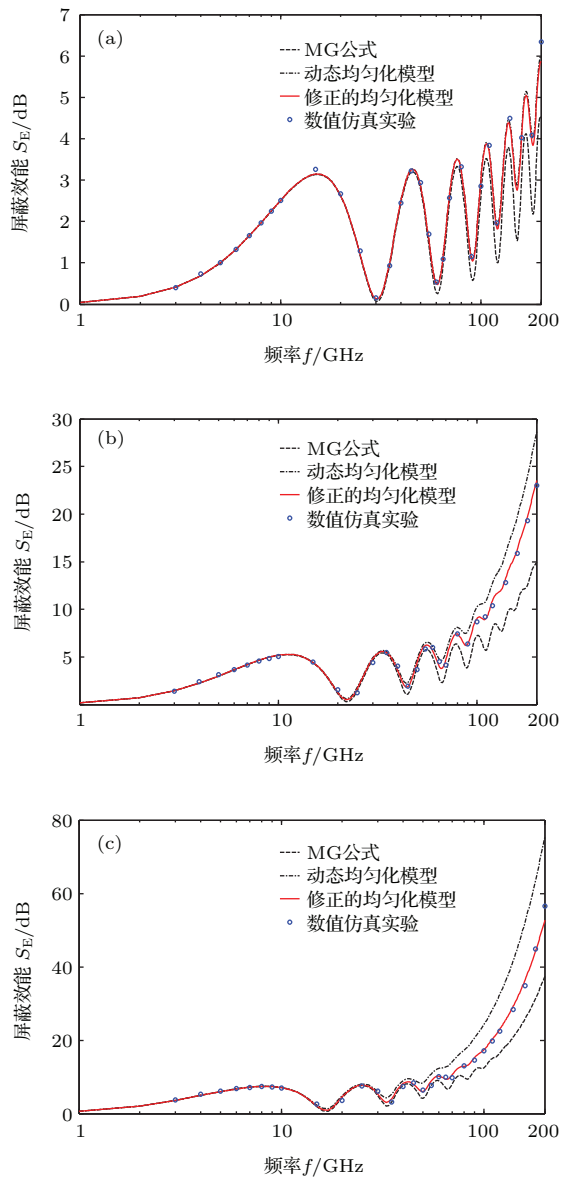


图7 (网刊彩色) 复合材料平板C的屏蔽效能 (a) 纤维体积分数 f_2 为 9.62%; (b) 纤维体积分数 f_2 为 38.5%; (c) 纤维体积分数 f_2 为 60.1%

Fig. 7. (color online) Shielding effectiveness of the infinite sheet C with various amount of fiber volume fraction: (a) $f_2 = 9.62\%$; (b) $f_2 = 38.5\%$; (c) $f_2 = 60.1\%$.

4 结 论

为了解决纤维增强复合材料电磁特性的数值计算难题, 本文对现有的均匀化方法提出的等效电

磁参数模型进行了研究. 分别在不考虑纤维间相互作用时, 采用低体积添加比至高体积添加比的迭代方法, 修正了估计的等效介质电磁波传播波长; 在考虑纤维间互耦时, 引入修正的纤维结构特征长度, 从而将现有均匀化模型推广至任意体积分数情况. 与经典的MG公式以及实际微观结构数值仿真实验结果对比表明, 提出的均匀化模型在保证现有模型微波频段适用范围的基础上, 能够应用至高体积分数情况. 根据对偶原理, 等效电磁参数计算公式同样适用于磁介质情况. 提出的均匀化模型可以直接利用传输线理论公式, 也可以用于数值仿真软件快速计算复合材料的电磁特性如屏蔽效能等.

参考文献

- [1] Liang J J, Huang Y, Zhang F, Li N, Ma Y F, Li F F, Chen Y S 2014 *Chin. Phys. B* **23** 088802
- [2] Cordill B D, Seguin S A, Ewing M S 2013 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **62** 743
- [3] He H H, Wu M Z, Zhao Z S 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 138 (in Chinese) [何华辉, 吴明忠, 赵振声 1999 物理学报 **48** 138]
- [4] Holloway C L, Sarto M S, Johansson M 2005 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **47** 833
- [5] Zang Y Z, He M X, Gu J Q, Tian Z, Han J G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 117802
- [6] Waki H, Igarashi H, Honma T 2005 *IEEE Trans. Magn.* **41** 1520
- [7] He Y F, Gong R Z, Wang X, Zhao Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5261 (in Chinese) [何燕飞, 龚荣洲, 王鲜, 赵强 2008 物理学报 **57** 5261]
- [8] Ding S J, Ge D B, Shen N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 944 (in Chinese) [丁世敬, 葛德彪, 申宁 2010 物理学报 **59** 944]
- [9] Preault V, Corcolle R, Daniel L, Pichon L 2013 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **55** 1178
- [10] Wasselynck G, Trichet D, Ramdane B, Fouldagar J 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 3277
- [11] Shen X Q, Liu H B, Wang Z, Qian X Y, Jing M X, Yang X C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 078101

An approach to characterize dielectric properties of fiber-reinforced composites with high volume fraction*

Liao Yi[†] Cai Kun Zhang Yuan Wang Xiao-Bing

(Shanghai Key Laboratory of Electromagnetic Environmental Effects for Aerospace Vehicle, Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

(Received 10 May 2015; revised manuscript received 18 September 2015)

Abstract

Fiber-reinforced composite materials are widely used in aeronautics and automotive industries due to their excellent mechanical properties. Composites with high conductive fibers embedded have good performance of shielding effectiveness and become possible candidates to replace metals. One approach for analyzing the electromagnetic (EM) interaction of fiber-reinforced composites is to use full numerical methods, which allow precise modeling and give accurate results. However, numerical methods may lead to prohibitive computational time and memory capacity due to the strong dependence on the shielding properties from heterogeneous microstructures.

In composite materials, two important parameters, effective permittivity ε_{eff} and effective permeability μ_{eff} , determine the interaction between the electromagnetic field and the materials. For estimating the effective parameters, homogenization techniques have been developed to describe a composite mixture in terms of a spatially homogeneous electromagnetic response, mostly under static conditions. The well-known rules are the Maxwell-Garnett (MG) formula and the Bruggeman formula.

These rules are usually applied to the dilute composite materials and provide satisfactory results as long as the wavelength remains large compared to the size of the heterogeneities. Recently, revised homogenization models have been developed to extend the frequency range. Some of them are presented with the help of numerical method but still require substantial computational time and resources to be performed. One recently proposed homogenization model, called dynamic homogenization model (DHM), is an extension of quasi-static homogenization methods for microwave frequencies. It is obtained by introducing a microstructure-dependent characteristic length for the composites made of a square array of circular cylinders buried in the matrix, based on the basic inclusion problems. The DHM overcomes the limitations of standard static homogenization tools, but only applicable to low fiber volume fraction (less than 20%).

In this paper, we focus on the microstructure in the case of a square array of circular 2D conductive long fibers embedded in a dielectric matrix. A revised DHM is proposed to describe the effective permittivity of the composite materials with different inclusion concentrations, including higher fiber volume fraction. Firstly, an iterative procedure is employed to estimate an effective permittivity, which is then used to modify the wavelength λ in the DHM. Secondly, an empirical formula-based characteristic size of the microstructure is presented by considering the current distribution of the fibers under the EM wave illumination in the case of high fiber volume fractions. Therefore, the final modified homogenization model is given for the effective permittivity of composites with arbitrary inclusion concentrations. It

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61302036), the Program of Shanghai Subject Chief Scientist (B type) (Grant No. 14XD1423100), and the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No. 14ZR1439400).

[†] Corresponding author. E-mail: lycle21@buaa.edu.cn

can be used to efficiently calculate the reflection and transmission coefficients, as well as the shielding effectiveness by classical transmission-line methods. Three infinite sheets with different physical parameters are utilized for validation. We compare the results of the shielding effectiveness obtained from this homogenization model with those obtained from a full numerical solution of the actual fiber composites. Reasonable agreements obtained demonstrate that the proposed model could define the effective permittivity of the composites with high fiber concentration over a wide frequency range including microwave frequencies. Analogous formulas also hold for the magnetic permeability with permittivity ε replaced by permeability μ wherever it appears in the proposed model.

Keywords: effective permittivity, homogenization, shielding effectiveness, fiber-reinforced composite materials

PACS: 41.20.-q, 77.22.Ch, 77.84.Lf

DOI: [10.7498/aps.65.024102](https://doi.org/10.7498/aps.65.024102)