

碳纳米管复合吸波涂层微波吸收性能的模拟计算*

陈明东¹⁾²⁾ 揭晓华^{1)†} 张海燕¹⁾

1) (广东工业大学材料与能源学院, 广州 510006)

2) (华南理工大学大学城校区物理教学实验中心, 广州 510006)

(2013年10月20日收到; 2013年11月29日收到修改稿)

如何利用碳纳米管复合吸波涂层的参数进行吸波性能优化是电磁屏蔽研究的热点之一. 涂层参数对吸波性能影响的研究主要停留在实验探索阶段, 而碳纳米管的结构参数对吸波性能影响的研究鲜有报道. 因此, 从微观结构层次研究涂层参数对吸波性能的影响有重要意义. 基于多壁碳纳米管的等效电路, 利用碳纳米管结构参数与等效电路各元件参数的关系, 研究了碳纳米管损耗微波的机理, 建立了碳纳米管结构参数与微波反射率的关系式. 根据此关系式, 利用 Matlab 软件模拟计算了碳纳米管管长、管径、涂层中碳纳米管的含量以及涂层厚度对微波反射率的影响. 模拟计算结果表明: 涂层的微波反射率随碳纳米管含量变化的模拟曲线与实验结果符合; 碳纳米管含量和厚度是影响吸收峰位置和吸收强度的重要参量, 而碳纳米管直径和长度是主要影响吸收峰强度的参量.

关键词: 等效电路, 涂层参数, 吸波性能, 反射率

PACS: 61.46.Np, 77.22.Gm, 77.84.Lf, 88.30.mj

DOI: 10.7498/aps.63.066103

1 引言

碳纳米管具有良好的热学、力学、光学和电学性能, 其复合材料被广泛研究和应用^[1-3], 如碳纳米管复合吸波剂是目前吸波材料和电磁屏蔽研究的热点之一^[4-6]. 目前, 大部分碳纳米管吸波材料的实验研究集中在探索碳纳米管吸波剂的制备、改性以及多层吸波涂层性能优化等方面. Fan 等^[7]制备了多壁碳纳米管(MWCNTs)/聚合物复合材料, 并通过实验测得复合材料在 8—18 GHz 频段范围内反射峰值达到 -24.27 dB. Xu 等^[8]研究了碳纳米管/Fe 纳米粒子复合材料的合成和磁性. 孙洪国等^[9]利用计算机对吸波涂层参数进行了优化, 此优化过程对复合吸波涂层的设计、制备有指导意义. 华绍春等^[10]将碳纳米管分散到纳米 Al₂O₃-TiO₂ 粉末中, 得到不同质量分数的碳纳米管复合材料, 并研究了复合材料的复介电常数和吸波性能. Zhu 等^[11]研究发现, 将磁介质 Fe 或 Ni 填

充(或镀)到碳纳米管内部(或表面)也能明显改善材料的吸波性能. Wang 等^[12]研究了手性材料的吸波机理. Peng 等^[13]研究了微波频段范围内单壁碳纳米管/有机聚合物复合材料的复电导和复介电常数. 虽然碳纳米管复合吸波材料的研究取得了很大的进展, 但是从微观分子结构研究碳纳米管复合材料吸波性能的报道较少, 特别是探讨碳纳米管结构参数对材料吸波性能影响的研究鲜有报道. 因此, 从碳纳米管的微观结构研究碳纳米管的吸波机理、探讨碳纳米管结构参数对吸波性能的影响有重要的意义.

研究表明, 碳纳米管可以认为是准一维的量子导线. 除了具有散射电阻外, 碳纳米管还具有动能电感和量子电容, 这些电阻、电容和电感与碳纳米管的参数密切相关. 因此, 在 MWCNTs 等效电路的基础上, 本文利用 MWCNTs 结构参数与等效电路各元件参数的关系, 研究了碳纳米管损耗微波功率的量化关系. 根据本文工作和传输线理论建立了

* 广东省科技计划 (批准号: 2009B090300017) 和广东省国际合作项目 (批准号: 2011B050300017) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: Jiexh@scnu.edu.cn

MWCNTs 结构参数与涂层吸波性能的关系, 并利用 Matlab 软件进行模拟计算.

2 碳纳米管的等效电路

用于吸波材料的碳纳米管大多数属于 MWCNTs. 这种 MWCNTs 具有较好的导电性能, 属于良导体, 通常被认为是准一维的量子导线. 研究表明, 当 MWCNTs 的长度大于电子的平均自由程 λ_i (λ_i 为第 i 层管壁电子的平均自由程) 时, 该管壁层沿管长方向存在散射电阻, 因此单位长度的第 i 层管壁散射电阻 $R_i^{[14]}$ 为

$$R_i = \frac{h}{2N'e^2 \lambda_i}, \quad (1)$$

式中, h 和 e 分别为普朗克常数和电子电量, N' 为每个管壁的导电通道数. 对于直径大于 6 nm 的 MWCNTs, 通常采用公式 $N' = 0.0612D_i \times 10^9 + 0.425$ 计算 MWCNTs 管壁导电通道数^[14,15], 其中 D_i 为 MWCNTs 第 i 层管壁的直径. 将 MWCNTs 每层管壁的电阻并联就可得到其总散射电阻 R .

由于 MWCNTs 是一维的量子导线, 所以在 MWCNTs 中增加一个电子会使量子导线的电势能增加, 因此 MWCNTs 还存在量子电容, 单位长度的量子电容 $C_Q^{[15]}$ 为

$$C_Q = \frac{4N'Ne^2}{hv_F}, \quad (2)$$

式中, N 为 MWCNTs 的管壁数目; v_F 是费米速率, 在 MWCNTs 中费米速率 $v_F \approx 8.5 \times 10^5$ m/s. 除了具有普通导线不明显的量子电容外, MWCNTs 还存在动能电感, 单位长度的动能电感 $L_K^{[14]}$ 为

$$L_K = \frac{h}{4N'e^2v_F}. \quad (3)$$

在 MWCNTs 中, 除了存在动能电感 L_K 外, 还存在磁性电感 $L_M^{[15]}$. 由于磁性电感 L_M 的存在, 当角频率为 ω 的高频感应电流流经 MWCNTs 时, 产生相应的阻抗 $j\omega L_M$, 其中, j 为复数虚部单位, L_M 与导线的线径、长度等有关. 当 MWCNTs 的长度较小时, 磁性电感 L_M 产生的阻抗 $j\omega L_M$ 远小于动能电感 L_K 产生的阻抗 $j\omega L_K$.

当微波照射在 MWCNTs 上时, MWCNTs 中产生高频感应电流. 当高频感应电流流经 MWCNTs 时, 可用图 1 所示的等效电路描述, 即将单根 MWCNTs 看成短路传输线. 由传输线理论可知, 单

根 MWCNTs 在频率为 ω 的高频感应电流作用下, 从 AB 端看进去的阻抗 Z 为

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega(L_K + L_M)}{j\omega C_Q}} \times \tanh \left[\sqrt{j\omega C_Q(R + j\omega(L_K + L_M))} \cdot l \right], \quad (4)$$

式中 l 为 MWCNTs 长度. (4) 式忽略了邻近 MWCNTs 的漏电导对阻抗的影响.

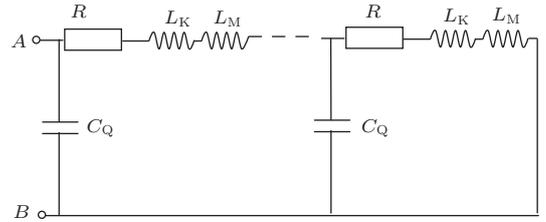


图 1 微波场中碳纳米管的等效电路

3 吸波性能

复介电常数是描述交变电场作用下电介质与交变电场相互作用过程的物理量. 复介电常数 $\epsilon_0(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ 包括介电常数的实部和虚部, 实部描述了外电场作用下介质极化性能的物理量, 而虚部描述交变电场作用下电介质取向极化时产生损耗的物理量. 因此在沿 z 方向传播的电磁场 $\mathbf{E}(z)$ 作用下, 电介质与电磁场相互作用的功率密度 p 可用极化矢量 \mathbf{P} 建立^[16], $p = E(dP/dt)$, 其中 $\mathbf{E}(z) = E_0 \exp(-\alpha z) \exp(j\omega t)$ (α 为衰减常数). 所以由电介质物理理论公式 $P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E$ 可得到电磁场与电介质相互作用过程中某点处的功率密度 p ,

$$p = [\omega\epsilon_0\epsilon_r'' + j\omega\epsilon_0(\epsilon_r' - 1)] E_0^2 \times \exp(-2\alpha z) \exp(2j\omega t). \quad (5)$$

MWCNTs 吸收电磁波可以认为主要是电磁波使 MWCNTs 产生高频感应电流 i , 高频感应电流流过 MWCNTs 时会产生损耗. 因此, 微波与 MWCNTs 相互作用的功率密度 p' 可表示为

$$p' = \sum_1^n \int_0^l i^2 Z dy.$$

由感应电流 i 与场强 E 的关系 $i = \sigma E$ (σ 为 MWCNTs 的电导率) 以及假设涂层中 MWCNTs 的取向和浓度均匀分布可得

$$p' = n \int_0^l \sigma^2 S^2 E^2 \cos^2(\theta) Z dy$$

$$= n \int_0^l \frac{\sigma^2 S^2}{2} E^2 Z dy, \quad (6)$$

式中, n 为单位体积中MWCNTs的数目, $n = V/(\pi D^2 l/4)$, 其中, D 为MWCNTs的外径, V 为MWCNTs的体积分数; S 为MWCNTs的有效导电面积; $\sigma = l/(S|Z|)$; θ 为MWCNTs与电场方向的夹角. 因为涂层中MWCNTs取向分布均匀, 所以对 $\cos^2 \theta$ 在各个方向取平均值得到 $\overline{\cos^2 \theta} = 1/2$. (5) 和 (6) 式分别是用不同方法推导得到的功率密度, 因此由 (5) 和 (6) 式可得到MWCNTs等效复介电常数

$$\varepsilon'_{Cr} - j\varepsilon''_{Cr} = 1 + \frac{2VZ}{j\omega\varepsilon_0(\pi D^2 l|Z|^2)}. \quad (7)$$

(7) 式描述了MWCNTs等效相对复介电常数与MWCNTs参数间的关系. 由 (7) 式可知等效复介电常数取决于MWCNTs的质量分数、管径和管长以及频率等.

碳纳米管复合吸波涂层一般由吸收剂MWCNTs和粘结剂环氧树脂混合而成. 因此, 涂层的介电常数应为环氧树脂和MWCNTs混合物的复介电常数. 根据混合物介电常数估算公式(cuming公式)^[17] 和 (7) 式可计算得到涂层的复介电常数

$$\begin{aligned} \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r &= \left[1 + \frac{2VZ}{j\omega\varepsilon_0(\pi D^2 l|Z|^2)} \right]^V \\ &\times [\varepsilon_{Oxy}]^{1-V}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 ε_{Oxy} 为环氧树脂的相对复介电常数.

因为吸波性能的研究一般是研究吸波剂涂敷在金属表面的吸波效果, 所以涂层的阻抗为 $Z_C \tanh(\gamma T)$. 这里 γ 为非磁性涂层中电磁波的传播常数,

$$\begin{aligned} \gamma &= \omega \left[\sqrt{(\varepsilon_r'^2 + \varepsilon_r''^2 - \varepsilon_r')/2} \right. \\ &\quad \left. + j\sqrt{(\varepsilon_r'^2 + \varepsilon_r''^2 + \varepsilon_r')/2} \right] / c, \end{aligned}$$

其中 c 为真空光速; Z_C 为涂层的等效特性阻抗,

$$Z_C = Z_0 \sqrt{\mu_r/(\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')},$$

其中, μ_r 为相对磁导率, Z_0 为空气的特性阻抗; T 为涂层厚度. 因此, 由 (8) 式及传输线理论可得到涂层的反射率与涂层参数间的关系

$$\Gamma = 20 \lg \frac{Z_C - Z_0}{Z_C + Z_0}$$

$$= 20 \lg \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r' - j\varepsilon_r''}} \tanh(\gamma T) - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r' - j\varepsilon_r''}} \tanh(\gamma T) + 1}. \quad (9)$$

4 结果与讨论

在模拟计算中, MWCNTs的密度 ρ_{CNT} 取值为^[18] $\rho_{CNT} \approx 2.16 \text{ g/cm}^3$, 环氧树脂的密度 ρ 取值为^[18] $\rho = 1.3 \text{ g/cm}^3$, 涂层的相对磁导率取为 $\mu_r \approx 1$, 环氧树脂复介电常数取值为 $\varepsilon_{Oxy} = 2.3 - 0.3j$; MWCNTs中每层管壁电阻取值相等, 均取为 $R_i = h/(2000DN'e^2)$; MWCNTs的质量分数取为^[18] 90%. 图2—图5是利用Matlab软件得到的 (9) 式等相关公式的计算结果, 频率范围为 1—20 GHz.

图2所示为微波反射率随MWCNTs质量分数曲线的变化, 其中参数取值如下: MWCNTs直径 $D = 20 \text{ nm}$, 长度 $l = 5 \mu\text{m}$, 涂层厚度 $T = 8 \text{ mm}$. 从图2可以看出: 在 1—20 GHz 范围内, 涂层对微波均有不同程度的吸收, 而且MWCNTs质量分数对涂层的微波反射率有明显的影响. MWCNTs质量分数越大, 主反射峰位置越小, 即主反射峰向低频方向移动. 当MWCNTs质量分数为 8%—10% 时, 涂层对微波主反射峰的影响最强, 吸波效率最好, 这主要是因为在该质量分数范围内, 涂层阻抗和空气阻抗能产生良好的匹配.

从图2还可以看出: 当MWCNTs质量分数为 5% 时, 主反射峰位于 15.8 GHz, 反射峰值为 -12.9 dB; 当MWCNTs质量分数为 8% 时, 主反射峰位于 13.8 GHz, 反射峰值为 -18 dB; 当MWCNTs质量分数为 20% 时, 主反射峰位于 2.9 GHz, 反射峰值为 -14.8 dB. 以上三个主反射峰值与文献^[19] 中直径为 10—30 nm、长度约为若干微米且质量分数大于 90% 的碳纳米管/环氧树脂复合涂层的实验结果符合得较好, 同时本文模拟计算得到的峰值位置和峰值大小以及吸收曲线形状(图2)与文献^[19] 的实验结果相符合. 虽然质量分数为 10% 的模拟结果与实验值的误差稍大, 但如果计算该质量分数的微波反射率时, 环氧树脂复介电常数取值为 $\varepsilon_{Oxy} = 2.3 - 0.2j$, 则模拟计算结果与实验结果很接近. 模拟计算结果与实验结果偏离的主要原因有以下五方面: 一是模拟计算时MWCNTs的长度和直径取均一值, 事实上实验中碳纳米管的长度和直径是在一定范围内分布的, 而且假定了MWCNTs在

涂层中的取向和浓度均匀分布;二是实验中MWCNTs的不同处理方式对吸波性能有一定的影响;三是在模拟计算中忽略了残留铁磁性催化剂对复磁导率的影响;四是在模拟计算中忽略了频率对环氧树脂复介电常数的影响;五是当MWCNTs质量分数较大时,混合物复介电常数计算公式(cuming公式)也将产生一定的误差.

图3所示为反射率随MWCNTs涂层厚度和微波频率的变化. 计算参数取值如下: MWCNTs质量分数为8%, 直径 $D = 20\text{ nm}$, MWCNTs长度 $l = 5\text{ }\mu\text{m}$. 从图3可以看出, 涂层厚度 T 对吸波性能有较大的影响. 随着涂层厚度 T 的增加, 反射峰的数目增加, 而且主反射峰的位置随涂层厚度 T 的增加向低频方向移动. 这主要是因为随涂层厚度 T 的增加, 电磁波在涂层中反射、干涉抵消的波长增大, 即反射、干涉抵消的微波频率下降, 图3所示的结果与理论分析结果一致. 由此可得, 增大涂层厚度能增强涂层对微波的吸收.

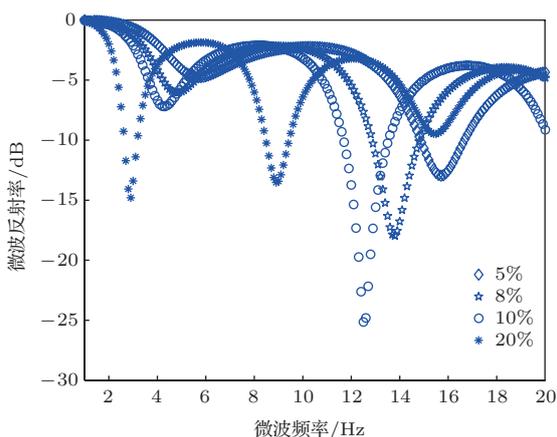


图2 反射率随碳纳米管质量分数和微波频率的变化

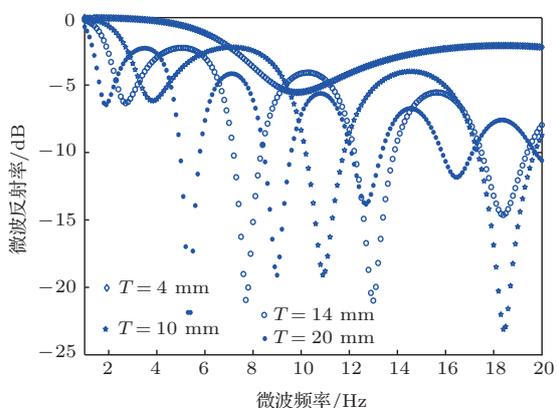


图3 反射率随碳纳米管复合涂层厚度 T 和微波频率的变化

图4为反射率随MWCNTs直径和微波频率变

化的三维图, 参数取值如下: MWCNTs质量分数为8%, 长度 $l = 5\text{ }\mu\text{m}$, 涂层厚度 $T = 8\text{ mm}$. 从图4可以看出, 当其他参数不变, MWCNTs直径从 $D = 10\text{ nm}$ 变化到 $D = 100\text{ nm}$ 时, 主反射峰位置基本不发生移动, 随MWCNTs直径增大, 主反射峰减弱. 这可能是因为MWCNTs管径较小, 所以随MWCNTs管径增大, MWCNTs中电子的平均自由程超过管壁长度的概率增大, 导致碳纳米管的电阻减小, 即降低了碳纳米管对电磁波的损耗, 因此涂层对微波的吸收减弱. 图4所示的结果与理论分析结果一致.

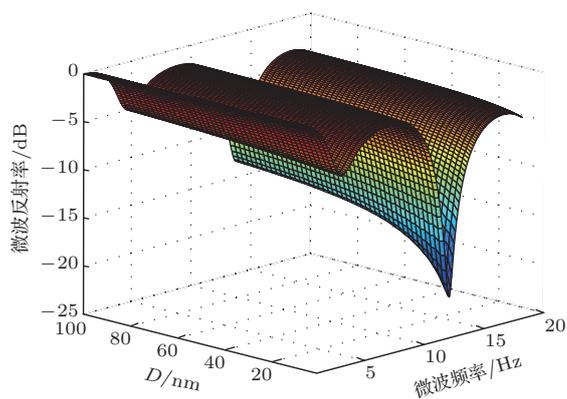


图4 反射率随碳纳米管直径 D 和微波频率的变化

图5为反射率随MWCNTs管长和微波频率变化的三维图, 参数取值如下: MWCNTs质量分数为8%, 涂层厚度 $T = 8\text{ mm}$, MWCNTs直径 $D = 20\text{ nm}$. 从图5可以看出, MWCNTs长度对微波反射率的影响较复杂. MWCNTs长度在 $1\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ 范围内变化时, 涂层的微波反射峰位置和反射峰值分别在 13.8 GHz 和 -17.9 dB 附近, 且基本上不发生变化; 当MWCNTs长度在 $6\text{--}37\text{ }\mu\text{m}$ 范围内变化时, 涂层的微波反射率和反射峰位置变化较剧烈, 主反射峰位置从 13.8 GHz 变化到 13.3 GHz , 微波主反射峰值在 -18.5 dB 到 -49.5 dB 之间变化, 主反射峰值在 $l = 20\text{ }\mu\text{m}$ 左右时突然减弱; 当MWCNTs长度在 $37\text{--}45\text{ }\mu\text{m}$ 范围时, 主反射峰位置基本不变, 而反射峰值从 -49.5 dB 变化到 -33.8 dB ; 当MWCNTs长度大于 $46\text{ }\mu\text{m}$ 时, 微波主反射峰位置和反射峰值变化较小. 产生以上现象的原因如下: 当MWCNTs长度在 $6\text{--}45\text{ }\mu\text{m}$ 时, 复合涂层阻抗与空气阻抗匹配良好, 因此在此范围内微波反射峰较强, 但当MWCNTs长度在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右时, 可能由于某些管壁电子的平均自由程正好在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 使MWCNTs的电磁

参数在 $l \leq 20 \mu\text{m}$ 范围内变化较为剧烈,从而使涂层阻抗与空气阻抗匹配有较明显的变化,导致在此附近的反射峰值突然减弱.

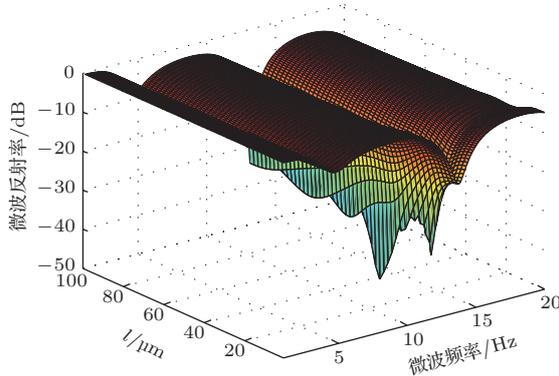


图5 反射率随碳纳米管长度 l 和微波频率的变化

综上所述可知:涂层的微波反射率和反射峰的位置对MWCNTs质量分数较为敏感,MWCNTs质量分数为8%左右时吸波性能最好;涂层的厚度对吸波性能也有较明显的影响,增大涂层厚度能增强吸波性能;MWCNTs长度的变化对反射峰值的影响较为复杂,当管长取某一范围时,反射峰能取得极值;而MWCNTs管径主要影响涂层的吸收峰值大小,当MWCNTs长度较小时,小管径的MWCNTs对增强吸波性能有利.

5 结 论

基于MWCNTs的等效电路模型,利用微波与电介质相互作用的规律,推导建立了MWCNTs涂层反射率与涂层参数的关系式.根据此关系式,利用Matlab软件模拟计算得到了涂层反射率随MWCNTs质量分数、MWCNTs直径、管长以及涂层厚度等变化的曲线.模拟计算结果表明:涂层的微波反射率随MWCNTs质量分数的变化曲线与文献[19]的实验结果符合较好,而且微波反射率受MWCNTs质量分数影响明显,质量分数在8%左右时,涂层的吸波效果最佳;涂层厚度对吸波性能有明显影响,且增大涂层厚度对吸波性能有利;而MWCNTs的管径、长度主要影响涂层的吸收强度.模拟计算的误差主要源于MWCNTs的管径、管长

等参数取单一值,忽略了残留催化剂的磁导率,以及碳纳米管等效电路参数的近似取值等.

参考文献

- [1] Pan R Q 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 066104
- [2] Moradi A 2013 *Chin. Phys. B* **22** 064201
- [3] Xu Y G, Zhang D Y, Cai J, Yuan L, Zhang W Q 2012 *J. Mater. Sci. Technol.* **28** 34
- [4] Zhao D L, Zeng X W, Shen Z M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3878 (in Chinese) [赵东林, 曾宪伟, 沈曾民 2005 物理学报 **54** 3878]
- [5] Wang J, Li H F, Huang Y H, Yu H B, Zhang Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1946 (in Chinese) [王建, 李会峰, 黄运华, 余海波, 张跃 2010 物理学报 **59** 1946]
- [6] Roberts J A, Imholt T, Ye Z, Dyke C A, Price D W, Tour J M 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 4352
- [7] Fan Z J, Luo G H, Zhang Z F 2006 *Mater. Sci. Eng. B* **132** 85
- [8] Xu M H, Qi X S, Zhong W, Ye X J, Deng Y, Au C T, Jin C Q, Yang Z X, Du Y W 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 116103
- [9] Sun H G, Zhou Z X, Qin R H, Yuan C X, Zhang H F, Lu Y 2007 *J. Harbin Inst. Technol.* **39** 474 (in Chinese) [孙洪国, 周忠祥, 秦汝虎, 袁承勋, 张海丰, 卢颖 2007 哈尔滨工业大学学报 **39** 474]
- [10] Hua S C, Wang H G, Wang L Y, Liu G, Zhao R X, Yao J X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6534 (in Chinese) [华绍春, 王汉功, 汪刘应, 刘顾, 赵瑞星, 姚建勋 2009 物理学报 **58** 6534]
- [11] Zhu H, Lin H, Guo H F, Yu L F 2007 *Mater. Sci. Eng. B* **138** 101
- [12] Wang Z P, Zhang Z H, Qin S M, Wang L H, Wang X X 2008 *Mater. Des.* **29** 1777
- [13] Peng Z H, Peng J C, Peng Y F, Wang J Y 2008 *Chin. Sci. Bull.* **52** 3497
- [14] Li H, Yin W Y, Banerjee K, Mao T F 2008 *IEEE Trans. Electron Dev.* **55** 1328
- [15] Zhang K L, Tian B, Zhu X S, Wang F, Wei J 2012 *Nanoscale Res. Lett.* **7** 138
- [16] Han G Z, Chen M D, Guo P S, Li S X 2007 *South China Univ. Technol.* **35** 52 (in Chinese) [韩光泽, 陈明东, 郭平生, 李绍新 2007 华南理工大学学报 **35** 52]
- [17] Prasad A, Prasad K 2007 *Physica B* **396** 132
- [18] Peng Z H 2010 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: Hunan University) (in Chinese) [彭志华 2010 博士学位论文 (长沙: 湖南大学)]
- [19] Yellampalli S 2011 *Carbon Nanotubes Synthesis Characterization Applications* (Croatia: InTech Press) pp265–278

Simulation and calculation of the absorbing microwave properties of carbon nanotube composite coating*

Chen Ming-Dong¹⁾²⁾ Jie Xiao-Hua^{1)†} Zhang Hai-Yan¹⁾

1) (School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

2) (Physics Teaching and Experiment Center of Campus of High Education Mega Center, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

(Received 20 October 2013; revised manuscript received 29 November 2013)

Abstract

How to optimize the absorbing microwave properties by using the parameters of carbon nanotube composite coating is a hotspot in the study of electromagnetic shielding. However, the study on the influence of coating parameters on absorbing microwave properties mainly stays in the stage of experimental study, and the influence of structure parameters of carbon nanotube on absorbing microwave properties has not been reported yet. Therefore, it is significant to study the method of optimizing the absorbing microwave properties of materials through micro-structure of the carbon nanotube composite coating. Based on an equivalent circuit of multi-wall carbon nanotubes, using the relationship between the parameters of each element in the equivalent circuit to study the mechanism of carbon nanotube loss microwave, an expression of absorbing microwave properties about carbon nanotube structure parameters is derived. According to the expression, the microwave reflection ratio of coating is calculated and simulated by Matlab software, which is affected by the length, diameter and coating thickness of carbon nanotube and the number of carbon nanotubes. The simulation result shows that the variation of reflection ratio curve of coating with the number of carbon nanotubes is consistent with the experimental results. The number of carbon nanotubes and the thickness of coating are the vital parameters, which influence the absorption intensity and absorption position, while the diameter and length of carbon nanotube are the vital parameters, which influence the absorption intensity.

Keywords: equivalent circuit, parameters of coating, absorbing properties, reflection ratio

PACS: 61.46.Np, 77.22.Gm, 77.84.Lf, 88.30.mj

DOI: 10.7498/aps.63.066103

* Project supported by the Science and Technology Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2009B090300017) and the International Cooperation Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2011B050300017).

† Corresponding author. E-mail: Jiexh@scnu.edu.cn