

多晶铁纤维吸收剂微波电磁参数的 各向异性研究

何华辉 吴明忠 赵振声

(华中理工大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(1999 年 6 月 10 日收到)

由麦克斯韦方程出发, 导出了多晶铁纤维吸收剂微波电磁参数的理论计算公式, 通过数值分析, 阐述了多晶铁纤维吸收剂微波电磁参数的各向异性. 通过纤维取向样品的制备和测试, 实验验证了电磁参数的各向异性. 理论和实验研究均表明, 多晶铁纤维吸收剂的微波电磁参数具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.

PACC: 7550

1 引 言

多晶铁纤维吸收剂是满足“薄、轻、宽、强”吸波材料的理想吸收剂之一. 据报道^[1], 吸收剂体积占空比为 25%、厚度为 1 mm 的多晶铁纤维吸波涂层在 3—18 GHz 宽频带内反射系数低于 -5 dB. 另据报道^[2], 多晶铁纤维吸波材料已用于战略防御部队的导弹和再入飞行器.

与铁氧体微粉和金属微粉等球形吸收剂不同, 多晶铁纤维吸收剂的微波电磁参数可能具有形状各向异性. 本文将通过理论分析阐明多晶铁纤维吸收剂微波电磁参数的各向异性, 通过纤维取向样品的制备和测试对电磁参数的各向异性进行实验验证.

2 理论分析

由于具有形状各向异性, 在微波电磁场作用下, 多晶铁纤维吸收剂的微波复磁导率和微波复介电常数均为二阶张量, 令纤维沿 z 轴取向, 则它们可分别表示为

$$\| \mu \| = \begin{bmatrix} \mu_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel} \end{bmatrix},$$
$$\| \epsilon \| = \begin{bmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{bmatrix},$$

其中 μ_{\parallel} , μ_{\perp} , ϵ_{\parallel} 和 ϵ_{\perp} 分别为多晶铁纤维的轴向 (z 轴方向) 磁导率、径向磁导率、轴向介

电常数和径向介电常数.

2.1 轴向磁导率和径向磁导率

多晶铁纤维是铁磁性导体,在微波磁场作用下,它的磁矩包含两方面的贡献:(1)固有磁矩的取向,包括磁畴转动磁化过程和畴壁位移磁化过程;(2)电子涡流产生的磁矩.设固有磁矩取向所产生的磁矩为 m_i ,电子涡流所产生的磁矩为 m_e ,则有

$$m_i = \iiint (\mu_i - 1) \mathbf{H} dV, \quad (1)$$

$$m_e = \frac{1}{2} \iiint \mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r}) dV = \frac{1}{2} \iiint \mathbf{r} \times \nabla \times \mathbf{H} dV, \quad (2)$$

其中 μ_i 为本征磁导率, $\mathbf{j}(\mathbf{r})$ 为涡流密度.

首先讨论轴向磁导率.令 $\mathbf{H}^{(e)} = H_0 e^{j\omega t} \mathbf{e}_z$ 为外磁场(磁场的极化方向与纤维轴向一致), $\mathbf{M} = M \mathbf{e}_z$ 为纤维的平均磁化强度,则由麦克斯韦方程可知纤维内的磁场为^[3](略去时间因子 $e^{j\omega t}$)

$$\mathbf{H} = \left[\frac{J_0(kr)}{J_0(ka)} H_0 - N_{//} M \right] \mathbf{e}_z, \quad (3)$$

其中常数 k 由 $k^2 = -j\omega\sigma\mu_0\mu_i$ 确定, a 为纤维半径, $N_{//}$ 为轴向退磁因子.利用(1)–(3)式,可得纤维内的总磁矩为

$$\mathbf{m} = m_i + m_e = \pi a^2 l \left[\mu_i \frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} H_0 - (\mu_i - 1) N_{//} M - H_0 \right] \mathbf{e}_z.$$

又 $\mathbf{m} = \pi a^2 l \mathbf{M}$,代入上式并化简,可得纤维内的平均磁化强度为

$$\mathbf{M} = \frac{\frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} - 1}{(\mu_i - 1) N_{//} + 1} H_0 \mathbf{e}_z,$$

由此可得多晶铁纤维吸收剂的轴向磁导率为

$$\mu_{//} = 1 + \frac{\frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} - 1}{(\mu_i - 1) N_{//} + 1}. \quad (4)$$

现在讨论径向磁导率.令 $\mathbf{H}^{(e)} = H_0 e^{j\omega t} \mathbf{e}_x$ 为外磁场, $\mathbf{M} = M \mathbf{e}_x$ 为纤维内的平均磁化强度,则由麦克斯韦方程可解得纤维内的磁场为^[3]

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{H}} = & \beta k H_0 e^{j\omega t} \left[\frac{J_1(kr)}{r} \cos \theta \bar{\mathbf{e}}_r + \left[\frac{J_1(kr)}{r} - k J_0(kr) \right] \sin \theta \bar{\mathbf{e}}_\theta \right] \\ & - N_{\perp} M (\cos \theta \bar{\mathbf{e}}_r - \sin \theta \bar{\mathbf{e}}_\theta), \end{aligned} \quad (5)$$

其中 N_{\perp} 为纤维的径向退磁因子,常数 β 可由边界条件确定^[3],

$$\beta = \frac{a}{k H_0} \frac{2 H_0 + N_{\perp} (\mu_i + 1) M}{(\mu_i - 1) J_1(ka) + ka J_0(ka)}. \quad (6)$$

将(5)和(6)式代入(1)和(2)式并化简,可得纤维内的总磁矩为

$$\mathbf{m} = m_i + m_e.$$

$$= \pi a^2 l \left\{ \frac{2\mu_i J_1(ka) - ka J_0(ka)}{(\mu_i - 1) J_1(ka) + ka J_0(ka)} \left[H_0 + \frac{1}{2} N_{\perp} (\mu_i + 1) M \right] - N_{\perp} (\mu_i - 1) M \right\} e_x.$$

将 $m = \pi a^2 l M$ 代入上式并化简, 可得纤维内的平均磁化强度为

$$M = \frac{\mu_i \frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} - 1}{(\mu_i - 1) \frac{1}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} + 1 + N_{\perp} (3\mu_i - 1) \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} \right]} H_0 e_x.$$

由此可知多晶铁纤维的径向磁导率为

$$\mu_{\perp} = 1 + \frac{\mu_i \frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} - 1}{(\mu_i - 1) \frac{1}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} + 1 + N_{\perp} (3\mu_i - 1) \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} \right]}. \quad (7)$$

2.2 轴向介电常数和径向介电常数

由于微波电场的波长远大于纤维的尺寸, 单一纤维可等效为一组电阻电容(R-C)电路来研究^[4]. 考虑到微波电场的频率为 $10^9 - 10^{11}$ Hz, 电感是不显著的, 因而等效电路中不包括电感. 这样, 纤维的电压可表示为

$$V = R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C}. \quad (8)$$

设微波电场的极化方向平行于纤维轴向, 即 $\mathbf{E}^{(e)} = E_0 e^{j\omega t} \mathbf{e}_z$, 并设纤维内的平均电场为 $\bar{E} e^{j\omega t} \mathbf{e}_z$, 则(8)式中的各参数为 $V = \bar{E} l e^{j\omega t}$, $R = \frac{l}{\pi a^2 \sigma}$, $C = \frac{\pi a^2 \epsilon_0}{N_{\parallel} l}$ ^[4] (由于纤维的退磁因子和极化因子具有相同形式, 纤维的轴向极化因子和径向极化因子仍分别用 N_{\parallel} 和 N_{\perp} 表示). (8)式中的 q 为纤维上的电荷, 令纤维的电偶极矩为 $\mathbf{p} = p e^{j\omega t} \mathbf{e}_z$, 则有 $q = \frac{p}{l} e^{j\omega t}$. 将 V, R, C 和 q 代入(8)式并化简, 可得纤维的电偶极矩为

$$\mathbf{p} = \pi a^2 l \frac{\epsilon_0 \sigma}{N_{\parallel} \sigma + j\omega \epsilon_0} \bar{E} e^{j\omega t} \mathbf{e}_z. \quad (9)$$

设纤维内的平均极化强度为 $\mathbf{P} = P e^{j\omega t} \mathbf{e}_z$, 则由(3)式和电磁场的对偶性原理, 可知纤维内的电场为

$$\mathbf{E} = \left[\frac{J_0(kr)}{J_0(ka)} E_0 e^{j\omega t} - \frac{N_{\parallel}}{\epsilon_0} P e^{j\omega t} \right] \mathbf{e}_z,$$

则平均场强为

$$\bar{E} = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^a \left[\frac{J_0(kr)}{J_0(ka)} E_0 - \frac{N_{\parallel}}{\epsilon_0} P \right] r dr = \frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} E_0 - \frac{N_{\parallel}}{\epsilon_0} P.$$

将上式和 $\mathbf{p} = \pi a^2 l \mathbf{P}$ 代入(9)式并化简, 可得

$$\mathbf{P} = \frac{\epsilon_0 \sigma}{2N_{\parallel} \sigma + j\omega \epsilon_0} \frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} E_0 e^{j\omega t} \mathbf{e}_z.$$

由此可得纤维的轴向介电常数为

$$\epsilon_{//} = 1 + \frac{\sigma}{2N_{//}} \frac{2 J_1(ka)}{\sigma + j\omega\epsilon_0 ka J_0(ka)} \quad (10)$$

当微波电场的极化方向垂直于纤维并沿 x 轴方向时,与上述推导过程相同,可得纤维的径向介电常数^[3]为

$$\epsilon_{\perp} = 1 + \frac{\sigma}{2N_{\perp}} \frac{1}{\sigma + j2\omega\epsilon_0} \frac{\frac{1}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)}}{1 - \frac{1}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)}} \quad (11)$$

2.3 数值分析

利用(4),(7),(10)和(11)式编程,可以计算多晶铁纤维吸收剂的微波电磁参数.数值计算表明,多晶铁纤维吸收剂的微波电磁参数具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.例如,已知 5 GHz 频率处铁的本征磁导率为 $\mu_i = 7.5 - 9i$ ^[5],取 $\sigma = 1 \times 10^7$ S/m, $a = 0.5 \mu\text{m}$,当 $l = 3 \mu\text{m}$ 时,计算结果为

$$\begin{aligned} \mu_{//} &= 5.42 - 2.50i, & \mu_{\perp} &= 1.45 - 0.08i, \\ \epsilon_{//} &= 5.12 - 0.32i, & \epsilon_{\perp} &= 1.90 - 0.13i; \end{aligned}$$

当 $l = 20 \mu\text{m}$ 时,计算结果为

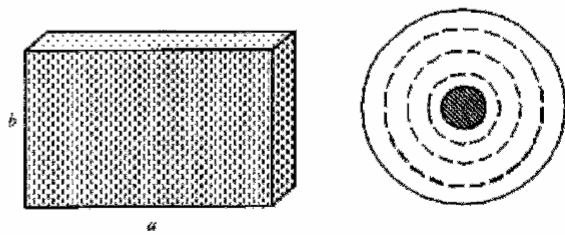
$$\begin{aligned} \mu_{//} &= 6.34 - 7.91i, & \mu_{\perp} &= 1.42 - 0.07i, \\ \epsilon_{//} &= 67.37 - 5.15i, & \epsilon_{\perp} &= 1.81 - 0.11i. \end{aligned}$$

这一结果主要是由外磁场作用下纤维内的退磁效应和退极化效应所决定.

3 实 验

3.1 实验方法

本文利用以 HP8510B 矢量网络分析仪为基础的材料电磁参数测试系统测试多晶铁纤维样品的微波电磁参数,测试样品包括纤维取向波导样品和纤维取向同轴样品.如图 1(a),在纤维取向波导样品中纤维均平行于 b 边取向分布,由于纤维平行于电场、垂直于磁场,通过测试该样品可得纤维的轴向介电常数和径向磁导率,即 $\epsilon'_{//}$, $\epsilon''_{//}$, μ'_{\perp} 和 μ''_{\perp} .如图 1(b),在纤维取向同轴样品中纤维呈环形分布,由于纤维垂直于电场、平行于磁场,通过测试该样品可得纤维的径向介电常数和轴向磁导率,即 ϵ'_{\perp} , ϵ''_{\perp} , $\mu'_{//}$ 和 $\mu''_{//}$.



(a) 纤维取向波导样品 (b) 纤维取向同轴样品
图 1 纤维取向测试样品示意图

3.2 实验及结果

将多晶铁纤维均匀分散于液态石蜡中,分别制备纤维取向波导样品和纤维取向同轴样品,样品编号分别为 8F# 和 9S#,样品中纤维的体积占空比均为 15%.制备纤维取向波导样品时,利用均匀单向恒定磁场引导纤维取向分布,制备纤维取向同轴样品时,利用环形恒定磁场引导纤维取向分布.图 2 为 9S# 样品断面的扫描电子显微镜(SEM)形貌图,由图 2 可知样品中纤维基本单方向取向分布.

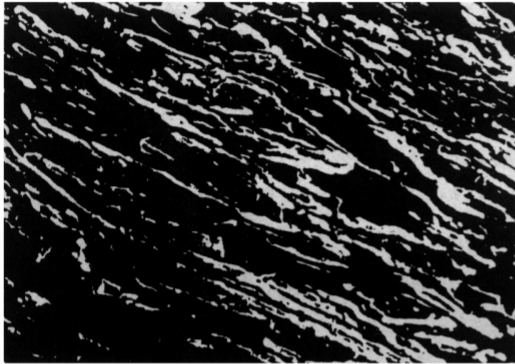


图 2 纤维取向同轴样品断面的 SEM 形貌图($\times 500$)

对 8F# 样品进行测试,获取参数 μ'_{\perp} , μ''_{\perp} , ϵ'_{\parallel} 和 ϵ''_{\parallel} ,对 9S# 样品进行测试,获取参数 μ'_{\parallel} , μ''_{\parallel} , ϵ'_{\perp} 和 ϵ''_{\perp} ,测试结果分别示于图 3(a)—(d).由图 3 可知,在整个 2.60—3.95 GHz 频率范围内,纤维轴向的电磁参数 μ'_{\parallel} , μ''_{\parallel} , ϵ'_{\parallel} 和 ϵ''_{\parallel} 均分别大于纤维径向电磁参数 μ'_{\perp} , μ''_{\perp} , ϵ'_{\perp} 和 ϵ''_{\perp} .如 3 GHz 频率处, μ'_{\parallel} 比 μ'_{\perp} 大 14.3%, μ''_{\parallel} 比 μ''_{\perp} 大 78.8%, ϵ'_{\parallel} 比 ϵ'_{\perp} 大 85.3%, ϵ''_{\parallel} 比 ϵ''_{\perp} 大 127.8%.可见多晶铁纤维吸收剂电磁参数的各向异性是客观存在的,且其轴向磁导

率 μ_{\parallel} 大于径向磁导率 μ_{\perp} , 轴向介电常数 ϵ_{\parallel} 大于径向介电常数 ϵ_{\perp} .

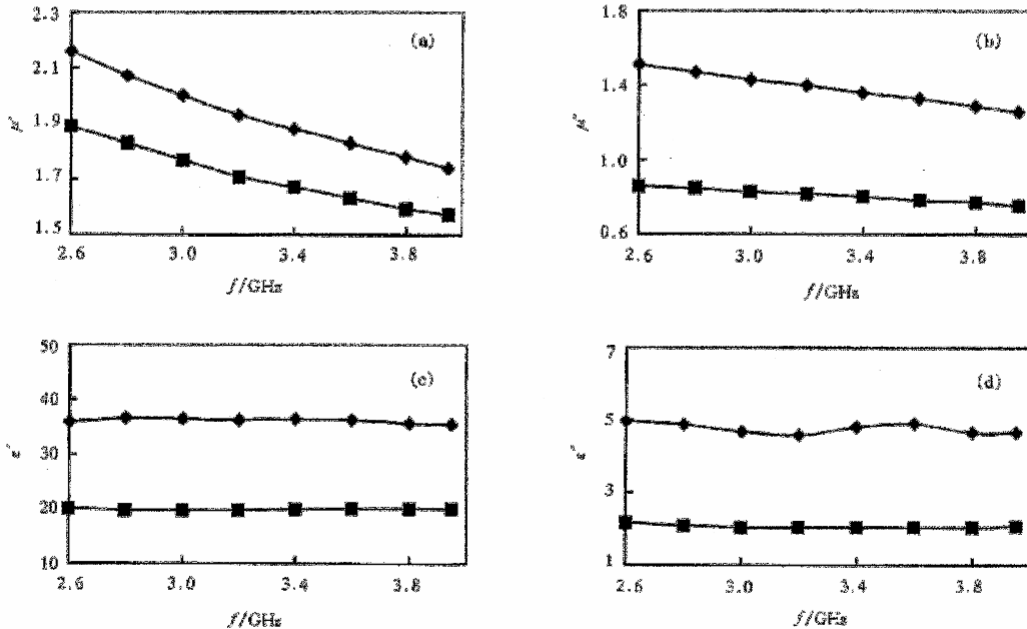


图 3 8F# 和 9S# 样品的电磁参数测试结果 ◆为纤维轴向, ■为纤维径向

4 结 论

理论分析和实验研究均表明,多晶铁纤维吸收剂的微波电磁参数具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.

电磁参数各向异性是多晶铁纤维吸收剂区别于铁氧体微粉吸收剂和金属微粉吸收剂的一个显著特点.如何在多晶铁纤维吸波材料的设计和应用中充分利用这一特点,尚待进一步研究.

- [1] C. E. Boyer, E. J. Borchers, R. J. Kou *et al.*, US Patent No. 5085931(1992).
- [2] 秦 嵘、陈 雷,宇航材料工艺,(1997)(4),17 [Qin Rong, Chen Lei, *Yuhang Caitiao Gongyi*, (1997)(4), 17(in Chinese)].
- [3] 吴明忠,博士学位论文(华中理工大学,武汉,1999) [Wu Ming-zhong, Ph. D. Thesis (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 1999)(in Chinese)].
- [4] 吴晓光,国外微波吸收材料(国防科技大学出版社,长沙,1992),第83页 [Wu Xiao-guang, Foreign Microwave Absorbing Materials (Defense University of Science and Technology Press, Changsha, 1992), p. 83(in Chinese)].
- [5] L. Olmedo, G. Chateau, C. Deleuze *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **10**(1993), 6992.

STUDY OF THE ANISOTROPY OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF POLYCRYSTALLINE IRON FIBER ABSORBER

HE HUA-HUI WU MING-ZHONG ZHAO ZHEN-SHENG

(Department of Electric Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 10 June 1999)

ABSTRACT

Based on Maxwell equations, the theoretical formulas of microwave electromagnetic parameters of polycrystalline iron fiber absorber are derived. The anisotropy of microwave electromagnetic parameters of polycrystalline iron fiber absorber is explained by use of numerical calculations. Some samples of fiber orientation have been produced and their electromagnetic parameters have been tested, the results confirm the anisotropy of electromagnetic parameters. Both of the theoretical and experimental results demonstrate that the axial permeability of polycrystalline iron fiber is greater than its radial permeability, and the axial permittivity of polycrystalline iron fiber is greater than its radial permittivity.

PACC; 7550