

蜂窝结构吸波材料等效电磁参数和吸波特性研究

何燕飞 龚荣洲 王 鲜 赵 强

(华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(2007 年 7 月 6 日收到, 2008 年 3 月 3 日收到修改稿)

根据强扰动理论, 在长波长近似条件下推导出蜂窝结构吸波材料等效介电常数和等效磁导率的计算公式. 电磁参数计算结果表明, 蜂窝结构吸波材料等效介电常数和等效磁导率均小于吸收层的介电常数和磁导率, 但等效介电常数的降幅更大, 从而使等效介电常数更接近于等效磁导率, 这正是吸波材料波阻抗匹配设计所需要的. 反射率计算结果表明, 不同的蜂窝高度, 吸收层对应一最优厚度, 使蜂窝结构吸波材料的反射率最低. 这些结果对于蜂窝结构吸波材料设计具有一定的意义.

关键词: 蜂窝结构吸波材料, 等效介电常数, 等效磁导率, 反射率

PACC: 7590, 4190

1. 引 言

随着高分辨率、高可靠性先进探测技术的发展和精确制导武器的出现, 未来战场上的各种武器系统面临着严峻的考验. 吸波技术作为提高武器系统生存和突防能力、提高总体作战效能的一种手段, 受到各军事大国的高度重视^[1-3].

模仿天然蜂巢的六边形蜂窝结构, 由于重量轻, 又有相当高的强度和刚度, 因而被广泛地用作夹层结构的夹芯^[4-7]. 蜂窝夹层结构的密度小, 可以明显地减轻结构重量; 它的导热系数低, 可以作为绝热和保温构件使用; 它的比强度和比刚度高, 可根据特殊的要求进行各向异性设计与制造. 将隐身技术与蜂窝结构相结合, 形成既能承载(作为结构部件)又能吸波(有效地减少雷达波的反射)的双重功能, 因此备受航空、航天等领域的关注.

美国 B-2 轰炸机的机身和机翼蒙皮是一种蜂窝型雷达吸波结构. 非金属蜂窝芯浸渍含有碳粉或其他吸波物质的树脂, 雷达波首先由具有损耗性能的芯格薄壁部分吸收, 剩余的雷达能量经过蜂格薄壁多次反射吸收, 展宽了吸收频带^[8]. 车孟刚等^[9]以多层蜂窝夹芯结构吸波材料为研究对象, 从理论分析和工程实验两个方面对这种结构吸波材料的电匹配设计及其实现的技术途径进行了研究. 结果表明, 电匹配设计是这种结构吸波材料研制过程中必不可少的重要环节. 在电匹配设计指导下制备的多层蜂窝

夹芯结构吸波材料的吸波性能有了显著提高, 材料具有良好的宽频吸波特性. 邢丽英、刘俊能^[10]对组成蜂窝夹芯结构浸渍胶液体系的基本成分(基料及吸收剂)及其制备工艺对吸收剂导电结构的影响进行研究, 并总结出了影响吸波性能的基本规律. 严格控制工艺参数是制备优质、稳定吸波材料的基础. 通过合理的选择浸渍胶液配方及制备工艺可使蜂窝夹层结构在增重较小的情况下获得较好的吸波性能. 高正平^[11]用传输线理论建立了蜂窝结构吸波材料的数学模型, 采用计算机辅助分析的方法, 讨论了在 4—18 GHz 频率范围内, 电磁波垂直入射时材料电磁参数不同对吸波性能的影响.

本文根据强扰动理论, 在长波长近似条件下忽略蜂窝杆间的耦合效应, 推导出蜂窝结构吸波材料等效介电常数和等效磁导率的计算公式. 对等效介电常数与等效磁导率的变化规律、蜂窝结构吸波材料的反射特性进行了研究.

2. 蜂窝结构吸波材料的理论模型

对于如图 1 所示的一致空间取向颗粒媒质, 根据强扰动理论^[12, 13], 这种材料的等效介电特性可用本构矩阵 $\overline{\overline{C}}_0$ 表示为

$$\overline{\overline{C}}_0 = \overline{\overline{C}}_g + j\omega \int_{\Omega} \overline{\overline{R}}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (1)$$

式中 $\overline{\overline{R}}(\mathbf{r})$ 是相关矩阵, $\overline{\overline{C}}_g$ 是媒质的静态本构矩阵. 当媒质中粒子的线度不能与电磁波波长

相比拟时,相关矩阵的作用可以忽略,因而有

$$\|\overline{C_0}\| \approx \|\overline{C_g}\|. \quad (2)$$

(2)式称为长波长近似.通常 $\|\overline{C_g}\|$ 可以展开为

$$\|\overline{C_g}\| = \begin{bmatrix} \overline{\epsilon_g} & 0 \\ 0 & \overline{\mu_g} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假如媒质由 N 种成分组成,则 $\overline{\epsilon_g}$ 和 $\overline{\mu_g}$ 分别由下列公式确定:

$$\sum_{i=1}^N v_i (\overline{\epsilon_i} - \overline{\epsilon_g} \mathbf{I} \overline{\epsilon_g} + \overline{L_i} (\overline{\epsilon_i} - \overline{\epsilon_g}))^{-1} = 0, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N v_i (\overline{\mu_i} - \overline{\mu_g} \mathbf{I} \overline{\mu_g} + \overline{L_i} (\overline{\mu_i} - \overline{\mu_g}))^{-1} = 0, \quad (5)$$

式中 $\overline{\epsilon_i}$, $\overline{\mu_i}$, v_i , $\overline{L_i}$ 分别是第 i 种单质的介电常数、磁导率、占空比、极化张量.在主轴坐标系中, $\overline{\epsilon_g}$, $\overline{\mu_g}$, $\overline{L_i}$, $\overline{\epsilon_i}$, $\overline{\mu_i}$ 均可写成对角张量

$$\overline{A} = \begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & A_z \end{bmatrix},$$

式中 $A = \epsilon_g, \mu_g, L_i, \epsilon_i, \mu_i$.

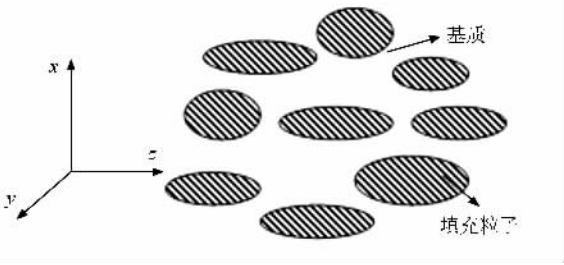


图1 一致空间取向颗粒媒质示意图

考虑纤维状材料,其结构如图2所示.在这种结构中,填充粒子可以等效成半径很小、轴向长度很长的圆柱.极化因子分别为 $L_{ix} = 1/2, L_{iy} = 0, L_{iz} = 1/2$.由于填充粒子一致取向,使得基质的极化因子与填充粒子接近.因此,由(4)式可得

$$\sum_{i=1}^N v_i \begin{bmatrix} \frac{\chi(\epsilon_{ix} - \epsilon_{gx})}{\epsilon_{ix} + \epsilon_{gx}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\epsilon_{iy} - \epsilon_{gy}}{\epsilon_{gy}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\chi(\epsilon_{iz} - \epsilon_{gz})}{\epsilon_{iz} + \epsilon_{gz}} \end{bmatrix} = 0. \quad (6)$$

从(6)式可以得到

$$\sum_{i=1}^N \frac{v_i(\epsilon_{ix} - \epsilon_{gx})}{\epsilon_{ix} - \epsilon_{gx}} = 0,$$

$$\epsilon_{gy} = \sum_{i=1}^N v_i \epsilon_{iy},$$
$$\sum_{i=1}^N \frac{v_i(\epsilon_{iz} - \epsilon_{gz})}{\epsilon_{iz} + \epsilon_{gz}} = 0. \quad (7)$$

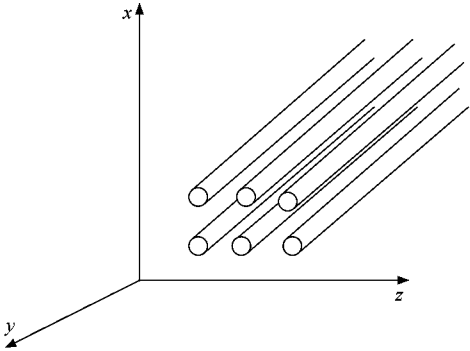


图2 一致取向纤维状材料结构示意图

对于如图3所示的蜂窝状结构吸波材料,其形状类似于纤维,可以将材料中的蜂窝形状用圆柱形代替来计算其等效介电常数.值得说明的是,在上述公式中只要把 $\overline{\epsilon_i}$ 换成对应的 $\overline{\mu_i}$ 就可以用来计算等效磁导率.

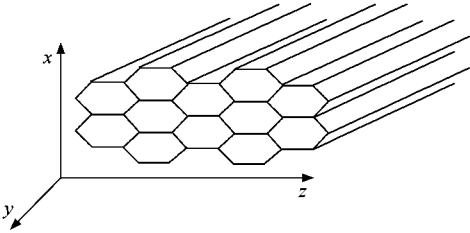


图3 蜂窝状材料结构示意图

3. 蜂窝结构吸波材料的等效电磁参数

每一个六角形蜂窝孔可以近似地看作一个特殊的圆波导,如果蜂窝状结构的壁厚为 $2t$,蜂窝孔之间的距离为 $2x$ (图4),可以求出空气和骨架材料的占空比分别为

$$v_0 = \left(1 - \frac{t}{x}\right)^2, \quad (8)$$

$$v_b = \frac{t}{x} \left(2 - \frac{t}{x}\right). \quad (9)$$

将(8)(9)式及空气的相对介电常数1和骨架的相对介电常数 ϵ_b 代入(7)式,可以求出平行和垂直于蜂窝轴线的介电常数

$$\epsilon_{//} = \frac{t}{x} \left(2 - \frac{t}{x} \right) \epsilon_b + \left(1 - \frac{t}{x} \right)^2 ,$$
$$\epsilon_{\perp} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\left(1 - \frac{t}{x} \right)^2 - \frac{t}{x} \left(2 - \frac{t}{x} \right) \right] (1 - \epsilon_b) + \sqrt{\left[\left(1 - \frac{t}{x} \right)^2 - \frac{t}{x} \left(2 - \frac{t}{x} \right) \right]^2 (1 - \epsilon_b)^2 + 4 \epsilon_b} \right\} .$$

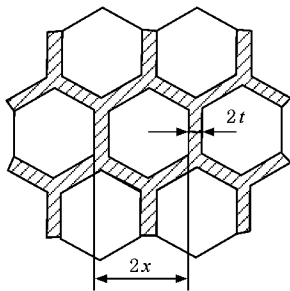


图 4 蜂窝状材料结构截面图

如果把蜂窝材料制成结构型吸波材料,吸收剂涂敷在如图 5(a)所示的蜂窝孔格的内表面,结果

等效为如图 5(b)所示的圆波导.对于涂敷吸收剂的蜂窝结构吸波材料等效电磁参量的计算可分两步进行.首先求出吸收层包围的空气柱介电常数,当吸收层的厚度为 d 时,空气和吸收层的占空比分别为

$$v_0 = \left(1 - \frac{d}{x-t} \right)^2 , \tag{10}$$

$$v_a = \frac{d}{x-t} \left(2 - \frac{d}{x-t} \right) . \tag{11}$$

将(10)(11)式及空气的相对介电常数 1 和吸收剂的相对介电常数 ϵ_a 代入(7)式,得到吸收层包围的空气柱介电常数

$$\epsilon_p = \frac{d}{x-t} \left(2 - \frac{d}{x-t} \right) \epsilon_a + \left(1 - \frac{d}{x-t} \right)^2 , \tag{12}$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{2} \left\{ \left[\left(1 - \frac{d}{x-t} \right)^2 - \frac{d}{x-t} \left(2 - \frac{d}{x-t} \right) \right] (1 - \epsilon_a) + \sqrt{\left[\left(1 - \frac{d}{x-t} \right)^2 - \frac{d}{x-t} \left(2 - \frac{d}{x-t} \right) \right]^2 (1 - \epsilon_a)^2 + 4 \epsilon_a} \right\} . \tag{13}$$

(12)(13)式中的 ϵ_p 和 ϵ_r 分别为平行蜂窝轴线方向的介电常数和垂直蜂窝轴线方向的介电常数.然后将吸收层包围的空气柱与骨架等效于两相媒质,它们的体积占空比仍表示为(8)(9)两式.将

上述结果代入(7)式后,就可以得到三层蜂窝结构吸波材料(空气、吸收剂、骨架)的轴向(平行蜂窝轴线方向)和横向(垂直蜂窝轴线方向)电磁参量为

$$\epsilon_{//} = \frac{t}{x} \left(2 - \frac{t}{x} \right) \epsilon_b + \left(1 - \frac{t}{x} \right)^2 \epsilon_p , \tag{14}$$

$$\epsilon_{\perp} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\left(1 - \frac{t}{x} \right)^2 - \frac{t}{x} \left(2 - \frac{t}{x} \right) \right] (\epsilon_r - \epsilon_b) + \sqrt{\left[\left(1 - \frac{t}{x} \right)^2 - \frac{t}{x} \left(2 - \frac{t}{x} \right) \right]^2 (\epsilon_r - \epsilon_b)^2 + 4 \epsilon_r \epsilon_b} \right\} . \tag{15}$$

(14)(15)式即为涂敷了吸收剂的蜂窝结构吸波材料等效介电常数的计算公式.将(14)(15)式中

的 ϵ 换为相应的 μ ,就可以得到等效磁导率的计算公式.

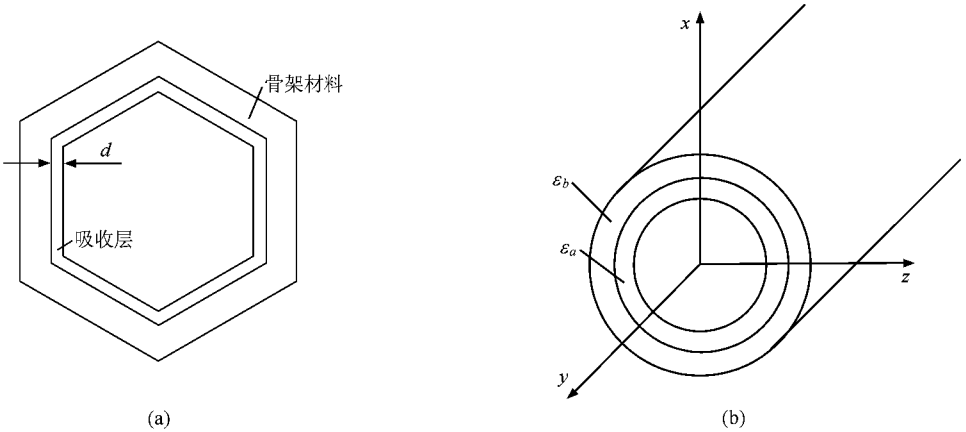


图 5 六角形蜂窝孔格及与其对应的特殊圆波导 (a)六角蜂窝孔格 (b)特殊圆波导

4. 数值模拟

4.1. 等效介电常数与等效磁导率

若基体材料和吸收剂的介电常数分别为 $\epsilon_b = 4.0$ 和 $\epsilon_a = 12.0 - j1.0$,基体材料和吸收剂的磁导率

分别为 $\mu_b = 1$ 和 $\mu_a = 3.0 - j1.0$,当 $t/x = 0.1$ ($t = 0.5\text{ mm}$, $x = 5.0\text{ mm}$) , $d/(x - t) = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40$ 时 ,采用(12)—(15)式 ,运行自制编程软件 ,计算出蜂窝结构吸波材料等效电磁参量随吸收层厚度的变化 ,结果如表 1 所列 .

表 1 蜂窝结构吸波材料等效介电常数和等效磁导率随吸收层厚度的变化

$d/(x - t)$	$\epsilon_{//}$	ϵ_{\perp}	$\mu_{//}$	μ_{\perp}
0.05	$2.4387 - j0.0790$	$1.4827 - j0.0036$	$1.1580 - j0.0790$	$1.0890 - j0.0219$
0.10	$3.2629 - j0.1539$	$1.7458 - j0.0103$	$1.3078 - j0.1539$	$1.1840 - j0.0498$
0.15	$4.0425 - j0.2248$	$2.0821 - j0.0227$	$1.4495 - j0.2248$	$1.2838 - j0.0838$
0.20	$4.7776 - j0.2916$	$2.5091 - j0.0443$	$1.5832 - j0.2916$	$1.3869 - j0.1235$
0.25	$5.4681 - j0.3544$	$3.0363 - j0.0790$	$1.7088 - j0.3544$	$1.4919 - j0.1680$
0.30	$6.1141 - j0.4131$	$3.6558 - j0.1278$	$1.8262 - j0.4131$	$1.5970 - j0.2163$
0.35	$6.7155 - j0.4678$	$4.3400 - j0.1876$	$1.9355 - j0.4678$	$1.7009 - j0.2670$
0.40	$7.2724 - j0.5184$	$5.0517 - j0.2527$	$2.0368 - j0.5184$	$1.8022 - j0.3185$

从表 1 可知 ,随着吸收层厚度的增加 ,蜂窝结构吸波材料等效电磁参量 $\epsilon_{//}$, $\mu_{//}$, ϵ_{\perp} , μ_{\perp} 均随之增加 .与吸收层的电磁参量 $\epsilon_a = 12.0 - j1.0$, $\mu_a = 3.0 - j1.0$ 相比较 ,蜂窝结构吸波材料等效电磁参量(等效介电常数和等效磁导率)均变小 ,其中等效介电常数的降幅更大 ,与等效磁导率的值更为接近 .这正是蜂窝结构吸波材料波阻抗匹配设计所需要的^[2 ,14—17] .

阻抗匹配设计是指创造特殊的边界条件使入射电磁波在材料介质表面的反射系数 R 最小(理想情

况为 $R = 0$) ,从而使电磁波最大程度地进入材料内部而被损耗吸收 .考虑吸波材料为半无限均匀介质 ,按 Fresnel 理论^[2 ,16—18]可导出电磁波垂直入射时的反射系数

$$R = 20\lg \left| \frac{z_c - z_0}{z_c + z_0} \right| ,$$

式中 z_c 为吸波介质特征阻抗 ,

$$z_c = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} .$$

无反射($R = 0$)时 ,吸波材料与自由空间的波阻抗相

匹配,匹配条件为 $z_c = z_0$,亦即 $\mu_r = \epsilon_r$.微波吸收材料应尽可能满足 $\mu_r = \epsilon_r$,但在宽频段范围内 $\mu_r = \epsilon_r$ 的材料是不存在的.因此,为了达到阻抗匹配和反射系数最小化,应尽量满足微波频率下 ϵ_r 越小,而 μ_r 越大,使 ϵ_r 接近 μ_r ,这样才能使吸波材料的电磁

波反射系数尽可能最小.

4.2. 反射率

由文献 [19, 20] 可知,单轴各向异性吸波材料对垂直入射电磁波的反射系数公式如下:

$$R = 20\lg \left| \frac{(\sqrt{\epsilon_{\perp}} + \sqrt{\mu_{\perp}}) + (\sqrt{\epsilon_{\perp}} - \sqrt{\mu_{\perp}}) e^{j2k_0 h \sqrt{\mu_{\perp} \epsilon_{\perp}}}}{(\sqrt{\epsilon_{\perp}} - \sqrt{\mu_{\perp}}) + (\sqrt{\epsilon_{\perp}} + \sqrt{\mu_{\perp}}) e^{j2k_0 h \sqrt{\mu_{\perp} \epsilon_{\perp}}}} \right|, \tag{16}$$

式中 h 为蜂窝结构吸波材料厚度(区别于吸收层厚度 d), $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, $\omega = 2\pi f$,其中 μ_0 , ϵ_0 和 f 分别为真空磁导率、介电常数和入射电磁波频率.(16)式表明,反射率只取决于横向电磁参量 ϵ_{\perp} 和 μ_{\perp} ,与轴向电磁参量 ϵ_{\parallel} 和 μ_{\parallel} 无关.

采用表 1 中的蜂窝结构吸波材料等效电磁参量数据, $d/(x-t) = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40$ 相应于 $d = 0.225, 0.45, 0.675, 0.90, 1.125, 1.35, 1.575, 1.80$, $f = 3\text{ GHz}$,对(16)式进行编程运算,计算得到蜂窝结构吸波材料(蜂窝轴向垂直向上)厚度 $h = 0.10, 0.25, 0.50\text{ m}$ 时反射率 R 随吸收层厚度 d 的变化关系,结果如图 6 所示.

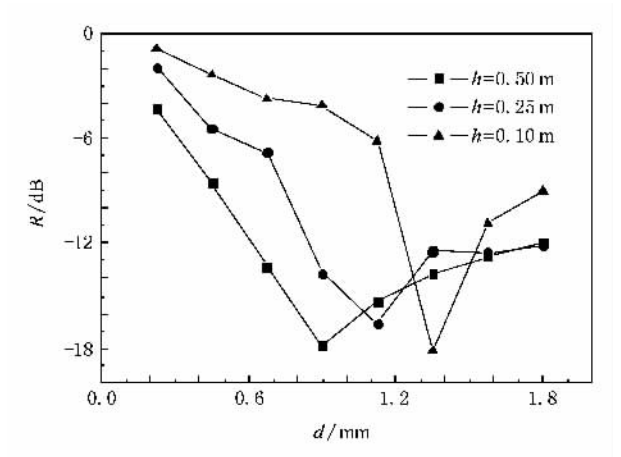


图 6 蜂窝结构吸波材料反射率 R 随吸收层厚度 d 的变化关系

图 6 表明,对应于不同的蜂窝结构吸波材料厚度 h ,吸收层存在一最优厚度 d ,使反射率 R 最低.当 $h = 0.10\text{ m}$, $d = 1.35\text{ mm}$ 时, $R = -18.2\text{ dB}$;当 $h = 0.25\text{ m}$, $d = 1.125\text{ mm}$ 时, $R = -16.6\text{ dB}$;当 $h = 0.50\text{ m}$, $d = 0.9\text{ mm}$ 时, $R = -17.9\text{ dB}$.这些结果对于蜂窝结构吸波材料的设计,无疑具有一定的意义.

5. 结 论

根据强扰动理论,在长波长近似条件下忽略蜂窝杆间的相互影响,推导出蜂窝结构吸波材料等效介电常数、等效磁导率的计算公式.数值模拟结果表明,等效介电常数、等效磁导率随吸收层厚度的增加而增加.在所模拟的范围内,蜂窝结构吸波材料的等效电磁参量均小于吸收层的电磁参量,其中等效介电常数的下降幅度更大,从而使等效介电常数更接近于等效磁导率.这正是吸波材料波阻抗匹配设计所需要的.

对单轴各向异性吸波材料垂直入射电磁波的反射系数公式进行编程运算,计算结果表明,对应于不同的蜂窝结构吸波材料厚度 h ,吸收层存在一最优厚度 d ,使反射率 R 最低.这些结果对于蜂窝结构吸波材料的设计,具有一定的意义.

[1] Zhang S Q, Shi Y L, Huang C G, Lian C C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1231 (in Chinese) [张拴勤、石云龙、黄长庚、连长春 2007 物理学报 **56** 1231]

[2] 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]

[3] Cui X D, Liu S H, Zhao Y B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5764 (in Chinese) [崔晓冬、刘顺华、赵彦波 2006 物理学报 **55** 5764]

[4] Yam L H, Yan Y J, Cheng L, Jiang J S 2003 *Smart Mater. Struct.* **12** 661

[5] Gao Z P, Luo Q 2003 *J. Electron. Sci. Techn. China* **32** 389

[6] Takahashi Y, Suzuki S 2001 *Electron. Commun. Jpn.* **84** 24

[7] Vaidya U K, Kamath M V 1998 *J. Reinf. Plast. Comp.* **17** 819

[8] Mo M F, Liu J N 1992 *J. Aeron. Mater.* **12** 71 (in Chinese) [莫美芳、刘俊能 1992 航空材料学报 **12** 71]

- [9] Che M G , Yang J S 1989 *Aeros . Mater . Techn .* **4—5** 74 (in Chinese) [车孟刚、杨建生 1989 宇航材料工艺 **4—5** 74]
- [10] Xing L Y , Liu J N 1993 *J . Aeron . Mater .* **13** 44 (in Chinese) [邢丽英、刘俊能 1993 航空材料学报 **13** 44]
- [11] Gao Z P 1989 *Aeros . Mater . Techn .* **4—5** 71 (in Chinese) [高正平 1989 宇航材料工艺 **4—5** 71]
- [12] Jia B F , Liu S Z , Lin W G 1990 *Acta Aeron . Astron . Sin . A* **11** 480 (in Chinese) [贾宝富、刘述章、林为干 1990 航空学报 **A 11** 480]
- [13] Jia B F 1989 *Ph . D . Dissertation* (Chengdu : University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [贾宝富 1989 博士学位论文(成都 : 电子科技大学)]
- [14] Zhao B L 1992 *Acta Aeron . Astron . Sin . A* **13** 662 (in Chinese) [赵伯琳 1992 航空学报 **A 13** 662]
- [15] He Y F , Gong R Z , Nie Y , He H H , Zhao Z S 2005 *J . Appl . Phys .* **98** 084903
- [16] Blehovskih L M 1960 *Wave in Delamination Media* (Beijing : Science Press) p5 (in Chinese) [布列霍夫斯基赫 JI M 1960 分层介质中的波(中译本) 北京 : 科学出版社 第 5 页]
- [17] Shimizu Y 1979 *IEEE Trans . EC E* **62** 274
- [18] Qin B , Qin R H , Jin C J 1997 *J . Harbin Inst . Techn .* **29** 115 (in Chinese) [秦 柏、秦汝虎、金崇君 1997 哈尔滨工业大学学报 **29** 115]
- [19] Wu M Z 2000 *Ph . D Dissertation* (Wuhai : Huazhong University of Science and Technology) p104 (in Chinese) [吴明忠 2000 博士学位论文(武汉 : 华中科技大学) 第 104 页]
- [20] Wu M Z , Zhao Z S , He H H 1998 *J . Huazhong Univ . Sci . Techn .* **26** 81 (in Chinese) [吴明忠、赵振声、何华辉 1998 华中理工大学学报 **26** 81]

Study on equivalent electromagnetic parameters and absorbing properties of honeycomb-structured absorbing materials

He Yan-Fei Gong Rong-Zhou Wang Xian Zhao Qiang

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

(Received 6 July 2007 ; revised manuscript received 3 March 2008)

Abstract

Based on strong interference theory and the assumption of long wave band , formulae for computing the equivalent electromagnetic parameters of honeycomb-structured absorbing materials are presented . It is pointed out that the equivalent permeability and permittivity of honeycomb-structured absorbing materials are smaller than those of the absorbing layer , but the equivalent permittivity is reduced more significantly , so the equivalent permeability is more close to the equivalent permittivity . This is helpful for the design of impedance matching of absorbing materials . It is indicated by reflectivity results that the absorbing layer should have an optimum thickness to make the reflectivity minimal for honeycomb-structured absorbing materials with different height of honeycombs . These results are useful for design of honeycomb-structured absorbing materials .

Keywords : honeycomb-structured absorbing materials , equivalent permittivity , equivalent permeability , reflectivity

PACC : 7590 , 4190