

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.021

自由空间法分析介质蜂窝等效复介电常数^{*}

张云祥^{1, **}, 赵志钦¹, 史维光¹, 王茜²

(1. 电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731; 2. 济南特种结构研究所, 济南 250023)

摘要:根据自由空间法介质材料介电常数测试原理,采用商用电磁场仿真软件给出了介质蜂窝材料等效复介电常数的分析方法,计算出了特定材料、格孔周期蜂窝材料的等效复介电常数。为验证方法的正确性,对等效介电常数的平板和相应的蜂窝的透射反射系数的幅度相位进行了比较,两者吻合良好。通过对宽带范围内蜂窝等效介电常数的计算表明,介质蜂窝具有微小的色散效应,随着频率增高,蜂窝的相对介电常数、损耗正切略微减小;蜂窝的磁介电常数接近为1,磁损耗正切接近为0。

关键词:介质蜂窝;复介电常数;自由空间法;周期性边界条件

中图分类号: TN804 ; **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)11-1518-05

Analysis of Dielectric Honeycombs Effective Complex Permittivity Using Free Space Method

ZHANG Yun-xiang¹, ZHAO Zhi-qin¹, SHI Wei-guang¹, WANG Qian²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. The Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite AVIC, Ji'nan 250023, China)

Abstract: According to the theory of adopting free space method to measure the dielectric permittivity, the commercial electromagnetic simulation software is used to analyze dielectric honeycomb effective complex permittivity. A certain material and geometry dielectric honeycomb effective complex permittivity is calculated. The validity of the idea is demonstrated by comparing the simulation scattering matrix of the real honeycomb and effective dielectric panel board. Good agreement is achieved. The calculation of wide band dielectric honeycomb effective complex permittivity shows that the material has a little dispersion property, the permittivity is increasing by frequency slowly and the mu is very close to 1, the magnetic tangent delta is close to 0.

Key words: dielectric honeycomb; complex permittivity; free space method; periodic boundary

1 引言

芳纶纸蜂窝材料具有低损耗、介电常数低、容重轻、比刚度、比强度高、良好的隔热性、阻燃性,良好的机加工特性,是一种理想的机载、弹载雷达罩芯层透波材料。除了在纯承力、隔热结构件外,介质蜂窝材料在天线罩设计领域、吸波材料、频率选择表面等领域具有非常广泛的应用。在对雷达罩电性能的设计过程中,材料的介电常数是天线罩必须的基本条

件之一^[1-3]。由于蜂窝是一种周期性人工介质材料,格孔壁非常薄,在微米数量级,格孔周期在毫米数量级,在电磁性能设计仿真过程中如果对其实体建模必然会大大降低计算效率,增加计算内存资源,现有的计算机性能无法满足实际工程设计需要。因此,一般而言在实际天线罩工程设计过程中,首先提取蜂窝材料的等效介电常数,把周期性的蜂窝结构等效为一种均匀介质。蜂窝格孔的结构参数决定着

* 收稿日期:2013-07-01;修回日期:2013-09-25 Received date:2013-07-01; Revised date:2013-09-25

基金项目:国防预研基金项目(9140A07010812DZ02081)

Foundation Item: The National Defense Pre-Research Foundation of China (9140A07010812DZ02081)

** 通讯作者:yxzhangwuli@163.com Corresponding author:yxzhangwuli@163.com

对蜂窝的力学、热学、电磁性能,研究介质蜂窝材料格孔参数与蜂窝等效介电常数的关系对蜂窝材料的设计具有重要的意义。

传统的蜂窝设计(包括其他类似的多孔结构人工合成材料,如多孔氮化硅等)一般采用经验公式的方法来预估蜂窝的介电常数^[4-5],然后通过测试来最终确定该材料的实际复介电常数值。这种方法相对简单,不是严格的理论解,存在较大误差。随着电磁数值计算理论的发展,时域有限差分法、有限元法、准静态法^[6-8]等都可应用于人工材料等效介电常数的预估,这类方法计算精度较高,但这些算法相对复杂难以短时间内掌握。采用成熟的仿真软件如 ANSYS 公司的 HFSS、CST 公司的 CST 微波工作室以及 EMSS 公司的 FEKO 等,可以克服上述缺点^[9-10]。文献[9]中基于 ANSYS 公司的 EMG 软件采用半自由空间法分析了蜂窝的等效介电常数,半自由空间的介电常数计算公式为一超越方程,从而给复介电常数计算带来不便。文献[11]采用强扰动理论对蜂窝吸波材料的等效复介电常数进行了分析但是忽略了蜂窝杆间的耦合效应。文献[12]采用均质化方法对蜂窝吸波材料等效介电常数进行分析,难以反映具体结构参数对材料造成的影响。本文借助 ANSYS 公司的有限元电磁分析工具 HFSS 对蜂窝的介电常数解析分析。此外,采用自由空间仿真的方法来提取蜂窝材料的等效介电常数,避免了自由空间测试过程中由于背景电平、材料边缘绕射带来的测试误差。

本文其余内容安排如下:第 2 节介绍自由空间法介电常数测试理论,第 3 节给出蜂窝结构的仿真流程,第 4 节采用自由空间法介电常数测试方法,根据仿真结果给出不同蜂窝结构参数对蜂窝等效介电常数的影响。

2 自由空间法介电常数测试理论^[13]

在自由空间中,假设材料的复介电常数为

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_r(1 - j\operatorname{tg}\delta) \\ \mu = \mu_r(1 - j\operatorname{tg}\delta_\mu) \end{cases} \quad (1)$$

如图 1 所示,假设垂直入射的线极化波的反射和传输系数分别为 S_{11} 和 S_{21} ,则有

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \\ S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, Γ 和 T 分别为介质材料在与空气界面上的传输反射系数。

$$\begin{cases} \Gamma = \frac{Z_{sn} - 1}{Z_{sn} + 1} \\ T = e^{-\gamma d} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Z_{sn} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \\ \gamma = \gamma_0 \sqrt{\varepsilon \mu} \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

求解上面方程可得

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (6)$$

其中:

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (7)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (8)$$

正负号选取由 $|\Gamma| < 1$ 确定。

$$\gamma = -\ln T/d \quad (9)$$

则

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\gamma(1 - \Gamma)}{\gamma_0(1 + \Gamma)} \\ \mu = \frac{\gamma_0(1 + \Gamma)}{\gamma(1 - \Gamma)} \end{cases} \quad (10)$$

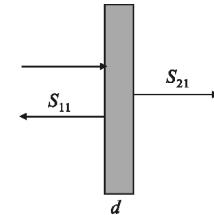


图 1 介质材料示意图
Fig. 1 The geometry of dielectric

3 蜂窝结构的仿真

蜂窝材料为一种周期性人工介质结构,如图 2 所示,需要采用周期性边界条件进行仿真分析。目前主流的三维电磁仿真软件如 HFSS、CST、FEKO 等都支持周期性边界条件分析。本文采用 HFSS 有限元电磁分析软件进行仿真,对蜂窝的六边形结构进行分析可知其周期性单元,如图 3 所示。假设蜂窝格孔厚度为 t ,边长为 a ,则其元胞周期边长为 $\sqrt{3}a$ 。

夹角为 60° 的平行四边形。

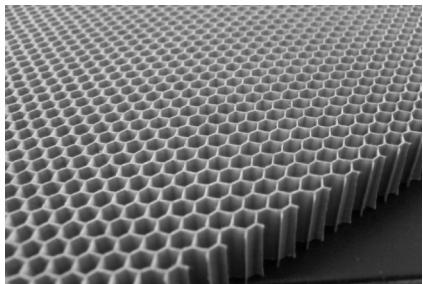


图 2 蜂窝的实际结构

Fig. 2 The real dielectric honeycomb structure

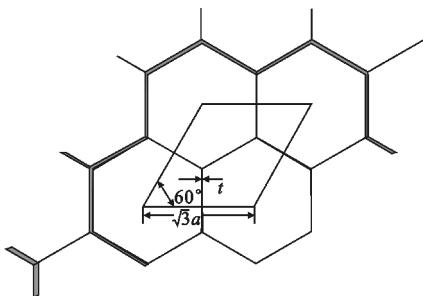


图 3 蜂窝的元胞

Fig. 3 The unit cell of honeycomb

在仿真软件中设置入射波为垂直入射, 入射参考面为蜂窝上下入射表面, 则可以仿真计算出各频点的散射矩阵参数 S_{11} 和 S_{21} 。

4 计算实例与方法验证

为验证方法的正确性, 本文对实际应用的蜂窝结构等效介电常数进行了计算。芳纶纸的介电常数为 $\epsilon=4(1-j0.03)$, 蜂窝格孔 $a=2.75\text{ mm}$, 格孔厚度 $t=0.08\text{ mm}$, 蜂窝介质厚度 $d=2\text{ mm}$ 。蜂窝周期如图 4 所示, 则通过仿真其 S 参数如图 5 和图 6 所示, 采用第 2 节给出的计算公式则可求得蜂窝的等效介电常数如图 7~10 所示。

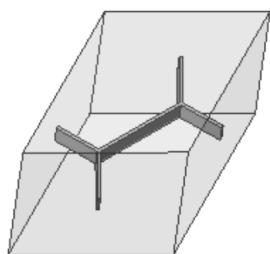


图 4 HFSS 蜂窝周期模型

Fig. 4 The periodic honeycomb simulation model in HFSS

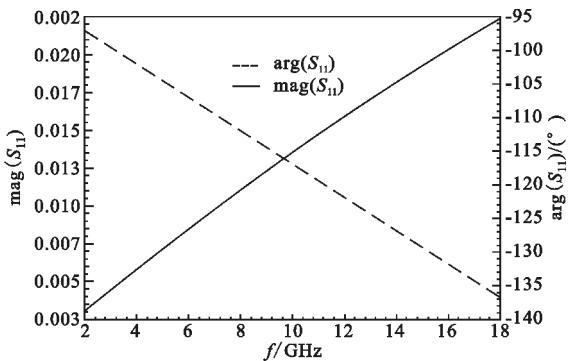


图 5 2 mm 厚蜂窝 S_{11} 仿真结果

Fig. 5 The S_{11} of 2 mm thickness dielectric honeycomb

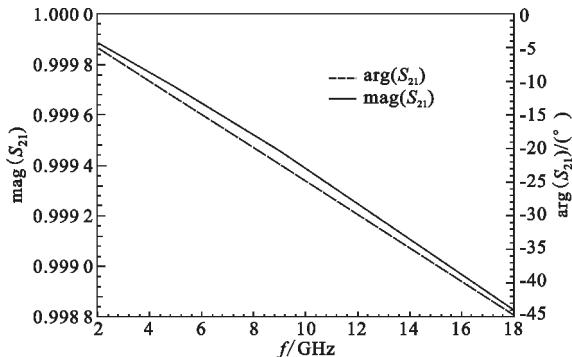


图 6 2 mm 厚蜂窝 S_{21} 仿真结果

Fig. 6 The S_{21} of 2 mm thickness dielectric honeycomb

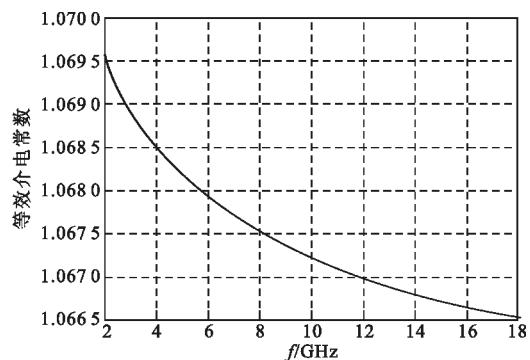


图 7 蜂窝等效介电常数

Fig. 7 The effective relative dielectric constant of honeycomb

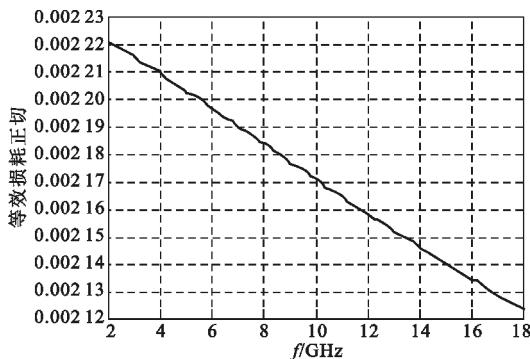


图 8 蜂窝等效损耗正切

Fig. 8 The effective loss tangent of honeycomb

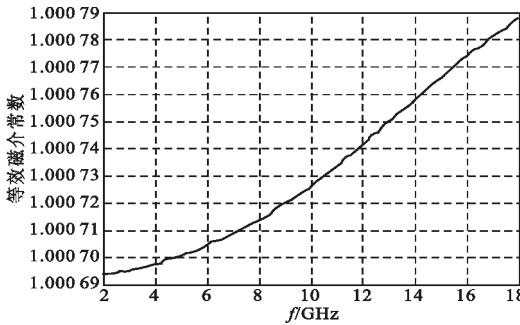


图9 蜂窝等效磁介电常数

Fig.9 The effective relative magnetic dielectric constant of honeycomb

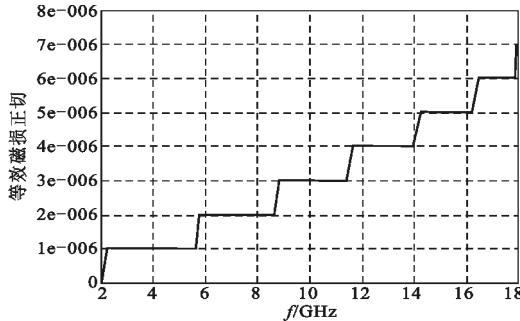
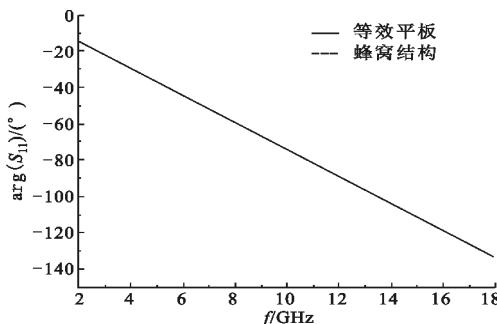
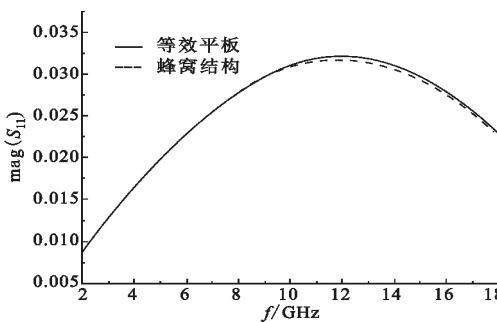
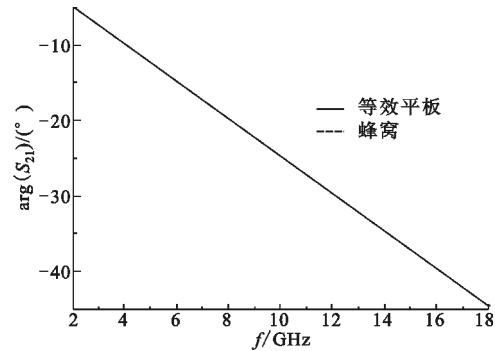
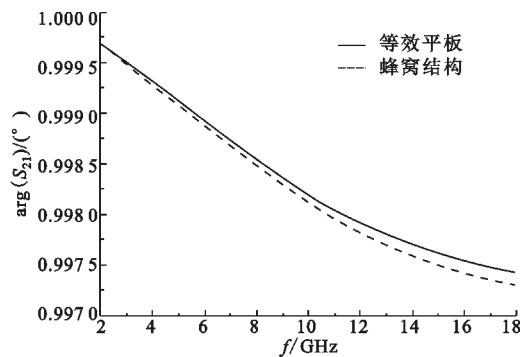


图10 蜂窝等效磁损耗正切

Fig.10 The effective magnetic loss tangent of honeycomb

为验证方法的正确性,本文将同样材料即6 mm厚度的蜂窝和采用相应计算得到的等效介电常数的介质平板分别进行仿真,平面波入射方向为垂直入射,比较其相应S参数,结果如图11~14所示。

图11 S₁₁相位比较Fig.11 The comparison of S_{11} phase图12 S₁₁幅度比较Fig.12 The comparison of S_{11} magnitude图13 S₂₁相位比较Fig.13 The comparison of S_{21} phase图14 S₂₁幅度比较Fig.14 The comparison of S_{21} magnitude

通过比较可见两者吻合良好,从而验证了本文方法的正确性。

5 结 论

本文给出了一种通过仿真计算蜂窝等效介电常数的方法,通过对等效平板与蜂窝实体结构的透射反射性能计算结果的验证两者吻合良好,证明了分析结果的正确性。通过对蜂窝宽带等效复介电常数的计算表明,在不考虑蜂窝材料色散的情况下,由蜂窝结构引起的色散比较微弱。同时,该介质蜂窝材料为非磁性材料。介质蜂窝材料是一种人工材料,通过文中给出的分析步骤可知,要想准确得到不同蜂窝结构的等效复介电常数,先决条件是要已知构成格孔结构材料的性能参数。

参考文献:

- [1] 程小炼,王宜,郑炽嵩,等. Nomex 纸和纸板的电气性能及应用研究[J]. 造纸科学与技术, 2005, 24(5):26~29.
CHENG Xiao-lian, WANG Yi, ZHENG Chi-song, et al. The electrical properties and their application of Nomex paper and pressboard[J]. Paper Science & Technology, 2005, 24(5):26~29. (in Chinese)
- [2] 宫兆合,梁国正,卢婷利,等. 高性能机载雷达罩用 Nomex

- 蜂窝的研制[J]. 工程塑料应用, 2003, 31(6): 36–38.
 GONG Zhao-he, LIANG Guo-zheng, LU Ting-li, et al. Development of the nomex honeycomb for high-performance airborne radome [J]. Engineering Plastics Application, 2003, 31(6): 36–38. (in Chinese)
- [3] 陆赵情, 张美云, 王志杰, 等. 芳纶纸基复合材料研究进展及关键技术[J]. 宇航材料工艺, 2006(6): 5–8.
 LU Zhao-qing, ZHANG Mei-yun, WANG Zhi-jie, et al. Progress and Technological Key of High Performance Aramid Paper Reinforced Composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2006(6): 5–8. (in Chinese)
- [4] Sareni B, Krähenbühl L, Beroual A, et al. Effective dielectric constant of random composite materials [J]. Journal of Application Physical, 1997, 81(5): 2375–2383.
- [5] Sihvola A, Lindell I. Dielectric Properties of Heterogeneous Materials [J]. Progress in Electromagnetic Research, 1992(6): 101–151.
- [6] Kärkkäinen K K, Sihvola A H, Nikoskinen K I. Effective Permittivity of Mixtures: Numerical Validation by the FDTD Method [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2000, 38(3): 1303–1308.
- [7] Feng Wu, Whites K W. Quasi-Static Effective Permittivity of Periodic Composites Containing Complex Shaped Dielectric Particles [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(8): 1174–1182.
- [8] Myroshnychenko V, Brosseau C. Finite-element method for calculation of the effective permittivity of random inhomogeneous media [J]. Physical Review E, 2005, 7(1): 1–16.
- [9] 马连华. 蜂窝夹芯材料力学与介电性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
 MA Lian-hua. Study on mechanical and dielectric properties of honeycomb core materials [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [10] Sun Jun, Huang Ming, Peng Jinhui, et al. The simulation of the frequency-dependent effective permittivity for composite materials [C]//Proceedings of 2010 9th International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory. Guangzhou: IEEE, 2010: 701–704.
- [11] 何燕飞, 龚荣洲, 王鲜, 等. 蜂窝结构吸波材料等效电磁参数和吸波特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5261–5266. (in Chinese)
- HE Yan-fei, GONG Rong-zhou, WANG Xian, et al. Study on equivalent electromagnetic parameters and absorbing properties of honeycomb structured absorbing materials [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5261–5266. (in Chinese)
- [12] 颜学源, 卢健, 高正平, 蜂窝结构吸波材料的等效电磁参数[J]. 磁性材料及器件, 2013, 44(1): 16–19.
 YAN Xue-yuan, LU Jian, GAO Zheng-ping. Equivalent electromagnetic parameters of honeycomb-structure absorbing material [J]. Journal of Magnizne Mater Devices, 2013, 44(1): 16–19. (in Chinese)
- [13] 卢子众, 唐宗熙, 张彪. 用自由空间法测量材料复介电常数的研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(4): 62–66.
 LU Zi-zhong, TANG Zong-xi, ZHANG Biao. Study of Using Free Space Method for Measuring Complex Permittivity [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(4): 62–66. (in Chinese)

作者简介:



张云祥(1982—),男,山东日照人,2008年于电子科技大学获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向天线与电磁散射;

ZHANG Yun-xiang was born in Rizhao, Shandong Province, in 1982. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2008. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns antenna and RCS.

Email: yxzhangwuli@163.com

赵志钦(1969—),男,1996年于电子科技大学获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为天线与电磁散射、信号处理;

ZHAO Zhi-qin was born in 1969. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1996. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns antenna and RCS, signal processing.

史维光(1989—),男,山东邹城人,电子科技大学硕士研究生,主要研究方向天线与电磁散射。

SHI Wei-guang was born in Zoucheng, Shandong Province, in 1989. He is now a graduate student. His research concerns antenna and RCS.