

纤维复合材料电磁屏蔽效能分层多尺度计算*

曲宝龙^{1,2}, 李旭东², 李俊琛²

(1. 长江大学 化学与环境工程学院, 湖北 荆州 434023;

2. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为建立复合材料宏观尺度之间电磁响应的关联性, 将分层多尺度计算方法应用于纤维复合材料电磁屏蔽效能计算。为准确描述复合材料宏观之间的联系, 以电磁屏蔽效能为衡量标准, 确定了复合材料细观结构的代表性体积单元(RVE)。根据电磁场媒质本构方程计算了 RVE 的等效电磁参数。采用分层多尺度方法计算复合材料宏观构件的电磁屏蔽效能。结果表明工作频率越高则复合材料的 RVE 越小; 所设计的纤维复合材料结构在工作频率 2~18GHz 范围内具有 38dB 以上的电磁屏蔽效能, 且电磁屏蔽效能随工作频率增加而下降。研究方法适用于求解细观结构相分散均匀或分布有规律的任意形状复合材料宏观构件电磁屏蔽效能。

关键词: 复合材料; 电磁屏蔽效能; 分层多尺度; 代表性体积单元; 等效电磁参数

中图分类号: TB332; O441.4 文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2012)17-2408-04

1 引言

复合材料具有较高电磁屏蔽性能, 并且能满足质量轻、强度高的工程要求, 在民用和军用方面得到广泛使用。复合材料电磁屏蔽性能的研究可以采用实验和数值模拟两种方法。在实验方面, 通常制备出具体的复合材料, 采用同轴传输线法^[1,2]和法兰同轴网络分析法^[3-5]等测试方法可以精确测量材料的电磁屏蔽效能。在国内, 采用网络分析仪测量金属复合材料^[6]和金属/导电聚合物材料^[7,8]电磁屏蔽效能的研究也比较多。但这样的实验会耗费大量的人力、物力和财力, 受环境的电磁干扰也比较严重。在数值模拟方面, 理论上可以用常规数值解法求解简单形体解析解, 但对于复杂构件和复杂细观结构的求解将十分困难。随着计算机技术和有限元方法的发展, 大规模计算成为可能, 电磁屏蔽数值模拟成为具体实验的互补性技术。结合计算机数值模拟, 可以减少和简化具体实验, 降低实验成本, 缩短实验周期。近年来, 随着数值模拟技术的广泛应用, 复合材料电磁参数预测及电磁屏蔽性能数值模拟^[9,10]研究迅速发展。但在复合材料宏观构件电磁屏蔽效能的数值模拟中, 不可能有效模拟出其细观结构, 因为这将导致天文数字的节点自由度, 普通计算机

根本无法计算。材料的分层多尺度计算成为解决这一问题的最好方式。

为了准确建立复合材料细观结构性质与复合材料宏观构件电磁响应之间的关联性, 引入代表性体积单元(RVE)的概念, 以纤维复合材料为研究对象, 电磁屏蔽效能值为衡量标准, 采用数值模拟方法确定了纤维复合材料细观结构 RVE, 并对此 RVE 进行磁导率、介电常数和电阻率等基本电磁参数的预测, 然后通过复合材料宏观分层多尺度计算方法计算复合材料宏观构件的电磁屏蔽效能。

2 复合材料 RVE 的确定

复合材料细观结构电磁响应数值计算是建立在 RVE 技术上的。细观结构的 RVE 定义在材料的细观尺度上, 是指其体积尺寸是最小的, 但体积单元内却包含了足够的细观结构组成物的几何信息、取向信息、分布信息与相场信息, 并能在统计学意义上(统计平均性质)代表材料细观结构的基本特征。从 RVE 的定义可以看出, RVE 只能用于细观结构相分散均匀或分布有规律的复合材料结构研究。本文采用电磁屏蔽效能值为衡量标准求取复合材料细观结构 RVE。

为了描述和定量分析屏蔽体的屏蔽效果, 通常采用屏蔽效能(shielding effectiveness, SE)表示屏蔽体对电磁干扰的屏蔽能力和效果。常用屏蔽效能有如下定义方式。

2.1 电屏蔽效能

不存在屏蔽体时某处的电场强度 E_0 与存在屏蔽体时同一处的电场强度 E_s 之比, 用分贝表示为:

$$SE_E = 20 \lg \frac{|E_0|}{|E_s|} \quad (1)$$

2.2 磁屏蔽效能

不存在屏蔽体时某处的磁场强度 H_0 与存在屏蔽体时同一处的磁场强度 H_s 之比, 用分贝表示为:

$$SE_H = 20 \lg \frac{|H_0|}{|H_s|} \quad (2)$$

纤维复合材料具有较高电磁屏蔽性能, 在电磁屏蔽领域内广泛应用, 在工程应用上, 已经实现多种纤维的二维和三维混编^[11,12], 编织程度非常高。本文建立

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50271016, 50571042)

收到初稿日期: 2012-03-19

收到修改稿日期: 2012-05-22

通讯作者: 曲宝龙

作者简介: 曲宝龙 (1978-), 男, 吉林农安人, 讲师, 在读博士, 师承李旭东教授, 从事材料内电磁场效应的数值模拟研究。

了一种用于电磁屏蔽的由二维编织纤维和基体组成的复合材料结构,其中,纤维截面为六边形,当量直径为0.1mm,纤维间距0.3mm,基体厚0.5mm。为清晰表现编织方式,给出比较简单的横、纵各6根纤维的复合材料细观结构,如图1所示。应用远场平面电磁波激励,针对单向纤维数量为3~12的一系列纤维复合材料结构进行了电磁屏蔽效能数值模拟,计算频率分别为2、6、12和18GHz。

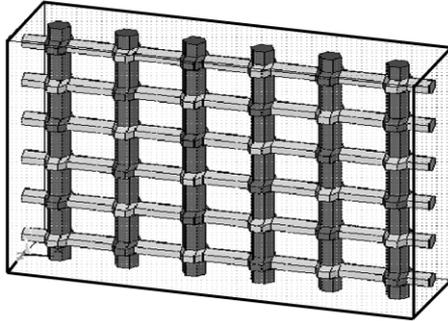


图1 纤维复合材料细观结构

Fig 1 Meso-structure of fiber composites

在复合材料细观结构的正前方设置与其表面垂直的远场平面电磁波激励,在其后方设置取值路径,在路径上提取电场强度和磁场强度,通过对包含屏蔽体和不包含屏蔽体模型的计算,根据式(1)、(2)可以计算出该细观结构的电磁屏蔽效能。表1所示为工作频率为2GHz,不同大小细观结构的电磁屏蔽效能值。结果表明在远场平面波作用下,屏蔽体的电屏蔽效能与磁屏蔽效能基本上是相等的,与屏蔽体的大小和结构无关。测试了不同纤维根数的复合材料细观结构在不同频率下的电磁屏蔽效能,均证明这一结论,这与电磁波的远场传播理论相符。

表1 工作频率为2GHz时复合材料细观结构的电磁屏蔽效能

Table 1 SE of composites meso-structure on the work frequency of 2GHz

| 纤维数量 | 磁屏蔽效能 | 电屏蔽效能 | 纤维数量 | 磁屏蔽效能 | 电屏蔽效能 |
|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 3 | 42.98 | 42.97 | 4 | 45.94 | 45.93 |
| 5 | 48.17 | 48.17 | 6 | 51.55 | 51.55 |
| 7 | 52.68 | 52.68 | 8 | 54.09 | 54.09 |
| 9 | 55.84 | 55.84 | 10 | 57.98 | 57.98 |
| 11 | 57.04 | 57.05 | 12 | 57.90 | 57.90 |

RVE在统计学意义上代表复合材料细观结构的基本特征,所以可以在统计学上以电磁屏蔽效能值为衡量手段,寻找细观结构的真正RVE。根据工作频率为2、6、12和18GHz下不同大小的二维编织复合材料细观结构的电屏蔽效能,绘制了电屏蔽效能与单向纤维数量的关系曲线图如图2所示。

图2结果表明,在测试的4种工作频率下,当编织纤维单向数量达到10之后,电屏蔽效能均趋于稳定值;当工作频率为12和18GHz时,编织纤维单向数量达到8以上,其电屏蔽效能趋于稳定。

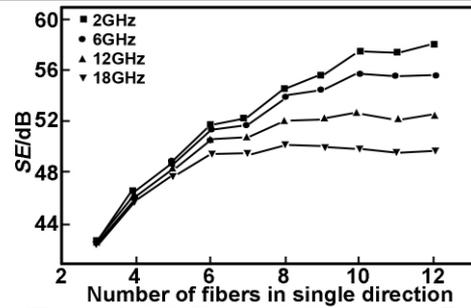


图2 纤维数量与电屏蔽效能的关系

Fig 2 The relationship of fiber numbers and electromagnetic shielding effectiveness

结合RVE的定义可以确定,在工作频率位于2~18GHz区间时,该编织结构复合材料的RVE应取单向纤维数量为10根的细观结构,这是可以代表该复合材料细观结构基本特征的最小单元。RVE的有限元模型如图3所示,该RVE外形尺寸为:高、宽各3mm,厚0.5mm,其内部包含横、纵各10根纤维的二维编织结构和基体。其纤维单元种子大小为0.2mm,基体单元种子大小为0.4mm,单元总数量为82586。

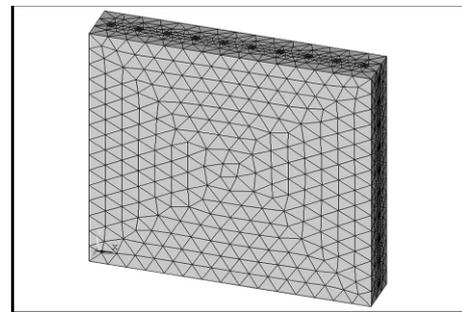


图3 RVE有限元模型

Fig 3 Finite element model of RVE

3 RVE等效电磁参数计算

分层多尺度计算需要有细观尺度的RVE材料属性,在电磁场数值模拟中需要根据电磁本构方程计算出RVE的等效电磁参数。

电磁场中的媒质在电磁运算中要应用到的基本参数有绝对介电常数 ϵ 、绝对磁导率 μ 和电导率 σ ,在电磁运算中,这些参数与电磁场的各个量之间通过电磁本构方程相联系。在初期阶段,假设电磁场的媒质是线性、均匀、各向同性的,即为简单媒质。简单媒质在电磁场中的本构方程如下:

$$\epsilon = \frac{D}{E} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (5)$$

其中, E 为电场强度; H 为磁场强度; D 为电通密度; B 为磁通密度; J 为电流密度。

如果电磁场中的媒质是各向异性的,则上述本构方程中各量扩展为矩阵。

以等效相对介电常数计算为例,计算机实验主要流程如下:在RVE(图3)的左侧面上施加某一非零电磁激励载荷,在模型的右侧面上施加零载荷,在这样的电磁激励环境中,可使RVE结构产生电磁响应。从计算结果数据中提取每个单元的 D_i 和 E_i ,根据式(3),并考虑各个单元对整体的体积贡献率,采用式(6)即可计算出复合材料的等效绝对介电常数,再根据式(7)就可计算出等效相对介电常数:

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n \left[\frac{D_i \times V_i}{E_i \times V} \right] \quad (6)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (7)$$

其中, ϵ 为等效绝对介电常数; ϵ_r 为等效相对介电常数; V 为RVE总体积; V_i 为第 i 个单元的体积; n 为RVE单元数量。

同理,根据式(4)、(5)可以计算出等效相对磁导率和等效电导率。

表2 RVE等效电磁参数

Table 2 RVE equivalent electromagnetic parameters

| 材料参数 | 等效相对磁导率 | 等效相对介电常数 | 等效电阻率 ($\Omega \cdot m$) |
|-------|---------|----------|-------------------------------|
| 纤维材料 | 1.00 | 2.00 | $3.1e-5$ |
| 基体材料 | 1.00 | 2.05 | $1.031e5$ |
| RVE等效 | 1.00 | 2.0457 | $3.580e-4$ |

4 复合材料宏观构件电磁屏蔽效能计算

根据以上工作,可以计算复合材料宏观构件的电磁屏蔽效能。首先将构件进行网格划分,网格大小应尽量与RVE大小一致,然后将RVE等效电磁参数赋给宏观构件的各个单元,实现宏观细观分层多尺度计算。

研究对象采用如图4所示的复合材料宏观构件,该构件为某设备上窗口玻璃的涂覆层,具有一定的曲率。具体外形尺寸为曲率半径为0.6m,高0.18m,宽0.12m,厚5mm。

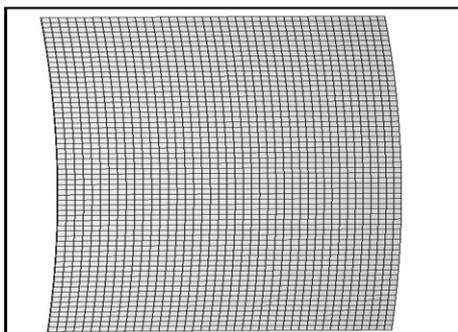


图4 复合材料宏观构件网格

Fig 4 Mesh of composites macro component

根据RVE大小,将其单元大小设定为3mm,采用六面体20节点单元进行网格划分后,单元数为2604,节点数为18751。用于电磁屏蔽效能计算的整体有限元模型(图5所示,含复合材料构件模型及用于电磁波传播的空气部分模型)总体单元数为109368,总体节

点数为458681。在构件前方设置平面电磁波激励,工作频率范围为2~18GHz,根据式(1)、(2)计算该复合材料构件的电磁屏蔽效能值。

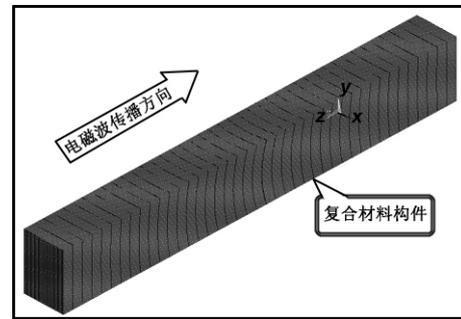


图5 屏蔽效能计算有限元模型

Fig 5 Finite element model for the calculation of SE

图6和7所示为在工作频率为2GHz,有/无复合材料构件屏蔽体时的数值计算结果云图。

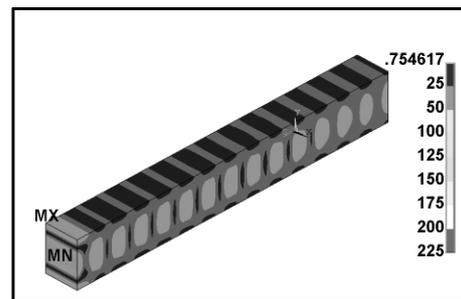


图6 无屏蔽体时的电场强度云图

Fig 6 Electric field intensity nephogram for no shielding

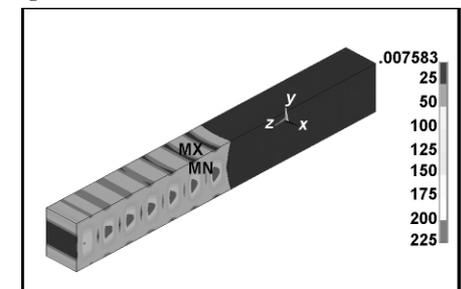


图7 有屏蔽体时的电场强度云图

Fig 7 Electric field intensity nephogram for shielding

从图6和7可以看出,数值模拟可以很好地模拟出电磁波的传播过程,在沿电磁波传播方向,可以清晰地看到电磁波的波峰及波谷。对比二者可以很容易看出,当加入复合材料构件屏蔽体后,在屏蔽体后方,电场强度急剧降低至最小值,这证明了该复合材料具有非常好的电磁屏蔽效能。此外,在屏蔽体前方,电场强度的峰值并不相同,这是由于复合材料对入射的平面电磁波形成强烈反射,反射波与入射波相互叠加导致。

根据图8所示复合材料宏观构件屏蔽效能曲线,纤维复合材料宏观构件在工作频率2~18GHz范围内具有38dB以上的电磁屏蔽效能;随工作频率增加,屏蔽效能曲线表现出整体下降趋势。曲线的整体下降趋势与工作频率增加有关,工作频率增加,电磁波波长减小,则电磁波的穿透效应相应减小,在传播过程中的衰减越大,导致复合材料的电磁屏蔽效能下降。

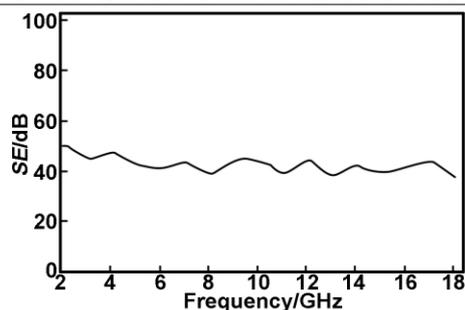


图8 复合材料宏观构件屏蔽效能曲线

Fig 8 Curve of SE for composites macro component

5 结论

重点介绍了分层多尺度计算方法在复合材料电磁屏蔽效能计算上的应用。通过雷达常用波段 2~18GHz 下的细观结构计算,确定了复合材料 RVE,根据电磁场媒质本构方程计算了 RVE 的等效电磁参数,采用分层多尺度计算方法计算了复合材料宏观构件的电磁屏蔽效能。计算机实验结果表明,研究方法是可行的。研究方法克服了复合材料宏观构件数值计算需要建立其细观结构,导致巨额数量节点自由度的缺点。适用于两相或多相复合材料计算,且不局限于纤维复合材料。可以十分方便地计算统计均匀材料,但如果复合材料内部各相分布不均匀且无规律,则需要进行相应的分块 RVE 计算,计算过程将比较复杂。

参考文献:

- [1] Yu Dongxiu, Cheng Jiang, Yang Zhuoru. Performance of polyaniline-coated short carbon fibers in electromagnetic shielding coating [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2007, 23(4): 529-534.
- [2] Kim Taejin, Chung D D L. Mats and fabrics for electromagnetic interference shielding [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2006, 15(3): 295-298.

- [3] Huang Shaowen, Chen Guanghua, Deng Min, et al. electromagnetic shielding effectiveness of graphite-carbon fiber cement based materials [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 38(4): 449-552.
- [4] Gong Chunhong, Zhang Yu, Yan Chao, et al. Electromagnetic shielding behavior of composites containing ultrafine Ni fibers [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(7): 1298-1302.
- [5] Liu Qinglei, Zhang Di, Fan Tongxiang, et al. Amorphous carbon-matrix composites with interconnected carbon nano-ribbon networks for electromagnetic interference shielding [J]. *Carbon*, 2008, 46(3): 461-465.
- [6] Tian Juntao, Gong Chunhong, Yu Laigui, et al. Investigation on the electromagnetic shielding effectiveness of the composite paints filled with ultrafine and micro-size Ni particles [J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, 39(10): 1615-1617.
- [7] Zhu Guohui, Wang Jun, Ruan Shipeng, et al. Effect mechanism of polyaniline on shielding efficiency in shielding composite [J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, 39(10): 1622-1624.
- [8] Huang Junfu, Zhu Zhenghou, Shan Xueyang, et al. Studies on preparation of poly(3, 4-ethylenedioxythiophene) and its thermoelectric performance [J]. *Journal of Functional Materials*, 2009, 40(12): 1990-1992.
- [9] Möller C, Klinkenbusch L. Electromagnetic and transient shielding effectiveness for near-field sources [J]. *Advances in Radio Science*, 2007, 5: 57-62.
- [10] Ozlem Ozgun, Raj Mittra, Mustafa Kuzuoglu. Parallelized characteristic basis finite element method (CBFEM-MPI)-A non-iterative domain decomposition algorithm for electromagnetic scattering problems [J]. *Journal of computational physics*, 2009, 228(6): 2225-2238.
- [11] Chen H C, Lee K C, Lin J H, et al. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness properties of diverse conductive textiles via various measurement techniques [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192-193: 549-554.
- [12] Cheng K B, Ramakrishna S, Lee K C. Electromagnetic shielding effectiveness of copper/glass fiber knitted fabric reinforced polypropylene composites [J]. *Composites: Part A*, 2000, 31(10): 1039-1045.

Hierarchical multi-scale calculation of electromagnetic shielding effectiveness for fiber composites

QU Bao-long^{1,2}, LI Xu-dong², LI Jun-chen²

- (1. College of Chemistry and Environmental Engineering of Yangtze University, Jingzhou 434023, China;
2. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to establish the correlation of electromagnetic response between macro-scale and meso-scale of composites, the hierarchical multi-scale calculation method was applied to the calculation of electromagnetic shielding effectiveness of fiber composites. In order to describe the relationship between macro-scale and meso-scale of composites accurately, representative volume elements (RVE) of the composites meso-structure was determined by the measure criterion of electromagnetic shielding effectiveness. The equivalent electromagnetic parameters were calculated by the constitutive equation of electromagnetic field medium. The electromagnetic shielding effectiveness of fiber composites macro component was calculated by hierarchical multi-scale calculation method. The results showed that: the RVE of composites becomes smaller with the increasing of working frequency, the electromagnetic shielding effectiveness of fiber composite structures was above 38dB in the range of working frequency from 2 to 18GHz, and the electromagnetic shielding effectiveness decrease with increasing of working frequency. The research method was suitable to solve electromagnetic shielding effectiveness of composites macro component of arbitrary shape which has uniform dispersion and regular distribution of meso-structure phase.

Key words: composites; electromagnetic shielding effectiveness; hierarchical multi-scale; representative volume elements; equivalent electromagnetic parameters