

文章编号: 2095-4980(2017)05-0823-05

编织增强型复合材料等效电磁参数计算与优化

曲兆明, 赵敏, 卢聘, 王妍, 王庆国

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 河北 石家庄 050003)

摘要: 编织增强型复合材料相比传统颗粒填充型复合材料在电磁防护领域具有更大优势, 然而其等效电磁参数计算与优化设计方法目前尚未明确。以正交编织型复合材料为研究对象, 将复合材料等效成多层单纱定向周期排列的各向异性介质叠加, 进而利用有效介质理论给出了各层介质等效电磁参数计算公式, 并针对磁屏蔽复合材料进行了优化设计。结果表明: 基体材料和纤维束的磁导率越高, 复合材料的等效磁导率越高; 纤维束直径越大, 孔洞尺寸越小, 复合材料的等效磁导率越大; 纤维含量越高, 复合材料磁导率越高。

关键词: 复合材料; 电磁参数; 磁导率; 优化设计

中图分类号: TN011; O441

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0823

Calculation of effective electromagnetic parameters and optimization design of braided reinforced composite materials

QU Zhaoming, ZHAO Min, LU Pin, WANG Yan, WANG Qingguo

(Institute of Electrostatic & Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract: The braided reinforced composite materials show many advantages in electromagnetic protection fields than traditional particle filled composites, while the effective electromagnetic parameters calculation and optimization design of braided reinforced composite materials are not clear at present. The orthogonal braided reinforced composite is taken as the research object, the composite is subdivided into multilayer anisotropic media with single yarn arrayed periodically, and the formulas of effective electromagnetic parameters of each layer are given using effective medium theory. The magnetic shielding composite is chosen to be optimized and the results indicate that the effective permeability of composites increases with the rise of the diameter, the content of fiber yarn, and the permeability of matrix and fiber, but with the decrease of the gap of the fabric.

Keywords: composites; electromagnetic parameter; permeability; optimization design

编织增强型复合材料作为一种新型的结构功能一体化材料, 与传统材料相比, 具有质量轻、比刚度高、比强度高、耐腐蚀等优良性能, 特别是在对减重有较高要求的领域, 其优势更加明显^[1-5], 对于军民两用的电子设备及系统的电磁防护具有广阔的应用前景^[6-9]。然而编织增强型复合材料是典型的多孔性非均质材料, 无论是单层还是多层结构, 其材料内部的纤维均呈现出立体交叉排列特征, 这使得应用传统的经典有效介质理论进行复合材料等效电磁参数计算时遇到了困难^[10-12]。因此, 将编织增强型复合材料剖分成多层具有典型周期分布特征的等效介质叠加, 成为编织增强型复合材料等效电磁参数计算以及优化设计的关键。

本文将典型编织型复合材料等效成多层单纱定向周期排列的各向异性介质叠加, 利用有效介质理论给出各层介质等效电磁参数计算公式, 以磁屏蔽复合材料为例, 采用所构建的材料等效模型及等效电磁参数计算公式进行了优化设计, 从理论上计算并分析了改变编织结构层的丝束直径、孔洞大小及丝束含量等参数对复合材料等效电磁参数的影响, 并给出了高效复合材料设计的参考依据。

1 复合材料等效电磁参数计算

1.1 织物编织结构的等效

为简化起见,本文针对常用的编织增强型复合材料开展研究。图 1 所示为二维正交编织型复合材料。分析二维编织型复合材料发现:若将织物内部的纱线交叉覆盖区域进行分离,则复合材料可等效成多层具有一维定向周期排列的各向异性介质的叠加。

假设复合材料为单层二维正交编织型复合材料,则其等效模型如图 2 所示。原始复合材料等效成了 2 层单纱定向排列的各向异性介质模型,利用有效介质理论即可计算复合材料的等效电磁参数。上述复合材料等效过程的理论依据在于:电磁波作用于网络型电磁屏蔽材料时,材料对其产生的反射、吸收以及多重反射损耗作用取决于内部连续的纱线排列特征。因此,将复合材料内部纱线交叉覆盖区域抽离成单纱直线排列并不会显著影响对电磁波的屏蔽作用。

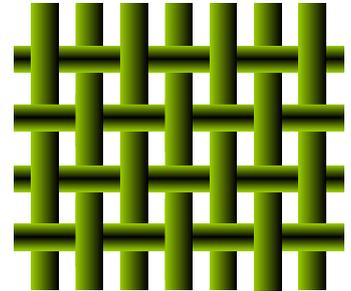


Fig.1 2D orthogonal braiding structure of fabrics
图 1 二维正交编织结构

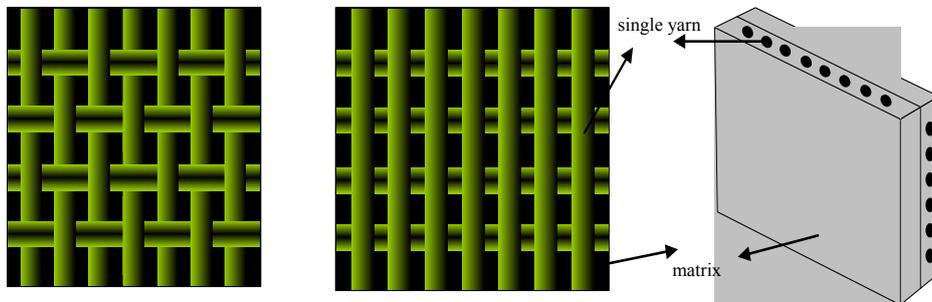


Fig.2 Equivalent model of 2D braiding structure
图 2 二维编织结构等效模型

1.2 复合材料等效电磁参数计算

对于电磁屏蔽特性来讲,多层材料的电磁传输特性可由其各层等效电磁参数(电导率、介电常数及磁导率)来定量描述。文献[13]研究表明:当周期结构的单元尺寸小于电磁波波长时,复合材料可看成等效介质,对于图 2 中所示的周期结构材料,其等效电磁参数表现为单轴各向异性,等效模型如图 3 所示。图中, x, y, z 为三维坐标; $\mu_f, \epsilon_f, \sigma_f$ 和 $\mu_m, \epsilon_m, \sigma_m$ 分别为纱线和本体的本征磁导率、本征介电常数和本征电导率; $\bar{\mu}$ 和 $\bar{\epsilon}$ 分别为等效介质的等效磁导率张量和等效介电常数张量; D 为纱线直径尺寸; P 为纱线排列周期尺寸。

假设复合材料等效介电常数张量和等效磁导率张量为:

$$\bar{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

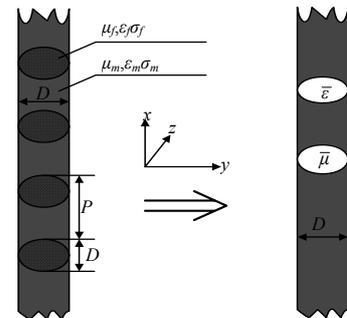


Fig.3 Equivalent model of 1D braiding composites
图 3 一维编织型复合材料等效模型

式(1)和式(2)中 $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{\mu}$ 分别为复合材料的等效介电常数张量和等效磁导率张量; ϵ_x, ϵ_y 和 μ_x, μ_y 分别为沿 x, y 方向的材料横向介电常数分量和横向磁导率分量; ϵ_z 和 μ_z 分别为沿 z 方向的材料径向介电常数分量和径向磁导率分量。分析图 3 中所示复合材料的微结构特征(材料厚度、纱线直径、排列周期等),利用基体与纱线构成的几何分布关系,可得复合材料电磁参数的分量分别为:

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_f \epsilon_m}{g \epsilon_f + (1-g) \epsilon_m} \quad (3)$$

$$\mu_x = \frac{\mu_f \mu_m}{g \mu_f + (1-g) \mu_m} \quad (4)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_z = g \epsilon_f + (1-g) \epsilon_m \quad (5)$$

$$\mu_y = \mu_z = g \mu_f + (1-g) \mu_m \quad (6)$$

式中 g 为纱线在 1 个周期结构单元内所占的体积分数, 其计算式为:

$$g = \frac{\pi D^2}{4PD} = \frac{\pi D}{4P} \quad (7)$$

由上述分析可见, 利用本文提出的编织增强型复合材料等效模型构建方法能够将材料分解成多层单纱周期排列的各向异性介质叠加, 并可利用式(3)~式(7)计算得到各层介质的等效电磁参数。

2 复合材料的优化设计

大量研究表明: 对于单轴各向异性复合材料而言, 影响复合材料电磁防护性能的等效参数与材料径向参数关系不大, 而主要受轴向参数的影响。因此, 本文在优化过程中采用所构建的材料等效模型及等效电磁参数计算公式从理论上计算并分析了改变编织结构层的丝束直径、孔洞大小及丝束含量等参数对复合材料等效电磁参数的影响。这里以磁屏蔽复合材料为研究对象, 优异的磁屏蔽材料要具有高的磁导率, 分析复合材料微结构特征对等效磁导率的影响对于高效复合材料的制备具有一定的理论参考价值。

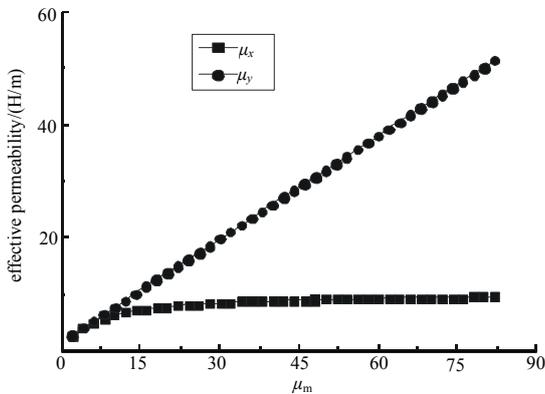


Fig.4 Dependence of effective permeability on permeability of matrix
图 4 复合材料等效磁导率与基体材料磁导率的依赖关系

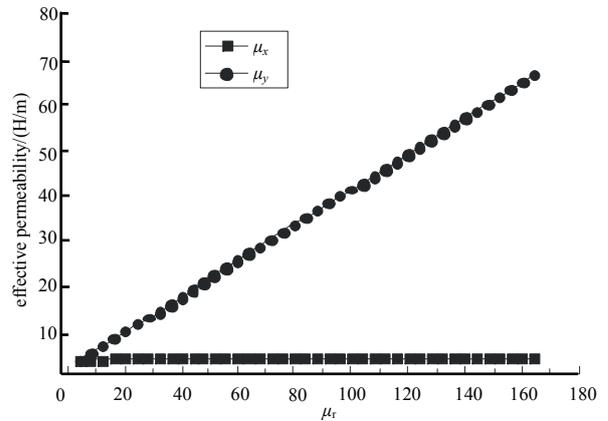


Fig.5 Dependence of effective permeability on intrinsic permeability of fiber
图 5 复合材料等效磁导率与纤维本征磁导率的依赖关系

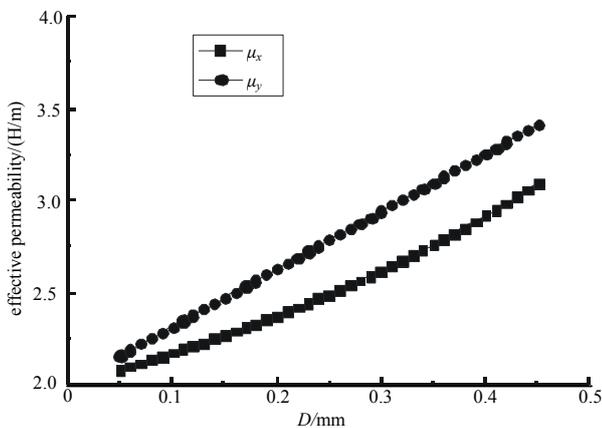


Fig.6 Dependence of effective permeability on diameter of fiber
图 6 复合材料等效磁导率与丝束直径的依赖关系

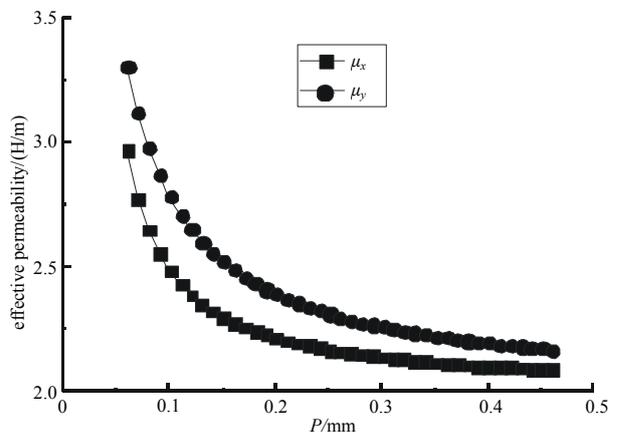


Fig.7 Dependence of effective permeability on gap of fabrics
图 7 复合材料等效磁导率与编织体孔洞大小的依赖关系

图 4 为复合材料等效磁导率与基体材料磁导率的依赖关系。从图 4 中可以看出:随着基体材料磁导率的增大,复合材料的轴向等效磁导率也随之升高,且 y 方向的改变更加显著,几乎成线性增加。因此,在制备编织型磁屏蔽复合材料时,基体材料选择磁导率高的材料对于复合材料的等效磁导率提升效果比较明显。

图 5 为复合材料等效磁导率与丝束本征磁导率的依赖关系。从图 5 中可以看出:随着碳纤维丝束本征磁导率的增大,复合材料的轴向等效磁导率也随之升高,同样是 y 方向的改变更加显著。因此,在制备编织型磁屏蔽复合材料时,碳纤维丝束的导磁性改性是提高其本征磁导率的关键,也是大幅提高复合材料等效磁导率的主要手段。

图 6 为复合材料等效磁导率与丝束直径的依赖关系。从图 6 中可以看出:随着碳纤维丝束直径的增大,复合材料的轴向等效磁导率也随之升高,且 x 和 y 方向的改变幅度相当,显著提高了复合材料的轴向等效参数。因此,在制备编织型磁屏蔽复合材料时,在制备工艺和编织技术能够容许的条件下应该使用大直径的碳纤维丝束,这对于大幅提高复合材料等效磁导率具有非常明显的作用。

图 7 为复合材料等效磁导率与编织体孔洞大小的依赖关系。计算模型中 p 为纤维丝束排列的周期长度,实际上体现出来的就是编织体的孔洞大小。从图 7 中可以看出:随着编织体孔洞尺寸的变大,复合材料的轴向等效磁导率随之降低,且 x 和 y 方向的降幅相当,且当孔洞尺寸达到一定数值时,复合材料的等效参数趋于稳定。分析得出:当孔洞尺寸变大时,作为磁性填料的纤维含量降低,因此,复合材料的等效参数会降低。同时,由于孔洞尺寸的变大,对于高频电磁波的电磁屏蔽也是不利的,因为高频电磁波波长短,容易从大孔洞缝隙中直接透射过去,不利于电磁屏蔽。因此,在制备编织型磁屏蔽复合材料时,要尽可能使编织体孔洞小而紧凑,这样能够提高复合材料的等效磁导率,且有利于屏蔽高频电磁波。

前面分别就基体材料磁导率、纤维丝束本征磁导率、丝束直径以及孔洞尺寸大小等因素对复合材料等效磁导率的影响规律进行了理论分析,实际上,关于纤维丝束直径和孔洞尺寸大小体现出来即是纤维含量对材料等效参数的影响。图 8 为复合材料等效磁导率与纤维含量的依赖关系。从图 8 中可以看出:随着纤维含量的增加,复合材料轴向等效磁导率随之增大,且 y 方向的增幅更加明显,因此,在制备编织型磁屏蔽复合材料时,要增加纤维在基体中的含量,这样能够显著提高复合材料的等效磁导率,从而有利于提高磁屏蔽性能。

3 结论

本文构建了编织增强型复合材料的等效介质模型,利用有效介质理论给出了各层介质等效电磁参数计算公式,并采用所构建的材料等效模型及等效电磁参数计算公式针对磁屏蔽复合材料进行了优化设计。优化设计结果表明:基体材料和纤维丝束的磁导率越高,复合材料的等效磁导率越高;纤维丝束直径越大,孔洞尺寸越小,复合材料的等效磁导率越大;纤维含量越高,复合材料磁导率越高。实际上,单纯改变某一参数对于复合材料等效参数的影响并不一定十分显著,比如,增大了纤维丝束直径,同时也增大了孔洞的尺寸,能否在效果上提高材料的等效参数要看哪种因素影响明显。因此,在进行编织增强型复合材料设计时,要综合各参数的整体作用,选择合适的结构尺寸及含量,并考虑材料加工工艺的可行性,最终设计出综合性能优异的复合材料。

参考文献:

- [1] CHENG K B, RAMAKRISHNA S, LEE K C. Electromagnetic shielding effectiveness of copper/glass fiber knitted fabric reinforced polypropylene composites[J]. *Composites: Part A, Applied Science and Manufacturing*, 2000(31):1039-1045.
- [2] MIROTZNIK M S, YARLAGADDA S, MCCAULEY R, et al. Broadband electromagnetic modeling of woven fabric composites[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(1):158-169.
- [3] FUTASUMORI S, KOHMURA A, YONEMOTO N. Evaluation of electromagnetic field characteristics inside carbon fiber reinforced plastic structure using reverberation chamber method[C]// *Proceedings of the 43rd European Microwave Conference*.

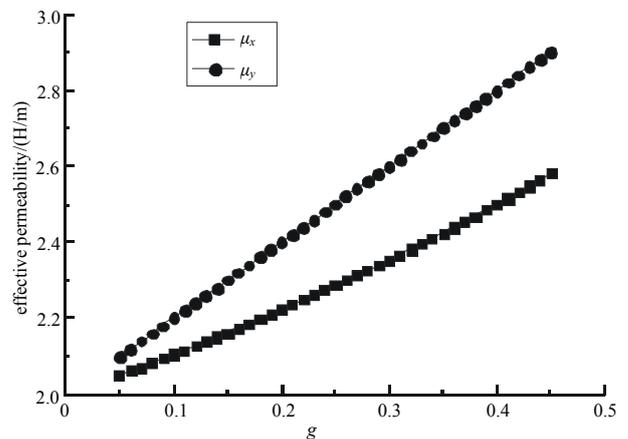


Fig.8 Dependence of effective permeability on content of fiber
图 8 复合材料等效磁导率与纤维含量的依赖关系

- Nuremberg, Germany: [s.n.], 2013: 1275–1278.
- [4] WANG X C, LIU Z. A new computation of shielding effectiveness of electromagnetic radiation shielding fabric[J]. Progress in Electromagnetic Research Letters, 2012(33): 177–186.
- [5] WANG X C, LIU Z, ZHOU Z. Computation of shielding effectiveness for electromagnetic shielding blended fabric[J]. Journal of Textile & Clothing Technology, 2013(62): 153–159.
- [6] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1605–1613. (LIU Shanghe, LIU Weidong. Progress of relevant research on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1605–1613.)
- [7] QU Zhaoming, LIU Shanghe, WANG Qingguo, et al. Electromagnetic shielding properties of multilayered composites containing multiple inclusions with various spatial distributions[J]. Materials Letters, 2013(109): 42–45.
- [8] QU Zhaoming, WANG Qingguo, LEI Yisan, et al. Research on 3D braided nickel plated carbon fiber/epoxy resin composites and their electromagnetic protection properties[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 2027–2030.
- [9] 杜英霞, 符建明, 陶睿, 等. 磁场环境对磁保持继电器影响及防护[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(4): 586–590. (DU Yingxia, FU Jianming, TAO Rui, et al. Effects of magnetic field on magnetic latching relay and shielding measures[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(4): 586–590.)
- [10] LIU Z, WANG X C. Relation between shielding effectiveness and tightness of electromagnetic shielding fabric[J]. Journal of Industrial Textiles, 2013, 43(2): 302–316.
- [11] PERUMALRAJ R, DASARADAN B S, ANBARASU R, et al. Electromagnetic shielding effectiveness of copper core-woven fabrics[J]. Journal of the Textile Institute, 2009, 100(6): 512–524.
- [12] RAJENDRAKUMARA K, THILAGAVATHI G. Electromagnetic shielding effectiveness of copper/PET composite yarn fabrics[J]. Indian Journal of Fibre & Textile Research, 2012, 37(2): 133–137.
- [13] JOHANSSON M, HOLLOWAY C L, KUETER E F. Effective electromagnetic properties of honeycomb composite and hollow pyramidal and alternating wedge absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(2): 728–736.

作者简介:



曲兆明(1983–), 男, 吉林省松原市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为电磁防护理论与技术、电磁防护材料技术. email: iamqzm3990@163.com.

赵敏(1985–), 女, 河北省邯郸市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电磁脉冲理论与防护.

卢聘(1988–), 男, 山东省菏泽市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁防护材料技术.

王妍(1983–), 女, 石家庄市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁防护材料与测试技术.

王庆国(1964–), 男, 河北省衡水市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁防护理论与技术.