

三角形截面碳纤维在复合材料中的分布规律

刘新^{1,2}, 武湛君¹, 王荣国², 刘文博², 严佳¹

1. 大连理工大学航空航天学院工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116024
2. 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080

摘要 三角形截面碳纤维在复合材料内部的排布结构像微波暗室一样, 能够对入射的电磁波进行多次反射, 从而衰减电磁波, 使三角形截面碳纤维复合材料具有吸波性能, 因此, 研究三角形截面碳纤维在复合材料中的排布规律对研究其吸波机理非常重要。采用实验和模拟的方法对三角形截面碳纤维在复合材料中的排布规律进行了分析。首先, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察了多组三角形截面碳纤维复合材料试样的截面微观形貌, 分析了三角形碳纤维在复合材料中的排布角度及均匀性; 其次, 为进一步研究三角形截面碳纤维复合材料的吸波机理, 根据蒙特卡洛原理, 通过 Matlab 软件对三角形截面碳纤维在复合材料中的排布情况进行了模拟。实验及数值模拟结果吻合较好, 均表明三角形截面碳纤维在复合材料中的排布是以各种排布角度随机排布的, 而三角形碳纤维分布是比较均匀的, 没有明显的密布区域和稀疏区域, 该模拟方法可以用于模拟不同含量的三角形截面碳纤维在复合材料中的排布规律。

关键词 复合材料; 三角形截面碳纤维; 排布规律; 蒙特卡洛原理; 数值模拟

中图分类号 V258

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.07.004

Distribution of Triangle-shape Carbon Fibers in Composite Materials

LIU Xin^{1,2}, WU Zhanjun¹, WANG Rongguo², LIU Wenbo², YAN Jia¹

1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China
2. Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract The triangle cross-section carbon fiber reinforced plastics could be used as absorbing composite materials, in which the incident microwave can be reflected many times to be greatly attenuated. The microwave absorbing property is affected significantly by the distribution of the triangle cross-section carbon fibers in the composite materials. In this study, the distribution of the triangle cross-section carbon fibers in the triangle cross-section carbon fiber reinforced plastics is investigated by experimental and theoretical simulations. In order to study the angle arrangement and the homogeneity of the carbon fibers in the composite materials, the cross-section morphology of the samples is observed by the SEM. And a process based on the Monte Carlo Method is established to simulate the distribution of the triangle cross-section carbon fibers in the triangle cross-section carbon fibers reinforced plastics. The simulation results agree with the experimental data, which indicates that the triangle cross-section carbon fibers are arranged in a random in angles and approximately homogeneous distribution. This simulation method could be used to simulate the cross-section morphology of the triangle cross-section carbon fibers reinforced plastics with arbitrary fiber contents.

Keywords composite material; triangle cross-section carbon fiber; distribution rules; Monte Carlo methods; numerical simulation

收稿日期: 2012-12-19; 修回日期: 2013-01-10

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-11-0055)

作者简介: 刘新, 博士, 研究方向为高性能树脂基复合材料, 电子信箱: haerbinliuxin@163.com

0 引言

碳纤维复合材料与金属材料相比,具有高比强度、高比模量和良好的抗疲劳特性,如果同时还能具有优异的吸波性能,将是一种很有前景的多功能复合材料^[1,2]。随着复合材料技术的发展和应用领域的扩展深入,传统圆形截面碳纤维在某些特殊的领域无法满足要求。例如,在结构隐身材料中,经常用到具有特殊截面形状的碳纤维,由于异形截面碳纤维特殊的截面形状,使复合材料微观结构如同微波暗室一样,会对入射进来的电磁波进行多次反射,从而达到对电磁波衰减的目的^[3-7]。国外对纤维增强树脂基结构隐身复合材料的研究已经取得了一定的进展,所使用的纤维大部分是有棱角的多边形或三角形截面碳纤维。异形截面碳纤维因其特殊的截面形状使其具有许多独特的性能,用其制备的复合材料会同时具备承载和吸波的功能^[5,7-10]。

针对三角形截面碳纤维复合材料微观结构对吸波性能的研究较少,其吸波机理更鲜见报道^[5,6]。因此,本文采用实验及模拟的方法对三角形截面碳纤维复合材料的微观形貌及纤维的分布情况进行了研究,分析了三角形截面碳纤维的截面特征,以及三角形截面碳纤维在复合材料中的分布规律,有利于进一步研究三角形截面碳纤维复合材料的吸波性能及吸波机理。

1 实验与材料

1.1 材料制备

复合材料的基体选择环氧体系 TDE-85 型环氧树脂,由天津晶东化学复合材料有限公司生产;固化剂选用间苯二胺,天津光复精细化工研究所生产,该胶液具有较低的黏度,适于缠绕工艺;同时作为增强材料和吸收剂的三角形截面碳纤维(1k)是由中国科学院山西煤碳化学研究所生产,三角形截面碳纤维的截面形状如图 1 所示,可以看出,三角形截面碳纤维横截面呈近似正三角形。

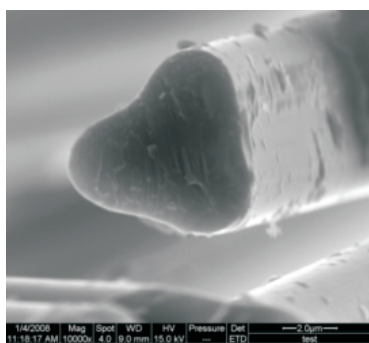


图 1 三角形截面碳纤维的横截面形貌

Fig. 1 Cross-section morphology of triangle cross-section carbon fiber

采用纤维缠绕 (filament winding) 和压缩模塑 (compress molding) 成型工艺制备复合材料^[11,12]。将间苯二胺与乙醇以 1:1 配比配制成固化液,再与树脂按 18:100 的比例配制成胶

液,搅拌均匀待用,复合材料缠绕制备流程如图 2 所示。通过实验测试,所制备的复合材料的纤维体积含量为 46.37%。

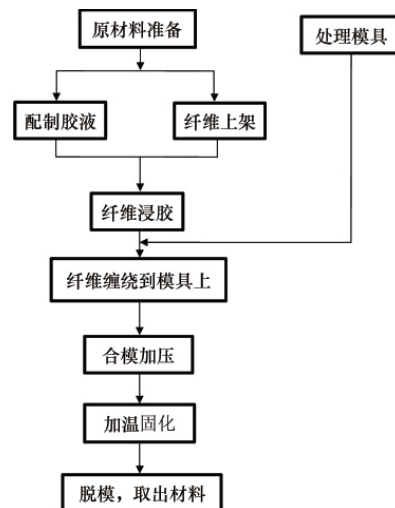


图 2 三角形截面碳纤维复合材料制备工艺流程

Fig. 2 Preparation process of triangle cross-section carbon fiber reinforced plastics

1.2 三角形截面碳纤维复合材料微观形貌

为研究复合材料中纤维的排布规律及分布的均匀性,将制备好的碳纤维复合材料(碳纤维体积含量为 46.37%)切割成小块,用牙脱粉将试样包埋固化后,进行打磨制备试样^[13]。通过扫描电镜观察三角形截面碳纤维复合材料横截面的微观形貌,如图 3 所示。扫描电子显微 (SEM) 分析使用 XL30 ESEM2 FEG, Philips 扫描电镜,15.0kV,最大放大倍数 1 万倍。

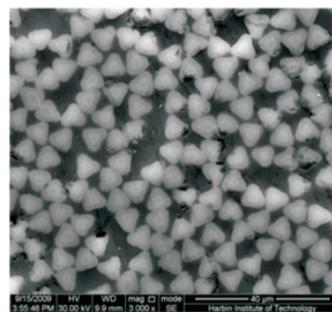


图 3 三角形截面碳纤维在复合材料中的排布形貌

Fig. 3 Cross-section morphology of composite materials

2 结果与分析

2.1 三角形截面碳纤维的分布规律

2.1.1 三角形截面碳纤维分布的均匀性

为研究纤维在复合材料中分布的均匀性,将扫描电镜图片平均分成 9 块,统计每块区域纤维的数量占整幅图纤维总量的比例,用此间接表征纤维分布的均匀性。将 27 组比例数据作为样本,1/9 作为平均比例数,用标准方差 ($S=\sqrt{\text{var}}$)

$\left[\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1} \right]$ 表示纤维分布的均匀度。根据三角形截面碳纤维在复合材料中分布的统计数据(表1)进行计算,纤维体

积含量为 46.37%的复合材料中,三角形截面碳纤维分布的标

准方差很小($S=0.009884$),因此,三角形截面碳纤维在本文研究的复合材料中分布很均匀。

2.1.2 三角形截面碳纤维分布的角度

为研究碳纤维在复合材料中排布的规律,分别对三角形截面碳纤维复合材料不同部位的横截面形貌进行多次观测。

表 1 复合材料中三角形截面碳纤维分布均匀性统计数据

Table 1 Data of triangle cross-section carbon fiber distribution in composite materials

观测区域	1		2		3	
	局部纤维数量	比例	局部纤维数量	比例	局部纤维数量	比例
1	14.7	0.102	17.9	0.127	13.0	0.101
2	16.7	0.116	13.7	0.097	14.1	0.109
3	15.2	0.105	16.4	0.116	14.1	0.109
4	18.3	0.127	16.9	0.120	17.0	0.132
5	16.5	0.114	16.8	0.119	14.0	0.109
6	16.6	0.115	15.9	0.113	15.8	0.122
7	14.9	0.103	14.0	0.099	14.1	0.109
8	15.6	0.108	16.2	0.115	14.6	0.113
9	15.8	0.109	13.0	0.092	12.3	0.095
整体纤维数量	144.3		140.7		129.0	

注:由于所取区域会存在不完整纤维,因此纤维数量不是整数。

Note: Numbers are not integer because there are fragments of fibers in the study area.

对于三角形截面碳纤维复合材料中纤维的排布,每隔 10° 设定一种排布角度,根据三角形碳纤维的截面特征,一共设定 12 种排布角度,如图 4 所示。

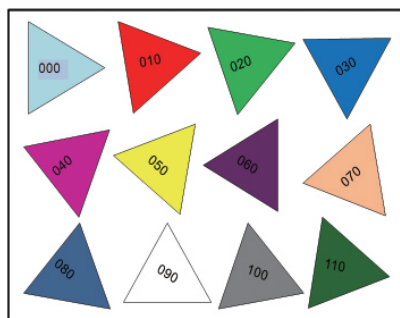


图 4 三角形截面碳纤维在复合材料中的 12 种排布角度示意图

Fig. 4 12 types of angle arrangement of triangle cross-section carbon fibers

根据图 4 中设定的排布角度,针对 13 幅复合材料横截面形貌图(复合材料不同位置形貌图,如图 3),统计了三角形截面碳纤维以各种不同角度排布所占的比例,12 种排布角度在复合材料中的分布情况如图 5 所示。

根据 13 幅图的分析结果,得出三角形截面碳纤维以 12 种角度在复合材料中的排布比例如图 6 所示。可以看出,三角形截面碳纤维以各种角度排布所占比例均在 8% 左右,因此,三角形截面碳纤维在复合材料中是随机排布的,各种排布角度所占比例几乎相同。

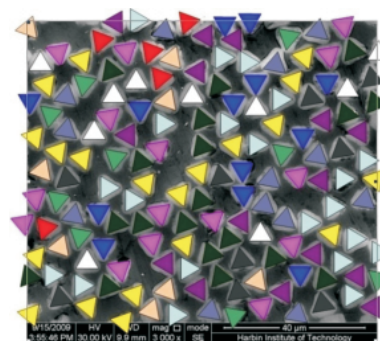


图 5 三角形截面碳纤维不同角度的分布示意图

Fig. 5 Distribution of triangle cross-section carbon fibers

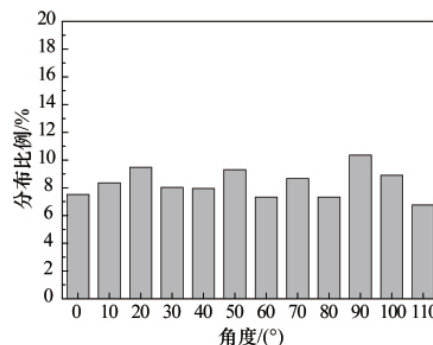


图 6 三角形截面碳纤维不同排布角度的分布比例

Fig. 6 Arrangement percentage of triangle cross-section carbon fibers

2.2 碳纤维复合材料横截面微观形貌的模拟

由于实验研究只能对具体材料的纤维分布规律进行分析,而设计材料结构时需要对不同纤维体积分含量的复合材料进行研究,因此,为了能够预测不同纤维含量复合材料中纤维的排布规律,以便在实验前对材料进行合理的设计,根据蒙特卡洛原理,采用 Matlab 软件模拟了不同纤维含量下复合材料中纤维的排布情况。图 7 为单位面积复合材料内分布 107 根三角形截面碳纤维的模拟结果图,相当于纤维体积分含量为 46.37% 的复合材料横截面。对三角形截面碳纤维复合材料中纤维排布情况进行多次模拟,并将模拟结果进行与上述实验类似的统计研究,分析了模拟图内三角形的分布规律。模拟分析结果表明,三角形是以各种排布角度进行排布的,纤维的分布是比较均匀的,没有明显的密布区域和稀疏区域。

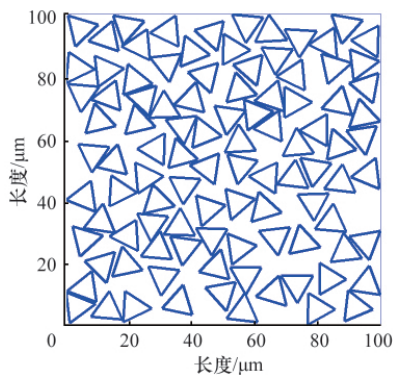


图 7 三角形截面碳纤维复合材料横截面形貌模拟

Fig. 7 Simulated cross-section morphology of composite materials

三角形截面碳纤维排布角度规律的实验结果与模拟结果的对比如图 8 所示。从图中可以看出,两种方法所得的三角形截面纤维在复合材料中的各种排布角度比例均在 8%~10%,与理想的随机分布结果相近。由于本文仅对有限的 13 组分布图进行了分析,因此结果与理想情况会有一些差异,若将分析样本的数量提高,其排布角度所占比例将趋近相同,即三角形截面碳纤维在复合材料中为随机分布。

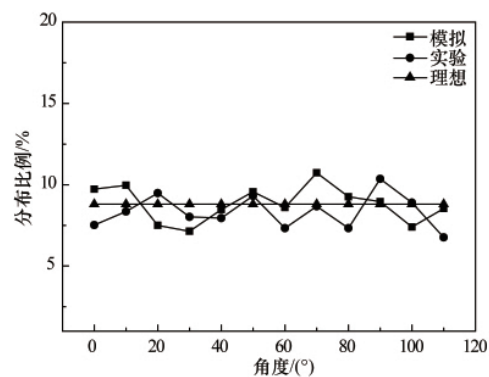


图 8 三角形截面碳纤维分布情况的模拟与实验结果

Fig. 8 Simulated and experimental results of the arrangement of triangle cross-section carbon fibers

3 结论

采用实验与模拟方法,对三角形截面碳纤维在复合材料中的排布规律进行了研究。结果表明,三角形截面碳纤维在复合材料中的排布是不规则的,以各种排布角度比较均匀地排布,不存在明显的密布区域或富树脂区域,而且三角形截面碳纤维分布的模拟结果与实验数据吻合较好。因此,这种模拟方法适用于对纤维在复合材料中排布方式及分布均匀性的分析,可以用来对任意纤维含量复合材料纤维排布规律及均匀度的预测,有利于对复合材料结构的设计,进而有利于分析三角形截面碳纤维复合材料的吸波机理及吸波性能。

参考文献 (References)

- [1] 谢伟,程海峰,楚增勇,等. 新型吸波碳纤维的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(9): 40-43.
Xie Wei, Cheng Haifeng, Chu Zengyong, et al. Materials Review, 2007, 21(9): 40-43.
- [2] 吴红焕,王晓艳,张玲,等. 碳纤维吸波材料的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(5): 115-117.
Wu Honghuan, Wang Xiaoyan, Zhang Ling, et al. Materials Review, 2007, 21(5): 115-117.
- [3] Liu X, Wang R G, Wu Z J, et al. The effect of triangle-shape carbon fiber on the flexural properties of the carbon fiber reinforced plastics[J]. Materials Letters, 2012, 73: 21-23.
- [4] 刘新,王荣国,刘文博,等. 三角形截面碳纤维复合材料弯曲强度 B 基准值[J]. 宇航学报, 2010, 31(6): 1651-1655.
Liu Xin, Wang Rongguo, Liu Wenbo, et al. Journal of Astronautics, 2010, 31(6): 1651-1655.
- [5] Wang R G, Liu X, Liu W B, et al. Prediction of the transverse Young's modulus of unidirectional triangle-section carbon fiber reinforced plastics[J]. International Journal of Materials Research, 2012(4): 513-517.
- [6] 刘新,王荣国,刘文博,等. 异形截面碳纤维复合材料的吸波性能[J]. 复合材料学报, 2009, 26(2): 94-100.
Liu Xin, Wang Rongguo, Liu Wenbo, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(2): 94-100.
- [7] Liu X, Wang R G, Liu W B. The B-basis value of the shearing strength of triangle-shape carbon fibers reinforced plastics[J]. Polymers and Polymer Composites, 2011, 19(4-5): 327-332.
- [8] Chin W S, Lee D G. Development of the composite RAS (Radar Absorbing Structure) for the X-band frequency range [J]. Composite Structures, 2007(77): 457-465.
- [9] Shen G Z, Xu Z, Li Y. Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on W-type La-doped ferrite and carbon fiber composites [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 301(2): 325-330.
- [10] Hamzab C A A, Sokkarb T Z N, El-Morsya M A, et al. Automatic determination of refractive index profile, sectional area, and shape of fibers having regular and/or irregular transverse sections[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(8): 1082-1090.
- [11] Edie D D. The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers[J]. Carbon, 1998, 36(4): 345.
- [12] Pantea D, Darmstadt H, Kaliaguine S, et al. Electrical conductivity of conductive carbon blacks: influence of surface chemistry and topology [J]. Applied Surface Science, 2003, 217(1-4): 181-193.
- [13] Dyer S R, Lassila L V J, Jokinen M, et al. Effect of cross-sectional design on the modulus of elasticity and toughness of fiber-reinforced composite materials[J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2005, 94(3): 219-226.

(责任编辑 许冰,吴晓丽)