

碳纤维复合材料趋肤效应研究

Research on the Skin Effect of Carbon Fiber Composites

孙磊,焦少妮,杜飞,曾志伟(厦门大学 航空系,福建 厦门 361005)

Sun Lei,Jiao Shao-ni,Du Fei,Zeng Zhi-wei(Department of Aeronautics,Xiamen University,
Fujian Xiamen 361005)

摘要:良导体在平面电磁场作用下的趋肤效应有简单的公式描述,而涡流检测中电各向异性材料的趋肤效应却非常复杂。该文通过对碳纤维复合材料的涡流检测进行有限元仿真,研究涡流检测中电各向异性材料的趋肤效应。

关键词:趋肤效应;碳纤维复合材料;各向异性

中图分类号:TB332

文献标识码:A

文章编号:1003-0107(2014)03-0086-03

Abstract: The skin effect of anisotropic material is much more complex than that of good conductors which is described by a simple formula. In the article, we will explore the skin effect of anisotropic material by simulating the eddy current testing of carbon fiber composites with finite element method.

Key words: skin effect; carbon fiber composite; anisotropy

CLC number: TB332

Document code: A

Article ID: 1003-0107(2014)03-0086-03

0 引言

涡流检测是最常用的无损检测方法之一,在工业生产中应用非常广泛。由于趋肤深度的限制,涡流检测只能检测表面或近表面的缺陷^[1],这就限制了涡流检测的使用范围,所以,对趋肤效应的研究是完善涡流检测技术的一个重要方面。对电各向同性良导体在平面电磁场作用下的趋肤效应研究已趋完善,趋肤深度的计算有简单的公式描述,而涡流检测中各向异性导电材料的趋肤效应问题却依旧是一个很复杂的难题,这影响了涡流检测在碳纤维复合材料等电各向异性材料检测中的应用。本文利用有限元法仿真碳纤维复合材料的涡流检测,以此来研究复合材料中的趋肤效应,促进涡流检测在复合材料检测中的应用。

1 趋肤效应

涡流检测是建立在电磁感应原理基础上的一种无损检测方法,只能用于导电材料的检测。当载有交变电流的检测线圈靠近导电试件时,由于线圈磁场的作用,试件会有感应电流产生,这种电流称为涡流。涡流的大小、相位及流动特性受到试件各种因素(如电导率、磁导

率、形状、尺寸和缺陷等)的影响。通过观察涡流的特性判断试件性质、状态,以及有无缺陷的检测方法,叫做涡流检测方法^[2]。

当线圈中通以交变电流时,由于感应作用会引起试件截面上电流分布的不均匀。涡流密度按负指数规律从试件表面向内部衰减,越靠近试件表面,涡流密度就越大,随着距表面深度的增加,涡流密度变小,这就是所谓的趋肤效应。当与表面的距离增大时,电流密度值从100%很快衰减到 $1/e$ (37%),当低于 $1/e$ 时,则变化不明显,故定义涡流密度衰减到其表面值 $1/e$ 时的深度为涡流标准渗透深度 δ ,也叫趋肤深度^[3]。电各向同性材料的趋肤深度为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

其中 f 是检测频率, μ 是磁导率, σ 是电导率。频率越高、导电性能越好或导磁性能越好的材料,趋肤效应越显著。

式(1)适用于平面电磁场情况下的涡流趋肤深度的计算。在线圈作为激励源的涡流检测中,涡流沿深度方向的衰减规律比较复杂。电各向异性材料的电导率 σ 不是常量,而是张量。这种材料的涡流检测中,涡流的衰减

作者简介:孙磊(1989-),男,硕士研究生,研究方向为无损检测;

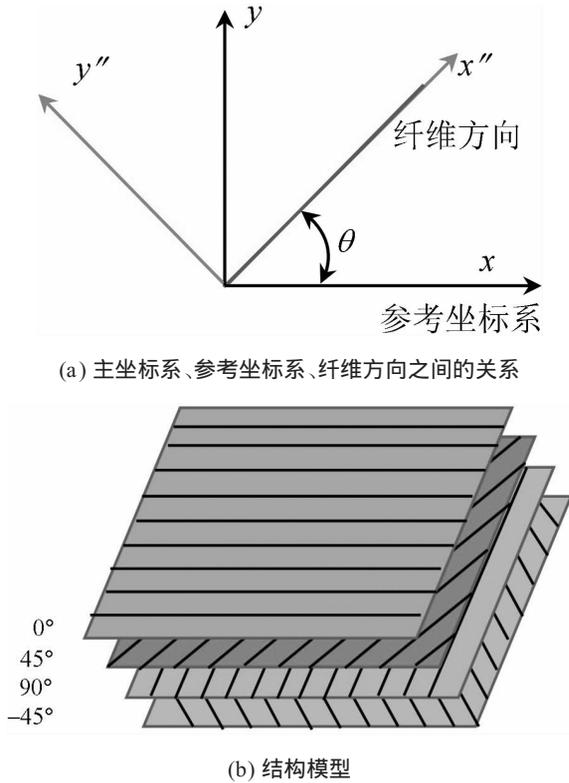
焦少妮(1986-),女,博士研究生,研究方向为无损检测;

杜飞(1991-),男,硕士研究生,研究方向为无损检测;

曾志伟(1974-),男,教授、博士生导师,研究方向为无损检测。

规律更加复杂,难以用解析式进行描述。本文通过数值仿真来研究电各向异性材料的趋肤效应。

2 仿真建模



(a) 主坐标系、参考坐标系、纤维方向之间的关系

(b) 结构模型

图 1 碳纤维复合材料的结构与纤维方向

碳纤维复合材料的结构如图 1(b)所示。它是由不同纤维方向的单层材料组合而成的层压结构,每层的厚度在 0.05~0.2mm 之间^[4]。碳纤维复合材料是一种典型的电各向异性材料。一般认为,碳纤维复合材料的纵向(纤维方向)电导率 σ_L 在 $5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ S/m 之间,而横向(垂直纤维方向)电导率 σ_T 在 $10 \sim 100$ S/m 之间。同时,在层压结构中,相邻铺层之间也会存在电导率 σ_{cp} ,其值与铺层间的压合程度有关,一般也比较小。基于上述考虑,可以用式(2)来表示复合材料的电导率张量^[5]。

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_L \cos^2(\theta) + \sigma_T \sin^2(\theta) & \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin(2\theta) & 0 \\ \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin(2\theta) & \sigma_L \sin^2(\theta) + \sigma_T \cos^2(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{pmatrix} \quad (2)$$

在式(2)中 θ 是单层材料中纤维方向在笛卡尔坐标下的角度,如图 1(a)所示。

仿真模型如图 2 所示,样品板由 80 层相同方向的碳纤维复合材料层压而成,每层厚 0.125mm,总厚度 10mm。空芯线圈内外半径分别是 2mm 和 6mm,高 1mm,提离 0.5mm。扁平状线圈可以提高检测灵敏度。在仿真中,设定电导率 $(\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{cp}) = (10\ 000, 100, 100)$ S/m。

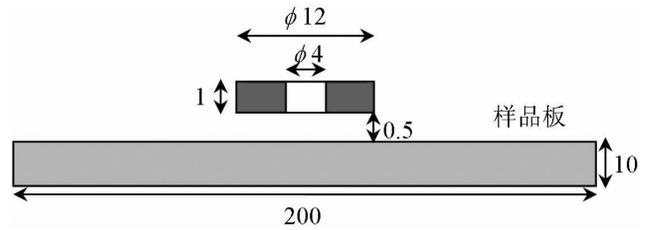
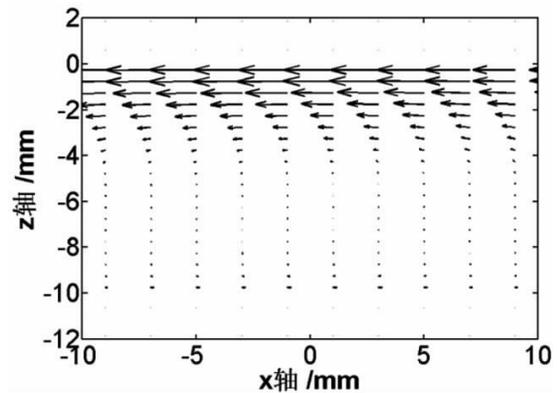


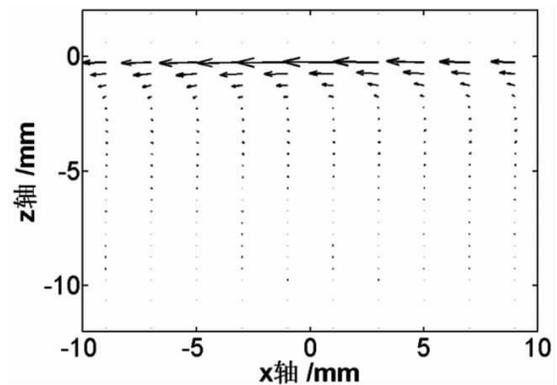
图 2 仿真模型(单位 mm)

3 仿真结果

激励线圈施加频率 10MHz、大小 1×10^6 A/m² 的交流电。在样品板横截面(x-z 平面)中涡流的分布如图 3 所示。从图 3 中可以看出,涡流在样品板中呈现明显的衰减,即出现趋肤效应。为了更具体地分析涡流在碳纤维复合材料板中的衰减规律并获得趋肤深度,我们将 $(x=1\text{mm}, y=5\text{mm})$ 处(选定线圈轴线在样品板上表面的投影为坐标原点)沿 z 方向的归一化涡流密度示于图 4 中。图 4 中同时画出了相同激励作用下电导率分别是 100S/m 和 10 000S/m 的各向同性材料中的涡流衰减曲线以及平面场作用下的涡流衰减曲线。从图 4 中可以看出,各向异性材料中涡流的衰减速度比各向同性材料中的快。而各向同性材料中线圈激励下的涡流衰减曲线和平面场激励下的涡流衰减曲线在电导率较小时差别较大,在电导率较大时差别较小。



(a) 实部



(b) 虚部

图 3 样品板截面上的涡流分布

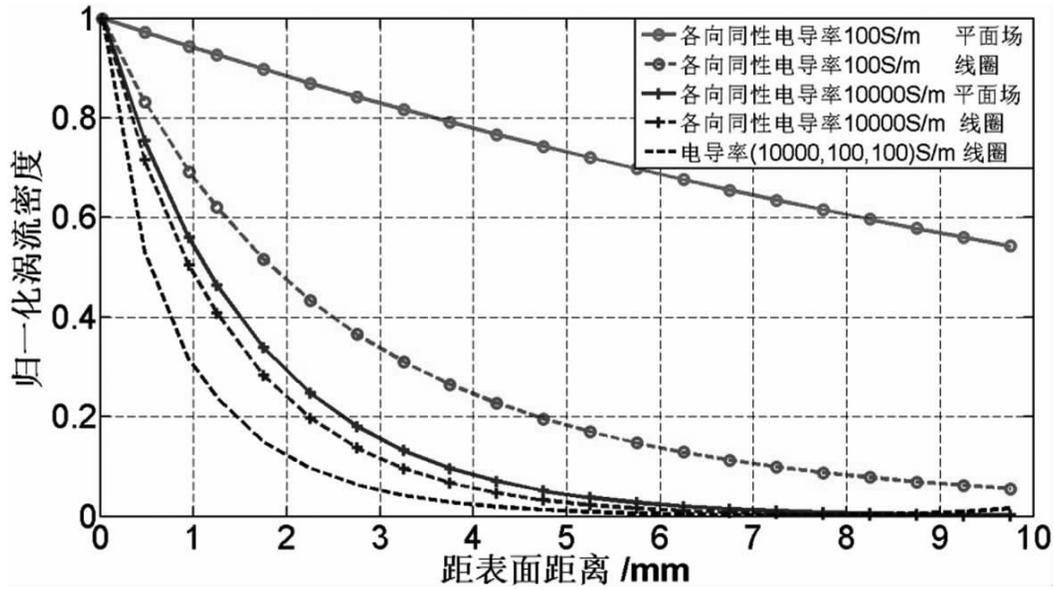


图 4 沿 z 轴方向涡流密度衰减归一化曲线

在如图 4 所示的涡流衰减曲线上,通过查找涡流密度衰减到 $1/e$ 时的点的坐标得到趋肤深度。趋肤深度随频率的变化曲线如图 5 所示。在各个频率上,各向异性

材料的趋肤深度明显小于各向同性材料的趋肤深度。对于各向同性材料,线圈激励下的趋肤深度只有在频率较高时才与平面场激励下的趋肤深度相近。

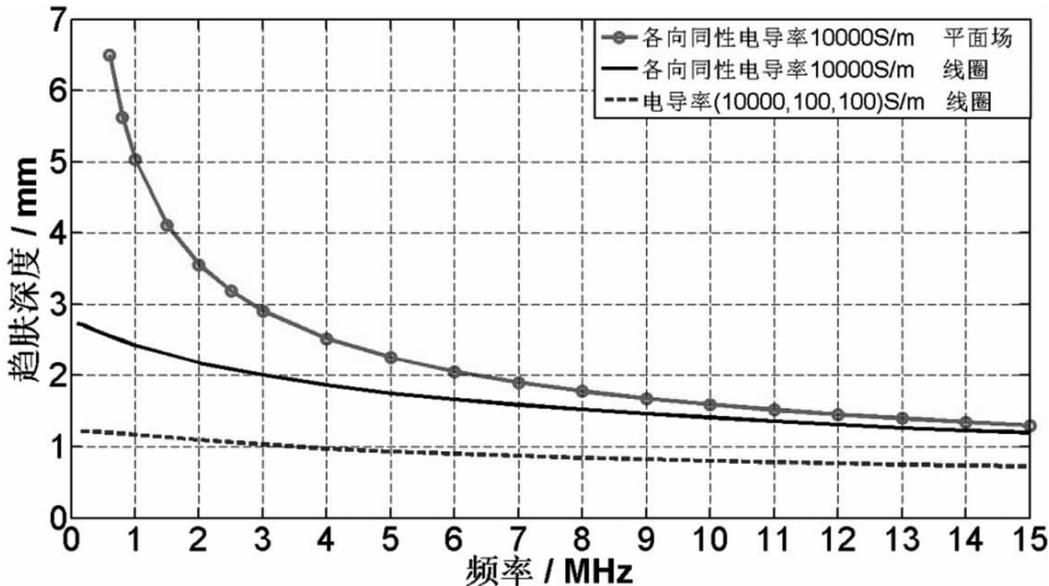


图 5 随频率变化趋肤深度的变化规律图

4 结论

通过以上碳纤维复合材料的涡流检测仿真,可以看出碳纤维复合材料等电各向异性材料存在趋肤效应。与各向同性材料相比,各向异性材料中涡流的衰减速度更快。此研究有助于促进碳纤维复合材料涡流检测的研究。

参考文献:

[1]杜占东,高顶,柳昌庆.涡流检测技术及其应用[J].煤矿机械,1997,(2):57- 58.

[2]任吉林,林俊明.电磁无损检测[M].北京:科学出版社, 2008.

[3]徐可北,周俊华.涡流检测[M].北京:机械工业出版社, 2004.

[4]H.Menana,M.Fé liachi.An integro- differential model for 3- D eddy current computation in carbon fiber reinforced polymer composites[J].IEEE Trans.Magn.,2011,47(4):756- 763.

[5]B.Pratap,W.F.Weldon.Eddy currents in anisotropic composites applied to pulsed machinery [J].IEEE Trans.Magn., 1996,32(2):437- 444.