

复合材料瞬变电磁检测的模拟试验

于润桥 陈兵芽 凡汉云

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

文 摘 建立了小尺度浅层瞬变电磁法检测碳纤维复合材料的计算模型。沿测线将计算模型进行简化,通过 Hankel 变换求取测点的瞬变电磁响应,组合所有测点的数据获得复合材料的瞬变电磁响应。结果表明:异常与试块缺陷有很好的对应关系,计算精度随测点间距的减小而增加。通过与检测试验数据的对比,分析和验证了计算模型的适用性和精度。

关键词 复合材料,瞬变电磁,模拟,响应

Simulation and Experiment on Transient Electromagnetic Testing of Composites

Yu Runqiao Chen Bingya Fan Hanyun

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract An computation model is developed that small yardstick and shallow transient electromagnetic method(TEM) is put forward to detect composites. The model is simplified along a measuring line, and transient electromagnetic response of every measuring point is obtained through Hankel transformation, then all data are converted into a profile of composites. The result shows that the comparison between anomaly and specimen flaws shows an excellent agreement, and computational precision improves along with the reduction of the space between measuring points. Finally, the computation model is verified by experiments.

Key words Composites, Transient electromagnetism, Simulation, Response

0 引言

复合材料在成型过程中易形成孔隙、分层等缺陷,目前对成型缺陷的有效检测,方法有超声、射线照相、声发射、全息照相^[1-2]。

瞬变电磁法是近年来国际上发展最快的电法勘探方法之一。与频率域电磁法相比,瞬变电磁法具有简单易行、探测深度大、信息丰富、不受一次场干扰等优点,在金属矿勘探、油气田、地下水、煤田及工程检测等方面获得应用^[3]。为了适应碳纤维复合材料的结构特点,借鉴地质勘探中的瞬变电磁法,提出小尺度浅层瞬变电磁法对复合材料进行检测。时域电磁法中,正、反演问题是它的理论及方法技术的数理基础,其中,正演问题又是反演问题的基础。至今,仅仅

对于一些简单形状的导体、导磁体及一维层状大地在瞬变电磁场中的响应可以通过数学解析方法得到,它可以用初等函数或积分形式表达出来。然而,多数二维或三维电模型的正演问题,用解析法求解尚存在相当多的问题或不可能。随着电子计算机技术的发展,一些复杂地电条件下,使用数值计算方法求解电磁响应成为了现实。目前的数值计算方法仍然有它的局限性,许多计算方法还显得不十分成熟。应用瞬变电磁法对复合材料进行试验检测和理论研究,在国内外文献中未见报道。本文对复合材料瞬变电磁检测模型进行简化,每个测点都看作层状介质,利用一维正演计算求取二维复合材料的瞬变电磁响应,并与试验结果进行对比分析,结果为实现复合材料瞬变电磁检

收稿日期:2010-06-02

基金项目:航空科学基金(2008ZF56015)

作者简介:于润桥,1963年出生,教授,主要从事电磁检测与仪器研究。E-mail:yurunqiao@163.com

测提供理论基础和技术依据。

1 瞬变电磁法的理论基础

1969年美国地球物理学家 H. F. Morrison 等人根据交变电磁场的 Maxwell 方程组,选择圆柱坐标系,引入阻抗的概念,忽略位移电流的影响。在激励为脉冲波形,同点装置条件下,推导出了层状介质的瞬变电磁场的表达式^[4]。重叠回线装置情况下,频率域感应电压虚部的表达式为:

$$V(\omega) = i\omega q u_0 a I(\omega) \int_0^{\infty} e^{-\lambda h} \frac{z^1}{z^1 + z_0} J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (1)$$

式中, a 为发送回线半径, r 为接收回线的半径, ω 为角频率, n 为地层数, σ_i, h_i 分别为第 i 层的电阻率、层厚度, $J_1(x), J_0(x)$ 分别为一阶、零阶贝赛尔函数, $I(\omega)$ 为激励脉冲电流的频谱表达式, q 为接收线圈的有效面积。式中 z^1 表示第一层的输入电阻, 以下的递推公式推得:

$$z^n = z_n, z^i = z_i \frac{z^{i+1} + z_i \text{th}(u_i h_i)}{z_i + z^{i+1} \text{th}(u_i h_i)} \quad (2)$$

其算法是,从底层(第 n 层)开始,逐次往上递推,最终得到 z^1 。定义第 i 层的表面输入阻抗为:

$$z^i = [E(\lambda, \omega) / H_r((\lambda, \omega))]_i$$

$$z_i = -i\omega\mu_0 / u_i$$

$$u_i = \sqrt{\lambda^2 + i\omega\sigma\mu_0} \quad (3)$$

假设激励电流为单位阶跃电流,则:

$$V(\omega) = q u_0 a \int_0^{\infty} e^{-\lambda h} \frac{z^1}{z^1 + z_0} J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (4)$$

通过傅里叶变换可以得到时间域感应电压为:

$$V(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a q \mu_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda h} \frac{z^1}{z^1 + z_0} J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda e^{i\omega t} d\omega \quad (5)$$

可以表示为关于 ω 的实偶、虚奇函数。依据实偶、虚奇函数的性质简化为余弦积分的简单形式:

$$V(t) = \frac{2C}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Re}[H_z(B)] \cos(Tb) db \quad (6)$$

式中:

$$C = 2q / \sigma_1 a^2, T = 2t / \sigma_1 \mu_0 a^2, b = B^2 = \sigma_1 \mu_0 a^2 \omega / 2,$$

$$\text{Re}[H_z(B)] = a \int_0^{\infty} e^{-\lambda h} \frac{z^1}{z^1 + z_0} J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda$$

由此可见,层状介质的时间响应为一双重无穷积分,内层积分为一含有贝赛尔函数的无穷积分,外层积分为一种余弦积分的简单形式。由于贝赛尔函数的振荡及慢速衰减的特性,使用常规的数值积分方法计算耗时太多,需要使用 Hankel 变换的数字滤波方法^[5-6]。

2 物理模型和模拟方法

设计的碳纤维复合材料试块如图 1 所示,试块缺

陷采用人工加工形式,主要是分层。

模拟分析时,沿测线 AB 分成多个测点,其中,每个测点的计算模型都看作层状介质如图 2 所示(第一层 h_1 为复合材料,第二层 h_2 为分层,第三层 h_3 为复合材料,第四层 h_4 为空气)。通过 Hankel 变换求取测点每个测道的数据,把所有测点的数据组合起来就可以获得复合材料的异常剖面曲线。

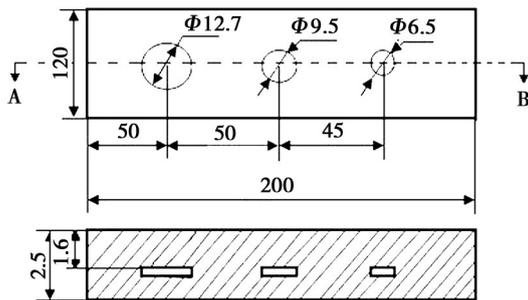


图 1 复合材料试块

Fig. 1 Composites test block

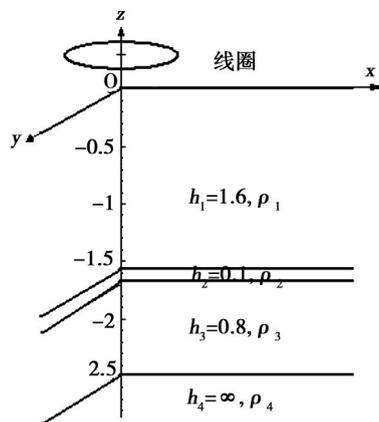


图 2 缺陷中心测点的计算模型

Fig. 2 Computational model of measuring point in the center of defects

3 计算结果与试验验证

检测装置采用重叠回线,其中发射回线的直径为 5 mm,接收回线的面积为 78.5 mm²。取空气和分层的电阻率为 10 GΩ·m,复合材料的电阻率为 1 MΩ·m,单匝回线,发射电流为 1 A,间距为 5 mm,模拟计算结果如图 3 和图 4 所示。

由剖面图形可知,异常与试块缺陷有很好的对应关系。当延迟时间增大时,异常并未减弱,这表明瞬变场响应有滞后现象,异常一旦引起瞬变响应,就会往后延时,并使响应延续较长时间。但异常的幅值并不是完全随延迟时间线性增大的,这也可以从测点的衰减曲线中看出,在 20~200 μs,曲线不再线性下降,而几乎没有变化。

为了验证模拟结果的正确性,采用 WTEM-1Q/GPS 浅部瞬变电磁勘探系统对复合材料试块进

行试验研究。检测系统分为电流发射部分和瞬变信号接收部分,电流发射部分通过驱动电路将控制信号由发射线圈产生一次场,激发的二次场由接收线圈获得经过信号调理后进行数据采集和显示,该二次场是由复合材料受到一次磁场激励后在其内部形成的感应涡流产生。随试块导电性能及空间赋存位置的不同,感应涡流衰变的规律也有所不同,通过分析和研究二次场的时空变化特性,达到解决复合材料缺陷检测的目的,总体框图如图 5 所示。

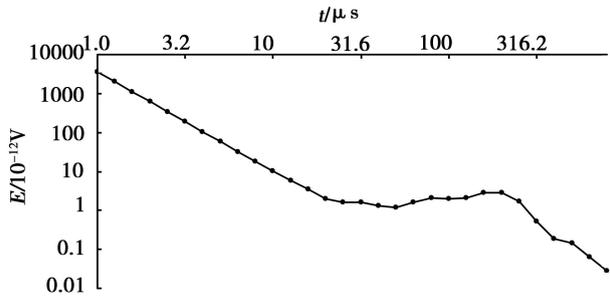


图 3 缺陷中心测点的瞬变电磁响应
Fig. 3 Transient electromagnetic response in center of measuring point

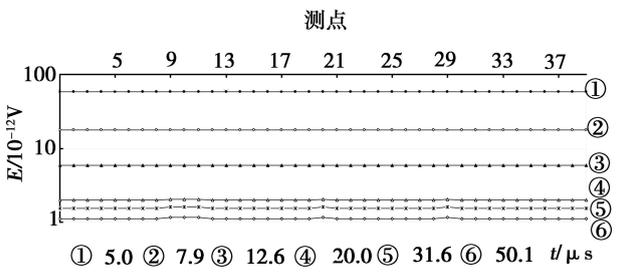


图 4 复合材料的异常剖面曲线
Fig. 4 Anomaly profile curve of composites

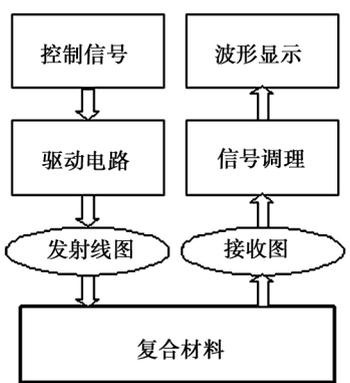


图 5 检测系统框图
Fig. 5 Sketch map of detection system

复合材料检测时,发射和接收回线均为 30 匝,发射电流为 2.69 A,供电频率为 32 Hz,其余同模拟,实

验结果如图 6 所示。6、11 和 16 点异常与试块缺陷中心位置具有一一对应关系,并随延迟时间增加,异常幅值增加,与模拟结果一致。但曲线形态上有所不同,随测点间距的减小,模拟计算结果越来越接近缺陷形状,而实验检测结果的异常是光滑的曲线。这主要是因为模拟时没有考虑缺陷的边缘效应和相互影响,而实际检测过程中是存在的。

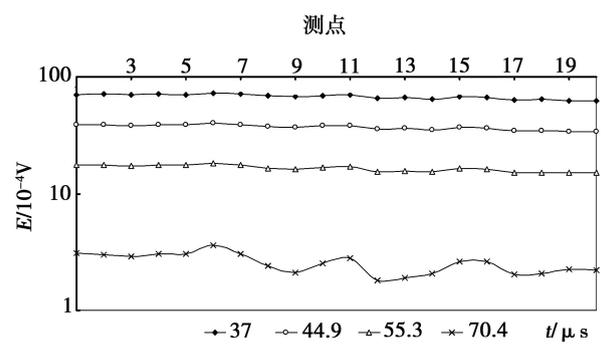


图 6 实验检测结果
Fig. 6 Experimental result

4 结论

- (1)碳纤维复合材料的瞬变电磁检测方法是可行的。
- (2)二维复合材料模型简化为一维层状介质的模拟方法,计算精度随测点间距的减小而增加。
- (3)瞬变场响应有滞后现象,异常一旦引起瞬变响应,就会往后延时,并使响应延续较长时间。因此,瞬变场的晚延迟时段可反映埋藏较浅的异常体。
- (4)设计的检测线圈和实验方法是正确的,但是实验数据需要作进一步的处理解释,才能较好地反映复合材料的内部结构。

参考文献

[1] 李志君. 先进复合材料的无损检测[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 28-31

[2] 徐涛清. 复合材料无损检测技术新进展[J]. 宇航材料工艺, 1996, 26(2): 63-66

[3] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007

[4] Morrison H F. Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half-space[J]. Geophysical Prospecting, 1969, 17: 82-101

[5] Anderson W L. Numerical integration of related hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering[J]. Geophysics, 1979, 44(7): 1287-1305

[6] 考夫曼 A. A. 王建谋译. 频率域和时间域电磁测深[M]. 北京: 地质出版社, 1990

(编辑 任涛)