

DOI: 10.11973/wsdc202001003

脉冲涡流有效渗透深度的测定

陈卫林, 张 昱, 李 骥

(中国核动力研究设计院, 成都 610213)

摘要: 实际脉冲涡流检测结果受多方面因素的影响, 利用标准渗透深度来评估实际脉冲涡流有效渗透深度可能会产生严重的偏差, 进而影响深层缺陷的检出率。对奥氏体不锈钢板开展了脉冲涡流标准渗透深度的理论计算与有效渗透深度的试验测定, 将计算结果与试验结果进行对比后发现试验测定值远小于理论计算值, 分析了上述偏差产生的原因, 为实际脉冲涡流检测中的参数优化与数据分析提供参考。

关键词: 脉冲涡流; 渗透深度; 计算与测定; 偏差分析

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)01-0010-03

Measurement of effective penetration depth of pulsed eddy current

CHEN Weilin, ZHANG Min, LI Ji

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: Standard penetration depth is influenced by various factors, and the effective detection depth evaluated based on standard penetration depth may greatly deviate from the actual one, thus influencing the detection of deep defects. In this paper, the effective penetration depth was theoretically calculated and measured by experiments; and the comparison reveals that the measured value is much smaller than the estimated one. The causes of such deviation were analyzed to provide a reference for detection parameters optimization and data analysis in practical testing.

Key words: pulsed eddy current; penetration depth; calculation and measurement; deviation analysis

涡流检测作为一种非接触式无损检测方法, 具有操作简单、检测速度快、安全、缺陷检出率高等特点, 被广泛运用在航空航天、船舶、核电、机械、建筑、冶金等领域^[1-2]。常规涡流检测以单一频率的正弦波作为激励信号, 通过对目标检测区域内感应电压幅值或相位的采集和分析来实现对表面及近表面缺陷的检出。但是, 上述单频涡流检测是稳态式检测方法, 具有有效渗透深度小, 频谱范围有限且对干扰信号敏感等缺点, 限制了该方法的应用^[1]。相比于传统单频涡流检测, 脉冲涡流检测具有频谱范围广^[3-4], 感应信号丰富、检测深度范围广^[5]、响应速度更快等优势, 对感应电压信号进行时域瞬态分析即可实现缺陷的检测和评估^[6-7]。

收稿日期: 2019-06-27

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX06004003)

作者简介: 陈卫林(1991—), 男, 硕士, 主要从事电磁无损检测工作

通信作者: 李 骥, liji2615@outlook.com

在脉冲涡流检测中, 标准渗透深度是影响检测参数选择的重要参考。但由于实际检测过程受多方面因素的影响, 其并非简单的一维涡流问题, 利用理论计算的标准渗透深度来评估实际有效渗透深度会产生严重的偏差, 影响包括检测频率等在内的关键检测参数的选择, 进而影响缺陷的检出率^[8-9]。

笔者针对工业上常用的奥氏体不锈钢, 开展了脉冲涡流标准渗透深度的理论计算与实际有效渗透深度的试验测定, 将计算结果与试验结果进行了对比, 分析了理论值与实际值产生偏差的原因, 为实际检测的参数优化与数据分析提供了参考。

1 渗透深度计算方法

脉冲涡流的标准渗透深度直接关系到涡流能否有效穿透到缺陷所在位置, 进而实现有效检出。与常规单频涡流不同, 脉冲涡流激励信号(方波)是基波和许多谐波的组合^[10-11], 利用傅里叶展开可表示为

$$s(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_1 t + \phi_n) \quad (1)$$

$$A_n = \frac{2V}{n\pi} |\sin(nk\pi)| \quad (2)$$

式中: A_0 为信号直流分量; ϕ_n 为相位; 基频 $\omega_1 = 2\pi f_1$, f_1 为与基准角频率 ω_1 对应的基准频率; A_n 为振幅谱; $n=1, 2, \dots$; V 为方波信号的幅值; k 为方波信号的占空比。

选择脉冲宽度及周期满足 $T=2\Delta$ (Δ 为脉冲宽度) 的脉冲信号, 则激励信号所有频率分量可表示为

$$\omega = n \frac{\pi}{\Delta} \quad (3)$$

常规单频涡流检测的标准渗透深度可表示为

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)} \quad (4)$$

式中: f 为正弦激励信号的频率; μ 和 σ 分别为导体的磁导率和电导率。

将式(3)代入式(4)中, 当 $n=1$, 占空比为 50% 时, 可以得到脉冲涡流的标准渗透深度 δ_{PW} 为

$$\delta_{PW} = \sqrt{2\Delta/(\pi\sigma\mu)} \quad (5)$$

2 渗透深度测定试验

2.1 脉冲涡流检测系统

脉冲涡流检测系统框架示意如图 1 所示, 该系统由信号发生器、功率放大器、差分放大器、探头以及计算机等组成。系统实施检测时, 信号发生器产生方波电压信号, 经功率放大器放大后驱动检测探头激励线圈, 同时由检测探头的接收线圈对产生的交变电磁场进行检测, 信号经放大后被采集, 最后由计算机分析处理。试验的脉冲涡流检测探头为一发一收式探头, 即该探头由独立的激励线圈(180 匝)和检测线圈(2 300 匝)构成。

待测试样尺寸(长×宽)为 300 mm×165 mm 的 304 不锈钢板, 设置 3 种厚度 H , 分别为 5, 10, 15 mm, 其电导率 σ 为 $1.39 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 磁导率 μ 为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在试样 S1 面加工有尺寸为

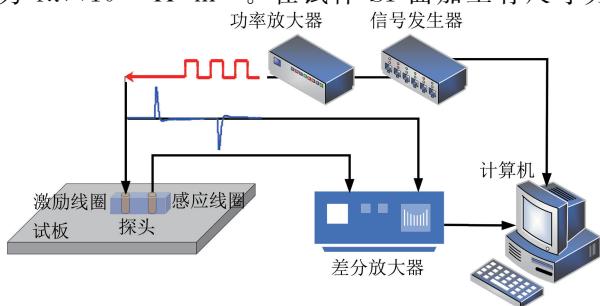


图 1 脉冲涡流检测系统框架示意

$15 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ (直径×深度)的平底孔(见图 2), 将脉冲涡流探头放置于 S2 面进行扫查。若脉冲涡流检测信号能够有效表征该平底孔, 则有效渗透深度可视为与板厚相当。

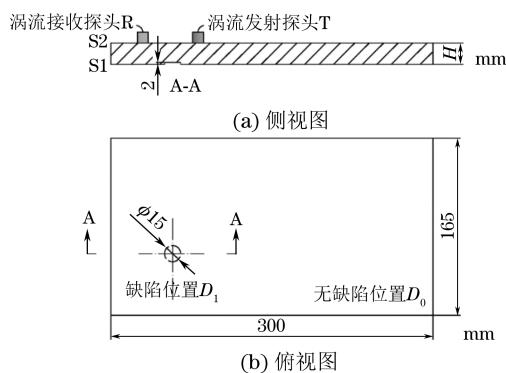


图 2 试样结构示意

试验中激励信号的脉冲宽度为 5 ms, 频率为 100 Hz, 由式(5)计算得出其标准渗透深度为 42.7 mm。脉冲涡流扫查区域示意如图 3 所示, 其中, D 区域尺寸(长×宽)为 50 mm×50 mm, 平底孔位于 D 区域中心。采用探头对 D 区域进行线扫查和面扫查, 得到的典型脉冲涡流响应信号及其典型特征如图 4 所示。在脉冲涡流响应信号的诸多特征值中, 主峰幅值特征在减薄缺陷的检测中应用较多, 因此选取主峰幅值作为脉冲涡流渗透深度的判定指标。

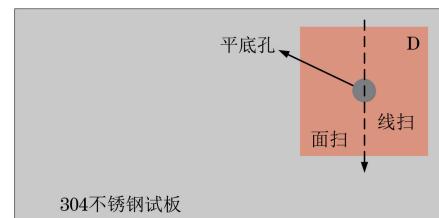


图 3 脉冲涡流扫查区域示意

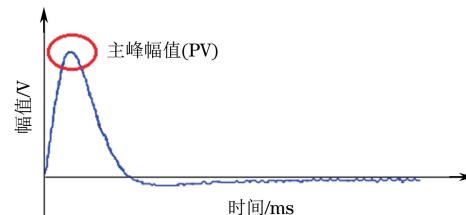


图 4 脉冲涡流响应信号及其典型特征

2.2 线扫结果分析

将线扫主峰幅值按照式(6)进行归一化

$$y = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (6)$$

式中: y 为归一化处理后的特征量; x 为归一化处理前的特征量; x_{\max} 为样本数据的最大值; x_{\min} 为样本数据的最小值。

不同厚度试样的归一化线扫主峰幅值分布如图 5 所示。由图 5 可知, 当 $H=5\text{ mm}$ 时, 曲线平滑, 信噪比较好, 平底孔区域与非平底孔区域信号的差异显著; $H=10\text{ mm}$ 时, 曲线与 $H=5\text{ mm}$ 时的较为接近, 虽然在扫查起始位置处出现一定波动, 但平底孔特征仍然明显; $H=15\text{ mm}$ 时, 曲线存在严重的不规则跳变且分布杂乱, 信噪比较低, 难以辨别出平底孔的位置。

线扫结果表明: 在该试验条件下, 脉冲涡流对 304 不锈钢板的有效渗透深度在 $10\sim15\text{ mm}$ 之间。考虑此次线扫描中采样间距较大, 可能会影响信号特征值的表征能力, 因此对试板进行面扫查, 获取主峰幅值的空间分布云图来论证脉冲涡流的有效渗透深度。

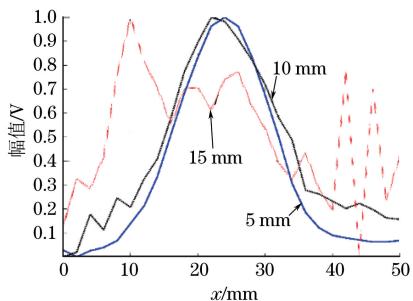


图 5 不同厚度试样的归一化线扫主峰幅值分布

2.3 面扫结果分析

不同厚度试样的面扫主峰幅值二维分布如图 6 所示, 其中 x, y 轴表示位置距离。当 $H=5\text{ mm}$ 时, 主峰幅值分布如图 6(a)所示, 可见无缺陷区域主峰幅值分布较为均匀, 且在平底孔区域内主峰幅值从圆心向四周逐渐降低, 底面边界明显; 根据主峰幅值分布可以大致判断平底孔的直径为 15 mm 左右; 当 $H=10\text{ mm}$ 时, 主峰幅值分布如图 6(b)所示, 与 $H=5\text{ mm}$ 时的分布图相比较, 无缺陷区域色阶分布不均匀, 平底孔区域轮廓模糊, 且无法观测出平底孔缺陷区域的尺寸, 但从图中能大致判断平底孔缺陷的分布位置; 当 $H=15\text{ mm}$ 时, 主峰幅值分布如图 6(c)所示, 此时平底孔区域的主峰幅值与其他区域的无明显区别, 无法根据主峰幅值辨识出平底孔的形状。上述分析表明: 在当前试验条件下, 脉冲涡流对奥氏体不锈钢板的有效渗透深度可达到 10 mm , 无法达到 15 mm 。

综合线扫和面扫结果可知, 在试验条件下, 脉冲涡流对奥氏体不锈钢板的有效渗透深度不超过 15 mm , 远小于理论计算值 42.7 mm , 可能原因如下所述。

(1) 在脉冲涡流实际检测过程中, 线圈形状及结构参数与被检试件中的涡流分布状态密切相

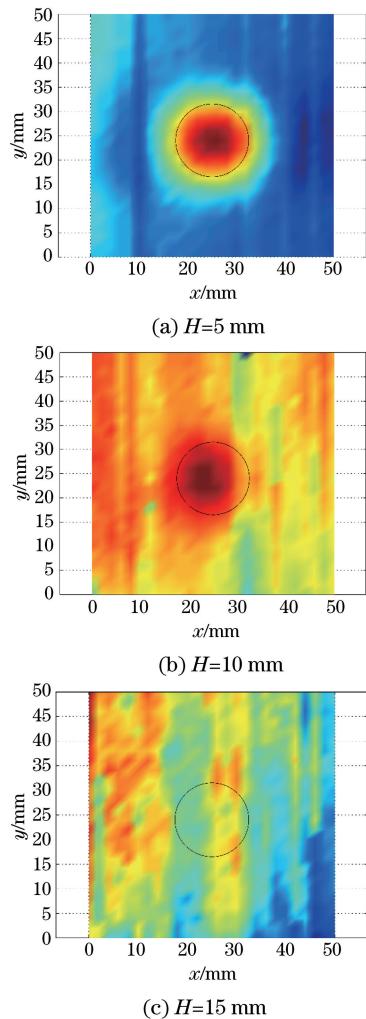


图 6 不同厚度试样的面扫主峰幅值二维分布

关^[12], 为了获得满足要求的涡流渗透深度, 还需要对线圈结构和形状进行适当的调节及优化。

(2) 奥氏体不锈钢在生产及加工的过程中, 由于偏析、热处理不当、冷轧、冷作硬化等原因, 会在母材内产生一定量的铁素体及形变, 诱发马氏体, 造成奥氏体不锈钢试板具有一定的铁磁性^[13]。

(3) 试验选用的奥氏体不锈钢为冷轧钢板, 在其轧制及平底孔加工的过程中晶体点阵会产生畸变和缺陷, 同时诱发材料应力状态的改变, 从而导致材料电导率发生变化^[14]。

3 结论

(1) 当钢板厚度为 5 mm 和 10 mm 时, 基于脉冲涡流信号的主峰幅值可以有效识别出平底孔缺陷; 当钢板厚度增加到 15 mm 时, 无法辨识出平底孔缺陷。结果表明, 在当前试验条件下, 脉冲涡流对奥氏体不锈钢板的有效渗透深度不超过 15 mm 。

(下转第 30 页)

3 结语

利用多次底波法测量 6 种试样的声速,以此为 6 种试样的标称声速,再用相关法进行测量,将所得结果与多次底波法的测量结果进行对比,以验证相关法的正确性和准确性。相关法得到的声速跟多次底波法得到的声速相比,误差在 2.5% 以内,因此相关法测声速的精度是可以接受的。以此为基础,测量了 C/SiC 复合材料 10 个部位的声速,各个部位声速的离散性较大,从而验证了 C/SiC 复合材料内部的不均匀性和高衰减性。

参考文献：

- [1] 史国普.纤维增强陶瓷基复合材料概述[J].陶瓷, 2009, 36(1): 16-20.
 - [2] 李涛, 陈秋阳, 匡乃航, 等. 先驱体转化法制备连续纤维增韧陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 纤维复合材料, 2014, 31(1): 17-21.
 - [3] 赵明, 涂冰怡, 陈养惠. 航空发动机关键部件结构及制造工艺的发展[J]. 航空制造技术, 2015, 481(12): 42-46.
 - [4] 陆铭慧, 李沛芮, 王旭. 复合材料孔隙含量超声多参数评价方法研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(3):

(上接第 12 页)

冲涡流信号的主峰幅值可以有效识别出平底孔缺陷;当钢板厚度增加到 15 mm 时,无法辨识出平底孔缺陷。结果表明,在当前试验条件下,脉冲涡流对奥氏体不锈钢板的有效渗透深度不超过 15 mm。

(2) 试验测定的脉冲涡流有效渗透深度远小于理论计算值 42.7 mm, 二者之间存在较大差异, 该差异可能是由脉冲涡流检测探头的结构、不锈钢加工过程诱发的附加铁磁性及电导率变化等引起的。因此, 在实际检测中需要综合考虑检测系统、扫查方式、材料加工工艺等因素的影响, 并采取相应措施, 如探头优化、材料消磁等, 以提高脉冲涡流的实际渗透深度。

参考文献：

- [1] 杨宾峰. 脉冲涡流无损检测若干关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
 - [2] 徐平. 多层金属结构中腐蚀缺陷的脉冲涡流检测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
 - [3] XIE S J, CHEN Z M, TAKAGI T, et al. Development of a very fast simulator for pulsed eddy current testing signals of local wall thinning[J]. NDT & E International, 2012, 51: 45-50.
 - [4] PARK D G, ANGANI C S, KIM G D, et al. Evaluation of pulsed eddy current response and

55-59.

- [5] 刘海韬, 杨玲伟, 韩爽. 连续纤维增强陶瓷基复合材料微观力学研究进展[J]. 无机材料学报, 2018, 33(7):711-720.
 - [6] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社, 2008.
 - [7] BRAZHNIKOV N I. Pulse-echo ultrasonic thickness gauge with a reduced dead zone[J]. Measurement Techniques, 1975, 18(12): 1834-1835.
 - [8] SHUTTLEWORTH P, MAUPIN J, TEITSMA A. Gas coupled ultrasonic measurement of pipeline wall thickness[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(3): 290-293.
 - [9] 刘磨, 杨宇清, 陆铭慧, 等. 基于一次底波法的玻璃钢容器厚度测量方法研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(1): 97-100.
 - [10] 江志红. 深入浅出数字信号处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
 - [11] 李专, 肖鹏, 熊翔. 连续纤维增强陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2007, 12(1):13-19.
 - [12] 朱颖. 纤维增韧陶瓷基复合材料超声检测关键问题研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.

detection of the thickness variation in the stainlesssteel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 3893-3896.

- [5] 康小伟, 付跃文. 带包覆层铁磁性管道腐蚀脉冲涡流检测技术[J]. 无损检测, 2011, 33(9): 40-42.
 - [6] 周昊. 基于脉冲涡流信号主成分分析的金属测厚研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
 - [7] 何赟泽. 电磁无损检测缺陷识别与评估新方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
 - [8] 游凤荷, 郭文婷. 涡流穿过式传感器实际渗透深度的数学模型[J]. 无损检测, 2003, 25(5): 225-228.
 - [9] 游凤荷, 陈丹, 牛龙江. 涡流三维磁场测量及实际渗透深度建模[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(4): 431-433, 440.
 - [10] 何赟泽, 罗飞路, 刘波, 等. 脉冲涡流技术对飞机结构内层裂纹缺陷的检测识别[J]. 无损检测, 2009, 31(10): 810-813.
 - [11] 姜守安. 奥氏体不锈钢脉冲涡流检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
 - [12] 周德强, 张斌强, 王海涛, 等. 脉冲涡流圆柱型探头参数的优化设计[J]. 无损检测, 2012, 34(9): 7-11.
 - [13] 蒲军, 周强. 核电产品奥氏体不锈钢材料磁导率控制工艺[J]. 机械, 2012, 39(3): 58-62.
 - [14] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.