

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105711

PECT在铁磁性材料测厚中传感器参数分析*

李超月 高鹏 贺柏达 王璇 牛卫飞 李菊峰

(天津市特种设备监督检验技术研究院 天津 300192)

摘要: 脉冲涡流检测中激励参数与传感器参数对检测信号影响较大,分析不同参数对检测信号的影响规律,进而优化设计可提高检测系统的性能。基于脉冲涡流检测原理,建立脉冲涡流铁磁性试件测厚试验系统,分析激励线圈匝数与线圈内径对检测信号的影响规律。试验结果表明,增大激励线圈匝数与线圈内径可提高检测信号分辨率;线圈内径与激励线圈匝数的增加可提高检测信号最小值数量级;通过增加激励线圈匝数与线圈内径可提高传感器的检测厚度范围。

关键词: 脉冲涡流检测;铁磁性材料;测厚;传感器参数

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Experimental analysis of sensor parameters of PECT in thickness measurement of ferromagnetic materials

Li Chaoyue Gao Peng He Boda Wang Xuan Niu Weifei Li Jufeng

(Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin 300192, China)

Abstract: In pulsed eddy current testing (PECT), the excitation parameters and sensor parameters have a great influence on the detection signal. Analyzing the influence law of different parameters on the detection signal can improve the performance of the detection system by optimizing the design. Based on the principle of pulsed eddy current testing, a test system for measuring the thickness of ferromagnetic specimen was established, and the influence of the number of turns and the inner diameter of the excitation coil on the test signal was analyzed. The test results show that increasing the number of turns and the inner diameter of the coil can improve the resolution of the detection signal. The increase of the inner diameter of the coil and the number of turns of the excitation coil can increase the order of magnitude of the minimum value of the detection signal. The detection thickness range of the sensor can be increased by increasing the number of coil turns and the inner diameter of coil.

Keywords: pulsed eddy current testing; ferromagnetic materials; thickness measurement; sensor parameter

0 引言

承压设备是电厂、石化等行业储存、分配和输送能源的关键技术设施。为了对承压设备保温、防潮等需要在外部覆盖保温层或绝缘层。由于外界环境的影响,在其外表面可能出现绝缘下腐蚀(corrosion under insulation, CUI)与管道内介质流动形成流动加速腐蚀(flow accelerated corrosion, FAC)。因此需要定期对其剩余壁厚进行测量,以保障设备能够正常的运转。传统的检测方式是在停机状态下将保温层剥离,用超声等方式测量设备壁厚。检测完成后重新装好包覆层。采用该方法工作量大、检测小效

率低、成本高^[1-3]。

由涡流检测技术(eddy current testing, ECT)发展而来的脉冲涡流检测技术(pulsed eddy current testing, PECT),与传统 ECT 相比 PECT 采用方波作为激励信号,使得激励信号具有很好的穿透性,能够穿透保温层和绝缘层,实现在不拆除保温层的前提下对承压设备不停机检测^[4-7]。

为了提高 PEC 传感器的检测厚度范围与分辨率。国内外学者对 PEC 传感器设计优化方面做了研究。张辉等^[8]基于 ANSYS 仿真矩形脉冲涡流传感器在铝板中涡流衰减规律,结果表明线圈长度、高度与宽度增加时,涡流衰

收稿日期:2021-01-18

* 基金项目:国家市场监督管理总局技术保障专项(2019YJ005)、天津市市场和质量管理委员会科技计划项目(2018-W21)、天津市科技支撑重点项目(20YFZCGX00480)资助

• 6 •

减速度变快。检测分辨率与激励频率、占空和被测试件厚度相关。周德强等^[9-11]基于 Comsol 分析了幅值、占空比与频率对缺陷检测分辨率的影响。朱红运等^[12]分析了脉冲涡流检测中激励电流对检测信号频谱特征的影响规律,表明裂纹缺陷尺寸、激励电流对差分信号频谱特征都有影响。官昊等^[13]采用有限元分别研究了激励电压、激励线圈内径、线圈高度与匝数对检测信号的影响,得出激励电压越大、线圈内径越大检测灵敏度与分辨率越高,激励频率、线圈高度、匝数越多检测灵敏度和分辨率越低,激励信号占空比的变化不影响检测信号的灵敏度与分辨率。

由以上可以看出,当前 PEC 传感器优化研究大多是以非铁磁性材料为主,铁磁性构件由于其磁导率大、检测难度高,相关研究较少,但目前带包覆层的设备大多为铁磁性材质。为了提高 PECT 在铁磁性材料中腐蚀测厚的能力,本文通过建立脉冲涡流测厚试验平台,采用铁磁性试件分析激励线圈匝数与激励线圈内径对检测信号的影响。

1 脉冲涡流检测原理与试验平台

1.1 PEC 测厚原理

PEC 测厚原理如图 1 所示。在铁磁性试件上放置的激励线圈,通以一定占空比、频率与幅值的方波信号时,信号在阶跃时会在激励线圈周围感生出感应磁场 B_1 , B_1 在试件表面感生出连续衰减的圆形涡流,变化的涡流进而感生出感应磁场 B_2 , 检测线圈将磁场 B_1 与磁场 B_2 叠加值的变化转化为电压信号。当被测试件厚度变化时,检测信号也会发生相应的变化,通过对检测信号进行分析,提取特征量可实现被测试件壁厚的测量。

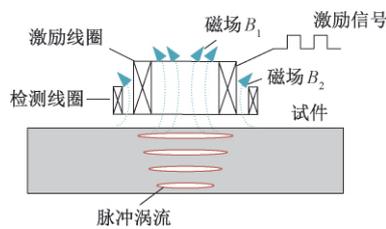


图 1 脉冲涡流原理

1.2 试验平台

如图 2 所示为 PECT 测厚试验系统,基于 Labview 编辑的检测软件可激励产生任意频率、电压与占空比的方波通过 NI 采集卡输入到功率放大器中;功率放大器将来自 NI 采集卡的信号进行放大输出至 PEC 传感器激励线圈;从接收线圈输出的信号通过 NI 信号采集卡输入到 PC 中进行预处理和特征值的提取与储存等。

实验试件材质为 Q235,尺寸为 400 mm×400 mm,厚度分别为 2、4、6、8、10、15、20 mm。

PEC 传感器采用圆形骨架绕制而成,内层先绕制线径为 0.4 mm 的漆包线作为激励线圈,之后再绕制线径为

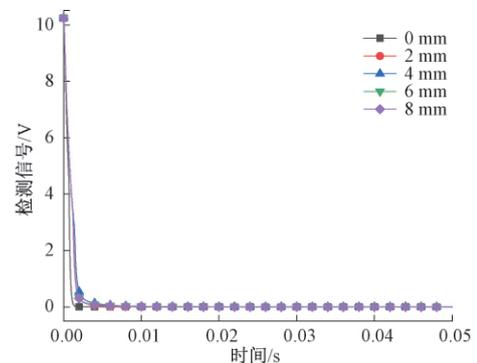


图 2 PECT 测厚试验系统

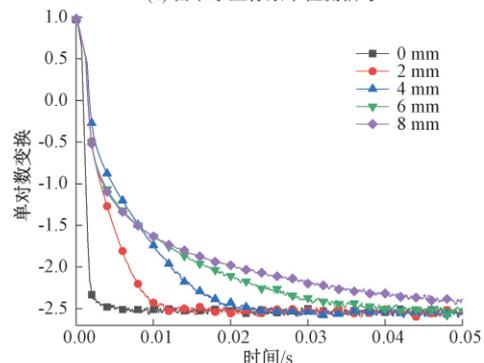
0.2 mm 的漆包线作为接收线圈。

1.3 检测信号特征值提取

检测线圈检测到的磁场信息为磁场 B_1 与磁场 B_2 的叠加值,其中磁场 B_2 是由被测试件中衰减的涡流感生电压信号非常微弱,通常是 mV 或 μ V 级。在笛卡尔坐标系下,不同厚度的检测信号会重合在一起,无法有效区分如图 3(a)所示。由文献^[14-16]可知对检测信号进行单对数变换后,绘制在单对数坐标系中,如图 3(b)所示。



(a) 笛卡尔坐标系下检测信号



(b) 单对数坐标系下检测信号

图 3 PEC 检测信号

不同厚度下检测信号特征清晰显示出来,检测信号曲线后期进入指数衰减阶段,不同厚度试件检测信号在衰减后期趋于直线。被测试件厚度越大感应曲线衰减也慢,其拟合斜率绝对值越小,试件厚度与曲线衰减斜率有着——对应的关系。因此斜率可以作为铁磁性试件厚度信息的特征值,用以对试件厚度的拟合计算。

2 PEC 测厚实验分析

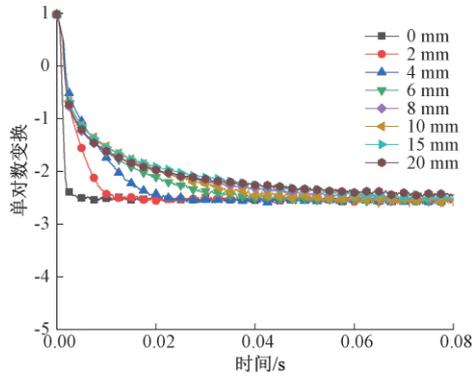
2.1 激励线圈匝数对检测信号的影响

设置激励频率为 2 Hz, 50% 占空比, 1 ms 延边时间, 激励电压为 0.4 V。不同激励线圈匝数的 PEC 传感器, 参数如表 1 所示。

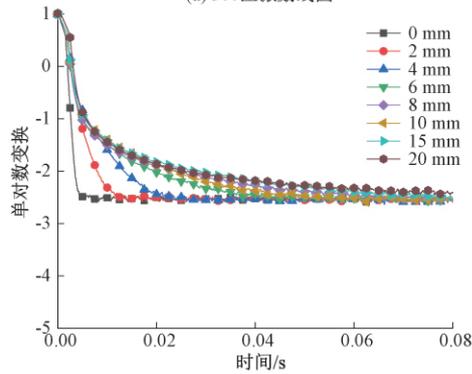
表 1 不同激励线圈匝数的 PEC 传感器参数

编号	内径/mm	高度/mm	激励线圈/匝	检测线圈/匝
1	46	20	300	1 200
2	46	20	600	1 200
3	46	20	1 200	1 200
4	46	20	1 800	1 200

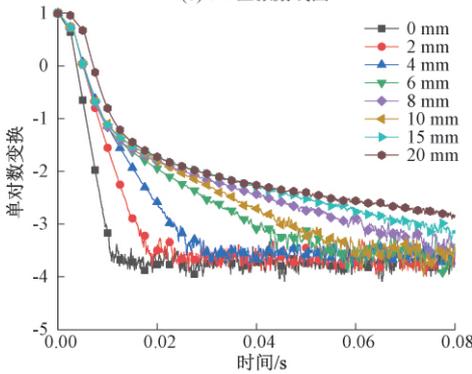
分别对不同厚度试件进行测试, 采集检测信号。检测信号经过预处理与单对数变换后如图 4 所示。



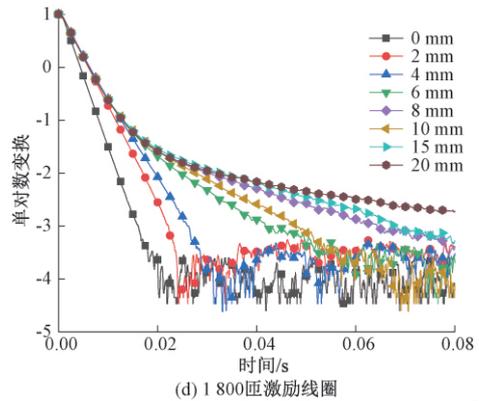
(a) 300匝激励线圈



(b) 600匝激励线圈



(c) 1 200匝激励线圈



(d) 1 800匝激励线圈

图 4 不同匝数激励线圈检测信号

观察图 4 可以看出, 随着激励线圈匝数的不同, 检测信号的衰减速率也不一致, 即随着激励线圈匝数的增加, 检测信号衰减速率越来越慢, 不同厚度试件检测信号更易于区分, 提高了检测信号分辨率。且激励线圈匝数的增加, 检测信号最小值也发生了变化, 激励线圈匝数越多, 检测信号的最小值数量级越高, 即能检测到信号的分辨率越高。但随着激励线圈的增加, 检测信号的信噪比也在逐渐降低。

对不同激励线圈匝数下不同试件厚度的检测信号进行特征值的提取, 采用式(1)进行归一化, 如图 5 所示。

$$N = T_i / T_{MAX} \tag{1}$$

式中: N 为归一化值; T_i 为各厚度检测信号特征值; T_{MAX} 为最薄厚度试件检测信号特征值。

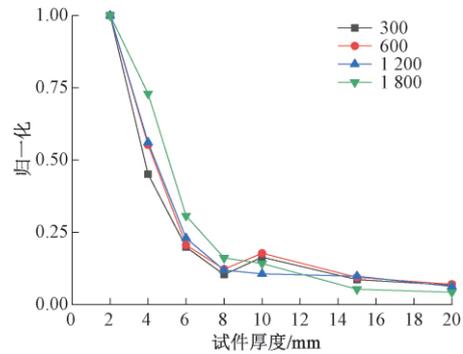


图 5 不同激励线圈匝数下检测信号特征值

观察图 5 可以发现, 在 2~8 mm 厚度试件中, 不同激励线圈匝数下检测信号的衰减规律相似, 随着试件厚度的增加检测信号也在逐渐降低。

对于激励线圈匝数为 300 和 600 匝的传感器在 10 mm 厚试件检测信号特征值会发生突变而增加, 且 15 与 20 mm 厚试件检测信号特征值变化不大, 表明传感器在测量 10 mm 以上试件时检测信号特征值无法表示试件厚度的变化, 此时传感器的测量范围在 2~8 mm。

对于 1 200 匝激励线圈的传感器在 2~15 mm 厚试件检测信号特征值在逐渐减小, 20 mm 厚试件检测信号特征值与 15 mm 厚检测信号特征值相同, 表明传感器检测厚度

范围在 2~15 mm。对于 1 800 匝激励线圈的传感器在 2~20 mm 厚试件检测信号特征值,随着试件厚度的增加特征值逐渐减小。表明传感器的检测厚度范围在 2~20 mm。

上述表明随着激励线圈匝数的增加,不仅可以提高检测信号的分辨率,而且可以提高检测传感器的检测能力。

2.2 线圈内径对检测信号的影响

设置激励频率为 2 Hz,50% 占空比,1 ms 延边时间,激励电压为 0.4 V。不同线圈内径的 PEC 传感器,参数如表 2 所示。

表 2 不同线圈内径 PEC 传感器参数

编号	内径/mm	高度/mm	激励线圈/匝	检测线圈/匝
1	8	20	1 800	1 200
2	26	20	1 800	1 200
3	46	20	1 800	1 200

分别对不同厚度试件进行测试,采集检测信号。检测信号经过预处理与单对数变换后如图 6 所示。

观察图 6 可以发现,线圈内径的不同,检测信号的衰减速率也不一致,随着线圈内径的增加,检测信号衰减速率逐渐放缓,不同厚度试件检测信号易于区分,提高了检测信号的分辨率。同时随着线圈骨架的增加,检测信号的最小值也在逐渐减小,检测信号的分辨率进一步提高。但检测信号信噪比随着线圈内径的增加逐渐降低。

对不同线圈内径下的检测信号进行特征值的提取,采用式(1)进行归一化,如图 7 所示。

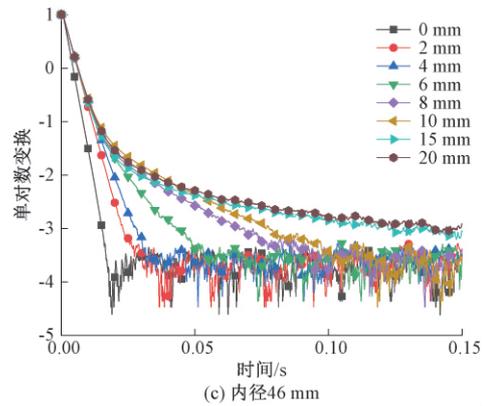
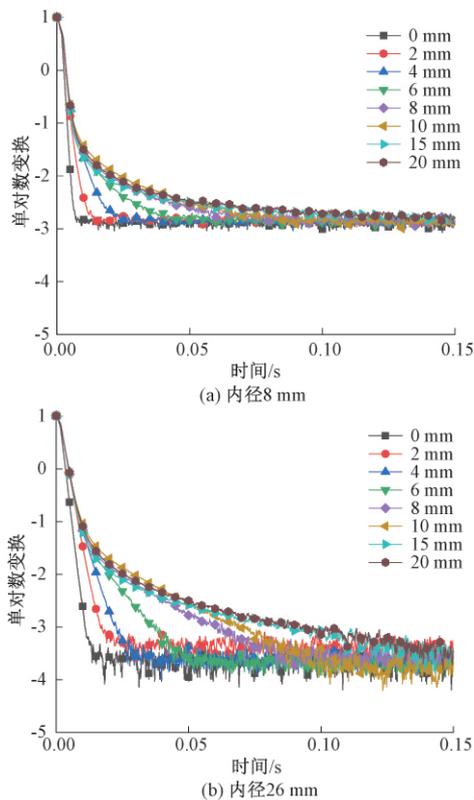


图 6 不同内径线圈的检测信号

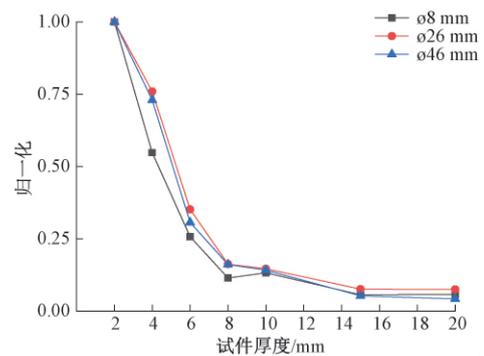


图 7 不同线圈内径检测信号特征值

观察图 7 可以发现,对于线圈内径为 8 mm 的传感器,在 2~8 mm 厚试件检测信号特征值,随试件厚度的增加特征值逐渐减小,但在 10 mm 处检测信号特征值突然增大,在 15 与 20 mm 厚试件检测信号特征值相同,表明传感器在测量 10 mm 以上试件时检测信号特征值无法表示试件厚度的变化,此时传感器的测量范围在 2~8 mm。对于内径为 26 mm 的传感器,在 2~15 mm 厚试件检测信号特征值在逐渐降低,而 15 与 20 mm 厚试件检测信号特征值相同,表明传感器的检测厚度范围在 2~15 mm。

对于内径为 46 mm 的传感器,在 2~20 mm 厚试件检测信号特征值,随着试件厚度的增加在逐渐降低,在 10 mm 处没有发生突然增加。表明传感器的检测厚度范围在 2~20 mm。综上所述,随着线圈内径的增加,提高了检测信号的分辨率,同时也提高了检测传感器的检测范围。

3 结 论

本文探究了 PECT 测厚检测中激励参数与传感器参数对检测信号的影响,建立了 PECT 测厚试验系统,制作了不同参数的 PECT 传感器。在不同厚度 Q235 铁磁性试件中,分析了激励线圈匝数、线圈内径对的不同对检测信号影响规律。

1) 激励线圈匝数与线圈内径可提高检测信号的分辨率。

2)激励线圈匝数的增加与线圈内径的增加,可提高检测信号最小值的数量级。

3)通过增加激励线圈的匝数与线圈内径可提高传感的检测能力。即传感器检测厚度范围随着激励线圈匝数与线圈内径的增加而增大。

参考文献

- [1] 武新军,张卿,沈功田.脉冲涡流无损检测技术综述[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1698-1712.
- [2] 马炬,邹金慧.铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(7):137-144.
- [3] 张涛.基于脉冲涡流的传感器设计及仿真研究[J]. 电子测量技术,2020,43(12):163-167.
- [4] CHEN X L, LI W, WANG Z H. Inversion method in pulsed eddy current testing for wall thickness of ferromagnetic pipes [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 (12): 9766-9773.
- [5] MARDANINEJAD R, SAFIZADEH M S. Gas pipeline corrosion mapping through coating using pulsed eddy current technique[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019, 55(11):858-867.
- [6] 孙虎,师奕兵,张伟,等.铁磁性套管脉冲涡流检测的时域解析解[J]. 仪器仪表学报,2020,41(6):179-186.
- [7] XIE S J, CHEN X M, TAKAGI T, et al. Quantitative non-destructive evaluation of wall thinning defect in double-layer pipe of nuclear power plants using pulsed ECT method[J]. Ndt & E International, 2015, 75(6):87-95.
- [8] 张辉,杨宾峰,王晓锋,等.脉冲涡流检测中参数影响的仿真分析与实验研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2012,13(1):52-57.
- [9] 周德强,闫向阳,尤丽华,等.脉冲涡流矩形传感器参数的仿真优化与实验[J]. 传感器与微系统,2013,32(5):13-16.
- [10] 闫向阳,周德强,左晓芳,等.脉冲涡流矩形传感器参数仿真优化设计[J]. 失效分析与预防,2013,8(1):6-9.
- [11] 周德强,闫向阳,尤丽华.激励参数对脉冲涡流缺陷检测的仿真分析[J]. 无损检测,2012,34(10):8-11.
- [12] 朱红运,王长龙,江涛,等.激励电流对脉冲涡流检测的影响研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(1):1-8.
- [13] 宫昊,郝宪锋,王安泉,等.脉冲涡流检测激励参数和激励线圈参数的优化设计[J]. 无损检测,2020,42(3):20-25.
- [14] 柯海,徐志远,黄琛,等.基于信号斜率的铁磁材料脉冲涡流测厚研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(10):2376-2381.
- [15] CHENG W, KOMURA I. Simulation for the assessment of wall thinning using eddy current method [J]. AIP Conference Proceedings, 2011, 1335(1):372-379.
- [16] 梁远远,杨生胜,文轩,等.脉冲涡流无损检测中缺陷定量化技术研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(11):70-78.

作者简介

李超月,工学硕士,助理工程师,主要研究方向为电磁无损检测新技术和新方法。

E-mail:lichaoyu@outlook.com