

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211680

金属保护层对脉冲涡流检测影响实验研究*

李超月^{1,2} 王璇^{1,2} 牛卫飞^{1,2} 高鹏^{2,3} 贺柏达^{1,2}(1.天津市特种设备监督检验技术研究院 天津 300192; 2.国家市场监督管理总局重点实验室(特种设备数字孪生共性技术)天津 300192;
3.天津农学院 天津 300384)

摘要:石化设备为保温会包裹一层由隔热层与金属保护层组成的包覆层,应用脉冲涡流检测技术可实现不拆包覆层条件下设备的壁厚检测。但在实际检测中由于金属保护层材质与厚度不一致,会对检测结果与检测误差产生影响。本文搭建了脉冲涡流实验平台,分析不同类型、厚度金属保护层在不同隔热层厚度下对脉冲涡流检测信号影响,结果表明:当金属保护层为铝板与不锈钢板时,其厚度或隔热层厚度增加会增大特征值离散程度,但不影响特征曲线趋势,可通过特征曲线计算被测试件厚度;当金属保护层为镀锌钢板时,其高磁导率特性产生的屏蔽效应与感生涡流会对检测信号衰减及特征曲线产生影响。随着镀锌钢板厚度增加,不同厚度试件检测信号后期衰减差异越小。当隔热层厚度增大到 50 mm 时,检测信号基本重合,无法通过特征曲线计算被测试件厚度。

关键词:脉冲涡流检测;包覆层设备;金属保护层;壁厚检测

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 51010

Experimental study on the influence of metal protective layer on pulsed eddy current testing

Li Chaoyue^{1,2} Wang Xuan^{1,2} Niu Weifei^{1,2} Gao Peng^{2,3} He Boda^{1,2}

(1. Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin 300192, China;

2. Key Laboratory of Digital Twin Generic Technology in Special Equipment for State Market Regulation, Tianjin 300192, China;

3. Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Petrochemical equipment always coated with a coating composed of thermal insulation layer and metal protective layer for thermal insulation. The application of pulsed eddy current testing technology can realize the wall thickness detection without removing the coating. However, in actual testing, the material and thickness of the metal protective layer are inconsistent, which will affect the testing results and testing errors. In this paper, a pulsed eddy current experiment platform was built to analyze the impact of different types and thicknesses of metal protective layers on the pulsed eddy current testing signal under different insulation layer thicknesses. The results show that when the metal protective layers are aluminum and stainless steel plates, the increase in their thickness or insulation layer thickness will increase the dispersion of characteristic values, but will not affect the trend of characteristic curves. The thickness of the tested part can be calculated through the characteristic curves; when the metal protective layer is galvanized steel plate, the shielding effect and induced eddy current generated by its high magnetic permeability characteristics will affect the detection signal and characteristic curve. With the increase of the thickness of the galvanized steel plate, the difference of the late attenuation of the detection signal of the specimens with different thicknesses is smaller. When the thickness of the insulation layer increases to 50 mm, the detection signals are basically coincident, and the thickness of the tested piece cannot be calculated through the characteristic curve.

Keywords: pulsed eddy current testing; insulation layer equipment; metal protective layer; wall thickness detection

0 引言

在石油化工和电力行业中设备为保温以减少能量损

失,会包裹一层由隔热材料与金属保护层组成的包覆层。为对带包覆层设备进行检验检测,需要在停机状态下将其拆除,检测完成后重新安装,检测工作量大,较为繁琐。

收稿日期:2022-10-12

* 基金项目:天津市科技支撑重点项目(20YFZCGX00480)、天津市市场监督管理委员会科技计划项目(2021-W01)、天津市市场监督管理委员会科技计划项目(2021-W24)、国家市场监督管理总局科技计划项目(2022MK011)资助

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),采用一定占空比的方波作为激励信号,使得激励信号具有很好的穿透性,能够穿透金属保护层与隔热材料检测设备的腐蚀情况,实现不拆除保温层的在线检测,因此得到了越来越多的关注与研究^[1-2]。

国内外学者针对 PECT 在不拆包覆层的应用展开了大量的研究,徐志远等^[3]建立了脉冲涡流检测传感器参数模型,模拟不同提高高度下脉冲涡流场的扩散过程,来分析试件厚度变化时检测线圈中电压的变化情况,并通过试验证明了模型的有效性。Li 等^[4]采用检测信号磁场的相对变化量作为特征值计算提高高度,采用塑料块模拟包覆层建立起 PEC 试验系统,试验表明提高高度计算相对误差小于 5%。张卿等^[5-6]应用电磁波反射和折射构成 PECT 模型中各层磁矢位的表达式,通过扩展的传递矩阵法对其求解,得到了平底孔 16Mn 试件的 PECT 解析解,并对其进行实验验证了模型的正确性。Azizzadeh 等^[7]建立起 PECT 三维仿真模型,通过磁铁对被测磁化达到磁饱和的方式,实现不同提高高度下 PEC 传感器对试件亚表面缺陷的检测。Nalika 等^[8]建立起不同提高下 PEC 传感器线圈检测电压衰减率梯度与铁磁试件厚度的定量关系,用于大直径铁磁材质管道壁厚的测量。Li 等^[9]建立起铁氧体探头的仿真模型,提出采用 PEC 检测信号提高交叉点特性用于壁厚反演计算,通过采用塑料切片模拟包覆层的试验进行了验证。上述学者研究中,仅仅考虑保温层厚度造成的提高影响,分析中简化模型,忽略金属保护层的存在,未考虑到金属保护层对脉冲涡流的影响。

Cheng^[10-11]建立了内/外双激励线圈,有效降低了激励线圈表面涡流占地面积,提高了 PECT 检测灵敏度,实现了 0.5 mm 厚铝板与不锈钢板保护层下壁厚腐蚀测量。孙杰等^[12-13]研究表明采用铝皮金属保护层时,采用脉冲涡流对设备腐蚀检测无影响,而当金属保护层为白铁皮时特别是搭接处,铁皮厚度增加会影响检测信号无法正常检测。上述学者在实验中增加了金属保护层,但没有考虑分析材质或厚变化造成检测影响。

根据《工业设备及管道绝热工程设计规范》中对保护层设计要求,常用的金属保护层种类有铝板、不锈钢板、镀锌钢板。金属保护层在接缝处还存在搭接、插接、咬接等形式,此时金属保护层的厚度将会加倍,在实际检测中保护层的种类不一,厚度不均匀。因此本文通过建立脉冲涡流检测实验平台,分析不同种类、不同厚度的金属保护层在不同隔热层厚度下对 PECT 检测的影响。

1 PECT 检测原理与实验平台

1.1 PECT 检测原理

脉冲涡流检测原理如图 1 所示,在带有隔热层与金属保护层的被测试件上放置 PEC 传感器,激励线圈中通以一

定占空比的方波信号,当激励信号处于阶跃过程时,激励线圈周围会感生出变化的一次磁场 B_1 , B_1 会在试件中感生出连续衰减的涡流,涡流进而感生出变化的二次磁场 B_2 。当无金属保护层时,检测线圈将磁场 B_1 与 B_2 叠加值的变化转为电压信号;在实际检测中传感器会放置于金属保护层上方,激励线圈感生出的一次磁场和试件中感生出的二次磁场均会受到金属保护层的电磁影响,因此检测线圈接收到的是被金属保护层影响后的一次磁场 B_1' 与二次磁场 B_2' 叠加的变化转化为电压信号,当试件中存在腐蚀缺陷时,试件中衰减涡流将发生改变,进而影响到检测线圈中电压的变化,通过对检测信号的处理、提取特征值,即可分析检测区域是否存在腐蚀缺陷。

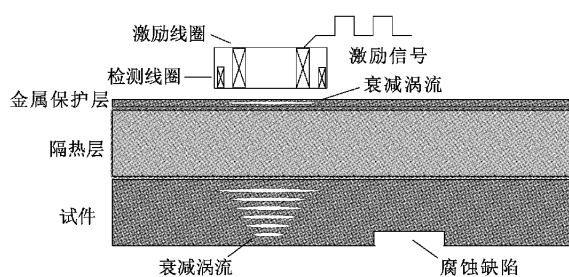


图 1 脉冲涡流检测原理

1.2 实验系统的搭建

根据脉冲涡流检测原理,搭建检测实验系统如图 2 所示,主要仪器设备:PC、NI 采集卡、功率放大器、PEC 传感器、试件、隔热层、金属保护层。其中基于 Labview 软件编译了脉冲涡流检测程序输出方波激励信号。激励信号通过 NI 采集卡输出端输入到功放中,放大后信号输入到 PEC 传感器的激励线圈中。检测线圈检测到的电压信号经过 NI 采集卡的输入端传回检测软件中进行预处理、滤波、分析与储存。

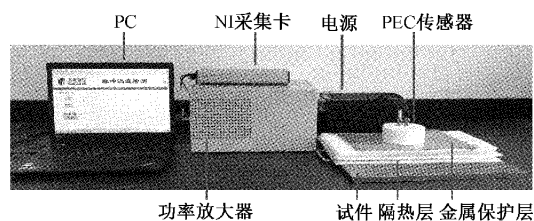


图 2 脉冲涡流检测实验系统

PEC 传感器结构如图 2 所示,采用圆型骨架绕制而成,其中内层为激励线圈,外层为检测线圈,传感器参数如表 1 所示。

表 1 PECT 传感器参数

参数	内径/mm	高度/mm	线径/mm	匝数
激励线圈	26	20	0.4	1 200
检测线圈	46	20	0.2	1 200

1.3 检测信号特征值提取

首先对在无隔热层、无金属保护层条件下对不同厚度试件进行检测,激励信号频率:2 Hz, 占空比:50%,各厚度试件连续采集五次并提取特征值,以平均值作为当前厚度试件检测信号的特征值,以减少测量时的随机误差。由 1.1 节可知试件中衰减的涡流感生出的二次磁场 B_2' 会包含试件的厚度信号,且二次磁场信号非常微弱,由接收线圈感生出的电压信号通常为 mV 或 μV 级的,因此在笛卡尔坐标系下很难观察不同厚度试件的检测信号。根据文献[14-16]可知通过式(1)对检测信号幅值进行对数变换,绘制于单对数坐标系中,如图 3 所示。

$$Y = \lg(V) \tag{1}$$

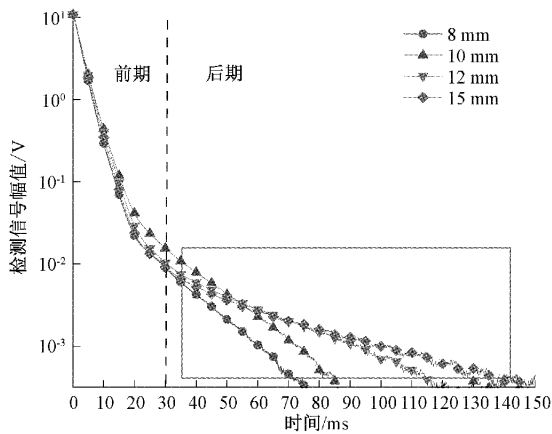


图 3 PEC 的检测信号

从图 3 可以观察到,检测信号的幅值经过单对数变换后,不同厚度试件的感应电压信号特征清晰表现出来。检测信号前期各厚度试件检测信号基本相重合,衰减一致,这是因为检测信号的前期包含了 B_1' 与 B_2' , 且此时 B_1' 远远大于 B_2' , 因此信号的衰减主要体现了激励线圈中磁场的衰减。检测信号后期进入指数衰减阶段,主要由试件表面涡流感生出二次磁场 B_2' 在持续衰减,此时检测信号衰减趋于直线段。采用式(2)对后期方框内的检测信号进行拟合,以斜率 k 作为检测信号特征值用以对试件厚度的拟合计算。试件厚度与特征值建立的特征曲线如图 4 所示,试件厚度与信号衰减速率存在一一对应的关系,检测试件厚度越大,检测信号的衰减越慢,信号特征值越大,因此可通过特征曲线来计算出被测试件的厚度。

$$Z = kx + b \tag{2}$$

1.4 不同金属保护层对 PEC 检测信号影响实验

选取尺寸为 400 mm×400 mm 的 Q235 试块作为被测试件,厚度分别为 8、10、12、15 mm。采用单块厚度为 5 mm 的白色泡沫模拟隔热层,设置隔热层的厚度分别为 10、20、30、40、50 mm。金属保护层的种类及厚度如表 2 所示。实验时先在试件上平铺隔热层,再覆盖金属保护层,最后将 PEC 传感器放置在金属保护层上。按 1.3 中所述设置激励

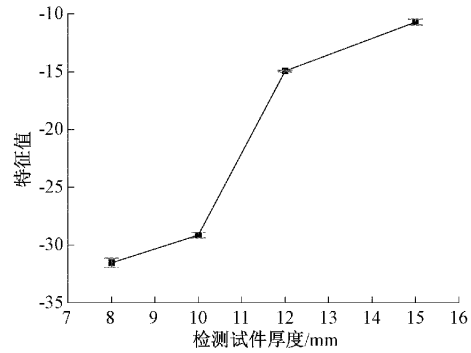


图 4 特征曲线

信号与采集检测信号。

表 2 金属保护层及厚度

编号	种类	厚度/mm
1	铝板	0.4、0.6、0.8、1.0
2	不锈钢板	0.3、0.5、0.6
3	镀锌钢板	0.3、0.5、0.7

2 结果分析与讨论

2.1 铝板对检测信号影响

根据 1.4 节所述,采集不同厚度隔热层与铝板保护层条件下被测试件检测信号,提取特征值,绘制不同厚度铝板下检测信号特征曲线分布图,如图 5 所示。并计算不同厚度铝板保护层下检测信号特征值标准差的平均值,采用特征值离散程度来表示,金属保护层对检测信号的影响强弱。

观察图 5 可以看出,在 10~30 mm 厚的隔热层下,不同厚度铝板特征曲线基本重合,特征值大小一致。在 40~50 mm 厚隔热层下,不同厚度铝板特征曲线趋势相同,检测信号特征值标准差由 0.34 增加到了 0.96 和 0.86,检测信号特征值离散程度逐渐增大,即铝板对检测信号影响越大。

上述表明,在 30 mm 厚隔热层以下,铝板厚度的改变对特征值大小及特征曲线趋势影响较小。随着隔热层厚度增加检测信号强度逐渐降低,铝板对检测信号影响逐渐增大,因此在大提离下会对特征值大小造成影响,但不影响特征曲线趋势。

2.2 不锈钢板对检测信号影响

采集不同厚度隔热层、不锈钢板保护层条件下被测试件检测信号,并提取特征值,绘制不同厚度不锈钢板下检测信号特征曲线分布图,如图 6 所示。并计算不同厚度不锈钢板保护层下检测信号特征值标准差的平均值。

观察图 6 可以看出,在相同厚度隔热层下,不锈钢板下检测信号特征值大小与无金属保护层时存在偏差,且不锈钢板厚度越大特征值偏差越大,但不同厚度不锈钢板下检测信号特征曲线趋势相同。随着隔热层厚度增加检测信号

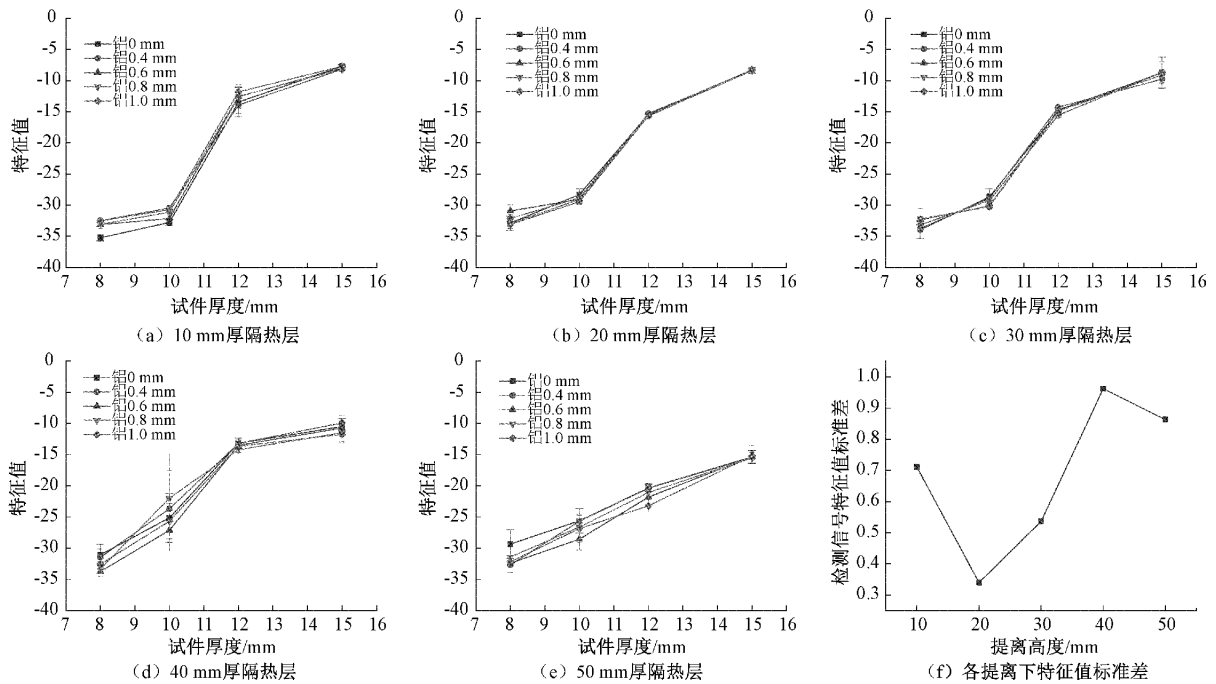


图 5 不同厚度铝板不同隔热层下的检测信号特征值

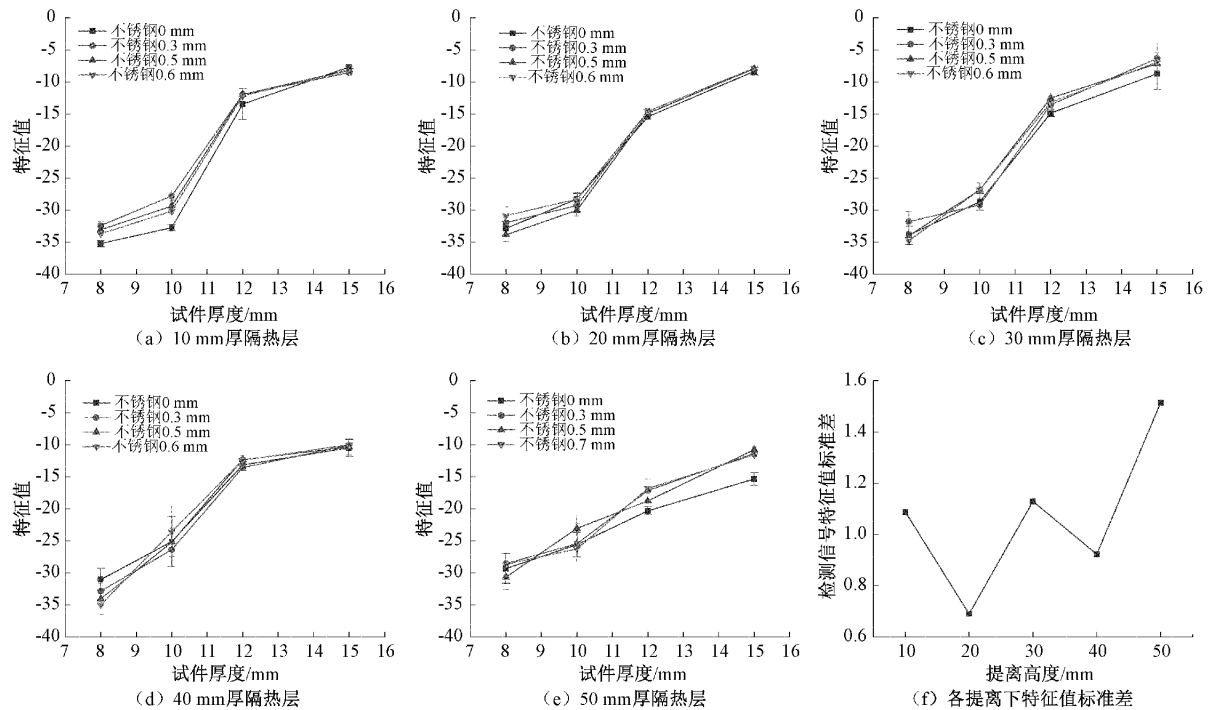


图 6 不同厚度不锈钢不同隔热层下的检测信号特征值

特征值标准差由 0.69 增加到 1.54,不同厚度不锈钢板下检测信号特征值离散程度增加。

上述表明,当金属保护层为不锈钢板时,脉冲涡流检测信号特征曲线规律不受影响。但不锈钢板的存在会影响检测信号特征值的大小,随着隔热层厚度增加检测信号强度逐渐降低,不锈钢板越厚对检测信号影响越大。

2.3 镀锌钢板对检测信号影响

采集不同厚度隔热层、镀锌钢板保护层条件下被测试件检测信号,并提取特征值,绘制不同厚度镀锌钢板下检测信号特征曲线分布图,如图 7 所示。并计算不同厚度镀锌钢板保护层下检测信号特征值标准差的平均值。

观察图 7 可以看出,在 10 mm 厚隔热层下,不同厚度

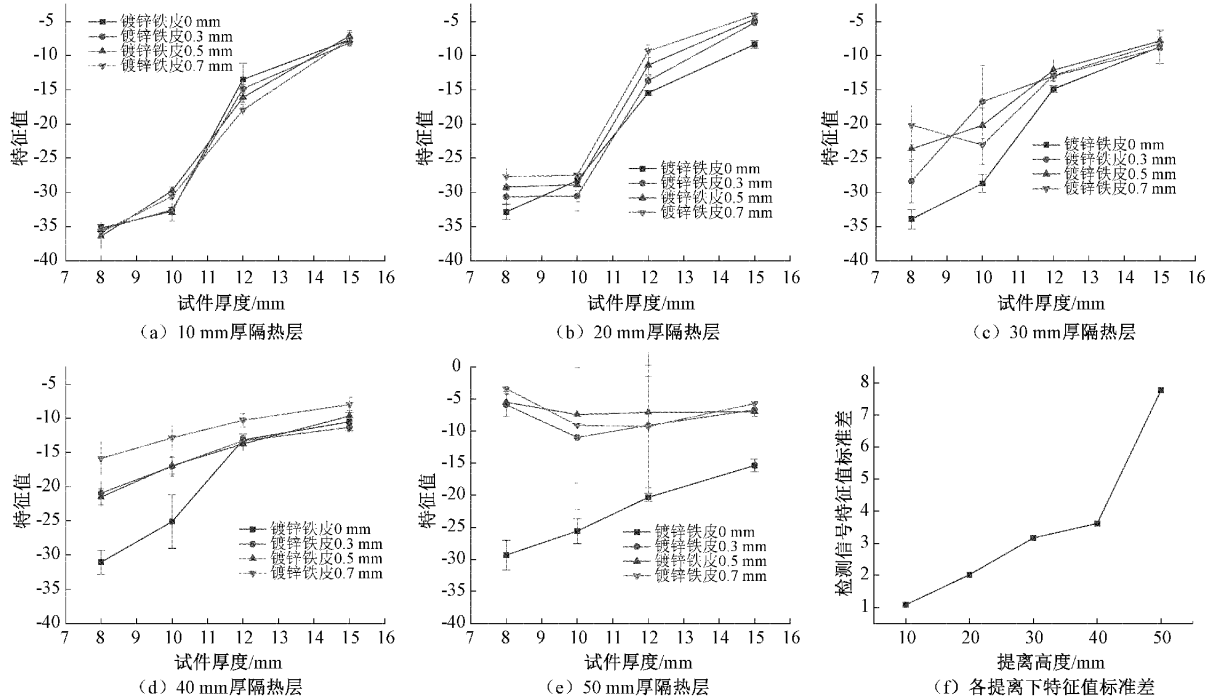


图 7 不同厚度镀锌钢板不同隔热层下的检测信号特征值

镀锌钢板检测信号特征曲线趋势相同,但特征值大小存在一定偏差;在 20~30 mm 隔热层厚度下,镀锌钢板保护层对检测信号特征值影响较为明显,检测信号特征值标准差由 1.1 增加到了 2.0 和 3.2,检测信号特征值离散程度逐渐增大。8 mm、10 mm 厚试件存在镀锌钢板保护层时特征值基本不变,表明当存在镀锌钢板保护层时在 20 mm 隔热层下无法有效区分 8 mm、10 mm 厚试件,在 10~15 mm 试件下各厚度检测信号特征曲线趋势相同,可通过特征曲线计算试件厚度;在 40 mm 厚隔热层下,随镀锌钢板厚度的增加,不同厚度试件检测信号特征值之间的差距减小,表明镀锌钢板厚度越大,不同厚度试件检测信号后期衰减差异越小;在 50 mm 厚隔热层下,检测信号特征曲线趋近于直线,各厚度试件检测信号特征值随试件厚度变化不大。

上述研究表明,当金属保护层为镀锌钢板时,会对检测信号衰减及特征曲线趋势产生明显影响。镀锌钢板厚度越大,不同厚度试件检测信号的后期衰减速率差异越小检测信号越相似。随着隔热层厚度的增加,已无法区分 10 mm 厚以下试件厚度,当隔热层厚度达到 50 mm 时,不同厚度试件检测信号重合,无法通过检测信号特征曲线计算被测试件厚度。表明随着隔热层厚度的增加,镀锌钢板影响越大。

2.4 讨 论

为分析产生上述现象的原因,分别列出被测试件、隔热层、金属保护层的材料属性如表 3 所示。

由本文 1.1 节检测原理部分分析可知脉冲涡流在检测过程中一次磁场 B1 需穿过金属保护层才能作用于被测

表 3 材料属性

	Q235	隔热层	铝板	不锈钢板	镀锌钢板
电导率 σ / (MS/m)	1.6	0	21.6	1.35	2.0
相对磁导率	200	1	1	1	300

试件,同时被测试件中的二次磁场 B2 也需穿过金属保护层才能被检测线圈接收到。由集肤效应可知,一次磁场 B1 与二次磁场 B2 在穿过金属保护层时会在其表面感生出涡流。而脉冲涡流检测中采用低频激励,金属保护层厚度通常小于 1 mm,根据集肤深度式(3)可知, δ 大于金属保护层厚度,因此金属保护层厚度越大感生出涡流强度越大。

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu_r \mu_0 \sigma)} \tag{3}$$

铝板与不锈钢板作为非铁磁性材料,具有低磁导率与导电不导磁特性,其表面感生出的涡流较小。当隔热层厚度增大时,由于二次磁场 B2 微弱更容易受到影响,因此金属保护层厚度增加和隔热层厚度增大将对脉冲涡流检测信号衰减产生影响,改变检测信号特征值大小,但不影响检测信号特征曲线趋势,可根据不同厚度隔热层与金属保护层建立的特征曲线来计算被测试件厚度。

而镀锌钢板其自身具备高磁导率特性,在激励阶段将屏蔽部分一次磁场 B1,激励线圈中的激励磁场只有一小部分到达被测试件。同样,在接收阶段二次磁场 B2 也会被屏蔽,只有少部分可被检测线圈接收到,且镀锌钢板越厚、隔热层越厚屏蔽效应越严重。同时由于镀锌钢板高磁

导率的特性,镀锌钢板中感生出较强的感应涡流也会影响检测信号的衰减。因此当金属保护层为镀锌钢板时,金属保护层厚度的变化会对检测信号特征值及特征曲线趋势产生明显影响。镀锌钢板厚度越厚,各厚度试件检测信号后期衰减速率差异越小,检测信号衰减越相似。当隔热层达到 50 mm 时,各厚度试件检测信号基本重合无法,无法通过检测信号特征曲线计算被测试件厚度。

3 结 论

本文研究了金属保护层对脉冲涡流检测信号的影响,基于脉冲涡流检测原理,搭建了实验平台,分析了不同类型及厚度金属保护层在不同隔热层厚度下对检测信号的影响,得到以下主要结论:

当金属保护层为铝板或不锈钢板时,其厚度增大或隔热层厚度增加将影响检测信号的衰减,进而影响特征值的大小,但不会影响检测信号特征曲线趋势,可通过特征曲线计算出被测试件的厚度;

当金属保护层为镀锌钢板时,由于其高磁导率的特性产生的屏蔽效应与感生出较强涡流,会对检测信号衰减及特征曲线趋势产生明显影响。镀锌钢板厚度增加影响检测信号后期衰减,检测信号特征值差距减小,无法区分 10 mm 厚以下试件。当隔热层厚度增大到 50 mm 时,镀锌钢板下检测信号基本重合,检测信号特征曲线趋近于直线,无法通过特征曲线计算被测试件厚度。

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] LIU B L, HUANG P J, HOU D B, et al. Application of Hilbert-Huang transform in denoising and recognition of pulse eddy current testing [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2018, 30(3): 233-251.
- [3] 徐志远,武新军,康宜华,等.脉冲涡流检测集总参数模型[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(5): 1-5.
- [4] LI J, WU X J, ZHANG Q, et al. Measurement of lift-off using the relative variation of magnetic flux in pulsed eddy current testing [J]. NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2015, 75:57-64.
- [5] 张卿,武新军.基于电磁波反射和折射理论的平底孔试件脉冲涡流检测解析模型[J].物理学报,2017,66(3): 335-342.
- [6] ZHANG Q, WU X J, LI J. An analytical method for pulsed eddy current testing of the steel plate with a

flat-bottom hole[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2016, 52(1): 339-345.

- [7] AZIZZADEH T, SAFIZADEH M S. Detection of sub-surface defects in ferromagnetic steels using a pulsed eddy current technique [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2018, 60(6):311-316.
- [8] NALIKA U, ALEN A, VALLS M J, et al. Non-destructive evaluation of ferromagnetic material thickness using pulsed eddy current sensor detector coil voltage decay rate[J]. NDT & E International, 2018, 100: 108-114.
- [9] LI Y, WANG Y, LIU Z S, et al. Characteristics regarding lift-off intersection of pulse-modulation eddy current signals for evaluation of hidden thickness loss in clad conductors[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4102.
- [10] CHENG W. Pulsed eddy current testing of carbon steel pipes' wall-thinning through insulation and cladding[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(3):215-224.
- [11] CHENG W, KOMURA I. Pulsed eddy current characterization of local wall-thinning [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 45(1-4):179-184.
- [12] 孙杰,李绪丰,胡华胜,等.金属保护层厚度对 PEC 检测结果影响的实验研究[J].无损探伤,2020,44(2): 17-20.
- [13] 孙杰,李绪丰,付跃文.基于 PECT 的金属保护层重合处干扰研究[J].中国特种设备安全,2020,36(2): 40-46.
- [14] 李超月,高鹏,贺柏达,等.PECT 在铁磁性材料测厚中传感器参数分析[J].电子测量技术,2021,44(5): 6-10.
- [15] 梁远远,杨生胜,文轩,等.脉冲涡流无损检测中缺陷量化技术研究[J].仪器仪表学报,2018,39(11): 70-78.
- [16] 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.

作者简介

李超月,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:lichaoyuelichaoyue@outlook.com

高鹏(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail:penggao_tjsei@163.com,penggao@tju.edu.cn