DOI: 10.3901/JME.2021.06.010

小径管脉冲远场涡流检测研究*

余兆虎 付跃文 江礼凡 杨 帆

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063)

摘要: 小径管如热交换器管等在工业中应用广泛,不少使用情况下需要定期检测。远场涡流技术是检测小径管缺陷的有效技术之一,在此基础上,脉冲远场涡流检测技术结合了脉冲涡流的频谱丰富性和远场涡流技术同时检测内外管壁缺陷的特点。应用脉冲远场涡流检测技术对小径管进行检测,并对该技术中差分式探头和绝对式探头的检测特点进行系统详细的研究。设计一种新型差分式探头,其接收部分由两个差分连接的检测线圈组成。差分结构中的一个检测线圈用作绝对式线圈,其检测信号采用一个信号采集通道处理,同时两个线圈的差分信号则采用另一个信号采集通道处理。通过数值仿真分析了检测原理,并对腐蚀、孔状和裂纹三种类型管道试件缺陷进行了系列检测研究。试验结果表明探头中的差分线圈对裂纹类、孔类缺陷具有很好的检测灵敏度,远优于绝对式线圈的检测能力,但对检测渐变腐蚀类缺陷不敏感;同时探头中的绝对式线圈对渐变腐蚀具有很好的检测灵敏度。绝对式线圈检测信号中存在着明显的伪峰信号,但差分式线圈则能够有效抑制伪峰信号。所设计的应用双通道处理方法的探头可同时对有效检测三种类型的缺陷,并且脉冲涡流检测所具有的缺陷深度定位特征也仍然有效。

关键词: 脉冲远场涡流; 小径管; 差分; 双通道; 伪峰

中图分类号: TG115

Study on Inspection for Small Diameter Tubes Using Pulsed Remote Field Eddy Current Method

YU Zhaohu FU Yuewen JIANG Lifan YANG Fan

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract: Small diameter tubes such as heat exchanger tubes are widely used in industry, and usually require regular inspection in many services. Remote field eddy current testing (RFEC) is one of the effective nondestructive testing methods to detect defects in small diameter tubes. Pulsed remote field eddy current (PRFEC) method combines the rich spectrum of pulsed eddy current with the characteristic of RFEC to detect inner and outer defects simultaneously. PRFEC method is used to detect small diameter tubes, the detection characteristics of the differential probe and the absolute probe in this technology are systematically studied. A novel differential probe is designed with two receiving coils connected in differential mode. One receiving coil of the differential probe is used as absolute coil and its signals are processed with one signal channel. The differential signals from two receiving coils are processed with another signal channel. The detection principle is analyzed through numerical simulations, and three types of defects, corrosion, hole and crack are tested in experiments. The experimental results show that the designed differential probe has a high detection sensitivity for cracks and holes, which is much higher than the absolute coil, but wide defects are detected by the absolute coil. Signals of the absolute coil have obvious spurious peaks, but the spurious peak can be restrained by the differential probe. Three kinds of defects can be effectively detected using designed probe with dual-channel signal reception method, and the defect depth characteristic of pulsed eddy current testing is still valid.

Key words: pulsed remote field eddy current; small diameter tube; differential structure; dual-channel; spurious peak

0 前言

油气井、电厂的承压设备管道在服役期间,会

产生各种腐蚀、孔状缺陷,由于高温高压,还会产生危险性极大的裂纹。这些缺陷的形成机理复杂,检测结果影响因素多,管道检测技术也较为复杂。目前常采用超声检测、射线检测、漏磁检测,涡流检测四大检测方法对管道进行检测。超声检测时需要耦合剂使得探头与管道表面耦合,大量管道表面

* 国家自然科学基金资助项目(51667016)。20200525 收到初稿,20201113 收到修改稿

经常附着较厚的氧化皮, 因此该方法受到了较大的限制; 射线检测由于射线源, 检测环境要求高, 在实际现场检测过程中会造成污染问题; 漏磁检测对闭口裂纹缺陷的检测能力不够; 常规涡流由于趋肤效应, 涡流渗透深度有限, 对检测埋藏表面较深处缺陷的检测能力不足。

在 20 世纪 40 年代, 对铁磁性管道检测提出了一种新型的涡流检测技术——远场涡流检测。该方法突破了常规涡流趋肤效应的限制, 检测管道的内外表面缺陷具有相同的检测灵敏度, 能够克服一定的提高效应, 有效检测管道腐蚀、裂纹类缺陷^[1-2]。由于远场涡流检测无法区分内外壁缺陷, 激励频率少, 通过将正弦激励改为脉冲激励, 从而提出了脉冲远场涡流检测技术。脉冲涡流对铁磁性管道有更强的渗透能力, 丰富的频谱使其能够获得更多的检测信息, 该技术已经运用于金属管道、金属板构件等的腐蚀和裂纹类缺陷的检测^[3-5]。脉冲远场涡流结合脉冲涡流的优势使得检测缺陷信息更为丰富, 检测灵敏度有很大提高, 远场涡流无法区分内外壁缺陷的问题得到了一定程度的解决。SUN 等^[6]对脉冲远场涡流进行了有限元仿真, 解释了脉冲激励下的远场涡流在管道中的传播过程, 研究了脉冲激励、管道壁厚和缺陷参数对脉冲远场涡流信号响应的影响。VASIC 等^[7-9]对恶劣环境下铁磁性管道壁厚和内径进行了检测, 并且还发现高频、激励与检测线圈之间的较短距离是内径检测的必要条件。杨理践等^[10]采用脉冲远场涡流, 运用过渡区检测信号幅值与过零时间特征有效区分管道内外全周向的缺陷。杨宾峰等设计了一种脉冲远场涡流阵列传感器, 检测线圈由四个沿管道周向间隔 90° 阵列摆放, 检测区域虽然无法覆盖管道, 但是对管道内径及内外部缺陷具有较高检测灵敏度。除此之外, 利用铁氧体磁轭设计的激励线圈不仅提高了响应信号的幅值而且缩短了探头长度, 使得探头可在过渡区接收缺陷信号^[11-12]。YANG 等^[13]提出了一种多层磁聚焦传感器结构, 采用平面脉冲远场涡流技术对铁磁性平板表面及内部缺陷进行了有效检测。张伟等^[14]分析了脉冲远场涡流信号特征, 采用双线圈结构及零均值归一化信号处理方法较为有效抑制了检测信号中的伪峰信号。

脉冲远场涡流技术通过以上方法的改进, 检测灵敏度有了显著的提高。除此之外, 在远场涡流检测中, 由于相对微弱的响应信号, 常采用差分结构的方法来提高传感器的检测灵敏度。CARDELLI 等^[15]利用等效网络模型对差分结构传感器在正弦

稳态和正弦脉冲激励下的响应进行了分析, 表明差分结构可以有效的检测缺陷。XU 等^[16]采用自差分模式接收线圈对管道缺陷进行了检测, 与常规传感器相比对轴向裂纹有更高的检测灵敏度, 但对不同类型缺陷之间的检测相位差异不大, 无法很好地分辨缺陷类型。

综上所述, 差分结构常被用来提高检测灵敏度, 但是在脉冲远场涡流技术中, 差分式探头对不同类型缺陷的检测特点仍缺乏系统性研究。为了明确该技术中差分式探头与绝对式探头对不同类型缺陷系列的检测特点, 本文提出一种具有差分式-绝对式双通道接收的脉冲远场涡流探头。以铁磁性管道为对象, 建立传感器及管道的三维仿真模型, 观察研究脉冲远场涡流的电磁现象并且确定传感器的设计。采用双通道分别接收探头中绝对式检测线圈和差分式检测线圈信号的方式对管道裂纹类、孔类以及渐变腐蚀类系列缺陷进行检测。

1 检测原理

脉冲远场涡流检测探头由一组相距 2 到 3 倍管径的线圈组成, 如图 1 所示。激励线圈施加脉冲激励电流, 在线圈周围空间会产生周期性的瞬变磁场, 由于电磁感应, 瞬变磁场激发出瞬变电场, 在该电场的作用下金属管道中将会形成涡流。接收线圈会接收到感应电压信号其来源分为两部分, 一部分由从激励线圈直接传播到达接收线圈的场产生, 这部分不提供缺陷信息。另一部分由二次穿过管壁的磁场产生, 如果二次穿过管壁时接收线圈处管壁有减薄或缺陷, 则该部分信号包含了壁厚或缺陷信息。同时由于脉冲信号频谱的宽频性, 脉冲远场信号当中也包含了缺陷的深度信息。

图 1 脉冲远场涡流检测原理

所设计的差分式脉冲远场涡流检测传感器其检测线圈由两个以差分方式连接的线圈构成, 如图 2 所示。图 2 中, 探头从位置 *a* 移动到 *b* 再移动到 *c* 的检测过程中, 检测线圈的感应电压信号呈现类似半个正弦波曲线状的变化。设计差分式检测线圈的目的是为了在检测时有效抑制激励线

图 2 差分式脉冲远场涡流检测原理

圈的直接耦合分量影响,以及突出无缺陷处和有缺陷处的信号差异,使得检测线圈获得更强的抗干扰能力。

2 试验设计

2.1 试验平台

试验平台由传感器、钢管试件、脉冲信号发生器、数据信号采集和处理单元、计算机构成,如图 3 所示。信号发生器可发射频率为 $1/16 \sim 32$ Hz 的等宽双极性方波脉冲激励,最大电流为 10 A。采集和处理单元能够接收大动态范围感应电压信号,可以测量微弱电磁信号。采集为 16 位 A/D,最高采样频率为 1 MHz,信号放大两级增益最高为 32×128 倍。试验时激励电流为 0.86 A,频率为 32 Hz,两级增益为 32×128 倍,采集 5 次信号叠加取平均。

图 3 试验平台

2.2 检测试件

管道试件的材质为 20 # 钢管,电导率为 5.8 MS/m,相对磁导率为 136。三根钢管的实际尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$,长度均为 1 m,管道上的周向裂纹、渐变腐蚀缺陷周向长度均为管道周长的 1/4。试件规格如图 4 所示。

图 4 中的三根样管试件用于不同的目的。图 4a 是依据承压设备无损检测标准 NB/T 47013.6—2015 制作的常用样管缺陷^[17],包括了孔类、裂纹和腐蚀类三种类型的缺陷,便于和其他使用该标准样管的检测方法比较检测结果。图 4b 制作了系列宽窄不同的缺陷,窄缺陷用于模拟裂纹,宽缺陷用于模拟腐蚀。图 4c 则是模拟孔类缺陷。

图 4 检测试件(mm)

2.3 探头设计

探头由相距一定距离的激励线圈和检测线圈组成,两线圈的中心轴保持重合。激励线圈采用线径为 0.31 mm 的漆包线,分 10 层共绕制 350 匝,检测线圈有两个相同参数的接收线圈组成,以差分方式连接。接收线圈采用线径为 0.12 mm 的漆包线,绕制 3 层共 60 匝。探头规格尺寸及实物如图 5 所示。

(a) 探头尺寸(mm)

(b) 探头管道实物图

图 5 探头尺寸及实物图

2.4 数据处理方法

在检测过程中, 探头顺着管道轴线方向从左往右移动, 选择的检测点之间的距离一定。在每个检测点, 方波激励可以简化为“直流-关断”模式, 直流在关断时产生瞬变的磁场, 接收线圈会产生变化的感应电压, 从而形成电压下降曲线。图 6 所示为管道有损和无损条件下使用差分探头实际检测的归一化感应电压(感应电压除以激励电流)下降曲线。在曲线的转折处远场信号开始占据主导地位。同时可以看出无缺陷处曲线和有缺陷处曲线从转折处开始存在上升速度方面的差异。

图 6 管道有损和无损条件下归一化感应电压下降曲线

将每个测点的下降曲线按照对数时间间距划分取样时窗, 前期信号的时窗间隔短, 后期衰减缓慢的信号时窗间隔长。设在管道上共检测 M 个测点, 并设 N 为每个检测点的归一化感应电压下降曲线的取样时窗数, 则第 i 个测点 N 个时窗点的数据就可以表示成矢量

$$\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}) \quad (1)$$

式中, v_{ij} 为第 i 个测点接收线圈归一化感应电压下降曲线矢量; v_{ij} 为第 i 个测点接收线圈归一化感应电压下降曲线矢量中第 j 个时窗的归一化电压值, $j=1, 2, \dots, N$ 。

把所有 M 个检测点的数据写成矩阵 $\mathbf{W}$

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{V}_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1N} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{M1} & v_{M2} & \cdots & v_{MN} \end{pmatrix} \quad (2)$$

矩阵 $\mathbf{W}$ 的行矢量代表某个测点的归一化感应电压下降曲线, 列矢量则为从第 1 点至第 M 个检测点在下降曲线的同一时刻所对应的归一化感应电压值, 构成时间剖面。以检测点的坐标为横坐标, 以某个列矢量为纵坐标绘制出的曲线称为该列矢量对应时刻的试件的检测电压剖面图。若某个测点处存在缺陷, 则某个列矢量的电压剖面图上该测点处的归一化感应电压值将出现异常, 从而发现缺陷。

3 有限元仿真

利用 COMSOL Multi-physics 建立脉冲远场涡流检测的三维有限元仿真模型, 如图 7 所示。模型中的管道为 20 # 钢管, 与试验检测的管道规格相同, 如图 4 所示。管道上周向裂纹的宽度为 3 mm, 深度为 1.25 mm, 长度为管道周向周长的 1/4。所使用的网格由六面体和四面体组成。仿真中励磁电流为单极性脉冲, 频率设置为 64 Hz, 参照实际试验中的 32 Hz 的双极性脉冲激励。

图 7 差分式探头检测管道有限元仿真模型

图 8 为差分探头在管道周围产生的磁通密度分布以及坡印廷矢量能流分布图。图 8a 显示从激励线圈直接沿管内轴向传播的磁通衰减快于间接沿管外轴向的磁通, 在管内远场区域间接磁通占主导地位。图 8b 中坡印廷矢量显示了脉冲远场涡流检测中能流分布及流向。通过 FUKUTOMI 等^[2, 6]对远场涡流现象的研究可知当管道某区域内由外向内流入管道的能流在管道中占主导地位, 且不再有由内向外流出管道的能流出现在管壁时, 该区域即为远场区。因此根据图 8b 中能流在管壁及其内外的流向变化

及仿真模型的几何关系可计算得到脉冲远场涡流远场区开始的位置约为距激励线圈 1.5 倍的管径处。这一结果对探头结构设计时确定激励与检测线圈距离提供了帮助。图 8c 为差分探头通过窄槽缺陷的电压时间剖面曲线,在感应电压曲线的时域特征中可看出存在类似正弦波的变化形式。

图 8 小径管脉冲远场涡流现象及电压时间剖面

4 试验结果

4.1 绝对式接收探头检测

图 9 为图 4 所示三根管道试件上不同类型缺陷的绝对式探头检测结果。根据检测系统和检测对象,选择了能够较好显示缺陷的时窗范围显示结果。

图 9a 为绝对式探头检测管道无缺陷区域的检测背景信号在 12~15 号时窗下的时间剖面曲线,图 9b 为绝对式探头检测标准管试件产生的检测信号在 13 至 16 号时窗下的时间剖面曲线,图 9c 为绝对式探头检测腐蚀裂纹类缺陷产生的检测信号在 12 至 15 号时窗下的时间剖面曲线,图 9d 为绝对式探

(a) 无缺陷区域管道背景信号检测

(b) 标准管试件检测

(c) 腐蚀裂纹类缺陷管试件检测

(d) 孔类缺陷管试件检测

图 9 绝对式接收探头检测结果

头检测孔类缺陷所产生的检测信号在 13 至 16 号时窗下的时间剖面曲线。

绝对式探头检测管道时,当探头的接收线圈经过窄缺陷时,在时间剖面曲线相应位置上会出现尖峰型信号,而在经过较宽的腐蚀缺陷时,接收线圈上的感应电压变化会持续一段时间,时间剖面曲线相应位置上会出现方波型曲线。同时,远场涡流技术中当激励线圈通过缺陷处时也会出现信号变化,被称为“伪峰”信号,但伪峰和接收线圈接收到的信号存在固定的空间间距。图中标记 $X-1$ 表示接收线圈通过管试件第 X 个缺陷位置处的信号, $X-2$ 表示激励线圈通过第 X 个缺陷位置处的伪峰信号。

图 9a 是在管道无缺陷区域绝对式探头的归一化感应电压变化,约为 $0.7 \mu\text{V}/\text{A}$ (峰值至峰值归一化电压差值 11.2 减 10.5, 15 号时窗),低于此值的信号变化可认为是背景信号干扰。

图 9b 中,利用尖峰状信号特征识别孔状和裂纹类缺陷和方波型信号特征识别腐蚀缺陷,管道上的五个缺陷均能够被清晰检出。每个缺陷有一个缺陷信号,同时还伴随伪峰信号。3 号裂纹缺陷的伪峰信号很小,几乎淹没在背景信号中,很难被识别。

图 9c 中,管道上五个缺陷均可以被识别,6 号裂纹缺陷信号难以被识别。在设置背景信号阈值的情况下,缺陷的伪峰信号值很小,难以识别出。

图 9d 中,管道上的三个孔缺陷可以被检出。而其他缺陷的特征信号不明显,低于背景信号阈值,或者信号特征在几个时窗内不具有重复一致性,无法识别为缺陷信号。尽管 7-1 缺陷信号值较小,但是在几个时窗内具有重复一致性,可以被识别出来。

从图 9 可以看出,绝对式探头检测腐蚀缺陷比检测裂纹缺陷灵敏度更高。绝对式线圈对孔缺陷的检测灵敏度不高。同时从伪峰信号的相对变化可以看出孔状缺陷的伪峰信号相对强于其他类型缺陷。

4.2 差分式接收探头检测

图 10 为图 4 所示三根管道试件上不同类型缺陷的差分式探头检测结果。

图 10a 为差分式探头检测管道无缺陷区域的检测背景信号在 13 至 15 号时窗下的时间剖面曲线。图 10b 为差分式探头检测标准管试件产生的检测信号在 14 和 15 号时窗下的时间剖面曲线。图 10c 为差分式探头检测腐蚀裂纹类缺陷产生的检测信号在 13 至 15 号时窗下的时间剖面曲线。图 10d 为差分式探头检测孔类缺陷所产生的检测信号在 13 至 16 号时窗下的时间剖面曲线。图中

标记 $X-1$ 表示接收线圈通过管道试件第 X 个缺陷位置处的信号, $X-2$ 表示激励线圈通过第 X 个缺陷位置处的伪峰信号。

(a) 无缺陷区域管道背景信号检测

(b) 标准管试件检测

(c) 腐蚀裂纹类缺陷管试件检测

(d) 孔类缺陷管试件检测

图 10 差分式接收探头检测结果

差分式探头检测管道时,利用正弦波形信号特征识别缺陷,有助于将其与噪声信号相区分。在管道某一测点位置周围存在缺陷,则在时间剖面曲线相应位置上会出现正弦波型曲线。正弦波型曲线是由差分接收线圈通过缺陷引起的。当缺陷位于两个接收线圈之间时,便对应正弦波型曲线的零点。

图 10a 中,在管道无缺陷区域差分式探头的归一化感应电压变化约为 $0.2 \mu\text{V}/\text{A}$ (峰值至峰值归一化电压差值,14 号时窗),可作为检测信号的阈值排除背景信号的干扰。

图 10b 中,通过识别正弦波型曲线特征,管道上五个缺陷都能被清晰检测。前三个缺陷的检测信号呈现了正弦波型曲线信号特征,最后两个检测信号在波形方面尽管不是标准的正弦波型曲线,但通过判断信号在各个时窗的一致性特征可以认为是缺陷信号。

所设计的孔状和裂纹缺陷都具有窄且对称的特点,根据差分式探头检测特点,前三个缺陷检测信号呈现正弦波型信号特征。对于两个腐蚀类缺陷,在腐蚀的每个边缘处,局部是不对称的,因此,在局部看其中一端仅有一半的正弦形状信号特征,但是和另一端的信号缺陷从整体上构成了完整的正弦形状信号特征。总之,如果缺陷对称,那么信号也中心对称,并且构成正弦形状的信号特征。

在检测信号中,一些位置处疑似出现激励线圈经过缺陷产生的伪峰信号。这是由于接收线圈并未完全对称绕制,激励线圈产生的伪峰信号无法完全抑制。但伪峰信号不明显,根据背景信号阈值,伪峰信号值未超出阈值并且信号在多个时窗内没有很好的一致性,因此被视为背景信号。

图 10c 中,管道上六个缺陷中的五个缺陷能够被检出,3-1 号腐蚀型缺陷检测信号没有明显的缺陷特征且信号值低于探头背景信号阈值,无法识别。5-1 号裂纹和 6-1 号裂纹类信号有较为明显的缺陷特征,并且信号出现的位置有重复一致性,信号值也未淹没于背景信号阈值范围内,因此可以被识别出。

相比其他缺陷,差分探头检测裂纹缺陷的灵敏度更高。且差分探头检测裂纹类缺陷的检测灵敏度远高于绝对式探头。

图 10d 中,管道上的七个孔缺陷有四个被检出。4-1、5-1 和 6-1 号缺陷检测信号没有出现检测特征

信号,并且处于背景信号之中无法分辨。其他四个孔缺陷都具有较好的缺陷特征,同时在多个时窗相应位置处重复出现,具有一致性,可以很好地识别。

除此以外,在孔缺陷信号旁边固定位置处会产生伪峰信号,分析原因,是由于差分探头接收线圈并未完全对称绕制,即使完全无缺陷处也具有一定输出。在缺陷处,差值比无缺陷处更大,有时就会超出背景阈值构成伪峰信号。差分探头在此没有很好地抑制孔缺陷的伪峰信号。如果要更好地抑制伪峰,则需要差分探头更好的对称性。

就检测能力而言,差分式探头检测孔缺陷的检测灵敏度要优于绝对式探头。

同时由于差分探头的结构原因,差分探头对于均匀类腐蚀的检测灵敏度不高,除非腐蚀端头具有尖锐的台阶。

4.3 脉冲远场涡流检测信号中的缺陷深度信息

图 11 为差分探头检测缺陷时的电压信号时间剖面图,取了较多的时窗个数,以便看出缺陷信号的时域特征。从图中可看出,离检测线圈较近的缺陷,例如 1 号和 4 号缺陷,其缺陷特征(正弦形状波形特征)在早期时窗 11 号时窗就已经出现。而离检测线圈较远的缺陷在晚期时窗中才出现缺陷特征,如 2 号和 5 号缺陷在 12 号时窗出现缺陷特征,6 号缺陷在 13 号时窗才出现缺陷特征,这是脉冲涡流检测的时域特性决定的。从该图可以看出,脉冲远场涡流检测保留了脉冲涡流检测可以通过缺陷信号出现的早晚识别缺陷深度的优点。

图 11 差分探头检测缺陷电压剖面图

5 结论

(1) 通过对孔、腐蚀和裂纹三种管道常见缺陷

进行系列检测,对脉冲远场涡流技术中差分式探头以及绝对式探头进行了系统详细的研究,通过试验结果对于两种探头的检测特点给出了一些定量的比较结果,弥补了当前差分式探头在脉冲远场涡流技术中缺乏系统性研究的不足。

(2) 研究发现,绝对式探头检测腐蚀类缺陷的检测灵敏度优于差分式探头,但是对孔类和裂纹类缺陷的检测能力弱于后者。同时,差分式探头能够较好地抑制伪峰信号。如果要提高抑制能力,需要提高两个差分线圈的结构对称性。

(3) 脉冲远场涡流技术中,脉冲涡流可以对缺陷进行深度定位的特性仍然成立,从而弥补了远场涡流无法区别内外壁缺陷的缺点。

(4) 采用双通道的信号接收办法,对差分式探头做出了改进,使用差分探头其中一个接收线圈用作绝对式线圈,综合了绝对式探头和差分式探头的检测特点,使得差分探头对不同类型缺陷均具有较好的检测灵敏度,扩展了差分探头在脉冲远场涡流检测技术中的应用价值。

现有的脉冲涡流技术与远场涡流技术都有各自的一些缺陷定量方法,二者结合时如何进行缺陷量化将在进一步的研究工作中进行探索。

参 考 文 献

- [1] ATHERTON D. Remote field eddy current inspection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 4142-4147.
- [2] FUKUTOMI H, TAKAGI T, NISHIKAWA M. Remote field eddy current technique applied to non-magnetic steam generator tubes[J]. NDT&E International, 2001, 34(1): 17-23.
- [3] FU Yuewen, YU Runqiao, PENG Xuwen, et al. Investigation of casing inspection through tubing with pulsed eddy current[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2012, 27(4): 353-374.
- [4] FU Yuewen, LEI Meiling, LI Zhaoxi. Lift-off effect reduction based on the dynamic trajectories of the received signal fast Fourier transform in pulsed eddy current testing[J]. NDT&E International, 2017, 87: 85-92.
- [5] 沈功田, 李建, 武新军. 承压设备脉冲涡流检测技术及研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 1-10.
SHEN Gongtian, LI Jian, WU Xinjun. Research and application of pulsed eddy current testing technology for pressure equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 1-10.
- [6] SUN Yushi, LOO W, KURNETH D. Finite element simulation of pulsed remote field eddy current phenomenon[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1998, 17: 259-266.
- [7] VASIC D, BILAS V, AMBRUS D. Pulsed eddy-current nondestructive testing of ferromagnetic tubes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(4): 1289-1294.
- [8] VASIC D, BILAS V, AMBRUS D. Measurement of ferromagnetic tube wall thickness using pulsed remote field technique[C]// Proceedings of 12th IMEKO TC4 International Symposium, September 25-27, 2002. Zagreb: IMEKO, 2002: 468-472.
- [9] VASIC D, BILAS V, AMBRUS D. Pulsed remote field technique in ferromagnetic tube wall thickness and inner diameter measurement[C]// Proceedings of 17th IMEKO World Congress. Zagreb: IMEKO, 2003: 912-916.
- [10] 杨理践, 王赓, 高松巍. 基于脉冲远场涡流的管道内检测技术[J]. 仪表技术与传感器, 2012(11): 141-144.
YANG Lijian, WANG Geng, GAO Songwei. Ferromagnetic tubes testing based pulsed remote field eddy current technique[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(11): 141-144.
- [11] YANG Binfeng, LI Xuechao. Pulsed remote eddy current field array technique for nondestructive inspection of ferromagnetic tube[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2010, 25(1): 3-12.
- [12] YANG Binfeng, LI Xuechao. Pulsed remote field technique used for nondestructive inspection of ferromagnetic tube[J]. NDT&E International, 2009, 53(2013): 47-52.
- [13] YANG Changrong, GAO Bin, MA Qiuping, et al. Multi-layer magnetic focusing sensor structure for pulsed remote field eddy current[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2490-2499.
- [14] 张伟, 李炎骏, 师奕兵, 等. 石油管道脉冲远场涡流信号特征分析与处理[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 12-20.
ZHANG Wei, LI Yanjun, SHI Yibing, et al. Feature analysis and processing of pulsed remote field eddy current signal in oil pipes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 12-20.

- [15] CARDELLI E , ESPOSITO N , RAUGI M. Electromagnetic analysis of RFEC differential probes[J]. IEEE Trans. Magn., 1993, 29(2): 1849-1852.
- [16] XU Xiaojie, LIU Ming, ZHANG Zhanbin, et al. A novel high sensitivity sensor for remote field eddy current non-destructive testing based on orthogonal magnetic field[J]. Sensors, 2014, 14(12): 24098-24115.
- [17] NB/T 47013.6-2015, 承压设备无损检测-第 6 部分: 涡流检测[S]. 北京: 新华出版社, 2015.
- NB/T 47013.6-2015, Nondestructive testing of pressure equipments-Part 6: Eddy Current testing[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2015.
-
- 作者简介: 余兆虎, 男, 1994 年出生。主要研究方向为电磁无损检测。
E-mail: yuhu112@foxmail.com
- 付跃文(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。
主要研究方向为电磁无损检测。
E-mail: fuyuewen@126.com