DOI: 10.3901/JME.2014.24.001

脉冲涡流方法过油管检测套管横向裂缝研究*

付跃文¹ 喻星星^{1,2}

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;
2. 长沙航空职业技术学院 长沙 410124)

摘要: 油井套管横向裂缝是可能导致套管断裂的严重危害性缺陷。通过有限元仿真与实际试验,研究利用脉冲涡流检测技术使用横向探头通过油管检测套管的横向裂缝缺陷的问题。仿真给出不同检测方式的管道涡流分布、磁场分布及其变化,以及接收线圈的电压。从仿真结果可观察到,套管壁涡流最强的区域并非横向探头正对的区域,而是平行于横向探头轴线的区域。横向裂缝平行于横向探头轴线时对涡流场的扰动最大。磁场的分布及其变化规律与涡流场情况类同。据此可解释为何横向探头轴线平行于横向裂缝时检测灵敏度会高于横向探头轴线垂直于横向裂缝时。实际的检测试验结果与仿真结果一致,并且显示了实际检测中横向探头轴线平行于横向裂缝时的检测灵敏度显著高于垂直于裂缝时。

关键词: 脉冲涡流; 套管; 油管; 裂缝; 有限元

中图分类号: TG115

Research on Transverse Crack Detection in Casing through Tubing Using Pulsed Eddy Current Method

FU Yuewen¹ YU Xingxing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063;
2. Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, Changsha 410124)

Abstract: Transverse cracks are great menace to casing safety due to their high probability to cause fracture. Transverse crack detection in casing through tubing with transverse probe using pulsed eddy current method is studied by finite element simulations and experiments. Distributions and variations of the eddy currents and magnetic fields in pipes and voltages of the receiving coil in different detection setups are given in the simulations. Simulation results show that highest eddy current intensity in casing wall does not appear in the zone which the transverse probe directly faces against but the zone which the axis of the transverse probe is parallel to. The greatest disturbance in the eddy current distribution is caused when the crack is parallel to the axis of the transverse probe. The properties of the magnetic field in the pipe are similar to those of the eddy current field. Thus it is explained why higher detection sensitivity is obtained when the axis of the transverse probe is parallel to the transverse crack rather than perpendicular to the crack. The experimental results agree well with the simulations and show that the detection sensitivity of the transverse probe to transverse crack is much higher when the axis of the probe is parallel to the crack than perpendicular to the crack.

Key words: pulsed eddy current; casing; tubing; crack; finite element

0 前言

套管在油井中起着保护井眼、加固井壁、隔绝油气层等作用。复杂的地质因素、工程因素和腐蚀常导致套管腐蚀、变形、开裂等损伤,影响油井安

全、造成经济损失。因地层应力、工程受力以及腐蚀等的综合作用,裂缝类损伤是套管损伤的重要类型^[1-2]。对于套管的损伤,可取出油管后检测套管,但需要中断生产,因而成本较高。近年采用了脉冲涡流(Pulsed eddy current, PEC)检测方法,这种电磁测井技术可在生产过程中不取出油管而将探头放在油管中同时检测油管和套管损伤,方便了油井的监控与普查。对于该技术的研究,俄罗斯测井技术研

* 国家自然科学基金资助项目(51067007, 51267016)。20131221 收到初稿, 20140610 收到修改稿

究所处于领先水平,其 EMDS-TM-42、MID-K 系列电磁探伤测井仪近年进入中国,大庆等油田不少测井技术人员对该类测井仪器进行了应用^[3-7]。应用结果表明,该类方法具有测量结果不受井筒内液体和管壁上石蜡、水泥块、盐垢等沉积物影响的特点,在生产情况下将探头置于油管内可同时检测油管 and 套管缺陷。其过油管测套管缺陷的油套管总壁厚可达 25 mm (EMDS-TM-42 型号),同时也可测油套管纵向及横向裂缝。该技术具有一定可行性及实用性,而目前问题之一是期望对套管能够具有更高检测灵敏度。但由于技术保护等原因,当前对于该技术主要处于使用经验阶段,缺乏详细状况及机理分析。如需要发展该技术并进一步提高,则必须对检测规律进行更基础的分析研究。

脉冲涡流技术因采用宽带激励,从而能检测金属构件内部深度不同的缺陷,在飞机多层结构等非铁磁性材料内不同深度缺陷的检测上已取得了成效^[8-13]。使用较低激励频率后,该技术也应用在铁磁性材料的检测上。除前述俄罗斯测井应用外,Atlantic Richfield Company (ARCO)^[14]、Röntgen Technische Dienst (RTD)^[15]、Shell^[16]等公司,中国特种设备检测研究院和华中科技大学等^[17],也应用该技术于带包覆层的铁磁性管道腐蚀检测,取得良好效果。

南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室近年应用脉冲涡流检测技术对通过油管进行油套管腐蚀和裂缝检测的问题进行了基础研究,在此过程中发现纵探头适合检测纵向裂缝,横探头适合检测横向裂缝。并且发现一特别之处,即横探头检测横向裂缝时,横探头轴线平行于裂缝的检测效果要优于垂直于裂缝时^[18]。

脉冲涡流技术中当使用纵探头检测油套管时,其激励引起的涡流垂直于纵向裂缝,纵向裂缝可有效切断涡流,因此与无缺陷处相比具有较大的涡流扰动,因而纵探头适合于检测纵向裂缝在原理上很明显。如果用纵探头检测横向裂缝,则由于横向裂缝平行于感应引起的涡流,因而引起的涡流扰动较小,使得纵探头不适合于检测横向裂缝。这一特点的机理也易于理解。

为检测横向裂缝,使用了横向探头。当使用横向探头检测横向裂缝时,存在着探头取向问题。在一般的常规涡流检测包括一般平板的脉冲涡流检测中,探头中螺线管轴线一般是垂直于待检缺陷,因而直观上首先考虑探头的此种布置,但是实际试验发现了与预期不同的结果。此时的涡流及电磁场分布及变化情况已经较为复杂,应用直观定性分析的

方法已经不能够准确解释其机理,因此本文应用了有限元仿真法,分析横探头检测横向裂缝时的不同检测方式的管道涡流分布、磁场分布及其变化,给出了仿真的接收线圈电压结果。通过分析这些结果,得出为何横向探头轴线平行于横向裂缝时检测效果会优于横向探头垂直于横向裂缝时的机理。同时也给出了实际的试验结果,以便与仿真结果对比,并显示检测效果的实际差异。

由于横向裂缝的横向特性,更易引致管道断裂事故,因此对该类裂缝的检测有必要加以明确研究。

1 检测原理

图 1 为脉冲涡流检测油套管的探头布置示意图。有纵向和横向两种类型探头,每个探头的接收线圈与激励线圈同轴。在激励线圈中通以双极性方波脉冲,如图 2 激励波形所示。激励所用频率较低,因此其机理可近似解释为直流截断后的效应。激励线圈中的电流在周围空间产生磁场,称为一次磁场。当激励电流从方波直流段快速关断时,导致周围磁场快速衰减。衰减的磁场在管道中感应出脉冲涡流,脉冲涡流产生的磁场称为二次磁场。在激励电流关断期间,激励电流产生的一次磁场为零,此时用检测线圈测量由涡流引起的二次磁场的变化,则检测电压的情况就反映了管道中的涡流变化,从而间接反映接收线圈附近管道的壁厚等信息,用以判断该处管道腐蚀等状况。

图 1 油套管检测布置示意图

图 2 脉冲涡流检测基本原理

本文通过仿真与试验,研究通过油管使用横向探头进行套管横裂缝的检测。

2 检测条件与试验设计

2.1 试验设备

试验设备可产生脉冲激励并可测量微弱磁信号变化。激励脉冲为频率为 $1/16 \sim 32$ Hz 的等宽双极性方波脉冲, 最大峰值电流为 10 A。最高采样频率 1 MHz, 16 位 A/D 采集。两级增益最高 32 倍 $\times$ 128 倍。整个检测试验平台照片如图 3 所示。

图 3 油套管脉冲涡流检测试验平台

2.2 检测试件

试件管道为材质为 J55 的油水井专用钢质管道。油、套管实际尺寸分别为 $\phi 73.8 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 和

$\phi 141.5 \text{ mm} \times 7.7 \text{ mm}$, 长度均为 6 m。试件如图 4 所示。横裂缝长分别为套管周长的 $1/3$ 、 $1/4$ 、 $1/5$ 。

(a) 完好油管

(b) 带裂缝套管试件

图 4 检测用油套管试件

2.3 检测探头设计

横向探头轴线与被检管道轴线垂直。探头由激励线圈和接收线圈组成, 二者同轴。激励线圈采用线径为 1 mm 的漆包线, 接收线圈采用线径为 0.2 mm 的漆包线。激励分 3 层共绕制 120 匝, 接收绕制 6 层共 600 匝。探头制作了套管支架, 以便加以保护。探头规格尺寸及实物如图 5 所示。

(a) 探头尺寸

(b) 探头照片

图 5 探头尺寸及实物图

2.4 检测数据处理方法

检测时, 探头在管内顺着管道轴线方向移动, 每隔一定距离选择一个检测点进行检测, 接收线圈在如图 2 所示的激励间歇期内接收信号得到检测电压值, 形成电压下降曲线。图 6 所示为油套管组合有损和无损条件下实际检测的感应电压下降曲线示例(前端两个平台为超过仪器最高可输入电压的饱和电压区, 为无效数据)。本文实际试验中将每个测点的下降曲线时段按照对数间距划分 31 个时窗, 前期信号间距小, 后期缓慢变化的信号间距大。

图 6 套管有损和无损条件下感应电压衰减曲线

设整条管道共检测 M 个测点, 并设 N 为每个检测点的接收线圈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

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}) \quad (1)$$

式中 V_i ——第 i 个测点接收线圈电压下降曲线矢量;

v_{ij} ——第 i 个测点接收线圈电压下降曲线矢量 V_i 中第 j 个时窗的电压值;

$j=1, 2, \dots, N$ 。

把所有 M 个检测点的数据写成矩阵 W

$$W = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1N} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{M1} & v_{M2} & \cdots & v_{MN} \end{pmatrix} \quad (2)$$

矩阵 W 的行矢量代表某个测点的电压下降曲线,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感应电压值。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工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感应电压值将出现异常,从而发现缺陷。电压剖面曲线实例见后续仿真与试验数据图。

考虑到试验设备的电压检测灵敏度在 $1 \mu\text{V}$ 左右,实际试验数据处理中对接收电压 $1 \mu\text{V}$ 以下的检测值,由于存在很大噪声干扰,作为无效数据进行处理,相应的时窗标记为无效时窗。仿真时过低的数值也存在噪声。本文中以试验设备灵敏度为基本参照,仿真时对于低于 $1 \mu\text{V}$ 的电压值,也相应不进行考虑。

3 仿真试验与结果分析

仿真所用的油管和套管规格与图 4 中的实际管道规格相同。套管横裂缝的宽度 10 mm ,长度是 $1/4$ 套管周长。

3.1 仿真模型的建立及网格划分

仿真时横向探头几何参数与图 5a 横探头相同。根据横向探头轴线与管道轴线垂直的布置,采用了三维有限元模型。

有限元网格如图 7 所示。选用了 ANSYS 中的 solid97 单元,单元属性如下设置。

ET,1,SOLID97,0 ! 定义空气单元类型并定义单元选项。

ET,2,SOLID97,3 ! 定义线圈单元类型并定义单元选项。

ET,3,SOLID97,1 ! 定义管道单元类型并定义单元选项。

通过查找相关资料的 J55 材料参数^[19],仿真时油套管取相对磁导率 164,电阻率 $2.5 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 。

仿真中划分网格时,对探头附近区域(磁场或者

涡流场主要影响区)网格都相应加密处理。同时为排除因网格的不同而引起的检测差异,完好管道和有损管道在划网格时,具有相同的网格形状及单元数。建模时将预设为缺陷的体单独建模,再统一进行人工控制的映射网格划分。在网格划分前,对预设为缺陷的体进行属性设置,赋予空气属性时表示缺陷,赋予管材属性时表示管道部分。

图 7 探头仿真三维模型网格

3.2 激励加载

有限元模型激励的加载通过耦合外接电路来实现,使用 CIRCU124 单元对激励线圈施加脉冲方波激励。CIRCU124 单元脉冲加载实常数。8 Hz 脉冲激励仿真计算时,CIRCU124 单元脉冲加载实常数具体设置如表 1 所示。

表 1 仿真中脉冲激励实常数设置

参数	数值	参数	数值
激励频率 f/Hz	8	初始电压 V_L/V	0
脉冲电压 V_H/V	1(按需求改)	延迟时间 T_D/s	0
脉冲上升时间 $T_R/\mu\text{s}$	1.0	脉冲下降时间 $T_F/\mu\text{s}$	1.0×10^{-6}
脉冲宽度 T_W/s	0.124 999	脉冲周期 T/s	0.125

试验时采用双极性脉冲激励以便通过对称消除随机噪声干扰。仿真计算中因无须考虑此类干扰,并且由于 CIRCU124 单元不易实现双极性脉冲激励,因此激励设置为单极性脉冲,其频率设置为 8 Hz,参照实际试验的 4 Hz 设置。

相应激励电流波形如图 8 所示。

图 8 激励电流波形图

3.3 仿真试验结果与分析

3.3.1 涡流分布与分析

图 9~11 选择了图 8 中时间点为 $t=0.075 \text{ s}$ 的时

刻(此时激励处于关断期间), 给出了不同放置方式的涡流分布及其变化。

图 9a 是完好管材在该时间点的油套管涡流分布侧视图(图 9a 中 x 方向为探头轴线方向)。为了改善观察效果, 在图 9b 中给出了油套管的涡流分布纵向视图。图 9c 单独给出了套管的涡流分布纵向视图, 其目的是增强套管涡流分布图的对比度, 更好地观察套管各个方位的涡流差异。

(a) 侧视图

(b) 纵向视图

(c) 套管单独显示的纵向视图

图 9 完好套管的涡流分布图

图 10a 是横向探头平行于横向裂缝时在该时间点的油套管涡流分布侧视图, 图 10b 为纵向视图, 图 10c 单独给出了套管的涡流分布纵向视图。

(a) 侧视图

(b) 纵向视图

(c) 套管单独显示的纵向视图

图 10 横向探头平行于横向裂缝时管道涡流分布图

图 11a 是横向探头垂直于横向裂缝时在该时间点的油套管涡流分布侧视图, 图 11b 为纵向视图。图 11c 单独给出了套管的涡流分布纵向视图。

首先观察图 9b、9c, 可以看出, 无论油管还是套管壁中, 涡流最强的地方是平行于探头轴线的区域, 而探头轴线正对的区域涡流最弱, 而且两个区域数值有数量级的差异。比较图 9c、图 10c 和图 11c, 横向裂缝位于平行于探头轴线的区域时, 从色度变化可以看出, 该区域涡流强度相对于无缺陷时变化很大。而探头轴线正对裂缝时, 虽也在裂缝区域引起了涡流变化, 但变化量相对于平行于裂缝时就小多了。这就是为何横向探头检测横向裂缝时, 探头轴线平行于裂缝时检测灵敏度远高于垂直于裂缝时的原因。

图 11 横向探头垂直于横向裂缝时管道涡流分布图

3.3.2 磁场分布与分析

图 12~14 分别给出了完好管道、探头轴线与套管横向裂缝平行和与其垂直时的磁通量密度图。观察图 12 可以看出,套管壁中磁场最强的区域为平行于探头轴线的区域,探头轴线正对的区域磁场最弱,二者有数量级的差异。比较图 12b、图 13b 和图 14b 可以看出,横向探头轴线与套管横向裂缝平行时,所引起的磁场的变化要比垂直于横向裂缝时大得多,其分布及变化特点与涡流是类同的。

3.3.3 接收线圈电压分析

图 15a 是仿真检测时完好管道、横探头与套管横裂缝平行、横探头与套管横裂缝垂直情况下激励关断期间接收线圈上电压下降曲线图,可定量衡量二种检测方式之差异。图 15b 截取了电压大于 $1 \mu\text{V}$ 且能良好表征缺陷的部分。从图 15b 可以看出,横探头与套管横裂缝平行时的电压下降曲线与完好管道的下降曲线可以完全区分开来,而横探头与套管横裂缝垂直时的电压下降曲线与完好管道的下降曲

图 12 完好管材磁通量密度图

图 13 横探头与套管横裂缝平行磁通量密度图

线则几乎重合在一起,因此不能检测出缺陷的存在。

图 16 是电压下降曲线中从 0.077 s 到 0.088 s 的时间剖面图,该图是假定测定长 4 m 的一段管道,中间存在一道横向裂缝时,探头移动间隔 10 cm 从一端检测至另一端时检测结果的时间剖面图。

图 16a 是横探头与套管横裂缝平行时的情况,图 16b 是横探头与套管横裂缝垂直时的情况。

图 14 横探头与套管横裂缝垂直磁通量密度图

图 15 仿真结果中接收线圈电压下降曲线

比较图 16a 和图 16b 的剖面图, 可以看出, 横探头与套管横裂缝平行时, 可对试件横裂缝进行有效检测, 而在横探头与套管横裂缝垂直时, 对同样规格的横裂缝基本不具有检测能力。

4 实际检测试验结果与讨论

图 17 是采用与仿真同规格试件(图 4 试件)、探

图 16 管道仿真检测结果时间剖面图

头(图 5 探头)及检测参数通过油管对套管进行实际检测结果的时间剖面图(显示 23~29 时窗)。

当横探头与套管横裂缝平行时, 对套管周长 1/3 长的横裂缝可以明确检测到。1/4 周长的裂缝在第 26、27 时窗的电压时间剖面曲线处有显示, 但不明显。仿真检测时可以检测到长度为 1/4 套管周长的横裂缝, 因此, 仿真的灵敏度稍高于实际检测灵敏度, 原因主要在于实际检测中噪声干扰比仿真时要大(图 17 中低于 $1 \mu\text{V}$ 的电压值由于受噪声干扰大作为无效时窗处理)等。

横探头与横裂缝垂直时检测能力显著降低。

仿真和实际试验所得的结果总体讲一致性很好, 均显示了横向探头平行于横向裂缝时检测效果显著优于横向探头垂直于横向裂缝时。

在实际试验中, 油套管中存在介质。将油管和套管空间用装入盐溶液的塑料袋填充, 并放置水泥块等物, 用于模拟介质, 未发现介质的存在对检测数据产生有意义的影响。根据相关资料, 井筒中的油气水混合液体电导率一般小于地层水的电导率 $0.5 \sim 50 \text{ S/m}^{[20]}$, 相对磁导率为 1, 因此电导率和磁导率的乘积远小于本文油套管的值(本文 J55 管的相对磁导率为 164, 电导率为 $4 \times 10^6 \text{ S/m}$), 数量级相差达 10^7 量级。水泥、蜡等固体介质的电导率则更

低。电磁参数相差巨大,这是套管中流体和固体介质对该方法的影响可以忽略的电磁机理背景。因此本文仿真和试验中的探头、工艺参数及试验结果在不同井筒介质存在条件下均有实际价值。这一点与参考文献[7]以及一些油田的其他应用资料相符。

当油套管壁厚增加时,依据已进行的频率影响和激励电流影响的相关研究^[21],应考虑取更低的脉冲基频,以便增加涡流渗透深度,同时考虑适当增大激励电流,以便增强接收信号的抗干扰能力,以此增强对于厚管的检测能力。

(a) 横探头与套管横裂缝平行

(b) 横探头与套管横裂缝垂直

图17 管道实际检测结果时间剖面图

5 结论

(1) 油井套管横向裂缝是可能导致套管断裂的严重危害性缺陷。通过有限元仿真与实际试验,研究了应用脉冲涡流检测技术使用横向探头通过油管进行套管的横向裂缝缺陷检测的问题,主要针对探头的取向问题进行了研究。

(2) 仿真结果表明,套管壁涡流最强区域并非横向探头正对的区域,而是平行于横向探头轴线的区域。横向裂缝平行于横向探头轴线时对涡流场的扰动最大。

(3) 磁场分布及其变化规律与涡流场类似,套

管壁磁场最强区域为平行于横向探头轴线的区域。横向裂缝平行于横向探头轴线时,对磁场扰动最大。

(4) 由于横向裂缝平行于横向探头轴线时对涡流场和磁场扰动最大,因此横向探头轴线平行于横向裂缝时检测效果优于横向探头轴线垂直于横向裂缝时。

(5) 实际检测试验结果与仿真结果一致,显示了横向探头轴线平行于横向裂缝时检测灵敏度远高于横向探头轴线垂直于横向裂缝时。研究结果对于探头和检测工艺设计具有指导意义和参考价值。

参考文献

- [1] 刘合, 刘建东, 卓胜广, 等. 大庆油田嫩二成片套损的地质控制因素[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 135-138, 142.
LIU He, LIU Jiandong, ZHUO Shengguang, et al. Geological factors for controlling damage of batch casing in the member II of nenjiang formation in Daqing oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 135-138, 142.
- [2] 王陶, 杨胜来, 朱卫红, 等. 塔里木油田油水井套损规律及对策[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 352-361.
WANG Tao, YANG Shenglai, ZHU Weihong, et al. Law and countermeasures for the casing damage of oil production wells and water injection wells in Tarim oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 352-361.
- [3] 钱俊, 唐振欢, 关莉, 等. 套管技术状况的测井应用及其对比分析[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(6): 73-76.
QIAN Jun, TANG Zhenhuan, GUAN Li, et al. Logging application and contrast analysis of casing failure[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(6): 73-76.
- [4] 张向林, 刘新茹, 郭云. 套损检测新技术[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1641-1645.
ZHANG Xianglin, LIU Xinru, GUO Yun. New technology of measuring flaws and damages and corrosion of case[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(5): 1641-1645.
- [5] 孙彦才, 郑华, 崔艳辉. 多层管柱电磁探伤测井技术及应用[J]. 测井技术, 2003, 27(3): 246-250.
SUN Yancai, ZHENG Hua, CUI Yanhui. The multilayer case-pipes electromagnetic defect detecting logging[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(3): 246-250.
- [6] 徐凤阳, 郝晓良. 新一代多层管柱电磁探伤成像测井技术及其应用[J]. 油气井测试, 2011, 20(2): 70-73.
XU Fengyang, HAO Xiaoliang. A new generation of

- magnetic flaw detection and imagery logging technology for multilayer string and its application[J]. Well Testing, 2011, 20(2): 70-73.
- [7] 张麟, 戴恩汉, 李宏魁, 等. 电磁探伤测井技术在中原油田的应用[J]. 石油仪器, 2011, 25(1): 69-71.
- ZHANG Lin, DAI Enhan, LI Hongkui, et al. The application of electromagnetic test logging in Zhongyuan oilfield[J]. Petroleum Instruments, 2011, 25(1): 69-71.
- [8] GIGUÈRE S, LEPINE B, DUBOIS J. Pulsed eddy current technology: Characterizing material loss with gap and lift-off variations[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2001, 13(3): 119-129.
- [9] SMITH R A, HUGO G R. Deep corrosion and crack detection in aging aircraft using transient eddy current NDE[J]. Review of Progress in Quantitative NDE, 1999: 1401-1408.
- [10] SOPHIAN A, TIAN G Y, TAYLOR D, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT[J]. NDT&E International, 2003, 36(1): 37-41.
- [11] YANG B F, LUO F L, HAN D. Research on edge identification of a defect using pulsed eddy current based on principal component analysis[J]. NDT&E International, 2007, 40: 294-299.
- [12] 胡祥超, 罗飞路, 何赞泽, 等. 脉冲交变磁场测量技术缺陷识别与定量评估[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 17-22.
- HU Xiangchao, LUO Feilu, HE Yunze, et al. Pulsed alternating current field measurement technique for defect identification and quantification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 17-22.
- [13] 张维思, 王晓锋, 杨宾峰, 等. 基于新特征量的脉冲涡流裂纹缺陷定量检测仿真分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 25-30.
- ZHANG Weisi, WANG Xiaofeng, YANG Bin Feng, et al. Simulation analysis and experimental research on quantification of cracks based on PEC technique with new eigenvalues[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 25-30.
- [14] SPIES B R. Transient electromagnetic method for detecting corrosion on conductive containers: United States, 4843320[P]. 1989-06-27.
- [15] BRETT C R, RAAD J A. Validation of a pulsed eddy current system for measuring wall thinning through insulation[C]// Proceedings of SPIE, 1996, 2947: 211-222.
- [16] CROUZEN P, MUNNS I. Pulsed eddy current corrosion monitoring in refineries and oil production facilities – experience at shell[C/CD]//European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), 2006.
- [17] HUANG C, WU X J, XU Z Y, et al. Pulsed eddy current signal processing method for signal denoising in ferromagnetic plate testing[J]. NDT&E International, 2010, 43: 648-653.
- [18] FU Y W, YU R Q, PENG X W, et al. Investigation of casing inspection through tubing with pulsed eddy current[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2012, 27(4): 353-374.
- [19] RIBICHINI R. Modelling of electromagnetic acoustic transducers[D]. London: Imperial College London, 2011.
- [20] 赵宏敏, 郑剑锋. 油井中混合流体电导率与持水率关系研究[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(4): 88-90.
- ZHAO Hongmin, ZHENG Jianfeng. Correlation between conductivity and water holdup of mixed fluids in oil wells[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004, 26(4): 88-90.
- [21] 喻星星. 激励参数对铁磁性管构件脉冲涡流检测的影响及其机理研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- YU Xingxing. Influence of excitement parameters in pulsed eddy current testing for ferromagnetic pipe structures and its mechanism[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013.

作者简介: 付跃文(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 副教授, 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

喻星星, 男, 1985 年出生。主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: 6xingjidxing@163.com