

DOI: 10.11973/wsjc202312010

基于动生涡流磁场的钢质管道内壁缺陷快速外检测

范效礼¹, 李玮涵², 苗锐¹, 李强¹, 时亚南¹

(1. 新疆维吾尔自治区特种设备检验研究院, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要:采用 ANSYS 有限元分析软件探讨了钢质管道内壁缺陷形状、宽度、深度及检测速度与动生涡流场间的关系;设计并搭建了快速外检测试验装置;评价了高速检测条件下,不同缺陷深度所产生的动生涡流信号特征。发现缺陷自身的深宽比越大,缺陷信号的磁感应强度信号越强;随着检测速度提高,动生涡流磁感应强度虽逐渐减小,但仍能精确检出缺陷的位置及参数信息;试验结果与仿真结果具有相同的变化趋势。试验结果表明,基于动生涡流磁场的钢质管道内壁缺陷快速外检测方法能够对管道内壁缺陷进行精准定位与参数辨别,可为管道的快速、精准检测提供理论参考和技术支持。

关键词:钢质管道;动生涡流;内缺陷外检测;检测速度

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)12-0051-06

Rapid external detection of steel pipe inner wall defects based on motion-induced eddy currents magnetic field

FAN Xiaoli¹, LI Weihan², MIAO Rui¹, LI Qiang¹, SHI Yanan¹

(1. Xinjiang Special Equipment Inspection and Research Institute, Urumqi 830011, China;

2. Power China Beijing Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: The ANSYS finite element analysis software was used to explore the relationship between the shape, width, depth, and detection speed of defects on the inner wall of steel pipelines and the dynamic eddy current field; Designed and built a rapid external detection testing device; Evaluated the characteristics of dynamic eddy current signals generated by different defect depths under high-speed detection conditions. The larger the aspect ratio of the defect itself, the stronger the magnetic induction intensity signal of the defect signal; As the detection speed increases, although the intensity of dynamic eddy current magnetic induction gradually decreases, the location and parameter information of defects can still be accurately detected; The experimental results and simulation results have the same trend of change. The experimental results show that the rapid external detection method for steel pipeline inner wall defects based on dynamic eddy current magnetic field can accurately locate and identify parameters of pipeline inner wall defects, providing theoretical reference and technical support for the rapid and accurate detection of pipelines.

Key words: steel pipeline; motion-induced eddy current; internal defect external detection; detection speed

收稿日期: 2022-11-07

基金项目: 自治区协同创新专项(2021E02050); 自治区市场监督管理局科技计划项目(S2023172060)

作者简介: 范效礼(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事特种设备检验及压力容器健康检测技术研发工作

通信作者: 范效礼, ychen08089@163.com

钢质管道具有安全、高效、低损耗等特点被广泛应用于石油、化工等领域, 在国民经济建设中起着至关重要的作用^[1]。钢质管道在服役过程中, 不可避免地会遭受不同输送介质的腐蚀和磨损, 造成管体内壁损伤, 为管道的安全运行埋下巨大的隐患^[2]。

因此,需定期对钢质管道内壁进行安全检测^[3]。目前,国内外工业领域应用较为成熟的管道内壁检测技术主要为漏磁内检测技术^[4],但其对管道的管径和管路平直度要求较高,且检测技术复杂,成本较高,目前主要应用于长距离、大口径和高压力的油气长输管道中,并不适用于人口密集区的城市燃气和热力管道、油田集输管道、站场管道以及成品油管道的检测^[5];同时,其主要用于检测钢质管道的划痕、凹陷和金属缺失等问题,难以检测出管道裂纹类缺陷^[6]且对其他几类缺陷尺寸的测量误差较大^[7]。针对这些问题,国内外学者提出一种基于动生涡流的管道内壁缺陷快速外检测方法。动生涡流(MIEC)是一种较为普遍的物理现象,即由磁场中金属导体运动所产生的电流^[8-9]。YANG 等^[10]首次对利用磁体相对管道运动所产生的动生涡流来测量径向分布缺陷的可行性进行了验证,结果表明检测信号峰值随缺陷深度变化近似呈现指数变化,而随缺陷宽度的增长呈现先快后慢单调增加的趋势。HOSHIKAWA 等^[11]基于动生涡流设计并制造了一种具有最小剥离噪声的探头,该探头能够以合理的信噪比检测出焊接区域表面的纵向和横向缺陷。ROCHA 等^[12]首次提出一种利用运动感应涡流扩散来评估铁磁性材料中亚表面缺陷的方法。CHU 等^[13]设计了一种集成涡流测试探头的巨型谐振式磁电(ME)传感器并应用于常规管道无损检测,发现该传感器适用于检测非铁磁和低电导率材料。GUESMI 等^[14]提出了一种基于涡流的无损检测技术,其能够在涡流分量和沿 x , y 轴的相关磁通密度上观察到裂纹扩展方向。伍剑波和康宜华等^[15-19]对穿过式线圈磁化时的涡流效应进行了研究,并得到了涡流对管端磁化及管端裂纹信号的影响,建立了钢管内部涡流分布的理论模型。

目前,国内外研究人员针对 MIEC 在管道无损检测技术中的研究多集中于准静态条件下的管道外表面方向,而忽视了速度变化条件下的管体内壁损伤,无法满足管道内缺陷的检测需求,为此提出一种基于动生涡流磁场的钢质管道内壁缺陷快速外检测方法并进行检测试验,结果表明,该方法能够对管道内壁缺陷进行精准定位与参数辨别,可为管道的快速、精准无损检测提供理论参考和技术支持。

1 运动场下动生涡流检测原理

动生涡流磁场的检测原理如图 1 所示,磁场源

(永磁铁)沿管道轴向快速运动时会在管道表面和亚表面产生涡电流,涡电流主要分布在磁场源前后和正下方,当管道表面或者内部存在缺陷时,缺陷区域涡流的产生与扩散会受到影响,从而造成缺陷上方的磁场发生变化,利用磁传感器沿管道连续采集磁场信息并对磁信号进行解析,即可获得管道缺陷的具体信息。

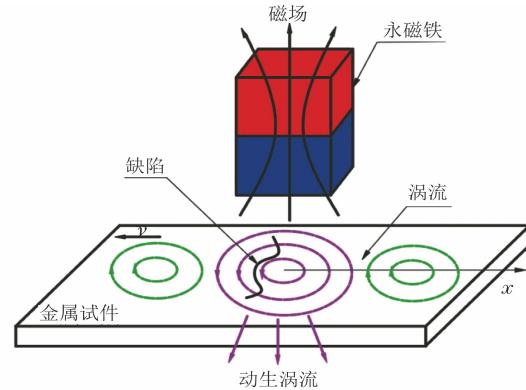


图 1 动生涡流磁场检测原理示意

假设磁场源产生的磁场是恒定的,将金属与磁场源相互运动视作磁场源以一定速度沿着 x 轴负方向运动,磁场从 N 极出发,经过金属内部和空气后,最终回到 S 极。所以,可以得到磁场源下方区域金属内部磁场的大致分布和方向,动生涡流生成原理如图 2 所示,图中不同位置的动生涡流分别表示为 J_{m1} , J_{m2} 和 J_{m3} ,“•”表示磁场方向垂直于纸面向上,“×”表示磁场方向垂直于纸面向下。金属中的自由电子以一定速度切割磁感线,会受到洛伦兹力 F 的作用而发生定向移动,由式(1)和左手定则可知,电子运动的方向垂直于速度和磁场的方向,试件中间为逆时针旋转,两侧均为顺时针旋转。

$$F = q(E + v \times B) \quad (1)$$

式中: F 为洛伦兹力; q 为带电粒子的电荷量; E 为电场强度; v 为带电粒子的速度; B 为磁感应强度。

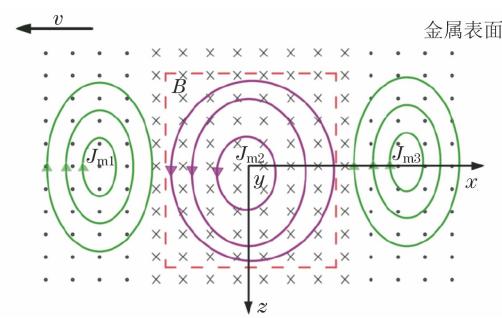


图 2 动生涡流生成原理示意

利用 ANSYS 软件对涡流分布进行仿真,动生涡流分布矢量仿真结果(金属 xy 轴截面处的涡流)

如图 3 所示, 可见分析与仿真结果一致。

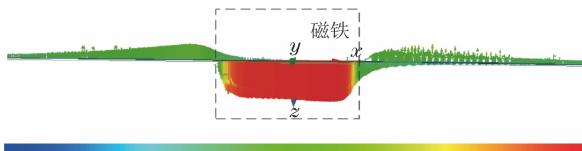


图 3 动生涡流分布矢量仿真结果

2 管道内壁缺陷动生涡流磁场检测建模与仿真

2.1 管道内壁缺陷建模

管道内壁缺陷主要由腐蚀和磨损造成, 且形状、尺寸各有不同。试验用不同形状、宽度、深度、几何尺寸缺陷如图 4 所示, 笔者在动生涡流磁场检测仿真分析过程中对复杂的内壁缺陷形状进行简化, 分别选用不同缺陷形状(矩形、三角形、梯形)、不同缺陷宽度(0.5, 1, 1.5, 2 mm)、不同缺陷深度(1, 2, 3, 4 mm)以及不同检测速度($5, 10, 15, 20, 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)来分析动生涡流磁场内壁缺陷检测的机理。

借助 ANSYS Electronics 有限元分析软件对管道内壁缺陷动生涡流磁场检测模型进行有限元分析, 二维动生涡流检测模型如图 5 所示, 该模型由永磁体、探头、管壁、内壁缺陷、空气域等组成, 首先设置如下材料属性: 永磁体采用钕铁硼磁铁、管道采用

1010 号钢; 其次进行边界条件、间隙相对磁导率、 B - H 曲线(见图 6)、求解模型及监控等初始化设置; 最后通过改变钢质管道内部缺陷形状、宽度和深度以及检测速度来研究各参数与动生涡流磁场之间的关系。接收线圈与测试管道的物理参数如表 1, 2 所示。

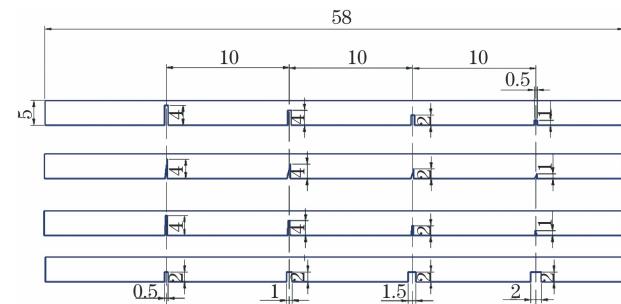


图 4 不同形状、宽度、深度、几何尺寸缺陷示意

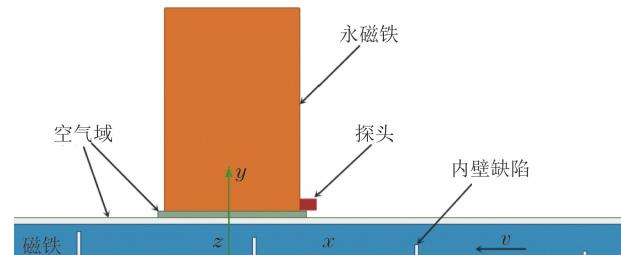


图 5 二维动生涡流检测模型

表 1 接收线圈的物理参数

材料	内径/mm	外径/mm	高度/mm	匝数/匝	电导率/ $\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$	相对磁导率
铜	2	3	10	800	58	1

表 2 测试管道的物理参数

材料	长度/mm	宽度	厚度/mm	电导率/ $\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$	磁导率
1010 号钢	300	-	5	2	见 B - H 曲线

2.2 内壁缺陷形状与动生涡流磁场之间的关系

在相同模型下, 取钢质管道内壁缺陷宽度尺寸为 0.5 mm, 检测速度为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 内壁缺陷深度为 4 mm, 缺陷形状分别为矩形、三角形和梯形进行仿真, 得到不同形状缺陷的动生涡流磁感应强度曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 矩形与梯形缺陷的磁感应强度信号总体趋势基本一致, 梯形缺陷的信号峰值较矩形缺陷的信号峰值略低, 三角形缺陷的磁感应强度信号则较弱; 这主要是因为矩形、梯形的深宽比差异较三角形缺陷的深宽比大^[20], 形状的差异使得缺陷处动生涡流磁场发生改变, 因而信号出现差异, 由此可见, 动生涡流磁场缺陷检测方法具有区分管道内壁缺陷形状差异的能力。

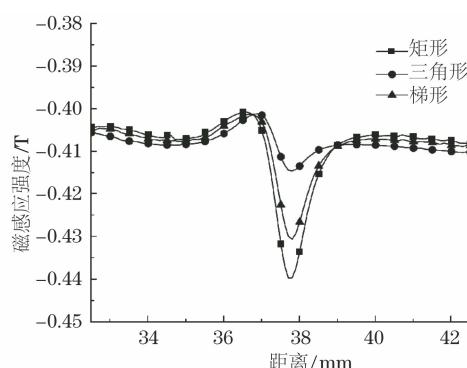


图 6 不同形状缺陷的动生涡流磁感应强度曲线

2.3 内壁缺陷宽度与动生涡流磁场之间的关系

在相同模型下, 取钢质管道内壁缺陷自身深度为 2 mm, 检测速度为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 内壁缺陷宽度分别为 0.5, 1, 1.5, 2 mm, 缺陷形状分别为矩形、三角形

和梯形,计算得到不同宽度内壁缺陷的动生涡流磁

感应强度曲线如图 7 所示。

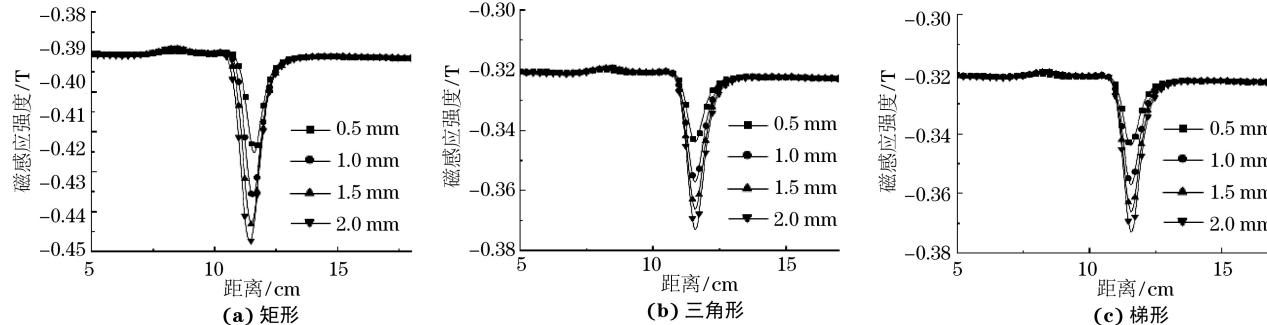


图 7 不同宽度内壁缺陷的动生涡流磁感应强度曲线

由图 7 可知,当内壁缺陷深度尺寸相同时,随着缺陷宽度的增大(0.5~2 mm),磁感应强度信号逐渐增强;随着缺陷宽度的增加,磁感应强度信号的强度也随之增加。这主要是因为随着缺陷宽度的增加,钢质管道内壁表面损失体积增大,使得缺陷平均深度增大,缺陷底部更加靠近管道外表面,在动生涡流的影响下,外表面磁场强度较大,因而磁感应强度逐渐增强,信号反馈愈发强烈。由此可见,基于动生涡流磁场的钢质管

道内壁缺陷外检测方法具有区分不同裂纹宽度的能力,且检测效果较漏磁检测技术^[21]的效果明显。

2.4 不同内壁缺陷深度与动生涡流磁场之间的关系

在相同模型下,取钢质管道内壁缺陷宽度为0.5 mm,检测速度为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,内壁缺陷深度分别为1,2,3,4 mm,缺陷形状分别为矩形、三角形和梯形,计算得到不同内壁缺陷深度对动生涡流磁感应强度的影响曲线如图 8 所示。

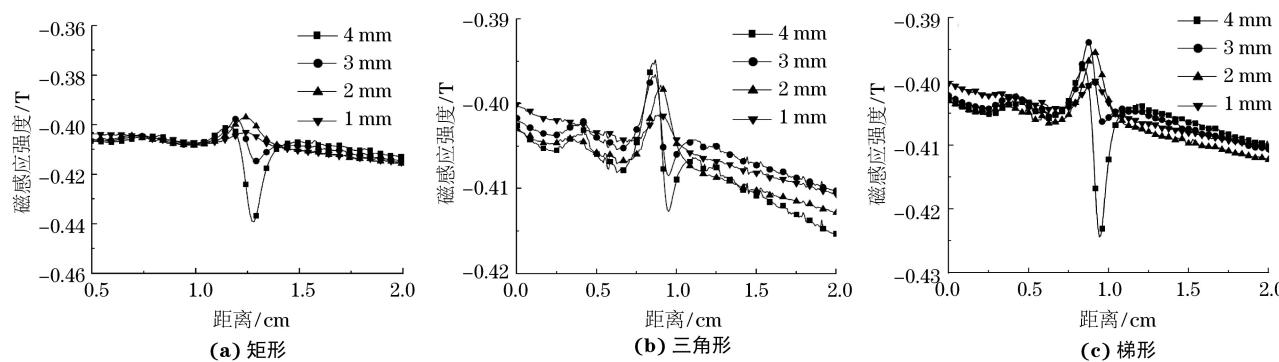


图 8 不同内壁缺陷深度对动生涡流磁感应强度的影响曲线

由图 8 可知,矩形、三角形、梯形缺陷作为常见缺陷形状,当改变缺陷自身深度时,随着缺陷深度的减小,缺陷的深宽比逐渐减弱,因此磁感应强度信号逐渐降低,波形趋于平缓。需要特别指出的是,随着缺陷深度的减小,磁感应强度信号的变化趋势发生改变,当缺陷深度为 4 mm 和 3 mm 时,信号表现为波峰-波谷的特征,当缺陷深度为 2 mm 和 1 mm 时,信号表现出只有一个方向变化的趋势。这是由于缺陷自身深度较大时,缺陷末端靠近管道外表面,缺陷将会新接触到靠近管壁外表面的磁场,这部分磁场与靠近内表面的磁场方向不同,因而反馈信号变化趋势会发生变化;由此可见,当内壁缺陷深度增加到一定值后,其缺陷信号特征会发生变化,随缺陷尺寸的增大,磁感应强度信号会出现分级现象,以此可以判断管道内壁的损坏情况。

2.5 检测速度与动生涡流场之间的关系

在相同模型下,取钢质管道内壁缺陷宽度为0.5 mm,深度为 2 mm,检测速度分别为 $5, 10, 15, 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,缺陷形状分别为矩形、三角形和梯形,计算得到不同检测速度对动生涡流磁感应强度的影响曲线如图 9 所示。

从图 9 可以看出,随着检测速度的增大,磁感应强度信号的基线值逐渐减小,这主要是因为随着检测速度的增大,动生涡流磁场强度增大,然而 J_m 的最大值不再位于探头中心位置^[22],从而导致 y 方向的磁场强度逐渐减小,其反映在磁感应强度曲线上表现为缩小态势;同时与漏磁法^[20]相比,基于动生涡流磁场的钢质管道内壁缺陷快速外检测方法仍能准确检测到实际缺陷位置,应用前景广阔。

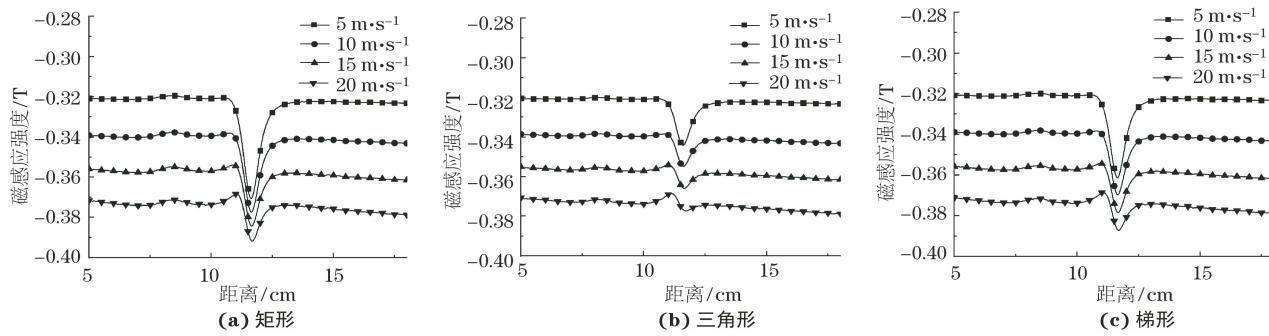


图 9 不同检测速度对动生涡流磁感应强度的影响曲线

3 动生涡流检测试验

3.1 试验设计

动生涡流检测试验装置如图 10 所示, 试验过程中由电动机为整个试验装置提供动力, 在动生涡流管道无损检测的过程中, 采用线圈作为探头, 当环形管道试件与探头、永磁铁发生相对位移时, 在管壁表面能够产生漩涡状电流, 使用线圈探头检测磁信号, 最终可得到缺陷的电压信号, 该信号经由采集卡传输到计算机中, 计算机能够把环形管道试件中的缺陷信息通过线圈探头的输出电压变化反映出来。

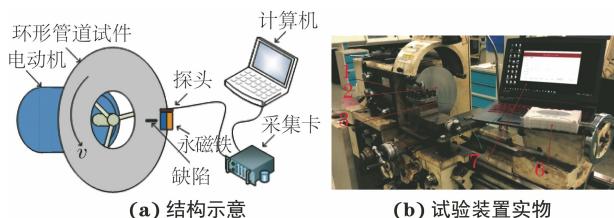


图 10 动生涡流检测试验装置示意

借助图 10 所示试验装置, 设计了图 11 所示的试件, 在管道内壁面加工出缺陷宽度为 0.5 mm, 长度为 2 mm 的矩形缺陷, 缺陷深度分别为 1, 2, 3, 4 mm, 检测速度为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 试验过程中应尽量

减少环境因素对检测信号的影响, 所有试验需重复 5 次以上, 以降低人为因素带来的影响。

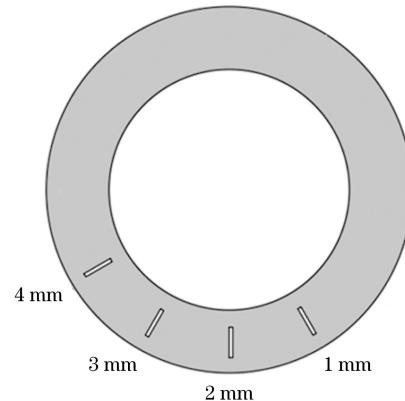


图 11 金属试件缺陷位置图

3.2 结果分析

采用图 10 所示试验装置在高速运动条件下采集环形管道内壁上不同缺陷深度产生的磁感应强度信号, 并与仿真数据进行对比(见图 12)。

由图 12 可知, 不同缺陷深度的数值计算曲线与试验验证结果具有相同的变化趋势, 试验结果与仿真结果存在一定的误差, 这主要由机械精度和人为因素造成; 由此验证了该检测方法的实际可行性, 说明基于动生涡流磁场的钢质管道内壁缺陷外检测方

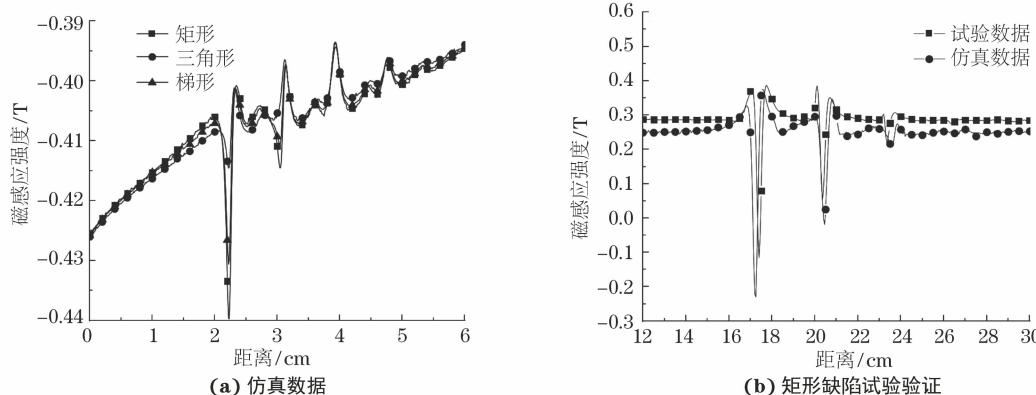


图 12 不同深度缺陷的动生涡流磁感应强度曲线

法能够有效区分缺陷的尺寸信息;矩形、梯形缺陷与三角形缺陷差异明显,缺陷深宽比^[19]越大,缺陷信号越强。需要特别说明的是,由于检测设备的抖动及人为因素的影响,试验结果存在一定的误差,但仍可在缺陷位置观察到明显波动,说明基于动生涡流磁场的钢质管道内壁缺陷外检测方法具备检测管道缺陷深度及形状差异的能力,有助于及时发现长输管道输送过程中的安全隐患。

4 结论

基于动生涡流原理,借助 ANSYS Electronics 有限元分析软件和动生涡流无损检测试验装置,在高速运动条件下对钢质管道内壁缺陷进行了建模仿真和试验验证,得出以下结论。

(1) 不同形状(矩形、三角形和梯形)钢质管道内壁缺陷的磁感应强度信号受缺陷自身深宽比的影响较大,深宽比越大,磁感应强度信号越强;随着钢质管道内壁缺陷宽度的增加,磁感应强度信号的强度也随之增加,信号反馈也愈加强烈。

(2) 随着钢质管道内壁缺陷深度的增大,受管壁内部涡流分布影响,磁感应强度信号逐渐增强,且信号特征会在一定深度时发生突变;随着检测速度的提高,缺陷磁感应强度信号的值逐渐减小。

(3) 设计并搭建了动生涡流无损检测试验装置,采用数值分析与试验相结合的方式,比较了在高速运行条件下环形管道内壁上不同缺陷深度产生的动生涡流信号特征。结果表明,不同缺陷深度数值计算曲线与试验结果具有相同的变化趋势,随着缺陷深度的减小,磁感应强度信号逐渐减弱;基于动生涡流磁场的钢质管道内壁缺陷外检测方法具有在高速检测条件下准确辨别缺陷位置及参数信息的能力。

参考文献:

- [1] ZHANG H, GAO M Q, LI Z L, et al. Vibration analysis of an In-pipe inspection robot considering fluid-structure coupling [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22 (5): 2250055.
- [2] 辛佳兴,陈金忠,李晓龙,等.油气管道内检测技术研究前沿进展[J].石油机械,2022,50(5):119-126.
- [3] PARK J H, KIM D K, KIM H J, et al. Development of EMA transducer for inspection of pipelines [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(11):5209-5218.
- [4] 王婷,杨辉,冯庆善,等.油气管道环焊缝缺陷内检测技

术现状与展望[J].油气储运,2015,34(7):694-698.

- [5] 王晓司,王勇,杨静,等.电磁超声和漏磁管道内检测技术对比分析[J].石油化工自动化,2018,54(5):55-57.
- [6] 王富祥,玄文博,陈健,等.基于漏磁内检测的管道环焊缝缺陷识别与判定[J].油气储运,2017,36(2):161-170.
- [7] TAPPERT S, ALLEN D L, MANN A, et al. Third-generation EMAT tool enhanced for finding SCC and disbonded coating in dry gas pipelines[J]. Pipeline & Gas Journal, 2009, 236(6):26-28,30,32.
- [8] NESTLEROOTH J B, DAVIS R J. Application of eddy currents induced by permanent magnets for pipeline inspection[J]. NDT & E International, 2007, 40(1): 77-84.
- [9] YUSA N, HASHIZUME H. Numerical investigation of the ability of eddy current testing to size surface breaking cracks [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 32(1):50-58.
- [10] YANG S, SUN Y, UDPA L, et al. 3D simulation of velocity induced fields for nondestructive evaluation application [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3):1754-1756.
- [11] HOSHIKAWA H, KOYAMA K, MIZOGUCHI K. Eddy current non-destructive surface testing of weld coated with anticorrosion painting[J]. Welding in the World, 2005, 49(7):28-32.
- [12] ROCHA T J, RAMOS H G, RIBEIRO A L, et al. Evaluation of subsurface defects using diffusion of motion-induced eddy currents[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65 (5): 1182-1187.
- [13] CHU Z Q, JIANG Z K, MAO Z N, et al. Low-power eddy current detection with 1-1 type magnetoelectric sensor for pipeline cracks monitoring[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2021, 318:112496.
- [14] GUESMI M, HARZALLAH S, KOUZOU A. New non-destructive testing approach based on eddy current for crack orientation detection and parameter estimation [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2021, 67 (4): 431-451.
- [15] WU J B, KANG Y H, TU J, et al. Analysis of the eddy-current effect in the Hi-speed axial MFL testing for steel pipe[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 45(1/2/3/4): 193-199.

(下转第 85 页)

验教学满意度达到 98% 以上。为了进一步科学评价实验教学效果,通过发放问卷形式,来调查学生毕业后射线检测职业资格取证实操一次通过率,发放对象为 2020 届、2021 届、2022 届毕业后从事射线检测工作的学生,共发放问卷 71 份,其中 69 份反馈一次通过,学生实操一次通过率超过 97%,数据表明课程实验教学体系合理,为培养工程实践能力强的射线检测技术人才奠定了坚实的基础。

5 结语

射线检测课程实验教学体系是专业实践教学体系的重要组成部分,通过课程实验教学内容的不断改革与探索,形成了原理验证实验-新技术实验-专业课程设计-技能训练-创新性训练-职业资格认证等 6 大实验教学环节,教学环节之间有机连接,层层递进,构建了一套较完整的射线检测实验教学体系。从设备与器材、试块、仿真软件等方面加强实验条件建设,为课程实验教学提供了有力支撑。实践证明,射线检测实验教学体系能够激发学生的创新思维,提升动手能力,能够满足新工科对应用型人才培养

的新要求。

参考文献:

- [1] 刘佳,薛明姬.高职专业课程实训项目的改革与教学应用——以高职射线检测课程为例[J].辽宁高职学报,2016,18(12):54-56.
- [2] 刘佳,崔国建.《射线检测技术》基于“1+N”人才培养模式的课程改革[J].南方农机,2018,49(18):25.
- [3] 刘佳,薛明姬.《射线检测技术》在工程应用中的建设与改革[J].科技传播,2016,8(11):164-165.
- [4] 刘文锁.高职院校射线检测实训基地的建设研究[J].广东化工,2019,46(24):124.
- [5] 赵高峰,周夕良.高职院校中射线检测的教育探讨[J].黑龙江科技信息,2012(36):205.
- [6] 裴梦琛,武玮,滕海鹏,等.“新工科”背景下教学模式的探索与研究——以“无损检测”课程为例[J].工业和信息化教育,2022(7):31-34.
- [7] 卢超,邬冠华,任吉林,等.无损检测专业实践教学体系建设的探索——南昌航空大学“测控技术与仪器”国家特色专业建设[J].无损检测,2011,33(8):59-64.

(上接第 56 页)

- [16] WU J B, FANG H, WANG J E, et al. Sensitivity difference caused by eddy-current magnetic field in Hi-speed MFL testing and its elimination method[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 52(3/4): 1007-1014.
- [17] 伍剑波,康宜华,孙燕华,等.涡流效应影响高速运动钢管磁化的仿真研究[J].机械工程学报,2013,49(22):41-45.
- [18] 伍剑波,王杰,康宜华,等.感生磁场对高速运动钢管磁化的影响机理[J].机械工程学报,2015,51(18):7-12.
- [19] 伍剑波.钢管同尺寸裂纹的多样漏磁场生成机理及其

应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.

- [20] 李迅波,李翔,陈亮,等.钢管相邻缺陷漏磁场相互影响的分析[J].电子科技大学学报,2008,37(5):797-800.
- [21] 杨杨,谢维成,张均富,等.天然气管道内壁缺陷形状的漏磁场分布特征及检测[J].传感器与微系统,2020,39(10):104-107.
- [22] YUAN F, YU Y T, WANG W, et al. A novel probe of DC electromagnetic NDT based on drag effect: design and application in crack characterization of high-speed moving ferromagnetic material [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-10.