

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905410

高速漏磁检测饱和场建立过程及影响因素研究*

杨理践, 耿浩, 高松巍, 刘斌

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘要:在高速漏磁检测过程中,随着检测速度增加,有效磁化时间减少,导致被测构件饱和场无法建立,影响磁化效果。采用方波激励模拟外磁场瞬变情况,建立瞬磁场作用下钢管内部磁场响应模型,对钢管内部饱和场建立过程及影响因素进行研究;分析高速漏磁检测时缺陷漏磁场特征,利用有限元方法计算磁场强度和钢管材质对磁化滞后时间及缺陷检测的影响;设计高速漏磁检测实验平台,对不同运行速度和不同外磁场强度下钢管缺陷进行实验研究。结果表明,外磁场瞬变时,钢管内壁中心磁场明显滞后于外磁场,钢管内部饱和场建立时间与磁场强度和材料电导率有关,提高外磁场强度,可快速建立饱和场,减弱磁化滞后时间和涡流效应影响,提升缺陷检测效果和漏磁检测速度,实验结果和理论分析具有很好的一致性。

关键词:磁化滞后;涡流效应;饱和磁场;高速检测;有限元仿真;漏磁检测

中图分类号: TM153.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Study on the establishment process and influence factors of high-speed magnetic flux leakage testing

Yang Lijian, Geng Hao, Gao Songwei, Liu Bin

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: During the high-speed magnetic flux leakage testing, the effective magnetization time decreases with the testing speed increase. It may lead to the non-magnetic saturation of the measured component. The magnetization effectiveness could be affected. To solve this problem, the square wave excitation is used to simulate the external magnetic field transients. The internal magnetic field response model of the steel pipe under the transient magnetic field is formulated. The formulation process and influencing factors of the internal saturation field of the steel pipe are studied. The features of the defect leakage magnetic field during high-speed magnetic flux leakage detection are analyzed. By using finite element analysis, the influences of magnetic field intensity and steel pipe material on magnetization lag time and defect detection are calculated. The high-speed magnetic flux leakage testing platform is designed. Experimental research on the steel pipe defects under different operating speeds and external magnetic field strengths are investigated. Results show that the central magnetic field of the inner wall of the steel pipe obviously lags behind the external magnetic field when the external magnetic field transients. The internal saturation field of the steel pipe is related to the magnetic field strength and the material conductivity. When the intensity of the external magnetic field is increased, the saturation field can be quickly established. Meanwhile, the defect detection effect and magnetic flux leakage detection speed can be improved. There is a good consistence between experiment results and theoretical analysis.

Keywords: magnetization hysteresis; eddy current effect; saturation magnetic field; high speed testing; finite element simulation; magnetic flux leakage testing

0 引言

界干扰小、无需耦合剂等优点,被广泛应用于钢轨、钢管、油气长输管道等在线检测领域。漏磁检测技术在应用过程中,首先利用励磁源对被测构件进行磁化,当被测构件被磁化至饱和或近饱和状态时,缺陷区域将产生漏磁场

漏磁检测技术具有可靠性高、易于实现自动化、受外

信号,通过检测传感器采集漏磁场信息,判断缺陷信息和特征^[1]。随着工业科技发展,对漏磁在线检测速度提出了更高要求和需求。静态检过程中,材料磁化的时间足够,磁饱场建立过程可忽略;当进行在线检测时,由于相对运动不可避免产生涡流磁场叠加在原磁场中影响被测构件磁化状态;同时检测速度的提升,将导致被测构件有效磁化时间缩短,磁饱和场建立过程对缺陷检测效果至关重要。

冯博等^[2-3]建立钢棒在瞬变磁场下的数学模型并对其进行分析,对涡流效应引起的钢棒磁化滞后时间进行了理论计算,并对静态和瞬态两种不同检测状态下钢管内外壁缺陷信号分布特点进行研究;Wu等^[4]对运动诱导的涡流对钢管周向磁化影响进行了研究,分析得出转速增加将使得涡流和周向磁通密度变得不对称和不均匀;Wang等^[5]对磁化器与被测构件之间由于相对运动而引起的动态磁化和磁滞的速度效应进行研究,分析了钢轨的磁化强度和磁导率随动态磁化时间的变化规律;伍剑波等^[6-7]对高速漏磁检测过程中产生的两种电磁感应现象即钢管内产生的感生涡流和磁化线圈内产生的感生电流,对钢管处于不同位置时的磁化状态的影响进行了研究;吴德会等^[8]对由管道漏磁内检测器运动产生的感应管壁环向涡流进行了定量分析,计算其形成的“逆磁场”及其对外加磁场的影响,分析了不同尺寸裂纹几何特征与漏磁信号之间的对应关系;Etcheverry等^[9]发现在较低激励场中,旋转产生的涡流效应对磁化状态影响明显,高速时涡流效应会使得被测构件的磁化效果减弱,甚至与外磁场反向;田贵云课题组^[10-12]对钢轨缺陷损伤的高速巡检技术和高速时磁通泄漏进行了数值模拟研究,提出了一种三传感器阵列的高速漏磁检测系统。Zhang等^[13]通过分析速度对漏磁信号的影响研究了检测传感器的最佳位置。国内外学者利用运动诱导的涡流对检测缺陷进行研究,Rocha等^[14-16]对利用速度感应涡流进行缺陷检测时,对不同传感器的检测性能进行研究,并提出了一种基于永磁体和霍尔传感器的新型移动检测探头;Feng等^[17]利用运动诱导的涡流对非铁磁性材料的缺陷检测进行研究。目前大部分研究主要是针对高速漏磁检测过程中涡流效应的影响及提升缺陷检测能力的方法,对于被测构件磁饱和场的建立过程以及影响因素等方法研究较少,而漏磁检测方法应用有效应用对被测构件磁饱和程度要求较高,磁饱和场建立过程及特征对缺陷检测影响重大。

本文采用方波激励模拟外磁场瞬变情况,研究了钢管内外壁饱和场的建立过程,分析了饱和场建立过程中磁化滞后时间受外磁场大小和被测材料材质的影响规律;通过有限元分析方法计算分析了磁滞时间对钢管内壁缺陷检测的影响,通过仿真计算和实验相互验证的方

法证明了外磁场强度的增加可加快建立被测构件内部饱和磁场,减少磁化滞后时间,同时减弱高速检测过程中产生的涡流效应影响,提升了检测速度和缺陷检测率。

1 高速漏磁检测磁滞影响原理

1.1 磁化滞后影响

当采用穿过式磁化线圈对钢管的周向缺陷进行检测时,为了实现全面的缺陷检测,钢管与磁化线圈将发生相对运动,被测钢管逐渐通过磁化线圈,根据磁化线圈磁场分布特性,钢管本身相当于被施加了恒定、非均匀变化的磁场,使钢管被磁化,线圈磁场的分布特点如图1所示。

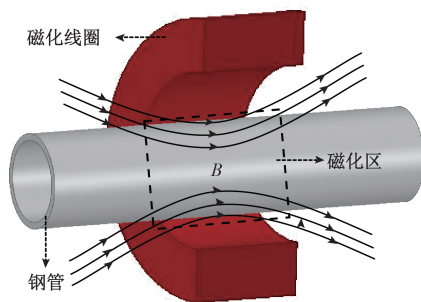


图1 线圈磁场分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of coil magnetic field distribution

由图1可知,磁化线圈产生的磁场在其边缘处开始迅速下降,只有在线圈内部才能形成足够大的磁场对被测钢管进行磁化。在实际应用中,当检测速度增加时,钢管通过线圈有效磁场区域的时间减少,使得有效磁化时间大幅度缩短,使得缺陷漏磁场信号减小,由于缺陷漏磁场大小与磁化场强度正相关,钢管内部磁饱和场的有效建立对于进行有效的高速漏磁检测至关重要。

1.2 方波激励磁场数学模型

为分析被测钢管内部饱和场和稳定场的建立过程,利用方波激励建立钢管在瞬变磁场作用下的磁化模型。漏磁检测遵守电磁学定律,磁化线圈激励时产生的磁场满足如下麦克斯韦方程^[18]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量; t 为时间; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; ∇ 为哈密顿算子。

由于磁场的无源性,引入矢量磁势 $\mathbf{A}$,并引入库伦规范,可得到矢量磁势与磁感应强度之间的关系,表示为:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (4)$$

在各向同性的铁磁性材料中,电流密度 $\mathbf{J}$ 在磁导率为 μ 的介质中形成的稳定磁场 $\mathbf{H}$ 和磁感应强度 $\mathbf{B}$, 可表示为:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5)$$

当频率小于 10 MHz 时忽略位移电流的影响,由式(1)和(2)可得出:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (6)$$

利用矢量恒等式 $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \cdot \mathbf{A}$, 则式(6)可以简化为:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \cdot \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (7)$$

根据信号特点可知,对于任意满足狄利克雷条件的激励信号都可以根据傅里叶变换转换为多次谐波信号的叠加形式^[19]。当线圈中通入电流为 I ,角频率为 ω 的信号时,结合式(2),钢管内部的电流 $\mathbf{J}$ 可以表示为:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -j\omega \sigma \mathbf{A} \quad (8)$$

式中: σ 为被测钢管的电导率; ω 为激励电流信号的角频率。

根据欧姆定律,钢管内部区域处的微分矢量方程可以表示为:

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{A} = \mu j\omega \sigma \mathbf{A} \quad (9)$$

对于钢管的轴对称模型,在柱坐标系 (r, θ, z) 下,矢量磁位 $\mathbf{A}$ 只有周向(θ)分量,即:

$$\mathbf{A} = A(\mathbf{r}, z) \mathbf{e}_\theta = A_\theta \quad (10)$$

此时,钢管内部磁场的微分矢量方程在柱坐标系下可以简化表示为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} - \frac{A}{r^2} = \mu j\omega \sigma A \quad (11)$$

式(11)给出了谐波激励作用下,钢管内各点磁场随时间的变化情况。

在给定的区域和边界条件下,对式(11)钢管内部微分矢量方程进行求解,可得到外磁场瞬变时,矢量磁势 $\mathbf{A}$ 随时间和外加磁场的分布特征,进而分析磁场稳定过程及影响因素。

2 高速漏磁检测缺陷漏磁场特征

在直流线圈漏磁检测的应用模型中,磁场传感器位于磁化线圈中心位置的钢管上方区域,对钢管缺陷产生的漏磁信号进行检测。在低速检测时,忽略涡流磁场的影响,当钢管中不存在缺陷时,检测传感器检测到的磁场为线圈产生的磁场,即信号的基线值,可以表示为:

$$B_b = B_c \quad (12)$$

式中: B_b 为传感检测到的信号基线值; B_c 为线圈产生的

磁场。

低速检测时,忽略涡流效应影响,当钢管缺陷经过检测传感器区域,此时只有磁化线圈产生的磁场对钢管进行磁化,钢管内部缺陷处的漏磁场分布示意图如图 2 所示。

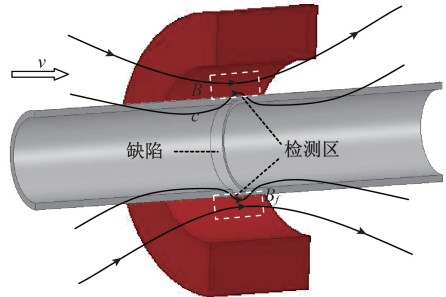


图 2 钢管内部缺陷漏磁场分布

Fig.2 Leakage magnetic field distribution of internal defects of steel pipes

由图 2 可看出,当缺陷区域经过检测区域时,传感器检测到的磁场信号为磁化线圈产生的磁场和磁化线圈磁场作用下缺陷处产生的漏磁场信号之和,此时传感器检测到的信号可以表示为:

$$B_t = B_c + B_f \quad (13)$$

式中: B_t 为传感器检测到的信号; B_f 为缺陷处产生的漏磁场信号。

在实际应用过程中,主要对缺陷的漏磁场信号特征进行判别,钢管内部缺陷漏磁场信号的大小主要通过检测传感器检测到有缺陷时的信号和无缺陷时的基线信号的差值进行表示:

$$B_d = B_t - B_c = B_f \quad (14)$$

通过式(14)可知,低速检测时,缺陷尺寸特征固定时,缺陷的漏磁信号强度主要与线圈磁场强度有关。在高速漏磁检测过程中,将不可避免产生涡流磁场与外加磁场叠加共同作用于被测构件,影响被测构件的磁化状态,此时缺陷漏磁场信号大小不仅与外加磁场有关,同时与涡流磁场有关。

由于钢管存在一定电感,管壁内涡流的变化无法瞬间完成,使得检测过程中涡流变换存在一定滞后现象,在磁化线圈中心处仍存在涡流磁场,影响缺陷检测。钢管检测传感器区域内涡流分布与钢管进入磁化线圈时涡流的分布方向一致,感生涡流产生的磁场与外磁场叠加共同影响钢管的磁化状态,根据涡流分布特点,选取磁化线圈中心区域截面分析,钢管运动方向垂直直面向里,高速检测时钢管内涡流磁场对钢管磁化状态影响原理如图 3 所示。

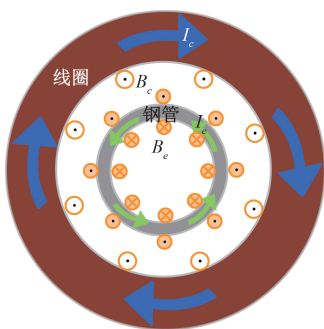


图3 涡流磁场对钢管磁化状态影响原理

Fig.3 Schematic diagram of the influence of eddy current magnetic field on magnetization state of steel pipe

图3中, I_c 表示磁化线圈电流, B_c 表示磁化线圈产生的磁场, I_e 表示钢管中产生的涡流, B_e 表示涡流产生的磁场。

由图3可知,当钢管运动到线圈中心区域时,钢管内涡流方向与线圈内电流方向相反,涡流产生的磁场在钢管外表面与线圈磁场方向一致,在钢管内壁表面与外磁场方向相反。由于钢管与线圈轴向磁化场的几何对称特性,两者发生轴向相对运动时形成的感生涡流与相对应的感应涡流磁场同样具有轴对称特性,且线圈左右两侧的涡流磁场方向相反。

高速漏磁检测过程中,当钢管内部不存在缺陷时,检测传感器检测到的磁场信号为线圈产生的磁场和涡流产生的磁场的叠加信号之和。

$$B'_b = B_c + B_e \quad (15)$$

式中: B'_b 为高速时检测到的信号基线值; B_e 为涡流产生的磁场。

当钢管内部缺陷经过检测区域时,缺陷处在涡流磁场和线圈磁场的共同作用下不仅产生漏磁场信号,同时缺陷的存在会导致涡流磁场发生变化,此时传感器检测的总磁场为:

$$B'_t = B_c + B'_f + B'_e \quad (16)$$

式中: B'_t 为高速时传感器检测到的信号; B'_f 为高速检测过程中缺陷漏磁场; B'_e 为缺陷存在时涡流磁场。

在钢管的高速漏磁检测过程中,存在涡流效应影响时,缺陷处产生的信号可以表示为:

$$B'_d = B'_t - B'_b = B'_f + B'_e - B_e = B'_f + \Delta B_e \quad (17)$$

从式(17)中可知,当进行高速漏磁检测时,钢管中缺陷信号的大小受涡流磁场和外磁场共同影响,同时漏磁场信号的大小与被测钢管上缺陷对涡流的扰动场有关。

根据涡流信号分布特点可知,在检测区域内涡流磁场与管道内壁磁场方向相反,当存在缺陷时,涡流效应产生的涡流磁场与在管道外壁处与线圈磁场同向,将使得

B'_f 值增大;涡流效应产生的涡流磁场与在管道内壁处与线圈磁场反向,使得钢管内壁磁场减弱,即使得 B'_f 值减小,同时缺陷的存在由于磁路增大,使得该处涡流减小,传感器检测到的 ΔB_e 减小;高速漏磁检测时,涡流效应对内壁缺陷信号检测影响重大,为提高信号强度和缺陷的检测精度,应增强管壁磁化强度,提升漏磁场信号 B'_f 。

3 磁饱和场建立及漏磁场分布仿真分析

利用有限元分析方法研究漏磁检测过程中钢管稳定场建立过程及其影响因素,采用 Ansoft 有限元分软件进行计算分析,建立如图4所示的仿真模型,电流方向如图中箭头所示。模型主要由磁化线圈、被测钢管两部分组成,采用磁化线圈对钢管进行磁化。磁化线圈材质设置为铜。

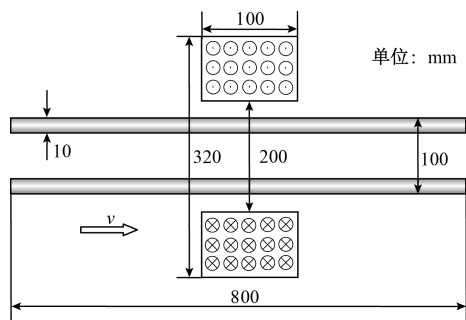


图4 仿真模型几何尺寸参数

Fig.4 Geometric dimension parameters of the simulation model

3.1 磁饱和场建立及影响因素分析

采用方波电流激励形式,模拟外磁场瞬变时钢管内部磁场达到稳定状态的变化过程,进而分析饱和场对缺陷检测的影响。在磁化线圈中通入占空比为4/5的方波电流信号,分析管道内外壁磁场强度变化随外磁场变化情况如图5所示。

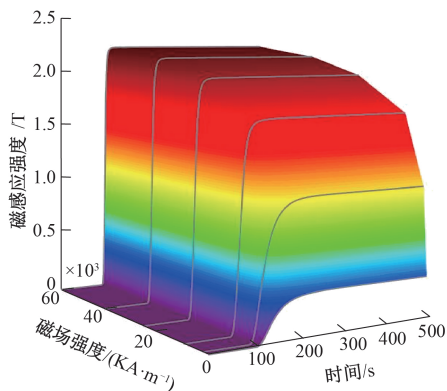


图5 钢管内壁磁场随外磁场强度变化特征

Fig.5 Feature of the magnetic field of the inner wall of steel pipe with external magnetic field strength

1) 磁场强度影响分析

根据式(12)可知,钢管内磁场的建立过程与外磁场和管道材质有关,首先分析外磁场强度对磁化滞后时间的影响。在线圈中通入不同大小的电流,对位于线圈中心位置的钢管内壁的磁场建立过程进行分析。

由图 5 可知,管道内壁磁场明显滞后于外磁场的变化,钢管内壁需要经过一定的时间才能建立饱和场,钢管内壁饱和场的建立存在磁化滞后现象;当激励电流较小时,管道内壁磁场稳定值较小,随着电流值的增大,钢管内壁的稳定磁场值逐渐增加,同时饱和场建立的磁滞时间随外加磁场值的增大而减小。为更加直观分析磁滞时间的变化情况,提取管内壁磁场达到最大值的 90% 时所用的时间随外加磁场强度的变化情况,如图 6 所示。

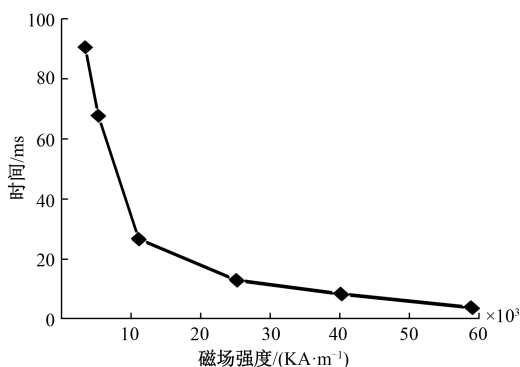


图 6 外磁场强度对磁化滞后时间影响

Fig.6 Influence of external magnetic field strength on magnetization lag time

由图 6 可看出,外磁场强度越小管壁内磁场达到稳定状态所需时间较长,随着磁场强度的增大,壁内磁场达到稳定状态所需时间急剧减少,随着外加磁场的增大可减小磁滞时间,使被测钢管快速建立饱和场稳定场。

2) 电导率影响分析

分析材料电导率对磁化滞后时间的影响,设置钢管的电导率分别为 1×10^6 、 2×10^6 、 5×10^6 、 8×10^6 、 10×10^6 、 30×10^6 S/m,对位于线圈中心位置的钢管内壁的磁场建立过程进行分析,钢管内壁磁场强度随电导率的变化情况如图 7 所示。

由图 7 可知,当外加磁场一定时,不同电导率的钢管内壁磁场稳定值几乎一致,且电导率越小,磁场的变化率越大。为更加直观分析磁滞时间的变化情况,提取管内壁磁场达到最大值的 90% 时的磁滞时间随钢管电导率的变化情况,如图 8 所示。

从图 8 中可明显看出,管壁内磁场达到稳定状态所需时间随电导率增加近似线性增大,说明导电性能越好,磁化状态磁化滞后时间影响越大。

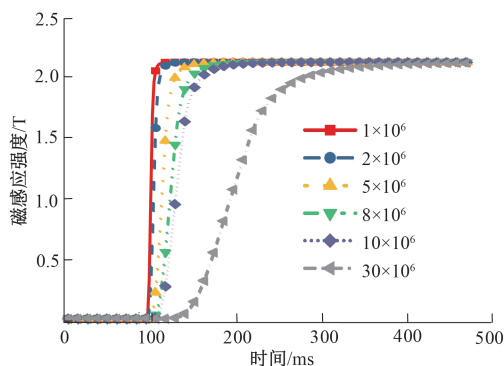


图 7 钢管内壁磁场随电导率变化特征

Fig.7 Feature of magnetic field along the inner wall of steel pipe with conductivity

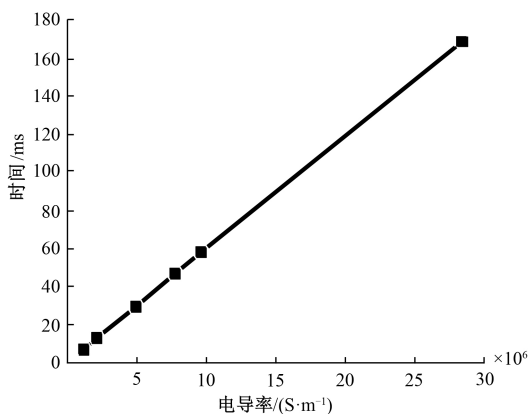


图 8 电导率对磁化滞后时间影响

Fig.8 Influence of conductivity on magnetization lag time

3.2 磁化滞后时间对缺陷检测影响

为分析磁化滞后时间对钢管缺陷漏磁检测的影响,对带有缺陷的钢管进行仿真计算,采用图 4 仿真模型,将缺陷设置在钢管内壁位置,缺陷长度为 10 mm,深度为 2 mm,环向一周。

1) 磁化滞后时间对缺陷检测影响

在高速漏磁检测时,随着检测速度的增加,使得钢管磁化时间减少,影响钢管内部磁场分布进而影响缺陷检测效果。

设置磁化线圈位置固定不动,线圈内电流为 5 A,分析不同检测速度下,磁化滞后时间和涡流效应对钢管内壁缺陷检测的影响。不同检测速度时缺陷漏磁场信号随时间的变化情况如图 9 所示。为了方便缺陷信号的对比分析,将不同速度的检测信号的横坐标设置为一致,以低速时的横轴为基准。

从图 9 可看出,检测速度较小时,缺陷漏磁场信号变化明显,主要由于低速时钢管通过线圈时的磁化时间较长,磁化滞后时间和涡流效应影响较小;随着检测速度增

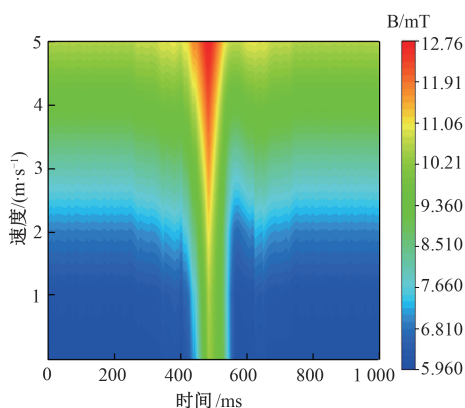


图9 不同速度缺陷漏磁场分布

Fig.9 Leakage magnetic field distribution at different speeds

加,缺陷漏磁场信号逐渐减小,当达到 5 m/s 时,缺陷信号几乎无法分辨,主要由于速度增大使得钢管磁化时间减少,钢管内部尚未建立饱和场,磁滞时间影响增大,同时速度的增加也会使得涡流信号增加,导致基线值增加和缺陷漏磁场信号减小,影响缺陷检测效果;速度的增加将增大钢管内涡流,涡流产生的涡流磁场与在管道内壁与外磁场反向,缺陷对涡流的扰动同样使得缺陷漏磁信号减小。

2) 磁场强度对缺陷检测影响

从磁化滞后时间影响因素分析结果可知,对同样材质的钢管进行检测时,外加磁场强度的增大,将减小钢管内壁磁场达到稳定状态所需时间,为进一步分析磁化滞后时间对缺陷检测的影响,设置钢管运行速度为 5 m/s,在磁化线圈内分别通入不同电流值,分析缺陷漏磁场信号随时间的变化情况,如图 10 所示。

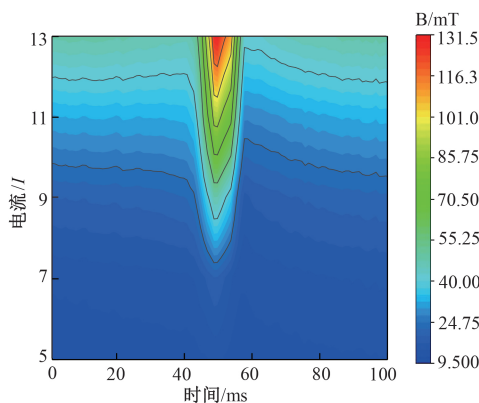


图10 不同外磁场强度缺陷漏磁场分布

Fig.10 Leakage magnetic field distribution at different external magnetic field strength

从图 10 中可以看出,当检测速度相同时,即励磁时间一致时,外磁场强度越大,缺陷漏磁场信号幅值变化程

度越大,且信号基线上升。

根据磁化线圈磁场分布特点,相同检测速度时,磁化线圈磁场强度的增强,会使得线圈边缘处磁场变化率增强,进而使得检测传感器区域处涡流增大^[20]。根据式(17),涡流的增大将会使得钢管内壁缺陷处漏磁场信号减小。而从图 10 中可明显看出,随着磁场强度的增加,缺陷处漏磁信号的幅值明显增大,说明外加磁场强度的增强,不仅使得磁滞时间减小,钢管可快速建立饱和场,增强漏磁场了信号,同时降低了由于检测速度存在导致的涡流效应使得漏磁信号减小的影响。

4 实验研究及分析

所搭建的钢管高速漏磁检测实验平台由供电系统、直流磁化线圈、检测传感器、动力系统、上位机等组成。高速漏磁检测试验原理如图 11 所示。

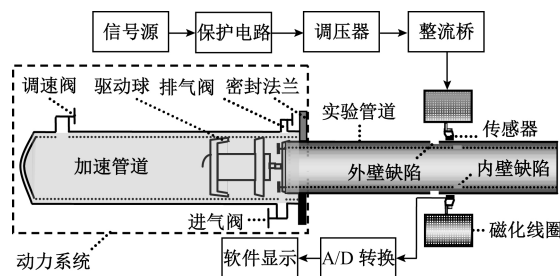


图 11 高速漏磁检测试验原理

Fig.11 Schematic diagram of high-speed magnetic flux leakage testing

实验中,采用自制的直流磁化线圈对被测钢管进行磁化,直流磁化线圈主要采用漆包线均匀缠绕在支撑骨架上制成,磁化线圈长度 300 mm,线圈匝数 2 000 匝;为保证检测数据的可靠性,检测时在磁化线圈内部放置 4 个三维检测传感器对缺陷漏磁场信号进行采集,检测传感器在磁化线圈内部呈 90°环向排列形式,检测传感器的采样频率 2 kHz;实验材料采用 20#材质无缝钢管,钢管外径 102 mm,壁厚 10 mm,实验钢管长度 12 m。

在实验钢管的内外壁表面分别加工深度为 2 mm、宽度为 2 mm、环向 360°的缺陷,进行内外壁缺陷信号的分析。退磁线圈仍采用漆包线均匀缠绕支撑骨架形式制成,与磁化线圈一致。每次实验结束后,在退磁线圈内部通入直流,利用直流退磁法对磁化后的钢管进行退磁,避免实验过程中产生的剩磁场影响。

实验中以实际钢管为研究对象,动力系统采用气推压力为被测钢管提供高速行进动力,目前实验平台检测速度可实现范围约为 0.2~12 m/s。高速漏磁检测平台如图 12 所示。

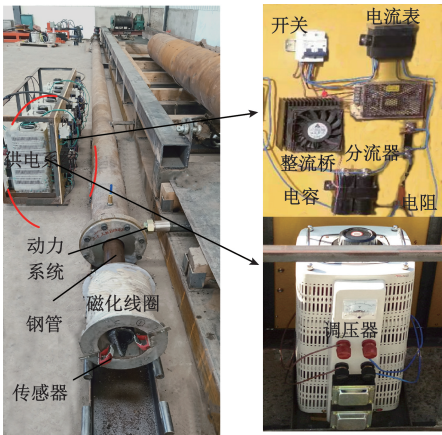


图 12 高速漏磁检测平台

Fig.12 Test platform for high speed magnetic leakage

4.1 速度对缺陷漏磁场影响分析

首先分析速度效应导致的磁化滞后时间对缺陷检测的影响。利用磁化线圈对钢管进行磁化,在线圈中通入 1.5 A 电流,使得低速时饱和场能够建立,可检测到钢管内壁缺陷漏磁信号。测试钢管在不同运行速度情况下内外缺陷的漏磁场信号分布情况,不同运行速度下缺陷漏磁场分布特征如图 13 所示。

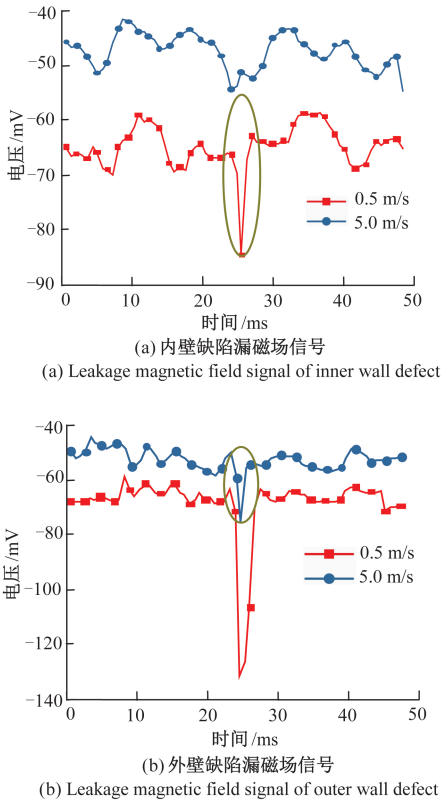


图 13 不同速度漏磁场信号

Fig.13 Magnetic flux leakage signals at different speeds

由图 13 可知,不同运行速度下缺陷漏磁场信号检测效果不同。当钢管运行速度较低,检测速度为 0.5 m/s 时,检测传感器可以检测到钢管内壁缺陷产生的漏磁场信号和外壁缺陷处产生的漏磁场信号,且内外壁缺陷漏磁场信号均很明显,易于判断缺陷存在;随着检测速度的增加,钢管内外壁信号均逐渐减小,当检测速度为 5 m/s 时,检测传感器只能检测到外壁缺陷产生的漏磁场信号,无法根据信号特征对内壁缺陷进行有效判断。

4.2 磁场强度对缺陷检测影响

在速度效应实验基础上,分析磁场强度对磁化滞后时间及缺陷检测影响,在线圈内通入不同的电流对同一钢管进行磁化。设置检测速度为 5 m/s,不同磁场强度检测得到的缺陷漏磁信号如图 14 所示。

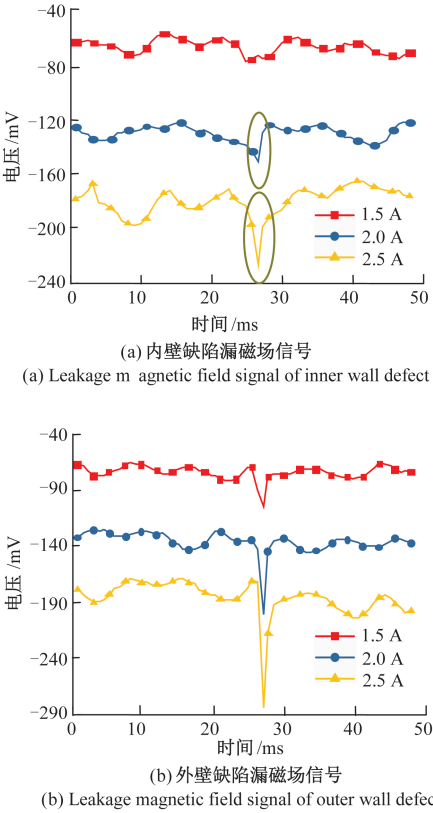


图 14 不同外磁场漏磁信号分布

Fig.14 Distribution of magnetic leakage signals at different external magnetic

由图 14 可知,随着电流增大,线圈磁场强度增加,使得信号的基线值增加;当外加磁场强度较小时,检测速度为 5 m/s,内壁缺陷漏磁场信号几乎无法分辨;随着外加磁场强度增大,在相同检测速度时,即钢管在相同磁化时间作用下,其内壁缺陷漏磁场信号越明显。为了更加直观地观测外磁场强度对缺陷检测的影响,提取不同磁场强度下,缺陷漏磁场信号的幅值,如图 15 所示。

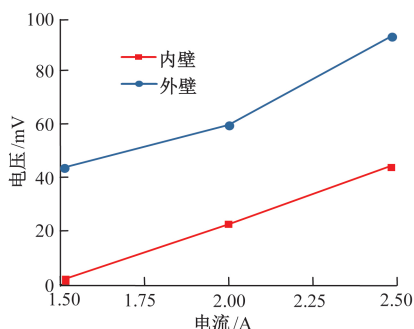


图15 不同电流缺陷信号幅值

Fig.15 Defect signal amplitude at different currents

由图15可明显看出,相同检测速度下,钢管内外壁缺陷漏磁场信号均随着外加电流值即外磁场强度的增加而增大。说明钢管受线圈的磁化作用时间相同时,外加磁场强度增大,检测速度对磁化滞后时间影响减小,对缺陷检测效果影响越小,与理论分析结果具有很好的一致性。

为进一步验证磁场强度对磁化滞后时间和缺陷检测的影响,在线圈内通入2.5 A电流,分析不同检测速度对管道内外壁缺陷的分布特点如图16所示。

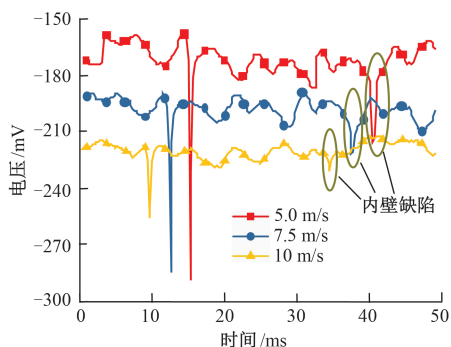


图16 不同速度缺陷漏磁场信号

Fig.16 Magnetic flux leakage signals of defect at different speeds

从图16中可以看出,线圈电流为2.5 A,检测速度从5 m/s增加到10 m/s时,内外壁缺陷漏磁信号逐渐减小,当检测速度为10 m/s时,内壁缺陷漏磁场信号仍能清晰分辨。由实验结果得到,当磁化线圈结构参数固定时,提高电流强度即提升外磁场强度,可减少钢管内部饱和场建立的磁滞时间的影响及检测速度带来的涡流效应的影响,可有效提高检测速度、提高缺陷的检测率。

5 结 论

1) 外磁场瞬间变化时,钢管内壁磁场滞后于外界磁场的变化,钢管内壁饱和磁化状态易受磁化滞后时间影响。

2) 磁化滞后时间与外加磁场强度的大小和材料的性质有关,磁场强度越大、电导率越小,磁饱和场建立的磁化滞后时间越短。

3) 提高磁化强度,可在高速检测时减小磁化滞后时间影响,加速磁饱和场建立过程,同时减弱涡流效应对缺陷检测的影响,提高检测速度,实现高速下缺陷信号的有效检测。

参考文献

- [1] 杨理践,耿浩,高松巍.长输油气管道漏磁内检测技术[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.
YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.
- [2] FENG B, KANG Y H, SUN Y, et al. Influence of motion induced eddy current on the magnetization of steel pipe and MFL signal [J]. International Journal of Applied Electromagnetic & Mechanics, 2016, 52(1-2): 357-362.
- [3] 冯搏,康宜华,汤祺,等.涡流引起的钢棒磁化滞后时间理论计算[J].机械工程学报,2015,51(22):135-140.
FENG B, KANG Y H, TANG Q, et al. Theoretical calculation of eddy current induced time lag in magnetization of steel rod [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 135-140.
- [4] WU J B, SUN Y H, FENG B, et al. The effect of motion-induced eddy current on circumferential magnetization in MFL testing for a steel pipe [C]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(7): 6201506.
- [5] WANG P, GAO Y, TIAN G Y, et al. Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed magnetic flux leakage inspection [J]. NDT & E International, 2014 (64): 7-12.
- [6] 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.
WU J B, KANG Y H, SUN Y H, et al. Numerical simulation on the influence of the eddy-current effect on the magnetization of steel pipe at high speed [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 41-45.
- [7] 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.
WU J B, WANG J, KANG Y H, et al. Influence mechanisms of the induced-magnetic field on the magnetization of steel pipe at high speed [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(18): 7-12.
- [8] 吴德会,黄松岭,赵伟,等.油气长输管道裂纹漏磁检测的瞬态仿真分析[J].石油学报,2009,30(1):136-140.

- WU D H, HUANG S L, ZHAO W, et al. Transient simulation analysis on magnetic flux leakage detection of cracks in long-distance oil and gas pipeline [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 136-140.
- [9] ETCHEVERRY J I, ZIELLA D H, SÁNCHEZ G A. Magnetic flux leakage experimental and numerical study of the influence of induced currents [C]. *American Institute of Physics*, 2013: 1498-1503.
- [10] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1763-1780.
- TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [11] LI Y, TIAN G Y, WARD S. Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed [J]. *NDT & E International*, 2006, 39(5): 367-373.
- [12] CHEN ZH J, XUAN J Q, WANG P, et al. Simulation on high speed rail magnetic flux leakage inspection [C]. *Instrumentation & Measurement Technology Conference*, 2011: 1-5.
- [13] ZHANG L T, BELBLIDIA F, CAMERON I M, et al. Influence of specimen velocity on the leakage signal in magnetic flux leak- age type nondestructive testing [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2015, 34(2): 6.
- [14] ROCHA T J, RAMOS H G, LOPES RIBEIRO A, et al. Studies to optimize the probe response for velocity induced eddy current testing in aluminium [J]. *Measurement*, 2015, 67(2): 108-115.
- [15] ROCHA T J, RAMOS H G, LOPES RIBEIRO A, et al. Magnetic sensors assessment in velocity induced eddy current testing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 228(6): 55-61.
- [16] ROCHA T J, RAMOS H G, LOPES RIBEIRO A, et al. Sub-surface defect detection with motion induced eddy currents in aluminium [C]. *Instrumentation & Measurement Technology Conference*, 2015: 930-934.
- [17] FENG B, KANG Y, SUN Y. Theoretical analysis and numerical simulation of the feasibility of inspecting non-ferromagnetic conductors by MFL testing apparatus [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2015, 27(2): 1-27.
- [18] 吴德会, 游德海, 柳振凉, 等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(2): 327-336.
- WU D H, YOU D H, LIU ZH L, et al. Mechanism and experimental research on skin depth in AC magnetic flux leakage testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(2): 327-336.
- [19] 唐莺, 潘孟春, 罗飞路. 脉冲漏磁检测技术中传感器性能影响因素研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(12): 2876-2880.
- TANG Y, PAN M CH, LUO F L. Study on effect factors of sensor performance in pulsed magnetic flux leakage testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(12): 2876-2880.
- [20] 杨理践, 耿浩, 高松巍. 基于多级磁化的高速漏磁检测技术研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(6): 148-156.
- YANG L J, GENG H, GAO S W. Study on high-speed magnetic flux leakage testing technology based on multistage magnetization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 148-156.

作者简介



杨理践, 1981 年于沈阳工业大学获得学士学位, 1984 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、无损检测技术。

E-mail: yanglijian888@163.com

Yang Lijian received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1981, his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. Now he is a professor in Shenyang University of Technology. His main research interests include in-detection technology of long distance oil and gas pipeline and related theory, nondestructive testing technology.



耿浩 (通信作者), 2014 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为漏磁检测技术及相关理论。

E-mail: 1025284323@qq.com

Geng Hao (Corresponding author) received her B. Sc. degree from shenyang University of Technology in 2014. Now she is a Ph. D. candidate in Shenyang University of Technology. Her main research interests include magnetic flux leakage detection technology and related theories.