

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108344

载荷作用下管道漏磁内检测信号定量化研究*

刘 桐, 刘 斌, 冯 刚, 廉 正, 杨理践
(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:管道漏磁内检测技术是国际公认的长输油气管道安全维护的最有效方法。为解决载荷作用下长输油气管道漏磁内检测信号定量化问题,本文基于 J-A 理论建立了改进的三维磁荷数学模型,分析了管道缺陷在内压作用下的磁力学效应对漏磁信号的影响规律,研究了外部载荷作用下缺陷尺寸对漏磁信号影响规律,并通过系统的实验验证了理论模型的正确性。研究结果表明:管道内压增加,材料磁化强度减小,漏磁信号径向分量和轴向分量呈指数函数下降规律;漏磁信号径向分量峰值和轴向分量极大值随着缺陷深度增加而增加,增长率逐渐降低,特征值分别变化 6.5% 和 14.7%;径向分量峰值增长率随长度增加而逐渐降低,轴向极大值线性减小,特征值分别变化 21.0% 和 36.8%,轴向分量对缺陷深度和长度变化更敏感。

关键词:漏磁检测;磁荷模型;应力

中图分类号: TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Quantization of pipeline magnetic flux leakage detection signal under load

Liu Tong, Liu Bin, Feng Gang, Lian Zheng, Yang Lijian

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

Abstract: Pipeline magnetic flux leakage internal detection technology is internationally recognized as the most effective method for safety maintenance of long-distance oil and gas pipelines. To solve the problem of quantifying the internal detection signal of magnetic flux leakage in long-distance oil and gas pipelines under load, an improved three-dimensional magnetic charge mathematical model is formulated, which is based on the J-A theory. The influence of the magnetomechanical influence of pipeline defects on the magnetic flux leakage signal under internal pressure is analyzed. The influence law of the defect size on the magnetic flux leakage signal under the action of external load is studied, and the correctness of the theoretical model is evaluated through systematic experiments. Research results show that the internal pressure of the pipeline increases, the magnetization of the material decreases, and the radial and axial components of the magnetic flux leakage signal decrease exponentially. The peak value of the radial component and the maximum axial component of the magnetic flux leakage signal increase with the depth of the defect. The growth rate gradually decreases, and the eigenvalue changes by 6.5% and 14.7%, respectively. The peak growth rate of the radial component gradually decreases with the increase in length, and the axial maximum value decreases linearly. The eigenvalue changes by 21.0% and 36.8%, respectively. The axial component is more sensitive to changes in defect depth and length.

Keywords: magnetic flux leakage detection; magnetic charge model; stress

0 引 言

管道运输已经成为石油、天然气运输的主要方式,

为 global 经济发展做出了重要贡献^[1-2]。但是,管道一旦发生泄露、爆管等事故,不仅会造成重大的经济损失,还会带来人员伤亡。目前,管道内检测技术是国际公认的管道安全维护的最有效手段^[3-4]。

收稿日期: 2021-07-31 Received Date: 2021-07-31

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61871450)、辽宁省优秀青年基金计划项目(2019YQ05)、辽宁省兴辽英才计划青年拔尖人才项目(XLYC2007062)资助

漏磁法作为一种成熟的无损检测技术,具有不需要耦合剂、抗干扰能力强、支持非接触动态在线检测等优点^[5-6],在油气管道内检测领域得到了比较成功的应用,并且管道漏磁内检测技术已经成为了国际管道内检测领域的主流技术^[7-8]。但是,现有管道漏磁内检测数学模型,仅仅是针对腐蚀、金属损失、裂纹、针孔等缺陷的单一分析,都未考虑应力对磁信号的影响^[9-10]。实际上,在役管道工作内压在 5~10 MPa 范围内,管道缺陷处应力远远高于管道的平均应力。同时,缺陷处的应力积累到一定程度会带来微观裂纹损伤,进而导致缺陷扩展爆管,利用现有的模型无法准确判断缺陷的实质性危害^[11-12]。因此,载荷作用下缺陷漏磁内检测数学模型的建立对管道缺陷危害的准确判读具有重要的意义。

本文基于 J-A 理论,将应力引入磁荷模型,建立了载荷作用下管道漏磁内检测计算模型,将受载荷作用的磁化强度与磁荷模型结合,定量计算了缺陷处磁力学关系,研究了管道内压、缺陷尺寸对磁信号的特征影响,并通过实验验证了理论的正确性。研究结果为全面评估长输油气管道裂纹内检测提供科学依据。

1 模型建立

1.1 经典磁荷模型

长输管道受外加磁场磁化,实际检测中缺陷被空气、油等杂质填充^[13-14]。当磁场穿过缺陷处的铁磁性材料,磁力线绕开低磁导率缺陷,在缺陷两个端面分布不同极性的磁荷,形成磁荷堆积,进而产生磁场。为方便分析,将缺陷假设为管道上的矩形槽形状,以缺陷中心为原点建立三维模型,如图 1 所示。

沿矩形槽 3 个正交方向建立坐标轴 x, y, z , 并给出其长、宽和深度分别为 $2D_x, 2D_y, D_z$, 假设外磁场 H 沿 X 轴方向,定义三维空间场点坐标为 $P(x, y, z)$,磁荷面源点坐标为 (X_m, Y_m, Z_m) ,则缺陷壁在点 P 处产生的三轴漏磁场信号的微分量如式(1)~(3)所示^[15-16]。

$$H_x = \frac{\rho}{4\pi} \left[\tan^{-1} \frac{(y + D_y)(z + D_z)}{(x - x_m)[(x - x_m)^2 + (y + D_y)^2 + (z + D_z)^2]^{\frac{1}{2}}} - \tan^{-1} \frac{y(z + D_z)}{(x - x_m)[(x - x_m)^2 + y^2 + (z + D_z)^2]^{\frac{1}{2}}} - \tan^{-1} \frac{(y + D_y)(z - D_z)}{(x - x_m)[(x - x_m)^2 + (y + D_y)^2 + (z - D_z)^2]^{\frac{1}{2}}} + \tan^{-1} \frac{y(z - D_z)}{(x - x_m)[(x - x_m)^2 + y^2 + (z - D_z)^2]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (4)$$

$$H_y = \frac{\rho}{4\pi} \ln \left(\frac{z + D_z + ((x - x_m)^2 + y^2 + (z + D_z)^2)^{\frac{1}{2}}}{z - D_z + ((x - x_m)^2 + y^2 + (z - D_z)^2)^{\frac{1}{2}}} \times \frac{z - D_z + ((x - x_m)^2 + (y + D_y)^2 + (z - D_z)^2)^{\frac{1}{2}}}{z + D_z + ((x - x_m)^2 + (y + D_y)^2 + (z + D_z)^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (5)$$

$$dH_x = \frac{(x - x_m)}{((x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2)^{\frac{3}{2}}} dH_1 - \frac{(x + x_m)}{((x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2)^{\frac{3}{2}}} dH_2 \quad (1)$$

$$dH_y = \frac{(y - y_m)}{((x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2)^{\frac{3}{2}}} dH_1 - \frac{(y + y_m)}{((x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2)^{\frac{3}{2}}} dH_2 \quad (2)$$

$$dH_z = \frac{(z - z_m)}{((x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2)^{\frac{3}{2}}} dH_1 - \frac{(z + z_m)}{((x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2)^{\frac{3}{2}}} dH_2 \quad (3)$$

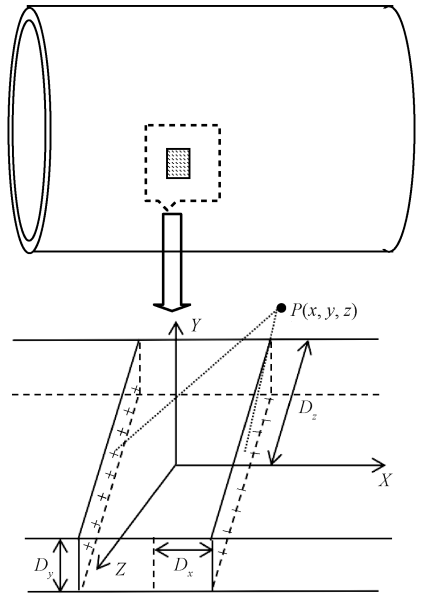


图 1 管道缺陷示意图

Fig. 1 Diagram of pipeline defect

对分量 H_1 进行二元积分,得到矩形缺陷周围的漏磁信号分量,即径向信号 H_x ,轴向信号 H_y ,周向信号 H_z 。三轴分量可以更全面的反映缺陷漏磁信号的分布情况,将二重积分公式化简得到:

$$H_z = \frac{\rho}{4\pi} \ln \left(\frac{y + D_y + ((x - x_m)^2 + (y + D_y)^2 + (z - D_z)^2)^{\frac{1}{2}}}{y + ((x - x_m)^2 + y^2 + (z - D_z)^2)^{\frac{1}{2}}} \times \frac{y + ((x - x_m)^2 + y^2 + (z + D_z)^2)^{\frac{1}{2}}}{y + D_y + ((x - x_m)^2 + (y + D_y)^2 + (z + D_z)^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (6)$$

磁场对缺陷产生的漏磁场分布,实际为 $x = -D_x$ 处的正负磁荷和 $x = D_x$ 的负正磁荷产生的合成磁场。因此产生的漏磁场分量为:

$$\begin{cases} H'_x = H_x(-D_x) - H_x(D_x) \\ H'_y = H_y(-D_y) - H_y(D_y) \\ H'_z = H_z(-D_z) - H_z(D_z) \end{cases} \quad (7)$$

通过三维磁荷模型建立模型,可以实现对管道表面缺陷漏磁场分布计算。

根据磁荷分布原理,在理想状态下缺陷表面磁荷均匀分布,式中表面磁荷密度可以通过下式计算^[17]:

$$\rho = 5.3 \left(\frac{D_y/D_x + 1}{D_y/(\mu D_x) + 1} \right) H \quad (8)$$

式(8)中磁荷密度只与缺陷尺寸有关,未考虑应力对磁荷密度的影响,与实际检测中相比考虑不全面。

1.2 改进磁荷模型

管道在高压环境下运行时,缺陷位置的应力状态变化会影响力磁关系,从而影响缺陷两侧的磁荷密度。将受应力影响的磁场强度 M 作为参数,计算载荷作用下缺陷处的磁荷密度,使计算的磁信号更贴合实际^[18]。

根据磁荷理论,铁磁性金属构件在载荷和外磁场共同作用下,在缺陷侧面产生大量磁荷,磁荷密度 ρ 可以表示为^[19]:

$$\rho = \chi \mu_0 H = \mu_0 M \quad (9)$$

式中 χ 为磁介质的磁化率; μ_0 为真空磁导率; M 为受应力影响的磁化强度。

$$\chi = \mu - 1 = M/H \quad (10)$$

其中, μ 为铁磁材料磁导率。

相对磁导率为:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{M}{H} + 1 \right) \quad (11)$$

J-A 模型是基于铁磁性材料畴壁理论建立起来的磁滞模型^[20],当铁磁性材料在弹性范围内受到外磁场和应力作用时,应力对材料磁化的作用可以等效为一个外加磁场 H_σ ,则有效磁场的表达式为^[21]:

$$H_e = H + \alpha M + H_\sigma \quad (12)$$

式中: M 为磁化强度; α 为耦合场参数,反映磁畴间的耦合关系; H 为外磁场强度; H_σ 等于材料受到外部应力时的磁场,可以表示为:

$$H_e^\sigma = \frac{3\sigma}{2\mu_0} \left(\frac{d\lambda}{dM} \right) (\cos^2\theta - v\sin^2\theta) \quad (13)$$

其中, θ 是磁化方向和应力方向的夹角, v 是泊松比,有效磁场为^[22]:

$$H_e = H + \alpha M + \frac{3\sigma}{2\mu_0} \left(\frac{d\lambda}{dM} \right) (\cos^2\theta - v\sin^2\theta) \quad (14)$$

λ 为磁致伸缩系数,它取决于铁磁性材料的畴型变化,随着应力的增加,磁致伸缩系数与磁化强度之间有所变化。可以用经验模型来模拟磁致伸缩与磁化强度的关系,磁致伸缩系数为:

$$\lambda = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma_i M^{2i} \quad (15)$$

取 $i=1$ 可以得到磁致伸缩系数的一个近似公式:

$$\lambda = \gamma_0(\sigma) + \gamma_1(\sigma) M^2 \quad (16)$$

式中: $\gamma_1(\sigma)$ 可用泰勒级数展开为:

$$\gamma_i(\sigma) = \gamma_i(0) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma^n}{n!} \gamma_i^n(0) \quad (17)$$

取 $n=1$,得到总有效场为^[23]:

$$H_e = H + \alpha M + \frac{3\sigma(\gamma_1 + \gamma_1'\sigma)M}{\mu_0} (\cos^2\theta - v\sin^2\theta) \quad (18)$$

根据麦克斯韦静磁方程,磁化强度 M 为^[24]:

$$M = \frac{B}{\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) \quad (19)$$

对管道施加外加磁场,其两端出现 N, S 极,会在内部产生退磁效应,产生一个附加退磁场。

$$B = \mu_0 H = \mu_0 (H_e + N_x M) \quad (20)$$

将缺陷形状等效为有长轴和短轴的扁球体,即可计算基于退磁效应的受应力影响的磁化强度。

$$M = \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r - N_x(\mu_r - 1)} \right) H_e \quad (21)$$

N_x 是退磁因子,在磁饱和和均匀磁化时,主要受外加磁场和缺陷尺寸影响,在扁旋转椭球的退磁因子可计算,当 $y = z = \infty$, y 和 z 方向退磁因子为 0, $N_x = 1$ 。

将受应力影响的磁化强度 M 带入式(9),即得到改进后载荷作用下磁荷密度。

$$\rho_s = \mu_0 \frac{\mu_r - 1}{\mu_r - N_x(\mu_r - 1)} \times \left(H + \alpha M + \frac{3\sigma(\gamma_1 + \gamma_1'\sigma)M}{\mu_0} (\cos^2\theta - v\sin^2\theta) \right) \quad (22)$$

本文改进的磁荷模型为研究载荷作用对缺陷漏磁信号的影响提供一种方法,所提模型的适用范围不仅限于本研究的案例,还适用于不同形状和尺寸的缺陷。

2 计算分析

2.1 力磁关系计算

管道受压及缺陷尺寸影响缺陷尖端处应力,结合缺陷尺寸参数,则缺陷尖端处的应力 σ 为^[25-26]:

$$\sigma = \frac{F \sqrt{\pi D_y / Q p R}}{t}$$
 (23)

其中, Q 为膨胀系数,可以表示为:

$$Q = \sqrt{1 + 1.61 (D_y^2 / R t)}$$
 (24)

p 为内压, R 为管道半径, t 为管壁厚度, D_y 为缺陷深度。 F 是裂纹尖端的应力强度因子,只与裂纹尺寸和内压有关,表达式为:

$$F = 1.12 + 0.053 \alpha + 0.005 5 a^2 + (1 + 0.02 \alpha + 0.019 1 \alpha^2) (20 - R/t)^2 / 1 400$$
 (25)

$$\alpha = (D_y / t) (D_y / D_x)$$
 (26)

当管道直径 $2R$ 为 1 016 mm,壁厚 t 为 14 mm,缺陷深度 4 mm,轴向长度 6 mm,对管道施加 0.5~3 MPa 的内压,并每隔 0.5 MPa 对缺陷处应力进行评估,应力如图 2 所示。

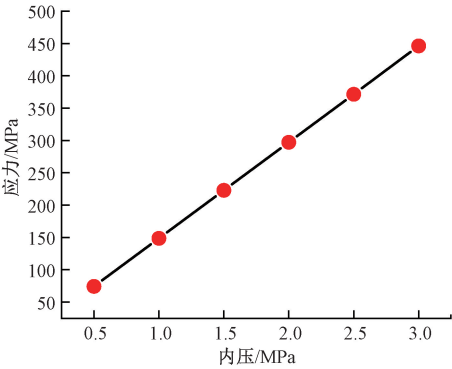


图 2 管道内压与应力的对应关系

Fig. 2 Relationship between pressure and stress in pipe

根据资料可知, $\alpha = 7.092 1 \times 10^{-4}$, $\gamma_1 = -1.5 \times 10^{-18} \text{ A}^{-2} \cdot \text{m}^2$, $\gamma'_1 = 4.17 \times 10^{-27} \text{ A}^{-2} \cdot \text{m}^2$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$,管道运行过程中轴向缺陷安全威胁较大,轴向缺陷主要受到与磁化方向垂直的周向应力,即应力与磁化方向角度 $\theta = 90^\circ$ 。计算不同外磁场下磁化强度与应力的关系,并对力磁曲线进行拟合,如图 3 所示。

由图 3 可知,对曲线进行拟合符合一阶下降指数函数,在低内压范围(0~1.5 MPa),磁化强度显示出近似线性的下降趋势和较高的下降率。在 1.5~4 MPa 的内压范围内,随着内压的增加而缓慢减小,增加到一定范围后,波幅、衰减速度保持稳定。当施加不同励磁强度强度,曲线斜率增加,磁化强度受载荷作用的影响愈加敏感。

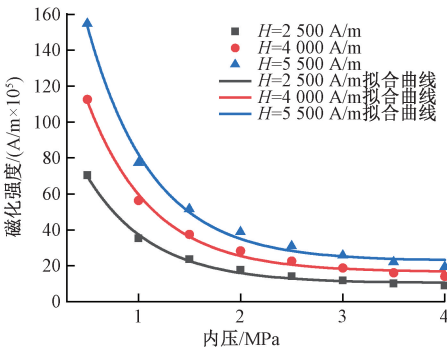


图 3 不同外磁场下内压-磁化强度曲线

Fig. 3 Internal pressure-magnetization curves under different external magnetic fields

当外加磁场较弱时,磁化过程为可逆的,随着磁场增强,不断克服阻止磁化的阻力,畴壁在最后一次移动后就消失了,如果继续增加磁场,磁化过程以完全磁矩转动形式进行。

磁化状态下,磁体内能量总密度的具体表示为:

$$E = K \sin^2 \theta - \mu_0 M_s H \cos(\theta_0 - \theta)$$
 (27)

其中,易偏离磁轴角度为 θ ,易轴和磁场的交角为 θ_0 ,应力增加有效场,同时易偏离磁轴角度减小,磁体总能量减小,导致磁化强度减小。所以在强磁场下,应力对磁信号只有磁向量旋转作用影响。

2.2 不同载荷作用下磁信号分析

漏磁场信号分布影响因素众多,不同几何形状的缺陷形成的漏磁场分布不同,相同几何尺寸的缺陷存在于不同载荷状态下的管道所形成的漏磁场分布也有明显差异,缺陷处应力累积会形成缺陷扩展,因此,分析应力对漏磁信号影响是非常有必要的。

为了研究不同载荷作用下缺陷的磁信号,基于管道缺陷三维磁荷模型,设计径向长度 2 mm,轴向长度 6 mm,深度 4 mm 的缺陷。外磁场强度为 5 500 A/m,检测脱离值为 3 mm,并设置检测范围为沿 X 轴-20 mm 到 20 mm。在管道漏磁内检测工程应用中 X 分量对应于轴向分量,Y 分量对应于径向分量,Z 分量对应于周向分量。以 0.5 MPa 内压为增量计算缺陷的漏磁信号,其径向、轴向分量随内压变化如图 4 所示。

图 4 表明不同应力作用下的管道缺陷漏磁信号,径向分量有一对波峰波谷,轴向分量具有极大值。由于应力诱导的材料磁化强度减小,缺陷的漏磁信号随着缺陷处应力的增加而非线性变化,并随应力增大,峰值变化敏感度逐渐降低。

2.3 不同缺陷深度磁信号分析

为研究缺陷深度对漏磁信号的影响,计算了不同深度缺陷的漏磁信号,缺陷尺寸长 6 mm,宽 2 mm,深度为

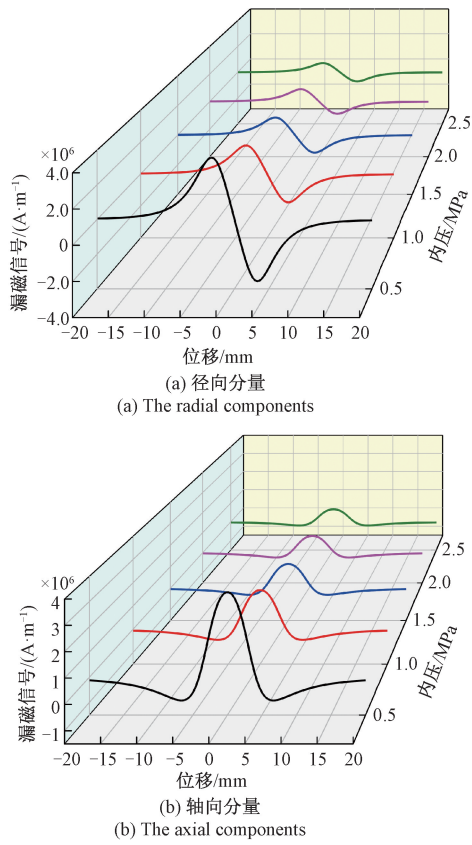


图 4 不同应力程度下漏磁信号

Fig. 4 MFL signals under different stress levels

2~7 mm,增量 1 mm,为管道中轴向缺陷。施加 0.5 MPa 管道内压,通过式 (23) 计算缺陷处周向应力随深度变化,如图 5 所示。缺陷处应力随着缺陷的深度增加近线性增加,即磁化强度随着缺陷应力增加而减小。

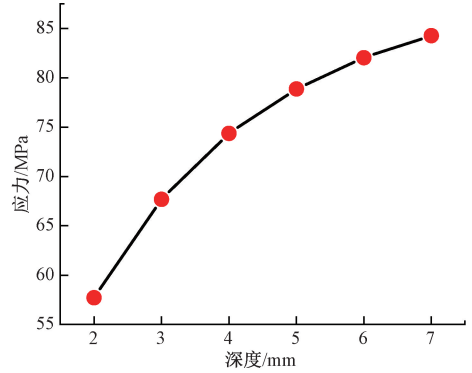


图 5 缺陷处应力与深度的关系

Fig. 5 Relationship between stress and depth at defect

漏磁信号随缺陷深度变化如图 6 所示。分析可知,随着缺陷深度增加,径向、轴向分量基本形状不变,峰值增加,周向分量信号特征不规则,不适用于表明裂纹特征。

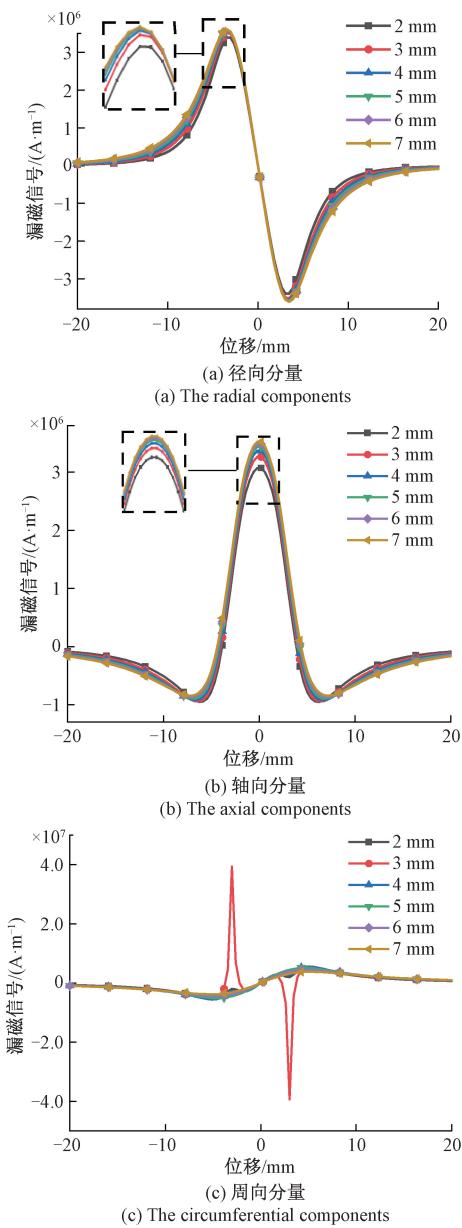


图 6 不同缺陷深度的漏磁信号

Fig. 6 MFL signals at different defect depths

提取漏磁信号的特征值如图 7 所示,随缺陷深度增加,径向分量和轴向分量的信号幅值随深度增加而增加,磁荷堆积区域面积随裂纹深度增加而增大,导致径向、轴向特征值增大。深度为 7 mm 时,径向峰值增加 6.5%,轴向极大值增加 14.7%,轴向分量变化程度更敏感。

2.4 不同缺陷长度磁信号分析

为研究缺陷的长度对漏磁信号的影响,计算了缺陷宽 2 mm,深度为 4 mm,长度以 2 mm 为增量的漏磁信号,施加 0.5 MPa 管道内压,通过式 (23) 计算不同长度缺陷的周向应力变化如图 8 所示。缺陷处应力随缺陷长度增加而线性增加。

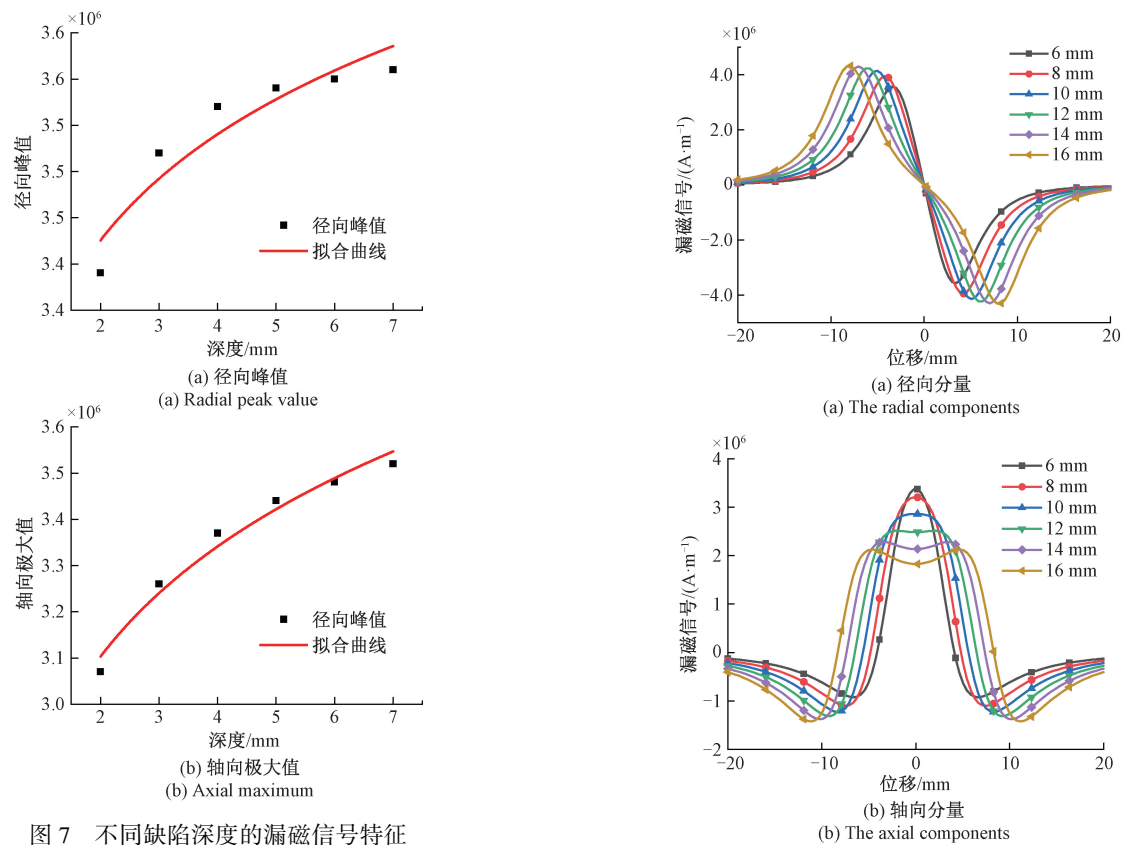


图 7 不同缺陷深度的漏磁信号特征

Fig. 7 Characteristics of MFL signals at different defect depths

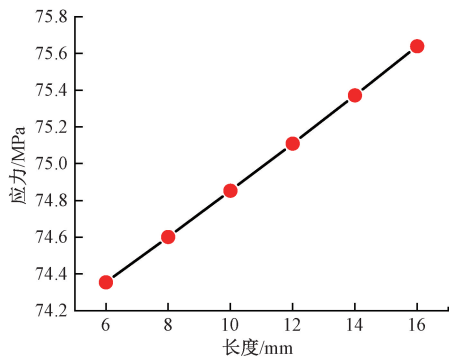


图 8 缺陷长度与应力的对应关系

Fig. 8 Relationship between defect length and stress

图 9(a)、(b) 表示了不同缺陷长度与漏磁信号的对应关系。分析可知,径向分量信号特征不随缺陷长度增加而改变,轴向分量在一定长度范围内出现一个极大值,超过范围后会出现两个波峰,呈轴对称形状,并且信号宽度与缺陷宽度有一一对应的关系。

图 9(c)、(d) 表示了特征值与裂纹长度的拟合结果。分析可知,径向峰值随着长度增加而增加,轴向分量极大值随着长度线性减小。在缺陷宽度增加到 16 mm 时,径向分量增大到 21.0%,轴向分量衰减到 36.8%,轴向分量比径向分量更敏感。

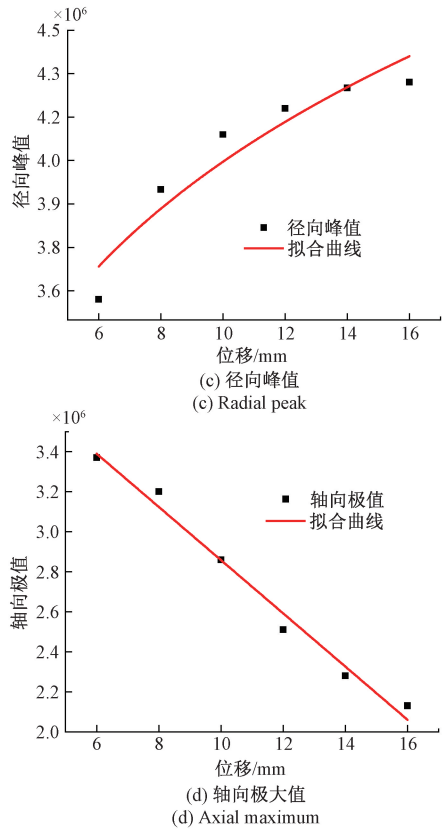


图 9 不同缺陷长度的漏磁信号

Fig. 9 MFL signals with different defect lengths

3 实验及结果分析

为了验证理论分析的正确性,本文设计了母材磁滞回线测量、钢条拉伸漏磁信号测量对比实验、管道漏磁拖拉实验。

3.1 Q235 母材磁化曲线测量

为分析应力对材料磁化曲线的影响,利用磁特性分析仪 MATS-2010D 测量了 Q235 母材在不同应力情况的磁化曲线。

实验装置如图 10 所示,被测母材尺寸为 600 mm×10 mm×10 mm,将材料固定在拉力机夹具上,励磁线圈均匀缠绕在 Q235 材质的 U 形磁芯上,并使 U 形磁芯两极靴固定在 Q235 钢条侧面上,外磁场强度从 0~6 000 A 变化,磁场方向沿钢条方向,接收线圈缠绕于两极靴之间的钢条,通过信号采集线将激励线圈与接收线圈连接到磁特性分析仪 MATS-2010D 的激励和接收端子上。

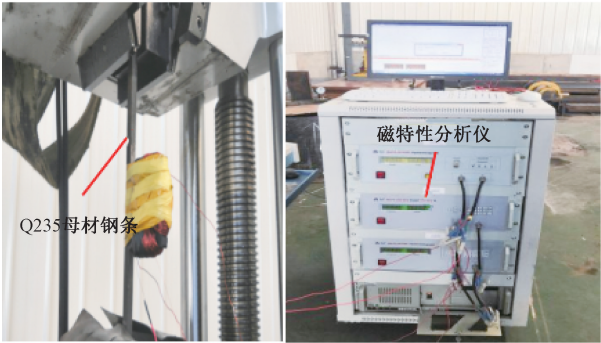


图 10 Q235 母材磁化曲线测量实验装置
Fig. 10 Experimental device for measuring magnetization curve of Q235 base metal

施加从 0 至 200 MPa 的拉力,增量为 40 MPa,采集磁特性分析仪中的检测信号,磁化曲线如图 11 所示。

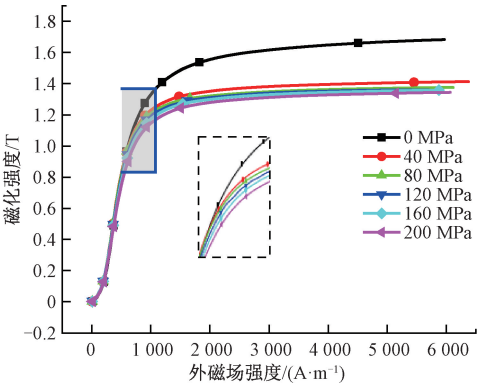


图 11 Q235 母材磁化曲线

Fig. 11 Magnetization curve of base metal Q235

由图 11 可知,实验得出的磁化曲线遵循基本形状,分析可知,在拉力一定时,随外磁场增加,磁化强度增加,在外磁场一定时,随拉力增大,磁化强度减小。为直观分析外加磁场和应力对漏磁信号的影响,提取外磁场强度在 2 500、4 000、5 500 A/m 时的磁化强度拟合后如图 12 所示。

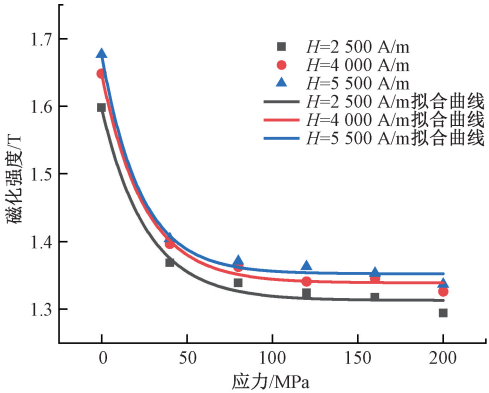


图 12 应力与磁化强度变化关系

Fig. 12 Relationship between stress and magnetization

由图 12 可知,拟合后磁化强度随拉力变化符合一阶下降指数趋势。在 0~40 MPa 应力范围内,磁化强度显示近似线性的下降趋势,在 40~200 MPa 的应力范围内,随着应力的增加磁化强度衰减速率趋于平稳。

3.2 Q235 钢条拉伸实验

为研究不同应力对漏磁信号的影响,设计钢条磁力拉伸实验,钢条尺寸方向与拉伸方向呈 90°,对钢条施加拉力,模拟管道周向应力。钢条尺寸为 800 mm×60 mm×16 mm,裂纹尺寸为 16 mm×1 mm×2 mm,实验装置如图 13 所示。

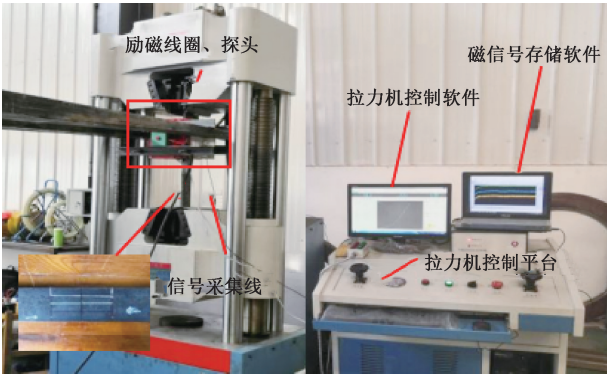


图 13 Q235 钢条拉伸实验装置

Fig. 13 Q235 steel bar tensile test device

实验平台主要由 3 部分组成,包括拉伸加载装置,励磁装置和信号采集装置。拉伸加载装置采用 SHT-4106

微机电控拉力试验机,试验机上下夹具将钢条夹紧并施加均匀拉力。励磁装置如图 14 所示,由线圈、桥接电路、变压器、电压表和电流表组成,变压器通过调整电压来改变励磁磁场强度,电压表和电流表用于观察励磁情况。信号采集装置中磁传感器元件型号是三轴 Mlx90393 磁感应传感器,可以分辨出最小为 3.22 μT 的磁通泄漏信号,检测范围达 1 000 mT,具有 16 位磁场分辨率。传感器检测到的信号通过串口接收,经过信号调理,滤波放大电路,模数转换,将数据传输到上位机,通过 LabVIEW 界面显示曲线。

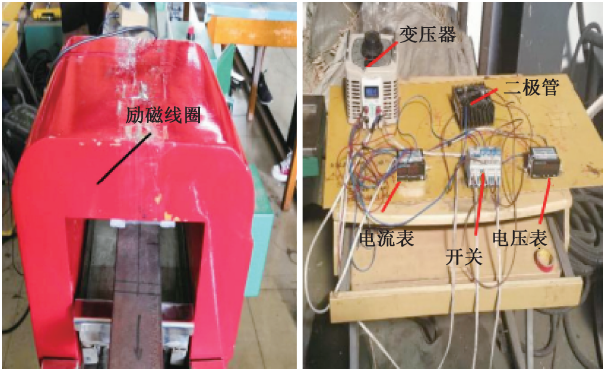


图 14 励磁装置
Fig. 14 Excitation device

钢条上缺陷宽 1 mm,深 2 mm,调节励磁线圈电流至 10 A,磁场大小为 40 KA/m,由上向下匀速移动励磁线圈,磁场方向沿钢条方向,施加拉力,分别在拉力为 0、10、20、30、40 kN 记录磁信号大小,来观察在漏磁条件下拉力对磁信号的影响情况。

由图 15 可知,检测信号呈现径向具有过零点的峰峰值,轴向具有极大值的特征,验证了理论分析的准确性。相同外磁场强度下,随拉力增大,径向和轴向漏磁信号的峰值呈下降趋势。

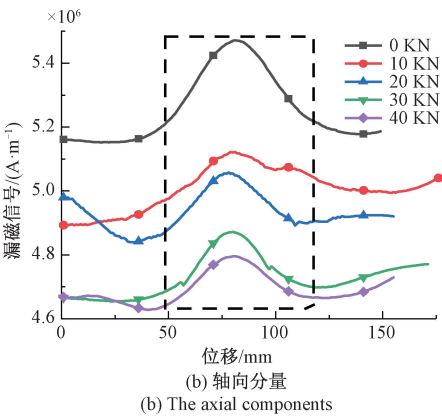
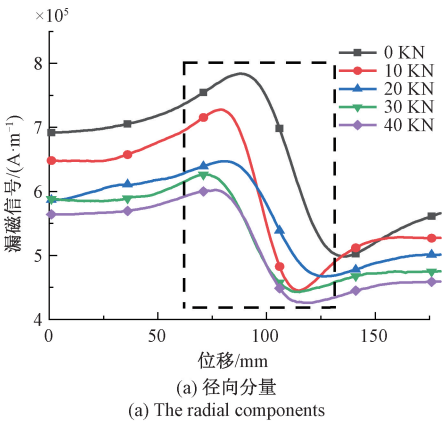


图 15 不同拉力的漏磁信号
Fig. 15 MFL signals at different pulling forces

3.3 管道漏磁拖拉实验

为研究缺陷深度和长度对漏磁信号影响,设计了管道漏磁拖拉实验,如图 16 所示。实验材料为 X70 管道,管道外径 610 mm,厚度 12 mm,内径为 598 mm。管道漏磁内检测装置应用漏磁检测原理实现管道上缺陷的检测,内检测装置主要实现对管道上缺陷的检测及保证检测器的平稳运行,主要包括驱动单元、测量单元和供电单元 4 部分。

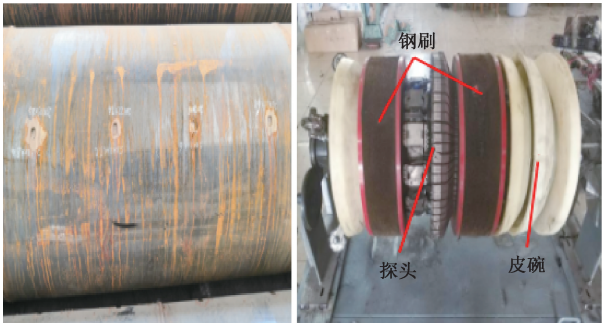


图 16 X70 管道拖拉实验材料及检测设备
Fig. 16 X70 pipeline drag test materials and testing equipment

检测器在管内运行,利用永久性磁铁将管道壁饱和磁化,当管壁存在缺陷时,磁力线会穿出管壁产生漏磁信号,探头拾取金属损失处的漏磁信号,并进行数据存储,运行过程中检测器皮碗装置紧贴管道壁,管道具有向外的周向应力。外磁场为 15 000 A/m,检测器距离内壁 1 mm,在管道上制作不同尺寸的缺陷,缺陷尺寸如表 1 所示。加工后的管道放入内检测装置,测量缺陷的漏磁信号。1~10 号缺陷的漏磁检测信号如图 17 所示。

由图 17 可知,缺陷信号径向具有一对波峰波谷,分布在缺陷两个尖端,轴向分量在一定长度范围内出现一个极大值,超过范围后会出现两个波峰,呈轴对称形状,与理论计算相同。

表 1 缺陷尺寸
Table 1 Defect dimension

缺陷编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
轴向长/mm	40	40	40	40	40	10	20	30	40	50
周向宽/mm	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
深/mm	0.6	1.2	2.4	4.8	7.2	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0

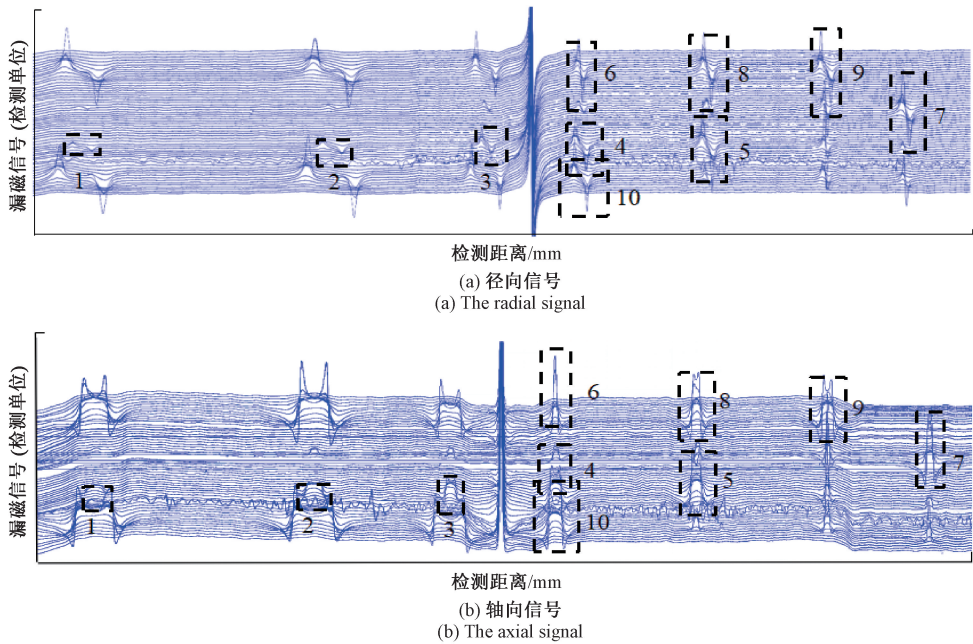


图 17 不同尺寸缺陷漏磁检测信号
Fig. 17 MFL detection signals of defects of different sizes

为分析缺陷深度对漏磁信号的影响规律,提取 1~5 号缺陷径向和轴向分量的特征值如图 18 所示。径向分量和轴向分量特征值随深度增加而增加,当缺陷深度增加到 7.2 mm 时,径向峰值增加了 9.47 倍,轴向极值增加了 11.02 倍,轴向分量变化程度更敏感。

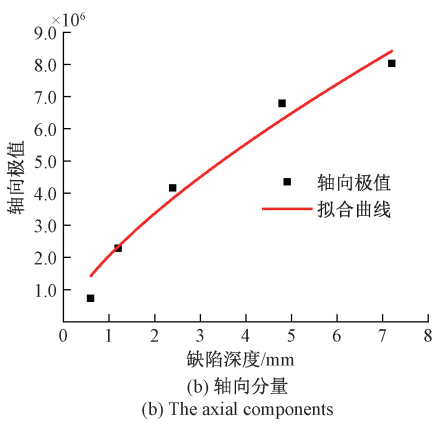
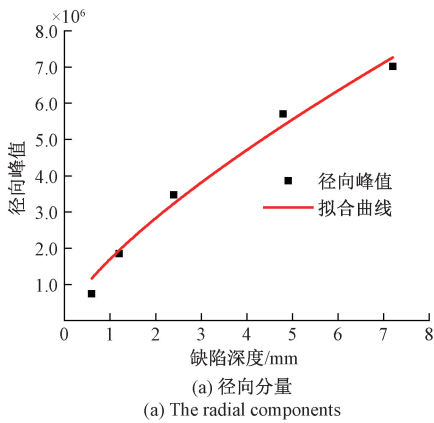


图 18 缺陷深度与漏磁信号特征关系
Fig. 18 Relationship between defect depth and magnetic flux leakage signal characteristics

提取 6~10 号不同长度缺陷径向和轴向分量的特征值如图 19 所示。

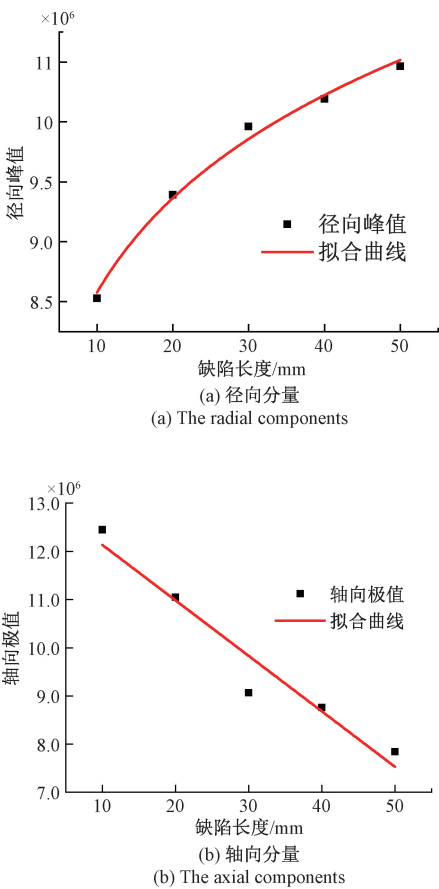


图 19 缺陷长度与漏磁信号特征关系
Fig. 19 Relationship between defect length and characteristics of MFL signal

径向峰值随着长度增加而增加,轴向分量极大值随着长度而减小。在缺陷宽度增加到 50 mm 时,径向分量增大了 1.23 倍,轴向分量衰减了 1.59 倍,轴向分量比径向分量更敏感。

4 结 论

本文提出一种基于 J-A 理论的应力-磁荷模型,计算了周向应力作用下的缺陷漏磁信号特征,并与实验进行分析,验证有效性,得出以下结论:

- 1) 缺陷处应力和磁化强度曲线呈指数下降关系,漏磁信号随管道内压增加符合一阶下降指数函数的规律,外磁场变化影响信号的波幅和衰减稳定值。
- 2) 缺陷径向峰值和轴向极大值与缺陷深度呈非线性相关,随着裂纹深度增加,特征值的增长率逐渐降低。
- 3) 径向分量峰值随缺陷长度增加非线性增加,特征值的增长率逐渐降低,轴向极大值线性减小,并且轴向分量对缺陷深度和长度变化更敏感。

参考文献

[1] 李健,陈世利,黄新敬,等.长输油气管道漏监测与准实时检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1747-1760.

LI J, CHEN SH L, HUANG X J, et al. Review of leakage monitoring and quasi-real-time detection technology for long distance oil and gas pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1747-1760.

[2] 郑洪龙,黄维和. 油气管道及储运设施安全保障技术发展现状及展望[J]. 油气储运, 2017, 36(1):1-7.

ZHENG H L, HUANG W H. Development status and prospect of safety assurance technology for oil and gas pipeline and storage and transportation facilities [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1):1-7.

[3] 孔朝金,胡利锋,付振林,等. 管道内检测技术现状和发展趋势探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(8):4-8.

KONG CH J, HU L F, FU ZH L, et al. Discussion on the status quo and development trend of pipeline inspection technology [J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(8):4-8.

[4] YAN S, ZHANG C, LI R, et al. Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2015, 15(12):31036-31055.

[5] 李明菲,薛向东,马健,等. 复杂天然气管网系统运行期可靠性评价体系[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 738-744.

LI M F, XUE X D, MA J, et al. Operational reliability evaluation system of complex natural gas pipeline network system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7):738-744.

[6] 杨理践,耿浩,高松巍,等. 高速漏磁检测饱和场建立过程及影响因素研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10):1-9.

YANG L J, GENG H, GAO S W, et al. Research on the establishment process and influencing factors of saturation field in high-speed magnetic flux leakage detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 1-9.

[7] 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 oil and gas pipeline for

- long distance transportation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (8): 1736-1746.
- [8] 王竹筠, 杨理践, 高松巍, 等. 管道漏磁图像的卷积核信息熵相似度约束方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 90-95.
- WANG ZH J, YANG L J, GAO S W, et al. Constraint method for convolution kernel information entropy similarity of pipeline magnetic flux leakage images[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(1): 90-95.
- [9] 罗宁, 刘斌, 何璐瑶, 等. 基于弱磁法的管道裂纹内检测技术探索[J]. 石油规划设计, 2019, 30(2): 11-15.
- LUO N, LIU B, HE L Y, et al. Exploration of pipeline crack detection technology based on weak magnetic method[J]. Petroleum Planning and Design, 2019, 30(2): 11-15.
- [10] 杨理践, 徐龙, 高松巍. $\Phi 273$ 管道的电磁励磁仿真模型分析与实验方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(6): 659-664.
- YANG L J, XU L, GAO S W. Simulation model analysis and experimental method of $\Phi 273$ pipeline electromagnetic excitation [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(6): 659-664.
- [11] 王国涛, 郭天昊. 油气管道特殊缺陷的漏磁信号识别方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(4): 401-405.
- WANG G T, GUO T H. Magnetic flux leakage signal identification method for special defects of oil and gas pipelines [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(4): 401-405.
- [12] LIU B, MA Z, HE L, et al. Quantitative study on the propagation characteristics of MMM signal for stress internal detection of long distance oil and gas pipeline[J]. NDT & E International, 2018, 100: 40-47.
- [13] FENG B, KANG Y, SUN Y, et al. Influence of motion induced eddy current on the magnetization of steel pipe and MFL signal [J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2016, 52 (1-2): 357-362.
- [14] LI C, CHEN C, LIAO K. A quantitative study of signal characteristics of non-contact pipeline magnetic testing[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2015, 57(6): 324-330.
- [15] ZHANG Y, YE Z, WANG C. A fast method for rectangular crack sizes reconstruction in magnetic flux leakage testing [J]. Ndt & E International, 2009, 42(5): 369-375.
- [16] MINKOV D, TAKEDA Y, SHOJI T, et al. Estimating the sizes of surface cracks based on Hall element measurements of the leakage magnetic field and a dipole model of a crack[J]. Applied Physics A, 2002, 74(2): 169-176.
- [17] 吴德会, 刘志天, 王晓红, 等. 表面缺陷的方向性对漏磁场分布的影响[J]. 物理学报, 2017, 66(4): 293-304.
- WU D H, LIU ZH T, WANG X H, et al. The influence of the directionality of surface defects on the distribution of leakage magnetic field[J]. Journal of Physics, 2017, 66(4): 293-304.
- [18] WANG Y, LIU X, WU B, et al. Dipole modeling of stress-dependent magnetic flux leakage [J]. NDT & E International, 2018, 95: 1-8.
- [19] 时朋朋, 郝帅. 磁记忆检测的力磁耦合型磁偶极子理论及解析解[J]. 物理学报, 2021, 70(3): 105-114.
- SHI P P, HAO SH. Force-magnetic coupling type magnetic dipole theory and analytical solution for magnetic memory detection [J]. Journal of Physics, 2021, 70(3): 105-114.
- [20] SABLİK M J, JILES D C. Coupled magnetoelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(4): 2113-2123.
- [21] LIU B, ZHENG S, HE L, et al. Study on internal detection in oil-gas pipelines based on complex stress magnetomechanical modeling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 (7): 5027-5036.
- [22] SABLİK M J, RUBIN S W, RILEY L A, et al. A model for hysteretic magnetic properties under the application of noncoaxial stress and field [J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(1): 480-488.
- [23] LIU B, MA Z, LIU Z, et al. Research on internal detection technology for axial crack of long-distance oil and gas pipeline based on micromagnetic method [J]. Structural Health Monitoring, 2019, 19(4): 1123-1136.
- [24] DUTTA S M, GHORBEL F H, STANLEY R K. Dipole

modeling of magnetic flux leakage [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(4):1959-1965.

[25] LIU B, LIU Z, LUO N, et al. Research on features of pipeline crack signal based on weak magnetic method[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(3):810.

[26] ZAHOOR A. Closed form expressions for fracture mechanics analysis of cracked pipes [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1985, 107(2):203-205.

作者简介



刘桐,2019 年于辽东学院获得学士学位,现为沈阳工业大学硕士研究生,主要研究方向为长输油气管道漏磁内检测技术、无损检测技术及相关理论。
E-mail: 993083177@ qq. com

Liu Tong received her B.Sc. degree from Eastern Liaoning University in 2019. She is currently a master student at Shenyang

University of Technology. Her main research interests include magnetic flux leakage internal testing technology, non-destructive testing technology and related theories for long-distance oil and gas pipelines.



刘斌(通信作者),现为沈阳工业大学信息科学与工程学院副院长、“翔源学者”特聘教授、博士生导师。主要研究方向为油气长输管道应力内检测技术及相关理论。
E-mail: 13998284051@ 163. com

Liu Bin (Corresponding author) is currently the Deputy Dean of School of Information Science and Engineering at Shenyang University of Technology. He is the “ Xiangyuan Scholar ” Distinguished Professor and a Ph. D. advisor at Shenyang University of Technology. His research interests include stress internal detection technology of long-distance oil and gas pipeline and related theories.