

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209175

# 基于扩展磁荷模型的埋地管道弱磁检测方法研究\*

杨晓惠,蒲海峰,陈龙,何长春,刘艳军  
(西南石油大学机电工程学院 成都 610500)

**摘要:**为了提高弱磁检测方法对埋地管道早期损伤诊断的有效性,进一步明确检测信号与应力和缺陷之间的定量关系,构建了考虑力磁耦合效应和位错钉扎效应的扩展磁荷模型,研究了多种管道异常状况引起的弱磁检测信号变化规律,利用工程检测实验验证了该模型的有效性。研究结果表明,在体积型凹坑缺陷、面积型裂纹缺陷和焊缝缺陷处,梯度模量 $G_M$ 均出现显著的对称尖峰畸变,且其峰值随缺陷尺寸的增加而增大,其中当量深度的影响更为显著;焊缝错边缺陷对 $G_M$ 峰型和峰值的影响显著,而咬边缺陷的影响不明显;工程实测数据与理论计算数据的最大位置误差 $\leq 1$  m,最大峰值误差 $\leq 15\%$ ,均在工程检测的可接受范围内。

**关键词:**弱磁检测;力磁耦合;位错钉扎;磁荷理论;梯度模量

**中图分类号:** TH878; TM153+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Weak magnetic detection method on the buried pipeline based on the extended magnetic charge model

Yang Xiaohui, Pu Haifeng, Chen Long, He Changchun, Liu Yanjun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** An extended magnetic charge model considering the magneto-mechanical coupling effect and dislocation pinning effect is constructed to improve the effectiveness of the weak magnetic detection method for early damage diagnosis of buried pipelines, and further clarify the quantitative relationship between detection signals and stress and defects. The variations of weak magnetic detection signals caused by various abnormal conditions of pipelines are studied. The effectiveness of the model is evaluated by engineering detection experiments. Research results show that the gradient modulus  $G_M$  has significant symmetrical peak distortion at the volume pit defect, area crack defect or weld defect. The peak value of the gradient modulus  $G_M$  increases with the increase of defect size, especially the equivalent depth. The influence of weld misalignment defect on the peak shape and peak value of  $G_M$  is significant, while the influence of undercut defect is not obvious. Comparing the engineering measured data and theoretical calculation data, the maximum position error is  $\leq 1$  m, and the maximum peak error is  $\leq 15\%$ , which are both within the acceptable range of engineering detection.

**Keywords:** weak magnetic inspection; magneto-mechanical coupling; dislocation pinning; magnetic charge theory; gradient modulus

## 0 引言

油气管道安全是关乎国计民生的重大问题。作为油气资源的输送主体,埋地管道的早期损伤检测对于保障全球能源资源的安全可靠运输,预防突发性灾害事故的发生具有非常重要的意义<sup>[1]</sup>。弱磁检测技术是一种基于金属磁记忆效应的非接触式无损检测方法,通过收集和

分析铁磁构件的自发漏磁场信号,可实现对宏-微观缺陷和应力集中等早期损伤的检测。该技术克服了管道传统无损检测方法(超声、涡流、漏磁等)只能检测宏观缺陷、接触式测量的局限性,且具有设备简单、操作方便、不干扰运行等特点,因此在管道检测领域得到了广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。然而,该技术的研究和应用尚处于起步阶段,缺陷的判别和早期损伤诊断多以定性分析为主,尚无法做到准确识别和精确定位。其关键在于明确应力、缺陷和自发漏磁场信号之间的定量关系。一些学者利用磁偶极子模型来研究缺陷引起的自发漏磁场信号变化规

收稿日期:2022-01-11 Received Date: 2022-01-11

\* 基金项目:国家自然科学基金(51974273)项目资助

律<sup>[5-6]</sup>。但是模型的结果很大程度上依赖于磁荷密度的选择,且主要研究的是近表面漏磁信号特征,其有效提高高度较低,因此所得结论并不适用于埋地管道的非开挖弱磁检测数据分析。另有学者利用 ANSYS 软件建立了埋地管道非接触式力磁耦合有限元仿真模型,分别研究了焊接残余应力和管道工况对检测信号的影响<sup>[7]</sup>。这种以微分方程求解为基础的有限元分析法,计算量大,计算效率较低,同时由于隐含了强烈的退磁场效应,使得磁响应强度较低,不利于对埋地管道磁异常特征的分析。Li 等<sup>[8]</sup>利用磁荷理论构造了埋地管道缺陷弱磁检测模型,研究了模型参数和缺陷特征对检测信号造成的影响。这种以磁荷理论为基础的数值分析法,为构建埋地管道弱磁检测正演模型提供了一条创新性思路。但是该模型没有考虑应力作用,忽略了力磁耦合效应对缺陷磁化强度造成的影响,不适用于对应力相关的弱磁检测信号做量化分析。

综上所述,为提高弱磁检测对埋地管道缺陷及早期损伤诊断的有效性,本文构建了综合考虑力磁耦合效应和位错钉扎效应的扩展磁荷模型,探讨了多种管道异常状况引起的弱磁检测信号变化规律,并利用实验数据验证了该模型在埋地管道弱磁检测中的适用性,为埋地管道缺陷及早期损伤的弱磁检测量化评估和识别提供重要理论支撑。

## 1 模型研究

### 1.1 埋地管道弱磁检测模型

假设埋地管道外径为  $D$ , 半径为  $R$ , 壁厚为  $\delta$ , 管道轴线离检测平面的距离为  $h$ ; 磁化方向与管道轴线方向相同; 管道壁面上存在一处缺陷, 其深度为  $d$ , 轴向长度为  $a$ , 环向宽度对应的圆心角为  $(\theta_2 - \theta_1)$ ; 缺陷周围存在一应力集中区, 其轴向长度为  $L$ , 环向宽度对应的圆心角为  $(\theta_4 - \theta_3)$ 。埋地管道缺陷的弱磁检测原理如图 1 所示。

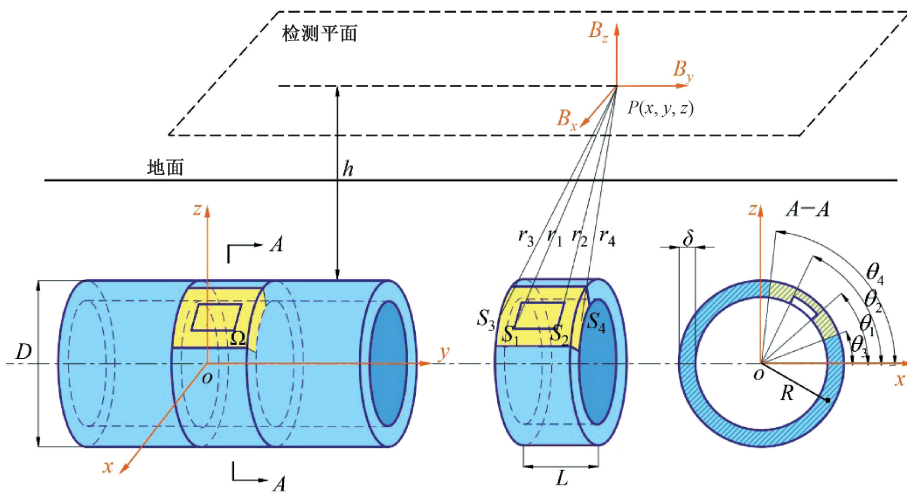


图 1 埋地管道的弱磁检测原理

Fig. 1 Principle diagram of magnetic intensity detection of buried pipeline

根据磁偶极子理论,在地磁场作用下,当铁磁性管道表面出现裂纹、减薄等缺陷时,垂直于磁化方向的缺陷两侧将形成新的磁极,该磁极近似为一对密度相等极性相反的磁荷面  $S_1$  和  $S_2$ , 这对磁偶极子将成为新的内部磁源,向外散射磁场。另一方面,大量实验结果表明,在缺陷周围的高应力集中区存在位错堆积现象;根据位错磁化效应,位错会影响畴壁运动,使该区域磁化受阻、磁导率下降;根据磁偶极子理论,大量正负磁荷将在位错堆积区的两端面  $S_3$  和  $S_4$  聚积,使得位错堆积区域成为附加磁源,向外散射磁场。在不考虑地磁场及周围杂散环境磁场影响时,检测点  $P$  的自发漏磁场信号便是由这四个磁荷面形成的磁场相互叠加而成的。

假设点  $P$  的坐标为  $(x, y, z)$ , 磁荷面源点的坐标为  $(x_m, y_m, z_m)$ , 这 4 个磁荷面的源点到点  $P$  的距离分别为  $r_1, r_2, r_3$  和  $r_4$ 。则磁荷微面元  $dx_m dz_m$  在检测点  $P$  产生的自发漏磁场强度可表示为<sup>[9]</sup>:

$$dH = \frac{\rho dx_m dz_m}{2\pi\mu_0 r^2} \mathbf{r} \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\rho$  为磁荷面密度。基于磁荷理论,磁荷密度  $\rho$  可表示为:

$$\rho = \mu_0(M_1 - M_2) \quad (2)$$

式中:  $M_1, M_2$  分别代表磁荷面两侧的磁化强度。如图 1 所示,假设管道在缺陷处的所有损伤都分布在应力集中区内,即造成不可逆磁化的位错钉扎点全部均匀分布在应力集中区内,则区域外无不可逆磁化,其磁化强度可认

为理想无滞后磁化强度  $M_{an}$ 。假设应力集中区内的磁化强度为  $M'$ , 可表示为<sup>[10]</sup>:

$$M' = 2M_{an} - M_0 \quad (3)$$

式中:  $M_0$  为在恒定弱磁场中应力造成的局部平衡磁化强度, 所有的钉扎阻碍作用都考虑在此参数内。

因此, 在缺陷处磁荷面  $S_1$  和  $S_2$  的磁荷面密度  $\rho_1$  和  $-\rho_1$ , 且有:

$$\rho_1 = \mu_0(M' - 0) = \mu_0 M' = \mu_0(2M_{an} - M_0) \quad (4)$$

在应力集中区磁荷面  $S_3$  和  $S_4$  上的磁荷面密度  $\rho_3$  和  $-\rho_3$  为:

$$\rho_3 = \mu_0(M' - M_{an}) = \mu_0(M_{an} - M_0) \quad (5)$$

现将式(4)代入式(1)中, 对磁荷面  $S_1$  和  $S_2$  进行积分, 经局部坐标变换后可得缺陷在检测点  $P$  产生的自发漏磁场强度  $H_1$  的三分量为:

$$\begin{aligned} H_{x1} &= \frac{\rho_1}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\frac{D}{2}-\delta}^{\frac{D}{2}-\delta+d} \left( \frac{x - R \cos \theta}{r_1^3} - \frac{x - R \cos \theta}{r_2^3} \right) dR d\theta \\ H_{y1} &= \frac{\rho_1}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\frac{D}{2}-\delta}^{\frac{D}{2}-\delta+d} \left( \frac{y + a/2}{r_1^3} - \frac{y - a/2}{r_2^3} \right) dR d\theta \quad (6) \\ H_{z1} &= \frac{\rho_1}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\frac{D}{2}-\delta}^{\frac{D}{2}-\delta+d} \left( \frac{z - R \sin \theta}{r_1^3} - \frac{z - R \sin \theta}{r_2^3} \right) dR d\theta \end{aligned}$$

同理, 应力集中区在点  $P$  产生的磁场强度  $H_2$  的三分量为:

$$\begin{aligned} H_{x2} &= \frac{\rho_3}{4\pi} \int_{\theta_3}^{\theta_4} \int_{\frac{D}{2}-\delta}^{\frac{D}{2}-\delta} \left( \frac{x - R \cos \theta}{r_3^3} - \frac{x - R \cos \theta}{r_4^3} \right) dR d\theta \\ H_{y2} &= \frac{\rho_3}{4\pi} \int_{\theta_3}^{\theta_4} \int_{\frac{D}{2}-\delta}^{\frac{D}{2}-\delta} \left( \frac{y + L/2}{r_3^3} - \frac{y - L/2}{r_4^3} \right) dR d\theta \quad (7) \\ H_{z2} &= \frac{\rho_3}{4\pi} \int_{\theta_3}^{\theta_4} \int_{\frac{D}{2}-\delta}^{\frac{D}{2}-\delta} \left( \frac{z - R \sin \theta}{r_3^3} - \frac{z - R \sin \theta}{r_4^3} \right) dR d\theta \end{aligned}$$

将  $H_1$  和  $H_2$  进行分量叠加, 即可得到同时考虑缺陷和应力集中区影响的自漏磁场强度  $H_0$ 。由于检测点位于埋地管道上方空气中, 且土壤或空气中的磁化强度为 0, 故检测点  $P$  的磁感应强度可简化为<sup>[11]</sup>:

$$B = \mu_0(H + M) \approx \mu_0 H \quad (8)$$

为消除地磁场及周围杂散环境磁场的影响, 通常对自漏磁感应强度取梯度值, 并且根据梯度模量来识别缺陷<sup>[12]</sup>。沿管道轴线  $y$  方向的梯度模量  $G_M$  为:

$$\frac{dM_{an}}{d\sigma} = \frac{\frac{3}{\mu_0} \left[ \frac{a^2}{H_e^2} - \operatorname{csch}^2 \left( \frac{H_e}{a} \right) \right] [(\gamma_1 + 2\gamma_1' \sigma) M_{an} + 2(\gamma_2 + 2\gamma_2' \sigma) M_{an}^3]}{\frac{a}{M_s} - \left[ \frac{a^2}{H_e^2} - \operatorname{csch}^2 \left( \frac{H_e}{a} \right) \right] \cdot \left\{ \alpha + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(\gamma_1 + 2\gamma_1' \sigma) + 6M_{an}^2(\gamma_2 + 2\gamma_2' \sigma)] \right\}} \quad (13)$$

$$\frac{dM_0}{d\sigma} = \frac{\frac{1}{\zeta k_1} (M_{an} - M_0) \left\{ 3[(\gamma_1 + 2\gamma_1' \sigma) M_0 + (2\gamma_2 + 4\gamma_2' \sigma) M_0^3] + \frac{\sigma}{\eta E} \right\}}{1 - \frac{\mu_0}{\zeta k_1} (M_{an} - M_0) \left\{ \alpha + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(\gamma_1 + 2\gamma_1' \sigma) + 6(\gamma_2 + \gamma_2' \sigma) M_0^2] \right\}} \quad (14)$$

$$G_M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} = \sqrt{\left( \frac{\partial B_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2} \quad (9)$$

## 1.2 J-A (Jiles-Atherton) 修正模型

由上述分析可得, 弱磁检测的自发漏磁场信号  $B$  取决于缺陷及其应力集中处的磁化强度。在恒定的地磁场作用下, 材料的磁化强度与作用在其上的应力密切相关。因此, 通过力磁耦合关系研究, 可建立起管道的受力状态与弱磁检测信号之间的联系。本文利用 J-A 修正模型来表征管道的力磁耦合关系。

Jiles<sup>[13]</sup> 于 1995 年在接近原理的基础上引入了有效场  $H_e$  的概念, 将应力  $\sigma$  的影响等效为外部磁场的作用, 即:

$$\begin{aligned} H_e &= H + \alpha M + \frac{3\sigma}{2\mu_0} \left( \frac{d\lambda}{dM} \right)_\sigma \approx \\ &H + \alpha M + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(\gamma_1 + \gamma_1' \sigma) M + 2(\gamma_2 + \gamma_2' \sigma) M^3] \quad (10) \end{aligned}$$

式中:  $H$  为外部磁场;  $\alpha$  为耦合系数;  $M$  为磁化强度;  $\gamma_1$ 、 $\gamma_1'$ 、 $\gamma_2$  和  $\gamma_2'$  为与材料有关的常数, 由 Taylor 级数二阶展开而得。在多晶材料中, 无磁滞磁化强度  $M_{an}$  可由 Langevin 方程(式(11))给出。

$$M_{an} = M_s \left[ \coth \left( \frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e} \right] \quad (11)$$

式中:  $M_s$  为饱和磁化强度;  $a$  为材料规划常数。

在应力集中区, 局部平衡磁化强度  $M_0$  是磁化强度  $M$  和无滞后磁化强度  $M_{an}$  的中间状态,  $M_0$  在进一步向  $M_{an}$  发展的过程中还需要考虑钉扎能量损失和非弹性能量变化的影响<sup>[14]</sup>。因此, 该能量平衡方程可表示为:

$$M_{an} d(H_e) = M_0 d(H_e) + \zeta k_1 M_0 - \frac{(M_{an} - M_0) dW}{\eta} \quad (12)$$

式中:  $\zeta$  为方向系数;  $k_1$  为钉扎系数;  $\eta$  为与单位体积能量有关的系数;  $W$  为单位体积的弹性能 ( $W = \sigma^2/2E$ ),  $E$  为弹性模量。分别用  $M_{an}$  和  $M_0$  代替式(10)中的  $M$ , 将所得  $H_e$  对应力求导, 分别代入式(11)、(12)中, 可求得考虑了应力集中区局部平衡磁化的力磁耦合关系如下:

## 2 计算结果与分析

### 2.1 体积型缺陷

埋地管道可能由于腐蚀或机械损伤等原因产生体积型缺陷,造成管道壁厚局部减薄,承载能力下降,增加了管道失效的可能性。利用本文构建的扩展磁荷模型,可以描述埋地管道体积型缺陷对弱磁检测信号的影响。

#### 1) 有限元分析

以  $\Phi 508 \times 9.5$  mm,内压  $p = 3$  MPa 的管道为例,假设管道外壁有一凹坑缺陷。为提高分析准确性,对其尺寸进行归一化处理,分别为当量深度  $d/\delta$ ,当量长度  $a/(R\delta)^{0.5}$  以及当量宽度  $\theta/\pi$ 。

当  $d/\delta = a/(R\delta)^{0.5} = 0.2, \theta/\pi = 0.1$  时,有限元仿真模型如图 2 所示。根据应力云图可确定应力集中区磁荷面尺寸,约为缺陷尺寸的 1.5 倍,然后分别提取缺陷和应力集中区轴向磁荷面的应力均值。

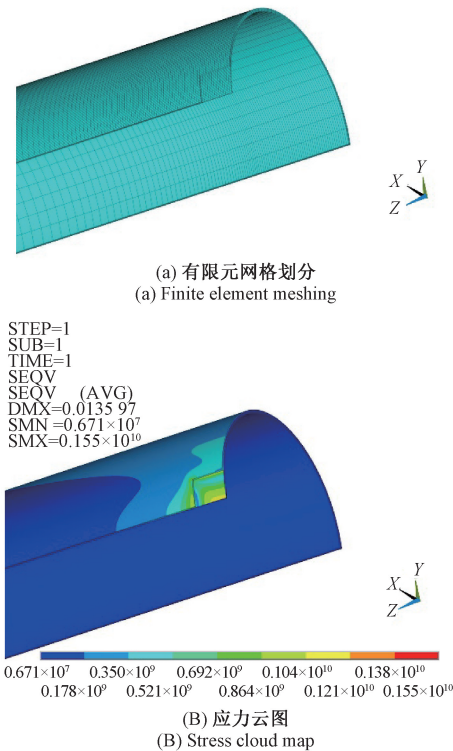


图 2 有限元仿真模型

Fig. 2 Finite element simulation model

#### 2) 磁特性分析

利用 MATLAB 软件,使用标准变步长龙格-库塔法求解 J-A 修正模型。相关参数<sup>[13]</sup>如下:  $M_s = 1.76 \times 10^6$  A/m,

$a = 955$  A/m,  $k_1 = 1.5$  A/m,  $\alpha = 1 \times 10^{-3}$ ,  $\eta = 605$ ,  $Y = 2.1 \times 10^{11}$  Pa,  $\zeta = 1$ ,  $\gamma_1 = 2 \times 10^{-18}$  A<sup>-2</sup>/m<sup>2</sup>,  $\gamma'_1 = -1 \times 10^{-26}$  A<sup>-2</sup>/m<sup>2</sup>,  $\gamma_2 = -1 \times 10^{-30}$  A<sup>-2</sup>/m<sup>2</sup>,  $\gamma'_2 = 5 \times 10^{-39}$  A<sup>-2</sup>/m<sup>2</sup>。根据有限元分析所得的应力值以及 J-A 修正模型求解结果,即可确定其对应的  $M_{an}$  和  $M_0$ ,并通过式(4)和(5)得到缺陷处磁荷密度  $\rho_1$  和应力集中区磁荷密度  $\rho_3$ ,所得应力与磁荷密度关系如图 3 所示。

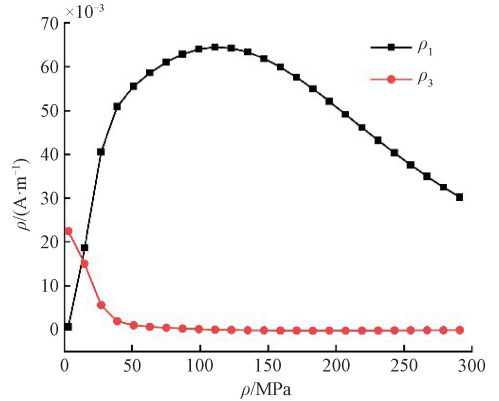


图 3 应力与磁荷密度的关系

Fig. 3 Relationship between stress and magnetic charge density

### 3) 弱磁检测信号分析

将  $\rho_1$  和  $\rho_3$  分别代入式(6)和(7),进而根据式(8)和(9)求得沿管道轴向的弱磁检测仿真数据。现分别取 6 组不同的当量数值讨论体积型缺陷尺寸对梯度模量  $G_M$  的影响规律,如图 4 所示。

由图 4 可知,梯度模量  $G_M$  曲线在管道体积型缺陷处呈现出一个明显的尖峰,且缺陷当量尺寸越大,梯度模量  $G_M$  峰值越大,即弱磁检测信号越强,与文献[15]结果相同。通过对比图 4(a)~(c)发现,虽然缺陷当量深度、当量宽度和当量长度对  $G_M$  的影响趋势相同,但影响程度却有所差异。当  $d/\delta, a/(R\delta)^{0.5}$  和  $\theta/\pi$  分别从 0.05 增加到 0.30 时,对应的  $G_M$  峰值分别增大了 541%、499% 和 500%,可见梯度模量  $G_M$  对  $d/\delta$  的变化最敏感。这主要是因为当量深度不仅影响磁荷面的大小,而且对管道应力的影响也最为显著。

### 2.2 面积型缺陷

裂纹等面积型缺陷是埋地管道上常见的、危害最大的缺陷形式。利用本文模型可以描述裂纹的尺寸、方向对弱磁检测信号的影响。以埋地管道裂纹缺陷为例,考虑裂纹轴向宽度为 0.2 mm 时,不同当量深度  $d/\delta$ 、当量环向长度  $\theta/\pi$  以及裂纹方向  $\omega$  (即裂纹与磁化方向的夹角)对弱磁检测信号的影响。

面积型裂纹缺陷对梯度模量  $G_M$  的影响如图 5 所示。图 5(a)和(b)中,梯度模量  $G_M$  曲线在管道裂纹处呈现一个明显的尖峰,当量深度  $d/\delta$  和当量环向长度  $\theta/\pi$  增

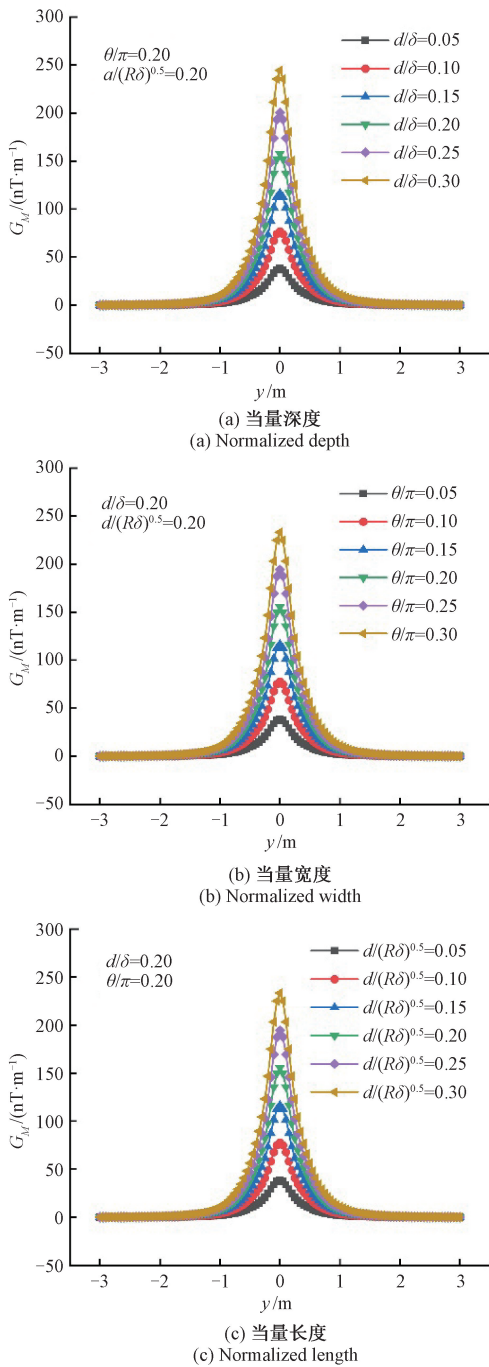


图4 体积型缺陷对  $G_M$  的影响

Fig. 4 Influence of volumetric defects on  $G_M$

加时,梯度模量  $G_M$  峰值随之增加,即弱磁检测信号增强,这符合弱磁检测实验揭示的磁信号随裂纹深度和长度的变化规律<sup>[16-17]</sup>。从影响程度来看,当  $d/\delta$  和  $\theta/\pi$  分别从 0.05 增加到 0.30,二者对应的  $G_M$  峰值分别增加了 530% 和 499%,说明当量深度变化对弱磁检测信号的影响更大。这同样可以用磁荷面面积和管道应力变化来解释。

图5(c)为裂纹方向  $\omega$  对梯度模量  $G_M$  的影响。随着  $\omega$  的增加,  $G_M$  的幅值逐渐增大,峰宽变宽,单峰性更加突出,即当裂纹与磁化方向垂直时,有效磁荷面积最大,所得的弱磁检测信号最强,这与文献[9]的实验检测结果趋势一致。

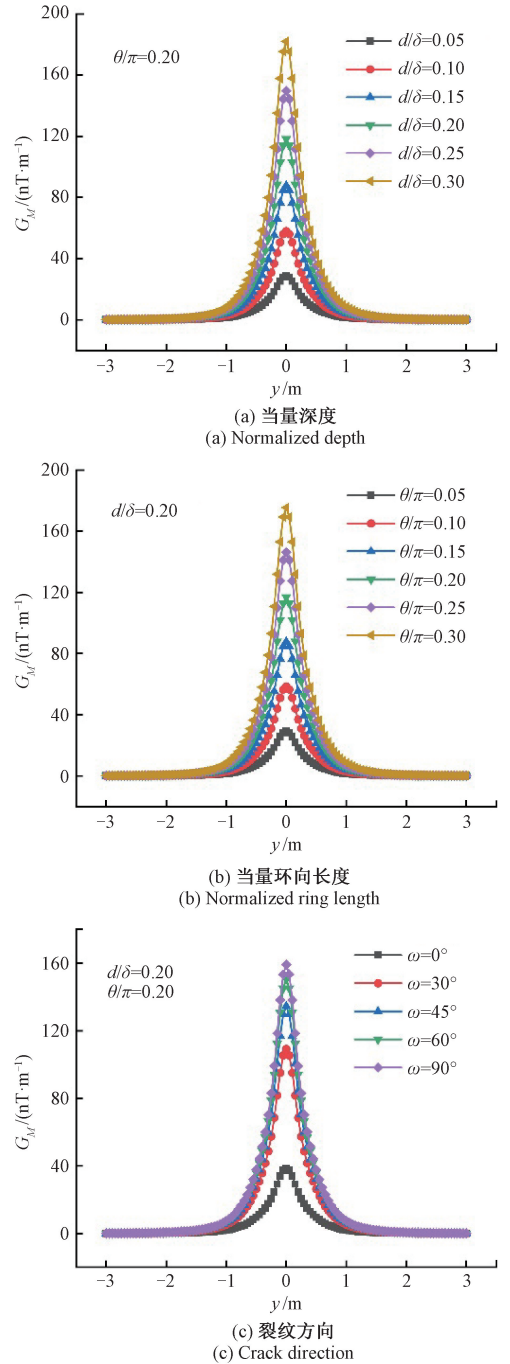


图5 面积型缺陷对  $G_M$  的影响

Fig. 5 Influence of area defect on  $G_M$

### 2.3 焊缝缺陷

环焊缝广泛存在于埋地管道中,其质量好坏直接影响管道能否正常运行,因此管道环焊缝的定位和缺陷检测对保障管道安全运行具有重要的意义。利用本文模型可以描述管道环焊缝、以及焊缝缺陷对磁信号的影响。对于管道环焊缝而言,常存在气孔、夹渣等体积型缺陷以及未焊透、未熔合、裂纹等面积型缺陷,其影响规律与2.1和2.2节所得结论相似,因此这里仅讨论错边和咬边两种缺陷。

焊缝模型示意图如图6所示,包含焊缝区、热影响区以及母材区,图6中 $d$ 表示热影响区宽度, $e$ 表示错边量, $c$ 表示咬边量。现以X70钢V型坡口焊缝为例,根据图6坡口形式,取余高 $t=1\text{ mm}$ ,钝边量 $v=2\text{ mm}$ ,焊缝间隙 $l=2\text{ mm}$ ,坡口角 $\alpha=60^\circ$ ,热影响区宽度 $d=2\text{ mm}$ 。考虑高匹配焊接接头,取焊缝区材料强度比母材区高10%,热影响区材料强度比母材区低10%<sup>[18]</sup>。为了研究不同错边量和咬边量对弱磁检测信号的影响,分析了不同当量深度 $e/\delta$ 和 $c/\delta$ 时, $G_M$ 的变化趋势。

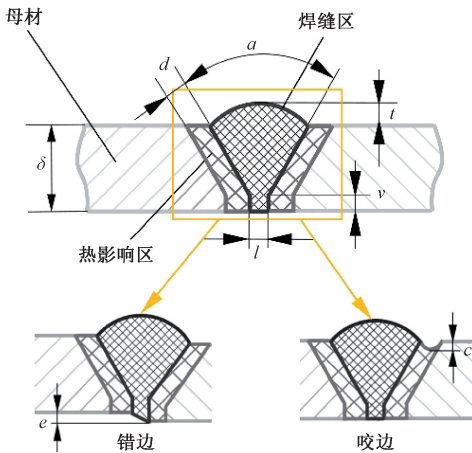


图6 焊缝模型  
Fig. 6 Weld model

错边缺陷焊缝对梯度模量 $G_M$ 的影响规律如图7所示,对于错边量为零的正常焊缝,梯度模量 $G_M$ 曲线呈现出显著的对称尖峰形态;当焊缝存在错边缺陷时, $G_M$ 曲线出现单侧小幅畸变,且随着错边量的增加, $G_M$ 主峰和畸变峰的峰值均逐渐增大。这主要是因为错边缺陷不仅加大了焊缝处应力,而且使磁荷面的相对位置发生变化,因此对弱磁检测信号的影响显著。咬边缺陷焊缝对梯度模量 $G_M$ 的影响规律如图8所示。咬边缺陷未对 $G_M$ 曲线峰型造成明显影响, $G_M$ 峰值仅随咬边量的增加而略微增大。本文理论分析揭示的错边和咬边缺陷焊缝对弱磁检测信号的影响规律与已有的研究结果保持一致<sup>[19]</sup>。

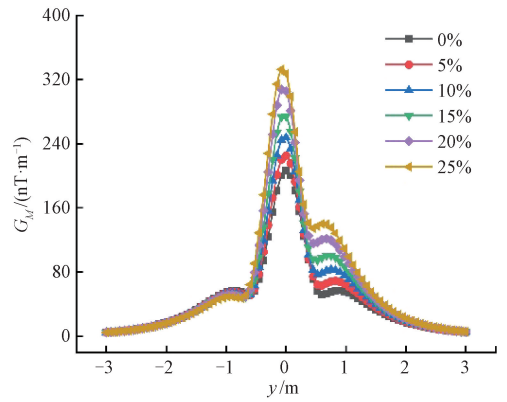


图7 错边缺陷对 $G_M$ 的影响

Fig. 7 Influence of misalignment defect on  $G_M$

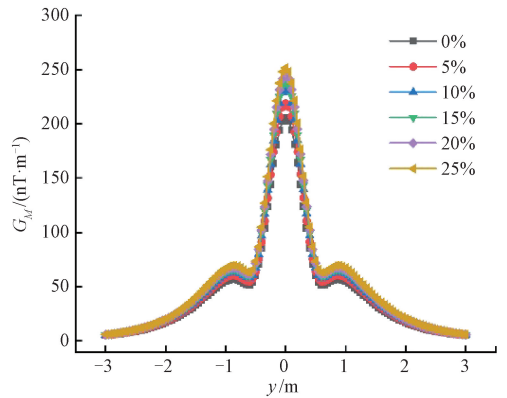


图8 咬边缺陷对 $G_M$ 的影响

Fig. 8 Influence of undercut defect on  $G_M$

### 3 实验结果与分析

本实验针对某油田埋地集输管道进行弱磁检测。管道规格为 $\Phi 508 \times 20.6\text{ mm}$ ,长度为6 km,运行压力 $p=2\sim 3\text{ MPa}$ ,管道材质为碳钢,埋深1.5 m。采用自主研发的高精度埋地管道弱磁检测仪进行检测,如图9所示。

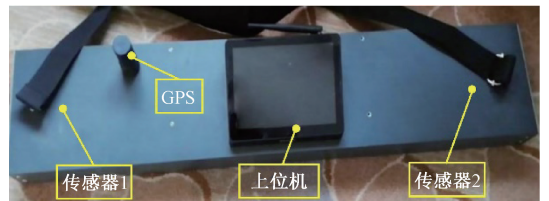


图9 埋地管道弱磁检测仪

Fig. 9 Weak magnetic detector for buried pipeline

该仪器集信号采集、处理、显示和储存功能为一体,利用高精度三轴磁通门传感器采集空间磁感应强度,通过内置程序自动转换输出三轴梯度值和梯度模量。根据仪器测量的自漏磁场异常分布情况,和扩展

磁荷模型计算的缺陷处散射磁场进行比较,即可实现模型的有效性验证。

检测过程中,检测人员手持仪器沿着管道路由在管道地面正上方行走,保持仪器离地面值为1 m,发现一段弱磁信号波形异常,其检测结果如表1所示。针对异常点进行开挖,开挖检测位置如图10所示。

表1 部分检测数据  
Table 1 Part of detection data

里程/ m	梯度值/(nT·m <sup>-1</sup> )			G <sub>M</sub> / (nT·m <sup>-1</sup> )
	G <sub>x</sub>	G <sub>y</sub>	G <sub>z</sub>	
795.020 1	212.995 1	-14.935 7	122.198 4	-173.814
795.664 4	243.870 2	-21.517 5	150.986 1	-190.299
796.308 7	263.431 3	-28.011 9	160.557 9	-206.960
797.597 3	288.834 5	-45.964 3	155.788 1	-238.836
798.241 6	286.661 1	-51.102 6	125.113 8	-252.804
798.885 9	290.825 4	-55.650 1	107.327 6	-264.506
800.174 5	272.355 9	-64.742 0	32.132 3	-262.509
800.818 8	254.162 8	-65.920 0	8.506 7	-245.318
801.463 1	230.179 9	-62.487 1	-12.191 4	-221.210
802.751 7	167.377 2	-51.102 6	-49.306 2	-151.567
803.396 0	127.327 8	-45.964 3	-53.325 4	-106.095
804.040 3	87.377 74	-40.335 9	-55.686 8	-53.915 3



图10 管道开挖检测位置

Fig. 10 Position of pipeline excavation detection

采用ST500超声测厚仪测量管道一周,发现在管道6点钟方向存在壁厚减薄,减薄量为3.4 mm;再采用OmniScan MX2相控阵探伤仪进行超声C扫描,结果如图11所示。C扫描图谱沿管道周向展开方向呈现不同颜色的区域,分别对应着不同的壁厚,颜色异常处为发生内腐蚀位置。经过数据处理,并结合超声测厚结果,得到缺陷尺寸为长50 mm、圆心角13°、深3.4 mm。

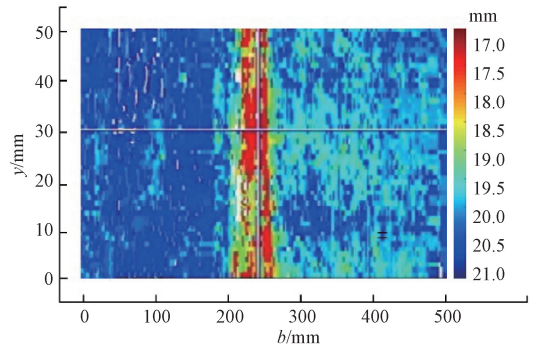
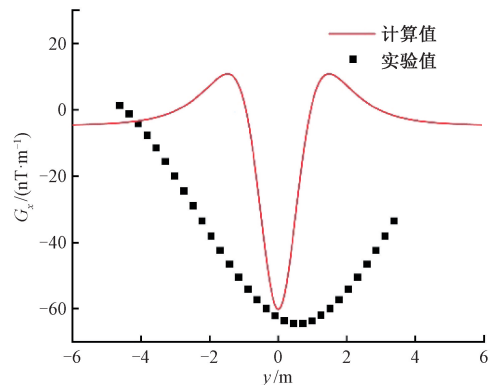


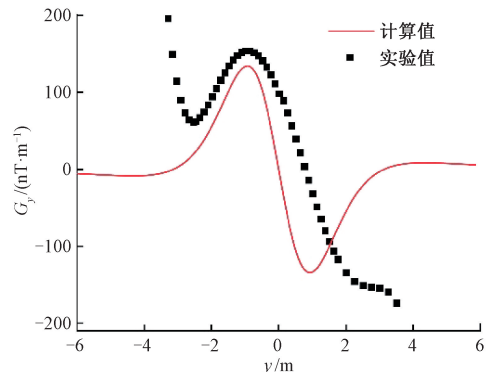
图11 超声C扫描图谱

Fig. 11 Ultrasonic C-scan spectrum

采用Savitzky-Golay法对表1中检测数据进行滤波处理。根据开挖检测的缺陷尺寸,利用本文模型,计算出该缺陷在检测点处产生的弱磁信号,并与实验检测信号进行对比。如图12(a)~(c)所示,计算所得的三轴梯度值G<sub>x</sub>、G<sub>y</sub>和G<sub>z</sub>与检测数据特征基本吻合,即缺陷处切向分量过零点,法向分量出现极值,并且最大位置误差≤1 m,最大峰值误差≤15%。如图12(d)所示,梯度模量G<sub>M</sub>的计算值和检测值相差9%,数值吻合良好,说明该综合值可有效地消除三分量的误差,使缺陷特征更加明显。上述误差均在工程检测的可接受范围内,说明本文模型能够很好地反映缺陷诱发的弱磁检测信号特征,证明了模型用于埋地管道弱磁检测定量分析的有效性。



(a) 梯度值G<sub>x</sub>  
(a) Gradient G<sub>x</sub>



(b) 梯度值G<sub>y</sub>  
(b) Gradient G<sub>y</sub>

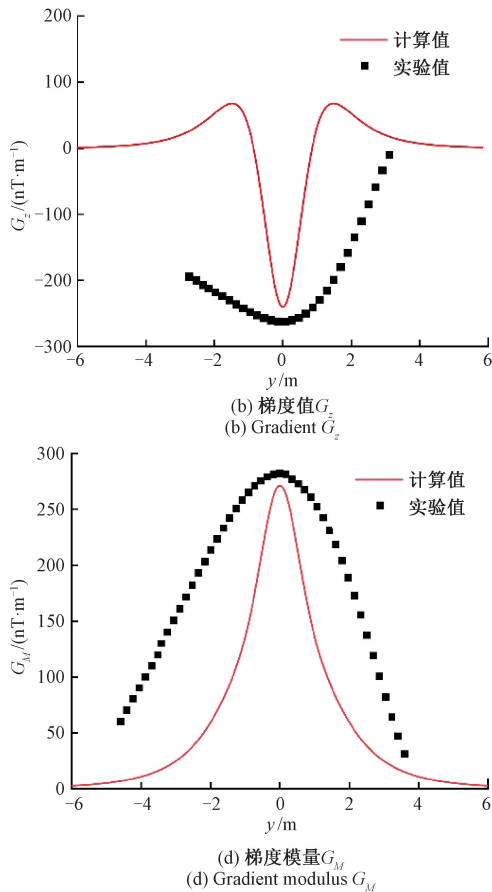


图12 实验和计算结果对比

Fig. 12 Comparison of experimental and calculated results

## 4 结 论

为实现埋地管道早期损伤弱磁检测的量化分析,本文构建了考虑力磁耦合效应和位错钉扎效应的扩展磁荷模型,分析计算了体积型缺陷、面积型缺陷、焊缝错边和咬边缺陷等管道异常状况对弱磁检测信号的影响,并通过实验进行验证,主要得到以下结论。

1) 在体积型凹坑缺陷和面积型裂纹缺陷处,梯度模量  $G_M$  出现同样的显著尖峰畸变,且缺陷尺寸越大,  $G_M$  峰值越大,其中当量深度的影响更为显著;当裂纹方向与磁化方向垂直时梯度模量  $G_M$  峰值最大。

2) 在焊缝处,梯度模量  $G_M$  仍然出现尖峰畸变,错边缺陷对峰型和峰值的影响显著,而咬边缺陷的影响不明显。

3) 工程实测数据与理论计算数据特征基本吻合,位置误差和峰值误差均在工程检测的可接受范围内。

基于扩展磁荷模型,可以有效地解释埋地管道弱磁检测中常见的实验现象,有助于提高缺陷和早期损伤诊

断的准确性。在后续研究中,还需要进一步优化理论模型,充分考虑磁荷面的应力分布不均匀性,以实现检测结果的定量评估。

## 参考文献

- [1] 李秋扬, 赵明华, 任学军, 等. 中国油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(S1): 14-17.  
LI Q Y, ZHAO M H, REN X J, et al. Construction status and development trend of Chinese oil & gas pipeline[J]. Oil&Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(S1): 14-17.
- [2] 龚灯, 韩刚. 基于磁记忆方法的管道应力检测设备的开发[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 94-100.  
GONG D, HAN G. Development of pipeline stress detection equipment based on magnetic memory method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2): 94-100.
- [3] 杨理践, 郑福印, 高松巍, 等. 基于力磁耦合型的管道电磁应力检测解析模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 249-258.  
YANG L J, ZHENG F Y, GAO S W, et al. An analytical model of electromagnetic stress detection for pipeline based on magneto-mechanical coupling model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 249-258.
- [4] 王国庆, 杨理践, 刘斌. 基于磁记忆的油气管道应力损伤检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 271-278.  
WANG G Q, YANG L J, LIU B. Study on the testing method of oil-gas pipeline stress damage based on magnetic memory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 271-278.
- [5] 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. Analytical solution of magneto-mechanical magnetic dipole model for the metal magnetic memory method [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(3): 105-114.
- [6] WANG Z D, YAO K, DENG B, et al. Quantitative study of metal magnetic memory signal versus local stress concentration [J]. NDT and E International, 2010, 43(6): 513-518.
- [7] 王博文. 基于非接触力磁耦合效应的埋地管道现场检测试验与有限元仿真研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.  
WANG B W. Testing experiments and ANSYS simulation for underground pipelines based on non-contact magnetic



- memory effect [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [ 8 ] LI CH J, CHEN CH, LIAO K X. A quantitative study of signal characteristics of non-contact pipeline magnetic testing[J]. *Insight*, 2015, 57(6): 324-330.
- [ 9 ] 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): 266-276.
- WU D H, LIU ZH T, WANG X H, et al. Mechanism analysis of influence of surface-breaking orientation on magnetic leakage field distribution [J]. *Acta physica sinica*, 2017, 66(4): 266-276.
- [ 10 ] 徐明秀, 尤天庆, 徐敏强, 等. 磁记忆信号的量化描述[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(4): 1215-1223.
- XU M X, YOU T Q, XU M Q, et al. Quantitative representation of magnetic memory signal[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(4): 1215-1223.
- [ 11 ] 冯慈璋, 马西奎. *工程电磁场导论*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 98-106.
- FENG C ZH, MA X K. *Introduction to Engineering Electromagnetic Field*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 98-106.
- [ 12 ] 李忠吉, 李长俊, 成婷婷, 等. 埋地管道缺陷的自漏磁场计算方法研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(9): 153-157.
- LI ZH J, LI CH J, CHENG T T, et al. Study on calculation method of self-leakage magnetic field for buried pipeline defects[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(9): 153-157.
- [ 13 ] JILES D C. Theory of the magnetomechanical effect[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1999, 28(8): 1537.
- [ 14 ] LIU Q Y, LUO X, ZHU H Y, et al. Modified magnetomechanical model in the constant and low intensity magnetic field based on J-A theory[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(7): 383-389.
- [ 15 ] LI CH J, CHEN CH, LIAO K X, et al. Theoretical research on the characteristics of the self-magnetic leakage field induced by ferromagnetic pipelines [J]. *Insight*, 2016, 58(11): 601-608.
- [ 16 ] LIU B, LIU Z Q, LUO N, et al. Research on features of pipeline crack signal based on weak magnetic method[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 810.
- [ 17 ] LI CH CH, DONG L H, WANG H D, et al. Metal magnetic memory technique used to predict the fatigue crack propagation behavior of 0.45% C steel[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, 405: 150-157.
- [ 18 ] 储玲玉, 刘觉非, 苏林, 等. 含凹坑缺陷管道环焊缝应力有限元分析[J]. *电焊机*, 2021, 51(4): 8-13, 118.
- CHU L Y, LIU J F, SU L, et al. Finite element analysis of girth weld stress in pipeline with pit defect [J]. *Electric Welding Machine*, 2021, 51(4): 8-13, 118.
- [ 19 ] 苏林, 成文峰, 刘保余, 等. 管道环焊缝缺陷漏磁检测信号仿真分析[J]. *焊接*, 2020(3): 10-16, 65.
- SU L, CHENG W F, LIU B Y, et al. Numerical simulation on magnetic flux leakage detection signal for pipeline girth weld defects [J]. *Welding*, 2020(3): 10-16, 65.

### 作者简介



杨晓惠(通信作者), 2016年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为油气管道无损检测技术。

E-mail: yxyxh8245@swpu.edu.cn

**Yang Xiaohui** (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Sichuan University in 2016. She is currently a lecturer and a M.Sc. supervisor at Southwest Petroleum University. Her main research direction is the nondestructive testing technology of oil and gas pipeline.