

## 油气管道典型渐变缺陷的漏磁特征研究\*

陈 颢<sup>1</sup>, 朱 波<sup>2</sup>, 路 辉<sup>2</sup>, 祝卫国<sup>2</sup>

(1. 盛隆石油管检测技术有限公司, 上海 200949;

2. 山东省特种设备检验研究院集团有限公司, 济南 250101)

**摘 要:** 基于漏磁检测技术, 建立了油气管道典型渐变缺陷的有限元仿真模型, 通过分析缺陷类型、几何尺寸对漏磁场的影响, 进一步探究了缺陷截面形状特征参数与漏磁信号的对应关系, 分析不同缺陷漏磁信号特征的变化规律, 对于提高缺陷识别与量化的精度、丰富缺陷样本数据库至关重要。以梯形、阶梯形典型渐变缺陷为研究对象, 通过开展仿真模拟研究, 进一步探究梯形缺陷与阶梯形缺陷特征参数与漏磁信号的对应关系, 为缺陷漏磁场的定性和定量分析提供参考。

**关键词:** 漏磁信号; 典型渐变缺陷; 仿真模拟; 油气管道

中图分类号: TG115.284

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.06.003

### Research on Magnetic Flux Leakage Characteristics of Typical Gradual Defects in Oil and Gas Pipelines

CHEN Tuo<sup>1</sup>, ZHU Bo<sup>2</sup>, LU Hui<sup>2</sup>, ZHU Weiguo<sup>2</sup>

(1. Shenglong Oil and Gas Pipeline Inspection Technology Co., Ltd., Shanghai 200949, China;

2. Shandong Special Equipment Inspection Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** Based on magnetic flux leakage detection technology, a finite element simulation model of typical gradual defects of oil and gas pipelines is established to analyze the influence of defect type and geometric size on magnetic flux leakage field, further explore the corresponding relationship between defect section shape characteristic parameters and magnetic flux leakage signal, and analyze the change law of magnetic flux leakage signal characteristics of different defects. It is very important to improve the accuracy of defect identification and quantification and enrich the defect sample database. Taking the typical gradient defects of trapezoid and echelon as the research object, the corresponding relationship between characteristic parameters of trapezoid and echelon defects and magnetic leakage signal is further explored through simulation research, which provides a reference for qualitative and quantitative analysis of magnetic flux leakage field of defects.

**Key words:** magnetic flux leakage signals; typical gradual defects; simulations; oil and gas pipeline

## 0 前 言

中国油气管道事故发生率平均为每年3次/1 000 km, 大约是美国的6倍、欧洲的12倍, 造成管道失效的首要因素是金属腐蚀<sup>[1]</sup>。因此准确

获取管体金属腐蚀的关键信息, 对于建立风险识别与评价方法、指导制定管网运营维护计划以及保证管网的安全运行尤为重要<sup>[2]</sup>。

GB 32167—2015《油气输送管道完整性管理规范》、TSG D7003—2022《压力管道定期检验

\*基金项目: 山东省重点研发计划“安惠万家”燃气安全科技示范工程项目(项目编号2022SFGC0801); 国家开发投资集团有限公司科技项目“油气管道内检测系统关键技术及装置研究”(项目编号SDIC2023-06)。

规则——长输管道》明确要求完整性评价和全面检验方案优先基于内检测数据<sup>[3-4]</sup>。目前常用的管道内检测器主要有漏磁内检测器 (MFL PIG)、超声内检测器 (UT PIG)、电磁超声内检测器 (EMAT PIG)、涡流内检测器 (EC PIG)、特殊功能内检测器以及融合多种功能的复合检测器<sup>[5]</sup>, 其中漏磁内检测器具有成本低、操作性强、环境污染小等优势, 广泛运用于长输油气管道内检测<sup>[6]</sup>。漏磁信号与缺陷形态、尺寸存在复杂的非线性关系, 漏磁特征信号难以直接、准确地反演管道缺陷特征<sup>[7]</sup>, 由此对于缺陷特征的识别与量化需要大量的数据样本<sup>[8]</sup>。有限元分析可以通过模拟和分析, 提供大量的设计数据和结果, 减少对试验的依赖。魏咏梅等<sup>[9]</sup>利用 ANSYS 有限元分析软件建立漏磁检测模型, 对不同渐变角度缺陷的漏磁场进行二维仿真, 分析了不同渐变角度与磁场分布之间的关系。胡桓<sup>[10]</sup>应用有限元软件对输油管道上坑状、横纹、纵纹、通孔、片状等常见缺陷进行仿真, 得到了漏磁场的仿真数据。杨志军<sup>[11]</sup>通过对矩形槽、梯形槽、三角形槽、半圆孔等类型缺陷仿真, 研究了缺陷类型对漏磁场信号波形和幅值的影响。

本研究基于漏磁检测技术, 建立了油气管道典型渐变缺陷的有限元仿真模型, 分析缺陷类型、几何尺寸对漏磁场的影响, 进一步探究缺陷截面形状特征参数与漏磁信号的对应关系。

## 1 电磁场有限元基础

一般认为漏磁检测属于静磁场问题<sup>[12]</sup>。基于麦克斯韦方程可以建立磁场的电场强度  $E$  和磁通量密度  $B$  之间的关系<sup>[13]</sup>

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $E$ ——电场强度, N/C;

$B$ ——磁通量密度, T。

漏磁场的控制偏微分方程 (PDE) 是从麦克斯韦旋度方程推导而出

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

式中:  $H$ ——磁场强度, A/m;

$J$ ——电流密度, A/m<sup>2</sup>。

铁磁性材料在非变磁场状态下, 通过联立方程 (1) 和方程 (2) 可以得到

$$\nabla \times (\nabla \times A) = 0 \quad (3)$$

式中:  $A$ ——磁场矢量磁矢势, AT。

根据磁铁磁场无源性可以得出

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (4)$$

以上为漏磁检测技术的控制偏微分方程的有限元求解方法。方程 (4) 中磁导率  $\mu$  是外加磁场的非线性函数,  $\mu = \mu(B)$ <sup>[14]</sup>。

对被测管道结构对称性分析, 二维磁场轴对称, 通过矢量恒等式  $\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla \times A) - \nabla^2 A$ , 漏磁场控制方程可以得出

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \times A = -J \quad (5)$$

利用圆柱形坐标系  $(r, \theta, z)$ , 公式 (5) 可变换为<sup>[15]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA) \right] + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -\mu J \quad (6)$$

根据式 (6) 可得到磁感应强度  $B$

$$\begin{cases} B_r = -\frac{\partial A}{\partial z} \\ B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (rA)}{\partial r} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $B_r$ ——径向分量, T;

$B_z$ ——轴向分量, T。

构建一个与公式 (6) 相等价的能量“泛函”并在一个近似的函数空间里寻找能量泛函的最小系统状态, 其相应的边界条件即为公式 (7), 因此可以用有限元法解决被测管道漏磁检测缺陷电磁场的模型求解<sup>[16]</sup>。

## 2 管道漏磁内检测器模型建立

所创建的管道漏磁内检测器结构图以及仿真模型如图 1 所示。其中, V1 为衔铁, V2、V3 为永磁体, V4、V5 为不锈钢钢箍, V6、V7 为钢刷, V8 为管道缺陷, V9 为被测管道, V10 为空气域。表 1 为漏磁内检测模型各部分的参数信息与控制方程。

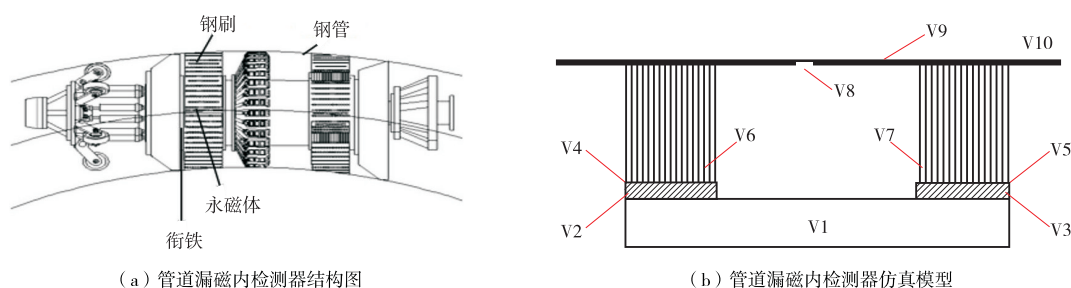


图1 管道漏磁内检测器结构与仿真模型

表1 漏磁内检测模型各部分的参数信息与控制方程

区域	部件	材料	几何参数/(mm × mm)	磁性特征	控制方程
V1	衔铁	Q235	455×48	BH 曲线 <sup>[17]</sup>	$ H  = f( B )$
V2、V3	永磁体	N48H	108×13	矫顽力= 896 000 A/m, 相对磁导率= 1.05	$B = \mu_0 H + \mu_0 M$
V4、V5	卡箍	316	108×3	相对磁导率=1.01 <sup>[18]</sup>	$ H  = f( B )$
V6、V7	钢刷	16Mn	108×97.5	相对磁导率=186 000	$ H  = f( B )$
V8	缺陷实体	空气	—	相对磁导率=1	$B = \mu_0 \mu_r H$
V9	钢管	X52	350×8.7	BH 曲线 <sup>[19]</sup>	$ H  = f( B )$
V10	空气域	空气	—	相对磁导率= 1	$B = \mu_0 \mu_r H$

### 3 仿真分析

#### 3.1 梯形腐蚀缺陷的仿真分析

目前大多数学者更多地关注规则的矩形截面缺陷,进而分析其漏磁场信号特征。实际管道缺陷的二维截面并不规整,大多呈现一定的过渡性,由此用梯形缺陷可以较好地模拟真实缺陷。本次模拟 X52 钢级  $\Phi 457 \text{ mm} \times 8.7 \text{ mm}$  钢管,参照 GB/T 27699—2023《钢质管道内检测

技术规范》中对轴向沟槽类缺陷的定义<sup>[20]</sup>,设定缺陷长度为  $4A$ ,其中  $A$  为几何参数,本研究取  $A=10 \text{ mm}$ ;设定缺陷深度为  $25\%t$  ( $t$  为管道壁厚);设定缺陷的渐变斜率  $K$  分别为  $0.5$ 、 $1.0$ 、 $2.0$  以及  $\infty$ ,不同斜率腐蚀缺陷的截面如图 2 所示。

通过 Maxwell 有限元分析软件开展分析研究,获得梯形腐蚀缺陷的漏磁信号特征如图 3 所示。

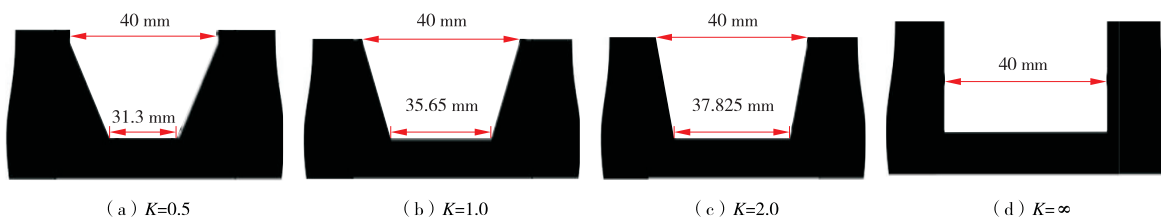


图2 腐蚀梯形缺陷截面图

由图 3 可看出,梯形腐蚀缺陷的轴向漏磁信号  $B_y$  呈现 2 个对称正波峰,径向漏磁信号  $B_x$  呈现 1 对相反的波峰。不同渐变斜率  $K$  的梯形腐蚀缺陷轴向漏磁信号和径向漏磁信号特征基本一致,但在信号幅值、轴向或径向漏磁信号的波峰波谷位置等方面存有差异;随着渐变斜率  $K$  值的减小,径向漏磁信号  $B_x$  和轴向漏磁信号  $B_y$  信号幅

值均呈现一定程度的上升趋势,轴向漏磁信号与径向漏磁信号的波峰波谷位置出现偏移,其中轴向漏磁信号  $B_y$  幅值的变化较为显著。

为了更清晰反映梯形腐蚀缺陷的磁场信号特征,在图 3 中定义  $\Delta B_y$  为轴向漏磁  $B_y$  曲线的峰-谷值,  $S_1$  为  $B_y$  曲线中 2 个对称正波峰的峰-峰间距,  $\Delta b_y$  为  $B_y$  曲线的较小峰-谷值;  $\Delta B_x$  为径向漏

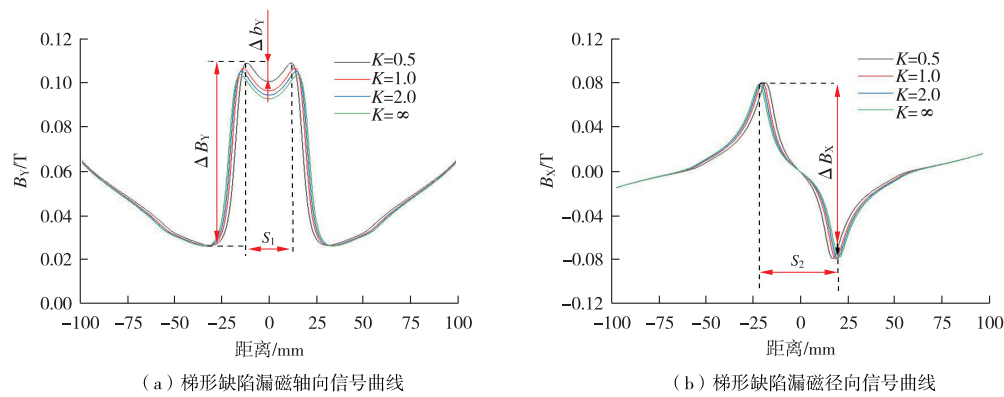


图3 梯形缺陷漏磁信号特征

磁  $B_x$  曲线的峰-峰值,  $S_2$  为  $B_x$  曲线的峰-峰间距, 提取以上数据, 获得变化特征见图4。

由图4可以看出, 轴向漏磁曲线的峰-谷值  $\Delta B_y$ 、轴向漏磁  $B_y$  曲线分量小波谷值  $\Delta b_y$ 、径向

分量峰-峰值  $\Delta B_x$  受到渐变斜率  $K$  的影响不显著。轴向漏磁信号峰-峰间距  $S_1$ 、径向漏磁信号峰-峰间距  $S_2$  均对缺陷渐变斜率  $K$  敏感, 峰-峰间距与缺陷渐变斜率  $K$  基本呈现正相关关系。

### 3.2 阶梯形腐蚀缺陷的仿真分析

为了进一步研究缺陷大小及截面类型对漏磁场分布的影响, 假设阶梯形缺陷是由二次腐蚀复合形成的, 第一次腐蚀为梯形缺陷, 第二次是在第一次腐蚀基础上出现深孔腐蚀 (缺陷长度定为  $1A$ ), 深孔深度变化量为  $25\%t \sim 100\%t$  ( $t$  为管道壁厚)。分析有限元仿真数据, 获得不同形态和深度的阶梯形缺陷漏磁信号特征如图5所示, 阶梯形缺陷特征变化如图6所示。

由图5可见, 相较之梯形腐蚀缺陷, 阶梯形缺陷漏磁信号轴向分量波峰、径向分量波谷的数

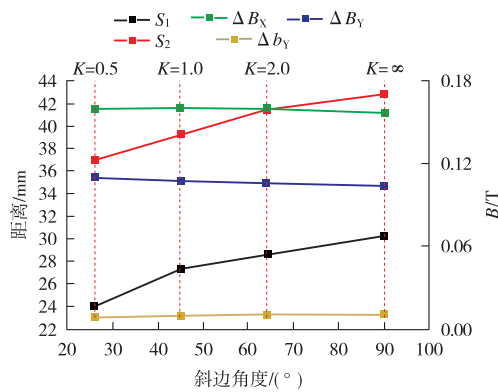


图4 梯形缺陷漏磁信号特征变化

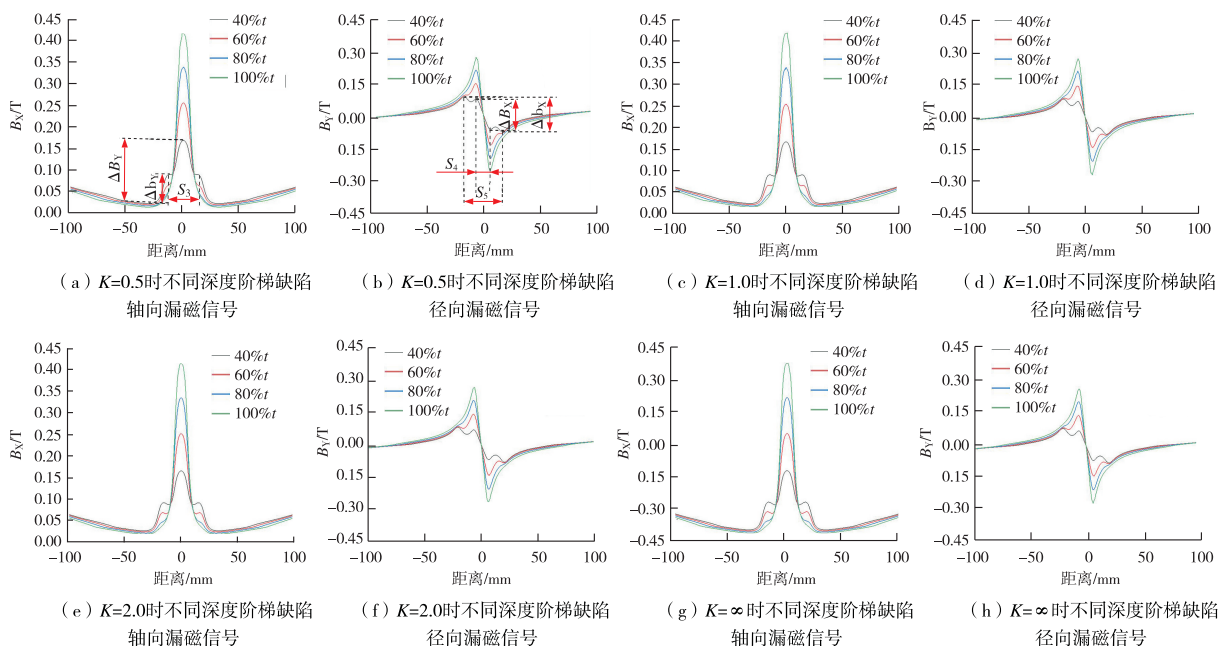


图5 阶梯形状缺陷漏磁信号特征



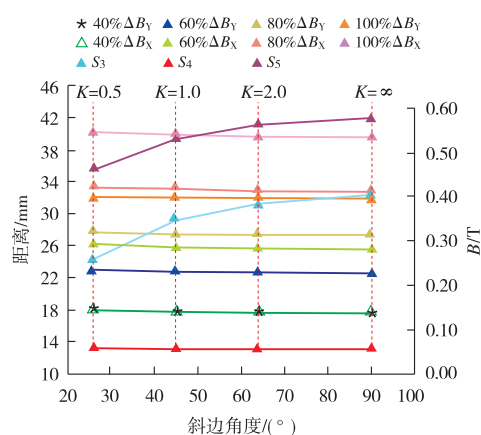


图6 阶梯缺陷特征变化图

量增多, 轴向漏磁信号近似台阶状, 越靠近缺陷中心位置信号幅值越大。

对于确定形态、尺寸的一次腐蚀 (即  $K$  值确定), 不同深度阶梯形缺陷漏磁场信号存在不同差异: ①缺陷深度等于  $100\%t$  时, 轴向漏磁  $B_y$  和径向漏磁  $B_x$  均与典型的漏磁信号类似; ②对于深度非  $100\%t$  的缺陷,  $B_x$  和  $B_y$  曲线均出现了信号畸变。二次腐蚀缺陷的深度越小时, 第一次腐蚀产生的漏磁场对其信号的影响就更为明显, 轴向漏磁  $B_y$  信号台阶状特征、径向漏磁  $B_x$  信号表现出显著的多波峰多波谷更加明显, 且两者变化幅度趋势相同, 但径向漏磁信号  $B_x$  的变化幅度远小于轴向漏磁信号  $B_y$  的变化幅度。

随着一次腐蚀渐变斜率  $K$  的减小, 漏磁场强度在腐蚀缺陷的边缘集中程度会相应增加, 磁通量在缺陷区域处较集中, 磁场在缺陷过渡区域变化处出现的小波峰波谷会消失。

对于阶梯形缺陷来说, 可用一次腐蚀渐变斜率  $K$  变化做修正, 来提升缺陷识别和量化精度的准确性, 以便得到阶梯缺陷深度与漏磁场波形成的固定关系。

从图6可看出, 阶梯形腐蚀缺陷深度一定, 当一次腐蚀渐变斜率  $K$  增大时, 漏磁信号轴向分量峰-谷值  $\Delta B_y$ 、径向分量峰-峰值  $\Delta B_x$  特征均减小。漏磁信号轴向分量峰-峰间距  $S_3$ 、径向分量峰-峰间距  $S_5$  与梯形腐蚀缺陷变化规律一致, 呈递增趋势, 径向分量较小峰-峰间距  $S_4$  保持不变。

综合发现, 阶梯形缺陷与一次腐蚀梯形缺陷斜率、二次腐蚀缺陷深度有关, 可作为量化阶梯形缺陷的参考量。

## 4 结 论

(1) 通过对梯形、阶梯形典型渐变缺陷进行仿真模拟, 发现对于不同渐变斜率  $K$  梯形缺陷的漏磁信号轴向分量峰-谷值  $\Delta B_y$ 、峰-峰间距  $S_1$  与径向漏磁信号峰-峰间距  $S_2$  可作为量化缺陷的参考量, 渐变斜率  $K$  接近无穷大时磁场信号特征量最大。

(2) 阶梯形缺陷的一次腐蚀渐变斜率  $K$ 、二次腐蚀缺陷深度可作为量化缺陷的参考量。量化阶梯形缺陷深度时, 可借助一次腐蚀渐变斜率  $K$  变化做修正, 降低漏磁信号轮廓对阶梯形缺陷识别和量化精度的影响。

## 参考文献:

- [1] 梁永宽, 杨馥铭, 尹哲祺, 等. 油气管道事故统计与风险分析[J]. 油气储运, 2017, 36(4): 472-476.
- [2] 张新建, 费雪松, 王梓力, 等. 基于管道完整性数据的关联规则挖掘与应用[J]. 油气储运, 2016, 35(5): 471-474.
- [3] 全国石油天然气标准化技术委员会. 油气输送管道完整性管理规范: GB 32167—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [4] 国家市场监督管理总局. 压力管道定期检验规则—长输管道: TSG D7003—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [5] SONG H D, YANG L, LIU G H, et al. Comparative analysis of in-line inspection equipments and technologies [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 382(3): 032021.
- [6] 吴志平, 陈振华, 戴联双, 等. 油气管道腐蚀检测技术发展现状与思考[J]. 油气储运, 2020, 39(8): 851-860.
- [7] 李志豪, 王宏安, 刘庆, 等. 管道缺陷截面形状与漏磁信号关系研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(33): 56-59.
- [8] 余文来. 管道漏磁检测缺陷识别技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [9] 魏咏梅, 张国光. 渐变缺陷漏磁特征的仿真研究[C]//第19届中国过程控制会议论文集. 北京: 化学工业出版社, 2008: 91-94.
- [10] 胡恒. 油管漏磁检测三维有限元仿真及结构优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [11] 杨志军. 铁磁性平板腐蚀缺陷多通道漏磁信号的反演与重构[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- [12] 王宏安, 陈国明. 基于深度学习的漏磁检测缺陷识别方法[J]. 石油机械, 2020, 48(5): 127-132.
- [13] 吕圆. 天然气长输管道金属损失漏磁内检测技术研究[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(2): 82-84, 102.

(下转第38页)