

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306969

# 基于直流电位降法的缺陷区域多探针检测<sup>\*</sup>

薛 河 宁 硕 张雨彪 张 顺 杨 超 武 军 王欣玥

(西安科技大学机械工程学院 西安 710054)

**摘要:**油气管道在服役过程中由于制造过程、环境复杂等因素容易产生缺陷,造成管道破裂等事故,因此对管道的无损检测具有重要意义。通过直流电位降法研究裂纹缺陷对电位场的影响规律,建立了多探针缺陷检测方法。首先采用有限元法对含有缺陷的平板试样进行电位分析,缺陷区域的电位差明显高于无缺陷区域,通过多探针的检测范围对试样区域进行划分后,提出了多探针缺陷区域检测方法。检测到区域存在缺陷后,对缺陷影响因子 $k$ 进行计算,无缺陷区域 $k$ 值基本在0.8~1.2之间,而缺陷周围的 $k$ 值都超过了2,根据 $k$ 值的分布可以得到缺陷的大致位置和尺寸。并搭建了多探针检测试验平台进行试验,结果表明,缺陷附近的电势差显著高于其他区域,与有限元结果相符。缺陷区域电势差明显高于其他区域,无缺陷区域 $k$ 值在0.75~1.2之间,缺陷区域 $k$ 值基本大于1.5。通过 $k$ 值分布对缺陷位置和尺寸进行分析,与实际尺寸相差在3~5 mm左右。

**关键词:** 直流电位降法;缺陷检测;多探针;有限元

中图分类号: TH871; TE973 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

## Multi-probe detection of defect region based on direct current potential drop method

Xue He Ning Shuo Zhang Yubiao Zhang Shun Yang Chao Wu Jun Wang Xinyue

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Oil and gas pipelines are susceptible to defects throughout their service life due to manufacturing processes and complex environmental conditions, often face incidents such as ruptures. Consequently, non-destructive testing is crucial for ensuring pipeline integrity. This study examines the impact of crack defects on the potential field through the direct current potential drop method, facilitating the development of a multi-probe defect detection technique. Finite element analysis of flat plate specimens with defects disclosed a pronounced potential difference in areas with defects compared to those without. By partitioning the specimen area according to the detection scope of multiple probes, a novel multi-probe detection method was devised. Detection of a defect triggers the calculation of the defect influence factor,  $k$ ; in areas without defects,  $k$  values typically range from 0.8 to 1.2, whereas in the vicinity of defects, they exceed 2. This variance in  $k$  values aids in approximating the defect's location and size. Additionally, a multi-probe detection experimental platform was established, confirming that potential differences near defects are significantly higher than in other areas, aligning with the findings from finite element analysis. Notably, the potential difference was substantially greater in defect areas, with  $k$  values in unaffected zones ranging from 0.75 to 1.2, and surpassing 1.5 in defect areas. The analysis of the distribution of  $k$  values offers insights into the defect's precise location and size, with an accuracy deviation of about 3~5 mm.

**Keywords:** direct current potential drop method; defect detection; multi-probe; finite element

## 0 引言

由于油气管道运输线路长、时间久,油气管道的制

造、高温高压等因素容易产生缺陷,缺陷的存在导致油气管道泄漏、爆炸的事故时有发生<sup>[1-2]</sup>,油气管道的安全运输问题受到了广泛关注,无损检测也逐渐在管道缺陷的检测中不断完善起来<sup>[3]</sup>。

目前,常用的无损检测方法有漏磁检测<sup>[4]</sup>、涡流检测<sup>[5]</sup>、超声检测<sup>[6]</sup>和直流电位降(direct current potential drop, DCPD)检测等方法。直流电位降法又称电位差法,原理是通过电路中电阻的变化引起电压的变化对缺陷进行检测,许多学者对此进行了大量的研究。Chen 等<sup>[7]</sup>通过有限元法建立缺陷影响因子,并通过仿真描绘其轮廓确定缺陷的位置和形状;Tada 等<sup>[8-10]</sup>利用直流电位降法提出了采用多探头传感器对半椭圆形裂纹进行检测,通过大量的公式计算能够识别出裂纹的大小和位置。Ryu 等<sup>[11]</sup>基于直流电位降的原理采用有限元模拟和机器学习的方式建立了管道减薄模型;Campagnolo 等<sup>[12]</sup>采用三探针技术通过电势差的变化对裂纹的面积和位置建立了评估的方法;Sun 等<sup>[13]</sup>基于直流电位降法利用修正后的Johnson 公式对管道裂纹长度进行了监测,并用有限元与实验结合验证了对管道裂纹评估的准确性;Xue 等<sup>[14]</sup>通过CT 试样采用有限元和算法对电流加载点和参考电位降探针点位置进行优化;王亮等<sup>[15]</sup>采用勾线法对直流电位降法测量的数值进行标定,通过勾线法修正获得了准确的裂纹长度;周素霞等<sup>[16]</sup>运用有限元法研究了电位降与裂纹深度的关系,并绘制了裂纹深度变化与电位降的曲线关系。

综上所述,关于缺陷区域检测的有限元分析及实验方法仍需要进一步研究,本文通过可移动多探针的方式对缺陷区域和缺陷尺寸进行检测分析。首先根据缺陷区域的电位差值与无缺陷区域的电位差值的大小关系,提出了多探针缺陷检测方法,多探针检测到区域存在缺陷后,通过缺陷影响因子  $k$  对缺陷的尺寸进行分析,可以得到缺陷的大致尺寸,实现多探针方法对缺陷的检测分析。

## 1 检测原理

通过对试样通入恒定大小的电流,在试样内部会形成电位场,且电位场会随着裂纹位置和长度的变化而变化,即有裂纹存在或裂纹发生变化时,电位场会随之改变。对于无限长有限宽裂纹试样,电压与裂纹长度之间的关系式为<sup>[17]</sup>:

$$U = C \cdot \cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a/2W)} \right] \quad (1)$$

式中: $a$  为试样裂纹半长, $y$  为试样上两测点距离裂纹的半长, $W$  为试样半宽, $U(a)$  为两测量间的电压差, $C$  为常数,其表达式<sup>[18]</sup>为:

$$C = \frac{4\rho I}{\pi B} \quad (2)$$

式中: $\rho$  为试样的电阻率; $I$  为通入试样的电流; $B$  为试样厚度。

缺陷的产生会影响试样的电阻率,当试样材料、宽度

和通入电流不发生变化时,可以通过电压差的变化实现对裂纹缺陷的检测,因此本文采用直流电位降法检测区域是否存在缺陷。本文研究对象为 X80 油气长输管道,外径长 1 422 mm,壁厚为 32.1 mm。考虑到 X80 油气长输管道尺寸足够大,为了更加好的对管道进行分析,将管道缺陷周围简化为平板模型进行分析,如图 1 所示。

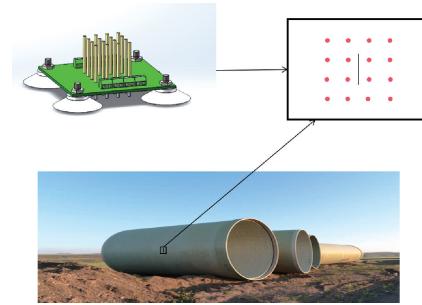


图 1 X80 长输管道多探针缺陷检测

Fig. 1 X80 long pipeline multi-probe defect detection

## 2 有限元分析

### 2.1 模型建立

本文采取无限长有限宽的平板试样作为裂纹缺陷分析试样,如图 2 所示。其中平板长  $L = 100$  mm, 平板宽  $W = 40$  mm,  $a$  为裂纹长度, 左侧为电流通入点, 右侧为零电势点。

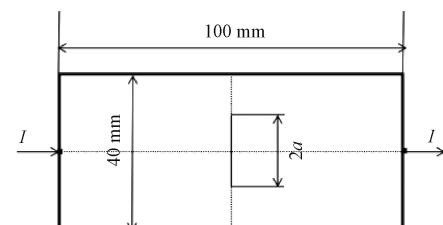


图 2 试样大小和缺陷位置

Fig. 2 Sample size and defect location

选择材料为 304 不锈钢,通入试样的电流为 1 A。为了保证计算的精确性,在非裂纹区域划分网格为 0.5 mm,在裂纹区域划分网格为 0.05 mm,网格属性设置为 4 节点二次热力耦合单元(DC2D4E)。

### 2.2 数值计算

对计算后的模型进行电势提取,以模型左下角为原点,模型长为  $x$  轴,宽为  $y$  轴,在  $x$  轴和  $y$  轴上每隔 1 mm 提取一次电势值,  $x$  轴共有 101 个点,  $y$  轴有 41 个点,共 有 4 141 个点。从左下角进行坐标标记,  $V_{1,1}, V_{1,2}, V_{1,3}, \dots, V_{1,41}, V_{2,1}, V_{2,2}, \dots, V_{101,41}$ 。将试样第 1 列的电势值减第 2 列的电势值, 第 2 列的电势值减第 3 列的电势值, 这

样依次相减, 得到两点之间的电势差值, 电势差值为 4 100 个, 电势差值的表达式为:

$$\begin{aligned} U_{1-2,1} &= V_{1,1} - V_{2,1} \\ U_{1-2,2} &= V_{1,2} - V_{2,2} \\ \dots \\ U_{2-3,1} &= V_{2,1} - V_{3,2} \\ \dots \\ U_{100-101,41} &= V_{100,41} - V_{101,41} \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.3 多探针缺陷检测分析

#### 1) 中心缺陷试样电压分布

如图 3 所示为裂纹缺陷长度为  $2a = 8, 10, 12 \text{ mm}$  时的电势差分布图。

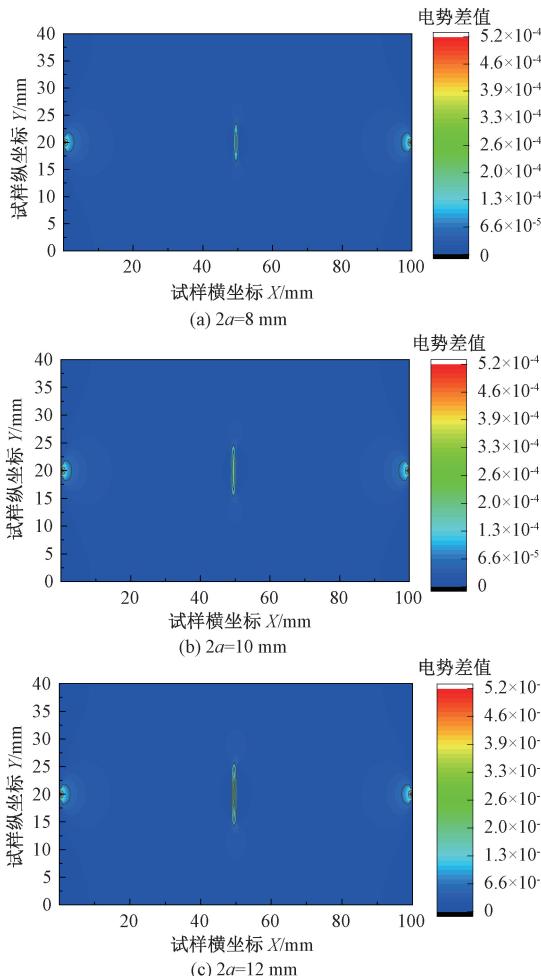


图 3 中心裂纹试样电压分布

Fig. 3 Voltage distribution of central crack specimen

由电压分布图可知, 大部分区域电压值都在一定范围内均匀变化, 除去电流输入点和输出点的区域, 只有在  $X = 50 \text{ mm}, Y = 20 \text{ mm}$  附近存在一定的不均匀分布区域。根据颜色刻度的范围, 无缺陷区域内电压值大小在  $1 \sim 7 \times 10^{-5} \text{ V}$  范围内变化, 证明了明其周围电场呈均匀分布, 未

受到缺陷的破坏; 而缺陷区域内电压最小为  $3.9 \times 10^{-4} \text{ V}$ , 缺陷区域内左右两侧电压存在一定的数量级差异, 说明其电场受到了破坏, 因此认为该区域为缺陷存在区域。对于不同长度中心裂纹缺陷的试样受电压测量位置和电流密度的影响, 电压变化较大, 可以根据电势差的大小对裂纹缺陷区域进行判断。

#### 2) 多探针缺陷区域检测

根据裂纹缺陷对周围电场的影响, 本文设计了一种多探针的方法对试样区域是否存在缺陷进行判断, 在试样上随机选取测量区域, 提取电位值并通过计算得到电压差值进行判断和分析。如图 4 所示, 以圆点表示为探针, 并用 1~16 进行编号, 相邻探针之间的距离为 4 mm, 在试样上选定测量范围后, 每隔一定距离提取相应点的电压, 通过上文的分析过程, 采用电压差值判断该区域是否存在缺陷。

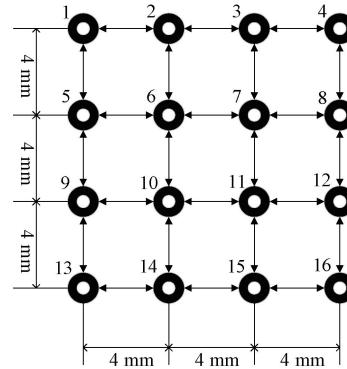


图 4 多探针采集电压

Fig. 4 Multi-probe acquisition voltage

由于点阵式探针尺寸为  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ , 因此在含有缺陷的试样上选择 3 个测量区域, 其中一个为缺陷区域, 两个任意位置的无缺陷区域, 如图 5 所示。每个区域可以得到 16 个电压值, 按照式(3)进行计算, 可以得到 12 个电压差值。将其按照对应位置进行排列, 根据电势差的大小进行对比。

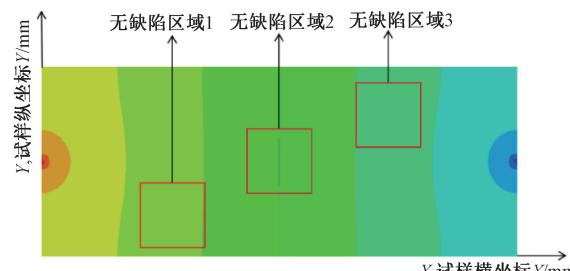


图 5 中心裂纹试样区域划分

Fig. 5 Central crack sample region division

缺陷区域检测结果如图 6 所示。在中心裂纹试样

中,无缺陷区域电压的变化是规律的,主要分布在 $1\sim5\times10^{-5}$  V之间。而缺陷区域电压的变化很大,以一定的数量级增长,多探针方法可以实现对缺陷区域的检测。

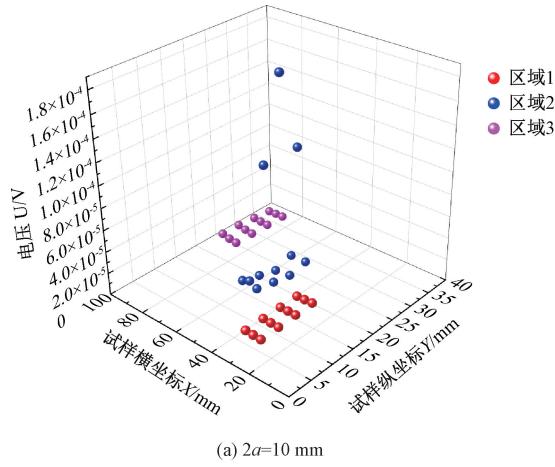
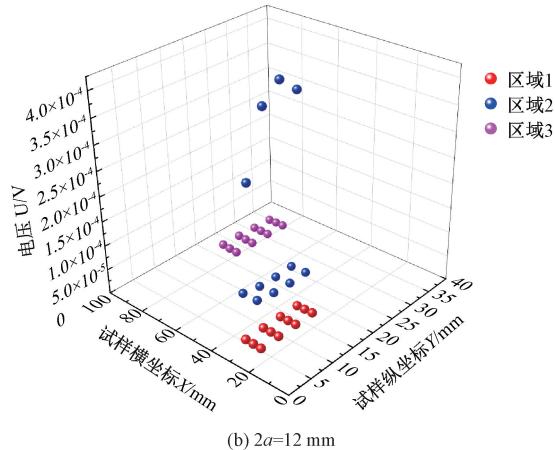
(a)  $2a=10$  mm(b)  $2a=12$  mm

图6 中心裂纹试样不同区域检测结果

Fig. 6 Test results of different regions of central crack specimen

### 3) 多探针缺陷尺寸检测

为了对裂纹尺寸进行分析,本文采用了Chen等<sup>[7]</sup>提出的缺陷影响因子的概念。将有缺陷板电压与无缺陷板的电压的比值称为 $\gamma$ ,缺陷影响因子 $\gamma$ 可以表示为:

$$\gamma = \frac{V(a)}{V(0)} \quad (4)$$

式中: $V(a)$ 为含缺陷试样的电势; $V(0)$ 为无缺陷试样的电势。

本文对式(4)进行了改进,通过相同位置两点电势差的比值来,并把比值的大小用 $k$ 来表示,表达式为:

$$k = \frac{\Delta V(a)}{\Delta V(0)} \quad (5)$$

式中: $\Delta V(a)$ 为含缺陷试样的电势差; $\Delta V(0)$ 为无缺陷试样的电势差。

将检测到的电压按照式(3)进行计算后,通过式(5)

与无缺陷板的电压值进行对比,通过 $k$ 值的大小反映缺陷的位置和形状,由于多探针之间距离为4 mm,因此在空隙内每次移动1 mm进行检测,通过多探针上下左右的移动检测电压。

检测结果如图7所示,对于无缺陷区域,比值 $k$ 基本在0.8~1.2之间,而缺陷区间的 $k$ 值在都超过了2。对于 $2a=8$  mm的试样,检测缺陷大致尺寸为10 mm,对于 $2a=10$  mm和 $2a=12$  mm的试样均可以检测出缺陷的大致尺寸,但与实际尺寸存在误差,超出的长度可能是缺陷对周围电场产生影响,导致检测出的缺陷尺寸相较于实际较大。

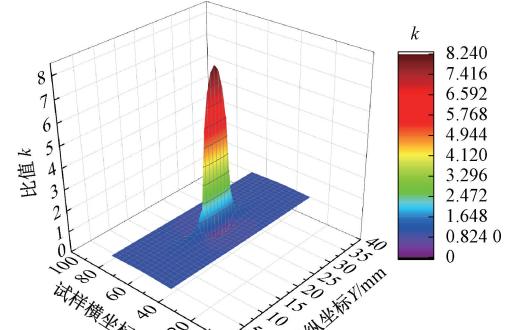
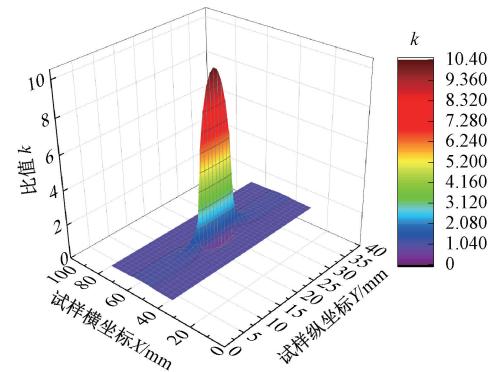
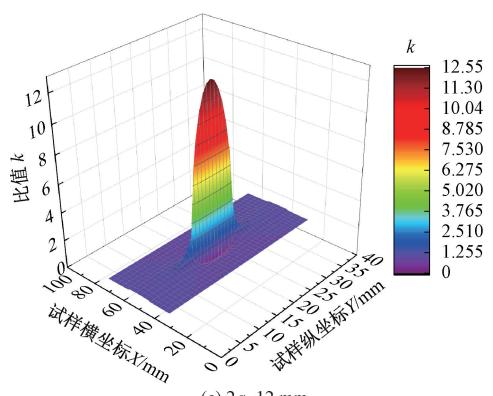
(a)  $2a=8$  mm(b)  $2a=10$  mm(c)  $2a=12$  mm

图7 中心裂纹试样尺寸检测结果

Fig. 7 Central crack specimen size test results

### 3 试验验证

#### 3.1 多探针检测装置

本次试验选取试样长宽为 150 mm×100 mm, 厚度为 15 mm<sup>[19]</sup>, 如图 8 所示。本文选用的探针为 P100-J1 型直上圆头测试探针, 针自然状态下总长度 33.3 mm, 圆头部分直径 1 mm, 额定电流 3 A。为了确保探针之间的距离和检测区域固定, 同时使探针可以与试样接触, 设计了一种电路板可以固定探针的距离和检测位置。通过吸盘的力对弹簧探针施加竖直向下的力, 保证探针可以接触试样, 并通过导电线将测点接入边缘, 方便对试样电势值的采集与测量, 如图 8(a) 所示。每个相邻探针距离为 6 mm, 将探针固定在试样上, 并将测量设备通过杜邦线与连接器相连。

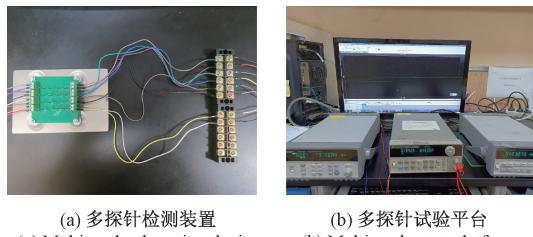


图 8 多探针检测平台

Fig. 8 Multi-probe defect detection platform

#### 3.2 实验平台搭建

首先使用 FK-0050 可编程双脉冲电焊机将焊线焊接在试样需要通入电流的两端, 为试样提供稳定的电流, 如图所示。分别采用由是德科技研发的 keysight 6611C 恒流源、34 420 A 纳伏表、34 970 A 数据采集单元和 PCI-GPIB 卡对电位信号进行采集和显示。恒流源为试样提供稳定的电流, 由于探针额定电流为 3 A, 因此输出电流选择为 2 A, 输出电压为 2 V, 选择 CC 恒流模式<sup>[20]</sup>。

将多探针结构放置在试样上后, 通过接线端与数据采集单元相连, 数据采集单元通过 GPIB 和 RS232 将仪器端与电脑端建立了数据连接, 在电脑上打开对应软件进行配置, 并建立保存文档, 便于后续对数据的分析, 如图 8(b) 所示。采集频率为 2 次/s, 选择每个探针对应的通道进行数据记录, 通道进行后续最多可实现 20 个通道的数据采集。由于采集的数据为连续信号, 本文去除了采集过程中波动较大的部分, 将其余部分取平均值作为该点的测量电压。

#### 3.3 试样缺陷区域检测分析

本次试验在 304 不锈钢平板试样表面的检测区域

分别选取了 5 个不同区域的检测情况进行对比: 左端近电流端无缺陷区域 1、含缺陷区域 3、右端近电流输出端无缺陷区域 5 和在它们之间的无缺陷区域 2 和 4, 以缺陷为 16 mm 时为例, 如图 9 所示。本次试验所选取板的裂纹长度分别为 10、16、20 和 24 mm 的中心裂纹, 将点阵式探针分别放置在 5 个区域进行检测, 判断存在缺陷区域识别结果的准确性以判断该缺陷检测方法的可行性。

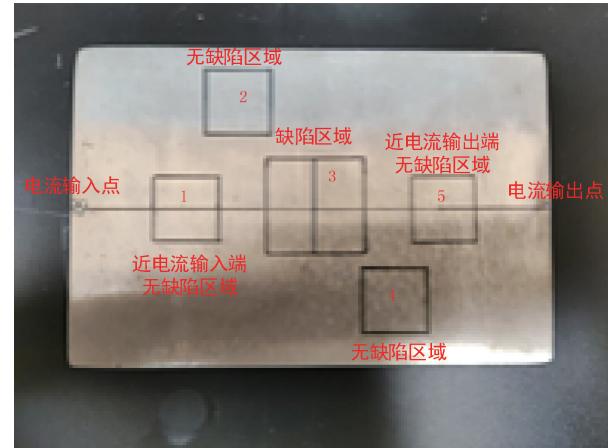


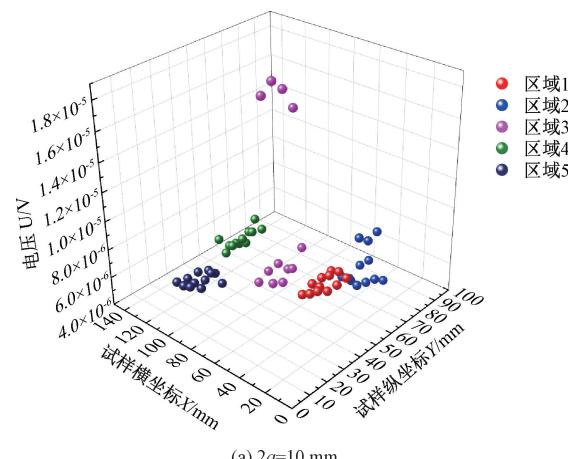
图 9 缺陷区域识别检测位置示意图

Fig. 9 Defect area identification detection position schematic diagram

检测结果如图 10 所示, 在区域 1、2、4、5 中, 电压差值在基本在一定范围内, 大小在主要在  $4 \sim 8 \times 10^{-6}$  V 之间, 而在区域 3 中, 电压差值发生了很大的变化, 数量级也发生了改变, 这与在有限元中得到的结果相同: 只有在裂纹缺陷产生的区域电压差值才会有数量级的改变, 分布比较离散。

#### 3.4 试样缺陷尺寸检测分析

检测到区域存在缺陷后, 移动多探针进行缺陷尺寸的检测, 结果如图 11 所示。



(a)  $2a=10$  mm

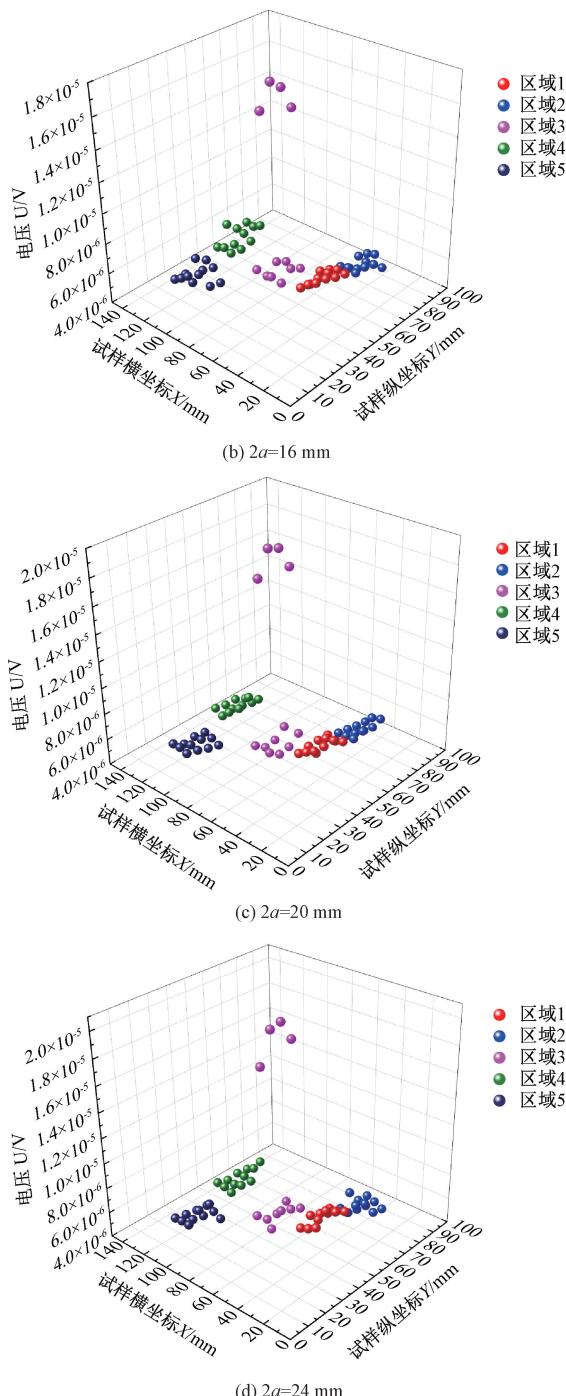


图 10 中心裂纹试样不同区域检测结果

Fig. 10 Test results of different regions of central crack specimen

无缺陷区域的  $k$  值在  $0.75 \sim 1.2$  之间, 缺陷周围的  $k$  值基本大于 1.5, 通过  $k$  值对缺陷尺寸进行分析, 与实际尺寸相差在  $3 \sim 5 \text{ mm}$  左右, 该方法可以检测缺陷的大致尺寸。

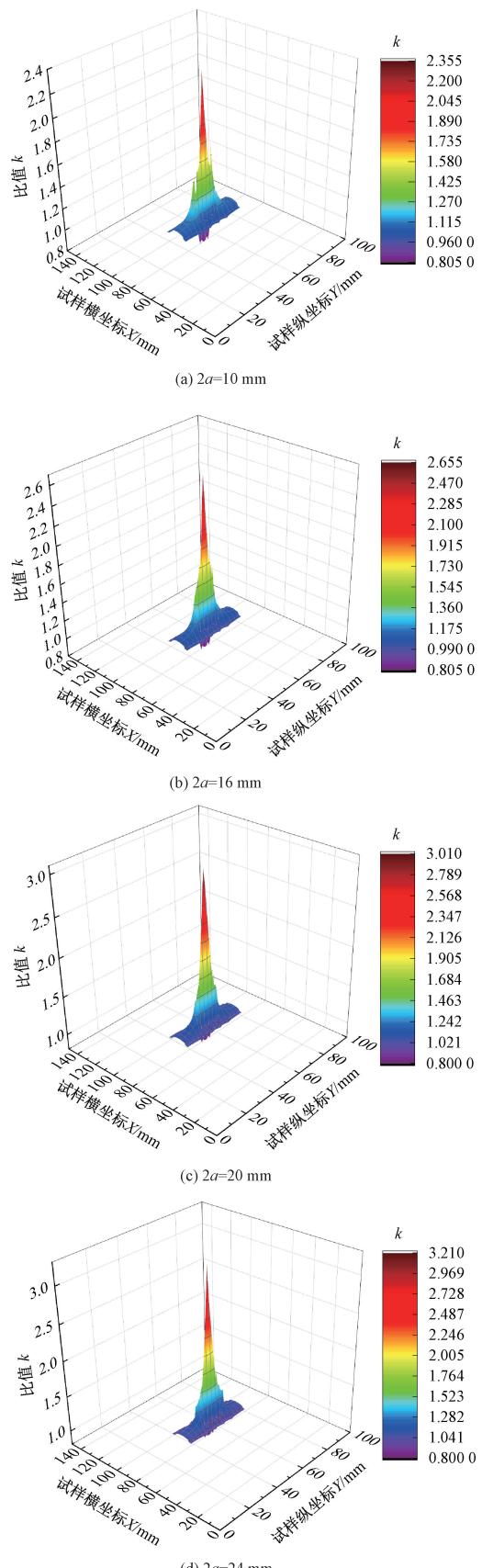


图 11 中心裂纹试样缺陷尺寸检测结果

Fig. 11 Test result of defect size of central crack specimen

## 4 结 论

针对 X80 油气管道结构的缺陷问题,本文基于直流电位降原理提出了多探针缺陷检测方法,搭建了多探针缺陷检测试验平台。对于存在缺陷的试样,无缺陷附近电势差变化比较规律,而缺陷区域的电势差比其他区域的电势差高一个数量级,采用多探针的方法可以检测到区域是否存在缺陷。检测到区域存在缺陷后,通过缺陷影响因子  $k$  值的大小可以得到缺陷的大致尺寸。最后,通过试验验证了有限元结果的准确性,可以通过电势差的大小判断区域是否存在缺陷,同时对含有缺陷的区域进行了尺寸分析,与实际尺寸相差在 3~5 mm 左右。为缺陷的检测分析奠定了一定基础。

## 参考文献

- [ 1 ] 吕政. 中国长输油气管道集中调控企业发展环境与战略现状 [J]. 油气储运, 2019, 38(12):1330-1337.  
LYU ZH. Development environment and strategy status of the centralized control enterprises of long-distance oil and gas pipeline in China [ J ]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(12):1330-1337.
- [ 2 ] 董绍华. 中国油气管道完整性管理 20 年回顾与发展建议 [J]. 油气储运, 2020, 39(3):241-261.  
DONG SH H. Review of China's oil and gas pipeline integrity management in the past 20 years and development suggestions [ J ]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3):241-261.
- [ 3 ] 吴同, 邓忠华, 沈亮, 等. 长距离输油管道泄漏监测技术研究进展 [J]. 油气储运, 2023, 42(3):259-275.  
WU T, DENG ZH H, SHEN L, et al. Research progress of long-distance oil pipeline leakage monitoring technology [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42 ( 3 ): 259-275.
- [ 4 ] 耿浩, 夏浩, 王国庆. 高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷定位方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4):70-78.  
GENG H, XIA H, WANG G Q, et al. Study on the defect location method of inner and outer wall of pipeline during high-speed magnetic flux leakage testing [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4):70-78.
- [ 5 ] 黄曼, 王婕, 周伟, 等. 单向 CFRP 表面缺陷的涡流检测与有限元仿真研究 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(19):182-187.  
HUANG M, WANG J, ZHOU W, et al. Eddy current detection and finite element simulation study of surface defects in unidirectional CFRP [ J ]. Electronic Measurement Technique, 2023, 46 ( 19 ): 182-187.
- [ 6 ] 梁海波, 王怡. 基于深度学习的天然气钢制管道缺陷检测方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9):148-158.  
LIANG H B, WANG Y. Research on defect detection method of natural gas steel pipeline based on deep learning [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9):148-158.
- [ 7 ] CHEN W H, CHEN J S, FANG H L. A theoretical procedure for detection of simulated cracks in a pipe by the direct current-potential drop technique [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 216(1-3): 203-211.
- [ 8 ] TADA N, OKADA M, IWAMOTO J. Three-dimensional identification of semi-elliptical surface crack by means of direct-current electrical potential difference method with multiple-probe sensor [ J ]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(3):441-448.
- [ 9 ] TADA N, FUNAKOSHI A. Three-dimensional identification of semi-elliptical crack on the back surface by means of direct-current electrical potential difference method with multipleprobe sensor ( PVP2006-ICPVT-11-93359 ) [ J ]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131(2):021501.
- [ 10 ] TADA N, UCHIDA M. Electric field analysis of simultaneous evaluation of crack on an inner pipe surface and pipe wall thickness using direct-current potential difference method of multiple-probe type [ J ]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134(4):041501.
- [ 11 ] RYU K, LEE T, BAEK D, et al. Pipe thinning model development for direct current potential drop data with machine learning approach [ J ]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(4):784-790.
- [ 12 ] CAMPAGNOLO A, BÄR J, MENEGHETTI G. Analysis of crack geometry and location in notched bars by means of a three-probe potential drop technique [ J ]. International Journal of Fatigue, 2019, 124:167-187.
- [ 13 ] SUN D X, LI H, FENG H, et al. Calibrating Johnson's formula for applying DCPD method to an axial through-wall crack in a pipe [ J ]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 242: 107461.
- [ 14 ] XUE H, GOU S, NI C, et al. Optimal selection of the reference potential probe point in DCPD real-time monitoring of crack growth rate [ J ]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020:1-13.
- [ 15 ] 王亮, 刘帅, 王翔. 直流电位法裂纹长度标定技术研究 [J]. 失效分析与预防, 2022, 17(2):96-101.  
WANG L, LIU SH, WANG X. Study on crack length calibration technology by direct current potential method [ J ]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(2):96-101.

- [16] 周素霞,卢俊霖,吴毅,等.基于直流电位降的高铁车轴裂纹检测研究[J].机械工程学报,2022,58(14):288-295.  
ZHOU S X, LU J L, WU Y, et al. Research on crack detection of high-speed railway axle based on direct current potential drop [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14):288-295.
- [17] 倪陈强,薛河,崔英浩.直流电位降法裂纹监测试验中接线点位置分析[J].热加工工艺,2016,45(24):122-125.  
NI CH Q, XUE H, CUI Y H. Analysis on wire layout in crack monitoring test using direct current potential drop method [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 ( 24 ) : 122-125.
- [18] 倪陈强,薛河,方秀荣,等.裂纹扩展试验中Johnson公式适用性研究[J].铸造技术,2017,38(12):2877-2880.  
NI CH Q, XUE H, FANG X R, et al. Study on applicability of Johnson's formula in crack propagation experiment [J]. Foundry Technology, 2017, 38 ( 12 ) : 2877-2880.
- [19] WANG S, WANG B, JANIN Y J, et al. Effects of the surface crack shape on J values along the front of an elliptical crack [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(11): 2944-2961.
- [20] 薛河,赵有俊,王双,等.疲劳裂纹扩展电位信号的最优光滑降噪算法[J].电子测量与仪器学报,2022,36(7):115-124.  
XUE H, ZHAO Y J, WANG SH, et al. Optimal smoothing

noise reduction algorithm for potential drop signal of fatigue crack growth [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 ( 7 ): 115-124.

### 作者简介



薛河(通信作者),1982年于西安科技大学获学士学位,1988年于西安科技大学获硕士学位,1998年于西安交通大学获博士学位,现为西安科技大学教授,主要研究方向为计算机辅助工程分析、仪器仪表开发。

E-mail: xuehe@xust.edu.cn

**Xue He** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 1982, M. Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 1988 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1998. Now he is a professor at Xi'an University of Science and Technology. His main research interests include computer-aided engineering and instrument development.



宁硕,2021年于安徽理工大学获学士学位,现为西安科技大学硕士研究生,主要研究方向为缺陷检测分析、仪器仪表开发。

E-mail: 525789241@qq.com

**Ning Shuo** received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Xi'an University of Science and Technology. His main research interests include defect detection and instrument development.