

表面质量控制及检测

直流电位法对 Q235 钢材表面裂纹的检测仿真

代占鑫, 胡博, 余业山, 刘怡

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

摘要: **目的** 针对 Q235 钢材的表面裂纹, 在电位法检测原理的基础上, 进行有限元仿真模拟。**方法** 首先, 设计不同宽度、不同深度及不同的裂纹与激励夹角等多组方案仿真计算。其次, 基于直流电位法原理的解析解与有限元模拟对比验证, 证明其有限元模拟的准确性。**结果** 不同宽度的表面裂纹, 两侧的电位值不同, 有明显的极值拐点, 且随着裂纹宽度的增加, 两侧的电压降趋势逐渐平缓。不同深度的表面裂纹, 两侧的电位幅值随着裂纹深度增加而增大, 最小可检测 0.02 mm 的裂纹深度。不同方向的裂纹, 其周围的电场线疏密程度及走向趋势不一样, 当夹角 $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 时, 直流电位法可以较好地检测表面裂纹。通过解析解验证有限元仿真结果, 在裂纹处的电位信号趋势一致, 幅值略有不同, 表明结果可靠。**结论** 直流电位法对 Q235 钢材表面不同宽度、不同深度及不同夹角的裂纹检测分辨率较好。该研究为电位法检测 Q235 钢材表面裂纹提供了一定的可行性依据, 证明此检测方法具有重要的工程实用价值。

关键词: Q235 钢材; 表面裂纹; 电位法; 有限元

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)01-0236-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.01.037

Simulation of Surface Crack Detection of Q235 Steel in DC-bit Method

DAI Zhan-xin, HU Bo, YU Ye-shan, LIU Yi

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: The work aims to apply finite element simulation to surface cracks of Q235 steel based on principle of potentiometric detection. Firstly, several schemes consisting of different width, different depth and different angle between crack and excitation were designed firstly for simulation calculation. Secondly, analytical solution based on the principle of DC-bit method and finite element simulation were compared and validated to verify accuracy of the finite element simulation. For surface cracks of different width, potential values on both sides were different, there was obvious extremum inflection point, and voltage drop on both sides became gentle as the crack width increased. Potential amplitude on both sides increased with the increase of crack depth, and minimum detectable crack depth was 0.02 mm. Density and trend of electric field lines were different around the cracks in different directions. When $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, the surface crack could be detected in the DC potential method smoothly. The finite element simulation results were verified based upon analytical solution, trend of potential signal at the cracks was consistent, the amplitude was slightly different, hence the results were reliable. The DC potential method has higher resolution in detecting different width, different depth and different angle of the surface cracks of Q235 steel, which provides a certain feasi-

收稿日期: 2017-06-29; 修订日期: 2017-07-15

Received: 2017-06-29; **Revised:** 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51565043, 51765048); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ160698)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation Project of China (51565043, 51765048) and Education Science and Technology Research Project of Jiangxi Province (GJJ160698)

作者简介: 代占鑫 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁无损检测。

Biography: DAI Zhan-xin (1991—), Male, Master, Research focus: electromagnetic non-destructive testing.

通讯作者: 胡博 (1984—), 女, 讲师, 主要研究方向为电磁无损检测和电磁场数值计算。

Corresponding author: HU Bo (1984—), Female, Lecturer, Research focus: electromagnetic non-destructive testing and numerical calculation of electromagnetic fields.

bility basis for detecting surface cracks of Q235 steel in potential method, and is of significant engineering practical value.
KEY WORDS: steel; surface cracks; potential method; finite element

随着工业的快速发展，Q235 钢材逐渐应用到各行各业，一些重要行业对 Q235 钢材的要求也逐渐提高。在工程环境中，Q235 钢材的失效形式较多，主要有表面裂纹、腐蚀及器壁缺陷 3 种形式，其中表面裂纹失效占有较大的比例^[1-3]。目前，国内表面裂纹的主要检测方法有磁粉、渗透、超声、射线和声发射等。磁粉检测方法可以较好地检测铁磁性材料表面和近表面的裂纹，但对于 Q235 钢材表面裂纹的检测有一定的局限性^[4]。渗透法一般应用在均匀材料的表面裂纹检测中，但对于不开口近表面裂纹或表面具有涂层的裂纹检测效果一般，甚至检测不出^[5]。超声检测是一种基于超声波在缺陷处的反射、投射以及衰减现场的检测技术，可以很好地实现结构中体积型缺陷及开口裂纹等的检测，但难以实现结构早期损伤及裂纹的检测^[6]。射线法对工件表层下体积型缺陷很有效，但对裂纹等面积型缺陷的检测较困难，而且射线辐射危险，人体检测操作较难^[7]。声发射技术可用于疲劳裂纹检测，但抗干扰能力弱，难以对裂纹进行定量分析^[8]。

针对现有检测技术存在的一些不足，本文通过查阅有关资料，提出了一种适用于检测表面裂纹的直流电位法，并研究了理论上检测表面裂纹的可行性。本文选取 Q235 钢材平板，建立有限元仿真模型，利用有限元软件对直流电位法检测 Q235 钢板裂纹进行有限元模拟，得出不同深度、宽度、夹角的裂纹对直流电位法检测结果的影响，为直流电位法检测 Q235 钢板表面裂纹提供一定的理论依据。

1 检测原理和仿真模型

1.1 电位法检测原理

直流电位法又称直流电位差法或电导法^[9-11]，是基于试件导电性优劣的检测方法。当电流通过检测试件时，试件阻抗分布呈线性增大，试件表面电势分布减小，根据电位与电场成正比关系可知，电场分布减小。当试件上没有裂纹产生时，试件的电场线基本呈均匀分布；当试件含有裂纹或产生裂纹后，电场线分布改变，电位发生变化，导致两个固定位置之间的电势差发生变化。裂纹的位置、形状和尺寸不同，它对被检测部位电流和电位场的影响也不同，相应的电位变化也不同^[11]。因此，电位差可以当作表征裂纹的位置与尺寸参数的函数，通过测量和分析电位差信号，即可对构件表面裂纹的产生和扩展情况进行检测。

直流电位法检测原理如图 1 所示，外侧 C1 和 C2

分别为电流输入和输出，激励电流通过 C1、C2 加载在试块两端，内侧 P1、P2 为电压探针，其施加位置取决于裂纹在试块中的分布，在 P1、P2 间可取得一个信号电压^[12-16]： $U=IZ=I\sqrt{R^2+X^2}$ （ R 、 X 、 Z 分别为 P1、P2 间的电极两端电阻、等效电抗和等效阻抗）。 U 值的变化随着表面裂纹的尺寸、位置不同而不同，因此可通过测量 U 值的变化来确定裂纹位置和裂纹尺寸。

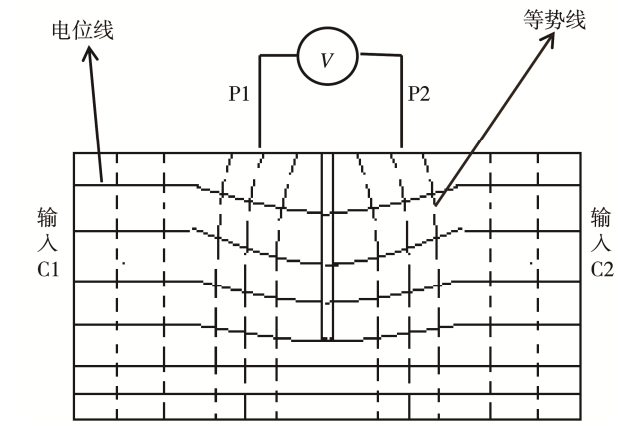


图 1 直流电位法测试件裂纹原理图
Fig.1 Schematic diagram of test piece cracks being tested in DC potential method

1.2 仿真模型

有限元仿真算法使用 COMSOL Multiphysics 的 AC/DC 模块建模。有限元模型与实际模型为 1:1 比例，设计三维试件模型尺寸（ $l \times w \times h$ ）：0.25 m×0.1 m×0.015 m。试件的电磁属性和力学属性如表 1 所示。

设置表面裂纹为矩形裂纹，以水平方向为裂纹宽度的参考方向（ $l \times w \times d$ ）：0.01 m×0.0005 m×0.0003 m。设计空气层模型尺寸（ $l \times w \times h$ ）为：2.5 m×1 m×0.15 m，设置 10 倍于试件的空气层模型，便于贴近真实检测环境，提高计算精度。试件使用自由剖分四面体极细化网格，空气层使用细化网格自由剖分，便于提高模型求解精度。使用物理场在试块一端施加+5 V 电压

表 1 Q235 钢材料参数 Tab.1 Parameters of Q235 steel material	
Material Property	Attribute Numericalization
Conductivity/(MS·m ⁻¹)	8.41
Relative permeability/(H·m ⁻¹)	1900
Relative permittivity	1
Yield strength/MPa	235
Tensile strength/MPa	375~500

和 $20\ \Omega$ 电阻, 另一端接地, 并对试块两端采用电流-电路耦合。空气层外表面使用狄氏边界(第一边界条件)约束。仿真模型的网格剖分如图2所示。

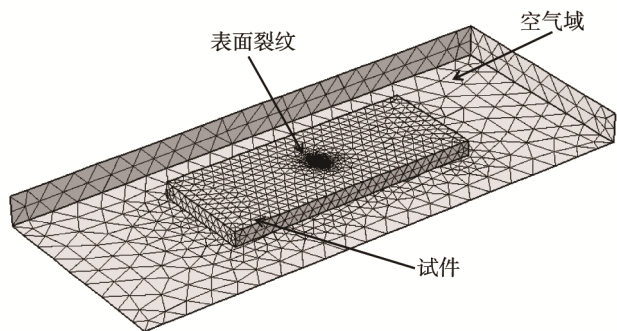


图2 仿真模型网格剖分
Fig.2 Mesh generation of simulation model

2 有限元仿真与结果分析

2.1 表面裂纹对检测的影响

图3为Q235钢平板表面存在裂纹时的电位分布。从图3中可以分析得到, 表面存在裂纹和无裂纹进行对比, 在裂纹处信号有明显变化, 且接近裂纹时表面电位分布逐渐平滑, 在裂纹处呈线性下降。当表

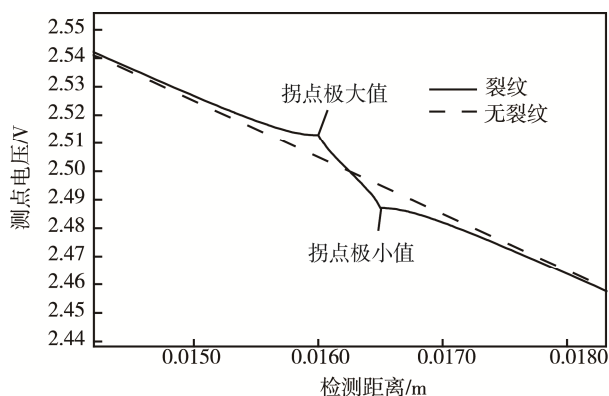


图3 表面存在裂纹和无裂纹的电位分布
Fig.3 Potential distribution of cracks and crack-free on the surface

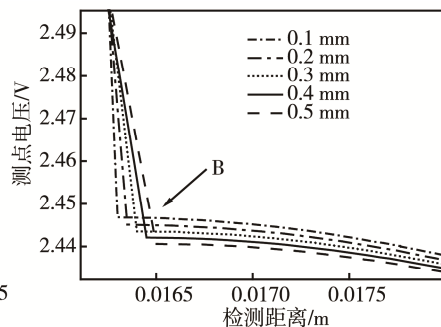
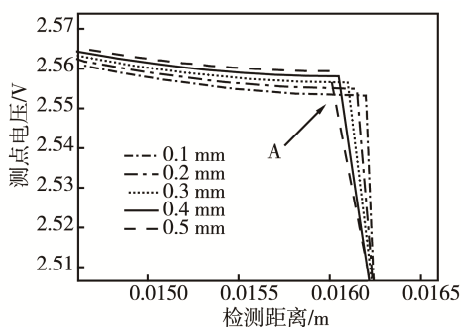
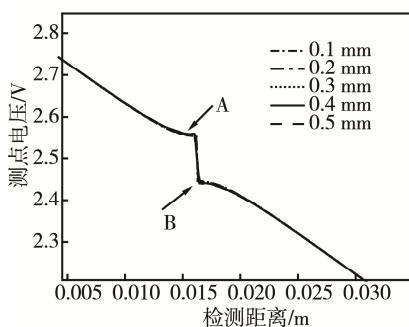


图5 不同裂纹宽度处的电压降
Fig.5 Voltage drop at different crack width

面存在裂纹时, 在裂纹两端处会存在极大值拐点和极小值拐点, 且两个拐点的存在可以确定裂纹的宽度, 为电位法检测表面裂纹以及确定裂纹大小提供了一定的依据。

2.2 不同裂纹宽度对检测的影响

使用有限元模拟设计5组不同宽度的裂纹, 分别是无裂纹和 $w=0.05$ 、 0.1 、 0.15 、 0.2 mm 的裂纹。采用迭代法使求解计算收敛, 后处理采用一组采样点数为200的三维截点, 并沿试件水平方向施加路径, 如图4所示。

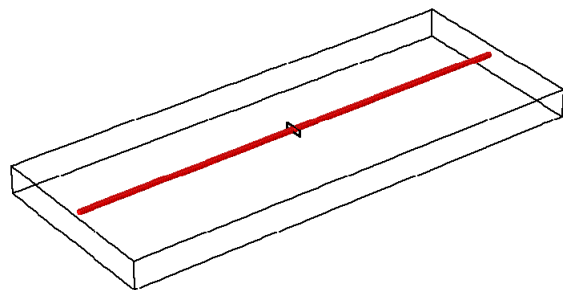


图4 采样路径
Fig.4 Sampling path

采集不同宽度裂纹的电压降数据, 不同宽度裂纹的测点电压如图5所示, 横坐标为检测距离, 纵坐标为测点电压幅值。由图5可知, Q235钢板无裂纹时, 电压成线性下降; 其表面存在不同宽度裂纹时, 在裂纹处出现突变电压, 并有极大值和极小值2个拐点, 分别在矩形裂纹两侧边缘。

将拐点极大值减去极小值, 可以得到裂纹两端的电压降, 如图6所示。由图6可知, 当裂纹宽度大于0且小于0.5 mm时, 随着裂纹宽度的增加, 拐点电压降信号经过最小二乘法拟合, 信号增大趋势接近指数函数, 其拟合关系式为: $y = -0.15917e^{-x/0.43954} + 0.15334$ 。当裂纹宽度大于0.5 mm并且小于2 mm时(超过2 mm的裂纹, 人眼可识别), 随着裂纹宽度的增加, 拐点电压降信号增大趋势逐渐平缓。

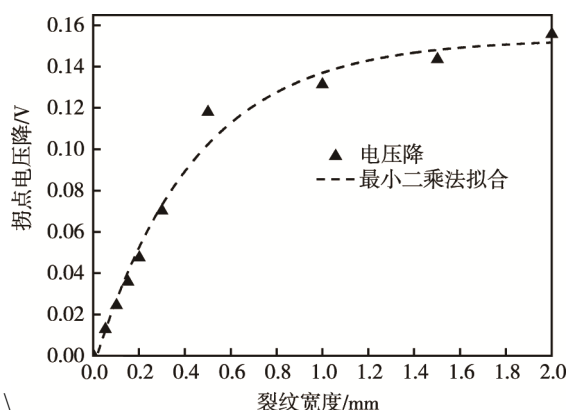


图 6 不同裂纹宽度对拐点差值影响

Fig.6 Influence of different crack widths on inflection point difference

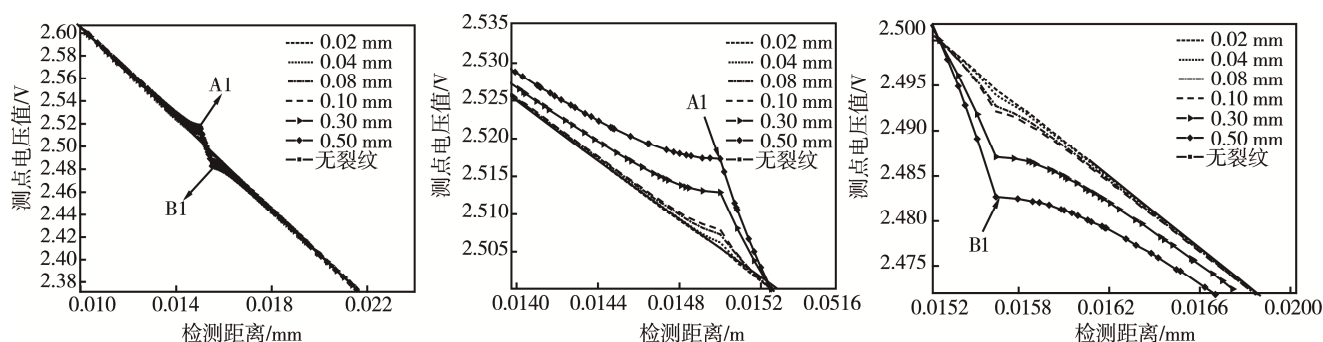


图 7 不同裂纹深度的电压降

Fig.7 Voltage drop at different crack depth

2.4 不同角度的裂纹对检测的影响

表面裂纹与电场施加方向的夹角 α 会使裂纹周围电场发生变化。裂纹尺寸为表面裂纹参考尺寸, 采集方向与电场施加方向一致。设计裂纹的角度: $\alpha=0^\circ$ 、 5° 、 30° 、 45° 、 90° , 夹角示意图如图 8 所示。

通过 MATLAB 分析处理数据, 如图 9 所示, 裂纹与水平电场的夹角 α 增大, 会引起电场矢量变化。从图中可以看出, 不同角度缺陷处的电场矢量分布密度均较密, 但方向不一样。裂纹夹角增大, 空间背景电场增大。

由图 10 可知, 随着夹角 α 的增大, 检出分辨率增加, 裂纹分辨率更加明显; 当夹角 α 为 0° 和 5° 时, 拐点极大值与极小值无法分辨, 电压降曲线近似线性

2.3 不同裂纹深度对检测的影响

不同的表面裂纹深度约束钢板的强度有所不同。设计 7 组对比裂纹, 模拟不同深度对直流电位法检测的影响。裂纹深度分别为: $d=0.02$ 、 0.04 、 0.08 、 0.1 、 0.3 、 0.5 mm。同样, 采用迭代法进行后处理计算, 路径设置如图 4 所示。通过 MATLAB 编程提取数据曲线特征值, 进行放大处理数据, 结果如图 7 所示。从图中可以看出, 随着裂纹深度的增加, 电位更早地出现平滑, 拐点差值也随之增大, 两拐点间的斜率同时增大。同时从图中可以看出, 当缺陷深度为 0.02 mm 时, 电位法能够精确检测缺陷变化引起的电压降在 $0\sim0.0005$ V, 可以检测微小缺陷, 为表面裂纹的检出率提供了可靠依据。

直线; 当夹角 α 大于 30° 时, 模拟信号较为明显, 分辨率较高。

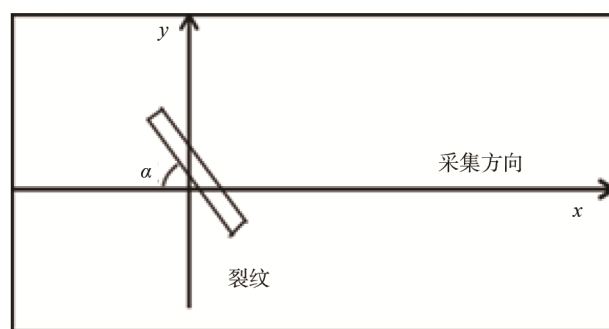


图 8 裂纹角度示意图

Fig.8 Schematic diagram of angle crack

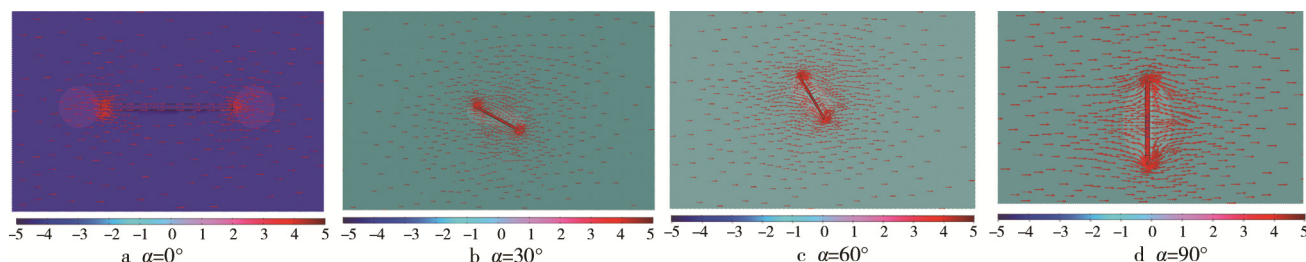
图 9 不同夹角 α 引起的电场矢量变化

Fig.9 Variation of electric field vector caused by different angles

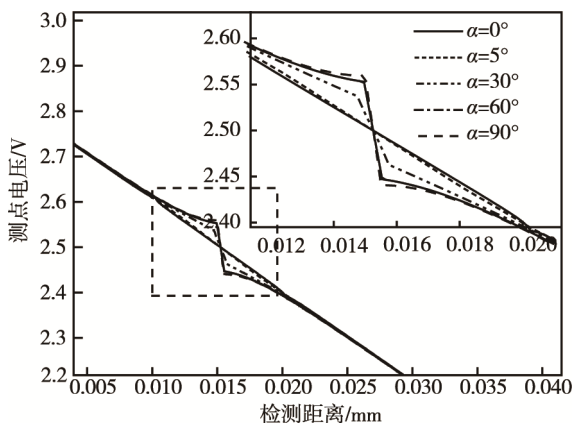


图10 裂纹与电场不同夹角的电压降

Fig.10 Voltage drop of angle between cracks and electric field

3 有限元模型数值解的验证

有限元模型的数值解验证方法是选取模型对其进行数值解的计算,将有限元程序算出的结果与解析解进行对比。验证模型示意图如图11所示,设计模型表面裂纹尺寸($l \times w \times d$)分别为:0.005 m×0.001 m×0.003 m、0.005 m×0.0008 m×0.003 m和0.005 m×0.0008 m×0.002 m。

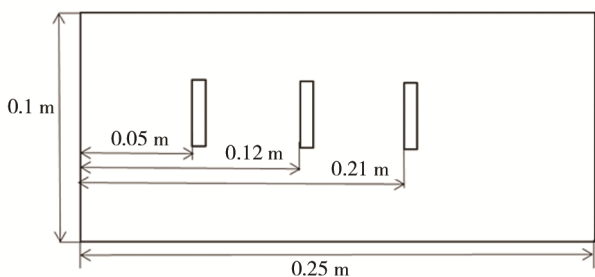


图11 Q235 钢裂纹试块

Fig.11 Q235 steel crack specimen

对于无裂纹的试件^[17],通过在试件的一端施加电流 I ,测得的电位差值 V_n 表示为: $V_n = \frac{\rho L}{S} I$ (式中, ρ 为材料的电阻率; L 为试件长度; S 为电流通过的横截面面积)。当试件表面存在裂纹时,施加相同的电流 I ,测得的电位差值 V_c 表示为: $V_c = \frac{\rho L_c}{S} I$ (L_c 为存在裂纹时电位间被延长了的电流流过距离, $L_c = L + 2D$; D 为裂纹深度)。

将有裂纹缺陷时的电位与无缺陷的电位做差值处理,并对电位差信号进行差分算法处理。通过 Matlab 编程实现解析解的计算,其裂纹两端的电势分布如图12所示。从图12中可以看出,每一个缺陷的云图信号呈现对称分布且幅值为正负对称,符合电场穿过试件缺陷后,电场线密度在缺陷处的变化,较好地展示了直流电位法检测表面裂纹的可行性。

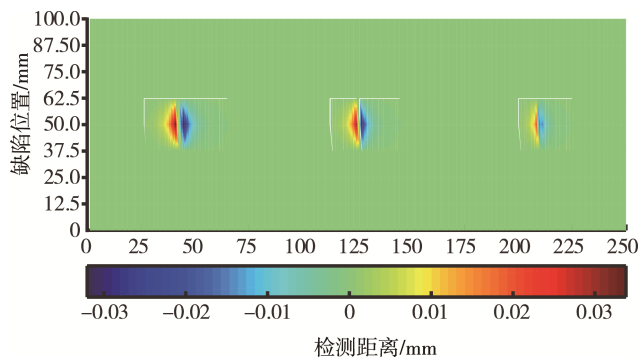


图12 解析解计算的裂纹两端电势分布

Fig.12 Potential distribution at both crack ends calculated based upon analytical solution

图13将解析解计算的裂纹两端的电位差与有限元计算的裂纹电位差进行比较。从图中可以看到,两种方式对裂纹的检测趋势一致,幅值稍有差异,在裂纹两端的检测信号异常。

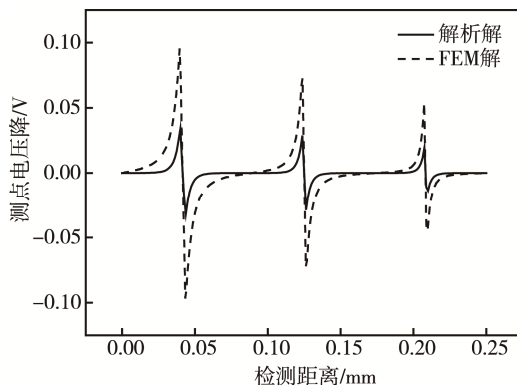


图13 解析解的验证

Fig.13 Verification of analytical solutions

4 结论

1) 设计优化的不同裂纹宽度和不同裂纹深度仿真,模拟电位差对裂纹深宽比的影响。裂纹深度不变,宽度越大,分辨率越高;宽度不变,深度越深,分辨率越高。

2) 深度和宽度不变,通过改变裂纹角度观察电场施加方向对检出裂纹的影响。当电场和裂纹的夹角 $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 时,电位变化明显,检出精度较高,检出效果较好。

3) 通过解析解计算与有限元计算对比,证明了有限元模拟电位法检测裂纹的可靠性,为直流电位法检测 Q235 钢材的表面裂纹提供了一种理论上的指导,具有较大的实际指导意义。

参考文献:

[1] 赵鹏,潘清红,邹宗树. Q235 钢板表面裂纹形成原

- 因分析[J]. 理化检验-物理分册, 2016, 52(3): 210-212.
- ZHAO Peng, PAN Qing-hong, ZOU Zong-shu. Formation Cause Analysis of Cracks on the Surface of Q235 Steel Plate[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2016, 52(3): 210-212.
- [2] 钱健清, 邹强, 罗秀梅, 等. 22 mm 厚 Q235B 钢板表面裂纹成因[J]. 理化检验: 物理分册, 2010, 46(6): 400-402.
- QIAN Jian-qing, ZOU Qiang, LUO Xiu-mei, et al. Formation Reason for Surface Cracks of Q235B Steel Plate with Thickness of 22 mm[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2010, 46(6): 400-402.
- [3] 赵乾, 李艳梅, 王豹, 等. 普通碳素钢板氢致冷弯裂纹研究[J]. 轧钢, 2009, 26(4): 10-14.
- ZHAO Qian, LI Yan-mei, WANG Bao, et al. Research on Hydrogen Induced Cold-bend Cracking in Carbon Steel Plate[J]. Steel Rolling, 2009, 26(4): 10-14.
- [4] 屈念文. 关于压力容器焊缝以及其附近微裂纹检测的分析[J]. 中国高新技术企业, 2012(30): 73-75.
- QU Nian-wen. Analysis of Welds in Pressure Vessels and Detection of Micro-cracks Nearby[J]. China High Technology Enterprises, 2012(30): 73-75.
- [5] 程树翔, 马晓梅. 压力容器焊缝及其附近微裂纹的检测[J]. 信息技术, 2001(11): 31.
- CHENG Shu-xiang, MA Xiao-mei. Detection of Pressure Vessels and Near the Weld Crack[J]. Information Technology, 2001(11): 31.
- [6] 焦敬品, 孙俊俊, 吴斌, 等. 结构微裂纹混频非线性超声检测方法研究[J]. 声学学报, 2013(6): 648-656.
- JIAO Jing-pin, SUN Jun-jun, WU Bin, et al. A Frequency-mixing Nonlinear Ultrasonic Technique for Micro-crack Detection[J]. Acta Acustica, 2013(6): 648-656.
- [7] 李培中, 于丛娟, 孙晓靖. 压力容器制造监检中发现的射线检测问题综述[J]. 中国特种设备安全, 2016(1): 37-41.
- LI Pei-zhong, YU Cong-juan, SUN Xiao-jing. Summary of the Question of Radiographic Inspection Found during Supervision Inspection of Pressure Vessel Manufacture[J]. China Special Equipment Safety, 2016(1): 37-41.
- [8] 骆志高, 李举, 王祥, 等. 声发射技术在疲劳裂纹检测中的应用[J]. 制造技术与机床, 2008(10): 134-136.
- LUO Zhi-gao, LI Ju, WANG Xiang, et al. Application of AE on Fatigue Crack Propagation[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(10): 134-136.
- [9] 王亮, 黄新跃, 郭广平. 直流电位法检测高温合金的疲劳裂纹扩展性能[J]. 理化检验: 物理分册, 2011(8): 480-482.
- WANG Liang, HUANG Xin-yue, GUO Guang-ping. Fatigue Crack Growth Behavior of Superalloy Detected by High Temperature Direct Current Potential Drop Method[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2011(8): 480-482.
- [10] 侯贵仓, 常小榕. 疲劳裂纹电位法测量研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21(4): 38-41.
- HOU Gui-cang, CHANG Xiao-rong. Investigation on an Electric Potential Difference Crack Length Measuring Procedure[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(4): 38-41.
- [11] 徐兴龙, 周好斌, 袁森. 脉冲电流与直流电流的阴极保护效果比较研究[J]. 表面技术, 2015(1): 133-135.
- XU Xing-long, ZHOU Hao-bin, YUAN Sen. Comparative Study on the Cathodic Protection Effect of Pulse Current and Direct Current[J]. Surface Technology, 2015(1): 133-135.
- [12] 丁传富, 王亮, 刘建中. 直流电位法自动检测高温疲劳裂纹长度的研究及应用[J]. 实验室研究与探索, 2007(10): 275-277.
- DING Chuan-fu, WANG Liang, LIU Jian-zhong. Investigation and Application of the DC-electrical Potential Difference Method to Automatic Fatigue Crack Length Measurements[J]. Research & Exploration in Laboratory, 2007(10): 275-277.
- [13] 王志涛, 韩文礼. 基于直流电位梯度法的滩浅海底管道外防腐层破损检测技术研究[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 134-138.
- WANG Zhi-tao, HAN Wen-li. External Coating Damage Inspection Technology for Submarine Pipelines in Paralitic Zone Based on DC Potential Gradient Method[J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 134-138.
- [14] 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(24): 122-125.
- NI Chen-qiang, XUE He, CUI Ying-hao. Analysis on Wire Layout in Crack Monitoring Test Using Direct Current Potential Drop Method[J]. Hot Working Technology, 2016(24): 122-125.
- [15] WU X, XIAO Y, QI C, et al. Computations of Secondary Potential for 3D DC Resistivity Modelling Using an Incomplete Choleski Conjugate-gradient Method[J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51(6): 567-577.
- [16] 李晓阳, 韩赞东, 冉刚, 等. 基于交流电位法的疲劳裂纹长度测量方法与装置[J]. 理化检验-物理分册, 2015, 51(8): 542-545.
- LI Xiao-yang, HAN Zan-dong, RAN Gang, et al. Measurement Method and Equipment of Fatigue Crack Length Based on Alternating Potential Method[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2015, 51(8): 542-545.
- [17] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- REN Ji-lin, LIN Jun-ming. Electromagnetic Nondestructive Testing[M]. Beijing: Science Press, 2008.