

# 在役高温蒸汽管道的交流电磁场检测

朱金朝<sup>1</sup>, 宋军昌<sup>1</sup>, 丁春晓<sup>1</sup>, 刘正存<sup>2</sup>

(1. 临沂市特种设备检验研究院, 临沂 276000; 2. 济宁鲁科检测器材有限公司, 济宁 272000)

**摘要:** 电站蒸汽管道系统长期处于高温、高压环境下, 易产生裂纹等缺陷, 甚至引发破坏性事故, 而该类缺陷的常规无损检测方法局限性较大。基于交流电磁场检测技术, 通过仿真研究工作表面电磁场变化规律, 制作高温探头及试块并进行检测试验, 验证该方法的有效性。试验结果表明, 采用交流电磁场检测技术可以实现高温蒸汽管道的在线检测。

**关键词:** ACFM; 高温; 仿真; 缺陷模拟

中图分类号: TG115.28      文献标志码: A      文章编号: 1000-6656(2022)12-0058-04

## ACFM detection of in-service high temperature steam pipeline

ZHU Jinzhao<sup>1</sup>, SONG Junchang<sup>1</sup>, DING Chunxiao<sup>1</sup>, LIU Zhengcun<sup>2</sup>

(1. Linyi Special Equipment Inspection and Research Institute, Linyi 276000, China;

2. Luke Testing Equipment Co., Ltd., Jining 272000, China)

**Abstract:** The steam piping system of the power station has been in a high temperature and high pressure environment for a long time, which is prone to cracks and other defects and lead to destructive accidents. Conventional NDT methods are limited. Based on the ACFM, the variation law of the electromagnetic field on the surface of the workpiece is studied by simulation. High-temperature probes and test blocks are made and tested to verify the effectiveness of this method. The test results show that the on-line detection of high-temperature steam pipelines can be realized by using the ACFM.

**Key words:** ACFM; high temperature; simulation; defect simulation

电站蒸汽管道系统长期处于高温、高压环境下, 易产生裂纹等缺陷而, 甚至引发破坏性事故, 直接影响锅炉的安全运行和整个热力发电系统的正常运转。目前系统的检测方法仍以停机检测为主, 为提高效率, 节约成本, 高温状态下的在线检测成为电站蒸汽管道系统无损检测技术的又一发展方向。

目前高温下蒸汽管道系统的无损检测方法有机器视觉检测法、磁粉检测法、涡流检测法、超声检测法、数字射线法等。机器视觉检测法设备复杂昂贵, 通常为生产过程中的自动检测线, 复杂工况下应用不便<sup>[1-2]</sup>; 高温磁粉检测技术自 21 世纪初就开始用

于压力容器制造过程中的焊缝检测<sup>[3]</sup>, 在压力容器、核电等领域应用较多, 但与常规磁粉方法相比, 灵敏度有所降低; 涡流检测在无损检测领域应用广泛, 但是目前的涡流传感器感应探头在高温下存在变形大、电磁特性易失效以及灵敏度低的问题, 高温下应用局限性较大<sup>[4-5]</sup>; 超声波检测技术是高温状态下缺陷检测应用最广的方法之一, 但受声能衰减、耦合剂耐热性能、探头寿命等因素影响, 仅仅在测厚及纵波探伤领域应用较多<sup>[6-7]</sup>。

通过仿真研究了温度对交流电磁场检测结果的影响, 设计了一种适用于高温环境的探头, 通过对模拟试块进行检测, 进一步分析了交流电磁场检测技术在高温环境下的检测效果。

## 1 交流电磁场检测原理

交流电磁场检测 (ACFM) 技术基于电磁感应原

收稿日期: 2022-08-13

作者简介: 朱金朝 (1966—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事特种设备的检验检测工作

通信作者: 刘正存, 1345354132@qq.com

理,激励线圈在工件中感应出均匀的交变电场,电场在缺陷位置外会出现扰动,引起此处感应磁场强度变化,通过检测感应磁场的变化强度及规律,可以实现缺陷的检测<sup>[8]</sup>。

交流电磁场检测原理如图 1 所示。

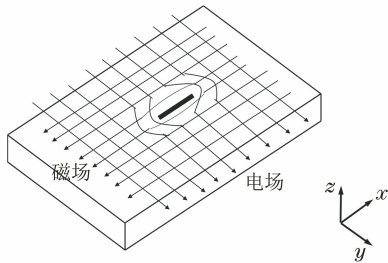


图 1 交流电磁场检测原理示意

## 2 仿真模型的建立

许多学者对 ACFM 技术常温下的检测原理,传感器选用,检测数据处理及检测设备的研发方面进行了大量研究<sup>[9]</sup>,但在高温下对金属结构进行 ACFM 检测的研究较少。金属材料,尤其是铁磁性材料,随着温度的升高,磁导率及电导率会发生变化,并对检测结果造成影响,但温度变化对材料性质的影响是有一定规律性的,即高温下的 ACFM 检测存在可行性。

### 2.1 几何模型的建立

为了研究高温蒸汽管道在线 ACFM 检测的可行性,利用 COMSOL 软件建立高温 ACFM 检测的有限元三维模型并进行仿真分析,模型包括感应线圈、被测金属和求解域 3 个部分(见图 2)。被检工件尺寸为 300 mm×200 mm×150 mm(长×宽×高),裂纹为长方体,尺寸为 5 mm×3 mm×0.2 mm(长×宽×高),磁芯为 U 型,求解域设置为 500 mm×400 mm×100 mm(长×宽×高)的长方体。感应线圈材料设置为铜,被测物材料设置为碳钢,求解域部分为空气。

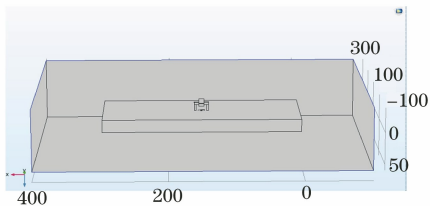


图 2 几何模型示意

对网格进行细化,几何模型的网格划分结果如图 3 所示,完整网格包括 24 056 个域单元,3 414 个边界元和 500 个边单元。

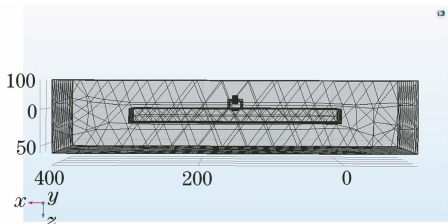


图 3 几何模型的网格划分结果

### 2.2 物理场选择及参数设定

在 COMSOL 软件中 AC/DC(交流/直流)模块选用磁场作为物理场,求解器设置为频域,频率设置为 1 kHz。将空气求解域的所有外边界设置为磁绝缘,矢量磁势  $A$  为零。感应线圈选择多匝线圈(匝数设置为 200),激励方式为电流激励,选择电流流通方向的横截面为输入面,电流大小设置为 200 mA。

### 2.3 求解及结果分析

设置温度及线圈距离工件高度(以下称提高高度)为变量,进行参数化扫描。

设置温度变化范围为 20 °C~820 °C(扫描步进为 20 °C),进行仿真计算。得到温度对  $B_x/B_z$  的影响曲线如图 4 所示,证明温度变化对缺陷位置磁场  $B_x$  及  $B_z$  信号的影响较小。通过对现场环境进行调研,结合设备能力,决定选取 20 °C~400 °C 的检测结果变化规律作为研究对象。

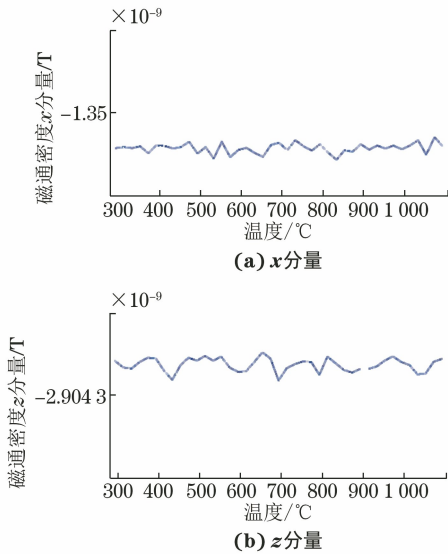


图 4 温度对  $B_x/B_z$  的影响曲线

设置提高高度为 1~10 mm(扫描步进为 0.5 mm),进行仿真计算。提高高度对  $B_x/B_z$  的影响曲线如图 5 所示,可见,随提高高度的增加,缺陷处电流密度减小,磁通密度也随之降低。结合提高高度仿真结果及实际加工能力,确定探头外壳厚度为 1 mm。

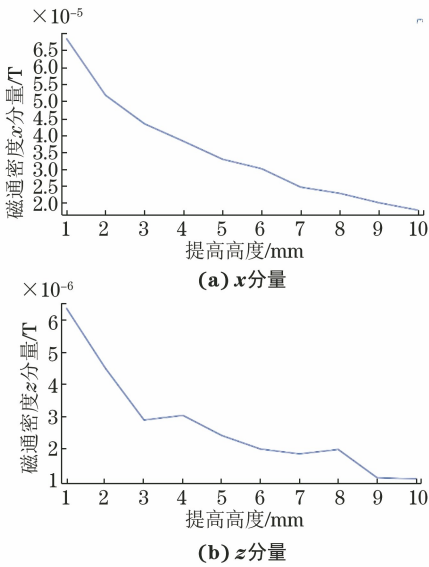


图 5 提高高度对  $B_x/B_z$  的影响曲线

3 ACFM 缺陷检测试验

3.1 检测装置及试块制备

根据在役蒸汽管道的形式,以材料为 20 钢,规格为  $\phi 159\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ (直径 $\times$ 壁厚)的钢管为试验对象,制作人工刻槽作为模拟缺陷,缺陷位于焊缝根部热影响区,缺陷尺寸及分布位置如图 6 所示,缺陷参数如表 1 所示。

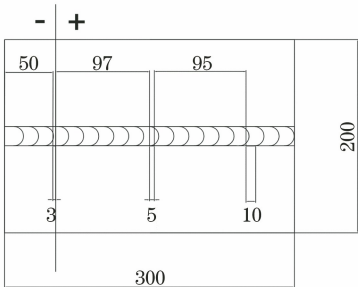


图 6 蒸汽管道模拟缺陷尺寸及分布位置示意

检测设备采用济宁鲁科检测器材公司生产的 LKACFM-X1 型交流电磁场检测系统。由于高温检测时探头外部温度较高,为防止内部线圈及传感器受热严重,选用气凝胶作为内部隔热介质。选用 peek(聚醚醚酮树脂)材料作为探头外壳材料,完成高温探头制作。

表 1 蒸汽管道模拟缺陷参数 mm

编号	缺陷长度	缺陷深度	缺陷宽度
缺陷 1	3	3	0.2
缺陷 2	5	3	0.2
缺陷 3	10	3	0.2

3.2 检测数据及分析

采用卡式炉对试块进行加热,使用红外测温枪测量温度,加热到所需温度后,将探头放置于工件需探测部位,双手扶持探头,在工件上进行匀速扫查,扫查速度控制在  $35\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,提高高度即为探头外壳厚度(1 mm),检测完成后记录相关数据。

使用常温探头对缺陷进行检测,管体温度从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,常温下检测信号变化明显,随着温度升高,受到探头本身性能限制,信号峰值及变化量逐渐降低,但仍可作为缺陷判定依据,常温探头检测结果如图 7 所示,常温探头  $B_z$  信号变化量随温度升高变化趋势如图 8 所示。

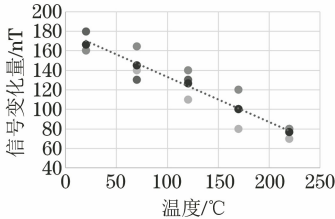


图 7 常温探头检测结果

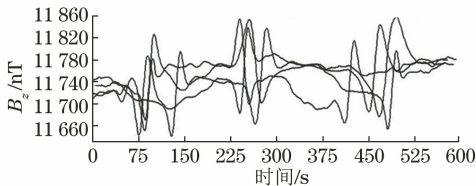


图 8 常温探头  $B_z$  信号变化量随温度升高变化趋势

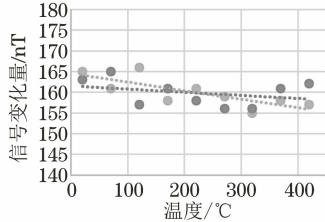


图 9 高温探头检测结果

使用高温探头对缺陷进行检测,管体温度从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,随着温度变化,信号峰值及变量无明显变化,缺陷检测效果较好。高温探头检测结果如图 9 所示,高温探头  $B_z$  信号变化量随温度升高的变化趋势如图 10 所示。

分析上述结果可知,温度升高会对金属材料的

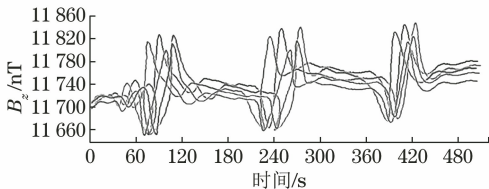


图 10 高温探头  $B_z$  信号变化量随温度升高的变化趋势

电磁特性产生影响,但对裂纹缺陷的检出影响不大。常温探头及高温探头的检测结果说明,高温对探头的影响大于对金属电磁特性的影响,改善探头高温性能可以作为解决 ACFM 高温检测问题的一个发展方向。

4 现场应用

对日照某电厂在役余热发电锅炉的高温蒸汽管道阀门进行了 ACFM 检测。阀门规格为 DN175,材料为 20G,服役温度为 340 ℃。其中两处(一处疑似缺陷,一处无缺陷)的 ACFM 检测图谱如图 11, 12 所示。

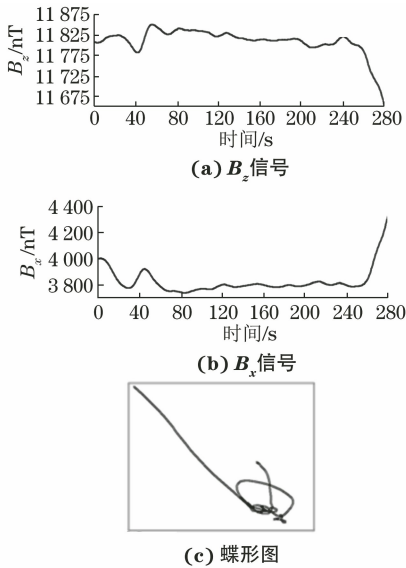


图 11 某处缺陷的 ACFM 检测图谱

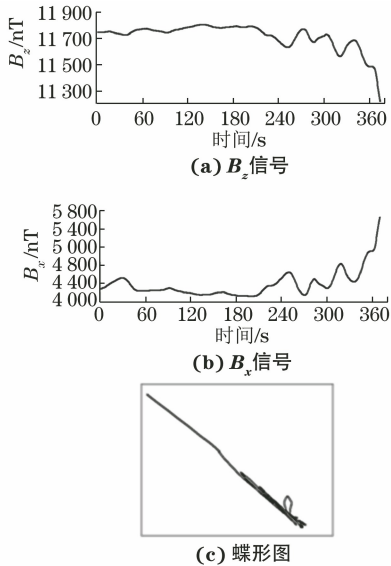


图 12 无缺陷的 ACFM 检测图谱

对疑似缺陷位置进行打磨,确定此处存在缺陷,



图 13 打磨前后缺陷形貌

缺陷类型为砂孔,直径约为 3 mm,打磨前后缺陷形貌如图 13 所示。

5 结论

- (1) 在 400 ℃ 温度范围内,温度变化对材料电磁特性及交流电磁场检测效果影响较小,提离高度的变化对交流电磁场检测效果影响较大。
- (2) 使用交流电磁场常温探头及高温探头对高温试块缺陷进行检测,均能获得清晰的缺陷信号,说明在 400 ℃ 以下,交流电磁场检测技术可以进行缺陷检测。
- (3) 常温探头在高温下检测时,温度对探头影响很大,检测效果不稳定。高温探头的温度特性好,对高温下的缺陷检测更有优势。

参考文献：

[1] 欧阳奇,张兴兰,陈登福,等. 高温连铸坯表面缺陷的机器视觉无损检测[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007,30(11):27-31.

[2] KOBAYASHI M, JEN C K, BUSSIÈRE J F, et al. High-temperature integrated and flexible ultrasonic transducers for nondestructive testing[J]. NDT & E International, 2009, 42(2):157-161.

[3] 金彦枫,张惠芳,张峥,等. 高温磁粉检测在压力容器制造中的应用[J]. 石油化工设备, 2012, 41(S1):48-50.

[4] 吕云腾. 高温电涡流位移传感器分析与设计[D]. 杭州:浙江大学, 2014.

(下转第 71 页)



6 结语

(1) 基于涡流检测的防打孔盗油专用管道内检测技术,研制了一种结构简单、通过能力强、检测里程长、检测效果好且施检方便快捷的内检测器,该检测器能够有效检测出管道上的打孔盗油特征,同时也能够检测一些典型的内壁缺陷,减少了检测成本,缩短了检测周期,能够及时响应检测计划。

(2) 可通过多轮次打孔盗油内检测数据建立数据库,将历次检测数据进行对齐和比对,建立盗油孔信号特征模型,以更好地提高盗油孔的识别概率和检测效率,减少经济损失及其引发的次发性危害。

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] 常番. “打孔盗油”的综合治理研究——以河北地区

为研究视角[D]. 北京:中国人民公安大学,2020.

[3] 刘文会,张丰,王军,等. 长输管道打孔盗油气监检测技术现状及展望[J]. 科技和产业,2021,21(6):246-249.  
[4] 邵卫林,陈金忠,马义来,等. 管道盗油孔的漏磁内检测信号识别[J]. 无损检测,2017,39(5):6-9.  
[5] 王方,邵宗宝. 长输石油管道打孔盗油的形式及安全修复对策[J]. 安全、健康和环境,2005,5(1):4-6.  
[6] 杨宾峰,罗飞路. 脉冲涡流无损检测技术应用研究[J]. 仪表技术与传感器,2004(8):45-46.  
[7] 游凤荷,蒋韬,孙砚飞. 脉冲涡流磁场特征分析[J]. 仪表技术与传感器,2003(5):38-39,50.  
[8] 杨理践,邢燕好,高松巍. 高精度管道漏磁在线检测系统的研究[J]. 无损探伤,2005,29(1):20-22,41.  
[9] 李春雨,马义来,张莉莉,等. 基于脉冲涡流的管道内检测系统设计[J]. 无损检测,2018,40(7):65-68.  
[10] 马义来,何仁洋,陈金忠,等. 基于 FPGA+ARM 的管道漏磁检测数据采集系统设计[J]. 无损检测,2017,39(8):71-74.

(上接第 41 页)

[8] 王斌,李升,朱富慧,等. 基于超声无损检测的扩散连接界面缺陷尺寸评估[J]. 焊接学报,2020,41(8):34-38,99.  
[9] 李圣贤,朱永凯,王海涛,等. 复合材料分层缺陷的激光超声检测[J]. 无损检测,2019,41(5):1-5,78.  
[10] 史俊伟,刘松平,刘菲菲,等. RTM 复合材料中分层缺陷的超声表征及量化分析[J]. 复合材料科学与工程,2020(6):68-73.  
[11] 高晓进. 金属夹心 CFRP 复合材料超声检测方法[J]. 声学技术,2019,38(5):526-531.  
[12] 史亦韦. 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材:超声检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005.  
[13] 刘海强,董德秀. 钎焊超声 C 扫描图像缺陷面积计算方法[J]. 无损检测,2014,36(2):53-55,59.

(上接第 61 页)

[5] 魏双盈,郑世权,龚辉,等. 连铸坯表面缺陷在线检测研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2009,31(3):433-436.  
[6] 李久政,康宜华,孙燕华,等. 基于信号源极值特征的钢管内外裂纹区分方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(12):75-78.  
[7] 杨理践,毕大伟,高松巍. 油气管道漏磁检测的缺陷量化技术的研究[J]. 计算机测量与控制,2009,17(8):1489-1491.  
[8] 袁新安,李伟,李文艳,等. 交流电磁场裂纹实时判定与评估方法[J]. 无损检测,2019,41(4):7-11,57.  
[9] 李伟,基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2007.

欢迎网上投稿      欢迎订阅      欢迎刊登广告