

# 远场涡流无损检测技术在电厂的应用研究

金万里

(淮南平圩发电厂 检修公司, 安徽 淮南 232089)

**摘要:** 远场涡流检测技术在国外发达国家中已充分应用于现场, 且收效显著。国内还处于研究认识阶段。本文针对远场涡流检测技术的理论作了分析研究, 并介绍首次应用在国产 60 万千瓦机组的高压加热器钢管的质量检验中所取得的良好效果。

**关键词:** 远场测量; 涡流; 理论分析;  
高压加热器; 钢管; 检验

中图分类号: TG115.28 文献标识码: B

## 1 前言

远场涡流 (RFEC) 检测技术是铁磁性管道在役检测的有效方法, 在 50 年代末曾被用于油井套管的检测。当时未被重视, 直到 80 年代中期随着远场涡流理论的逐步完善以及实验手段、试验方法的改进, 远场涡流技术用于管道, 特别是铁磁性管道检测的优越性才被人们广泛地认识。现在可以说远场涡流检测技术是最有希望用来对在役金属管道进行无损检测的方法, 可以延长那些已达到使用期限, 但仍安然无恙的管道的使用年限; 也可用于产品的质量检测。其潜在的经济效益相当可观。目前美国、英国、加拿大、日本等发达国家进行了大量的研究开发工作, 并将该技术应用于现场。我国也开始研究远场技术理论及应用, 且取得了很大进展。本文对远场涡流检测技术理论作了研究分析, 并阐述了远场涡流检测技术在国产首台 60 万千瓦机组的高加钢管检验中的应用及其取得的良好效果。

## 2 远场涡流检测技术的理论研究

远场涡流法属低频涡流检测技术。它的探头是内通过式探头: 由一个激励线圈和一个与该线圈相距约二倍内径长度处所设置的较小测量线圈构成。激励线圈通以低频交流电, 其磁力线能量流两次穿过管壁并沿管壁传播; 测量线圈能测到来自激励线

圈的穿过管壁后返回管内的磁场, 因而能以相同的灵敏度检测管子内外壁缺陷及壁厚减薄, 不受趋肤深度的限制。可有效检测碳钢或其它强铁磁性管子, 探头在管内摆动也基本没有影响检测效果。而普通的涡流检测技术是以电磁感应原理为基础, 在涡流检测线圈的激励绕组中通以交流电, 则会在被检试件中产生感应涡流, 且在其周围建立起一个交变涡流磁场反作用激励磁场, 经过反复多次达到动态平衡。当被测试件中存在缺陷时涡流流动发生畸变, 原来的平衡被破坏, 原线圈立刻会测到这种变化的涡流信号及线圈阻抗变化, 传送到微机记录分析, 从而判断出试件中是否存在“伤”。由此可见普通涡流检测技术就是接受被测物体反馈的涡流信号, 可是当被测物体出现量变时会导致检测线圈的阻抗变化, 从而影响涡流信号的输出。其影响因素很多: 主要有电导率 ( $\sigma$ )、磁导率 ( $\mu$ )、几何形状、温度、检测线圈与被测物体的相对位置、工件中的冷加工和热处理、应力、“伤”的非连续性及其信噪比等。由于诸多因素的干扰而使涡流检测仪器对检测的信号处理分析很困难, 采用远场涡流检测技术消除了干扰因素使得检测结果更加准确有效。现将远场涡流检测方法与普通涡流检测方法从理论上及实践应用中作对比分析。

由上述的远场涡流检测原理与普通涡流检测原理对比可见, 普通涡流检测技术靠仪器接受的涡流信号来分析, 而涡流信号和交流电一样具有趋肤效应, 涡流在被检物体上分布呈指数变化, 靠近线圈的表面涡流密度最大, 随着深度的增加呈自然指数规律衰减, 其标准渗透深度公式:  $\delta_{0.37} = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ , 式中  $\delta_{0.37}$ —标准渗透深度,  $f$ —电流频率 Hz,  $\mu$ —相对磁导率,  $\sigma$ —电导率。由上式可看出, 普通涡流检测受趋肤效应严重影响, 检测试件的深度极其微小, 通过计算和实际验证, 表 1 中几种导体的标准穿透深度更加显著。

表 1 几种导体的标准穿透深度

频率 Hz	Cu	Al	黄铜	Ag	Fe
50	9.33	11.68	17.96	9.08	0.72
105	0.21	0.26	0.4	0.2	0.02
106	0.07	0.08	0.13	0.06	0.01

另外由标准渗透深度 ( $\delta_{37}$ ) 可推导出穿透深度与电导率、磁导率及频率的平方根成反比。角频率  $\omega$  愈高, 磁导率  $\mu$  愈大, 穿透深度  $\delta$  愈小, 特别是铁磁性材料的磁导率变化范围非常大。在没有达到磁饱和时, 这些变化就掩盖了缺陷信号或电导率变化的信号而使普通涡流检测失效, 所以对铁磁性材料普通涡流探伤时必须应用磁饱和技术, 增设一个磁饱和线圈, 以降低干扰信号, 但效果不理想。而远场涡流检测技术是通过测量穿过管壁后返回管内的磁场, 故在检测技术理论上是一个新的突破, 不受趋肤效应的影响, 克服了电导率、磁导率的影响, 对检测铁磁性材料效果更加优越于普通涡流检测技术。同时普通的涡流检测技术对试件的几何变形、试件边缘末端及相对位置产生的提离效应都会产生一个畸变的涡流信号干扰检测信号; 材料的温度、应力变化、材料的冷加工热处理引起的变形及伤的非连续性和信噪比, 也改变试件的电导率、磁导率, 影响着涡流信号的产生, 造成普通涡流检测技术对检测结果判断困难。远场涡流检测技术消除了这些干扰。以上分析从理论上证明了远场涡流检测技术的优势, 实践中我们也做了大量的实验工作, 得到了科学依据。在平圩电厂高压加热器钢管质量检验中, 充分证明了其实用优势, 其优点如下:

- (1) 检测结果可以直接用电信号输出, 因此可以进行自动检测;
- (2) 由于采用非接触式方法, 检测速度快;
- (3) 适用范围广, 除能检测缺陷外, 还能检测材质变化、尺寸形状的变化等;
- (4) 特别适合管材、线材的检测, 与传统的漏磁、渗透、超声等方法比较, 该法使用简捷、方便, 消耗品费用少;
- (5) 对碳钢或其它强铁磁性管子的蚀坑、裂纹等缺陷的检测十分有效;
- (6) 安全, 防护简单不会对人体造成伤害。

### 3 远场涡流技术的开发与应用研究

平圩电厂高压加热器钢管规格为  $\Phi 16 \text{ mm} \times$

2.11 mm, 材质为碳钢 U 型管; 1990 年初投产到 1998 年 9 月, 累计运行 3.5 万小时, 均发生不同程度的泄漏。根据高加采用的碳钢管材分析, 其发生泄漏的原因主要有四种: 弯曲应力、热应力, 冲刷减薄及腐蚀。它们将导致管子产生蚀坑裂纹, 甚至断裂等, 严重时甚至造成高加筒体爆破。远场涡流检测可以快速、准确检出这些缺陷。为保证机组的经济运行, 定期对其实施检测十分必要, 为此, 决定在 1998 年 9 月趁机组大修期间对其进行检测, 在检测之前我们做了大量的实验工作: 选取了高加原泄漏管段第 N 排 42<sup>#</sup> 长 1.5 m, 用普通涡流检测仪 EEC-31D 型检测频率 20 kHz, EF-556H 便携式远场涡流检测仪, 检测频率 350 Hz, 采用同一标样管把  $\Phi 2$  通孔的相位调整为  $40^\circ$ , 内插式探头, 对取样管检测做对比分析, 远场涡流仪检测结果发现了取样管有 3 处明显的缺陷信号反应: 1 点处是已泄漏处裂纹, 相位是  $38^\circ$ ; 2 点处仪器显示的相位是  $29^\circ$ ; 结合图形分析为内壁腐坑裂纹, 深度为壁厚 70%; 3 点处相位是  $120^\circ$ , 判定是外部凹坑, 经目视观察属安装或取样时碰伤; 再用普通涡流检测仪检测时, 缺陷信号的显示已不是简单的缺陷显示, 而是较为复杂的叠加信号, 探头稍抖动, 信号变化相当混乱, 在检测到原泄漏处缺陷时, 相位为  $85^\circ$  的不规则信号图形, 其余检测信号无法分析。于是我们选定远场涡流检测出的 2 点处进行解剖做进一步宏观和微观分析, 其宏观形貌: 管内壁有锈蚀坑存在, 且坑内有裂纹自内向外扩展, 末稍圆钝具有应力腐蚀裂纹形貌特征, 深度基本与远场涡流检测的相符。微观上通过 S-570 型电子显微镜扫描分析: 裂纹是沿晶扩展, 与应力腐蚀机理相吻合。因此我们可知应力腐蚀造成的沿晶裂纹改变了样管的电导率再加上高加钢管是铁磁性材料, 其磁导率  $\mu \gg 1$ , 影响了涡流信号的产生, 导致普通涡流检测的准确性难以辨析。而远场涡流检测是涡流探伤技术上的革命, 消除了伤信号以外的其它干扰信号, 大大地提高了涡流检测的准确度。故在理论上和实践中都奠定了远场涡流检测技术应用基础。

## 4 高加钢管的远场涡流检测的工艺

### 4.1 使用的检测设备

ET-556H 便携式远场涡流探伤仪, 外径  $\Phi 10 \text{ mm}$  的远场探头及磁饱和差动探头。检测频率  $f_1 = 350 \text{ Hz}$ , 磁饱和法检测频率  $f_1 = 100 \text{ kHz}$

### 4.2 远场涡流检验的方法

采用远场涡流法磁饱和和探头法检验在役热交换器钢管, 效果良好, 它可以解决铁磁性材料由于磁导率  $\mu \gg 1$ , 而渗透深度极薄及磁导率不均匀引起较高噪音信号的问题。另外由于远场涡流检测法中检测线圈测量的物理量与普通涡流法不同, 不是测量线圈的阻抗值, 而是测量检测线圈的感应电压和激励信号的相位差。后者不能对缺陷的深度进行定量, 也不是易检测到支撑板及管板下的缺陷。而使用磁饱和和探头法是在探头内部安装高强度稀土永久磁铁, 从而将要检测的局部管壁磁化并达到饱和状态。当被检管壁基本处于磁饱和状态时, 磁噪音被抑制, 这时信号的幅值将取决于缺陷体积大小, 而信号的相位主要由缺陷的深度决定, 这与非铁磁性管子的涡流检测情况类似。

检测采用标定管是将  $\Phi 1.2 \text{ mm}$  通孔信号的相位调整为  $40^\circ$ ,  $\Phi 2 \text{ mm}$  通孔信号的相位大约是  $38^\circ$ , 并做出相位——缺陷深度曲线, 据此, 可精确地确定缺陷的当量大小及缺陷深度占壁厚的百分比。

#### 4.3 涡流检验标准

目前, 在役热交换器管的检验还没有标准。通常参考 GB/T 7735—87《钢管涡流探伤方法》, 该标准制定时采用阻抗分析技术的涡流仪, 当时远场涡技术还未出现。对缺陷的评定只考虑了反映缺陷体积的信号相位, 没有顾及到反映缺陷深度的信号相位, 因而有其局限性。随着远场涡流技术的开发和应用, 在缺陷评定上我们制定了如下原则:

- (1) 缺陷信号幅值超过  $\Phi 1.2 \text{ mm}$  通孔的为记录标准(不论缺陷深度大小)。
- (2) 缺陷信号幅值超过  $\Phi 2 \text{ mm}$  通孔的为堵管标准(不论缺陷深度大小)。
- (3) 缺陷深度超过 50% 壁厚的为记录标准(不论其信号幅值大小)。
- (4) 缺陷深度超过 80% 壁厚的为堵管标准(不

论其信号幅值大小)。

根据标准在探伤过程中凡发现超过堵管标准的信号显示时, 而探伤人员无法确定为非相关信号时, 一律判废。

## 5 检验结果

按照上述的缺陷评定标准, 1 号高加未发现超过记录标准及堵管标准的管子。

2 号高加建议堵管 5 根, 监督运行 5 根。

3 号高加建议堵管 3 根, 监督运行 2 根。

同一根管段上有的存在多个缺陷。但每根管段上的典型缺陷多数分布在距管口 300 mm 的位置。

## 6 高压加热器钢管的质量分析

高压加热器钢管的泄漏与其运行状况紧密相关, 高加在运行中具有如下特点:

(1) 进出水流对管板的冲击造成较大的管板弯曲应力, 导致管板与管板胀接处萌生裂纹, 并向内延伸。

(2) 疏水区域由于疏水不良, 造成管段腐蚀, 特别是汽水两相混合区域尤为严重。

(3) 进水室管口向内 300 mm 的管段存在水流的冲刷减薄, 乃至开裂。

鉴于上述特点, 今后的检查范围重点是整个下水室, 管口向内 300 mm 的管段。

通过此次对高加钢管的远场涡流探伤检查及采取了相应的措施, 保证了高压加热器安全稳定地运行, 也给远场流检测技术应用在电厂钢管质量检验奠定了基础, 为类似高压加热器的热交换器钢管的质量控制提供了良好的方法。

(复 编辑)

### 工程消息

## JIM3 将向连云港核电站供应两台汽轮机

据“Modern Power Systems”1999 年 9 月号报道, 俄罗斯 JIM3(列宁格勒金属工厂)已从原子能建造出口公司赢得一份金额为 1 亿 2 千万美元的合同, 为正在建设的中国连云港核电站提供两台额定功率为 1 000 MW 的汽轮机。

(思娟 供稿)

150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —93 ~ 95

This paper describes a portable flue-gas analyzing device, detailing its composition, operation principle, functions and usage conditions. The recommended device can be employed to conduct experimental research of the combustion process and the commissioning test of power generation plants. **Key words:** data acquisition, flue gas analysis

125 MW 汽机快冷系统的设计和使用 = **Design and Operation of a 125 MW Steam Turbine Rapid-cooling System** [刊, 汉] / Diao Xiang-dong (Anhui Provincial Electric Power Design Institute, Hefei, Anhui Province, China, Post Code: 230022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —96 ~ 98

A relatively detailed description is given of the design and installation of a steam turbine rapid cooling system now in operation at Suidong Power Plant, including an analysis of the temperature dropping process of a turbine cylinder. On the basis of relevant data the cost-effectiveness and operation safety of the rapid cooling system have been validated. **Key words:** steam turbine, rapid cooling system, turbine cylinder temperature drop, turbine cylinder differential expansion

国产 50 MW 汽轮机轴端汽封的改造 = **Modification of the Shaft End Gland Seal of a Chinese-made 50 MW Steam turbine** [刊, 汉] / Cai Guo-liang (Guangzhou Yuancun Thermal Power Generation Co. Ltd., Guangzhou, China, Post Code: 510655) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —99 ~ 100

Two Chinese-made 50 MW steam turbines suffered from a high leakage of shaft end gland seal steam and an excessively low vacuum in the condenser. On the basis of a formula for calculating gland seal leakage an analysis was conducted of the various influencing factors of the gland seal leakage. This has been done in the light of the operating condition of the gland seal system as well as its structural parameters (tooth type and quantity) and mounting clearance. As a result, the basic cause of the problem has been determined. This was followed by a modification of the original gland seal construction as well as its fabrication material and mounting clearance. The operation results after the above modification show that the gland seal leakage problem has been solved with significant energy-savings being attained. **Key words:** 50 MW steam turbine, shaft end gland seal, modification of gland seal

远场涡流无损检测技术在电厂的应用研究 = **The Applied Research of Remote-field Eddy Current-based Non-destructive Inspection Technology at a Power Plant** [刊, 汉] / Jin Wan-li (Huainan Pingwei Power Plant, Huainan, Anhui Province, China, Post Code: 232089) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —101 ~ 103

Remote-field eddy current-based non-destructive inspection technology has been widely used in advanced nations with significant effectiveness. However, in China the application of this technology still remains at an investigation and research stage. The authors have made an analytical study of the theory of the above-mentioned technology and reported its effective use for the first time in the quality inspection of steel tubes of a high-pressure heater for a 600 MW power plant. **Key words:** remote-field eddy current, measurement, theoretic analysis, high-pressure heater, steel tube, check and inspection

SHW46-1.6/150/90-A II (65 吨) 型热水锅炉研制 = **The Development of a Model SHW46-1.6/150/90-AII Hot-water Boiler** [刊, 汉] / Ding Li-qun, Wang Wen-yu, Dong San (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), Qiao Li-ying (Harbin Heavy Machinery Works, Harbin, China, Post Code: 15000), Sun Hong-tao (Industrial Boiler Co. under the Harbin Boiler Works, Harbin, China, Post Code: 150030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —104 ~ 105

This paper covers the development and manufacture of a 65 t/h reciprocating grate boiler along with a narration of the authors' design experience. It can serve as a guide during the design and fabrication of large-sized natural circulation hot-water boilers. **Key words:** natural circulation, reciprocating grate, boiler, design