

锅炉水冷壁管沉积物下腐蚀损伤特征及其超声检测

龙会国^{1,2}, 邓宏平², 何鹏飞², 杨湘伟^{1,2}

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007;

2. 湖南省湘电锅炉压力容器检验中心有限公司, 长沙 410007)

摘要:通过金相、扫描电镜、超声波检测等试验,对某锅炉 20 G 钢水冷壁管内壁介质沉积物下腐蚀损伤特征及其超声技术进行分析。结果表明:水冷壁管内壁沉积物下腐蚀产物氢元素与钢中渗碳体反应,造成内部组织脱碳、空隙,沿晶产生裂纹并扩展,材料力学性能降低。横波超声检测对水冷壁氢腐蚀裂纹比较敏感,5 MHz、K1 及小晶片尺寸的横波探头能对材质损伤裂纹进行可靠检测,根据超声检测波形特征及缺陷回波波幅当量值,能很好地反映其氢腐蚀及裂纹扩展程度。

关键词:锅炉水冷壁;沉积物下腐蚀;超声检测

中图分类号: TG115. 28, TB302. 5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)06-0019-05

Characteristics of Corrosion Damage under the Deposition in a Boiler Water-cooled Wall Tubes and its Ultrasonic Testing Technique

LONG Hui-guo^{1,2}, DENG Hong-ping², HE Peng-fei², YANG Xiang-wei^{1,2}

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Research Institute, Changsha 410007, China;

2. Hunan Xiangdian Boiler & Pressure Vessel Test Center Co. Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: The steam-side corrosion damage characterization and ultrasonic testing technique of the internal surface of water-cooled wall tube made of 20G steel removed from boiler of some power plant had been investigated by metallurgic inspection, scanning electron microscope-energy dispersive and other tests. The examination results showed that the reaction process of hydrogen and cementite in grain boundary caused decarburization of water-cooled wall tube, void fraction and grain boundary cracks initiation and propagation, and mechanical performance degradation. Due to the fact that the ultrasonic transverse wave is sensitive to the hydrogen corrosion cracks, small chip size of transverse wave probe of K1, 5MHz frequency is used to test the corrosion grain boundary cracks, showing high reliability. The wave form characteristics of the echo by hydrogen corrosion cracks in the samples and its equivalent amplitude can be used to assess the degree of hydrogen corrosion cracks.

Keywords: Boiler water-cooled wall; Under the deposition corrosion; Ultrasonic testing

由于水质原因或排污不畅会造成的锅炉水冷壁管内壁沉积污垢,在高温运行过程中水冷壁管内壁发生腐蚀而造成壁厚减薄及氢腐蚀裂纹,锅炉进而造成爆管故障。

国内外一些学者对水环境下锅炉水冷壁腐蚀机理及腐蚀特征进行了研究^[1-3],对氢腐蚀裂纹提

出了不同的超声波检测方法,通常为速度比率法、衰减法以及反向散射法^[4-6],但均存在一定的局限性。

速度比率法在氢腐蚀后期以及在形成了大面积氢腐蚀裂纹且要使声速均匀降低时运用比较成功,但不能发现氢腐蚀前期及单个氢腐蚀裂纹或气孔。衰减法需要被检部件与超声波传感器相对的一面是光滑的,但是现场水冷壁管外壁表面相对粗糙,内壁由于存在腐蚀,相对也比较粗糙,粗

收稿日期: 2013-08-13

作者简介: 龙会国(1978—),男,高级工程师,硕士,主要从事电力系统金属检验,失效分析与焊接工作。

糙表面造成超声波散射,使衰减法的可靠性难以保证。背散射法对于氢腐蚀裂纹比较敏感,但对于材料内部的其它缺陷也比较敏感,分辨比较难,利用背散射回波难以评价腐蚀裂纹的程度。利用纵波直探头检测法,则结合面难以满足检测要求,难以评价腐蚀裂纹程度。

为此,作者通过对某在役锅炉水冷壁内壁沉积物下腐蚀裂纹管取样,对其管样内壁腐蚀裂纹特征进行分析,并对横波超声波检测水冷壁管氢腐蚀裂纹工艺及波形特征进行探讨分析。

1 试验设备及材料

1.1 试样准备

某电厂锅炉为超高压自然循环汽包炉,燃烧器四角布置,过热器出口蒸汽压力为 13.7 MPa,蒸汽温度为 540 ℃。在设计煤种下,50% 负荷至满负荷下,水冷壁设计工质温度为 294.7~341.7 ℃。

累计运行逾 5.8×10^4 h,水冷壁发生 5 次泄漏。泄漏位置均为标高 15~20 m 之间,位于水冷壁高热负荷区域。泄漏部位均为向火侧纵向裂纹,内壁均存在较厚腐蚀氧化层及不同程度溃疡性腐蚀坑,背火面内壁则未发现明显腐蚀氧化层现象。泄漏管外壁存在黑色致密氧化膜,管子均无明显胀粗现象。

取样管为左侧水冷壁从左向右数第 63 根,左侧水冷壁共 121 根,标高约 20 m,规格为 $\phi 60 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$,材料为 20 G 钢。

1.2 试验方法

利用 LECO-500 金相显微镜对管子内壁腐蚀组织形态进行分析,利用扫描电镜进行显微组织分析,利用室温拉伸试验机测水冷壁管的力学性能。

选取无腐蚀水冷壁管做超声检测对比试样。根据标准 JB/T 4730—2005《承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测》承压设备无缝钢管超声检测规定的试块制备要求,制备检验纵向和横向缺陷所用的人工缺陷对比试块。纵向和横向缺陷分别平行于管轴的纵向槽口和垂直与管轴的横向槽口,其断面形状采用 V 形槽。纵向槽在试样的两端内、外表面各加工一个深 0.3 mm,长 40 mm 的 V 形槽。横向槽在试样的中部外表面、对面内表面各加工一个深 0.3 mm,长 40 mm 的 V 形槽。

试验仪器为汉威 HS610e 型,试样表面为喷砂处理,耦合剂为机油,表面补偿为 0 dB。

2 结果分析

2.1 腐蚀氧化损伤特征

对水冷壁管背火侧及向火侧分别取样,进行室温拉伸试验,结果如表 2 所示。所有取样管,室温力学性能符合标准 GB5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》的要求,向火侧力学性能指标均较背火侧低,可见向火侧材质劣化相对严重。

表 1 取样管母材力学性能

性能	抗拉强度/MPa	延伸率/%	硬度/HB
向火侧	455.3	26.2	143
背火侧	468.7	32.8	151
GB5310—2008	410~550	≥ 24	/

使用 X 射线衍射仪(XRD)对向火侧内壁沉积物表面剥落物进行物相分析,发现主要成分为 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 及少量的 Na、Zn、Ca、Mg 等磷酸盐,即锅炉水冷壁管内壁沉积物主要由氧化铁垢、磷酸盐垢混合而成。

图 1(a)所示为背火侧内壁金相组织,组织为铁素体+珠光体,具有明显的带状特征,内壁未见脱碳现象,且未见显微裂纹。

图 1(b)所示为向火侧内壁金相组织,组织为铁素体+珠光体,有带状组织迹象,但未见明显的渗碳体带状组织,且存在严重脱碳和沿晶微裂纹。

图 1(c、d)为 4% 硝酸酒精溶液侵蚀的水侧氧化膜截面形态,氧化膜具有明显的二层结构。氧化膜厚度:背火侧约为 0.05 mm,向火侧约为 0.56 mm。氧化膜截面形态:向火侧与背火侧存在明显差异,向火侧外层、内层厚度均明显增厚,且内层存在明、暗相间的层状结构。可见,向火侧沉积物下腐蚀改变了内氧化层的形态。

从图 2(a)所示水冷壁管向火侧内壁沿晶微裂纹分布形态可知,沉积物下腐蚀后材料损伤裂纹分布形态与珠光体分布形态基本一致,且裂纹均在晶界处珠光体侧萌生,显微裂纹边界呈白亮色。可见,微裂纹是由于沿晶处珠光体中渗碳体的迁移、反应,造成脱碳而产生的,且具有明显氢脆特征。

对该锅炉炉水取样进行分析,结果如图 3 所示,炉水 pH 值在 9.17~9.48 范围内,符合设计及 GB/T 12145—2008《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》要求。 PO_4^{3-} 质量浓度在 2.4~5.87 mg/L

范围内,平均值为 3.12 mg/L,运行最高值达 5.87 mg/L,超出了 GB/T 12145—2008 标准规定的不大于 3 mg/L 要求。

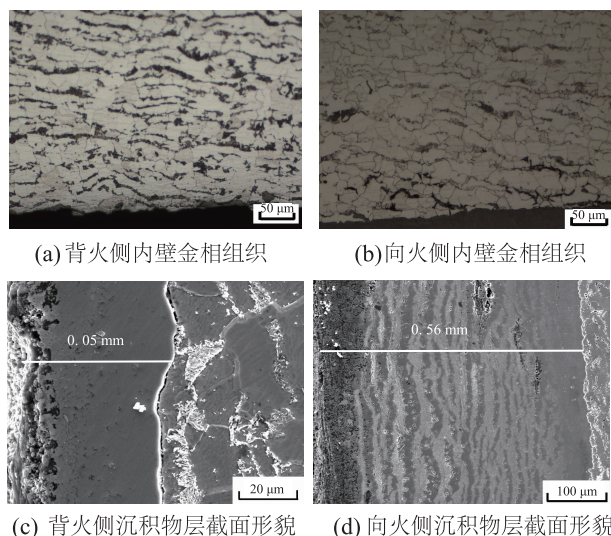


图1 水侧沉积物腐蚀层下内壁金相组织及氧化膜截面形貌(4%硝酸酒精溶液)

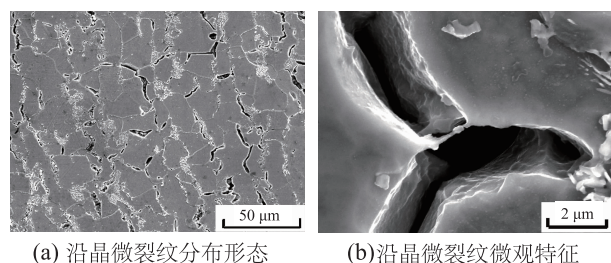


图2 沉积物腐蚀下向火侧内壁组织扫描电镜图

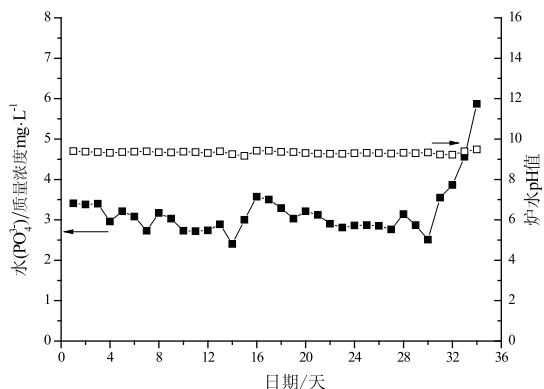


图3 锅炉运行某期间内炉水中 PO₄³⁻ 含量与 pH 值

分析可知,内壁沉积物下腐蚀损伤特征为:管内壁均存在较为严重的腐蚀氧化膜,沉积物下管材内壁组织存在严重脱碳、沿晶微裂纹现象,沿晶裂纹形态与原始组织中珠光体形态保持一致。相对背火侧而言,向火侧材料力学性能劣化较为严重,

其内壁硬度相对降低,从长期炉水品质统计结果看,水质存在异常现象。

2.2 超声波检测工艺参数

由于水冷壁管壁厚一般小于 20 mm,且沉积物下腐蚀发生在管内壁,其氢腐蚀造成的微裂纹发生在管内壁,逐渐向外壁延伸,则横波超声波频率选 5 MHz,对于该水冷壁管检测灵敏度及分辨率较佳^[7]。

由于探头 K 值对裂纹检测灵敏度有较大的影响,随着 K 值减少,裂纹检出率越高,灵敏度越高^[8],因此选用 K 值为 1 的探头。

为了减少超声检测近场区的影响范围,选用小晶片尺寸探头,晶片尺寸不大于 64 mm²,推荐选用晶片尺寸为 6 mm×6 mm 的探头。

2.3 仪器调整及灵敏度的确定

2.3.1 横向缺陷检查灵敏度的确定

根据被测管的外径,对探头进行修磨,使探头与检测面紧密接触。利用 DL/T820《管道焊接接头超声波检验技术规程》的 DL-1 型专用试块测定探头参数、系统组合性能及校准时基线性,即对超声波探伤仪及探头系统性能进行校准,调好零偏并测量探头前沿及实际 K 值。

距离-波幅曲线按横向槽对比试块中内壁槽、外壁槽的一次、二次反射波实测数据绘制,作为检测时的基准灵敏度,检查灵敏度在基准灵敏度的基础上增加 6 dB。

2.3.2 纵向缺陷检查灵敏度的确定

利用 CSK-1A 试块对超声波探伤仪及探头系统性能进行校准,调整好零偏并测量探头前沿及实际 K 值。

根据被测管的外径,在纵向槽对比试样管子纵向外径上对探头进行修磨,使探头与检测面紧密接触。

距离-波幅曲线按纵向槽对比试块中内壁槽、外壁槽的一次、二次反射波实测数据绘制,作为检测时的基准灵敏度,检查灵敏度在基准灵敏度的基础上增加 6 dB。

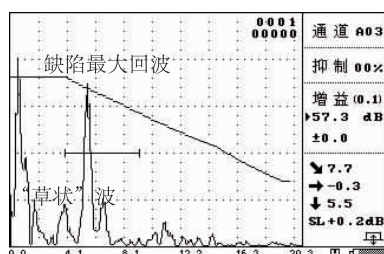
2.4 水冷壁管沉积物下腐蚀裂纹的超声波形特征

对该电厂锅炉水冷壁管标高 21 m 以下向火侧进行 100% 超声波检查,共发现 30 根管存在严重内壁腐蚀微裂纹的情况,且均在标高 15~21 m 间,其中前墙 8 根、后墙 8 根、左墙 12 根、右墙 2 根。现场割管后,对检测发现缺陷的标识部位内部进行宏观检查,内壁均存在较厚的氧化膜,且均存在不同程度的溃疡性腐蚀坑,并随即选取了该批管中编号为

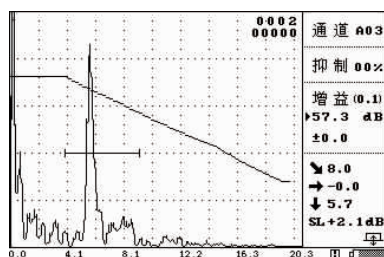
左侧水冷壁从左向右数 63 根作为取样管进行腐蚀损伤特征分析。

为了便于对氢腐蚀裂纹超声波检测典型波形进行分析,采用 0.3 mm V 型槽的 DAC 曲线,如图 4 所示。

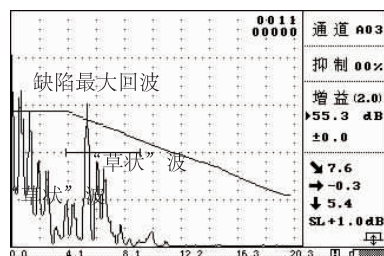
图 4(a)所示为前墙左数某根腐蚀裂纹横向缺陷检查波形,波形中有一最大裂纹缺陷波形(缺陷最大回波),其前后均存在不同程度的“草状”波。前后移动探头,均出现不同程度的“草状”波,且最大裂纹缺陷波及“草状”波的深度均在壁厚之内。



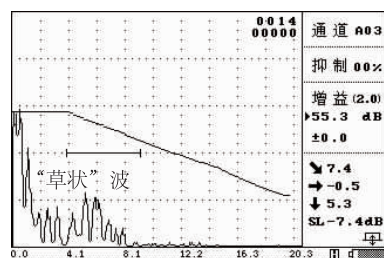
(a) 前墙管横向缺陷



(b) 前墙某根管纵向缺陷



(c) 后墙某根管横向检测



(d) 左墙某根管横向检测

图 4 不同水冷壁内壁腐蚀裂纹超声波检测波形特征

如管壁厚为 6.5 mm, 则缺陷最大回波及“草状”深度均在 6.5 mm 之内。此处缺陷最大回波当量为 0.3 mm 槽+0.2 dB, 深度为 5.4 mm, 在 6.5 mm 之内均存在不同程度的“草状”波, “草状”波幅的高度及与 DAC 曲线的相对值即为“草状”波幅相对应的微裂纹当量值。

图 4(b)所示为某根腐蚀裂纹纵向缺陷检查波形图, 纵向缺陷检查时波形与横向缺陷扫查时相类似, 即缺陷最大回波前后均存在不同程度的“草状”波, 当前后移动探头时, 也均有不同程度的“草状”波出现。缺陷最大回波及“草状”波深度均在管壁厚之内; 如此处水冷壁管壁厚为 6.5 mm, 则缺陷最大回波及“草状”波深度均在 6.5 mm 之内。此处主波缺陷的深度为 5.3 mm, 在 6.5 mm 之内均存在不同程度的“草状”波。由于水冷壁管在运行过程承受内压作用, 其理论计算周向应力是径向应力的 2 倍。周向应力作用纵向截面, 径向应力作用环向截面, 因此, 氢腐蚀裂纹向纵向扩展相对快些, 纵向缺陷扫查时一般比横向缺陷扫查时缺陷最大回波当量值稍大, 此处纵向缺陷扫查时最大缺陷回波当量值为 0.3 mm 槽+2.1 dB。

图 4(c)(d)所示为典型的内壁氢腐蚀裂纹超声缺陷波形图。其中图 4(d)中未发现明显主裂纹缺陷回波, 说明其腐蚀程度较轻, 微裂纹还未扩展, 在该区域前后、左右移动探头检测时, 均能发现密集的“草状”波, 其“草状”回波当量在 0.3 mm 槽-16 dB 时, 即能判断其存在氢腐蚀裂纹现象。

分析可知, 水冷壁内壁腐蚀裂纹超声波检测波形特征为:

(1)“草状”波密度大, 波形密集, 探头前后、左右移动检测时其“草状”波继续出现。这是由于水冷壁管内壁腐蚀造成的氢腐蚀裂纹及脱碳区域较大, 很难有单独的点缺陷存在, 沉积物下氢腐蚀造成了更多的沿晶微裂纹。

(2)波形光滑, 波形顶部较尖锐, 具有明显裂纹波形特征, 波形根部较宽, 回波波形与密集气孔回波类似。这是由于氢腐蚀造成的脱碳或沿晶微裂纹时, 其脱碳空隙或沿晶微裂纹空隙充满甲烷气体, 造成内表面较光滑, 而当氢腐蚀扩展为微裂纹时, 其裂纹尖端回波较为尖锐。

(3)氢腐蚀下微裂纹均从内壁向外壁扩展, 且周向应力是径向应力的 2 倍, 微裂纹在运行应力下纵向扩展的程度相对大些。因此, 氢腐蚀下微

裂纹深度均在壁厚范围内,且纵向缺陷扫查时缺陷最大回波当量值比横向缺陷扫查时缺陷当量值大。

(4)由于氢腐蚀下区域较大,很难单独存在点状的沿晶裂纹,因此,移动探头前后扫查时,其“草状”波在一定区域内不间断地出现。

3 结论

利用频率为 5 MHz、K1 及小晶片尺寸横波探头,可以快速检测锅炉水冷壁内壁腐蚀裂纹。水冷壁内壁腐蚀超声波检测波形特点:最大裂纹具有顶部较尖锐、波形光滑、前后均存在不同程度的“草状”波;“草状”波具有密度大、波形顶部尖锐,具有裂纹波特征,根部较宽,与密集气孔回波类似;氢腐蚀下微裂纹回波深度均在壁厚范围内,且纵向缺陷扫查时缺陷最大回波当量值比横向缺陷扫查时大,探头前后移动检测时其“草状”波不间断地出现。

参考文献:

- [1] 徐洪. 高压锅炉水冷壁管碱腐蚀诊断与机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 183-187.
- [2] DOOLEY R B, PATERSON S. Proceedings of the 55th international water conference[C]. //Pittsburgh, PA. 1994.
- [3] 侯祥松, 史翊翔, 杨景标. T91 煤粉锅炉水冷壁结垢腐蚀情况及其原因分析[J]. 电站系统工程, 2007, 23(2): 26-28.
- [4] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] 李大东. 加氢处理工艺与工程[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [6] 李晓刚, 陈华, 谢根栓, 等. 20G 钢氢腐蚀的超声背散射检测[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1994, 6(2): 179-183.
- [7] 龙会国, 龙毅, 陈红冬, 等. 铝母线焊缝超声波检测工艺参数的选择[J]. 无损检测, 2013(2): 41-47.
- [8] 龙会国, 邓宏平. 电站锅炉小径管焊缝超声波检测技术[J]. 锅炉技术, 2012, 43(4): 59-62.

2014 全国特种设备安全与节能学术会议暨展览会征文与招展通知

由国家质量监督检验检疫总局科技委特种设备安全与节能专业技术委员会和特种设备科技协作平台共同主办、中国特检院等 50 多家特种设备检验检测机构支持的 2014 全国特种设备安全与节能科技活动周将于 2014 年 11 月 20—30 日在广东举行。本届科技活动周是 2012 年在海口举办的全国特种设备安全与节能科技活动周的继续, 预计将有来自全国特种设备行业的 800~1 000 人参加活动, 其主题是“推进科技创新, 引领特检未来”, 旨在通过一系列活动, 交流最新特检科技成果, 培育科技创新环境, 不断促进特检科技进步。

本届科技活动周期间将举办 2014 全国特种设备安全与节能学术会议和全国特种设备科技成果与仪器展。会议的征文内容为在国内外杂志和学术会议上未发表的有关锅炉、压力容器、压力管道、电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施、场(厂)内专用机动车辆、大型常压储罐和大型钢结构等设备的设计、制造、安装、检验检测、使用、安全监察和

节能监管等环节的安全和节能技术研究和应用的论文。展览会招展范围为有关锅炉、压力容器、压力管道、电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施、场(厂)内专用机动车辆、大型常压储罐和大型钢结构等设备的设计、制造、安装和检验检测等方面的新成果、新技术、新产品和先进的检验检测仪器设备等。

本次活动周是 2014 年度我国特种设备行业一次盛大的活动, 真诚邀请您踊跃投稿和参展, 详细信息请登陆中国特种设备科技协作平台门户网站 www.setp.org.cn。

会议和展览秘书处联系方式:

地址: 北京市朝阳区和平街西苑 2 号楼, 邮政编码: 100013; 联系人: 吴 莱, 张 硕; 电话: 010-59068302, 59068108; 传真: 010-59068113; 电子邮箱: aqyjn_setp@163.com(学术会议), kjcgz_setp@163.com(科技成果展)。

(中国特种设备科技协作平台)