

电站锅炉无损检测技术

李 兵, 沈功田, 周裕峰, 李邦宪

(中国特种设备检测研究中心, 北京 100013)

摘 要: 电站锅炉是电站的三大主机之一, 由于其结构较为复杂, 所处环境和工况十分恶劣, 因而运行过程中具有潜在的泄漏甚至爆炸的危险性。所以, 通过合理有效的无损检测手段对锅炉主辅机及其零部件的制造、安装及定期检验来对其质量进行控制, 以期降低事故率, 保证其安全运行具有很大的意义。综述了电站锅炉主辅机及其零部件的制造、安装及运行过程中采用的各种无损检测技术的特点和目的。采用的无损检测技术除常规的无损检测方法外, 还包括 X 射线实时成像检测技术、系列的各种自动超声检测技术及定量光谱分析技术等。

关键词: 无损检测; 电站锅炉; 制造; 安装; 在线检测

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)08-0426-05

Nondestructive Testing Technique for Power Station Boiler

LI Bing, SHEN Gong-tian, ZHOU Yu-feng, LI Bang-xian

(China Special Equipment Inspection and Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: Power station boiler is one of the three main equipments in the power station. As its complicated structures and badly operation environment, so many potential risk such as leakage even bomb exist in the operation process. How to choose reasonable and effective inspection methods in the manufacture, installation and period inspection to guarantee the quality is very important. The characters of some routine and new inspection methods in the manufacture, installation and period inspection process for the power station boiler are briefly introduced. Additionally, the aim to choose such methods is also explained. Except for some routine testing methods, some new testing methods such as real-time X-ray imaging technique, auto-ultrasonic testing technique and material positive identification(PMI) technique are also included.

Keywords: Nondestructive testing; Power station boiler; Manufacture; Installation; On-line inspection

电站锅炉是一种直接受火焰加热的高温高压的特种设备, 具有泄漏和爆炸的潜在危险, 世界上的工业发达国家很早就颁布有相关的法规、规范及标准对其设计、施工安装、运行及检验等过程进行了严格控制, 以确保其安全运行。我国电站锅炉的安全管理及检验检测的法规和标准主要为《特种设备安全技术监察条例》《蒸汽锅炉安全技术监察规程(1996年版)》《电力工业锅炉压力容器监察规程(1998年版)》《火电施工质量检验及评定标准(管道篇)(2002

年版)》及国家质量技术监督局锅炉压力容器监察局颁发的 1999 年版《锅炉定期检验规则》等^[1~3]。为了确保设备的安全运行, 在设备的设计、制造、施工安装及定期检验的整个过程中, 需要通过一定的非破坏性措施或检测方法, 来预先发现安全隐患, 对设备的质量进行提前控制, 无损检测技术在质量控制过程中就发挥着这样的作用。下面将根据电站锅炉的制造、安装和检验的不同阶段所采用的不同无损检测技术分别介绍。

1 电站锅炉制造过程中的无损检测技术

电站锅炉主要由“锅”和“炉”两部分组成, 常见的结构由炉膛、省煤器、集箱、除氧器、锅筒、过热器、

收稿日期: 2006-07-04

作者简介: 李 兵(1977~), 男, 工程师, 主要从事锅炉压力容器、大型常压储罐和长管拖车的无损检测与安全性分析的检验和研究工作。

再热器及各类管件几大部件组成。上述部件主要由一些压力容器和管道部件组成。因为制造过程直接决定了设备部件的初始情况,也会对后续的运行和检验造成直接影响,因此从最初的制造过程采取合理的无损检测技术手段来控制锅炉部件的制造质量具有重要的意义和作用。采用的无损检测技术除了常用的目视、测厚、磁粉、渗透、涡流、射线和超声检测外,还有 PMI(Material Positive Identification)材质鉴别技术及各类自动化程度相对较高的磁学和声学检测技术等。在具体制造过程中,根据设备构件的不同及可能出现的缺陷形式进行针对性的选取。

1.1 电站锅炉用钢管的无损检测技术

电站锅炉常用的管材为无缝管,无缝管主要用于一些设备组成件部分,如过热器和再热器的管程部分以及水冷壁和冷凝器等。无缝管的制造过程一般主要包括棒材的下料、热致成形、化学清洗、多次拉拔成形、热处理及精确成形等加工过程。对无缝管采用的无损检测方法一般有涡流和超声波探伤方法。涡流检测是利用材料表面近表面缺陷处会形成畸变的涡流场,通过相应的装置提取缺陷处的涡流参量来对缺陷进行检测和识别,目前大部分管件制造厂已形成自动检测流水线及相应的自动分选系统;超声波探伤是通过外加的探头等设备对材料或设备施加超声波,通过提取和识别材料内部的不连续异质界面的反射回波等信号来达到对缺陷的不连续性进行检测。对无缝管来说,常见的超声波检测方法有液浸法或接触法。液浸法检测是通过使用线聚焦或点聚焦探头来发现纵向缺陷,接触法检测使用与钢管表面耦合良好的斜探头或聚焦斜探头来进行检测。

对于电站用无缝钢管及锻件管的对接环焊缝通常除了采用射线、超声、磁粉及渗透检测四项常规检测方法外,目前还有其它各类自动化检测技术。对管道的射线及超声检测技术采用 JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》进行。具体方法的选用及依据视具体的情况和各方法的特点进行组合应用。目前对于一些制造厂的大批量、形状规则的焊接管,已采用 X 射线实时成像检测技术对环焊缝或规则的焊缝进行质量控制。

1.2 电站锅炉用板材的无损检测技术

电站锅炉及其附件用板材的制造过程质量控制及验收标准主要是参照 GB 713—1997《锅炉用钢板》及 YB(T)41—1987《锅炉用碳素钢及低合金钢

厚钢板》进行。具体的无损检测操作标准按 JB/T 4730—2005 标准进行。目前,对于一些大型的制造厂,钢板的自动化超声检测发展较快。由于钢板具有形状规则、结构尺寸相对较为单一、探伤工艺相对较为简单等特点,故比较适于自动化超声探伤。对于板材的超声探伤多以内部不连续的单个缺陷的指示长度、指示面积及单位面积上不连续性的指示面积百分比来对板材工件的质量进行评价。具体的检测方法因设备系统的不同而异,但是结果评价方法则按 JB/T 4730—2005 标准的要求进行。

1.3 电站锅炉用锻件的无损检测技术

电站锅炉用锻件主要包括各类法兰、三通、弯头、封头及大轴等,有时一些厚壁的管道元件也采用锻件,其制造和验收标准主要是参照 JB/T 9626—1999《锅炉锻件技术条件》执行,相应的检验检测项目除了宏观、力学、理化和硬度以外,主要是通过超声波检测进行质量控制。具体的检测操作方法按照 JB/T 4730—2005 标准相关的要求进行。一般采用纵波直探头对加工过程中的实心锻件进行检测,根据锻件的形状不同,选用不同的探头及探伤工艺进行检测。对于重要的锻件有时要求多探测面多探头检测,采用横波斜探头对内外径之比 $<80\%$ 的环形或筒形锻件进行周向检测。

1.4 电站锅炉用棒材的无损检测

钢棒材主要用于锻件和螺栓的制造。对于直径 $>\phi 50\text{ mm}$ 的钢螺栓件通常需采用超声纵波单晶直探头或双晶直探头检测的方法来发现锻件中的危害性气孔、疏松、偏析和夹杂等冶金缺陷。一般对加工过程中的实心锻件进行直探头检测,采用横波斜探头对内外径之比 $<80\%$ 的环形或筒形锻件进行周向检测,具体的检测方法参照 JB/T 4730—2005 标准及 DL/T 930—2005《整锻式气轮机实心转子体超声波检验技术导则》的要求进行。

2 电站锅炉安装过程中的无损检测技术

由于电站锅炉是一套很大的装置,在制造厂内只能制造各个大的部件,大量工作需要在现场进行组装完成。现行电站设计施工验收标准主要依据《特种设备安全技术监察条例》《蒸汽锅炉安全技术监察规程》《电力工业锅炉压力容器监察规程(1998年版)》《火电施工质量检验及评定标准(管道篇)(2002年版)》和 DL/T 5007—1992《电力建设施工及验收技术规范(火力发电厂焊接篇)》等文件中对

焊缝无损检测的具体规定执行,通常执行的更为详细的操作及评定行业标准依据国家质检总局质检办特函(2006)144号《关于锅炉压力容器安全监察工作有关问题的意见》应为JB/T 4730—2005标准。以下介绍几种常用的无损检测方法。

2.1 目视检测

目视检测是通过裸眼或低倍的5或10倍的放大镜对各类组件或焊缝的结构及外表面状况进行观察,以确认不允许的锈蚀、组织疏松、凹坑或裂纹等缺陷存在的一种检测方法。

2.2 表面检测

常用的表面检测技术包括磁粉、渗透及涡流检测。磁粉检测是一种适合于铁磁性材料的表面和近表面缺陷的检测技术,磁粉探伤系统包括磁粉探伤机和磁悬液,常见的磁轭湿磁粉检测又分为黑磁粉和荧光磁粉检测;渗透检测是适合于非多孔性表面开口缺陷的检测技术,常见的溶剂清洗型渗透探伤系统由清洗剂、渗透剂及显像剂组成。根据渗透剂的不同,又分为荧光渗透剂和普通渗透剂;涡流检测适合于规则形状的导电管材、棒材或线材的表面和近表面缺陷的检测。各类表面检测技术的操作方法、要求及结果评价方法依据JB/T 4730—2005标准执行。

2.3 射线检测

射线检测过程中,应根据工件和源的种类或射线机的特点以及技术条件的要求选择适宜的透照方式。射线因源种类及底片质量级别要求不同,其能够透射的工件厚度的范围是不同的。X射线探伤机的能量一般在50~450 kV的范围内,适用于厚度<50 mm钢板的单面透照和<20 mm钢管的双面透照;常用的 γ 射线源 ^{75}Se 、 ^{192}Ir 和 ^{60}Co 的透照厚度因源的种类不同而异。由于 γ 射线源的几何尺寸小、能量高,既适用于X射线机和人无法进入的开口小的部位,也适用于X射线无法穿透的厚壁材料,同时工作时不需要电源,且工作效率较高,因此适合于现场作业。但是 γ 射线源的不足就是对人体辐射危害大,同时透射底片的灰雾度大、灵敏度相对较低,需要对底片系统的级别进行要求。对于厚度>200 mm对接焊缝的射线探伤必须采用射线加速器才能进行,常用射线加速器的能量在1~12 MeV,可检测钢板的厚度范围为40~380 mm。电站锅炉射线检测的结果按照DL/T 821—2002《钢制承压管道对接焊接接头射线检验技术规程》

及JB/T 4730—2005标准进行检测和结果评价。

2.4 超声检测

目前电站锅炉安装过程中常用的超声检测方法为A扫描,但常规的A扫描超声波探伤具有缺陷结果显示不直观、探伤技术难度大及探伤结果不易保存等缺点。近年来,结合各种数字图像处理技术,全自动超声波技术发展迅速。各种B扫描、C扫描和P扫描技术日趋完善和成熟。同时多探头、多扫描方式组合的超声回波检测(PE)技术及日渐成熟的超声波衍射回波技术、低频超声技术等也在近年来逐步得到完善,进一步充实了超声波检测技术的内容。目前,全自动超声检测技术在国外已被大量地应用于规则元件的纵焊缝及环焊缝检测。与传统的手动超声检测和射线检测相比,其在检测速度、缺陷定量准确性、减少环境污染以及降低操作人员的作业强度等方面均有着明显的优点。如全自动相控阵超声检测系统就是采用区域划分的方法,按照厚度的不同将焊缝分成垂直方向上的若干个区,每个特定的探头覆盖一定的区域,各区稍有叠加以达到能够对被检对象进行100%扫查覆盖的目的,再由探头辅助系统来控制相控阵多套探头分别对其控制的区域进行时分分区的扫查,对扫查的结果进行数字图像处理后即可得到以双门带状图显示的扫查结果。TOFD(衍射时差法)检测系统也是一套全自动超声波检测系统,当探头对埋藏缺陷发射声波时,在缺陷的上下两端会相应的有衍射回波传播,通过接收该衍射回波即可达到对缺陷进行检测的目的。但是到目前这些新的超声波探伤技术都没有具体的标准规范可以依据,基本上停留在企业标准和操作指导书的水平上,而对成熟的电站对接接头手动超声波A型检测目前主要是按照DL/T 5048—1995《电力建设施工及验收技术规范》及JB/T 4730—2005标准进行检测。

2.5 定量光谱分析技术

在电站锅炉的安装过程中,对原材料的控制直接影响锅炉的安全运行。目前常见的材料鉴别技术除谱线分析仪器看谱镜和化学分析外,近年来发展较快的有PMI材料鉴别技术。

PMI定量光谱分析技术是基于光谱分析的原理,通过一定的装置激发元素谱线,通过分光设备进行分光,用光电法测量分析线和预置的内标线强度比或和相应数据的符合程度,再通过一定的处理求出被分析元素的含量并进行显示的方法。该装置达

到了材料化学成分的定量直读。其相对于常规的化学或物理分析方法具有设备轻巧、操作方便、定量准确的优点,更加适合于电站锅炉的现场安装、定期检验及制造厂的原材料检验。常见的金属材料 PMI 仪器按其分析能力大致可分为两类,即全定量分析仪和便携式半定量仪器;按照采样方式可分为电极激发燃烧式和荧光激发式(X 和 γ 射线源)等。所谓全定量仪指将被检测固体试件作为一个电极,通过电极激发的方法使元素发光并进行采样、分光及后续处理的仪器。该类仪器可一次完成金属和非金属元素的定量分析;而半定量仪器指通过电极激发燃烧或荧光激发的方式使得元素发光并进行采样、分光及后续处理的仪器,该类仪器只能完成大部分金属元素的定量分析。

全定量仪器主要用于重要部件的元素分析,该类仪器具有分析准确,可一次完成全部元素含量分析的优点,在工程上已部分用来替代取样化学分析法,其相对于取样化学分析方法具有不破坏金属构件,可直接对现场已安装好的金属部件进行最终检验等优点,从根本上杜绝了可能存在的过程因素而导致的材料错用问题的发生。但是,目前已知的该类仪器多具有结构复杂、操作繁琐、不适合在线检验、试件表面质量要求高、需氩气保护、仅有交流电源及影响检验结果的不确定性因素较多等缺点。

便携式半定量光谱分析仪多具有体积小、重量轻及操作简单等特点。该类仪器多采用电极或荧光(X 和 γ 源)激发的方式进行采样,且多由电池直接供电,具有分析速度快、操作简单、环境适应性强等优点。但该类仪器只能进行金属元素的定量分析及显示材料参考牌号,因此对需要进行非金属元素分析的重要结构件或稀少的金属部件,仍需采用全定量分析仪或二者结合的方式进行。

3 在用电站锅炉定期检验的无损检测

电站锅炉定期检验的主要目的是为了保障锅炉的安全运行,防止各类事故的发生。目前指导电站锅炉定期检验的主要文件依据是《特种设备安全监察条例》《蒸汽锅炉安全技术监察规程》及《锅炉定期检验规则》。按照《锅炉定期检验规则》的内容,电站锅炉的定期检验工作分为外部检验、内部检验和水压试验三种。根据各类部件的检验重点及检验项目,常用的无损检测技术除了常见的宏观检查、厚度测定、硬度测定、表面磁粉检测、表面渗透检测、金相

检测、超声检测及射线检测外,还经常会用到化学成分定量光谱分析、铁素体含量测定、涡流检测、磁记忆检测、声发射检测、红外热成像检测、漏磁通检测、导波检测、管道猪检测、激光超声检测及内外腐蚀检测等一些相对较为先进的检测手段。

3.1 漏磁通检测技术

漏磁通检测技术主要用于检测电站设备或相关管道的腐蚀缺陷检测,漏磁通检测设备的工作原理是利用自身携带的磁铁,在设备圆周上产生一个纵向磁通回路场,如没有缺陷,则磁力线封闭且均匀分布;如内壁或外壁有缺陷,则磁通路变窄,磁力线发生变形,部分磁力线将穿出相应部件的表面而产生漏磁场。漏磁场会被位于两磁极之间的紧贴的探头检测到。对该检测信号进行一定的数字信号处理即可得到缺陷的位置、深度和轴向长度等信息。

3.2 涡流检测技术

涡流检测系统一般包括涡流检测仪、检测线圈及辅助装置等几部分。它一般分为常规涡流检测、透射式涡流检测和远场涡流检测。电站锅炉所用管件绝大部分为铁磁性材料,因此只能采用远场涡流技术来对内外腐蚀引起的穿孔、蚀坑和壁厚均匀减薄等缺陷进行检测。在实际的定期检验工作中,应用涡流检测技术时,要充分考虑各种因素对涡流检测信号的影响,才能取得较好的检测效果。目前,由加拿大开发的 FERROSCOPE308 管道腐蚀检测系统是利用远场涡流,配合各种高灵敏度和分辨率的内置、外爬式探头及其它特定的探头,利用 10 Hz ~ 20 kHz 的频率及其复合频率,最小可以检测内径为 $\phi 6.35$ mm 的小管,对普通的碳钢最小检测厚度可以达到 12.70 mm,同时由于探头形式的多样性,可实现多种复杂形状及部位的检测,正常的检测速度可达到 10 m/min;并且不同于常规涡流检测的是,它可以通过各种双频或混频技术来消除干扰信号,可实时立体地显示检测结果。图 1 为该检测系统检测排管或水冷壁的示意图。

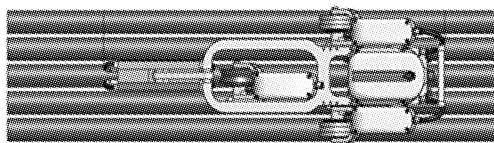


图 1 FERROSCOPE308 系统检测排管示意图

3.3 磁记忆检测技术

金属磁记忆检测技术是俄罗斯杜波夫教授于

20 世纪 90 年代初提出并在 90 年代后期发展起来的一种检测材料应力集中和疲劳损伤的无损检测与诊断新方法。其原理是利用铁磁工件在受载过程中,在应力和变形区域内产生的磁状态不可逆变化,在该区域内发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向,而且这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后不仅会保留,还与最大作用应力有关系。通常采用磁记忆检测仪器对焊缝进行快速扫查,以发现应力峰值部位,然后对应力峰值部位进行表面磁粉检测、内部超声检测、硬度测试或金相分析,以发现可能存在的表面裂纹、内部裂纹及材料微观损伤。

磁记忆检测方法适于发现锅炉部件上存在的高应力集中部位,而往往在这些部位最容易产生应力腐蚀开裂和疲劳损伤,对于高温设备还容易产生蠕变损伤。该技术在电站锅炉上使用最成熟的是对各种管子角焊缝和气轮机叶片的检测。

3.4 红外热成像检测技术

对于电站锅炉设备,红外热成像检测方法常用于对高温或低温承压设备内部保温层完好状态或深度腐蚀导致的泄漏等情况的检测与评价。采用常规的红外热成像技术,可以很容易地发现设备壳体的局部超温现象,从而可及早发现设备壳体上存在的薄弱部位,为以后的重点检测提供一定的依据和指导。图 2 和 3 为某设备保温层有热泄漏的热像图和可见光照片。



图 2 某设备热泄漏的热像图

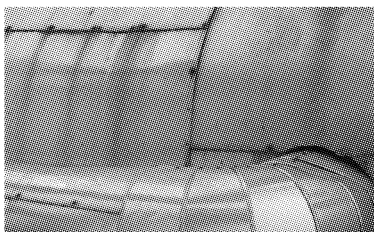


图 3 某设备保温层可见光照片

3.5 金相检测技术

金相检测是发现电站锅炉承压部件产生材料劣

化和蠕变的最有效的方法,在电站锅炉检验中得到广泛使用。常用的方法是现场金相法和复膜法。金相检测的重点是目视发现存在的过烧或变形的异常部位,或是进行硬度检测发现的异常部位。

4 小结

(1) 电力工业是国民经济发展的基础,电站锅炉是电力工业基础设施的重要组成部分,保障电站锅炉的安全正常运行具有重要意义,而合理有效的无损检测技术是重要的保障手段之一。

(2) 在电站锅炉元件的制造过程中,必须采用合适的无损检测技术来保障产品的质量。针对不同的产品,其相应的手段也有所不同,主要方法有目视、射线、超声和表面检测等技术。

(3) 在电站锅炉的安装过程中,安装检验的重点主要是控制各类元件的质量及相应的焊接质量,采用的无损检测方法主要有目视、射线、超声、表面和光谱检测等。

(4) 在电站锅炉的使用过程中,承压部件受介质、载荷、温度和环境等因素的影响较大,会产生如腐蚀、冲蚀、应力腐蚀开裂、疲劳开裂、材料劣化和蠕变等损伤。因此,在电站锅炉的定期检验工作中,除采用目视、超声、磁粉和渗透等常规无损检测方法外,还采用自动超声、红外热成像、漏磁检测、金相和 PMI 光谱定量分析等方法。

(4) 随着超临界锅炉等大型电站锅炉的出现及相继运行,今后会对无损检测技术提出更高的要求。因此,应在保证完善常规方法的基础上,有针对性地不断开发一些新的无损检测仪器及检测方法,并需不断丰富和完善相应的检测及评价标准。

参考文献:

- [1] DL/T 5069—1996, 电力建设施工及验收技术规范(管道焊缝超声波检验篇)[S].
 - [2] SDJ 279—1990, 电力建设施工及验收技术规范(热工仪表及控制装置篇)[S].
 - [3] DL 438—2000, 火力发电厂金属技术监督规程[S].
- ~~~~~
- (上接第 425 页)
- [3] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会, 渗透检测[M]. 北京: 中国锅炉压力容器安全杂志社, 2001.
 - [4] 陈南明. 提高在役低温液氧容器表面渗透探伤灵敏度的尝试[J]. 无损检测, 2000, 22(7): 310—311.