

# 660 MW 超超临界机组高温再热器的射线检测

许云伟, 钟 鹏, 张春有

(中国能源建设集团浙江火电建设有限公司, 杭州 310015)

**摘要:**火力发电厂 660 MW 超超临界机组运行中, 对高温再热器的焊接质量要求较高, 且作业环境困难, 检测要求严格。根据现场实际情况, 合理选择射线源和透照位置, 通过对比检测试验确定了焦距和曝光参数, 设计制定了最佳透照工艺。结果表明, 该工艺既满足了质量要求, 同时也兼顾了检测效率。

**关键词:**超超临界; 高温再热器; 射线检测; Se75

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)08-0038-03

## Radiographic Testing of High Temperature Reheater in 660 MW Ultra Supercritical Thermal Power Generating Units

XU Yun-wei, ZHONG Peng, ZHANG Chun-you

(China Energy Engineering Group Zhejiang Thermal Power Construction Co., Ltd, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** The 660MW ultra supercritical thermal power generating units of thermal power plants demand rather high requirements for the welding level of high temperature reheater, needing a more demanding working environment and stricter standard of testing. This paper shows how to choose the ray source and transillumination position reasonably based on the situation of the site, and to determine the focus and exposure parameters through experiments, and finally it designs and develops the optimum radiographic technology, which is able to meet the requirements of quality and testing efficiency.

**Key words:** Ultra supercritical; High temperature reheater; Radiographic testing; Se75

近年来, 随着经济的迅速发展, 超超临界机组<sup>[1]</sup>进入了大规模建设阶段, 这就对电厂的运行安全提出了全新的要求, 对机组安装质量的控制也就显得至关重要。而超超临界机组高温再热器爆管事故常有发生, 为了避免此类事故的重复发生, 有必要加强对超超临界机组高温再热器的无损检测, 使其焊缝质量满足标准要求, 提高安装质量, 确保电厂的运行安全。

笔者以某 660 MW 超超临界机组的检测为例, 通过对比试验制定了射线检测工艺, 满足了检测要求, 为机组顺利建设提供了质量保证。

收稿日期: 2016-01-04

作者简介: 许云伟(1981—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事无损检测专业技术的研究及应用工作。

通信作者: 许云伟, E-mail: 15600136781@163.com。

## 1 高温再热器的结构与检测要求

高温再热器布置在凝渣管后部水平烟道内, 共有 96 片, 管屏间间距 228.6 mm。高温再热器进口管排管子规格(直径×壁厚)为  $\phi 50.8 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ , 材料为 SA-213T23 钢, 运行温度在 340 ℃ 左右。高温再热器出口管排管子规格(直径×壁厚)为  $\phi 50.8 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ , 材料为 SA-213T91 钢, 运行温度在 603 ℃ 左右, 管排分布示意如图 1 所示(图中 s 表示透照源, 下同)。

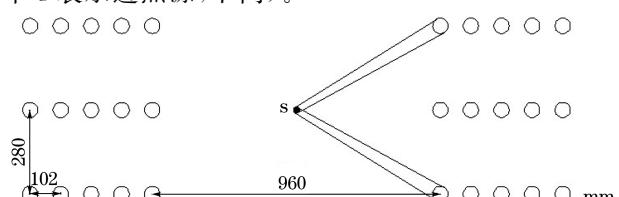


图 1 管排分布示意

根据 DL/T 869—2012《火力发电厂焊接技术规程》标准要求,超超临界机组必须对设备进行100%无损检测,射线检测比例不低于50%。而高温再热器设备管子都为小口径薄壁管,不便使用UT或其他无损方法进行检测。根据业主要求,确认对高温再热器进行100%射线检测。

高温再热器一般在水压试验前安装,存在时间紧迫、空间狭小和安装难度大的问题,给无损检测工作带来了新的考验。因此,首先需要制定合理的检测工艺,来满足安装检测要求。

## 2 检测方法的选择

目前,电厂安装中的射线检测主要有X射线检测和 $\gamma$ 源射线检测。X射线检测时,可根据工件的不同选择不同的能量。 $\gamma$ 源有Se75和Ir192两种,可根据能量、工件厚度及照相底片的灵敏度清晰度来选择不同的源。

根据DL/T 821—2002《钢制承压管道对接焊接接头射线检验技术规范》标准,对外径不大于76 mm的管子焊缝,采用双壁双投影透照法时,允许一次透照并应选择较高电压,管子内壁轮廓应清晰地显现在底片上。对此规格管子采用双壁双影透照时,透照厚度为:

$$T_A = 0.8 \times \sqrt{(D - T) \times T} + T \quad (1)$$

式中: $T_A$ 为透照厚度; $D$ 为外径; $T$ 为公称厚度。

以下就这几种射线检测方法在高温再热器中的检测应用进行探讨。

### 2.1 X射线

采用X射线检测法,可根据不同的透照厚度选择不同的能量,具有一定的灵活性。但是其检测仪体积较大,且需要电源,无法在高温再热器设备中全面透照,因此不考虑此方法。

### 2.2 Ir192源

Ir192源可透照的钢厚度在20~80 mm间。根据式(1)计算,两种规格双壁双影的透照厚度 $T_A$ 分别为13.8,16.0 mm,均小于20 mm,因此Ir192源满足不了透照灵敏度的要求。

### 2.3 Se75源

Se75源射线能量较低,适宜透照较薄的工件,所拍底片的质量也较好,可透照的钢厚度在10~40 mm间,高温再热器出口透照厚度在其灵敏度范围内。如果合理地选择透照工艺,射线照相底片质量能符合验收要求。

根据分析和对比选择,确定选择Se75源对超超临界高温再热器焊缝进行检测。

## 3 工艺制定

由于高温再热器出口管排选用T91钢,而T91钢在焊接过程及其后进行的热处理中均可能出现裂纹,笔者选择出口管排中最难检测的中间管排,对其进行工艺设计,以满足质量验收标准。

### 3.1 透照角度的选择

使用双壁双影透照工艺时,为了能有效检测出根部裂纹、未熔合以及未焊透等缺陷,椭圆开口越小越好,但考虑到还要检测其他缺陷并进行缺陷定位,特定椭圆开口最大处为5 mm。另通过现场测量,此种规格的管子焊缝宽度约为8 mm,透照示意如图2所示。根据计算,透照角度 $\theta = \arctan^{-1}(13/51) = 17^\circ$ 。

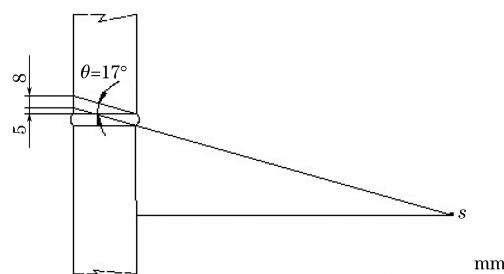


图2 双壁双影透照工艺示意

### 3.2 透照焦距的选择

选用Se75源,焦点尺寸3 mm×3 mm, $\gamma$ 射源强度 $A$ 为60 Ci。根据DL/T 869—2012验收标准,最小透照距离为:

$$L_1 \geq 10d_f L_2^{2/3} \quad (2)$$

$$L_2 = D + 2\Delta t \quad (3)$$

式中: $L_1$ 为射线源至工件表面的距离; $d_f$ 为焦点尺寸; $L_2$ 为工件表面至胶片的距离; $\Delta t$ 为余高,一般取2 mm。

根据式(2)与式(3), $L_2 = 54.8$  mm时计算出透照距离 $L_1 \geq 10d_f L_2^{2/3} = 433$  mm。

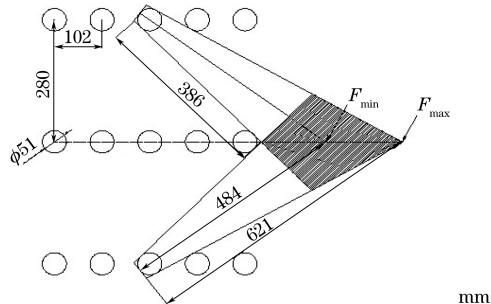


图3 有效透照焦距示意

根据透照源的直线辐照原理,可在如图 3 所示的阴影区域中放置源。但在安装过程中,要尽可能做到一次能拍两条焊缝,以提高工作效率。按照以上要求,源要放置在轴线上,直线距离  $386 \text{ mm} \leq f$  (射线源至工件的距离)  $\leq 621 \text{ mm}$ ,通过透照角度换算  $402 \text{ mm} \leq F(\text{焦距}) \leq 650 \text{ mm}$ 。而标准规定  $L_1 \geq 433 \text{ mm}$ ,最小焦距  $F_{\min} = 484 \text{ mm}$ 。根据透射性质和标准要求,  $484 \text{ mm} \leq F \leq 650 \text{ mm}$ 。

### 3.3 散射线屏蔽

由于管排排列紧密而间距小,故要考虑透照过程中其他管子散射线对底片质量的影响。 $\text{Se75}$  的平均能量为  $0.206 \text{ MeV}^{[2]}$ ,射线与物质的作用会发生康普顿散射。因此自行设计了一铅板屏蔽装置,以求最大程度地降低散射线对射线照相质量的影响。铅板曝光屏蔽装置的结构示意如图 4 所示。

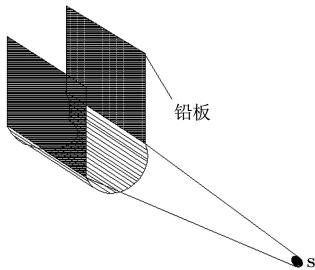


图 4 曝光屏蔽装置结构示意

在现场检测作业时,放置两个相同的曝光屏蔽装置,使装置透照焦点处重叠。在焦点放置处放置曝光光源,两个曝光装置分别放入管排中进行检测。

通过以上计算和设计,现场操作时,只要放置好曝光屏蔽装置,无需检测人员在狭小的空间进行焦距的测量,就可以快速拍摄出高质量的射线底片,达到验收要求。

## 4 试验内容

根据高温再热器的特殊性和透照源的特性,确定选用 AGFA C 7 胶片,曝光系数  $E = 2.5$ 。在工作中研究了不同焦距( $500, 550, 600 \text{ mm}$ )、不同曝光时间、放置曝光屏蔽与否以及不同铅箔增感屏 [ $0.05 \text{ mm}/0.16 \text{ mm}$ (A)、 $0.10 \text{ mm}/0.16 \text{ mm}$ (B) 和  $0.16 \text{ mm}/0.16 \text{ mm}$ (C)] 对底片质量的影响。结果如表 1 所示,底片质量均满足黑度  $D$  要求。

从试验结果中的底片质量来看,有无曝光屏蔽装置对底片质量的影响很大。从底片上缺陷影像的轮廓和细节方面进行比较,发现没有放置曝光屏蔽装置的底片较模糊,缺陷的清晰度不够。这是因为,大量散射线的存在引起了射线底片对比度的变化,而屏蔽

表 1 不同透照条件下的底片质量

增感屏	焦距/ mm	像质 要求	曝光时 间/min	有无曝光 屏蔽装置	像质 显示	缺陷 影像
A	500	12	2.6	有	清晰	清晰
				无	模糊	模糊
B	500	12	2.6	有	较清晰	较清晰
				无	模糊	较模糊
C	500	12	2.6	有	清晰	清晰
				无	较清晰	模糊
A	550	12	3.2	有	清晰	清晰
				无	模糊	较模糊
B	550	12	3.2	有	清晰	清晰
				无	模糊	模糊
C	550	12	3.2	有	清晰	较清晰
				无	较清晰	较清晰
A	600	12	3.8	有	清晰	清晰
				无	较清晰	较清晰
B	600	12	3.8	有	清晰	较清晰
				无	较清晰	较清晰
C	600	12	3.8	有	清晰	清晰
				无	较清晰	较清晰

装置能起到降低散射的作用。随着透照焦距的增大,降低了底片的几何不清晰度,提高了底片的质量。

透照焦距  $F$  的变化,对底片的质量产生了一定的影响。随着  $F$  的增大,底片的几何不清晰度变小,提高了射线底片的清晰度。由于选择的焦距均大于最小焦距  $F_{\min}$ ,在其他试验条件不变的情况下,底片的清晰度没有明显的变化。在有曝光屏蔽装置的情况下,像质清晰度和缺陷的清晰度都比较好。而在施工安装中,在考虑底片质量的前提下,还要考虑经济和效率因素。因此,选取透照焦距  $F$  为  $500 \text{ mm}$ ,透照时间为  $2.6 \text{ min}$  时,可以快速高效地完成检测工作。

观察底片,比较不同厚度的增感屏对底片影像质量的影响,发现结果并无明显的差异。经过仔细地分析比较,在透照焦距  $F$  为  $500 \text{ mm}$  和有曝光屏蔽装置的条件下, $0.10 \text{ mm}/0.16 \text{ mm}$ (A)类增感屏得到的底片清晰度最高,缺陷影像质量最好。同时,以其他焦距为参考,发现此增感屏为最优。

在选用 AGFA C 7 胶片的前提下,综合考虑以上三个因素,以透照焦距  $F$  为  $500 \text{ mm}$ ,增感屏为  $0.10 \text{ mm}/0.16 \text{ mm}$ ,配以自己设计的曝光屏蔽装置为最佳组合。合理的工艺设计,能经济高效地完成高温再热器出口管排的无损检测任务。

(下转第 43 页)

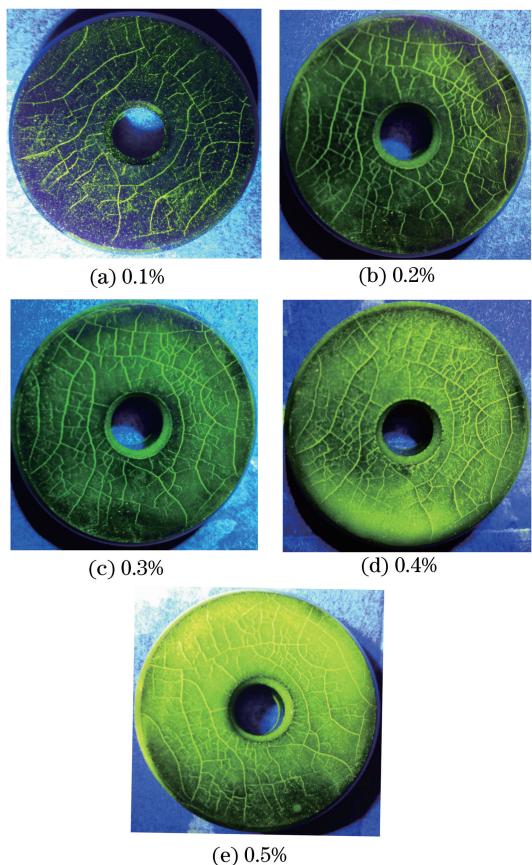


图 5 不同体积分数磁悬液的磁痕显示  
磁痕显示,如图 5(e)所示。

### 2.3 试验分析

美国标准、欧洲标准以及国际标准中规定荧光磁悬液体积分数在 0.1%~0.4% 间,非荧光磁悬液体积分数在 1.2%~2.4% 之间。经过大量试验验证,磁痕出现最佳显示时,磁悬液浓度值一般在范围区间的中等偏上左右,即荧光磁悬液体积分数在 0.3% 左右,非荧光磁悬液体积分数在 1.9% 左右。

(上接第 40 页)

### 5 结语

针对火力发电厂中高温再热器的无损检测,合理地选用能量较低的 Se75 放射源,充分考虑了管排之间间距小带来的问题,通过计算选取透照距离  $F$  为 500 mm,透照角度  $\theta$  为 17° 为合理参数。另外,制作了高温再热器曝光屏蔽装置,降低了旁边管子散射线对射线底片质量的影响,提高了员工工作效率和底片质量。

试验中,观察到 MTU-3 试块磁痕显示最清楚时,磁悬液的体积分数为 0.2% 与 0.3%;体积分数 0.1% 的磁悬液对试块上面的磁痕显示很模糊;体积分数 0.4% 的磁悬液虽然可以显示试块上面的磁痕,但是已经有部分缺陷被掩盖住而无法判断出来;体积分数 0.5% 的磁悬液掩盖了试块上面的磁痕,严重影响了对缺陷的判断。

通过以上试验,发现不同体积分数的磁悬液,在 MTU-3 试块上对应不同的磁痕显示。反过来,可以通过 MTU-3 试块上面的磁痕显示,来推断磁悬液的浓度范围。这样,就可以快速高效地完成对磁悬液浓度的测试,即 MTU-3 试块可以对磁悬液的沉淀浓度进行测试。

### 3 结论

(1) MTU-3 试块在测试效率上明显比传统的梨型瓶方法高。梨型瓶测定磁悬液浓度测试时间长,至少需要 30 min;而 MTU-3 试块只需将磁悬液均匀地喷洒在其表面,就可根据磁痕的显示而快速推断出磁悬液沉淀浓度的大致范围。

(2) 梨形瓶无法排除杂质的影响,如果有杂质进入梨型瓶中,操作者常会误认为磁悬液浓度已经达到标准要求,从而影响对缺陷的识别。MTU-3 试块上的磁痕显示只与磁悬液或磁粉有关;如果磁粉或者磁悬液中混有杂质,一般是不会影响磁痕显示的,因此 MTU-3 试块可以排除杂质对测定准确度的影响。

### 参考文献:

- [1] 宋志哲.磁粉检测 [M].北京:中国劳动社会保障出版社,2007:83.

使用此工艺可以满足其他超超临界机组中高温再热器的无损检测要求,对于监控锅炉质量,延长锅炉使用寿命,有较好的应用价值。

### 参考文献:

- [1] 叶勇健,何振东.华能玉环电厂 1 000 MW 超超临界锅炉特性 [J].电力建设,2007,28(11):66-69.  
[2] 李衍.第二代 Se75 $\gamma$  射源的特性及其在管道检测中的应用 [J].无损检测,2003,25(4):1-4.