

核电厂高压加热器传热管涡流检测及缺陷产生机理分析

葛炼伟¹, 郭 韵², 丁有元¹, 方 江¹, 厉建文², 翟宏亮²

(1. 中核核电运行管理有限公司, 海盐 314300; 2. 国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233)

摘 要: 高压加热器的热交换管束泄漏事故将影响到核电厂机组的安全运行。对高压加热器管束进行涡流检测可以有效地发现缺陷。结合高压加热器管束的涡流检测结果, 通过对高压加热器运行情况的分析, 分析管束的降质机理, 提出了解决该问题的防护建议。

关键词: 涡流检测; 高压加热器; 管束; 降质机理

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: B

文章编号: 1000-6656(2014)01-0074-03

Eddy Current Testing of Nuclear Power Plant High-pressure Heater Tubes and Defect Mechanism Analysis

GE Liang-wei¹, GUO Yun², DING You-yuan¹, FANG Jiang¹, LI Jian-wen², ZHAI Hong-liang²

(1. CNNC Nuclear Power Operations Management Co. Ltd, Zhejiang 314300, China;

2. State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: Leaking failures of the heat-exchanging tubes of high-pressure heaters have serious impact on the safe operation of nuclear power plant. Eddy current testing for the high-pressure heaters can always find the defects effectively. In this thesis, with the results from eddy current testing, by analyzing the operation condition of high-pressure tubes, the degradation mechanism is studied and the protection suggestion is introduced.

Keywords: Eddy current testing; High-pressure heater; Heat-exchanging tubes; Degradation mechanism

高压加热器的传热管泄漏事故将影响到核电厂机组的安全和经济运行。在高压加热器运行所出现的故障中, 传热管泄漏事故是最常见的故障, 占70%以上。因此, 加强对高压加热器传热管的监督和检测十分必要。

某核电厂高压加热器为卧式如图1所示。在一次大修检查中, 采用检漏试验发现了两台高压加热器传热管发生了泄漏。为了检测传热管受损情况, 笔者对7B、5A和7A三台高压加热器的传热管进行了抽检。

1 高压加热器结构

如图2所示, 该核电厂的高压给水加热器采用



图1 卧式高压加热器

U形不锈钢传热管, 双流程, 卧式布置, 水室采用自密封结构。壳体采用碳钢板全焊接结构件, 壳体和水室是焊接结构, 以便于壳体拆除。水室为半球形小口水室, 由半球形封头和堆焊不锈钢的管板组成。U形管经焊接和爆炸胀与管板连接。隔板沿着整个长度方向布置, 即支撑着管束并引导蒸汽沿着管束按90°方向转折流过管子, 以期将蒸汽均匀

收稿日期: 2013-02-05

作者简介: 葛炼伟(1982—), 男, 工程师, 主要从事核电厂在役检查、焊接管理等工作。

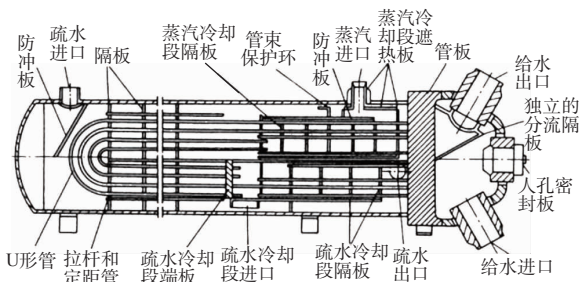


图2 卧式高压加热器结构

分配并提高加热器效率。这些隔板借助拉杆和定距管在纵向位置固定。在蒸汽和疏水入口处均装设了不锈钢防冲板,可使壳侧疏水和蒸汽不直接冲刷管束,以免管束遭受冲蚀^[1]。

2 涡流检测结果

该核电厂高压加热器传热管为 $\phi 16\text{ mm}$ 的不锈钢管,壁厚 1 mm 。针对被检对象的情况,采用涡流检测方法对其进行了检查。采用的设备为 Zetec 公司生产的 MS 5800 涡流仪,探头采用 $\phi 12\text{ mm}$ 和 $\phi 11\text{ mm}$ 柔性内穿过式涡流探头。

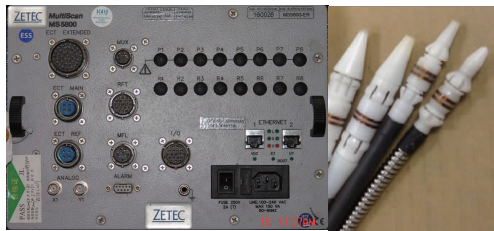
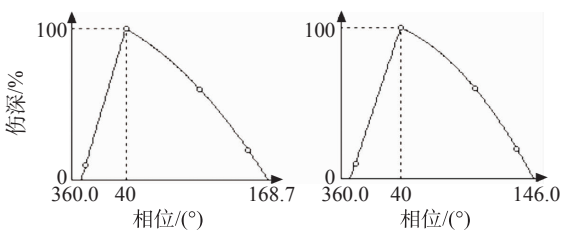


图3 MS 5800 涡流检测仪以及内穿过式涡流探头

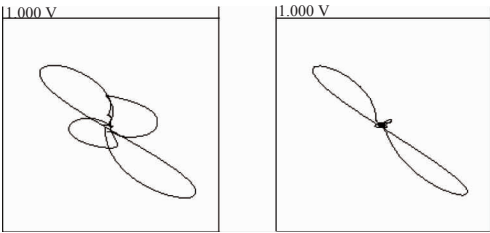
采用多频涡流检测技术可有效区分干扰信号和缺陷信号。检测频率选用 $400, 181.8$ (主频), 90.9 和 45.5 kHz 。由于高压加热器传热管穿过多个隔板,需要采用混频技术对隔板信号进行抑制,混频采用频率为 181.8 和 90.9 kHz 。传热管的缺陷深度测量利用对比样管上的人工缺陷(10% 内壁环槽、通孔、 60% 外壁平底孔和 20% 外壁平底孔)制作相位伤深曲线,主频和混频判伤曲线如图 4 和 5 所示。

三台容器涡流抽查结果见表 1。从表 1 可以看出,三台容器传热管均发生了管壁减薄,部分传热管管壁减薄严重。其中 7B 容器的 9 根泄漏管的涡流检测结果与上次大修涡流检测结果比较,情况如表 2 所示。

从表 2 可以看出,相同的泄漏传热管伤深值较上次大修深度有所增加,说明缺陷在一个运行周期中发生了扩展。



(a) 主频 (b) 混频
图4 相位-伤深曲线



(a) 隔板信号 (b) 混频抑制后隔板信号
图5 混频后抑制隔板信号情况

表1 高压加热器涡流检查情况

设备 编号	抽查 数量 /根	抽查 比例 /%	管壁减 薄 21% ~40%	管壁减 薄 41% ~60%	管壁减 薄 61% ~80%	管壁 减薄 >80%
5AU	5	2.6	0	1	0	0
5AD	54		1	15	27	7
7AU	0	2.4	0	0	0	0
7AD	49		1	8	34	6
7BU	362	17.7	1	1	1	2
7BD	366		3	6	53	37

表2 TB 容器泄漏管的两次涡流检测结果比较

行 号	列 号	本次大修				上次大修		
		幅值 /dB	相位 /(°)	位 置	伤深 /%	幅值 /dB	相位 /(°)	伤深 /%
1	21	5.5	82	9-W	74	6.1	94	65
1	23	3.5	62	9-W	88	4.6	87	70
1	24	9.5	65	9-W	86	5.9	82	74
1	25	5.2	72	9	79	4.8	74	72
2	19	26.4	49	9-W	96	伤深 40%~60%		
3	9	3.8	75	3-4	79	3.8	70	82
3	13	8.8	47	8	96	伤深 40%~60%		
4	4	9.1	70	9	80	9.1	75	79
46	1	12.0	55	9-W	92	伤深 40%~60%		

以表2中第1行第23列的泄漏管为例,整个传热管在隔板附近部位集中了大量的缺陷,涡流缺陷信号见图6。

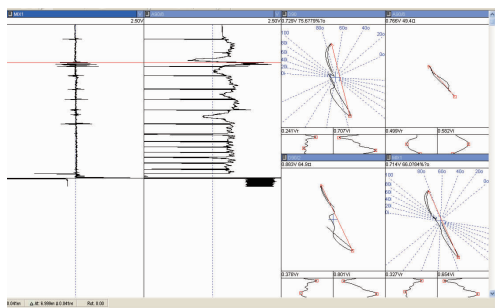


图6 涡流信号

针对隔板附近的大量缺陷进行了分析和统计,最终得到以下的结论:① 泄漏的传热管都存在较深缺陷,涡流相位判伤对这些缺陷评定的伤深都在70%以上。② 大部分上次大修检查超过60%伤深的传热管,也存在40%~60%伤深的其他缺陷。③ 缺陷有加深和扩展的趋势。④ 缺陷主要集中在下部1至3行,3行以上仅有少量缺陷管。⑤ 缺陷主要集中在下部传热管最后一个隔板附近、最后一个隔板至U形管段以及第3至第4个隔板之间区域。

3 缺陷形成机理分析

高压加热器运行状况如图7所示。在高压加热器运行时保持汽侧一定的水位显然是非常必要的。

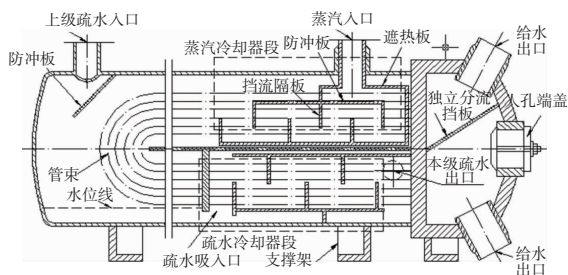


图7 高压加热器运行状况

如果汽侧水位过高,在发生因传热管泄露或疏水调节系统故障时将造成汽侧水位上涨过快甚至满水时,壳侧的水就有可能通过抽汽管道倒流入汽轮机,引起汽轮机叶片断裂、大轴弯曲等重大事故。即使不发生此类极端事故,水位过高也多淹没了一部分有效传热面积,给水在加热器中的吸热量就会减少,降低了给水的温升值,从而降低了回热循环的热效率和热经济性。

如果壳侧水位过低,不能浸没内置式疏水冷却段的疏水入口,蒸汽就会进入疏水冷却段,影响疏水冷却段内部传热过程,虹吸水封遭到破坏,入口处形成蒸汽和水的两相流动,介质流速大大增加,对入口附近的传热管束、隔板等造成冲蚀,从而造成管束振动损坏。其中,由于水位过低对管束所能造成的危害如下:① 由于水位过低,虹吸水封破坏,造成蒸汽直接从疏水口流出,大大加快了流速,造成对于管束的冲刷,引起管壁减薄。② 引起疏水管路和加热器振动,造成管束受到隔板的磨损,引起疏水管路和加热器的泄漏。越远离管板,管束振动越大,磨损越严重。③ 介质处于疏水冷却段进水口的管束,将受到蒸汽的冲刷而损坏。④ 位于低水位的管束,由于振动,在水和蒸汽汽液交界处受到强烈的冲蚀。

根据上述分析以及涡流检查的结果,可以判断传热管缺陷和泄漏主要是由于水位线较低引起疏水冷却段入口形成蒸汽和水的两相流动,造成管束的冲蚀和振动造成损坏。其表现为,在外围的管束(1至3行)振动大、受到冲蚀严重,且U管段水位线附近的管段(最后一个隔板至U管段)受到冲蚀最严重。另外,疏水冷却段进水口附近的管段(第3至第4个隔板之间)由于受到水液两相介质的吸入冲击,也会产生冲蚀缺陷。涡流检测的结果与由于低水位线造成的影响是吻合的。

4 结论与建议

高压加热器作为核电厂重要换热器,对传热管的监控和管理时,应将涡流检测同运行控制相结合,以取得最好的防护效果。建议采取以下的防护和监控措施:

(1) 控制好水位线,至少将水位线调整至疏水吸入口以上,建议找到最佳水位点。

(2) 对于涡流检测结果中深度大于70%且幅值较大的缺陷传热管予以堵管处理,以免泄漏造成泄漏管附近管束进一步损伤。

(3) 定期进行涡流检测,针对传热管涡流的历史缺陷进行跟踪,避免再次发生泄漏,影响机组的运行。

参考文献:

- [1] 童亮,刘红文,林介东. 高压加热器换热管远场涡流检测技术的实验研究[J]. 广东电力,2005(2):25-28.