

燃气电厂余热锅炉低压蒸发器腐蚀现状 调研及防治措施研究

郇晓慧¹, 石岩¹, 邱质彬¹, 张锦文¹, 郭延军¹, 王兴合²

(1. 华电电力科学研究院, 杭州 310030; 2. 中国华电集团公司, 北京 100031)

摘要:调研了华电集团内若干燃气电厂余热锅炉低压蒸发器的运行情况及其主要失效模式。结果表明, 流动加速腐蚀(FAC)是导致此类低压蒸发器管泄漏的主要原因。阐述了流动加速腐蚀的机制及相关影响因素, 并从设计、选材、运行和检修维护等方面提出了针对性的防治措施。

关键词:余热锅炉; 低压蒸发器; 流动加速腐蚀; 水化学; 溶解氧

中图分类号:TE 96

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2017)08-0013-04

0 引言

燃气-蒸汽联合循环电站是目前国内外发展最快的发电形式之一。它具有清洁环保、发电效率高、操作运行方便、启停时间短、调峰能力强等优点, 有利于改善电网结构和区域电网调峰, 对我国的电力供给和环保治理具有重大意义。近10多年来, 以五大发电集团为代表的国内电力公司逐步掀起了燃气-蒸汽联合循环电站的建设高潮。

随着燃气-蒸汽联合循环电站的日渐增多、运行时间延长, 相关问题也逐渐暴露。另外, 余热锅炉低压蒸发器采用模块化设计, 内部结构紧凑、空间狭小, 同时给停机检修、漏点补焊和局部换管带来一定难度。调研结果表明, 近年来华电集团下属若干电厂的低压蒸发器多次发生泄漏, 影响机组正常运行。国内外公开发表的文献资料中也有部分关于余热锅炉泄漏问题和呼吁引起重视的报道^[1-7]。Moelling等人^[8]指出无论是两相还是单相流动条件, 余热锅炉低压蒸发回路是常见的失效位置。文献[2]报道了江苏华电仪征热电有限公司3台E级燃气-蒸汽联合循环机组配的DG233.9/7.95/57.4/0.63-M106型双压、无补燃、卧式、自然循环余热锅炉的低压蒸发器, 在运行1年多后, 均发生出口管侵蚀减薄甚至爆管的问题。文献[3]报道了某电厂S109FA机组由东方公司引进日立技术生产的三压、一次中间再热、卧式、无补燃、自然循环余热锅炉低压蒸发器中间联箱上1根受热面管座弯管处发生的泄漏事故。文献[4]报道了两起由杭州锅炉集团公司引进美国Nooter/Eriksen公司技术设计和制造的三压、再

热、卧式、无补燃、自然循环锅炉的低压蒸发器管子在接近上联箱部位的弯头外弧处发生穿孔泄漏的事故。一般认为, 国内与9E和9F等级主力机型相应等级的余热锅炉系统的中、低省煤器系统以及低压蒸发器系统均处在极易发生流动加速腐蚀(FAC)的温度区间(120~180℃), 并且机组正常运行时, 给水含氧量(DO)仅为 7×10^{-9} , 在低压蒸发器的末端工质流速经常超过10 m/s, 并且伴随传热和传质的两相流FAC^[9]。

本文调研了华电集团内若干燃气电厂余热锅炉低压蒸发器的运行情况及其主要失效模式, 分析了相关失效机制, 并从设计、选材、运行和检修维护等方面提出了针对性的防治措施, 为燃气电厂余热锅炉的安全、经济运行提供参考。

1 余热锅炉低压蒸发器腐蚀现状调研

1.1 部分电厂余热锅炉简介

A电厂和B电厂的余热锅炉均由杭州锅炉集团有限公司生产, 结构和设计参数相近, 均为三压、再热、卧式、无补燃、自然循环燃机余热锅炉, 适用于以天然气为设计燃料的燃气轮机排气条件。区别是A电厂的余热锅炉与PG9341FA型燃气轮机相匹配, B电厂的余热锅炉与S109FA型燃气轮机相匹配。

C电厂的余热锅炉也由杭州锅炉集团有限公司生产, 为三压无补燃强制循环锅炉, 与PG9171E型燃机相匹配。该锅炉既适用于以轻油为燃料的燃机排气, 也适用于以天然气为燃料的燃机排气, 亦可作为相近的低含尘大流量中低温烟气的余热回收设备。

D电厂的余热锅炉是由福斯特惠勒(Foster Wheeler)锅炉有限公司提供, 型号为FW-283(40)(41)/11.23(3.17)(1.01-0019FAHRSG)。

E 电厂的余热炉由武汉锅炉厂引进荷兰余热炉生产技术设计制造。

1.2 部分电厂低压蒸发器运行参数

上述 5 家电厂机组的详细运行情况见表 1。

表 1 部分电厂机组运行信息统计

名称	A 电厂	B 电厂	C 电厂	D 电厂	E 电厂
管材材质	SA-210A1	SA-210A1	20(GB3087-99)	SA 178-A	SA-210A1
管材规格/mm	φ 50.80	φ 50.80	φ 42.00 × 3.00	φ 38.10 × 2.67	φ 38.00 × 2.60
低压主蒸汽额定温度/°C	300.1	300.1	256.0	—	—
低压蒸发器出口烟气温度/°C	158.7	158.7	176.8	≈158.0	166.0
低压锅炉出口蒸汽压力/MPa	0.31	0.31	0.63	0.41	0.61
低压最大连续蒸发量/(t · h ⁻¹)	41.2	41.2	31.0	40.9	—
管子数量/根	798	798	928	111	—

1.3 低压蒸发器运行情况

经调研,A 电厂和 B 电厂的余热锅炉尚未发现低压蒸发器腐蚀泄漏。C 电厂某余热锅炉在锅炉停机备用过程中发现炉底东侧放水管有水滴出,打开人孔门检查发现低压蒸发器出口联箱和蒸发器焊缝位置有泄漏,如图 1 所示。



图 1 C 电厂低压蒸发器接管角焊缝处腐蚀形貌

D 电厂某余热锅炉运行至 29 000 h 左右,停机后发现炉内有水汽漏出,烟囱下部排水口有大量出水,由此判断炉内有泄漏点。打开人孔门后发现余热锅炉顶部低压蒸发器联箱两侧局部直管段存在由腐蚀导致的泄漏,如图 2 所示。



图 2 D 电厂低压蒸发器管漏点

对泄漏处的低压蒸发器上、下联箱分别进行“开窗”处理,用内窥镜进行全面检查,典型的内部腐蚀形貌照片如图 3 所示。割管取样并纵向剖开后显示的内部形貌照片如图 4 所示。由表面形貌分

析,此类腐蚀形式属于典型的 FAC。D 电厂将这部分管子 FAC 迹象的管段材质升级为 12Cr1MoVG,至今运行良好。



图 3 D 电厂低压蒸发器管内窥镜观察



图 4 D 电厂低压蒸发器管内部形貌

E 电厂某余热锅炉在上水准备启动过程中,发现锅炉尾部烟道受热面存在泄漏现象。经现场检查确认,低蒸 I 级受热面发生泄漏,如图 5 所示。典型的漏点位置附近内窥镜检查结果如图 6 所示。从表面形貌分析,E 电厂余热锅炉低压蒸发器管内腐蚀形貌与 D 电厂类似,属于典型的 FAC。

综合其他电厂的调研情况分析,C 电厂余热锅炉低压蒸发器接管角焊缝处因点蚀发生泄漏为偶发现状,而 D 电厂和 E 电厂中大量的余热锅炉低压蒸发器管是由 FAC 导致泄漏,该泄漏方式的危害性和



a 带散热片照片



b 去除管外散热片照片

图 5 E 电厂低压蒸发器管漏点

导致的损失也更大。

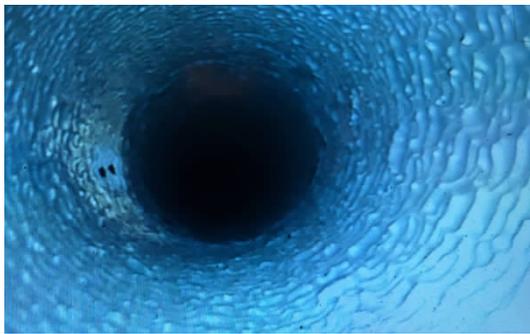


图 6 E 电厂低压蒸发器管内窥镜观察

2 讨论与建议

2.1 流动加速腐蚀机理及部分相关影响因素

FAC 主要发生在燃机余热锅炉、燃煤锅炉、工业锅炉和核电站的高能管道,主要与水化学(pH 值、溶解氧、还原性介质)、温度、流速、几何形状和材料成分有关^[1,10]。Shunsuke Uchida 等人^[11]认为 FAC 分为 2 个过程,第 1 个是腐蚀过程,另 1 个是工质流动的动态过程。其中,腐蚀是 FAC 的本质过程,而工质流动是 FAC 发生的加速过程。材料表面形成的氧化膜是决定 FAC 的关键因素,保护性的氧化膜可以控制材料的腐蚀速率^[12]。

根据热力学原理计算得到的电位-pH 值示意图是分析材料在水溶液中表面形成稳态氧化膜的重要方式。Townsend^[13]计算了 Fe-H₂O 体系在 60,100,150 和 200 °C 下的电位-pH 值示意图,研究发现随着温度提高,Fe-H₂O 体系电位-pH 值示意图最显著的变化是在高 pH 介质中,HFeO₂⁻的范围显著扩大。尤海峡^[14]等人计算了 Cr-H₂O 体系在 25,50,100 和 150 °C 时的电位-pH 值示意图。结果表明:150 °C 时,pH 值在 6.7087~7.1971 之间,Cr 在 -1.25~1.28 V 之间开始发生 Cr=Cr³⁺+3e 反应,远低于 Fe 在该温度和 pH 值范围发生 Fe→Fe²⁺+2e 的反应电位

-0.85~0.79 V。Cr 含量是提升材料抗腐蚀能力的关键。调研的 5 家燃机电厂余热锅炉低压蒸发器管材均为碳钢,20 钢中的 Cr 含量也仅小于等于 0.25%,12Cr1MoVG 中 Cr 含量为 0.25%~0.35%。D 电厂材料更换升级后有效流动加速腐蚀,充分说明材料中 Cr 含量提升对减缓流动加速腐蚀的重要性。

由电位-pH 值示意图分析可知,材料表面稳态氧化膜的形成主要受电位和 pH 值两方面影响。实验已经证明,水化学中的溶解氧(DO)含量直接影响材料的电位,溶解氧含量的升高可提高材料的电位^[15]。然而,随着温度的升高,炉水 pH 值会逐渐降低。按 GB/T 12145—1999《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量标准》要求,溶解氧(DO)≤7 μg/L,pH 值(25 °C)的范围在 9.0~9.5 之间。朱志平^[16]等人计算了各种浓度下 Na₃PO₄,NH₃ 和 NaOH 水溶液的 pH 值随温度变化情况。研究发现,25 °C 时各种浓度下 Na₃PO₄,NH₃ 和 NaOH 水溶液的 pH 值范围在 9.0215~9.3910 之间,150 °C 时 pH 值的范围在 6.7087~7.1971 之间^[16]。通过对 Townsend 和尤海峡计算的电位-pH 值示意图进行图解可知,150 °C 时将碳钢的电位控制在 -0.79~0.50 V 之间是比较合适的。即,在 pH 值一定的环境下,水化学中含适量的溶解氧,有助于碳钢表面形成 FeO,Fe₃O₄ 和 Fe₂O₃ 等氧化膜,适当降低碳钢表面的腐蚀速率。

2.2 防治措施及建议

2.2.1 设计方面

余热锅炉低压蒸发器管的材料选择除考虑常规的强度、焊接性能、耐蚀性、导热性和经济性等方面的因素外,还应结合低压蒸发器管内工质流速,考虑流动加速腐蚀对备选材料的影响。合理选材和控制设计流速是避免流动加速腐蚀的关键。

2.2.2 运行方面

余热锅炉汽水品质的控制对于部件的可靠性和有效性至关重要。建议严格控制水化学参数,采用在

线监测的方式实时掌握余热锅炉低压蒸发器的各项水化学参数。对于不含 Cr 的低压蒸发器管,水化学控制过程中可含有微量溶解氧,促进管内表面保护性氧化膜的形成。对于含 Cr 的低压蒸发器管,水化学控制过程中溶解氧可控制在较低的水平。建议定期对各类水化学监测探头进行校准,加强低压蒸发器内部温度监测,防止产生烟气走廊和局部超温。

2.2.3 检修维护方面

应重点检查工质流速较高的余热锅炉低压蒸发器,并对联箱接管座附近温度较高、有可能发生液汽转变导致流速急剧增加的重点区域进行测厚,并用内窥镜检查 and 割管抽查。

3 结束语

余热锅炉低压蒸发器泄漏问题目前是一个普遍性的问题,应引起足够的重视。设计方面,主要解决材质和流速方面的问题,防止先天不足。运行方面,主要加强水化学控制,尤其是溶解氧和 pH 值,并防止局部超温。检修维护方面,主要是及时发现、消除安全隐患。通过设计、运行和检修维护 3 方面结合,防患于未然,切实提高电厂运行的安全性和经济性。

参考文献:

[1] DOOLEY R B. Flow accelerated corrosion in fissile and combined cycle/HRSG plants[J]. Power Plant Chemistry, 2008,10(2):68.

[2] 周军. 余热锅炉低压蒸发器出口管泄漏原因分析及处理对策[J]. 科学中国人,2016(11):36.

[3] 罗以勇. S109FA 机组余热锅炉低压系统泄漏分析与处理[J]. 重庆电力高等专科学校学报,2014,19(4):45-49.

[4] 黄杰. 低压蒸发器换热管泄漏原因分析及处理措施[J]. 广东电力,2013,26(5):107-110.

[5] BUECKER B, ENGINEERS K P. Water/Steam Treatment Programs and Chemistry Control for Heat Recovery Steam Generators[C]//ASME 2013 Power Conference. American Society of Mechanical Engineers,2013.

[6] BUECKER B. Beware of flow-accelerated corrosion; operators of steam-generating systems should understand flow-accelerated corrosion and the potential problems it can cause [J]. Chemical Engineering,2013,120(3):38-41.

[7] SWANEKAMP R. Combined-cycle users broaden their view to integrated plant[J]. Power Engineering,2004,108(7):

36-41.

[8] MOELLING D, MALLOY J, GRAHAM M, et al. Design factors for avoiding FAC erosion in HRSG low pressure evaporators[C]//ASME 2013 Power Conference. American Society of Mechanical Engineers,2013.

[9] 王利宏,单建明,李伟,等. 联合循环余热锅炉中的流动加速腐蚀[J]. 发电设备,2010,24(6):409-413.

[10] DOOLEY R B, CHEXAL V K. Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2000,77(2):85-90.

[11] UCHIDA S, NAITOH M, OKADA H, et al. Evaluation of flow accelerated corrosion by coupled analysis of corrosion and flow dynamics. Relationship of oxide film thickness, hematite/magnetite ratio, ECP and wall thinning rate[J]. Nuclear Engineering and Design,2011,241(11):4585-4593.

[12] UCHIDA S, NAITOH M, UEHARA Y, et al. Evaluation methods for corrosion damage of components in cooling systems of nuclear power plants by coupling analysis of corrosion and flow dynamics (IV) comparison of wall thinning rates calculated with the coupled model of static electrochemical analysis and dynamic double oxide layer analysis and their values measured at a PWR plant[J]. Journal of nuclear science and technology,2010,47(2):184-196.

[13] TOWNSEND H E. Potential-pH diagrams at elevated temperature for the system Fe - H₂O[J]. Corrosion Science, 1970,10(5):343-358.

[14] YOU H X, XU H B, ZHANG Y, et al. Potential - pH diagrams of Cr - H₂O system at elevated temperatures[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2010,20:26-31.

[15] WANG J Q, LI X H, HUANG F, et al. Comparison of corrosion resistance of UNS N06690TT and UNS N08800SN in simulated primary water with various concentrations of dissolved oxygen[J]. Corrosion,2014,70(6):598-614.

[16] 朱志平,黄可龙,张玲,等. 高温状态下锅水 pH 值的变化特征研究[J]. 热能动力工程,2005,20(2):182-185.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

郦晓慧(1984—),男,浙江兰溪人,工程师,从事电厂材料腐蚀与防护相关研究方面的工作(E-mail:xhlee@yeah.net)。

(上接第 9 页)24(8):180-184.

(本文责编:刘芳)

[2] 刘吉臻. 协调控制与给水全程控制[M]. 北京:水利电力出版社,1995.

[3] 房方,刘吉臻,谭文. 火电单元机组协调控制系统的多变量 IMC - PID 设计[J]. 动力工程,2004,24(3):360-365.

作者简介:

杨大锚(1977—),男,内蒙古赤峰人,工程师,热控专工,工学硕士,从事火电机组热控及优化方面的工作(E-mail:47773152@qq.com)。