

600 MW 超临界 W 火焰锅炉水冷壁拉裂研究

徐金苗, 李伟科, 吴阿峰, 樊晓茹

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 水冷壁拉裂问题是 600 MW 超临界 W 火焰锅炉面临的一个技术难题。通过调研已投运电厂的水冷壁拉裂情况, 研究分析了水冷壁拉裂的原因, 结果表明其根本原因是炉膛内水平方向上热负荷的偏差。最后给出了设置水冷壁中间完全混合集箱等防止水冷壁拉裂的建议措施。

关键词: 超临界; W 火焰; 水冷壁; 拉裂

中图分类号: TK228

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0049-04

Research on 600 MW Supercritical W-flame Water Wall Cracking

XU Jinmiao, LI Weike, WU Afeng, FAN Xiaoru

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The water wall cracking is a big problem for 600 MW supercritical W-flame boiler. The investigation and survey results about 600 MW supercritical W-flame boiler water wall cracking were indicated. The reason of water wall cracking was analyzed according to the boiler operation. The main reason is the furnace thermal deviation in horizontal direction. The fully mixing header is provided on the transitional section of the water wall, which is the most useful method to prevent the water wall cracking.

Key words: supercritical; W-flame; water wall; cracking

W 火焰锅炉因其特殊的拱型炉膛、双 U 型火焰结构使得煤粉气流在炉内停留时间增长、火焰根部的烟气温度得到显著提高, 十分有利于低挥发分煤粉的燃尽, 特别是无烟煤的燃烧。随着国家能源结构调整, 节能减排工作的深入, 无烟煤的燃烧发电机组也朝着大容量高参数方向发展。目前, 600 MW 等级超临界 W 火焰锅炉已有一些运行业绩, 但是在实际运行中也暴露了一些问题, 特别是水冷壁拉裂泄露问题。本文针对此问题做了全面的技术调研, 并做了详尽的总结分析, 并探讨了其解决方法。

1 国内 600 MW 超临界 W 火焰锅炉运行情况

2009 年 7 月 4 日唐华银金竹山火力发电公司二期 3#炉顺利通过试运行移交生产, 标志着世界首台 600 MW 超临界 W 型锅炉投入商业运行。截止到 2012 年底, 我国 600 MW 等级超临界 W 火焰锅炉的订货及运行业绩共有 18 台, 国内几大锅炉制造厂均有业绩, 其中北京巴威 9 台, 20 台, 哈锅 4 台, 上锅 2 台^[1]。这些 600 MW 超临界 W 火焰锅炉在实际运行中暴露了一些问题, 主要是与锅炉水冷壁相关的泄露、拉裂、变形等。笔者就此对这些投运电厂的运行情况进行了统计, 结果如下。

A 电厂: 至投产以来水冷壁泄漏 25 次; 其中 2011 年超温原因 3 次; 安装原因 3 次; 热偏差导致拉裂 1 次, 制造质量原因 1 次; 2012 年热偏差导致水冷壁拉裂 8 次, 设计原因 1 次; 2013 年安装原因 2 次; 热偏差导致拉裂 2 次; 过热原因 2 次; 制造质量原因 2 次。

收稿日期: 2016-11-14

基金项目: 中国能建广东院科技项目“600MW 超临界空冷机组选型与装机方案研究”(EV00041W)

作者简介: 徐金苗(1982), 男, 湖北宜昌人, 高级工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机专业设计研究工作(e-mail)xujinmiao@gedi.com.cn。

B 电厂：共有 3 次水冷壁拉裂停炉。2011 年有多次低负荷停炉。卫然带结焦问题较严重。

C 电厂：共发生 4 次拉裂爆管停炉。2009 年 9 月 17 日#3 锅炉停炉后发现锅炉前墙水冷壁出现严重拉裂状况，最严重弯曲折裂发生在标高 41 m 炉前墙左数第 306 根水冷壁管，爆口宽 35 mm，张口 20 mm，其主要原因为壁温偏差大。

D 电厂：截止到 D 电厂调研时发生水冷壁泄漏事件 3 次。2012 年 6 月#1 炉左侧墙 IR5 短吹处由于材质原因发生水冷壁泄漏；2013 年 4 月#2 炉左侧墙 IR3 短吹处由于密封盒焊缝咬边发生水冷壁泄漏；2013 年 6 月#1 炉前墙 C 修停炉过程中在前墙水冷壁中部过渡段集箱以上 2 米位置发生水冷壁拉裂泄漏，其主要原因为壁温超温和热偏差大。

E 电厂：从 2011 至今共发生过 10 次泄露事故，主要是在前墙过渡段及上部管屏，裂缝主要发生在管屏管子、鳍片及集箱管座处，E 电厂分析主要原因为 W 锅炉炉膛宽深比较大，水冷壁为一次垂直上升型，横向温度梯度比较大，水冷壁水动力与实际运行有偏差，导致壁温偏差较大，当负荷变化调整频繁时，产生的交变应力作用致使产生疲劳裂纹并扩展，形成泄露事故。

F 电厂：截止 2013 年 10 月，未发生水冷壁拉裂泄露事件。F 电厂是我们调研的四大锅炉厂（东锅/上锅/巴威/哈锅）唯一未发生水冷壁拉裂泄漏和水冷壁鳍片拉裂的电厂。

在较高负荷下（>420 MW）水冷壁各部分温差能控制在合理范围内，一般能将屏间最大温差控制在 50℃以下，经常性区域在 30~50℃之间；在低负荷（<420 MW）四台磨运行方式下，屏间温差有增大趋势，在 40~70℃之间变化，超过 80℃的情况较少。

G 电厂：截止到 G 电厂调研时今年发生水冷壁泄漏事件至少 15 次以上，机组连续运行时间最长约一个月。

H 电厂：截止调研时总计发生了 9 次水冷壁泄漏，其中水冷壁堵塞过热爆管 1 次、焊缝焊接质量问题泄漏 2 次，水冷壁拉裂泄漏 6 次。

2 水冷壁拉裂泄露的原因分析

根据投运电厂的反馈，出现水冷壁拉裂泄露问题主要是在机组启动初期和低负荷运行阶段。因为此时

仅部分磨煤机、燃烧器投入运行，炉膛内的热负荷输入不均衡，水冷壁管内的温度偏差和膜式壁鳍片的温度偏差是非常大的，这样容易造成水冷壁拉裂。

笔者根据各电厂反馈的运行情况，对水冷壁拉裂泄露问题的原因进行了统计分析，如图 1 所示。

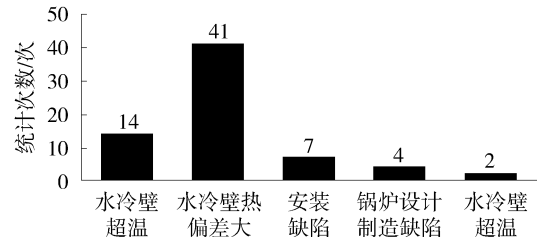


图 1 水冷壁拉裂原因统计

Fig. 1 The statistics of water tube cracking reason

从图 1 可知：水冷壁热偏差大是最主要的原因，其次是水冷壁超温、安装缺陷、设计制造缺陷、材料缺陷、运行不当。究其实质，水冷壁超温和热偏差大是属于同一类问题，即锅炉水循环安全性。

2.1 低质量流速内螺纹管的水动力特点分析

对于 W 型火焰锅炉，由于其特殊的几何外形，必须采用垂直水冷壁；而多次往复上升的水冷壁结构由于其锅炉性能的局限性已经不被目前超临界锅炉的设计所采用。因此为了将 W 火焰锅炉的参数从亚临界提高到超临界，就必须采用低质量流速的设计，它不但可以克服高质量流速设计的各种缺点，而且会得到有利于炉膛安全的正流量特性。要实现这样的设计这就必须解决超临界条件下，在炉膛水冷壁高热负荷区工质高干度状况下水冷壁的冷却问题。内螺纹管的出现很好的解决了这一问题。采用优化内螺纹管是保证水冷壁安全的先决条件和首要措施。

低质量流速内螺纹管的水动力计算最先由 SIEMENS 公司开展，随后美国 B&W 公司对 SIEMENS 公司优化内螺纹管的试验数据进行了广泛而深入的分析，并提出了改进意见。目前国内的主机厂也都针对该技术进行了大量的研究工作，并提出了一系列的水冷壁安全运行措施，目前该技术已经日趋成熟。通过以上工程实践证明，低质量流速内螺纹管的水动力计算是安全可靠的，不存在技术问题。

2.2 水冷壁超温、热偏差大

现在锅炉水冷壁均为膜式壁，为了使各处水冷壁的热负荷尽量均衡，一般在锅炉订货时会要求：

相邻水冷壁管壁温度测点的温差不得超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,同一面墙同一联箱水冷壁管壁温差不得超过 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据上述电厂的实际运行数据显示,一般在高负荷工况下,水冷壁的温度能满足上述要求。但是(1)在启动过程中,水冷壁的温度偏差较大;(2)转干态过程中水冷壁局部点超温;(3)负荷变化波动时,易出现超温现象;(4)低负荷工况下,水冷壁偏差较大,特别是前墙位置。

1)启动、低负荷工况:对于超临界W火焰锅炉在锅炉启动和低负荷工况下,仅有部分磨煤机和燃烧器投入运行,而W火焰锅炉由于其特殊结构,炉膛较宽,这样在水平方向上的热负荷是极不均匀的。这也是造成水冷壁的热偏差大,水冷壁拉裂泄露的根本原因。

2)变负荷工况:当锅炉由高负荷向低负荷变化时,要降低磨煤机负荷直至进行切磨处理,当磨煤机切除一台后,炉膛水平方向上的热负荷均匀性是恶化的,更易出现水冷壁热偏差大。当锅炉由低负荷向高负荷变化时,要提高磨煤机负荷直至投入新的磨煤机。W火焰锅炉一般配置钢球磨煤机,新投入的磨煤机往往滚筒内有存粉,当再次启动时,大量的煤粉会迅速送入炉膛,造成对应燃烧器的水冷壁区域局部热负荷增加^[4]。

3)工质由湿态转向干态时超温:对于超临界锅炉,水冷壁管内工质既可能运行于超临界状态,也可能工作在汽水两相区域;即便在超临界压力下运行,水冷壁内工质的相变点也将随着负荷的变化而上下移动。在汽水两相区域,相同的压力差下,同一个水冷壁管组内的管子其结构、热负荷均相同时,管子内的流量是唯一的。但是,管子中的流量会随着时间、负荷的变化而波动,进而管子的壁温也出现波动,从而引起管子的疲劳,而其中流量小的管子就会出现超温现象。产生以上现象的根本原因在于蒸汽与水的比容不同^[2]。

2.3 安装缺陷

从图1可以看出,安装缺陷也是造成水冷壁拉裂泄露不可忽视的因素。根据已经运行电厂反馈的情况,主要存在以下安装缺陷:(1)焊工操作不当或未按图施工,导致焊缝焊接质量差,这也是最主要的安装缺陷;(2)刚性梁在安装过程中,刚性梁角部装置未按图施工,角固或销轴存在刚性梁与水冷壁连接处存在卡死的情况,限制了上部水冷壁左

右方向的膨胀。水冷壁左右方向的膨胀应力无法得到释放,只能通过水冷壁自身的变形进行吸收,从而导致了水冷壁管拉裂;(3)锅炉尾部吹灰枪下方低再上层表面管子因设计的防磨瓦加装不到位,管子局部磨损严重;(4)卫燃带安装质量差,出现脱落现象;(5)水冷壁管节距超标严重。

2.4 锅炉制造设计缺陷

锅炉制造设计缺陷主要是刚性梁角板未预留膨胀缝隙或者预留空隙不够,不能满足膨胀间隙的要求,水冷壁管屏的热膨胀受到阻碍。

2.5 运行不当

超临界W火焰锅炉由于容易发生水冷壁超温、拉裂泄露等问题,在锅炉启动、变负荷、低负荷时,一定要注意配风,特别是在切磨操作时,要合理控制风量和给煤量的变化速度,避免严重超温或热偏差现象的出现。另外,有部分电厂在锅炉小修时发现,前后墙短吹灰枪炉内喷口附近水冷壁管屏存在程度不同的吹伤,有的管子最薄处壁厚 3.5 mm (设计厚度: 5.5 mm)。

3 水冷壁拉裂的解决措施

3.1 设置水冷壁中间全混合集箱

通过上述原因分析可以看出,水冷壁拉裂的根本原因是炉膛内水平方向上热负荷的不均匀性。要想从根本上解决这个问题,设置水冷壁中间集箱是一个很好的办法,而且有很多锅炉就是这样设计的,从运行情况来看设置了水冷壁中间集箱的锅炉,水冷壁拉裂情况要明显好于未设置的锅炉。其中,广西南宁电厂截止目前未发生一次因水冷壁拉裂而引起的强迫停炉事故。

从实际运行情况来看,有些电厂的锅炉设置了水冷壁中间集箱,但还是出现了拉裂现象。对此,有学者研究发现是其设计结构不合理所致^[2]:下炉膛水冷壁与上炉膛水冷壁通过4个中间集箱连接并过渡,工质在中间集箱内完成向上炉膛光管水冷壁流量分配,中间集箱主要起着平衡压力和上水冷壁工质的再次分配功能,而不具备混合功能,一旦下炉膛局部出现管组金属壁温高,进入上炉膛水冷壁对应位置管组的工质温度相应升高,导致这些水冷壁管排的冷却效果变差,壁温升高。

对此,有锅炉制造厂在炉膛四周取消原有的单根混合集箱,增大刚性梁间距,增设下部水冷壁出

口集箱、上部水冷壁进口集箱，另外在锅炉两侧各设置中间混合集箱，保证下部水冷壁出口工质在此处能充分混合后再分配至上部水冷壁。根据计算及实测对比，可减少上部水冷壁偏差幅度约10~20℃。

3.2 优化集箱中心线至管屏扁钢末端长度

为避免发生前墙水冷壁上集箱管座裂纹现象，东方锅炉厂已优化了上部水冷壁管屏至集箱的连接长度：将原结构集箱中心线到管屏扁钢末端长度增长，将该管接头由原结构的计算应力最大值1388 MPa降低到116 MPa，与采用弯管的计算最大应力值108 MPa相当，确保前墙水冷壁集箱管接头不会产生疲劳裂纹。上述改进措施已在东锅后续超临界W炉，例如：国电织金、贵州茶园、重庆安穩等项目中得到实施^[3]。

3.3 适当增加水冷壁的壁温(汽温)监测的测点数量

水冷壁壁温的控制，对于防止水冷壁的开裂显得尤为重要。为方便现场运行人员的控制，设置多级水冷壁的报警温度，在水冷壁壁温超过设定值时，及时提醒运行人员，调整运行，对于保证锅炉水冷壁的安全是非常有必要的。例如，某工程水冷壁壁温测点数量由原来的96个，增加到约500个，严密监测水冷壁的壁温情况。

3.4 少油点火装置的使用要充分考虑对水冷壁的影响

在锅炉投运少油点火设备时，应充分考虑少油点火与大油枪的投运协调配合以及切/投中对炉膛水动力、水冷壁壁温影响等。若在投入少油点火时，出现水冷壁壁温超温报警，从安全性考虑，建议撤除少油点火，多投大油枪。

3.5 负荷变化时，调整给水流量的前置信号

在锅炉升、降负荷时，特别容易引起水煤比失调，从而引起包括水冷壁在内的受热面壁温升高。因此在锅炉变负荷前，可适当降低主汽温度，根据汽温及水冷壁壁温变化，及时调节给水量，燃料量(磨煤机容量风)。电厂可根据运行经验调整负荷变化时的给水流量前置信号，可在一定程度上缓解燃料量调整不够及时的问题。

3.6 适当降低减温水流量

在保证对主汽温有效调节的前提下(应尽量通过燃烧调节)，可采用适当降低减温水流量，以减

小过热度的方式来降低水冷壁壁温及热偏差。

4 结论

1)600 MW超临界W火焰锅炉在我国应用广泛，但普遍存在水冷壁超温、拉裂泄露的问题。

2)600 MW超临界W火焰锅炉水冷壁超温、拉裂泄露的原因主要是水冷壁超温、热偏差大，另外锅炉设备的安装缺陷、设计制造缺陷、运行不当等也是其原因之一。

3)解决600 MW超临界W火焰锅炉水冷壁拉裂的根本方法是消除炉膛内水平方向上的热负荷偏差，在炉膛四周设置水冷壁完全混合集箱可减少上部水冷壁偏差幅度约10~20℃。

4)为避免发生前墙水冷壁上集箱管座裂纹现象，可通过调整集箱中心线到管屏扁钢末端长度，将该管接头由原结构的应力最大值降低到较低的水平。

参考文献：

- [1] 吴阿峰, 马旻, 李伟科, 等. 超临界机组可行性研究专题报告[R]. 广州: 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 2013: 11-12.
WU A F, M M, LI W K, et al. The feasibility research report of supercritical unit project [R], Guangzhou: Guang Dong Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, 2013: 11-12.
- [2] 郭大山, 王伟来, 胡双南. 超临界锅炉水冷壁技术特点分析与比较[J]. 锅炉制造, 2012, 7(4): 7-10.
GUO D S, WANG W L, HU S N. Technical character analysis and comparison of supercritical boiler water-wall [J]. Boiler Manufacturing, 2012, 7(4): 7-10.
- [3] 冯强, 魏同生, 梁浩. 600 MW超临界“W”火焰锅炉启动过程中水冷壁超温原因分析[J]. 河北电力技术, 2013, 32(6): 48-49.
FENG Q, WEI T S, LIANG H. Cause analysis on severe waterwall tube overheating of 600 MW supercritical w-flame boiler during startup [J]. Hebei Electric Power, 2013, 32(6): 48-49.
- [4] 徐金苗, 吴阿峰, 樊晓茹, 等. 磨煤机配套钢球的选型及技术经济研究[J]. 南方能源建设, 2015, 2(Supp. 1): 178-182.
XU J M, WU A F, FAN X R, et al. Study on steel mill ball selection and technique economic research [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 178-182.