

660MW 超临界 W 火焰锅炉上部水冷壁拉裂治理研究

王康¹, 王玲洋²

1. 国家电投集团贵州金元股份有限公司, 贵州 贵阳 550081

2. 贵州金元茶园发电有限责任公司, 贵州 毕节 551800

DOI:10.61369/EPTSM.2025030017

摘 要 : 聚焦某火电厂两台 660MW 超临界参数 W 火焰锅炉上部水冷壁管频繁拉裂现象, 开展致裂机理分析。在此基础上, 针对水冷壁管温差大、膨胀受限及炉墙晃动叠加效应三个方面的致裂原因进行对应治理策略研究, 并加以实施。实施后的机组运行情况表明, 措施行之有效, 可作为同类型机组运维借鉴, 也可作为该型锅炉预防性检修的重要手段。

关 键 词 : W 火焰锅炉; 水冷壁管; 拉裂; 机理分析; 治理研究

Research on the Treatment of Upper Water-Cooled Wall Tearing in 660Mw Supercritical W Flame Boiler

Wang Kang¹, Wang Lingyang²

1. State Power Investment Corporation Guizhou Jinyuan Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081

2. Guizhou Jinyuan Tea Garden Power Generation Co., Ltd., Bijie, Guizhou 551800

Abstract : Focusing on the frequent tearing phenomenon of the upper water-cooled wall tubes of two 660MW supercritical parameter W flame boilers in a certain thermal power plant, the cracking mechanism analysis is carried out. On this basis, corresponding treatment strategies are studied and implemented to address the causes of cracking in three aspects: large temperature difference, limited expansion, and combined effect of furnace wall shaking in water-cooled wall tubes. The operation of the unit after implementation shows that the measures are effective and can be used as a reference for the operation and maintenance of similar units, as well as an important means of preventive maintenance for this type of boiler.

Keywords : W-shaped flame boiler; water-cooled wall tube; tension crack; mechanism analysis; treatment research

引言

“双碳”背景下, 新型电力系统中新能源比例的不断增高, 对传统燃煤发电机组的运行方式提出了新的要求。该厂两台 660MW 超临界参数燃煤发电机组是区域骨干电源点, 是区内基础负荷和调峰、调频的主要支撑。针对现有矛盾加强预防性检修, 采取行之有效的治理措施, 提升设备可靠性, 减少主、辅设备故障造成非计划停机, 为区域能源保供提供可靠支撑, 对提高火电企业核心竞争力, 意义重大。

因超临界参数 W 火焰锅炉固有的结构特性, 国内同类型机组水冷壁拉裂造成锅炉停运或降出力的问题普遍存在。该火电厂 2 台 660MW 超临界变压直流炉自 2015 年投运至今, 一直受到水冷壁管频繁拉裂的困扰。针对锅炉机组存在的这一现实问题, 论文聚焦拉裂频次高的上部水冷壁, 开展造拉裂机理分析, 提出系列治理措施, 旨在为预防性检修奠定基础。^[1]

一、水冷壁管拉裂情况

缝。1 号炉冷灰斗水冷壁有 8 条裂缝, 2 号炉冷灰斗有 5 条裂缝。

从 2016 年至 2020 年, 该火电厂 1、2 号炉因水冷壁拉裂引发机组非计划停运 12 次, 其中上部水冷壁拉裂的次数有 6 次, 占比 50%。

因应力长期存在, 在前墙和灰斗均形成水冷壁鳍片大范围裂纹。两台锅炉前墙上部水冷壁各有 3 条长度在 10 米左右的拉裂裂

二、水冷壁拉裂机理分析

结合两台锅炉因水冷壁拉裂停炉后观察到的实际情况及机组运行历史数据, 进行水冷壁拉裂机理研究, 分析造成这一问题的原因

作者简介:

王康 (1974.04-), 男, 汉族, 湖北武汉人, 大学本科, 工程师, 从事的研究方向: 火电机组锅炉可靠性技术管理。

王玲洋 (1995.01-), 男, 汉族, 重庆忠县人, 大学本科, 工程师, 从事的研究方向: 燃煤火力发电厂。

主要包括管壁温差大、水冷壁管膨胀受限和炉膛燃烧工况不稳造成炉墙晃动引起水冷壁间拉扯等三个方面。

（一）管壁温差大

超临界 W 火焰锅炉炉膛较宽，受制于下炉膛结构只能采用垂直管圈，缺乏四角切圆或对冲炉型的螺旋管圈

均温手段，锅炉水冷壁温控制难度大。尤其是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，水平方向上的热负荷极不均匀的加剧水冷壁的热偏差。^[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。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。

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，导致管组温差大。

以上情况均会导致水冷壁管屏、管子之间存在一定热偏差，造成水冷壁管间承受较大应力，且该应力无法有效吸收、释放，随着锅炉启停次数及运行中汽温、壁温变化，应力反复作用，且刚性梁刚度不足，水冷壁管屏反复弯折，最终在相对薄弱的鳍片与管间部位因金属疲劳产生拉裂或挤裂。

（二）水冷壁管竖向膨胀受限

超临界参数 W 火焰锅炉因炉型特殊，分上下两部分悬挂，上部炉膛水冷壁设置有中混集箱，中混集箱虽与上部水冷壁一体，但其连接管设置了独立吊挂，连接管与中混集箱存在支撑关系，为上部水冷壁增加了一个中间悬挂点。

连接管恒力弹簧吊架设计选型标准低，未能充分吸收水冷壁下行膨胀位移，导致前墙上部水冷壁以该中间悬挂点为分界线，上部膨胀不足向外膨出，并给上部水冷壁沿水平方向晃动预留了柔性空间，尤其以结构简单、自身刚度不足的前墙上部水冷壁矛盾最为突出。

（三）上部炉墙晃动大

W 火焰锅炉水冷壁采用膜式水冷壁，在机组正常运行过程中，一是炉内正常燃烧时，燃烧场压力波动造成炉墙周期性晃动；二是在燃烧不稳、垮焦、炉膛瞬间爆燃等特殊情况，炉墙承受巨大压差变化引起大范围晃动。

第一种情况导致上部水冷壁周期晃动，水冷壁与刚性梁链接卡扣产生微量滑动累积，引发水冷壁沿水平方向收缩或拉伸，产生局部波浪变形，并在波峰部位产生应力疲劳；第二种情况在疲

2016年-2020年1号炉水冷壁拉裂位置				
序号	时间	设备名称（位置）	单位（mm）	备注
1	2016年4月	1号炉水冷壁炉膛上部第一管圈	500mm	
2	2017年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第二管圈	400mm	
3	2017年4月	1号炉水冷壁炉膛上部第三管圈	300mm	
4	2017年7月	1号炉水冷壁炉膛上部第四管圈	700mm	
5	2018年10月	1号炉水冷壁炉膛上部第五管圈	1200mm	
6	2018年10月	1号炉水冷壁炉膛上部第六管圈	1000mm	
7	2018年10月	1号炉水冷壁炉膛上部第七管圈	800mm	
8	2018年12月	1号炉水冷壁炉膛上部第八管圈	200mm	
9	2019年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第九管圈	600mm	
10	2019年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第十管圈	1100mm	
11	2019年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第十一管圈	600mm	
12	2019年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第十二管圈	200mm	

图1 号炉水冷壁拉裂的时间和部位

劳部位引发撕裂泄漏。

三、水冷壁拉裂治理措施研究

针对前述三方面原因，分别开展治理措施研究，并结合现场实际加以实施。

（一）管壁温差大问题

一是加强水冷壁壁温控制：运行中相邻管壁温度和同一断面最高管壁温差均控制在50℃以内；机组启动时严控锅炉上水速率（一般情况都是控制在4小时以上）；机组停运后控制锅炉冷却速率（启风机强制冷却时间推迟12小时）。

二是主动疏导应力，对水冷壁采取主动开缝释放膨胀，并在开缝两段设置止裂孔阻断裂纹扩展。开缝部位设置 V 型密封，为水冷壁提供柔性约束，并密封炉墙。

开缝设计计算：鳍片拉裂，管子变形。根据现场实际情况，假定沿炉长方向管子变形10mm，沿炉宽方向管子变形20mm；

管道位移最大许用应力： $[\sigma]_a = f[1.25\sigma_c + 0.25\sigma_h]$ ， σ_c 和 σ_h 为低温、高温时的材料许用应力，取147MPa（20℃）、88MPa（500℃，设计温度高，放大了安全系数），全温度循环次数不超过14000， $f = 0.9$ ，计算得 $[\sigma]_a = 185.18MPa$

弹性模量 E 取186GPa（350℃，设计温度低，放大了安全系数），截面惯性矩 $I = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{64} = 41009mm^4$

沿炉长方向管道位移 $y_{Bo} = 10mm$ ，沿炉宽方向管道位移 $y_{Bi} = 20mm$ ，以现让管起弧处为始点，开缝长度另一端为终点，裂缝长度 $l = 1300mm$ ，沿炉长方向始点等效压力根据挠度变形公式推导得 $y_B = \frac{F_l^3}{3EI} \Rightarrow F_o = \frac{3EIy_{Bo}}{l^3} = 104N$ ，沿炉长方向弯曲力矩 $M_o = F_o \cdot l = 135403N \cdot mm$ ；沿炉长方向始点等效压力 $y_B = \frac{F_l^3}{3EI} \Rightarrow F_i = \frac{3EIy_{Bi}}{l^3} = 208N$ ，沿炉宽方向弯曲力矩 $M_i = F_i \cdot l = 270805N \cdot mm$ ，合成力矩 $M_E = \sqrt{M_o^2 + M_i^2} = 302769N \cdot mm$ ；

管道最大位移应力范围： $\sigma_E = \frac{M_E}{W}$ ，其中截面系数 $W = \frac{\pi}{32D_o}(D_o^4 - D_i^4) = 1680mm^3$ ，所以最大位移应力范围 $\sigma_E = \frac{M_E}{W} = 180.22MPa$ ，小于位移许用应力 $[\sigma]_a = 185.18MPa$ ，符合要求。

V 型密封设计计算：

V 型密封夹角 90°，边长均为70mm，长度1500mm。

V型密封焊接连接鳍片，沿炉长（或炉宽）方向位移不超过3.8mm时，为弹性形变，当位移超过7.6mm时，将发生破坏性塑性形变。

当 V 型密封沿炉长（或炉宽）方向位移10mm时，V 型密封将对所连接水冷壁提供约 2.57×10^4N 约束力；位移20mm时，V 型密封将对所连接水冷壁提供约 5.13×10^4N 约束力。

外加 V 型密封在不同温度偏差时均可以有效降低水冷壁管横截面最大等效应力，并改变最大等效应力集中位置使最大等效应力在材料许用应力之下，对水冷壁管及鳍片能起到有效的保护作用，使之能够适应现实运行中遇到的问题，降低因水冷壁拉裂而带来的安全性和经济性问题。^[3]

（二）水冷壁管竖向膨胀受限问题

对恒力弹簧吊架重新选型，由原1.2位移系数调整为1.4位移系数，充分释放上部水冷壁下移膨胀量，使得上部水冷壁主要依靠顶部吊挂承重，向下膨胀自由，以自重张力增强上部水冷壁刚度，降低晃动幅度。

恒力弹簧吊架是一种解决超临界参数 W 火焰锅炉膜式水冷壁拉裂问题的水冷壁柔性性与刚性结合的垂直悬吊与邻墙角部铰接组合结构，包括横列弹性垂直悬吊件和刚性垂直悬吊件，横列弹性垂直悬吊件在锅炉每角设置9个，四个角共设置36个，按联络管系长度方向间隔布置，每个横列弹性垂直悬吊件两端分别固定连接在位于炉膛外的下水冷壁出口水平集箱管系及水冷壁入口水平集箱管系至竖直混合集箱管系之间的联络管系和锅炉中部大板梁上，刚性垂直悬吊件在锅炉左右两侧墙外中心位置各设置1个，每个刚性垂直悬吊件两端分别固定连接在位于炉外的下水冷壁竖直混合集箱管系顶部与和锅炉中部大板梁上，刚性悬吊件确定联络管系热膨胀死点。横列弹性垂直吊件弹性位移系数，指在设计位移量的基础上，预留位移余量，如位移系数1.4，即预留设计位移量的40%。主要为确保设备异常（如水冷壁温度超限、炉膛压力超限等）情况下，充分考虑水冷壁的允许弹性变形量，使其能够自由膨胀、发生弹性形变，不发生局部塑性变形。有限提升了炉膛内水冷壁管向下的膨胀自由，降低了鳍片及水冷壁管的应力水平，降低水冷壁被拉裂的风险。

（三）炉墙晃动大问题

一是在 A 侧标高约50m 处加装止晃装置，止晃装置与水冷壁连接点加装3mm 隔板一块，将该处预留间隙减至2mm，约束炉墙位移量，有效降制约前墙晃动，降低疲劳拉裂风险，如图3所示。

二是对所有刚性梁连接部位间隙予以复查，对安装间隙大的，使用套筒结构调至设计间隙至1mm，如图2所示。

在锅炉炉膛外相邻两面墙角45°角安装的铰接销轴与夹板套筒间隙配合铰链装置，其销轴与夹板套筒间的间隙为1mm，销轴活动穿过夹板套筒，夹板套筒采用两个，分别固定连接在双耳板的两个耳板孔上，双耳板的两个耳板之间插入单耳板且通过销轴与夹板套筒铰接，铰接销轴与夹板套筒间隙配合铰链装置在锅炉标高50m 处，与横列弹性垂直悬吊件和刚性垂直悬吊件相近标高位置，相近标高位置邻墙角部45°角安装铰接销轴与夹板套筒小间隙配合，间隙的存在保证了一定程度的膨胀自由，小的间隙取值限制了水冷壁邻墙角接位置的旷动位移，降低了过大位移传递于邻墙的应力，配合水冷壁柔性性与刚性结合的垂直悬吊，进一步有效降低了水冷壁管拉裂的风险。

同时在标高50m 层前墙刚性梁处沿炉宽方向增设5只液压阻尼器，如图3所示，液压阻尼器两端分别固定连接在前墙刚性梁下方

100mm 处竖梁上和锅炉炉墙的立柱上；阻尼器一端固定连接接长杆，另一端铰接于上滑动板上的铰接双耳，接长杆铰接在竖梁上，上滑动板底部两端分别通过剪力销固定连接在两下滑动板上，剪力销穿过上滑动板和下滑动板后采用上螺母和下薄螺母锁紧，双螺母锁紧限位更可靠，两下滑动板分别固定连接在两根 H 型钢上，两下滑动板与两根 H 型钢之间分别设置有加强筋板，能够提

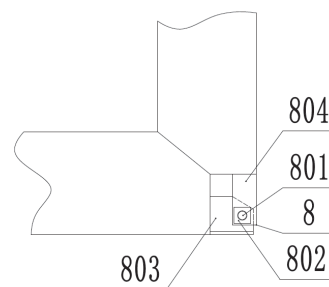


图2 连接部位套筒结构

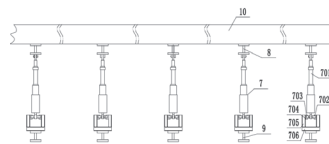


图3 前墙液压阻尼器

高两根 H 型钢同一侧端部固定连接在支撑横梁的两端部，支撑横梁中部固定连接立柱上，竖梁、支撑横梁和立柱为 H 型钢结构，立柱正对的支撑横梁中部处的设置加固板，提高支撑刚性和强度。

通过安装阻尼器，使 W 火焰锅炉的火焰负压气流波动对膜式水冷壁冲击作用下，膜式水冷壁固定连接在前墙上，液压缓冲器能够起到对前墙起到减震缓冲作用，进而使得膜式水冷壁能够在火焰气流的冲击下避免被损坏的概率，尤其是在膜式水冷壁焊接等薄弱处的损坏，将大幅减小锅炉运行期间炉墙晃动量，减少炉墙的交变应力。^[4]

四、结论

针对超临界参数 W 火焰锅炉固有结构特点和新形势下传统燃煤发电机组运行方式发生的根本性改变造成水冷壁频繁拉裂进而导致非计划停机和迫减负荷降出力问题，开展了造成水冷壁拉裂的机理研究，提出相应治理措施。措施实施后的情况表明，水冷壁炉墙晃动幅值降幅达75%，上部水冷壁未再发生拉裂情况，为同类型锅炉机组运维提供了借鉴，也为预防性检修奠定了良好基础。

五、遗留问题

以上治理措施较好的解决了该炉型上部水冷壁和下炉膛前后墙水冷拉裂问题。因设计结构问题，下炉膛角部、侧墙与下炉膛灰斗结合部易撕裂问题有待进一步优化局部结构予以解决。同时该炉型水冷壁鳍片设计厚度6mm，较内螺纹水冷壁壁厚大0.5mm，该矛盾会导致水冷壁应力集中区域优先撕裂水冷壁管壁导致泄漏频发，这一问题在锅炉出厂后无法优化，已反馈锅炉设计单位进一步优化设计标准。

参考文献

- [1] 徐金苗, 李伟科, 吴阿峰, 等. 600 MW 超临界 W 火焰锅炉水冷壁拉裂研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(01): 49-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.008.
- [2] 王飞, 唐晓飞, 赵海峰. 锅炉炉墙局部晃动分析及处理 [J]. 华北电力技术, 2008, (01): 44-45. DOI: 10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2008.01.007.
- [3] 王良伟. 超临界 W 火焰锅炉水冷壁变形、拉裂问题及对策 [J]. 中国设备工程, 2021, (01): 104-105.
- [4] 许好好, 鲍昕. 热力承压部件膨胀不畅引发的失效分析及防范 [J]. 中国特种设备安全, 2014, 30(12): 47-50.