

沁北发电厂超临界压力电站锅炉 水冷壁截面温度场分析

张志正, 孙保民, 徐 鸿, 郭永红

(电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Analysis of the Water Wall Temperature Field of 600 MW Supercritical Boiler of Qinbei Power Plant

ZHANG Zhi-zheng, SUN Bao-min, XU Hong, GUO Yong-hong

(Key laboratory of Condition Monitoring & Control for Power Plant Equipments, North China
Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Ultra- and supercritical pressure electricity-generating units with the virtues of high efficiency, low emission, good load regulation and steady operation should be developed actively in the nations that have plenty coal resource. But much transverse cracking of water wall tube failure occur in many units. In-depth research is needed. In the paper, membrane water wall temperature fields of 600 MW supercritical boiler of Qinbei power plant were calculated out in many work condition by numerical method. From analysis of relation of the difference of two key points on backside and severe points on fireside, formula can be fitted. The formula can carry out on-line monitoring temperature of severe points. The paper also makes an opinion on the design of the water wall tube.

KEY WORDS: thermal power engineering; membrane water wall; wall temperature; numerical simulation; fitting

摘要: 超(超)临界压力发电技术现在已经是成熟的技术, 具有效率高、排放少、易于调峰、运行稳定的优点, 是一次能源以煤为主的国家应大力发展的机组。但大多数机组存在水冷壁横向裂纹失效的问题, 因此, 有必要对这一问题进行深入研究。针对沁北发电厂 600 MW 超临界压力锅炉膜式水冷壁, 通过数值方法模拟了多种工况下水冷壁的温度场, 分析了背火侧两个关键点的温差与向火侧危险点温度的关系, 拟合出了关系式。此关系式可用于向火侧壁温的在线监测。文章还根据数值模拟结果对沁北电厂水冷壁管径的选择进行了评价。

基金项目: 国家高技术研究发展 863 计划经费项目 (2002AA526015)。
The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2002AA526015) .

关键词: 热能动力工程; 膜式水冷壁; 壁温; 数值模拟; 拟合

0 引言

河南华能沁北发电有限责任公司(华能沁北电厂)装有两台 600MW 超临界火电机组, 均已正式投产发电。

超(超)临界压力发电技术现在已经是成熟的技术, 具有效率高、排放少、易于调峰、运行稳定的特点, 是一次能源以煤为主的国家应大力发展的机组^[1-2]。但是在发展过程中也曾出现过一些问题, 如: 美国 155 台超临界机组大多数存在水冷壁横向裂纹失效, 这种裂纹都发生在热负荷最高的下辐射区。美国电力研究院(EPRI)经过 3 年试验研究认为壁温峰值是导致水冷壁横向裂纹失效的关键因素^[3]。国内直流锅炉也普遍出现此类事故, 经研究也认为超温和温度波动是产生横向裂纹的主要因素^[4]。而且壁温监测是进行故障诊断、寿命管理、运行调整的重要依据。直接在向火侧安装测点来进行长期监测显然是不可行的, 只有采用间接监测的方法。

1 沁北发电厂锅炉概况简介

沁北发电厂采用的是 DG1900/25.4-III 型锅炉, 是东方锅炉(集团)股份有限公司与日本巴布科克-日立公司及东方-日立锅炉有限公司合作设计、联合制造的 600MW 超临界本生直流锅炉。炉膛下部水冷壁(包括冷灰斗水冷壁、中部螺旋水冷壁)都采用螺

旋盘绕膜式管圈,安装在从水冷壁进口到折焰角水冷壁下标高 52608.9 mm 处。螺旋水冷壁管全部采用六头、上升角 60° 的内螺纹管,共 456 根,管子规格 $F38.1 \times 7.5$,材料为 SA-213T2。炉膛冷灰斗处管子节距为 50.8 及 49.827 mm,冷灰斗以外的中部螺旋盘绕管圈,倾角为 19.471° ,管子节距 50.8 mm。冷灰斗管屏、螺旋管屏膜式扁钢厚 $d=6.4$,材料为 15CrMo,均采用双面坡口型式。上炉膛水冷壁与常规炉膛水冷壁没有差异,采用结构和制造较为简单的垂直管屏,垂直管屏管子规格为 $F31.8 \times 9.1$,节距 50.8 mm;膜式扁钢厚 $d=6.4$,材料为 15CrMo,采用直条式且不开坡口^[5]。由于下辐射区热负荷最高,所以研究重点发在下辐射区螺旋管圈水冷壁。

2 研究方法

2.1 指导思想

国内外关于水冷壁壁温求解的文献很多,但至今未实现壁温的准确在线监测,主要原因是:所有文献中对水冷壁温度场的求解都把所求高度位置的管外局部热负荷 q_0 、管内对流换热系数 a_2 、工质温度 t_p 作为已知条件,但对于锅炉 q_0 、 a_2 、 t_p 的准确的在线测量和计算存在一定困难,所以在线监测危险点温度难于实现^[6-7]。

本文采用通过建立水冷壁温度场数学模型来间接获得危险点(向火侧管壁中点或鳍片端部)温度,通过建立水冷壁温度场的数学描写,用数值模拟方法求解多个工况下的水冷壁温度场分布,最终能找到背火侧壁温和向火侧壁温的关系。把这种关系抽象出来,拟合成具体的关系式,以实现通过监测背火侧温度间接得到向火侧危险点温度。

2.2 数学模型

由于管子尺寸相对于炉膛空间来说很小。可以认为管子温度场是左右对称的,计算区域可以只选择管子截面的一半。如图 1 所示。

膜式水冷壁工作时受到两个基本的传热作用:一个是炉内火焰和烟气对其向火侧外表面输入的辐射热(加热作用),另一个是水冷壁管内壁与工质的对流换热,向工质释放热量(冷却作用)。为简化计算,对于超临界压力锅炉,合理引入如下假设:

(1) 对于超临界压力锅炉,由于管内始终是单

相流体,随着工质流动吸热温度逐渐升高,所以沿水冷壁管子轴向管壁温度也逐渐升高。但根据文献[8]给出的各种型式的超临界锅炉可以粗略地算出沿管子轴向温度梯度(约为 $2.5 \sim 6.5^\circ\text{C}/\text{m}$)与截面内温度梯度(约为 $5000 \sim 15000^\circ\text{C}/\text{m}$)相比很小,所以轴向导热可忽略不计。因此导热问题可看作任一截面的二维问题。

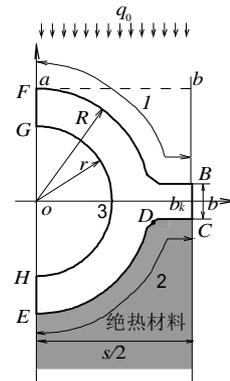


图1 沁北发电厂膜式水冷壁计算区域及边界条件示意图
Fig. 1 Sketch map of calculation area and boundary conditions of membrane water-wall tube of Qinbei power plant boiler

(2) 在超临界压力下,因为是单相流体,任一截面的管内壁与工质的对流换热系数和工质温度可以看作沿管内周界均匀分布,并在某一个工况下稳定不变,这与亚临界及以下压力不同。对于内螺纹管,内径取为当量内径便可按同样方法处理^[9]。

(3) 由于锅炉即使在启动、停运和变负荷运行时的温度变化率很慢(小于 $3^\circ\text{C}/\text{min}$),水冷壁温度场的变化对于监测来说足够缓慢,所以可将水冷壁中的导热视为稳态导热。

(4) 膜式水冷壁的金属材料是各向同性的,只考虑导热系数随温度的变化而变化。

(5) 膜式水冷壁经炉墙所散失的热量可忽略不计,即背火侧是绝热的。

(6) 膜式水冷壁接受的辐射热都是从 ab 假想平面传入,而且在 ab 面上辐射热负荷 q_0 均匀分布。不论是垂直管屏式还是螺旋管圈式均可这样处理,对于螺旋管圈式水冷壁,只要保证计算截面与管子轴线方向垂直即可;

(7) 水冷壁管内、外壁为清洁壁面。

基于以上假设,可以给出整个计算区域的导热微分方程和边界条件为

$$\begin{cases} \partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2 = 0 \\ \partial t / \partial n|_1 = -q(x) / I \\ \partial t / \partial n|_3 = -a_2(t - t_p) / I \\ \partial t / \partial n|_{2.BC.EH.FG} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： t 为金属温度分布， $^{\circ}\text{C}$ ； t_p 为管内工质温度， $^{\circ}\text{C}$ ； I 为金属管壁和鳍片的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； a_2 为管内对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ； $q(x)$ 为向火侧管外壁热流密度， $q(x)=q_0\psi(x)$ ， W/m^2 ，其中， q_0 是计算区域平均辐射热负荷， $Y(x)$ 是管壁和鳍片接受火焰的角系数，随 x 的变化而变化，计算方法见文献[10-11]。

这是一个典型的二维导热微分方程，本文采用数值模拟软件针对沁北发电厂超临界压力直流锅炉水冷壁截面温度场进行了数值求解，水冷壁结构和物理参数见表 1。

表 1 沁北电厂 1900t/h 超临界压力锅炉水冷壁结构和物理参数

Tab.1 The structural and physical parameters of the water wall tube of the 1900t/h supercritical boiler in Qinbei Power Plant

参数	外径 D /mm	内径 d /mm	节距 s /mm	鳍端厚度 b_b /mm	鳍根厚度 b_k /mm	管壁导热系数 λ /[W/($\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)]
数值	38.1	23.1	50.8	6.4	6.4	54.607-0.0307t

在沁北电厂得锅炉水冷壁可能发生的工况条件下，对于管内工质温度 $t_p=320^{\circ}\text{C}$ 、 340°C 、 360°C 、 380°C 、 400°C 、 420°C ，管外热负荷 $q_0=100$ 、 150 、 200 、 $250 \text{ kW}/\text{m}^2$ ，和管内对流换热系数 $a_2=10000$ 、 15000 、 20000 、 $25000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 的所有组合共 96 个工况，进行了温度场的数值模拟及分析。

2.3 数值模拟结果分析

本文选用背火侧关键点是 E 点和 C 点(见图 1)，因为这两点易于测量且对安装精度不敏感。向火侧 F 点热流密度最大， B 点冷却最差，所以是两个危险点。通过对数值模拟结果分析发现，在保证 q_0 和 a_2 不变时，各点壁温虽然随工质温度变化而变化，但与工质温度保持恒定差值。也就是说， B 、 C 、 E 、 F 各点之间温差与工质温度无关。其证明和文献[12]中的例子相同。其中工质温度为 350°C 时，不同 q_0 和 a_2 组合工况下数值模拟结果如图 2 所示。可以看出，背火侧温差 Δt_{EC} 与温差 Δt_{EF} 、 Δt_{EB} 成较好的线性关系。

根据图 2 的拟合公式，向火侧危险点壁温可表示为

$$\Delta t_B = \Delta t_E + \Delta t_{EB} \quad (2)$$

$$\Delta t_C = \Delta t_E + \Delta t_{EC} \quad (3)$$

经比较，拟合曲线计算和数值模拟结果的绝对误差不超过 2.2°C ，相对误差不超过 2.5% 。由于水冷壁温度场的数值模拟结果的准确性已经被多方面验证，所以根据数值模拟结果拟合的公式的准确程度值得信赖。

这一点与文献[12]中的不同。因此可以根据测量 E 点和 C 点的温度就可间接知道 F 点和 B 点的温度，可称这种方法为“背火侧两点法”。比文献[12]中的“背火侧三点法”少了一个测点。

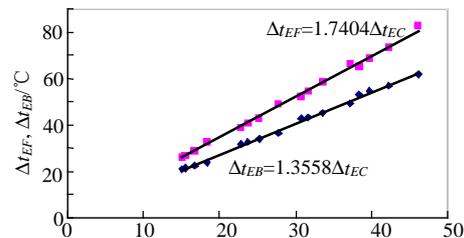


图 2 温差 Δt_{EC} 与 Δt_{EF} 、 Δt_{EB} 的关系的拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of relation between Δt_{EC} , Δt_{EF} and Δt_{EB}

“背火侧两点法”的优点在于：

- (1) 大量安装时减少了设备投资。
- (2) 减轻了传感器对温度场的破坏，使测量更准确。
- (3) 克服了鳍根处不易安装测点，温度梯度大、不易测准的缺点。

分析还发现，无论哪种工况，向火侧管子中点 F 点的温度始终比向火侧鳍端 B 点的温度高，最大差值可达 50.1°C ， F 点与背火侧管子中点 E 点的温差最大可达 138.1°C ，这说明危险点始终在 F 点，这应该是水冷壁管在设计上的不妥之处。正常情况下应该是 F 点和 B 点温度在不同的工况下温度交错，并比较接近。

根据热传导的基本原理和热阻的概念可知这是管壁选择过厚的缘故。通过与同样是 600 MW 超临界机组的几个电厂的相同容量和参数锅炉的水冷壁比较(见表 2)，也可以看出华能沁北发电厂的锅炉水冷壁厚度比其它几个电厂大 $1.5\sim 1.8 \text{ mm}$ 。

表 2 几个超临界 600MW 电厂的锅炉水冷壁尺寸比较
Tab. 2 The comparison of water wall sizes of several 600 MW power plants

尺寸/mm	电厂名称			
	华能沁北 发电厂	上海石洞口 二厂	俄罗斯 某电厂	日本某 电厂
外径	38.1	38	32	28
厚度	7.5	5.6	6	6
管间距	50.8	53	48	42

如果水冷壁管子设计过厚， F 点就容易超温。

而且在锅炉吹灰、启停、调峰以及水冷壁出现结渣、掉渣等现象时，使水冷壁温度交替变化幅度更大，更剧烈，更容易产生金属疲劳和横向裂纹。通过与以上相同的方法进行的数值计算发现，如果把沁北电厂的水冷壁管子在设计时减薄 1.5 mm，外径为 36.1 mm，内径不变，而且水冷壁管间距不改变，不会改变锅内工况。可以使 F 点温度降低，和 B 点的温度就基本在同一个水平，其数值模拟结果的拟合曲线如图 3 所示。本文按文献[13]的计算标准进行了强度计算，强度同样可满足要求（计算过程不再赘述）。这样至少可以使水冷壁管子重量减少 1/4。这样锅炉总重量减轻，不仅可以节省较大的投资，还能使水冷壁热应力更小，工作更安全。

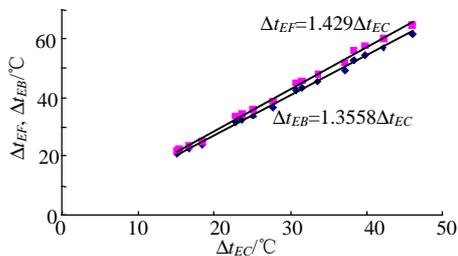


图3 管子减薄后温差 Δt_{EC} 与 Δt_{EF} 、 Δt_{EB} 的关系的拟合曲线
Fig.3 Fitting curves of relation between Δt_{EC} 与 Δt_{EF} 、
and Δt_{EB}

3 结论

使用本文提出的针对沁北电厂给出的拟合公式，通过背火侧二点温度来计算膜式水冷壁向火侧危险点温度，精度满足工程应用，可用于对膜式水冷壁向火侧危险点温度进行在线监测参考。

通过分析，本文认为沁北发电厂水冷壁管壁厚度可设计薄一些。可减少投资且有利于水冷壁安全。

参考文献

- [1] 宋之平. 从超临界化浅谈优化我国火电结构的发展模式[J]. 现代电力, 2002, 19(1): 1-7.
Song Zhiping. Remarks on development made for updating fossil fuel power constitution in China[J]. Modern Electric, 2002, 19(1): 1-7(in Chinese).
- [2] 陆延昌. 大力发展超临界压力机组, 优化火电结构[J]. 中国电力, 2000, 33(1): 1-5.
Lu Yanchang. Derote major efforts to developing supercritical pressure generating units,optimize thermal power mix[J]. Electric Power,2000,33(1): 1-5(in Chinese).
- [3] Barry Dooley. A vision for reducing boiler tube failures[J]. Power Engineering, 1991, (10): 148-154.
- [4] 刘勇,唐必光,余艳芝. 锅炉水冷壁管横向裂纹故障机理分析[J]. 华东电力, 1999, 9: 37-39.

- Liu Yong, Tang Biguang, Yu Yanzhi. An analysis on mechanism of transverse cracking of water wall tube failure in boiler[J]. East China Electric Power, 1999, 9: 37-39(in Chinese).
- [5] 锅炉结构说明书[R]. 东方锅炉股份有限公司, 2003. 4.
Boiler structure instruction book[R]. Dongfang Boiler Group CO., LTD, 2003(in Chinese).
- [6] Fang Z H, Xie D L, Diao N R, et al. A new method for solving the inverse conduction problem in steady heat flux measurement 职[J]. Int. J. Heat Mass Rransfer, 1997, 40: 3947-3953.
- [7] Fang Z H, Xie D L, Diao N R. Error analysis of heat flux measurement on membrane waterwalls[C]. In: Proceeding of the 11th International Conference on Heat Transfer, Seoul, 1998.
- [8] 樊泉桂. 亚临界和超临界压力锅炉[M]. 北京: 中国电力工业出版社, 2000.
- [9] 郑建学, 陈听宽, 陈学俊, 等. 600MW 变压运行直流锅炉水冷壁内螺旋管内壁换热特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 271-275.
Zheng Jianxue, Chen Tingkuan, Chen Xuejun, et al. Investigation on internal surface heat transfer in internally ribbed tubes of sliding-pressure operation once-through boiler's water wall[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 271-275(in Chinese).
- [10] 盛春红, 陈听宽. 矩形鳍片膜式水冷壁辐射角系数的求解[J]. 锅炉技术, 1997. (8): 8-11
Sheng Chunhong, Chen Tingkuan. Derivation for radiation angle factor of membrane water wall with rectangular fins[J]. Boiler Technology, 1997, 8: 8-11(in Chinese).
- [11] 周一工. 600MW 超临界压力锅炉水冷壁温度场计算外边界条件的确定[J]. 电力建设, 1974. 5: 23-43.
Zhou Yigong. Determination for calculation of outer boundary conditions of the temperature field of 600mw supercritical pressure boiler water wall[J]. Electric Power Construction, 1974, (5): 23-43(in Chinese).
- [12] 张志正, 孙保民, 郭永红, 等. 超(超)临界压力锅炉水冷壁危险点壁温在线监测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 130-134.
Zhang Zhizheng, Sun Baomin, Guo Yonghong, et al. Research on on-line temperature monitoring of severe point of membrane water wall of ultra-supercritical boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 130-134(in Chinese).
- [13] 宋桂良. 锅炉计算手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1995.

收稿日期: 2005-11-13。

作者简介:

张志正(1971—), 男, 汉族, 博士研究生, 长春工程学院能源动力系副教授, 从事锅炉热力过程的数值模拟和试验研究, zhangzz@ncepubj.edu.cn;

孙保民(1959—), 男, 汉族, 博士后, 教授, 博士生导师, 从事锅炉热力过程的数值模拟和试验研究;

徐 鸿(1959—), 男, 汉族, 博士, 教授, 博士生导师, 从事热能机械的运行安全与监测研究;

郭永红(1975—), 女, 汉族, 博士研究生, 从事锅炉热力过程的数值模拟和试验研究。

(编辑 贾瑞君)