

超临界直流锅炉水冷壁压降及出口汽温计算

卢欢¹, 杨冬¹, 周旭¹, 徐良洪², 边宝², 邵国桢²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 上海锅炉厂有限公司, 200245, 上海)

摘要: 针对超临界直流锅炉水冷壁结构特点及炉内热负荷分布特点, 将水冷壁划分为由流量回路、压力节点和连接管组成的流动网络系统. 根据质量守恒、动量守恒和能量守恒方程, 建立了超临界直流锅炉水冷壁压降和出口汽温的数学计算模型. 在此基础上, 对利港发电厂 600 MW 超临界螺旋管圈直流锅炉在不同负荷时上升系统总压降及上、下炉膛水冷壁出口汽温进行了计算, 并与实炉数据进行了比较, 表明 100% 负荷(锅炉最大连续蒸发量)、75% 负荷及 50% 负荷时, 上、下炉膛水冷壁出口汽温误差均不超过 2%; 75% 负荷时上升系统总压降相差 0.058 MPa, 误差为 2.87%. 由此表明所建立的 600 MW 超临界螺旋管圈直流锅炉水动力计算模型和所开发的程序是正确可靠的, 完全可用于实际工程计算, 为超临界锅炉设计提供了参考.

关键词: 超临界直流锅炉; 螺旋管圈; 压降; 出口汽温

中图分类号: TK223.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)01-0038-05

Calculation of Pressure Drop and Outlet Steam Temperature of Water Wall Pipes for Supercritical Once-Through Boiler

LU Huan¹, YANG Dong¹, ZHOU Xu¹, XU Lianghong², BIAN Bao², SHAO Guozhen²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shanghai Boiler Works Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: The water wall system can be equivalent to a network consisting of circuits, pressure grids, and connecting pipes. A mathematical model for calculating pressure drop and outlet steam temperature of a supercritical once-through boiler was established on the basis of the mass conservation, momentum conservation and energy conservation equations. Moreover, the pressure drop in the up-system and the outlet steam temperature of a 600 MW supercritical once-through boiler with spiral tube coils at Ligang Power Plant were calculated under different loads, and compared with field test data. The results show that the errors of outlet steam temperature of the water wall pipes for the upper-furnace and lower-furnace were all less than 2% under 100% load (boiler maximum continuous rating, BMCR), 75% load and 50% load; the error of the pressure drop under 75% load for the up-system was 2.87%. It shows that the present hydrodynamic calculation model and the program developed for the 600 MW supercritical once-through boiler are accurate and reliable.

Keywords: supercritical once-through boiler; water wall with spiral tube coils; pressure drop; outlet steam temperature

超临界锅炉水冷壁水动力特性研究是超临界锅炉的关键技术之一, 在锅炉设计和校核中具有十分

重要的意义. 目前水动力计算的主要模型^[1]有弦截法、多项式拟合法及直接求解流动回路守恒方程的拟牛顿法,其中拟牛顿法具有计算精度高、能够处理复杂结构回路等优点.

本文采用拟牛顿法,结合具体工程编写了超临界直流锅炉水动力计算程序,并将程序计算结果与实炉数据进行了比较,以分析程序的正确可靠性.

1 锅炉布置

江苏利港发电厂 600 MW 超临界锅炉是在引进美国 ALSTOM 公司超临界锅炉技术的基础上,结合上海锅炉厂有限公司燃用神府东胜煤的经验基础进行设计的超临界变压运行螺旋管圈直流炉,单炉膛、一次中间再热、四角切圆燃烧、平衡通风、Π 型露天布置、固态排渣、全钢架悬吊结构.

烟气从炉膛上部至锅炉尾部依次流过分隔屏过热器、后屏过热器、末级再热器、末级过热器,然后至后烟井的低温再热器及省煤器,最后全部流入炉后尾部两台三分仓容积式空气预热器.

锅炉给水进入省煤器入口集箱,流经省煤器管组、中间集箱和悬吊管,汇合在省煤器出口集箱,再由连接管引入四周相连通的环形水冷壁入口集箱,然后螺旋进入炉膛四面墙水冷壁进行吸热,经水冷壁过渡连接管引至水冷壁中间集箱混合后再由连接管引出,经过渡段形成垂直水冷壁.后墙的 336 根垂直水冷壁形成折焰角,之后分为两路,一路是 280 根管子的垂帘管,一路是 56 根管子的悬吊管.此后,四面墙的工质分别流入出口集箱,通过引出管进入汽水分分离器.

炉膛水冷壁由光管的膜式壁组成,分为上下两部分.炉底冷灰斗入口到中间混合集箱处为 326 根 $\varnothing 38.1\text{ mm}\times 6.36\text{ mm}$ 、节距 54 mm、倾角 13.949° 的 SA-213T12 螺旋管圈水冷壁.上炉膛为垂直水冷壁,结构参数见表 1.

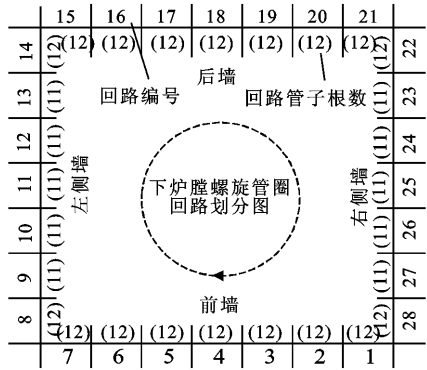
表 1 上炉膛垂直水冷壁结构参数

名称	管材	外径/ mm	壁厚/ mm	节距/ mm	根数
前墙及后墙垂直段	SA-213T12	34.93	6.04	56	336
两侧墙	SA-213T12	34.93	7.96	56	316
后墙折焰角	SA-213T22	34.93	6.21	56	336
后墙垂帘管	SA-213T12	34.93	6.04	56	280
后墙悬吊管	SA-213T22	57.15	15.89	336	56

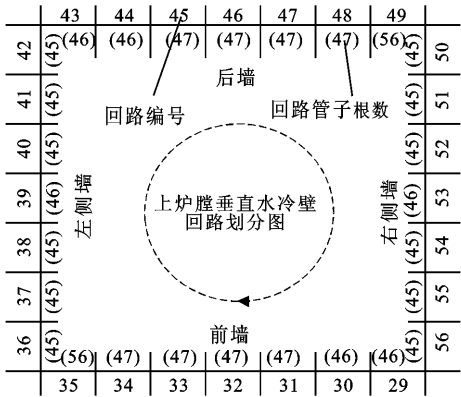
2 数学模型

2.1 回路划分

锅炉炉膛尺寸为 $18.816\text{ m}\times 17.696\text{ m}$,近似为方形,故每面墙划分的回路数均相同.各回路中的管子根数划分原则^[2]为:根据热负荷沿炉宽、炉深方向的分布特点,在热负荷变化剧烈处回路划分较为稠密,而在热负荷变化平缓处回路划分较为稀疏.这样,在计算中能充分反映热负荷分布的不均匀性.图 1 为炉膛水冷壁回路划分示意图.



(a) 下炉膛螺旋管圈回路划分



(b) 上炉膛垂直水冷壁回路划分

图 1 炉膛水冷壁回路划分示意图

2.2 流量分配计算模型

本文通过直接求解回路和节点的守恒方程组来求解流量、压力以及出口汽温. 图 2 为流动网络示意图.

第 59 号连接管遵守的动量守恒方程为

$$p_{70} - p_{71} - (\Delta p_f + \Delta p_g + \Delta p_{jb})_{59} = 0 \quad (1)$$

式中: p_i 为第 i 号节点的压力 ($i=70\sim 81$), Pa; Δp_f 、 Δp_g 、 Δp_{jb} 分别为 59 号连接管的摩擦压降、重位压降和局部阻力压降, Pa.

第 72 号节点遵守的质量守恒方程为

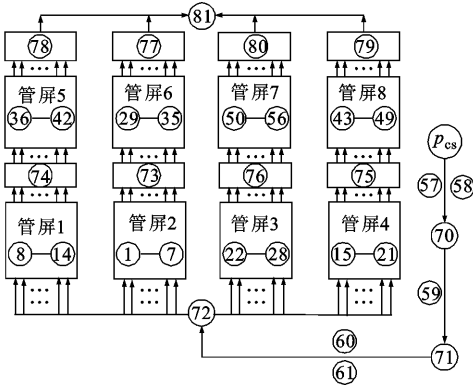
$$G_{60} \cdot N_{60} + G_{61} \cdot N_{61} - \sum_{j=1}^{28} G_j \cdot N_j = 0 \quad (2)$$

式中： G_j 为第 j 号回路的单管质量流量 ($j=1 \sim 69$), kg/s; N_j 为第 j 号回路的管子根数.

能量守恒方程用于计算水冷壁各划分管段的出口焓值

$$h_{i,n}^o = h_{i,n}^i + \frac{q_{i,n} s l_{i,n}}{G_{i,n}} \quad (3)$$

式中： h 为焓值, J/kg; q 为热负荷, W/m²; s 为节距, m; l 为划分管段的长度, m; 上标 o、i 分别代表管段出口、进口; 下标 $i、n$ 代表第 i 回路的第 n 管段.



57~61:连接管;70~71:程序计算中设置的节点;72:四周相通环形水冷壁入口集箱;73~76:中间集箱;77~80:水冷壁出口集箱;81:分离器;管屏 1~4:下炉膛螺旋管圈水冷壁;管屏 5~8:上炉膛垂直水冷壁; p_{cs} :省煤器出口压力

图 2 流动网络系统示意图

2.3 压降计算模型

当流体在管道内流动时,其压降由 4 部分组成,分别为摩擦压降、局部阻力压降、重位压降和加速压降^[3-7]. 由于加速压降所占比重比较小,可以忽略不计,因此管路总压降可写成下式

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_g + \Delta p_{jb} \quad (4)$$

光管内单相工质的摩擦压降可采用下式计算

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_m \omega^2}{2} \quad (5)$$

式中： λ 为摩擦阻力系数; d 为管子内径, m; ρ_m 为计算管段内工质的平均密度, kg/m³; ω 为工质的流速, m/s.

汽水两相摩擦压降可采用下式计算

$$\Delta p_{fp} = \phi_{LO}^2 \Delta p_{fLO} \quad (6)$$

式中： Δp_{fLO} 为按总流量计算的单相水的摩擦压降; ϕ_{LO}^2 为两相摩擦压降倍率, 其值由试验得出^[7].

重位压降计算公式为

$$\Delta p_g = \rho_m g H \quad (7)$$

式中： H 为划分管段的高度, m.

管道系统中安装有各种管件,如弯头、三通、阀门等. 当流体流经这些管件时会产生局部阻力压降. 各管件的局部阻力压降主要依据试验确定,加之管件种类繁多,无法在计算中考虑完全. 因此,程序计算只考虑了部分关键的局部阻力压降.

计算所用到的管段进、出口工质的热力参数通过炉侧热负荷分布曲线和工质流量来确定.

图 3 给出了 100% 负荷时热负荷沿炉膛标高方向的分布. 75% 负荷和 50% 负荷时的热负荷曲线与图 3 类似,但由于投运燃烧器的层数逐步减少,故热负荷曲线的峰值有所减小.

沿炉膛标高方向的水平环带热负荷是热负荷沿炉宽和炉深方向的平均值,用于流量分配的计算. 根据各吸热段在炉墙上的投影位置确定各段的热负荷,该热负荷乘以沿炉宽或炉深方向的吸热不均匀系数,即为计算管段的实际热负荷.

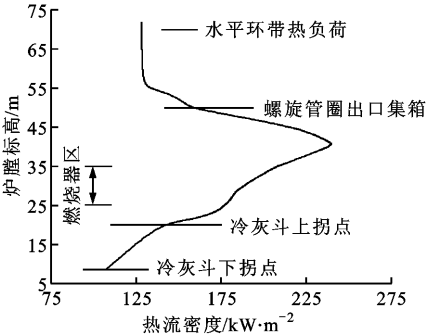


图 3 100% 负荷时热负荷沿炉膛标高方向的分布

整个锅炉水冷壁系统包括 69 个动量守恒方程、12 个质量守恒方程,共 81 个非线性方程. 对此进行直接求解^[8],即可得到水冷壁流量分配及各节点的压力,进而根据各回路入口参数及热负荷逐步分段计算出不同回路不同管段的工质温度.

3 计算结果分析

3.1 系统压降计算与比较

从水冷壁入口集箱到汽水分离器之间的压降称为上升系统压降,包括下炉膛水冷壁压降、上炉膛水冷壁压降及各部分连接管压降. 表 2 给出了上升系统压降的计算值.

表 2 上升系统压降计算值

负荷/%	100	75	50
压降/MPa	3.10	2.02	1.18

螺旋管圈水冷壁以小倾角盘绕炉膛周界上升,质量流速较高,致使水冷壁阻力较大,因此上升系统总压降要比垂直水冷壁大。

现场调研利港电厂 435 MW 时的运行系统图,锅炉负荷类似于 75% 负荷,此时省煤器入口压力为 23.65 MPa,工质为单相超临界水,其密度为 822.7 kg/m³,分离器压力为 21.77 MPa。省煤器入口集箱和炉膛冷灰斗进口的标高分别为 42 730、8 300 mm,计算得出二者之间的重位压降为 0.278 MPa。按照《电站锅炉水动力计算标准》计算省煤器内工质的摩擦压降为 0.08 MPa,则利港电厂实际运行时上升系统的总压降为 (23.65+0.278-0.08)-21.77=2.078 MPa。该数值与计算值 2.02 MPa 相差 0.058 MPa,相对误差为 2.87%。

3.2 出口汽温计算与比较

下炉膛螺旋管圈水冷壁的回路编号是按照炉膛进口布置进行编号的,由于螺旋管圈水冷壁沿炉膛高度右螺旋上升,图中横坐标不再是下炉膛进口时的回路编号,而是与每面墙出口汽温的实炉数据对应后的一个数据编号。出口前墙表示下炉膛螺旋管圈的出口在前墙的回路,其余类似。

图 4 为 100% 负荷时下炉膛螺旋管圈水冷壁出口汽温的计算与比较。

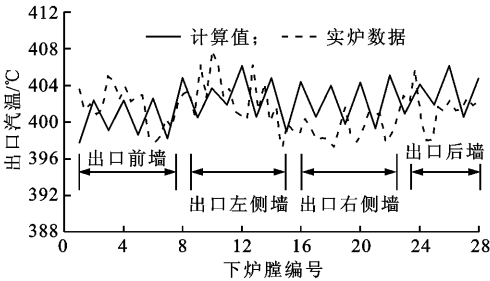


图 4 100% 负荷时下炉膛螺旋管圈水冷壁出口汽温比较

100% 负荷时,下炉膛螺旋管圈水冷壁出口汽温计算值的最大值为 406.1℃,最小值为 397.7℃,平均值为 402.1℃,最大温差为 8.4℃。这是由于螺旋管圈水冷壁盘绕炉膛周界上升,对炉膛燃烧或局部结渣引起的热负荷偏差不太敏感,各根管受热均匀,从而使下炉膛水冷壁管间温度偏差大大减小(相对于一次上升垂直管圈而言)。各计算值与对应的实炉数据的最大值 407.8℃、最小值 396.63℃(最大汽温偏差 11.17℃)、平均值 401.22℃之间的误差分别为 0.42%、0.27%、0.22%,二者符合较好,说明所建立的数学模型和所编制的程序是可靠的。

图 5、图 6 分别为 75% 负荷时下炉膛螺旋管圈

水冷壁、上炉膛垂直水冷壁出口汽温的计算与比较。

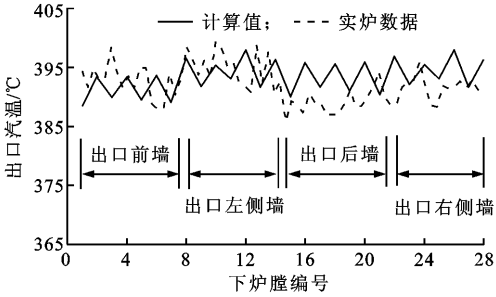


图 5 75% 负荷时下炉膛螺旋管圈水冷壁出口汽温比较

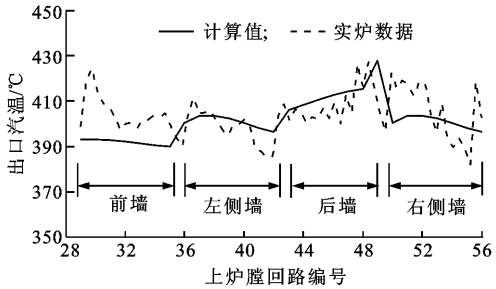


图 6 75% 负荷时上炉膛垂直水冷壁出口汽温比较

75% 负荷时,下炉膛螺旋管圈水冷壁出口汽温计算值的最大值为 397.9℃,最小值为 388.4℃,平均值为 393.35℃,最大温差为 9.5℃,与对应的实炉数据的最大值 399.44℃、最小值 385.9℃(最大汽温偏差 13.5℃)、平均值 391.96℃之间的误差分别为 0.39%、0.65%、0.35%。

上炉膛垂直水冷壁出口汽温计算值的最大值为 437.8℃,最小值为 399.8℃,平均值为 411.68℃,最大温差为 38℃,由此可以看出垂直水冷壁管间温度偏差较螺旋管圈大,这正体现了螺旋管圈的优点。各计算值与对应的实炉数据的最大值 437.21℃、最小值 392.12℃(最大汽温偏差 45.09℃)、平均值 414.12℃之间的误差分别为 0.13%、1.96%、0.60%。水冷壁出口汽温计算值与实炉数据的最小值之间的误差最大,计算值偏高 7.68℃。这是由于本文的回路划分不及实炉测点那样细密,不能刚好在测点的位置上。如果回路划分位置与测点位置一致,出口汽温偏差将会更小,整体趋势将更加符合。

图 7 为 50% 负荷时下炉膛螺旋管圈水冷壁出口汽温的计算与比较。

50% 负荷时,下炉膛螺旋管圈水冷壁出口汽温计算值的最大值为 368.7℃、最小值为 353.7℃,二者偏差 15℃,平均值为 359.22℃,实炉数据的最大值为 375.47℃、最小值为 350.83℃(最大汽温偏差

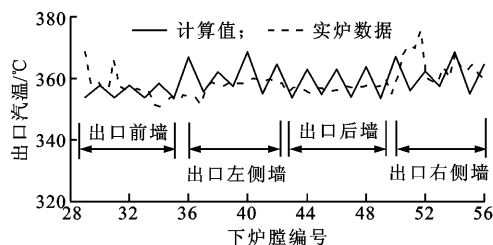


图7 50%负荷时下炉膛螺旋管圈水冷壁出口汽温比较

24.64℃)、平均值为358.73℃,二者对应的误差分别为1.84%、0.82%、0.14%。

由图4~图7可以看出,上、下炉膛水冷壁出口汽温的计算值与实炉数据在总体数值和分布趋势上比较符合。由于实际运行时热负荷分布和吸热偏差受到煤种、运行方式及结渣情况等影响,与计算时采用的曲线有差别,此外实炉几何结构和计算结构上的差别都会引起出口汽温计算值和现场测量结果的偏差。

4 结 论

(1)针对超临界直流锅炉的结构特点,将水冷壁流动网络系统划分为流量回路、压力节点和连接管3类元件。根据回路和节点所遵循的质量守恒、动量守恒以及能量守恒方程,建立了流量分配和压降计算模型。在此基础上,对利港电厂600 MW超临界螺旋管圈直流锅炉在不同负荷时上升系统压降和上、下炉膛水冷壁出口汽温进行了计算,并与实炉数据进行了比较。

(2)75%负荷时,上升系统总压降的计算值和实炉数据相差0.058 MPa,误差为2.87%,两者符合得很好,说明所建立的压降模型和开发的单管压降计算程序是正确可靠的。

(3)100%负荷、75%负荷及50%负荷时,上、下炉膛水冷壁出口汽温的计算值与实炉数据之间的误差均不超过2%,表明所建立的600 MW超临界螺旋管圈直流锅炉水动力计算模型和所开发的程序是正确可靠的,完全可以用于实际工程计算。

参考文献:

- [1] 于辉. 1 000 MW超超临界垂直管圈锅炉水冷壁水动力特性及壁温分布研究[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2008.
- [2] 张魏静,杨冬,黄莺,等. 超临界直流锅炉螺旋管圈水冷

壁流量分配及壁温计算[J]. 动力工程, 2009, 29(4): 342-347.

ZHANG Weijing, YANG Dong, HUANG Ying, et al. Calculation on flow rate distribution and wall temperature of water wall with spiral tube coils of supercritical once-through boilers[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(4): 342-347.

- [3] 林宗虎,王树众,王栋,等. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2003.
 - [4] 上海发电设备成套设计研究院. JB/Z 201-1983 电站锅炉水动力计算方法[S]. 北京:机械工业出版社, 1983.
 - [5] 冯俊凯,沈幼庭,杨瑞昌. 锅炉原理及计算[M]. 3版. 北京:科学出版社, 2003.
 - [6] 林宗虎,徐通模. 实用锅炉手册[M]. 北京:化学工业出版社, 1999.
 - [7] 陈听宽. 两相流与传热研究[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2004.
 - [8] 杨冬,超(超)临界垂直管圈锅炉水冷壁流量分配及壁温计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 32-38.
- YANG Dong. Numerical computation on the mass flow rate profile and metal temperature in vertical water wall of an ultra supercritical boiler[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(17): 32-38.

[本刊相关文献链接]

- 高压气体在膜式螺旋管环形通道中的对流换热特性. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 17-22.
- 联合循环电站改造为整体煤气化联合循环的粗煤气冷却. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 71-76.
- 横流中单喷嘴雾化形态与两相掺混特性研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 104-108.
- 带60°肋和出流孔的矩形通道端壁换热特性研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 116-119.
- 低质量流速垂直和倾斜并联内螺旋管两相流不稳定性研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 17-21.
- 低质量流速垂直并联内螺旋管中两相流不稳定性试验研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 36-39.
- 竖直矩形窄通道空气自然对流换热特性的实验研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 10-13.
- 多相流体流量测量的采样分流方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 103-107.
- 竖直环管内低压水过冷沸腾数值模拟. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 855-859.
- 方形小通道内高参数下煤油传热与阻力特性. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 265-268.

(编辑 荆树蓉)