

超超临界锅炉水冷壁节流圈结构对结垢的影响

汤妍,周克毅,韦红旗,徐啸虎

(东南大学能源与环境学院,江苏南京 210096)

摘要:基于 FLUENT 平台,建立超超临界锅炉水冷壁节流圈的三维数学模型并进行数值求解,利用水动力标准计算方法验证数值解法的正确性。分析了节流圈的结垢机理,并进一步分析了节流圈入口倒角、出口倒角、孔径和长度等结构参数对结垢的影响,最后指出减少结垢的方法,并对节流圈的结构设计提出建议。

关键词:超超临界;节流圈;结垢;数值模拟

中图分类号:TK224.9

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2011)01-0005-04

超超临界机组在投运一定时间后普遍存在节流圈结垢现象,严重影响机组正常运行。某发电厂超超临界锅炉自投产一年多的时间内,多次发生水冷壁超温和爆管事故,割管检查发现入口节流圈处有黑色沉积物,沉积物占节流圈通径的 1/2 以上,即节流圈出现严重结垢^[1],进一步检查发现其他水冷壁节流圈也有不同程度的结垢现象。为了防止因节流圈结垢引起超超临界锅炉水冷壁超温和爆管事故的发生,目前主要采用定期酸洗除垢的方法,也有采用改善水质的方法减缓结垢速率^[2]。关于水冷壁节流圈结垢问题,目前国内外学者主要从结垢化学机理分析、除垢方法以及如何在运行中控制水质以减缓结垢等方面进行研究^[3-5]。文中利用数值模拟的方法^[6-9],分析节流圈的结构参数对结垢问题的影响,为改进节流圈的设计提供理论依据。

1 基本模型

1.1 物理模型

工质从水冷壁入口短管的进口流入,经节流后从出口流出,如图 1 所示。由于节流圈安装在水冷壁入口短管内,热流密度较小,可近似认为工质在入口短管内为绝热流动,即壁面热流密度为零。节流圈前后短管的壁厚与流场分析无关,为了便于建模和计算,可认为壁面厚度为零。节流圈及其前后短管内壁均十分光滑,粗糙度可以近似取零。

根据某电厂 1 000 MW 超超临界机组水冷壁入口节流圈的结构尺寸建模,短管直径取 32.5 mm,节流圈前后短管长度分别取 50 mm 和 200 mm。

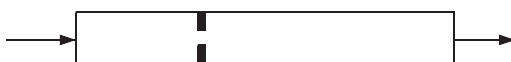


图 1 物理模型

1.2 数学模型

节流圈数学模型包括基本控制方程和考虑到

大雷诺数湍流运动引入的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10,11]。由于假设壁面厚度为 0, 节流圈数学模型仅包括工质的控制方程。

基本控制方程组由质量守恒方程、动量守恒方程(雷诺平均 $N-S$ 方程)、能量守恒方程以及蒸汽状态方程构成,分别为:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_s u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s u_i u_j) = -\frac{\partial p_s}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu_s(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + B_i \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_s h_s)}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho_s u_j h_s}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x_j}) + S_s \quad (3)$$

$$\rho_s = f(p_s, T_s) \quad (4)$$

式中: ρ_s 为蒸汽密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; u 为蒸汽流动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; p_s 为蒸汽静压, Pa ; μ_s 为蒸汽黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; B_i 为体积力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$; h_s 为蒸汽焓, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$; T_s 为蒸汽温度, $^{\circ}\text{C}$; k_s 为蒸汽导热系数, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$; S_s 为蒸汽能量方程源项。

湍流方程采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,它由湍流动能方程(k 方程)和扩散方程(ε 方程)组成,分别为:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m k) = \nabla \cdot (\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \varepsilon) = \nabla \cdot (\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{K}(C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (6)$$

式中: $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ 为方程系数; σ_k , σ_ε 分别为 k 方程、 ε 方程普朗特常数; K 为湍流脉动动能, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; ε 为耗散率, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$; $G_{k,m}$ 为由层流速度梯度产生的湍流动能, $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$, $G_{k,m} = \mu_{t,m}(\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T) / \nabla \vec{v}_m$; $\mu_{t,m}$ 为紊流黏性系数, $\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$; C_μ 为模型系数。

在以上各式中,引入了3个系数 $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 及2个常数 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$, 在近年发表的文献中,关于这5个经验常数的取值已经比较一致,如表1所示^[12]。

表1 $k-\varepsilon$ 方程中的常数取值

名称	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
取值	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

2 模型的数值求解及验证

考虑到方程求解的复杂性,在求解数学模型时采用了目前广泛使用的CFD软件——FLUENT。利用FLUENT专用前处理软件Gambit建立节流圈的三维模型并划分网格,网格形式为四边形-六面体网格。考虑到在紧靠管道壁面的区域内流体速度梯度较大,在壁面处划分边界层网格,如图2所示。



图2 网格划分

文中采用压力入口条件定义入口边界条件,绝热壁面条件定义壁面边界条件,质量入口条件定义出口边界条件。金属比热和导热系数取为常数。工质比容是温度和压力的函数,由于节流过程绝热,节流前后工质温度变化(约0.1 K)和压力变化(约0.5 MPa)相对较小,可认为工质在整个节流过程中比容不变,根据水和水蒸汽性质表取为入口状态参数对应的比容^[13]。采用隐式、分离、SIMPLE求解器、二阶离散精度进行求解。

利用水动力标准计算方法^[14],选取锅炉典型工况(BMCR),计算工质经过节流圈的压降并与数值计算结果进行比较,以验证所建节流圈数值模型的正确性。

根据电站锅炉水动力计算方法,经过节流圈的阻力压降为:

$$\Delta P_{jbl} = \xi_{jbl} \frac{(\gamma w)^2}{2g} v_r \quad (7)$$

式中: γ, w, v_r 分别表示入口工质的密度、流速、比容,阻力系数 ξ_{jbl} 为:

$$\xi_{jbl} = \left[0.5 + \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_n} \right)^2 \right]^2 + \tau \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_n} \right)^2 \right] \right] \left(\frac{d_0}{d_n} \right)^4 \quad (8)$$

式中: d_n 为管子内径; l 为节流圈长度; d_0 为节流圈孔径; τ 为与 l/d_0 有关的系数。

工质经过节流后的压降,水动力标准计算方法和数值计算方法所得结果分别为0.49 MPa和0.47 MPa,相对误差为4.3%,误差较小,数学模型和数值解法总体上是可信的。

3 结果分析

3.1 结垢机理分析

通过数值计算,可得到如图3、图4所示的节流圈处流场的压力分布和速度矢量图以及其他所有压力分布和速度矢量图。从图3可以看出,在节流圈壁面靠近入口处存在一个低压区,压力在该处突然降低,同时从图4可以看出,此处存在较为激烈的回流和漩涡。

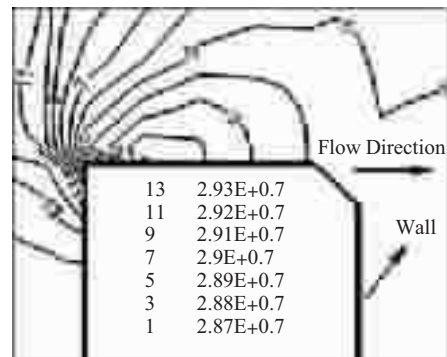


图3 压力分布(Pa)

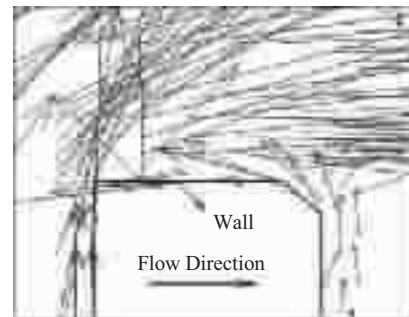


图4 速度矢量

事实上水冷壁节流圈的割管检查发现,结垢的位置发生在节流圈的进水端,沿孔径延伸,垢物占节流圈通径的1/2以上。对垢物进行含量分析,发现其主要成分为 Fe_2O_3 ,即磁性氧化铁^[15]。

超超临界机组汽水系统中的磁性氧化铁及铁离子来自碳钢的腐蚀,其形成和迁移规律与温度和压力有关^[16]。在节流圈入口靠近壁面处压力突然降低,导致铁离子溶解度跳跃式减小,过剩的铁离子就会迅速以磁性氧化铁的形式析出,同时此处存在漩涡和回流,更有利于铁离子的沉积。另外,磁性氧化铁的磁性不仅使其本身容易缔结和沉积,还能吸引其他金属杂质沉积,最终在节流圈入口附近形成严重的结垢。

3.2 节流圈结构参数对结垢的影响分析

节流圈的结构参数对其附近的压力和速度分布均有直接影响,以下分别取不同的入口倒角、出口倒角、孔径和长度研究流场分布,分析节流圈结构参数对结垢的影响。

3.2.1 入口倒角影响分析

分别取入口倒角为 0° 、 45° 、 60° 进行计算,可得到如图 5 所示的压力分布和速度矢量图。分析比较可以看出:入口倒角越小(如 0° 倒角),入口处低压区范围越大且压降幅度也越大,同时低压区有旋涡产生,表明此时在入口附近越容易结垢;反之,入口处低压区就越小,压降幅度也越小,旋涡也越小,表明不易发生结垢。所以,节流圈入口倒角大小对结垢有较大的影响。

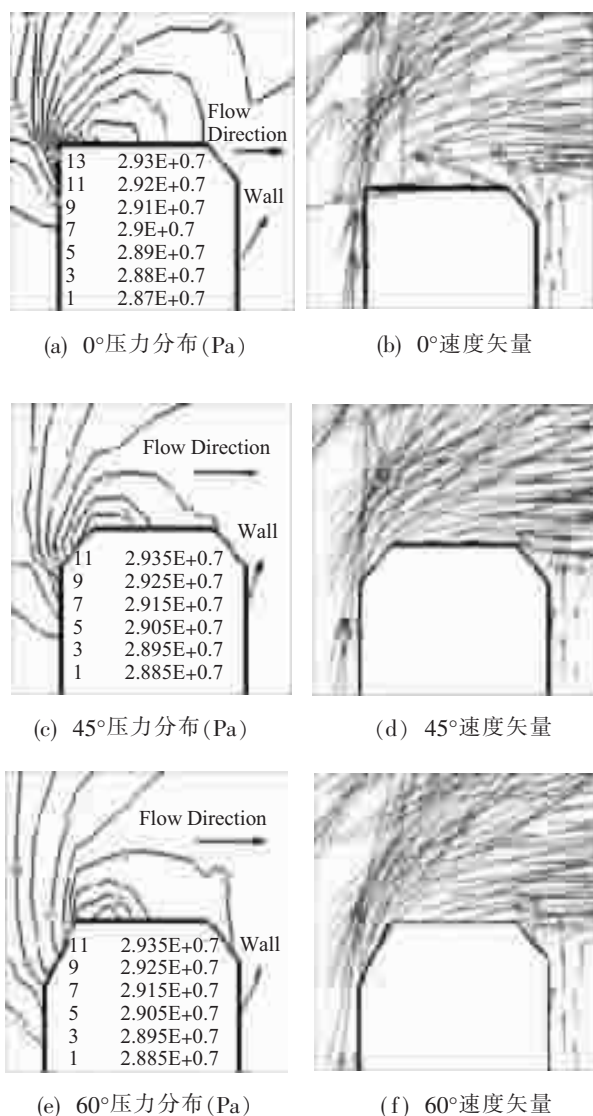


图 5 入口倒角为 0° 、 45° 、 60° 时的压力分布和速度矢量

3.2.2 出口倒角影响分析

分别取出口倒角为 0° 、 45° 、 60° 进行计算,结果如图 6 所示。由图可知:不同出口倒角下,节流圈壁面靠近入口处的压力分布和速度矢量都非常相

似——均有压力突降且降幅基本相同,产生的漩涡亦非常相似,所以入口处的结垢难易程度应相近。另外,不同出口倒角下靠近出口处压力场和速度场均有较大不同,但由于出口处不存在压力突降,所以不会对结垢程度产生明显的影响。因此,相对于入口倒角而言,节流圈出口倒角大小对其结垢影响较小。

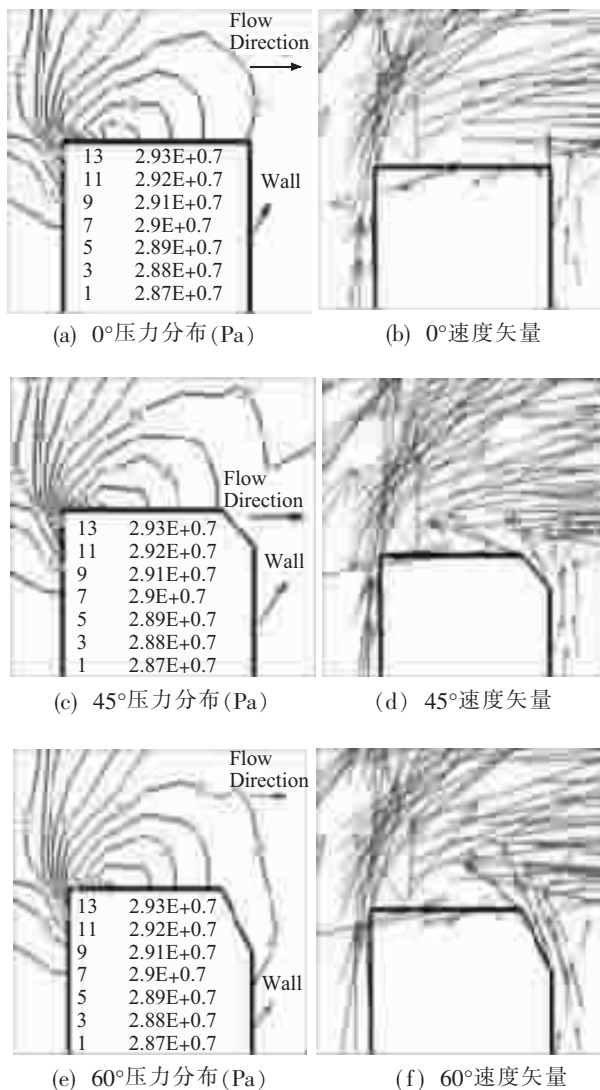


图 6 出口倒角为 0° 、 45° 、 60° 时的压力分布和速度矢量

3.2.3 孔径影响分析

分别取孔径为 10 mm 和 14 mm 进行计算,结果如图 7 所示。可见,2 种孔径下节流圈入口附近都存在旋涡和压力突降,孔径越小节流圈入口附近压降幅度就越大,会加剧入口附近的结垢;反之,入口附近压降幅度也就越小,结垢程度相对来说会减弱一些。

3.2.4 节流圈长度影响分析

分别取节流圈长度为 3 mm 和 6 mm 进行计算,结果如图 8 所示。由图可知,2 种节流圈长度下,入口处均有旋涡产生,且压力场和速度场分布亦十分相似,表明节流圈长度变化对结垢影响不明显。

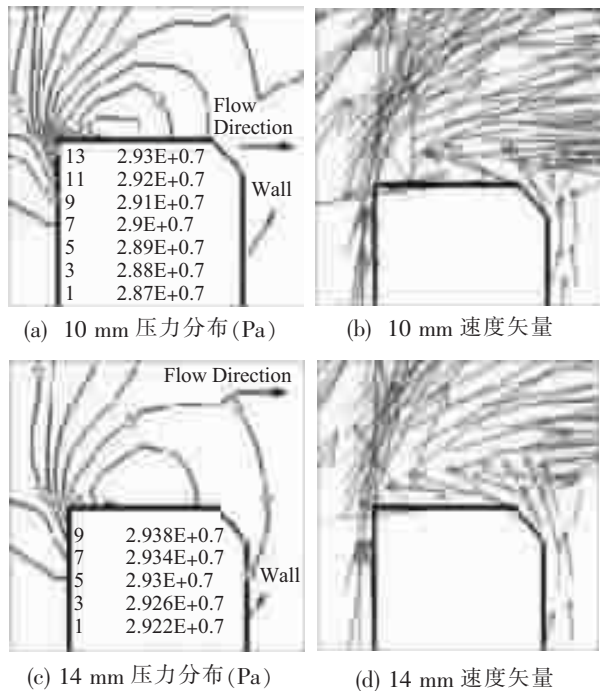


图7 孔径为10 mm和14 mm的压力分布和速度矢量

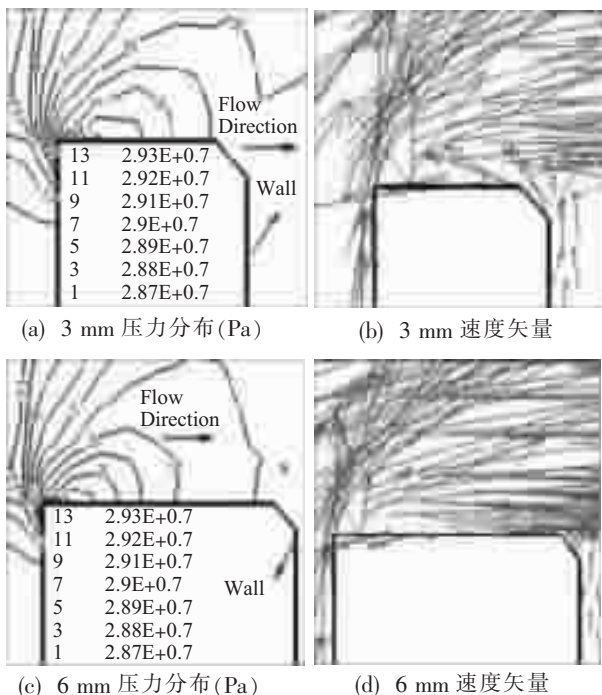


图8 节流圈长度为3 mm和6 mm时的压力分布和速度矢量

4 结束语

通过数值模拟的方法得到节流圈附近的压力和速度矢量分布,分析了节流圈结垢机理及其结构参数对结垢问题的影响。

(1) 在节流圈入口靠近壁面处容易发生压力突降,导致铁离子溶解度跳跃式减小,过剩的铁离子迅速以磁性氧化铁的形式析出,同时此处存在的漩涡和回流使析出的氧化铁更容易沉积。另外,磁性氧化

铁的磁性不仅使其本身容易缔结和沉积,还能吸引其他金属杂质沉积。最终在节流圈入口附近形成严重的结垢。

(2) 节流圈入口倒角大小对其结垢问题影响很大,入口倒角较大时,可以大大减轻结垢程度;出口倒角大小对结垢问题基本无影响;孔径越小,结垢倾向越严重;节流圈长度对结垢问题基本无影响。

(3) 在设计节流圈时,可以选择一定的入口倒角以减少结垢,但入口倒角较大时节流圈的进出口压降降低,为了达到同样的节流效果,需要减小节流孔径,这又会增加结垢,所以,需要找出两者的最佳匹配,以达到既满足压降要求又减少结垢的目的。

参考文献:

- [1] 沈琦,刘鸿国,杨菁.超超临界垂直管圈直流炉水冷壁节流孔圈垢物聚结原因分析及预防[J].华东电力,2009,37(5):877-879.
- [2] 刘红兴.1000 MW超超临界机组的化学清洗工艺[J].江苏电机工程,2008,27(S):87-89.
- [3] 祝骊伟,关玉芳.AVT工况下超临界机组直流炉首年结垢、积盐特征分析[J].浙江电力,2009(1):12-15.
- [4] 徐洪,刘红兴,帅云峰.锅炉盐酸清洗新工艺——无漂洗工艺[J].中国电机工程学报,2004,24(12):258-262.
- [5] 赵凤娟.水冷壁管结垢率与水汽质量合格率的关系初探[J].华东电力,2003(6):14-16.
- [6] 任玉新,陈海昕.计算流体力学基础[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [7] 李春燕,阎维平,李钧.基于矩量法的超临界锅炉水冷壁温度场数值计算[J].中国电机工程学报,2008,28(32):29-34.
- [8] 王为术,陈飞,刘美玲,等.电站锅炉膜式水冷壁温度场特性的数值分析[J].水利电力机械,2007,29(12):23-27.
- [9] CHANG Y S, KIM S H, CHANG H S, et al. Fluid Effects on Structural Integrity of Pipes with an Orifice and Elbows with a Wall-thinned Part[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 854-859.
- [10] 王福军.计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [11] 张强,杨永,李喜乐.基于新的描述湍流耗散方程的 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型的数值算法研究[J].西北工业大学学报,2009,27(4):466-470.
- [12] 陶文铨.数值传热学(第二版)[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [13] 严家驊,余晓福,王永青.水和水蒸汽热力性质图表[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [14] JB/Z 201—1983,电站锅炉水动力计算方法[S].
- [15] 邵天佑,闻国华.直流锅炉水冷壁节流孔板磁性氧化铁沉积探讨[J].华电技术,2009,31(6):45-47.
- [16] 徐洪.超临界火电机组的金属腐蚀特点和沉积规律[J].动力工程,2009,29(3):210-217.

(下转第13页)

质量流量与高压蒸汽质量流量之比)是各工况高压蒸汽参数、中压缸参数所能达到的最大值,当按某一工况参数设计喷射器结构后,其他工况的喷射系数将达不到设计值,因而经济性将大幅下降。此外,在低负荷下为保证吸入蒸汽的压力,中排碟阀的节流也会使汽轮机效率显著下降。

对 135 MW 和 300 MW 机组而言,相同流量及参数的供热,135 MW 机组的煤耗降低要大于 300 MW 机组。

3.4.2 供热对机组出力的影响

由于机组对外供热,主汽作功能力减少,机组出力降低。从以上计算曲线可看出,135 MW 和 300 MW 凝汽式机组改供热后机组出力均有较大幅度的下降,其中 135 MW 机组供热 50 t/h 机组出力下降约 10 MW,平均每供 5 t/h 机组出力下降约为 1 MW;300 MW 机组中压供热 100 t/h 机组出力下降约 20 MW,平均每供 5 t/h 机组出力下降约为 1

MW;300 MW 机组高中压联合供热 130 t/h 机组出力下降约为 32 MW,平均每供 4 t/h 机组出力下降约为 1 MW。

4 结束语

通过以上综合研究和分析,得出了 135 MW 和 300 MW 不同类型供热机组的运行特性和供热节能计算结果,即对应某类机组,在已知机组供热流量下,可以知道该供热量对机组出力和发电煤耗率的具体影响值,这为调度安排大型供热发电机组的发电排序提供了数据支撑。

参考文献:

[1] 重庆大学.热力发电厂[M].北京:电力工业出版社,1981.

作者简介:

陈国年(1965-),男,浙江宁波人,高级工程师,从事电力技术管理工作。

Analysis on Effects of the Heating-retrofit on Operation Economic of the Condensing Turbine-generator Unit

CHEN Guo-nian¹, LIU Jin¹, ZHOU Qiang², LU Cheng-bin²

(1. Jiangsu Electrical Power Co. Ltd., NanJing, 210024, China;

2. Jiangsu Fangtian Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: With the theoretical analysis on operating characteristics of a heating-retrofitted unit, the effect of unit heating on the gross coal consumption and adjustable power load is evaluated. Through the quantitative analysis of 135MW and 300MW condensing units in different heating modes, the effect on energy-saving and the power load impacted by heating-retrofitted is calculated. The results can provide valuable reference for the electric power dispatching department to arrange power load reasonably and realize energy-saving generation.

Key words: large condensing unit; heating-retrofit; operating characteristics; gross coal consumption rate; unit load

(上接第 8 页)

作者简介:

汤妍(1987-),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事电站锅炉运行方面的研究工作;

周克毅(1955-),男,江苏泰州人,博士生导师,长期从事电站锅炉动态特性与建模、机组性能分析与优化、设备故障诊

断等方面教学和科研工作;

韦红旗(1966-),男,安徽霍山人,硕士生导师,研究方向为热能与动力设备、流体机械等性能分析、优化运行;

徐啸虎(1974-),男,江苏盐城人,讲师,研究方向为火电机组性能监测及仿真。

Effects of Throttle Orifice's Structural Parameter on its Scaling Problem in the Water Wall of an Ultra-Supercritical Boiler

TANG Yan, ZHOU Ke-yi, WEI Hong-qi, XU Xiao-hu

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, a simulation model for the throttle orifice installed in the water wall of an Ultra-Supercritical Boiler is established based on the FLUENT numerical platform, and the verification has also been carried out just using the results obtained from the standard hydrodynamic calculating method. The scaling mechanism of the throttle orifice is analyzed, and effects of the throttle orifice's structural parameter on its scaling problem are studied by selecting different entrance chamfering, export chamfering, diameter and length. Finally, a method to reduce scaling is provided and a suggestion for the design of the throttle orifice is also made.

Key words: ultra-supercritical; throttle orifice; scaling; numerical simulation