

420 t/h 同心正反切圆锅炉燃烧优化的数值计算

徐明厚 胡泰来 袁建伟 曾汉才
(华中理工大学煤燃烧国家重点实验室)

〔摘要〕 以株洲电厂配 125 MW 机组的 420 t/h 同心正反切圆锅炉为研究对象,对不同工况下锅炉炉内空气动力场、温度场、煤粉颗粒轨迹等进行了数值计算,分析了该锅炉结渣的原因,提出了改善该炉结渣和燃烧经济性的措施。

关键词 煤粉燃烧 结渣 数值计算

分类号 TK222 TK227

1 引言

株洲电厂 11 号炉系上海锅炉厂生产的引进美国 CE 公司技术的 420 t/h 四角喷燃锅炉(CFS-I 型)。为了强化炉内燃烧,该炉采用了宽调节比(WR)燃烧器。为了加强炉内煤粉和空气的混合,并避免一次风煤粉气流贴壁,该炉采用了同心正反切圆燃烧系统;为了减少锅炉水平烟道左右两侧的烟温偏差,并降低污染物 NO_x 的生成,在三次风上部设置了消旋二次风(OFA)。其燃烧器布置及切圆系统如图 1 所示。

CFS-I 型锅炉是在 CFS-I 型的基础上改进而来的,两者的区别在于前者为一次风正切、二次风反切,而后者则一、二次风均正切。其设计思想都是为了避免炉内结渣、将一次风包裹在二次风中,避免煤粉气流贴壁。不同的是 CFS-I 型锅炉中一次风煤粉射流由于受到上游邻角动量较大的以二次风为主体的混合射流的推撞作用,将偏离其轴线位置而易于

导致贴壁,从而引起炉内结渣;而 CFS-II 型锅炉设计时将一、二次风反切,当一次风被上游邻角气流冲撞时射流将向炉膛中心偏转,直至形成与同角的二次风一样的一次风反切圆,因而其防结渣性能比 CFS-I 型要强。然而,实际锅炉炉膛中由于运行工况的变化及流动的复杂性,即使采用了 CFS-II 型燃烧方式,仍存在结渣现象。株洲电厂 #11 炉就是其中之一。为了分析其结渣原因,从运行的角度提出防止结渣的措施,我们对该炉不同配风情况

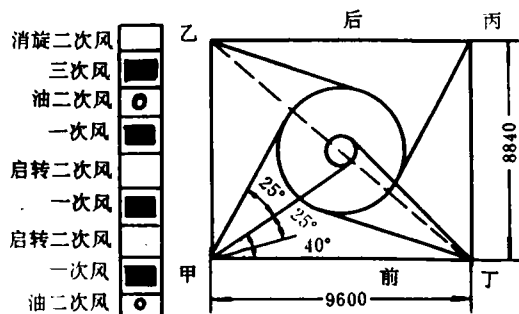


图 1 锅炉燃烧器及切圆系统布置图

收稿日期 1995-11-07

下的炉内流动、燃烧过程进行了数值模拟。

2 基本方程组及求解方法

2.1 气体流动

气体流动由时间平均的整体质量、动量、焓和组分数的守恒方程所描述。湍流扩散系数由有效粘性系数来处理,所有的方程由气体密度来耦合,气体密度是燃料释热和辐射换热的函数,气相守恒方程的三维形式可由下式表达:

$$\frac{\partial(\rho u_i \Phi)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} (\Gamma_{\Phi} \frac{\partial X \Phi}{\partial X_i}) + S_{\Phi} + S_{i\Phi} \quad (1)$$

式中, Φ 代表质量 m 、动量 u, v, w 、焓 h 及组分 f 。 S_{Φ} 是气体的源或汇项, $S_{i\Phi}$ 是来自于颗粒的源或汇项。有效湍流粘度即 $\mu = C_{\mu} \rho k^2 / \epsilon + \mu_i$, 式中 $C_{\mu} = 0.09$ 。气体平均密度由气体方程得到, 温度利用从组分方程得到的焓和分子量计算出。

2.2 颗粒动力学方程

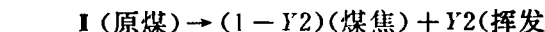
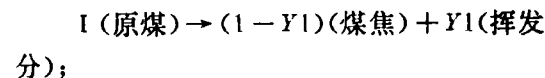
由于固体燃料(如煤粉)在炉膛中燃烧具有非均相性及相对缓慢的燃烧速率,因此对颗粒在炉膛中的运动进行准确模拟是十分必要的。在本程序中采用随机轨道模型来计算颗粒的随机轨道及沿轨迹的变化经历。颗粒动量方程为:

$$m_p d\mu_{pi} / dt = (1/2) C_D \rho (\bar{\mu}_i + \mu_i' - \mu_{pi})^2 + m_p g_i \quad (2)$$

$\bar{\mu}_i$ 和 μ_i' 分别为流体的平均速度和脉动速度分量; μ_{pi} 为颗粒瞬时速度。

2.3 颗粒燃烧

煤粉颗粒一开始是由原煤和灰分组成。煤的热解和挥发分的燃烧发生于气相中, 剩余煤焦以化学反应或扩散速率燃尽成灰。颗粒热解由一对平行的一阶反应来模拟:



分)。

这两个反应相互竞争, 反应 I 慢而反应 II 快, 对单位质量的原煤, 其挥发分产生率 $Y1$ 假设为挥发分的工业分析, $Y2$ 假设等于 $2Y1$, 速率 k_1 和 k_2 由 Arrhenius 表达式 $k = A \exp(-e/RT_p)$ 给定。

2.4 能量传递

锅炉中传热主要依靠辐射方式来传递, 本程序所采用的辐射传热计算方法为离散传递法 (Discrete Transfer Method)^[1], 简称 DT 法。该方法直观形象, 适合于工程实际应用。

3 计算结果及分析

为了深入探讨株洲电厂 #11 炉结渣的原因, 并进而从运行的角度提出防治方案, 我们计算了多种工况下的该炉炉内流动、燃烧过程。

3.1 计算工况

计算工况如表 1 所示, 其中设计工况时各次风射入炉膛的具体角度见图 1。

表 1 计算工况

工 况	条 件
工 况 1 (设计工况)	一次风、二次风、油二次风反切小圆; 启转二次风正切大圆; 二次风均等配风
工 况 2	减少启转二次风, 其余同工况 1
工 况 3	减小启转二次风切圆直径; 三次风在设计位置; 其余同工况 1
工 况 4	增大一次风、三次风及油二次风切圆直径; 其余同工况 1
工 况 5	所有二次风采用正宝塔形(下大上小)配风; 其余同工况 1
工 况 6	停投上启转二次风; 其余同工况 1
工 况 7	停投消旋二次风; 其余同工况 1
工 况 8	停投三次风; 其余同工况 1

3.2 计算结果及分析

通过计算,我们得到了各工况下的炉内速度场、温度场和煤粉颗粒运动轨迹,并且经过整理,得到了各工况下的炉内相对切圆直径、气流在炉膛内的充满系数,它们分别定义如下:

3.2.1 炉内相对切圆直径

$$D = (D_x/X + D_y/Y) \quad (3)$$

式中: D_x 、 D_y 分别是沿炉膛截面宽度和深度方向轴线上最大切向速度之间的距离; X 、 Y 分别是炉膛的宽度和深度。

3.2.2 充满系数

$$S = F_x/F \quad (4)$$

式中: F 为炉膛截面积; F_x 为 $V_x/V > 0.1$ 的炉内有效气流面积,其中 V_x 为气流的水平分速度, V 为燃烧器出口气流平均速度。

在设计工况下,各一次风喷口均等送粉,各二次风均等配风,气流在炉内形成一稳定的切向旋转流场。在燃烧器区域内,相对切圆直径沿高度方向变化不太大,炉内气流充满度良好。图 2 是下一次风喷口平面内的气流速度分布。从图中可以看到,尽管该炉燃烧系统设计时一次风为逆时针旋转,但由于顺时针旋转的二次风气流动量矩较大,使一次风气流离开喷口不久即受二次风引射而顺时

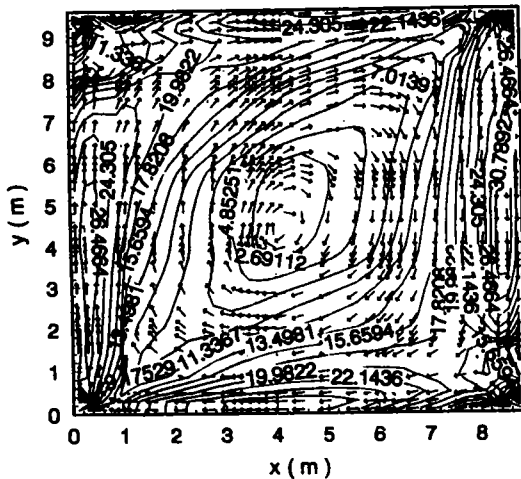


图 2 下一次风喷口截面速度分布(工况 1)

针旋转。同时,由于二次风切圆较大,使水冷壁附近的贴墙风速较高。尽管贴壁气流中大部分为二次风,但也有相当一部分煤粉在受到二次风的推挤后而卷吸到水冷壁附近,特别是前、后墙,这可以从炉内煤粉颗粒的运动轨迹的计算结果(如图 3)得到证实。于是在水冷壁附近形成局部高温区(图 4),导致该区域结渣。

从工况 1 的计算初步得知,二次风动量矩较大是导致结渣的一个重要原因,于是我们对减小该动量矩,包括减少启转二次风量(工况 2)和减小启转二次风直径并将三次风改为沿设计位置喷入(工况 3)的情况进行了计算。结果表明,与工况 1 相比,工况 2 煤粉颗粒的贴墙情况有所好转,但仍较严重,炉内相对切圆直径和炉膛充满系数的变化不大;而工况 3 炉膛充满系数变化不大,但炉内相对切圆直径有所下降,煤粉颗粒贴墙的情况有一定改善,且水冷壁附近局部高温区温度有所降低,结渣情况有所好转。

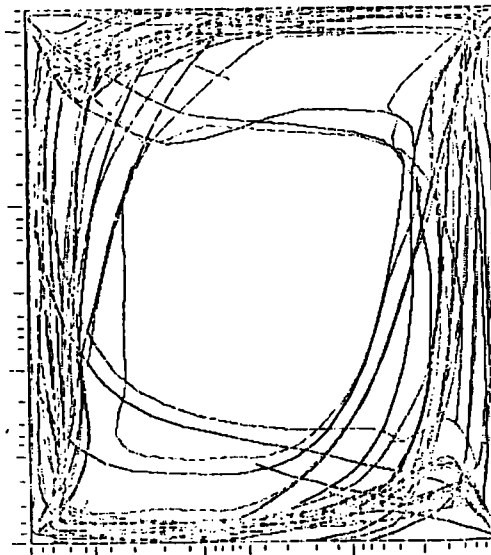


图 3 炉内煤粉颗粒运动轨迹(工况 1)

如前所述,CFS-I 型燃烧系统设计目

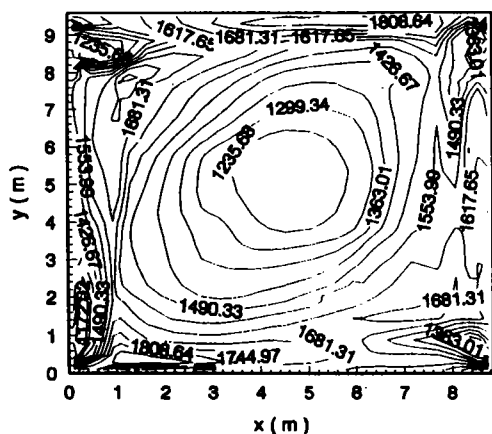


图4 下一次风喷口截面温度分布
(工况1;单位:K)

的是为了将一次风包裹在二次风里,而工况3减小顺时针方向旋转强度的结果是减轻了结渣,那么增大逆时针方向的旋转强度又如何呢?工况4的计算结果表明,它与工况3有类似的效果。

众所周知,提高一次风煤粉气流的刚度对防止结渣具有一定效果,工况5的计算结果证明了这一点,它使煤粉颗粒贴墙情况有所减轻。

对停投上启转二次风(工况6)的计算表明,此时虽然三次风粉的贴墙情况有较大改善,但一次风粉的贴墙改善有限,且导致炉内相对切圆直径减小很多,炉膛充满系数明显下降;而停投消旋二次风(工况7)或三次风(工况8)对燃烧器区域的影响不大。

综合上述各工况的计算结果,我们认为导致株洲电厂#11厂结渣的主要原因是一次风煤粉气流在受到二次风的推挤和引射后,煤粉颗粒产生贴墙,而减小启转二次风切圆直径、增大一次风和油二次风的切圆直径、改变三次风的射入角度等都对炉内结渣有较明显的效果。通过综合比较,我们提出了减轻该炉结渣的推荐运行工况(工况9):将启转

二次风由设计工况的偏 25° 减小到 20° ;将#1、3角与#2、4角的一次风和油二次风顺时针分别转 1° 和 2° ;将三次风从设计位置顺时针偏 8° 。该工况下一次风喷口平面内的煤粉颗粒运动轨迹如图5所示,从计算结果来看,此工况可明显地改善炉内结渣。

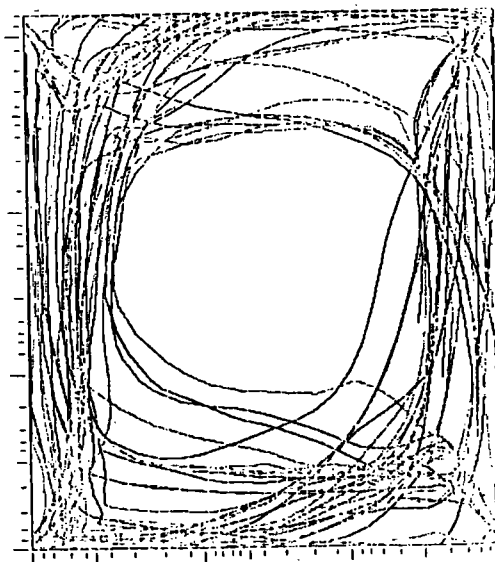


图5 下一次喷口截面煤粉颗粒运动轨迹(工况9)

CFS-I型锅炉的另一个特点是为了减少锅炉水平烟道左右两侧的烟温偏差,在三次风上部设置了消旋二次风(OFA),实际情况究竟如何呢?为此,对该炉水平烟道的烟气温度分布进行了计算,图6是设计工况下屏区中部($K=49$)截面 $x=4\text{ m}$ 上两侧墙之间的温度分布。此时最高温度与最低温度之间的差值约 250 K ,且温度分布不均匀;图7是推荐工况下屏区中部($K=49$)截面 $x=4\text{ m}$ 上两侧墙之间的温度分布。此时最高温度与最低温度之间的差值约为 120 K ,且温度分布比较均匀。其它工况的计算结果亦表明,减小一次风动量矩,特别是增大二次风动量矩,则锅炉出口气流的残余扭转就大,锅炉水平

烟道左右两侧的烟温偏差就大。因此可以认为,增大一次风动量矩、减小二次风动量矩,即减小锅炉出口气流的残余扭转,将有利于降低烟温偏差,从而使过热器、再热器超温的可能性减小。

程序是可信的。电厂已按上述推荐方案——工况 9 进行操作,并且得到了与计算一致的结果。

4 结 论

- (1) 对 CFS - I 型锅炉,影响炉内结渣的主要因素是一、二次风的动量矩,在本文的研究对象中,增大一次风动量矩、减小二次风动量矩都有利于减轻结渣。
- (2) 增大一次风动量矩、减小二次风动量矩,即减小锅炉出口气流的残余扭转,有利于减小烟温偏差,防止过热器、再热器汽温超温。
- (3) 实际运行中,当煤质变差时,可采取一些其它措施强化燃烧,如增大一次风煤粉的浓淡分离比等;当煤质变好时,除了采取前述方法,还可投入各一次风喷口周围的周界风。
- (4) 从计算结果与实际情况的对比可以看出,本文的计算程序对计算大型燃煤锅炉炉内流动、燃烧是比较精确的,它对锅炉的合理运行具有较强的指导作用。

参 考 文 献

- 1 Lockwood F C. Shah N G A. New radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures. 18th symposium on combustion. The Combustion Institute, Pittsburg. 1981. 1405-1414
- 2 曾汉才. 株洲电厂#11炉防止结渣燃烧优化调整研究报告. 华中理工大学、株洲电厂,1995

(渠源 编辑)

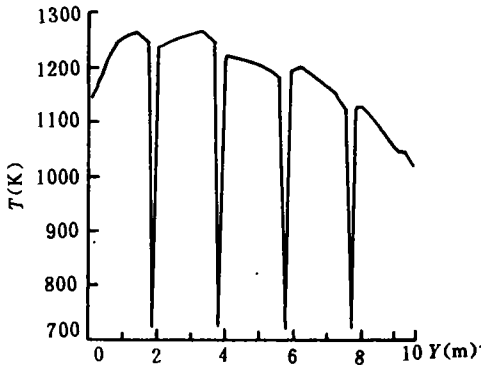


图 6 屏区中部 $x = 4\text{ m}$ 截面上的温度分布(工况 1)

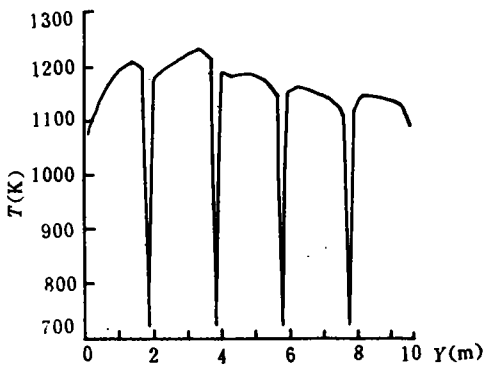


图 7 屏区中部 $x = 4\text{ m}$ 截面上的温度分布(工况 9)

与锅炉实际运行情况的比较表明⁽²⁾,工况 1、2、5 计算结果同实际情况基本符合(其他工况无实测结果),说明本文的计算方法和

作者介绍: 徐明厚,男,1966 年 6 月生,于 1992 年 6 月毕业于华中理工大学,获工学博士学位。现在华中理工大学煤燃烧国家重点实验室任教,1994 年破格晋升为副教授。主要研究方向为煤粉燃烧理论与应用技术开发;煤燃烧过程中污染物形成机理与控制技术的研究;燃烧过程的数值模拟等。(通讯处: 430074 武汉 华中理工大学)

ing mill, resistance characteristics

火焰中形成的二氧化氮和氧化亚氮=Nitrogen Dioxide and Nitrogen Monoxide Formed in a Combustion Flame[刊,中]/Zhong Beijing(Qinghua University), P. V. Rosliakov(Moscow Power Engineering Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(3): 147~153

Studied in this paper is the process of formation in a boiler furnace of nitrogen dioxides and nitrogen monoxides and their emission levels resulting from the combustion of various fuels. Also discussed are the transformation relationship between various constituents of nitrogen oxides and the main factors influencing the formation and emission levels of nitrogen dioxides and nitrogen monoxides. Key words: boiler, combustion, nitrogen oxide, nitrogen dioxide

C语言在锅炉热力计算中的应用=The Use of C Language for a Boiler Thermodynamic Calculation[刊,中]/Zhao Guangbo, Lin Jincheng, Liu Wentie, Zhu Qunyi, Ruan Genjian(Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(3): 154~157

This paper deals with the data structure of boiler thermodynamic calculation program prepared through the use of C language, the block diagram of the thermodynamic calculation program, the basis for the preparation of the thermodynamic calculation program, the thermodynamic calculation program screen menu and its use as well as the specific features of the thermodynamic calculation program, etc. The above-cited program can be more conveniently employed for the thermodynamic calculation of grate-fired and fluidized bed-fired industrial steam boilers and hot-water boilers. Key words: C language, boiler, thermodynamic calculation

全功能课题起停模块软件的研制=The Development of a Total-function Start/Stop Module Software[刊,中]/Sun Xidong(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(3): 158~159

With the help of gas turbine total-function computer-based controls realized is a comprehensive automation of the gas turbine start-up, operation and protection. As a sequential control software of the gas turbine start-up the start/stop module can after checking and verifying the preconditions of gas turbine start-up conduct the gas turbine start-up in accordance with the gas turbine start-up program. Also described are the hardware basis of the gas turbine start/stop module and the software preparation process. Key words: start/stop module, total-function control, gas turbine

420 t/h 同心正反切圆锅炉燃烧优化的数值计算=Numerical Calculation of the Optimization of a 420 t/h Boiler Combustion System with Concentric Tangential and Anti-tangential Air Feeding[刊,中]/Xu Minghou, Hu Tailai, Yuan Jianwei, Zeng Hancan(Huazhong University of Science & Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(3): 160~164

With the 420 t/h boiler of a 125 MW unit, which features furnace concentric tangential and anti-tangential air feeding, serving an object of study a numerical computation was performed of the boiler in-furnace aerodynamic field, temperature field, pulverized coal particle trajectory under various operating conditions. The cause of the boiler slagging is analyzed with proper measures for reducing the slagging and attaining an efficient combustion process being proposed. Key words: pulverized coal combustion, slagging, numerical calculation