

宽调节比燃烧器空气动力场的数值模拟

刘贵苏 陈世英 徐 辉 曾汉才 郑楚光

(华中理工大学煤燃烧国家重点实验室)

〔摘要〕 本文运行 $k-\epsilon$ 模型对 WR 燃烧器空气动力场进行了数值计算,得到了流场中的轴向速度、湍动能以及湍能耗散率分布,分析比较了 WR 燃烧器与常规燃烧器的不同点,利用计算结果分析了 WR 燃烧器中钝体的位置及边宽对流场结构的影响。

关键词 燃烧器 数值模拟 $k-\epsilon$ 模型

分类号 TK223 O242

0 引言

宽调节比(Wide Range,简称 WR)燃烧器由于采用了浓淡偏差燃烧技术、钝体回流等措施,使其具有适应煤种和负荷变化的特点^{〔1〕},广泛应用于各大中型电站,因此开展对宽调节比燃烧器的研究是十分必要的。

由于湍流分离流场的复杂性,流动特性对燃烧过程有极其重要的影响,特别是在 Reynolds 数较高时,复杂的湍流结构对于实验测量来说是比较困难的。计算燃烧学的发展,使得越来越多的研究工作者应用数值计算方法去研究燃烧室内气流流动、传热、燃烧特性,并能得到可靠的结果,用以指导燃烧器的设计。

本文对宽调节比燃烧器的空气动力场进行了数值计算。

1 数学物理模型

由于数值计算的复杂性,几何结构的复杂会给计算带来很大的困难,因此本文对 WR 燃烧器进行了一定的简化:①将燃烧室考虑成三维通道;②一次风喷口斜面考虑成直面;③将波纹钝体考虑成平直斜面的钝体。简化后的燃烧器见图 1。

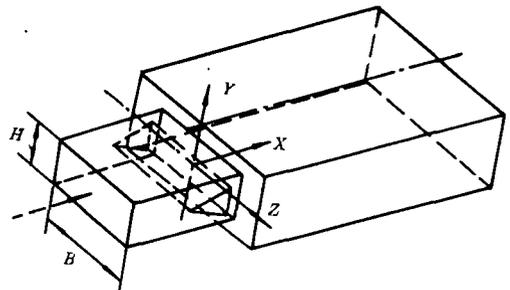


图 1 简化后的 WR 燃烧器计算区域

本文选用了 $k-\epsilon$ 模型双方程模型^{〔2〕},描述湍流流动守恒方程的通用表达式为:

收稿日期 1994-12-15 修改完稿 1995-02-17

本文联系人 徐辉 男 1972 年生 硕士 436074 武汉

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_1}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_1}) + S_\Phi \quad (1)$$

式中各变量及常数的表达式列于表 1 中。

表 1 通用控制守恒方程中各变量的意义

守恒方程	Φ	Γ_Φ	S_Φ
连续	1	0	0
x-动量	u	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_1}[\mu(\frac{\partial v_1}{\partial x})]$
y-动量	v	μ	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_1}[\mu(\frac{\partial v_1}{\partial y})]$
z-动量	w	μ	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_1}[\mu(\frac{\partial v_1}{\partial z})]$
湍动能	k	μ/σ_k	$G - C_D \rho \epsilon$
耗散率	ϵ	μ/σ_ϵ	$(\epsilon/k)(C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$

表中:

$$P = p + \frac{2}{3} \rho k; G = \mu [(\frac{\partial v_1}{\partial v_1} \frac{\partial v_1}{\partial x_1})] \frac{\partial v_1}{\partial x_1};$$

$$\mu = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}; C_D = 1.0; C_1 = 1.44; C_2 = 1.92;$$

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\epsilon = 1.3$$

2 计算方法

2.1 网格的划分

网络的划分采用先确定控制体表面,然后把网格节点定在控制体表面的中心的方法,给 k、 ϵ 方程的离散及壁面的处理带来方便,采用非均匀网格,钝体处以及回流区边界附近网格划分得密一些;为了保证迭代求解的收敛性,相邻网格的宽度比小于 1:3^[3]。

2.2 方程的离散

方程的离散就是用控制容积法将通用微分方程转化为统一代数方程的形式。本计算采用乘方定律(PLDS)来离散对流项,选用 SIMPLE^[4] 算法来处理速度与压力间的耦合,源项的线性化处理为 $S_\Phi = S_u + S_p \Phi_p$,得到的离散方程为:

$$(\sum A_i - S_p) \Phi_p = \sum A_i \Phi_i + S_u \quad (2)$$

2.3 边界条件

2.3.1 入口边界

假定入口截面的流动已是充分发展的湍流,流体具有均匀的速度、湍流脉动能、湍流耗散率分布,因此:

$$u_{in} = \text{const}; v_{in} = w_{in} = 0.0;$$

$$k_{in} = 0.005 u_{in}^2;$$

$$\epsilon_{in} = k_{in}^{3/2} / 0.09 B$$

2.3.2 出口边界

当出口截面离入口截面较远时,可以认为流场在出口边界已分布均匀,即各参数量沿轴线方向的导数为零。

2.3.3 对称边界 考虑流场对称,则

$$v_i = 0.0; \frac{\partial v_i}{\partial x_1} = \frac{\partial k}{\partial x_1} = 0.0; (i = y, z, j \neq i)$$

2.3.4 固壁边界

固壁面上,取各参数值为零,而在近壁网格点,则采用壁面函数法^[5]来修正其源项,这样可以避免近壁处划分较多的网格;

2.3.5 为计算的统一处理,将钝体的斜壁面考虑成台阶

文献[6]曾用此方法计算过含钝体的流场,与实验结果较吻合,为使计算更精确,收敛性更好,在网格划分时,钝体斜壁面部分划分了较多的网格,这在工程上也是可以接受的。

2.4 计算方法

根据 SIMPLE 算法,依次迭代求角 u、v、w、p'、k、 ϵ 各个变量,迭代求解法是采用逐线逐面的 TDMA 迭代法,在线性方程组迭代求解的过程中,采用如下的收敛准则

$$\left| \frac{\Phi^{(n)} - \Phi^{(n-1)}}{\Phi^{(n)}} \right| < 0.001 \quad (3)$$

为提高求解过程的稳定性,加快收敛,本计算采用了如下方法:

2.4.1 在对每一个变量迭代求解时,采用低松弛因子法,即:

$$\Phi = \alpha \Phi^{(n)} + (1 - \alpha) \Phi^{(n-1)} \quad (4)$$

各参量的松弛因子见表 2:

表 2 各参量选用的松弛因子

Φ	u	v	w	p'	k	ϵ	μ_w
α	0.5	0.5	0.5	1.0	0.7	0.7	0.7

2.4.2 出口截面采用了流量修正^[3]

根据流量相等,则出口截面的速度修正为:

$$u_{new} = u_{old} + (m_{in} - m_{out}) / \sum \rho_j \Delta A_j \quad (5)$$

式中 m_{in} 、 m_{out} 为流体进口与出口的流量。

3 结果分析

3.1 钝体位置对回流特性的影响

图 2 为设计工况下流场中各截面上的轴向速度分布,计算中,一个风速 $U_0 = 18 \text{ m/s}$ 。由于本文采用的楔形钝体,其顶角只有 20° ,较常规钝体的顶角(60°)要小得多,这将会使钝体后回流区变短,回流区长度 L/b 为 $0.7 \sim 0.8$ (比较图 2 与图 3 可看出)。文献[7]中所做的实验是在钝体斜壁面存在波纹的情况下进行的,结果回流区相对长度为 1,比本文计算结果要略大。从这里分析可知,本文计算与实验结果是定性吻合的。图 4 为钝体向燃烧室方向移动一个距离后的速度分布,钝体后回流区长度 L/b 等于 0.9,跟设计工况相比略微增长,而各截面上的速度分布定性相似,略微不同的是,钝体尾迹后流动混合较移动前要慢。

图 5 与图 6 为两种工况下湍动能分布。图中看出,在钝体燃烧器出口流场的第一个截面上,湍动能具有两个峰值,而其中峰值较大的则位于回流区边界附近,这个结论与常规钝体的计算结果是一致的。

图 7 为常规钝体燃烧器流场中的湍动能分布,与图 5 相比较可以看出,WR 燃烧器在湍流结构上较常规钝体有了很大的改进,回

流区边界上的湍动能峰值比常规钝体要高得多。

图 8 为设计工况下湍动能耗散率分布。图中曲线表明,峰值位置跟湍动能分布相对应,但数值上较湍动能要大得多。分析可知,湍动能产生较大的地方,由于能量守恒,其湍动能耗散率就更大。

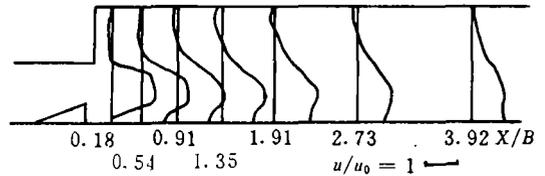


图 2 设计工况下流场中的速度分布
由工程数值计算的常规钝体燃烧器结构的回流区

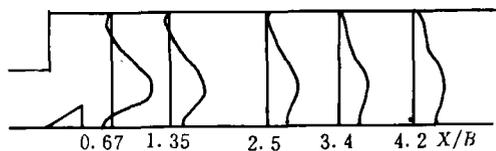


图 3 常规钝体燃烧器流场的速度分布

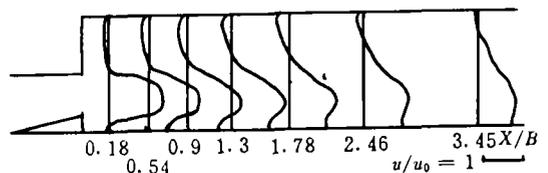


图 4 位置移动后流场中的速度分布

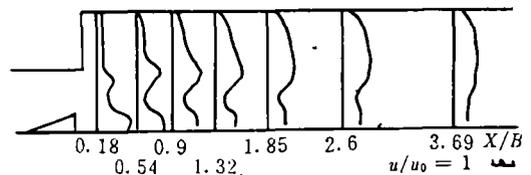


图 5 位置移动后流场中湍动能分布

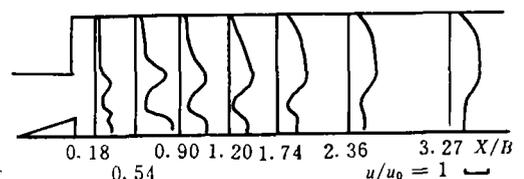


图 6 位置移动后流场中湍动能分布

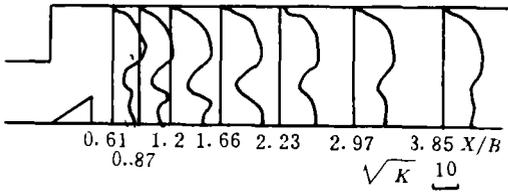


图 7 常规钝体燃烧器流场的湍动能分布

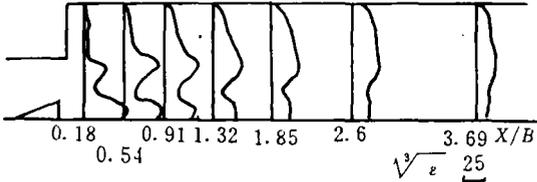


图 8 位置移动前流场中的湍动能耗散率分布

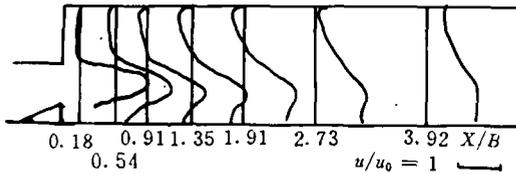


图 9 钝体边宽加大后流场中速度分布

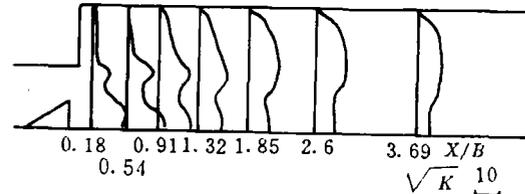


图 10 钝体边宽加大后流场中湍动能分布

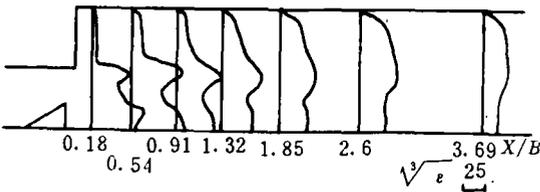


图 11 钝体边宽加大后流场中湍动能耗散率分布

3.2 钝体边宽对流场分布的影响

图 9 为燃烧器出口轴向速度分布,钝体后回流区长度 L/b 约为 $1.1 \sim 1.2$,较设计工况下要长,由此看出,钝体边宽加大后(其顶角约为 30°),对回流区的形成有利,而且流场

变得复杂,与图 3 相比,速度不均匀分布较设计工况下要严重,流场混合延迟。

图 10、图 11 为钝体边宽加大后的湍动能分布与湍动能耗散率分布。图中看出,参数分布以及峰值位置与设计工况基本相似,但钝体回流边界上的湍动能及湍动能耗散率较设计工况要大得多,因为此边界上横向速度梯度值很大,这是好理解的。

4 结论

1 WR 燃烧器钝体后的回流区长度较常规钝体要短,一般 L/b 为 $0.8 \sim 1.2$,这与实验结果是定性吻合的,钝体后的速度分布与实验结果定性相符;

2 WR 燃烧器后的湍流结构较常规钝体有了明显的改进,这将有利于回流区边界的热质交换,对钝体稳燃有很大促进作用;

3 通过改变钝体位置和钝体边宽的工况计算,发现,钝体位置的改变对流场无明显的影响,而钝体边宽无论是对钝体后回流区长度,还是对回流区边界上的湍流结构都有很大的影响,加大边宽是有利的。

参 考 文 献

- 1 曾汉才等. 汉川电厂 300 MW 贫煤机组锅炉燃烧技术的研究. 锅炉技术, 1992(1)
- 2 Launder B E and Salding D B. The numerical computation of turbulent flow. Com. Meth. Appl. Mech. Eng., 1974, 3, 263-289
- 3 陈义良, 孙慈. SIMPLE 方法的收敛性. 工程热物理学报, 1984, 5(3)
- 4 Patanka S V. 传热与流体流动的数值方法, 安徽科学技术出版社, 1984
- 5 Patankar S V. A calculation procedure for two-dimensional elliptic simulation. Numerical Heat Transfer, 1981, 4, 409-425
- 6 郑楚光. 煤粉钝体燃烧器及其数值模拟. 华中工学院博士论文, 1986
- 7 何耀华. 华中理工大学硕士学位论文, 1993

necessitates a test rig compatibility design. This paper gives a detailed description of the said design philosophy and process, and analyses the stage characteristics of the three-dimensional flow blade wheel, which provides a reliable basis for the uprating-oriented modification of the compressor. **Key words:** axial-flow test rig, centrifugal stage test, test rig compatibility test, multi-function stage characteristics.

电站锅炉汽温问题的现状及应采取的对策 = The Present Status of Utility Boiler Steam Temperature Problems and Some Countermeasures [刊, 中]/Liu Linhua, Yu Qizheng, et al. (Harbin Institute of Technology), Xu Wanli (Harbin University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -297~300

Some existing problems relating to utility boiler steam temperature are reviewed and the present status of steam temperature research in China presented with the future main direction of experimental research in this field being proposed. **Key words:** boiler, steam temperature, present status, countermeasures

宽调节比燃烧器空气动力场的数值模拟 = Numerical Simulation of the Aerodynamic Field of Wide-range Burners [刊, 中]/Liu Guisu, Chen Shiyong, et al (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -301~304

A numerical calculation was performed of the aerodynamic field of a wide-range burner through the use of $k-\epsilon$ model. Obtained were the axial speed in the flow field, turbulent kinetic energy and the dissipation rate distribution of the said energy. The difference between the wide-range burner and a conventional one was compared and analyzed with calculation results being used to analyze the location of the wide-range burner bluff body and the effect of bluff body side width on the burner flow field structure. **Key words:** burner, numerical simulation

供热系统“单耗分析”模型 = “Unit Consumption” Model for a Heat Supply System [刊, 中]/Song Zhiping (North China Electrical Engineering University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1996, 11(5). -305~310

Starting with a simple outline of the “unit consumption analysis” theory and method proposed by the author a generalized model was set up for a modern heat supply system. With regard to this model the fuel unit consumption for boiler heat supply, electric heat supply and heat pump heat supply was calculated with a calculation formula for heat supply cost being given, which is readily applicable for specific engineering cases. **Key words:** heat supply, unit consumption, cogeneration, exergy saving, exergy

风水共冷式冷渣器的换热计算 = Heat-transfer Calculation of a Slag Cooler Cooled by Air and Water [刊, 中]/Zhao Guangbo, Zhu Qunyi, et al. (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -311

水泥窑余热锅炉窄点温差 = Heat Recovery Boilers for Cement Kilns and Their Pinch Temperature [刊, 中]/Yu Zhimin, Gao Jiguo (Harbin Boiler Co. Ltd.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -312~314

Key words: cement kiln heat recovery boiler, pinch point temperature