

大湿度燃烧计算模型及蒸汽喷注对燃烧室燃烧流场特性的影响

(上海交通大学, 上海 200030) 胡宗军 王 颖 吴铭岚 邹介棠

摘 要: 基于传统的气态燃烧计算模型针对大湿度燃烧室的工作特点作出修正, 提出了适于大湿度燃烧计算的数学模型, 然后就一个具体的注蒸汽燃烧室中的四种蒸汽喷注位置方案对燃烧室内流场特性的影响进行了对比计算分析, 得到了一些规律性结论。

关 键 词: 大湿度燃烧; 蒸汽喷注; 流场模拟计算

中图分类号: TK 16. 8

文献标识码: A

1 前言

以 STIG(注蒸汽燃气轮机)为代表的双工质联合循环大大地改善了燃气轮机循环的性能, 正日益引起人们的重视^[1]。在国内, 哈尔滨·第七〇三研究所已成功地将投入实际生产, 取得了可观的社会及经济效益^[2]。目前这方面的研究重点多局限在循环总体性能的实验及分析上^[3], 较少深入研究其主要部件的内部细节问题。实际上由于在循环中采用了双工质, 大量“湿”工质的引入将使燃气轮机各部件尤其是燃烧室的内部流动特性受到较大程度的影响, 进而影响到双工质循环的总体性能。而目前对双工质循环大湿度燃烧室内部流动状况的实验及数值研究仍是空白。本文试图采用数值计算方法对 STIG 大湿度燃烧室内部流动特性与蒸汽喷注方式间的相互关系进行研究探讨。计算中采用气态丙烷作为燃料, 计算模型中没有考虑辐射的影响^[4]。

2 流场模拟计算的数学模型

2.1 常规燃烧室气态燃烧流场的计算模型

湍流用标准的 $k-\epsilon$ 模型进行描述, 湍流动量扩散系数 μ_e 中考虑了湍流粘性系数 μ_t 的影响:

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (1)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (2)$$

燃烧计算采用 Arrhenius—EBU^[5] 模型, 燃烧速率 R_{fu} 受到湍流及化学动力学因素影响:

$$R_{fu1} = -C_R \rho \sqrt{g\epsilon} / \kappa \quad (3)$$

$$R_{fu2} = -A_0 \rho^2 m_{fu} m_{ox} \exp(-E/RT) \quad (4)$$

计算时 R_{fu} 取两者中绝对值较小的一个, m_{fu} 、 m_{ox} 分别为燃料和氧气的质量分数, 系数取为 $C_\mu = 0.09$, $C_R = 1.0$, $A_0 = 2.10^{10}$, $E = 1.84 \cdot 10^4$ 。

2.2 蒸汽质量分数的计算模型

双工质大湿度燃烧室中的蒸汽成分除少量由燃烧产生外, 大部分通过喷注进入, 蒸汽在燃烧室的各气态成分中占有较大比重。常规燃烧计算模型不能说明蒸汽在流场中的分布特点, 本文对其加以修正, 通过添加描述蒸汽质量分数输运的方程来描述蒸汽的产生、扩散情况。

蒸汽成分的输运方程形式同其它方程相似, 蒸汽产生率通过方程源项反映, 大小根据燃料质量分数的生成速率 R_{fu} 基于反应时相互之间的特定比例关系确定。丙烷燃烧时蒸汽方程的源项用下式表示, 负号表示蒸汽产生和燃料消耗的过程相反:

$$R_{steam} = -(4W_{H_2O}/W_{C_3H_8})R_{fu} \quad (5)$$

蒸汽输运方程同常规气态燃烧计算模型一起构成大湿度燃烧的计算模型。

2.3 大湿度燃烧流场计算模型的控制方程组

本文的研究限于轴对称的二维情况, 计算中需求解速度 (u, v, w)、湍动能 (κ) 及其耗散率 (ϵ)、总焓 (H)、混合分数 (f)、燃料质量分数 (f_{fu}) 及其脉动量 (g) 及蒸汽质量分数 (f_{steam}) 等共计 11 个物理量。其输运方程可用下面的方程形式统一表述:

$$\frac{\partial(\rho u \Phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v \Phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S \quad (6)$$

收稿日期: 1998-10-26; 修订日期: 1999-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(59776005)及国家 211 工程资助项目

作者简介: 胡宗军(1972-), 男, 四川广安人, 上海交通大学动力与能源工程学院博士生。

Copyright © 2000 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中: x 和 r 分别为轴向及径向坐标; Φ 为待求的物理量, Γ 表示各物理量的名义扩散系数, S 是方

程的源项, 各项的具体形式如下表所示。

| 方程 | Φ | Γ | S |
|----------|-------------|-------------------------|---|
| 连续性方程 | I | — | — |
| 轴向动量方程 | u | μ_e | $-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\mu_e \frac{\partial v}{\partial r})$ |
| 径向动量方程 | v | μ_e | $-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\mu_e \frac{\partial v}{\partial r}) - \frac{2\mu_e v}{r^2} + \frac{\rho_w^2}{r}$ |
| 周向动量方程 | w | μ_e | $-\frac{W\partial\mu_e}{r\partial r} - \frac{\rho_w w}{r} - \frac{\mu_e w}{r^2}$ |
| 湍流动量方程 | κ | μ_t/σ_κ | $G - \rho\epsilon$ |
| 湍流耗散率方程 | ϵ | μ_t/σ_ϵ | $(C_1 G - C_2 \rho\epsilon)\epsilon/\kappa$ |
| 总焓输运方程 | H | μ_t/σ_H | 0 |
| 混合分数方程 | f | μ_t/σ_f | 0 |
| 燃料质量分数方程 | f_{fu} | μ_t/σ_f | R_{fu} |
| 燃料分数脉动方程 | g | μ_t/σ_f | $C_{g1}G - C_{g2}g^{\rho\epsilon}/\kappa$ |
| 蒸汽质量分数方程 | f_{steam} | μ_t/σ_f | R_{steam} |

表中 G 、 G_g 分别为 κ 及 g 的产生项, 具体形式表示为:

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

$$G_g = \mu_t \left[\left(\frac{\partial f_{fu}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{fu}}{\partial r} \right)^2 \right] \quad (8)$$

计算采用 42×32 的网格布置方案, 计算区域为图中上半部分的 $0.1 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 的矩形区域(为防止下游出口边界条件假定对计算结果造成不利影响, 轴向长度取得较长)。燃料喷嘴看作一个圆环状结构, 保持同实际情况相同的入口速度及流量。

各常数取值: $C_1 = 1.44$ 、 $C_2 = 1.92$ 、 $C_{g1} = 2$ 、

8 、 $C_{g2} = 2.0$ 、 $\sigma_\kappa = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.22$ 、 $\sigma_H = 0.9$ 、 $\sigma_f = 0.9$ 。

3 计算对象

本文的计算对象为某实验用模型燃烧室(图 1), 该模型壁面没有空气射流孔, 流动近似于轴对称的两维结构。另外壁面上有两排为以后的蒸汽喷注而预留的射流孔。旋流器的叶片扭角为 50° , 喷嘴为直射式, 在 9.5 mm 的半径处沿周向分布了 6 个直径 1.2 mm 的小孔, 喷射角为 45° , 过量空气系数为 1.16 。

4 方程求解

方程采用 SIMPLE 系列的 SIMPLEC 方法求解。为改善收敛情况, 计算中还采用了块修正技术, 同时还对线性方程采用亚松弛处理。在近壁面区域采用壁面函数法处理^[6]。

假设燃气成分的物性仅随温度变化, 燃气混合物的比热根据组分的比热值按照理想气体混合方式进行计算, 混合物的动力粘度通过组分的纯物质粘度值采用结合因子法确定^[7]。

方程求解时的边界条件及收敛条件如下:

(1) 进口: 速度、燃料及蒸汽的质量分数及混合分数均事先按均匀分布给定。 κ 、 ϵ 及 g 进口分布假定为: $\kappa = 0.005 \times (u_{in}^2 + w_{in}^2)$, $\epsilon = C_\mu \kappa^{1.5}/0.03R$, $g = 0.01f_{fu}$ 。

(2) 对称轴: $v = 0$, 其它变量径向梯度为 0。

(3) 出口: 各变量的轴向梯度为 0, 同时满足流量及化学组分守恒的条件。

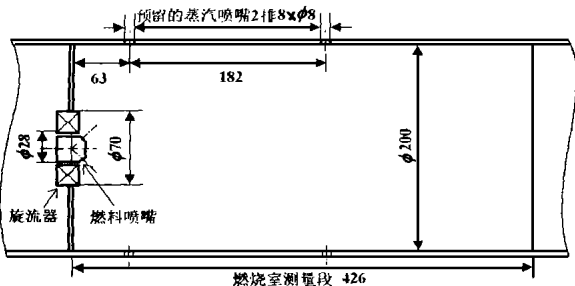


图 1 计算对象示意图

(4) 壁面: 假设壁面处无速度滑移; 其它变量的法向梯度为零。

计算中采用各物理量两次迭代值的相对残差作为收敛条件, 收敛精度为 $R_{\Phi} \leq 10^{-4}$ 。

5 计算结果

蒸汽在四个位置注入: 燃烧室头部端面上半径 40 mm 及 67.5 mm 处、壁面上距离端面 63 mm、182 mm(回流区前、后)处; 喷注量为空气质量流量的 10%, 方向垂直于壁面, 速度和空气进口速度相同。蒸汽喷嘴采用同燃料喷嘴相同的方法转换成二维结构考虑。

5.1 大湿度燃烧室中蒸汽质量成分的分布特点

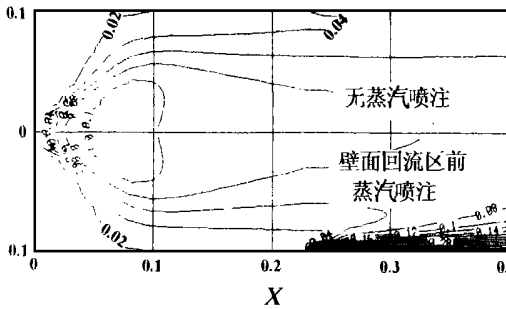


图 2 不注汽及在壁面回流区后注汽时的计算结果

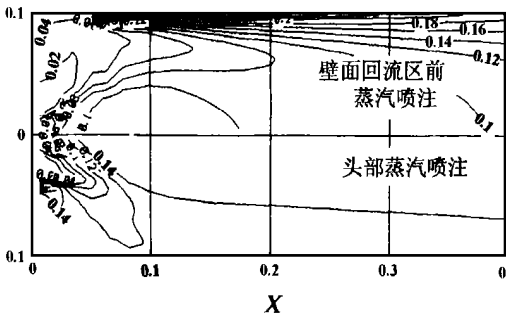


图 3 在头部端面及壁面回流区前注汽时的计算结果

不同喷注位置对燃烧室中的蒸汽分布情况有不同影响。在壁面回流区后方注入蒸汽对高温回流区中的蒸汽分布造成的影响很小, 蒸汽绝大部分被燃气流贴着壁面吹向燃烧室出口, 而在头部及壁面上回流区前喷注将使蒸汽更多地进入中心回流区, 尤其是在头部端面喷注时, 中心区蒸汽含量急剧上升, 这将影响到燃烧室的温度场。

5.2 蒸汽喷注对燃烧区温度场及流场特性的影响

影响

图 4 及图 5~8 分别是不喷注蒸汽及采用四种喷注位置方案时的燃烧流场流线(上)及温度等值线(下)图, 温度的单位为 K。

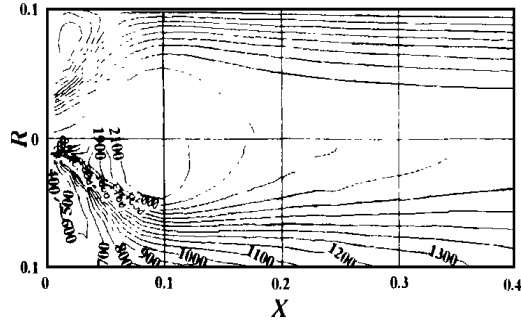


图 4 无蒸汽喷注时的燃烧流场

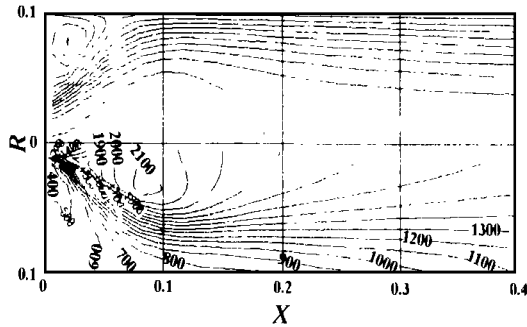


图 5 左端面上方喷注时的燃烧流场

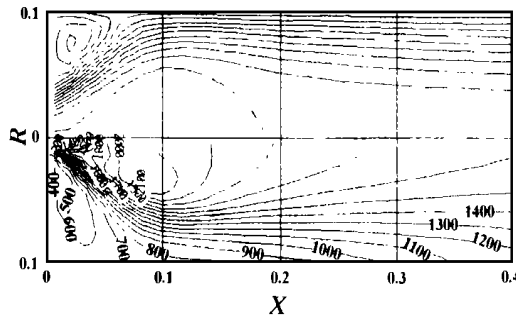


图 6 左端面下方喷注时的燃烧流场

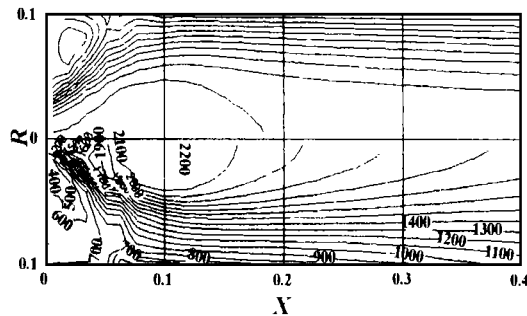


图 7 壁面前方喷注时的燃烧流场

图中结果表明, 在头部端面喷注蒸汽将使燃烧区的温度下降, 高温区变窄, 回流区变长。喷注位置越靠近中心轴线, 影响的幅度越大。燃烧温度的下降将有利于降低燃气轮机 NO_x 等污染物的生成水平。在壁面回流区前方喷注时, 高温区变长后移, 燃烧火焰

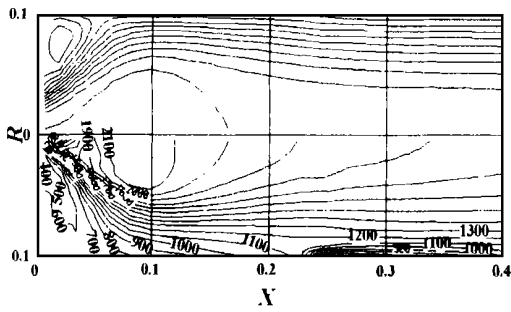


图 8 壁面后方喷注时的燃烧流场

相应变长, 中心回流区也有相似的变化。在壁面上注入蒸汽对燃

烧区最高温度的影响相对较小。在壁面上回流区后喷注蒸汽最有利, 这时蒸汽喷注可加强燃气回流, 使回流区及高温区变短, 燃烧火焰也变短, 有利于燃烧室取得好的燃烧性能^[8], 这些蒸汽在一定程度上起到了壁面空气射流的作用。

6 结论

(1) 本文建立了适于大湿度燃烧室特性分析的大湿度燃烧计算模型, 该模型可用于分析预测双工质循环大湿度燃烧室的流场特性, 尤其是其中的蒸汽分布特性。

(2) 蒸汽在燃烧室头部端面及壁面上回流区前

方注入时大部分进入高温回流区, 对回流区蒸汽浓度影响较大; 而在壁面回流区后方注入的蒸汽则基本上被吹向下游, 对回流区蒸汽浓度影响不大。

(3) 不同的蒸汽喷注方案对燃烧流场特性影响造成不同影响。在燃烧室头部端面上喷注蒸汽将使燃烧区的燃烧温度降低; 在壁面回流区后注入蒸汽, 可使高温区及回流区变短, 较有利于燃烧室取得好的性能。

参考文献

- [1] Tuzson J. Status of steam-injected gas turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114(3): 682.
- [2] 闻雪友, 魏应新. PG536ISTIG 装置. *热能动力工程*, 1992, 7(4): 169.
- [3] 胡宗军, 吴铭岚. 注蒸汽燃气轮机最佳注汽量的研究. *热能动力工程*, 1998, 13(4): 257.
- [4] 向征涛. 炉内流动与辐射的数值研究: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 1985.
- [5] 范维澄, 万跃鹏. 流动及燃烧的模型与计算. 合肥: 中国科学技术出版社, 1992.
- [6] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [7] 董景山, 李敬. 流体热物理性质的计算. 北京: 清华大学出版社, 1982.
- [8] 焦树建. 燃气轮机燃烧室. 北京: 机械工业出版社, 1981.

(何静芳 编辑)

(上接第 92 页)

4.2 依靠科技进步, 节能降耗, 减少 SO₂ 排放

以 300 MW、600 MW 等大型、特大型机组为主, 逐步淘汰低效高耗的中低压机组, 如 1 kW^h 的煤耗 2000 年比 1990 年降低 60 g 标准煤, 仅此一项可节约标准煤 6 600 万 t 左右, 减少 SO₂ 排放量 180 万 t。

4.3 煤炭的清洁使用和发展洁净煤技术

我国是一个以煤为主要能源的国家, 即使再过半个世纪, 煤炭在我国一次能源中的比例仍将不低于 40%。因此, 煤炭的洁净使用和发展洁净煤技术在未来我国可持续发展中将占有举足轻重的地位。我国是发展中国家, 面临经济建设的任务很重, 不可能拿出大量的资金用于环境治理。为此, 发展洁净煤技术应遵循技术上的可行性与经济上的合理性。

此项主要有煤炭的洗选加工; 工业与民用型煤; 限制高硫煤开采与使用; 煤炭气化、液化; 水煤浆; 循环流化床燃烧 (CFBC); 煤气化联合循环发电 (IGCC); 增压流化床联合循环发电 (PFBC) 等。

4.4 开发适合我国国情的烟气脱硫技术

4.5 大力研究和推广有利于提高我国综合能源利用效率, 如峰谷电价、冰蓄冷技术、抽水蓄能、超导电感储能等。

参考文献

- [1] 中国环境科学学会编. 脱硫技术. 中国环境科学出版社, 1995.
- [2] 国家环境保护局. 电力工业废气治理. 中国环境科学出版社, 1993.
- [3] 国家环境保护局. 燃煤固硫、烟气脱硫技术与酸雨研究. 科学出版社, 1992.
- [4] 周宇伟, 钱垂喜. 我国主要燃煤电厂 SO₂ 生成量的现状及其预测. *热力发电*, 1994(1).
- [5] 曾汉才. 燃烧与污染. 华中理工大学出版社, 1992.
- [6] 张新生, 李长春, 李光霞. 燃煤烟气脱硫. 中国地质大学出版社, 1991.

(复 编)

words: thermoacoustic engine, standing wave, resonance tube, refrigeration

二维真空系中壁面幅射热负荷反问题= **An Inverse Problem of Wall-surface Radiation-heat Load in a Two-dimensional Vacuum System** [刊, 汉] / Fan Hongwu, Li Bingxi, Yang Lidan, et al (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —104 ~ 106

Based on a Monte Carlo method and through the use respectively of a Singular Value Decomposition method (SVDM) and a Conjugate Gradient Method (CGM) solved in this paper is the inverse problem of a wall-surface radiation-heat load. Calculation results show that when the error of measured values is taken into account the stability and precision of the solution by the CGM are by far higher than those of the solution by the SVDM method. **Key words:** inverse radiation problem, numerical analysis, Monte-Carlo method, Singular Value Decomposition, Conjugate Gradient Method

有限空间内不可逆卡诺热机的不可逆因子的研究= **A Study of the Irreversible Factor of a Finite-time Endo-irreversible Carnot Engine** [刊, 汉] / Yang Yushun, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —107 ~ 109

Deduced in this paper is the calculation formula of an irreversible factor for a finite-time endo-irreversible Carnot engine. Meanwhile, it is pointed out that at the maximum engine power the irreversible factor cannot be determined by using only the temperature of the high and low-temperature heat source. To make such a determination possible, one has to know the temperature of one end of a system's circulating working-medium. The calculation of a specific example shows the validity of the irreversible factor calculation formula. The latter can somehow serve as a helpful guide during the computation of the irreversible loss and thermal efficiency of the finite-time endo-irreversible Carnot engine. **Key words:** finite-time thermodynamics, irreversible factor, irreversible loss

煤的结渣特性磁力分析的研究= **A Study of the Magnetic Analysis of Coal-slagging Characteristics** [刊, 汉] / Chen Lizhe, Ai Jing, Li Zhenqi, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —110 ~ 111

Coal-ash slagging characteristics are studied from the perspective of coal physical properties. Among the various kinds of substances present in the coal, iron compounds have the lowest melting temperature, which is the major cause of coal-related slagging during coal-firing in a boiler furnace. This paper describes a new method for determining the slagging tendency of various kinds of coal on the basis of a magnetic absorption percent of magnetic iron-to-coal. Furthermore, an in-depth analysis is conducted of the mechanism and use of the above method, which makes possible the rapid measurement on-site of the coal-slagging characteristics. **Key words:** coal quality, magnetic analysis, slagging

大湿度燃烧计算模型及蒸汽喷注对燃烧室燃烧流场特性的影响= **A High-humidity Combustion Computation Model and the Effect of Steam Injection on the Combustion Flow-field Characteristics of a Combustor** [刊, 汉] / Hu Zongjun, Wang Ying, Wu Minglan, et al (College of Power & Energy under the Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(2). —112 ~ 115

On the basis of a traditional gas-state combustion-calculation model a correction is performed of the operating features of a high-humidity combustor and a mathematical model appropriate for the high-humidity combustion calculation proposed. Thereupon, with respect to four versions of steam-injection location in a specific steam-injection combustor a comparison and calculation analysis has been conducted of the effect on combustor inner flow-field characteristics of the different steam injection locations. As a result, some logical conclusions were obtained. **Key words:** high-humidity combustion, steam injection, flow field simulation calculation