

煤粉燃烧过程的数值模拟

张宏博

秦国彤

纪任山

王乃继

(北京航空航天大学 化学与环境学院, 北京 100191)

(煤炭科学研究总院 北京煤化工研究分院, 北京 100013)

摘 要: 采用计算流体动力学软件对煤粉实际燃烧过程进行数值计算并结合其热态试验数据进行对比分析, 已成为验证数学模型和指导工程实践的一种重要研究手段. 应用商业软件 FLUENT 对煤粉燃烧及流场进行了数值模拟分析, 采用混合分数/概率密度函数法模拟湍流燃烧, 用 P-1 辐射模型开展辐射传热模拟, 利用拉格朗日/欧拉法处理气固两相间的动量、质量和能量交换, 对挥发份的析出采用双速率竞争模型, 采用动力/扩散反应速率模型模拟煤粉颗粒的表面燃烧. 并对模拟结果进行分析与对比, 计算结果与实际燃烧过程有较好的一致性. 数值模拟计算结果揭示了挥发分释放与焦炭燃烧的过程, 为改善和优化煤粉的燃烧提供了重要的参考依据.

关键词: 数值模拟; 煤粉燃烧; 两相流

中图分类号: TK 229.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965(2009)05-0536-04

Numerical simulation of pulverized-coal combustion

Zhang Hongbo Qin Guotong

(School of Chemistry and Environment, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Ji Renshan Wang Naiji

(Beijing Research Institute of Coal Chemistry, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The comparative study between CFD numerical results of pulverized coal combustion process and the experimental data is becoming an important measure for validating mathematical models and direct engineering practice. The CFD commercial software, FLUENT, was used to simulate the pulverized coal flow and combustion. Mixture-Fraction/PDF model was used to simulate turbulent combustion; P-1 radiation model was used for simulating radiation heat transfer; the Langrange/Euler's method was used for dealing with momentum, mass and energy exchange between the solid and the gas phase; the two-competing rates model for devolatilization and the kinetics/diffusion limited combustion model for simulating surface combustion of pulverized coal particles. The result of simulation is consistent with the data from actual combustion process. The simulation results show the rules of the volatile releasing and combustion processing of coke, which could provide important references to improve the combustion of the pulverized coal.

Key words: numerical simulation; pulverized coal combustion; two phase flow

煤粉燃烧是一个非常复杂的物理和化学过程. 本文以新型煤粉燃烧装置为对象, 借助 FLUENT 软件平台, 对其燃烧状态进行模拟. 模拟中根据以往文献[1-4]选用了比较合适的数学物理

模型和几何结模型, 并对模型的网格系统进行改进, 采用尽可能多的结构网格, 减少因网格质量造成的误差, 增强了模拟的合理性. 模拟中得到了温度场、连续相和离散相的轨迹等反映燃烧状况的

数据,对了解和掌握煤粉燃烧过程及其规律,提高该种煤粉燃烧装置的设计、运行与改造提供了有益的参考。

1 数学模型及基本方程

1.1 数学模型

煤粉燃烧过程是伴随有多种热传递现象的有化学反应的湍流气固两相流动,涉及流体力学、传热学及燃烧学等多个学科。煤粉燃烧过程的模拟需要建立很多物理过程的简化模型,包括气固两相流动、气固热传递、煤粉干燥、挥发分析出与燃烧、焦炭燃烧以及辐射传热等过程。通过试算及查阅文献,本文采用非预混燃烧模型,用 Realizable $\kappa\text{-}\epsilon$ 紊流模型模拟气相湍流运输,对固体颗粒相的求解采用随机颗粒轨道模型,用 P-1 辐射模型计算辐射传热,对煤粉挥发分释放采用双匹配速率模型,对焦炭的燃烧采用动力学/有限扩散速度模型来模拟。

1.2 基本方程

本文所采用的模型基于对气相的 Euler 处理和对颗粒相的 Lagrangian 描述,紊流流场和温度场的时均值控制方程用紊流粘性系数法实现封闭。对于非预混燃烧模型、Realizable $\kappa\text{-}\epsilon$ 紊流模型、随机颗粒轨道模型和 P-1 辐射模型。

对于煤粒挥发的双方程竞争反应模型^[5],该模型有计算相对简单,而计算结果又有相当的准确性的优点。

在本文中,采用动力学/有限扩散速度模型(the kinetic/diffusion surface reaction rate model)来模拟焦炭的燃烧。该模型认为表面反应的速率由化学反应动力速率或有限扩散速率决定,FLUENT 使用 Baum and Street 模型^[6]和 Field 模型^[7],导出扩散速率系数及反应动力速率。

2 计算方法及网格划分

2.1 计算方法

对于离散后的代数方程组一般不能直接用来求解,必须对离散方程进行一些调整,对未知量的求解顺序及方式进行特殊处理。目前工程上应用最广泛的流场数值计算方法为 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)算法,其全称为压力耦合方程组的半隐式解法,其优点是可直接求出压力场和速度场,并且收敛性好,边界条件处理也方便。

2.2 新型煤粉燃烧装置和网格划分

模拟对象为新开发的煤粉燃烧装置,助燃风

在导向结构的作用下携带着煤粉在燃烧室充分混合燃烧,热烟气进入换热器换热,飞尘积灰落入回转室并排出。

由于回转室和很多细小的管道不易划分网格,而且实际中也只对回转室前的部分进行试验测试,故只对燃烧室部分进行建模和计算,划分网格采用结构网格与非结构网格的混合网格。

3 数值计算与热态试验对比及分析

本文模拟计算了标准工况下的燃烧装置内的燃烧过程,分析了燃烧室内的温度场、助燃风流线和煤粉颗粒的运动轨迹以及煤粉颗粒在燃烧装置内的挥发燃烧规律。

3.1 计算结果与试验结果对比

为了验证数值模拟的结果的准确性,应该和实际测试的结果对比验证。由于煤粉燃烧时燃烧室内完全处在高温的环境中,所以其温度也就成了最直接最有效的参考数据,所以在燃烧室内不同的位置设置探头,测量其稳定燃烧时的温度 T ,计算的温度场和测量点位置见图 1,由图 2 数据对比可知,3 个测点的测量值和计算值很接近,相对误差都在 10% 以内,认为模拟结果基本符合实际。

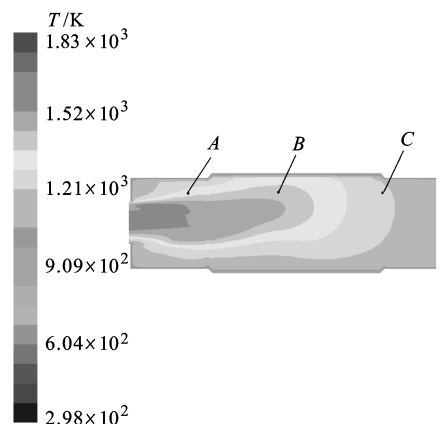


图 1 计算温度场和测点分布图

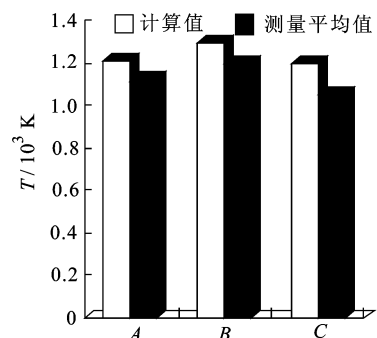


图 2 测量值和计算值对比图

3.2 连续相和离散相轨迹分析

图3、图4分别为输送风和助燃风的流线图，输送风进入燃烧室后，在燃烧室的前段部分与助燃风相遇；助燃风在一定的风压下以一定速度沿导流叶片旋转进入燃烧室，既有轴向速度又有切向速度，主要在燃烧室内壁做旋流运动；在助燃风的影响下，输送风在预燃室中心做旋流运动，二者相互作用，相互结合使得煤粉颗粒和空气达到充分的混合燃烧。

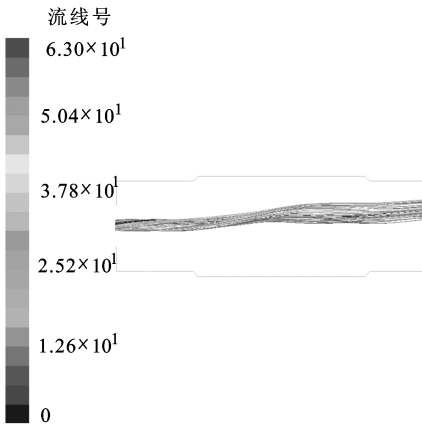


图3 一次风流线图

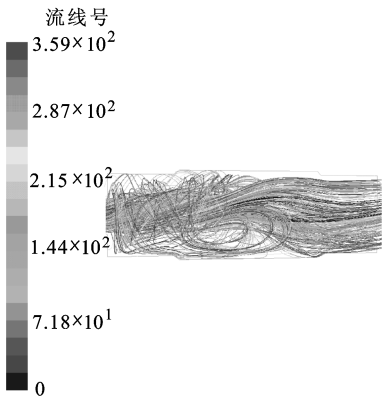


图4 二次风流线图

图5为煤粉的颗粒轨迹图，10种不同粒径的煤粉颗粒在燃烧室内在助燃风的旋流作用下也在

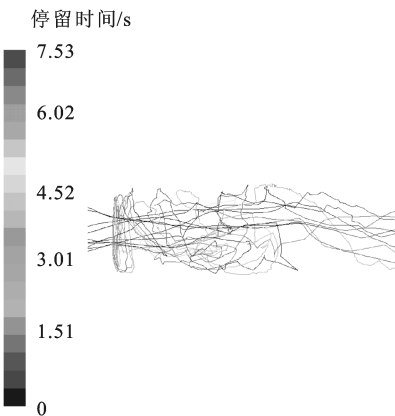


图5 颗粒轨迹图

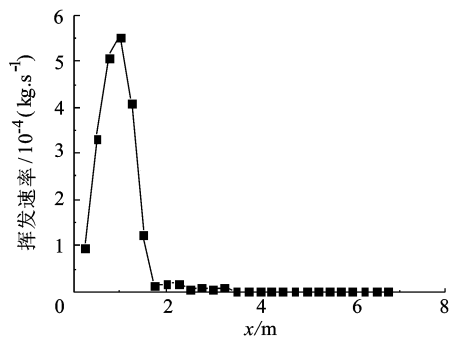
炉内做旋流运动；由图中可知颗粒在炉膛中的分散性较好，有利于煤粉的燃烧；煤粉颗粒的轨迹对燃烧的影响很大，煤粉分散性好、和空气混合均匀是燃烧装置结构合理的重要依据。

3.3 煤粉的挥发和燃烧

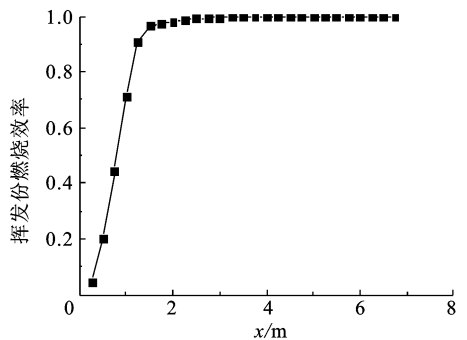
由于网格数量巨大，计算整个燃烧区域的计算有一定难度，考虑到整个燃烧装置的温度场接近于轴对称，故可以求中截面的挥发速率和焦炭燃烧速率来近似代替，现将 $z=0$ 的轴切面(见图2)作为计算域，计算其沿 x 轴方向上的挥发份析出速率和焦炭的燃烧速率。

1) 挥发份的析出规律和着火

如图6a所示，煤粉颗粒在进入预燃室后，颗粒得到迅速加热并开始析出挥发份，挥发份析出速率随着 x 轴坐标的增加迅速增大，在 $x=1$ m左右达到最大值，然后剧烈下降，在 $x=2$ 处基本挥发完毕，由于挥发份的燃烧过程非常迅速，可以认为一旦析出就燃烧，由此可知挥发份的析出和燃烧在燃烧室的前段内基本完成；挥发份的析出过程相对集中在较小的范围内，若将挥发份析出的50%作为着火的开始，从图6b可以知着火过程发生在 $x=1$ 附近的区域，这与其温度场的分布是吻合的。



a 挥发速率



b 挥发率

图6 煤粉随 x 轴变化的挥发速率和挥发率

2) 焦炭的燃尽规律

由图7可知，焦炭的燃烧速率随着 x 轴的增大先迅速增大，之后呈递减趋势，与燃烧室中温度

场相关联,大概在 $x=1.5\text{ m}$ 处,即燃烧室中温度最高的位置达到峰值;在 $x=2\text{ m}$ 处,焦炭的燃尽率达到 50% 左右;在燃烧室中,焦炭的燃烧速率随着 x 轴的增大呈逐渐降低的趋势,随着燃尽率的增加,焦炭颗粒的可燃组分减少,导致其燃烧速率降低,进而使温度降低;在接近燃烧室出口的后半部分,尽管燃烧速率呈减少趋势,但在出口位置煤粉的燃烧过程仍趋近完成,燃尽率达到了 91%,由于煤粉的燃尽率已经很高,而且在燃烧室出口处燃烧速率也已经很小,所以增加燃烧室长度对煤粉燃烧效率的影响不大,综合考虑一下可知现有燃烧室长度是合理的。

烧室中的分布状态达到最佳,说明新型燃烧装置的结构合理,各项操作工况条件合适。

煤粉的燃烧是分段进行的,首先是挥发份的析出和燃烧,然后是焦炭颗粒的燃烧.由模拟结果可以看出在燃烧室的前半部分,煤粉快速被加热,其燃烧以挥发份为主;在燃烧室后半部分,由于挥发份已经挥发完,其燃烧以焦炭为主;可以看出模拟结果是完全符合煤的燃烧规律的.在出口位置煤粉的燃烧过程仍趋近完成,燃尽率达到了 91%,燃烧速率也已经很小,所以增加燃烧室长度对煤粉燃烧效率的影响不大,综合考虑一下可知燃烧装置现有结构和长度是合理的。

参考文献 (References)

- [1] 范贤振,郭烈锦. 200MW 四角切向燃烧煤粉炉炉内过程的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(3): 241-245
Fan Xianzhen, Guo Liejin. Numerical simulation of flow and combustion process in the tangentially fired furnace of a 200MW pulverized coal boiler [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(3): 241-245 (in Chinese)
- [2] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994
Zhou Lixing. Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion [M]. Beijing: Science Press, 1994 (in Chinese)
- [3] 周力行,李力,李容先,等. 炉内两相流动和煤粉燃烧的双流体-轨道模型[J]. 工程热物理学报, 2001 (11): 771-774
Zhou Lixing, Li Li, Li Rongxian, et al. Numerical modeling of 3-d gas-particle flows and coal combustion in a tangentially-fired furnace using a two-fluid-trajectory model [J]. Journal of Engineering Thermo Physics, 2001 (11): 771-774 (in Chinese)
- [4] 靳贵铭. 四墙切圆煤粉燃烧室内湍流气粒两相流动的数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 2004
Jin Guiming. The numerical simulation of gas-solid flow in chamber of four wall tangentially fired [D]. Xi'an: School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, 2004 (in Chinese)
- [5] Kobayashi H, Howard J B, Sarofim A F. Coal devolatilization at high temperatures [C]// 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1976: 411-425
- [6] Baum M M, Street P J. Predicting the combustion behavior of coal particles [J]. Combust Sci Tech, 1971, 3(5): 231-243
- [7] Field M A. Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low rank coal between 1200K-2000K [J]. Combustion and Flame, 1969, 13: 237-252

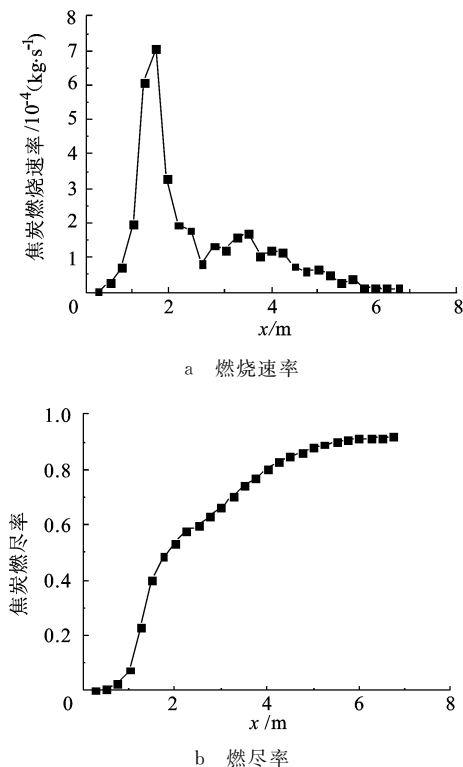


图7 焦炭随 x 轴变化的燃烧速率和燃尽率

4 结论

以 FLUENT 计算流体动力学软件为基础,选用合适的数学物理模型与几何结构模型,可以较好地模拟煤粉旋流燃烧的流动、传热和燃烧特性,并能较详细、准确地预报燃烧室内的温度场、速度场以及煤粉颗粒的运动轨迹.这为新型煤粉燃烧装置的设计、运行和改造提供了有益的参考。

通过模拟煤粉颗粒的运动轨迹和分布,结果表明煤粉颗粒在燃烧室中有良好的分散性,在助燃风的强旋流作用下和空气完全混合,使其在燃