

旋流煤粉多相流动与燃烧一维数学模型及应用

陈春明, 张健, 周力行

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘要: 为了发展和有效地进行旋流煤粉多相流动与燃烧数值模拟, 作者在多连续介质模型的框架中建立了综合考虑气-固两相旋流流动、燃烧与传热的旋流煤粉燃烧一维数学模型。应用这一模型对涡旋燃烧炉环形通道内煤粉燃烧和气体燃烧的数值计算表明, 该模型可快速有效地用于模拟旋流煤粉多相流动与燃烧过程, 给出炉内温度、速度与浓度分布以及燃烧效率等主要参数。

关键词: 旋流多相流动; 煤粉燃烧; 一维数学模型; 涡旋燃烧炉

中图分类号: TK16 文献标识码: A

1 引言

旋流燃烧在各种燃烧反应装置、包括煤的燃烧反应装置中有广泛的应用, 如各种旋流煤粉燃烧器、旋风燃烧炉、旋流化床和旋风链条炉等。发展对煤的旋流多相燃烧过程进行定量分析预报的方法, 对于进行有关的各种旋流燃烧反应装置的优化设计, 实现煤的高效低污染清洁燃烧具有重要的意义。近二十年来, 多相流动与燃烧的数学模型有了很大的发展, 并且在各种煤粉燃烧装置的研制、开发与优化设计中得到了应用^[1~2], 在煤粉旋流燃烧装置的研究与设计中也得到了应用^[3~4]。然而, 由于煤粉多相流动与燃烧具有过程复杂、涉及变量多和非线性耦合强等特点, 采用多维数值模拟不便于进行大量变参数和变工况的计算。一维数学模型尽管有一定的近似性, 但它却可以快速有效地对煤粉多相流动与燃烧过程进行模拟计算与分析, 便于进行大量不同工况和参数的计算, 因而也得到了发展和应用。如 Smith 和 Smoot 发展了煤粉燃烧器和气化器的一维数学模型^[5], Fiveland 和 Jamaluddin 发展了工业和电站锅炉内煤粉燃烧的一维数学模型^[6]。为了在旋流燃烧技术的发展中有效地进行旋流煤粉多相流动与燃烧过程的数值模拟, 可以采用一维模拟与多维模拟相结合的方法。为此本文作者建立并发展了旋流煤粉多相流动与燃烧的一维数学模型, 该模型综

合考虑了气-固两相旋流流动、燃烧与传热过程。应用该模型分别对涡旋燃烧炉环形通道内的气体燃烧和煤粉燃烧进行了数值模拟。

2 数学模型

在多连续介质模型的框架中建立气-固两相旋流流动和燃烧的控制方程组^[2]。为了得到旋流煤粉多相流动与燃烧的一维数学模型, 将在轴对称圆柱坐标系中写出的气-固两相连续、动量、能量和组分控制方程在燃烧室或炉内的任一径向截面上沿半径方向进行积分。在积分中假定: (1)忽略物理量沿轴向的扩散; (2)忽略壁面摩擦力; (3)除在空气和燃料的切向喷口处考虑进口的影响外, 其余地方取径向速度为零; (4)各物理量仅沿轴向变化。由此可以得到描述旋流煤粉燃烧的下列一维控制方程组:

气相连续方程

$$\frac{d}{dx}(\rho u) = S - 2\pi r_0 \rho_{in} v_{in} / A \quad (1)$$

气相切向动量方程

$$\frac{d}{dx}(\rho u w) = \sum_k \rho_k (w_k - w) / \tau_{rk} - \sum_k w_k S_k - 2\pi r_0 \rho_{in} v_{in} w_{in} / A \quad (2)$$

气相能量方程

$$\frac{d}{dx}(\rho u h) = q_r - \sum_k n_k Q_{ck} - \sum_k h_{ks} S_k - 2\pi r_0 \rho_{in} v_{in} h_{in} / A + Q_{wg} / A \quad (3)$$

气相组分方程

$$\frac{d}{dx}(\rho u Y_j) = -W_j + \alpha_j S - 2\pi r_0 \rho_{in} v_{in} Y_{jin} / A \quad (4)$$

颗粒相连续方程

$$\frac{d}{dx}(\rho_k u_k) = S_k - 2\pi r_0 \rho_{kin} v_{kin} / A \quad (5)$$

颗粒相轴向动量方程

$$\frac{d}{dx}(\rho_k u_k u_k) = \rho_k (u - u_k) / \tau_{rk} + u_k S_k - \rho_{kg} - 2\pi r_0 \rho_{kin} v_{kin} u_{kin} / A \quad (6)$$

颗粒相切向动量方程

$$\frac{d}{dx}(\rho_k u_k w_k) = \rho_k (w - w_k) / \tau_{rk} + w_k S_k - 2\pi r_o \rho_{kin} v_{kin} w_{kin} / A \quad (7)$$

颗粒相能量方程

$$\frac{d}{dx}(\rho_k u_k h_k) = n_k (Q_{ck} + Q_{rk}) + h_{ks} S_k - 2\pi r_o \rho_{kin} v_{kin} h_{kin} / A \quad (8)$$

上面各式中,下标“k”代表第k组颗粒相,下标“in”代表壁面的切向进口处,A代表燃烧室或通道的径向横截面积,r_o为燃烧室半径,τ_{rk}为颗粒-流体动量传递的驰豫时间,Q_{ck}为气体对颗粒的对流传热,q_r和Q_{rk}分别为气-固两相介质对气相和颗粒的辐射传热,Q_{wg}为壁面对气相的对流传热,S和S_k分别为气相和颗粒相的相变质量源项,并有

$$S = - \sum_k S_k = - \sum_k n_k \dot{m}_k$$

α_j代表颗粒相变对气相第j组分贡献的质量分数。h_{ks}代表颗粒相变逸出(吸附)的气体在颗粒表面处的焓值。

在煤粉颗粒同时有水分蒸发、热解挥发及焦炭燃烧的情况下,颗粒质量变化率 $\dot{m}_k = \dot{m}_{wk} + \dot{m}_{vk} + \dot{m}_{hk}$, 其中 \dot{m}_{wk} 、 \dot{m}_{vk} 和 \dot{m}_{hk} 分别为颗粒水分蒸发、挥发分析出和焦炭反应速率。对它们的模拟分别采用球体表面蒸发的扩散模型、热解挥发的双平行反应动力学模型和焦炭燃烧的扩散-反应动力学模型^[2]。为求出颗粒中水分和原煤的质量 m_{wk} 和 m_{ck} 以及颗粒的物质密度 ρ_{pk} , 还要求解颗粒相的下列控制方程组:

$$\frac{d}{dx}(n_k u_k m_{wk}) = n_k \dot{m}_{wk} - 2\pi r_o n_{kin} v_{kin} m_{wkin} / A \quad (9)$$

$$\frac{d}{dx}(n_k u_k m_{ck}) = n_k \dot{m}_{ck} - 2\pi r_o n_{kin} v_{kin} m_{ckin} / A \quad (10)$$

$$\frac{d}{dx}(n_k u_k \rho_{pk}) = \frac{6}{\pi d_k^3} n_k (\dot{m}_{wk} + \dot{m}_{vk}) - 2\pi r_o n_{kin} v_{kin} \rho_{pkin} / A \quad (11)$$

上式中假定 ρ_{pk} 的变化与水分蒸发和热解挥发有关。颗粒数密度 n_k 可用颗粒相连续方程的另一种形式求出,即

$$\frac{d}{dx}(n_k u_k) = - 2\pi r_o n_{kin} v_{kin} / A \quad (12)$$

颗粒质量 m_k 和直径 d_k 可分别利用关系式 $m_k = \rho_k / n_k$ 和 $d_k = (6m_k / \pi \rho_{pk})^{1/3}$ 求出。

3 求解方法和模拟对象

对上述微分方程组采用上风即向后差分格式进行离散,对源项则利用当前节点值进行计算。对气-固两相的差分方程组均采用沿轴向逐点向前推进求解的方法。在各节点上分别联立求解两相各自的差分方程组时,由于相内变量间的耦合关联性而仍需采用迭代的算法。两相总体循环迭代求解的步骤为:(1)求解颗粒相差分方程组;(2)计算气相差分方程组中的颗粒源项;(3)求解气相差分方程组;(4)重复上述步骤,直至前后两轮循环迭代求解得到的气相温度场的相对偏差绝对值小于 5×10⁻⁴,即两相均达到收敛时为止。

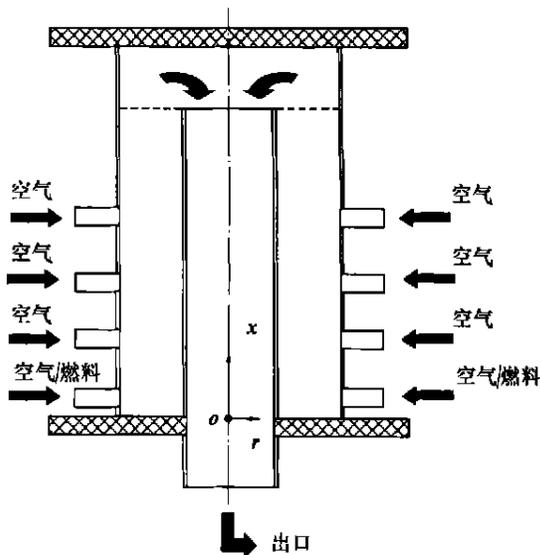


图1 燃煤涡旋燃烧炉

利用上述模型和算法,对图1所示的涡旋燃烧炉环形通道内(图中虚线以下部分)的气体燃烧和煤粉燃烧过程分别进行了模拟计算。涡旋燃烧炉环形通道的内外直径分别为0.089 m和0.216 m,高度为0.61 m,四个切向进风口分别位于距炉底0.003 m、0.13 m、0.238 m和0.34 m的高度上,燃料和一次风喷口位于距炉底0.003 m的高度上。气体燃烧工况的燃料(丙烷)流量为4.5 kg/h,空气流量76.1 kg/h,过剩空气系数为1.07,从下至上四级空气喷口的流量分数分别为0.54、0.18、0.19和0.09,环形通道的外壁为水冷壁。煤粉燃烧工况的燃料流量为6.8 kg/h,空气流量为113.3 kg/h,过剩空气系数为1.45,空气从下面两级喷口喷入,下、上两级空气喷口的流量分数分别为0.505和0.495,环形通道的外

壁为涂有耐火层的水冷壁。煤粉的工业分析含量为原煤与灰分分别占 97.74% 和 2.26%, 可燃基挥发分含量为 37.78%。计算中将燃料进口处的煤粉分成初始粒径为 5 μm、16 μm 和 22 μm 的三个组, 各组的质量分数分别为 0.012 3、0.598 6 和 0.389 1, 挥发分的成份近似取为丙烷(C₃H₈)。在煤粉燃烧工况中, 共进行了 17 轮两相耦合循环迭代计算即得到了两相差分方程组的收敛解。

4 结果与讨论

图 2~图 4 给出了涡旋燃烧炉环形通道内气体燃烧工况的计算结果。图 2 为气体温度分布的计算结果及其与实验数据的比较, 由该图可以看到计算得到的气体温度分布与实验测量数据是基本符合的, 但计算值比实验值偏高, 两者均沿轴向呈逐渐下降的趋势。气体燃料从靠近底部的喷口进入环形通道, 与从最下面一级喷口喷入的空气迅速混合并燃烧, 导致靠近环形通道底部处出现气体温度分布的峰值。在第二和第三级喷风口附近, 由于新鲜空气的补燃作用而使得气体温度有所升高。

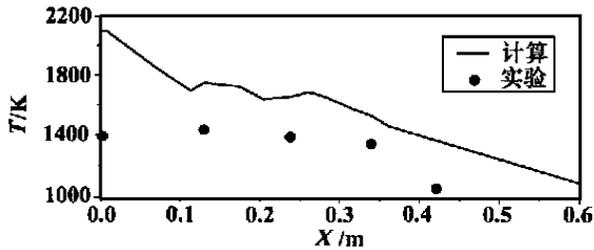


图 2 气体燃烧的温度分布

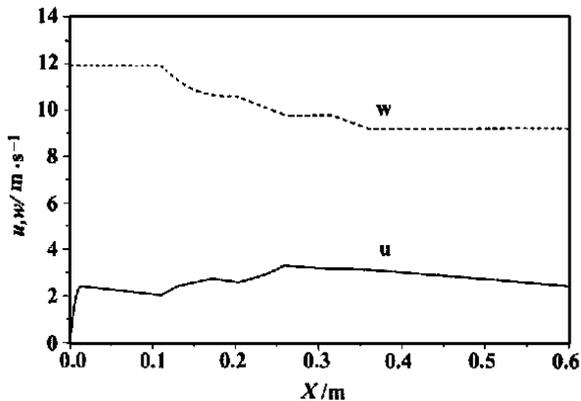


图 3 气体燃烧的轴向与切向速度分布

图 3 为气体轴向速度(*u*)与切向速度(*w*)沿轴向分布的计算结果。由图可见, 由于多级切向进风和燃烧反应造成的气体膨胀效应, 气体轴向速度沿

轴向逐渐增大, 而气体切向速度则沿轴向逐渐减小。图中气体切向速度大于轴向速度, 表明旋流在炉内气体流动中起着主导作用。

图 4 为丙烷、氧气、二氧化碳和水蒸气等主要气体组分质量分数分布的计算结果。由于空气分级喷入导致燃烧分级进行, 燃料(丙烷)浓度沿轴向逐渐下降, 在最上面(即最末)一级喷风口附近趋于燃尽。在下面三级喷风口附近, 燃料和空气迅速混合并燃烧, 导致空气中的氧以较快的速率消耗完毕, 即氧浓度很快就趋近于零。由于燃料燃烧完毕, 在最上一级喷风口后氧浓度分布逐渐趋于均匀。二氧化碳和水蒸气浓度分布的变化趋势是相似的。随着空气的分级喷入和燃烧反应的不断进行, 二氧化碳和水蒸气浓度沿轴向逐渐增加。当燃烧反应基本进行完毕后, 从最上面一级喷口喷入的空气又使得二氧化碳和水蒸气的浓度均有所下降。

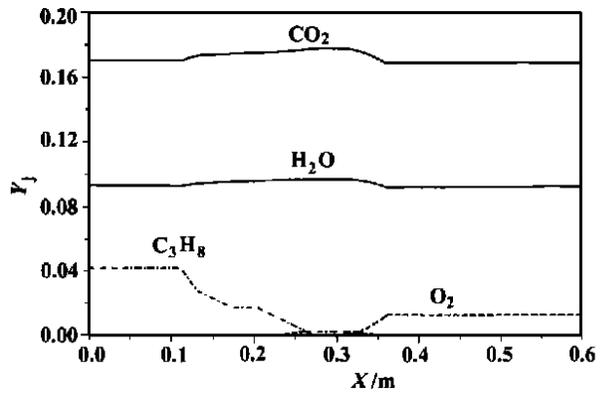


图 4 气体燃烧的组分质量分数分布

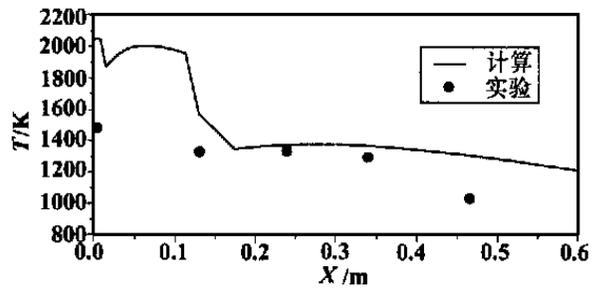


图 5 煤粉燃烧的气相温度分布

图 5~图 7 给出了涡旋燃烧炉环形通道内煤粉燃烧工况的计算结果。图 5 为环形通道内气相温度分布计算结果与实验测量值的比较。由图可见, 除在环形通道的底部区域外, 计算与实验是基本符合的。在底部区域计算与实验的偏差则反映了一维模型的近似性。在靠近环形通道底部的区域, 煤粉热解析出的挥发分与从下级喷口喷入的空气混合并燃

烧使得气相温度快速升高。在焦炭燃烧过程中,随着上面一级二次风的喷入和壁面的吸热作用,气相温度沿轴向呈逐渐下降的趋势。

图6给出环形通道内氧气、二氧化碳和水蒸气等气相主要组分质量分数分布的计算结果。在紧靠近底部的区域,由于挥发分很快燃尽,导致氧气消耗较快。之后随着焦炭燃烧的进行,氧浓度呈快速下降的趋势。在上面一级喷风口附近,新鲜空气的喷入又导致氧浓度上升。在离开喷风口后,氧浓度继续下降,这是由于焦炭仍在继续进行燃烧。在紧靠近环形通道底部处,挥发分的燃烧使得二氧化碳和水蒸气的浓度较高。在焦炭燃烧过程中,二氧化碳浓度继续升高,而水蒸气浓度则保持不变,但上面一级二次风的喷入会使得喷口处二氧化碳和水蒸气的浓度均有所下降。

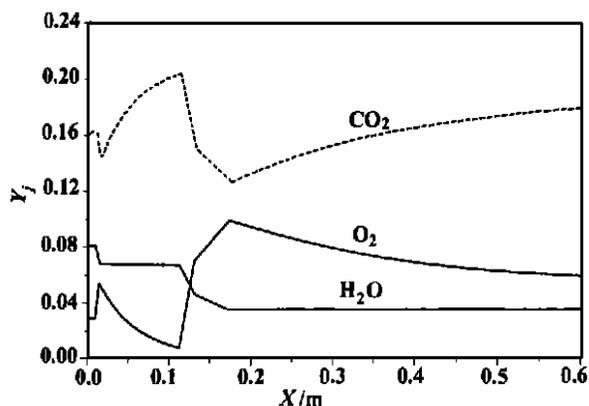


图6 煤粉燃烧的气相组分质量分数分布

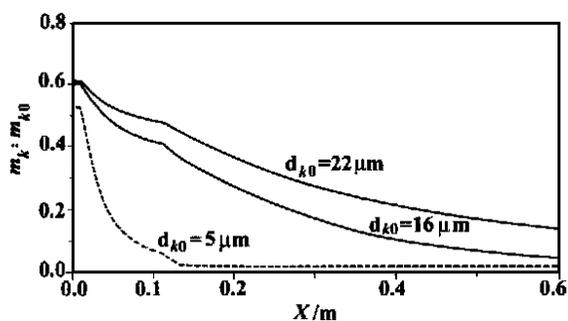


图7 煤粉颗粒的质量变化

图7给出初始粒径为5 μm、16 μm和22 μm的三组煤粉颗粒的质量沿环形通道轴向变化的计算结

果。在紧靠近底部处,由于挥发分的快速燃烧,煤粉颗粒质量以较快的速率减少。在焦炭燃烧过程中,煤粉颗粒质量继续逐渐减小,其中初始粒径较小的颗粒的质量减少得相对较快。初始粒径为5 μm的煤粉颗粒在环形通道内最先燃尽,初始粒径为16 μm和22 μm的煤粉颗粒在环形通道出口处接近于燃尽。按环形通道出口处颗粒中残炭含量计算出的煤粉燃烧效率为94.5%,而在同种工况条件下实验测量出的涡旋燃烧炉的煤粉燃烧效率为97.6%,两者是较为接近的。

5 结论

在本文中,作者建立并发展了综合考虑气-固两相旋流流动、气相燃烧、煤粉热解与焦炭反应等物理化学过程的旋流煤粉多相流动与燃烧一维数学模型。将该模型应用于涡旋燃烧炉环形通道内旋流煤粉燃烧和气体燃烧数值模拟得到的结果在趋势上是合理的。旋流煤粉燃烧一维数学模型提供了一种对旋流煤粉多相流动与燃烧过程进行快速分析预报的方法,它与多维数值模拟相结合,将在旋流煤粉多相流动与燃烧数值模拟以及旋流燃烧技术的发展中发挥有效的作用。

参考文献:

- [1] SMOOT L D, SMITH P J. Coal combustion and gasification[M]. New York: Plenum Press, 1985.
- [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.
- [3] BOYSAN F, WEBER R, SWITHEBANK J, et al. Modeling coal-fired cyclone combustor[J]. *Combustion and Flame*, 1986, 63(1-2): 73-85.
- [4] ZHANG J, NIEH S. Comprehensive modelling of pulverized coal combustion in a vortex combustor[J]. *Fuel*, 1997, 76(2): 123-131.
- [5] SMITH P J, SMOOT L D. One-dimensional model for pulverized coal combustion and gasification[J]. *Combust Sci and Tech*, 1980, 23(1-2): 17-31.
- [6] FIVELAND W A, JAMALUDDIN A S. An efficient method for predicting unburned carbon in boilers[J]. *Combust Sci and Tech*, 1992, 81(4-6): 147-167.

(渠源 编辑)

under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), MA Chun-yuan (Shandong Industrial University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 530 ~ 532

A calculation model of heat and mass balance along with relevant software has been developed, which is fit for both flue gas desulfurization in a circulating fluidized bed (CFB-FGD) and various other kinds of semi-dry type flue gas desulfurization systems. The accurate calculation results of the above-mentioned model and software were verified with the help of a 1 t/h boiler flue gas desulfurization test rig and the operating data of several typical semi-dry type flue gas desulfurization systems currently in operation in China. The calculation model and software under discussion may well be employed for the design, operation and industrial control of semi-dry type flue gas desulfurization systems. **Key words:** semi-dry type flue gas desulfurization, spray drying, calcium-based absorbent, model

旋流煤粉多相流动与燃烧—维数学模型及应用 = **A One-dimensional Mathematical Model for Pulverized Coal Multi-phase Swirl Flow and Combustion and Its Applications** [刊, 汉] / CHEN Chun-ming, ZHANG Jian, ZHOU Li-xing (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 533 ~ 536

With a view to developing an effective way of numerically simulating the multi-phase swirl flow of pulverized coal and its combustion set up was a one-dimensional mathematical model. Built on the framework of a multi-continuum model, the above-cited mathematical model comprehensively takes into account a gas-solid two-phase swirl flow as well as the pulverized coal combustion and heat transfer. It can be used to simulate in a speedy and effective way the pulverized coal multi-phase swirl flow and combustion process, as evidenced by the results of numerical calculation of pulverized coal and gas combustion in the annual duct of a vortex combustor. As a result, obtained were the following main parameters: in-furnace temperature, distribution of pulverized coal flow speed and concentration as well as combustion efficiency, etc. **Key words:** swirl multi-phase flow, pulverized coal combustion, one-dimensional mathematical model, vortex combustor

基于参数化建模的转子有限元剖分 = **Finite-element Meshing of a Turbine Rotor Based on Parametric Modeling** [刊, 汉] / WANG Zhang-qi, AN Li-qiang, PENG Zhen-zhong (Mechanical Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 537 ~ 539

The structural parametrization of a steam turbine rotor was attained through an analysis of its structural features. A method for the parametric modeling of the turbine rotor was put forward, resulting in an enhancement of the inputting efficiency and precision of the rotor initial geometric model. With the use of a Delaunay triangulation method generated by finite element grids a two-dimensional finite-element calculation model has been obtained. The finite-element grids feature a uniform size, a smooth transition in grid refinement and an absence of singular elements. As a result, fully ensured is the precision of finite element-based analytic calculation of the rotor temperature field and thermal stress. **Key words:** steam turbine rotor, parametrization, modeling, meshing

用时间相关法求解定常粘性流场的加速收敛法 = **Accelerating-convergence Approach for Solving a Steady Viscous Flow Field through the Use of a Time-marching Method** [刊, 汉] / ZHANG Yan-ying, WU Meng, SU Jie-xian (Energy Science and Engineering Institute under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), CUI Ming-gen, Department of Mathematics, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 540 ~ 542

After a detailed analysis of the CFL number of explicit and implicit scheme it is noted that the key factor influencing the magnitude of CFL lies in a discrete form. To enhance the speed of convergence in solving a steady flow field when a time-marching method is used, it is essential to enlarge the CFL number. Meanwhile, the most direct and effective approach