

二维炉膛气液两相对冲流动数值模拟

王文帅, 杨 茉, 陈 建, 陆 威

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 以锅炉炉膛选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝为应用背景, 抽象出具有对称结构的二维两相流动模型, 通过数值模拟, 探讨气液两相对冲射流的流动和混合特性。模拟结果表明, 由于炉内高速气流的扰动, 液体射流并非在所有的雷诺数 Re 下都能穿透气体区域在模型中心线附近位置汇合。增大 Re , 液体穿透力增加, 两侧对冲的液体射流逐渐可以在模型中汇合。当 Re 为 464 807 时, 左右两股液体射流出现汇合点; 增大 Re , 汇合点位置上移, 上部计算区域气液两相流体混合更加均匀; 继续增大 Re , 汇合点位置变化不大, 液相流体因动量过大而流出计算区域, 导致两相混合效果变差。在对称结构的炉膛内进行模拟, 得到了不对称的气液两相流动, 排除物理和几何上的干扰, 这可能是问题的非线性所导致的。

关键词: 两相流动; 液体射流; 非线性现象; 数值模拟

中图分类号: TK 123 **文献标志码:** A

Numerical simulation of gas-liquid two-phase relative impulse flow in a two-dimensional furnace

WANG Wenshuai, YANG Mo, CHEN Jian, LU Wei

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the selective non-catalytic reduction (SNCR) denitration in the furnace, a two-dimensional two-phase flow model with a symmetrical structure was abstracted from the problem of gas-liquid two-phase flow. Numerical simulation was conducted to discuss the flow and mixing characteristics of gas-liquid two-phase relative impulse flow. The simulation results show that due to the disturbance of high-speed gas flow in the furnace, the liquid jet can't penetrate the gas zone and converge near the center line of the model at all of Reynolds numbers. With the increase of Re , the liquid penetration increases, and the liquid jets with opposite sides can gradually converge in the model. There is a confluence point between the left and right liquid jets when Re is 464 807. When Re continues to increase, the position of the convergence point moves up, and the gas-liquid two-phase fluid mixing in the upper calculation area is more uniform. If Re continues to increase, the position of the convergence point does not change much, and the two-phase mixing efficiency becomes worse because the liquid flow out of the computation zone for its too much momentum. At last, as physical and

收稿日期: 2020-07-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51736007)

第一作者: 王文帅 (1992-), 男, 硕士研究生。研究方向: 流动和传热的数值计算。E-mail: wangwen.shuai@163.com

通信作者: 杨 茉 (1958-), 男, 教授。研究方向: 流动和传热的数值计算。E-mail: yangm@usst.edu.cn

geometric interference is eliminated in this simulation, the asymmetric gas-liquid two-phase flow in the furnace with symmetrical structure may be caused by the nonlinearity of the problem.

Keywords: two-phase flow; liquid jet; nonlinear phenomenon; numerical simulation

燃煤电厂的氮氧化物 NO_x 排放,是目前大气的主要污染源之一^[1],减少燃煤锅炉的 NO_x 排放具有重要意义。目前工程上主要采用选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)和选择性非催化还原(selective non-catalytic reduction, SNCR)进行烟气脱硝(去除 NO_x)。SCR的主要缺点是设备造价昂贵和运行费用高;SNCR是一种费用相对较低的脱硝方法,但其脱硝率相对较低。为了降低脱硝设备费用和脱硝成本,同时又要满足污染物排放标准,有人提出可以综合使用 SNCR 和 SCR 两种脱硝方法,即采用 SNCR 方法在锅炉炉膛进行前置脱硝,使炉膛出口烟气中的 NO_x 含量降至 100 mg/m^3 以下,之后再采用小型的 SCR 设备将 NO_x 含量降至排放标准以下。这样既降低了投资和运行成本,又能够达到规定的排放标准。

本文提出的炉膛内冷态气液两相对冲流动模型,正是针对 SNCR 的。SNCR 脱硝方法是直接把脱硝剂,如氨水,喷射到锅炉炉膛内的烟气中,利用脱硝剂与 NO_x 的化学反应,脱除 NO_x 。为使化学反应充分进行,减少氨逃逸,烟气与氨水两相流体需要充分混合。本文提出的炉膛内冷态气液两相对冲流动模型,正是针对 SNCR 的。通过对所提出的研究模型中气液两相流动的数值模拟,探讨两相流体射流的流动特性和混合情况,为提高 SNCR 的脱硝率提供参考。

目前,电站锅炉流动与传热的数值模拟已有较高的可靠性^[2-4]。关于烟气脱硝的优化研究方面,林静仁等^[5]利用非均匀喷氨优化首层催化剂入口截面浓度分布。吕洪坤等^[6]通过软件对 SNCR 反应的模拟进行反应机理分析。沈伯雄等^[7]、韩奎华等^[8]、李穹等^[9]研究了温度、氧气体积浓度、 NO_x 初始体积浓度、氮氨摩尔比等参数对氨水 SNCR 反应的影响。Qi 等^[10-11]分析了塔式炉中热力 NO_x 和燃料 NO_x 的生成机理,并提出了一种降低 NO_x 的方法。

上述文献的研究成果主要是在降 NO_x 的反应机理和各种影响因素方面。对于本文所关注的炉膛中气液两相流动特性以及气液两相流体混合情况,在笔者所能查阅的文献中,还未见公开的研究成果报道。此外,对这种炉膛内气液两相流动

中存在的非线性现象,也未见报道。王慧等^[12]、Yang 等^[13]、Shen 等^[14]、赵明等^[15]在对锅炉炉膛内流动与传热研究中,都发现了存在非线性现象。Shen 等^[16]亦发现在完全对称的几何结构中的流动和传热是非对称的,存在解的分岔等非线性现象。本文所抽象的二维模型也具有完全对称的结构,数值模拟结果证实,该模型同样存在非线性现象。

本文以燃烧器对冲布置的超超临界塔式锅炉炉膛内的流动换热为应用背景,抽象出了一个物理和几何结构完全对称的二维炉膛内气液对冲射流两相流动模型,并进行了数值求解。根据数值结果,进一步分析了气液两相流动特性和密度分布特性(代表气液混合情况)。本文的数值结果,还揭示了所研究问题中存在的非线性现象,在对称结构下获得了非对称解。

1 物理模型及数学模型

1.1 物理模型

研究模型如图 1 所示,模型的几何结构和物理条件关于竖直中心线左右对称。上部流动区域高 L_1 ;冷灰斗高 L_2 ;模型左右宽与冷灰斗上底宽相同,为 D_1 ;灰斗下底宽 D_2 ;气体喷嘴和液体喷嘴高度相同,均为 H 。模型采用的无量纲尺寸如下: $\frac{D_1}{H} = 20$; $\frac{D_2}{H} = 4$; $\frac{L_1}{H} = 70$; $\frac{L_2}{H} = 10$ 。在气体和液体喷口上方定义一个区域 Z,在实际工程背景中表示氨水与 NO_x 发生还原反应的最佳温度区域,在此区域布置喷口喷射氨水。流动模型以塔式炉炉膛内的流动与换热为背景。尽管炉膛有多层燃烧器,为简化问题又不失一般性,本文建立的模型仅考虑了一对燃烧器对冲布置和一对双速喷嘴对冲布置,模型没有折焰角,略去了尾部烟道以使整个炉膛关于竖直中线完全对称。气体喷嘴和液体喷嘴关于模型中心线对称布置,气体出口流速为 U_g ,液体出口流速为 U_l ,同一相流体左右喷嘴流速相同。

1.2 计算模型

采用 Fluent 软件进行数值模拟。多相流模型

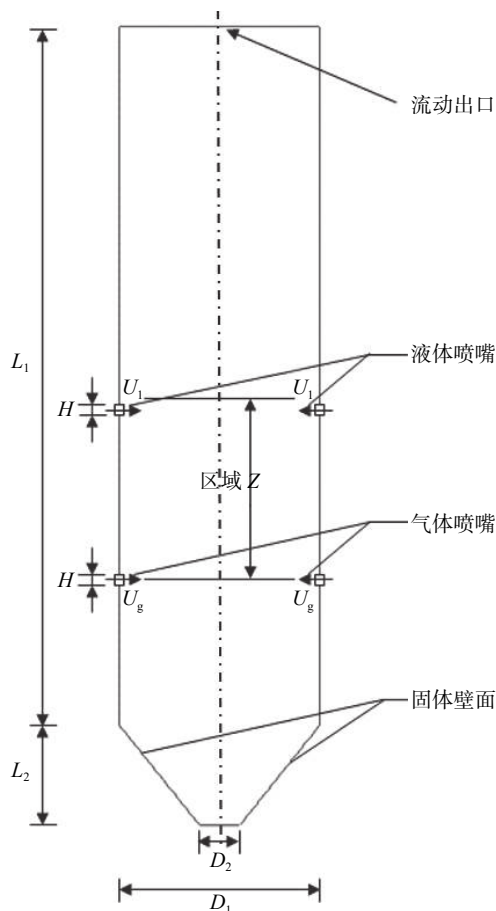


图1 流动模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flow model

采用VOF模型。在VOF模型中,跟踪相之间的界面是通过求解单相或多相的容积比率来完成的。对第 q 相,流动过程的数学模型可由以下时均形式的方程描述:

$$\frac{\partial(\rho_q \alpha_q)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_q \bar{u}_j \alpha_q)}{\partial x_j} = S_{\alpha_q} \quad (1)$$

式中: ρ_q 为微元体中第 q 相流体的密度; α_q 为微元体中第 q 相流体体积分数, $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$; $\bar{u}_j$ 为时均流速; S_{α_q} 为质量源项,微元体内无质量源时 $S_{\alpha_q} = 0$ 。

通过求解整个微元内单一的动量方程,得到的速度场由各相共享。动量方程如下:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,j} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) + S \quad (2)$$

式中: $\frac{\partial}{\partial t}$ 为非稳态相; $\bar{\phi}$ 为物理量的时间平均值; ϕ' 则为物理量的脉动值; $\bar{p}$ 为静压项; $\delta_{i,j}$ 为克罗内

克变量; $-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ 称为雷诺应力或湍流应力; S 为源项,可包含重力等体积力的影响。

动量方程取决于基于所有相的体积分数的密度 ρ 和动力粘度 μ ,两相流系统中单一微元中的密度为: $\rho = \alpha_i \rho_i + (1 - \alpha_i) \rho_j$ 。

采用SST $k-\omega$ 湍流模型时,由湍流脉动所形成的应力可表示如下:

$$-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = (\tau_{ij})_t = -p_t \delta_{i,j} + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \delta_{i,j} \text{div} \mathbf{V} \quad (3)$$

式中: p_t 是由脉动速度所造成的压力项,在二维流动模型中, $p_t = \frac{1}{3} \rho (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2) = \frac{2}{3} \rho k$, k 是单位质量流体湍流脉动动能, $k = \frac{1}{2} (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2)$; μ_t 为涡粘性系数, $\mu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}$, 其中, $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$, $\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y'}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right)$, 常数 $a_1 = \frac{5}{9}$, $\beta' = 0.09$; $\mathbf{V}$ 为速度矢量。

取液体出口速度 U_l 为参考量,雷诺数 $Re = \frac{U_l H}{\mu/\rho}$, μ 和 ρ 是基于所有相的体积分数的加权。

湍流模型采用SST $k-\omega$ 模型;压力与速度的耦合采用PISO算法;压力插值采用PRESTO!插值;出口边界条件采用压力出口。假设冷灰斗底面封闭,设为固体壁面。所有固体壁面采用无滑移假设,边界上无质量渗透。气体喷口和液体喷口均匀进风。

由于炉内模型气相流场的扰动,当液体射流的 Re 较小时,左右喷嘴喷出的液体射流不一定完全在区域Z内汇合。为研究液体射流能否穿过气体流场到达炉膛中心,本文定义了一个穿透力 P ,考察液体的穿透力。 P 为单侧液体射流沿模型宽度方向所能达到的最远位置 d_x 与模型一半宽度 $\frac{1}{2}L_1$ 的比值, $P = \frac{2d_x}{L_1}$, P 值越大表示液体穿透力越强。

当两股液体射流能在区域Z内汇合时,液体流速继续增大,此时考察两相流体在上部计算区域的混合均匀程度。

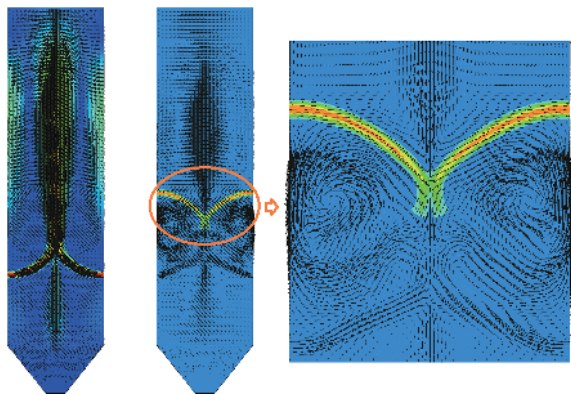
1.3 网格划分

计算模型采用ICEM软件进行网格划分,整个区域内都采用四边形网格。靠近喷口的区域速度梯度比较明显,因此对靠近速度进口处的网格进行加密。经过网格无关性验证,最终选定计算模型的网格数为14 591。

2 数值计算结果及分析

2.1 两相流速度场和密度场

图 2(a)和图 2(b)分别给出了单相气体流动速度场和两相流动速度场的数值模拟结果。气相射流出口 Re 为 1 812 749，液体射流出口 Re 为 664 010。



(a) 气体速度矢量图 (b) 速度矢量与密度等值线合成图

图 2 模型内的流场
Fig.2 Flow field in the model

初始时刻只打开气体喷嘴，由于冷灰斗为封闭的固体壁面，气流经过一段时间后从模型上方的出口流出。当时间步长 $\tau=25\text{ s}$ 时，气体在模型中建立了稳定的流场，图 2(a)中亮色部分表示气体流速较高区域。随后打开液体喷嘴，如图 2(b)所示，其中红色部分为液体的密度，蓝色部分为气体的密度，中间的过渡颜色表示按气液两相流体体积分数的加权平均得到的流体密度。图 2(b)中用密度的分布表示液体射流在模型中的位置。从图 2(b)可以看出，此 Re 下，液体射流穿过气体流场在模型中轴线附近汇合，由于液体射流的阻挡，空气射流在液体射流下部形成了回流区，这两个气体回流区关于模型中轴线对称分布。在以下对模型内两相流速度场和密度场在不同 Re 下的研究中，均采用先打开气体喷嘴，待模型中建立稳定的气体对冲流场后，再在模型中喷入液体的方法。

2.2 不同雷诺数下的液体穿透力

图 3 是喷嘴出口处不同 Re 下液体的速度与密度等值线合成图。

在图 3(a)中，由于液体射流动量较小，在刚打开液体喷嘴的一段时间内，液体离开喷嘴一小段距离便向下流动，液体射流与气体射流相互碰撞，在下方形成了一对关于模型中轴线对称分布的涡。图 3(b)中液体射流的 Re 比图 3(a)中的

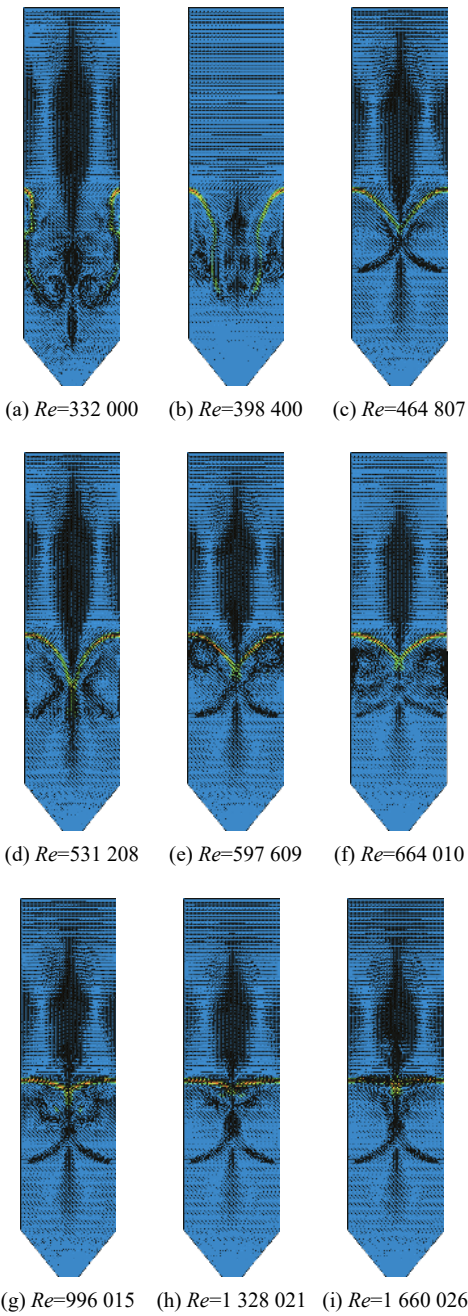


图 3 不同 Re 下的速度和密度分布图

Fig. 3 Velocity and density distribution at different Reynolds numbers

Re 大，但不足以穿透模型内的气体流场，到达模型中心。图 3(a)和图 3(b)中的液体穿透力 P 分别为 0.26 和 0.79。当 $Re=464\ 807$ 时，如图 3(c)所示，液体射流刚好在区域 Z 的中轴线附近汇合，其穿透力 $P=1$ 。

在图 3(d)中，液体射流 $Re=531\ 208$ ，此时液体射流动量较大，模型两侧对冲的液体已经可以在中轴线附近汇合，但此 Re 下液体交汇点位置较低，气体射流打在液体射流上发生偏斜。当液体

射流 $Re=597\ 609$ 时, 见图 3(e), 液体射流动量更大, 抵抗气流干扰的能力强, 同时由于较大的 Re , 液体交汇点位置相比前一个 Re 下有所上移。由于液体射流的抛物线形状, 气体射流在液体射流下方形成一对回流区。继续增大液体射流 Re , 如图 3(f) 所示, $Re=664\ 010$, 液体射流交汇点位置进一步上移, 同时由于液体射流的抛物线形状变得平直, 气体射流在液体射流下方形成的回流区变大。

继续增大 Re , 如图 3(g)~(i) 所示, 液体射流的汇合点依旧符合随着 Re 的增大, 汇合点逐渐上移的趋势, 但上移并不明显。同时由于液体射流从抛物线形状变成近乎平直的线形, 气体射流的回流区开始靠近, 见图 3(g), 最终在液体射流汇合点下方合为一体。

2.3 不同雷诺数下气体和液体的混合情况

当液体射流到达模型中心线附近汇合后, 继续计算, 得到液体射流在模型中流动的发展情况, 如图 4 所示。图中红色部分为液体密度, 蓝色部分为气体密度, 中间的过渡颜色表示按气液两相流体体积分数的加权平均得到的流体密度。

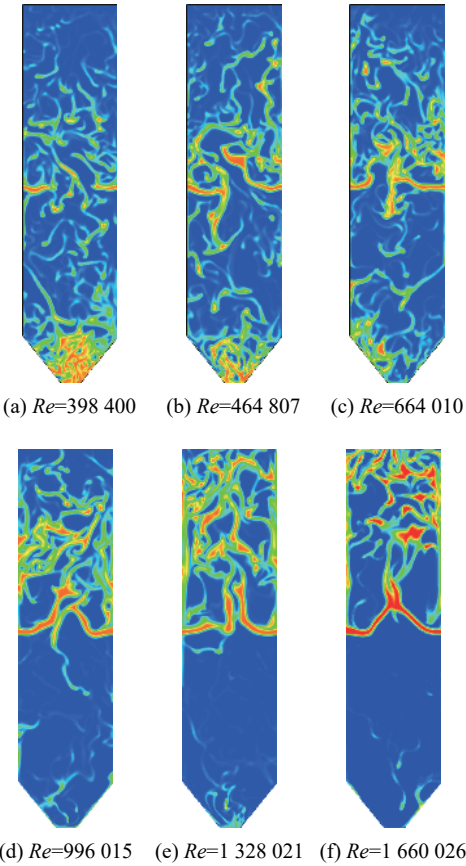


图 4 不同 Re 下的密度分布

Fig.4 Density distribution at different Reynolds numbers

$Re=398\ 400$ 时, 初始一段时间内, 液体射流并不能在中心线处汇合(见图 3(b)), 继续计算直至模型内气液两相流动充分发展, 如图 4(a) 所示。区域 Z 中液相流体较少, 冷灰斗区域积水情况严重。当 $Re=464\ 807$ 时, 如图 4(b) 所示, 虽然液体射流可以在中心线处汇合, 但区域 Z 中液相流体仍较少, 冷灰斗区域积水情况比较严重。继续增大 Re , 如图 4(c) 所示, 区域 Z 中的液体分布变多, 冷灰斗积水情况变少。同时对比图 4(d)~(f) 可以看出, 此雷诺数下区域 Z 中液相流体最多。

图 4(d)~(f) 是模型中液体 Re 继续增大时模型内的密度分布。相比图 4(a)~(c), 图 4(d)~(f) 中冷灰斗积水情况几乎不存在, 一方面是因为液体 Re 变大, 喷入模型中的液体变多; 另一方面更重要的因素是液体射流动量变大, 液体可以穿透气体射流在模型中发展, 不会直直地掉入冷灰斗中, 积水现象得到解决。但过大的 Re 会造成液相流体因动量过大而流出区域 Z, 这在实际的炉膛脱硝过程中, 体现为氨水流出适合与 NO_x 发生还原反应的温度窗, 导致 NO_x 脱除效果变差。同时过多氨水未发生反应便流出炉膛, 造成浪费。

2.4 流动中的非线性现象

在 $Re=996\ 015$ 下计算模型内的流动状态时发现, 最初在单相气体对冲建立气体流场时, 由于抽象出的二维炉膛物理和几何条件关于中心线完全对称, 给出的边界条件也关于中心线对称, 模拟得到了关于中心线对称的气体流场, 如图 2(a)。气体流场建立后向模型中喷入液体, 在初始一段时间内, 模型的气体流动和液体流动呈中心线对称。随着时间的推移, 气体流场和液体流场出现了非线性现象, 如图 5 所示。当 $\tau=12\ s$ 时, 气体

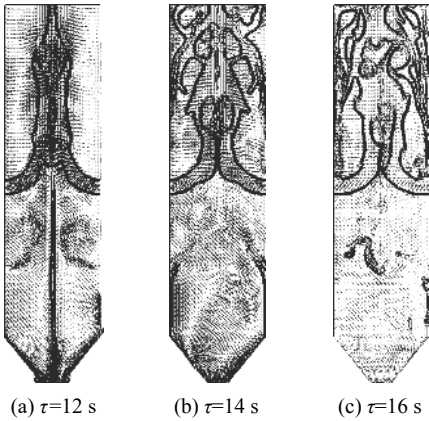


图 5 不同时刻速度和液体相分布

Fig.5 Velocity and liquid phase distribution at different times

流动开始出现略微的不对称现象,液体在模型中的流动关于中心线呈对称分布;当 $\tau=14$ s时,液体流场开始出现略微的不对称,气体流场出现明显的不对称,此时边界条件仍是对称给出的;当 $\tau=16$ s时,不对称现象下移,此时可明显地看出气体流场和液体流场关于中心线都呈不对称分布。参考文献[16],在几何和边界条件对称的系统中同时得到了对称解和不对称解,表明二维炉膛内的气液两相流动具有非线性的特性。

3 结 论

以锅炉炉膛 SNCR 脱硝为应用背景,抽象出具有对称结构的二维两相流动模型,进行了数值模拟,探讨具有对称结构的气液两相对冲射流的流动问题。模拟结果表明:

a. 由于炉内高速气流的扰动,液体射流并非在所有 Re 下都能穿透气体在模型中心线附近位置汇合;增大液体射流的雷诺数 Re ,液体穿透力增加,两侧对冲的液体射流逐渐可以在模型中汇合。当 $Re=464\ 807$ 时,液体射流出现汇合点;增大 Re ,汇合点位置上移; Re 过大,汇合点位置变化很小。

b. 气液两相流体在区域 Z 中的混合存在最佳的 Re 。当 $Re=664\ 010$ 时,气液两相流体在区域 Z 中的混合最为均匀; Re 过大时,两相流体混合程度反而会因液体射流动量过大而流出区域 Z ,导致气相和液相流体混合效果变差,而且过多的液相流体流出研究区域会造成资源浪费。

c. 在一定的参数范围内,在对称结构的模型中,所得到的数值解是非对称的。

参考文献:

- [1] 中国环境保护产业协会锅炉脱硫除尘委员会. 我国火电厂脱硫脱硝行业 2007 年发展综述 [J]. 中国环保产业, 2008(6): 18–21.
- [2] XU M H, YUAN J W, DING S F, et al. Simulation of the gas temperature deviation in large-scale tangential coal fired utility boilers[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 155(3/4): 369–380.
- [3] YIN C G, CAILLAT S, HARION J L, et al. Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from a 609 MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler[J].

Fuel, 2002, 81(8): 997–1006.

- [4] AL-ABBAS A H, NASER J, HUSSEIN E K. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions[J]. Fuel, 2013, 107: 688–698.
- [5] 林静仁, 刘国富, 沈德魁, 等. 基于 CFD 模拟方法的 SCR 系统喷氨优化研究 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 313–316.
- [6] 吕洪坤, 杨卫娟, 周俊虎, 等. 选择性非催化还原反应的实验研究与机理分析 [J]. 电站系统工程, 2011, 27(2): 4–7.
- [7] 沈伯雄, 刘亨, 韩永富. 选择性非催化还原脱除氮氧化物的影响因素分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 53–59.
- [8] 韩奎华, 路春美, 王永征, 等. 选择性非催化还原脱硝特性试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 80–85.
- [9] 李穹, 吴玉新, 杨海瑞, 等. SNCR 脱硝特性的模拟及优化 [J]. 化工学报, 2013, 64(5): 1789–1796.
- [10] QI X C, YANG M, ZHANG Y W. Numerical analysis of NO_x production under the air staged combustion[J]. Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2017, 8(3): 1–8.
- [11] QI X C, YANG M, ZHANG Y W. Numerical analysis of influence of SOFA on NO_x emissions for pulverized coal boiler [C]//Proceedings of 2016 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Phoenix, Arizona, USA: ASME, 2016.
- [12] 王慧, 杨莱, 王治云, 等. 对称结构锅炉炉膛内非对称流动机理分析 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 2162–2165.
- [13] YANG M, SHEN Y Y, XU H T, et al. Numerical investigation of the nonlinear flow characteristics in an ultra-supercritical utility boiler furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88: 237–247.
- [14] SHEN Y Y, YANG M, XU H T, et al. Investigation of the forming mechanism of flue gas side heat deviation and improvement measures in the boiler furnace with a symmetrical structure[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(10): 2178–2182.
- [15] 赵明, 黄凯, 杨莱. 超超临界锅炉燃烧模拟及减小热偏差方法 [J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(4): 324–332.
- [16] SHEN C Y, YANG M, ZHANG Y W, et al. Effects of slotted structures on the nonlinear characteristics of natural convection in a cylinder with an internal concentric slotted annulus[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2016, 70(5): 447–459.