文章编号:1006-3080(2006)04-0427-04

间歇排渣型气化系统的锁斗内部水循环流动

汪　洋，　于广锁，　代正华，　梁钦锋，　于遵宏
(华东理工大学洁净煤技术研究所，上海 200237)

摘要：在由间歇排渣型锁斗和洗涤冷却室组成的模拟系统中，应用 Realizable κ～ε 湍流模型进行了非稳态计算，得到的计算结果和实际情况比较吻合。考察了多个因素对锁斗内平均温度的影响，模拟结果表明：锁斗循环水进口数对流场及温度场的分布影响较小；锁斗循环水量的影响很显著，循环水量越大，锁斗内湍流程度越剧烈，锁斗内平均温度越高；锁斗间歇排渣周期越长，锁斗内的平均温度越高；整个循环体系的热损失每增加 0.5%，锁斗内的平均温度将下降 5 K 左右。

关键词：煤气化；锁斗；数值模拟；Fluent
中图分类号：TQ54　　**文献标识码**：A

Circulating Water Flow State in Batch Handling Lock Hopper

WANG Yang，　*YU Guang-suo*，　*DAI Zheng-hua*，　*LIANG Qin-feng*，　*YU Zun-hong*
(*Institute of Clean Coal Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai* 200237, *China*)

Abstract: The realizable κ～ε turbulent model was used to carry out the unsteady calculation about the simulation system which was composed by batch handling lock hopper and scrubbing cooling chamber. The result of numerical simulation agrees well with the operation value. The average temperature in the lock hopper was studied according to a lot of factors. The results show that: the number of the circulating water inlet has slight effect on the average temperature in the lock hopper, while the circulating water flow plays an important role. The more the circulating water flow is, the more intense the turbulence is, and the higher the average temperature in the lock hopper is. The average temperature in the lock hopper becomes higher along with the extension of the lock hopper batch time. When the heat lost of the whole simulation system increase by 0.5%, the average temperature would decrease about 5 K.

Key words: coal gasification; lock hopper; numeric simulation; Fluent

随着研究工作的不断深入，水煤浆气化技术快速发展，气化效率不断提高。利用计算机可以对复杂的水煤浆气化过程进行数值模拟，使得水煤浆气化炉开发以及改造过程得以大大简化，节省了大量的人力、物力及时间。气化系统中具有复杂化学反应的高温、高压反应器等操作单元或部件中的流场、温度场和浓度场等的数值模拟计算已经广泛地进行。在对水煤浆气化系统的数值计算模拟中[1~4]，气化炉以及洗涤塔等一些核心设备备受关注，但是有关间歇排渣型气化系统的锁斗等设备的研究报道甚少。锁斗排渣操作对于气化炉的正常运转至关重要，因此，研究锁斗内部水循环流动特性可以指导工厂间歇排渣的实际操作，也能为连续排渣型气化炉锁斗的设计提供参考。本文用 Fluent 软件模拟计算了洗涤冷却室下部和锁斗构成的水循环体系的流场和温

收稿日期：2005-04-28
基金项目：上海启明星计划(03QF14013)；国家高技术研究发展计划(2003AA521020)；国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2004CB217700)
作者简介：汪　洋(1980-)，男，江西上饶人，硕士研究生，研究方向：过程系统工程。E-mail:czoton@sina.com
通讯联系人：于广锁，gsyu@ecust.edu.cn

度分布情况。

1 数学模型及求解

CFD技术在20世纪60年代伴随计算机技术迅速崛起,至今已相当成熟[5]。Fluent软件的核心部分是Navier-Stokes方程组的求解模块。用压力校正法作为低速不可压流动的计算方法,包括SIMPLE、SIMPLER、SIMPLEC、PISO等。采用有限体积法离散方程,其计算精度和稳定性都优于传统编程中使用的有限差分法。

1.1 控制方程

连续性方程:

$$\partial(v_i)_{av}/\partial x_j = 0 \tag{1}$$

雷诺平均N-S方程:

$$(v_j)_{av}\frac{\partial(v_i)_{av}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p_{av}}{\partial x_j} + (\nu + \nu_T)\frac{\partial^2(v_i)_{av}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial(u_i u_j)_{av}}{\partial x_j} \tag{2}$$

其中:v_i为i点速度;u_i为脉动速度;下角标av表示平均值;$\nu=\mu/\rho$,为分子粘度,μ为粘性系数,ρ为密度;ν_T为湍流涡粘度,x_j为坐标方向。

Realizable $\kappa\sim\varepsilon$湍流模型的传输方程[6~7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa\mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}\right)\frac{\partial\kappa}{\partial x_j}\right] + G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_\kappa \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon\mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\kappa}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2\frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{\kappa}C_{3\varepsilon}G_b + S_\varepsilon \tag{4}$$

其中:κ为湍动能,ε为湍流动能耗散率,μ_t为湍粘性系数,ρ为密度,G_b、G_κ分别是由于速度梯度和浮力引起的湍动能产生项,S_κ、S_ε为自定义的湍动能和湍动能耗散率源项,C_1、$C_{3\varepsilon}$为模型系数,$C_{1\varepsilon}$、C_2、σ_κ、σ_ε为常数,t为时间,ν为运动粘度。

模型中常数值如下:

$C_{1\varepsilon}=1.44$,$C_2=1.9$,$\sigma_\kappa=1.0$,$\sigma_\varepsilon=1.0$

1.2 工业背景

间歇排渣型水煤浆气化工业装置,利用间歇操作的锁斗排出气化生产的渣,以实现气化反应的连续运行。我国引进的水煤浆气化技术均采用锁斗来实现排渣。锁斗在排渣循环过程中,经历压力和温度的循环变化,设备性能受到很大影响,因此研究锁斗内介质的温度变化对工程应用很有指导意义。

间歇排渣型锁斗的工作流程如图1所示。洗涤冷却室底部含渣水中含固量(质量百分数)小于1%,通过液位调节连续排出洗涤冷却室,送入含渣水处理工序。沉积在气化炉洗涤冷却室底部的粗渣及其他固体颗粒,通过循环水流的循环作用,经过锁斗安全阀、进口阀进入锁斗。锁斗安全阀处于常开状态,仅当洗涤冷却室液位低到引起气化炉停车,安全阀才关闭。锁斗循环泵从锁斗顶部抽取相对洁净的水送回洗涤冷却室底部水浴,帮助排渣。锁斗循环分为收渣、减压、清洗、排渣和充压5个阶段,循环时间一般为30 min左右。锁斗程序启动后,当排渣时间到时,锁斗进口阀关闭,循环泵入口阀关闭,循环阀打开。减压阀打开,渣池溢流阀关闭,锁斗开始减压,锁斗内压力泄至渣池。减压至常压后,清洗阀打开,清洗泄压管线,设定时间到后关闭减压阀,打开自冲洗水罐至锁斗的冲洗阀及自锁斗至渣池的出口阀,开始排渣,排渣计时器开始计时。经过一段预定时间后,锁斗出口阀、清洗阀、冲洗阀关闭,充压阀打开,用来自后续工段的高压灰水对锁斗进行充压。当锁斗与气化炉之间的压差小于设定值时,充压阀关闭,锁斗进口阀重新打开。与此同时,锁斗循环泵入口阀打开,循环阀关闭,锁斗开始收渣。全部排渣循环(减压、清洗、排渣、充压)时间大约3 min。锁斗循环重新开始。

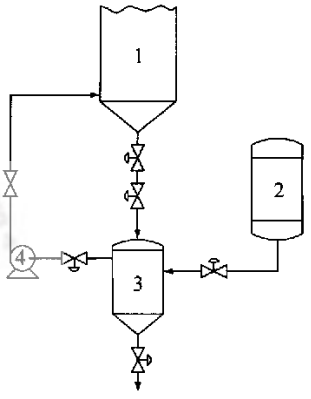


图1 流程示意图

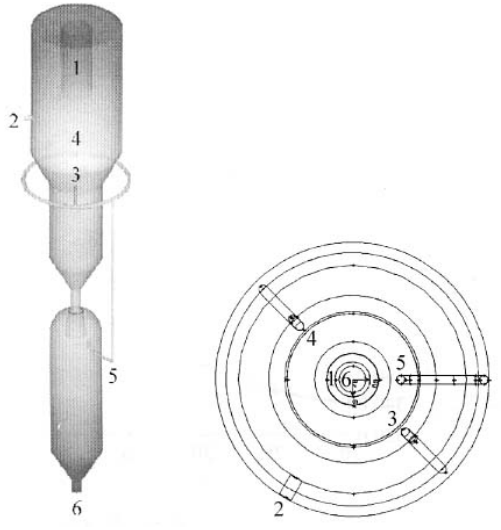
Fig. 1 Sketch of flowsheet

1—Scrubbing-cooling chamber; 2—Water container; 3—Lock hopper; 4—Pump

1.3 模型简化及边界条件

由于洗涤冷却室的上部是气液接触很剧烈的区域,下部基本上都是液态水,而锁斗循环水只是和洗涤冷却室的下部进行热质传递,所以取洗涤冷却室下部和锁斗构成的循环体系进行模拟。洗涤冷却室底部含渣水中含固量小于1%,通过二维模拟可以发现,渣对于洗涤冷却室下部和锁斗构成的水循环

体系的流场和温度分布情况影响较小，所以，在考虑计算机处理能力的前提下，三维模型中暂忽略渣的影响。模拟设备的尺寸采用工业装置实际值，设备示意图如图 2 所示。如图 2(a)所示，上半部分为洗涤冷却室，下部分为锁斗，取两者相接处为坐标原点。管口方位图如图 2(b)所示。



(a) Structure of simulation system　　(b) Sketch of pipe distribution

图 2　设备结构示意图

Fig. 2　Schematic view of apparatus

1—Downcomer of scrubbing-cooling chamber; 2—Water outlet of scrubbing-cooling chamber; 3,4—Circulating water inlet 1 to scrubbing-cooling chamber; 5—Circulating water outlet of lock hopper; 6—Slag water outlet of lock hopper

文中采用水为模拟工质，洗涤冷却室下降管的进口速度 0.06 m/s，锁斗循环水流速为 1.397 m/s。由于没有进口的湍流动能 κ 和湍流动能耗散率 ε 的实测值，根据文献的推荐，可采用近似计算公式[8~9]。近壁区模拟采用壁面函数法。

$$\kappa = \lambda u_v^2 \tag{5}$$

$$\varepsilon = C_d \kappa^{1.5} / \alpha D \tag{6}$$

其中：u_v 是进口流速(m/s)，湍流强度影响因子 λ=0.005，拽力系数 C_d=0.09，α=0.005，D 为进口直径(m)。

2　设备模拟及结果分析

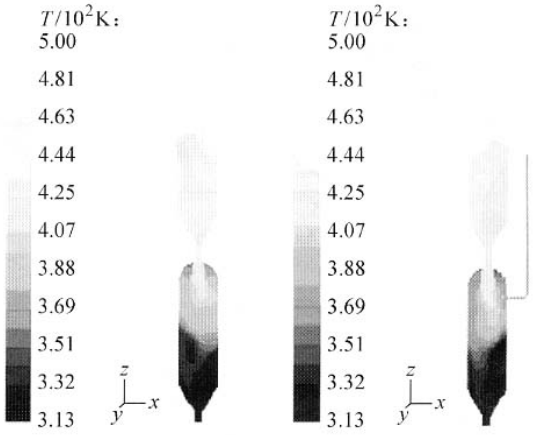
2.1　网格划分及数值计算方法

网格划分采用六面体结构。应用 Realizable κ～ε 湍流模型进行非稳态计算，对流项采用二阶迎风插值格式——QUICK 格式(Quadratic Upwind Interpolation for Convection Kinetics Scheme)，压力-速度耦合基于协调一致的求解压力耦合方程的半隐方法(SIMPLE)。

参考工业上的数据，采用用户自定义函数来定义初始温度分布，洗涤冷却室上半部分黑水的温度为 500.0 K，下部约为 410.0 K，锁斗初始状态盛满 313.2 K(即 40 ℃)的水。循环开始时，黑水从洗涤冷却室的下降管进入系统，出口为管口 2，同时，锁斗循环水通过循环水进口进入到洗涤冷却室底部，协助排渣。模拟时采用的黑水进出流量和锁斗循环水流量全部来自于实际操作值，参考实际情况，取 30 min 为一个循环周期。

2.2　模型检验

经过一个循环周期的模拟计算，得到了图 3 所示的温度分布结果。



(a) Contours of z-x plain　　(b) Contours of z-y plain

图 3　一个循环周期结束时的温度分布

Fig. 3　Contours of temperature at t　1 800 s

在实际操作状态下，即下降管进口流速为 0.06 m/s、锁斗循环水量为 35 500 kg/h 时，经过一个排渣周期，工厂实测的锁斗内平均温度为 358.5 K。通过计算得到循环结束时锁斗内平均温度为 354.4 K，和实际情况比较相符。

从图 4 可以看到，在轴向位置为 4 m 处左右，湍流强度最大，而此处正是锁斗循环水进口处，湍流强度大和此处流动特性吻合。

2.3　锁斗循环水进口数的影响

从图 2(a)可以看出有两个锁斗循环水进口，循环水进口数不同，模拟系统内的流场和温度分布情况必然不同，图 5 考察了一个循环水进口和两个循环水进口的情况。

从计算结果可以看出，锁斗循环水进口数对流场及温度场的分布影响不是很大，一个循环口进水时锁斗内的平均温度为 353.9 K，两个进口时为

354.4 K。从图上可以看出,一个循环水进口时的湍流强度比两个进口时要小,系统要稳定一些。湍流强度大,则锁斗和激冷室的换热越多,锁斗内的平均温度会升高,这对锁斗排渣是不利的。

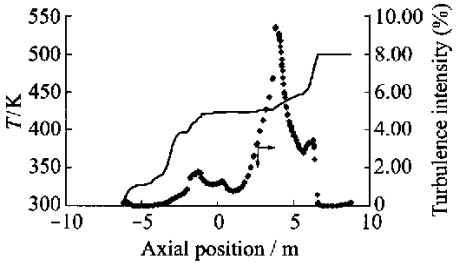


图4 一个循环周期结束时的轴向温度和湍流强度分布

Fig. 4 Axial temperature and turbulence intensity distribution at $t=1\ 800$ s

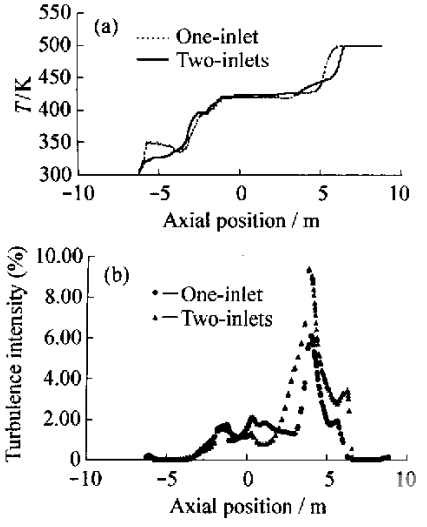


图5 循环水进口数目不同时的轴向温度(a)和湍流强度(b)分布

Fig. 5 Axial temperature (a) and turbulence intensity distribution (b) of different inlet numbers

2.4 锁斗循环水量的影响

图6给出了锁斗循环量系统的流场和温度场的关系。曲线表明,循环量越大,系统内的湍流程度越明显,锁斗内的平均温度越高(分别为348.5、354.4和360.3 K)。因此,实际操作中可以考虑在不影响冲渣的情况下,适当减小锁斗循环量,这样,可以减小系统内的湍流程度,降低锁斗内的平均温度,还可以降低锁斗循环泵的负荷。

2.5 锁斗间歇排渣周期的影响

图7考察了不同的间歇排渣周期对锁斗内平均温度的影响。由于锁斗内的温度比激冷室内的温度要低,所以循环周期越长,则锁斗和激冷室内的热交换越多,锁斗内的平均温度也越高。从图7看出,30 min时锁斗内的平均温度变化最显著。因此,可以调整锁斗间歇排渣周期来控制锁斗内的平均温度。

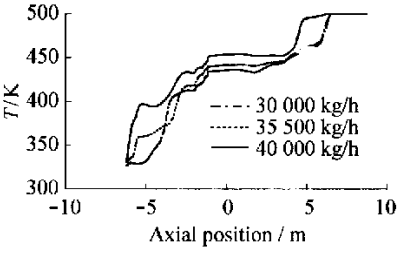


图6 不同循环水量的轴向温度分布

Fig. 6 Axial temperature distribution of different circulating water flow

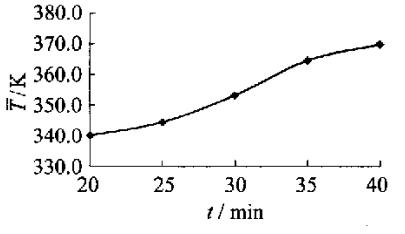


图7 不同间歇排渣周期的锁斗内平均温度

Fig. 7 Average temperature in the lock hopper of different batch time

2.6 整个循环体系热损失的影响

由于实际工况下的热损失是不可避免的,且大部分的热损失集中在洗涤冷却室的下部(洗涤冷却室下部的温度相对较高,大约490 K左右),锁斗与外界存在一定的温差,故锁斗存在一定的热损失,应考察整个循环体系热损失大小对锁斗内平均温度的影响。图8分析了热损失分别为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%和3.0%的情况。从图8可以看出,热损失增大,体系温度降低,热损失的影响比较显著,热损失每增加0.5%,锁斗内的平均温度就下降5 K左右。

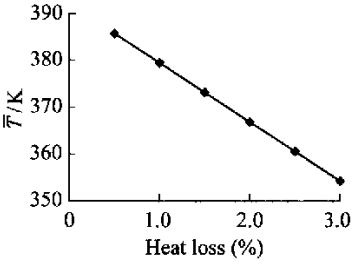


图8 不同热损失的锁斗内平均温度

Fig. 8 Average temperature in the locker of different heat loss

(下转第439页)

adsorption at interfaces using the pivot algorithm[J]. Macromolecules, 1993, **26**: 628-636.

[13] Clancy T C, Webber S E. Pivot algorithm computer simulation of the effect of grafted polymers on the adsorption of polymers by a surface[J]. Macromolecules, 1995, **28**: 2561-2569.

[14] Clancy T C, Webber S E. Controlling adsorption of polymers at polymer-modified surfaces [J]. Macromolecules, 1997, **30**: 1340-1346.

[15] Chen T, Liu H L, Hu Y. Monte Carlo simulation for the adsorption of diblock copolymers: 1. In nonselective solvent [J]. J Chem Phys, 2001, **114**(13): 5937-5948.

[16] Jiang J W, Liu H L, Hu Y. Lattice Monte Carlo simulation of polymer adsorption at an interface: 1. Monodisperse polymer[J]. Macrom Theory Simul, 1998, **7**: 105-111.

[17] Scheutjens J M H M, Fleer G J. Statistical theory of the adsorption of interacting chain molecules: 1. Partition function, segment density distribution and adsorption isotherms [J]. J Phys Chem, 1979, **83**(12): 1619-1635.

[18] Scheutjens J M H M, Fleer G J. Statistical theory of the adsorption of interacting chain molecules: 2. Train, loop and tail size distribution[J]. J Phys Chem, 1980, **84**: 178-190.

[19] Jiang J W, Liu H L, Hu Y. Lattice Monte Carlo simulation of polymer adsorption at an interface: 2. Polydisperse polymer [J]. Macrom Theory Simul, 1998, **7**: 113-117.

[20] 姜建文，刘洪来，胡　英. 二元链状分子吸附的 Monte Carlo 模拟[J]. 华东理工大学学报，1997，**23**(8)：457-461.

[21] 刘梅堂，牟伯中，刘洪来，等. 多分散高分子在固液界面吸附层厚度的 Monte Carlo 模拟[J]. 高校化学工程学报，2004，**18**(3)：275-280.

[22] Liu M T, Mu B Z, Liu H L, *et al*. Adsorption behavior of polydisperse polymeric systems in slits [J]. J Mol Simul, 2004, **30**(5): 313-321.

（上接第 430 页）

3　结　论

模拟结果和实际情况比较吻合，说明 Realizable $\kappa\sim\varepsilon$ 湍流模型能用于温度场模拟，Fluent 软件用于模拟洗涤冷却室下部和锁斗的水循环情况效果良好。模拟结果表明：锁斗循环水进口数对流场及温度场的分布影响较小；锁斗循环水量的影响很显著，循环水量越大，锁斗内湍流程度越剧烈，锁斗内平均温度越高；锁斗间歇排渣周期越长，锁斗内的平均温度越高；整个循环体系的热损失每增加0.5%，锁斗内的平均温度将下降 5 K 左右。通过模拟计算还可以得到锁斗集渣整个过程温度变化的动画，结果再现了装置内的温度分布变化情况，得到了实际装置无法得到的直观的、详细的信息。

参考文献：

[1] 王辅臣，刘海峰，龚　欣，等. 水煤浆气化系统数学模拟[J]. 燃料化学学报，2001，**29**(1)：33-38.

[2] Vicente William, Ochoa Salvador, Aguillón Javier, *et al*. An Eulerian model for the simulation of an entrained flow coal gasifier[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, **23**(15): 1993-2008.

[3] 代正华，刘海峰，于广锁，等. 四喷嘴对置式撞击流的数值模拟[J]. 华东理工大学学报(自然科学版)，2004，**30**(1)：65-68.

[4] 汪　洋，代正华，于广锁，等. 运用 Gibbs 自由能最小化方法模拟气流床煤气化炉[J]. 煤炭转化，2004，**27**(4)：27-33.

[5] Fluent Inc. Fluent 6.1 User's Guide[M]. USA: Fluent Inc, 2003.

[6] Shih T H, Liou William W, Shabbir A, *et al*. A new $\kappa\sim\varepsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, **24**(3): 227-238.

[7] Siegel R, Howell J R. Thermal Radiation Heat Transfer[M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.

[8] 郭鸿志，张欣欣，刘向军. 传输过程数值模拟[M]. 北京：冶金工业出版社，1998.

[9] 岑可法，樊建人. 燃烧流体力学[M]. 北京：水利电力出版社，1991.