

气化炉激冷室下降管内气液两相热质同时传递过程数值研究

李铁, 吴暄, 袁竹林

(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

Numerical Investigation of Gas-liquid Heat and Mass Concurrent Transfer Process in Vertical Pipe in Gasifier Quenching Chamber

LI Tie, WU Xuan, YUAN Zhu-lin

(College of Energy & Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A numerical simulation was conducted to investigate the gas-liquid heat and mass concurrent transfer in the vertical pipe of Texaco type coal-water slurry gasifier, using volume of fluid (VOF) multiphase flow model and the species transport model of the gas phase. The numerical prediction of the temperature distribution along the vertical pipe was in a good agreement with experiment. Based on this, both the influence of the phase transition on liquid-film flow pattern and the influence of the flow on the water vapor distribution are investigated. It is found that the liquid-film flow pattern is significantly affected by the phase transition. The liquid vapor distributes with great gradient along the vertical pipe and the liquid vapor concentration of the outlet is highest, as a result of vapor carrying effect. The liquid entrainment of the gas in the vertical pipe is also discovered.

KEY WORDS: gasifier; quenching chamber; vertical pipe; heat and mass concurrent transfer; volume of fluid model; numerical simulation

摘要: 采用流体体积双流体模型对德士古水煤浆气化炉激冷室下降管内气液两相热质同时传递过程进行数值研究, 并建立了水蒸气在气相主体中的组分传输模型。数值预测的下降管内温度分布规律与实验结果吻合较好。据此探讨了相变对下降管内液膜流动形态的影响以及流动对水蒸气分布的影响, 研究结果表明, 相变对液膜形态有显著影响; 气体对水蒸气的携带作用使得下降管内水蒸气沿高度方向上呈大梯度分布, 出口处水蒸气浓度最高, 下降管内存在气体带液的现象。

关键词: 气化炉; 激冷室; 下降管; 热质同时传递; 流体体积模型; 数值模拟

0 引言

下降管是德士古水煤浆气化炉激冷室的重要组成部分, 是气液并流通道的主体。目前国内已运行的4套气化炉装置中, 激冷室下降管内都存在不同程度的换热隐患, 即液膜断裂导致下降管壁烧损、变形, 使气化炉无法运行而被迫停车检修, 给工厂带来较大的经济损失^[1-2]。经分析, 上述问题主要由激冷室结构设计不合理造成, 但国内已有的改进设计缺乏可靠的理论依据, 因此迫切需要对激冷室下降管内传热传质的机理进行深入的理论分析, 从而为工程设计提供理论指导。

由气化炉出来的高温气体进入下降管后, 与低温激冷水膜直接接触发生大温差的热质同时传递过程。如图1所示, 激冷水膜与高温气体发生对流和辐射换热, 部分激冷水剧烈的沸腾或蒸发, 产生的水蒸气在高温气体中扩散, 使气体急剧增湿。剧烈的热质交换过程给实验参数的测取和过程规律的探讨增加了难度。目前, 华东理工大学已经建立了Texaco水煤浆气化炉激冷室的热态实验装置, 并取得了显著成果, 但始终困扰于提高实验温度和压力的问题。随着数值模拟技术的成熟, 下降管内传热、传质特性的数值研究方法受到重视, 但是可查阅的文献并不多, 数学模型需要进一步完善^[3-6]。

本文应用FLUENT软件对下降管内气、液两相系统的热质同时传递过程进行模拟。采用流体体积 (volume of fluid, VOF) 模型^[7-8]对管内气液两相系统

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金项目(2004CB217707)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China(2004CB217707).

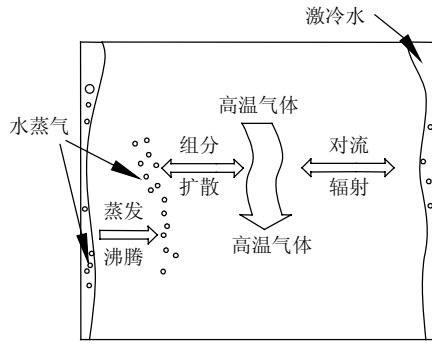


图1 下管内热质传递过程

Fig. 1 Heat and mass transfer process in vertical pipe

建立控制微分方程,利用用户自定义函数将组分传递方程用于VOF模型中,计算水蒸气组分在气相主体中的扩散。计算结果与实验及前人模拟计算获得的温度曲线规律符合较好,初步验证了模型预测结果的可信性。本文还分析了相变对下降管内液膜分布的影响、流动对水蒸气分布的影响,并发现下降管内存在气体带液的现象。

1 数值计算原理、方法及算例介绍

本文基于前文^[9]已建立的相变和辐射数学模型,进一步考虑了水蒸气在气相主体中的扩散,将组分扩散方程应用于界面追踪模型中。在气液流动与换热过程中伴随有质量交换,水蒸气扩散到气相主体,引起气相主体的质量、动量、能量的变化。工业实践表明,高温气体经下降管后显著增湿,由此可知水蒸气扩散也将是导致下降管内气体比热、发射率等属性变化的重要原因之一,因此在下降管多相流动与换热的计算中考虑组分扩散的影响是十分必要的^[10-16]。本文基于界面追踪方法,将气液界面上产生的水蒸气作为组分控制方程的源项。在模型中,气相作为第1相,即主相;液态水作为第2相,组分方程的控制范围始终为主相所在区域。

在笛卡儿坐标系下,根据质量、动量、能量、组分守恒原理建立控制方程,在连续性方程(1)中: α_q 为第 q 相体积分数,两相体积比之和为1; U_q 为混合相的速度; ρ_q 为第 q 相的密度; S_{α_q} 为质量源项,根据文献[9]已建立的相变模型计算得到。

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q U_q) = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q}, \quad q=1,2 \quad (1)$$

组分守恒方程(2)中:下标1表示水蒸气在气相中的扩散; Y_{1,H_2O} 为水蒸气的质量分数; v 为气相主体的速度矢量; ρ_{H_2O} 为水蒸气密度; S_{1,H_2O} 为蒸发产生的水蒸气源项,数值上等于 S_{α_q} ($q=2$); J_{1,H_2O} 为

水蒸气的扩散通量,如式(3)所示; D_{1,H_2O} 为水蒸气扩散系数; Sc_t 为湍流施密特数; μ_t 为湍流黏度。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{H_2O} Y_{1,H_2O}) + \nabla \cdot (\rho_{H_2O} v Y_{1,H_2O}) = -\nabla J_{1,H_2O} + S_{1,H_2O} \quad (2)$$

$$J_{1,H_2O} = -(\rho_{H_2O} D_{1,H_2O} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \nabla Y_{1,H_2O} \quad (3)$$

动量方程(4)中: ρ 为密度; U 为混合相的速度矢量; p 为压力; g 为重力加速度; Γ 为广义扩散系数; F_s 为表面张力。出现在方程中的密度、粘度等属性由存在于每一控制容积中的分相份额决定的,采用不可压湍流标准 $k-\varepsilon$ 模型。

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot \Gamma [\nabla (U + U^T)] + F_s \quad (4)$$

能量方程(5)中: S_h 为辐射能量源项,根据文献[9]的结论,采用Rossland模型计算辐射换热量;按照各相共享处理密度 ρ 和有效导热系数 k_{eff} ,如式(6)所示, ρ_q 为第 q 相的密度, k_q 为第 q 相的导热系数。采用式(7)中质量平均法处理能量 E , E_q 为第 q 相的能量。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [U (\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \sum_{q=1}^2 \alpha_q \rho_q \\ k_{eff} = \sum_{q=1}^2 \alpha_q k_q \end{array} \right. \quad (6)$$

$$E = \frac{\sum \alpha_q \rho_q E_q}{\sum \alpha_q \rho_q} \quad (7)$$

本文采用与求解区域相适应的二维结构化网格,并且对降膜区域的网格进行局部加密。采用具有二阶精度的迎风方式对连续性方程、动量方程、能量方程进行离散求解,组分控制方程采用一阶精度的迎风离散方式。对压力项离散应用体积力方法,压力速度耦合采用压力的隐式算子分割(pressure implicit with splitting of operators, PISO)算法。出于计算量的考虑,本文的算例是按照下降管实际尺寸的四分之一所建立的模型,表1给出了的数值计算条件。

表1 下降管几何尺寸及入口条件
Tab. 1 Geometry parameters and inlet conditions of vertical pipe

直径/m	高度/m	膜厚/m	气速/(m/s)
0.24	1	0.01	3
压力/MPa	气温/K	水温/K	水速/(m/s)
3	1700	460	1

2 模拟结果与分析

图 2 给出了下降管内温度分布色图，图 3 为下降管中心温度分布曲线，下降管入口作为高度坐标原点，出口高度坐标值为 1 m。由图 2 可见，在下降管上半部主体颜色递变幅度较大，说明此段温度变化很大，而下半部主体颜色变化不显著，温度变化不大。图 3 的中心温度曲线也证明，在下降管入口处，由于温差显著，气液两相发生了激烈热质传递，气体温度急剧下降。在距离下降管入口高度近 1/2 处，下降管内温度降至最低，而在下降管下半部，气相主体的温度基本不变。图 4 给出了文献[17]中实验及本文模拟结果曲线，本文所模拟的下降管中心温度分布规律与其实验和模拟曲线所示规律一致，同时与图 5 给出的文献[18]中下降管中心温度分布的模拟曲线进行对比，也吻合较好。由以上对比可知，本文模拟的下降管内温度分布曲线与实验规律吻合较好，能够正确模拟管内气液两相的温度分布，并可以尝试用该数学模型预测下降管运行过程中液膜沿壁面的流动、相变与断裂特性以及管内水膜的蒸发特性。

图 6 给出了冷态无相变和热态有相变条件下，管内液膜沿壁面的浓度分布色图。由图可见，当冷

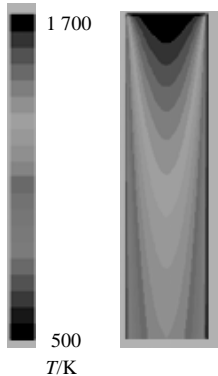


图 2 下降管温度分布

Fig. 2 Vertical pipe temperature

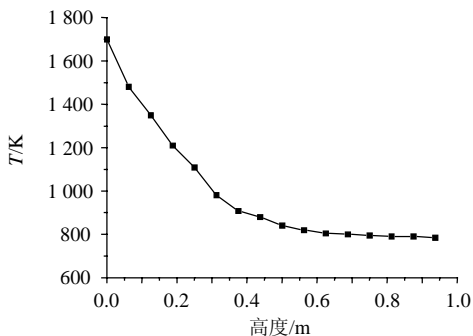


图 3 下降管中心温度

Fig. 3 Temperature of the vertical pipe center

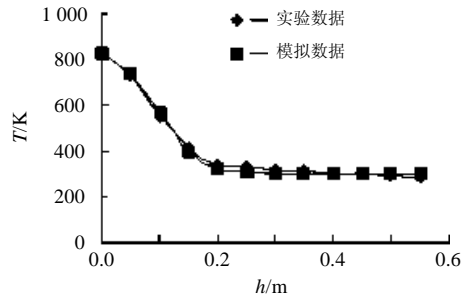


图 4 文献[17]的实验及模拟结果

Fig. 4 Experimental and simulated result in reference [17]

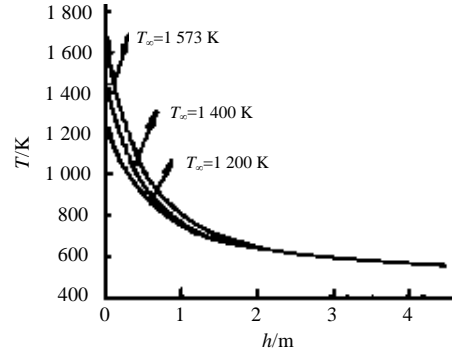


图 5 文献[18]的模拟结果

Fig. 5 Simulated result in reference [18]

态无相变过程中，气液界面平滑，并且液膜流型连续无断裂，在激冷水流量不变的条件下，距离管口越远液膜速度将越大，所以沿流动方向的液膜厚度逐渐变薄；当气液界面发生质量交换时，水蒸气迁移引起界面流动的剧烈扰动，使液膜表面不再平滑，甚至有液体被携带出液膜主体区域。可见，气液两相间的热质交换过程对液膜沿管壁流动形态有重要影响，在有相变发生时，界面的扰动使气体更易带液，作者认为这将是工业运行中经常出现液膜断裂现象的重要原因之一。

图 7 给出了不同时刻下降管液膜沿壁面流动的分布色图。由图可见，随时间步进，液膜不断蒸发，液膜开始变薄的位置越来越靠近管口。管壁局部出现干涸现象，暴露在高温气体中的管壁很可能被烧损，这是工业运行中影响下降管正常运行的重要问题。

另外，从 $t=0.8$ s 时刻开始，管壁液膜显著变薄，液膜厚度沿管壁分布的不连续性使液膜流动更易受到气相主体的扰动，造成大量液滴向气相主体飞溅，产生下降管内的带液现象。可以预测，如果气相扰动足够大，不但会产生带液，而且还会出现液膜断裂。理论上，这种现象将有利于下降管内气液两相进行充分的热质交换，但是当带液量过大，大量液滴将被夹带出下降管，进入后续的冷却、分离

工序,势必会影响后续冷却和分离的效率。因此应合理调整下降管内激冷水流量以维持一定液膜厚度和两相的速度差以抑制带液现象并保持液膜不断裂。

图8给出了 $t=1.3$ s时下降管内水蒸气组分沿高度方向上不同截面的质量流率变化曲线。理论上,由于下降管入口气体温度高,气液温差最大,蒸发量也最大,在不考虑流动对水蒸气携带作用的条件

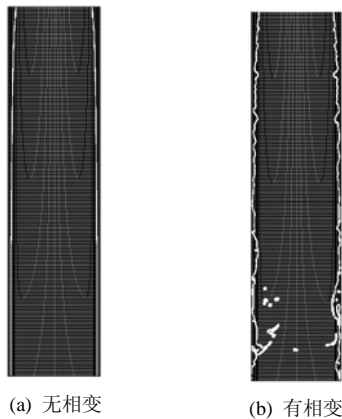


图6 下管内液膜分布图

Fig. 6 Liquid film distribution along vertical pipe

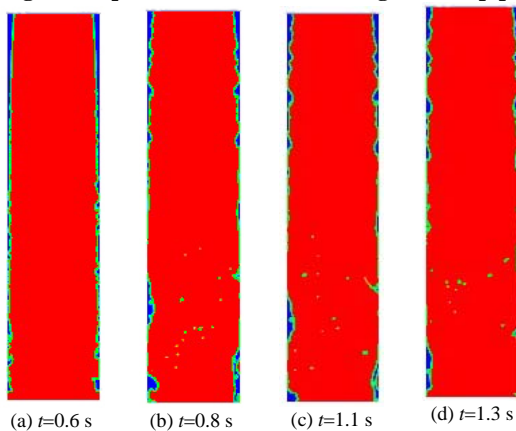


图7 不同时刻下降管内液膜分布图

Fig. 7 Liquid film distribution along vertical pipe when different time

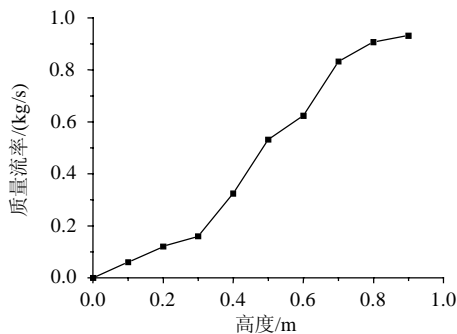


图8 水蒸气质量流率沿下降管高度变化

Fig. 8 Mass flow rate trend of the liquid vapor along vertical pipe altitude

下,入口附近的水蒸气质量流率应与其蒸发量一致,即质量流率最高。但是,由图可见,水蒸气质量流率随下降管高度的增加而增大,在接近出口位置处达到最大,下降管内水蒸气浓度沿高度方向上呈大梯度分布。可见,下降管内水蒸气分布受气相主体流动的显著影响。气相主体对水蒸气的携带作用使下降管入口处气液两相间始终存在一定的水蒸气浓度梯度,是相间传质的重要动力之一。

3 结论

1)利用 FLUENT 软件,基于 VOF 双流体模型,考虑气相主体中水蒸气的扩散,引入气相组分方程,以及气相主体内部的动量和能量交换方程,建立下降管内气液热质同时传递过程的数学模型。模拟了管内温度分布,并与实验结果及其他作者的模拟结果进行对比。结果表明,在本文所建立的气液两相直接接触热质同时传递的数学平台上,基本可以获得可信的管内温度分布曲线。

2)对于目前难以通过实验观测的现象和参数,如管内液膜分布、下降管内水蒸气含量等,本文采用的数值模拟手段给出定性及定量的分析,为下降管内热质交换深层次的研究创造条件。

3)通过数值模拟,发现了下降管内气体的带液现象,并分析该现象存在对下降管及整个冷却分离系统的影响。

参考文献

- [1] 赵永. 水煤浆加压气化炉带水的原因分析及预防措施[J]. 煤化工, 2000, 11(4): 44-46.
- [2] 谢海燕, 袁竹林. 激冷室内合成气穿越液池过程流动特性与带水问题[J]. 中国电机工程学报, 2006, 27(8): 37-41.
Xie Haiyan, Yuan Zhulin. Flowing characteristics and problem of entraining water about mixed gas crossing the cistern in quench chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 27(8): 37-41(in Chinese).
- [3] 谷芳, 刘春江, 余黎明, 等. 气-液两相降膜流动及传质过程的 CFD 研究[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(4): 438-444.
Gu Fang, Liu Chunjiang, Yu Liming et al. The CFD simulation of mass transfer process in falling film with countercurrent two-phase flow[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2005, 19(4): 438-444(in Chinese).
- [4] Tryggvason G, Esmaceli A, Al-Rawahi N. Direct numerical simulations of flows with phase change[J]. Comput. Struct., 2005, 83: 445-453.
- [5] Hughes D T, Bott T R. Minimum thickness of a liquid film flowing down a vertical tube[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41(2): 253-260.
- [6] Bankoff S G. Significant questions in thin liquid film heat transfer [J]. Transactions of the ASME. J. Heat Transfer, 1994, 116(1):

- 10-16.
- [7] 刘儒勋, 王志峰. 数值模拟方法和运动界面追踪[M]. 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [8] Welch S W J, Wilson J. A volume of fluid based method for fluid flows with phase change[J]. *J. Comput. Phys.*, 2000, 160(5): 662-682.
- [9] 李铁, 李伟力, 袁竹林. 用不同辐射模型研究下降管内传热传质特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 92-98.
Li Tie, Li Weili, Yuan Zhulin. Different radiative models for heat and mass transfer characteristics in vertical pipe[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(2): 92-98(in Chinese).
- [10] 程乐鸣, 骆仲泱, 倪明江, 等. 循环流化床辐射传热模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 100-103.
Cheng Leming, Luo Zhongyang, Ni Mingjiang, et al. Radiation heat transfer model of a circulating fluidized bed[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(9): 100-103(in Chinese).
- [11] Chang Hyun Kim, Hee Cheon No. Liquid entrainment and off-take through the break at the top of a vessel[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 235(16): 1675-1685.
- [12] 刘振华. 细小传热管内过冷水和空气高速两相流的换热特性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 80-84.
Liu Zhenhua. Study on heat transfer of high velocities two-phase flow of subcooled water and air in a heated narrow-tube[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1999, 19(6): 80-84(in Chinese).
- [13] Marco Fossa. A simple model to evaluate direct contact heat transfer and flow characteristics in annular two-phase flow[J]. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 1995, 16(4): 272-279.
- [14] 贾涛, 刁彦华, 唐大伟. 核态沸腾中汽化核心密度的预测[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 122-125.
Jia Tao, Diao Yanhua, Tang Dawei. Prediction of the nucleation site density in nucleate boiling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(16): 122-125(in Chinese).
- [15] 程伟良, 韩晓娟, 孙宏玉. 质量传递过程中的场协同作用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 105-108.
Cheng Weiliang, Han Xiaojuan, Sun Hongyu. Field synergy action in mass transfer process[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(13): 105-108(in Chinese).
- [16] 郭朝红, 余顺周, 蔡静, 等. 蒸发冷却电机中汽液两相沿程摩擦阻力的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 139-144.
Guo Chaohong, Yu Shunzhou, Cai Jing, et al. Research on two-phase flow frictional pressure drop in the evaporative generator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(19): 139-144(in Chinese).
- [17] 王亦飞, 卢瑞华, 苏宜丰, 等. 新型水煤浆气化炉内洗涤冷却管的温度分布[J]. 华东理工大学学报, 2007, 32(3): 300-304.
Wang Yifei, Lu Ruihua, Su Yifeng, et al. Temperature distribution in the scrubbing-cooling tube of the new type coal slurry gasifier [J]. *Journal of East China University of Science, and Technology*, 2007, 32(3): 300-304(in Chinese).
- [18] 李云, 顾兆林, 郁永章, 等. TEXACO 气化炉激冷室下降管传热传质过程模拟[J]. 化工学报, 2000, 28(4): 22-24.
Li Yun, Gu Zhaolin, Yu Yongzhang, et al. Heat & mass transfer research on descending pipe of quench chamber in Texaco coal gasifier[J]. *Chemical Engineering*, 2000, 28(4): 22-24(in Chinese).



李铁

收稿日期: 2007-12-25。

作者简介:

李铁(1979—), 女, 博士研究生, 主要从事多相流研究, litie0622@yahoo.cn。

(责任编辑 车德竞)