

气化炉洗涤冷却室液池内分隔板对气液流动特性影响的数值模拟

吴 暄¹ 武文斐¹ 李 铁² 袁竹林³

- (1. 内蒙古科技大学 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010;
2. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012;
3. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了提高气化炉洗涤冷却室内合成气洗涤热质的传质效果, 采用数值模拟技术, 研究了液池结构及液池内分隔板对气泡特性的影响。以气化炉液池内气液两相流动过程为研究对象, 通过气液两相流动数值模拟实验平台, 重点研究了分隔板对气泡特性的影响。基于图像处理技术, 从数值计算结果中提取液池内气泡湿周信息, 揭示了液池内分隔板对气泡湿周特性的影响, 探讨了分隔板结构及分布的优化。结果表明: 分隔板能有效增大气泡湿周, 减小液位波动; 其安装位置不宜太高, 合理选择板上孔隙的大小及数量有利于优化气泡特性; 分隔板交叉布置比平行布置更有利于均匀分布气泡。

关键词: 气化炉; 气液两相流; 洗涤冷却室; 湿周; 分隔板; 液池; 数值模拟

中图分类号: TQ546

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2012)03-0084-05

Numerical simulation of influence of demarcation plates on gas-liquid two-phase flow characteristics in scrubbing-cooling chamber of gasifier

WU Xuan¹, WU Wen-fei¹, LI Tie², YUAN Zhu-lin³

(1. Inner Mongolia Key Laboratory for Utilization of Baiyun Obo Multi-Metallic Resources,

Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

3. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To improve the mass transfer efficiency of scrubbing-cooling chamber of gasifier, study the influence of gasifier pool's structure and demarcation plates in liquid pool on gas-liquid two-phase flow characteristics. Through numerical simulation experiments, focus on the influence of demarcation plates. Based on the image processing technology, obtain wetted perimeter data from numerical simulation results, which well illustrates the specific impact of demarcation plates. Also discuss how to better utilize the distribution of demarcation plates. The results show that the demarcation plates can obviously increase wetted perimeter, reduce liquid level fluctuation. The demarcation plates shouldn't be installed too high. Proper size and number of pores helps to utilize bubble characteristics. The crossed demarcation plates are more beneficial to distributing uniformly bubble than the parallel demarcation plates.

Key words: gasifier; gas-liquid two-phase flow; scrubbing-cooling chamber; wetted perimeter; demarcation plate; gasifier pool; numerical simulation

收稿日期: 2012-03-28 责任编辑: 宫在芹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51166010); 国家重点基础研究发展规划(973计划)(2004CB217700); 东北电力大学博士科研启动基金(BSJXM-201201)

作者简介: 吴 暄(1976—), 男, 湖北武汉人, 博士, 内蒙古科技大学教师, 主要从事多相流的研究工作。

引用格式: 吴 暄, 武文斐, 李 铁, 等. 气化炉洗涤冷却室液池内分隔板对气液流动特性影响的数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(3): 84-88.

在激冷式气流床水煤浆气化炉内,气化室产生的高温合成气进入洗涤冷却室液池,在穿越液池的过程中与冷却水直接接触,从而达到降温、除尘和增湿目的^[1]。合成气洗涤热质传质效果的好坏与液池内的气液流动特性紧密相关。影响气液流动特性的因素很多,如进气速度、液位高度等,但这些因素会随运行工况的变化而改变,不利于实际控制。从改进洗涤冷却室的结构入手,探讨优化气液流动特性,提高设备运行稳定性的方法,具有较好的工程参考价值。然而,目前的研究仅局限于气化炉激冷环部分^[2],对液池内所发生的多相流动问题研究较少。仅华东理工大学对常见的洗涤冷却室添加了分隔板和支管,并通过实验测量了结构改进后局部气含率和气泡直径的分布情况^[3-4]。赵乾乾等^[5]通过数值模拟研究了压力变化对气化炉洗涤室内的气泡特性,但对液池的结构特性尤其是分隔板对气泡特性的影响还未涉及。与实验相比,数值模拟技术对研究气化炉内复杂工作条件下各相运动特性具有十分独特的优势。因此对气化炉洗涤冷却室内的气液两相流动采用数值模拟的方法进行研究,侧重采用气泡湿周特征参数揭示液池内气泡特性,从而表征分隔板对液池内气液流动特性的影响。

1 数值模拟平台的建立

1.1 物理模型

研究所用洗涤冷却室的装置尺寸均与实际装置和条件相同。考虑到在洗涤冷却室圆周方向上流体速度变化较为均匀,因此假设沿圆周方向上没有速度变化,仅考虑沿轴向和径向的分布和流动特性,则三维物理模型简化为仅在轴向和径向变化的二维轴对称物理模型,以提高计算效率。图1为数值计算物理模型。其中气体沿中间下降管流入液池,在底端管口处顺着下降管外壁向上穿越液池,最后从环隙空间向上逸出洗涤冷却室。

在上述物理模型的基础上加装4块分隔板,从液池底部向上,依次编号1、2、3、4。按分隔板布置方式的不同,将其分为方案1和方案2,图2为分隔板布置方案示意。由图2a)可知,在方案1中,各分隔板在相同的径向位置开孔,且孔隙可连成相互平行的轴向直线;由图2b)可知,在方案2中,相邻两板在径向交错开孔,且孔隙与挡板刚好相互交叉。表1为分隔板参数。

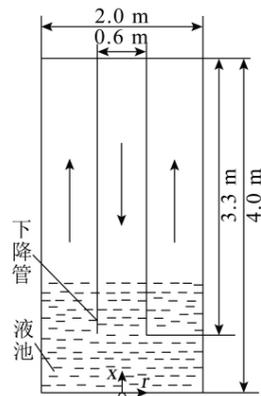


图1 数值计算物理模型

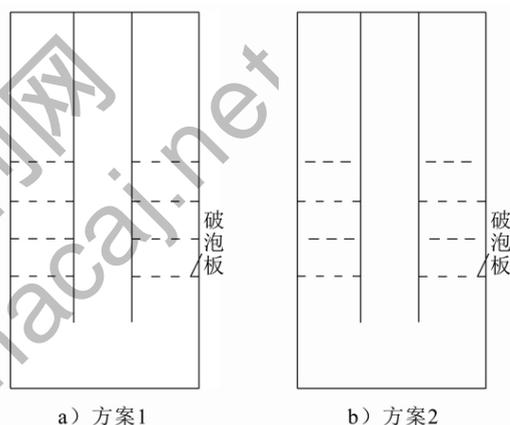


图2 分隔板布置方案

表1 分隔板参数

分隔板数量	第1块板距池底距离/m	板间距/m	板上孔数量	板上孔径/m
4	1.2	0.45	4	0.1

1.2 数学模型

主要研究分隔板对洗涤冷却室液池内气液两相运动规律的影响,而影响气液两相流动的因素很多,为了便于计算模拟分析,进行了适当的简化:①忽略气体内固体煤渣的影响;②假设流体为不可压缩牛顿流体;③假设气体在下降管出口处已完全冷却到池内压力下饱和水的蒸发温度,气液两相间无热质传递现象。

在适当假设的基础上,建立柱坐标下的二维控制方程。连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho r u) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v) = 0 \quad (1)$$

动量方程的通用形式为^[3-4]

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(r\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(ru\phi) + \frac{\partial}{\partial r}(rv\phi) = \frac{\partial}{\partial x}(r\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + rS_\phi \quad (2)$$

式中 ϕ 是一个通用变量, m/s, 当其表示为轴线 x 方向上的速度分量 u 时, 公式(2) 就表示 x 方向上的动量方程; 当其表示为径向 r 方向上的速度分量 v 时, 公式(2) 就表示 r 方向上的动量方程; Γ_ϕ 为有效扩散 Γ 系数, m^2/s ; 不同速度分量动量方程的源项 S_ϕ 参考文献 [6]。

研究所模拟的气液流动过程, 气液两相间相互扰动, 存在着气液湍流流动过程。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的最大特点是在一定程度上考虑了紊流的各向异性效应, 从而改善了对有分离、回流和冲击等较复杂湍流的模拟 [7]。贺阿特等 [8] 运用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对气化炉中的流动过程进行了模拟, 并取得了较为理想的结果。Yakhot 等 [9] 采用基于重整化群 (Renormalization Group) 理论, 从非稳态 Navier-Stokes 方程推导出 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。

湍动能 k 输运方程:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{r} \rho v \frac{\partial}{\partial r}(rk) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散输运方程:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{1}{r} \rho v \frac{\partial}{\partial r}(r\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中 t 为时间, s; μ 为分子黏度, $Pa \cdot s$; σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能普朗特数和湍动能耗散普朗特数; G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生项; 湍流黏度 $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$; 方程中的系数分别为: $C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $\eta = Sk / \varepsilon$; $\eta_0 = 4.38$; $\beta = 0.012$; $C_\mu = 0.0845$; $C_{1\varepsilon} = 1.42$ 。

气体穿越液池的流动过程是 2 种不能混合流体的流动过程。故采用流体体积 (VOF) 模型进行数值模拟, 其流体输运控制方程:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha_q}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

式中, α_q 为控制单元中第 q 相的体积分量, 有 $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$ 。

n 表示流场为 n 相流, 研究中 $n = 2$ 。

采用连续表面力 (CSF) 模型 [10] 计算相界面上的表面张力, 即

$$F_s = \sigma k \nabla \alpha_q \quad (6)$$

2 网格划分与计算条件

划分的计算网格单元采用二维均分四边形网格。由于洗涤冷却室内的气泡特性为研究重点, 尤其是小气泡的产生对气泡特性有很大影响, 因此要缩小网格尺寸, 但这也同时增加了计算时间。兼顾两者, 最终选取计算网格间距为 8 mm, 总共划分 8×10^4 个网格。采用 DELL 四核 Intel 处理器 X5460 工作站进行计算, 表 2 为计算参数。选用非耦合隐式求解方法, 时间依赖解为非稳态, 以空气代替合成气, 液体即为水, 且气相为基本相。气流入口为速度边界, 出口为压力边界, 下降管为固体壁面边界条件, 且壁面采用无滑移边界。压力速度耦合采用 PISO 算法, 压力离散应用 Body Force Weighted 方法, 该方法假定压力和体积力之差的方向速度为定值, 其它均为一阶迎风格式。

表 2 数值模拟的计算参数

气体密度 $\rho_g /$ ($kg \cdot m^{-3}$)	操作压力 P / Pa	操作温度 T / K	进气气速 $V_g / (m \cdot s^{-1})$	初始液位 h / m
1.225	101325	300	0.8	1.2

3 结果与讨论

3.1 有无分隔板对气液流动形态的影响

图 3 为无分隔板时气液流动达到相对稳定时的气液相分布。

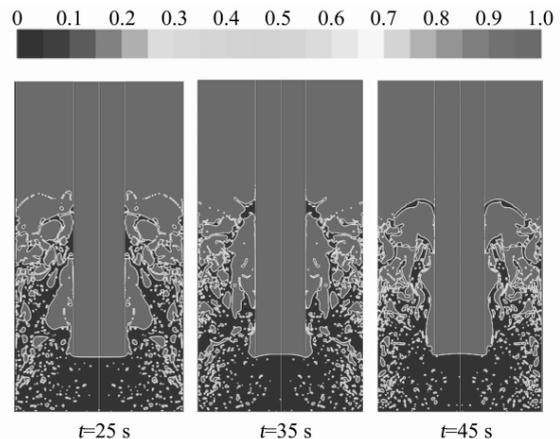


图 3 无分隔板时液池内气液流动形态

由图3可以看出,气体主要沿下降管外壁上升,同时携带液体,由于重力和气体阻力的共同作用,这部分液体在环隙上部产生回流,这样气液两相发生剧烈的湍流作用,导致大气泡破裂和聚并,形成许多形状不规则的气泡。这种气液流动特性使下降管外壁面气含率增大,而环隙主体区域气含率较低,设备空间利用率低。同时,下降管附近气量大,造成该区液面波动大,操作不稳定,这种情况也应该避免。

图4为有分隔板时气液流动稳定后的相分布。由图4可以看出,气体经分隔板破碎和分散后,在环隙空间分布较均匀,且环隙上部形成稳定的鼓泡床,克服了加板前环隙主体区域气含率低,液面波动大的缺点。但在下降管底端管口下方没有形成气液湍动,这一区域的液体几乎没有发挥作用。为了充分利用设备空间,可适当减小下降管底端管口与液池底部的距离。

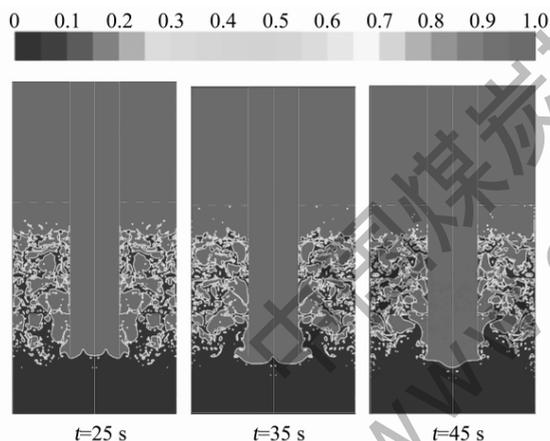


图4 有分隔板(方案1布置)时液池内气液流动形态

对比图3和图4可知,液池内加装分隔板,能有效减小液池内气泡尺寸,增加气液界面面积浓度,有利于加强气液间的动量交换,促进气体在液池中的扩散,强化气液两相间的混合效果,使气体在液池内的分布更广。添加分隔板可以有效降低床层及液面的波动,有利于装置的稳定运行。

3.2 分隔板对气泡湿周分布的影响

3.2.1 对轴向分布的影响

在建立的二维坐标系下,气泡与液体的接触面积即为气泡湿周。利用VC++编程对VOF模型计算得到的气液流动图像进行后处理从而得到气泡湿周。考虑到VOF模型计算出的气液相体积分数的数值范围为0~1。因此借助数字图像处理技术^[11],通过判断计算网格内的气相体积分数,即可搜寻到

气泡或液滴周界上的网格单元,图5为气泡湿周计算示意。然后计算边界上相邻网格的中心距离之和就可以得到气泡湿周的大小。在气液两相流场处于准稳定状态时,连续提取1s计算时长内的计算数据进行统计后取平均,计算得到气泡湿周分布。

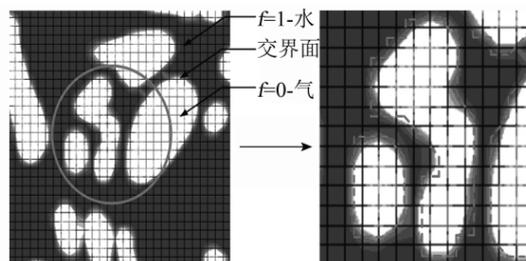


图5 气泡湿周计算示意

图6研究了有分隔板和无分隔板2种情况下,液池内气泡湿周沿轴向的分布规律。由图6可以看出,当液池内没有布置分隔板时,沿液池轴向方向,气泡湿周存在较大波动。而有分隔板时,气泡湿周分布较为平缓。同时还发现,有分隔板时的气泡湿周明显大于没有分隔板时的气泡湿周。结合图3和图4中所显示的气液流动形态分析可知,由于没有分隔板的分隔作用,气体在穿越液池的过程中,液池内形成了较大尺寸的气泡,而分隔板的存在则使气泡尺寸变小,从而增加了气液接触面积即湿周。另外,大尺寸气泡在液面破裂时,激起的液滴明显多于小尺寸气泡,这在导致液面剧烈波动的同时,也使得液面附近的气液接触面积急剧增加,这也是在图6中所显示的无分隔板时,气泡湿周在轴向高度为1.8~2.0m时出现峰值的原因。

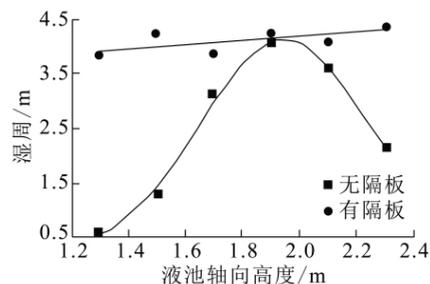


图6 分隔板对液池内轴向气泡湿周分布的影响

3.2.2 对径向分布的影响

以图2a)所示的方案1对分隔板进行布置,通过计算发现,当气液流动达到相对稳定状态时,记录液池内某一高度区间内的气泡湿周平均值。图7为液池内沿半径方向气泡湿周的变化规律。

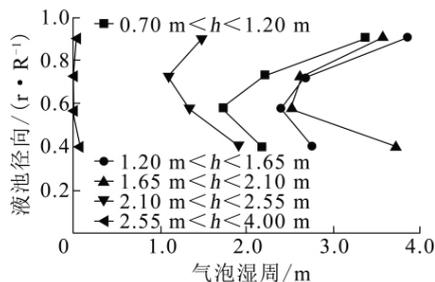


图7 液池内沿半径方向气泡湿周的变化规律

由图7中可知,在液池内,气泡湿周沿径向方向呈现两头大中间偏小的趋势。结合图3和图4所示的气液流动相分布可知,在没有分隔板存在时,气体在出下降管反折向上流动过程中,液池内气泡主要分布在下降管外壁面附近,而分隔板的存在,对该处的气泡进行了分隔,因此在靠近下降管外壁面处的气泡湿周较高。同时,由于液池内气液间相互扰动,气体在各层分隔板中出现回流,促进了小气泡向径向的快速扩散,因此在靠近液池壁面附近,气泡湿周出现最大值。

3.3 分隔板布置对气液流动形态的影响

分别对2种不同的分隔板布置方式进行计算,图8为有分隔板(方案2布置)时液池内气液流动形态。由图4所示的布置方案1的计算结果可知,第1块分隔板处,形成一层稳定的气膜,这说明分隔板对气泡的上升具有明显的阻碍作用。由于实际工况下气体温度较高,如若气体一直附着在分隔板处,必将影响分隔板的稳定安全工作,且不利于气液流动换热。由图8可知,采用方案2的交错布置方式,没有形成气膜,气体能够很好地被破碎,并从板间缝隙向上运动,这体现了分隔板交叉布置的优越性。

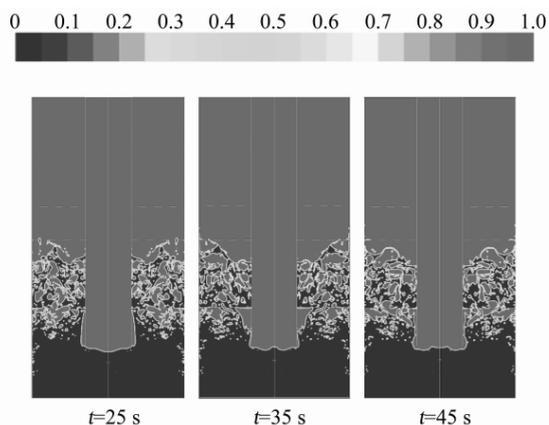


图8 有分隔板(方案2布置)时液池内气液流动形态

4 结 论

(1) 分隔板的加入有助于提高液池内气泡湿周,并且其沿液池轴向分布更加均匀。

(2) 沿液池径向,湿周分布呈现两头大中间小的分布趋势。

(3) 分隔板使大气泡破碎,在液池内形成无数小环流,增大了气体在液池内的停留时间和相间接触面积。

(4) 分隔板的安装位置不宜过高,以便于其能及时对从下降管口出的气泡产生破碎作用。第1块分隔板左侧及后3块板右侧的孔隙应适当减小,并加大孔隙分布密度,以增强气泡破碎效果。

(5) 分隔板交叉布置比平行布置更有利于气泡的均匀分布。

参考文献:

- [1] 金刚,王亦飞,路文学. 新型洗涤冷却室结构的应用[J]. 大氮肥, 2007, 30(5): 1-3.
- [2] 徐明,张忠孝,樊俊杰,等. 气流床气化炉激冷环冷态流场数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(1): 75-78.
- [3] 贺必云. 新型洗涤冷却室内多相流动特征的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2005.
- [4] 陈意心,王亦飞,梁铁,等. 新型洗涤冷却室内气液两相的分布特性[J]. 化工学报, 2008, 59(2): 322-327.
- [5] 赵乾乾,徐峰,吴暄,等. 压力变化对洗涤室内气泡特性影响的数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(5): 44-47.
- [6] Sarkar T, Sayer P G. Flow simulation past axisymmetric bodies using four different turbulence models[J]. Applied Mathematical Modelling, 1997, 21(12): 783-792.
- [7] 李福田. 三维冲击射击截面宽厚比对动水冲击压力的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1230-1235.
- [8] 贺阿特,冯霄,董绍平,等. 德士古渣油气化炉的数值模拟[J]. 高校化学工程学报, 2001, 15(6): 526-531.
- [9] Yakhot V, Orzag S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-11.
- [10] Brackbill J U. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(3): 335-354.
- [11] 陈天华. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.