

研究简报

水煤浆气化炉激冷室下降管内 流动与传热数学模拟

赵永志 顾兆林 李 云 冯 霄
(西安交通大学环境与化学工程学院, 陕西 西安 710049)

关键词 激冷室 下降管 流动与传热 数学模拟

中图分类号 TK 124

文献标识码 A

文章编号 0438-1157(2003)01-0115-04

NUMERICAL SIMULATION ON TURBULENT FLOW AND HEAT TRANSFER OF VERTICAL PIPE IN QUENCH CHAMBER OF COAL GASIFIER

ZHAO Yongzhi, GU Zhaolin, LI Yun and FENG Xiao

(College of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract Quench chamber is the most important component in the coal gasifier, and is easy to break. In order to find the pattern of turbulent flow and heat transfer of synthetic gas in the Vertical downward pipe, a numerical model based on analyzing the flow and heat transfer features of the vertical pipe in quench chamber is first presented. The variations of temperature, velocity of synthetic gas with the change in length and radius of the vertical pipe and the velocity of the gas are obtained, and the effect of radiation is found. The pattern of turbulent flow and heat transfer of synthetic gas in the vertical pipe is further revealed.

Keywords quench chamber, vertical pipe, turbulent flow and heat transfer, numerical simulation

引 言

由于工程经验不足及技术方面的原因, 煤气化设备经常出现故障而导致工厂被迫停产, 从而造成巨大的经济损失^[1]. 而煤气化设备中的核心设备气化炉是易损坏的设备. 经分析, 气化炉激冷室结构设计不够合理. 本文以水煤浆气化炉激冷室为研究对象, 采用 $k-\epsilon$ 模型^[2]、四通量辐射模型和 SIMPLE 算法对激冷室内的湍流流动及传热进行数值模拟, 以掌握激冷室下降管内的流体工作变化规律.

1 下降管工作过程

1400 °C 的高温合成气由气化炉进入激冷室,

成分主要有 CO、CO₂、H₂、H₂O 和一定浓度的灰分, 合成气将在激冷室进行冷却、除灰过程. 激冷室下降管见图 1, 激冷环下接下降管, 下降管下端浸入黑水中. 水泵从底部把激冷水送入激冷环, 激冷水经分配室 24 个小孔喷射进入激冷环室, 再由 8 mm 宽的环形槽缝流出, 沿下降管内表面成膜状下流, 与合成气并流接触, 进行传热、传质过程. 一方面, 高温合成气将热量传递给水膜, 使水部分汽化, 并进入合成气主流, 合成气的温度急剧降低并增湿; 另一方面, 激冷水要保持足够, 满足激冷需要的同时还能保护下降管免受高温带来的热变形. 最后合成气冲入黑水被洗涤, 除去大部分碳黑和灰渣, 以满足后续工段的需要.

2001-08-14 收到初稿, 2002-03-25 收到修改稿.

联系人: 顾兆林. 第一作者: 赵永志, 男, 25 岁, 博士.

Received date: 2001-08-14.

Corresponding author: GU Zhaolin. E-mail: yongzhizhao@

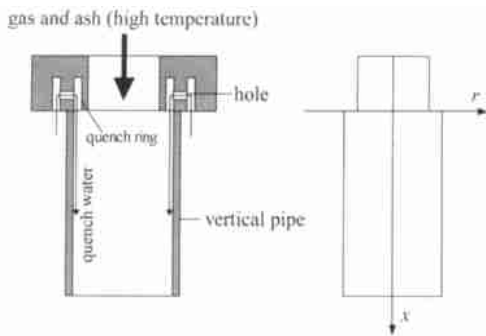


Fig. 1 Schematic diagram of quench chamber

激冷过程中热、质传递十分剧烈，建立下降管中工作过程的数学模型有助于分析解决其中存在的问题。

2 建立数学模型的假设

在建立单相流体数学模型之前，对下降管内的实际情况做了一定的简化，以便于问题的解决：

(1) 由于下降管下部的壁面有水膜存在，水量充足，可认为下降管的壁温保持不变，即为下降管内水蒸气分压下相对应的激冷水的饱和温度，壁面处速度为壁温下水蒸气蒸发速度。

(2) 经研究发现灰分对流动和传热的影响不大^[1,3]，所以忽略气体中灰分对合成气流动和传热的影响。

(3) 气体的入口为均匀流速，流动处于紊流状态，辐射传热中只考虑气体的辐射传热。

(4) 仅考虑气体相的流动，液体相水的流动情况不考虑。

(5) 气体成分主要是 CO 和 H₂，合成气体可看做理想气体。

3 控制方程组

针对气体相，可列出圆柱坐标系下二维连续方程、动量方程、能量方程以及水蒸气扩散方程。

连续方程

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

动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r u v \rho)}{\partial r} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial r} \right] - \\ & \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r v^2 \rho)}{\partial r} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial r} \right] - \frac{\partial p}{\partial r} + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right] - \frac{2 \mu_{\text{eff}} v}{r^2} \end{aligned} \quad (3)$$

能量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v T)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \\ & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + S_r \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$S_r = 2 \alpha_k (R_x + R_y - 2E), \quad \mu_t = c_p \rho k^2 / \epsilon$$

其中 S_r 的计算采用多通量辐射模型中的四通量模型，在柱坐标系中^[4,5]有下方程。

R_x 方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\alpha_k + \alpha_s} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left[r \frac{1}{\alpha_k + \alpha_s} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] \\ & = \alpha_k (R_x - E) + \frac{\alpha_s}{2} (R_x - R_y) \end{aligned} \quad (5)$$

R_y 方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\alpha_k + \alpha_s + 1/r} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left[r \frac{1}{\alpha_k + \alpha_s + 1/r} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] \\ & = \alpha_k (R_y - E) + \frac{\alpha_s}{2} (R_y - R_x) \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$E = \delta T^4$$

状态方程：将合成气看做理想气体

$$p = \rho R T \quad (7)$$

水蒸气扩散方程^[1]

$$\frac{\partial(\rho u m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v m_1)}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho D_{1r} \frac{\partial m_1}{\partial r} \right] \quad (8)$$

边界条件

$$r = 1, \quad m_1 = 1; \quad r = 0, \quad m_1 = m_{10}$$

其中 m_1 为水蒸气浓度，在壁面处为 1； m_{10} 为下降管进口中心位置水蒸气的浓度。

4 边界条件

边界条件包括进口、出口、壁面及轴对称线处的条件。与壁面相邻的黏性支层采用壁面函数法处理^[4]。

(1) 进口条件：进口速度按给定常量；紊动能 k 按进口平均动能的 1%，紊动能耗散率 ϵ 按紊动能生成量等于耗散量确定；进口温度取合成气起始温度 1673 K。

(2) 出口条件：出口边界参数采用局部单向化假设；出口速度由内点外推求得，并满足质量守恒条件。

(3) 壁面条件：在轴向固体壁面处取 $U = 0$ 。

$V = -V_w$ (壁面上水蒸气的蒸发速度); $T = 523 \text{ K}$. 在入口突扩区径向固体壁面处取 $U = 0, V = 0; T = 523 \text{ K}$.

(4) 中心线: 由于下降管的轴对称性, 可取求解变量沿中心线的一阶导数为零, 即 $\partial \phi_k / \partial n = 0$.

5 计算结果与分析

合成气进口密度为 $9.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 进口流速 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 进口直径 0.76 m , 下降管直径 0.86 m , 下降管长度 4.2 m , 合成气进入激冷室下降管时的温度 1673 K , 下降管部分为恒壁温 573 K .

图 2 是下降管内温度等值线, 可以看出在下降管上半段等温线比较密, 这说明在下降管上半段降温特别激烈. 图 3 是水蒸气浓度分布等值线, 可以看出水蒸气沿管径和管长方向浓度逐渐增加而达到饱和. 图 4 是下降管中心温度沿管长变化情况, 可以看出合成气的主要降温过程是在管长 3 m 内完成的, 此时合成气的温度由进口的 1673 K 降低到 700 K . 这说明在下降管的上半段传热过程非常激烈, 而运行经验也表明下降管的损坏往往是在上半段. 图 5 是合成气速度在出口截面的分布, 可以看出中心速度较高, 边界处速度较低, 这是因为边界处存在黏性边界层. 图 6 是有无辐射对下降管中心气温的影响, 可以看出辐射对激冷室下降管内的传热影响特别大, 辐射换热量占有所有换热量的绝大部分, 如果没有辐射而只靠对流无法达到降温的目的. 图 7 是不同流速对下降管中心气温的影响, 可以看出气体流速越低出口温度越低, 这是因为气体流速越低, 单位时间内通过下降管的气量越少, 降温幅度越大. 图 8 是不同管长对下降管中心气温的影响, 可以看出下降管长度越长合成气的出口温度越低, 这是因为合成气和激冷水之间的传热面积增加, 所以降温效果良好. 图 9 是不同管径对下降管中心气温的影响, 可以看出管径越小降温效果越

好, 这是因为管径越小单位进气量对应的换热面积越大, 所以降温效果越好.

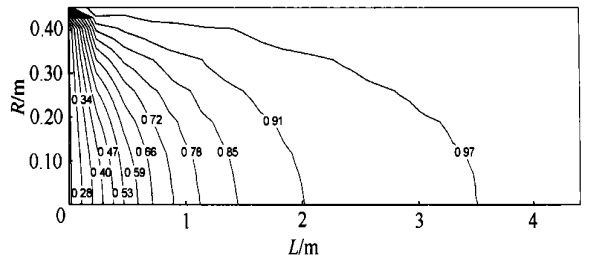


Fig 3 Contour line of concentration of vapor

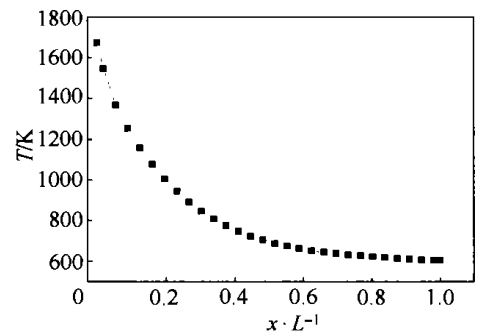


Fig 4 Gas temperature along axis in chiller

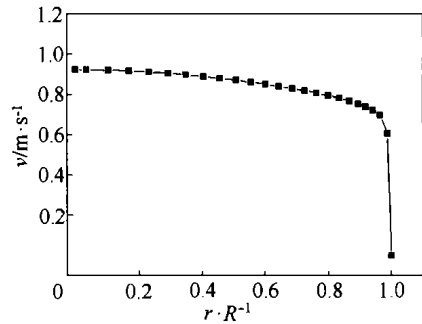


Fig 5 Outlet velocity of gas

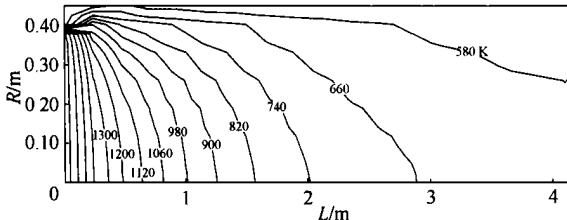


Fig 2 Isotherm of synthetic gas

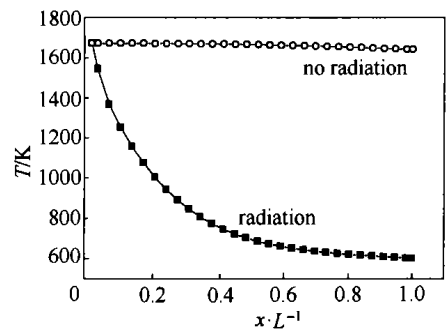


Fig 6 Effect of radiation

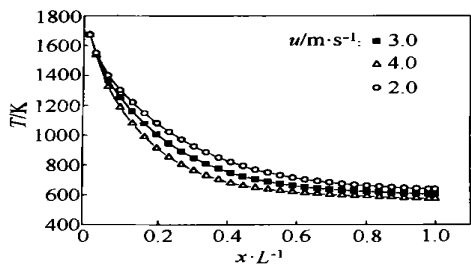


Fig 7 Effect of inlet velocity on temperature along axis

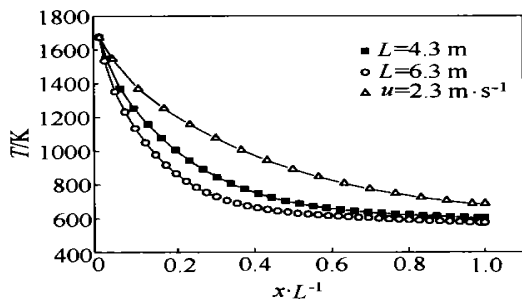


Fig 8 Effect of pipe length on temperature along axis

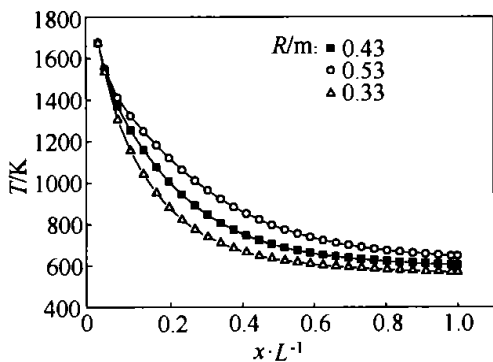


Fig 9 Effect of pipe radius on temperature along axis

6 结 论

(1) 下降管的上半段传热过程非常激烈, 合成气的大部分降温过程在下降管的上半段完成, 因此下降管上半段的工作条件最恶劣, 也最容易损坏, 化工厂所出现的故障验证了这个结果. 壁面处与中心处温差较大.

(2) 减小进气流速可以增加降温效果, 但流速受到气化炉操作负荷的限制, 因为流速降低意味着激冷室的操作负荷降低, 而激冷室的操作负荷等于气化炉的操作负荷.

(3) 增加管长可以增加降温效果, 但如果管长增到一定长度后对降温效果影响不甚明显, 而且如

果管长增长会增加设备的不稳定性并且增加设备的成本和制造费用, 应综合考虑各种因素来决定管子的长度.

(4) 减小管径可以增加降温效果, 但是管径的减小会使操作负荷减小, 从而不符合工作需要, 所以管径的决定也要综合考虑, 才能找出最佳的数值.

符 号 说 明

- c_{μ} ——标准 $k-\epsilon$ 模型常数 (0.09)
- E ——黑体辐射率, $W \cdot m^{-2}$
- k ——紊动能, $m^2 \cdot s^{-2}$
- L ——管长, m
- m_1 ——水蒸气浓度
- Pr ——Prandtl 数
- p ——压强, Pa
- R ——半径, m
- R_x, R_y ——分别为四通量辐射模型 x 方向、 y 方向热流, $W \cdot m^{-2}$
- r ——径向坐标, m
- S ——通用源项
- T ——温度, K
- u ——轴向速度, $m \cdot s^{-1}$
- v ——径向速度, $m \cdot s^{-1}$
- x ——轴向坐标, m
- α_k ——辐射吸收系数
- α_s ——辐射散射系数
- δ ——Boltzmann 常数
- ϵ ——紊动能耗散率, $m^2 \cdot s^{-2}$
- μ ——动力黏性系数, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
- μ_{eff} ——有效动力黏性系数, $Pa \cdot s^{-1}$
- ρ ——密度, $kg \cdot m^{-3}$
- σ_1 ——标准 $k-\epsilon$ 模型常数 (0.9~1.0)
- ϕ ——任一输运量

References

- 1 Li Yun (李云). Numerical Simulation and Analysis of the Turbulent Flow and Heat Transfer in Vertical Pipe of Quench Chamber of Coal Slurry Gasifier; [dissertation] (学位论文). Xi'an; Xi'an Jiaotong University, 1999
- 2 Tao Wenquan (陶文铨). Numerical Heat Transfer (数值传热学). Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press, 1988. 431
- 3 Zhao Yongzhi (赵永志). Study of the Flow and Heat Transfer in Downward Pipe of Quench Chamber of Coal Slurry Gasifier; [thesis] (学位论文). Xi'an; Xi'an Jiaotong University, 2001
- 4 Fan Weicheng (范维澄), Wan Yuepeng (万跃鹏). Model and Calculation of Flow and Combustion. Anhui; China Science and Technology Press, 1992. 208
- 5 Yang Shiming (杨世铭). Heat Transfer (传热学). 3rd ed. Beijing; Higher Education Press, 1998. 239