

汽液固三相蒸发管内壁面磨损的数值模拟研究

Numerical Simulation of the Inner Wall Wear Performance in Vapor-liquid-solid Three Phase Evaporation Tube

邱亚娟, 王德武, 刘燕, 张少峰*
(河北工业大学 化工学院, 天津 300130)

摘要: 应用 STAR-CCM+模拟软件和基于 VOF 模型基础上的 Lagrange 多相流模型, 在流体入口速度为 0.5m/s 到 1.5m/s, 系统固体颗粒体积分率为 1%到 8%的条件下, 研究了汽液固三相循环流化床蒸发管内壁面处磨损率的轴向分布以及其随流体入口速度、固体颗粒体积分率和温度等操作参数的变化规律。结果表明: 沿蒸发管轴向向上, 壁面处磨损率逐渐增加, 并随壁面处固含率、液体入口速度和固体颗粒体积分率的增加而增加。外加热温度对蒸发管中下部的磨损率影响较小, 对中上部的影响较大, 随着外加热温度的升高, 壁面处磨损率降低。

关键词: 汽液固三相; 蒸发器; 磨损率; 固含率; 数值模拟; STAR-CCM+

Abstract: To investigate the inner wall wear performance in vapor-liquid-solid three phase evaporation tube, software STAR-CCM+ was used to simulate the vapor-liquid-solid three phase flow. The Lagrange multi-phase flow model based on the Volume of Fluid (VOF) algorithm was used to describe the effect of the inlet velocity, the particles hold up and temperature on inner wall wear rate. The research results showed that the inner wall wear rate increased along the axis of evaporation tube with increase of the inlet velocity and the particles hold up; Inner wall wear rate decreased with increase of temperature. And the inner wall wear rate along axis of evaporation tube is different at the same temperature.

Keywords: Vapor-liquid-solid three-phase; evaporator; wear rate; particle hold up; numerical simulation; STAR-CCM+

0 前言

蒸发是化工、轻工、石油、医药、海水淡化等领域常见的单元操作。为了消除或减轻蒸发器换热管内壁面结垢现象并强化传热, 李修伦等^[1,2]在流动沸腾系统中加入惰性固体颗粒并使其保持流化, 形成了汽液固三相流化床流动沸腾体系, 取得了较好的防除垢效果^[3~5]。但是, 在这种三相体系中, 颗粒的引入是否会对管内壁造成一定程度的磨损, 以及这种磨损随操作条件的变化规律如何, 因受

实验及检测手段所限, 还未有研究者对其进行过相关的实验研究。在颗粒与壁面碰撞及磨损的数值模拟研究方面, 郭烈锦和亢力强^[6]对风沙跃移中颗粒与多粒径床面的碰撞过程进行了数值模拟计算, 模型中对颗粒碰撞采用了软球模型; 周力行^[7,8]等提出了考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型。Benedetto^[9]等根据实验和电化学测量的数据采用数值模拟的方法对多相流的冲刷腐蚀进行了研究, 计算了管道内流体的流动特性、颗粒的轨迹和碰撞速度等, 得出颗粒对壁面的磨损率及材料表面的腐蚀速率。以上数值模拟研究多集中于气固及液固体系, 鉴于汽液固三相系统流动情况复杂及现阶段有效磨损检测手段匮乏, 本文采用 STAR-CCM+模拟软件和基于 VOF 模型基础上的 Lagrange 多相流模型, 通过数值模拟的方法, 研究汽液固三相循环流化床蒸发器常见运行工况下颗粒与壁面的磨损特性, 以期三相蒸发器的工业设计和现场操作提供基础指导。

1 数值模拟方法

在进行数值模拟之前先做如下假设: (1) 颗粒相是大小均匀的球形颗粒, 在管内流动是连续的; 流体相在达到饱和温度以后会发生相变变成水蒸汽, 在管内体现为气泡, 由于 $\Phi \ll 1$ (Φ 是颗粒相体积分数), 流体相取与载粒流体相同的物性参数。(2) 颗粒间的相互碰撞可忽略, 但要考虑颗粒-流体间的相互作用引起的两相间的双向耦合作用。(3) 平均流动是三维的、定常、不可压缩、湍流的局部各向同性。(4) 由于 $\Phi \ll 1$, 含颗粒相浓度脉动的三阶关联式项可以忽略。(5) 颗粒相与流体相之间的动量交换按 Stokes 定律描述。

1.1 管内流动控制方程

1.1.1 基本方程

固体颗粒作为离散相在循环流化床中运动时与连续相发生能量、质量和动量传递。

$$S_E = - \sum_{\pi} \sum_{\alpha_p} \dot{n}_{\pi} \left(Q_t + \mathbf{F}_s \cdot \mathbf{v}_p + \frac{1}{2} \dot{m}_p \mathbf{v}_p^2 + \dot{m}_p h \right) \delta t_p \quad (1)$$

Q_t 是颗粒表面热传导, \mathbf{F}_s 是作用在颗粒表面的力, \dot{m}_p 是连续相传递给颗粒的传质率, h 是连续相传递给颗粒的传质焓。 δt_p 是基于网格的 π 包总和。

$$S_m = - \sum_{\pi} \sum_{\delta t_p} \dot{n}_{\pi} \dot{m}_p \delta t_p \quad (2)$$

$$S_v = - \sum_{\pi} \sum_{\alpha_p} \dot{n}_{\pi} (\mathbf{F}_s + \dot{m}_p \mathbf{v}_p) \delta t_p \pi \quad (3)$$

$\mathbf{F}_s + \dot{m}_p \mathbf{v}_p$ 是连续相传递给颗粒的动量。

1.1.2 紊动能(k)方程及耗散率(ϵ)方程:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho k dV + \int_A \rho k (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} = \\ \int_A \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \cdot d\mathbf{a} + \int_V [G_k + G_b - \rho((\varepsilon - \varepsilon_0) + \gamma_M) + S_k] dV \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \varepsilon dV + \int_A \rho \varepsilon (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} = \\ \int_A \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \cdot d\mathbf{a} + \int_V \frac{I}{T} [C_{\varepsilon 1} (G_k + G_{nl} + G' + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho (\varepsilon - \varepsilon_0) + \rho \gamma_y + S_\varepsilon] dV \end{aligned} \quad (5)$$

这里 S_k 和 S_ε 是被定义的源项, ε_0 是抵消湍流衰减的湍流值源项。 G' 是引入的一个附加项, 如式 (6) 所示

$$G' = Df_2 \left(G_k + 2\mu \frac{k}{y^2} \right) \exp(-0.00375 Re_y^2) \quad (6)$$

阻尼系数 f_2 如下式所示

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(Re_T^2) \quad (7)$$

其中 Re_y 和 Re_T 分别定义为

$$Re_y = \frac{\sqrt{k} y}{\nu} \quad (8)$$

$$Re_T = \frac{k^2}{\varepsilon \nu} \quad (9)$$

在经典模型中, D 的值被定义为 $D = C_{\varepsilon 2} / C_{\varepsilon 1} \approx 1.3$ 。在 STAR-CCM+ 中默认为 $D=1$, 这样在低雷诺数下模拟流动能得到更好的结果。湍流相 G_k 、非线性相 G_{nl} 、浮力相 G_b 、压缩修正系数 γ_M 和校正相 γ_y 均与标准 $k-\varepsilon$ 模型中相同。

湍流粘度由下式计算

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu k T \quad (10)$$

式 (10) 中阻尼函数如下式所示

$$f_\mu = 1 - \exp \left[- \left(C_{d0} \sqrt{Re_y} + C_{d1} Re_y + C_{d2} Re_y^2 \right) \right] \quad (11)$$

式中系数分别为 $C_{d0}=0.091$, $C_{d1}=0.0042$, $C_{d2}=0.00011$

1.2 磨损模型

固体颗粒冲击壁面引起的表面磨损主要取决于固体颗粒和被磨表面的物性,如固体颗粒的形状、粒度、密度及硬度,被冲蚀材料的硬度、韧性、疲劳强度、表面粗糙度等。影响磨损的流场参数主要是固体颗粒撞击壁面的频率(即颗粒相在壁面处的固含率)、颗粒的冲击速度及相对于被磨损表面的冲角^[10]。当颗粒及被磨材料一定时,材料的磨损率就取决于上述的流场参数。所以需要一种磨损模型来描述材料的磨损率与流场参数之间的关系,指导人们通过改变流场参数来消除或减小磨损。

磨损模型中主要的计算参数为磨损率。磨损率 e_r 指在单位时间内单位面积上侵蚀壁面的质量。 e_r 决定于流体的流动和它的计算方法,本文采用 Oka^[11~12] 关联式计算,计算式为:

$$e_r = e_{90} g(\alpha) \left(\frac{u_p}{u_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d_{ref}} \right)^{k_3} \quad (12)$$

式中 u_p 和 d_p 分别是实际的颗粒速度和颗粒直径; u_{ref} 和 d_{ref} 分别是颗粒参考速度和颗粒参考直径;

k_2 和 k_3 分别是参考速度 u_{ref} 和参考直径 d_{ref} 的指数; α 是颗粒入射角度; e_{90} 是当 $u_p = u_{ref}$,

$d_p = d_{ref}$, $\alpha = 90^\circ$ 时的磨损率。角度函数 $g(\alpha)$ 如下式:

$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} (1 + H_v (1 - \sin \alpha))^{n_2} \quad (13)$$

n_1 、 n_2 和 H_v 是指定常数。其中 H_v 是单位 GPa 的维氏硬度材料的侵蚀。

计算粒子入射角需要预定义系统场函数,其中包括法向恢复系数 ϵ_N 和切向恢复系数 ϵ_T 。为了更好地预测颗粒与固体壁面碰撞后的反弹角度,采用 Forder et al^[13] 定义的恢复系数来计算:

$$\epsilon_N = 0.988 - 0.78\alpha_p + 0.19\alpha_p^2 - 0.024\alpha_p^3 + 0.027\alpha_p^4 \quad (14)$$

$$\epsilon_T = 1 - 0.78\alpha_p + 0.84\alpha_p^2 - 0.21\alpha_p^3 + 0.028\alpha_p^4 - 0.022\alpha_p^5 \quad (15)$$

2. 初始和边界条件

2.1 初始条件 (t=0 时)

- (1) 液相流速 $u_l=0.5\text{m/s}$, 颗粒相速度 $u_s=0.5\text{m/s}$;
- (2) 湍动强度 $I=0.05$, $k=0.00125$, $\epsilon=0.02192$;
- (3) 初始时刻颗粒在管底均布, $M_s=0.0036895\text{kg/s}$;
- (4) 操作压力为常压。

2.2 边界条件

进口处已知流量、液固两相速度和颗粒体积分数、湍流动能及湍流动能耗散率;在进口处,液、

固两相给定相同的进口速度；在壁面处,对流体相采用壁面函数法和无滑移边界条件,颗粒相在壁面处不满足无滑移条件；入口定为速度入口,出口定为压力出口。

2.3 计算条件

本文忽略蒸发管入口段及出口段周向不均匀性的影响,管内流动可简化为轴对称问题。采用文献[14]中的流化床作为模拟对象,计算域尺寸、介质物性及模拟条件如表 1 所示。

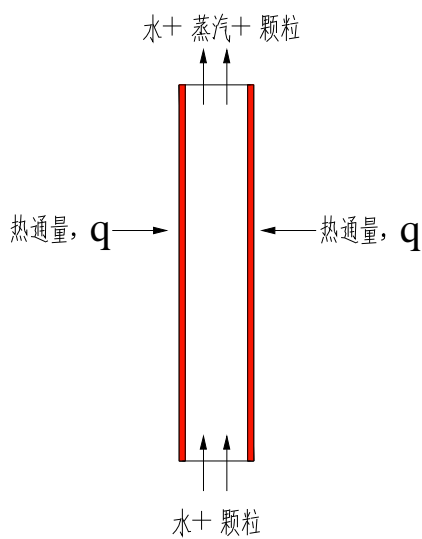
表 1 模拟计算操作条件及参数

Tab.1 Operation conditions and parameter in the numerical simulation

| 物理量 | 符号 | 数值 | 说明 |
|--------|------------|---------------------------|-----------|
| 计算域高 | H | 1200 mm | 主计算域高,固定值 |
| 计算域直径 | D_H | 24 m | 圆形截面,固定值 |
| 液体入口速度 | u_1 | 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s | |
| 液体密度 | ρ_1 | 998.2 kg/m ³ | |
| 颗粒密度 | ρ_s | 2350 kg/m ³ | 球形颗粒 |
| 颗粒平均直径 | d_s | 1 mm | 平均颗粒直径 |
| 颗粒体积分数 | V_s | 1%, 3%, 5%, 8% | |
| 管外加热温度 | T | 406 K, 424 K | |
| 时间步长 | Δt | 5×10^{-4} s | 满足收敛条件 |

2.4 计算模型结构与网格划分

2.4.1 计算模型结构



计算模型如图 1 所示。液体水和球形颗粒从入口进入管内,沿管子下到上流动,通过管壁加热,从上端出口流出。由于伴随加热,出口有蒸汽流出。

图 1 计算模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of calculation

2.4.2 网格划分

网格划分见图 2 和图 3，网格划分在柱坐标系下进行，采用多面体网格。根据低 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型要求，边界层划分为五层，边界层拉伸因子为 1.15，如图 3 所示。

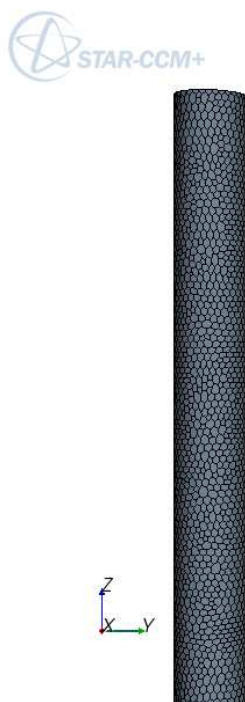


图 2 网格划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of mesh



图 3 横截面剖面网格划分示意图

Fig.3 Schematic cross-section mesh section

3. 结果与分析

3.1 壁面处固含率轴向分布云图

图 4 给出了速度为 0.5m/s 颗粒体积含量为 1%，3%，5%，8%时的壁面处固含率云图。从图中可以看出，颗粒体积含量为 1%时整根管在轴向上的固含率很小；颗粒体积含量为 3 时整根管在轴向上的固含率少量出现在上半根管子；随着颗粒体积分含量的增加，壁面处固含率也随之增加，同样也是下半根管子壁面处固含率小，上半根固含率大，颗粒体积含量为 8%时壁面处有些部位固含率达到最大值 0.95600。

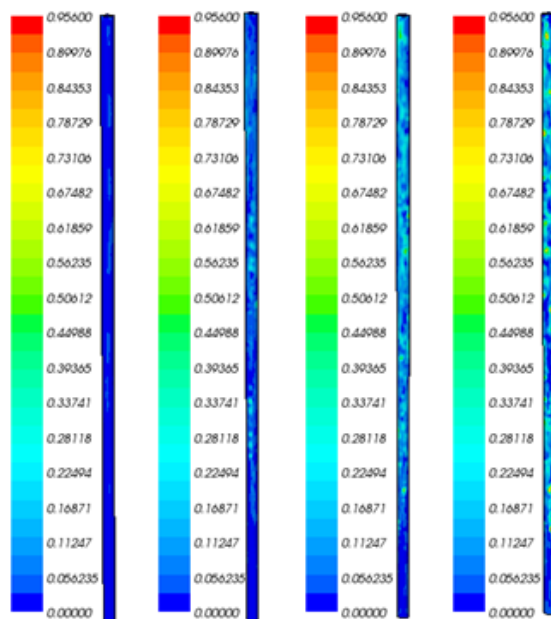


图 4. 速度为 0.5m/s 时的壁面处固含率云图

Fig.4. The solid holdup cloud with speed of 0.5m/s

图 5 出了速度为 1.0m/s 颗粒体积含量为 1%, 3%, 5%, 8%时的壁面处固含率云图。从图中可以看出, 颗粒体积含量为 1%时整根管在轴向上的固含率很小; 颗粒体积含量为 3%时整根管在轴向上的固含率少量出现在上半根管子; 随着颗粒体积分含量的增加, 壁面处固含率也随之增加, 同样也是下半根管子壁面处固含率小, 上半根固含率大, 颗粒体积分含量为 8%时壁面处有些部位固含率达到最大值 0.12349。

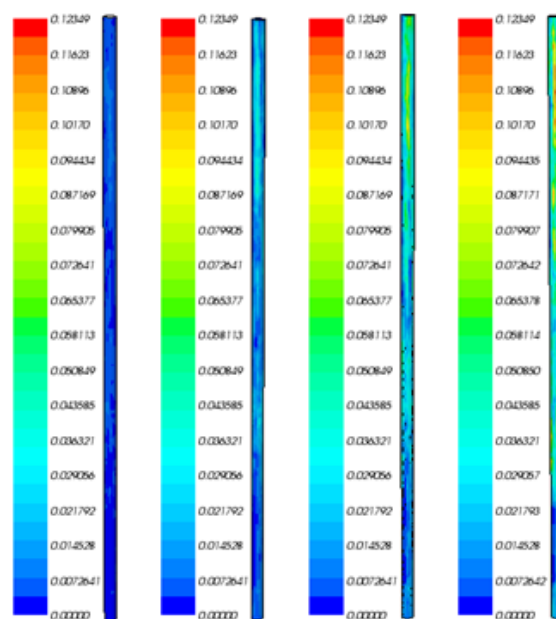


图 5. 速度为 1.0m/s 时的壁面处磨损率云图

Fig.5. The solid holdup cloud with speed of 1.0m/s

图 6 了速度为 1.5m/s 颗粒体积含量为 1%, 3%, 5%, 8%时的壁面处固含率云图。从图中可以看出, 颗粒体积含量为 1%时整根管在轴向上的固含率很小; 颗粒体积含量为 3%时整根管在轴向上的固含率少量出现在上半根管子; 随着颗粒体积含量的增加, 壁面处固含率也随之增加, 同样也是下半根管子壁面处固含率小, 上半根固含率大, 颗粒体积含量为 8%时壁面处有些部位固含率达到最大值 0.07600。

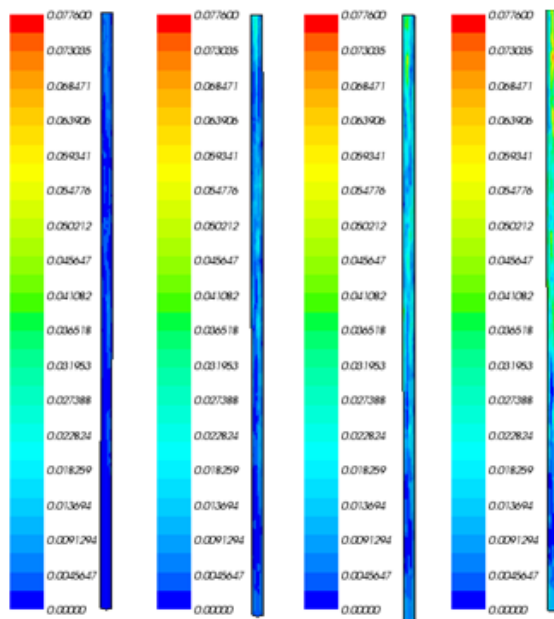


图 6. 速度为 1.5m/s 时的壁面处磨损率云图

Fig.6. The solid holdup cloud with speed of 1.5m/s

3. 2 壁面处磨损率轴向分布云图

图 7 给出了速度为 1.5m/s 颗粒体积含量为 1%, 3%, 5%, 8%时的壁面处磨损率云图。从图中可以看出, 颗粒体积含量为 1%时整根管在轴向上的磨损率很小, 少量出现在上半根管子; 随着颗粒体积含量的增加, 壁面处磨损率也随之增加, 同样也是下半根管子壁面处磨损率小, 上半根磨损率大, 颗粒体积含量为 8%时壁面处有些部位磨损率达到最大值 $1.00E-08\text{kg/m}^2\text{-s}$ 。

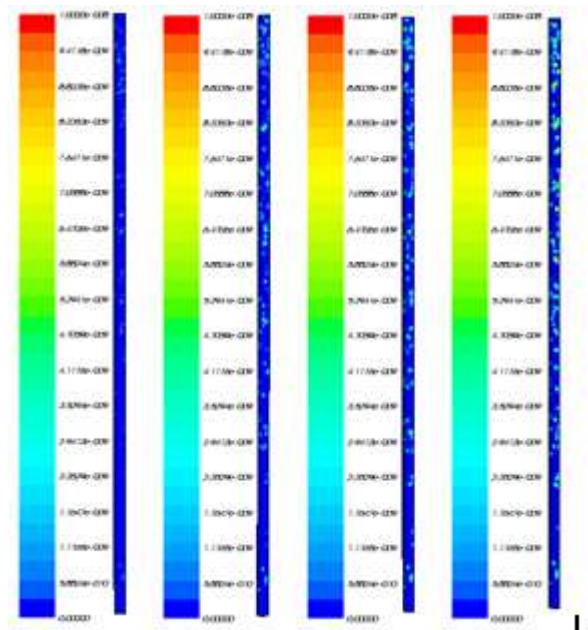


图 7. 速度为 1.5m/s 时的壁面处磨损率云图

Fig.7. The wear rate cloud with speed of 1.5m/s

图 8 给出了颗粒体积含量为 8% 速度为 0.5m/s, 1.0m/s, 1.5m/s 时的壁面处磨损率云图。从图中可以看出, 速度为 0.5m/s 时整根管在轴向上的磨损率很小, 少量出现在上半根管子; 随着速度的增加, 壁面处磨损率也随之增加, 同样也是下半根管子壁面处磨损率小, 上半根磨损率大, 速度为 1.5m/s 时壁面处有些部位磨损率达到最大值 $1.00E-08 \text{kg/m}^2\text{-s}$ 。

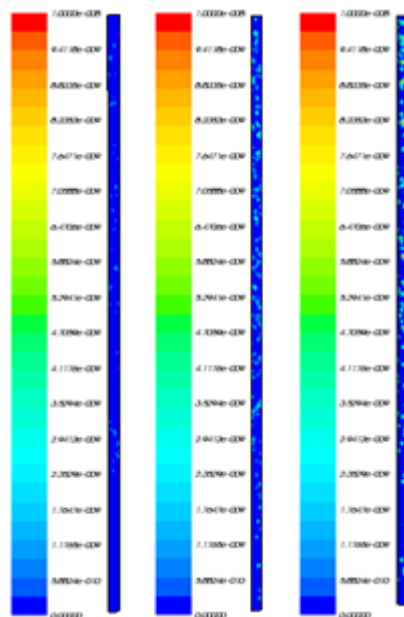


图 8. 颗粒体积分量为 8% 时的壁面处磨损率云图

Fig.8. The wear rate of cloud with particle volume of 8%

3.3 壁面处磨损率与壁面处固含率的轴向分布

图 4 和图 5 分别给出了液体入口速度为 1.0m/s 时壁面处磨损率和壁面处固含率的轴向分布。从图 4 中可以看出, 换热管内壁磨损率沿轴向上是增加的, 且颗粒体积含量不同, 磨损率的增长速度也不相同, 在颗粒体积含量较大时, 增长速度较快。液体和颗粒进入管内以后, 受管壁加热影响, 管内流体温度升高, 流体速度加快, 湍动越来越剧烈, 颗粒撞击壁面的频率提高, 从而对壁面产生一定程度的磨损作用。沿轴向上, 管子上半段内流体温度较高, 速度较快, 湍动较剧烈, 当其加热到饱和温度以后就会产生小气泡, 小气泡的生成和运动加剧了管内流体的湍动程度, 从而导致上半段磨损率较大。从图 5 可以看出, 壁面处固含率沿轴向上逐渐增加, 随颗粒体积含量不同, 固含率的增长速度也不相同, 在颗粒体积含量较大时, 增长速度较快。结合图 4 和图 5 可以看出, 壁面处固含率曲线的轴向分布趋势与壁面处磨损率曲线的轴向分布趋势相同, 说明二者之间存在一定的对应关系。

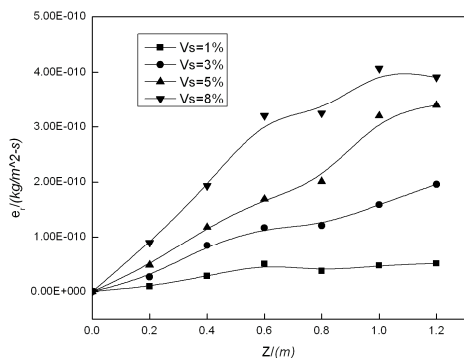


图 9 壁面处磨损率的轴向分布

Fig.9 The axial distribution of wall wear rates

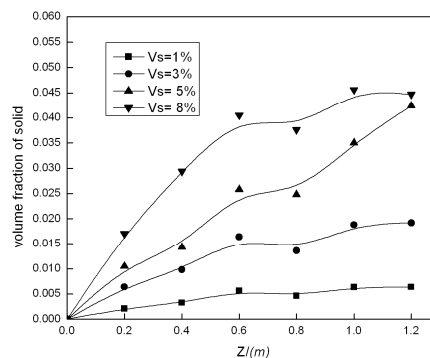


图 10 壁面处固含率的轴向分布

Fig.10 The axial distribution of all solid holdup

图 11 给出了液体入口速度为 0.5m/s、1.0m/s 和 1.5m/s, 固体颗粒体积含量为 5%时壁面处固含率与壁面处磨损率之间的关系曲线。从图中可以看出, 壁面处磨损率随着壁面处固含率增加而呈增加趋势, 且液体入口速度不同时壁面处磨损率受壁面处固含率的影响程度不同, 当液体入口速度相对较低 (如 0.5 m/s) 时, 壁面处磨损率增加较慢; 当液体入口速度相对较高 (如 1.5 m/s) 时, 壁面处磨损率增加较快。由此可以得出, 随着液体入口速度的增加, 壁面处固含率对壁面处磨损率的影响程度越来越大。

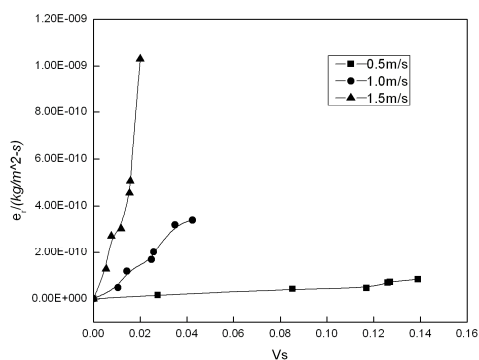


图 11 壁面处固含率对壁面处磨损率的影响

Fig.11 Wall of solid holdup on the wear rate of the wall

3.4 液体入口速度对与壁面处磨损率的影响

图 12 选取了蒸发管中部 $h_1=0.6\text{ m}$ 和蒸发管上部 $h_2=1.0\text{ m}$ 的两个位置及颗粒体积含率为 8% 的条件, 给出了液体入口速度 u_1 与壁面处磨损率的关系曲线。从图中可以看出, 壁面处磨损率随着液体入口速度的增加而增加, 在 $0\sim 0.5\text{ m/s}$ 之间时增加的速度较慢, 在 $0.5\sim 1.5\text{ m/s}$ 之间时增加的速度较快。当液体入口速度低于 0.5 m/s 时, 颗粒撞击壁面的频率和强度均较低, 因此对壁面的磨损小; 随着液体入口速度的加大, 管内湍动强度越来越剧烈, 颗粒撞击壁面的频率和强度加大, 造成壁面的磨损增加。

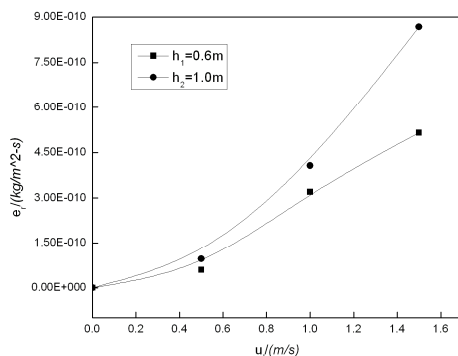


图 12 液体入口速度对壁面处磨损率的影响

Fig.12 Liquid inlet velocity on the wall wear rate

3.5 固体颗粒体积含量对壁面处磨损率的影响

图 13 选取了蒸发管中部 $h_1=0.6\text{ m}$ 和蒸发管上部 $h_2=1.0\text{ m}$ 的两个位置及液体入口速度为 0.5 m/s 的条件, 给出了颗粒体积含量与壁面处磨损率的关系曲线。由图可以看出, 壁面处磨损率随着颗粒体积含量的增加而增大。结合图 5 可知, 壁面处固含率随着颗粒体积含量增加而增加, 又因为壁面处磨损率随着壁面处固含率的增加而增加, 所以壁面处磨损率随着颗粒体积含量的增加而增大。

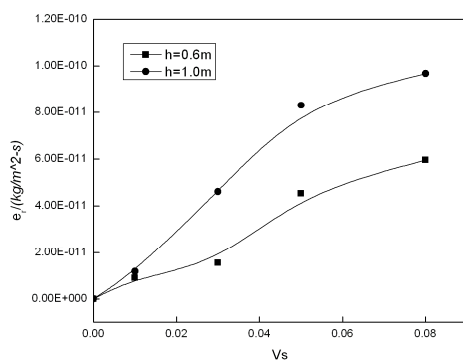


图 13 颗粒体积含量对壁面处磨损率的影响

Fig.13 Particle volume fraction on the wall wear rate

3.6 外加热温度对壁面处磨损率的影响

图 14 选取了固体颗粒体积含量为 5%及液体入口速度为 1.0 m/s 的条件,给出了外加热温度为 406 K 和 424 K 时壁面处磨损率轴向分布曲线。从图中可以看出,在蒸发管中下部 ($0\sim 0.4$ m),外加热温度对壁面处磨损率影响较小;在蒸发管中上部 ($0.4\sim 1.2$ m),外加热温度的影响逐渐增强,随外加热温度升高,壁面处磨损率降低。这是因为外加热温度升高时,蒸发管中上部液体沸腾程度增加,在壁面处产生大气泡,壁面处大气泡的形成阻隔部分颗粒到达壁面处。当颗粒撞击壁面时,大气泡起到了有效的缓冲作用,从而降低了颗粒对壁面的冲击力,因此外加热温度升高时壁面处磨损率降低。所以,在工业操作中,增大加热介质温度,提高传热温差,不仅可以强化蒸发管内的液体蒸发,还可以在在一定程度上降低颗粒对壁面的磨损作用。

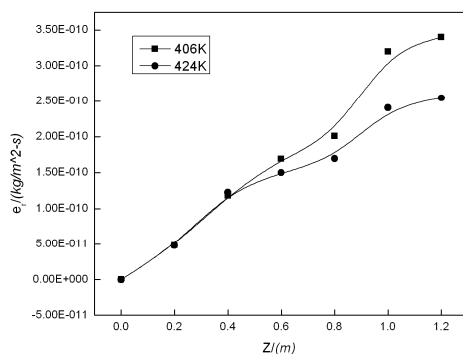


图 14 不同温度下壁面处磨损率的轴向分布

Fig.14 The axial distribution of the wear rate on different temperature

4 结论

- (1) 壁面处磨损率随着蒸发管轴向高度的增加而增大。

(2) 壁面处磨损率随着液体入口速度和固体颗粒体积含量的增加而增加。在其它条件相同时,壁面处磨损率随着固含率的增加而增加,且液体入口速度较高时固含率的影响程度大于液体入口速度较低时。

(3) 外加热温度对蒸发管中下部的磨损率影响较小,对中上部的影响较大;随着外加热温度的升高,壁面处磨损率降低。

5 参考文献:

- [1] 李修伦,刘绍丛,谷俊杰. 汽固液三相循环流化床沸腾传热的研究[J]. 化工学报, 1993, 44(2): 224~229.
- [2] 李修伦, 闻建平, 谷俊杰. 三相流沸腾传热[J]. 高校化学工程学报, 1995, 3(4): 163.
- [3] 李修伦, 闻建平. 垂直管内三相流沸腾传热特性[J]. 化学工程, 1995, 23(4): 50~54.
- [4] 张利斌, 李修伦, 张金钟等. 三相循环流化床中沸腾传热特性[J]. 化工学报, 1999, 50(2): 208~214.
- [5] 张少峰. 三相循环流化床蒸发器防除垢和强化沸腾传热的研究[D]. 天津: 天津大学, 2000.
- [6] 郭烈锦, 亢力强. 风沙跃移中颗粒与多粒径床面碰撞的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 82~84.
- [7] 张夏, 周力行. 考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(2): 140~144.
- [8] 张夏, 周力行. 利用考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型模拟气粒两相水平槽道运动[J]. 自然科学进展, 2006, 16(1): 66-71.
- [9] Bozzinib, Ricottime, Boniardin, et al. Evaluation of erosion-corrosion in multiphase flow via CFD and experimental analysis[J]. Wear, 2003, 255: 237~245.
- [10] 柳成文, 毛靖儒, 俞茂铮. 90°弯管内稀疏气固两相及固粒对壁面磨损量的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 53~57.
- [11] Oka, Y. I., Okamura, K., and Yoshida, T. "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effect of impact parameters on a predictive equation" [J]. Wear, 2005, 259, pp. 95~101.
- [12] Oka, Y. I., and Yoshida, T. "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage" [J]. Wear, 2005, 259, pp. 102~109.
- [13] Forder, A., Thew, M., Harrison, D. An numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves[J]. Wear, 1998, 216, pp. 184~193.
- [14] 张少峰, 李修伦, 刘明言. 新型三相循环流化床蒸发器的实验研究[J]. 化工机械, 2002, 29(6): 317~319.