

降膜吸收 CO₂ 水平管外滴状流的脉动特性数值模拟

贾斌广, 江 稔, 盖殿臣, 田永生, 马晓旭, 杨洛鹏

(山东建筑大学 热能工程学院, 济南 250101)

摘要: 液滴的瞬态行为对强化水平管降膜吸收 CO₂ 装置的性能至关重要。基于 VOF(volume of fluid)方法建立了滴状流降膜吸收 CO₂ 的二维模型, 引入液滴下坠长度与无量纲时间来分析滴状流降膜吸收 CO₂ 过程中的液滴脉动与管间距和雷诺数 Re 的关系。结果表明: 液体在换热管下侧堆积直至形成液滴的过程中, 受到重力、表面张力与惯性的相互作用, 液滴的移动方向出现了多次反转; 液滴脉动过程中, 由于摩擦阻力的存在, 随着无量纲时间的增加, 液滴脉动幅度逐渐减小; 由于管间距的增加提高了液滴在换热管底部交汇时的动能, 导致随着管间距的增加, 液滴的脉动次数与脉动幅度逐渐增加; 在 Re 不断增加的情况下, 液滴滴落速度的减小导致液滴的脉动次数与幅度也逐渐减小。

关键词: 降膜吸收; 滴状流; 脉动幅度; 脉动次数; 管间距

中图分类号: TK 172 文献标志码: A

Numerical simulation of pulsation characteristics of droplet model flow falling film absorbing CO₂ outside the horizontal tubes

JIA Bingguang, JIANG Ren, GAI Dianchen, TIAN Yongsheng, MA Xiaoxu, YANG Luopeng

(School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: The transient behavior of liquid droplets was crucial for enhancing the thermal performance of the horizontal falling film CO₂ absorbers. A two-dimensional mathematical model of the droplet model flow falling film absorbing CO₂ was established based on the volume of fluid(VOF) method. The effects of the Reynolds number Re and the tube spacing on the droplet pulsation in the process of the falling film absorbing CO₂ were analyzed by introducing the drop length and the dimensionless time. The results showed that in the period of the formation for liquid droplets at the bottom of tubes, affected by the gravity, surface tension and inertia, it could be found that there were several reversals in the movement direction of liquid droplets. During the period of the droplet pulsation, due to the frictional resistance, the pulsation amplitude gradually decreased with respect to the dimensionless time. The kinetic energy of droplets increased with the tube spacing increasing when the liquid accumulated at the bottom of tubes, resulting in an increase in both the amplitude and number of pulsation. The amplitude

收稿日期: 2023-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976022); 济南市高校科研带头人工作室项目

第一作者: 贾斌广(1994-), 男, 博士研究生。研究方向: 海水淡化技术。E-mail: jiabinguang78@163.com

通信作者: 杨洛鹏(1973-), 男, 教授。研究方向: 海水淡化技术。E-mail: yangluopeng19@sdjzu.edu.cn

and number of pulsation decreased with the increase of Re due to the droplet velocity decreasing.

Keywords: falling film absorb; droplet model flow; pulsation amplitude; pulsation number; tube spacing

随着以化石燃料燃烧为主的能源消费的增加, CO₂ 的排放量逐年增长, 由此造成的温室效应给人们的生存和生活带来了巨大的威胁, CO₂ 捕集与封存技术应运而生^[1]。降膜法 CO₂ 捕集技术的原理在于通过改变乙醇胺水溶液的温度与压力, 使乙醇胺与 CO₂ 的化学反应朝正方向进行, 放出的反应热被换热管内的低温介质吸收。相比于物理吸收法、膜吸收法和生物固定法, 降膜法 CO₂ 捕集技术具有驱动能耗低、设备结构简单、传热传质效率高、CO₂ 吸收量大等优点, 引起了众多研究者的关注^[2-3]。

液体的管间流动形态对降膜吸收 CO₂ 的性能有着至关重要的影响^[4]。相关研究指出, 雷诺数 Re 在 40~600 时, 滴状流的传质系数约是片状流传质系数的 2 倍^[5]。滴状流更易增加降膜吸收 CO₂ 的原因在于: 滴状流相比于其他流动形态会出现更多的相界面; 液滴间歇性地撞击换热管会加剧液膜的局部不稳定^[6-8]。

相关学者已经对水平管外滴状流的流动形态分类与热质传递进行了研究。Liu 等^[9-10] 通过实验测试将滴状流细分为 7 种类型。Chen 等^[11] 与罗佳等^[12] 分别对滴状流的液膜厚度与传热系数进行了研究, 并得到了经验关联式。武金燕^[13] 与杜雪平等^[14] 分别以海水和制冷剂为研究对象, 研究了液

滴撞击换热管后的拓扑结构。然而, 目前的研究重点多集中于液滴对换热管的撞击与铺展阶段, 对液滴在换热管下侧形成过程的描述较少, 仅有的相关研究也多集中于液滴的分离长度、直径与滴落速度方面^[15-17]。其原因可能是, 在液滴撞击与铺展过程中, 存在着剧烈的动量变化, 从而导致热质传递量在整个滴状流 CO₂ 吸收过程中最大^[8]。然而, 根据 Zheng 等^[16] 的研究, 液滴对换热管的冲击和扩散仅占整个滴状流周期的 30%~40%。因此, 对占据液滴生命周期大部分时间的液滴形成阶段的研究, 有助于从科学的角度透彻地认识滴状流的热质传递过程, 并通过加速液滴滴落来进一步提升水平管降膜吸收 CO₂ 装置的性能。

为了克服上述研究的缺陷, 本研究基于 VOF (volume of fluid) 方法建立了滴状流降膜吸收 CO₂ 的二维数学模型来了解降膜吸收 CO₂ 水平管外滴状流的脉动特性, 并着重分析了液滴脉动特性与管间距和 Re 的关系。

1 数值模拟方法

1.1 物理模型

图 1 显示了水平管降膜吸收 CO₂ 装置的物理模型。图中, w , H , S , D , L 分别表示布液孔直

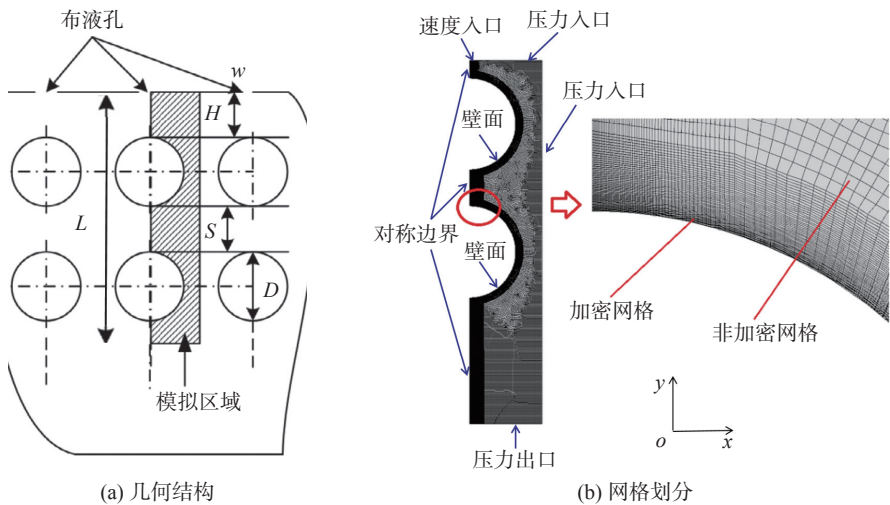


图 1 物理模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of the physical model

径、布液高度、管间距、管直径与模型的总高度。为了消除布液口高度对滴状流的影响，物理模型中包含了两根直径为 25.4 mm 的铜管，其中，上侧的管作为布液管，下侧的管作为换热管。考虑到水平管降膜吸收 CO₂ 装置的结构对称性，为节省计算时间，仅选择阴影区域进行模拟。模型结构参数列于表 1 中。

采用以下假设模拟水平管外的二维流动过程^[18-19]：a. 滴状流的模拟采用层流模型；b. 液体被认为是不可压缩的非牛顿流体；c. 不考虑液滴脉动过程中的质量传递；d. 界面处忽略气相剪切作用，相界面光滑。

表 1 物理模型的几何参数

Tab.1 Geometrical parameters of the physical model

参数	数值/mm
<i>H</i>	5
<i>D</i>	25.4
<i>S</i>	10, 20, 30
<i>L</i>	95.8, 105.8, 115.8
<i>w</i>	1

1.2 控制方程

模拟不可压缩的液滴流动，需求解如下连续性与 Navier-Stokes 方程^[20]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

(1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \mu [\nabla \cdot (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_\sigma$$

(2)

式中： ρ 表示流体密度，kg/m³； t 表示时间，s； $\mathbf{v}$ 表示速度矢量，m/s； μ 表示流体动力黏度，Pa·s； P 表示流体压力，Pa； $\mathbf{g}$ 表示重力加速度，m/s²； $\mathbf{F}_\sigma$ 表示动量源项，kg/(s·m²)。

在 VOF 模型中，网格单元中液相的体积分数范围为 0~1。体积分数为 0.5 的等值线被认为是乙醇胺水溶液与 CO₂ 气体的相界面。每个网格中的流体物性如下：

$$\rho = (1 - \alpha_w)\rho_g + \alpha_w\rho_w$$

(3)

$$\mu = (1 - \alpha_w)\mu_g + \alpha_w\mu_w$$

(4)

式中： α_w 表示液相率； ρ_g 表示 CO₂ 气体的密度，kg/m³； ρ_w 表示乙醇胺水溶液的密度，kg/m³； μ_g 表示 CO₂ 气体的动力黏度，Pa·s； μ_w 表示乙醇胺水溶液的动力黏度，Pa·s。

考虑到表面张力对气液界面的影响，连续表面张力(CSF)模型以体积力源项的形式加入动量方程中，如式(5)~(6)所示。

$$\mathbf{F}_\sigma = \sigma \frac{\rho \kappa \nabla \alpha_w}{0.5(\rho_w + \rho_g)}$$

(5)

$$\kappa = \nabla \cdot \left(\frac{|\nabla \alpha_w|}{|\mathbf{n}|} \right)$$

(6)

式中： σ 表示表面张力，N/m； κ 表示界面曲率； $\mathbf{n}$ 表示方向向量。

CSF 模型也可以用来计算壁面与液体的壁面附着力。气液界面的法向量为

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos \theta_D + \mathbf{t}_w \sin \theta_D$$

(7)

式中： θ_D 表示动态接触角； $\mathbf{t}_w$ 表示壁面的单位切向量； $\mathbf{n}_w$ 表示壁面的单位法向量。

本模拟采用 Blake 提出的基于固-液-气三相区域内分子统计动力学理论的动态接触角模型^[20]：

$$U = 2\kappa^0 \lambda \sinh \left[\frac{\sigma(\cos \theta_0 - \cos \theta_D)}{2nk_B T} \right]$$

(8)

式中： U 表示接触线速度，m/s； λ 表示乙醇胺水溶液分子的平均直径，m； θ_0 为静态接触角； n 表示每单位吸附位点的数量； k_B 表示玻尔兹曼常数； T 表示液膜温度，取 333 K； κ^0 表示水分子的特征频率。

1.3 边界条件与物性参数

模型的边界条件如图 1 所示，顶部左侧为 0.5 mm 宽的液体速度入口，顶部其余区域设置为压力入口。乙醇胺水溶液(质量分数为 20%)的入口速度分别设置为 0.135 m/s ($Re=160$)、 0.204×10^{-2} m/s ($Re=240$)与 0.135 m/s ($Re=320$)，以保证入口 Re 低于 Hu 等^[21]所给出的滴状流与滴/柱状流临界 Re 值。模型的左边界为对称边界，底部为压力出口。换热管设置为无滑动壁条件，换热管与液体的静态接触角 θ_0 为 3°。模型的物性参数如表 2 所示。

表 2 模型中材料的物性参数

Tab.2 Parameters of material's physical properties in model

名称	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比定压热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	动力黏度/ (Pa·s)	表面张力/ (N·m ⁻¹)
乙醇胺水溶液	1002	0.51	3774	6.67×10^{-3}	0.066
CO ₂	2.67	0.019	840	1.49×10^{-5}	—

1.4 网格划分与无关性验证

乙醇胺水溶液的液滴在换热管外的流动过程

中受表面张力的影响较大, 且较低的 Re 使液相率梯度出现在换热管近壁面处, 如图 1 所示。在换热管外侧的近壁面, 采用精度较高、适应性较强的四边形结构化网格进行网格加密。在近壁面处设置 20 层厚度为 0.02 mm 的加密网格。在非加密区域, 网格的厚度为 0.4 mm。为了保证模拟精度较高的同时加快计算速度, 以管间距 30 mm、 $Re=320$ 为例, 在不同无量纲时间 t^* 下, 对 4 种不同网格数量方案计算得到的液滴下坠长度进行了比较, 如图 2 所示。随着网格数量的增加, 液滴下坠长度逐渐增加, 但当网格数量大于 26 669 时, 模拟精度并没有得到显著提高。因此, 采用 26 669 个网格的模型就足以获得后续模拟的准确结果。

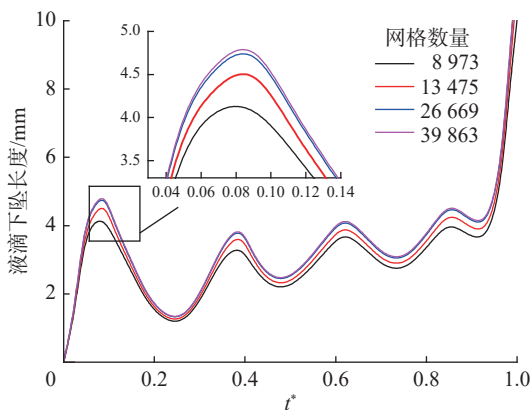


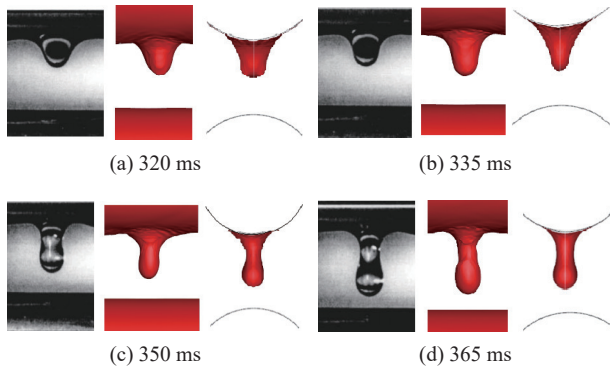
图 2 液滴下坠长度随网格数量的变化

Fig. 2 Variation of the droplet drop length with the number of grids

2 模型验证

实验和模拟得到的液滴形状比较如图 3 所示。在图 3(a)与图 3(c)中, 模拟得到的液滴形状并非左右完全对称, 会产生一定的偏移。造成这种现象的原因可能在于: 模拟中液滴的形状受到了气体流动的影响, 而基于冷态的相关实验忽略了气体流动对液滴形状的影响。从整体来说, 数值模拟结果与 Killion 等^[22] 的实验结果吻合良好。

图 4 展示了当 $Re=158$ 时, 单根管液膜厚度的模拟值与 Zheng 等^[16] 得到的结果的对比。从图 4 中可以发现, 模拟得到的液膜厚度与 Zheng 等^[16] 的结果相吻合。模拟结果偏薄的原因可能在于实验值测量的是管外液膜厚度的瞬时值, 而模拟得到的是受到重力影响的平均值。综合图 3 与图 4 的结果可以得到, 模型能够有效地预测水平管降膜吸收 CO₂ 装置滴状流的流动过程。



左: 实验结果; 中: 三维模拟结果; 右: 二维模拟结果

图 3 实验和模拟所得液滴形状的比较

Fig. 3 Comparison of droplet shapes obtained from the experimental and simulated data

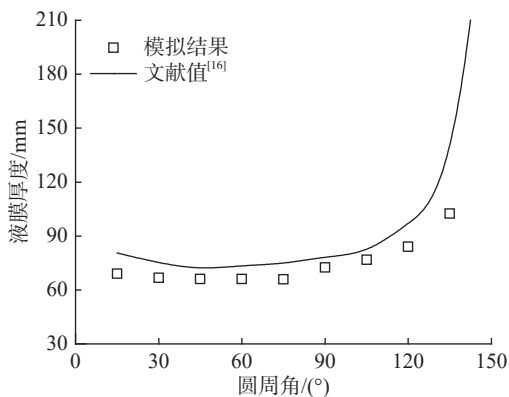


图 4 $Re=158$ 时实验和模拟所得液膜厚度的比较

Fig. 4 Comparison of the liquid film thickness obtained from the experimental and simulated data at $Re=158$

3 结果与讨论

3.1 液滴脉动过程中的拓扑结构

图 5 以管间距 30 mm、 $Re=160$ 为例, 展示了乙醇胺水溶液的液滴在脉动过程中液滴内部的压力和速度分布。从图 5 可以发现, 液体在换热管下侧堆积直至形成液滴的时间段内, 液滴的运动方向并不总是向下, 而是沿着竖直方向出现了多次反转, 这表明在液滴的形成过程中存在脉动。液滴脉动产生的原因可以归因于重力、表面张力与惯性的相互作用。如图 5(a)所示, 当液滴完全覆盖换热管后, 由于液滴的动能并不能完全被摩擦阻力消耗, 液滴在换热管外逐渐堆积并产生下坠的趋势, 在液滴的下部形成了高压区。随着换热管下侧液滴的逐渐堆积, 液滴在换热管底部碰撞后发生移动方向上的变化, 这导致液滴内部产生了涡流。受到重力与惯性的作用, 液滴的持续下落导致液滴的表面积逐渐增加, 进而使得重力

与表面张力逐渐达到平衡状态。在惯性作用下，液滴继续减速下落，直至在如图 5(b) 所示的 190 ms 处达到液滴最大下坠长度。此时，液滴的表面积扩张到最大，在吊坠状液滴的头部形成了高压区，在液颈处形成了负压区。如图 5(b) 和 5(c) 所示，吊坠状液滴内部产生的压力差促使液滴出现从高压区向低压区移动的趋势。如图 5(c) 所示，随着液滴逐渐克服重力向上收缩，液滴的表面张力随着表面积的减小而减小，表现为液滴底部的高压区和液滴上侧的低压区面积逐渐缩

小。在液滴回缩的过程中，表面张力与重力逐渐平衡，但在惯性作用下液滴仍然向上作减速运动，并在液滴上侧沿着换热管切向方向移动。如图 5(d) 所示，当液滴收缩到最高位置时，液滴内部的压力差逐渐减小并趋近于 0，液滴完成了一次脉动过程。如图 5(d)~5(f) 所示，在上一次脉动过程中，受到惯性的作用，液滴的向上收缩导致表面张力小于重力。因此，在液滴收缩到最高点

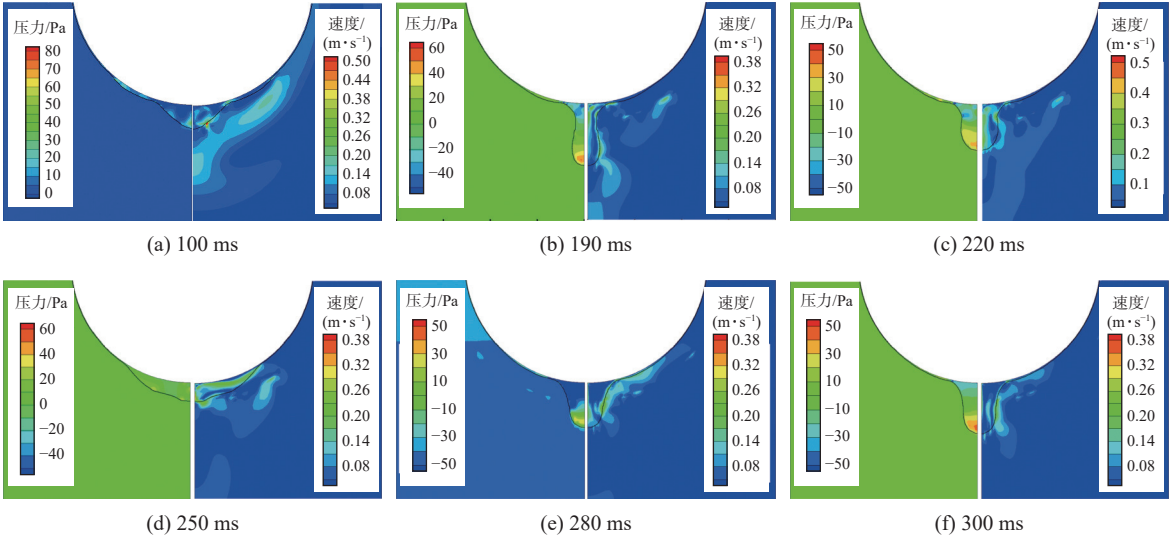


图 5 管间距 30 mm、 $Re=160$ 时液滴脉动过程中的压力与速度分布

Fig.5 Pressure and velocity distributions during the droplet pulsation process at a tube spacing of 30 mm and $Re=160$

3.2 管间距对液滴脉动的影响

为了更好地反映换热管间距对液滴脉动情况的影响，引入了液滴的下坠长度(定义为下坠液滴的底部到换热管底部的距离)、无量纲时间(定义为所处时刻液滴脉动过程的完成度)和液滴脉动幅度(定义为液滴脉动一次液滴下坠长度的变化量)来分析液滴形成周期内的脉动强度。无量纲时间计算如下：

$$t^* = (t - t_{ini}) / (t_{end} - t_{ini}) \tag{9}$$

式中： t 表示时间，s； t_{ini} 表示液滴完全覆盖换热管的时间，s； t_{end} 表示液滴完全滴落的时间，s。

图 6 展示了 $Re = 160$ 时液滴下坠长度与管间距的关系。从图 6 可以发现，在整个液滴形成一滴落的过程中，液滴的下坠长度会随着 t^* 的变化出现脉动的现象，且随着 t^* 的增加，液滴的下坠长度逐渐减弱。此外，随着管间距的增加，液滴的脉动次数逐渐增加，其原因可能在于换热管间距的增

加导致液滴的动能增加。

图 7 展示了管间距对液滴幅度的影响。从图 7 可以发现，随着液滴脉动次数的增加，液滴脉动的幅度逐渐减小，以管间距 30 mm 为例，液滴 6 次脉动的幅度分别为 6.48，3.72，3.15，2.40，

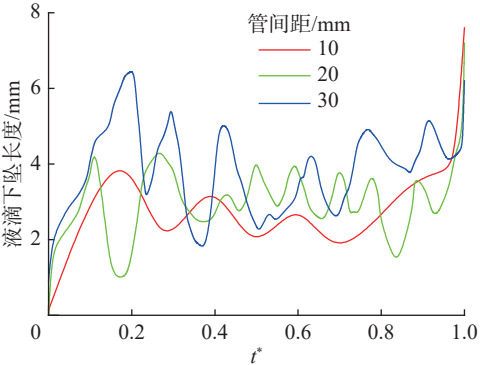


图 6 $Re=160$ 时液滴下坠长度与管间距的关系

Fig. 6 Relationship between the droplet drop length and the tube spacing at $Re=160$

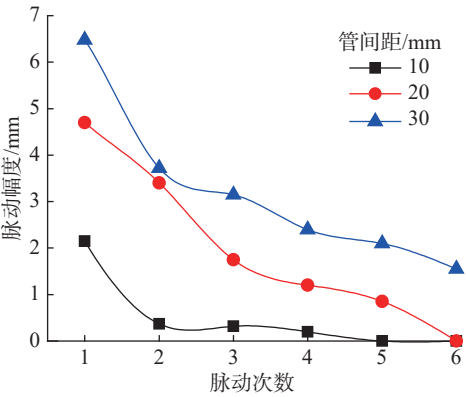


图 7 $Re=160$ 时液滴脉动幅度与管间距的关系

Fig. 7 Relationship between the droplet pulsation amplitude and the tube spacing at $Re=160$

2.10, 1.55 mm, 脉动幅度的减少达到 75.9%。此现象产生的原因在于: 摩擦阻力使得液滴在脉动过程中动能逐渐减小, 进而导致液滴的脉动幅度逐渐减弱。此外, 随着管间距的增加, 液滴的脉动幅度逐渐增加, 其原因可能在于液滴在换热管

底部交汇时, 动能随着管间距的增加而增加。

3.3 Re 对液滴脉动的影响

图 8 展示了 Re 对液滴脉动的影响。从图 8 可以得到, 随着 t^* 的增加, 液滴的下坠长度出现多次的波动, 且随着 Re 的增加, 液滴下坠长度的变化逐渐趋于平缓, 即表明随着 Re 的增加, 液滴的脉动幅度逐渐减小。这是因为, 随着 Re 的增加, 液滴滴落速度逐渐减小^[10]。较低的液滴动能导致液滴在换热管下部的惯性较小, 减小了液滴的下坠长度。

为了更好地明晰 Re 对液滴脉动次数的影响, 将液滴的脉动次数与 Re 的关系展示在图 9 中。如图 9 所示, 整体来说, 液滴的脉动次数会随着 Re 的增加而逐渐减小。以管间距 30 mm 为例, 当 Re 分别为 160, 240, 320 时, 液滴的脉动次数分别为 6, 5, 4 次。其原因可能在于: Re 的增加导致换热管下侧液滴堆积的速度加快, 液滴在较短的时间内即可滴落。

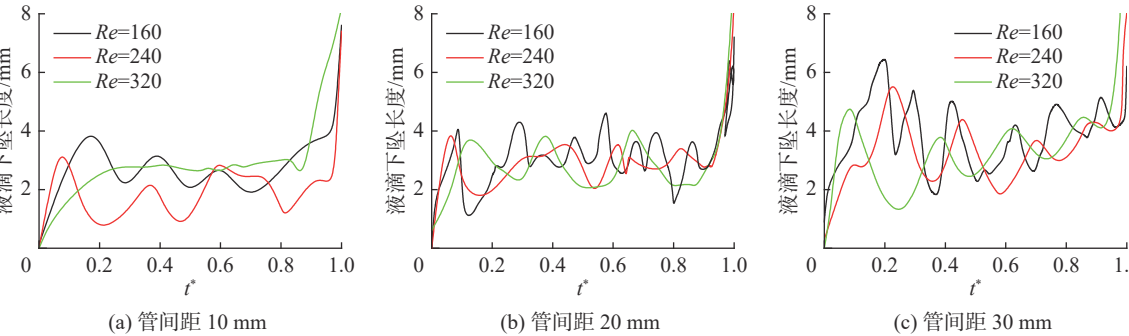


图 8 液滴下坠长度与 Re 的关系

Fig.8 Relationship between the droplet drop length and Re

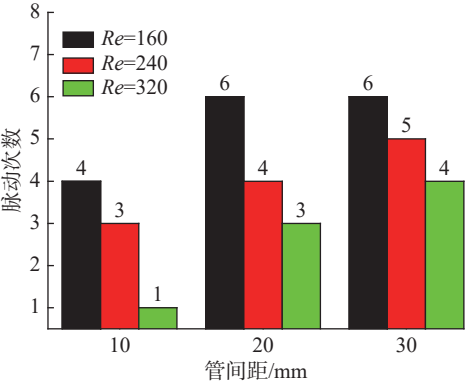


图 9 液滴脉动次数与 Re 关系

Fig.9 Relationship between the droplet pulsation number and Re

4 结 论

基于 VOF 方法, 建立了滴状流降膜吸收 CO₂

目前建立的数学模型并未考虑能量的传递, 未来的研究中, 还需对滴状流降膜吸收 CO₂ 过程

中的热质传递进行进一步分析。

参考文献:

- [1] 叶航, 刘琦, 彭勃. 基于二氧化碳驱油技术的碳封存潜力评估研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(2): 107–116.
- [2] 赵林林, 丁玉栋, 朱恂, 等. 乙醇胺水溶液降膜吸收 CO₂ 的数值研究[J]. *热能动力工程*, 2016, 31(9): 27–32.
- [3] 赵林林. 降膜吸收 CO₂ 界面现象数值研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [4] ZHANG F F, GUO L H, DING Y D, et al. Flow pattern and CO₂ absorption in a falling film reactor with mixed aqueous solution of ionic liquid and MEA[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 138: 583–590.
- [5] HOSSEINIA S M, NAGHASHZADEGAN M, KOUHIKAMALI R. CFD simulation of water vapor absorption in laminar falling film solution of water-LiBr-drop and jet modes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 860–873.
- [6] DING H B, XIE P, INGHAM D, et al. Flow behaviour of drop and jet modes of a laminar falling film on horizontal tubes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 929–942.
- [7] ZHENG Y, LAN Z, CAO K J, et al. A new insight of temperature distribution on superhydrophilic surface horizontal tubes falling film at low spray density[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, 91: 17–22.
- [8] SUBRAMANIAM V, CHANDRASEKARAN S, GARIMELLA S. A 2-D numerical analysis of heat and mass transfer in lithium bromide-water falling films and droplets[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 177: 121518.
- [9] LIU S L, LIANG G T, LI C, et al. The falling, necking, and break-up of droplet between horizontal tubes with low Reynolds number[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, 142: 103717.
- [10] LIU S L, SHEN S Q, MU X S, et al. Experimental study on droplet flow of falling film between horizontal tubes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 118: 10–22.
- [11] CHEN X S, WANG J, LU T, et al. Three-dimensional film thickness distribution of horizontal tube falling film with droplet and sheet flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, 148: 103933.
- [12] 罗佳, 吴双应, 肖兰, 等. 撞击速度对连续液滴撞击热圆柱壁面局部传热特性影响的实验[J]. *化工学报*, 2022, 73(7): 2944–2951.
- [13] 武金燕. 微纳结构表面滴状流流动传热特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [14] 杜雪平, 陈志杰, 牛玉振. 水平管外混合制冷剂的降膜滴状流动数值研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(8): 2060–2067.
- [15] PRUDVIRAJ K, DESHMUKH S, SUPRADEEPAN K. Experimental investigation on falling-film droplet flow behavior on varied horizontal tube spacing[C]//Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- [16] ZHENG Y, YANG S, ZHAO X D, et al. The transient flow mechanism and intermittent film thickness evolution regulation of droplet mode for horizontal tube falling film[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2021, 89: 151–160.
- [17] 胡苇航, 贾志海, 潘桂暖, 等. 液滴在倾斜表面上的固化特征研究[J]. *能源研究与信息*, 2023, 39(1): 47–55.
- [18] ZHAO C Y, QI D, JI W T, et al. A comprehensive review on computational studies of falling film hydrodynamics and heat transfer on the horizontal tube and tube bundle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 202: 117869.
- [19] YANG L P, LIU Y, YANG Y, et al. Microscopic mechanisms of heat transfer in horizontal-tube falling film evaporation[J]. *Desalination*, 2016, 394: 64–71.
- [20] BLAKE T D. The physics of moving wetting lines[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 299(1): 1–13.
- [21] HU X, JACOBI A M. The intertube falling film: Part 1—Flow characteristics, mode transitions, and hysteresis[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1996, 118(3): 616–625.
- [22] KILLION J D, GARIMELLA S. Simulation of pendant droplets and falling films in horizontal tube absorbers[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2004, 126(6): 1003–1013.

(编辑: 丁红艺)