

纳米流体毛细弯液蒸发界面热质迁移特性分析

林 俊,陈 威

(上海海事大学 商船学院 上海 201306)

摘 要: 基于增广杨拉普拉斯方程的毛细弯液面薄膜蒸发区的传热传质模型,数值分析了过热度及纳米流体的工质对毛细弯液面薄膜蒸发区热质迁移特性的影响。结果表明,过热度增大导致薄膜区范围减小,蒸发界面热流密度增大,薄膜区总换热量增大,但同时减弱了薄膜界面的稳定性。在传统流体工质中添加合适的纳米颗粒,纳米流体运动粘性系数随体积分率增大而减小,导热系数随体积分率增大而增大,影响其传热传质效果。较大体积分率的纳米流体,其薄膜厚度更小,薄膜区热流密度和蒸发质量流率更大,但同时蒸发界面的稳定性减弱。不同种类的纳米流体对毛细弯液蒸发界面的影响也较为明显,具有较低运动粘性系数和较高导热系数的纳米流体能够迁移更多的热量。

关 键 词: 毛细弯液面; 纳米流体; 薄膜蒸发; 传热传质

中图分类号: TQ021.3

文献标识码: A

符号说明

A ——扩散系数 J

h_{fg} ——蒸发潜热 J/kg

h ——蒸发界面换热系数 W/K

K ——气液界面的曲率

k ——导热系数 $W/(m \cdot K)$

m_e ——界面蒸发质量流率 $kg/(m^2 \cdot s)$

m_x ——薄膜区液体质量流率 $kg/(m^2 \cdot s)$

p_c ——毛细压力 N/m^2

p_d ——脱离压力 N/m^2

P_l ——液相压力 N/m^2

p_v ——气相压力 N/m^2

Q ——薄膜区总换热量 W/m

q ——蒸发界面热流密度 W/m^2

T ——温度 K

u —— x 方向速度 m/s

x —— x 方向 μm

y —— y 方向 μm

μ ——动力粘性系数 $N \cdot s/m^2$

δ ——薄膜厚度 μm

ρ ——密度 kg/m^3

ν ——动力粘性系数 $\mu m^2/s$

Φ ——体积分率, %

上下角标

* ——无量纲数

f ——基液

l ——液体

nf ——纳米流体

p ——纳米颗粒

s ——汽液界面

v ——气体

w ——壁面

引 言

毛细驱动相变传热技术是利用毛细通道中液体工质的相变来迁移热量的,因其具有传热强、热阻低、尺寸小、布置灵活等特点,在能源、化工等各大工程领域中有着日益广泛的应用^[1]。毛细驱动相变装置内,液体工质流动的驱动力来自微通道内毛细弯液面提供的抽吸力。毛细弯液蒸发界面的热质迁移特性对毛细驱动相变装置传热性能以及稳定性的影响至关重要。同时,毛细弯液蒸发界面的热质迁移特性也是传递现象理论研究领域的一个经典问题。

纳米流体是指以一定的方式和比例将纳米级的固体颗粒添加在传统的液体换热工质中,从而形成一种新型的传热工质。纳米流体的概念最早由美国 Argonne 国家实验室的 Choi 于 1995 年提出^[2],由于纳米颗粒自身具有的各种特性,其行为更接近于液体分子,因而不会像毫米或微米级粒子易产生磨损或堵塞等不良结果。纳米流体在提高流体导热系数,强化对流以及沸腾换热等传热传质领域都具有显著的效果。图 1 显示了毛细弯液蒸发界面的物理模型。

由于所受的控制力和蒸发机制的不同,弯液面延展薄膜区可分为 3 个区域^[3]:(1) 吸附区,主要受分子间吸引力控制,蒸发被基本抑制;(2) 薄膜蒸发区,主要受毛细压力和脱离压力共同作用,蒸发强

收稿日期:2013-12-23; 修订日期:2014-03-11

基金项目:国家自然科学基金(51276107);上海市教委创新科研课题(14ZZ142);交通部应用基础项目(2013319810150)

作者简介:林 俊(1989-),男,江苏启东人,上海海事大学商船学院硕士研究生。

烈,为延展薄膜区主要蒸发区域,80%的蒸发发生在该区域;(3)固有弯液面区,毛细力为主要控制力。

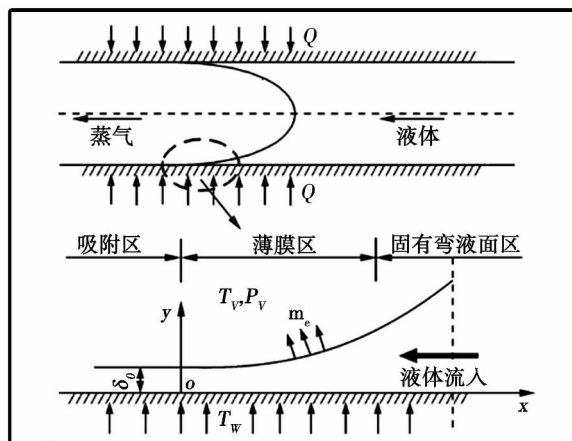


图1 毛细通道弯液蒸发界面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a bent liquid surface evaporating interface in a capillary channel

本研究针对纳米流体为工质的毛细弯液蒸发界面的热质迁移模型出发,利用数值分析,观察过热、纳米流体体积积分率以及纳米流体工质物性对毛细弯液薄膜蒸发界面热质迁移特性的影响。

1 毛细弯液蒸发界面传热传质模型

1.1 增广杨拉普拉斯方程

1976年,Wayner等研究薄膜蒸发热质迁移过程中提出了增广杨拉普拉斯模型^[4]:

$$P_v - P_l = P_c + P_d \quad (1)$$

该式表明了气液界面两侧的压力平衡关系。式中, P_l 、 P_v —液体侧和蒸汽侧的压力; P_d —脱离压力,可表示如下:

$$P_d = \frac{A}{\delta^3} \quad (2)$$

P_c —毛细压力,以液体表面张力 σ 和曲率 K 的乘积表示:

$$P_c = \sigma K \quad K = \frac{\delta''}{(1 + \delta'^2)^{1.5}} \quad (3)$$

式中: A —扩散常数,取值为 10^{-19} J; $6\pi A$ —Hamaker常数^[1]; δ —液膜厚度; δ'' 、 δ' —液膜厚度在长度方向的二阶和一阶导数。由式(1)~式(3)可知,当蒸汽侧压力不变时,液体侧压力也表示为关于 δ 的函数。

1.2 薄膜蒸发区的动量及质量传输模型

根据薄膜蒸发区液体工质流动特性,做出以下的假设^[1]:

- (1) 流动为低雷诺数流动,不考虑对流项;
- (2) 薄膜区长度方向上远大于厚度方向,忽略 y 方向的动量方程;
- (3) 为无滑移壁面边界条件;
- (4) 不考虑气液界面处的剪切应力。

根据牛顿流体润滑理论^[5-6],可得到薄膜区动量方程如下:

$$\frac{dP_l}{dx} = \mu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (4)$$

无滑移壁面边界条件:

$$\begin{cases} u = 0 & y = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial y} = 0 & y = \delta \end{cases}$$

式中: x 、 y —薄膜长度方向和厚度方向的坐标; u —流体在 x 方向的流动速度; μ —流体的动力黏性系数。坐标选取如图1所示。

由式(4)及其边界条件可得出薄膜区速度方程:

$$u = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP_l}{dx} \right) \left(\frac{y^2}{2} - \delta y \right) \quad (5)$$

薄膜区质量流率:

$$m_x = \rho_l \int_0^\delta u dy = -\frac{\delta^3}{3\nu} \left(\frac{dP_l}{dx} \right) \quad (6)$$

根据质量守恒,分析图1可得薄膜区气液界面液体蒸发质量流率

$$m_e = -dm_x/dx \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得局部液体压力梯度和界面质量流率的关系:

$$m_e = \frac{d}{dx} \left(\frac{\delta^3}{3\nu} \frac{dP_l}{dx} \right) \quad (8)$$

式中: ν —流体的运动粘性系数。

由此可得蒸发界面处的热流密度:

$$q = m_e \cdot h_{fg} = h_{fg} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{\delta^3}{3\nu} \frac{dP_l}{dx} \right) \quad (9)$$

式中: h_{fg} —液体工质的汽化潜热。

根据傅里叶定律,薄膜区液膜传热的热流密度可表示为:

$$q = k_l \frac{T_w - T_s}{\delta} \quad (10)$$

气液界面温度与蒸汽温度关系表示为^[7-8]:

$$T_s = T_v \left(1 + \frac{\Delta P}{\rho_v h_{fg}} \right) \quad (11)$$

式中: $\Delta P = P_v - P_l$ 。

在薄膜区, 热流密度以显热形式从加热壁面传递到气液界面; 在气液界面处, 热流密度以液体蒸发潜热的形式传递热量。在稳定的传热条件下, 两个传热过程所传递的热流密度应相等。

联立式 (1)、式 (2)、式 (3)、式 (9)、式 (10) 和式 (11) 即得:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\delta^3}{3\nu} \frac{d(P_c + P_d)}{dx} \right) = - \frac{k_l}{h_{fg}} \frac{[T_w - T_v(1 + (P_c + P_d)/\rho_v h_{fg})]}{\delta} \quad (12)$$

求解上式即可得出毛细弯液面薄膜蒸发区热质迁移特性及其影响因素。

1.3 纳米流体的输运参数

根据 Maxwell 理论^[9], 固液两相混合物的导热系数与固液两相各自的导热系数有关。当液相导热系数一定时, 固相导热系数越大, 混合物的导热系数越大。

Maxwell 针对球形纳米颗粒纳米流体导热系数的计算式为^[10]:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (13)$$

式中: k_p 、 k_f 、 k_{nf} —固体纳米颗粒、纳米流体基液以及纳米流体的导热率。

纳米流体的密度公式:

$$\rho_{nf} = \rho_f \cdot (1 - \phi) + \rho_p \cdot \phi \quad (14)$$

根据 Einstein 公式^[11], 纳米流体动力黏性系数以及运动粘性系数:

$$\mu_{nf} = \mu_f \frac{1 + 0.5\phi}{(1 - \phi)^2} \quad (15)$$

$$\nu_{nf} = \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \quad (16)$$

表 1 为相关纳米流体的物性参数计算结果。

表 1 相关纳米流体物性参数

Tab. 1 Physical parameters of relevant nano fluids

纳米 粒子	$\phi /$ %	$\rho_{nf} /$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\nu_{nf} /$ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$k_{nf} /$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Cu	2	1157.796	4.542×10^{-7}	0.689
	4	1317.190	4.201×10^{-7}	0.731
CuO	4	1224.000	4.521×10^{-7}	0.727
Al ₂ O ₃	4	1118.800	4.946×10^{-7}	0.717
SiO ₂	4	1026.800	5.398×10^{-7}	0.673

2 计算方法

在毛细弯液薄膜蒸发区, 脱离压力 P_d 沿长度方向不断减小, 毛细压力 P_c 随界面曲率的变化而变化。薄膜蒸发区中, 曲率变化较小, 由式 (2)、式 (3) 可知, 毛细压力变化较小, 影响较弱, 而脱离压力 P_d 的变化则较为明显, 同时脱离压力 P_d 的绝对值远大于毛细压力 P_c , 故脱离压力 P_d 对于薄膜蒸发区液体流动起主要作用^[12]。因此, 为探究影响毛细弯液薄膜蒸发界面热质迁移特性的主要因素, 毛细压力 P_c 可忽略, 对计算结果无明显影响。由式 (12) 可得:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\delta^3}{3\nu} \frac{dP_d}{dx} \right) = - \frac{k_l}{h_{fg}} \frac{[T_w - T_v(1 + P_d/\rho_v h_{fg})]}{\delta} \quad (17)$$

将式 (2) 代入 (17), 即得:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{3A\delta^3}{\delta^4} \frac{d\delta}{dx} \right) = \frac{k_l}{h_{fg}} \frac{[T_w - T_v(1 + A/\delta^3/\rho_v h_{fg})]}{\delta} \quad (18)$$

引入特征系数:

$$B = k_l \nu (T_w - T_v) / A h_{fg} \quad (19)$$

$$C = k_l \nu / \rho_v h_{fg}^2 \quad (20)$$

则式 (18) 化简为:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dx} \right) = \frac{B - C\delta^{-3}}{\delta} \quad (21)$$

在稳定的传热条件下, 毛细弯液面吸附区因液相蒸发潜热所传递的热流密度 q 为零, 气液界面温度 T_s 等于加热壁面温度 T_w , 由式 (9) 和式 (21) 可得毛细弯液面吸附区的液膜厚度, 即 $x = 0$ 处, 薄膜蒸发区的初始厚度:

$$\delta_0 = \left(\frac{AT_v}{\rho_v h_{fg} (T_w - T_v)} \right)^{1/3} = \left(\frac{C}{B} \right)^{1/3} \quad (22)$$

在吸附区, 因加热壁面与蒸汽相温差所传递的热流密度:

$$q_0 = k_l (T_w - T_v) / \delta_0 \quad (23)$$

则得薄膜厚度与薄膜蒸发界面热流密度的无量纲参数:

$$\delta^* = \frac{\delta}{\delta_0}, \mu^* = \frac{q}{q_0}, x^* = \frac{x}{\delta_0} \quad (24)$$

在边界条件 $x = 0$, $\delta = \delta_0$, $\mu \delta / dx = d_0$ 下, 通过解式 (21)、式 (22) 和式 (24), 可得薄膜区厚度无量

纲参数的关系式:

$$\frac{d\delta^*}{dx^*} = \sqrt{\frac{B\delta_0}{2}\left(\frac{1}{\delta^{*2}} - 4\delta^* + 3\delta^{*2}\right) + d_0^2\delta^{*2}} \quad (25)$$

文献[1]采用略大于 δ_0 的液膜厚度 δ_1 为薄膜蒸发区的计算初始点。对于完全浸润流体,薄膜区起始区域的斜率变化趋近于0,故 d_0 可以取一个微小值。取 d_0 值为 1.5×10^{-6} ,文献表明 d_0 的取值对于计算结果产生的影响很小^[12]。此外 $x=0$ 时, $\delta^*=1$ 。由式(12)、式(17)和式(21)可得:

$$q = \frac{Ah_{fg}}{v} \left(\frac{B}{\delta} - \frac{C}{\delta^4} \right) = \frac{Ah_{fg}}{v} \frac{B}{\delta} \left(1 - \frac{\delta_0^3}{\delta^3} \right) \quad (26)$$

将式(18)代入式(26),即得:

$$q = \frac{k_1(T_w - T_v)}{\delta} \left(1 - \frac{\delta_0^3}{\delta^3} \right) \quad (27)$$

由式(27)可得整个薄膜区的热流量:

$$Q = \int_0^x q dx = \frac{Ah_{fg}}{v} \left(\frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dx} - \frac{d_0}{\delta_0} \right) \quad (29)$$

根据文献[1]及上述分析可得,弯液面薄膜蒸发区范围是以 $x=0$ $\delta=\delta_0$ $\mu\delta/dx=d_0$ 为起始点,定义脱离压力 P_d 降至 $1/2000 P_{d0}$ 为薄膜区结束点。

薄膜区在稳定传热条件下,加热壁面温度 T_w 和汽液界面饱和蒸汽温度 T_v 存在的温差为薄膜区的过热度。本研究分析了薄膜区的过热度、纳米流体体积分数以及纳米流体质物性对毛细弯液面热质传递的影响。

3 结果分析

3.1 薄膜过热度对蒸发界面热质迁移特性的影响

图2显示了以水为工质并根据式(29)所计算的薄膜总换热量与文献[13]提出的计算薄膜总换热量方法所得结果的对比。计算结果与文献[13]基本一致,变化趋势一致。

在稳定传热下,主液区在液面压力差和热毛细力的作用下,补充毛细弯液面薄膜区蒸发所需液体。液面压力差即脱离压力梯度起主导作用。因此,界面过热度的上升,薄膜区蒸发量增加,从而使补充薄膜区液体的界面压力梯度增大,薄膜区的尺寸范围减小,如图3所示。

此外,如图4所示,薄膜蒸发区内界面蒸发质量流率极值点随着过热度的上升,界面蒸发质量流率极值点位置逐渐向液膜的吸附区迁移。为维持一定的传热量,蒸发质量流率相应增加,导致相关的蒸发

质量损失,蒸汽的反冲作用增大,蒸发界面稳定性减弱,薄膜蒸发传热过程稳定性下降。根据式(9),界面蒸发质量流率的变化与蒸发界面热流密度的变化规律相一致。

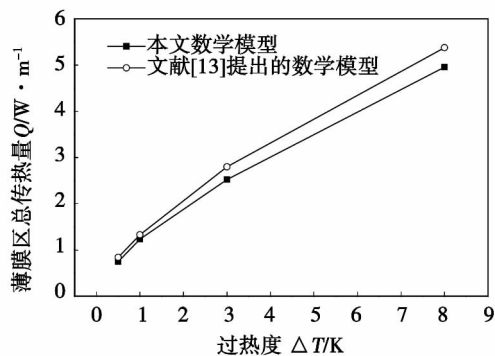


图2 本计算方法与文献[13]计算方法结果对比

Fig. 2 Comparison of the results obtained by using the method in question with those obtained by using the method proposed in the literature [13]

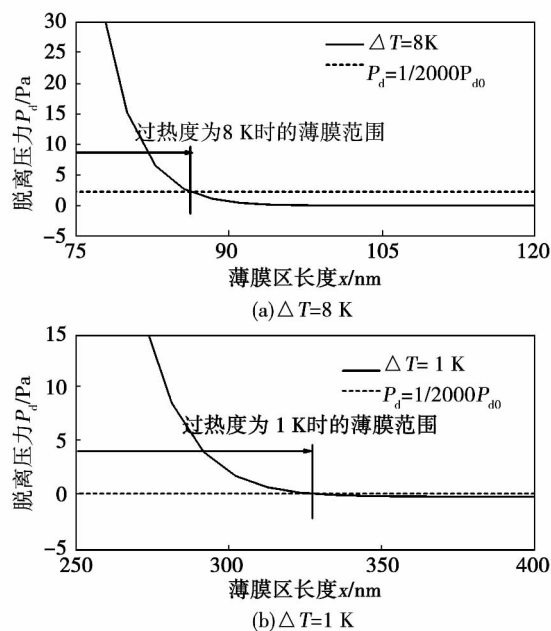


图3 不同过热度薄膜区范围的变化

Fig. 3 Changes of the thin film area at various superheating degrees

3.2 纳米流体浓度对蒸发界面传热传质特性的影响

与传统液相工质相比,纳米流体由于其内部纳米粒子较强的布朗运动特性以及粒子与液体及壁面

的相互作用能够破坏层流底层,增强扰动。同时由于纳米流体本身具有较高的导热系数,因而具有更加优异的热力学性能。

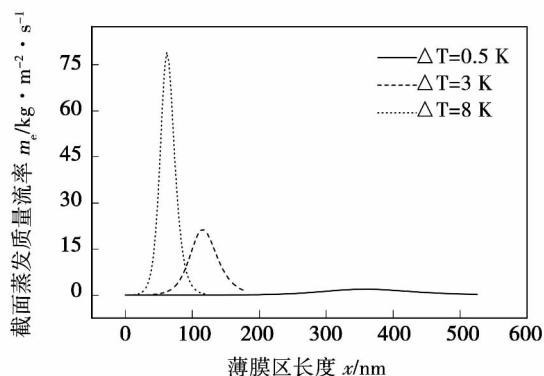


图4 不同过热度蒸发界面质量流率的变化

Fig. 4 Changes of the mass flow rate in the evaporation interface at various superheating degrees

在 $T_w = 353 \text{ K}$, $T_v = 350 \text{ K}$ 条件下,研究不同浓度的 Cu-water 纳米流体对毛细弯液蒸发界面热质迁移特性的影响。根据计算,随着纳米流体中纳米铜的体积分率的增加,流体工质的运动粘性系数减小,导热系数增加。

如图5所示,由于纳米流体浓度的增加,纳米流体的运动粘性系数变小,薄膜区流体内部的内摩擦力减小,从而导致蒸发界面更加平坦,薄膜的平均厚度减小。

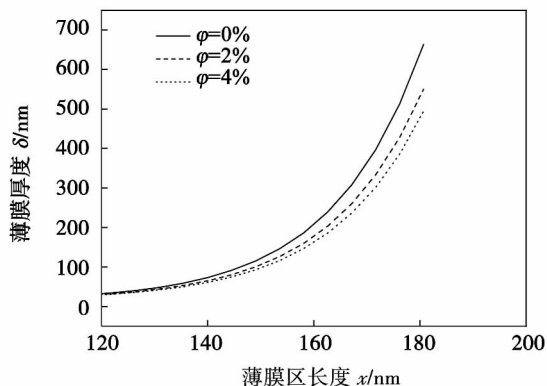


图5 不同浓度纳米流体的薄膜厚度的变化

Fig. 5 Changes in the thickness of the thin film of the nano fluid at various concentrations

纳米颗粒体积分率变化对蒸发界面热流密度的影响如图6所示。在接近薄膜蒸发区起点处,过热

度 $T_w - T_s$ 不断增加,而薄膜厚度 δ 的变化率较小,从而导致界面热流密度沿长度方向上升,而在薄膜蒸发区后端,薄膜厚度迅速上升,变化率较大,此时薄膜厚度起主要作用,从而导致热流密度反而减小,出现极大值。由于纳米流体的导热系数随纳米颗粒体积分率增加而增加,较高浓度的纳米流体薄膜蒸发区通过对流传导的热量增加,相应的蒸发换热量增加,蒸发界面热流密度增加。对应的界面平均蒸发质量流率随之上升,蒸发界面蒸发明显加剧,稳定性下降。

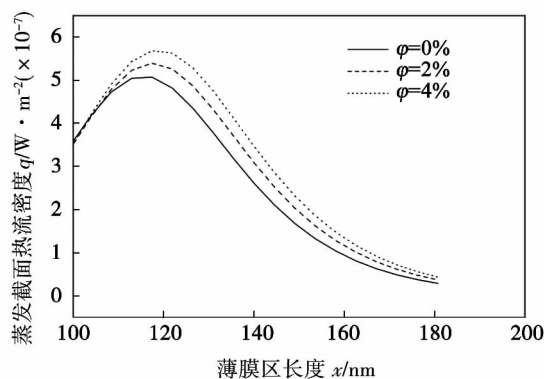


图6 不同浓度纳米流体薄膜蒸发界面热流密度变化

Fig. 6 Changes in the heat flux density in the evaporation interface of the nano fluid at various concentrations

图7显示的是不同浓度纳米流体的蒸发界面换热系数。

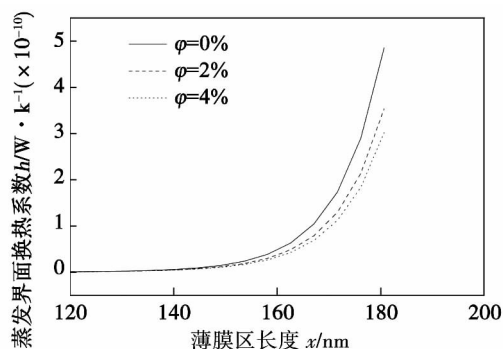


图7 不同浓度纳米流体蒸发界面换热系数变化

Fig. 7 Changes in the heat exchange coefficient of the nano fluid in the evaporation interface at various concentrations

根据式(11)的计算,蒸发界面处的温度有所上升,且温度上升的幅度大于热流密度的上升幅度,从而导致蒸发界面处的换热系数反而减小。经计算,当纳米流体浓度为4%时,薄膜区平均厚度相对于纯水工质时平均厚度降低18.5%,平均蒸发界面热流密度上升了14.6%,蒸发界面的平均换热系数降低了35%。

3.3 不同种类纳米流体工质对毛细弯液蒸发界面传热传质特性的影响

图8对比了4种相同体积分率以及相同过热度下的纳米流体薄膜厚度的变化,包括了Cu、CuO、 Al_2O_3 以及 SiO_2 。对应纳米流体物性如表1所示。随着纳米流体运动粘性系数的增加以及导热系数的减小,薄膜厚度的变化率发生变化。结果显示,较高的运动粘性系数以及较低的导热系数导致了薄膜加速变厚,薄膜区变小。与不同浓度的Cu-water纳米流体计算结果对比可见,薄膜厚度及其变化率受到了流体运动粘性系数以及导热系数的耦合作用。

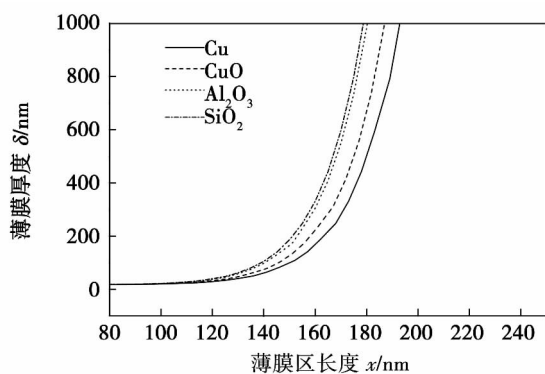


图8 不同种类纳米流体薄膜厚度的变化
Fig. 8 Changes in the thickness of the thin film of the nano fluid in various nano fluids

图9显示了不同种类的纳米流体蒸发界面热流密度的变化。

Cu-water 纳米流体的蒸发界面热流密度最高。CuO-water 其次, Al_2O_3 -water 纳米流体更小, SiO_2 -water 纳米流体的蒸发界面热流密度最小。对比各纳米流体的物性可知,影响毛细弯液蒸发界面热流密度的主要因素是流体工质的导热系数,较高的导热系数传递更多的热量,从而增加了界面热流密度。

图10显示了水和不同种类纳米流体薄膜总热流量的对比。结果进一步验证了在相同过热度条件

下,流体运动粘性系数以及导热系数的耦合作用是影响毛细弯液薄膜蒸发界面热质迁移的关键因素。

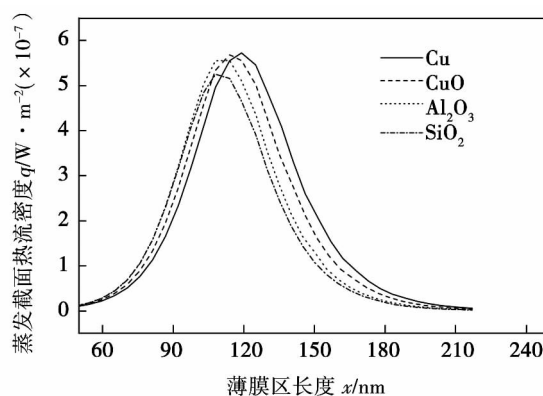


图9 不同种类纳米流体薄膜蒸发界面热流密度的变化

Fig. 9 Changes in the heat flux density in the evaporation interface of the nano fluid in various nano fluids

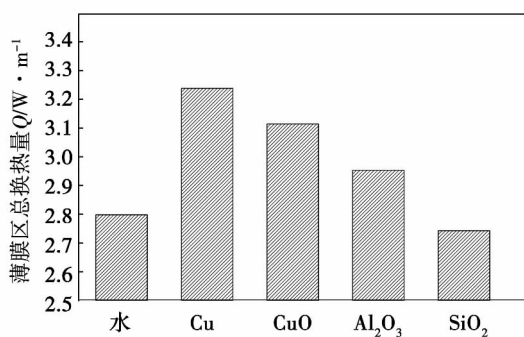


图10 不同种类纳米流体薄膜总热流量
Fig. 10 Total heat flux of the thin film in various nano fluids

与水相比,Cu-water 纳米流体导热系数较高同时运动粘性系数更小,导致其界面热流密度以及薄膜范围较大,因而其薄膜区总换热量要明显高于水。CuO-水、 Al_2O_3 -水纳米流体也能够传递更多的热量,但 SiO_2 -水的总换热量则小于水。

4 结 论

通过运用数值计算方法重点分析了过热度、纳米流体体积分率以及纳米流体物性对毛细弯液薄膜蒸发区传热传质特性的影响,得到以下结论:

(1) 毛细弯液面过热度上升,薄膜区液面脱离压力梯度增加,薄膜区范围减小;但薄膜区蒸发界面热流密度提高和气液界面总换热量提高。又由于界面蒸发质量流率的增加,导致相应的蒸发质量损失,蒸汽的反冲作用增强,从而引发界面稳定性降低,气液蒸发界面易出现振荡。

(2) 选择合适的纳米流体能够强化毛细弯液蒸发界面的热质迁移效果。纳米流体选择适当时,可减小流体工质的运动粘性系数并增大液体导热系数,从而强化毛细弯液蒸发界面的热质迁移特性,传递更多热量。较高体积分率的纳米流体具有更好的传热效果。

(3) 运动粘性系数降低导致薄膜平均厚度减小,薄膜范围延长,导热系数升高使得蒸发界面热流密度增加,但同时增加了界面蒸发质量流率,降低界面换热系数,使界面稳定性有所降低,薄膜区出现振荡。纳米流体运动粘性系数以及导热系数的耦合作用是影响热质迁移特性的又一关键因素。

综合以上分析可以看出,较高的过热度以及纳米流体工质的特殊物性可以实现毛细弯液面薄膜蒸发区的强化传热,但同时降低了蒸发界面的稳定性。两者的优化选择是提高毛细相变传热综合性能的关键因素之一。

参考文献:

- [1] 黄晓明, Tarik Kaya. 蒸发毛细弯液面热质传输特性及其稳定性分析[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 21-25.
HUANG Xiao-ming, Tarik Kaya. Heat and mass transfer characteristics of the evaporation capillary bent liquid surface and analysis of its stability[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3): 21-25.
- [2] Choi S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[C]. ASME FED, 1995, 231: 99-105.
- [3] F W Holm, S P Goplen. Heat transfer in the meniscus thin film region[J]. International Journal of Heat Transfer, 1978, 101(3): 543-547.
- [4] P C Wayner, Y K Kao. The interline heat transfer coefficient of an evaporating wetting film, International Journal of Heat and Mass Transfer[J]. 1976, 19(5): 487-492.
- [5] ZHAO Jun-Jie, PENG Xiao-Feng, DUAN Yuan-Yuan. Slip and Micro Flow Characteristics near a Wall of Evaporating Thin Films in a Microchannel[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7): 1171-1174.
- [6] Wee S K, Kihm K D, Hallinan K P. Effects of the Liquid Polarity and the Wall Slip on the Heat and Mass Transport Characteristics of the Micro-Scale Evaporating Transition Film[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 265-278.
- [7] A Mirzamoghadam, J Catton. A physical model of the evaporating meniscus, International Journal of Heat Transfer, 1979, 110(1): 201-207.
- [8] H B Ma, G P Peterson. Temperature variation and heat transfer in triangular grooves with a evaporating film[J]. International Journal of Heat Transfer, 1997, 11(1): 90-97.
- [9] J C Maxwell, A treatise on electricity and magnetism[M], second ed, Clarendon Press, London, 1881.
- [10] J C Maxwell, Electricity and Magnetism[M], Part II, third ed, Clarendon Press, London, 1904.
- [11] Einstein A. Investigation on the theory of brownian movement[M]. New York: Dover, 1956.
- [12] Chunji Yan, H B Ma, Analytical Solutions of Heat Transfer and Film Thickness in Thin-Film Evaporation[J]. International Journal of Heat Transfer, 2013, 135(3).
- [13] H Wang, S V Garimella, An analytical solution for the total heat transfer in the thin-film region of an evaporating meniscus[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25-26): 6317-6322.

(陈 滨 编辑)

the load of 300 MW 240 MW and 180 MW respectively were obtained and a detailed analysis was performed. The calculation results show that with an increase of the SOFA air ratio ,both the temperature and average oxygen concentration in the main combustion zone will somewhat decrease ,the average CO concentration will increase and the NO_x concentration will also decrease and at the same time ,the burn-out rate of the pulverized coal particles will somehow decrease. The analytic results can offer certain theoretical reference for boiler units to use rational SOFA air ratios operating at different loads to realize an environmental protection and economic operation. **Key Words:** SOFA air ratio ,tangential ,stereo-staged combustion , NO_x ,numerical simulation

商业 SCR 催化剂在蓄热式换热条件下脱硝性能的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Denitrification Performance of the Commercial SCR (Selective Catalytic Reduction) Catalyst Under the Condition of Heat Accumulation Type Heat Exchange** [刊 ,汉] TIAN Zhong-jun ,JIN Shi-ping ,LIU Zheng-jie ,HUANG Su-yi (College of Energy Source and Power Engineering ,Central China University of Science and Technology ,Wuhan ,China , Post Code: 430074) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(4) . -415 -419

To further reduce the NO_x produced in the process of high temperature air combustion ,the honeycomb selective catalytic reduction catalyst was put into the heat accumulation chamber of a HiTAC system and a one-dimensional mathematical model for heat accumulation type heat exchange and NO_x catalytic reduction was established ,of which the reactant adsorption and reaction process complied with the Eley-Rideal mechanism and a numerical simulation study of the denitrification performance of the catalyst in the unsteady state was conducted. It has been found that the corresponding values to the reaction speed constant and the residence time—the variation range of the reciprocal of the speed will increase with an elapse of the direction changing time ,the gas speed will assume an entirely linear change with the air speed ,the NO concentration at the outlet will exhibit a periodical change ,the NO conversion rate will increase with an elapse of the direction changing time and decrease with an increase of the air speed. **Key Words:** high temperature air combustion (HiTAC) ,selective catalytic reduction (SCR) ,heat accumulation type heat exchange ,numerical simulation ,denitrification performance

纳米流体毛细弯液蒸发界面热质迁移特性分析 = **Analysis of the Migration Characteristics of the Heat and Mass on the Capillary Curved Evaporation Liquid Surface in the Process of Evaporation of a Nano-fluid** [刊 ,汉] LIN Jun ,CHEN Wei (College of Merchant Marine ,Shanghai Maritime University ,Shanghai ,China ,Post Code: 201306) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(4) . -420 -426

By using a model for heat and mass transfer in the film evaporation zone on the capillary curved liquid surface based on the augmented Yang Laplace equation ,numerically analyzed was the influence of the superheating degree and

nano-fluid working media on the migration characteristics of the heat and mass in the film evaporation zone on the capillary curved liquid surface. It has been found that increasing the superheating degree will lead to a decrease of the area of the film evaporation zone ,an increase of the heat flux density on the evaporation interface and an increase of the total heat quantity exchanged in the film evaporation zone ,and at the same time ,however ,weaken the stability of the film interface. By adding an appropriate amount of nano particles to the traditional fluid working medium ,the kinematic viscosity coefficient of the nano-fluid will decrease with an increase of the volume fraction ,the heat conduction coefficient will increase with an increase of the volume fraction ,thus affecting its heat and mass transfer effectiveness. In the meantime ,however ,the stability of the evaporation interface will be weakened. A variety of nano-fluids has a conspicuous influence on the capillary curved liquid evaporation surface and the nano-fluids with a relatively low kinematic viscosity coefficient and a relatively high heat conduction coefficient can have more heat quantity be transferred. **Key Words:** capillary curved liquid surface ,nano-fluid ,film evaporation ,heat and mass transfer

基于改进人工蜂群算法的锅炉 NO_x 排放预测优化 = **Optimization of the Prediction of the NO_x Emissions of a Boiler Based on an Improved Swarm Algorithm** [刊 ,汉] NIU Pei-feng ,LIU Yong-chao ,ZHANG Xian-chen , ZHANG Xiang-ye (Hebei Provincial Key Laboratory on Industrial Computer-based Control Engineering ,Yanshan University ,Qinhuangdao ,China ,Post Code: 066004) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(4) . -427 -433

Studied were the problems relating to the NO_x emissions of circulating fluidized bed boilers in power plants and improved was the artificial swarm algorithm. In combination with the least square supporting vector machine ,the authors established a model for the NO_x emissions of boilers and optimized the adjustable parameters of the boiler and reduced the NO_x emissions concentration. A comparison of the improved artificial swarm algorithm with the basic artificial swarm algorithm and the particle colony algorithm indicates that the model based on the improved artificial swarm algorithm can predict very well the NO_x emissions concentration and boasts a very strong identification and generalization ability ,and at the same time ,it also indicates that the improved artificial swarm algorithm is quick in calculation and has an edge in optimizing data. Through a simulation test ,the optimized NO_x emissions concentration can obviously decrease ,displaying its practical value in engineering applications. **Key Words:** boiler combustion optimization ,least square supporting vector machine , NO_x emissions concentration ,artificial swarm algorithm

正交试验方法在波形板分离器数值模拟研究中的应用 = **Applications of the Orthogonal Test Method in the Numerical Simulation Study of Waveform Plate Separators** [刊 ,汉] WANG Song ,WANG Ting ,ZHANG Zhi-qiang ,WANG Meng (College of Power and Energy Source Engineering ,Harbin Engineering University ,Harbin ,Chi-