

直接接触相变换热中单泡滴生长及传热特性

黄峻伟¹, 王伟超^{1*}, 王辉涛², 徐建新³

(1. 云南农业大学 机电工程学院, 昆明 650201; 2. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;

3. 昆明理工大学省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093)

摘 要: 基于对直接接触换热过程中单泡滴生长及传热研究现状的分析, 在综合考虑热传导和热对流能量平衡方程共同作用的结果, 以及泡滴蒸发过程中, 几何边界条件开放角的情况下, 完善了单泡滴蒸发生长物理几何模型, 同时导出单泡滴生长率及努塞尔数的表达式。进一步讨论了无量纲参数普朗特数 Pr 、雅各布数 Ja 及斯坦顿数 St 等对单泡滴生长率及传热系数的影响规律。结果表明: 本文模型与其它论文所推导的模型具有较好的一致性; 与文献 [6] 中所推导的模型平均偏差为 19%; 与文献 [4] 中所推导的模型平均偏差为 28%。

关 键 词: 直接接触换热; 单泡滴; 生长率; 努塞尔数

中图分类号: TK172 **文献标识码:** A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.06.002

符号说明

A —— 两相泡滴表面积/ m^2 ;
 C_p —— 连续相流体定义比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$;
 Fr_0 —— 初始弗洛德数;
 g —— 重力加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;
 h —— 瞬时传热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$;
 L —— 分散相汽化潜热/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;
 k_c —— 连续相流体导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$;
 k_f —— 分散相流体导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$;
 Ja —— 雅各布数;
 q_1, q_2 —— 热流密度, 热对流热流密度, 热传导热流密度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$;
 Nu, Nu_c —— 瞬时努塞尔数, 两相泡滴尾流处努塞尔数;
 Pr —— 普朗特数;
 R, R_d, R_v —— 两相泡滴瞬时半径, 液滴初始半径, 两相泡滴气相初始半径/ m ;
 r —— 径向坐标轴;
 Re, Re_0 —— 瞬时雷诺数, 初始雷诺数;

RRC —— 分散相液相密度与连续相密度比值;
 RRD —— 分散相气相密度与连续相密度比值;
 St —— 斯坦顿数;
 ΔT —— 温差/ K ;
 t —— 时间/ s ;
 U —— 液滴上升速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 V —— 两相泡滴体积/ m^3 ;
 β —— 半开放角/ $^\circ$;
 θ —— 切向坐标轴;
 μ —— 动力粘度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$;
 ρ_c —— 连续相流体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 ρ_l —— 分散相流体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 ρ_v —— 两相泡滴内气相密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 τ —— 无量纲时间。

引 言

单个泡滴在互不相溶流体中的直接接触换热过程一直是国内外研究的热点问题, Sideman, Tochitani, Battya, Abbas Kendoush, Mahood 等人对单泡滴的蒸发生长过程及传热特性进行了研究^[1-4], 目前单泡滴生长及传热模型主要有两种研究思路, 一是以学者 Sideman 的论文为代表^[1], 其两相泡滴生长几何模型中, 气相位于上部, 未蒸发的液相由于重力作用, 以镰刀型态位于下部, 如图 1(a) 所示。传热模型以球坐标能量方程为基础, 流动方程符合斯托克斯方程, 根据边界条件对能量方程进行积分变换, 最终得到的换热表达式为表征气相生长几何模型边界条件开口角 2β 的函数。但该模型只重点考虑了泡滴下部镰刀型液-液界面 θ 方向的热对流, 而忽略了同方向的热传导, 因此其理论值与试验值相比,

收稿日期: 2015-06-25; 修订日期: 2016-01-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51406071); 云南农业大学自然科学基金资助项目(2015ZR14); 云南省自然科学基金资助项目(2013FB020); 云南省自然科学基金资助项目(2015FD022)

作者简介: 黄峻伟(1983-), 男, 吉林松原人, 云南农业大学讲师。

通讯作者: 王伟超(1988-), 男, 黑龙江绥化人, 云南农业大学助教。

偏差较大;二是以文献[6]为代表,其两相泡滴生长几何模型为同心球模型,泡滴生长过程中忽略重力作用的影响,汽化核心的中心为球心,以球形向周围蒸发,即两相泡滴内部为气相,而液相均匀的分布在气相球的外部,如图1(b)所示。传热模型考虑热对流和热传导的共同作用,热量同时以热对流和热传导的方式从连续相流体传递到泡滴内部,最终得到的换热表达式为表征热对流经验方程和热传导系数的函数。但该模型的泡滴生长几何模型与实际的泡滴传热过程几何形态有较大差别,图2为文献[7~8]进行试验时所拍摄到的单个泡滴蒸发过程的图像。

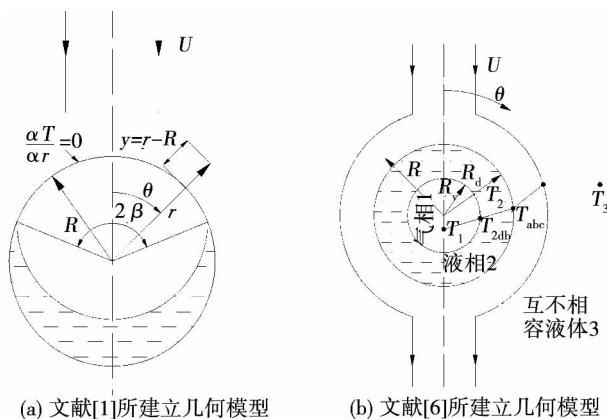


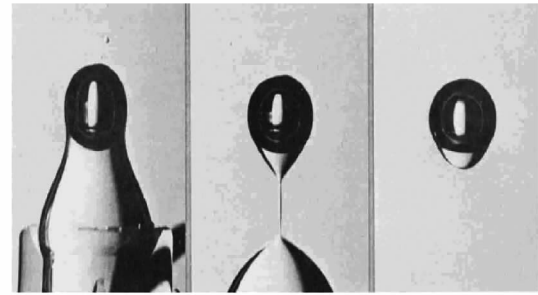
图1 经典泡滴生长几何模型^[1,6]

Fig. 1 The classical physical geometry model of single bubble^[1,6]

针对于上述单泡滴传热模型的局限性,本文拟在两个经典模型的基础上,完善单泡滴传热数理模型,导出单泡滴生长模型及努塞尔数表达式,为单泡滴直接接触传热计算提供一定的借鉴意义。

1 单个泡滴蒸发传热物理几何模型

本文所提出的单泡滴生长传热几何模型如图3所示。该模型完善了经典模型的不足,一是考虑了泡滴传热过程的实际形状,即液相由于重力作用以镰刀型分布于两相泡滴的下部;二是传热过程综合考虑了热对流和热传导的共同作用,热量同时以热对流和热传导的方式从连续相流体传递到泡滴内部,而开口角 2β 限定了两相泡滴中气相的边界条件。



文献[7]所拍摄的泡滴图像



文献[8]所拍摄的泡滴图像

图2 单泡滴生长图像^[7~8]

Fig. 2 The images of single bubble from Mori and Kulkarni^[7~8]

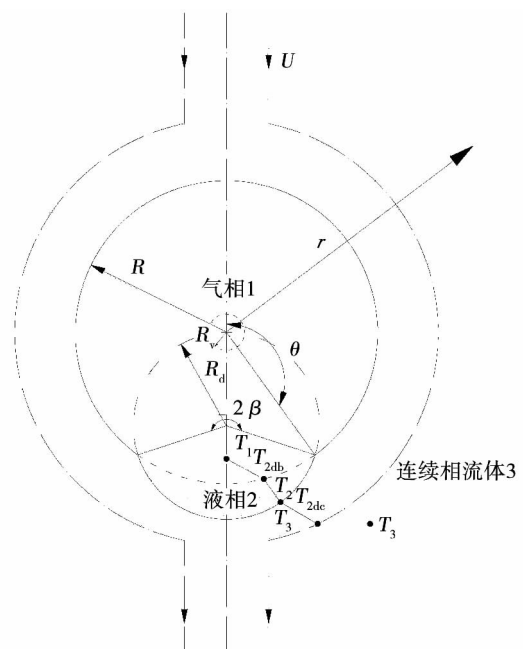


图3 单个泡滴生长物理几何模型

Fig. 3 The physical geometry model of single bubble

由于泡滴的实际传热过程较为复杂,因此需要通过假定和边界条件的限制来简化,以便求解模型。对单个泡滴几何模型通常进行如下通用假定:

(1) 整个系统呈现准平衡状态^[1~3];

(2) 两相泡滴为球体,内部气相位于上部,未蒸发的液相位于下部,且相对于垂直轴呈现轴对称^[1,3];

(3) 两相泡滴以恒定的速度垂直上升并无震荡,或泡滴处于静止状态而连续相流体以相同的速度下降^[1,4];

(4) 两相泡滴周围的连续相流体的流型为势流,即其流动符合斯托克斯方程^[1,9~10];

(5) 在传热开始阶段,分散相液滴处于饱和状态,传递到液滴内部的热量全部用于液滴汽化过程的潜热^[8];

(6) 没有热流通过气相表面,气相内无温度梯度^[1,4]。

本文物理几何模型除了上述通用假定外,同时提出如下假定条件:

(1) 两相泡滴蒸发起始点(两相泡滴中心)位于液滴球体对称轴上的顶点处,液相横截面呈镰刀形,开口角的极限情况为零;

(2) 热量仅从两相泡滴中液相的球外表面进行传递,热对流和热传导的方向均为两相泡滴中心的径向方向。

2 理论分析

2.1 单个泡滴蒸发生长的理论分析

根据图3的单泡滴物理几何模型及上述假定条件,选取两相泡滴中心为坐标轴原点,单泡滴蒸发生长模型推导过程如下:

(1) 热量以热对流的方式从连续相传递给分散相液滴:

$$dq_1 = h \cdot 2\pi R_d^2 \sin(2\theta - \pi) d(2\theta - \pi) \cdot \Delta T_{3-2dc} \quad (1)$$

其中:

$$\Delta T_{3-2dc} = T_3 - T_{2dc}$$

边界条件为:

$$\frac{\pi + \beta}{2} \leq \theta \leq \pi$$

所以有

$$q_1 = 2\pi R_d^2 h (1 - \cos\beta) \Delta T_{3-2dc} \quad (2)$$

(2) 热量以热传导的方式从未蒸发的液相层传递给气相:

$$dq_2 = -k_i 2\pi r^2 \sin(\pi - \theta) d(\pi - \theta) \frac{dT}{dr} \quad (3)$$

边界条件为:

$$r = R_v; T = T_{2db}; \theta = \frac{\pi + \beta}{2}$$

$$r = R; T = T_{2dc}; \theta = \pi$$

所以有:

$$q_2 = \frac{2\pi k_i (1 + \sin\beta/2)}{1/R_v - 1/R} \Delta T_{2dc-2db} \quad (4)$$

(3) 所以从连续相传递给分散相液滴的总热量等于以热对流和热传导传递的热量之和^[8]:

$$q = q_1 + q_2 \quad (5)$$

根据能量平衡,液滴汽化潜热过程中所需要的热量等于连续相传递给分散相液滴的总热量。

液相的汽化潜热公式为:

$$q_3 = L\rho_v \cdot \frac{dV}{dt} = 4\pi R^2 \cdot L\rho_v \cdot \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

所以有:

$$4\pi R^2 \cdot L\rho_v \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{2\pi k_i (1 + \sin\beta/2)}{1/R_v - 1/R} \cdot \Delta T_{2dc-2db} + 2\pi R_d^2 h (1 - \cos\beta) \Delta T_{3-2dc} \quad (7)$$

因为 R_v 是两相泡滴气相初始半径,其值与换热计算起始点选取的时刻有关,当计算起始点选取的时刻确定后, R_v 是个不随时间变化的确定值,而 R 是表示两相泡滴瞬时半径,其值是时间 τ 的函数。

在泡滴蒸发初始阶段,泡滴汽化核心刚刚开始,此时 R_v 是个极小值,所以有 $1/R_v \gg 1/R$;在泡滴蒸发最后阶段,两相泡滴中气相半径与两相泡滴瞬时半径基本相等,所以有 $1/R_v \approx 1/R$ 。而本文选取换热开始时刻为换热计算起始点,即当 R_v 是个极小值时,此时有:

$$\frac{1}{R_v} \gg \frac{1}{R}$$

同时假定:

$$\Delta T_{3-2dc} = \Delta T_{2dc-2db}$$

所以式(7)可以简化为:

$$R^2 \frac{dR}{dt} = \frac{\Delta T_{3-2dc}}{2L\rho_v} \left[R_v k_i \left(1 + \sin \frac{\beta}{2} \right) + R_d^2 h (1 - \cos\beta) \right] \quad (8)$$

因为:

$$Nu_c = \frac{2R_d h}{k_c}$$

所以式(8)可以转化为:

$$R^2 \frac{dR}{dt} = \frac{k_c \Delta T_{3-2dc}}{4L\rho_v} \left[\frac{2R_v k_f (1 + \sin\beta/2)}{k_c} + R_d (1 - \cos\beta) \cdot Nu_c \right] \quad (9)$$

其中, Nu_c 由文献 [1] 给出, 该式(9)为球体尾流区内, 热量以热对流方式传递时的换热关联式:

$$Nu_c = 0.0447 Re_0^{0.78} Pr^{1/3}$$

在根据边界条件: $t=0, R=R_d$

所以:

$$R = \left\{ R_d^3 + \frac{3tk_c \Delta T_{3-2dc}}{4L\rho_v} \left[\frac{2k_f R_v}{k_c} \left(1 + \sin \frac{\beta}{2} \right) + 0.0447 Re_0^{0.78} Pr^{1/3} R_d (1 - \cos\beta) \right] \right\}^{1/3} \quad (10)$$

公式(10)可以转换为无量纲形式:

$$\frac{R}{R_d} = \left[1 + \frac{3JaFr_0\tau}{Re_0 Pr} \left[\frac{2k_f R_v}{k_c} \left(1 + \sin \frac{\beta}{2} \right) + 0.0447 Re_0^{0.78} Pr^{1/3} (1 - \cos\beta) \right] \right]^{1/3} \quad (11)$$

其中:

$$Ja = \frac{\rho_c C_p \Delta T}{\rho_v L} = \frac{St}{RRD \cdot RRC}$$

$$Nu = \frac{\left[\frac{2k_f R_v}{k_c} \left(1 + \sin \frac{\beta}{2} \right) + 0.0447 Re_0^{0.78} Pr^{1/3} R_d (1 - \cos\beta) \right]}{2 \cdot \left\{ R_d^3 + \frac{3tk_c \Delta T_{3-2dc}}{4L\rho_v} \left[\frac{2k_f R_v}{k_c} \left(1 + \sin \frac{\beta}{2} \right) + 0.0447 Re_0^{0.78} Pr^{1/3} R_d (1 - \cos\beta) \right] \right\}^{1/3}} \\ = \frac{\left[\frac{k_f R_v}{k_c} \left(1 + \sin \frac{\beta}{2} \right) + 0.0447 Re_0^{0.78} Pr^{1/3} \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \right]}{\left[1 + \frac{3JaFr_0\tau}{Re_0 Pr} \left[\frac{2k_f R_v}{k_c} \left(1 + \sin \frac{\beta}{2} \right) + 0.0447 Re_0^{0.78} Pr^{1/3} (1 - \cos\beta) \right] \right]^{1/3}} \quad (15)$$

式(15)是单个泡滴努塞尔数表达式, 其中 k_f/k_c 项对应于热传导。 $0.0447 Re_0^{0.78} Pr^{1/3}$ 项对应于热对流。半开放角 β 是表征泡滴内气相的边界条件, 是依赖于时间 τ 的函数。

3 结果与讨论

公式(11)为泡滴生长模型表达式, 其随无量纲时间和半开放角变化的关系如图4所示, 图中所展示的变化规律符合泡滴实际生长过程, 在泡滴实际的蒸发生长过程中, 随着时间的增加开放角不断增大, 其对应着泡滴的蒸发膨胀过程。从图中还可以

$$St = \frac{C_p \Delta T}{L}; RRD = \frac{\rho_v}{\rho_l}; RRC = \frac{\rho_l}{\rho_c}$$

$$Fr_0 = \frac{U^2}{2R_d g}; Pr = \frac{\mu C_p}{k_c};$$

$$Re_0 = \frac{2R_d U \rho_c}{\mu}; \tau = \frac{gt}{U}$$

2.2 单个泡滴传热的理论分析

单个泡滴的瞬时传热公式为:

$$h = \frac{q}{\Delta T \cdot A} = \frac{L\rho_v}{\Delta T \cdot A} \frac{dV}{dt} \quad (12)$$

其中:

$$A = 4\pi R^2$$

所以有:

$$h = \frac{L\rho_v}{\Delta T \cdot 4\pi R^2} \frac{4\pi R^2 dR}{dt} = \frac{L\rho_v}{\Delta T} \frac{dR}{dt} \quad (13)$$

又因为:

$$Nu = \frac{2Rh}{k_c} \quad (14)$$

结合式(12)、式(13)、式(14)、式(9)及式(10)有:

观察到, 其增长速率在泡滴生长的开始阶段较快, 然后逐渐减慢。可以看出泡滴的生长速率在开始阶段较快, 然后逐渐减慢。

为了对比式(11)泡滴生长模型与其它模型及试验数据的一致性, 选取引入文献 [4, 6] 中的气泡生长模型, 同时选取文献 [1] 中三组试验数据, 其单个正戊烷液滴的初始直径分别 3.6、3.62 和 3.2 mm, 对应的初始传热温差为 1.6、3.8 和 8 K(试验数据为文献 [1] 中 Run No. 1、7 和 14)。无量纲参数取值如表1所示, 分析结果如图5所示, 可以看出本文所推导的模型与其它两篇论文中的模型及试验数据有较好的一致性, 其中本文模型与文献 [6] 中模

型的平均偏差为 19%, 与文献 [4] 中模型的平均偏差为 28%。

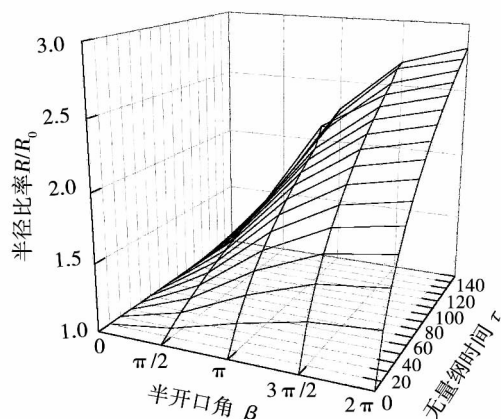


图 4 泡滴生长与半开放角 β 和无量纲时间 τ 关系

Fig. 4 The relationship of bubble growth with β and τ

表 1 无量纲参数取值

Tab. 1 Dimensionless parameters in Fig. 5

参数	工况 1	工况 2	工况 3
Re_0	901.3	960.5	897.24
Fr_0	0.780 3	0.776	0.877 8
Pr	4.448	4.148	3.89
St	0.018 7	0.044 4	0.093 6
RRC	0.612 6	0.613 4	0.614 2
RRD	0.005 23	0.005 23	0.005 23

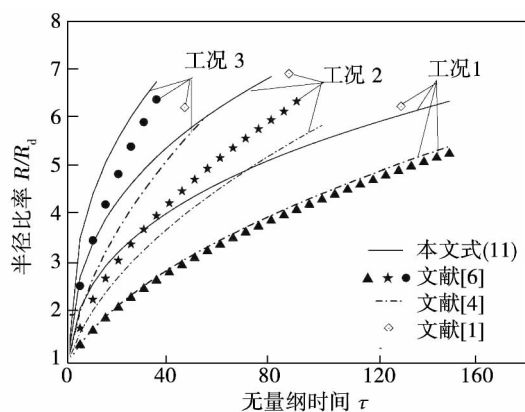


图 5 公式 (11) 与其它模型对比 [4, 6]

Fig. 5 Comparison of the present analytical solution with numerical results of others [4, 6]

本文其它图中无量纲参数取值范围如表 2 所示。

表 2 参数取值范围

Tab. 2 Ranges of dimensionless parameters

Re_0	Fr_0	Pr	St	RRC	RRD
250 ~ 1 000	0.25 ~ 1.0	1.0 ~ 16.0	0.02 ~ 0.2	0.3 ~ 1.5	0.002 5 ~ 0.01

图 6 表示 Prandtl 数对泡滴生长的影响。图中清楚的展示了 Pr 与泡滴生长成反比关系, 随着 Pr 的增加泡滴的生长呈减小趋势, 同时通过式 (11) 可以明显的看出泡滴完全蒸发时间将随 Pr 的增加而增加。

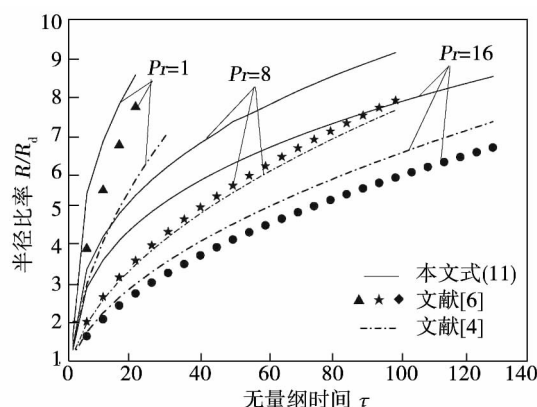


图 6 Pr 对泡滴生长的影响

Fig. 6 Effect of Pr on bubble growth

图 7 表示 St 数对泡滴半径比率的影响。由于 Jakob 数随着 St 数的增加而增加, 所以导致了泡滴生长率的增加, 当泡滴生长率增加较快时将伴随较低的完全蒸发时间与高度。

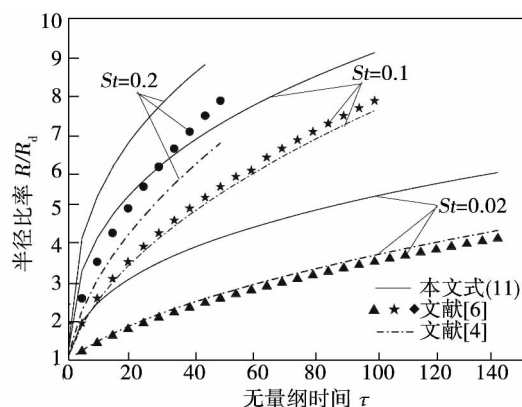


图 7 St 对泡滴生长的影响

Fig. 7 Effect of St on bubble growth

图8表示密度比率RRC(分散相液相密度与连续相密度比值)对泡滴生长的影响,因为RRC与 Ja 呈反比关系,所以随着RRC的增加泡滴生长率呈减小趋势,RRC主要对蒸发过程的初始阶段影响比较大,因为初始阶段分散相液相密度变化较大。

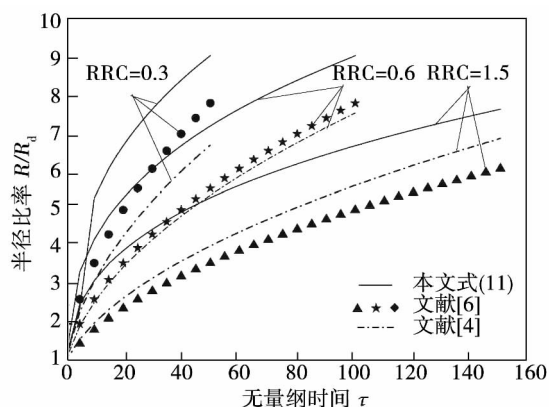


图8 RRC对泡滴生长的影响

Fig. 8 Effect of RRC on bubble growth

图9表示密度比率RRD(分散相气相密度与连续相密度比值)对泡滴生长的影响,与RRC影响规律相似,较低的RRD导致 Ja 的增加,其对泡滴生长率影响规律与 St 增加过程的类似,随着RRD的增加泡滴生长率同样呈减小趋势,但RRD的值主要影响着泡滴蒸发过程的最终阶段,因为最终阶段分散相气相密度变化较大。

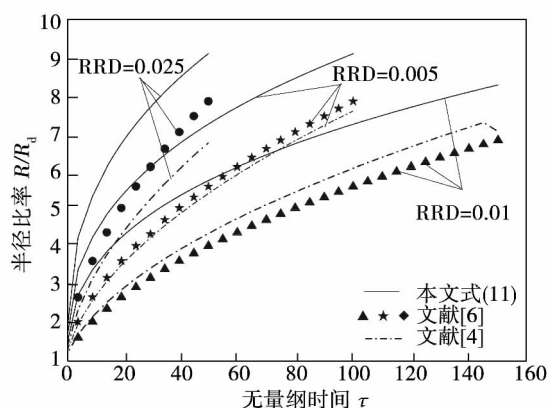


图9 RRD对泡滴生长的影响

Fig. 9 Effect of RRD on bubble growth

图10表示了液滴初始半径对泡滴生长的影响,可以看出泡滴生长率随着液滴半径的减小而增加。

图11为努塞尔数随无量纲时间和半开放角变

化的关系,可以看出努塞尔数在换热开始阶段最大,然后随着时间的增加呈现下降的趋势,这是因为在单个泡滴的物理几何模型假设中,热量是通过两相泡滴中的液相进行传递,而随着泡滴的逐渐生长,半开放角增大,液相面积逐渐减小到极限,直致完全蒸发。

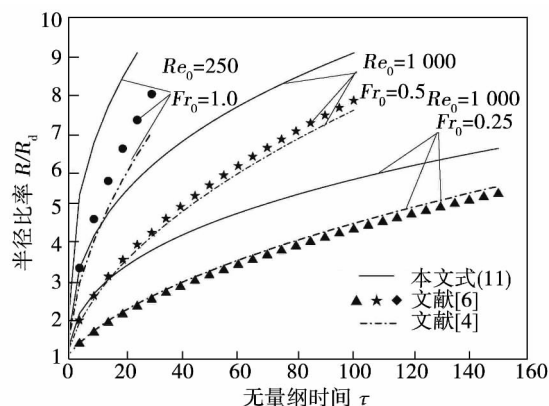


图10 液滴初始半径对泡滴生长的影响

Fig. 10 Effect of initial drop diameter on bubble growth

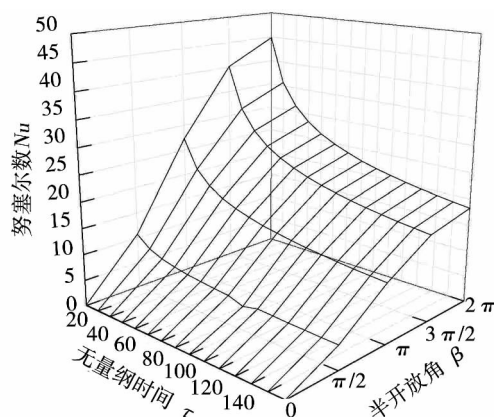


图11 努塞尔数与半开放角 β 和无量纲时间 τ 的关系

Fig. 11 The relationship of Nu with β and τ

图12表示初始雷诺数 Re_0 对努塞尔数 Nu 的影响,可以看出,随着 Re_0 的增加, Nu 呈增加趋势,同时发现当 Re_0 的值较低时,本文的分析模型和文献[1]中模型一致性较好,而当 Re_0 的值较高时,与文献[6]中模型得到的结果较为接近。

图13表示普朗特数 Pr 对努塞尔数 Nu 的影响。可以看出,随着 Pr 的增加, Nu 呈增加趋势,本文得

到的模型总体与文献 [1] 论文中数据的一致性较好。

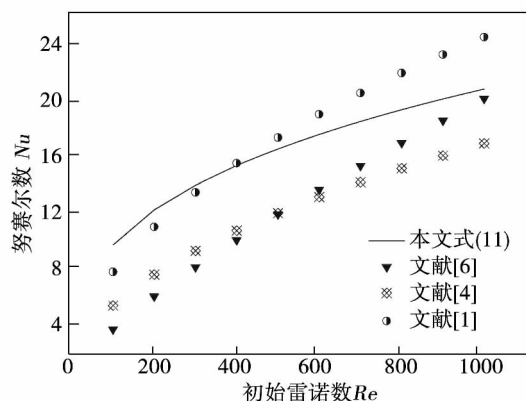


图 12 Re_0 对 Nu 的影响

Fig. 12 Effect of Re_0 on Nu

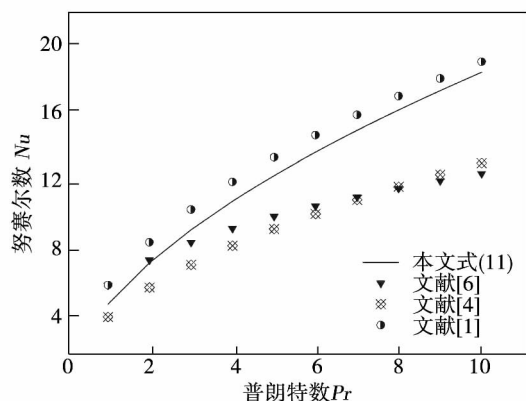


图 13 Pr 对 Nu 的影响

Fig. 13 Effect of Pr on Nu

4 结 论

本研究完善了单泡滴蒸发物理几何模型,并进一步导出泡滴生长模型和努塞尔数 Nu 表达式,通过对各无量纲参数相互影响关系的分析,得到如下结论:

(1) 泡滴生长模型与其它两个模型及试验数据有较好的一致性,本研究模型与文献 [6] 中模型平均偏差为 19%,与文献 [4] 中模型平均偏差为 28%;

(2) 泡滴的生长随 Pr 的增加呈减小的趋势,随 St 的增加呈增加的趋势;

(3) 泡滴的生长随着 RRC 、 RDR 及 Fr_0 的减小呈增加的趋势,随着 Re_0 的增加呈增加趋势;

(4) 努塞尔数 Nu 随着 Re_0 和 Pr 的增加呈增加趋势,当 Re_0 的值较低时,本研究的分析模型和文献 [1] 中模型一致性较好,而当 Re_0 的值较高时,与文献 [6] 中模型得到的结果较为接近。

参考文献:

- [1] Sideman S., Taitel Y. Direct-contact Heat Transfer with Change of Phase: Evaporation of Drops in an Immiscible Liquid Medium [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1964, 7(11): 1273 - 1289.
- [2] Tochitani Y., Mori Y. H., Komotori K. Vaporization of Single Liquid Drops in an Immiscible Liquid Part I: Forms and Motions of Vaporizing Drops [J]. Wärme-und Stoffübertragung, 1977, 10(1): 51 - 59.
- [3] Tochitani Y., Nakagawa T., Mori Y. H., Komotori K. Vaporization of Single Liquid Drops in an Immiscible Liquid Part II: Heat Transfer Characteristics [J]. Wärme-und Stoffübertragung, 1977, 10(2): 71 - 79.
- [4] Batty P., Raghavan V. R., Seetharamu K. N. Parametric Studies on Direct Contact Evaporation of a Drop in an Immiscible Liquid [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(2): 263 - 272.
- [5] Kendoush A. A. Theory of Convective Drop Evaporation in Direct Contact with an Immiscible Liquid [J]. Desalination, 2004, 169(1): 33 - 41.
- [6] Mahood H. B. Direct-contact Heat Transfer of a Single Volatile Liquid Drop Evaporation in an Immiscible Liquid [J]. Desalination, 2008, 222(1-3): 656 - 665.
- [7] Mori Y. H. Configurations of Gas-liquid Two-phase Bubbles in Immiscible Liquid Media [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1978, 4(4): 383 - 396.
- [8] Kulkarni A. A., Ranade V. V. Direct Contact Heat Transfer via Injecting Volatile Liquid in a Hot Liquid Pool: Generation and Motion of Bubbles [J]. Chemical Engineering Science, 2013.
- [9] Mokhtarzadeh M. R., El-Shirbini A. A., A Theoretical Analysis of Evaporating Droplets in an Immiscible Liquid [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1979, 22(1): 27 - 38.
- [10] Tadrist L., Diso I. S., Santini R., Pantaloni J. Vaporization of a Liquid by Direct Contact in another Immiscible Liquid Part I: Vaporization of a Single Droplet Part II: Vaporization of Rising Multidroplets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30(9): 1773 - 1785.
- [11] Lee K., Barrow H. Transport Processes in Flow around a Sphere with Particular Reference to the Transfer of Mass [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1968, 11(6): 1013 - 1026.

(姜雪梅 编辑)

旋涡泵研究现状及存在的问题分析 = Research Status and Existing Problems of Vortex Pump 刊, 汉 QUAN Hui, LI Jin, LI Ren-nian, FU Bai-heng (College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu, China, Post Code: 730050) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016, 31(6) . - 1 ~ 7

With the development of the national economy, the application span of the vortex pump is gradually expanding as well, and the study of the vortex pump has significant theoretical and application value. In this review paper, the classification and characteristics of the vortex pump are introduced first, followed by the discussion on the research status at home and abroad from the perspectives of the flow mechanism, design method, cavitation performance, mechanical properties and special purpose. Secondly, the existing problems in the related research are analyzed from the various aspects of research methods, the conversion of research results, test methods and so on. Finally, the scopes which have significant value and need to be further improved in the research and application of the vortex pump are prospected according to the aforementioned research results. It is believed that the studies of the seal performance, mechanical properties, internal vortex generation and evolution mechanism and control method, the characteristics and control method of noise and vibration of the vortex pump by using the advanced instrument may be the focus of the vortex pump research. **Key words:** Vortex pump, research status, existing problems, analysis

直接接触相变换热中单泡滴生长及传热特性 = The Growth Rate and Heat Transfer Performance of Single Bubble in Direct Contact Heat Transfer with Phase Change 刊, 汉 HUANG Jun-wei, WANG Wei-chao (Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming, China, Post Code: 650201) , WANG Hui-tao (Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China, Post Code: 650093) , XU Jian-xin (State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China, Post Code: 650093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016, 31(6) . - 8 ~ 14

Based on the research status quo of the single bubble growth and heat transfer in direct contact heat transfer process and the energy balance equation including both convection and conduction from the continuous liquid to the bubble with the opening angle spheres model, an improved physical geometry model of single bubble growth rate and evaporation was proposed. The effect of Pr number, St number, and Ja number were examined. The results show good agreement between the presented model and the others in literature. The average deviation is 19% compared with Mahood's model, and 28% with Batty's model. **Key words:** direct-contact heat transfer; single bubble, growth rate, Nusselt number

换热器管道内漏故障状态与声发射信号特征定量关系实验研究 = Experimental Study on Quantitative Rela-