

真空条件下液滴闪蒸的非均温建模与分析

杨锐¹, 林贵平¹, 柏立战¹, 陈鹏飞², 李龙飞², 孙兵¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 中国航天科技集团公司 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 西安 710100)

摘 要: 为深入揭示液滴在真空环境下的闪蒸机理,建立了真空闪蒸全过程、非均温的传热传质数学模型,获得了各时刻液滴温度场及半径,并能够追踪结冰阶段的相变界面位置.通过开展液滴闪蒸的实验研究,观察了相变前后液滴的形态变化,并对数值模型进行了验证.基于数学模型,研究了液滴初始半径、初始温度、真空舱压力和结冰过冷度对闪蒸过程的影响规律.结果表明:真空舱压力是影响闪蒸过程的主要因素,且会影响最终平衡温度;初始半径主要影响预冷和冻结时间,而初始温度和结冰过冷度主要只影响预冷时间.

关 键 词: 闪蒸; 非均温; 传热传质; 移动相变界面; 参数效应

中图分类号: V434⁺.14; TK02

文献标志码: A

Modeling and analysis of non-isothermal of droplet flash evaporation in vacuum environment

YANG Rui¹, LIN Gui-ping¹, BAI Li-zhan¹, CHEN Peng-fei²,
LI Long-fei², SUN Bing¹

(1. School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Liquid Propulsion Rocket Engine,
Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: To reveal the mechanism of droplet flash evaporation in vacuum in depth, a complete non-isothermal model for heat and mass transfer was established. The variation of temperature field and droplet radius was solved exactly, and the accurate position of solid-liquid interface in freezing stage was tracked in real time. Based on the experimental study, the change of droplet shape before and after phase change was observed, and the numerical model was validated to accurately predict the basic features of the process. The effects of initial radius, initial temperature, vacuum pressure and subcooling degree on flash evaporation were studied. Results showed that the vacuum pressure was the major factor in the whole process which would affect the final equilibrium temperature. The initial radius mainly affected the precooling and freezing time, while the initial temperature and subcooling degree only affected the precooling time.

Key words: flash evaporation; non-isothermal; heat and mass transfer;
moving phase change interface; parametric effect

收稿日期: 2017-03-22

作者简介: 杨锐(1989—),女,博士生,主要从事环路热管等高效传热技术的研究.

引用格式: 杨锐,林贵平,柏立战,等.真空条件下液滴闪蒸的非均温建模与分析[J].航空动力学报,2017,32(5):1058-1065. YANG Rui, LIN Guiping, BAI Lizhan, et al. Modeling and analysis of non-isothermal of droplet flash evaporation in vacuum environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1058-1065.

随着人们生活水平和对舒适性要求不断提高,2001—2010 年全世界能耗增长了 29%^[1]. 与此同时,白天峰值电力负荷的提高导致峰谷差的持续拉大也严重影响了电力系统经济、安全运行^[2-3]. 为缓解电网用电压力、提升系统效率,以冰浆为介质的冰蓄冷技术应运而生,其利用夜间低谷时段电力制冰并蓄冰,在白天用电高峰期则可少开甚至不开制冷主机,从而有效实现电力负荷的移峰填谷^[4-5]. 冰浆通常由直径为 50~100 μm 的冰晶颗粒与水构成,具有流动性好、储能密度高、传热系数大且温差小等优点,目前已广泛应用于蓄冷、食品工程、能量传输等领域^[6-8]. 冰浆真空制备法利用三相点原理实现闪蒸与结冰同时进行,其传热效率高、结构简单且操作方便,具有广泛的应用前景.

单个液滴在真空条件下闪蒸结冰是一个复杂的传热传质过程,目前针对该过程的建模与数值研究还不够完善. Feuillebois 等^[9]运用 3 种模型描述冻结方向,即中心结冰向外扩展、均匀结冰和外部结冰向内扩展,并分别用摄动法和数值解法追踪了结冰过程中的固液界面. Shin 等^[10]和 Kim 等^[11]团队利用控制扩散蒸发模型研究了真空产生冰粒的条件,获得了蒸发阶段液滴的质量减少率和温度变化. 赵凯璇等^[12]和 ZHANG Xuelai 等^[13]对整个闪蒸结冰过程进行了数学建模,其中蒸发和升华速率的计算基于 Hertz-Knudsen-Schrage 模型. 在此基础上,文献[12]还分析了主要参数对预冷时间、冻结时间和最终温度的影响,文献[13]对含冰率的影响因素进行了预测.

值得注意的是,上述文献都是利用扩散控制的蒸发模型对闪蒸冻结各阶段进行整体的传热传质建模,采用集总参数法对液滴进行了等温处理. 然而在可视化的实验研究中,刘伟民^[14]和 LIU Lu 等^[15]均发现真空闪蒸过程中液滴内部存在较大的温度梯度. 因此,有必要建立非均温的液滴闪蒸模型. Strub 等^[16]只计算了冰层温度随时间和半径的变化,且其模型在结冰阶段忽略了相变界面的热传导. CHENG Wenlong 等^[17]通过考虑内部温度梯度和对流的影响修正了液滴热导率,但该模型只适用于过冷阶段. Hindmarsh 等^[18]建立了冷气流中液滴过冷、冻结、升华阶段的一维瞬态导热模型,温升阶段采用了整体热平衡,即认为过冷结束和冻结初始整个液滴均温,且该模型没有考虑传质即闪蒸过程中液滴质量和半径的变化.

可见,虽然上述文献在建模时考虑了液滴的

非均温特点,但有的只是针对部分阶段或认为某些阶段温度均匀,有的则忽略了过程中的质量传递,另外,以上文献均认为温升阶段整个液滴达到三相点温度,但事实上该过程的闪蒸和结冰在液滴表面瞬间完成,故理解为冰和表层液体升温至三相点更为合理. 因此,为了更深入地揭示液滴在真空环境下的闪蒸机理,本文建立了更趋合理的真空闪蒸全过程、非均温传热传质数学模型,考虑了固液相的物性参数随温度的变化. 通过对瞬态导热方程进行全隐式离散,结合移动节点法和虚拟边界点法,精确求解了各时刻的液滴温度场及半径,准确追踪了结冰阶段的相变界面位置. 开展了液滴闪蒸的实验研究,观察了相变前后液滴的形态变化,并对数值模型进行了验证. 另外,本文对闪蒸过程的数值结果进行了详细分析并研究了初始半径、初始温度、真空度和结冰过冷度对闪蒸过程的影响.

1 模型建立及求解

真空条件下单个液滴的闪蒸冻结是一个非常复杂的物理过程,受到液滴内部热量扩散及外部质量扩散、辐射换热的共同控制. 根据实验现象,一般将闪蒸冻结过程划分为 4 个阶段^[18],即预冷阶段、温升阶段、冻结阶段和再冷阶段.

为简化计算过程,凸显闪蒸机理,本文采用准平衡过程假设,对闪蒸过程进行如下简化:

1) 闪蒸过程中液滴保持为球形.

2) 蒸发与升华只发生在外表面,内部固液相变引起的应力不影响冰壳稳定性.

基于上述机理和假设,本文建立了单个液滴真空闪蒸 4 个阶段的非均温传热传质模型. 液滴温度在整个相变过程是半径和时间的函数,即 $T=T(t,r)$,且所有涉及的物性参数均认为随温度变化,由方程拟合得到.

1.1 过冷阶段

闪蒸开始后,液滴表面发生强烈蒸发,其温度从初值 T_0 不断下降,至冰点温度 T_c 后继续过冷至表面温度达到结冰过冷度(由液滴纯度以及外界干扰状况等决定).

1.1.1 液滴半径减少量 Δr_1

液滴体积 V_1 随时间 t 的变化为

$$\frac{dV_1}{dt} = -4\pi r_1^2 \frac{\dot{m}_{lg}}{\rho_l} \quad (1)$$

式中 r_1 为液滴半径, ρ_l 为液滴密度, $\dot{m}_{lg}$ 为表面单位面积的蒸发速率,由 Hertz-Knudsen-Schrage 模

型^[19]确定,表达式为

$$\dot{m}_{lg} = \frac{1}{\sqrt{2\pi R_g}} \cdot \frac{2\sigma_{lg}}{2 - \sigma_{lg}} \left(\frac{p_{sat,l}}{\sqrt{T_l}} - \frac{p_a}{\sqrt{T_a}} \right) \quad (2)$$

式中 R_g 为气体常数; σ_{lg} 为蒸发/凝结过程的伴随系数, p_a 为环境压力; T_l, T_a 分别为液滴表面温度和环境温度; $p_{sat,l}$ 为液相与气相在弯曲界面取得相平衡时表面温度 T_l 对应的饱和压力

$$p_{sat,l} = p_{sat}(T_l) \exp\left(\frac{p_{sat,l} - p_{sat}(T_l) + \gamma K}{\rho_l R_g T_l}\right) \quad (3)$$

式中 γ 为液体表面张力, K 为气液界面曲率, $p_{sat}(T_l)$ 为不考虑表面张力时液滴表面温度 T_l 对应的饱和压力。

从而可得液滴半径减少率

$$\frac{dr_l}{dt} = -\frac{\dot{m}_{lg}}{\rho_l} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi R_g}} \cdot \frac{2\sigma_{lg}}{2 - \sigma_{lg}} \left(\frac{p_{sat,l}}{\sqrt{T_l}} - \frac{p_a}{\sqrt{T_a}} \right) \quad (4)$$

采用差分易得相邻时刻液滴半径减少量 Δr_l 。

1.1.2 液滴温度场

由液滴能量守恒可得一维瞬态导热方程

$$\rho_l c_l \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r_l^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_l r_l^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5)$$

$r = r_l$ 处的边界条件为第2类,包括液滴表面向环境的蒸发散热和液滴真空环境的辐射换热

$$-\lambda_l \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_l} = \Delta h_{lg} \dot{m}_{lg} + \epsilon \sigma (T_l^4 - T_a^4) \quad (6)$$

式中 ϵ 为液滴辐射率, σ 为黑体辐射常数, Hindmarsh 等^[18]通过实验和数值模拟验证了 r 为零处热电偶的热流可以忽略,因此由对称性可知

$$-\lambda_l \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 0 \quad (7)$$

通过在时间步长 Δt 内对节点采用控制容积积分法来建立方程式(5)的离散格式, $r = r_l$ 处的边界条件采用虚拟点法进行处理,采用全隐格式以保证其数值稳定性和解的物理意义。

1.2 温升阶段

当液滴表面温度下降至结冰温度时,表面过冷液迅速冻结并释放大量潜热,导致表面薄层内的固液混合物迅速升温至三相点温度 T_c (文献[18]观察到冰层始终位于液滴最外层,内部液体温度保持过冷阶段结束瞬间的分布,如图1。需注意,从该阶段至闪蒸结束液滴外表面已有冰层或液滴已全部变成冰,因此之后的液滴改称为颗粒,对应的半径为 r_s ,即整个颗粒半径。

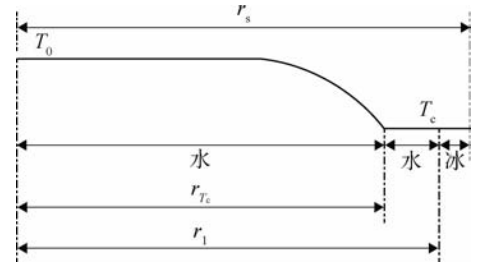


图1 温升结束时颗粒温度分布

Fig. 1 Temperature distribution of particle at the end of recalescence stage

该过程极其短暂,颗粒与外界的热量交换可忽略,作为等焓过程处理。设温升后固液混合物中结冰质量为 m_s 、液体质量为 m_l ,则有

$$m_l h_l(T_c) + m_s h_s(T_c) = \int_{r_{T_c}}^{r_s} \rho_l h(r) 4\pi r^2 dr \quad (8)$$

式中 r_{T_c} 是预冷阶段结束瞬间温度等于三相点 T_c 的节点半径。又由质量守恒易知

$$m_l + m_s = \int_{r_{T_c}}^{r_s} \rho_l 4\pi r^2 dr \quad (9)$$

联立方程式(8)、式(9)即可求解 m_s 和 m_l ,从而获得冰层厚度 δ 及 r_{T_c}, r_l 。

1.3 冻结阶段

表面冰层升华吸热,颗粒温度不断下降,内部包覆的液体沿径向向外传热,结冰由外向内逐渐推进,是典型的移动边界问题,如图2所示。

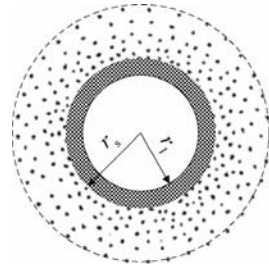


图2 闪蒸过程冻结阶段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of freezing stage of the flash evaporation

1.3.1 颗粒半径减少量 Δr_s

与预冷类似,颗粒体积 V_s 随时间变化为

$$\frac{dV_s}{dt} = -4\pi r_s^2 \frac{\dot{m}_{sg}}{\rho_s} \quad (10)$$

式中 $\dot{m}_{sg}$ 为颗粒表面单位面积的升华速率,同样由 Hertz-Knudsen-Schrage 模型确定

$$\dot{m}_{sg} = \frac{1}{\sqrt{2\pi R_g}} \cdot \frac{2\sigma_{sg}}{2 - \sigma_{sg}} \left(\frac{p_{sat,s}}{\sqrt{T_s}} - \frac{p_a}{\sqrt{T_a}} \right) \quad (11)$$

式中 σ_{sg} 为升华/凝华过程中的伴随系数, $p_{sat,s}$ 为颗粒表面温度 T_s 对应的饱和压力。从而颗粒半

径的减少量 Δr_s 可参照预冷阶段得到.

1.3.2 固液界面

认为结冰过程中固液两相具有明确的界面,且该界面以一定的速度 $v = dr_l/dt$ 向内推进,该速度由相变界面的温度梯度决定,通过分析界面处的能量守恒可知

$$\lambda_l \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_l + \rho_l \frac{dr_l}{dt} \Delta h_{sl} = \lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_s \quad (12)$$

即液体传给交界面的热流密度加上其结冰释放的潜热,等于通过交界面传给冰的热流密度.采用向前差分进行离散可得相邻时刻液体半径的减少量 Δr_l ,从而跟踪固液界面.

1.3.3 颗粒温度场

冻结阶段导热微分方程及其离散与预冷阶段一致,但须以固液交界面为分界分别进行水和冰的离散.边界条件参照方程式(6)、式(7),不同的是 $r = r_s$ 处物性参数为冰的,潜热为升华潜热.

1.4 再冷阶段

颗粒完全冻结后即进入再冷阶段,冰球表面继续升华吸热直至整个冰球全部消失.再冷阶段的数学模型及计算方法与预冷阶段一致,只是后者发生蒸发、物性参数均为液态,而前者发生升华、物性参数均为固态.

2 模型验证及结果分析

为验证模型的准确性,设计并搭建了颗粒闪蒸的可视化实验系统如图3所示.实验前将颗粒悬挂在闪蒸室内的热电偶上,并关闭连通阀,将真空舱抽至真空状态.随后启动数据采集系统,打开连通阀,使闪蒸室中环境压力迅速降低到工质饱和

蒸汽压以下,颗粒发生闪蒸,通过高速相机和热电偶获取颗粒图像和温度变化参数.图4所示为颗粒闪蒸的实验条件及实验前后的形态变化,初始半径 $r_0 = 0.5\text{ mm}$,初始温度 T_0 与环境温度 T_a 相等,均为 283.15 K ,环境压力 p_a 为 50 Pa ,可以看出在重力作用下热电偶几乎位于颗粒边界.

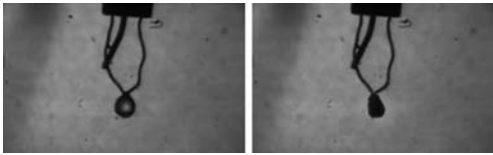


图4 颗粒闪蒸相变前后的形态变化

Fig. 4 Shape change of the particle before and after flashing evaporation

图5所示为数值计算的边界温度与实验结果的比较(截取至达到平衡温度后一段时间,后同),计算条件与图4标注一致.本文通过与实验数据(尤其是预冷时间和平衡温度)进行对比,选取 $\sigma_{lg} = 0.01, \sigma_{sg} = 0.06$ 进行计算.实验测得结冰过冷度为 15 K ,平衡温度为 243.15 K .边界温度随时间的变化曲线与实验结果符合很好,因此该模型完全可以用来对闪蒸进行模拟预测.

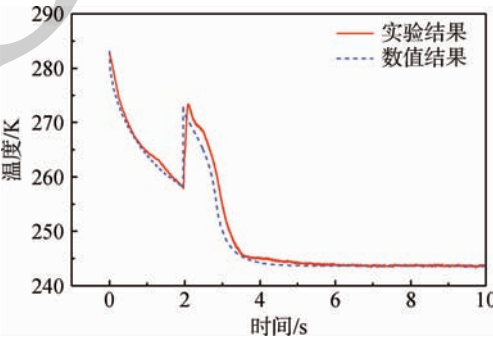


图5 边界温度变化计算值与实验值对比

Fig. 5 Comparison between computation and experimental value of boundary temperature variation

数值计算过程中取时间步长 $dt = 10^{-5}\text{ s}$,将颗粒沿径向从内往外划分为1000个节点.下面通过该算例对闪蒸过程进行详细分析.图6所示为预冷阶段颗粒温度场的变化情况,整个过程用时 1.96 s ,结束时颗粒边界达到结冰温度(258.15 K).取初始温度场、每隔 0.5 s 的温度场及结束时的温度场进行研究,如图6(a)所示.可以看出随着时间的增加,边界温度下降较快,同时由于热传导,其他节点温度也随着时间从外到内依次降低(如图6(b)),预冷结束时内外温度几乎相等.

由于预冷阶段结束时各节点温度均已降至三相点温度以下,因此温升阶段整个颗粒温度升至

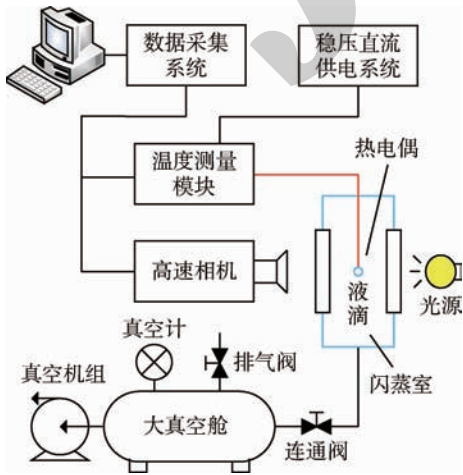


图3 颗粒闪蒸实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system of droplet flash evaporation

273.15 K, 其中 $r_l=0.471\text{ mm}$, $r_s=0.493\text{ mm}$, 冰层厚度 $\delta=r_s-r_l=0.022\text{ mm}$. 液体质量 $m_l=0.458\text{ mg}$, 冰质量 $m_s=0.044\text{ mg}$.

冻结阶段用时 0.83 s 整个颗粒即完全结冰, 温度场变化如图 7 所示. 初始状态各节点温度等于 273.15 K, 随着热传导, 节点温度从外到内依次降低, 液体半径逐渐减小, 固液界面逐渐向内部移动直至完全结冰, 对应关系见图 8.

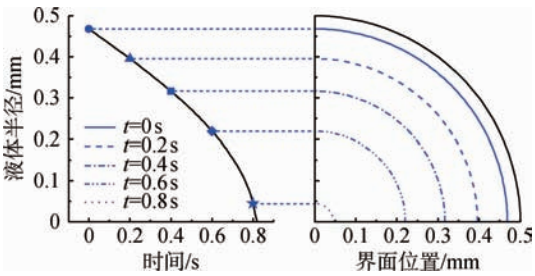


图 8 固液界面位置

Fig. 8 Location of the solid-liquid interface

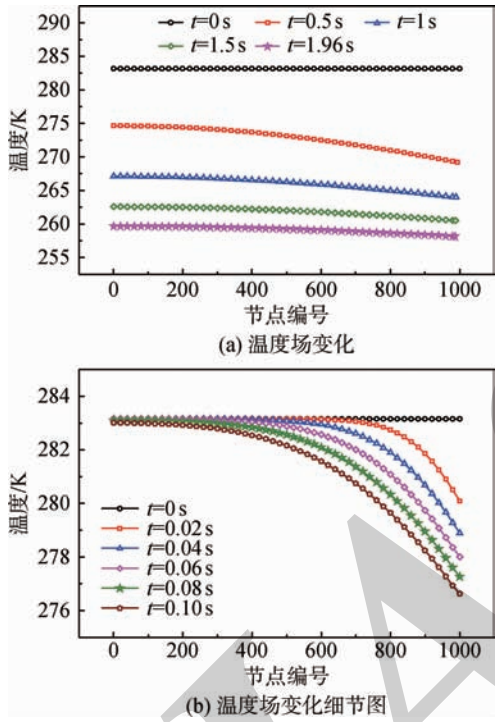


图 6 预冷阶段颗粒温度场变化及细节图

Fig. 6 Temperature field variation and its details during precooling stage of particle

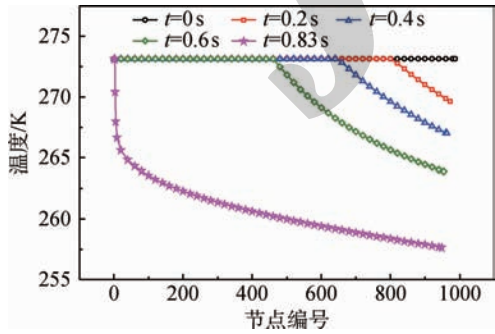


图 7 冻结阶段颗粒温度场变化

Fig. 7 Temperature field variation during freezing stage of particle

冰粒在再冷阶段开始后 6.8 s 即达到平衡温度 243.65 K, 而整个冰粒全部升华掉需要用时 2.3 h. 图 9 所示为再冷开始 3 s 内的温度场情况, 可见在 1 s 时颗粒温度已几乎均匀, 2 s 和 3 s 时刻

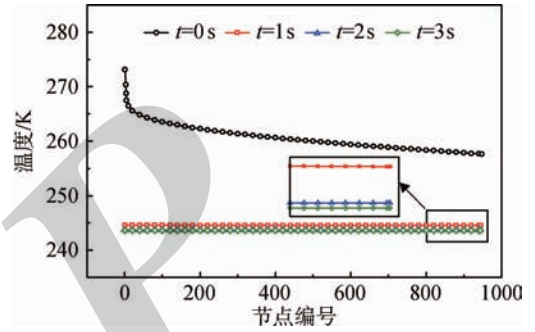


图 9 再冷阶段前 3 s 的温度场变化

Fig. 9 Temperature field variation at the first three seconds during sublimation stage

的颗粒温度均已非常接近平衡温度.

图 10 所示为闪蒸开始至平衡过程中边界节点、中心节点(即节点 1)和节点 500 的温度变化情况. 可明显看出预冷和冻结阶段温度由外向内的推进情况.

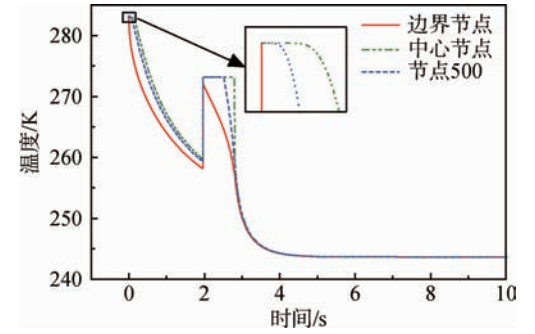


图 10 边界节点、中心节点和节点 500 的温度变化

Fig. 10 Temperature variation of the boundary node, center node and node 500

3 参数效应分析

3.1 初始半径的影响

本节取初始半径 $r_0=0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{ mm}$ 进行其对闪蒸特性影响的研究. 图 11 给出了不同初始半径的液滴在闪蒸过程中边界温度随时间的变化情况, 表 1 为预冷和冻结阶段结束时液滴/颗

粒半径与初始半径的比值. 可见, r_0 越大, 其自身热容越大, 预冷达到相同结冰过冷度所需时间就越长, 终了半径比越大. 冻结开始后, r_0 越大的对应内部液体的初始半径就越大, 冻结时间相应增长, 颗粒表面吸收热量增多, 因此冻结结束时的颗粒边界温度越小. 另外, 平衡温度 T_e 对应 $\Delta h_{sg} \dot{m}_{sg} = \varepsilon \sigma (T_a^4 - T_s^4)$ 时的温度 T_s , 因此与初始半径无关.

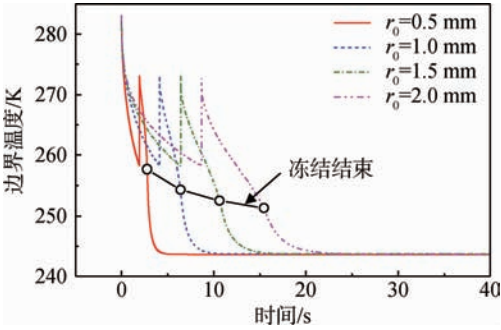


图 11 初始半径对边界温度的影响

Fig. 11 Influence of initial radius on boundary temperature

表 1 初始半径对预冷和冻结阶段终了半径比的影响

Table 1 Influence of initial radius on radius ratio at the end of precooling stage and freezing stage

r_0/mm	半径比/%	
	预冷阶段	冻结阶段
0.5	98.62	94.75
1.0	98.65	94.70
1.5	98.69	94.68
2.0	98.72	94.66

3.2 初始温度的影响

本节取初始温度 $T_0=278.15, 283.15, 288.15, 293.15\text{ K}$ 进行其对闪蒸特性影响的研究. 液滴/颗粒边界温度及预冷、冻结终了半径与初始半径的比值分别见图12和表2. 可见, T_0 越大, 闪蒸

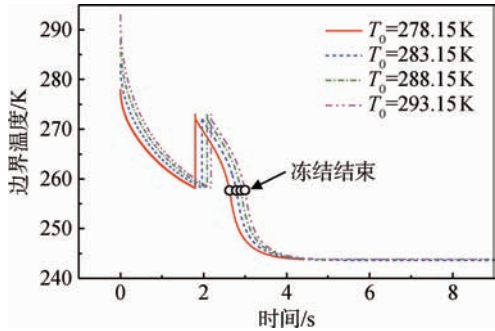


图 12 初始温度对边界温度的影响

Fig. 12 Influence of initial temperature on boundary temperature

表 2 初始温度对预冷和冻结阶段终了半径比的影响

Table 2 Influence of initial temperature on radius ratio at the end of precooling stage and freezing stage

T_0/K	半径比/%	
	预冷阶段	冻结阶段
278.15	98.90	95.01
283.15	98.62	94.75
288.15	98.34	94.48
293.15	98.06	94.21

速率越快, 边界温度降低就越快, 但由于需要达到相同结冰过冷度, 其预冷时间还是会相应变长, 从而预冷阶段半径减少越多, 终了半径比越小. 由于液滴整体在温升阶段均已达到三相点温度, 因此初始温度对冻结阶段和再冷阶段的影响几乎可以忽略, 且对平衡温度没有影响. 另外, 表 2 中各初始温度对应的预冷和冻结阶段半径比的差值几乎相等也能说明这个问题.

3.3 真空舱压力的影响

本节取真空舱压力 $p_a=20, 50, 100, 150\text{ Pa}$ 进行其对闪蒸特性影响的研究. 液滴/颗粒边界温度及预冷、冻结终了半径与初始半径的比值分别见图13和表3. p_a 越小, 蒸发/升华速率越快, 边

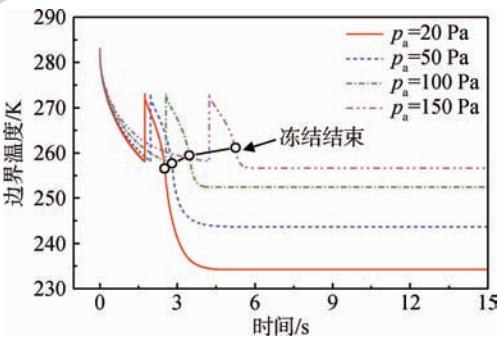


图 13 真空舱压力对边界温度的影响

Fig. 13 Influence of vacuum pressure on boundary temperature

表 3 真空舱压力对预冷和冻结阶段终了半径比的影响

Table 3 Influence of vacuum pressure on radius ratio at the end of precooling stage and freezing stage

p_a/Pa	半径比/%	
	预冷阶段	冻结阶段
20	98.63	94.73
50	98.62	94.75
100	98.60	94.77
150	98.58	94.79

界温度下降越快,相应的预冷和冻结时间越短,半径比越小,且冻结终了边界温度越小. 另外, p_a 越小对应的 $\Delta h_{sg} \dot{m}_{sg}$ 越大,由平衡时 $\Delta h_{sg} \dot{m}_{sg} = \epsilon \cdot \sigma(T_a^4 - T_s^4)$ 知对应的平衡温度就越低.

3.4 结冰过冷度的影响

本节取结冰过冷度 $\Delta T=10,15,20,25\text{ K}$ 进行其对闪蒸特性影响的研究. 液滴/颗粒边界温度及预冷、冻结终了半径与初始半径的比值分别见图 14 和表 4. 随着 ΔT 的增大,液滴需要更长时间来达到结冰温度,相应的终了半径比会减少. 与初始温度的影响类似,在温升阶段后整个液滴均达到 273.15 K,虽然此时结冰过冷度越大对应的结冰量会稍多,但由于升华速率快、吸热多且冻结时间短,因此 ΔT 对冻结及再冷阶段的影响几乎可以忽略.

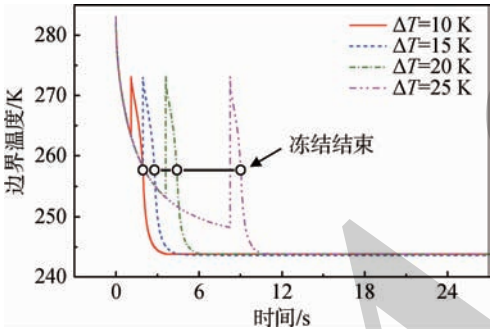


图 14 结冰过冷度对边界温度的影响
Fig. 14 Influence of subcooling degree on boundary temperature

表 4 结冰过冷度对预冷和冻结阶段终了半径比的影响
Table 4 Influence of subcooling degree on radius ratio at the end of precooling stage and freezing stage

$\Delta T/\text{K}$	半径比/%	
	预冷阶段	冻结阶段
10	98.93	94.86
15	98.62	94.75
20	98.31	94.64
25	97.97	94.54

4 结 论

本文以冰浆蓄冷为应用背景,对真空闪蒸现象建立了更趋合理的全过程、非均温传热质数学模型. 获得了各时刻的液滴温度场及半径,并能够追踪结冰阶段的相变界面位置. 开展了液滴闪蒸的实验研究,观察了相变前后液滴的形态变化,并对数值模型进行了验证. 另外,本文对闪蒸过程

的数值结果进行了详细分析并研究了初始半径、初始温度、真空舱压力和结冰过冷度对闪蒸过程的影响. 结论如下:

- 1) 初始半径主要影响预冷和冻结的时间. 初始半径越大,则预冷和冻结时间越长.
- 2) 初始温度主要影响预冷时间. 初始温度越高,闪蒸速率越快,预冷时间略有增长,终了半径比减小.
- 3) 真空舱压力是整个闪蒸过程的主要控制因素. 真空度越高,蒸发/升华速率越快,预冷、冻结阶段时间越短,平衡温度越低.
- 4) 结冰过冷度主要影响预冷时间. 结冰过冷度越大,预冷时间越长,终了半径比越小.

参考文献:

[1] Mahato A, Kumar A. Modeling transport phenomena of ice slurry in an ice forming unit[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 69: 205-222.

[2] Yau Y H, Rismanchi B. A review on cool thermal storage technologies and operating strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(1): 787-797.

[3] Al-Abidi A A, Mat S B, Sopian K, et al. Review of thermal energy storage for air conditioning systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 5802-5819.

[4] Ezan M A, Erek A, Dincer I. Energy and exergy analyses of an ice-on-coil thermal energy storage system[J]. Energy, 2011, 36(11): 6375-6386.

[5] PU Jing, LIU Guilian, FENG Xiao. Cumulative exergy analysis of ice thermal storage air conditioning system[J]. Applied Energy, 2012, 93(5): 564-569.

[6] YAN Junjie, ZHANG Dan, CHONG Daotong, et al. Experimental study on static/circulatory flash evaporation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(23): 5528-5535.

[7] Davies T W. Slurry ice as a heat transfer fluid with a large number of application domains[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 108-114.

[8] Egolf P W, Kauffeld M. From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 4-12.

[9] Feuillebois F, Lasek A, Creismas P, et al. Freezing of a subcooled liquid droplet[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1995, 169(1): 90-102.

[10] Shin H T, Lee Y P, Jurng J. Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber[J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(5): 439-454.

[11] Kim B S, Shin H T, Lee Y P, et al. Study on ice slurry production by water spray[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(2): 176-184.

[12] 赵凯璇, 赵建福, 陈淑玲, 等. 颗粒真空闪蒸/冻结过程的热动力学研究[J]. 空间科学学报, 2001, 31(3): 57-62.

ZHAO Kaixuan, ZHAO Jianfu, CHEN Jiaozhen, et al. Thermodynamics of flashing/freezing process of a droplet in vacuum[J]. Chinese Journal of Space Science, 2001, 31 (3): 57-62. (in Chinese)

[13] ZHANG Xuelai, HAN Zhong, LI Zhiwei. Analysis on IPF influencing factors for vacuum binary ice making method [J]. International Journal of Thermal Science, 2013, 67 (5): 210-216.

[14] 刘伟民. 真空闪蒸过程中换热与流动机理的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.

LIU Weimin. Study on the mechanism of heat transfer and flow of flash evaporation in vacuum [D]. Xi'an: Xi'an Jiao-tong University, 2006. (in Chinese)

[15] LIU Lu, BI Qincheng, WANG Guoxiang. Dynamics of evaporation and cooling of a water droplet during the early stage of depressurization [R]. Lake Buena Vista: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2009.

[16] Strub M, Jabbour O, Strub F, et al. Experimental study and modelling of the crystallization of a water droplet[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 59-68.

[17] CHENG Wenlong, PENG Yuhang, CHEN Hua, et al. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of vacuum spray flash evaporation cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102: 233-240.

[18] Hindmarsh J P, Russell A B, Chen X D. Experimental and numerical analysis of the temperature transition of a freezing food solution droplet [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(12): 2503-2515.

[19] Schrage R W. A theoretical study of interphase mass transfer [M]. New York: Columbia University Press, 1953.

(编辑: 王碧珺)