

过热度 and 液膜厚度对微米级液膜闪蒸影响的数值模拟探究

王 岩, 刘 妮, 于智翔

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年2月9日; 录用日期: 2022年3月11日; 发布日期: 2022年3月18日

摘 要

建立空间内微米级液膜的二维数值分析模型, 采用patch形式对网格进行划分来定义不同的液膜厚度。基于Mixture模型来描述液膜与其上方的水蒸气之间的传质传热过程, 研究了液膜厚度和液膜过热度对液膜闪蒸造成的影响。根据模拟得到液膜的温度数据, 在数学模型的基础上, 计算液膜闪蒸的蒸发质量以及蒸发质量的变化率, 并引入反映闪蒸过程中温度变化的非平衡分数NEF来表示闪蒸过程的完整性。对液膜各个瞬态时间点的闪蒸状态及影响其传质传热特性的因素进行分析。结果表明: 微米级液膜的闪蒸分为快速和稳定两个阶段, 初始液膜厚度的增大会抑制闪蒸, 由于初始厚度的不同会影响液膜底部的静压, 致使达到平衡时的温度略微不同。液膜过热度会通过表面张力产生影响, 进而产生Marangoni对流, 促进闪蒸的进行。

关键词

液膜闪蒸, 过热度, 液膜厚度, 非平衡分数, 传热传质

Numerical Simulation of Influence of Superheat and Film Thickness on Micron-Scale Liquid Film Flash Evaporation

Yan Wang, Ni Liu, Zhixiang Yu

Faculty of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 9th, 2022; accepted: Mar. 11th, 2022; published: Mar. 18th, 2022

Abstract

The two-dimensional numerical analysis model of micron liquid film in space was established, and the mesh was divided in patch form to define different liquid film thickness. The mass and heat transfer process between liquid film and water vapor was described based on Mixture model, and the effects of liquid film thickness and superheat on liquid film flash were studied. According to the temperature data of liquid film obtained by simulation, the evaporation mass of liquid film flash and the change rate of evaporation mass are calculated on the basis of mathematical model. The non-equilibrium fraction NEF, which reflects the temperature change in the flash process, is introduced to represent the integrity of the flash process. The flash state of liquid film at each transient time point and the factors affecting its mass and heat transfer characteristics were analyzed. The results show that the flash of micron liquid film can be divided into two stages: fast and stable. The increase of initial liquid film thickness will inhibit the flash, and the difference of initial liquid film thickness will affect the static pressure at the bottom of liquid film, resulting in a slightly different temperature at equilibrium. The superheat of liquid film can influence the surface tension, and then produce Marangoni convection, which promotes flash

Keywords

Liquid Film Flash, Superheat, Liquid Film Thickness, Non-Equilibrium Fraction, Heat and Mass Transfer

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

喷雾冷却作为一种新型的冷却方式,具有换热系数高、工质流量小、冷却均匀等特点,在电子器件散热方面具有广阔的应用前景[1]。在接近真空的条件下进行喷雾冷却,大部分液滴会在喷雾过程中直接发生闪蒸汽化甚至破裂,但仍有一部分液滴落到空间底部,在壁面上形成一层微米级的薄膜,继续进行闪蒸,这一过程被称为液膜闪蒸。现有研究普遍集中在池水闪蒸的研究中,相比于喷雾下的液膜闪蒸,池水的深度要远高于液膜。且针对液膜闪蒸的研究,主要集中在实验对工业领域的探究[2],而针对液滴落下形成的较薄液膜的建模细化研究相对较少。所以有必要对于微米级的液膜闪蒸进行数值模拟研究,并对过热度以及液膜厚度对液膜闪蒸造成的影响进行机理分析,从而为提高喷雾冷却的效率提供参考意义。

在关于液膜闪蒸的传质传热机理研究方面,Saury等人[3]在初始液膜高度为15 mm,过热度为1~35 K,初始温度为30°C~75°C的条件下,对液膜的闪蒸现象进行了实验研究。发现液体的初始温度和过热度是影响闪蒸的动力学参数,并得到了液体的闪蒸蒸发量与过热度的关系。Saury等人也研究了初始液膜高度和减压速率对液膜闪蒸的影响[4]。在初始液膜高度25~250 mm、过热度2~44 K、初始液体温度45°C~85°C的条件下进行了实验研究,首次定性地指出了初始液膜高度对闪蒸现象的影响,并将液体的闪蒸蒸发质量与液体温度关联起来,用数学模型描述了初始液膜高度对闪蒸时间、液体的闪蒸蒸发质量以及减压速率的影响。郭迎利等人[5][6]在初始液膜厚度40~150 mm,初始水温36°C~88°C,过热度2.1°C~48°C的范围里对池水沸腾进行了研究。得到了与闪蒸时间、液膜初始温度以及过热度相关的经验关联式。Yang等人[7]在初始液膜浓度为0~0.15 mg/L、初始高度为0.1~0.4 m、过热度为1.8~49.5 K的条件下,对盐水静

态闪蒸进行了实验研究，引入了两个新的影响参数，瞬时过热度以及瞬时传热系数，对闪蒸的传热进行了描述。结果表明，增大水膜的初始高度，非晶化区和晶化区的水膜厚度均减小。Wang 等[8]搭建了静态闪蒸试验台，利用高速摄像机研究了不同过热度对纯水静态闪蒸中液膜高度变化的影响，引入液膜膨胀率(闪蒸过程中液膜实时液位与初始液位的比值)来衡量液膜高度变化，结果表明，在该过热度(7~32.5 K)范围内，液膜最大膨胀率随过热度的增加而增大。He [9]实验研究了不同过热度 and 液膜厚度对乙二醇工质循环闪蒸的不平衡特性，发现提高过热度、降低初始液膜高度能够促进闪蒸的进行。

基于前人关于液膜闪蒸的实验探究方面，液膜的厚度最小也在毫米数量级上，而微米级的液膜闪蒸由于液膜厚度太小，闪蒸太剧烈，实验中很难捕捉到其温度、直径等状态变化参数。为了更好地分析液膜闪蒸过程中的传质传热机理，有必要对于微米级的液膜闪蒸进行数值研究，并对过热度 and 液膜厚度对液膜闪蒸造成的影响进行机理分析。

2. 计算模型和数值方法

2.1. 物理模型

本文研究的微米级液膜，其厚度相对于所处空间占比很小，为了更好地反映液膜在闪蒸时经历的变化，所以对液膜在壁面上的一部分进行了选取，同时保证液膜厚度 1:1 还原，如图 1 所示：

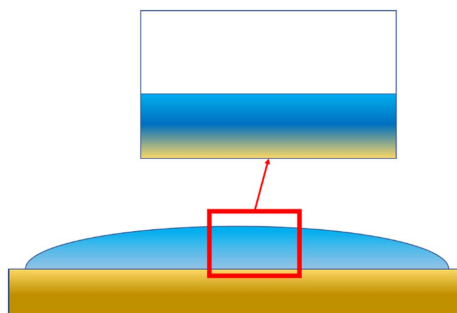
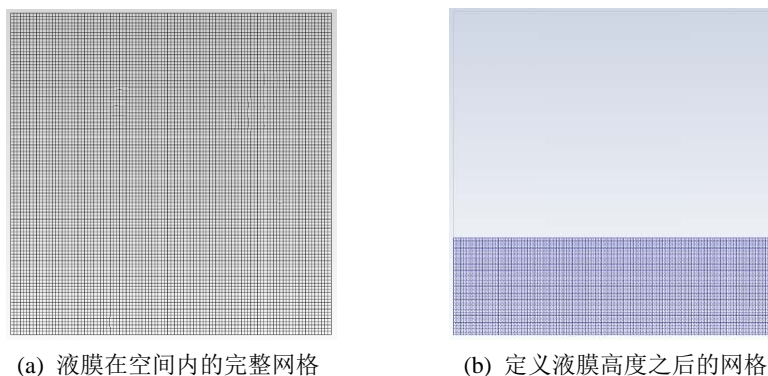


Figure 1. Liquid film in space and selected part of numerical simulation schematic diagram

图 1. 空间中液膜以及数值模拟选取部分示意图

2.2. 网格划分

本文针对液膜采用的是 Mixture 模型，可以更好的观测液膜与其上方水蒸气相之间的传热传质过程，同时采取 Patch 的形式在网格上进行划分，定义不同的液膜高度，如图 2(a)、图 2(b)所示。



(a) 液膜在空间内的完整网格

(b) 定义液膜高度之后的网格

Figure 2. Meshing of liquid film

图 2. 液膜的网格划分

2.3. 液膜闪蒸的数学模型

液膜闪蒸的数学模型包括 Mixture 混合模型对液膜部分建立的基本控制方程, 包括质量、动量、能量守恒方程以及水蒸气相体积分数的相关计算, 分别如公式(1)~(4)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{w=1}^n (\alpha_w \rho_w E_w) + \nabla \cdot \sum_{w=1}^n (\alpha_w \mathbf{v}_w (\rho_w E_w + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (4)$$

在传热传质方面, 传质通过蒸发的质量流量进行表征。考虑到实际情况中, 闪蒸室内的壁面具有一定热惯量, 使得其与外界的能量交换可以忽略不计。此外, 由于闪蒸现象的速度和闪蒸过程中壁面温度变化极小, 相比于能量守恒方程中其他项, 闪蒸过程中壁面所提供的能量是可以忽略的[10]。因此, 闪蒸室内温度下降所释放的能量被完全用于蒸发液膜, 则对在 t 时刻, 原质量为 m , 温度为 T , 蒸发质量为 δm 的液体水, 可得下能量平衡式:

$$(m - \delta m) c_p (T - dT) - mc_p T + \delta m h_{fg} = 0 \quad (5)$$

h_{fg} 是水的蒸发潜热, $h_{fg} = 2.734 \times 10^6 + 82.78T - 3.660T^2$;

c_p 是水的比热容, 取 4200。

忽略二阶小量, 可以得到:

$$\frac{\delta m}{m} = \frac{c_p dT}{h_{fg} - c_p T} \quad (6)$$

则液膜蒸发速率为:

$$\dot{m}_{ev} = \frac{dm}{dt} = \left(\frac{mc_p}{h_{fg} - c_p T} \right) \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

根据前人的假设, 室内的水质量变化可以忽略不计(实验数据中大多 <4%), 可以得到液膜闪蒸的蒸发质量 $m_{\text{flash-evaporation}}$:

$$m_0 c_p (T - dT) - m_0 c_p T + \delta m h_{fg} = 0 \quad (8)$$

$$m_0 c_p \Delta T = m_{\text{flash-evaporation}} h_{fg} \quad (9)$$

$$m_{\text{flash-evaporation}} = m_0 \frac{c_p}{h_{fg}} \Delta T \quad (10)$$

这里, 我们还引入了反应液膜闪蒸中温度变化的非平衡分数 NEF [11] (一般通过它反应整个闪蒸过程的完整性):

$$\text{NEF}(t) = \frac{T(t) - T_e}{T_0 - T_e} \quad (11)$$

其中: T_e 是闪蒸现象平衡后的温度。

闪蒸时间的经验式[12]:

$$t^* = 44T_e^{-0.86} \Delta T^{0.55} \quad (12)$$

其中: ΔT 是闪蒸平衡温度(环境压力对应的饱和温度)与液膜初始温度的差值。

在闪蒸时间 t^* 处的 NEF 为:

$$NEF^* = \frac{T(t^*) - T_e}{T_0 - T_e} \quad (13)$$

2.4. 边界条件及初始条件的选择

由于本文研究的液膜闪蒸的尺寸量级为微米,其厚度相对于所处空间占比很小,出口条件以及两侧壁面边界条件均选择无滑移的绝热壁面,由于液膜静止, Re 数很小,不需要考虑近壁面函数的影响,同时为了减少影响因素,更明确环境压力以及初始过热度对液膜闪蒸的影响,所以与液膜相接触的壁面选择无滑移的绝热壁面。液膜闪蒸的初始条件如表 1 所示:

Table 1. Initial conditions of liquid film flash

表 1. 液膜闪蒸的初始条件

初始条件	参数值
初始液膜厚度	500 μm , 1000 μm , 1500 μm
过热度	5 K, 10 K, 15 K, 20 K

2.5. 数学模型验证

为了验证本文液膜闪蒸数学模型的合理性,选择了与实验相同[11]的条件,在压力为 5000 Pa,过热度为 4°C,初始液膜厚度 0.015 m 的相同实验条件下进行的数值如图 3 所示,通过本文的数值模拟得到数据计算的结果与实验相比,存在一定程度的偏差,这是由于实验过程中,由于注入水形成液膜之后,再将闪蒸室与真空泵连接起来,没有立即获得真空,闪蒸开始的时间存在延迟,而且本身从实验角度来说,设置的条件存在误差,而数值模拟不存在这一点,但从整体趋势来看,二者是一致的,所以该模型是可以应用于对本文研究的液膜闪蒸的数值模拟结果进行判断。

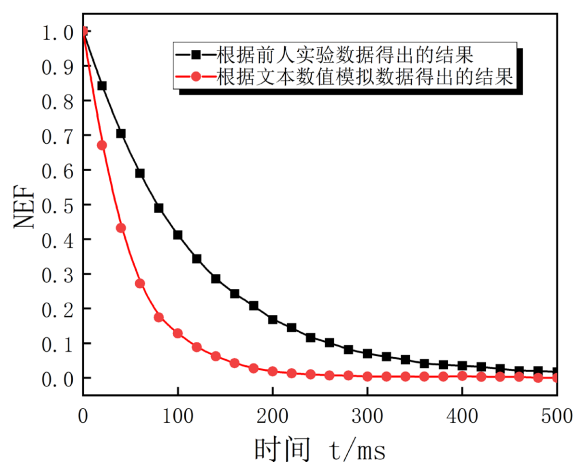


Figure 3. The change of NEF with the process of liquid film flash

图 3. NEF 随液膜闪蒸过程进行的变化

3. 结果分析

3.1. 过热度对液膜闪蒸的影响

关于过热度的影响的数值模拟是基于压力 611.3 Pa，初始液膜高度为 1500 μm 的条件下进行的。

如图 4 所示，可以观察到，无论过热度高低，NEF 的降低均表现出先快后慢的趋势，符合之前对液膜闪蒸过程里同样包含两个阶段的结论，其中过热度 5 K 的液膜相对于其余三者，NEF 值更快趋于稳定，说明更早达到平衡。结合图 5，虽然过热度只有 5 K 的液膜温度变化幅度均远远小于过热度为 20 K 的液膜，但由于其过热度低，对应的最终平衡温度较高，从温度变化的斜率来看，过热度 5 K 的液膜与过热度 20 K 的液膜相差不大，所以，过热度 5 K 比其余三者更快达到平衡温度，NEF 作为衡量闪蒸进程的无量纲数，过热度为 5 K 的在 NEF 上表现是幅度最大，达到平衡时间最短的。但其余三者达到平衡的时间也相差不大，结合图 4 与图 5 的变化，可以发现过热度为 20 K 的液膜，虽然没有在 NEF 中 fastest 达到平衡，但是进行最充分的，因为在同样的时间内，过热度 20 K 的液膜的温度降幅是最大的。

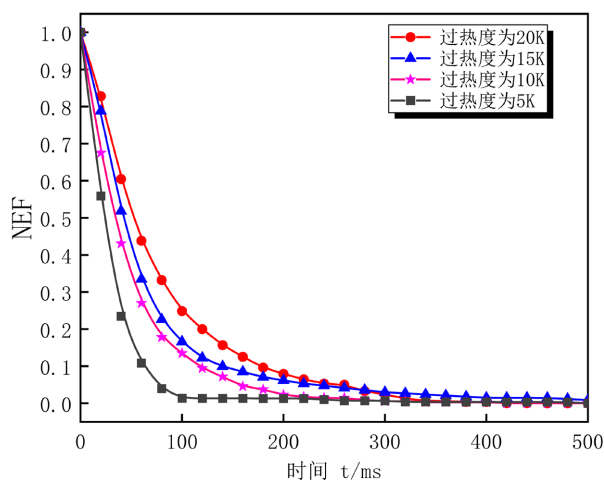


Figure 4. The liquid film NEF changes with time under four different superheat conditions
图 4. 四种不同过热度下的液膜 NEF 随时间变化

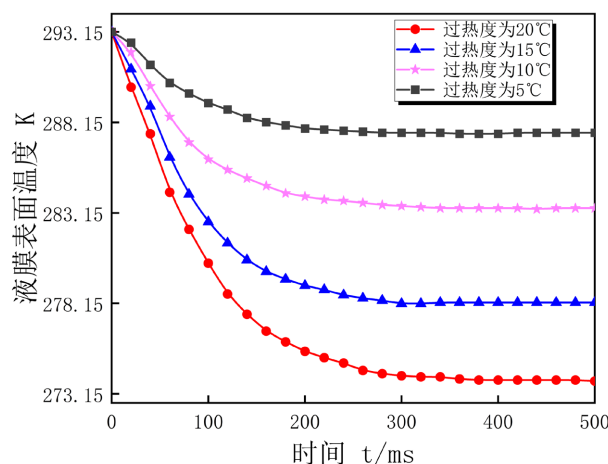


Figure 5. The surface temperature of liquid film varies with time under four different superheat conditions
图 5. 四种不同过热度下的液膜表面温度随时间变化

如图 6 所示, 过热度为 20 K 的液膜比其余三组蒸发的质量更多, 而且闪蒸的速率在同一时刻要更快, 维持的时间也要更久。

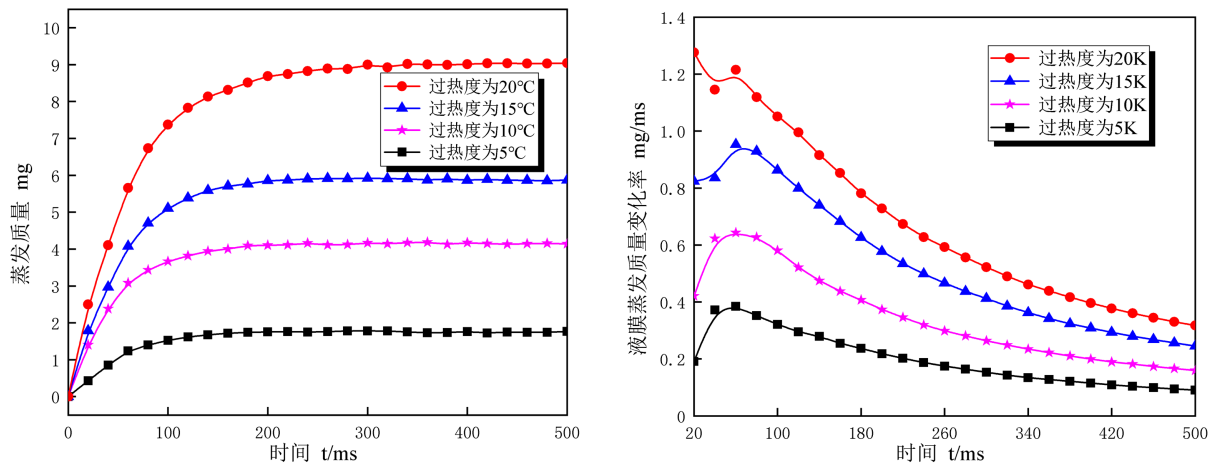
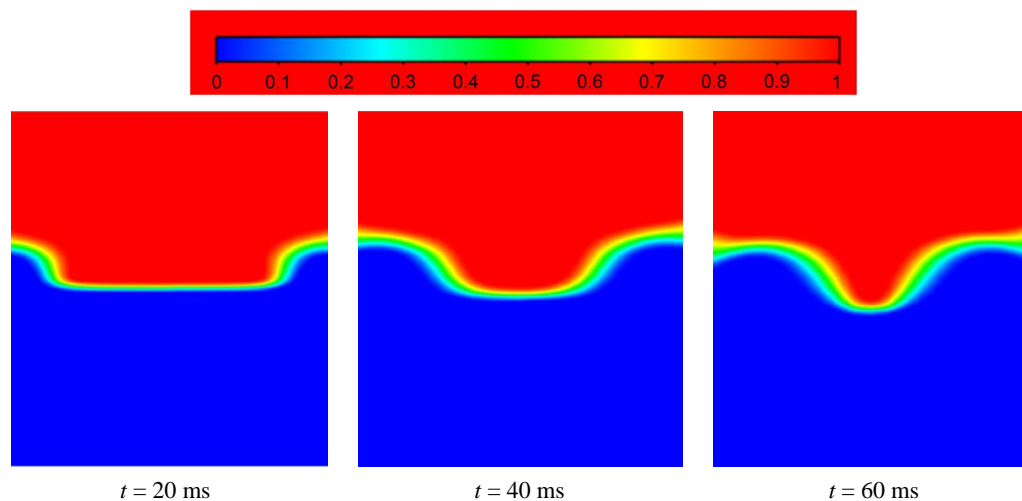


Figure 6. The evaporation mass and evaporation mass rate of liquid film with different superheat change with time
图 6. 不同过热度的液膜蒸发质量和蒸发质量变化率随时间变化

之所以如此, 是由于随着过热度的增大, 越来越多的过热能量转化为闪蒸所需的潜热, 延长了液膜闪蒸的时间, 增大了液膜闪蒸的消耗, 这也符合过热度是闪蒸的驱动力的结论。而且在 NEF 中的表现, 过热度高的液膜 NEF 进程要更久, 变化相对慢一些, 这是因为 NEF 是表征闪蒸完成情况的无量纲数, 过热度越高, 相当于 NEF 的分母越大, 而分子是每一时刻的温度与平衡温度的差, 显然分子的变化并不会对基数较大的分母造成影响, 所以过热度高的液膜在 NEF 上的表现的趋势的含义是 NEF 越小, 闪蒸现象进行的越彻底, 也印证了过热度对液膜的促进作用。

结合液膜的体积分数云图进行深入分析, 如图 7 所示, 液膜闪蒸从两侧开始出现变化, 并不断波动, 这种变化逐渐向液膜中心传播, 而且十分剧烈, 这是由于液膜初始温度高于环境压力对应的饱和温度, 即过热度高导致的, 当液膜表面边缘的液体在蒸发时, 内部液体在表面张力的作用下, 自发地移动到边缘以弥补损失。由于液膜温度场的不均匀分布, 上层的液体温度更高, 从而导致较低的表面张力。因此, 温差引起的表面张力梯度导致了 Marangoni 对流的产生。对流反过来推动热水沿气液界面向下层流动, 从而使得液膜表面不断发生变化, 发生扰动, 促进闪蒸的进行。



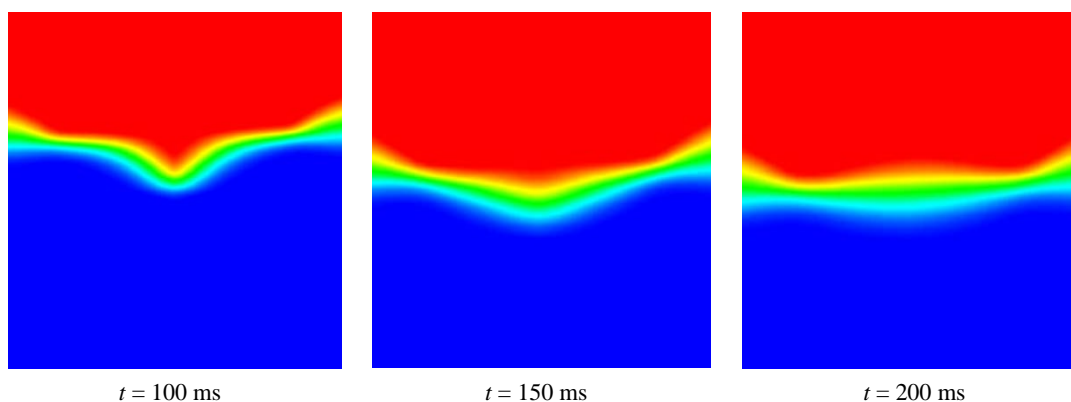


Figure 7. Cloud image of liquid volume fraction at different time of liquid film flash
图 7. 液膜闪蒸不同时刻的液相体积分云图

3.2. 初始液膜厚度对液膜闪蒸的影响

对于初始液膜厚度的研究，基于压力 611.3 Pa，初始温度为 293.15 K 的条件下进行的。

如图 8 所示，初始液膜高度越大，NEF 随时间变化越慢，初始厚度 1500 μm 的液膜的 NEF 达到平衡状态在 200 ms 左右，而初始厚度 500 μm 的液膜则仅仅用时 100 ms 便达到稳定状态，对应图 9 中，液膜厚度越大，液膜表面温度降低的速度反而越慢，且达到的平衡温度要比厚度更低的液膜用时更久，但是四种不同初始厚度的液膜的平衡温度均接近 273.15 K，与环境压力对应的饱和温度基本一致，有略微的不同，初始液膜厚度大的平衡温度相对更高一些，差距在 1 K 左右。如图 10 所示，初始厚度越小的液膜蒸发质量变化率越高，蒸发的质量越大，但达到平衡的时间越短，初始厚度大的液膜则需要更长的时间才能达到平衡。同时图 8、图 9 以及图 10 均表现出一致的变化规律，即液膜闪蒸的变化也同样经历了快速和稳定两个阶段。

这是由于在增加闪蒸室的初始液膜高度时，初始的水质量会增加，从而使液膜通过显热传递的能量增加，而这些能量必须全部转化为蒸发潜热，因此会延长闪蒸持续时间，表现为 NEF 随时间变化放缓，且达到稳定所需时间变长，这是由于 NEF 是用来衡量闪蒸完成的程度以及进行的情况，NEF 越小，表示闪蒸越接近结束，进行的越充分。

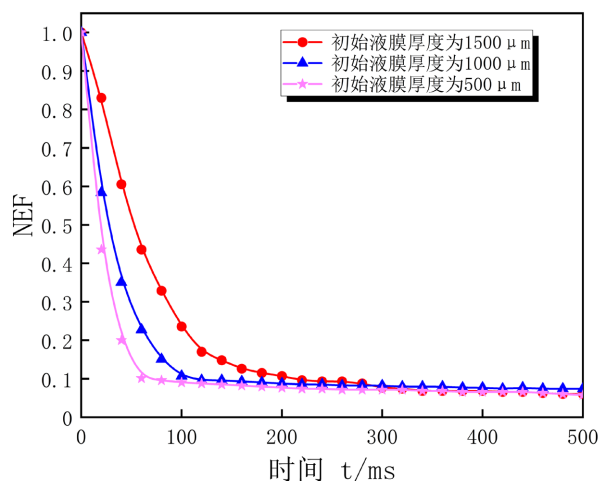


Figure 8. Variation of NEF with time at three different liquid film heights
图 8. 三种不同液膜高度下 NEF 随时间的变化

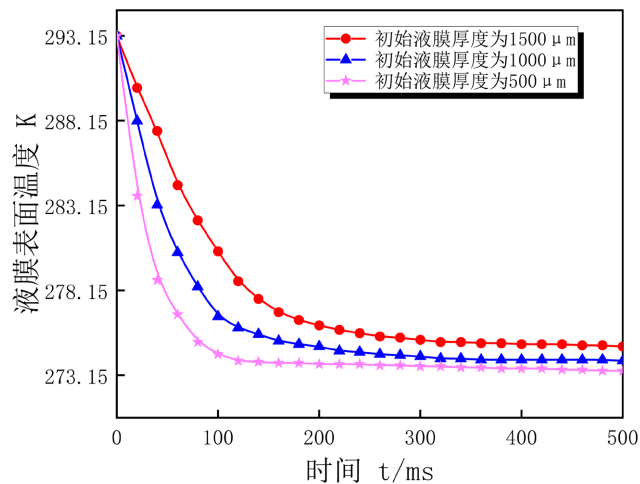


Figure 9. The surface temperature of three liquid films with different thickness varies with time
图 9. 三种不同厚度的液膜表面温度随时间变化

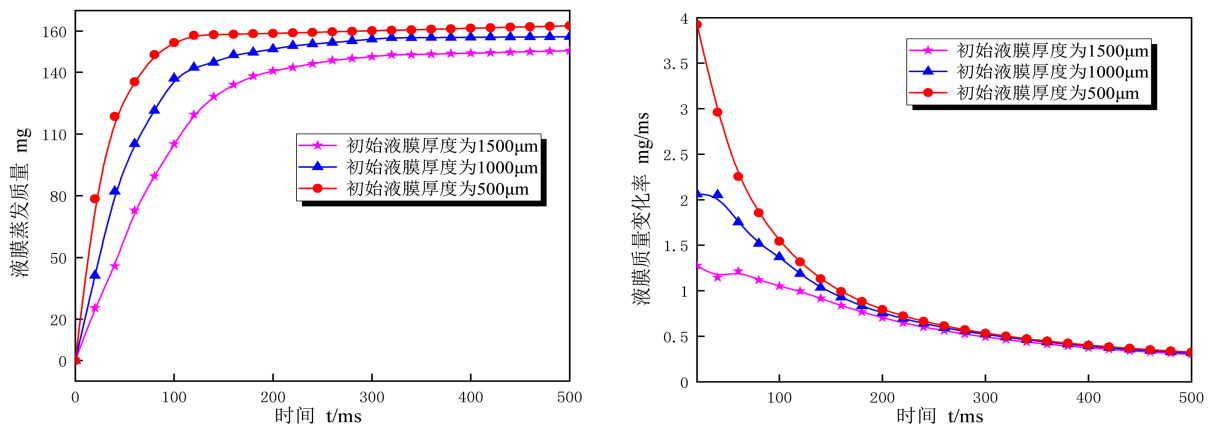


Figure 10. The change of mass and mass change rate with time at three different liquid film heights
图 10. 三种不同液膜高度下液膜蒸发质量以及质量变化率随时间的变化

而温度没有像微米级液滴闪蒸一样趋于一致的原因一方面是由于液滴闪蒸的假设根据液滴很小，产生的蒸汽量不足以影响环境压力，所以是在环境压力保持稳定的情况下，对应的饱和温度一致，另一方面是由于初始液膜厚度的增加，会导致液膜底部受到较大的静水压头，进而抑制闪蒸。根据 $p = \rho gh$ ，液膜底部压力要大于液膜上方的闪蒸室压力，相对应的饱和温度高于闪蒸室压力对应的饱和温度，液膜底部的水若想达到蒸发条件，则需要液膜内部温度变化产生的显热，更多的用于满足蒸发所需的潜热，而且产生的水蒸气在向液膜表面移动的过程中，需要克服阻力做功，进而厚度高的液膜需要消耗更多显热，使得闪蒸不充分，液膜闪蒸的蒸发质量变化率降低，闪蒸过程变慢，最后达到的平衡温度会略微变高。

4. 结论

通过数值模拟，对液膜初始厚度和液膜过热度对微米级液膜闪蒸造成的影响及机理进行了分析。可以得到如下结论：

- 1) 对于微米级的液膜，其闪蒸经历两个阶段，即快速和稳定的阶段。在前 100 ms 内蒸发剧烈，温度，质量都呈现直线式下降，后变化趋势放缓，基本在 300 ms 时达到稳定。
- 2) 初始液膜厚度和过热度均会对液膜闪蒸造成影响，其中初始液膜厚度会抑制液膜闪蒸，液膜厚度

越大,液膜表面温度降低的速度反而越慢,且达到平衡温度要比厚度更低的液膜用时更久,平衡温度略微不同的原因是由于初始厚度大的液膜由于液膜底部受到较大的静水压头的影响,致使液膜闪蒸变慢。而过热度则可以促进液膜闪蒸,表现在同样的时刻内,过热度越高的液膜,其蒸发质以及蒸发质量变化率降幅均越高,这同时也印证了过热度是闪蒸驱动力的说法。

3) 液膜闪蒸中同样经历了快速闪蒸以及稳定蒸发阶段。同时,由于液体和蒸气间的表面张力会随温度的升高而下降,过热度会对液膜的温度均匀性产生影响,造成液膜各处表面张力的不同,进而产生 Marangoni 对流,同样会促进闪蒸的进行。

参考文献

- [1] 钟泽民,刘妮,黄千卫,余宏毅,由龙涛. 喷雾冷却技术及其在电子冷却领域的应用[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(10): 75-79.
- [2] 赵子豪,袁益超,陈昱,孟凡茂. 闪蒸特性的研究现状与闪蒸技术的应用[J]. 能源与环境, 2018(3): 25-27.
- [3] Saury, D., Harmand, S. and Siroux, M. (2002) Experimental Study of Flash Evaporation of a Water Film. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **45**, 3447-3457. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00056-X)
- [4] Saury, D., Harmand, S. and Siroux, M. (2005) Flash Evaporation from a Water Pool: Influence of the Liquid Height and of the Depressurization Rate. *International Journal of Thermal Sciences*, **44**, 953-965. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2005.03.005>
- [5] 郭迎利,邓炜,严俊杰,等. 初始条件对瞬态闪蒸过程的影响[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 77-80.
- [6] 郭迎利,严俊杰,邓炜,等. 池水瞬态闪蒸时间的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(8): 1339-1342.
- [7] Yang, Q., Zhang, D., Yan, J. and Liang, T. (2018) Experimental Study on Energy Conversion in Static Flash Evaporation of Aqueous NaCl Solution. *Desalination*, **430**, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.051>
- [8] 王辉辉,张丹,杨庆忠,牛照程. 纯水静态闪蒸中液膜高度演变的实验研究[J]. 化工学报, 2019, 70(S1): 54-60.
- [9] 何佳伟. 基于乙二醇溶液循环闪蒸特性实验研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2021. <https://doi.org/10.27171/d.cnki.ghdcc.2021.000461>
- [10] 郭迎利,严俊杰,邓炜,刘继平,种道彤. 池水瞬态闪蒸时间的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(8): 1339-1342.
- [11] Miyatake, O., Tomimura, T., Ide, Y., et al. (1981) An Experimental Study of Spray Flash Evaporation. *Desalination*, **36**, 113-128. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)88635-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)88635-X)
- [12] Miyatake, O., Murakami, K., Kawata, Y., et al. (1972) Fundamental Experiments of Flash Evaporation. *Bulletin of the Society of Sea Water Science Japan*, **26**, 89-100.