

文章编号:2095-6134(2018)02-0188-05

低压加热条件下水膜蒸发特性^{*}

王 超, 陈 学, 胥蕊娜, 姜培学[†]

(清华大学热能工程系热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

(2017 年 5 月 8 日收稿; 2017 年 8 月 31 日收修改稿)

Wang C, Chen X, Xu R N, et al. Water film heating evaporation under low pressure[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(2):188-192.

摘 要 针对低压密闭腔体内水膜的加热蒸发现象,利用斐克扩散定律构建一维蒸发模型。基于饱和水温度和压力的对应关系,发展一种确定扩散边界层厚度的方法。搭建水膜低压加热蒸发的实验系统,实验研究不同压力条件下水膜的蒸发质量和温度随时间的变化。通过对比蒸发质量和温度变化的模型预测结果和实验结果,发现二者数据的吻合度较高,表明该模型能够较为准确地预测低压加热条件下的水膜蒸发特性。基于当前的数学模型,进一步研究真空压力、加热热流密度和蒸发容积对水膜蒸发速率、蒸发质量和蒸汽压力的影响。研究发现,压力越低、加热热流密度越高和蒸发容积越大,水膜的蒸发速率越大,达到饱和状态的时间越短。

关键词 斐克定律;蒸发模型;水膜蒸发;蒸发速率;扩散边界层

中图分类号:TK12 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2018.02.006

Water film heating evaporation under low pressure

WANG Chao, CHEN Xue, XU Ruina, JIANG Peixue

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A one-dimensional evaporation model for simulating water evaporation under vacuum condition is proposed by using Fick's diffusion law. Based on the correspondence between saturated water temperature and pressure, a method for determining the thickness of diffusion boundary layer is developed. An experimental system of water film low pressure heating and evaporation is set up. The vaporization and temperature variations of water film under different conditions are studied. By comparing the predicted results and experimental data for evaporation mass and temperature changes, it is found that the model accurately predicts the evaporation characteristics of water film under low pressure and heating conditions. Based on the current mathematical model, the effects of vacuum pressure, heating heat flux, and chamber volume on water evaporation rate and vapor pressure are further studied. The results indicate that the lower the pressure, the higher the heat flux, and the larger the chamber volume are, the higher evaporation rate is and the shorter time is needed to reach saturation.

^{*} 国家自然科学基金(51606108)、中国博士后基金(2016M601023)和国家自然科学基金创新研究群体项目(51621062)资助

[†] 通信作者, E-mail: jiangpx@mail. tsinghua. edu. cn

Keywords Fick's law; evaporation model; film evaporation; evaporation rate; diffusion boundary

低压环境并耦合加热的水膜蒸发现象常见于海水淡化^[1]、材料加工^[2-3]以及废物处理^[4]等工业过程中。此外,在真空环境中做喷雾冷却时,被冷却表面上形成的液膜的蒸发也是一种典型的低压蒸发现象^[5-6]。水膜的蒸发相变过程成为上述工业或工艺过程中的主要影响因素,理解和掌握水膜低压蒸发相变的特性和机理,对于优化相关工艺过程、提高生产效益具有重要意义。

水蒸发导致系统质量和温度的变化本质上是气-液界面分子扩散行为的宏观结果。经典的蒸发-凝结理论认为气-液界面分子的扩散行为同时包含分子向空间的蒸发逃逸行为和向液面的凝结回落行为^[7]。当前者的质量流率大于后者,表现为宏观的蒸发现象;反之,表现为宏观的凝结现象。研究人员采用分子动力学模拟的方法尝试从微观角度揭示界面分子的扩散行为^[8],发现在气液平衡体系中界面附近存在局域热非平衡区域,获得了界面碰撞分子停留在液相区的分子数目随时间的变化规律。实验研究发现,极低压条件水蒸发在界面处存在温度的跳跃性变化^[9]。斐克扩散定律^[10]从存在于界面的浓度梯度的角度对蒸发现象进行机理描述,为研究流体的蒸发扩散特性提供了理论基础。本文基于斐克扩散定律,理论结合实验研究低压封闭腔内水膜蒸发的一般特性。

1 蒸发模型

低压密闭舱体内水膜蒸发过程示意图如图1所示。假设初始时刻舱体内水蒸气分压力为零,水膜的蒸发使得舱体内的压力升高,为了维持舱体内的恒压环境,需要将部分含有水蒸气的空气排出舱体。在上述过程中,水膜逐渐从不饱和状态变化到饱和状态,本文正是关注该过程中水膜的蒸发特性。模型构建依据的假设条件为:1)低压舱体密闭且绝热;2)在低压环境中将空气和水蒸气视为理想气体;3)由于加热热流密度和液膜厚度较小,不考虑液膜内部的温度不均匀性和气泡对蒸发的影响。

密闭舱体内的总压 P_{tot} 为空气压力 P_a 和水蒸气压力 P_v 之和,表示为

$$P_{\text{tot}} = P_a + P_v, \quad (1)$$

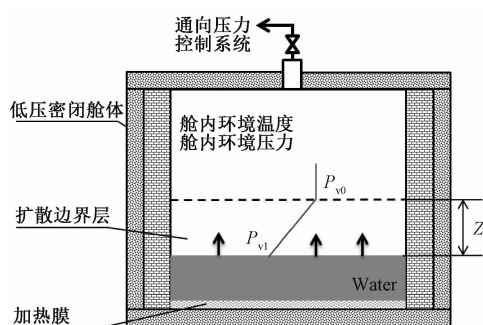


图1 密闭腔体内水膜加热蒸发物理模型

Fig.1 Model of water film heating evaporation in a closed cabin

其中,水蒸气分压力 P_v 为

$$P_v = RH \cdot P_{\text{sat}}, \quad (2)$$

式中: RH 为相对湿度, P_{sat} 为饱和水蒸气压力,计算式为

$$P_{\text{sat}} = 8.953 \times 10^5 \text{EXP} \left\{ - \left[\frac{(T + 49.05)}{84.05} \right]^2 \right\}, \quad (3)$$

式中 T 表示水膜温度。

根据斐克定律,水膜蒸发速率的计算式为

$$\frac{dm_e}{d\tau} = -AD_{\text{diff}} \frac{M_w}{RT_a} \frac{\partial P_v}{\partial z}, \quad (4)$$

式中: m_e 为蒸发质量; τ 为时间; A 为蒸发面积; R 为通用气体常数 ($8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$); T_a 为气体温度; D_{diff} 为扩散系数^[10],计算式为

$$D_{\text{diff}} = 1.87 \times 10^{-10} \left(\frac{T^{2.072}}{p} \right), \quad (5)$$

式中: p 以大气压 (atm) 为单位,该式的适用范围为 $282 \text{ K} \leq T \leq 450 \text{ K}$ 。系统的温度变化可根据热量守恒求得:

$$(m_w c_{pw} + m_a c_{pa}) dT = qAd\tau - m_e h_{li}, \quad (6)$$

式中: m_w 和 m_a 分别为舱体内水膜和空气质量; c_{pw} 和 c_{pa} 分别为水和空气的比热容; q 指提供的热流; h_{li} 指水的气化潜热。式(4)中 $\partial P_v / \partial z$ 为扩散边界层内蒸汽压力梯度,其中 z 表示扩散边界层厚度,如图1所示,其计算方法见本文第2节。

舱体内空气摩尔数 n_a 和水蒸气组分摩尔数 n_{wv} 分别表示为:

$$n_a = P_a V / RT_a, \quad (7)$$

$$n_{wv} = P_v V / RT_a + \Delta n_{wv}. \quad (8)$$

式中: V 表示蒸发腔体体积; Δn_{wv} 为由水膜蒸发导致的水蒸气物质的量增量,计算式为

$$\Delta n_{\text{wv}} = \Delta m_{\text{e}}/M_{\text{w}}, \tag{9}$$

式中 M_{w} 为水分子摩尔质量。

在水膜蒸发过程中,为维持舱体压力恒定,需要时时排出一定量的气体。计算过程中,一个时间步长内的排气量为

$$n_{\text{ext}}^i = n_{\text{tot}}^{i+1} - n_{\text{tot}}^i (T^i/T^{i+1}), \tag{10}$$

式中: n_{ext} 和 n_{tot} 分别为所排气体和舱内气体总的物质的量;上标 i 和 $i+1$ 指迭代计算过程中的时间步。获得排出气体的物质的量 n_{ext} 后,可分别求出排出水蒸气的物质的量 n_{wv_r} 和空气的物质的量 n_{a_r} , 分别为:

$$n_{\text{wv}_r}^i = n_{\text{ext}}^i (n_{\text{wv}}^i + \Delta n_{\text{wv}}^i)/n_{\text{tot}}^{i+1}, \tag{11}$$

$$n_{\text{a}_r}^i = n_{\text{ext}}^i n_{\text{a}}^i/n_{\text{tot}}^{i+1}. \tag{12}$$

2 扩散边界层厚度的计算方法

从方程(4)可以看出,扩散边界层厚度 z 的取值大小直接影响水膜蒸发速率的计算结果;但是,影响 z 值的因素较多,至今还没有一个理论或经验公式能够准确预测 z 值大小。在假定 z 值大小一定的情况下,迭代求解方程(4)和方程(6)发现,当 z 取值不同时,水膜最终的平衡温度也是不同的。当 z 取值较大时,水膜的平衡温度相对较高;反之,当 z 取值较小时,水膜的平衡温度相对较低。当水膜达到饱和状态(实验观察有气泡不断产生)时,则水膜的平衡温度一定等于舱体环境压力对应的水饱和温度。基于上述分析并结合实验研究,给水膜足够大的加热功率使水膜达到饱和和沸腾状态。将实验过程的条件作为模型迭代求解的初始条件和边界条件,改变 z 值大小获得不同的水膜平衡温度,当水膜的平衡温度等于该压力条件下水膜的饱和温度时,则该条件下的 z 值即为该压力条件下水膜扩散边界层厚度。列举实例:假设环境压力为 1.8 kPa,水膜质量和初始温度分别为 0.02 kg 和 9.5 ℃,加热功率为 376 W/m²,蒸发面积为 19.5 cm²,环境的初始相对湿度为 20%,赋值 z 分别为 3,7 和 14 mm。计算结果如图 2 所示,可以看出,对应 $z=3,7$ 和 14 mm 时水膜的平衡温度分别为 15.3,16 和 17.1 ℃。但由于计算选取的环境压力为 1.8 kPa,该压力对应的饱和温度为 16 ℃,因此,认为扩散边界层厚度为 $z=7$ mm。从后面的实例中还可以看出,利用该方法确定的 z 值代入模型后获得的水膜蒸发质量和温度的预测值与实验结果的吻合程度较高。

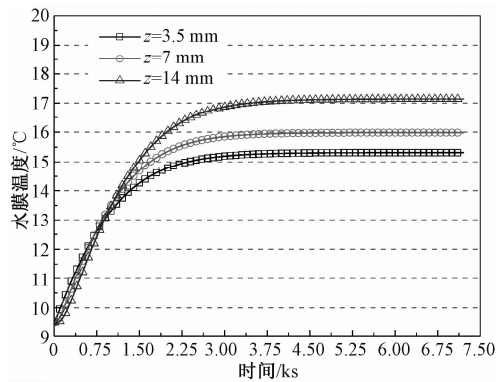


图 2 在不同蒸发厚度水膜温度变化
Fig. 2 Changes in temperature of water film at different depths of diffusion boundary layer

3 实验系统

实验系统如图 3 所示,主要由真空泵、真空缓冲罐、真空舱体和数据采集系统组成。其中,真空泵的抽气速率为 15 L/s,真空缓冲罐的体积为 400 L,真空舱体的尺寸为 350 mm × 250 mm × 250 mm。使用精密电子天平测量水膜的蒸发量,测量精度为 0.01 g。真空舱体压力采用压力传感器测量,量程为 0 ~ 400 mbar,测量精度为 0.05%。其他参数同 2 节所述。

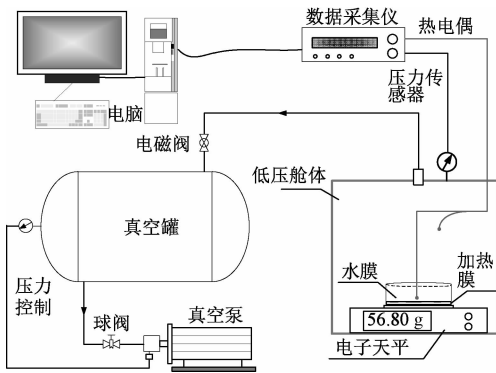


图 3 水膜低压蒸发实验系统
Fig. 3 Experimental system of water film vaporization under low pressure

实验开始前,将一定质量和温度的水放入含有加热片的蒸发器皿中;关闭真空舱体和缓冲罐之间的连结阀门,启动真空泵将缓冲罐抽至某一低压值;缓慢开启真空舱体和缓冲罐之间的连结阀门,直至真空舱体内的压力降至恒定的目标压力后,关闭连结阀门;开启电加热,时时记录水温变化,实验持续时间为 7 200 s,间隔一段时间记录水膜质量变化;当舱体压力升高时,缓慢开启连

结阀门,抽出多余气体,恢复舱体压力至目标值。实验过程的其他参数将在数据结果的具体讨论中给出。

4 模型验证

图 4 展示水膜蒸发质量和温度随时间变化的实验结果和计算结果的对比,其中图中的实验结果均为多次测量后的平均结果。从图中可以看出,两种条件下蒸发质量/水膜温度的实验结果和计算结果的数值和分布趋势吻合程度比较高。7 200 s,舱体压力为 2.5 kPa 时水膜的蒸发质量为

2. 04 g,舱体压力为 1. 8 kPa 时水膜的蒸发质量为 2. 18 g。从水膜温度的变化曲线图中看出,两种条件下水膜温度的实验结果和计算结果的分布趋势吻合度较高,最大误差约 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。值得注意的是压力为 1. 8 kPa 时,实验结果在 3 500 ~ 4 000 s 之间时下降约 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,之后在 5 000 s 时又缓慢恢复至饱和温度 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在多次的反复实验中均出现这种温度的波动现象,实验观察中有气泡附着在热电偶表面,这可能是由于水膜内部气泡的扰流 - 破裂造成的。

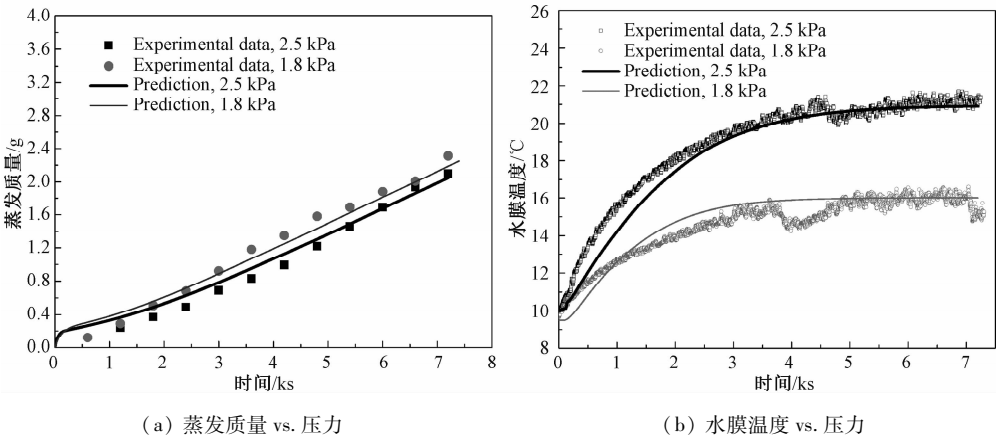


图 4 不同压力条件下水膜蒸发质量和温度变化
Fig.4 Variations in water film evaporation mass and temperature under different low pressures

5 蒸发速率 & 蒸汽分压力

图 5 为不同压力和加热功率条件下水膜的蒸发速率和水蒸气分压力随时间的分布变化,其中舱体压力分别为 1. 8 和 2. 5 kPa,加热功率分别为 376 和 485 W/m^2 。从图中可看出,在开始的前 300 s 内,水膜的蒸发速率从 $1. 1 \sim 1. 4\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 快速降至 $0. 1\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,降幅达一个量级,之后缓慢小幅回升至一恒定水平($\leq 0. 2\text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。这是因为初始时刻封闭空间内没有水蒸气,即水蒸气的分压力为零,水膜表面的蒸汽扩散压力或水蒸气的压力梯度最大,因此,计算开始时获得的水蒸气扩散速率也最大。随着水蒸气的扩散,密闭舱内的水蒸气分压力迅速增大,导致水膜表面的水蒸气压力梯度不断减小,密闭舱内的水蒸气扩散速率快速下降。当密闭舱内充满水蒸气后,水膜蒸发速率接近一恒定数值,该数值大小取决于水膜的加热功率。对比图中曲线分布可以看出,压力越小或加热功率越大,水膜的蒸发速率越大。值得注意的是,约在 4 000 s 和 5 000 s 之后,蒸发速率曲线出现重合现象。结合水蒸气的分压

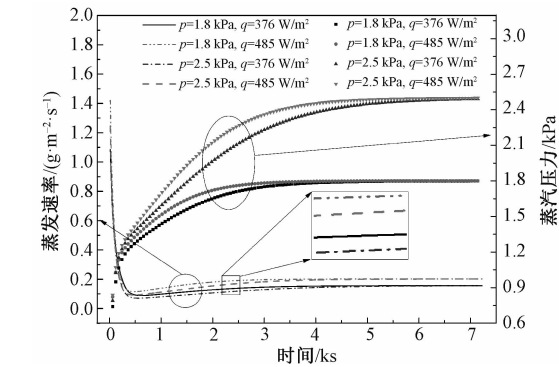


图 5 压力、加热功率对水膜蒸发速率和舱内水蒸气的分压力影响
Fig.5 Effects of pressure and heating power on water film evaporation rate and water vapor partial pressure

力曲线不难看出,此时水膜已经达到饱和状态。当水膜处于饱和状态时,加热热流完全转化为水的汽化潜热,加热功率越大,水膜的汽化速率越大。从水蒸气的分压力曲线可以看出,与蒸发速率的分布趋势相反,蒸汽分压力在前 300 s 内近似直线上升至某一水平(约 1 200 Pa),之后缓慢增大至饱和压力水平。与预期相同,加热功率越大或压力越小,蒸汽分压力达到饱和压力的时间

越短。

图 6 为不同低压舱体容积对水膜蒸发速率和蒸发质量的影响,与图 5 中蒸发速率曲线分布趋势相似,蒸发速率快速大幅降低,然后稳定于某一恒定水平,约 $0.12\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当其他条件不变,单纯改变蒸发容积大小,并不能提高稳定时的蒸发速率,但是相同时间内的蒸发量随着蒸发容积的增大而增大。

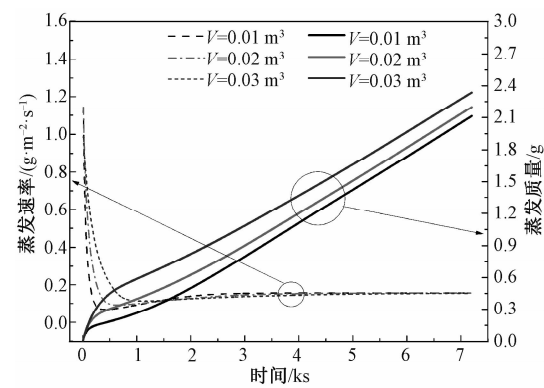


图 6 舱体容积对水膜蒸发质量和蒸发速率的影响 ($q=376\text{ W}/\text{m}^2$)

Fig. 6 Effect of cabin volume on water film evaporation mass and rate

6 结论

针对低压加热条件下密闭舱体内的水膜蒸发,建立一维蒸发模型,提出一种水膜扩散边界层厚度的计算方法,实现了模型的封闭求解。开展相关的实验研究,对模型的预测性能进行验证。获得以下主要结论:

1)在本文条件下,水膜蒸发质量、温度的计算结果和实验结果吻合程度较高,表明该模型能够应用于实际的工业工程中,实现低压加热环境中液膜的蒸发特性预测。

2)加热表面水膜的蒸发速率受舱体体积、加热功率和环境压力等多种因素的影响。在本文条件下,水膜蒸发速率表现出快速下降-缓慢回升-平稳分布的趋势。稳定之后的蒸发速率取决于加热功率的大小。

3)舱体压力越小或加热功率越大,蒸气分压力达到饱和压力的时间越短;蒸发容积越大,相同时间内水膜的蒸发质量越大,但达到饱和蒸发状态时的蒸发速率相同。

参考文献

[1] 陈学, 刘晓华, 沈胜强, 等. 水平管外降膜蒸发传热实验研究[J]. 太阳能学报. 2015, 36(8): 1 996-2 001.

[2] Liu L, Wang Y, Fan D, et al. Using phenolphthalein as a promising indicator to monitor the vacuum freeze-drying process[J]. Materials Letters, 2015, 139: 245-248.

[3] Bai Y, Pang C, Hu W, et al. High capacity cobalt boride prepared via vacuum freeze-drying method and used as anode material for alkaline secondary battery [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013, 5(2): 021 401.

[4] Wheeler R R, Hadley N M, Dahl R W, et al. Microwave enhanced freeze drying of solid waste[R]. SAE Technical Paper, 2007.

[5] Cheng W, Chen H, Hu L, et al. Effect of droplet flash evaporation on vacuum flash evaporation cooling: modeling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 149-157.

[6] Wang C, Xu R, Song Y, et al. Study on water droplet flash evaporation in vacuum spray cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 112: 279-288.

[7] Cammenga H K. Evaporation mechanisms of liquids [J]. Current topics in materials science, 1980, 5: 335-446.

[8] 王遵敬. 蒸发与凝结现象的分子动力学研究及实验[D]. 北京: 清华大学, 2002.

[9] 肖宁, 赵小明, 陈民, 等. 液体蒸发率及表面温度测量 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(5): 748-750.

[10] Lienhard J H. A heat transfer textbook [M]. 4th ed. New York: Courier Corporation, 2013.