

封闭腔水膜闪蒸汽液界面瞬态传质系数的实验研究

严俊杰, 张丹, 邓炜, 郭迎利

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 以膜渗透理论为依据, 通过搭建水膜闪蒸实验台, 对水膜闪蒸汽液界面的瞬态传质系数进行了实验研究. 实验中液膜厚度为 0.02~0.10 m, 过热度为 10~20 °C, 真空腔压力为 0.005~0.015 MPa. 结果表明, 实验条件下界面传质系数的变化范围为 0.08~16.77 m/s. 在相同条件下, 该系数随初始过热度或初始液膜厚度的增大而减小. 闪蒸过程中, 该传质系数随液膜厚度的减小或真空腔压力的升高而迅速减小.

关键词: 闪蒸; 传质系数; 汽液界面; 过热度; 液膜厚度

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0515-04

Experimental Investigation of the Instantaneous Mass Transfer Coefficient at Steam-Liquid Interface During Water Film Flash Evaporation in Closed Chamber

YAN Junjie, ZHANG Dan, DENG Wei, GUO Yingli

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: On the basis of the membrane penetration theory, an experimental investigation of the instantaneous mass transfer coefficient at the steam-liquid interface during water film flash evaporation was conducted. The range of the height and the superheat of water film, and the pressure of water in the vacuum chamber was 20-100 mm, 10-20 °C, and 0.005-0.015 MPa, respectively. The results show that the mass transfer coefficient varies from 0.08 m/s to 16.77m/s under the experimental conditions. The coefficient decreases with the increase of the initial superheat or the initial height of water film. However, during the flash evaporation, the instantaneous mass transfer coefficient decreases quickly with the decrease of the height of water film or the increase of the pressure in the vacuum chamber.

Keywords: flash evaporation; mass transfer coefficient; steam-liquid interface; superheat; height of water film

符 号 表

D	传质系数,m/s	H	液膜厚度,m	下标	
r	汽化潜热,kJ/kg	ΔT	过热度,℃	i	界面
τ	时间,s	A	横截面积,m ²	e	闪蒸平衡状态
v	速度,m/s	N	质量通量,kg/(m ² ·s)	s	闪蒸蒸汽
T	温度,℃	ρ	密度,kg/m ³	l	液膜
P	压力,MPa	V	体积,m ³	0	闪蒸初始时刻

闪蒸是指当过热液体暴露在低于自身饱和压力以下的空间时,骤然蒸发并且自身温度迅速下降的现象.因其广泛存在于海水淡化、石油工业等领域,近年来受到了各国学者的关注.

Jin^[1-2]等针对闪蒸中的流场和气泡的变化进行了观察. Miyatake^[3-4]、Gopalakrishna^[5]、Kim^[6]和Saury^[7]等学者针对封闭系统中的闪蒸,提出了用过热来衡量水膜的不稳定能量,并就闪蒸换热系数作了重点研究.但是,闪蒸是传热与传质相互耦合的非稳态过程,其换热系数在本质上依赖于汽液界面的传质能力,而目前针对该界面传质系数的研究较少. Miyatake^[3]提出了闪蒸系数(flash evaporation rate coefficient)的概念,对闪蒸总体蒸发质量进行了初步研究,但其所使用的真空腔最终平衡后的压力与水膜压力之差并不是界面瞬时传质的真正动力.本文针对前人研究的不足,提出闪蒸瞬时传质系数(instantaneous mass transfer coefficient of flash evaporation)的概念,并就水膜闪蒸的瞬态传质特性进行了实验研究.

通过搭建闪蒸实验台,测量出了闪蒸过程中真空腔压力、水膜温度随时间的变化.由膜渗透理论推导出了传质系数的计算式,最后以过热度、真空腔压力、液膜厚度和界面传质系数为指标,对水膜闪蒸的传质特性进行了较为全面的分析和研究,总结出了液膜厚度在20~100 mm、过热度在10~20℃、压力在0.005~0.015 MPa下,该传质系数的变化规律.

1 实验系统与方法

图1所示为实验采用的瞬态闪蒸系统,主要由加热部分、低压部分和数据采集3部分组成.其中:加热部分包括加热器、闪蒸室等;低压装置部分包括真空泵、真空腔和电磁阀;数据采集部分包括热电偶、差压变送器、压力传感器和装有NI数据采集板的计算机.

本实验台闪蒸腔汽液界面设计为130 mm×125 mm的矩形.液膜温度的测量采用16对热电偶对称布置在闪蒸腔两侧,且沿液面高度方向垂直等距分布,间距为10 mm,最低一组亦距闪蒸腔内底面10 mm.实验时由于液膜厚度不同,每组实验均将液面以下热电偶的测量值平均后作为液膜温度的量度.

实验系统中真空腔容积为332.358 L,所采用的压力传感器为MSI公司生产的US600压敏电阻压力传感器,量程为0~0.1 MPa,采样间隔为

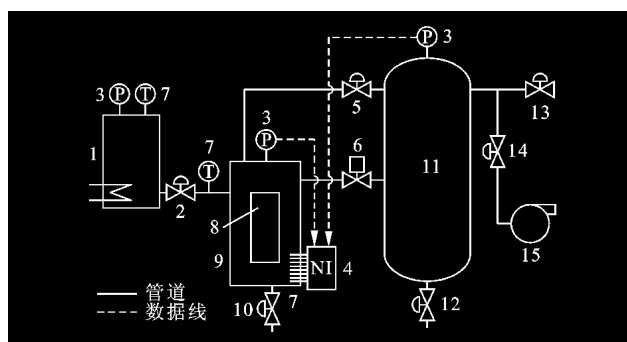
0.08 s.

实验步骤如下.

(1)低压系统的调节:实验开始时,开启阀门14(见图1),使电磁阀处于常闭状态,这时可以通过压力传感器监视真空腔压力,然后打开真空泵冷却水并开启真空泵,开始抽取真空腔中的气体,使得真空腔的压力低于目标压力,最后通过调节阀门13使真空腔压力达到预定的工况.

(2)加热系统的调节:将加热器内的水加热到略高于目标温度,通过进水阀门2(见图1)进入闪蒸室,此时可由旁路阀调节闪蒸室内的压力,使其稳定在目标压力下,当液体温度和压力同时稳定以后,记录液膜厚度.

(3)数据采集:准备就绪后启动数据采集系统,采点间隔为0.08 s;打开电磁阀,闪蒸过程将在数秒内完成,期间闪蒸室的压力和温度逐渐趋于定值,当两者的波动幅度小于测量值的1%时,认为闪蒸达到平衡,结束数据采集.



1:加热器; 2:进水阀; 3:压力传感器; 4:数据采集系统;
5:旁路阀; 6:电磁阀; 7:热电偶; 8:观察窗;
9:闪蒸室; 10、12:热水阀; 11:真空腔;
13、14:调节阀; 15:真空泵

图1 实验系统图

2 计算模型的建立

闪蒸汽液界面传质系数是指在界面两侧汽相单位密度差下,界面单位面积上水蒸气的通过速度.

为测得该系数,本实验的数据处理以Toor的膜渗透理论^[8]为基础.如图2所示,该理论认为,传质阻力主要集中在汽液界面极薄的层流薄层内,传质动力是界面两侧的蒸汽相的密度差,其中汽液界面以上为真空腔压力对应下的饱和蒸汽的密度,界面以下为液膜温度对应下的饱和蒸汽的密度.膜内所进行的是不稳定的传质过程.由于竖直方向的对流作用,不断地把流体主体中蒸汽微元带到界面上,形成新的表面元,传质就在这些表面元中进行,经过传质的表面元又在涡流的作用下回到流体主体让位



图2 薄膜渗透理论下实验系统的计算模型

于新的蒸汽微元,保证传质过程继续进行。同时,为了简化实验数据处理,本计算模型提出如下假设:①真空腔内蒸汽始终为饱和状态且热力性质均一;②忽略闪蒸蒸汽进入真空腔时的动能。于是,依据薄膜渗透理论并参考文献[7]提出界面传质方程为

$$N_i = \rho_l v_l = D(\rho_l - \rho_s) \quad (1)$$

同时,以真空腔为控制体(CV),根据质量守恒有

$$V_s(\tau) \frac{d\rho_s}{d\tau} = \rho_l v_l A_i \quad (2)$$

实验中液膜厚度 H_l 的减小使得真空腔的容积增大,即

$$V_s(\tau) = V_{s0} + A_i[H_{l0} - H_l(\tau)] \quad (3)$$

由于液膜同时满足能量守恒,即

$$\rho_l A_i H_l c_{pl} T_l = \rho_l c_{pl} A_i (H_l - dH_l)(T_l - dT_l) + \rho_l A_i [c_{pl}(T_l - dT_l) + r] dH_l \quad (4)$$

将上式展开,忽略二阶小量,并考虑到初始条件 $H_l(0) = H_{l0}$ 、 $T_l(0) = T_{l0}$,可得液膜厚度随液膜温度变化的计算式为

$$H_l(\tau) = H_{l0} e^{\frac{c_{pl}}{r}[T_l(\tau) - T_{l0}]} \quad (5)$$

联立式(1)~(3)及(5),并考虑到实验直接测量的是真空腔压力和液膜温度随时间的变化,可得出传质系数的计算式为

$$D = \left[\frac{V_s}{A_i} + H_{l0} (1 - e^{\frac{c_{pl}}{r}[T_l(\tau) - T_{l0}]}) \right] \cdot \frac{1}{\rho_l [T_l(\tau)] - \rho_s [P_s(\tau)]} \left[\frac{d\rho_s(P_s)}{dP_s(\tau)} \right] \left[\frac{dP_s(\tau)}{d\tau} \right] \quad (6)$$

实验中,首先测定真空腔压力、液膜温度随时间的变化规律,进而拟合出关系式 $P_s = P_s(\tau)$ 、 $T_l = T_l(\tau)$ 依次带入式(5)、(6),即可得出液膜厚度、界面传质系数随时间的变化规律。

3 实验结果

3.1 真空腔压力、液膜温度随时间变化关系的拟合

根据实验结果并参考文献[9],可提出液膜温

度、真空腔压力随时间变化关系的拟合形式如下

$$T_l(\tau) = \Delta T_0 e^{-\frac{A\Delta T + BT_0}{CH_{l0} + D}\tau} + T_{l0} - \Delta T \quad (7)$$

$$P_s(\tau) = P_{s0} + \Delta P_s (1 - e^{-\frac{A\Delta T + BT_0}{CH_{l0} + D}\tau}) \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为常数。采用非线性拟合方法,得到常数的拟合值如表1所示。经验公式的适用范围见表2。实验值与拟合值的比较见图3,将拟合式(7)代入式(6),即可得出液膜厚度随时间变化的规律如图4所示。

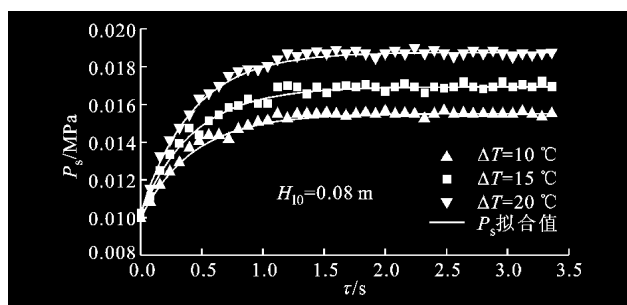
表1 式(7)、(8)中的拟合系数

	A	B	C	D	相对误差/%
式(7)	0.033 89	-0.033 64	16.060 0	1.813 41	9.27
式(8)	0.002 60	0.000 70	0.431 7	0.383 30	4.22

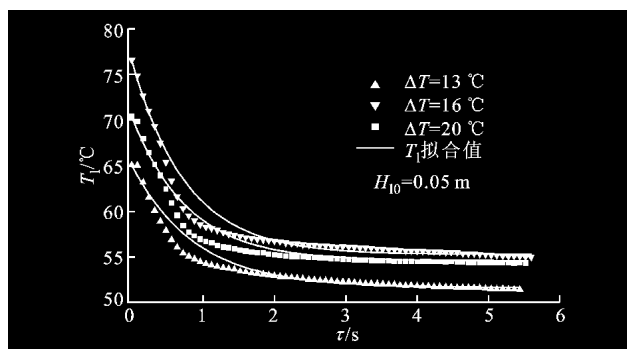
注:相对误差为实验值和拟合值的偏差与实验值之比。

表2 式(7)、(8)的适用范围

实验工况参数	使用范围
液膜初始过热度/ $^{\circ}\text{C}$	$10 \leq \Delta T_0 \leq 20$
液膜初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	$55 \leq T_{l0} \leq 85$
液膜初始厚度/ m	$0.02 \leq H_{l0} \leq 0.10$
真空腔初始压力/ MPa	$0.005 \leq P_{s0} \leq 0.015$



(a) 真空腔压力实验值与拟合值的对比



(b) 液膜温度实验值与拟合值的对比

图3 真空腔压力、液膜温度实验值与拟合值的对比

3.2 汽液界面传质系数的变化规律

汽液界面传质系数随各相关指标的变化关系经

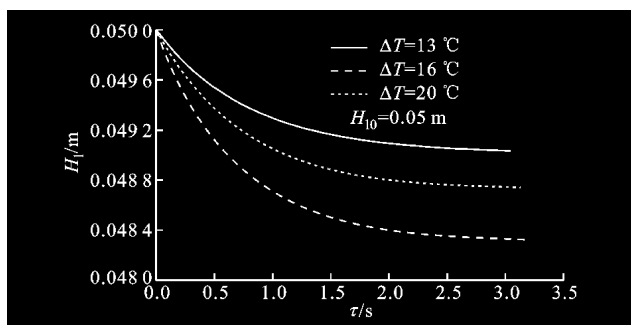


图4 液膜厚度随时间的变化规律

过数据处理后如图5所示。

(1)本实验条件下汽液界面传质系数的变化范围为0.08~16.77 m/s。

(2)图5a所示为传质系数随时间变化的规律,可以看出初始过热度越高,传质系数越小,其主要原因是液体的黏性和表面张力都会随着温度的升高而降低,不利于液侧气泡的成核和长大。另外,随着时间的增加,各工况下的传质系数均单调递减趋于0,且当 $\tau > 2\text{ s}$ 后各传质系数几乎相同(即与初始过热度无关)。文献[9]提出液膜的闪蒸经历前期快速沸腾和后期缓慢蒸发两个阶段,且液膜初始过热度主要影响前者,由该理论估算得出在图5a所示的实验条件下,快速蒸发阶段约为2 s,故此传质系数的变化几乎与初始过热度无关。

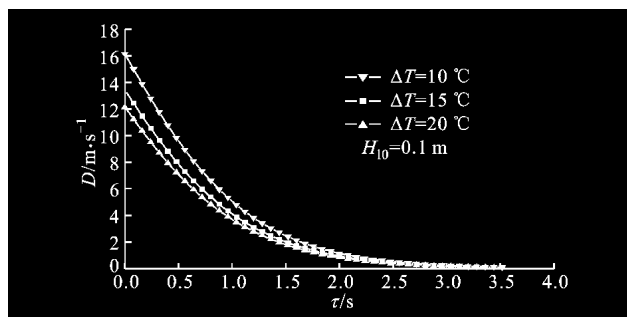
(3)图5b为相同过热度下汽液界面传质系数随时间的变化,传质系数随初始液膜厚度的增大略有减小。这是因为液膜的增厚导致下层液体对应的饱和压力升高,对应的过热度下降,汽化的驱动力减小,亦不利于气泡的成核。

(4)图5c为传质系数随液膜厚度减小的变化规律,传质系数随液膜过热度、液膜厚度的减小迅速减小。文献[3-4]提出液膜过热度、液膜厚度分别是衡量不稳定能量强弱和多少的标志。随着闪蒸的进行,两者的迅速减小导致液膜内所蕴含的不稳定能量和竖直方向上的对流强度大大减小,界面液侧蒸汽微元得不到及时更新,从而导致传质系数减小。

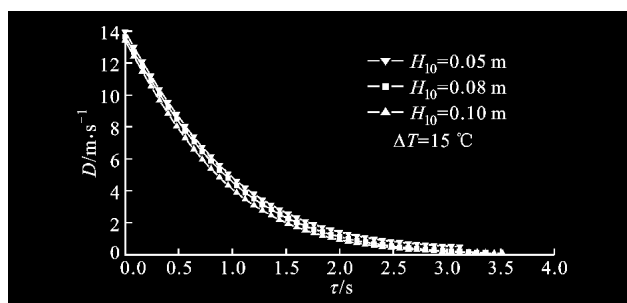
(5)图5d所示为传质系数随真空腔压力的变化规律。可以看出,传质系数均随真空腔压力的升高而减小,且过热度越小,减小得愈加迅速。这缘于真空腔蒸汽密度的逐渐升高使得界面两侧密度差减小,从而削弱了闪蒸过程的传质动力。

最后,由前文分析可知,本文的数据处理采用了“集总参数”的思想,即认为液膜温度均一,而实际中由于液膜厚度的影响,液膜底层的饱和压力高于表

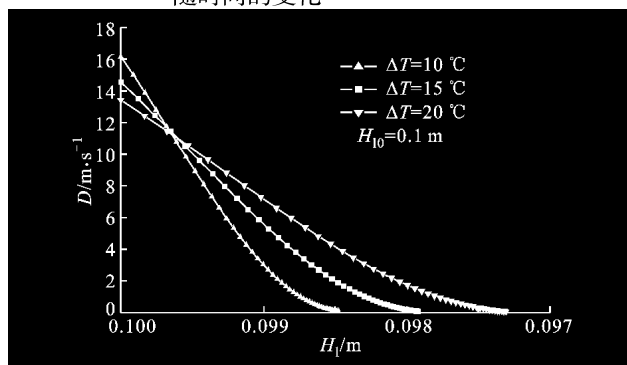
层,当液膜厚度达到最大值0.1 m时,底层的饱和温度比表层约高出 1°C ,使得传质系数计算值略高于实际值,由式(6)估算得,实验参数范围内此误差约为7.1%。



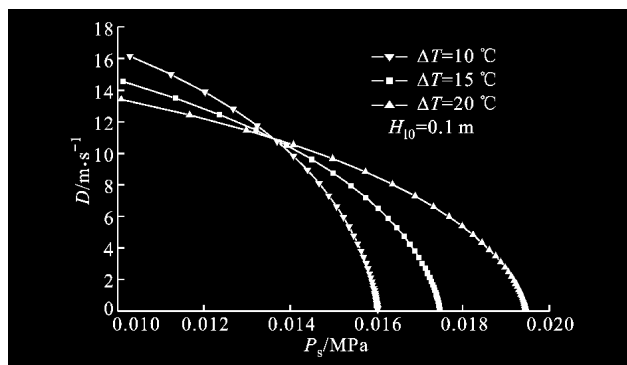
(a) 相同液膜厚度下汽液界面传质系数随时间的变化



(b) 相同过热度下汽液界面传质系数随时间的变化



(c) 汽液界面传质系数随液膜厚度的变化



(d) 汽液界面传质系数随真空腔压力的变化

图5 界面传质系数随各指标的变化规律

4 结 论

本文通过搭建水膜闪蒸实验台,进行了不同液膜厚度、过热度、压力下的闪蒸实验,并结合膜渗透理论建立计算模型,得出了闪蒸汽液界面瞬态传质系数,最后详细考察了该传质系数与各影响因素之间的关系.结果表明实验工况下:① 汽液界面传质系数的变化范围为 $0.08 \sim 16.77 \text{ m/s}$; ② 其他条件相同时,传质系数随初始过热度 and 初始液膜厚度的增大而减小;③ 闪蒸过程中,该传质系数随液膜厚度和真空腔压力的升高而迅速减小.本次实验从本质上研究了水膜闪蒸中,水蒸气在汽液界面的瞬态通过能力,其结果不仅为闪蒸换热系数的理论研究奠定了基础,还为设计和改善多级闪蒸海水淡化系统的性能提供了参考依据.

参考文献:

- [1] JIN W X, LOW S C, YU S C M. Some experimental observations on the single and multi-phase flow patterns in a model flash evaporation chamber[J]. Int Comm Heat and Mass Transfer, 1999, 26(6): 839-848.
- [2] JIN W X, LOW S C. Investigation of single-phase flow patterns in a model flash evaporation chamber using PIV measurement and numerical simulation[J]. Desalination, 2002, 150(1): 51-63.
- [3] MIYATAKE O, MURAKAMI K, KAWATA Y, et al. Fundamental experiments with flash evaporation[J]. Heat Transfer-Jap Res, 1973, 2(4): 89-100.
- [4] MIYATAKE O, FUJII T, TANAKA T, et al. Flash evaporation phenomena of pool water[J]. Heat Transfer-Jap Res, 1977, 6(2): 13-24.
- [5] GOPALAKRISHNA S, PURUSHOTHAMAN V, LIOR N. An experimental study of flash evaporation from liquid pools[J]. Desalination, 1987, 65(11): 139-151.
- [6] KIM J, LIOR N. Some critical transitions in pool flash evaporation[J]. Heat and Mass Transfer, 1995, 40(10): 2363-2372.
- [7] SAURY D, HARMAND S, SIROUX M. Experimental study of flash evaporation of a water film[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(16): 3447-3457.
- [8] 江体乾. 近代传递过程原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 178-194.
- [9] 王桂芳. 水膜闪蒸特性的实验研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.

(编辑 荆树蓉)