

开式系统中水膜闪蒸换热特性的实验研究

严俊杰¹, 李鲁宁¹, 胡申华², 郭迎利¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 新疆大学电气工程学院, 830008, 乌鲁木齐)

摘要: 针对开式系统中水膜闪蒸的换热特性进行了实验研究. 实验参数选择如下: 循环水过热度为 1~15 K; 闪蒸室压力分别为 20.4、30.2、47.4 kPa; 水膜厚度分别为 100 和 300 mm; 循环水流量分别为 0.028、0.056、0.083 kg/s. 实验结果表明: 闪蒸换热系数的变化范围为 60~140 kW/(m²·K), 并随过热度的增大而减小, 随闪蒸室内饱和压力的升高而增大, 随水膜厚度的增大而减小. 根据实验结果, 基于闪蒸过程类似核态沸腾, 给出了换热系数与各影响参数之间关系的实验关联式, 与实验结果的误差小于 27%.

关键词: 闪蒸; 换热系数; 过热度

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0001-04

Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Flash Evaporation of Water Film in Open System

Yan Junjie¹, Li Luning¹, Hu Shenhua², Guo Yingli¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Wulumuqi 830008, China)

Abstract: Heat transfer characteristics of flash evaporation of water film in an open system were studied. The tests were conducted at superheat temperature differences of 1—15K, flash evaporation pressures of 20.4, 30.2 and 47.4 kPa, water film thicknesses of 100 and 300 mm, and mass flux of 0.028, 0.056, 0.083 kg/s. The results show that under the operating condition, heat transfer coefficient ranges from 60 to 140 kW/(m²·K) which decreases with the increase of superheat, increases with the increase of flash evaporation pressure and decreases with the increase of water film thickness. According to the results in this experiment, based on the similarity between flash evaporation and nuclear boiling, an experimental expression of heat transfer coefficient with all of the influence parameters was presented with the maximum error of 27%.

Keywords: flash evaporation; heat transfer coefficient; superheat

符号表

A	闪蒸室横截面积, m ²	H	液膜厚度, m	c_{pl}	饱和液体定压比热容, kJ/(kg·K)
ΔH	凝结水水位差, m	T_{out}	闪蒸室出口水温度, °C	h	换热系数, kW/(m ² ·K)
r	汽化潜热, kJ/kg	p_{sat}	饱和压力, kPa	Q	循环水质量流量, kg/s
ΔT_{out}	闪蒸室出口水过热度, K	T_{sat}	闪蒸室压力下的饱和温度, °C	ΔT_{in}	闪蒸室入口水过热度, K
η	动力黏度, Pa·s	ρ_l	饱和水密度, kg/m ³	$\Delta \tau$	数据记录时间间隔, s
γ	表面张力, N/m	g	重力加速度, m/s ²	ρ_v	饱和蒸汽密度, kg/m ³
d	冷凝水容器横截面积, m ²				

当一定温度的液体突然暴露在低于其饱和压力的环境下时,液体中的过热能量作为不稳定能量将不能继续存在于液体中,会迅速形成蒸汽泡,同时液体温度迅速下降,这个过程被称为液体的闪蒸(flash evaporation).闪蒸现象在海水淡化、闪蒸喷雾和食品等工业中广泛存在.近年来闪蒸过程引起了世界范围内学者的关注,文献[1-5]对封闭系统中闪蒸的瞬态特性进行了研究,但工业中普遍应用的是开式系统,封闭系统下静止水膜的瞬态特性并不能完全适用于开式系统.文献[6-7]针对开式闪蒸系统进行了研究,并将重点集中于对流场和气泡的观察,缺少换热特性方面的实验研究,而换热特性是影响整个系统设计和性能的决定性因素.因此,本文针对开式系统在不同过热度、不同压力、不同液膜厚度以及不同流量下,以换热系数和不平衡温差为指标,通过连续的测量和观察,研究了闪蒸过程换热方面的特性,并且根据实验结果,基于闪蒸过程类似核态沸腾原理,给出了换热系数与各影响参数之间关系的实验关联式.

1 实验系统与方法

实验所采用的闪蒸循环系统如图1所示,包括主循环、冷凝循环和抽真空辅助循环.

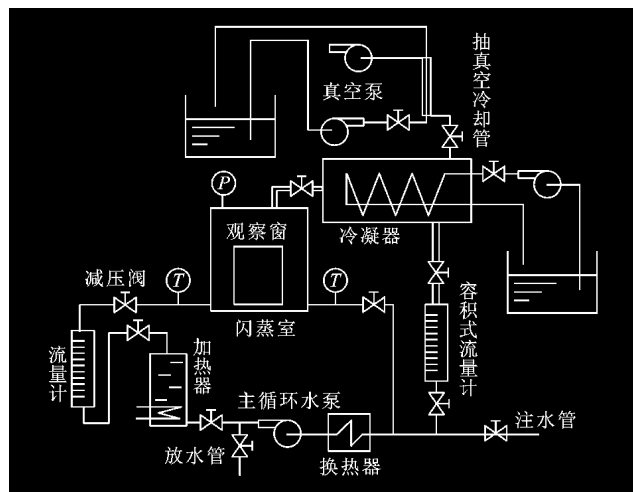


图1 实验系统图

主循环回路主要由主循环水泵、加热器、流量计、减压阀、闪蒸室和换热器等组成.循环水由主循环水泵升压后,通过加热器时进行加热,进入闪蒸室时由于突然暴露于低压下而达到过热状态并开始闪蒸.闪蒸出的蒸汽在闪蒸室和冷凝器间压差的作用下进入冷凝器冷凝,产生的凝结水在重力的作用下进入容积式流量计,闪蒸室内闪蒸后的液体通过换

热器降温后回到主循环水泵.减压阀和主循环水泵把主循环回路分隔为高压和低压两个部分,高压区能够保证循环水进入闪蒸室前不会提前闪蒸.蒸汽冷凝辅助循环回路主要由冷凝器、冷却水泵和冷却水箱组成.冷凝器采用管壳式结构,管路采用 $\varnothing 10$ mm螺旋盘管.抽真空冷凝辅助循环由循环水泵、冷凝管、真空泵和冷却水箱组成.冷凝管采用双层套管结构,真空泵在实验中连续抽出冷凝器内的不凝气体,以保证蒸汽冷凝循环的冷凝效果.

实验开始时,先加热循环水至略高于实验饱和温度,再抽真空至实验压力,使闪蒸室内发生闪蒸,利用闪蒸出的蒸汽把系统内的不凝气体排出系统,然后调节冷凝器内冷凝循环水的流量,使得闪蒸室内的压力稳定在实验压力下,开始记录数据.实验过程中,通过对容积式流量计中冷凝水的液位高度进行测量来确定单位时间内闪蒸出蒸汽的量,通过调节加热器的加热功率使得闪蒸室入口水达到不同的过热度,通过调节减压阀的开度来调节主循环水流量.

为了得到闪蒸过程的换热系数,本实验主要利用冷凝水测量系统测量了 $\Delta\tau$ 时间内冷凝器产生的冷凝水量,即 $\Delta\tau$ 时间内闪蒸室液体的蒸发量.本实验采用改变减压阀的开度来改变流量的方法,由于流量的改变会改变单位时间内进入闪蒸室液体所含的不稳定能量,所以采用下式来计算单位流量液体闪蒸时的换热系数

$$h = \frac{m_{ev}}{\Delta\tau A Q \Delta T_{in}} \quad (1)$$

式中: m_{ev} 为 $\Delta\tau$ 时间内闪蒸蒸汽的质量, $m_{ev} = \Delta H \cdot \frac{\pi d^2}{4} \rho$.

为了反映闪蒸室内闪蒸换热的充分程度,本文采用了文献[1-2]提出的不平衡温差指标,即

$$\Delta T_{NETD} = T_{out} - T_{sat} = \Delta T_{out} \quad (2)$$

实验中采用精度为0.1%的压敏电阻压力传感器测量闪蒸室内的压力,采用误差为0.2 K的T分度铜-康铜热电偶进行温度测量,所有热电偶在使用前都经过统一标定.利用文献[8]的方法对换热系数 h 的不确定度进行分析.从式(1)可以看出,影响 h 的因素有 d 、 ΔH 、 $\Delta\tau$ 、 A 、 ΔT_{in} 等.计算时假定这些因素相互独立, d 和 ΔH 的不确定度取为 5×10^{-4} m, $\Delta\tau$ 的不确定度取为 5×10^{-2} s, A 的不确定度取为 2.5×10^{-7} m², ΔT_{in} 的不确定度取为0.2 K.可以得出 h 的不确定度为1.83%~11.25%.

2 实验结果

从图2、图4可以看出:当 Q 为0.028 kg/s时,闪蒸换热系数随过热度的增大基本保持不变;当 Q 为0.056和0.083 kg/s时,闪蒸换热系数随过热度的增大出现减小的趋势.原因是增大流量导致液体在闪蒸室内停留的时间减少,有更多液体在来不及闪蒸的情况下就由闪蒸室出口流出,从而使得出口处的液体带走了更多的不稳定能量.用不平衡温差更能直观地解释出现这种趋势的原因.如图3、图5所示,当 Q 为0.056和0.083 kg/s时,不平衡温差随过热度的增大而增大,即表示出口水包含了更多的不稳定能量.对比图2、图4还可以看出,在过热度、循环水流量和液膜厚度相同的条件下,闪蒸换热系数随闪蒸室压力的增大而增大.这是因为较高的饱和压力对应较高的液体温度,由于液体表面张力和黏性都随温度的升高而减小,同时液体在低压下

的蒸发潜热较大,发生闪蒸所需要的蒸发驱动力较大,相同过热度条件下较之高压时更难以形成蒸汽泡,因此低压下闪蒸换热系数较小.

对比图2~图5可以看出,在过热度、闪蒸室压力和流量相同的条件下,闪蒸换热系数随液膜厚度的增大而减小.这是因为液膜厚度的增加会导致闪蒸室内下部液体压力的增加,从而增大了下部液体的饱和温度,对应地减小了入口水的过热度.

3 闪蒸换热特性实验关联式

基于闪蒸沸腾换热类似于大容器内核态沸腾换热原理,考虑到液膜厚度以及开式系统中液体流量对闪蒸换热特性的影响,本文在文献[9]推荐的核态沸腾实验关联式的基础上加入了量纲一的量 $\left[\frac{H}{Q\tau^* / (\rho_l DH)}\right]$,并给出了下列开式系统中闪蒸换热实验关联式

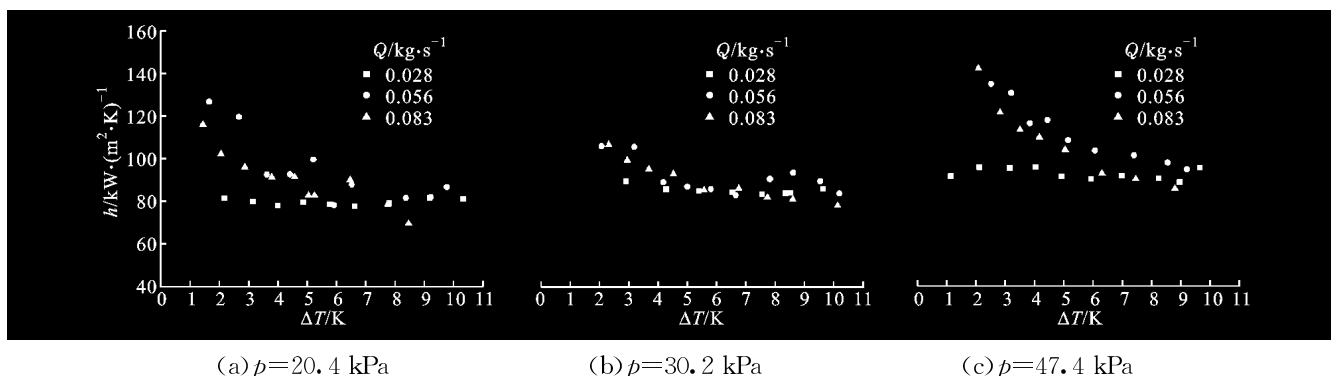


图2 $H=100$ mm时流量对换热系数的影响

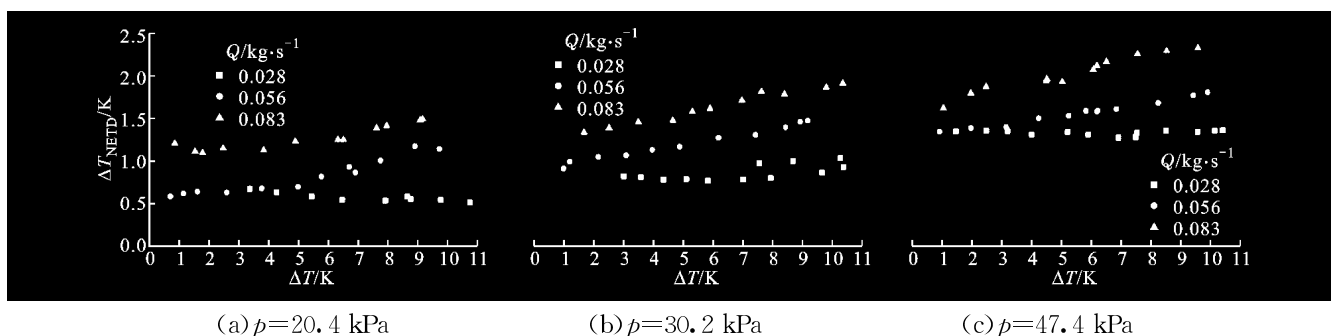


图3 $H=100$ mm时流量对不平衡温差的影响

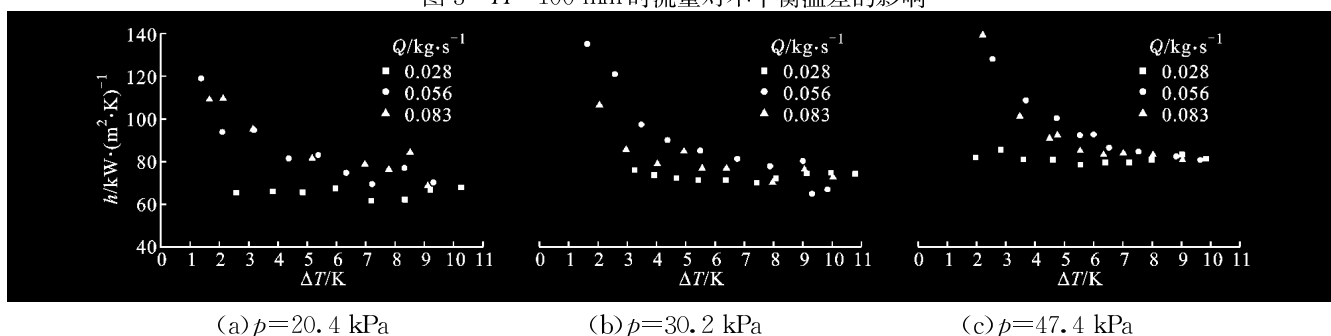
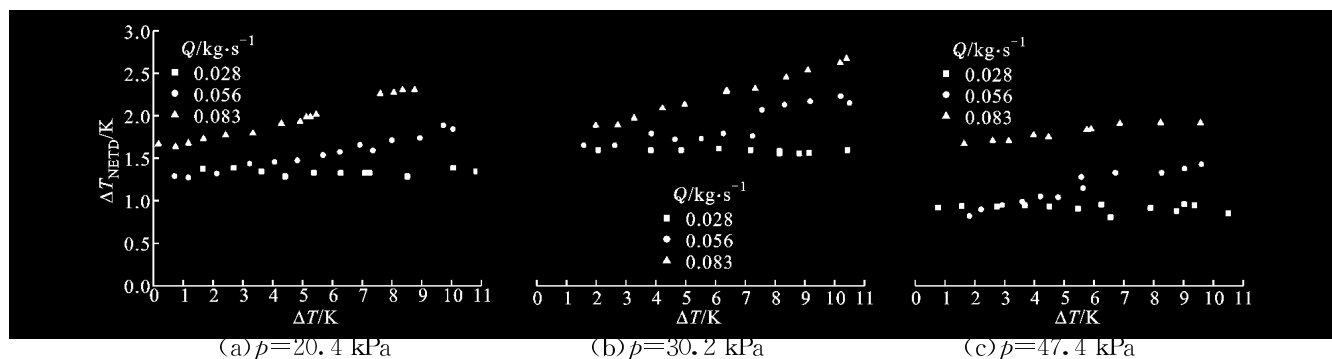


图4 $H=300$ mm时流量对换热系数的影响

图5 $H=300$ mm时流量对不平衡温差的影响

$$h = \frac{\eta r}{\Delta T_{in}} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\gamma} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{c_{pl} \Delta T_{in}}{r(c_{pl} \eta / \lambda)^{C_2} C_{wl}} \right]^{\frac{1}{C_1}} \cdot \left[\frac{H}{Q \tau^* / (\rho_l D H)} \right]^{\frac{C_3}{C_1}} \quad (3)$$

式中: $\frac{h \Delta T_{in}}{\eta r} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\gamma} \right]^{\frac{1}{2}}$ 为雷诺数, 以单位面积上的蒸汽质量流速 ($h \Delta T_{in} / r$) 为特征速度, 特征长度 $[\gamma / g(\rho_l - \rho_v)]^{\frac{1}{2}}$ 正比于气泡脱离加热面时的直径; $r / c_{pl} \Delta T_{in}$ 为斯坦顿数; $c_{pl} \eta / \lambda$ 为普朗特数; 量纲一的量 $\left[\frac{H}{Q \tau^* / (\rho_l D H)} \right]$ 的物理意义是液膜厚度与 τ^* 时间内液体的水平位移之比; τ^* 采用文献[4]中静态闪蒸结束的时间 4 s; C_{wl} 为取决于闪蒸室壁面-液体组合情况的经验常数, 根据本实验结果得出

$$C_{wl} = 9.6 \times 10^{-4}, \quad C_1 = 1.220$$

$$C_2 = 1.915, \quad C_3 = 0.056$$

图6为所有参数下换热系数实验值 h_{exp} 与拟合值 h_{fit} 的对比, 图中实线上的点表示拟合值与实验值相等, 实线上方的点表示实验值大于拟合值, 其中最大正偏差为+24.90%, 位于实线下方的点表示实验值小于拟合值, 其中最大负偏差为-26.67%。

4 结论

本文通过开式实验系统, 进行了不同过热度、压力、液膜厚度和流量下的闪蒸实验, 得到了不同条件下闪蒸换热特性曲线。结果表明: 在实验的过热度范围内, 换热系数在流量为 0.028 kg/s 时没有明显的变化, 流量为 0.056、0.083 kg/s 时, 不平衡温差随过热度的增大而增大, 导致换热系数减小。压力的增大以及液膜厚度的减小都可以导致换热系数的增大。本文最后给出了闪蒸换热系数与各影响参数之间的实验关联式, 这些结论为工业应用中闪蒸系统性能的改善提供了参考依据。

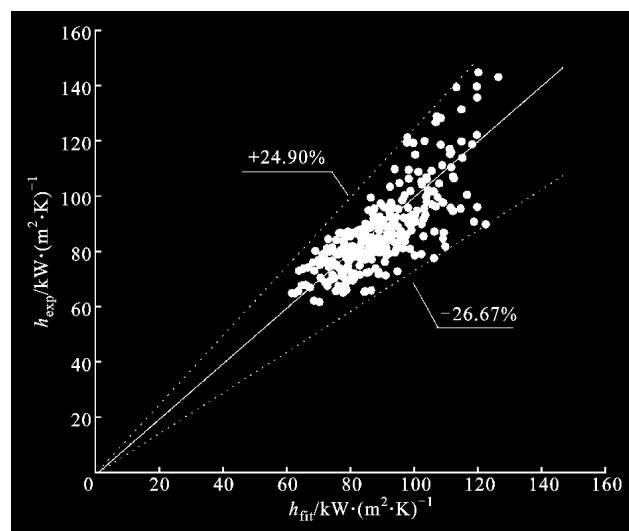


图6 所有参数下换热系数实验值与拟合值的对比

参考文献:

- [1] Miyatake O, Murakami K, Kawata Y, et al. Fundamental experiments with flash evaporation[J]. Heat Transfer-Japanese Research, 1973, 2(4): 89-100.
- [2] Miyatake O, Fujii T, Tanaka T, et al. Flash evaporation phenomena of pool water[J]. Heat Transfer-Japanese Research, 1977, 6(2): 13-24.
- [3] Gopalakrishna S, Purushothaman V, Lior N. An experimental study of flash evaporation from liquid pools[J]. Desalination, 1987, 65(2): 139-151.
- [4] Kim J I, Lior M N. Some critical transitions in pool flash evaporation[J]. Heat and Mass Transfer, 1995, 40(10): 2363-2372.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Moffat R J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis[J]. ASME Journal of fluids Engineering, 1982, 104(2):250-260.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998:221-223.

(编辑 王焕雪)

(下转第 36 页)