

水平管外海水降膜蒸发传热特殊现象分析

沈胜强*, 牟兴森, 杨 勇, 刘 瑞, 龚路远

(大连理工大学 海水淡化辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:以低温多效蒸发海水淡化装置中的水平管降膜蒸发过程为研究对象,对海水水平管降膜蒸发的传热系数在不同蒸发温度、雷诺数(Re)等条件下沿圆周角方向的分布特征进行了实验研究. 研究表明:海水作为实验流体时,传热系数随蒸发温度的升高而降低,随 Re 的增大而呈现先升高,达到最大值后略微降低的趋势,随圆周角的增大而先减小后增大.

关键词:水平管降膜蒸发;传热系数;海水淡化;海水

中图分类号: P747.13 **文献标志码:** A

0 引言

淡水作为人类生存的必需品,其重要性不言而喻.但由于淡水资源地域性分布不均和社会发展对淡水需求的急剧增加,淡水资源短缺现象愈来愈严重.海水淡化作为一种开辟新水源的技术,已成为世界上公认的解决沿海地区淡水缺乏的重要途径之一.海水淡化的方法多种多样,其中低温多效蒸发技术由于其运行可靠性高、产水水质好、便于余热利用、成本较低等诸多优点,成为现今世界上大型海水淡化装置的主要技术之一.

水平管降膜蒸发是目前多效蒸发海水淡化装置采用的主流技术,对于光滑管而言,水平管降膜蒸发传热系数远高于竖管降膜蒸发、浸没式蒸发等过程^[1],它在海洋温差发电、制冷工程、食品加工、石油化工等领域也有着广泛的用途^[2-4].

关于水平管降膜蒸发传热过程的研究,对其传热系数与蒸发温度^[5-7]、雷诺数^[7-10]、圆周角度^[11-12]、盐度^[6,13-14]等参数的关系均提出了不同的看法.由于研究对象针对性不同,关于物性、尺度、流动状态等参数的变化缺乏通用结论.作者针对大型低温多效蒸发海水淡化装置中的水平管降膜蒸发过程开展了实验研究,发现了一些特殊的传热现象,本文就海水在水平管外降膜蒸发传热

过程中的特点展开讨论,探讨蒸发温度、降膜流动雷诺数、圆周角度等参数的变化对传热系数所产生的影响及其作用机理.

1 实验装置及实验过程

为了测量水平管降膜蒸发传热系数并确定其影响因素,建立了如图1所示的单管实验系统.系统主要分成水循环系统、蒸发冷却系统和数据采集系统3个部分.水循环系统中,实验原料水在加热水箱1中被加热到实验所要求的饱和温度,经给水泵2进入高位水箱3中,在重力作用下流体流经转子流量计4,经计量后以稳定的速率进入蒸发器5内的喷淋管,喷淋管将实验流体均匀地喷淋到布液管表面形成液膜,液膜下落与换热管进行换热.部分流体在换热管表面被蒸发,未被蒸发的流体经计量罐8计量后由射流泵10抽出,重新返回加热水箱中循环使用.

蒸发冷却系统中,实验流体在蒸发器5内以液膜形式与换热管在与蒸发温度相对应的真空环境下进行热交换,产生的蒸汽进入冷凝器6中冷却,凝结出的淡水被收集并计量.实验中通过控制冷却水水量使冷凝器中的冷凝量与蒸发器中的蒸发量达到一个平衡,保证冷凝器中的真空持续存在.

在实验中,加热管为 $\phi 25.4\text{ mm}$ 铝黄铜管,喷淋管、布液管、传热管之间的管间距为 57.1 mm ,传热管热流密度控制在 $9.4\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$,蒸发温度 $50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (对应真空度为 $0.088\ 98\sim 0.070\ 15\text{ MPa}$),海水喷淋雷诺数 $100\sim 600$ (对应的喷淋密度 $0.02\sim 0.09\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$).

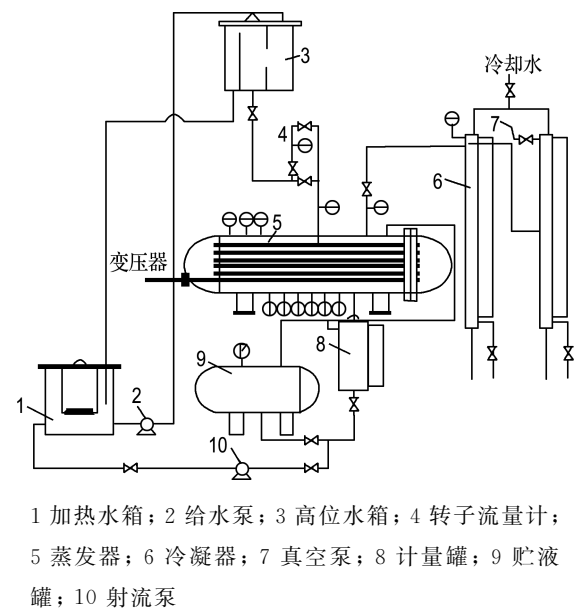


图 1 实验装置系统图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

为了探讨海水在水平管外降膜蒸发传热的详细过程与特征,在传热管的截面上,以顶部为 0° ,分别在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 和 180° 设置了 5 个测温点. 热电偶焊接于截面为 $0.3\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$ 的沟槽中,沿轴向敷设 20 mm 后引出,热电偶沟槽中灌入焊锡并打磨光滑,使表面状态与原管子表面相同,以确保热电偶的安装不影响降膜流动和传热. 实验管上分别在 5 个截面上如此设置测温点. 由于本实验在系统和结构设计上保证了海水喷淋密度稳定均匀,各个截面上的实验结果表现出高度的一致性.

数据采集系统中,为保证实验数据的可靠、合理、准确,采用了多测量手段、多测点的方法以使其能相互验证,尽可能地减小测量误差. 实验台共设有温度测点 27 个,压力测点 3 个,流量测点 3 个. 蒸发器中换热管采用电加热棒加热,加热功率连续可调.

本实验中使用的海水采于黄海海域,实验前检

测其盐度为 3.0% ;实验中使用的纯水为蒸馏水.

2 实验结果分析与讨论

为方便描述实验结论,选用量纲一雷诺数 (Re) 作为分析的一个参数,其计算式为

$$Re = 4\Gamma/\eta \tag{1}$$

式中: Γ 为喷淋密度,单位为 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; η 为动力黏度,单位为 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$.

在低温多效蒸发海水淡化装置中,蒸发温度沿蒸发器效数而降低;在一个蒸发器内,由于部分流体蒸发,从上至下流体的 Re 沿管排数下降. 图 2 给出海水在水平管外平均降膜蒸发传热系数随 Re 和蒸发温度变化的分布图. 由图 2 可以看出,水平管降膜蒸发传热系数分布的一个重要特征:传热系数并不是随 Re 单调增加的.

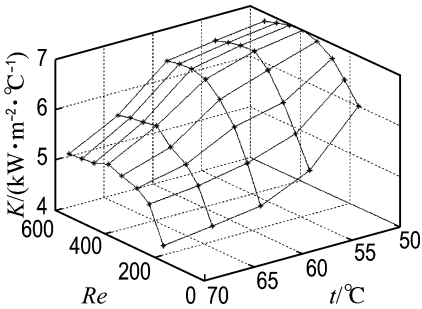


图 2 传热系数随 Re 和蒸发温度变化曲线

Fig. 2 Distribution of heat transfer coefficient at different Re and evaporation temperature

在 Re 较小时,降膜蒸发传热系数随 Re 的增大而增大. 在多效蒸发海水淡化过程设置的实验条件下,壁面温度与蒸发温度之差仅为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右. 对于小温差下的水平管降膜蒸发传热过程,换热方式主要以对流换热和表面蒸发为主. Re 较小时,管子表面的液膜较薄,薄液膜受黏性力的控制内部波动较弱,当上层管的液滴滴落到下层换热管表面时,液滴与管表面液膜产生碰撞,使液膜波动增强, Re 越大,液膜波动越剧烈,且液膜的流速也越大,有利于强化对流换热,于是出现了换热系数随 Re 的增大而增大的趋势,这与一般的 Re 和对流换热能力的规律一致.

当 Re 较大时,传热系数随 Re 的增大趋势减缓,到达某点后曲线近乎水平,甚至出现下降. 这

体现出小温差下降膜蒸发传热的另一个特点:随着 Re 的增大,换热管表面的液膜厚度也在增大.当液膜厚度增大到一定程度后,液膜中热量由管子表面向汽液表面的扩散过程成为热量传递的控制因素,膜厚的增加抵消了液膜波动对对流换热的增强,于是出现了换热系数随 Re 的增大而不再增大的现象.将传热系数达到最大值所对应的雷诺数称为临界雷诺数 Re_c .

由此也可以确定,对于多效蒸发海水淡化装置的过程设计,在小温差传热条件下,海水在水平管上降膜流动 Re 应限制在一定范围之内.

在海水降膜蒸发传热实验中发现的另一有趣现象是图 2 所示的传热系数与蒸发温度的关系.由图可以看出,传热系数随蒸发温度的升高出现了明显降低的趋势,这与采用淡水进行的降膜蒸发传热实验结果是相悖的^[15].该现象在其他研究者的文献中从未见到报道,经过对海水在不同条件下的降膜蒸发传热过程的反复试验,证实了实验数据的可靠性.在对影响传热系数的因素作了全面分析后发现,出现该实验结果的控制因素可能是流体的导热系数.表 1 给出了实验温度范围内海水和淡水的导热系数^[16].随着蒸发温度的升高,海水的导热系数降低,而淡水的导热系数升高,物性的差异造成降膜蒸发传热系数规律的差异.这也从另一个角度证明,水平管降膜蒸发传热过程受扩散过程控制,临界雷诺数的出现是扩散阻力影响的结果.

表 1 海水和淡水的导热系数^[16]

Tab. 1 Coefficient of thermal conductivity of sea water and fresh water^[16]

$t/^\circ\text{C}$	$\kappa_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$\kappa_f/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
50	0.576	0.644
55	0.573	0.649
60	0.569	0.654
65	0.566	0.659
70	0.562	0.663

图 3、4 分别为蒸发温度为 50 °C 和 70 °C 时,传热系数随 Re 和圆周角的分布.由图可以看出,换热管表面传热系数从 0°到 45°呈现出基本不变或略微下降的趋势;随后随圆周角的增加,传热系

数明显减小;到 135°附近时,传热系数减小趋势减缓,随后出现略微上升的情况.在本实验参数范围内,对任何蒸发温度、喷淋密度、管间距的实验,都出现了这种传热系数分布,说明了这是水平管降膜蒸发传热系数的一种分布特征,反映了水平管降膜蒸发过程液膜运动状态和传递机理对传热系数的影响.对此现象的分析认为,液滴滴落到换热管正上方时,在重力的作用下,液滴与液膜碰撞,导致液膜波动加剧,所以其局部传热系数较高;流体在沿管壁向下流动过程中,由于液膜较薄,液膜内的波动逐渐减缓,扩散过程逐渐成为主导,传热系数明显降低;在管子底部,换热管表面液膜破碎向下滴液,在液滴脱离的过程中,出现周

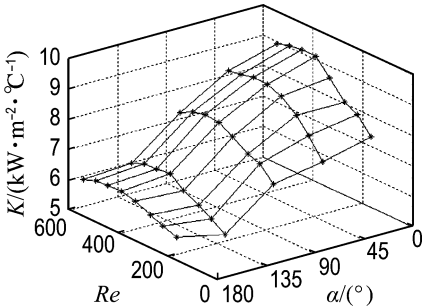


图 3 蒸发温度为 50 °C 时,传热系数随 Re 和圆周角的分布

Fig. 3 Distribution of heat transfer coefficient at different Re and tube circumference angle when the evaporation temperature is 50 °C

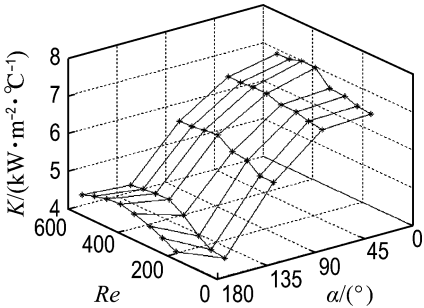


图 4 蒸发温度为 70 °C 时,传热系数随 Re 和圆周角的分布

Fig. 4 Distribution of heat transfer coefficient at different Re and tube circumference angle when the evaporation temperature is 70 °C

期性的脱离、回缩脉动和尾流,使得液膜剧烈波动,而导致传热系数在 180°附近出现上升趋势.

由此现象可以将水平管降膜蒸发传热过程分为 3 个区域:顶部液滴冲击区,该区域没有稳定的液膜形成,属于冲击传热区,液膜中的传热受对流过程控制,按照场协同理论,该区域具有最小的热流场与流场协同角,因此具有较高的传热系数;中间大部分区域中液体呈膜状流动,液膜较为稳定,传热受到液膜内热量扩散过程的控制;管子底部属于液膜破碎脱离尾流区,液体脱离管子造成该区域中液体周期性的脉动,液膜扰动加剧且处于不稳定状态,使得其局部传热增强。

由于受不同的传热机理控制,传热系数沿管子周向的变化很大,换热管顶部的换热系数是底部的 1.5 倍左右,反映出不同换热机理对传热的影响。

3 结 论

(1)在本实验条件范围内, Re 较小时,传热系数随 Re 的增大而增大;随着 Re 的增加,传热系数随 Re 的增大趋缓并达到极大值,继续增加 Re 传热系数会出现下降趋势。

(2)实验流体为海水时,水平管降膜蒸发传热系数随着蒸发温度的升高而下降。

(3)对不同蒸发温度、喷淋密度、管间距的实验,换热管表面的局部传热系数均随圆周角的增大,呈现出先缓慢降低,再加速降低,随后局部传热系数出现小幅回升的现象。

(4)根据实验结果,将水平管降膜蒸发过程细分为 3 个区域:顶部液滴冲击区、中间扩散传递区和底部液膜破碎脱离尾流区,上下两个区域的传热过程主要受对流传热的控制,中间区域的传热主要受扩散过程控制。

参考文献:

[1] 齐和发,沈吟秋. 影响水平管降膜蒸发传热性能的因素[J]. 高校化学工程学报, 1995, **9**(3):270-274.
QI He-fa, SHEN Yin-qiu. Effecting factors on heat transfer performance of horizontal tube falling film evaporation [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 1995, **9**(3): 270-274. (in Chinese)

[2] 何茂刚,王小飞,张 颖. 制冷用水平管降膜蒸发器的研究进展及新技术[J]. 化工学报, 2008, **59**(2): 23-28.
HE Mao-gang, WANG Xiao-fei, ZHANG Ying. Review of prior research and new technology for horizontal tube falling film evaporator used in refrigeration [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, **59**(2):23-28. (in Chinese)
[3] 路慧霞,马晓建. 水平管外降膜蒸发的传热实验[J]. 化工进展, 2009, **28**(2):203-205.
LU Hui-xia, MA Xiao-jian. Experimental on heat transfer of falling film evaporation on horizontal tubes [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, **28**(2):203-205. (in Chinese)
[4] 马学虎,高大志,安家明. 功能表面降膜蒸发传热特性的实验研究[J]. 热科学与技术, 2003, **2**(2): 119-123.
MA Xue-hu, GAO Da-zhi, AN Jia-ming. Preliminary investigation of seawater falling film evaporation on treated functional surfaces [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2003, **2**(2):119-123. (in Chinese)
[5] Edahiro K, Hamada T. Research and development of multi-effect horizontal tube film evaporator [J]. *Desalination*, 1977, **22**:121-130.
[6] Jelino G A. Pilot plant test and design study of a 2.5MGD horizontal-tube multiple-effect plant [R] // *Research and Development Progress Report*, **492**. New York: United States Department of the Interior, 1969.
[7] LI Xu, GE Mu-rong, WANG Shi-chang, *et al.* Heat transfer film coefficients of falling film horizontal tube evaporators [J]. *Desalination*, 2004, **166**:223-230.
[8] YANG Luo-peng, SHEN Sheng-qiang. Experimental study of falling film evaporation heat transfer outside horizontal tubes [J]. *Desalination*, 2008, **220**:654-660.
[9] Chyu M, Bergles A. Horizontal-tube falling-film evaporation with structure surfaces [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1989, **111**(2):518-524.
[10] Fujita Y, Tsutsui M. Experimental investigation of

falling film evaporation on horizontal tubes [J]. **Heat Transfer-Japanese Research**, 1998, **27**(8):609-618.

[11] Chyu M, Bergles A. An analytical and experimental study of falling-film evaporation on a horizontal tube [J]. **Journal of Heat Transfer**, 1987, **109**(4):983-990.

[12] Jafar F, Thorpe G, Turan O F. Liquid film falling on horizontal circular cylinders [C] // **16th Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC)**. Melbourne: Australasian Fluid Mechanics Society, 2007.

[13] Slesarenko V. Thermal desalination of sea water in thin film plants [J]. **Desalination**, 1983, **45**:295-302.

[14] 范延品. 水平管降膜蒸发实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.

FAN Yan-pin. Experimental study of falling film evaporation on horizontal tubes [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)

[15] MU Xing-sen, SHEN Sheng-qiang, YANG Yong, *et al.* Experimental study of falling film evaporation heat transfer coefficient on horizontal tube [J]. **Desalination and Water Treatment**, 2012, **50**(1-3):310-316.

[16] Fabuss B M, Korosi A. Properties of sea water and solutions containing sodium chloride, potassium cholride, sodium sulfate and magnesium sulfate [R] // **Research and Development Progress Report, 384**. New York:United States Department of the Interior, 1968.

Analysis of special heat transfer phenomenon outside horizontal-tube falling film evaporation for sea water

SHEN Sheng-qiang* , MU Xing-sen, YANG Yong, LIU Rui, GONG Lu-yuan

(Key Laboratory of Liaoning Province for Desalination, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The study is focused on the heat transfer process of the horizontal-tube falling film evaporation in a low temperature and multiple effect distillation (MED) desalination plant. The distribution characteristics of heat transfer coefficient of horizontal-tube falling film evaporation for sea water along the tube circumference direction are investigated at different evaporation temperatures and different Reynolds numbers (Re). Analytical results indicate that the growth of evaporation temperature is disadvantageous to the average heat transfer coefficient of sea water falling film evaporation. The heat transfer coefficient increases with the growth of Reynolds number until it reaches the maximum value, and then a little decrease will appear in it. The local heat transfer coefficient decreases along the tube circumference angle, but at the bottom of the tube, it shows an increasing trend.

Key words: horizontal-tube falling film evaporation; heat transfer coefficient; desalination; sea water