

低压蒸汽横掠水平降膜管束流动阻力实验研究

刘 华, 沈胜强*, 龚路远, 刘 瑞

(大连理工大学 辽宁省海水淡化重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用模拟方法对海水淡化装置中大型水平管降膜蒸发器内的流动过程进行实验研究. 管束采用海水淡化装置中广泛应用的正三角形和转角正方形排列, 其管间距为 1.3 倍管外径. 实验在饱和温度为 50~70 ℃, 喷淋密度为 0.02~0.08 kg·m⁻¹·s⁻¹ 的条件下进行. 分析了管束排列方式、喷淋密度和饱和温度等因素对流动阻力的影响. 实验结果表明, 流动阻力在正三角形管束下比在转角正方形管束下大得多. 引入 Re_l 、 Re_g 、 s_{10}/D 、 s_{1r}/D 等参数来表征各个影响因素并用来拟合有降膜流动时蒸汽横掠管束的压降预测公式. 新拟合的公式误差在 ±15% 以内.

关键词: 流动阻力; 喷淋密度; 降膜流动; 水平管管束

中图分类号: TK125 **文献标志码:** A

0 引 言

水平管降膜蒸发器是 20 世纪 70 年代发展起来的新型蒸发器. 在海水淡化过程中, 布液器均匀地将海水喷淋在水平管的外壁面, 喷淋形成的液膜沿管子圆周做降膜流动. 加热蒸汽在管内流动, 通过管壁与液膜进行热交换来加热液膜. 管内蒸汽凝结温度略高于管外液体的蒸发温度, 管内蒸汽被管外液体冷却而凝结, 管外部分液体吸收管内冷凝蒸汽的相变热而蒸发. 大型装置多效蒸发海水淡化系统由多个单效蒸发单元组成, 每一效蒸发器内以特定结构安装有成千上万的管束, 系统运行时由上一效蒸发器内产生的二次蒸汽进入下一效蒸发器作为热源蒸汽, 提高了热利用率和造水比.

水平管降膜蒸发器的研究重点包括传热特性和流动特性. 在以往的可查文献中关于管束间气液两相流动特性的研究对象都是两相混合物同向冲刷管束, 研究方法基本上都是加一个转换因子将两相流压降转变成单相流压降. Ishihara 等^[1]提出将研究管内两相摩擦压降的马蒂内利参数法应用到管外两相流动阻力, 并提出两相摩擦因子

关联式. 这一方法的提出对后面学者^[2-4]影响很大, 之后关于两相流的理论研究基本都是基于此, 比如空隙率模型的提出^[5]和改进^[6-7], 两相流流型^[8]的分类依据等. Ribatski 等^[9]对前人关于两相流压降和传热的研究进行了总结.

与以上研究不同的是, 本文的研究对象是蒸汽掠过降膜管束的两相流动, 它包括液体在重力驱动下的降膜流动和蒸汽在压差驱动下由管束内部向出口方向的流动. 研究发现^[10-11]水平管降膜蒸发传热能力在大型管束中受温度、喷淋密度、管子排列形式等诸多因素影响, 有着很不均匀的分布. 蒸汽流动阻力与这些参数有着相互的影响, 有必要进行深入研究. 为此, 本文通过设计制作模拟大型水平管降膜蒸发器流动过程的实验台, 针对流动阻力开展实验研究, 并对其进行定量分析.

1 实验装置及误差分析

1.1 实验装置

降膜蒸发器管束流动阻力实验装置如图 1 所示. 实验系统由锅炉、分气缸、降温减压器、主实验台、冷凝器、储液罐、水泵及测量仪表等设备组成.

收稿日期: 2012-11-02; 修回日期: 2013-09-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976016); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110041110032).

作者简介: 刘 华(1984-), 男, 博士生, E-mail: liuhua@mail.dlut.edu.cn; 沈胜强* (1961-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zzbshen@dlut.edu.cn.

其中锅炉、分气缸、降温减压器为实验装置提供实验所需工况的饱和蒸汽;储液罐、水泵等为实验装置提供适量的喷淋水;真空泵、冷凝器等控制实验装置的真空度,并维持系统的连续运行.实验时锅炉产生的常压蒸汽经降温减压器达到设定的真空压力和饱和温度后进入流动阻力测试装置,蒸汽经过管束后进入冷凝器,凝结水返回锅炉;与此同时在流动阻力测试装置中的管束上部设有喷淋箱,按照设定的流量将对应管束空间压力的饱和水均匀地喷淋到管束上,形成降膜流动.

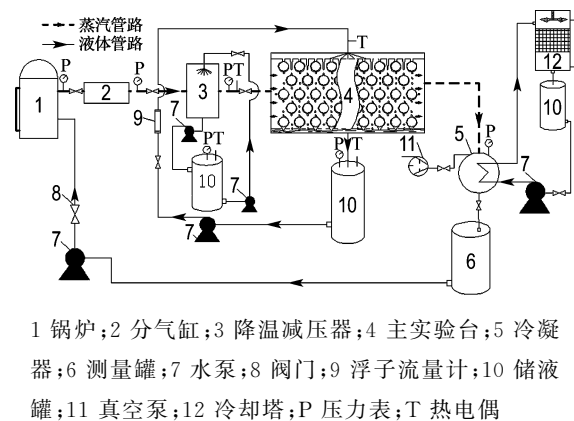


图 1 实验系统图

Fig. 1 Experimental schematic diagram

实验测试了管间距同为 $1.3D$ (D 为管外径) 的正三角形和转角正方形 (见图 2) 两种管束排列方式.管束区域内,流体的流通面积在变化,选取同一列管心连线的最小流通面积作为计算截面积.

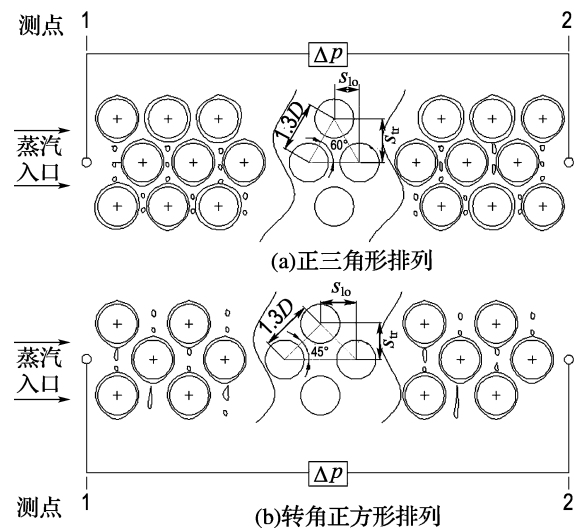


图 2 管束结构和压力测点示意图

Fig. 2 Diagram of tube bundle and monitoring-point

图 2 给出了管束结构和测点分布,压差测量有效长度为 $1\ 500\text{ mm}$.本实验中管材选用 HAL77-2A 铝黄铜管,管子外径 25.4 mm ,壁厚 0.7 mm ,管长 500 mm ;管束结构采用正三角形排列和转角正方形排列,对应管数分别为 501 和 448.管束安装在可以拆卸的管排上,主实验台流体进口处都设有热电偶测量流体的温度.在管束的进出口都设置了压力测孔,并装有精密压差和压力传感器用以测量蒸汽流过管束的压降.

1.2 实验条件

为了模拟海水淡化装置中水平管降膜蒸发器内的流动过程,设定饱和蒸汽温度 (t) 的范围和对应的饱和压力 (p);降膜流动的水流量采用喷淋密度 (Γ) 表示,即单位时间、单位管长、通过水平管一侧的质量流量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).蒸汽质量流速 (G) 的计算面积采用最小截面积,详细实验参数见表 1.实验中,分别改变蒸汽温度、蒸汽流量和喷淋水量,测量不同条件下的管束间压力及压差.

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

参数	$t/^{\circ}\text{C}$	p/kPa	$G/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Gamma/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
正三角形	50~70	12~31	0.19~1.1	0.02~0.08
转角正方形	50~70	12~31	0.39~1.24	0.02~0.08

1.3 误差分析

压差测量采用 GE Druck LPX9381 型号的精密压差传感器,读数误差为 $\pm 1\text{ Pa}$;温度测量采用 T 型铠装热电偶,测量误差 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$;流量测量采用 LZB-80 浮子流量计,其精度为 $0.2\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.各个测点的温度、压差及压力信号都接入到数据采集系统,并经处理后输入计算机存储.

实验数据在工况稳定后开始记录,实验仪器间隔 6 s 自动记录一次数据,相同工况下每个参数的测量数据不少于 50 个.每一个喷淋工况下,因为仪表的精度和实验工况的不稳定等因素都会造成数据记录的不稳定,因此实验需很长时间,甚至多次反复.实验选取的每组数据的不稳定性都在 $\pm 5\%$ 以内.

2 流动阻力测试结果及特性分析

对实验结果作相应处理以便比较两种不同结

构管束的流动阻力;首先,将每个工况下的测量数据取平均求得期望值;然后,将获得的平均值除以相应管排的管列数求得单列管排对应的压降.

图 3 以蒸汽质量流速 $0.54\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 为例,说明喷淋密度和管束结构对压降的影响.正三角形排列管束在喷淋密度 Γ 变化范围内($0.02\sim 0.08\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)单列管压降变化如下: $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时由 6.1 Pa 增加到 13.0 Pa , $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时由 4.4 Pa 增加到 11.0 Pa , $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则由 3.1 Pa 增加到 7.9 Pa ,即压降增加一倍多.转角正方形排列管束在 Γ 变化范围内单列管压降变化如下: $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时由 1.7 Pa 增加到 6.0 Pa , $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时由 1.3 Pa 增加到 4.6 Pa , $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时单列管压降由 0.9 Pa 增加到 3.4 Pa ,即压降增加 $2\sim 3$ 倍.数据表明喷淋密度对压降影响非常显著.

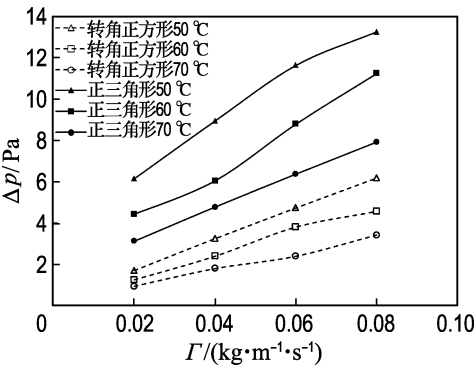


图 3 降膜流动时单列管压降
Fig. 3 Pressure drop of each tube column in falling-film flow

降膜流动对流动阻力的影响可由两方面因素解释.首先液体在管子表面形成液膜,相当于管子直径增加使管间距变小,蒸汽实际流速高于计算流速,从而导致压降增加.再者随着喷淋密度的增加,液体在上下两排管间的滴落速度和频率加大,在较大的喷淋密度时还会由滴状逐渐变成柱状,蒸汽气流穿过管束的截面积进一步缩小,也导致了压降的增加.

图 3 数据显示,蒸汽横掠降膜管束时,正三角形结构下的压降明显大于转角正方形结构的压降,如工况为喷淋密度 $0.06\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,前者是后者的 2.45 倍.这说明管束结构对流动阻力影响巨大.管束流动阻力和相邻两排

管的管间距有很大关系,相同管间距下转角正方形的纵向管间距比正三角形的纵向管间距要大,更利于流场的发展和流体的流动.即对因管束结构造成的形状阻力而言,转角正方形结构下压降更小.因此从减小管束流动阻力方面看,转角正方形结构是更好的选择.

正三角形排列管束在喷淋密度为 $0.08\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,15 列的管束就会形成 200 Pa 左右的压降.对于一般的换热设备来说, 200 Pa 的压降可忽略,但对于每效蒸发器的表观传热温差只有 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温多效蒸发海水淡化装置,则影响很大.在饱和温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 200 Pa 的压降会造成约 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度损失,这将使传热温差减小 $10\%\sim 15\%$,其影响是非常可观的.因此,在对低温多效蒸发海水淡化装置热力性能计算时,必须考虑管束流动阻力的影响.

图 4 以正三角形排列下的各工况数据分析饱和温度对流动阻力的影响,蒸汽质量流速 $0.54\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.由同一条曲线上变化可知,管束间流动阻力都随着蒸汽温度的升高而减小.对于多效蒸发海水淡化装置而言,各效蒸发器的质量流量近似相等,但随着蒸发器效数的增加,压力和温度逐渐降低,上述规律说明在低温效的蒸发器内部流动阻力更大.

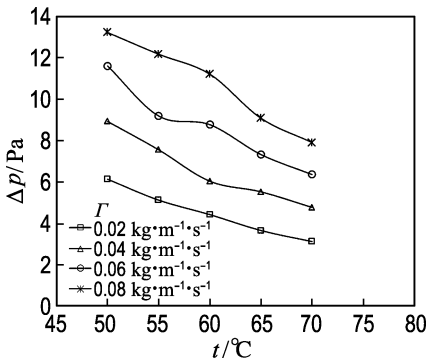


图 4 温度对压降的影响
Fig. 4 The effect of temperature on pressure drop

对于蒸汽而言,之所以流动阻力随饱和温度升高而降低,这是因为:一方面,饱和蒸汽的密度随着温度的升高而增大,也就是同一蒸汽质量流量下温度越高流速越小,而流速的影响因子(二次)比密度的影响因子(一次)要高,因此造成温度越高,流动阻力越小;另一方面,蒸汽横掠有降膜

流动的管束时和液膜直接接触,温度高时饱和水形成的液膜的黏度减小,因而两者摩擦阻力也就越小. 两者的共同作用,使得一定质量流速下,高温时蒸汽流动阻力反而较小.

3 流动阻力计算关系式的归纳

综合考虑,本文选取管排列数(N)、密度(ρ)、蒸汽质量流速(G)、管束纵向和横向管间距(s_{lo} 和 s_{tr}) 及两相流动时压降修正系数(ξ) 作为参考变量与压差进行拟合. 分析因子选取蒸汽流动雷诺数、液体降膜流动雷诺数及表征管束结构的纵向和横向管间距.

定义液体降膜流动雷诺数 Re_l 和蒸汽流动雷诺数 Re_g 如下:

$$Re_l = 4\Gamma/\mu \tag{1}$$

$$Re_g = G \cdot D/\eta \tag{2}$$

其中 μ 为饱和喷淋水动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η 为饱和蒸汽动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

根据上述选择的流动阻力模型,依据最小二乘法原理,采用多元线性回归,得到蒸汽横掠有降膜流动的水平管束时的压降预测公式:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{G^2}{2\rho} N \tag{3}$$

$$\xi = 1.6 Re_g^{-0.33} Re_l^{0.48} (s_{lo}/D)^{-1.86} (s_{tr}/D)^{-0.27} \tag{4}$$

式中: Re_g 取值范围为 $500 \sim 2\,900$, Re_l 取值范围为 $105 \sim 1\,000$, $s_{tr}/D = 0.920 \sim 1.125$, $s_{lo}/D = 0.65 \sim 0.92$. 拟合公式误差在 $\pm 15\%$ 以内(见图 5).

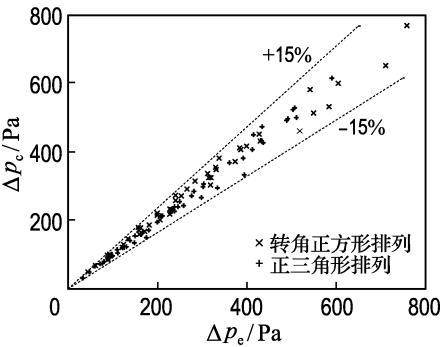


图 5 压降计算值 Δp_c 与实验值 Δp_e 比较
Fig. 5 Comparison of the experimental data Δp_e and the calculated value Δp_c

4 结 论

(1) 喷淋密度及饱和温度对蒸汽横掠降膜管束时的流动阻力有很大影响.

(2) 管束结构对流动阻力影响巨大,实验结果显示转角正方形排列比正三角形排列更有利于蒸汽横掠有降膜流动的管束,前者的流动阻力更小.

(3) 蒸汽在管束间的流动阻力可造成大型海水淡化装置水平管降膜蒸发器传热温差的明显降低,管束流动阻力对水平管降膜蒸发器性能的影响不可忽视.

(4) 由实验结果拟合得到了有降膜流动时蒸汽横掠管束的压降关系式,其误差小于 $\pm 15\%$.

参考文献:

[1] Ishihara K, Palen J W, Taborek J. Critical review of correlations for predicting two-phase flow pressure drop across tube banks [J]. *Heat Transfer Engineering*, 1980, **1**(3):23-32.

[2] Dowlati R, Kawaji M, Chan A M C. Pitch-to-diameter effect on two-phase flow across an in-line tube bundle [J]. *AIChE Journal*, 1990, **36**(5):765-772.

[3] Dowlati R, Chan A M C, Kawaji M. Hydrodynamics of two-phase flow across horizontal in-line and staggered rod bundles [J]. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 1992, **114**(3):450-456.

[4] Dowlati R, Chan A M C, Kawaji M. Two-phase crossflow and boiling heat transfer in horizontal tube bundles [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1996, **118**(1):124-131.

[5] Feenstra P A, Weaver D S, Judd R L. An improved void fraction model for two-phase cross-flow in horizontal tube bundles [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, **26**(11):1851-1873.

[6] Schrage D S, Hsu J T, Jensen M K. Two-phase pressure drop in vertical crossflow across a horizontal tube bundle [J]. *AIChE Journal*, 1988, **34**(1):107-115.

[7] Consolini L, Robinson D, Thome J R. Void fraction and two-phase pressure drops for evaporating flow over horizontal tube bundles [J]. **Heat Transfer Engineering**, 2006, **27**(3):5-21.

[8] Xu G P, Tou K W, Tso C P. Two-phase void fraction and pressure drop in horizontal crossflow across a tube bundle [J]. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, 1998, **120**(1):140-145.

[9] Ribatski G, Thome J R. Two-phase flow and heat transfer across horizontal tube bundles — a review [J]. **Heat Transfer Engineering**, 2007, **28**(6):508-524.

[10] 沈胜强,梁刚涛,龚路远,等. 水平管降膜蒸发器传热系数空间分布[J]. 化工学报, 2011, **62**(12): 3381-3385.

SHEN Sheng-qiang, LIANG Gang-tao, GONG Lu-yuan, *et al.* Distribution of heat transfer coefficient in horizontal-tube falling film evaporator [J]. **CIESC Journal**, 2011, **62**(12): 3381-3385. (in Chinese)

[11] 牟兴森,杨 勇,沈胜强. 海水淡化中降膜蒸发过程的实验研究[J]. 热科学与技术, 2011, **10**(4):291-296.

MU Xing-sen, YANG Yong, SHEN Sheng-qiang. Experimental research of horizontal tube falling film evaporation in desalination [J]. **Journal of Thermal Science and Technology**, 2011, **10**(4):291-296. (in Chinese)

Experimental investigation of steam flow resistance
across horizontal tube bundle with falling film at low pressure

LIU Hua, SHEN Sheng-qiang*, GONG Lu-yuan, LIU Rui

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

Abstract: Experiments are carried out to simulate the flow characteristics in a large horizontal falling film evaporator of desalination plant. The tube bundle arrangements are regular triangle and rotated square, and the relative tube bundle-pitch ratio is 1.3, a typical value for evaporators used in desalination. Experiments are conducted with saturated temperature ranging from 50 °C to 70 °C and spray density ranging from 0.02 kg · m⁻¹ · s⁻¹ to 0.08 kg · m⁻¹ · s⁻¹. The influences of these factors, such as tube arrangement, spray density and saturated temperature on steam flow resistance are analyzed. The experimental results show that the steam flow resistance across regular triangle tube bundle is bigger than that across rotated square tube bundle. Parameters Re_1 , Re_g , s_{lo}/D , s_{tr}/D are employed to fit the prediction formula. Based on the experimental data, a pressure drop correlation for steam flowing across horizontal tube bundle with falling film is proposed with a standard deviation of ±15%.

Key words: flow resistance; spray density; falling film flow; horizontal tube bundle