

DOI: 10.7652/xjtub201404016

水平管降膜蒸发器温度损失的计算与分析

刘华, 沈胜强, 龚路远, 牟兴森, 刘瑞

(大连理工大学辽宁省海水淡化重点实验室, 116024, 辽宁大连)

摘要: 为了研究降膜蒸发管束阻力造成的压降及其对传热的影响,以降膜蒸发器内广泛应用的正三角排列管束为物理模型,采用由实验数据拟合出来的压降系数,计算了压降对应的温度损失,分析了蒸汽产率、饱和温度、管列数和喷淋密度对蒸发温度损失的影响。结果表明:温度损失随喷淋密度、管列数和蒸汽产率的增加而升高,随饱和温度的升高而减小;在相同的蒸汽质量流量下,45℃蒸汽的温度损失是70℃时的6倍,而喷淋密度为0.08 kg/(m·s)时的温度损失约是0.02 kg/(m·s)时的2倍;大型降膜蒸发器内管束区内的温度损失随管列数的增加呈现抛物线型升高。为保证各效蒸发器的传热效率,提出每一效蒸发器温度损失都相等的等温度损失设计思想,其对低温多效蒸发器的设计具有指导意义。

关键词: 水平管降膜蒸发器;管束;温度损失;低温多效蒸馏

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0090-05

Evaporation Temperature Loss Evaluation in Horizontal Tube Falling Film Evaporator

LIU Hua, SHEN Shengqiang, GONG Luyuan, MU Xingsen, LIU Rui

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

Abstract: To investigate the vapor pressure drop due to the resistance force of tube bundle and the effect on heat transfer, triangular arrangement tube bundle widely applied to falling film evaporator is chosen as the physical model to evaluate the vapor temperature loss, and the fitting coefficient of pressure drop from the experimental data is provided. The effects of steam mass flux, saturated temperature, tube column number and water flow rate on vapor temperature loss are analyzed respectively. The results indicate that the temperature loss increases with the increase of water flow rate, steam mass flux and tube column number, while decreases with the increasing saturated temperature. With the equal steam mass flux, the temperature loss at 45℃ is six times of that at 70℃ and the temperature loss as water flow rate in 0.08 kg/(m·s) is almost double of that as water flow rate in 0.02 kg/(m·s); the temperature loss rises parabolically with the increasing tube column number in large falling film evaporator. A new design idea of equal temperature loss in each effect evaporator is proposed which facilitates ensuring the heat transfer efficiency.

Keywords: horizontal tube falling film evaporator; tube bundle; temperature loss; low-temperature multi-effect distillation

收稿日期: 2013-08-29。 作者简介: 刘华(1984—),男,博士生;沈胜强(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176017);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110041110032)。

网络出版时间: 2014-03-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140305.0839.001.html>

降膜蒸发器在食品冷冻、石油化工、海水淡化等领域有着广泛的应用^[1-2]。低温多效降膜蒸发技术因其在低温、小喷淋密度、小温差工况下具有高传热系数^[3],而在海水淡化领域被称为最有前景的热法技术^[4-5]。前人对降膜蒸发的流动和传热特性进行了深入研究^[6-7]。张颖等分析了布液方式对水平管间降膜流型的影响^[8]。何茂刚等运用激光诱导荧光法测量给出水平光管和 Turbo-CH 强化管的管外液膜厚度^[9]。沈胜强等考虑喷淋密度和管内冷凝的影响,给出了蒸发器内的总换热系数分布^[10]。尽管 Ishihara 等提出了两相流压降公式^[11],且其他学者在此基础上又添加了新的影响因子如管间距^[12]、体积分数^[13]等,但降膜蒸发器管束间气体和液体是呈近似垂直流动的,与传统两相流研究有着极大的不同。为确定大型降膜蒸发器中管束阻力,本实验室设计了水平降膜管束压降测试实验台,基于实验数据,沈胜强等给出了压降的关系式^[14]。在低温多效蒸发海水淡化装置的蒸发器内,海水最高饱和温度控制在 70℃ 以下,表观传热温差在蒸发器内仅 3℃ 左右,所以较小的温度损失都会对传热造成较大的影响。流动阻力造成的蒸汽压力降低必然引起饱和温度的降低,从而引起传热温度损失,但迄今为止,关于降膜蒸发管束阻力造成的压降及其对传热影响的细致研究还很罕见。

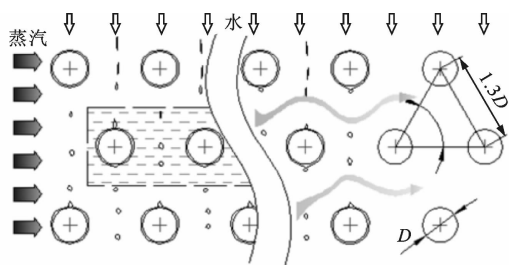
为深入分析温度损失对降膜蒸发传热效率的影响,本文在实验研究的基础上^[14],计算蒸汽流过管束的压降所造成的温度损失,研究结果对降膜蒸发器的优化设计及传热效率的提高具有重要意义。

1 计算模型

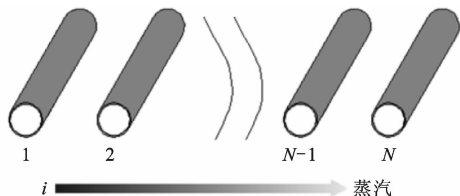
1.1 物理模型

实验和物理模型如图 1 所示。图 1a 为实验核心简化模型,实验用铝黄铜管正三角排列,每根长为 500 mm,管外径 D 为 25.4 mm,相对管间距为 $1.3D$ 。实验时,饱和水喷淋到最上排管表面,在重力作用下形成降膜流动,与此同时,一定量的饱和蒸汽横向冲刷有降膜流动的管束,模拟降膜蒸发器内气液两相的流动过程。实验测量蒸汽横掠有降膜流动管束的压降并根据实验数据拟合出压降系数的关系式。在实验范围内,随着喷淋密度及蒸汽流速的增加,包含了可能出现的液滴溅射、液柱偏移等影响。

图 1b 为物理模型,采用沿管列数变化方向的一维模型,计算蒸汽流经降膜管束的压降及其造成的温度损失。



(a) 实验简化模型



(b) 物理模型

图 1 实验和物理模型

1.2 数学模型

在大型水平管降膜蒸发器内,液体吸热产生的二次蒸汽由管束中心流向管束外侧,在这个蒸发、流动过程中,蒸汽流速逐渐变化,蒸汽流量和压降系数通过每一列管时都在变化,因此为准确计算管外二次蒸汽横掠管束的压降及对应的温度损失,采用叠加的方法计算。蒸汽流过单列管的压降计算式为

$$\Delta p_i = f_{HF} \rho V_i^2 \quad (1)$$

式中: Δp 为压降, Pa; ρ 为蒸汽密度, kg/m^3 ; V_i 为流速, m/s ; f_{HF} 是由实验数据拟合得出的压降系数,由下式计算

$$f_{HF} = 23.1 Re_g^{-1.1} Re_\Gamma^{0.926} + 4.07 Re_g^{-0.216} \quad (2)$$

式(2)的计算误差在 $\pm 10\%$ 以内。 Re_g 和 Re_Γ 分别为蒸汽雷诺数和降膜雷诺数

$$Re_g = \frac{V_i D}{\eta} \quad (3)$$

$$Re_\Gamma = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (4)$$

式中: Γ 为喷淋密度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; η 为饱和蒸汽运动黏度, m^2/s ; μ 为饱和水动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; 下标 $i=1, 2, \dots, N$, N 代表管列数。

为简化计算,假定每根管单位管长蒸汽产率是相同值,且作为一个变量 H 添加到计算中。第 i 列管的最小流通截面处的蒸汽流速用式(5)计算

$$V_i = iH/\rho A \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$, 表示给定的列数; H 表示单位管长在单位时间内产生的蒸汽质量, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; A 为计算流通面积, m^2 。

计算沿管列方向的第 i 列管处的压力值为

$$p_i = p_{i-1} - \Delta p_i \quad (6)$$

根据第 i 列管处的压力值 p_i 可以求得该处的饱和温度 T_i , 进而求得压降造成的温度损失 ΔT 。

1.3 流程说明

基于上述热力过程及数学公式, 设计水平管降膜蒸发器内温度损失的计算程序, 对不同工况下蒸发器内部沿管列方向的压降及对应的温度损失进行模拟计算, 具体计算流程见图 2。先按顺序计算每一列管的压降, 进而计算该管列处的压强与饱和温度, 最后计算整个管束的压降及温度损失。为保证计算的正常进行, 作如下说明:

(1) 每次计算时输入管列数 N , 饱和温度 T , 单位管长蒸汽产率 H 及喷淋密度 Γ ;

(2) 计算中涉及的水和水蒸气的密度、黏度等物性参数均调用水和水蒸气热力性质公式 IAPWS-IF97 国际标准。

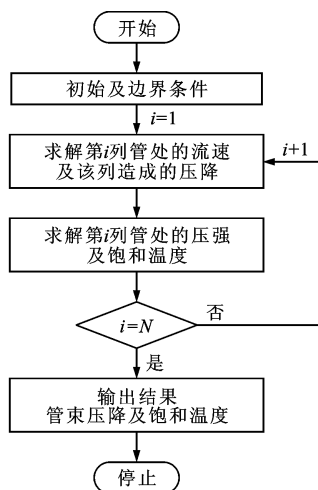


图2 计算流程图

1.4 计算验证

为验证计算的可信度, 对管列数 N 为 46 的正三角排列水平管束进行模拟计算, 并将计算结果与实际测量值进行比较, 如图 3 所示。图 3 表明, 在设定与实验相同的入口蒸汽流速、喷淋密度等参数下, 计算值与实验值误差小于 4.5%, 验证了计算程序的可信度。

2 结果与分析

2.1 温度损失分析

模拟计算单位管长蒸汽产率 $H=0.0003 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时, 不同饱和温度下的温度损失如图 4 所示。由图 4 可知, 随着饱和温度的升高, 温度损失降低。同样蒸发量下, 由压降造成的温度损失在饱和温度

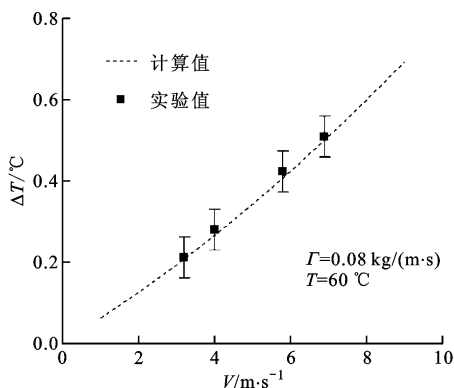


图3 实验值和计算结果对比图

为 45°C 时约为 70°C 下的 6 倍。按照蒸汽性质, 饱和温度越低, 单位压力变化造成的饱和温降越大; 同时蒸汽质量流量一定时, 饱和温度越低, 蒸汽流速越大, 压降越大, 相应温度损失越大。图 4 结果还表明, 喷淋密度越大, 温度损失越大, 喷淋密度的增加对温度损失的作用明显。蒸汽质量一定时, 压降造成的温度损失随着饱和温度的升高而减小, 随着喷淋密度的增加而升高。

蒸汽蒸发温度越高, 相同压降造成的温度损失越小。为减小温度损失, 仅从饱和温度的因素考虑, 应多在温度较高的工况下进行。低温多效蒸发海水淡化装置中的温度范围一般为 70°C 至 40°C , 为合理使用热源, 在多效蒸发装置设计时, 应考虑高温段和低温段温度损失的差异, 在表观传热温差分配、蒸发器传热面积分布、蒸发量分布等方面进行优化。

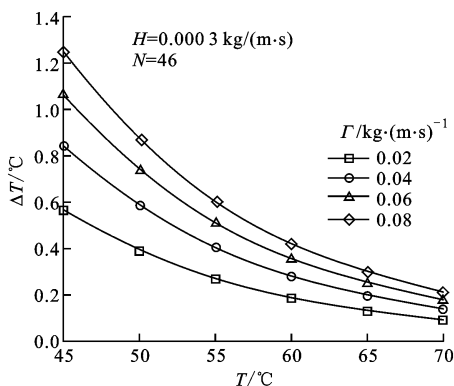


图4 饱和温度对温度损失的影响

饱和温度为 60°C 、 $N=46$ 时不同喷淋密度下的温度损失如图 5 所示。由图 5 可知, 喷淋密度从 $0.02 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 增至 $0.08 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时, 温度损失几乎都增加至原来的 2 倍。这是因为液体在管外的降膜流动减小了蒸汽的实际流通面积, 随着喷淋密度的增加, 管间降膜流动形态由滴状流逐渐变成柱状流^[15], 进一步减小了蒸汽的流通面积。此外, 液

滴及液柱的存在会额外增加蒸汽和液体的接触面积,也导致了阻力的增加。总之,喷淋密度的增加,加大了压降,从而导致温度损失的扩大。

比较图 5 中不同蒸汽产率下的温度损失和喷淋密度的曲线可知,每根管子蒸汽产率越大,温度损失越大,即热负荷对流动阻力的影响非常明显。

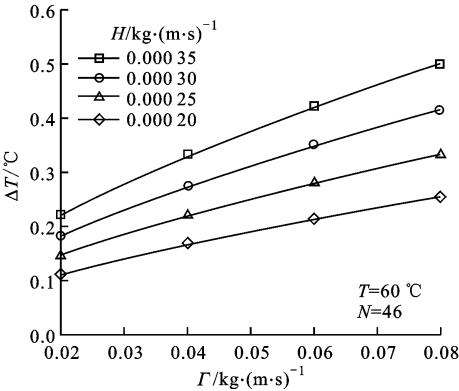


图 5 喷淋密度对温度损失的影响

当工况为 $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $H=0.000\text{ }3\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,温度损失与管列数的关系如图 6 所示。由图 6 可知,随着管列数的增加,温度损失呈现抛物线型升高,因而管束每增加一列比其前一列管束对温度损失的影响更加明显。随着管列数的增加,总的蒸汽量呈线性加大,压降升高,其造成的温度损失也会升高。

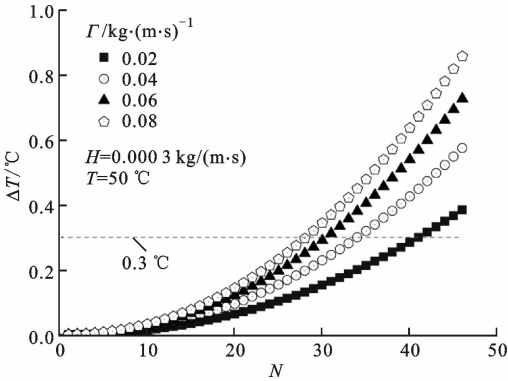


图 6 管列数对温度损失的影响

2.2 最大管列数分析

在多效蒸发海水淡化装置中,每一效蒸发器管内外传热温差仅为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,温度损失为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时占整个传热温差的比率约为 10% ,其影响也是非常可观。如图 6 所示,给定温度损失 ($0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$),可得最大管列数 N_{max} ,可知最大管列数随喷淋密度的增加而减小。

计算最大管列数对蒸发器设计有重要的参考意

义。本文的最大管列数是在正三角形结构下,选定温度损失为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的计算值。

图 7 为不同饱和温度下最大管列数 N_{max} 与喷淋密度的关系曲线,图 8 为不同饱和温度下最大管列数和蒸汽产率之间的关系。参考前文所述温度损失与喷淋密度、蒸发温度和蒸汽产率等参数的关系,可以理解最大管列数的变化关系。

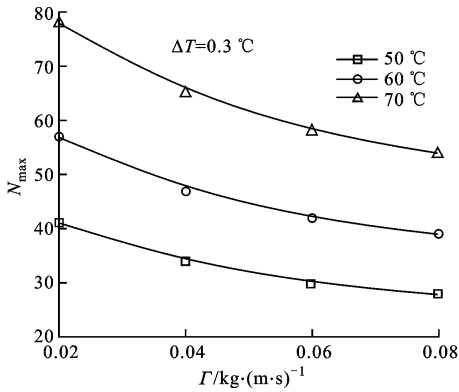


图 7 喷淋密度对最大管列数的影响

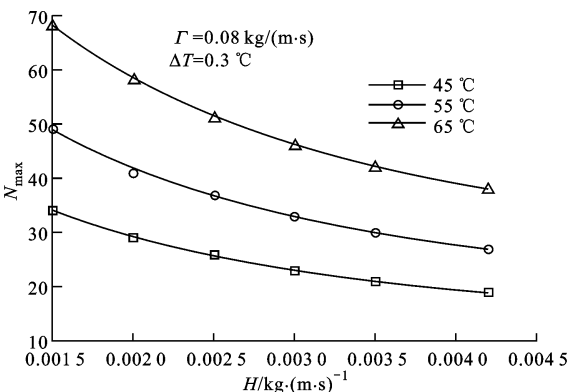


图 8 蒸汽产率对最大管列数的影响

2.3 蒸发器设计分析

水平管降膜蒸发器的优势在于它的小温差传热和高传热系数。然而,由本文计算可知,压降造成的温度损失相当可观。温度损失使蒸发器管内外实际传热温差降低,影响传热效果。在多效蒸发系统计算中,对于各效蒸发器参数的确定可采用多种前提条件,如等温差、等面积、最小面积等。低温多效蒸发海水淡化装置中的蒸发器中传热温差很小,较小的温差损失对传热过程的影响很大,若某一效的蒸发器温差损失过大,其蒸发量将大大降低,其性能还将影响系统的整体性能。采用等温度损失法,有利于控制各效蒸发器的温度损失。因此,本文提出采用等温度损失法计算系统设备参数的思想。

3 结 论

通过计算水平管降膜蒸发器中蒸汽横掠降膜管束的压降所对应的温度损失,分析饱和温度、喷淋密度及单位管长蒸汽产率等因素对温度损失的影响,得到如下结论。

(1)饱和温度越低,温度损失越大。同样的蒸汽质量流量,45℃蒸汽的温度损失比70℃的温度损失增加了5倍。

(2)喷淋密度对温度损失有明显影响。同样的蒸汽质量流量,喷淋密度0.08 kg/(m·s)时的温度损失约是0.02 kg/(m·s)时的2倍。

(3)大型降膜蒸发器内管束区内的温度损失随管列数的增加呈现抛物线型升高。

(4)为保证各效蒸发器具有相同的传热效率,提出关于多效蒸发海水淡化装置的等温度损失设计思想。

参考文献:

- [1] THOME J R. Falling film evaporation: state-of-the-art review of recent work [J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 1999, 6(2): 263-278.
- [2] RIBATSKI G, JACOBI A M. Falling-film evaporation on horizontal tubes-a critical review [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2005, 28(5): 635-653.
- [3] YANG L P, SHEN S Q. Experimental study of falling film evaporation heat transfer outside horizontal tubes [J]. *Desalination*, 2008, 220(1/2/3): 654-660.
- [4] ARMBRUSTER R, MITROVIC J. Evaporative cooling of a falling water film on horizontal tubes [J]. *Experiment Thermal and Fluid Science*, 1998, 18(3): 183-194.
- [5] REDDY K V, GHAFFOR N. Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies [J]. *Desalination*, 2007, 205(1/2/3): 340-353.
- [6] 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.
- [7] 侯昊, 毕勤成, 张晓兰. 海水淡化系统中水平管降膜蒸发器流动与传热特性数值研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(20): 81-87.
HOU Hao, BI Qin Cheng, ZHANG Xiaolan. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of horizontal-tube falling-film evaporators in seawater desalination system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011,

31(20): 81-87.

- [8] 何茂刚, 范华亮, 王小飞, 等. 水平管外降膜流动的膜厚测量和数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 1-5.
HE Maogang, FAN Hualiang, WANG xiaofei, et al. Experimental study and numerical simulation on falling film thickness outside a horizontal tube [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(9): 1-5.
- [9] 张颖, 吕凯, 王小飞, 等. 布液方式对水平蒸发管管间流型转换的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(1): 19-23.
ZHANG Ying, LÜ Kai, WANG Xiaofei, et al. Effects of liquid distribution method on falling film mode transitions between horizontal tubes [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(1): 19-23.
- [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(12): 3381-3385.
SHEN Shengqiang, LIANG Gaotao, GONG Luyuan, et al. Falling film evaporation heat transfer of water/salt mixtures from roll-worked enhanced tubes and tube bundle [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2011(12): 3381-3385.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] XU G P, TOU K W, TSO C P. Two-phase void fraction and pressure drop in horizontal crossflow across a tube bundle [J]. *Transactions of the ASME*, 1998, 120(1): 140-145.
- [14] 沈胜强, 刘华, 冯寅, 等. 真空条件下蒸汽横掠水平降膜管束的流动阻力 [J]. *化工学报*, 2013, 64(3): 886-890.
SHEN Shengqiang, LIU Hua, FENG Yin, et al. Steam flow resistance across horizontal tube bundle under vacuum condition [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2013, 64(3): 886-890.
- [15] HU X, JACOBI A M. The intertube falling film: Part 1 Flow characteristics, mode transitions, and hysteresis [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1996, 118: 616-625.

(编辑 刘杨 苗凌)