

场协同原理强化管外降膜吸收传热特性实验研究

薄守石, 马学虎*, 陈嘉宾, 白涛

(大连理工大学 化学工程研究所, 辽宁 大连 116012)

摘要: 对基于场协同原理设计的两种强化传热管型进行了 LiBr 降膜吸收水蒸气过程的传热实验研究, 并与光滑铜管作比较, 考查该传热管型在吸收过程中的强化作用. 实验测量参数包括: 溶液进出口温度、浓度、流量, 冷却水进出口温度、流量等. 实验结果表明, 两种强化传热管型在低雷诺数时对 LiBr 降膜吸收传热的强化比分别为 20% 和 50%, 而且随着雷诺数的增大而增大. 利用场协同理论和降液膜流动的波动特性分析了强化降膜吸收过程传热特性的物理机制, 发现速度矢量与温度梯度的夹角及降液膜厚度形成的阻力对对流换热有一定影响.

关键词: 场协同原理; 降膜吸收; 传热传质; 强化管

中图分类号: TB616 **文献标志码:** A

0 引言

第二类吸收式热泵具有可直接利用热源、运行可靠、无“三废”排放等优点而得到日益广泛的应用. 吸收器性能的优劣是影响热泵系统性能的关键^[1].

在热泵技术中经常采用立管式换热器, 作为主要部件之一的吸收器还多采用 LiBr 溶液竖直接管外降膜吸收这一热-质传递过程. 因此, 采用各种强化手段强化吸收器传热传质成为目前国内外研究的热点之一. 文献[2~5]中采用各种高效换热管, 强化热-质传递过程, 与光管换热性能相比, 都有一定的强化效果. 过增元^[6]从对流换热的能量方程出发, 重新审视对流换热物理机制. 认为对流换热可以比拟为有内热源的导热问题, 热源的强度不仅取决于流体的速度和物性, 而且取决于流速与热流矢量的协同. 提出可以通过改变流场与温度场的协同关系来达到控制对流换热的强弱.

本文实验研究两种基于场协同原理设计的强化管型的 LiBr 降膜吸收水蒸气的传热传质特性, 并与光滑铜管的性能进行比较以分析强化传热的物理机制.

1 实验流程与实验方法

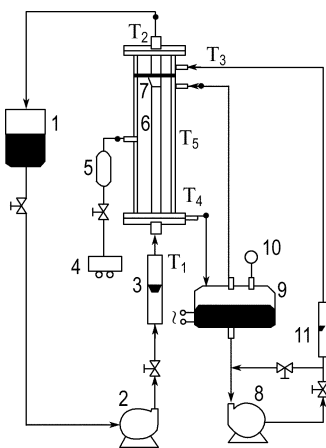
实验装置如图 1 所示. 由于热泵系统运行过程的实际需要, 另外, 为了排除不凝性气体对传热传质过程的影响, 实验前必须用真空泵 4 将系统抽至一定真空度(96 kPa 左右). 实验时, 浓 LiBr 溶液在溶液罐 9 内被加热至沸腾, 产生的水蒸气沿输送管路进入换热套管测试空间. 热的浓 LiBr 溶液由位于溶液罐下方的屏蔽泵 8 通过输送管路送至换热套管顶部的积液空间, 经由螺旋槽布膜器 7 在重力牵引下沿位于换热套管 6 的测试管道外壁呈膜状流下. 降膜流下的浓 LiBr 溶液吸收已进入换热套管测试空间内的水蒸气, 释放出吸收热, 热量由测试管道内逆流流动的循环冷却水带出, 稀释后的 LiBr 溶液流回锅炉内重新混合并循环流动.

T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 为 5 个测温点, 采用标准铂电阻分别测取冷却水进、出口温度, LiBr 溶液进、出口温度和换热套管测试空间温度, 采用 Agilent 公司生产的 34970A 数据采集系统进行数据采集. T_3 位置和 T_4 位置分别设计了 LiBr 浓溶液和稀溶液的取样口, 取出的溶液样品用已知浓度的标准 AgNO_3 溶液滴定, 得到 LiBr 溶液进出口的质量分数.

收稿日期: 2006-10-23; 修回日期: 2007-09-09.

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20032130); 中石化研究开发资助项目(X503009).

作者简介: 薄守石(1980-), 男, 博士生; 马学虎*(1965-), 男, 教授, 博士生导师.



1 水罐；2 水泵；3 管内冷却水流量计；4 真空泵；
5 缓冲泵；6 换热套管；7 螺旋槽布膜器；8 屏蔽泵；
9 溶液罐；10 数字真空表；11 LiBr 溶液流量计

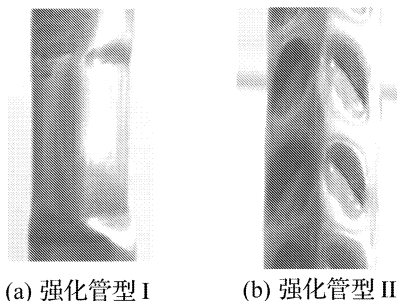
图1 实验装置图

Fig. 1 Flow diagram of the experimental apparatus

LiBr 溶液流量计 11 和管内冷却水流量计 3 分别用来改变 LiBr 溶液喷淋密度和管内冷却水的雷诺数。数字真空表 10 用来测量换热套管测试空间压力。

实验时，首先确定测试管内冷却水流量不变，改变 LiBr 溶液的流量，调节系统稳定以得到一定范围内 LiBr 溶液喷淋密度与垂直管外降膜吸收传热传质状况的关系。然后，确定 LiBr 溶液流量不变，改变测试管内冷却水的流量，调节系统稳定以得到一定范围内测试管内冷却水雷诺数与管外降膜吸收的传热传质状况的关系。

将换热套管内的测试管依次更换为尺寸为 $\phi 19 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ 的光滑铜管、 $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ 的强化管型 I、 $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ 的强化管型 II，实验均在隔日重复进行 1~2 次，检验实验数据的重复性。两种强化管的外形如图 2 所示。



(a) 强化管型 I (b) 强化管型 II

图2 两种强化管型外观图

Fig. 2 Geometry of two enhanced tubes

图 2(a) 为交叉缩放椭圆强化换热管，是由多个轴向互相交叉为 90° 的椭圆形截面管段组成，且

相邻管段之间存在过渡段。管两端为圆形截面^[7]。

图 2(b) 为不连续双斜向内肋强化换热管。管壁存在不连续的、与轴向有一定夹角并有两个方向倾斜的棱状凸起物——双斜内肋^[8]。

2 实验结果与讨论

图 3~5 给出了光滑铜管、强化管型 I、强化管型 II 传热系数 (K) 和喷淋密度 (Γ)、管内水雷诺数的关系。从图 3 可看出，在管内水雷诺数一定的条件下，传热系数随着喷淋密度的增加而增加；在相同的喷淋密度下，管内水雷诺数越大，传热系数越高。

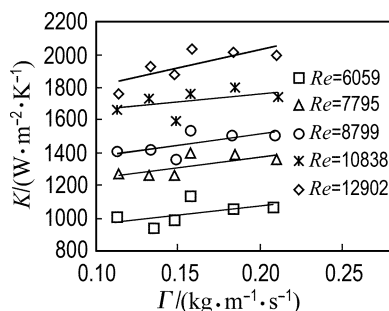


图3 传热系数与喷淋密度的关系(光滑铜管)

Fig. 3 Variation of K with Γ (smooth copper tube)

图 4 表明强化管型 I 在相同的雷诺数条件下，传热系数与喷淋密度的关系与光滑铜管相反。相同的管内水雷诺数，传热系数随喷淋密度的增加而降低。另外，在相同的喷淋密度下，传热系数随管内水雷诺数的增加而增加。

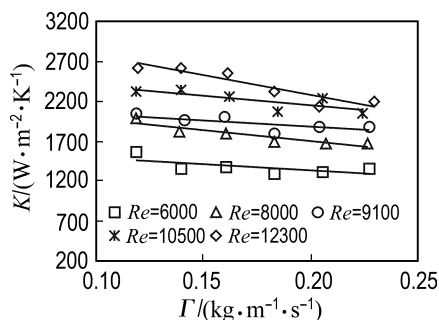


图4 传热系数与喷淋密度的关系(强化管型 I)

Fig. 4 Variation of K with Γ (enhanced tube I)

图 5 表明强化管型 II 在低雷诺数 ($Re = 6200$) 时，传热系数随喷淋密度的增加而降低，但雷诺数较大时，传热系数随喷淋密度有平缓的上升趋势。

图 6 给出了 3 种不同管型在相同喷淋密度下，传热系数与管内水雷诺数的关系。从图中可以看出，随着管内水雷诺数的增加，3 种不同管型

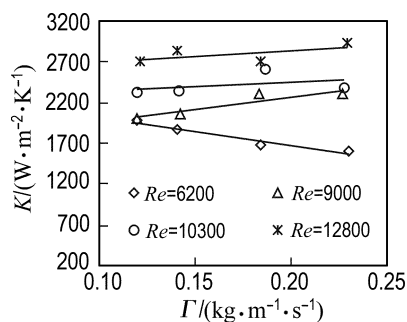
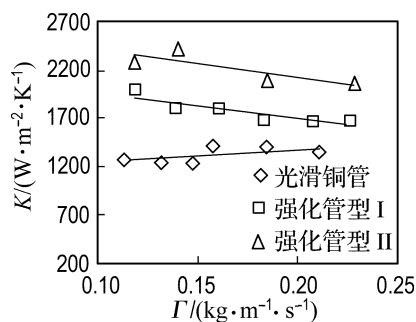


图5 传热系数与喷淋密度的关系(强化管型 II)

Fig. 5 Variation of K with Γ (enhanced tube II)图7 传热系数与喷淋密度的关系 ($Re=8000$)Fig. 7 Comparison of K vs. Γ for three tubes
($Re=8000$)

传热系数有明显的上升趋势. 其中管型 II、管型 I 的传热系数均高于光滑铜管, 管型 II 最高, 在低雷诺数时传热系数较光滑铜管可提高 50%, 管型 I 次之, 在低雷诺数时, 可提高 20%. 这是因为在相同的喷淋密度下, 随着管内冷却水流量的增大, 管外 LiBr 降膜吸收水蒸气放出的热量被及时带走, 降低了壁面温度和液膜表面温度, 有利于传热质过程的进行. 两种强化传热管型, 由于在光滑铜管表面进行了加工处理, 管外管内的形状都发生了变化, 内表面的突起更加大了冷却水的扰动(见图 2). 文献[9]指出, 椭圆管与椭圆管连接的过渡部分, 流体的流通面积发生变化, 对管内冷却水的对流换热起着至关重要的作用.

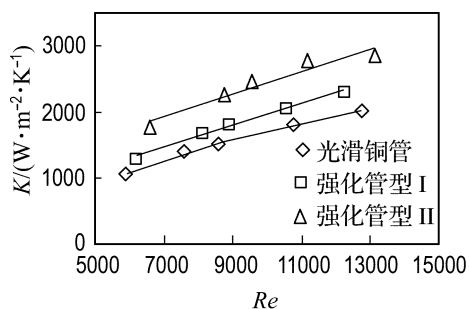
图6 传热系数与管内水雷诺数的关系
($\Gamma=0.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 6 Comparison of K vs. Re of water in three tubes
($\Gamma=0.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 7 给出了在一定的管内水雷诺数条件下, 3 种管型传热系数与喷淋密度的关系. 从图中可以看出, 随着喷淋密度的增加, 光滑铜管传热系数有平缓的上升趋势, 而两种强化管型则为下降趋势. 但总体看, 强化管型传热系数较光滑铜管大, 有一定的强化效果. 管型 II 最高, 管型 I 次之.

场协同原理^[6]认为, 对流换热的性能不仅取决于流体的速度和物性以及流体与固壁的温差, 而且还取决于流体速度场与流体热流场间协同的程度. 在相同的速度和温度边界条件下, 它们的

协同程度越好, 则换热强度就愈高. 协同体现在 3 方面: (1) 速度矢量与温度梯度矢量的夹角余弦值尽可能大; (2) 流体速度剖面与温度剖面尽可能均匀; (3) 尽可能使 3 个标量场中的大值与大值搭配.

文献[7]认为, 控制对流换热的强度, 不仅可以通过改变流速、温差, 或者改变 Re 数和 Pr 数, 而且还有一个非常重要的因素, 即速度矢量与温度梯度, 或者说速度矢量与热流矢量的夹角 β . 当它们的夹角 β 小于 90° 时, β 越小对流换热系数越大. 当 $\beta=0^\circ$ 时, 可以达到对流换热的最大值. 设想如果在管外降膜吸收的整个对流换热区域内, 使液膜流动的速度方向与温度梯度方向处处相同, 即 $\beta=0^\circ$, 则 LiBr 降膜吸收水蒸气的传热系数大大提高, 吸收器乃至第二类吸收式热泵的性能将会得到改善.

对于光滑竖直圆管外液体降膜对流传热, 降液膜速度可以分解为竖直向下分量和垂直壁面分量, 假设为一维传热, 即沿径向传热, 温度梯度方向始终垂直于壁面. 竖直向下速度分量与温度梯度始终垂直, 所以流体流动对热量传递并无任何贡献. 而真正对热量传递起作用的是垂直于壁面的速度分量. 在液膜下降过程中, 重力、黏性力、表面张力等共同作用, 使液膜不稳定性增加, 液膜由平滑转变为波动, 并产生与温度梯度成一定夹角的速度. 根据实验结果, 两种强化管型的传热性能都优于光滑管, 该速度对强化传热有重要作用. 相比之下, 强化管型 II 的强化效果好于强化管型 I, 分析原因可能与表面几何形状改变的频率有关. 从管子的几何形状来看(见图 2), 管型 II 的不连续双斜向肋出现的频率多于管型 I 交叉椭圆改变的频率, 结果在管外形成的场协同点增多, 更有利于强化传热.

文献中普遍提到的降液膜雷诺数为表征降液膜波动程度的物理量. 降液膜雷诺数越大, 说明波动越大, 垂直于壁面的速度分量越大, 对传热越

有利。

本实验中的两种强化管型在铜管内外表面都进行了表面几何形状的改变,增大管内冷却水扰动,破坏流动边界层的同时,也改变了管外降液膜的流动状态与方向,使速度矢量发生变化,速度矢量与温度梯度两个场能更好协同,从而强化了传热传质过程,提高了传热系数。

同时还应该注意到液膜厚度对传热系数的影响。随着喷淋密度的增加,测试管外液膜厚度有所增厚,从而增加了传热阻力,导致强化管型的传热系数随喷淋密度呈下降趋势。

3 结 论

(1)与光滑铜管相比,管型 II 在低雷诺数时传热系数可提高 50%,管型 I 可提高 20%,但随着雷诺数的增加,管型 II 和管型 I 提高幅度均减小。

(2)通过改变速度矢量与温度梯度的夹角 β ,可使降膜吸收过程的对流换热得到强化,场协同理论同样适用于降膜吸收过程。

(3)降液膜厚度形成的阻力对对流换热也起着重要的作用。

参考文献:

[1] MA X H, CHEN J B, LI S P, *et al.* Application of

absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant [J]. **Appl Therm Eng**, 2003, **23**(7):797-806

[2] 尹 铭,陈嘉宾,陈 沛,等. 竖直管外降膜吸收传热传质过程强化的研究[J]. 高校化学工程学报, 2002, **16**(6):602-608

[3] 廖运文,杨景昌,党洁修. 热管式降膜吸收器波动降膜传热传质过程研究[J]. 四川联合大学学报, 1999, **3**(6):63-68

[4] CONLISK A T. Prediction of the performance of a splined-tube absorber — Part 1: governing equations and dimensional analysis [J]. **ASHRAE Trans**, 1996, **102**(1): 116-127

[5] CONLISK A T. A model for the prediction of the performance of a splined-tube absorber — Part 2: model and results [J]. **ASHRAE Trans**, 1996, **102**(1): 128-137

[6] 过增元. 对流换热的物理机制及其控制:速度场与热流场的协同[J]. 科学通报, 2000, **45**(9): 2118-2122

[7] 过增元,黄素逸. 场协同原理与强化传热技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004

[8] 孟继安,过增元,胡槐林,等. 不连续双斜内肋强化换热管:中国,03125132.3[P]. 2003-10-29

[9] CHEN W L, GUO Z Y, CHEN C K. A numerical study on the flow over a novel tube for heat-transfer enhancement with a linear Eddy-viscosity model [J]. **Int J Heat Mass Trans**, 2004, **47**:3431-3439

Experimental investigation of falling film absorption heat transfer performance for field synergy principle enhanced tubes

BO Shou-shi, MA Xue-hu*, CHEN Jia-bin, BAI Tao

(Inst. of Chem. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116012, China)

Abstract: The falling film absorption heat transfer of water-lithium bromide on the outer surface of vertical tubes is experimentally studied. The two enhanced heat transfer tubes are designed in terms of the field synergy principle. Their absorption heat transfer performance is compared with that of the smooth copper tube as well to investigate the enhancement effect in absorption process. The control variables for the experimental study were solution mass flow rate, solution concentration and temperature, cooling water temperature and mass flow rate. The experimental results indicate that two heat-enhanced tubes can considerably improve the LiBr/H₂O falling film absorption performance. The heat transfer enhancement ratios for the two tubes are 20% and 50% respectively at lower falling film Reynolds number, and increase with the Reynolds number of cooling water. The inherent physical mechanism of heat transfer enhancement is analyzed with respect to the field synergy principle and the wavy nature of the falling film. It is discovered that both the intersection angle between velocity and temperature gradient and the heat resistance caused by film thickness have an effect on convective heat transfer.

Key words: field synergy principle; falling film absorption; heat and mass transfer; enhanced tube