

文章编号:1671-6833(2012)03-0099-04

# 热管式吸收器传热传质的实验研究

方书起，郭俊，王睿宇

(郑州大学 化工与能源学院,河南 郑州 450001)

**摘 要:** 在升温型吸收式热泵内对热管式吸收器的传热传质性能进行了实验研究, 对不同规格的表面横纹槽热管和光管热管做了对比实验. 发现采用热管直接导出吸收热具有较好的效果, 并且表面带有横纹沟槽热管的传热膜系数约为光滑管的 2~3 倍, 传质系数约为光滑管的 2 倍, 为吸收式热泵吸收器的高效紧凑化研究提供了依据.

**关键词:** 吸收式热泵;热管;横纹槽管;降膜吸收

中图分类号: TQ051.8

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.03.025

## 0 引言

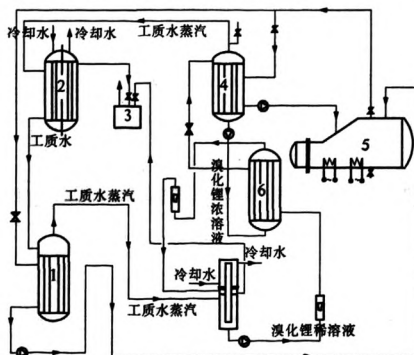
在能源危机日益严重的当今社会,升温型吸收式热泵因其具有直接利用低品位热源回收热量,且无“三废排放”,运行可靠,能耗低等诸多优点得到了非常广泛的关注.然而由于热泵系统中的主要部件吸收器存在传热传质效果不佳的问题,导致系统结构庞大,性能系数较低,严重阻碍了升温型吸收式热泵在工业中的应用.吸收式热泵系统中的关键设备通常采用立式换热器,其中吸收器还多采用竖直管外降膜吸收的方式.浓溶液通过液体分布器在管外形成液膜,在下降的过程中吸收来自蒸发器的工质水蒸气并放出热量,直至达到平衡状态.吸收器中的吸收过程是一个传热传质相互耦合的过程.由于溴化锂( $\text{LiBr}$ )溶液吸收水蒸气是一个强放热过程,过高的温度会严重阻碍吸收过程的进行,如何快速地导出吸收热,促进吸收是国内外研究的重点,其中采用各种强化手段来强化热质传递过程的研究较为突出<sup>[1-4]</sup>.

热管是一种高效传热元件,不仅价格低廉而且具有良好的导热能力、极高的等温性和热流密度可调性,所以被广泛应用于众多工业领域。杨景昌<sup>[5]</sup>等对热管应用于热泵吸收器进行了数值模拟。而具有横纹沟槽的横纹槽管在降膜过程中使降膜层流底层更易剥离,减薄了边界层厚度,增加了流体边界层的扰动,有利于传热传质的进行<sup>[6]</sup>。本实验采用竖直热虹吸管进行 LiBr 溶液降

膜吸收水蒸气的实验,并对表面光滑和带横纹沟槽的热管传热传质性能做了对比,考察热管在吸收式热泵吸收器中应用的可能性,并对不同规格的横纹槽管的强化传热传质的情况进行了研究.实验结果表明,热管能够迅速的导出吸收过程产生的热量,有效地促进了传质过程的进行.而横纹槽热管也对降膜吸收起到了一定的强化作用,并对横纹管参数的优化设计提供了一定的参考价值.

## 1 实验流程及方法

考虑到吸收过程的连续性,实验选择在完整的吸收式热泵系统中进行,实验流程如图1所示。



1—蒸发器；2—冷凝器；3—真空泵；4—发生器；5—加热釜；6—溶液热交换器；7—吸收器

图1 实验流程图

**Fig. 1** Flow diagram of experimental apparatus

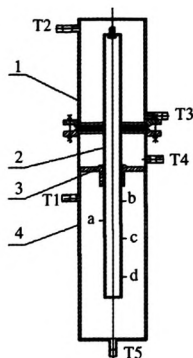
收稿日期:2011-11-13;修订日期:2012-02-05

**基金项目:**国家科技支撑计划资助项目(2007BAD66B04)

**作者简介:**方书起(1964-),男,山东冠县人,郑州大学教授,硕士,主要研究方向为过程装备的强化,E-mail:fangsq

@ zzu. edu. cn.

图2是热管式吸收器示意图.系统采用铜-康铜热电偶测定温度,吸收器中有 $T_1 \sim T_5$  5个温度数据采集点,其中 $T_1$ 为制冷剂水蒸气温度; $T_2$ 和 $T_3$ 分别为冷却水进、出口温度, $T_4$ 和 $T_5$ 分别为LiBr溶液进、出口温度.在 $T_4$ 和 $T_5$ 处有LiBr溶液取样口,取样后的LiBr溶液通过比重法测定其质量分数.



1—上套管;2—热虹吸管;3—液膜分布器;4—下套管

图2 热管式吸收器

Fig. 2 Heat pipe absorber

为得到降膜传热传质情况随LiBr溶液喷淋密度的变化关系,实验中首先恒定热管冷凝段循环水流量,再调节LiBr溶液流量,最后在不同真空度下保持热泵系统稳定.实验所用热管由外径20 mm、壁厚2 mm、长1 500 mm的紫铜管加工而成,热管的蒸发段长度和冷凝段长度分别为900 mm和600 mm.实验时重复对比测试6根不同尺寸规格的横纹槽热管和光管.横纹管参数见表1所示.

表1 横纹槽管尺寸规格

Tab.1 Geometrical-parameters of grooved tube

编号	1	2	3	4	5
$P/\text{mm}$	9	6	6	6	3
$e/\text{mm}$	0.75	0.75	0.5	0.15	0.75

## 2 数据处理

### 2.1 传热膜系数

将热泵系统调整至稳定状态,此时认定水蒸气所释放的热量被LiBr溶液吸收并且全部由热管蒸发段传至冷凝段,最后全部被冷却水带走.所以吸收溶液释放的热量 $Q_a$ 为

$$Q_a = q_{s,i} \times h_{s,i} - q_{s,o} \times h_{s,o} + q_{vap} \times h_{vap} \quad (1)$$

冷却水带走的热量 $Q_c$ 为

$$Q_c = q_c \cdot C_{p,c} (t_{c,o}, t_{c,i}) \quad (2)$$

当 $|\frac{Q_a - Q_c}{Q_a}| \leq 10\%$ 时认为系统处于稳定状态,所得数据有效.令:

$$Q_c = \alpha \cdot A \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中: $\Delta t$ 为热管表面温度与液膜表面吸收温度之差,确定液膜传热温差和冷却水带走的热量后可求得传热膜系数 $\alpha$ .

### 2.2 传质系数

根据传质理论可知,传质系数为传质量除以传质面积和传质推动力,在本系统中压差为传质推动力,所以

$$K_m = \frac{\Delta q_m}{\Delta p \cdot A_m} \quad (4)$$

式中: $\Delta q_m$ 为传质量,本实验中转质量为出口溶液质量流量与进口溶液质量流量之差,即

$$\Delta q_m = q_s \cdot (\xi_1 - \xi_2) / \xi_2 \quad (5)$$

式中: $\Delta p$ 为传质推动力,传质推动力为吸收器中溶液平衡分压 $p_s$ 和气相水蒸气平均压力 $p_g$ 之差.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 喷淋密度对传热传质的影响

在对光管的实验中发现,热泵系统吸收器压力为-0.07 MPa时,吸收传质系数和管外降膜换热系数都会因管外LiBr溶液喷淋密度的增大而逐渐降低,如图3和4所示.随喷淋密度的增加,换热系数降低,这是因为管外布膜的液膜厚度增大引起传热阻力增大.同时在整个降膜过程中热量传递和质量传递是相互作用的,因为吸收过程中会释放热量,释放的热量会提高温度,而提升温度会提升传质阻力.液膜厚度增加导致换热系数降低,此时将无法及时传递出LiBr溶液吸收的水蒸气中的热量,热量将提升液膜的温度,最终降低传质的推动力,传质系数也随之降低.

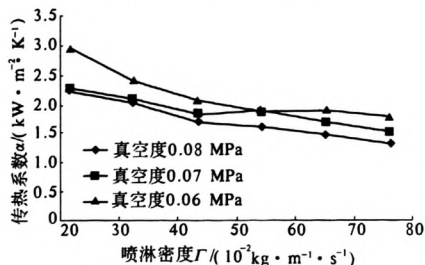


图3 管外传热膜系数与喷淋密度的关系

Fig. 3 The relationship between membrane heat transfer coefficient and spraying density

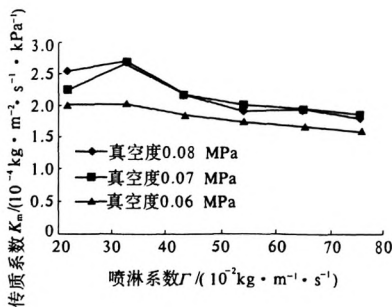


图4 传质系数与喷淋密度的关系

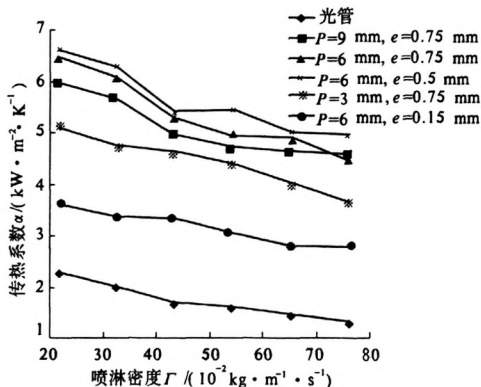
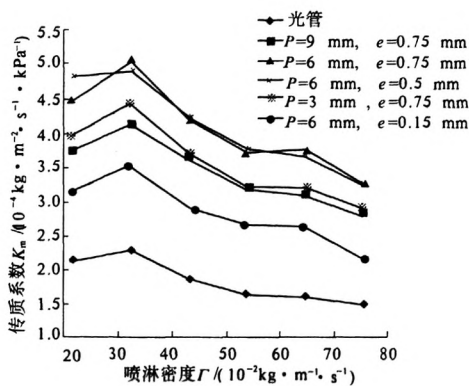
Fig. 4 The relationship between mass transfer coefficient and spraying density

### 3.2 吸收压力对传热传质的影响

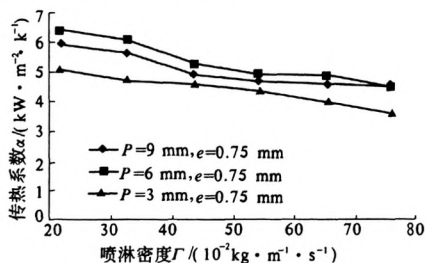
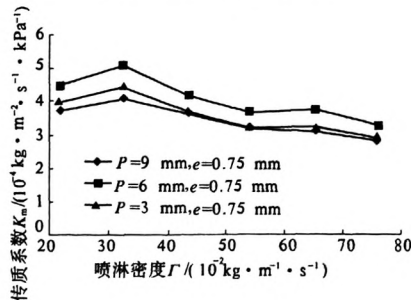
理想状况下吸收式热泵系统的吸收器和蒸发器真空度是一致的.如图3,4所示.在相同的喷淋密度但不同的真空度下,吸收传质系数和管外传热膜系数都发生改变.当真空度增大的情况下,管外传热膜系数逐渐降低,同时传质系数没有明显增大.这是因为系统真空度增大时,蒸发器真空度也增大,其中的水蒸气的蒸发温度随之降低;而吸收过程的LiBr溶液温度降低、黏度变大,传热阻力随之变大,导致传热膜系数降低.液膜的温度降低使温差变大促进传质过程,导致传质系数有不明显的上升.

### 3.3 横纹管参数对传热传质的影响

表面有横纹沟槽的强化管与光管相比,强化管的传质系数和管外传热膜系数都有所提高,如图5,6所示.强化管外的沟槽引起降膜过程中液膜的扰动,从而加速了溶液的更新速度,同时接触面积增大,液膜厚度相应变薄.所以强化管有利于传质、传热过程的进行.强化管外不同的节距和沟槽深度导致各强化管的性能不同.

图5 横纹槽管与光管传热膜系数随喷淋密度变化的比较  
Fig. 5 Membrane heat transfer coefficient and spraying density of smooth tube and grooved tube图6 横纹槽管与光管传质系数随喷淋密度变化的比较  
Fig. 6 Mass transfer coefficient and spraying density of smooth tube and grooved tube

当横纹槽管的槽深不变( $e = 0.75$  mm)时,传热膜系数和传质系数随节距 $p$ 变化的规律如图7,8所示.实验结果表明:当沟槽节距不小于6 mm时,管外传质系数和换热系数随着节距减小而逐渐增大;当沟槽节距小于6 mm时,管外传质系数和换热系数反而下降.造成这个结果的原因是因为减小节距时,液膜经过沟槽时扰动更加剧烈,有利于传热、传质的进行;当节距过小时,扰动效果小,并且液体会在沟槽中残留,增大传热阻力,此时传热、传质性能不升反降.

图7 传热膜系数与节距 $p$ 的关系Fig. 7 The relationship between membrane heat transfer coefficient and  $p$ 图8 传质系数与节距 $p$ 的关系Fig. 8 The relationship between mass transfer coefficient and  $p$

当横纹槽管的节距不变( $p = 6 \text{ mm}$ )时,传热膜系数和传质系数随槽深  $e$  变化的规律如图 9、10 所示。实验结果表明:随横纹槽管槽深的增加,管外换热系数和传质系数呈现出先增大后减小的趋势。造成这种结果的原因是沟槽变深,液膜流经沟槽时扰动变大,有利于传热、传质过程的进行;当沟槽过深,沟槽内部残留液体减弱了液膜流经时的扰动,并加大了阻力。

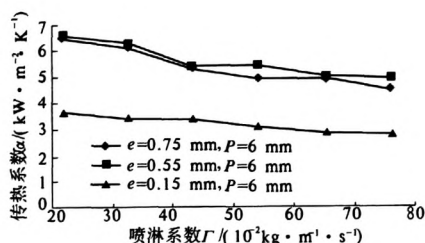


图 9 传热膜系数与槽深  $e$  的关系

Fig. 9 The relationship between membrane heat transfer coefficient and  $e$

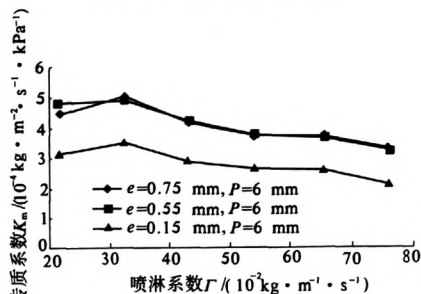


图 10 传质系数与槽深  $e$  的关系

Fig. 10 The relationship between mass transfer coefficient and  $e$

## 4 结论

(1) 验证了竖直热虹吸管应用于热泵吸收器

### Experimental Study on Heat and Mass Transfer in Heat Pipe-Type Absorber

FANG Shu-qi, GUO Jun, WANG Rui-yu

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Heat transfer characteristic of absorption heat pump in absorption heat pump was experimentally studied. Comparative experiments were conducted using the grooved pipe and the smooth pipe with different dimensions. The results showed that directly exporting absorption heat with heat pipe could get a good result. What is more, the film heat transfer coefficient of the grooved pipe was 2 to 3 times as much as that of smooth pipe, and the mass transfer coefficient was twice as much as that of smooth pipe. These results provided a basis for study on absorption heat pump with compact structure and high efficiency.

**Key words:** absorption heat pump; heat pipe; grooved pipe; falling film absorption

的可行性,并对其实际效果进行了实验,为进一步研究提供了依据。

(2) 对表面带有横纹沟槽的竖直热虹吸管和表面光滑热管的传热、传质性能进行对比实验,结果表明横纹槽管强化管性能明显优于光管。强化管的降膜吸收传热膜系数约为光管的 2~3 倍,传质系数约为光滑管的 1.5~2 倍。

(3) 横纹管槽深  $e$  和节距  $p$  共同影响着降膜吸收的传热、传质过程,需要进行优化组合;盲目改变节距  $p$  和槽深  $e$  不仅提高了加工难度、增加了成本,还会对传热传质效果造成不利影响。

## 参考文献:

- [1] YOON J I, KIM E, CHOI K H, et al. Heat transfer enhancement with a surfactant on horizontal bundle tube of an absorber [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(4): 735-741.
- [2] 尹铭, 陈嘉宾, 陈沛, 等. 竖直接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] 姜周曙, 胡亚才. 溴化锂吸收式制冷机新型镍合金强化传热管的实验研究 [J]. 流体机械, 1999, 27(10): 42-46.
- [4] 薄守石, 马学虎, 陈嘉宾, 等. 场协同原理强化管外降膜吸收传热特性实验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(1): 18-21.
- [5] 杨景昌, 张国喜, 党洁修. 热管式降膜吸收器的传热传质 [J]. 高校化学工程学报, 1997, 11(2): 126-130.
- [6] 黄维军, 邓先和, 黄德斌. 横纹槽管结构优化的正交数值模拟实验研究 [J]. 化工学报, 2005, 56(8): 1445-1450.