

研究论文

## 双面膜反转强化吸收过程传热传质

陈亚平, 施晨洁, 施明恒

(东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 提出了一种双面液膜反转方案, 垂直布置 2 组或 2 组以上交叉双尺度波纹板束为传热面, 在上板束各对板底部设置耙形导流器, 交叉地将上板束各对板两侧的液膜引至下板束异侧, 然后利用液膜与具有水平沟槽的波纹板片上的表面张力作用使反转后的下降液膜均匀化, 以此实现液膜反转和交叉双尺度波纹板技术的复合强化。建立了溴化锂水溶液在 2 段光滑平板上降膜反转吸收过程的传热传质数学模型并进行了数值计算。给出了反转液膜前后液膜内流场、温度场、质量分数分布计算结果, 并讨论了溴化锂水溶液降膜吸收传热和传质过程中反转次数对传热和传质系数的影响。

**关键词:** 双面膜反转; 溴化锂吸收式制冷; 降膜; 吸收; 交叉双尺度波纹板

中图分类号: TB 61

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 01-0019-06

## Heat and mass transfer enhancement during absorption process with double-side film-inverting configuration

CHEN Yaping, SHI Chenjie, SHI Mingheng

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** Film-inversion is an effective way recently developed to enhance heat and mass transfer in absorbers. However, only one-side of round or rectangular tube *i. e.* half of the total heat transfer area is used to form film-inverting configuration in the published literatures. This paper presents a double-side film-inverting scheme, which consists of two plate bundles with two-scale crosswise corrugations and a set of comb shaped conjunctions for leading the film from both sides of each couple of the upper plate bundle to the opposite sides of the bottom one. The horizontal corrugation can make film distribution uniform before and after inversion with the surface tension effect, and thus increase the heat and mass transfer coefficients of the absorption process. A mathematic model for heat and mass transfer in absorption process with aqueous Li-Br solution falling film-inverting on two sequential vertical plane plates was established and calculated numerically. The velocity profiles, temperature and concentration distribution inside the solution film were obtained. The influence of the number of inversion on heat and mass transfer characteristics was analyzed. The calculation results show that the heat and mass transfer coefficients of the once-film-inverting scheme increased by about 58% and 73% respectively over these of the none film-inverting scheme.

**Key words:** double-side film-inversion; LiBr absorption chiller; falling film; absorption; two-scale crosswise corrugations

2007-05-29 收到初稿, 2007-06-27 收到修改稿。

联系人及第一作者: 陈亚平 (1956—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50776016)。

Received date: 2007-05-29.

Corresponding author: Prof. CHEN Yaping. E-mail: ypgchen@sina.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50776016).

# 引 言

溴化锂吸收式制冷机是太阳能空调的关键设备，其吸收器性能又直接影响着制冷剂蒸发过程及整个机组的制冷性能，对其进行强化传热传质研究一直受到国内外同行的重视。传统的溴化锂制冷机的各个换热器大多采用管壳式结构。由于管壳式换热器结构比较庞大，紧凑型的板型换热器（包括板式、板翅式、板壳式换热器等）是很好的替代选择方案。Genssle 等<sup>[1]</sup>、Reay 等<sup>[2]</sup>和 Flamensbeck 等<sup>[3]</sup>分别研究分析了紧凑型换热器用于吸收式热变换器、热泵和制冷系统的特性；Bassols 等<sup>[4]</sup>研究了板翅式换热器在吸收式热泵中的应用；程卓明等<sup>[5]</sup>研制了全板翅式热质交换器组成的溴化锂吸收式制冷机实验台；陈亚平等<sup>[6-7]</sup>研制了由板壳式换热器组成的溴化锂吸收式制冷机，并对根据吸收传热传质过程的特点改进换热器的波纹结构方面进行了较深入的研究。

对溴化锂溶液降膜吸收过程已有的研究成果表明，沿着液膜向下流动的方向，随着吸收过程的继续，液膜外层温度较高而溶液质量分数逐步降低；液膜内层则是温度逐步降低而溶液质量分数变化很小，即外层冷不下，内层稀不了，此时若能将液膜反转就可有效改善传热传质。2003 年 Islam 等<sup>[8]</sup>提出了两种液膜反转方案（如图 1），一种为板式，一种为管式，并从数值模拟和实验研究两方面重点研究了管式膜反转降膜吸收器，该方案用导流板将水平管束的上方管子液膜引入下方管子时实现液膜内外反转。崔晓钰等<sup>[9]</sup>在其基础上也提出了一种由矩形管组成的板式膜反转降膜吸收器的方案。

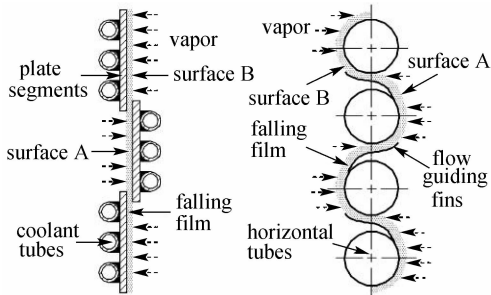
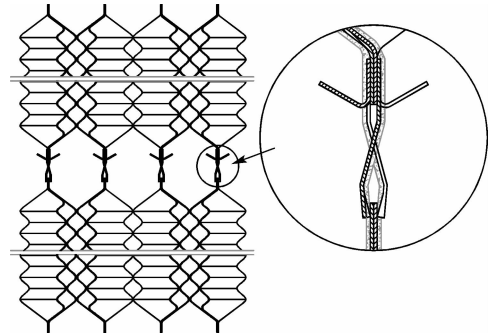


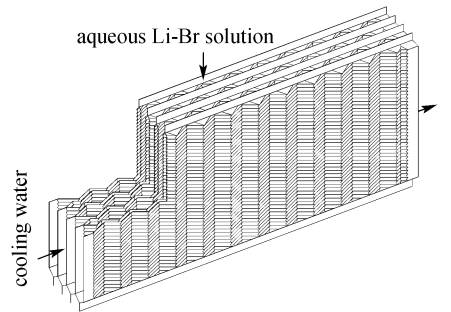
图 1 Islam 等提出的 2 种液膜反转方案  
Fig. 1 Two film-inverting schemes proposed by Islam *et al.*

上述这些液膜反转方案都存在着只在占传热面一半的表面上形成液膜分布和液膜反转条件，而忽

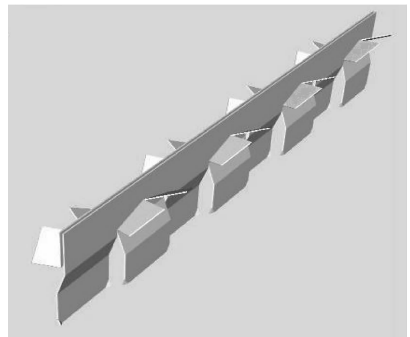
略了对另一半传热表面利用的缺点。为此，作者提出一种双面液膜反转交叉双尺度波纹板吸收器传热元件的新的技术构思 [图 2 (a)]，设置上下 2 组（或 2 组以上）用交叉双尺度波纹板组成的传热板束 [图 2 (b)]，在上板束每个对板底部设置一对耙形导流器 [图 2 (c)]，交叉地将上板束各对板两侧的液膜从大波纹波谷处引至下板束对应板的异侧大波纹波峰处，然后利用波纹板片上液膜的表面张力作用使下降液膜均匀化。在此过程中液膜发生反转，原来深藏在液膜内部的浓度高、温度低、具有较强吸收能力的溶液被暴露到相界面上来吸收蒸汽，维持较大的吸收势差。由于是从液膜的内外



(a) flow over double-side film-inverting absorber



(b) two-scale crosswise corrugation plate bundle



(c) a pair of comb shaped film guiders

图 2 双面液膜反转的交叉双尺度波纹板吸收器传热元件

Fig. 2 Scheme of double-side film-inverting absorber

两个方向依次实现溶液与冷剂蒸汽及溶液与冷却壁面之间的热质传递，因而可使吸收增强，同时波纹板束的两侧表面都得到利用。

## 2 基本假设与数学模型

为了建立上述吸收过程的数学模型，并使模型便于求解，作如下简化和假设：(1) 吸收器内的气相为均匀、等压、单一的纯净水蒸气；(2) 将上述交叉双尺度波纹板简化为竖直平板，并按等壁面温度边界条件处理；(3) 溶液能均匀地全部喷淋在板片上，无飞溅，无旁落，只考虑覆盖在传热表面上的液膜对水蒸气的吸收；(4) 稳态吸收过程，且液膜的流动为层流；(5) 蒸汽在板片通道内流动时，由于阻力作用产生的压力降可以忽略不计；(6) 液膜内液体的对流可以忽略不计，膜内沿流动方向无扩散。

其连续方程、动量方程、能量方程和质量方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \rho g \\ c_p \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + c_p \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial(u\xi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\xi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_m \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (1)$$

边界条件

$$\begin{cases} x = 0: \quad \frac{u}{u_0} = \frac{3y}{2\delta} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right)^3; v = 0; T = T_m; \xi = \xi_m \\ y = 0: \quad u = 0; v = 0; \frac{\partial \xi}{\partial y} = 0; \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T - T_h}{R_i + R_h} \\ y = \delta: \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = -\Delta h \frac{\rho D_m}{\xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

两相界面上溴化锂溶液温度与其质量分数和冷剂蒸汽温度有关，用拟合公式计算。

## 3 数学模型的量纲 1 化和离散化

为了编程方便，先对数学模型进行量纲 1 化处理，然后再离散化。

令

$$\begin{aligned} X = \frac{x}{L}; Y = \frac{y}{\delta}; \sigma = \frac{\delta}{\delta_0}; U = \frac{u}{u_0}; \\ V = \frac{v}{u_0}; \theta = \frac{T - T_a}{T_m - T_a}; \omega = \frac{\xi}{\xi_m} \end{aligned}$$

得

$$\begin{cases} \sigma \frac{\partial(\rho U)}{\partial X} + \frac{L}{\delta_0} \frac{\partial(\rho V)}{\partial Y} = 0 \\ \frac{\delta_0 \sigma^2}{L} \frac{\partial(\rho U^2)}{\partial X} + \sigma \frac{\partial(\rho UV)}{\partial Y} = \frac{1}{u_0 \delta_0} \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \frac{\delta_0 \sigma^2}{u_0^2} \rho g \\ \frac{\delta_0 \sigma^2}{L} \frac{\partial(\rho U \theta)}{\partial X} + \sigma \frac{\partial(\rho V \theta)}{\partial Y} = \frac{1}{c_p u_0 \delta_0} \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \\ \frac{\delta_0 \sigma^2}{L} \frac{\partial(U \omega)}{\partial X} + V \frac{\partial(V \omega)}{\partial Y} = \frac{D_m}{u_0 \delta_0} \frac{\partial^2 \omega}{\partial Y^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} X = 0: \quad U = \frac{3}{2} Y - \frac{1}{2} Y^3; V = 0; \theta = 1; \omega = 1 \\ Y = 0: \quad U = 0; V = 0; \frac{\partial \omega}{\partial Y} = 0; \lambda \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\theta - \theta_h}{R_i - R_h} \\ Y = 1: \quad \frac{\partial U}{\partial Y} = 0; \lambda \frac{\partial \theta}{\partial Y} = -\Delta h \frac{\rho D_m}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial Y} \end{cases} \quad (4)$$

为了编程的通用性，考虑到上述方程形式上的类似，统一采用如下形式的方程进行离散

$$A \frac{\partial(\rho U \Phi)}{\partial X} + B \frac{\partial(\rho V \Phi)}{\partial Y} = K \frac{\partial}{\partial Y} \left( \Pi \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right) + S \quad (5)$$

其中，A、B、K 为常系数，S 为源项。采用逆风格式，经离散后的二维方程为

$$a_p \Phi_p = a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + b \quad (6)$$

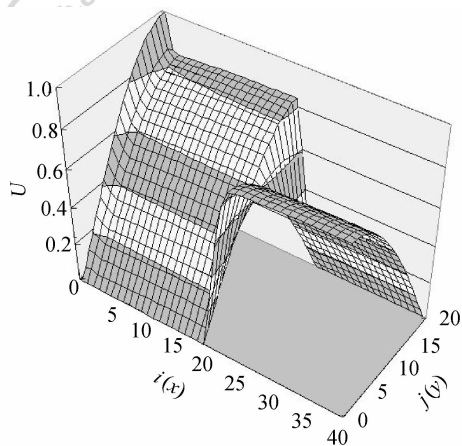
边界条件的离散略。

## 4 计算结果及其讨论

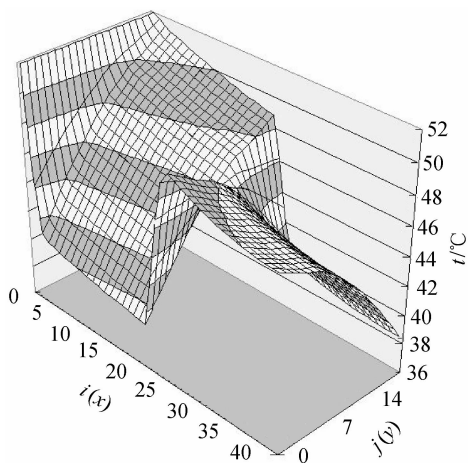
采用 Matlab6.5 软件进行编程计算，分别建立了速度场、温度场和浓度场以及密度、液膜厚度、比定压热容和黏度等计算子程序。在计算过程中用到的原始数据为：溴化锂浓溶液入口温度  $t_{in} = 52^\circ\text{C}$ ，入口浓度  $\xi_m = 62\%$ ，溶液喷淋密度  $\Gamma = 0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，吸收压力  $p = 1 \text{ kPa}$ ，板片总高度  $h = 400 \text{ mm}$ ，壁面温度  $t_w = 38^\circ\text{C}$ 。

图 3 (a) 反映了液膜反转前后量纲 1 速度分布。由图可见，溶液在壁面处由于黏滞阻力作用，速度为零，在入口处的自由界面上速度为  $u_0$ ，然后过渡到由喷淋密度确定的液膜厚度所对应的速度分布值，并随着吸收水蒸气后溶液质量的增大，速度也稍稍增大。经过反转以后，自由界面和壁面处的液膜层互相转化，原来的自由界面转为贴近壁面，速度骤降为零；原来壁面处的液膜层速度则由零迅速增大为峰值。

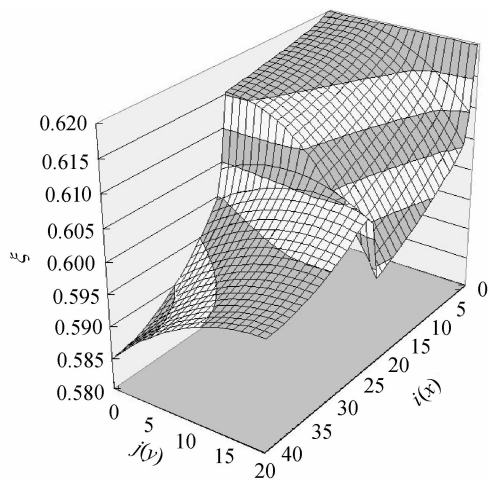
图 3 (b) 显示了膜反转前后温度分布的变化，由于溶液液膜内导热和扩散作用都比较差，自由界面吸收的冷剂水蒸气热量在穿越液膜传给壁面时存在较大的热阻，因而界面上温度较高；靠近壁面处



(a) dimensionless velocity distribution



(b) temperature distribution



(c) concentration distribution

图 3 液膜反转前后液膜内的速度、温度与质量分数分布

Fig. 3 Distributions of dimensionless velocity, temperature and concentration of liquid film profile before and after film-inverting

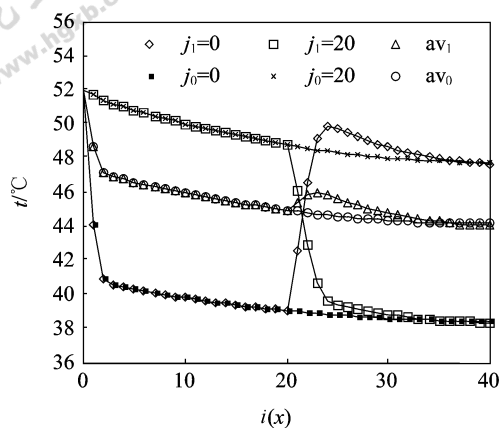
$i$ —node number along flow direction;  
 $j$ —node number normal to plate surface

的液膜由于另一侧冷却水的作用而温度较低。经过反转以后，原来的自由界面转为贴近壁面，得到冷却后温度迅速下降，然后再缓慢下降；而原来贴近壁面的液膜则成为新的自由界面，因其质量分数较高、温度较低，吸收大量水蒸气后温度迅速升高，随后才逐渐回落。

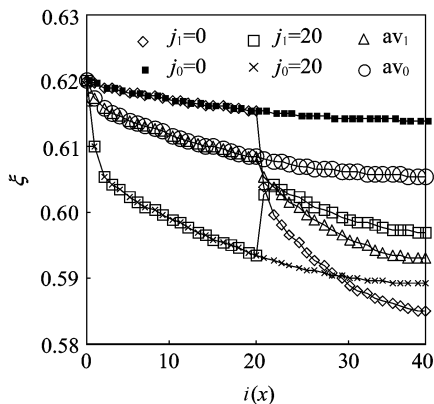
图 3 (c) 显示了液膜反转前后溶液液膜内质量分数分布的变化情况，可见原来均匀的溶液在降膜吸收的过程中发生两极分化，自由界面层液膜因吸收制冷剂蒸汽后质量分数很快下降，接近饱和；而贴近壁面层质量分数变化较小。反转液膜后，原来贴近壁面的液膜层，吸收水蒸气后质量分数先迅速下降，然后缓慢降低；而原先的自由界面层转为贴近壁面后，不再吸收水蒸气，因液膜内的扩散作用使质量分数先迅速上升，然后再缓慢降低。

图 4 (a) 和图 4 (b) 分别显示了板片总高度一定条件下不反转与一次液膜反转 2 种方案的内外 2 层液膜内以及平均的温度和质量分数的变化。可以明显看出尽管前半程情况相同，但液膜反转后由于液膜两侧都先后得到暴露和冷却，反转后新的自由界面上由于溶液吸收能力强，温度明显高于不反转方案，但出口处的温度值则相差不大（与等壁温模型有关）；反转后新的自由界面上的质量分数也可先急剧下降，再逐渐趋缓，出口处内外液膜层的质量分数都比不反转方案的数值要低得多。计算结果显示在液膜反转后，虽然液膜内外表面互相转换，液膜平均温度和平均质量分数此消彼长，但仍然可见平均温度先有明显上升，然后逐步回落，出口处各层温度都低于不反转的值；而平均质量分数则在反转后有明显的突降，且在出口处各层质量分数都远低于不反转的对应值，这说明液膜反转有利于液膜充分吸收水蒸气，强化传热传质。

图 5 反映了不同的液膜反转次数对溶液侧平均蒸汽吸收率  $\beta$  和平均膜换热系数  $h$  的影响及相对值的变化。可以看到，在液膜流动总长度（即板片的总高度）一定的情况下，吸收率和膜换热系数都随着液膜反转次数的增多而增大，且其增大的幅度都随着液膜反转次数的增多而逐渐减小。考虑到液膜反转将增加结构上的复杂性，因此液膜反转次数不宜过多。在本算例条件下，对于液膜一次反转，溶液侧吸收率和膜换热系数可分别提高约 73% 和 58%。考虑到双面反转液膜比单面反转液膜方案可利用的传热面积增大了一倍，并且根据作者以前对



(a) temperature



(b) concentration

图 4 不反转和一次反转的贴壁、自由界面液膜层及平均温度  $t$  与质量分数  $\xi$  沿流动方向的变化

Fig. 4 Variations of temperatures and concentrations of the falling film layers at wall, free surface and mean value along flow direction of both continuous film and inverted film  
 $j_0$ —continuous film;  $j_1$ —inverted film; av—average value

波纹板上溴化锂溶液对水蒸气的吸收过程所作的实验研究成果<sup>[10]</sup>，交叉双尺度波纹板可比竖直平板的传热系数和传质系数提高近一倍。因此本文提出的新型双面液膜反转交叉双尺度波纹板复合强化技术将有更好的传热传质效果。

## 5 结 论

(1) 在液膜传热传质过程中采用双面液膜反转和波纹板两项强化技术复合的方案是一种可以超越传统平板和圆管方案以及单面膜反转方案的新型高效强化元件。本文的数值计算结果显示了平板反转液膜前后液膜内速度、温度和质量分数分布的变化

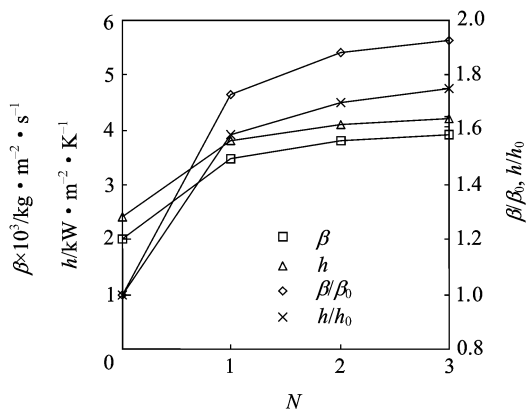


图 5 液膜反转次数对蒸汽吸收率  $\beta$  和膜换热系数  $h$  的影响

Fig. 5 Variations of both vapor absorption flux  $\beta$  and heat transfer coefficient  $h$  with number of film inverting

规律，有助于进一步理解其强化传热传质的机理。

(2) 液膜反转后，自由界面和壁面处的液膜层互相转化，液膜层速度在零和峰值间转换；温度场在壁面受冷却、自由表面受冷剂蒸汽释放汽化潜热的加热及液膜内导热和扩散等多种因素作用下呈现较复杂的变化态势；质量分数的分布规律显示液膜在自由表面附近形成较大的浓度梯度，而在液膜内部则变化较小。

(3) 与不反转方案相比，在出口截面上，液膜各层温度比不反转方案的对应值稍有下降；而液膜各层质量分数则都远低于不反转方案的对应值，充分显示了反转液膜方案对促进传质强化尤其有效。

(4) 在本算例中，液膜一次反转可使溶液侧吸收率和膜换热系数分别提高约 73% 和 58%。反转次数增多时，随后增加的强化效果将会逐步减少。

## References

- [1] Andreas Genssle, Karl Stephan. Analysis of the process characteristics of an absorption heat transformer with compact heat exchangers and YFE-E181. *Int. J. Thermal Science*, 2000 (39): 30-38
- [2] Reay D A. Compact heat exchangers, enhancement and heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 2002, **25**: 460-470
- [3] Flamensbeck M, Summerer F, Riesch P. A cost effective absorption chiller with plate heat exchangers using water and hydroxides. *Applied Thermal Engineering*, 1998, **18** (6): 413-425
- [4] Bassols J, Schneider R, Veelken H, et al. First operation results of a gas-fired 250 kW absorption heat pump with

- plate-fin heat exchangers//Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference. New Orleans, 1994: 73-77
- [5] Cheng Zhuoming (程卓明), Li Meiling (李美玲), Cui Xiaoyu (崔晓钰), *et al.* Structure and performance study of LiBr absorption chiller based on whole-plate-fin heat-exchanger. *Journal of Refrigeration* (制冷学报), 2003, **24** (1): 28-32
- [6] Chen Yaping, Li Yingbin, Shi Mingheng. Numerical simulation of characteristics of falling film absorption on vertical corrugation plates for aqueous Li-Br solution//Proc. of the 6th Int.Symposium on Heat Transfer. Beijing: China Sciences Multi-Media Electronic Publishing House, 2004: 630-634
- [7] Chen Yaping, Li Yingbin, Wang Keyong, *et al.* Experimental study on falling film absorption with aqueous Li-Br solution on two-scale corrugation plate surfaces//Proceedings of 3rd ISHTEEC. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2004: 335-339
- [8] Islam M R, Wijeyesundera N, Ho J C. Performance study of falling-film absorber with film-inverting configuration. *International Journal of Refrigeration*, 2003, **26**: 909-917
- [9] Cui Xiaoyu (崔晓钰), Tang Cong (唐聪), Li Meiling (李美玲). Design and performance study of plate falling film absorber with a film-inverting configuration. *Journal of Refrigeration* (制冷学报). 2005, **26** (3): 47-52
- [10] Chen Yaping (陈亚平), Li Yingbin (李映斌), Shi Mingheng (施明恒). Numerical simulation on heat and mass transfer during aqueous Li-Br solution falling film absorption on corrugated plate surfaces. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2004, **25** (3): 463-465