

# 壁面材料对太阳能降膜吸收特性影响的实验研究

綦戎辉, 董传帅

(华南理工大学化学与化工学院, 广州 510006)

**摘要:** 为探索壁面特性对降膜吸收及太阳能利用的影响, 实验研究了不同竖壁表面(不锈钢、PTFE塑料及这两者的超亲水改性表面)上的氯化锂气液吸收过程。结果表明, 更小的表面接触角不仅有利于液膜铺展及膜厚降低, 还可增强表面波动频率与振幅, 从而促进了传质。不锈钢壁面上的液膜厚度较PTFE壁上薄20%, 传质量提升35%以上。超亲水改性后不锈钢表面上的膜厚进一步降低15%, 振幅/膜厚比提高25%, 传质量提升了30%以上。与不锈钢表面相比, 塑料表面超亲水改性对传质的提升更为明显。基于实验获得了降膜形态随填料表面接触角变化的经验关联式, 并预测了对系统能耗及太阳能利用率的影响, 为太阳能除湿空调、吸收式制冷、蒸发冷却等相关工程应用提供参考。

**关键词:** 吸收; 传质; 太阳能; 表面改性; 液膜波动

中图分类号: TK124

文献标志码: A

## 0 引言

降膜吸收/蒸发过程具有流量小、压降小、设备简单等优势, 作为一种高效传热传质方式, 被广泛应用于太阳能热利用领域(如太阳能蒸馏、海水淡化、溶液浓缩、吸收式制冷等<sup>[1-2]</sup>)。太阳能溶液除湿系统利用盐溶液在填料壁面上降膜吸收空气中的水蒸气, 并采用低温热源(50~90℃)再生。作为一种温湿度独立处理方式, 它具有高效、清洁、无新回风掺混等优点, 是建筑节能的重要途径之一<sup>[3-4]</sup>。

使用不同材料或改性以提高壁面润湿性有益于降膜/壁面传热及气液传质过程, 可降低运行能耗、提高太阳能利用率。董传帅等<sup>[5]</sup>和Åkesjö等<sup>[6]</sup>研究超亲水涂层在溶液除湿中的作用, 证明气液传质能力可提高1.2~2.5倍。另一方面, 壁面特性也对液膜流动行为有明显的影响。降膜表面在低雷诺数 $Re$ 条件下会形成规则的表面波动<sup>[7]</sup>。丁子敬等<sup>[8]</sup>实验发现这些波动通过增强Marangoni效应从而增强传质; 綦戎辉等<sup>[9]</sup>、石玉琦等<sup>[10]</sup>及张琳等<sup>[11]</sup>对液膜波动进行了理论研究。但这些研究很少考虑壁面的影响。基于文献调研可知, 目前关于壁面特性对降膜行为的研究还较少, 缺乏相应性能预测方法, 限制其工程应用进程。

为此, 本文通过建立溶液除湿实验台, 对氯化锂溶液在不同竖壁表面(不锈钢、PTFE塑料及其对应超亲水改性表面)的降膜气液传质过程进行实验研究, 测试多种工况下的液膜特性(包括膜厚、波动振幅、波长)及除湿性能。在实验

基础上, 拟合液膜波动随壁面接触角变化的经验关联式, 并预测太阳能空调系统性能, 为相关工程应用提供参考。

## 1 实验方法

所搭建的双通道降膜除湿实验台如图1a所示。实验台通道内共采用了4块不同材质的壁面, 即不锈钢(未改性S)及其超亲水改性表面(改性S), PTFE塑料(未改性P)及其超亲水改性表面(改性P)。实验过程中, 具有吸湿性能的氯化锂水溶液通过分管及溢流式布膜器均匀地分别降膜到2个通道的工作壁面上( $W \times H = 550 \times 500$  mm), 并与充分发展的逆流湿空气直接接触。在这2个通道中, 除分别应用改性及未改性竖壁表面外, 其他结构设计及操作条件完全相同。

降膜厚度及波动形态由高精度电容测微仪(JDC系列, 天大精仪)获得, 测量误差为 $\pm 1.0\%$ 。每一通道均设置有两个探针, 分别安装在距中心+100 mm和-100 mm的中心线上方, 并通过对所获得的液膜数据取平均以提高精度, 如图1所示。有关实验台的更多细节, 请参考笔者前期相关文章<sup>[9]</sup>。

实验台通道内所使用的未改性表面为未经处理的316不锈钢板及PTFE塑料板, 改性表面为涂覆 $TiO_2$ 超亲水涂层的不锈钢板及刻蚀并涂覆 $SiO_2$ 超亲水涂层的塑料板。超亲水涂层及改性方法均为前期研究中自行研发的<sup>[10, 12]</sup>。4种表面的润湿性测试如图2所示。可以看出, 溶液在原始表面上的接触角较大, 尤其是塑料表面上高达 $110^\circ$ 。这意味着润湿

收稿日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51876067); 广东省高层次人才项目(2017GC010226); 中央高校基本业务费(xh2GD2190150)

通信作者: 綦戎辉(1984—), 女, 博士、教授, 主要从事气液对流及传热传质的研究方向。qirh@scut.edu.cn

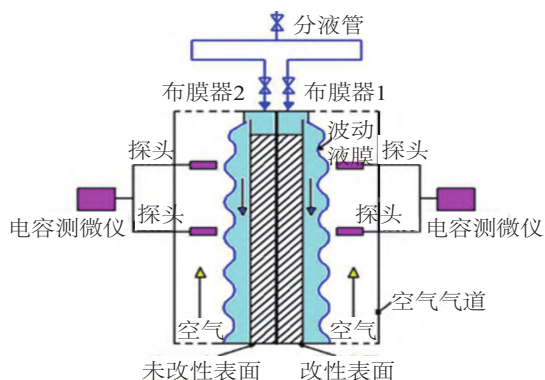


图1 降膜液空气除湿试验系统示意图

Fig. 1 Falling film liquid-air dehumidification test rig

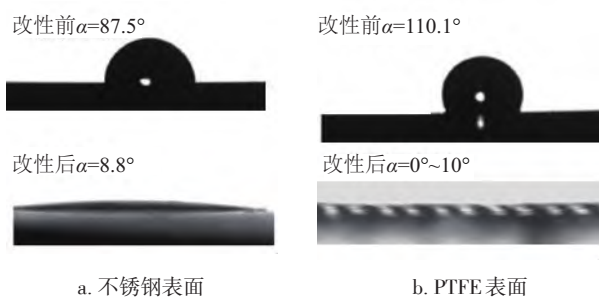


图2 超亲水改性前后的表面接触角 $\alpha$

Fig. 2 Contact angles of liquid on different solid surfaces

性较差并影响液膜铺展,改性之后液体接触角显著降低。改性塑料表面上的液体接触角可以小至 $0^\circ$ ,但是由于溶液的流动冲刷,实验结束后这一接触角将增至约 $10^\circ$ 。

实验过程中,主要变量为气液雷诺数  $Re$  (可由质量流量计算), 见式(1)。其余参数保持不变,如溶液进口温度及质量浓度分数分别为 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 及 $30\%\pm 2\%$ ,空气进口温湿度为 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 及 $(85\%\pm 5\%)\text{RH}$ 。实验工况见表1。通过测量湿空气进出口的湿度变化,即可得到气液传质量,如式(2)所示。此外,与液膜波动相关的无量纲数计算见式(3)

$$Re_L = \frac{4\Gamma_L}{\mu_L}, Re_a = \frac{4\Gamma_a}{\mu_a} \quad (1)$$

$$m_{\text{removal}} = m_a(\omega_{a,\text{in}} - \omega_{a,\text{out}}) \quad (2)$$

$$N_\delta = \frac{z}{\delta_N}, N_z = z(g/\nu^2)^{1/3} \quad (3)$$

式中:  $\Gamma$  ——单位宽度质量流量,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ;  $m$  ——质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $Z$  ——液膜波动振幅,  $\text{m}$ ;  $\delta_N$  ——由 Nusselt 公式计算得到的液膜厚度,  $\text{m}$ ;  $\nu$  ——溶液黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\omega$  ——空气绝对湿度,  $\text{kg}/\text{kg}$  干空气;  $g$  ——重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $N_\delta$  及  $N_z$  ——液膜波动相关无量纲数; 下标“L”和“a”——溶液和空气; 下标“removal”——除湿量。

根据测试仪器精度,可计算得到  $Re_L$ 、 $Re_a$ 、除湿量(即气液传质量)及  $N_\delta$  测试的综合测量误差分为 1.6%、3.1%、3.7% 及 2.8%。实验过程中,每组实验均重复 5 次以上并取平均值以消除随机误差。

表1 实验工况

Table 1 Summary of experimental conditions

工况	基板条件	溶液 $Re_L$	溶液质量流量 $m_l/(\text{g}/\text{s})$	空气 $Re_a$	空气质量流量 $m_a/(\text{g}/\text{s})$
G.1	改性S、未改性S	29, 42, 54, 65, 77, 89, 101, 132, 143, 154, 163, 176	12.7, 17.8, 22.8, 27.9, 33.0, 38.1, 43.1, 48.2, 53.3, 58.4, 63.4, 68.5	5800	59.4
G.2	改性P、未改性P	43, 57, 79, 109, 138, 153, 175, 182	14.2, 19.0, 26.2, 35.8, 45.4, 50.2, 57.4, 67.0	5670	58.8
G.3	未改性S	122, 156, 202	48.2, 65.9, 84.3	2400, 3400, 4260, 4890, 5896	28.4, 40.1, 50.4, 57.8, 69.7

## 2 结果与讨论

### 2.1 除湿量

首先,测试了不同工况及不同壁面条件时的降膜除湿性能。如图3所示,当溶液  $Re_L$  从 29 变化为 182 时,由于具有了更好的表面润湿性,应用不锈钢表面可使气液传质量提高约 38%。进一步地,当进行了超亲水改性后,对于应用塑料及不锈钢表面的传质量可分别提升 20%~40% 及 10%~30%。这一增强效果主要是由于表面改性后,液膜的均匀分布增加气液接触面积,以及相应的液膜厚度减小以降低传质阻力而实现的。同时,超亲水改性对于初始润湿性更差的塑料表面更有效。另外,随着溶液  $Re_L$  增加,气液传质量几乎线性增加。

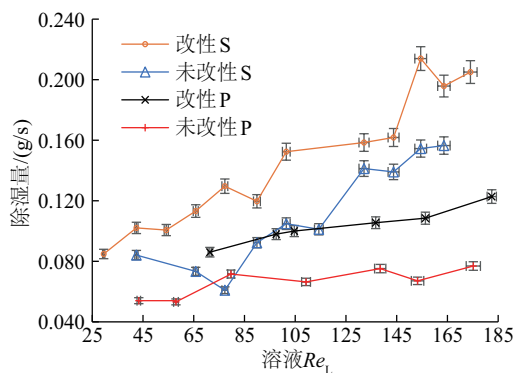


图3 气液传质量随  $Re_L$  的变化(工况 G.1, G.2)

Fig. 3 Variation in mass transfer rate with liquid  $Re_L$  (G.1 and G.2)

降膜过程的除湿量随空气流量的变化如图 4 所示。可以看出,尽管气液传质量随空气  $Re_a$  的增加先增大后减小,但变化不如随溶液流量的变化那么明显。因此,在随后的液膜行为分析中,溶液  $Re_L$  被作为主要影响因素。

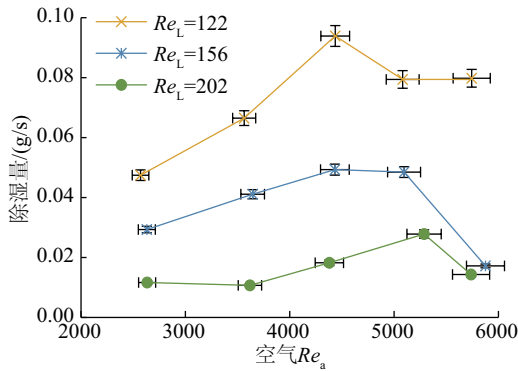


图4 除湿量(气液传质量)随  $Re_a$  的变化(工况 G.3)  
Fig. 4 Variation in mass transfer rate with air  $Re_a$  (G.3)

### 2.2 液膜特性

降膜除湿过程中液膜的厚度如图 5 所示。可以看出,膜厚随着溶液放液流量的增加而增加。采用塑料壁面的液膜厚度 ( $Re_L = 100$  时膜厚约为  $1000 \mu\text{m}$ ,未改性)要比不锈钢壁面上的膜厚(约为  $650 \mu\text{m}$ ,未改性)高得多。这是由于液膜在塑料表面上难以铺展,并且流动时的收缩更明显导致的。这也是塑料表面上降膜传质性能较差的原因之一。进一步地,采用超亲水改性可促使液膜的铺展并有效降低液膜厚度。当  $Re_L$  在 20~70 范围内时,改性后的液膜厚度分别比未改性时的低  $50\sim 100 \mu\text{m}$  (不锈钢)及  $150\sim 250 \mu\text{m}$  (塑料)。同样地,表面改性对于液膜在塑料表面上的铺展改善更为明显。

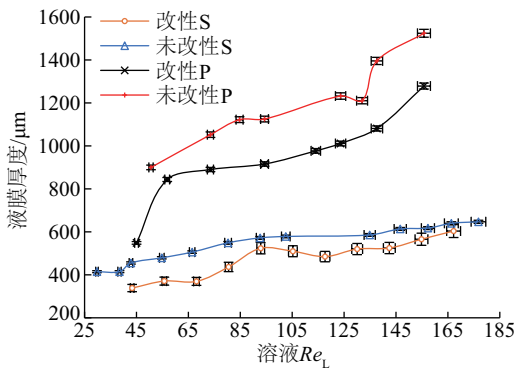


图5 液膜厚度随  $Re_L$  的变化(工况 G.1, G.2)  
Fig. 5 Variation in film thickness with liquid  $Re_L$  (G.1 and G.2)

进一步地,低  $Re$  降膜流动表面通常呈规律正弦波形态,且表面波对传质有显的增强作用<sup>[10]</sup>。液膜波动的振幅与膜厚之比,  $N_s$ , 是用于评价波动程度的标准之一,由式(3)计算得到。如图 6 所示,不锈钢壁面上的振幅膜厚比 ( $Re_L = 100$  时约为 0.05,未改性)远高于塑料表面上的(约为 0.02,未改性),这意味着降膜表面波动更强烈。这也是溶液在不锈钢

表面上传质性能更佳的原因之一。壁面超亲水改性则可进一步增加振幅/膜厚比。与未改性壁面相比,改性壁面可增加约 25%(不锈钢)及 40%(塑料)。如图 7 所示,尽管表面改性的会稍微地降低液膜波动频率,但频率随溶液流量变化而变化的幅度会随之增加。例如,当溶液  $Re_L$  从 30 增至 160 时,未改性与改性塑料壁面上的液膜波动频率变化范围分别为  $0.28\sim 0.30 \text{ s}^{-1}$  和  $0.21\sim 0.27 \text{ s}^{-1}$ 。这意味着,若溶液  $Re_L$  进一步增加,改性壁面上的波动频率将超过未改性壁面上的。此外随着溶液流量增加,降膜波动频率和振幅/膜厚比也会增加。

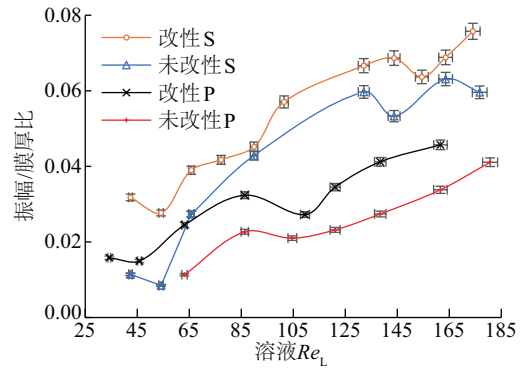
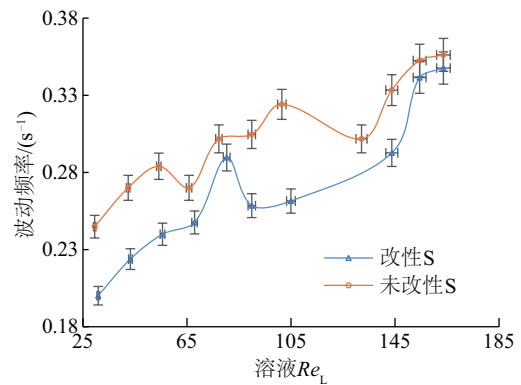
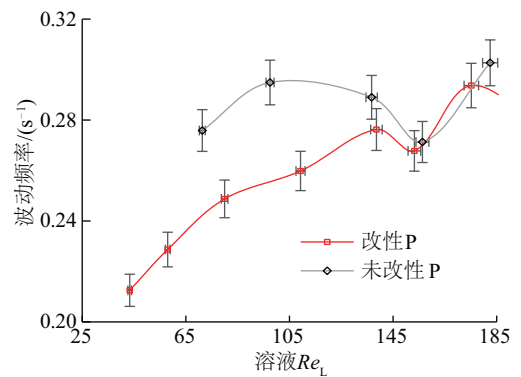


图6 振幅/膜厚比随  $Re_L$  的变化(工况 G.1, G.2)  
Fig. 6 Variation of ratio between wave amplitude and film thickness with liquid  $Re_L$  (G.1 and G.2)



a. G.1



b. G.2

图7 波动频率随  $Re_L$  的变化

Fig. 7 Variation of wave frequency with liquid  $Re_L$

此外,虽然影响较小,但溶液除湿过程中的液膜厚度和振幅/膜厚比也会随着空气流动的增加,出现先增加后减小的趋势。这主要是由于逆流空气有利于液膜的波动。但当流量进一步增加时,气液界面处过大的剪切力会降低液膜界面速度,从而削弱了波动的程度。

### 2.3 经验模型

降膜除湿过程中液膜厚度和波动形态均受到壁面特性的影响。基于实验数据,通过最小二乘法得到液膜厚度  $\delta$ 、波动频率  $f_w$  和振幅无量纲数  $\delta_\lambda$  随壁面接触角  $\theta$  变化的经验关联式,如式(4)~式(6)所示。

$$\delta = \delta_\lambda (1 - \cos \theta)^{0.15} \tag{4}$$

$$f_w = f'_w (1 - \cos \theta)^{0.354} \tag{5}$$

$$N_z = N'_z (1 - \cos \theta)^{0.085} \tag{6}$$

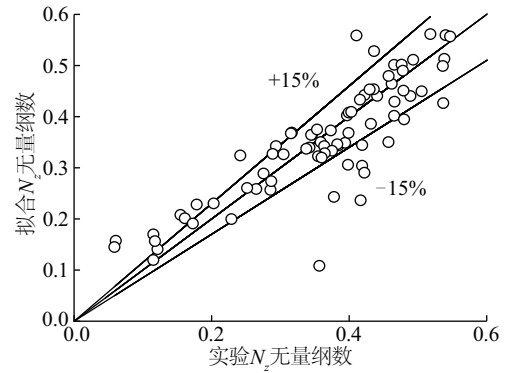
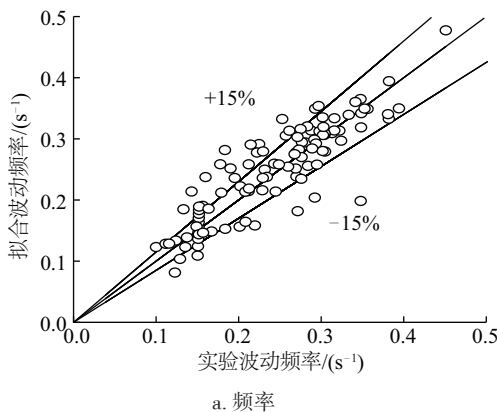
式中:  $\theta$ ——液体在固体表面上的接触角;  $f'_w$  及  $N'_z$ ——分别采用未考虑壁面特性的现有理论公式计算得到的降膜波动频率及振幅,具体可见笔者前期相关研究<sup>[8]</sup>。通过 F-test 显著性检验法计算得到,式(4)~式(6)的  $F$  值分别为 69.8、43.1 及 20.7,均明显高于检验水平标准值(0.01、0.05 及 0.1 水平分别为 6.635、3.841 及 2.706),验证了这一线性回归过程的可靠性。

图 8 比较了由经验关联式(4)~式(6)预测得到的与实验得到的液膜波动频率及振幅。预测值与实验值的误差在超过 90%以上的样本中小于 15%。关联式平均相对误差分别为 5.2%(膜厚)、11.7%(振幅)和 13%(频率),验证了这一过程的准确性。

基于拟合过程,该实验关联式的适用条件为:1)低含量气体降膜吸收过程,如降膜吸收空气中的水蒸气;2)低雷诺数降膜,液体雷诺数小于 200~500<sup>[13]</sup>,无三维孤立波的情况;3)本关联式适用于应用氯化锂水溶液的工作况。

### 2.4 太阳能除湿系统性能

为了评估壁面特性对太阳能热驱动降膜吸收系统能耗的影响,本文模拟了应用如上 4 种壁面的溶液除湿空调系统在实际建筑中的运行能耗及太阳能利用率(即由太阳能提供的能量占所需能量的比例)。本案例中所采用的降膜除湿装



b. 振幅无量纲数

图 8 实验与预测结果相对偏差

Fig. 8 Relative deviation between experimental and prediction results

置为内冷/内热型,由太阳能热水器提供再生热量:所使用的建筑位于中国亚热带地区。具体建模参数可见笔者前期相关研究<sup>[12]</sup>。

由图 9 可看出,应用不锈钢壁面可减少约 20%的能耗:经过超亲水改性后,塑料及不锈钢系统能耗可进一步降低约 25%及 16%。这主要是由于更好的壁面润湿性不仅增加了气液传质量,还增强了溶液与壁面的传热效果,使其更适合于内热式太阳能溶液除湿空调。因此,降膜装置壁面改性可使系统的太阳能利用率提升约 20%(不锈钢)及 33%(塑料),从而使其在实际建筑中的应用前景更为广阔。

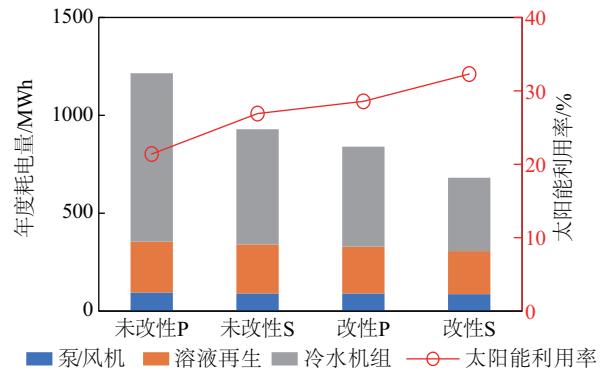


图 9 应用不同壁面的除湿系统能耗及太阳能利用率

Fig. 9 Energy consumption and solar energy utilization rate of dehumidification system with different plate surfaces

## 3 结 论

探索壁面特性与降膜特性相互作用十分重要,特别是对于太阳能热应用领域。本文对 4 种壁面(不锈钢、PTFE 塑料及这两种的超亲水改性表面)上的氯化锂降膜除湿过程进行实验研究,分析壁面亲水性对气液传质量、液膜形态及系统性能的影响,并提出液膜形态随固体表面接触角变化的经验关联式。具体结论如下:

1) 不锈钢壁面上液膜厚度较塑料壁面上低 20%,波动频

率及振幅/膜厚比增加,传质量提升 38%;超亲水改性后膜厚进一步降低 15%,振幅/膜厚比提高 25%,气液传质量提升 30%以上。这意味着更小的表面接触角不仅有利于液膜铺展、膜厚降低,还可增强液膜波动频率及振幅,从而促进传质。

2)对于塑料及不锈钢表面,采用超亲水改性可分别增强气液传质量 20%~40%及 10%~30%、提升空调系统太阳能热利用率 33%及 20%:表面改性对于初始润湿性差的塑料壁面更为有效:

3)液膜厚度及波动振幅也随随溶液流量增加而增加,而随空气流量的变化不大。

这一研究针对低  $Re$  数降膜吸收过程,描述了受填料壁面接触角影响的液膜行为及除湿性能的相互作用,并提出实验关联式。这一研究可为推动降膜流动这一高效传热传质方式在化工、暖通、太阳能利用等领域的实际工程应用提供经验参考。

### [参考文献]

- [1] 万智华, 厉彦忠, 苏长满. 溢流式布膜铝板液膜厚度和润湿特性实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4): 35-43.  
WAN Z H, LI Y Z, SU C M. Experimental study on thickness and wetting characteristics of liquid film on aluminum plate with overflow type distributor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 35-43.
- [2] 朱国鹏, 李瑞晨, 侯静, 等. 四效管式降膜蒸发太阳能海水淡化装置性能研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 363-369.  
ZHU G P, LI R C, HOU J. et al. Performance research of four-effect tubular falling film evaporation solar desalination device [J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(6): 363-369.
- [3] 毛巨正, 郑宏飞, 杨军伟, 等. 多效竖管降膜蒸发太阳能海水淡化装置性能研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2743-2748.  
MAO J Z, ZHENG H F, YANG J W, et al. Performance investigation of solar desalination device with multi-effect vertical tube falling film evaporation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(10): 2743-2748.
- [4] 彭冬根, 程小松, 李霜玲, 等. 一种新型溶液除湿装置数学模型及性能分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 474-479.  
PENG D G, CHENG X S, LI S L, et al. Mathematical model and performance analysis of a new liquid desiccant dehumidifier [J]. Acta energiae solaris sinica, 2019, 40(2): 474-479.
- [5] DONG C S, LU L, WEN T, Experimental study on dehumidification performance enhancement by TiO<sub>2</sub> superhydrophilic coating for liquid desiccant plate dehumidifiers [J]. Building and environment, 2017, 124: 219-231.
- [6] ÅKESJÖ A, GOURDON M, VAMLING L, et al. Modified surfaces to enhance vertical falling film heat transfer - An experimental and numerical study [J]. International journal of heat and mass transfer, 2019, 131: 237-251.
- [7] 邱庆刚, 任倩倩, 龙黄祥, 等. 竖壁降膜波动特性数值模拟研究[J]. 热科学与技术, 2020, 19(4): 332-338.  
QIU Q G, REN Q Q, LONG H X, et al. Numerical simulation for laminar wave characteristics of falling film flow [J]. Journal of thermal science and technology, 2020, 19(4): 332-338.
- [8] DING Z J, WONG T N. Falling liquid films on a slippery substrate with Marangoni effects [J]. International journal of heat and mass transfer, 2015, 90: 689-701.
- [9] QI R H, DONG C S, ZHANG L.-Z. Wave-wise falling film in liquid desiccant dehumidification systems: Model development and time-series parameter analysis [J]. International journal of heat and mass transfer, 2019, 132: 96-106.
- [10] SHI Y Q, CHEN G M, WANG Q, et al. Simulation on falling film absorption based on lattice Boltzmann method at moderate Reynolds number [J]. International journal of heat and mass transfer, 2019, 128: 991-998.
- [11] 范学成, 张琳, 卜诗, 等. 垂直下降管内液膜沸腾蒸发及相界面波动研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(8): 2258-2265.  
FAN X C, ZHANG L, BO S, et al. Boiling and evaporation of liquid films and phase interface fluctuation in vertical down tubes [J]. Acta energiae solaris sinica, 2019, 40(8): 2258-2265.
- [12] ZHI J H, DONG C S, GUO M M, et al. Wettability and performance enhancement with durable super-hydrophilic surfaces for plastic liquid desiccant dehumidification systems [J]. Energy and buildings, 2019, 187: 77-85.
- [13] PATNAIK V, PEREZ-BLANCO H. Roll waves in falling films: An approximate treatment of the velocity field [J]. International journal of heat and fluid flow, 1996, 17(1): 63-70.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EFFECT OF DIFFERENT SOLID SURFACES ON FALLING FILM BEHAVIOR IN SOLAR-ASSISTED ABSORPTION PROCESS

Qi Ronghui, Dong Chuanshuai

*(School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)*

**Abstract:** To investigate the effect of solid surface characteristics on the mass transfer process of falling film absorption and other solar-assisted applications, the lithium chloride-air absorption of on different vertical surfaces (stainless steel, PTFE plastic and each of these with super-hydrophilic modified surfaces) was experimentally studied. Results show that the smaller liquid contact angle on the solid surface was not only conducive to the expansion of liquid film and the reduction of film thickness, but also increased the frequency and amplitude of film surface waves. Thus, the liquid/air mass transfer could be promoted significantly. The liquid film thickness on stainless steel surface is 20% lower than that of the PTFE. The mass transfer rate is increased by 35% simultaneously. After the super-hydrophilic modification, the film thickness was further reduced by 15%. The amplitude/film thickness ratio was increased and the mass transfer rate was increased by 30% accordingly. The super-hydrophilic modification of plastic surfaces is more effective for improving the mass transfer performance. Through experiments, the empirical formulas that the falling film wavelength and amplitude vary with the contact angle on solid surface were obtained, and predicted the effects on the energy consumption and solar utilization rate of practical air-conditioning systems. This study can help the engineering application in the fields of solar-assisted air conditioning, absorption refrigeration and evaporative cooling, etc.

**Keywords:** absorption; mass transfer; solar energy; surface treatment; wave-wise falling film