

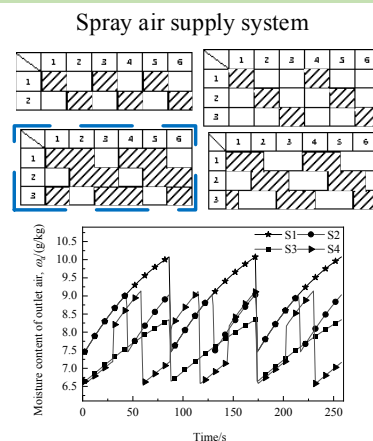
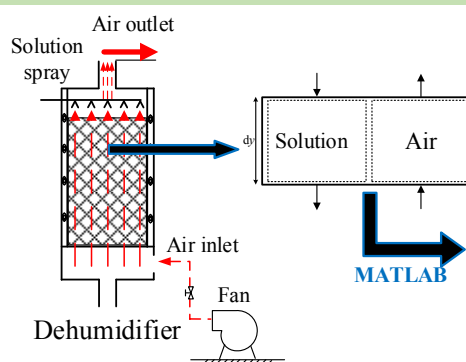
## Feasibility study on intermittent operation of solution dehumidifier

Zhijia HUANG<sup>1\*</sup>, Heng ZHOU<sup>1</sup>, Feifei ZHUO<sup>2\*</sup>

1. School of Civil Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243032, China

2. Hangzhou Institute of Architectural Design, Hangzhou, Zhejiang 310001, China

**Abstract:** In order to solve the problem of air with liquid in the solution dehumidifier, a method of intermittent operation of the solution dehumidifier was proposed, which separated the air supply from the solution spray. The numerical model of dehumidifier was established, and the feasibility of the model was verified by comparing the experimental data and simulation data. Based on the model, the



influence of operation parameters and design parameters of intermittent solution dehumidifier on dehumidification performance was studied and the operation effect of different air supply systems was simulated. The results showed that the static liquid holding capacity should be controlled in the range of 4.575~6.100 kg/kg and the packing height should be controlled in the range of 0.45~0.75 m, the intermittent operation method was more suitable to deal with the air with low temperature and high humidity (such as 20 °C and RH95%), which can solve the problem of traditional solution dehumidification with liquid. The dehumidification effect of the parallel staggered air supply system was the best, during the operation, the dehumidification rate was more than 5 g/kg, which can supply air continuously and meet the dehumidification demand.

**Key words:** solution dehumidification; air with liquid; intermittent; air supply system; feasibility

收稿: 2019-12-18, 修回: 2020-03-01, 网络发表: 2020-03-24, Received: 2019-12-18, Revised: 2020-03-01, Published online: 2020-03-24

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(编号: KJ2019ZD08)

作者简介: 黄志甲(1963-), 男, 安徽省枞阳县人, 博士, 教授, 暖通工程专业, E-mail: hzj@ahut.edu.cn; 通讯联系人, 黄志甲, E-mail: hzj@ahut.edu.cn; 卓飞飞, E-mail: zhao0626@163.com.

**引用格式:** 黄志甲, 周恒, 卓飞飞. 溶液除湿器间歇运行的可行性研究. 过程工程学报, 2020, 20(11): 1257-1264.

Huang Z J, Zhou H, Zhuo F F. Feasibility study on intermittent operation of solution dehumidifier (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(11): 1257-1264, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219379.

# 溶液除湿器间歇运行的可行性研究

黄志甲<sup>1\*</sup>, 周恒<sup>1</sup>, 卓飞飞<sup>2\*</sup>

1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032

2. 杭州市建筑设计研究院, 浙江 杭州 310001

**摘要:**为解决溶液除湿器运行过程中的空气带液问题, 提出一种送风过程和喷淋过程分开进行的除湿器间歇式运行的方法。建立了除湿器数值模型, 通过实验数据和模拟数据对比, 验证了模型的可行性, 基于该模型, 研究了溶液除湿器的填料静持液量、填料高度和空气入口参数对间歇运行系统除湿效果的影响; 为保证间歇式运行满足除湿需求, 且送风连续, 设计了四种不同的送风制度, 对不同送风制度的运行效果进行了模拟。结果表明, 采用该间歇式溶液除湿方法时, 应将填料静持液量控制在 4.575~6.100 kg/kg 范围内, 填料高度控制在 0.45~0.75 m 范围内; 该间歇运行方法能解决传统溶液除湿器运行时的空气带液问题; 入口空气处于低温高湿状态(如温度为 20℃, 相对含湿量为 95%), 除湿效果最佳; 并联交错送风制度运行除湿效果最佳, 运行期间基本保持除湿率大于 5 g/kg, 能够持续送风且满足除湿需求。

**关键词:** 溶液除湿; 空气带液; 间歇式; 送风制度; 可行性

中图分类号: TU834.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)11-1257-08

## 1 前言

在溶液除湿器的除湿器和再生器中, 溶液与空气直接接触进行热湿交换过程。普通的溶液除湿器中送风和溶液喷淋同时进行<sup>[1]</sup>, 具有腐蚀性的盐溶液通过喷淋至规整填料塔上, 在填料表面形成一层液膜, 气流可能会引起液膜的变形而形成小液滴, 单个的液滴可能被气流托起悬浮带到室内, 造成空气管道和室内装置腐蚀<sup>[2,3]</sup>, 空气带液问题已成为限制溶液除湿技术进一步发展的重要因素。

有关溶液除湿设备的空气带液现象已有大量研究。填料和溶液之间的界面波状态表征了填料的结构特性对除湿器空气带液现象的影响, Singh 等<sup>[4]</sup>通过对填料上的液体薄膜进行数值研究, 分析了固液界面的接触角(填料的湿润性)对界面波的影响; 谷芳等<sup>[5]</sup>和吴思其等<sup>[6]</sup>研究了不同形状的填料的界面波变化情况, 发现除湿溶液的物理性质直接影响了喷淋过程中溶液与填料层和气流之间的力的作用; 王顺林<sup>[7,8]</sup>建立了溶液除湿空调除湿性能研究的实验装置, 通过实验研究了不同除湿盐溶液对空气带液的影响以及空气带液对室内环境的影响; 安守超等<sup>[9]</sup>和张良等<sup>[10]</sup>分别从实验和模拟的角度分析了空气流量、溶液流量对空气带液量的影响, 发现随空气流量或溶液流量增加, 空气带液量呈增长趋势。国内外学者通过实验和模拟研究发现, 可选择规整填料尽量避免空气带液现象, 规整填料上的溶液分布效果相对较

好, 能保证较好液膜的均匀性<sup>[11,12]</sup>; 也有学者提出控制溶液除湿器内空气的迎面风速<sup>[13]</sup>、采用具有较小溶液喷淋量的喷淋装置或改变除湿器流型能降低带液可能性<sup>[14,15]</sup>以及在除湿器上方设置除沫器, 对携带的液膜进行拦截过滤<sup>[16]</sup>。但以上方法只能一定程度降低空气带液的可能, 无法从根本上避免除湿器内空气和溶液直接接触, 出口空气会夹带液体的现象。此外, 也有学者<sup>[17,18]</sup>研究了膜式溶液除湿技术, 除湿器中的半透膜将湿空气和溶液分隔, 能彻底解决空气带液问题, 但同时也存在成本相对较高且除湿效率较低的问题。

本工作提出了一种溶液除湿器间歇运行的方法, 将溶液除湿器中送风过程与溶液喷淋过程分开进行, 当喷淋溶液对入口空气进行处理时不进行送风, 当空气被处理到满足除湿需求时进行送风, 但不喷淋溶液; 间歇式运行方式能避免喷淋溶液和空气直接接触时的对流流动, 从而降低空气和溶液相互流动时产生曳力的可能, 除湿过程中没有产生液滴的现象发生, 能有效解决空气带液问题。对溶液除湿器间歇运行进行数值模拟, 分析间歇运行的溶液除湿器除湿性能, 从而评估其可行性。

## 2 溶液除湿间歇运行方法

为了保证持续、稳定的送风状态, 本研究提出的间歇溶液除湿系统需要两台及以上的除湿器组合送风, 如图 1 所示, 以两台除湿器为例。除湿器 b 进行送风时, 除湿器 b 的风阀 V<sub>4</sub> 打开, 溶液喷淋阀 V<sub>2</sub> 闭合, 空气从

下至上流动,与填料层内持有的溶液进行热湿交换。与此同时,除湿器 a 进行除湿溶液喷淋,除湿器 a 的风阀  $V_3$  闭合,溶液喷淋阀  $V_1$  打开,溶液从上至下流动,对填料进行润湿。当除湿器 b 与被处理空气热湿交换之后,填料持有的溶液无法再满足除湿需求(或除湿器 a 中的填料被充分润湿)时,除湿器 b 停止送风开始进行喷淋。这个过程中,除湿器 b 的风阀  $V_4$  闭合,溶液喷淋阀  $V_2$  打开;除湿器 a 的风阀  $V_3$  打开,溶液喷淋阀  $V_1$  闭合。喷淋后从填料上流淌下来较低浓度的溶液可根据应用场合,利用填料塔再生或膜渗透再生等方法再生。

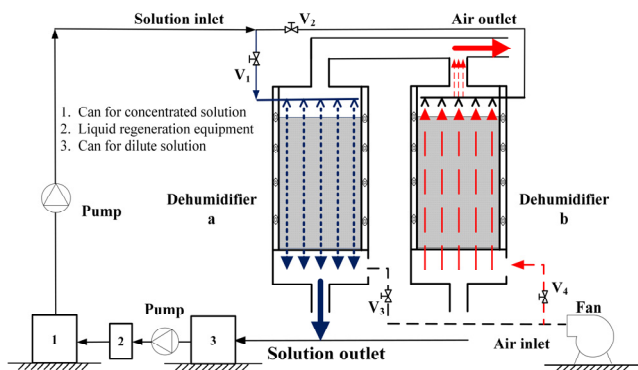


图 1 溶液除湿间歇运行方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of intermittent operation method for solution dehumidification

### 3 间歇式溶液除湿系统性能分析

溶液除湿器连续运行,送风和喷淋同时进行,虽能保证除湿效率在一定范围平稳不降低,但其空气带液现象却较为严重;间歇式运行,送风过程中停止喷淋,杜绝了空气带液问题。但空气与润湿后的填料传热传质,填料塔中未补充新的高浓度溶液,除湿效率受影响有所下降。因此利用间歇式溶液除湿的方式对湿空气进行除湿时,其除湿性能的主要影响因素为除湿器中填料塔的结构参数和除湿器的运行参数。

通过模拟的方法对结构参数(填料静持液量、填料高度)和运行参数(空气入口参数)进行研究,分析各参数对出口空气含湿量、温度和有效除湿时间的影响。有效除湿时间是指从溶液喷淋停止即开始送风的时刻,到除湿率小于某规定数值的时刻所经历的时长,在本研究中均指从开始送风到除湿率小于 0 所经历的时间。

#### 3.1 除湿器数值模型

为研究间歇式溶液除湿器的除湿性能及结构参数和运行参数对除湿性能的影响规律,建立了间歇式溶液除湿器数值模型,为该运行方式的除湿器填料静持液量、填料高度以及入口空气参数的选取提供指导依据。

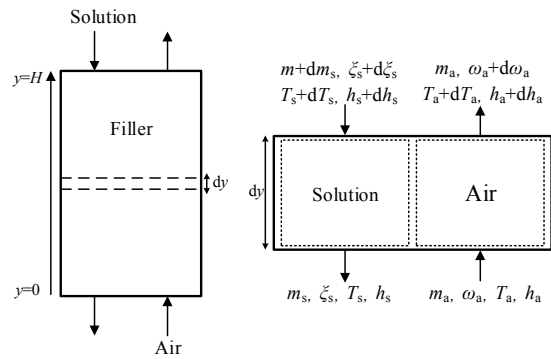


图 2 逆流除湿器热湿传递过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat and moisture transfer process of countercurrent dehumidifier

该除湿器模型包括喷淋工况和送风工况两个部分。不考虑填料传质系数的变化,将湿空气和溶液进行热湿交换的过程简化为一维非稳态的传热传质问题,沿着除湿器中湿空气的流动方向分成许多个微小控制体,取任意一段微元体  $dy$  作为研究对象,每一个微元控制体又可以分为湿空气部分和溶液部分,如图 2 所示。根据空气质量变化方程、空气能量变化方程、溶液质量变化方程、溶液能量变化方程、溶液溶质变化方程分析微元控制体中湿空气和溶液两个部分,如式(1)~(5)所示:

$$\frac{\partial \omega_a}{\partial \tau} = \frac{m_a H}{M_{a, \text{sum}}} \left\{ \frac{NTU}{H} (\omega_e - \omega_a) - \frac{\partial \omega_a}{\partial y} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h_a}{\partial \tau} = \frac{m_a H}{M_{a, \text{sum}}} \left\{ \frac{NTU}{H} [Le(h_e - h_a) + (1 - Le)r(\omega_e - \omega_a)] - \frac{\partial h_a}{\partial y} \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial m_s}{\partial \tau} = \frac{m_{s, \text{in}} H}{M_{s, \text{sum}}} \left\{ -\frac{\partial m_s}{\partial y} + \frac{m_a}{H} NTU (\omega_a - \omega_e) \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial x_s}{\partial \tau} = -\frac{H}{M_{s, \text{sum}}} \frac{\partial m_s x_s}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{m_a}{c_{p, s} M_{s, \text{sum}}} \left\{ -\frac{H}{m_a} \frac{c_{p, s} \partial m_s T_s}{\partial y} + c_{p, a} Le NTU (T_a - T_s) + NTU (\omega_a - \omega_e) r \right\} \quad (5)$$

其中,  $m$  为单位体积的质量(kg),  $T$  为温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $h$  为比焓(kJ/kg),  $\omega$  为含湿量(g/kg),  $y$  为沿高度方向的长度(m),  $H$  为填料高度(m),  $\tau$  为时间(s),  $C_p$  为比热容[kJ/(kg $\cdot^{\circ}\text{C}$ )],  $Le$  为路易斯数,  $M$  为总质量(kg),  $NTU$  为体积传质系数, 下标 sum 为总数, a 代表空气, s 代表溶液, e 代表平衡态, in 代表入口。

对任意微元控制体,使用隐式格式和逆风格式对式(1)~(5)进行离散,得到送风工况下溶液除湿热质交换过程代数方程,利用 MATLAB 编程对代数方程组进行数值求解。

#### 3.2 模型验证

用实验数据对间歇式除湿的模拟数据进行验证,如

图3所示。由图可看出,模拟结果与实验结果有一定偏差,随时间增加偏差逐渐减小,这主要是由于进行实验时,在湿空气与溶液进行热湿交换过程中,除湿器内的填料和PVC板并非绝热体,存在一定的蓄热性,因此溶液的温度上升较缓慢,导致实验前期的除湿率比模拟高。

实验数据与模拟数据的平均相对误差值为23.9%,表明所建立的除湿器动态模型模拟送风工况下的结果具有一定的准确性。

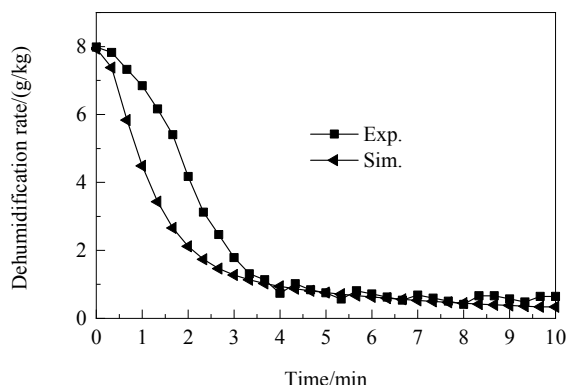


图3 间歇运行方法下除湿率模型预测值与实验值的比较

Fig.3 Comparison of simulated and experimental values of dehumidification rate under intermittent operation method

### 3.3 性能分析

模拟采用间歇式运行的方法,将除湿过程分为喷淋工况和送风工况,喷淋120 s后开始送风,参数设定见表1。

表1 模拟参数设定	
Table 1 Settings of simulation parameter	
Parameter	Value
Air flow rate/(kg/s)	0.1075
Temperature of fresh air/°C	30.6
Moisture content of fresh air/(g/kg)	18.03
Flow rate of solution/(kg/s)	0.22
Temperature of solution/°C	15
Concentration of CaCl <sub>2</sub> solution/%	38
Static liquid holding capacity/(kg/kg)	4.575
Cross sectional area of packing, A	0.6
Packing height, H/m	0.6

#### 3.3.1 不同填料静持液量对除湿性能的影响

对无纺布填料的静持液量大小进行实测,得到结果为4.674 kg/kg。不同填料静持液量(7.625, 6.100, 4.575, 3.050, 1.525 kg/kg)下的除湿性能如图4所示。由图可知,在除湿器刚开始送风时,不同填料静持液量下的出口空

气状态相同,温度均为20.19°C,含湿量均为8.36 g/kg。不同填料静持液量下的出口空气的含湿量随时间的推移逐渐上升。当填料静持液量为1.525 kg/kg时,除湿器仅部分时间对空气有除湿效果,该结果是由填料静持液量过低使溶液浓度下降过快导致。填料静持液量越大,除湿效果越好。

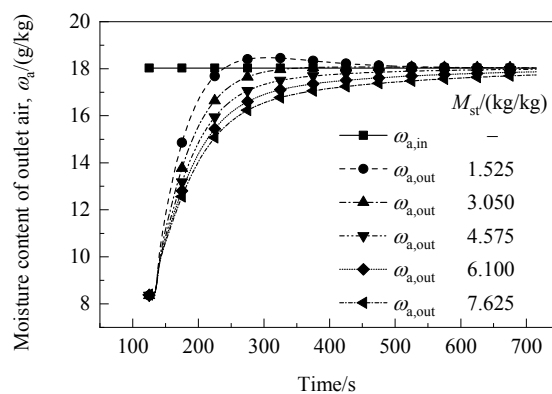


图4 不同填料静持液量下出口空气含湿量

Fig.4 Moisture content of outlet air under different static liquid holding capacity of fillers

不同填料静持液量下有效除湿时间如图5所示。由图可知,增加填料静持液量对有效除湿时间有一定的促进作用,除湿率大于2, 3, 4, 5 g/kg的有效除湿时间分别由70 s增至145 s、60 s增至105 s、50 s增至80 s、40 s增至65 s。

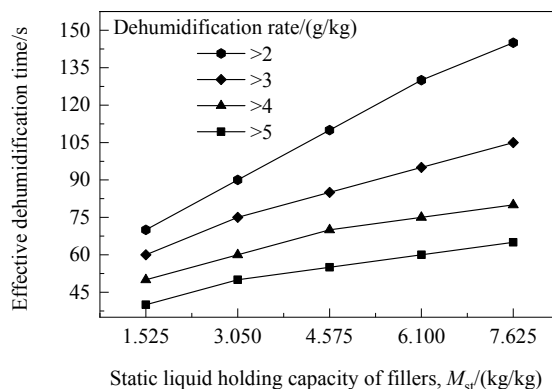


图5 不同填料静持液量下有效除湿时间

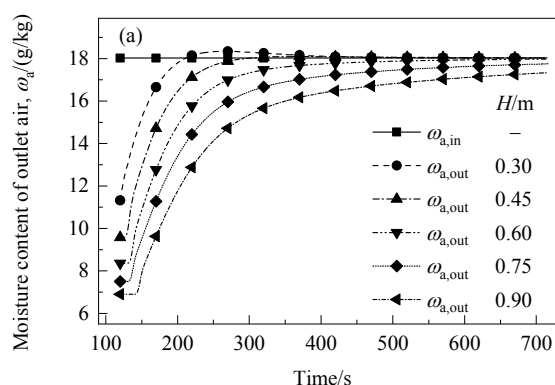
Fig.5 Effective dehumidification time under different static liquid holding capacity of fillers

综上,间歇式溶液除湿器性能参数(出口空气状态、有效除湿时间)随着填料静持液量的增大有一定提升,除湿效果有所提高。但从填料塔的流体力学性能考虑且填料的材质和结构参数等影响填料静持液量,持液量过大,填料层的空隙和气相流通截面减小,压降增大,处

理能力下降, 填料传质系数等参数降低, 反而会降低除湿效果。因此, 根据模拟的环境和条件, 建议将填料的静态持液量控制在 4.575~6.100 kg/kg。

### 3.3.2 填料高度对除湿性能的影响

根据填料塔的水力计算, 一般填料高度在 0.30~0.90 m。研究了 5 种不同填料高度(0.30, 0.45, 0.60, 0.75, 0.90 m)下的除湿效果。



不同填料高度下出口空气含湿量和温度如图 6 所示。由图可知, 在除湿器刚开始进行送风时, 填料高度越高, 出口空气含湿量和温度越低, 最大出口空气含湿量为 11.33 g/kg, 最低为 6.90 g/kg, 最高温度为 23.35 °C, 最低为 18.49 °C。在相同填料高度下, 随时间推移, 出口空气含湿量和温度逐渐增大。随填料高度增加, 空气的除湿和降温效果有了较大的改善。

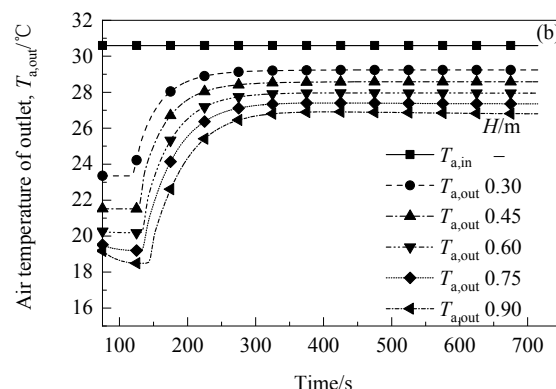


图 6 不同填料高度下出口空气含湿量和温度

Fig.6 Moisture content and temperature of outlet air at different packing heights

不同填料高度下有效除湿时间如图 7 所示。由图可知, 增加填料高度对有效除湿时间促进作用很大。填料高度从 0.30 m 增至 0.90 m 时, 除湿率大于 2, 3, 4, 5 g/kg 的时间分别增加了 190, 135, 110, 90 s。实际对填料高度进行设计时应考虑其对设备的成本以及体积的影响, 因此建议将填料高度控制在 0.45~0.75 m。

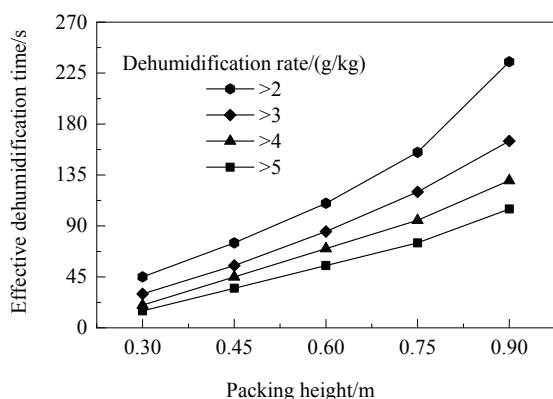


图 7 不同填料高度下有效除湿时间

Fig.7 Effective dehumidification time at different packing heights

### 3.3.3 空气入口参数对除湿性能的影响

夏热冬冷地区除湿需求大, 拟定除湿器在夏热冬冷地区运行, 本模拟方案入口空气参数根据夏热冬冷地区气候变化特点进行选取。入口空气温度范围在 20~35 °C

之间, 相对湿度范围在 40%~95%之间, 设置 C1~C5 五种入口空气状态, 分别为低温中湿(20 °C, RH60%)、低温高湿(20 °C, RH95%), 中温中湿(28 °C, RH60%)、高温低湿(35 °C, RH40%)及高温高湿(35 °C, RH80%)。

查找焓湿图可知 C2, C3 及 C4 三种入口空气状态含湿量基本相同。不同入口空气状态下出口空气含湿量如图 8 所示。由图可知, C2, C3 及 C4 三种入口空气状态中, 入口空气温度越低, 出口空气含湿量越小, 即当入口空气的含湿量大小基本相同时, 间歇溶液除湿器的除湿效果在初始阶段随着入口空气温度的降低而提高。

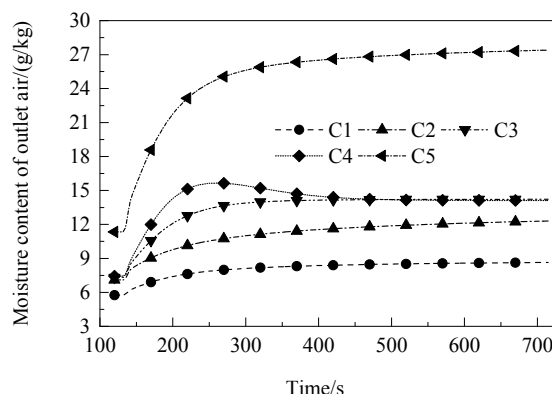


图 8 不同入口空气状态下出口空气含湿量

Fig.8 Moisture content of outlet air under different inlet air conditions

不同入口空气状态下出口空气温度如图 9 所示。由图可知,入口空气温度 35℃时,随入口空气相对湿度越高,降温效果越好,溶液温度上升越快,此时水蒸气液化潜热量下降幅度小于气液对流传热量的上升幅度,出口空气温度呈上升趋势。

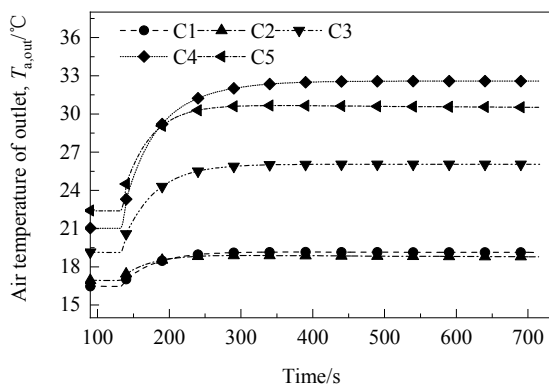


图 9 不同入口空气状态下出口空气温度  
Fig.9 Temperature of outlet air under different inlet air conditions

不同入口空气状态下的有效除湿时间如图 10 所示。入口空气状态的改变对有效除湿时间影响很大。对比 C2, C3 及 C4 三种状态,发现在入口含湿量基本相同的情况下, C2 状态时的有效除湿时间均远高于其他两种状态,表明相同含湿量下,空气温度越低越有利于除湿。

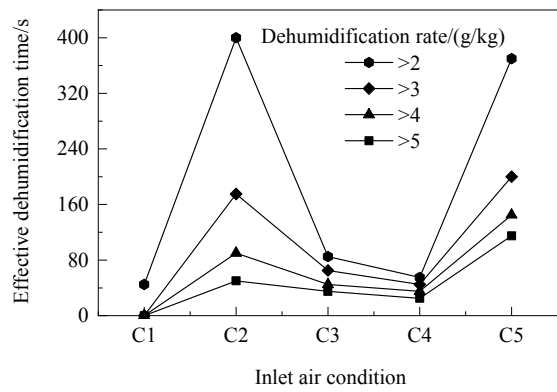


图 10 不同入口空气状态下有效除湿时间  
Fig.10 Effective dehumidification time under different inlet air conditions

4 间歇式溶液除湿组合送风分析

连续运行工况下,风量受填料塔液泛的限制。间歇式送风工况下,停止喷淋,风量上限提高,但处理风量受空气除湿要求限制,风量增大,空气与填料的热质传

递不充分,空气出口含湿量达不到要求,同时风量还受到塔内阻力影响。对于单体除湿器间歇运行,其工作过程是间断的,需多个除湿器协同工作,形成完整的连续送风过程,并维持一定的除湿效率,使出口含湿量达到要求。为保障溶液除湿间歇运行方法能够持续稳定送风,满足风量及除湿需求,进一步提出间歇式溶液除湿系统组合送风。选用固定周期运行控制的方法,模拟间歇式溶液除湿系统组合送风性能。模拟时入口空气参数、除湿器结构参数、喷淋溶液参数等相关因素均设定为固定值。

4.1 送风制度

通常情况下,为保证持续稳定送风,需配备 2 台或 3 台除湿器交替工作。四种送风制度的示意图如图 11 所示。S1 制度(一喷一送)采用 2 台除湿器,送风全程中,仅单台除湿器送风,一台除湿器处于送风工况,则另一台除湿器处于喷淋工况; S2 制度(两喷一送)采用 3 台除湿器,送风全程中,仅单台除湿器送风,一台除湿器处于送风工况,则另外两台除湿器处于喷淋工况; S3 制度(并联交错送风)采用 3 台除湿器,在送风全程中,始终有双除湿器处于送风状态,每台除湿器的送风状态可分为 2 个阶段(主除湿器、副除湿器); S4 制度(半并联交错送风)采用 3 台除湿器,在送风全程中, 2/3 时间为双除湿器送风, 1/3 时间为单除湿器送风。

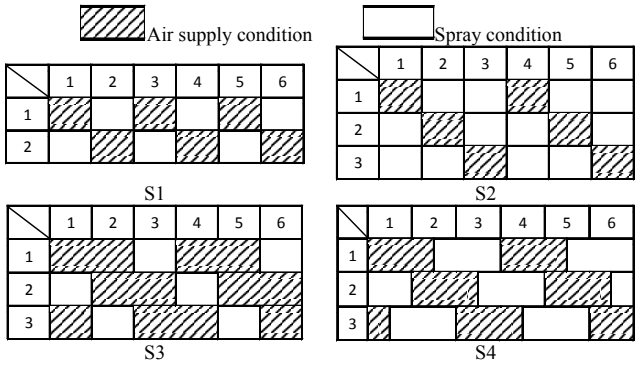


图 11 四种送风制度的示意图  
Fig.11 Schematic diagrams of four air supply systems

表 2 不同送风制度的操作参数				
Table 2 Operating parameters of different air supply systems				
Air supply system	Spray cycle	Air flow rate in air supply cycle of single dehumidifier	Air supply cycle	Total cycle
S1	$\tau_s$	$V_d=V_f$	$t_f=\tau_s$	$2\tau_s$
S2	$\tau_s$	$V_d=V_f$	$t_f=\tau_s/2$	$1.5\tau_s$
S3	$\tau_s$	$V_d=0.5V_f$	$t_f=2\tau_s$	$3\tau_s$
S4	$\tau_s$	$V_d=1.5V_f$	$t_f=\tau_s$	$2\tau_s$

参考高炉热风炉的操作制度<sup>[19]</sup>,各送风制度操作参

数见表 2, 其中,  $V_d$  为单体除湿器的空气流量,  $V_f$  为总需求空气流量,  $t_f$  为送风周期。

4.2 结果分析

在除湿器数学模型的基础上, 利用 MATLAB 软件进行编程, 建立了间歇溶液除湿系统组合送风的仿真模型。将填料静持液量设为 4.575 kg/kg, 填料高度设为 0.60 m, 入口空气状态模拟参数设为 20℃和 RH95%。仿真参数设定如表 3 所示。计算了间歇溶液除湿组合送风的数值解, 分析了不同送风制度下间歇式溶液除湿系统的除湿性能。

表 3 模拟参数设定  
Table 3 Simulated parameter settings

Basic parameter	Set point
Total air flow/(kg/s)	0.1075
Fresh air temperature/°C	20
Relative humidity of fresh air/%	95
Solution flux/(kg/s)	0.22
Solution temperature/°C	15
Concentration of CaCl <sub>2</sub> solution/%	38
Static liquid holding capacity of packing/(kg/kg)	4.575
Cross sectional area of packing, $A$	0.09
Packing height, $H$ /m	0.60

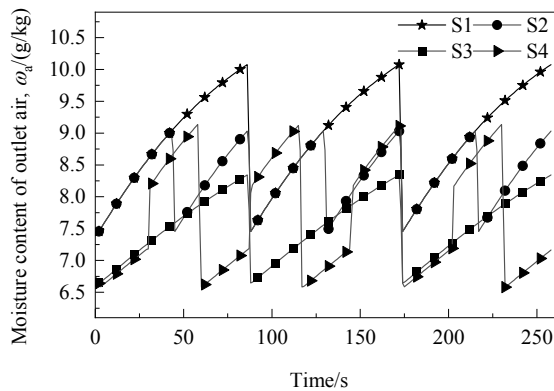


图 12 不同送风制度下组合系统出口空气含湿量  
Fig.12 Moisture content of outlet air of combined system under different air supply systems

不同送风制度下组合系统出口空气含湿量如图 12 所示。由图可知, S3 制度出口空气含湿量平均值为 7.54 g/kg, 波动范围为 6.65~8.34 g/kg, 换向次数为 3 次/周期; 由于双除湿器送风,  $V_f$  不变的情况下, 单体除湿器的空气流量  $V_d$  为  $V_f$  的一半, 溶液的吸湿能力下降较慢, 因此出口空气含湿量比仅用一台除湿机进行送风要低, 空气湿度和除湿速率的波动也相对较小。假设要求出口空气含湿量降低到 8.5 g/kg, S1, S2, S4 制度运行时达到该要求的时间占总送风时间的百分比分别为 30.35%,

60.70%, 70.04%, 而 S3 制度运行时可始终满足该要求, 其送风周期为 172 s, 单体除湿器的喷淋周期为 86 s。

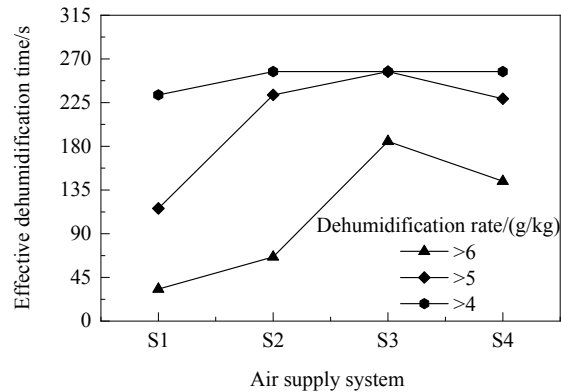


图 13 不同送风制度下组合系统有效除湿时间  
Fig.13 Effective dehumidification time of combined system under different air supply systems

不同送风制度下组合系统的有效除湿时间如图 13 所示。由图可知, 4 种不同送风制度组合系统均运行至 258 s, 在相同喷淋周期、总空气流量的条件下, 除湿率越大, 有效除湿时间越短, 除湿效果越好。除湿率大于 4, 5, 6 g/kg 时, S3 的有效除湿时间均最大; 除湿率大于 5 g/kg 时, S3 的有效除湿时间为 257 s, 即 S3 制度运行期间基本保持除湿率大于 5 g/kg。

综上可知, 从出口空气含湿量和有效除湿时间分析, S3 组合送风制度明显优于其他送风制度, 能满足基本的除湿需求。

5 结 论

提出了一种溶液除湿器间歇运行方法, 建立了除湿器数值模型, 通过模型模拟结果与实验结果的对比较验证了其可行性。基于所验证的数值模型, 分析溶液除湿器间歇运行系统设计参数(填料静持液量和填料高度)以及运行参数(入口空气状态温度和含湿量)对除湿性能的影响, 对不同的送风制度的运行效果进行模拟, 得到以下结论:

- (1) 在一定范围内增加填料持液量和填料高度有利于降低间歇式运行系统的出口空气含湿量, 增大有效除湿时间。建议将填料静持液量控制在 4.575~6.100 kg/kg 范围内, 填料高度控制在 0.45~0.75 m 范围内。
- (2) 入口空气为低温高湿状态(20℃, RH95%)时, 送风工况的除湿性能参数以及出口空气状态明显优于其他状态, 表明该间歇式运行方式更适合处理低温高湿状态下的空气。
- (3) 从防止空气带液的角度考虑, 溶液除湿器间歇



运行方法将送风与溶液喷淋分开运行,杜绝除湿过程中液沫的产生,解决空气带液现象。

(4) S3(并联交错送风)制度的除湿效果最佳,送风全程基本保持除湿率大于 5 g/kg,除湿器喷淋工况和送风工况进行切换的次数最少,能够保证持续送风,且可以满足绝大部分场所的除湿需求。

## 参考文献

- [1] 黄志甲,王永泰.不同填料溶液除湿器热质传递过程的数值模拟[J].流体机械,2013,41(6):54-57.  
Huang Z J, Wang Y T. Numerical simulation of heat and mass transfer process in liquid dehumidifier with different packing [J]. Fluid Machinery, 2013, 41(6): 54-57.
- [2] Fu H X, Liu X H. Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality [J]. Building and Environment, 2017, 116: 158-172.
- [3] 陈煜健,裴清清,许贵泉,等.溶液除湿空调空气中带液离子检测方法及其应用[J].建筑热能通风空调,2009,28(3):37-40.  
Chen Y J, Pei Q Q, Xu G Q, et al. A method to detect liquor ion carried by liquid desiccant handling air and its application [J]. Building Thermal Air Conditioning, 2009, 28(3): 37-40.
- [4] Singh R K, Galvin J E, Sun X. Three-dimensional simulation of rivulet and film flows over an inclined plate: effects of solvent properties and contact angle [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 142: 244-257.
- [5] 谷芳,刘春江,袁希钢,等.倾斜波纹板上液膜流动的CFD研究[J].化工学报,2005,56(3):462-467.  
Gu F, Liu C J, Yuan X G, et al. CFD study of liquid film flow on inclined corrugated plates surface [J]. CIESC Journal, 2005, 56(3): 462-467.
- [6] 吴思其,蔡来,袁美晨,等.逆向气流对薄膜流动特性影响研究[J].化学工程,2016,44(12):45-49.  
Wu S Q, Cai L, Yuan M C, et al. Influence of counter-current airflow on the film flow characteristics [J]. Chemical Engineering, 2016, 44(12): 45-49.
- [7] 王顺林.溶液除湿空调除湿性能的实验研究[J].发电与空调,2013,34(2):63-65.  
Wang S L. Experimental study of dehumidification performance of liquid desiccant air conditioning [J]. Power Generation and Air Conditioning, 2013, 34(2): 63-65.
- [8] 王顺林.液体除湿空调除湿量与空气带液量的实验研究[C]//中国建筑学会暖通空调分会,中国制冷学会空调热泵专业委员会.全国暖通空调制冷2010年学术年会论文集.北京:中国制冷学会,2010:1.  
Wang S L. Experimental study on dehumidification capacity and air-zone liquid volume of liquid dehumidification air conditioning [C]//HVAC Branch of China Architectural Society, Air-conditioning Heat Pump Committee of China Refrigeration Society. Papers of the National Annual Conference on HVAC Refrigeration 2010. Beijing: China Refrigeration Society, 2010: 1.
- [9] 安守超,王谨,柳建华,等.液体除湿填料塔液体夹带和压降问题研究[J].暖通空调,2007,37(4):109-112.  
An S C, Wang J, Liu J H, et al. Study on liquid entrainment and pressure drop in liquid desiccant packing tower [J]. Journal of HV and AC, 2007, 37(4): 109-112.
- [10] 张良,柳建华,张海江,等.液体除湿丝网波纹填料应用特性研究[J].流体机械,2011,39(6):48-52.  
Zhang L, Liu J H, Zhang H J, et al. Study on application characteristics of corrugated packing with liquid dehumidification wire mesh [J]. Fluid Machinery, 2011, 39(6): 48-52.
- [11] 李相鹏,陈冰冰,高增梁.规整填料表面液膜流动特性的数值模拟[J].化工学报,2013,64(6):1925-1933.  
Li X P, Chen B B, Gao Z L. Numerical simulation on hydraulic characteristics of liquid film on structured packing surface [J]. CIESC Journal, 2013, 64(6): 1925-1933.
- [12] 黄志甲,罗良,柯瑞,等.亲水无纺布PVC复合规整填料除湿性能实验[J].化工学报,2019,70(3):913-921.  
Huang Z J, Luo L, Ke R, et al. Experiments on dehumidification performance of hydrophilic non-woven PVC composite structured filler [J]. CIESC Journal, 2019, 70(3): 913-921.
- [13] 高煜,张欢,由世俊,等.利用蒸发式冷凝器再生除湿溶液时传质系数的实验研究[J].暖通空调,2012,42(1):65-68,50.  
Gao Y, Zhang H, You S J, et al. Experimental study on mass transfer coefficient of dehumidification solution regeneration with evaporative condenser [J]. Journal of HV and AC, 2012, 42(1): 65-68, 50.
- [14] 常晓敏.溶液除湿(再生)装置性能研究综述[C]//中国建筑学会暖通空调分会,中国制冷学会空调热泵专业委员会.全国暖通空调制冷2006年学术年会论文集.合肥:中国制冷学会,2006:1.  
Chang X M. A summary of research on performance of solution dehumidification (regeneration) device [C]//HVAC Branch of China Architectural Society, Air Conditioning Heat Pump Committee of China Refrigeration Society. Papers of the 2006 Annual Academic Conference on HVAC Refrigeration. Hefei: China Refrigeration Society, 2006: 1.
- [15] 张海江,柳建华,张良,等.叉流除湿器传质性能实验研究[J].制冷学报,2010,31(6):21-27.  
Zhang H J, Liu J H, Zhang L, et al. Experimental study on mass transfer performance of cross-flow dehumidifier [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(6): 21-27.
- [16] 沈胜强,甄妮,牟兴森.丝网除沫器除沫效率的数值模拟[J].核动力工程,2014,35(5):172-177.  
Shen S Q, Zhen N, Mou X S. Numerical simulation of foam removal efficiency of wire mesh demister [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(5): 172-177.
- [17] Zhang L Z. An analytical solution to heat and mass transfer in hollow fiber membrane contactors for liquid desiccant air dehumidification [J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133(9): 2001-2008.
- [18] Bai H Y, Zhu J, Chen Z, et al. State-of-art in modelling methods of membrane-based liquid desiccant heat and mass exchanger: a comprehensive review [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 445-470.
- [19] 王冰.基于数学模型的高炉热风炉合理工艺周期的分析[J].应用能源技术,2015,(3):27-30.  
Wang B. Analysis of reasonable process cycle of blast furnace hot blast stove based on mathematical model [J]. Application of Energy Technology, 2015, (3): 27-30.