文章编号:1001-2060(2024)09-0134-10

# 湿空气接触式换热过程建模与分析

史维秀1,李 敏1,潘利生2

(1. 北京建筑大学 环境与能源工程学院,北京 100044;

2. 中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室,北京 100190)

摘 要:以湿空气为研究对象,提出了一种空气全热吸收装置,建立了空气与盐溶液换热的理论模型,通过二分法 分析换热过程,研究了直接接触式换热装置中空气进口温度、空气相对湿度和盐水进口温度、盐水质量流量对热质 交换性能,以及凝结水量和换热量的影响。研究结果表明:空气进口温度升高和相对湿度增加会加强热质交换程 度;盐水进口温度升高会削弱热质交换程度,而盐水质量流量的增加可以增强传质传热。

关键 词:低品位热源;直接接触式换热;空气全热;理论建模

热能工程

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2024.09.016

[引用本文格式] 史维秀,李 敏,潘利生. 湿空气接触式换热过程建模与分析[J]. 热能动力工程, 2024, 39(9):134-143. SHI Weixiu, LI Min, PAN Lisheng. Modeling and analysis of wet air contact heat transfer process[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9):134-143.

# Modeling and Analysis of Wet Air Contact Heat Transfer Process

SHI Weixiu<sup>1</sup>, LI Min<sup>1</sup>, PAN Lisheng<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, Post Code: 100044; 2. State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190)

**Abstract**: A total heat absorption device for humid air was proposed as the research object, and a theoretical model for heat exchange between air and salt solution was established. The heat transfer process was analyzed using the binary method. The effects of air inlet temperature, relative humidity of air, inlet temperature of salt water and mass flow rate of salt water in a direct contact heat exchange device on heat and mass exchange performance as well as condensation water volume and heat transfer were studied. The research results indicate that an increase in air inlet temperature of salt water inlet will enhance the heat and mass exchange degree; the increase in temperature of salt water inlet will weaken the degree of heat and mass exchange, while the increase in mass flow rate of salt water can enhance mass and heat transfer.

Key words: low grade heat source, direct contact heat exchange, total heat of air, theoretical modeling

收稿日期:2023-08-19; 修订日期:2023-10-26

基金项目:北京市教育委员会科学研究计划资助项目(KM202310016008);北京市自然科学基金资助项目(3192042)

Fund-supported Project: R&D Program of Beijing Municipal Education Commission (KM202310016008); Beijing Natural Science Foundation (3192042) 作者简介: 史维秀(1983 - ), 女, 北京建筑大学副教授.

通信作者:潘利生(1982-),男,中国科学院力学研究所副研究员.

*	<u> </u>		11/		-
· / ·			- E I	ιн	н
45	<b>T</b> -	5	ı.π	·н	н

*t*—温度,℃; x-盐水质量百分比浓度,%; *tt*—微元温度.℃: p一压力,kPa; m—质量流量.kg/s: M-质量分数: H—焓,kJ; rh—相对湿度; h—比焓,kJ/kg;  $\eta_{\rm h}$ 一等效焓效率: d-含湿量,g/kg; q-微元模块换热量,kW;  $c_n$ —比定压热容,kJ/(kg·℃); 0-换热量.kW: 下标 a—空气; out—出口; ae—空气平衡状态: ice—冰点: s--盐水溶液: sat—饱和点: in—进口。

# 引 言

环境中低品位热能储量巨大,但一般将其视为 不可用能源。空气源热泵是比较熟知的利用环境中 低品位热能的技术<sup>[1-3]</sup>。空气作为常见的低品位热 源,利用盐溶液与空气直接接触换热过程可充分回 收其全热,提高对于低品位热源的回收利用率。

采用直接接触式换热的方式,相较于传统的间 壁式换热省去了物理屏障(如间壁),同时还具有耐 腐蚀、结垢少、结构简单、耗材少和运行成本低等优 点,为此直接接触式换热装置广泛应用于海水淡 化<sup>[4-5]</sup>、太阳能热利用等诸多领域<sup>[6]</sup>。

近年来,低品位能源的利用受到越来越多研究 人员的关注。周苇杭等人<sup>[7]</sup>提出一种低品位热驱 动的工业建筑除湿降温空调系统,从而实现低品位 热的梯级深度利用。周君明等人<sup>[8]</sup>利用建立余热 驱动溶液除湿蒸发冷却新风系统的模拟仿真平台, 通过模型模拟系统工作特性。张凡等人<sup>[9]</sup>提出了 一种低品位热能驱动的溶液除湿蒸发冷却空调系 统,研究了溶液空气参数对该系统的影响。李逸飞 等人<sup>[10]</sup>提出了适用于烟气回收的逆流式蒸发冷凝 型全热换热器。王馨等人<sup>[11]</sup>为了提升全热回收装置的除湿性能,对双泵单流道的全热回收装置结构 形式进行优化。周金亮等人<sup>[12]</sup>将蒸发冷凝技术引 入全热回收空气处理系统,开发出一种高效节能型 机组,并对其进行性能实验研究。

张衡<sup>[13]</sup>基于体积有限查分模型提出 ε-NTU 模型,以 Le(路易斯数)和 NTU(传质单元数)作为输入条件,通过合理简化得到逆流除湿器除湿效率和 全热效率的数学解析式。这种方法并不能从理论上 解释传热与传质之间相互影响与耦合。

在全热回收过程中,盐溶液和空气参数都会随着热质交换过程的进行发生变化,因此建立较为准确的空气和盐水传质传热的理论模型显得尤为重要。本文提出了一种新型的湿空气全热吸收利用系统,该系统消除了冷热流体间的换热壁面,减少了壁面腐蚀的风险,提升了换热过程的稳定性与可靠性。 采用 MATLAB 软件平台,基于质量守恒定律与能量守恒定律构建各部件的数学模型,通过改变湿空气和盐水溶液的初始参数,研究了系统运行参数对该系统换热性能的影响规律。

# 1 理论模型建立

# 1.1 物理模型

所研究的接触式空气全热回收装置采用接触式 空气全热吸收装置错流结构,该结构通过依靠重力 自流的盐溶液与湿空气在全热回收装置中直接交叉 接触换热。如图1所示。溶液借助溶液泵在回收装 置的顶端喷淋,自上而下流动至底部溶液槽。空气 以错流的形式与盐溶液直接接触进行传热传质。



图 1 接触式空气全热吸收装置 c<sub>p,s,out</sub>示意图 Fig. 1 Schematic diagram of c<sub>p,s,out</sub> of contact air total heat absorption device

全热吸收装置中的换热过程是一个复杂的传热 传质过程,传质的推动力是空气中水蒸气的分压力 与溶液表面饱和边界层的蒸汽压力之差,传热的推 动力是空气与盐水溶液间的温度差。

# 1.2 动态传质过程

在传质传热的过程中时刻发生着热质交换,空 气的换热量与盐水的换热量时刻相等,在吸热、吸水 的过程中,盐水温度和浓度都处于动态变化中,所以 比热容等物性参数也不固定,对于盐水侧换热量和 出口温度的求解要综合考虑盐水物性参数的变化。

采用划分微元模块的思路,将空气全热吸收过 程假定为逆流去分析。同时,为了得到精准的计算 结果,采用寻找窄点位置的方法去获取窄点处的温 差。微元模块热质交换示意图如图2所示。图2表 现的是在空气全热吸收的过程中,空气和盐水温度 对应的变化曲线,与饱和温度线交叉的位置即为窄 点温差,也是开始形成凝结水的位置。





将空气进出口的温度差分成若干份,每个模块 单元都能计算出对应的温差。空气在与盐水换热的 过程中,由于水蒸气分压差的存在,时刻存在着水蒸 气的传递,当达到凝结条件时会出现凝结出水的现 象。水蒸气传递量是根据水蒸气分压达到平衡时传 递的水蒸气量得到。

当空气质量流量不同时,每个模块空气出口温 度和盐水进口温度的差值都在改变,通过寻找窄点 位置的方法锁定最小温差所在位置,这个位置对应 的温差即为最小温差。

# 1.3 数学模型

湿空气的最大含湿量是指其在饱和状态下的含 湿量,根据已知温度和压强,在干度等于1的条件下 通过空气物性参数计算得出,计算式为:

$$d_{a} = d_{a,max} \times rh_{a}$$
 (1)  
式中: $d_{a}$ —湿空气含湿量,g/kg; $d_{a,max}$ —湿空气的最  
大含湿量,g/kg; $rh_{a}$ —湿空气的相对湿度。

氯化钠溶液的浓度基于氯化钠溶液相图中氯化 钠溶液的温度和浓度都未到达共晶点之前的状态点 求得。

 $t_{s,ice} = -36.97 x_s^2 - 57.28 x_s + 0.1037$  (2) 式中: $t_{s,ice}$ —氯化钠溶液的结冰点, ℃; $x_s$ —氯化钠溶液的质量百分比浓度, %。

拉乌尔定律是物理化学的基本定律之一,广泛 应用于蒸馏和吸收等过程的计算中,可表述为,一定 温度下,稀溶液溶剂的蒸汽压等于纯溶剂的蒸汽压 乘以溶液中溶剂的摩尔分数。所以,在计算氯化钠 溶液中水的蒸汽压时,用纯水的蒸汽压乘以氯化钠 溶液中水的摩尔分数即可求得。

纯水的蒸汽压:

$$p_{\rm H_20} = 10^{(7.074\,06 - (\frac{1\,657.46}{227.02 + t_{\rm H,0}}))} \tag{3}$$

$$p_{s,H_{20}} = p_{H_{20}} \times k \tag{4}$$

$$k = \left(\frac{1 - x_{\rm s}}{18}\right) / \left(\frac{1 - x_{\rm s}}{18} + \frac{x_{\rm s}}{58.5}\right) \tag{5}$$

式中: $p_{H_{20}}$ —纯水的蒸汽压,kPa; $p_{s,H_{20}}$ —氯化钠溶液 中水的蒸汽压,kPa; $t_{H_{20}}$ —纯水的温度,C;k—氯化 钠溶液中水的摩尔分数。

湿空气中水的蒸气压由当地压强和湿空气各组 分质量分数决定:

$$p_{a,H_{2}0} = p_a \times \frac{M_{H_{2}0}}{M_{N_2} + M_{O_2} + M_{H_{2}0}}$$
(6)

式中: $p_{a,H_{20}}$ 一湿空气中水蒸气分压, $kPa;p_{a}$ 一湿空气的压强, $kPa;M_{H_{20}}$ 一湿空气中水分的质量分数;  $M_{N_{2}}$ 一湿空气中氮气的质量分数; $M_{O_{2}}$ 一湿空气中氧 气的质量分数。

湿空气和盐溶液的错流热质交换过程遵循最基本的能量守恒和质量守恒(包括水分守恒和溶质守

恒)关系。所采用的表征性能的参数为等效焓效 率,计算式为:

$$\eta_{\rm h} = \frac{h_{\rm a,in} - h_{\rm a,out}}{h_{\rm a,in} - h_{\rm ae,in}} \tag{7}$$

式中:*h*<sub>a,in</sub>一空气进口焓值, kJ/kg; *h*<sub>a,out</sub>一空气出口 焓值, kJ/kg; *h*<sub>ae,in</sub>一空气平衡时的焓值, kJ/kg。

空气出口焓值计算式为:

$$h_{\mathrm{a,out}} = (1 - \eta_{\mathrm{h}})h_{\mathrm{a,in}} + \eta_{\mathrm{h}}h_{\mathrm{ae,in}}$$
(8)

根据溶液和湿空气中总水分的质量守恒关系, 可以得到出口溶液的质量流量为:

$$m_{s,out} = m_{s,in} + (m_{a,in} - m_{a,out})$$
 (9)  
式中: $m_{s,out}$ —盐水溶液出口质量流量, kg/s; $m_{s,in}$ —  
盐水溶液进口质量流量, kg/s; $m_{a,in}$ —空气进口质量  
流量, kg/s; $m_{a,out}$ —空气出口质量流量, kg/s。

根据溶质质量守恒关系,可以得到出口溶液的 质量百分比浓度:

$$x_{\rm out} = \frac{m_{\rm s,in}}{m_{\rm s,out}} x_{\rm in} \tag{10}$$

式中:x<sub>out</sub>一盐水溶液出口质量百分比浓度,%;x<sub>in</sub>一盐水溶液进口质量百分比浓度,%。

氯化钠溶液的比定压热容与温度和质量百分比 浓度的关系:

$$c_{p,s} = \sum_{n=0}^{2} \sum_{m=0}^{5} A_{n,m} t^{n} x^{m}$$
(11)

式中: $c_{p,s}$ 一盐水溶液的比定压热容, $kJ/(kg \cdot C)$ 。 盐溶液比定压热容方程系数如表1所示。

# 表1 盐水溶液比定压热容方程的系数(A<sub>n</sub>)

Tab. 1 The coefficient  $(A_{n,m})$  of specific heat capacity

equation at constant pressure for saline solution

	m				
n	0	1	2		
0	2.731	-0.007 194	$7.284 \times 10^{-5}$		
1	0.564 5	0.001 332	$-2.2 \times 10^{-5}$		
2	-0.084 18	$-3.301 \times 10^{-5}$	$1.42 \times 10^{-6}$		
3	0.005 1	$-2.289 \times 10^{-6}$	$-2.652 \times 10^{-8}$		
4	-0.000 139 45	7.529 × 10 $^{-8}$	-		
5	$1.49 \times 10^{-6}$	_	-		

根据湿空气侧的焓差计算得到换热器中的换

热量:

$$Q = m_{a,in} \times (h_{a,out} - h_{a,in}) - (m_{a,in} - m_{a,out}) \times h_{water}$$
(12)

根据能量守恒和质量守恒可以计算得到出口溶 液的温度:

$$t_{\rm s,out} = \frac{q}{m_{\rm s,in} \times c_{p,s}} + t_{\rm s,in}$$
(13)

上述理论模型可用于分析空气和盐水直接接触 传质传热过程。通过在"解"的范围内不断二分取 中间点,判断范围端点和中间点满足要求的程度,进 而构建新的"解"的范围,经过若干次迭代后获得满 足精度要求的"解"。二分法不需要对函数进行求 导或计算高阶项,通过迭代即可获得满足精度要求 的"解"。空气和盐水传质传热理论模型框图如图 3 所示。





Fig. 3 Block diagram of theoretical model of mass and

#### heat transfer in air and salt water

空气和盐水之间传质量的理论计算模型框图如 图 4 所示。



# 图4 空气和盐水传质量的理论模型框图

Fig. 4 Block diagram of theoretical model of mass transfer in air and salt water

# 2 结果与分析

# 2.1 空气参数对换热装置性能的影响

空气参数的变化影响空气全热吸收装置的运行 参数与热质交换的性能。研究环境空气参数对于换 热装置性能的影响时,选择其他参数不变而环境空 气参数不同的一系列工况,本研究选择环境空气温 度范围为-5~5℃,空气相对湿度为100%,95%, 90%,85%和80%5种工况进行性能分析。

图 5 为空气进口温度和相对湿度对空气出口温度的影响曲线。由图可知,空气进口温度的升高和 相对湿度的增大均使得空气出口温度升高,对换热 装置的换热起到了积极作用。



humidity on air outlet temperature

图 6 为盐水的出口温度随空气进口温度和相对 湿度的变化曲线。盐水出口温度升高说明随着空气 进口温度的升高,装置的换热效果逐渐增强,空气进 口温度的升高将有助于提高换热温差,增强传热的 驱动力。从图中可以看出,空气相对湿度的增加对 盐水出口温度的影响不大。



Fig. 6 Influence of air inlet temperature and relative humidity on salt water outlet temperature

空气进口温度和相对湿度对换热量的影响如图 7 所示。全热吸收装置的换热量随空气进口温度的 增大而不断增加,但是空气相对湿度对换热量的影 响不明显。在换热器内,空气与盐水溶液之间存在 温度差异,这种差异驱动了热量传递的过程。当空 气进口温度升高时,空气与盐水溶液之间的温差增 大,使得热量传递的驱动力增强,从而导致换热量 增加。



图 7 空气进口温度和相对湿度对换热量的影响 Fig. 7 Influence of air inlet temperature and relative humidity on heat transfer

图 8 为空气全热吸收装置的空气除湿量随空气 进口温度和相对湿度的变化曲线。除湿量反映了装 置传质能力的强弱,表示的是含有 1 kg 干空气的湿 空气中水的减少量。由图可见,空气温度越高,相对 湿度越大传质能力越强。



Fig. 8 Influence of air inlet temperature and relative humidity on dehumidification capacity

图 9 是热质交换过程中凝结水量随空气进口温 度和相对湿度的变化曲线。结合图 8 可以看出,凝 结水量与除湿量的变化趋势相同。





### 2.2 盐水参数对换热装置性能的影响

盐水的温度直接关系到换热强度,盐水温度在 -15~-5℃的范围内变化,保持其他参数不变,分 析换热器性能的变化趋势。同时,盐水的质量流量 也决定了热质交换进行的程度。盐水进口温度对空 气出口温度及盐水出口温度的影响如图 10 和图 11 所示。盐水温度的提高使得空气出口的温度增加而 盐水出口的温度略微降低。盐水进口温度从 -15℃升至-5℃,空气出口温度从-6.6℃升至 -1.3℃,升高了5.3℃;盐水出口温度从4.01℃降 至4.00℃。由于盐水温度的升高使得换热器初始 参数换热温差降低,导致换热量减小。同时,盐水溶 液的比热容比空气高,导致溶液的进出口温差减小, 进而导致盐水出口温度略微降低。



图 10 盐水进口温度对空气出口温度的影响 Fig. 10 Influence of salt water inlet temperature on air outlet temperature



图 11 盐水进口温度对盐水出口温度的影响 Fig. 11 Influence of salt water inlet temperature on salt water outlet temperature

盐水进口温度对换热量的影响如图 12 所示。 盐水进口温度升高导致换热温差减小,而换热的驱 动力由温差决定。所以,随着盐水温度升高,空气全 热吸收装置的换热量降低。盐水溶液温度升高时, 其内部的分子运动速度加快,分子间的碰撞频率增 加,这可能导致溶液内部的能量分布更加均匀,从而 减少了溶液与空气之间的温差。温差是热量传递的 主要驱动力,温差减小意味着热量传递的动力减弱,



盐水进口温度对除湿量和凝结水量的影响如图 13、图 14 所示。



图 13 盐水进口温度对除湿量的影响

Fig. 13 Influence of salt water temperature on dehumidification capacity



盐水进口温度是影响溶液水蒸气分压的重要因 素,而空气中水蒸气分压力与溶液表面水蒸气分压 力之差为空气、溶液传质过程的驱动力。随着盐水 进口温度的升高,溶液表面水蒸气压力升高,空气水 蒸气分压力不变,二者间的差值变小,装置的传质能 力降低,空气除湿量减少,凝结水量也在减少。

盐水进口质量流量对换热量和凝结水量的影响 如图 15 和图 16 所示。随着盐水的质量流量增加, 换热量也在增加,说明盐水流量的增加提高了溶液 的接触反应量,增强了空气与盐水的热交换程度,增 加了进行热交换的热量。换热量增加导致溶液表面 的平均温度和压力的升高,空气的水蒸气分压力不 变,则溶液的表面压力和水蒸气的压力差变大,导致 凝结水量增加。



water on heat transfer





### 2.3 全热吸收过程分析

分析空气和盐水参数改变条件下,不同工况下 空气全热吸收过程中的凝结水量和换热量的变化 过程。

全吸热过程中空气进口温度对凝结水量的影响 如图 17 所示。图 17 显示,空气温度越高,凝结水的 速度越快,同时凝结水量越多。这是因为,空气温度 的升高导致空气与溶液之间的温度差增大,导致溶 液的平衡温度升高,溶液表面温度的升高会提升溶 液表面蒸汽压力,溶液表面的蒸汽压力和水蒸气压 力差变大加强了溶液和空气之间的传质驱动力,最 后导致溶液向空气的传质增加。所以,空气全热吸 收过程随着空气温度的升高而持续时间变长,同时 换热量增多。



Fig. 17 Influence of air inlet temperature on condensed water volume during total heat absorption

全热吸热过程中空气进口温度对换热量的影响 如图 18 所示。空气温度越高,凝结水的形成进程越 提前,凝结水形成过程的换热量逐渐增大。对于单 一工况,凝结出水的换热量明显高于未凝结水时的 换热量。

图 19 为全热吸收过程中空气进口相对湿度对凝结水量的影响。结果显示,当空气进口相对湿度为 100% 时,换热过程已有水凝结,随着空气相对湿度的降低空气侧的水蒸气分压力逐渐减小,导致凝结水量在减少。

图 20 为换热过程中盐水进口温度对换热量的 影响曲线。曲线中的拐点是不同的盐水温度工况 下,换热过程中空气中水分凝结的时刻。可以看出, 盐水温度越低,换热量越大,凝结水量越多。



Fig. 18 Influence of air inlet temperature on heat transfer during total heat absorption



凝结水量的影响





换热量的影响

Fig. 20 Influence of inlet temperature of salt water on heat transfer during total heat absorption

# 3 结 论

采用微元划分的方法建立空气全热吸收装置的 模型,通过控制变量的方法分析空气和盐水的参数 对于装置性能以及换热过程中换热量和凝结水量的 影响,得到如下结论:

(1)空气进口温度和相对湿度的提高都对空气 全热吸收存在积极作用,强化了热质交换过程。换 热量和除湿量随着空气进口温度的升高而升高;空 气相对湿度对除湿量的影响较为显著,相对湿度越 高,除湿量越大。

(2) 盐水进口温度和质量流量对装置性能的 影响不同。盐水进口温度的升高会减弱热质交换 程度,而质量流量的增加会增强热质交换的程度。 盐水进口温度从 – 15 ℃升至 – 5 ℃的过程中,由于 水的比定压热容比空气高,导致溶液的进出口温差 减小,空气出口温度升高5.3 ℃,盐水出口温度降低 0.01 ℃。

(3)分析全热吸收过程发现,热质交换程度越强的工况下,凝结水量会越多,换热量也会越大;当空气相对湿度是100%时,在换热过程中能较快凝结出水分;空气进口温度的升高和盐水溶液进口温度的降低,均有利于整个换热装置的换热和传质,更容易凝结出水,且能够放出更多的热量。

### 参考文献:

[1] 墙新奇.环境中的低品位热能利用研究[J].上海节能,
 2023(4):493-497.

QIANG Xingqi. Research on utilization of low grade thermal energy from environment [J]. Shanghai Energy Saving, 2023(4): 493 - 497.

[2] 付 强,王国荣,周守为.温差能与低温海水资源综合利用研究[J].中国工程科学,2021,23(6):52-60.

FU Qiang, WANG Guorong, ZHOU Shouwei. Comprehensive utilization of temperature difference energy and low-temperature seawater resources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6):52-60.

[3] 王家政. 严寒地区热泵供暖技术适应性研究[D]. 吉林: 吉林 建筑大学,2019.

WANG Jiazheng. Research on the adaptability of heat pump heating technology in severe cold regions [D]. JiLin: Jilin University of Architecture, 2019.

- [4] PATEL V, PATEL R, PATEL J. Theoretical and experimental investigation of bubble column humidification and thermoelectric cooler dehumidification water desalination system[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(2):890 - 901.
- [5] 钟国坚,谢庆亮,陈木凤. 溴化锂吸收式余热回收机组的设计
  [J].贵州大学学报(自然科学版),2024,41(1):78-82,88.
  ZHONG Guojian, XIE Qingliang, CHEN Mufeng. Design of waste heat recovery unit with lithium bromide absorption [J] Journal of Guizhou University (Natural Sciences),2024,41(1):78-82,88.
- [6] SAIKRISHNAN V, KARTHIKEYAN A, BEEMKUMAR N, et al. The thermal performance analyses of the solar energy-powered thermal energy storage system with MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O as PCM [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 42:19 - 20.
- [7] 周苇杭,殷勇高,程小松.低位热驱动的工业建筑除湿降温空 调系统应用研究[J].制冷学报,2022,43(5):10-15.
  ZHOU Weihang, YIN Yonggao, CHENG Xiaosong. Application of low-grade level heat driven industrial building dehumidification and cooling air conditioning system [J]. Journal of Refrigeration, 2022,43(5):10-15.
- [8] 周君明,彭冬根,黄 红. 基于 Simulink 的溶液除湿蒸发冷却 新风系统性能分析[J].太阳能学报,2018,39(6):
  1533-1542.

ZHOU Junming, PENG Donggen, HUANG Hong. Performance analysis of solution dehumidification evaporation cooling fresh air system based on Simulink[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(6):1533 - 1542.

- [9] 张 凡,殷勇高.一种低位热驱动除湿冷却空调系统的热性能 分析[J].化工学报,2016,67(S2):275-283. ZHANG Fan,YIN Yonggao. Thermal performance analysis of liquid desiccant evaporative cooling air-conditioning system driven by low-grade heat[J]. CIESC Journal,2016,67(S2):275-283.
- [10] 李逸飞,杜震宇,华 靖.逆流式蒸发冷凝型烟气全热换热器
   的数值模拟研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023, 37(9):312-321.

LI Yifei, DU Zhenyu, HUA Jing. Numerical simulation of countercurrent evaporative flue gas total heat exchanger [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(9):312-321.

[11] 王 馨,杨 娟,肖学林.溶液除湿系统全热回收装置的优化
 [J].制冷与空调,2023,23(12):13-19.

WANG Xin, YANG Juan, XIAO Xuelin. Optimization of heat recovery unit in liquid desiccant dehumidification system [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2023, 23(12):13 – 19. [12] 周金亮,叶松梅.节能型新排风空气处理机组的性能研究
[J].轻工科技,2023,39(6):168-170.
ZHOU Jinliang, YE Songmei. Performance study of energy-saving new exhaust air treatment units [J]. Light Industry Science and

Technology,2023,39(6):168-170.
[13] 张 衡. 溶液除湿技术在闭路循环干燥系统中的应用研究

### (上接第112页)

[15] 赵永亮,张 利,刘 明,等.660 MW 燃煤机组热力系统构型 调整对一次调频性能的影响研究[J].中国电机工程学报, 2019,39(12):3587-3598.

> ZHAO Yongliang, ZHANG Li, LIU Ming, et al. Effects of regulating thermal system configuration for 660 MW coal-fired power units on the performance of primary frequency control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12); 3587 – 3598.

- [16] 李志强,陈晓利,高继录,等.350 MW 火电机组热电解耦深度 调峰技术研究[J]. 汽轮机技术,2020,62(5):389-392.
  LI Zhiqiang, CHEN Xiaoli, GAO Jilu, et al. Research on deep peak regulation technology of thermo-electrolytic coupling for 350 MW thermal power Units[J]. Turnine Technology,2020,62(5): 389-392.
- [17] LIU Z, ZHENG Z, SONG J, et al. Primary frequency regulation capacity enhancement of CHP units: Control strategy combining high pressure valve adjustment and heating extraction steam adjustment [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 35:97 - 102.
- [18] 王 霞,应黎明,卢少平.考虑动态频率约束的一次调频和二次调频联合优化模型[J].电网技术,2020,44(8):

[D]. 杭州:浙江工业大学,2020.

ZHANG Heng. Application study on solution dehumidification technology in closed-loop drying system[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.

(丛 敏 编辑)

2858 - 2867.

WANG Xia, YING Liming, LU Shaoping. Joint optimization model for primary and secondary frequency regulation considering dynamic frequency constraint [J]. Power System Technology, 2020, 44(8):2858-2867.

- [19] XU Junhua, AO Lihua, YANG Yuejun, et al. Simulation study on coal consumption and peak regulating characteristics of industrial extraction steam power supply for 300 MW unit[C]//2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS):IEEE,2022:635-638.
- [20] 庞春凤,张德利,李祥勇,等. 基于 Ebsilon 的供热机组灵活性 改造研究[J]. 汽轮机技术,2023,65(2):127-130.
  PANG Chunfeng,ZHANG Deli,LI Xiangyong, et al. Research on flexibility modification of heating unit based on Ebsilon[J]. Turbine Technology,2023,65(2):127-130.
- [21] XIONG J, DING Y, YE H, et al. The additional control strategies to improve primary frequency response for hybrid power plant with gas turbines and steam turbines [J]. Energy Reports, 2022, 8: 557-564.

(姜雪梅 编辑)