



基于溶液除湿的湿烟气水分余热回收及消烟技术

董勇 张昊

燃煤污染物减排国家工程实验室
山东大学能源与动力工程学院

2017.12



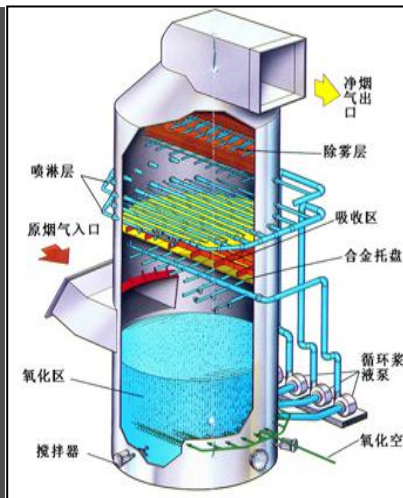
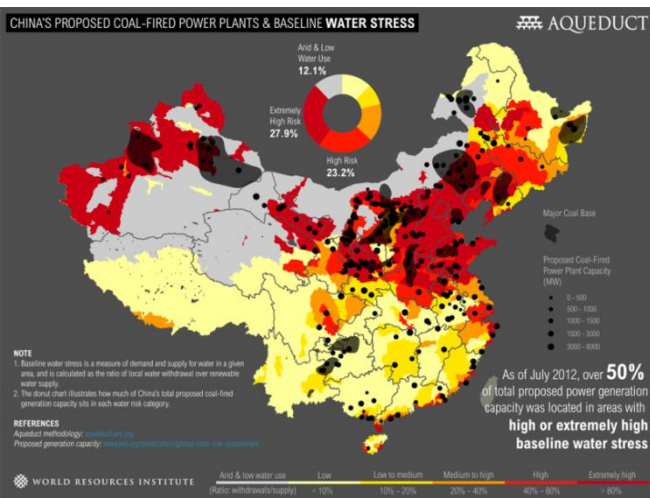
目录

1. 研究背景
2. 湿烟气中水分回收方式
3. 溶液除湿技术研究
4. 白烟的控制技术研究
5. 研究成果及结论



研究背景

- ▶ 我国大量电厂建于缺水地区，随着取水定额标准提高、《水污染防治行动计划》等政策的落实，燃煤电厂**节水压力巨大**；
- ▶ 国家2005~2020年电力发展规划，明确提出了发电节水的问题：**必须着力发展适用于水资源短缺地区的节水型烟气污染控制技术**。
- ▶ 燃煤电厂烟气脱硫90%以上采用**湿法脱硫**工艺，其**蒸发耗水**是电厂水耗的重要组成部分。
- ▶ 脱硫塔是湿法脱硫工艺的核心装置，烟气在脱硫塔内经喷淋洗涤后，成为**温度约50℃、相对湿度100%的饱和湿烟气**。





研究背景



湿烟气直排

烟 囱 腐 蚀

白 烟

烟 囱 雨

扩 散 差

水 分 损 失

热 量 损 失

表₁ 燃煤机组净烟气(除雾器入口)含水量计算值 t/h

项 目	600 MW 机组		1000 MW 机组	
	A 电厂	B 电厂	C 电厂	D 电厂
汽态水	217.80	222.10	345.80	354.60
液态水	16.80	17.80	26.60	27.80
固体(石膏+粉尘)	2.52	2.67	3.99	4.17

- **水量分析**：水分约占烟气体积10%，含湿量100-200g/Nm³(大气湿度9g/Nm³)。如300MW机组≈100t/h。基于中电联公布的2015年估算，全国燃煤电厂湿法脱硫机组年耗水量近10亿立方米。
- **环境影响**：区域低空空气湿度，不利于扩散；利于吸湿气溶胶生长，能见度下降
- **余热分析**：排烟余热约占燃煤低位发热量6.4%，且包含大量汽化潜热；
- **热量形式**：以600MW机组为例，一般含湿量约12%，水蒸汽体积为282217m³/h，含水量约为300t/h, 年排水约150万t;水蒸汽中含有大量气化潜热，以600MW机组为例，(50℃水的气化潜热2382kJ/kg)，相当于25t标煤/h, 12.5万t标煤/年；
- **脱硫前后**：显热 63%→25%，潜热由 37%→75%。



湿烟气的产生机制及其影响因素

1) 煤燃烧过程产生的水蒸汽- H_A

$$V_{H_2O} \begin{cases} V_{H_2O} - V_{H_2O}^\circ = 0.0161(\alpha - 1)V^\circ \\ V_{H_2O}^\circ = 0.111 H_{ar} + 0.0124 M_{ar} + 0.0161 V^\circ \end{cases}$$

$$H_A = 0.111 H_{ar} + 0.0124 M_{ar} + 0.0161 \alpha V^\circ$$

2) 湿法脱硫过程产生的水蒸汽- $(H_B - H_A)$ 脱硫过程热平衡:

$$c_A(t_A - t_B) = (H_B - H_A)r_B$$

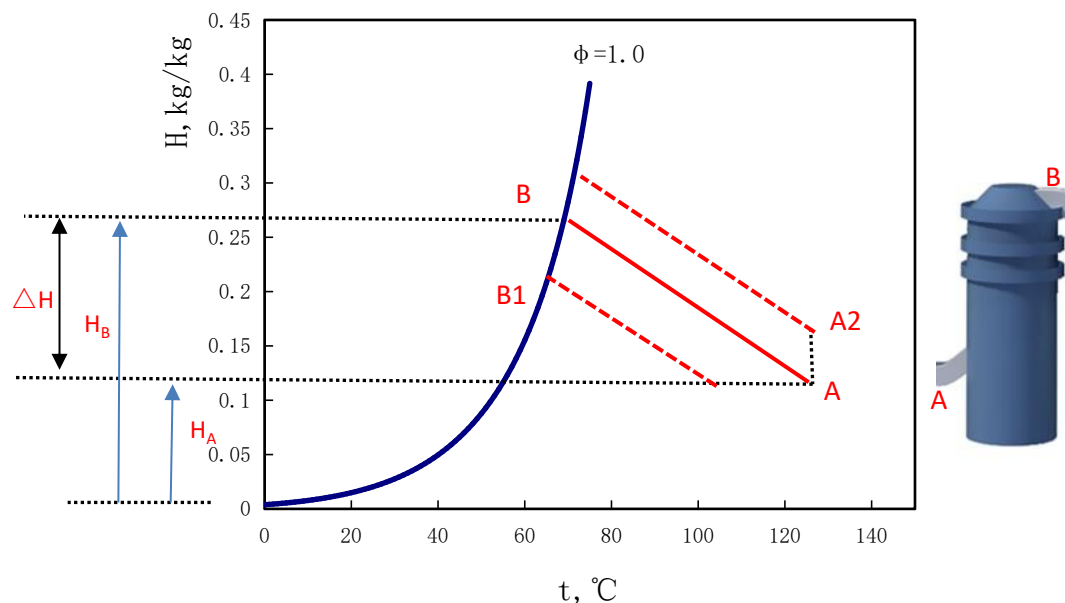
脱硫过程蒸发水量:

$$\Delta H = H_B - H_A = \frac{c_A(t_A - t_B)}{r_B}$$

脱硫塔出口烟气含湿量:

$$H_B = H_A + \frac{c_A(t_A - t_B)}{r_B}$$

由上式可见，脱硫塔出口烟气温度、湿度是脱硫塔入口烟气温度、湿度的函数，入口温度（ t_A ）越低，出口温度（饱和温度）、湿度越低；入口湿度越高，脱硫塔出口温度、湿度越高。





湿烟气中水分回收方式

湿烟气除湿方法借鉴于空气除湿，在除湿量、除湿对象性质、溶液温度与溶液选择性方面有所不同。

几种常用的空气除湿方法的比较

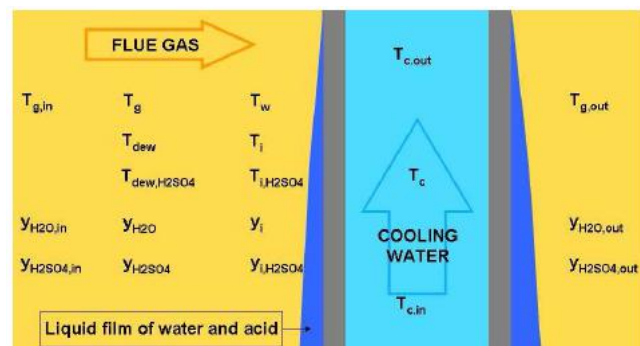
操作方法	冷冻法	吸收法	吸附法	转轮法	膜法
分离原理	冷凝	吸收	吸附		渗透
除湿后露点温度 (°C)	0~20	0~30	-30~50	-30~50	20~40
设备占地面积	中	大	大	小	小
生产规模	小~大型	大型	中~大型	小~大型	小~大型
主要设备	冷冻机	吸收塔	吸附塔	转轮除湿机	膜分离器



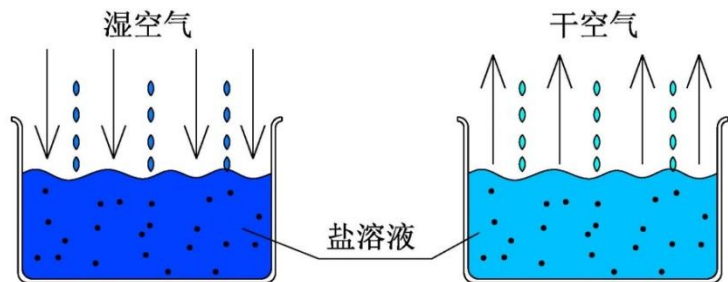
湿烟气中水分回收方式

传统的湿烟气水分回收方式主要包括以下三种

- ◆ 冷凝式（非接触式，混合式），Lehigh University
- ◆ 溶液吸收式（LDDS），美国能源环境研究中心
- ◆ 膜法（TMC），GTI

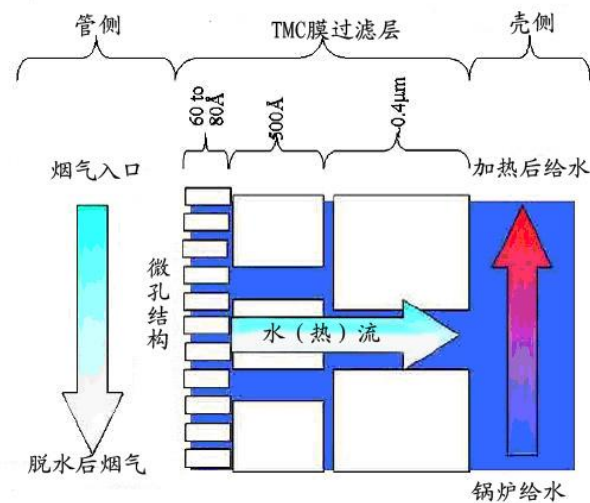


冷凝式烟气除湿机理示意图



除湿: $P_{sol} < P_a$

再生: $P_{sol} > P_a$



TMC膜法烟气除湿机理示意图

除湿及再生机理示意图



湿烟气中水分回收方式

不同烟气除湿方法应用情况

技术名称	技术简介	研发单位	国家	实施阶段
CAPWA	有机膜分离技术	KEMA荷兰电科院	荷兰	中试
TMC	无机膜分离技术	GTI美国天然气工艺研究院 华电科工、华北电力	美国 中国	中试
LDDS (liquid desiccant dehumidification system)	三甘醇喷淋吸收 氯化钙溶液	西门子 能源环境研究中心	德国 美国	中试
冷凝法	合金换热器冷凝	里海大学能源研究中心	美国	中试
水喷淋	对烟气喷淋降温	国电清新	中国	全尺度



溶液除湿技术研究

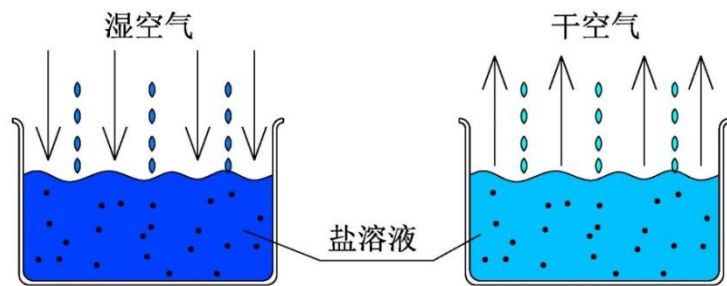
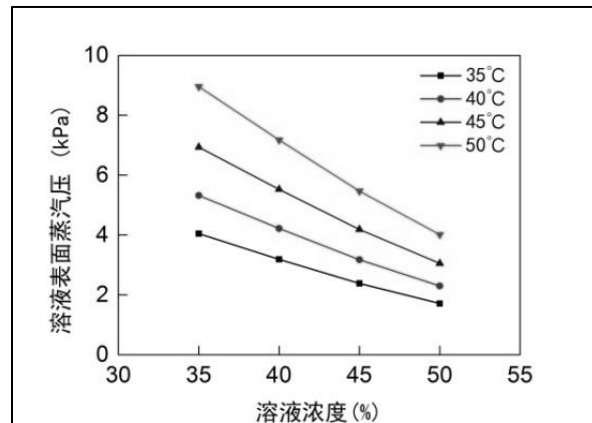
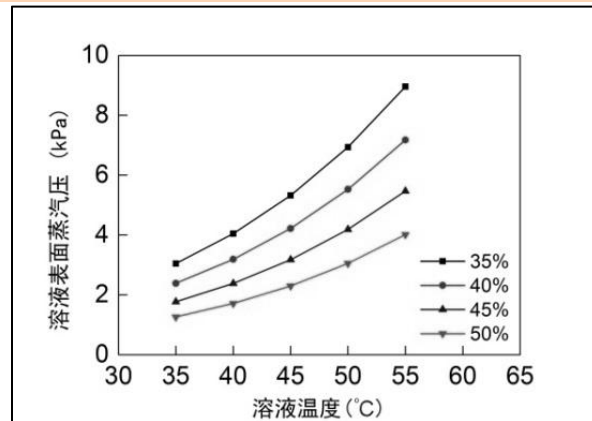


3.1 基于溶液除湿的湿烟气除湿原理

基于吸湿性盐溶液表面的水蒸气分压力

(P_{sol})与烟气的水蒸气分压力(P_a)差,驱动水分在烟气和吸湿溶液间传递,从而实现除湿与再生过程。

CaCl₂溶液蒸汽压随温度与浓度的变化



除湿: $P_{sol} < P_a$

再生: $P_{sol} > P_a$

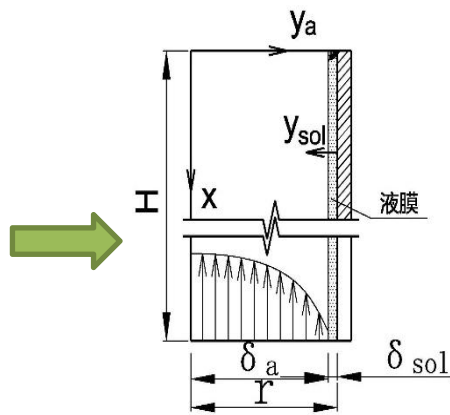
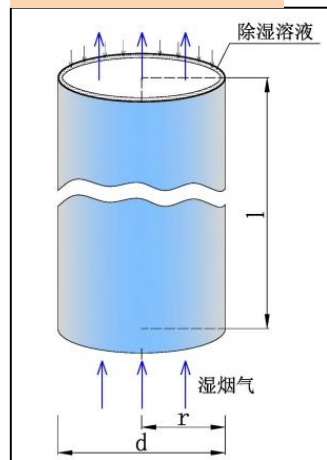
主要应用于空调领域,与烟气除湿相比,在溶液/空气温度、含湿量、除湿剂选择等方面有较大差异。

近年来推广应用于烟气除湿,多针对燃气烟气,其温度与燃煤烟气存在区别且含湿量偏小,选用的参数范围较窄,多着重于宏观角度研究除湿过程,对热质交换过程的机理研究较少,对于吸收过程主要影响参数范围的选取及对应条件下的性能研究不足。



3.2 管式降膜除湿数值模拟

物理模型



简化条件

- 1) 溶液为不可压缩牛顿流体，流态稳定，液膜厚度为恒值。
- 2) 流动为充分发展的稳定层流，不考虑进口段影响。
- 3) 气液界面处于平衡状态。
- 4) 烟气中全部水分的质量约为溶液质量的1%左右，吸收过程对溶液质量影响较小，假定溶液质量在沿降膜管高度上保持恒定。
- 5) 忽略体积力（重力）对烟气的影响。
- 6) 烟气及溶液物性（导热系数、粘度系数、密度、扩散系数、比热）为常数。
- 7) 不考虑烟气中酸性气体如SO₂对溶液的影响。

控制方程

连续性方程

$$\frac{\partial u_a}{\partial x} = 0$$

动量方程

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu_a \frac{\partial^2 u_a}{\partial y_a^2}$$

能量方程

$$\rho_a c_a u_a \frac{\partial t_a}{\partial x} = k_a \frac{\partial^2 t_a}{\partial y_a^2}$$

组分方程

$$u_a \frac{\partial W_a}{\partial x} = D_a \frac{\partial^2 W_a}{\partial y_a^2}$$

气液界面方程

烟气侧

溶液侧

$$\frac{\partial u_{sol}}{\partial x} = 0$$

$$\rho_{sol} g + \mu_{sol} \frac{\partial^2 u_{sol}}{\partial y_{sol}^2} = 0$$

$$u_{sol} \frac{\partial t_{sol}}{\partial x} = a_{sol} \frac{\partial^2 t_{sol}}{\partial y_{sol}^2}$$

$$u_{sol} \frac{\partial X_w}{\partial x} = D_{sol} \frac{\partial^2 X_w}{\partial y_{sol}^2}$$

$$-k_a \frac{\partial t_a}{\partial y_a} - \rho_a D_a \frac{\partial W_a}{\partial y_a} = k_{sol} \frac{\partial t_{sol}}{\partial y_{sol}}$$

$$-\rho_a D_a \frac{\partial W_a}{\partial y_a} = \rho_{sol} D_{sol} \frac{\partial X_w}{\partial y_{sol}}$$

边界条件

$$x=H, 0 \leq y_a \leq \delta_a: t_a = t_{ain}, W_a = W_{ain}$$

$$x=0, 0 \leq y_{sol} \leq \delta_{sol}: t_{sol} = t_{solin}, X_w = X_{w}$$

$$y_a=0: \frac{\partial u_a}{\partial y_a} = 0, \frac{\partial t_a}{\partial y_a} = 0, \frac{\partial W_a}{\partial y_a} = 0;$$

$$y_{sol}=0: u_{sol} = 0, \frac{\partial t_{sol}}{\partial y_{sol}} = 0, \frac{\partial X_w}{\partial y_{sol}} = 0;$$

$$y_{sol}=\delta_{sol}: \frac{\partial u_{sol}}{\partial y_{sol}} = 0;$$

$$\text{气液界面处: } u_a = -u_{sol}, t_a = t_{sol}, W_a = W_{eq}$$

3.2 管式降膜除湿数值模拟

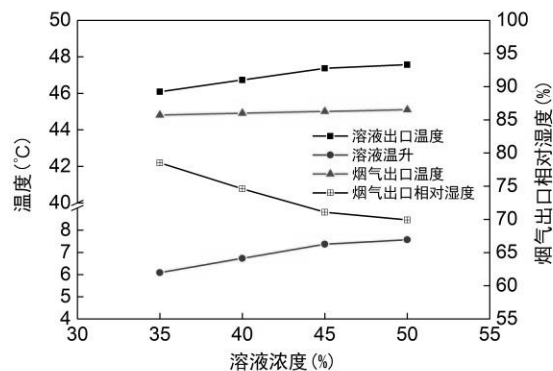
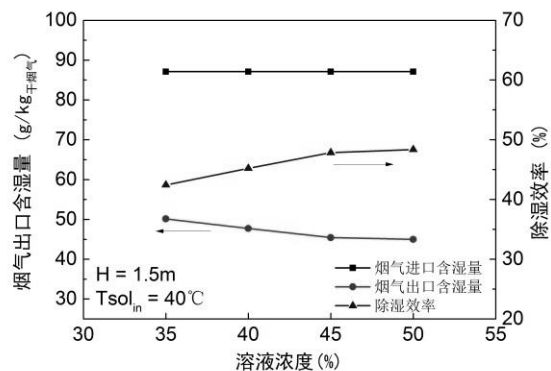
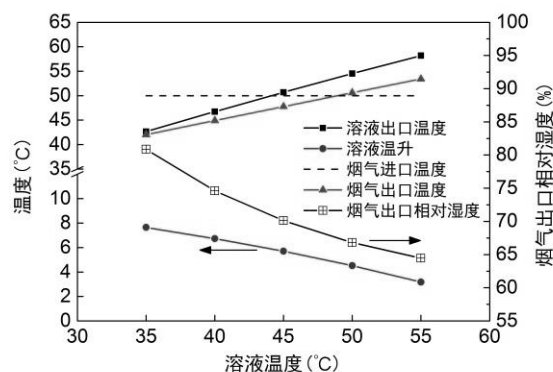
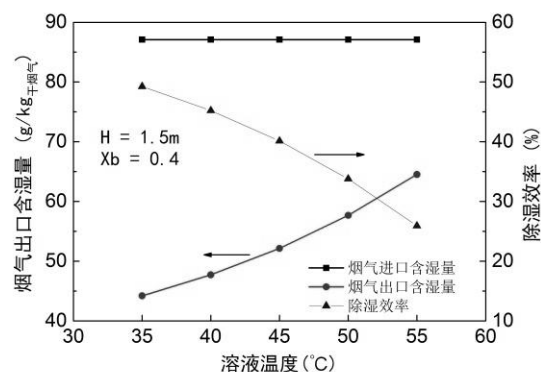
网格划分

控制方程及计算区域的离散化

编程求解分析

结果与讨论

溶液温度及浓度的影响



1、 CaCl_2 溶液除湿潜力较大，除湿效率可达约50%；

2、溶液温度与浓度的影响与溶液物性相符；

3、溶液温度需综合考虑

温度低→高效率

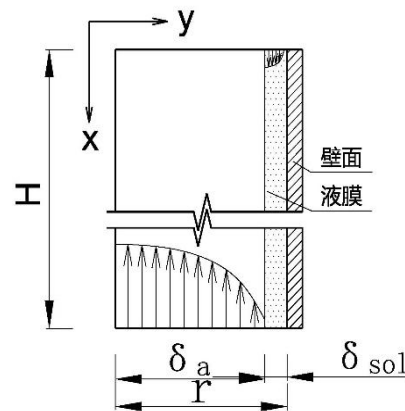
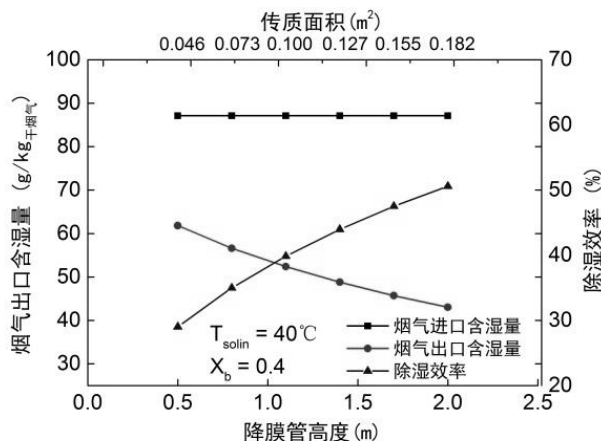
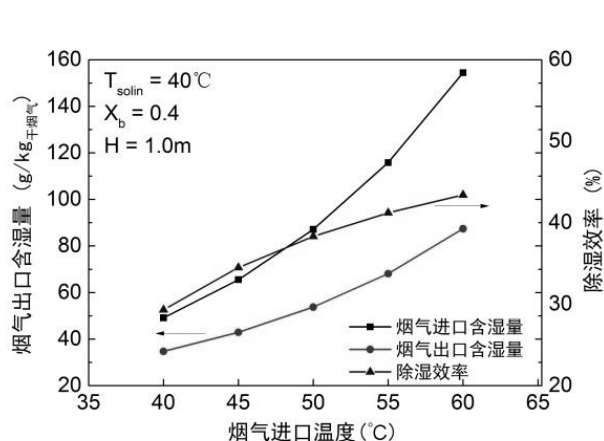
温度高→扩散性能；

4、溶液浓度需进一步试验确定。

3.2 管式降膜除湿数值模拟

结果与讨论

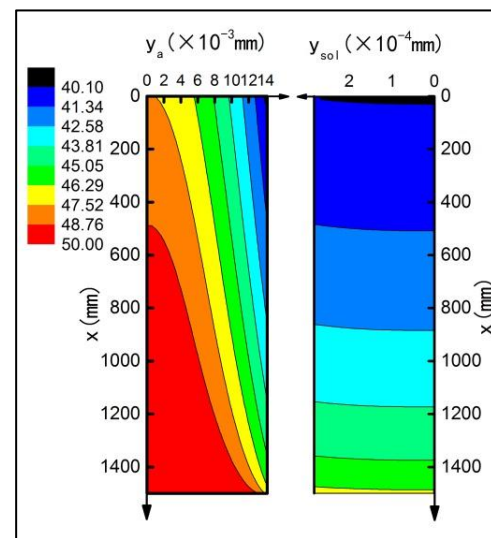
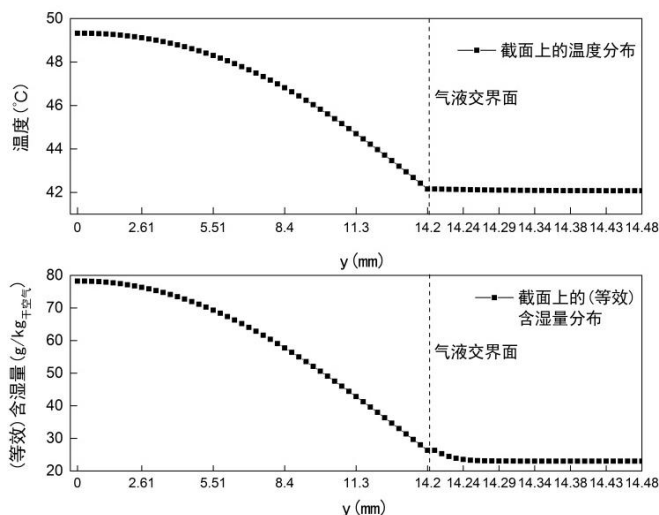
进口烟气温度的影响



沿程分布及截面数据

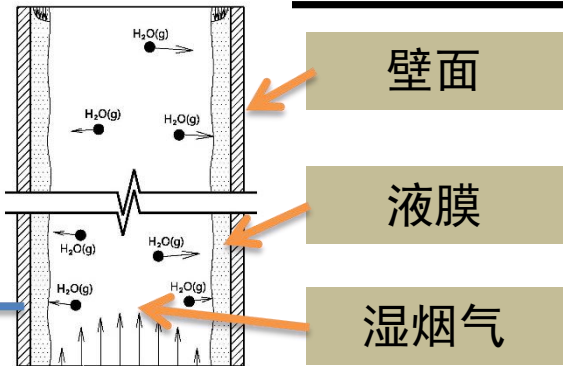
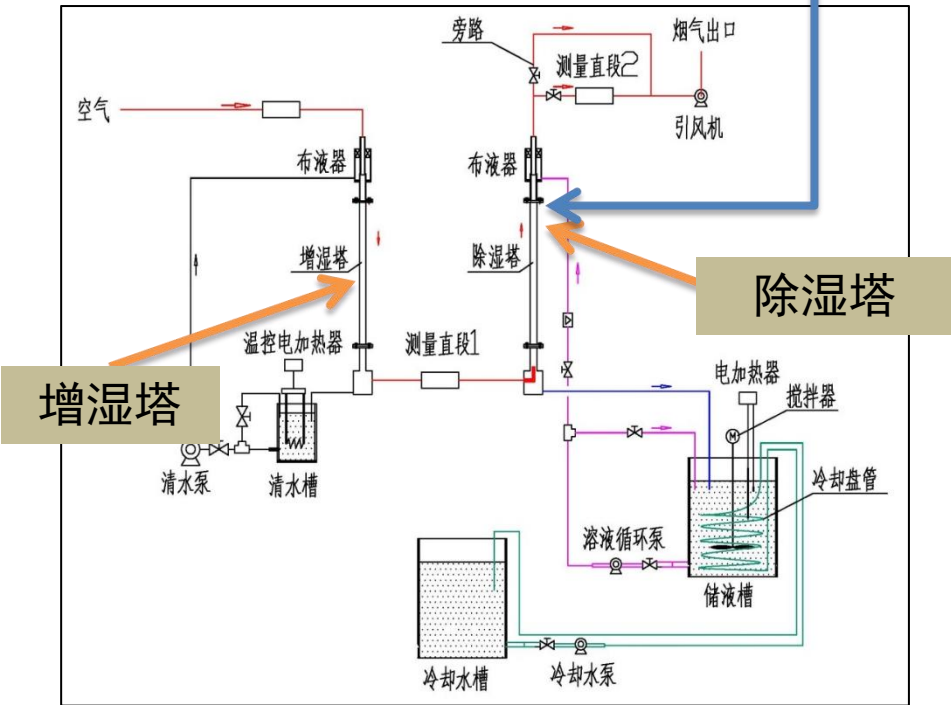
在单次吸收过程中，溶液温度上升是导致除湿性能下降的主要因素。

除湿过程气液传质的主要传热传质梯度在气侧，加强气侧扰动将能够有效提高除湿性能。



3.3 管式降膜除湿试验研究

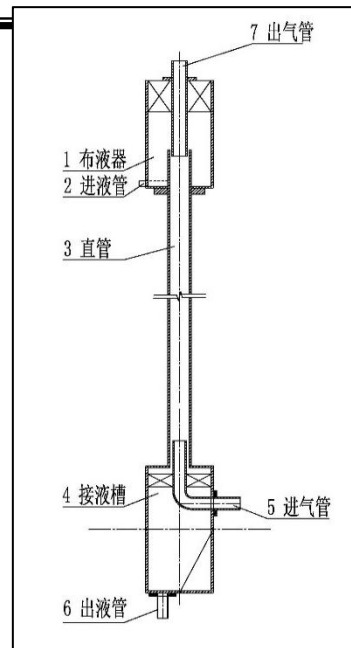
管式降膜除湿试验台
系统流程图及系统主要参数



降膜管内介质流动示意图

项目	数据	单位	备注
烟气流量	10.7		max
	8.3	m ³ /h	
	4.8		min
空气温度	40~60	°C	
相对湿度	100	%	
溶液浓度	40~50	%	
溶液温度	35~55	°C	
降膜管直径	29	mm	
降膜管高度	500~2000	mm	
烟气流速	4.5		max
	3.5	m/s	
	2.0		min
溶液泵流量	50~120	L/h	

3.3 管式降膜除湿试验研究



管式降膜除湿试验装置图



3.3 管式降膜除湿试验研究

3.3.1 除湿试验的主要变量

- ▶ 主要探究溶液温度、溶液浓度、降膜管高度、入口烟气温度、溶液及烟气的雷诺数等因素对除湿性能的影响。

3.3.2 主要评价指标

- ▶ 除湿效率：

烟气进出口含湿量差与进口含湿量之比。

$$\eta = \frac{d_{in} - d_{out}}{d_{in}}$$

η —除湿效率 %

d_{in} —进口烟气含湿量 (g/kg干烟气)

d_{out} —出口烟气含湿量 (g/kg干烟气)

- ▶ 烟气及溶液出口状态：温度、相对湿度、含湿量、露点温度、烟气过热度（排烟温度与烟气露点温度之差）等。

3.3 管式降膜除湿试验研究

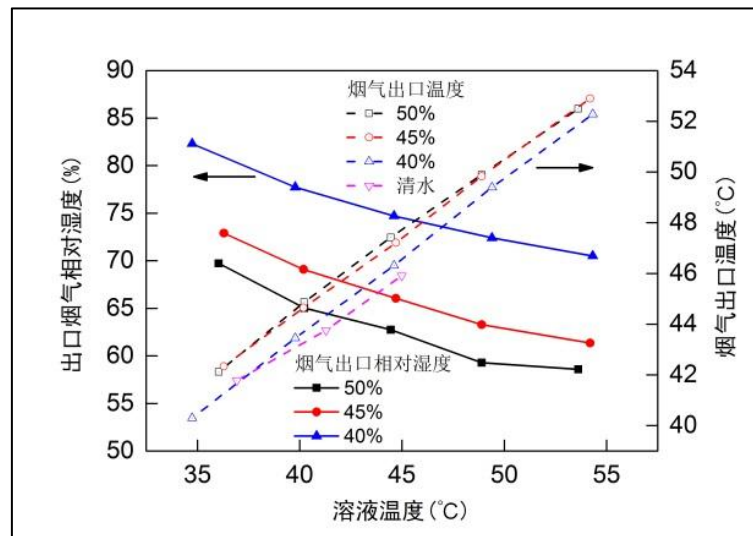
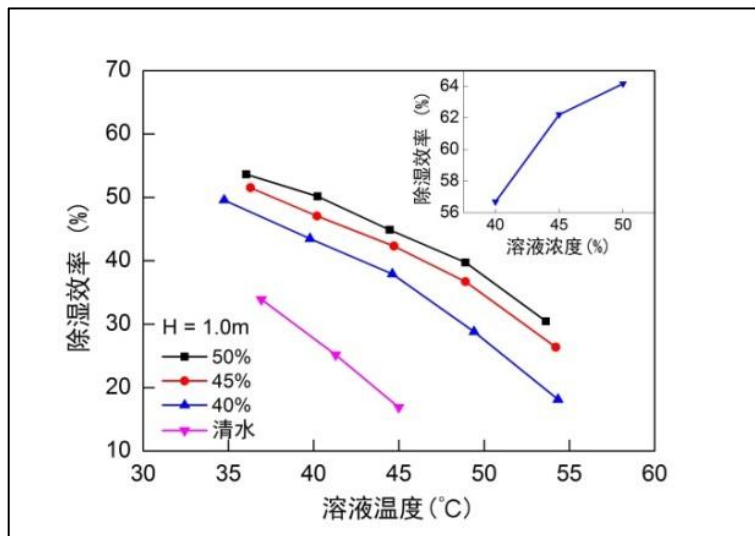
3.3.3 溶液温度及浓度对除湿性能的影响

性能趋势：除湿效率随溶液温度降低、溶液浓度升高而上升：**溶液物性**

温度的选择：溶液温度高于烟气温度时仍具有一定的除湿能力，与冷凝法具有显著的差异。溶液温度为50~55℃时，除湿效率约20%~40%，出口相对湿度约60%

(H=1.0m)，高溶液温度不利于水回收，但出口烟气温度高、相对湿度低，能够提高烟气扩散能力，因此，**溶液温度需根据应用要求综合考虑确定。**

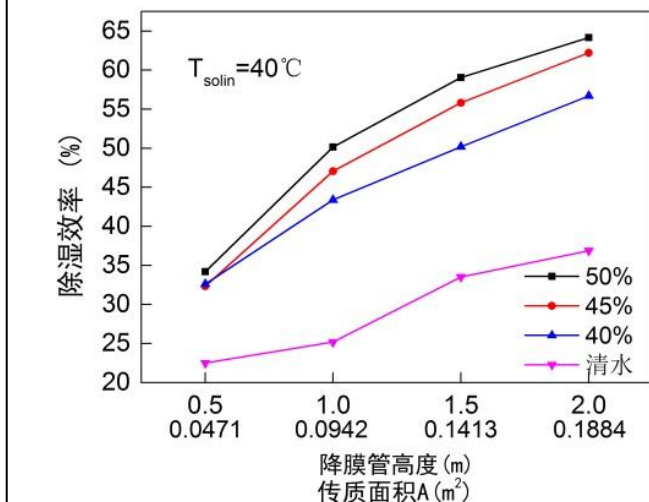
浓度的选择：溶液浓度超过45%后，溶液的**溶解能力明显下降**，易形成块状小颗粒，经较长时间搅拌后才逐步溶解，此时溶液**结晶**温度约25℃~30℃，为保证系统及管道安全运行，CaCl₂溶液除湿系统的溶液浓度**不宜超过45%**。



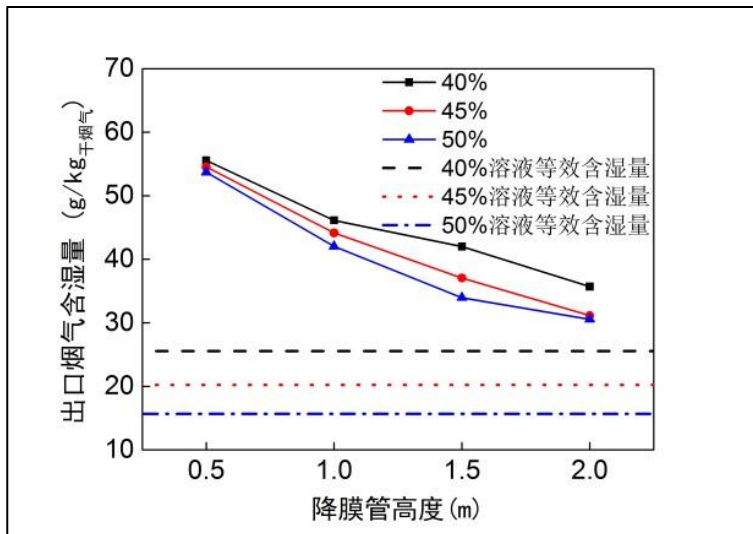
3.3 管式降膜除湿试验研究

3.3.4 传质面积对除湿性能的影响

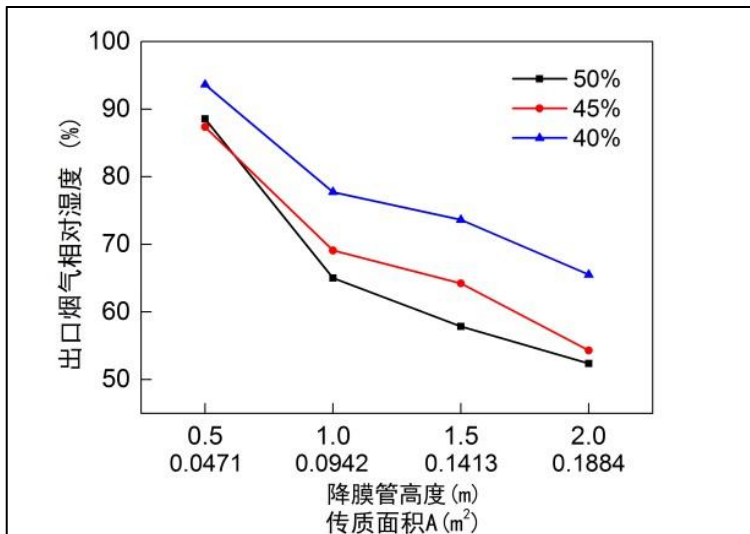
- ▶ 溶液除湿过程中，总传质量是传质系数、气液传质面积及水蒸汽密度差的函数。除湿过程随传热传质面积增大趋于完善。出口烟气含湿量逐步靠近溶液等效含湿量。
- ▶ 溶液除湿效率提升30%，冷凝除湿效率提升14%，冷凝及吸收过程对除湿效率的贡献率分别为14%和16%，基本相当。



除湿效率与降膜管高度的关系



出口烟气含湿量与降膜管高度的关系

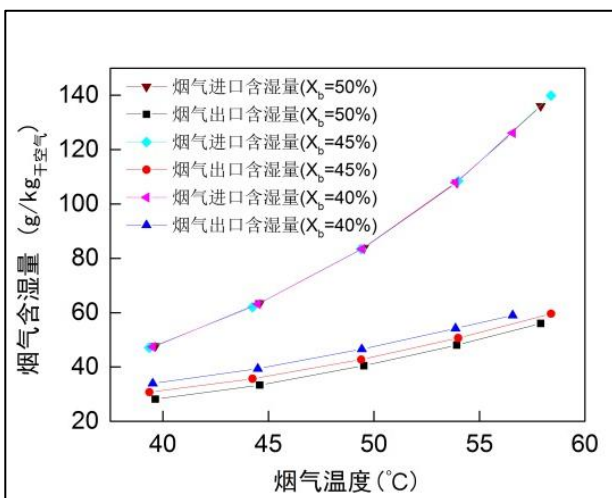


出口烟气相对湿度与降膜管高度的关系

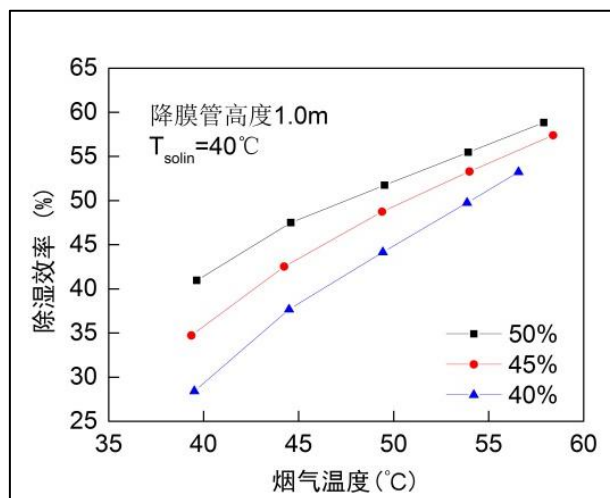
3.3 管式降膜除湿试验研究

3.3.5 进口烟气温度的影响

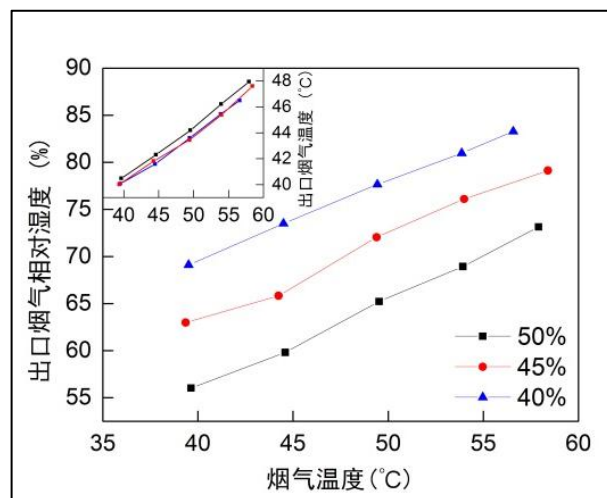
- 温度是影响烟气中饱和蒸汽分压的关键参数，随着烟气温度升高，湿烟气水蒸气分压力增大，传质驱动力增强，使得水蒸气迁移速度提升，除湿效率提高。
- 随进口烟气温度由40℃升高至58℃，进口烟气含湿量由47g/kg干烟气提高至139g/kg干烟气，除湿效率 ($T_{\text{solin}}=40^{\circ}\text{C}$, $H=1.0\text{m}$) 由30%提高至约60%，出口烟气含湿量及相对湿度均提高。
- 能够满足烟气温度的工况变动。



进出口含湿量的变化



除湿效率的变化

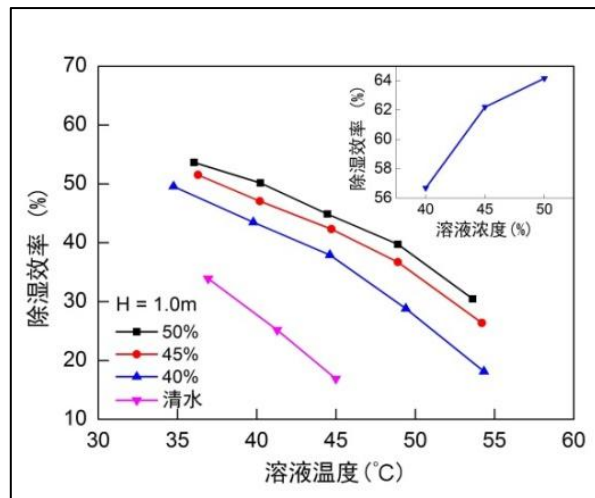


出口烟气相对湿度的变化

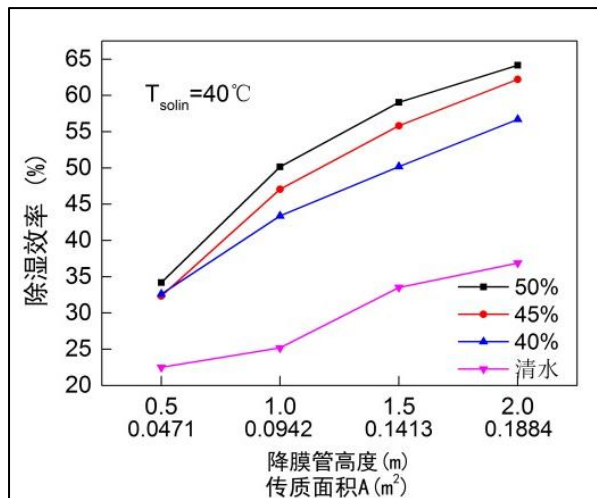
3.3 管式降膜除湿试验研究

3.3.6 溶液除湿与清水冷凝除湿效果对比

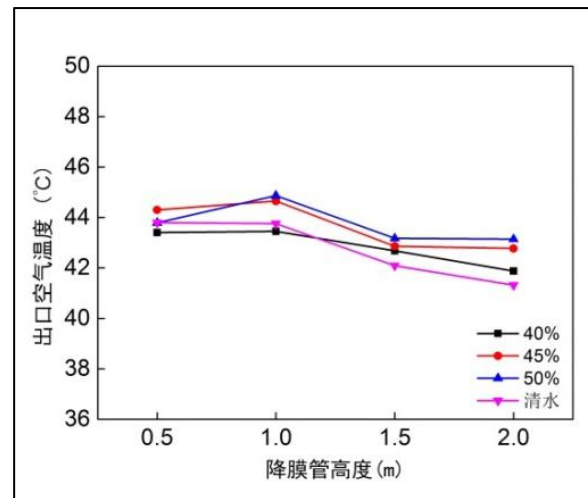
- 采用35℃-45℃清水（ $H=1.0\text{m}$ ），由于冷却作用，使得湿空气中水蒸气凝结析出，**冷凝除湿效率17%-34%**，相比之下，**溶液除湿效率40%~55%**；
- 溶液除湿效率约为冷凝除湿效率一倍，**优势明显**。



除湿效率与溶液温度的关系



除湿效率与降膜管高度的关系



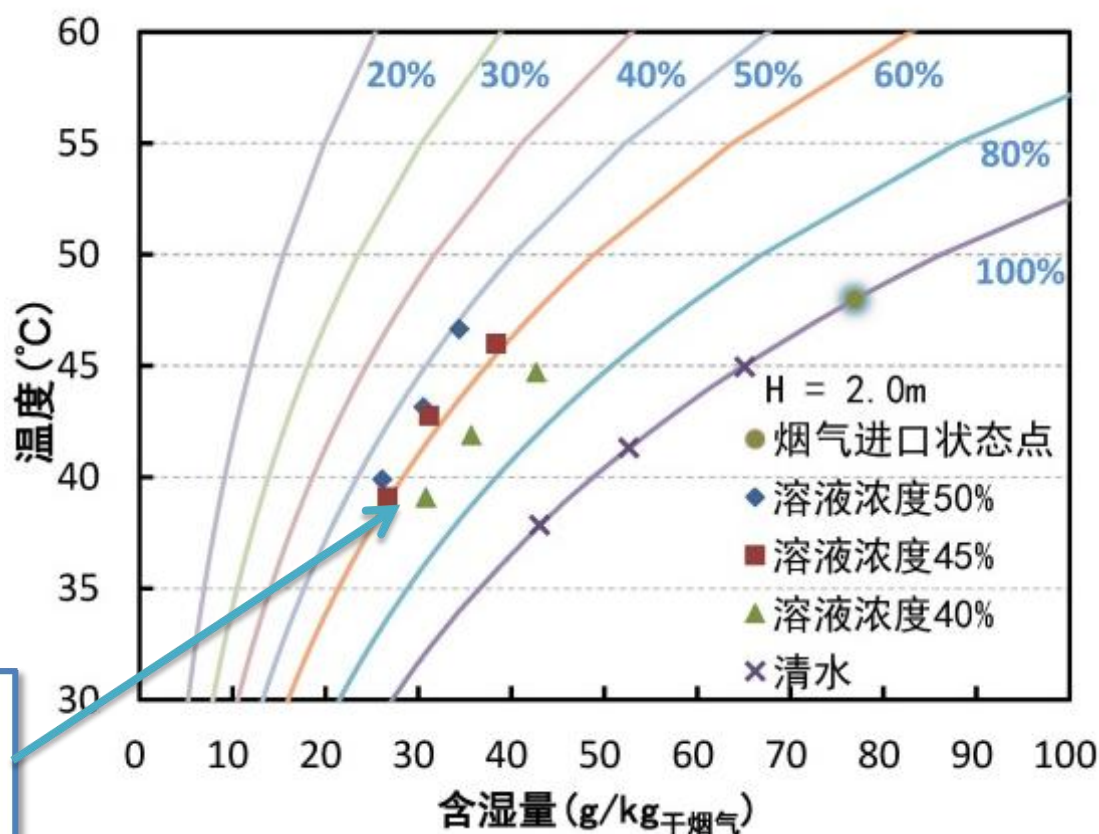
出口空气温度与降膜管高度的关系

3.3 管式降膜除湿试验研究

3.3.7 溶液除湿与清水冷凝除湿烟气出口状态点在焓湿图上的分布

■ 溶液及清水温度分别均为 35°C 、 40°C 、 45°C 。

随进口溶液（水）温度升高，出口烟气温度对应升高，但在相同的溶液（水）进口温度下，烟气出口温度差别不大。采用溶液除湿时，出口烟气含湿量更低，相对湿度约60%，冷凝除湿烟气始终保持相对湿度100%的饱和状态。

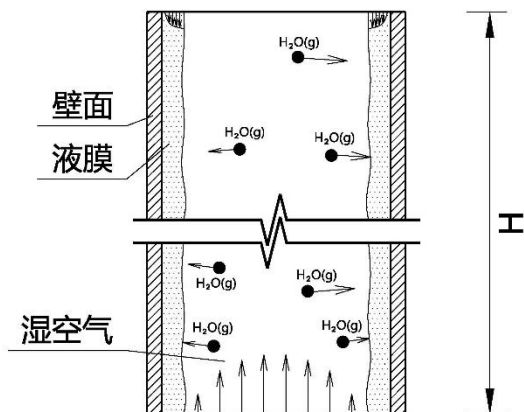


为避免烟囱腐蚀及烟囱出口“白烟”现象提供了条件。

溶液除湿与清水冷凝除湿烟气出口状态点的分布

3.3 管式降膜除湿试验研究

3.3.8 数据分析



降膜管内水蒸气平均传质速率 m :

$$m = h_m A \Delta \rho$$

式中: m —降膜管内水蒸气平均传质速率 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

h_m —平均对流传质系数 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

A —对流传质面积 m^2

$\Delta \rho$ —塔内传质平均密度差 kg/m^3

塔内传质平均密度差 $\Delta \rho$ 可采用对数平均密度差:

$$\Delta \rho = \frac{\Delta \rho_{\max} - \Delta \rho_{\min}}{\ln \frac{\Delta \rho_{\max}}{\Delta \rho_{\min}}}$$

$\Delta \rho$ 主要受进出口溶液蒸汽压及烟气中水蒸气分压影响。

溶液蒸汽压(P_z) 是溶液温度(T_{sol})与溶液浓度(X_{sol})的函数, 浓度降低而升高, 从而使传质过程驱动力降低。

气液物性

工况参数

装置结构参数

溶液浓度 X_{in}

溶液温度 $T_{\text{sol in}}$

进口空气温度 T_{ai}

液气比 ε_{lg}

降膜管高度 H

3.3 管式降膜除湿试验研究

3.3.8 数据分析

■ 除湿效率实验关联式

对除湿效率结果进行回归分析，得到如下实验关联式：

$$\eta = 467.24T_{ain}^{0.4805}X_{in}^{0.841}T_{solin}^{-1.843}\varepsilon_{lg}^{0.071}A^{0.432}$$

回归统计表

Multiple R	0.9621
R Square	0.9255
Adjusted R Square	0.9226
标准误差	0.0840

■ 传质系数

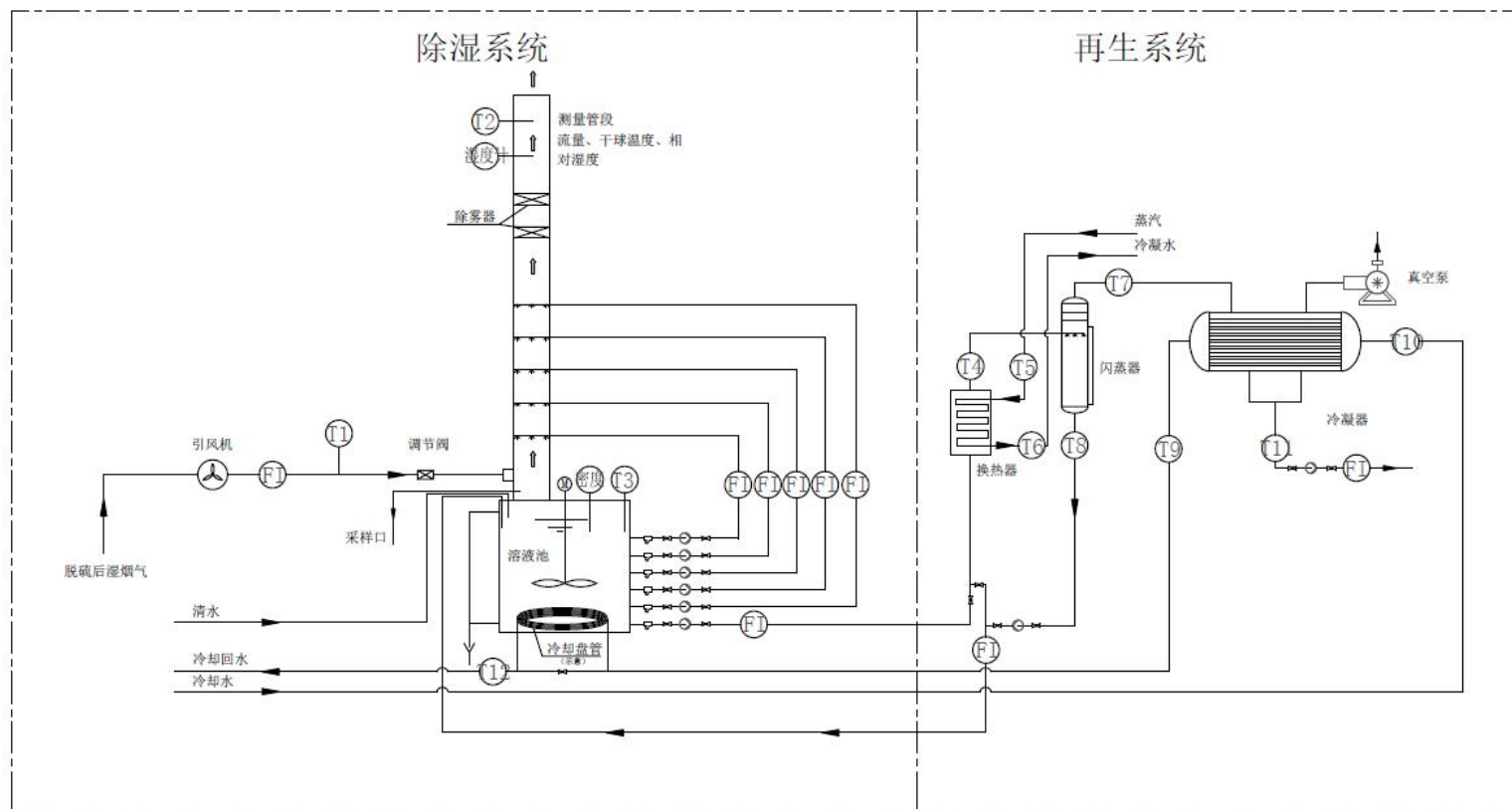
降膜管内水蒸气平均传质速率 m 可通过试验监测的进出口湿烟气参数计算，湿烟气进出口水蒸气密度及溶液表面水蒸气密度可通过物性计算得出，降膜管内传质面积近似等于降膜管内壁面面积（忽略液膜厚度）。因此，可计算每个工况下的对流传质系数，计算结果表明，在本实验研究的工况下，传质系数介于0.009m/s~0.040m/s之间。

$$m = h_m A \Delta \rho$$



3.4 基于溶液除湿技术的中试试验

基于氯化钙溶液除湿技术，设计搭建了5000m³中试试验台，将于水分回收、余热利用及湿烟气白烟消除等方面展开试验研究，该项目已被列入国家重点研发计划。





白烟的控制技术研究



白烟的控制技术研究

白烟的形成机理及危害

由吸收塔出来的烟气经过除雾器后直接送往烟囱，排放到大气环境中。由于饱和湿烟气与大气环境存在温差，在冷却稀释过程中，烟气中的水蒸气温度降低至露点，凝结成液态小水滴，形成白烟现象。



白烟现象的危害



烟囱腐蚀



石膏雨



影响烟气扩散





白烟的控制技术研究

白烟控制的实质是对其温湿度及过热度进行调控

假设：

环境温度 T_0 ，烟气温度 T_y

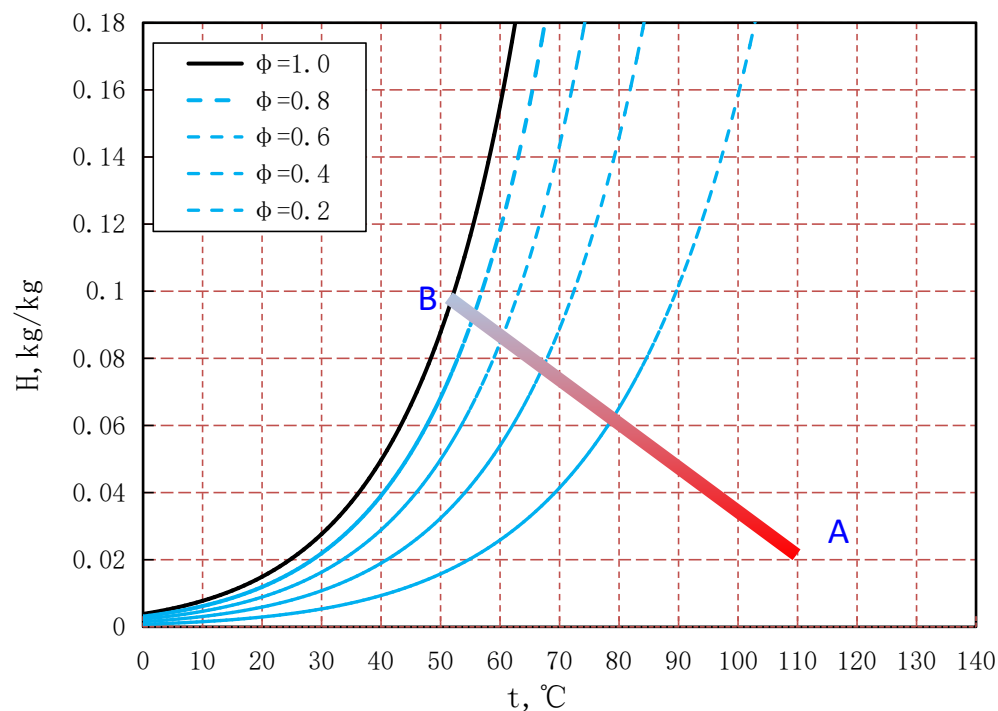
烟气中水蒸汽饱和温度 T_a

烟气过热温度 $T_r = T_y - T_a$ ；

烟气与环境温差 $T_{y0} = T_y - T_0$

抑制白烟条件：

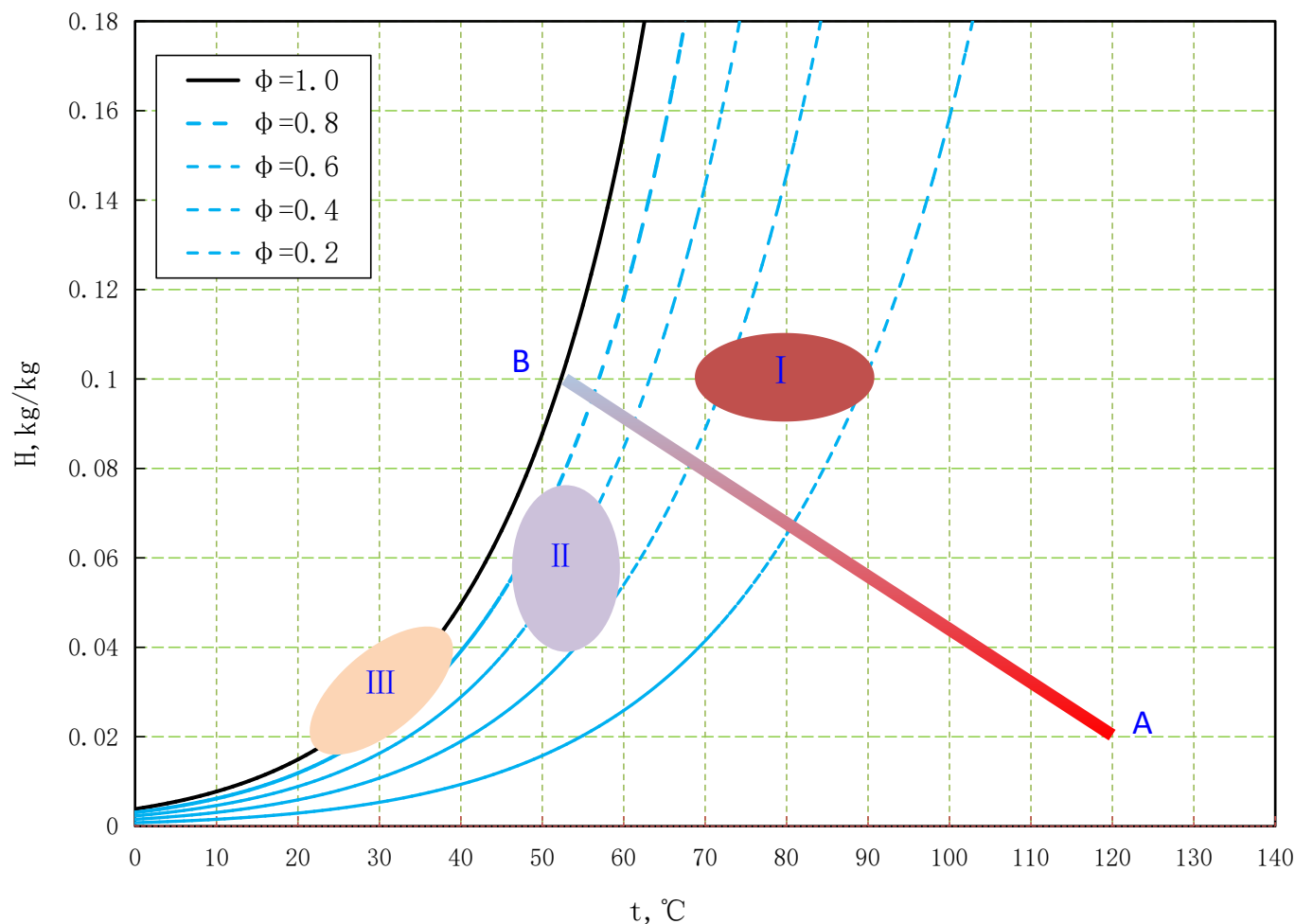
$$T_r > \text{const} \quad \text{或} \quad T_{y0} \leq \text{const}$$





白烟的控制技术研究

抑制白烟的三种方式



I 区: 保持烟气含湿量不变, 将烟气温度升高、相对湿度降低。

如: GGH, MGGH

II 区: 保持烟气温度不变, 将烟气含湿量降低、相对湿度降低。

如: LDDS

III 区: 将烟气温度、湿度均降低至环境温度附近。如: 冷凝法



白烟的控制技术研究

关于燃煤电厂湿烟气排放导致白烟问题的结论

1. 湿法脱硫后的低温饱和湿烟气在大气环境中的冷却稀释过程是导致白烟问题发生的主要原因。
2. 白烟控制的实质是对其温湿度及过热度进行调控，可以由提高烟气过热度到一定数值或者降低烟气与大气环境温差到一定数值来实现。
3. 基于溶液除湿的湿烟气水分余热回收技术既提高了烟气的过热度，又降低了相对湿度，是有效的白烟控制技术。

$$\text{LDDS} \approx \text{冷凝} + \text{GGH}$$

申报专利：2015109300504，ZL 201521042640.5；2015109321106，ZL201521042404.3



研究成果及结论



研究成果

论文

- 田路泞, 韩哲楠, 董勇*, 吕扬, 李玉忠. 燃煤电厂湿烟气余热及水分回收技术研究[J]. 洁净煤技术. [已收录]
- 吕扬, 董勇*, 田路泞等. 燃煤电厂湿烟气的除湿特性[J]. 化工学报
- 张昊, 董勇*, 申凯等. 燃煤电厂湿烟气降膜除湿过程的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报. [已投稿]

专利

- 董勇, 吕扬, 崔琳. 一种提高湿法脱硫后烟气过热度的装置: CN201521042404.3[P]. 2016-4-27. (实用新型已授权, 发明在审)
- 董勇, 吕扬, 崔琳. 一种带有深度除湿功能的湿法烟气脱硫塔: CN201521042640.5[P]. 2016-4-27. (实用新型已授权, 发明在审)



结论

- 1、采用 CaCl_2 为除湿溶液的燃煤电厂饱和湿烟气除湿工艺**潜力较大**，在本试验系统中，**最大除湿效率可达70%**。
- 2、除湿性能的**主要影响因素**包括溶液浓度 X_{in} ，溶液温度 T_{solin} ，进口空气温度 T_{ai} ，传质面积 A 等，试验中各变量因素对除湿性能的影响与模拟结果**趋势一致**；溶液浓度和溶液温度是影响除湿效率的关键物性因素，除湿**溶液浓度不宜超过45%**。溶液温度越低，除湿效率越高，溶液温度高于烟气温度时，仍具有一定的除湿效率，当溶液温度为 $50\sim 55^\circ\text{C}$ 时，除湿效率约 $20\%\sim 40\%$ ，较高的溶液温度有利于提高烟气过热度及扩散能力，需根据情况**综合考虑确定溶液温度**；针对进口 $40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 的饱和湿烟气， CaCl_2 溶液除湿系统具有**较强的适应性**，能够满足不同的进口饱和烟气条件下的除湿需求。
- 3、与清水冷凝除湿相比，其效率 $16.9\%\sim 33.9\%$ 时($H=1.0\text{m}$)，相同工况下溶液除湿效率 $40\%\sim 55\%$ ，**具有较大的优势**；
- 4、湿烟气水分余热回收技术既提高了烟气的过热度，又将出口空气相对湿度降低到 $50\%\sim 70\%$ ，能够避免烟气在烟囱及烟囱出口结露，**为烟囱腐蚀、“白烟”及“石膏雨”问题的解决提供了条件**。



请批评指正！