

DOI: 10.19666/j.rlfed.202502017

# 煤电化学吸收法碳捕集系统水平衡试验

杨亚利<sup>1</sup>, 胡治平<sup>1</sup>, 蔡子建<sup>2</sup>, 胡昔鸣<sup>3</sup>, 武生<sup>4</sup>, 方梦祥<sup>3</sup>

(1. 国能锦界能源有限责任公司, 陕西 榆林 719319;

2. 西北大学碳中和学院, 陕西 西安 710127;

3. 浙江大学青山湖能源研究基地, 浙江 杭州 310000;

4. 国家能源集团科学技术研究院有限公司, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 以某电厂15万吨/年CO<sub>2</sub>捕集系统为研究对象, 对其用水、耗水及水平衡情况进行了全面分析, 分别对不同负荷工况下碳捕集系统的水平衡进行了试验与对比。试验结果表明, 当前碳捕集系统水平衡存在的主要问题是吸收塔塔顶出口温度高于入口烟温, 高负荷工况下, 吸收塔内部的反应热较大, 造成排汽温度过高, 系统耗水大幅增加, 吸收塔出口温度由54℃降低到43℃后, 系统耗水降低约86.7%, 节能效果显著。对此, 结合实际运行情况, 提出了通过调整循环水量, 提高贫液冷却器和尾气洗涤器的换热效果, 从而进一步改善吸收塔温度场, 降低吸收塔出口温度的建议。试验结果可为碳捕集系统高效经济运行提供指导。

**[关键词]** 碳捕集系统; 水平衡; 吸收塔; 循环水量

[引用本文格式] 杨亚利, 胡治平, 蔡子建, 等. 煤电化学吸收法碳捕集系统水平衡试验[J]. 热力发电, 2025, 54(6): 113-118.  
YANG Yali, HU Zhiping, CAI Zijian, et al. Experiment on water balance of the carbon capture system using chemical absorption method in coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(6): 113-118.

## Experiment on water balance of the carbon capture system using chemical absorption method in coal-fired power plants

YANG Yali<sup>1</sup>, HU Zhiping<sup>1</sup>, CAI Zijian<sup>2</sup>, HU Ximing<sup>3</sup>, WU Sheng<sup>4</sup>, FANG Mengxiang<sup>3</sup>

(1. Guoneng Jinjie Energy Co., Ltd., Yulin 719319, China;

2. Carbon Neutrality College, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. Qingshanhu Energy Research Base, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;

4. China Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, China)

**Abstract:** By taking a 150 000 tons/year carbon dioxide capture system in a power plant as the research object, a comprehensive analysis was conducted for its water usage, water consumption and water balance. Moreover, the water balance of the carbon capture system was experimentally studied and compared under different loads. The experimental results show that, the main problem in the current capture system's water balance is that the outlet temperature at the top of the absorption tower is higher than the inlet flue gas temperature. Under high-load conditions, the reaction heat inside the absorption tower is relatively large, resulting in an excessively high exhaust steam temperature and a significant increase in system water consumption. After the outlet temperature of the absorption tower was reduced from 54 °C to 43 °C, the system water consumption reduced by approximately 86.7%, demonstrating remarkable energy-saving effects. In light of this, combined with the actual operation situation, suggestions are put forward to further improve the temperature field of the absorption tower and reduce the outlet temperature of the absorption tower by adjusting the circulating water volume and enhancing the heat transfer efficiency of the lean solution cooler and the tail gas scrubber. The experimental results can provide guidance for efficient and economical operation of carbon capture systems.

**Key words:** carbon capture system; water balance; absorption tower; circulating water volume

收稿日期: 2025-02-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0199300)

Supported by: National Key Research and Development Program (2023YFE0199300)

第一作者简介: 杨亚利(1990), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为二氧化碳捕集、利用相关技术的研发和应用, 16143327@ceic.com。

煤电碳捕集是当下煤电碳减排的有效方式之一<sup>[1-2]</sup>，2024 年 7 月，国家发改委和国家能源局发布的《煤电低碳化改造建设行动方案（2024—2027 年）》中，明确了碳捕集利用与封存是煤电清洁低碳转型改造和建设方式之一<sup>[3]</sup>。化学吸收法凭借捕集效率高、技术成熟度较高等优势，成为现有碳捕集工程的主流选择。目前国内长周期运行的大规模碳捕集系统还不多<sup>[4-6]</sup>。实际运行过程中，碳捕集系统水平衡控制欠佳时，会出现吸收塔补水量过大、胺逃逸加剧等问题，化学吸收法碳捕集系统的水耗特性研究持续受到关注<sup>[7-10]</sup>。研究表明，吸收塔温度场分布对系统水平衡具有关键影响。Zhang 等人<sup>[11]</sup>通过模拟分析指出，出口烟气温度每升高 5 °C，蒸汽逸散量增加 23%~28%，并诱发胺液损耗的链式反应。针对负荷敏感性，Wang 等人<sup>[12]</sup>发现 70% 额定负荷后

系统耗水量增速加快，其研究进一步验证了级间冷却器对温差控制的必要性。本文以某电厂每年 15 万吨化学吸收碳捕集系统为研究对象，通过对不同工况下系统水平衡进行全面测试，对碳捕集系统在实际运行过程中存在的问题进行分析探讨，并提出了相应的措施。

## 1 碳捕集系统概况

### 1.1 系统概况

某电厂 15 万吨/年 CO<sub>2</sub> 碳捕集系统（图 1）以复合胺吸收剂为核心，采用化学吸收法 CO<sub>2</sub> 捕集技术。从 1 号和 2 号机组超低排放改造后的脱硫净烟气中抽取烟气，标准状态下处理量约 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/h，CO<sub>2</sub> 捕集效率在 90% 以上，剩余尾气从吸收塔顶排出，系统可在 50%~110% 额定负荷范围内稳定运行。

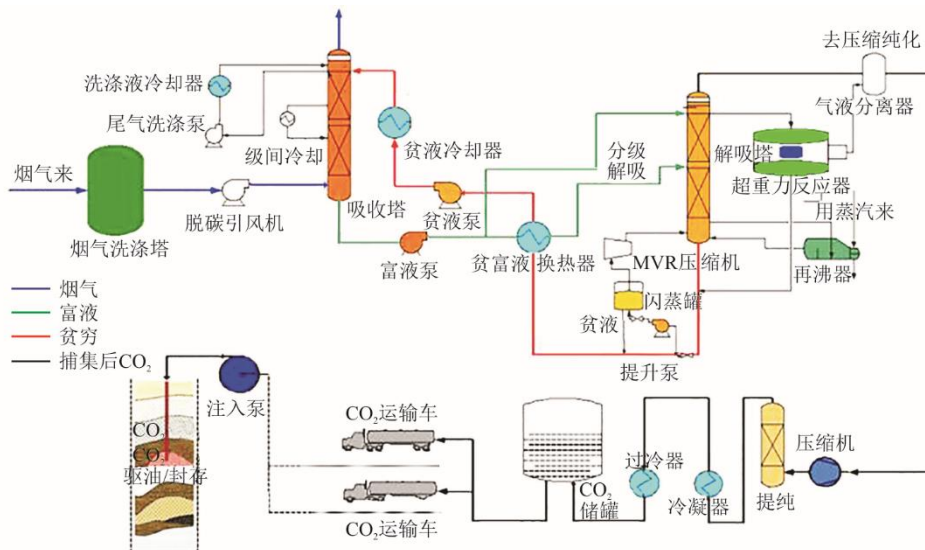


图 1 碳捕集系统工艺流程

Fig.1 Process flow diagram of the carbon capture system

该系统工艺流程具体为：烟气经过水洗塔水洗和冷却，去除烟气中的酸性气体和粉尘；然后进入吸收塔与有机胺溶液进行反应，吸收 CO<sub>2</sub> 的富液从塔底通过泵送至贫富液换热器回收热量后，进入再生塔；在再生塔进行高温解吸，将吸收溶剂中 CO<sub>2</sub> 解吸出来，用于加热的蒸汽来自主机低辅蒸汽系统，解吸出的 CO<sub>2</sub> 与水蒸气分离后，得到纯度 99.5%（干基）以上的产品 CO<sub>2</sub> 气体；高浓度的 CO<sub>2</sub> 气体进入 CO<sub>2</sub> 压缩机进行压缩，随后进入干燥脱水系统除去水分，再进入 CO<sub>2</sub> 液化系统冷却降温，最终得到纯度 99.5%（体积比）、压力为 2.2 MPa、温度为 -20 °C 的液态 CO<sub>2</sub>；液态 CO<sub>2</sub> 最终储存在 2 台

650 m<sup>3</sup> 的球罐中，生产出的 CO<sub>2</sub> 主要用于矿化粉煤灰制砖和驱油封存。

### 1.2 系统用水情况

碳捕集系统中的脱盐水来自电厂主机脱盐水系统，系统中补水是经碳捕集系统尾气洗涤槽至地下槽由泵打入吸收-再生系统中，以维持系统水平衡。除盐水设计水质主要参数见表 1。

碳捕集系统中的主要用水有以下 2 处。

1) 吸收-再生系统中用水 在实际运行过程中，吸收-再生系统胺液浓度质量分数一般维持在 20%~30%，系统中的脱盐水一部分用于稀释原胺液至预定含量，另一部分用于运行过程中，通过补充除盐

水至吸收塔和再生塔，确保 2 个塔的液位满足运行要求。

2) 再生蒸汽减温水用水 碳捕集系统中再生蒸汽为主机低辅供汽，蒸汽参数为 0.63 MPa、290 °C，再生过程中，用于胺液加热的降膜再沸器所需蒸汽参数为 0.3 MPa、144 °C，此过程需要通过脱盐水减温减压得到。

表 1 碳捕集系统脱盐水水质参数

Tab.1 Water quality parameters of the desalinated water in carbon capture system

项目	内容
压力/MPa	0.4
温度/°C	常温
悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤5
总硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	≤0.05
pH 值 (25 °C)	7.0~8.5

## 2 水平衡测量与计算方法

### 2.1 水量测量

按照《火力发电厂能量平衡导则 第 5 部分：水平衡试验》(DL/T 606.5—2009)的要求<sup>[13]</sup>，采用美国 GE 公司生产的 PT 878 型便携式超声波流量计，仪表精度为 1%。主要针对碳捕集系统脱盐水补水管线流量、减温减压脱盐水管线流量进行测量。现场吸收塔、再生塔、除盐水箱、地下槽液位采用液位差压式液位变送器，符合《工业过程控制系统用变送器性能评估方法》(IEC 60770)标准<sup>[14]</sup>。

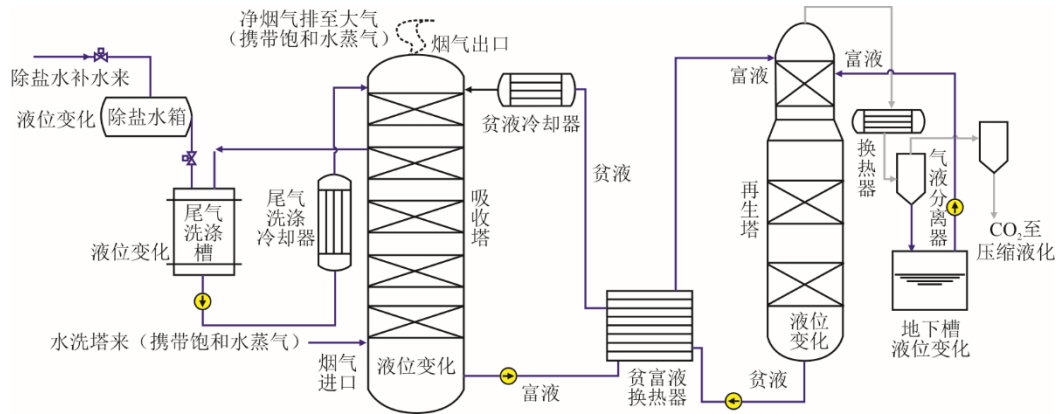


图 2 吸收-再生系统模型  
Fig.2 The absorption-regeneration system model

### 2.3 烟气水量计算

吸收-再生系统中，烟气携带水量是影响水平衡的重要因素。吸收塔入口烟气来自水洗塔，烟气在水洗塔中被冷却，在运行过程中，通过水洗塔对烟气的预处理，为确保烟气进入吸收塔内有较充分

按照碳捕集系统 50%、65%、80%、100% 额定烟气流工况进行测量，各工况测量过程中的吸收剂质量分数维持在 21%~23%。

### 2.2 吸收-再生系统水平衡计算模型

根据碳捕集系统的运行工艺，碳捕集系统中水平衡控制的研究重点在吸收-再生系统中，其计算模型如图 2 所示。由图 2 可见，系统中，外界进水包括除盐水补水和来自水洗塔进入吸收塔的烟气所携带水蒸气；系统排水则涵盖吸收塔顶部烟气夹带的水蒸气以及再生塔产生的 CO<sub>2</sub> 气体至压缩工段时随气流排出的夹带水分。其中，再生塔出口至压缩机所携带的水蒸气经过后端的再生气冷凝器、压缩机级冷凝水两级冷却后，通过地下槽返回到吸收-再生系统，不与系统外界产生关联，因此这部分是吸收-再生系统的水内循环。系统内液位变化的设备有除盐水箱、吸收塔、再生塔和地下槽，系统水量计算公式为：

$$\sum Q_b = \sum Q_{out} - \left[ \sum Q_{in} + \sum (\Delta L_{DS} + \Delta L_{ABS} + \Delta L_{REG} + \Delta L_{UB}) \right] \quad (1)$$

式中： $Q_b$  为系统补水量，t/h； $Q_{in}$  为水洗塔至吸收塔烟气所携带水量，t/h； $Q_{out}$  为吸收塔顶部烟气夹带水量，t/h； $\Delta L_{DS}$  为除盐水箱水量变化，t/h； $\Delta L_{ABS}$  为吸收塔水量变化，t/h； $\Delta L_{REG}$  为再生塔水量变化，t/h； $\Delta L_{UB}$  为地下槽水量变化，m<sup>3</sup>。

的 CO<sub>2</sub>-胺液反应，吸收塔入口温度一般控制在 40 °C。而吸收塔出口烟气由尾气洗涤冷却器冷却，所以吸收塔入口和吸收塔出口烟气中均含饱和水蒸气，水蒸气分压力为温度的单值函数，即  $p_{sat} = f(T)$ ，水蒸气密度为压力、温度函数，即  $\rho = f(T, p)$ 。

进而根据道尔顿分压定律和理想气体状态方程获得水蒸气的体积流量:

$$V_w = V_g \times \frac{p_{\text{sat}}}{p_g} \quad (2)$$

式中:  $V_w$  为水蒸气体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $V_g$  为烟气体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $p_{\text{sat}}$  为水蒸气分压力(该温度对应的饱和压力),  $\text{kPa}$ ;  $p_g$  为烟气压力(绝压),  $\text{kPa}$ 。

烟气在吸收塔中升温耗水量  $\Delta m$  计算公式为:

$$\Delta m = V_{w,o} \times \rho_o - V_{w,i} \times \rho_i \quad (3)$$

式中:  $V_{w,o}$  为吸收塔出口水蒸气体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\rho_o$  为吸收塔出口水蒸气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V_{w,i}$  为吸收塔入口水蒸气体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\rho_i$  为吸收塔入口水蒸气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 3 水平衡试验结果分析

#### 3.1 不同负荷工况下水平衡问题分析

本研究采用试验测量与理论计算相结合的方法, 系统分析了不同负荷工况下碳捕集系统的水耗特性。基于吸收-再生系统实际运行参数构建水平衡模型:

1) 测试基准设定为级间冷却器正常投运状态, 尾气洗涤器及贫液冷却器循环水量维持 60% 工况; 2) 控制气液比在标准状态下为 220~260  $\text{m}^3/\text{t}$ , 实时监测烟气流量、水蒸气分压和密度等核心参数。表 2 实测数据显示, 系统总耗水量随负荷提升呈现显著非线性增长特征, 负荷率达 100% 时总耗水量达 1.80  $\text{t}/\text{h}$ 。

表 2 不同工况下消耗水蒸气试验数据  
Tab.2 Test data for steam consumption under different working conditions

单位:  $\text{t}/\text{h}$

参数	定义	负荷			
		50%	65%	85%	100%
除盐水箱补水量	系统为维持水平衡在单位时间内补充的除盐水量	0.06	0.42	1.04	1.38
进口烟气含水量	系统入口烟气中水蒸气的质量流量	0.17	0.23	0.28	0.40
出口烟气含水量	系统出口烟气中水蒸气的质量流量	0.32	0.43	1.08	1.82
洗涤液储槽水量变化	净液位变化折算成质量流量	-0.13	0.06	0.05	-0.09
吸收塔水量变化	吸收塔液位波动引起的储水量净变化	0.16	-0.23	-0.12	0.12
再生塔水量变化	再生塔液位波动引起的储水量净变化	0.14	-0.12	-0.10	-0.08
地下槽水量变化	冷凝水收集系统的水存储量变化	-0.08	0.05	-0.16	0.09
每小时耗水量	系统试验期间的等效稳定水耗	0.20	0.40	0.96	1.80

根据水量测量和计算结果, 针对 100% 负荷率工况下的用水情况, 得到碳捕集系统水平衡如图 3 所示。由图 3 可以看出, 碳捕集系统的总耗水量为 1.82  $\text{t}/\text{h}$ 。由于计算过程中选取参数等与实际情况略有差别, 系统总补水量和总耗水量存在一定误差。本次测量各工况不平衡率在 2%~4% 之间。

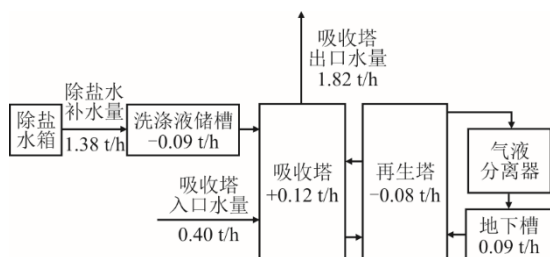


图 3 100% 负荷率工况水平衡

Fig.3 Water balance under 100% load operating conditions

为进一步分析吸收塔进出口温度对系统水平衡的影响。基于试验工况的烟气流量参数, 对不同负荷条件下吸收塔进出口烟气温升 ( $2\sim 16\text{ }^\circ\text{C}$ ) 对

系统耗水量的影响进行理论分析与计算。理论计算结果表明(图 4), 各工况下系统耗水量随进出口烟气温差的增大呈显著上升趋势, 这主要归因于烟气饱和水蒸气携带量与温度的正相关特性。当吸收塔出口烟温升高时, 其携带的饱和水蒸气含量相应增加, 导致系统需要通过补充除盐水来维持物质平衡。进一步分析表明, 耗水量增速与温升幅度呈非线性正相关, 温升越大, 单位温升对应的耗水增量越显著。当温升达到  $16\text{ }^\circ\text{C}$  时, 系统在 50%、65%、80%、100% 额定负荷下的除盐水消耗量分别达到 0.65、0.81、1.26、1.46  $\text{t}/\text{h}$ 。值得注意的是, 随着烟气负荷的增大, 温升对耗水量的影响呈现明显的放大效应, 在 100% 负荷工况下,  $16\text{ }^\circ\text{C}$  温升导致的耗水量较 50% 负荷工况增加了 124.6%。这一现象可归因于高负荷条件下更大的烟气体积流量与温升效应的协同作用。因此, 在碳捕集系统运行过程中, 吸收塔进出口烟气温差控制是影响系统水耗的关键工艺参数。

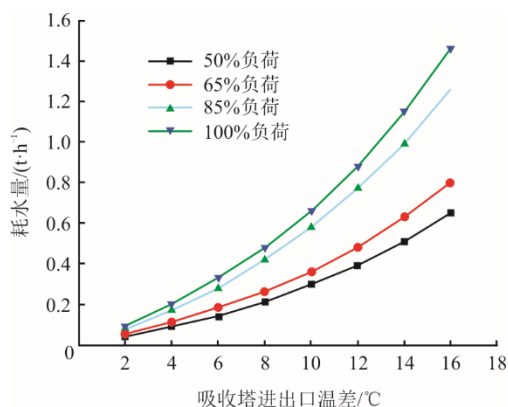


图 4 吸收塔进、出口烟气温差对耗水量影响  
Fig.4 Impact of flue gas temperature differential at the absorber inlet and outlet on water consumption

### 3.2 水平衡控制试验

试验发现,降低吸收塔出口温度可有效建立系统水平衡,针对现场实际工况,能够降低吸收塔顶温度的措施主要有降低尾气洗涤器出口温度及贫液冷却器出口温度,核心在于热力学与传质协同作用优化系统水平衡,吸收塔内温度直接影响溶剂吸收效率及水分蒸发速率。为了试验该温度对吸收塔顶温度的影响,在系统满负荷工况下,通过调整尾气洗涤器循环水流量、贫液冷却器循环水流量。4 个工况待其系统参数稳定后,在 DCS 中取 1 h 内的平均值。尾气洗涤器出口温度由 50 °C 降低至 40 °C。调整贫液冷却器流量,贫液出口温度由 45 °C 降低至 40 °C,探究对吸收塔出口温度的影响效果。试验结果见表 3。

表 3 满负荷工况下水平衡控制试验结果  
Tab.3 The result of water balance control test at full load

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
尾气洗涤器出口温度/°C	50	45	40	40
贫液冷却器出口温度/°C	45	45	45	40
吸收塔出口温度/°C	54	49	45	43
每小时耗水量/(t·h <sup>-1</sup> )	1.80	0.96	0.56	0.24

结果表明:尾气温度由 50 °C 降低至 40 °C,减少了气相显热输入,削弱气液传热驱动力,抑制溶剂升温;贫液温度由 45 °C 降低至 40 °C,则提升 CO<sub>2</sub> 溶解度,降低溶剂挥发,二者协同降低了塔内热负荷。吸收塔出口温度可由 54 °C 降低至 43 °C,系统耗水量降低约 86.7%。从理论角度分析,塔顶温度降低直接抑制水分蒸发,除盐水消耗量逐渐降低,同时低温贫液黏度增加减少雾沫夹带,双重作用显著降低除盐水消耗。最优工况下,除盐水消耗量仅为 0.24 t/h,可有效维持系统水衡。国际领

先的碳捕集系统水耗阈值为 0.35 t/h (Global CCS Institute, 2023) [15],本研究优化后数值优于该参考标准。

### 3.3 水平衡控制对碳捕集系统的影响

#### 3.3.1 对碳捕集率的影响

碳捕集率反映的是系统吸收 CO<sub>2</sub> 的能力,因从再生塔来的贫液是由吸收塔顶部自流至底部,与烟气进行逆流吸收反应。在试验过程中,通过控制系统水平衡,在满负荷工况下,将吸收塔出口温度从 54 °C 降低至 43 °C 时,捕集效率得到明显提升,通过在线气相色谱仪实测,CO<sub>2</sub> 捕集率从 90.2% 升至 93.8% (绝对值提升 3.6 百分点)。

从理论上分析:胺液吸收 CO<sub>2</sub> 为放热反应,温度降低对吸收的动力学有一定影响,胺液吸收 CO<sub>2</sub> 为放热反应,降低温度至 40 °C 可提高反应平衡常数,促进吸收速率。同时,低温下胺液黏度上升,延长气液接触时间,可提高传质效率。

#### 3.3.2 对胺逃逸的影响

胺逃逸是碳捕集系统胺损耗的主要因素之一,吸收塔顶部温度越高,由塔顶水蒸气或者液滴携带出的胺液就越多,造成的胺损耗就越大,对碳捕集系统的经济性就有直接的影响,降低塔顶的温度,可有效实现塔顶液体的回收。在系统满负荷工况下,通过调整尾气洗涤器循环水流量、贫液冷却器循环水流量,吸收塔出口温度由 54 °C 降低至 43 °C,吸收塔出口折算胺逃逸损失为每吨 CO<sub>2</sub> 由 0.28 kg 降低至 0.18 kg,降低约 35.7%。同时,对外排放烟气等环保方面也有积极的影响。

## 4 结 论

1) 碳捕集系统吸收塔顶温度对耗水量影响明显,吸收塔进出口温差越大,耗水量越大。随着负荷的升高,由于吸收塔内气液反应放出的热量增大,溶液温度升高导致反应时间常数降低,促使 CO<sub>2</sub> 吸收速率提高。但同时也加剧了溶液水分子活化逃逸,吸收塔塔顶的温度呈增高趋势,系统耗水量也相应升高。

2) 通过降低尾气洗涤器出口温度、贫液冷却器出口温度,可有效控制吸收塔出口温度,减少胺液损耗。满负荷工况下,吸收塔出口温度由 54 °C 降低到 43 °C 后,系统耗水量从 1.80 t/h 减少到 0.24 t/h,降低约 86.7%。

3) 针对捕集系统耗水量增加及运行成本升高

等问题, 结合实际运行情况, 提出了通过调整循环水量, 提高贫液冷却器和尾气洗涤器的换热效果, 从而进一步改善吸收塔温度场, 降低吸收塔出口温度的建议。本试验研究成果可为捕集系统高效经济运行提供指导。

### 【参考文献】

- [1] 方梦祥, 王涛, 张翼. 烟气二氧化碳化学吸收技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2023: 353.  
FANG Mengxiang, WANG Tao, ZHANG Yi. Chemical absorption technology for carbon dioxide in flue gas[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2023: 353.
- [2] 曹文浩, 周明宇, 周军, 等. 吸收法烟气二氧化碳捕集系统的工艺优化研究[J]. 现代化工, 2025, 45(3): 249-253.  
CAO Wenhao, ZHOU Mingyu, ZHOU Jun, et al. Study on process optimization of absorption route flue gas carbon dioxide capture system[J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(3): 249-253.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局. 煤电低碳化改造建设行动方案(2024—2027年)[EB/OL]. (2024-07-15) [2025-01-12]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202407/t20240715\\_1391665.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202407/t20240715_1391665.html).  
National Development and Reform Commission, Energy Administration. Action plan for low carbon transformation and construction of coal and electricity (2024—2027)[EB/OL]. (2024-07-15) [2025-01-12]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202407/t20240715\\_1391665.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202407/t20240715_1391665.html).
- [4] LIN Y J, PAN T H, WONG D S H, et al. Plant wide control of CO<sub>2</sub> capture by absorption and stripping using monoethanolamine solution[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2011, 50(3): 1338-1345.
- [5] 于航, 梁达扬, 余子炎, 等. 脱硫废水蒸发系统对燃煤电厂水平衡及氯平衡的影响[J]. 动力工程学报, 2024, 44(12): 1935-1940.  
YU Hang, LIANG Dayang, YU Ziyan, et al. The impact of desulfurization wastewater evaporation system on the water balance and chlorine balance of coal-fired power plants[J]. Journal of Power Engineering, 2024, 44(12): 1935-1940.
- [6] 赵宁, 汤龙华, 刘海滨. 鼓泡塔烟气脱硫系统水平衡试验[J]. 热力发电, 2016, 45(9): 116-121.  
ZHAO Ning, TANG Longhua, LIU Haibin. Experimental study on the level balance of the flue gas desulfurization system of the bubble tower[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(9): 116-121.
- [7] 刘飞. 胺基两相吸收剂捕集二氧化碳机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 1.  
LIU Fei. Study on the mechanism of carbon dioxide capture by amino-based two-phase absorbent[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 1.
- [8] BELABBACI A, RAZZOUK A, MOKBEL I, et al. Isothermal vapor-liquid equilibria of (monoethanolamine + water) and (4-methylmorpholine + water) binary systems at several temperatures[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2009, 54(8): 2312-2316.
- [9] 刘飞, 祁志福, 方梦祥, 等. 用于烟气二氧化碳捕集的有机胺挥发性研究进展[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 33-43.  
LIU Fei, QI Zhifu, FANG Mengxiang, et al. Research progress of amine volatility for carbon dioxide capture from flue gas[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 33-43.
- [10] KVAMSDAL H M, HETLAND J, HAUGEN G, et al. Maintaining a neutral water balance in a 450 MWe NGCC-CCS power system with post-combustion carbon dioxide capture aimed at offshore operation[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(4): 613-622.
- [11] ZHANG Y, SMITH J, BROWN K, et al. Temperature gradient effects on amine loss in CCS systems[R]. London, UK: IEA Clean Coal Centre, 2022: 1.
- [12] WANG H, LI X, LIU Y, et al. Dynamic model of water balance in post-combustion carbon capture[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116336.
- [13] 国家能源局. 火力发电厂能量平衡导则 第5部分: 水平衡试验: DL/T 606.5—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 3-7.  
National Energy Administration. Guide for energy balance of thermal power plant. Part 5: water balance test: DL/T 606.5—2009[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 3-7.
- [14] 国际电工委员会. 工业过程控制系统用变送器 第3部分: 智能变送器性能评定方法: IEC 60770-3: 2014[S]. 日内瓦: 国际电工委员会, 2014: 15.  
International Electrotechnical Commission. Transmitters for use in industrial-process control systems: Part 3: Methods for performance evaluation of intelligent transmitters: IEC 60770-3: 2014[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014: 15.
- [15] Global CCS Institute. Global status of CCS 2023: technical analysis of water consumption in carbon capture systems[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2023: 3.

(责任编辑 杜亚勤)