

## 工业技术

## 燃煤电厂溶剂法碳捕集中试系统分析

王保登, 崔倩, 闫学良, 张峰, 龙银花, 孙永伟, 熊日华\*

(北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

**摘要:**通过对某电厂溶剂法 CO<sub>2</sub> 捕集中试装置开展基础溶剂(30%乙醇胺(MEA))的测试,揭示了烟气流量、贫液流量、再生温度、再生压力等关键操作条件对 CO<sub>2</sub> 脱除率和再生能耗的影响规律,预测了 CO<sub>2</sub> 脱除率 90%、再生能耗 4.0 GJ/t 时的装置操作范围,通过选定预测操作条件的 24 h 连续运行验证了预测的准确性,证实了该溶剂法 CO<sub>2</sub> 捕集装置的可靠性,为后续其他溶剂在该装置上的测试奠定了基础。该研究方法在电厂溶剂法 CO<sub>2</sub> 捕集中试装置上的成功应用,大大提高了中试现场的工作效率,也将为更大规模的溶剂法 CO<sub>2</sub> 捕集示范工程提供宝贵的借鉴经验。

**关键词:**燃煤电厂; CO<sub>2</sub> 吸收; 乙醇胺; CO<sub>2</sub> 脱除率; 能耗

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)12-0242-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.12.043

Analysis on slipstream CO<sub>2</sub> capture pilot facility at coal fired power plantWANG Bao-deng, CUI Qian, YAN Xue-liang, ZHANG Feng, LONG Yin-hua,  
SUN Yong-wei, XIONG Ri-hua\*

(National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, CHN Energy, Beijing 102211, China)

**Abstract:** Through performing test with benchmark solvent (30% monoethanolamine) at the slipstream CO<sub>2</sub> capture pilot facility in a power plant, the influence of several key operation conditions such as flue gas flow rate, lean solvent flow rate, regeneration temperature, regeneration pressure on CO<sub>2</sub> removal rate and regeneration energy consumption are investigated. Meanwhile the operation conditions for the slipstream facility to achieve a 90% of CO<sub>2</sub> capture efficiency and 4.0 GJ/tCO<sub>2</sub> of regeneration energy consumption are predicted. The prediction is validated via a continuous 24-hour test with the optimized conditions, which provides a baseline for other solvent assessments on this facility. The successful application of this research approach for slipstream CO<sub>2</sub> capture pilot facility has improved the efficiency of pilot-scale testing, and will also supply with valuable experience for larger-scale slipstream CO<sub>2</sub> capture demonstrations in the future.

**Key words:** coal fired power plant; CO<sub>2</sub> adsorption; monoethanolamine; CO<sub>2</sub> removal efficiency; energy consumption

随着“双碳”目标的确定, CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存(CCUS)在实现碳中和进程中的定位越发清晰。国际能源署(IEA)发布的《2050年净零排放:全球能源行业路线图》指出, CCUS是唯一能够在发电和工业过程中大幅减少化石燃料碳排放的解决方案<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub> 捕集作为 CCS 的上游环节, 较高的捕集成本是制约 CCS 大规模应用的最大瓶颈。燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕集技术主要包括溶剂法、膜法和吸附法<sup>[2]</sup>, 其中溶剂法是目前最成熟的 CO<sub>2</sub> 捕集技术, 如加拿大 Boundary Dam 项目<sup>[3]</sup>、美国 Petra Nova 项目<sup>[4]</sup>等, 均在燃煤电厂开展了碳捕集示范应用。我国近年来也开展了多处燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 捕集示范项目, 如国能锦界电厂 15 万 t/a CO<sub>2</sub> 捕集项目<sup>[5]</sup>、华能石洞口 10 万 t/a CO<sub>2</sub> 捕集项目<sup>[6]</sup>、重庆双槐电厂 1 万 t/a CO<sub>2</sub>

捕集项目<sup>[7]</sup>等。

随着新能源的快速发展, 大部分电厂需以灵活调峰的模式运行以满足不同时期用电量的需求, 而电厂烟气中的 CO<sub>2</sub> 浓度会随着电厂发电负荷的降低而升高<sup>[8]</sup>, 为了研究这种灵活模式给 CO<sub>2</sub> 捕集产生的影响, 国家能源集团北京低碳清洁能源研究院在四川江油发电厂建立了集溶剂法和膜法一体的碳捕集平台。

本文中主要针对溶剂法 CO<sub>2</sub> 捕集装置的操作条件进行分析优化, 以此验证装置的可靠性。根据文献报道, 本文中采用质量分数 30% 的乙醇胺(MEA)溶液作为基础溶剂<sup>[9-11]</sup>, 通过实验探究, 掌握了烟气流量、贫液流量、再生塔温度和压力等关键操作参数对 CO<sub>2</sub> 脱除率和再生能耗的影响规律, 通过对实验数据进行分析模拟, 预测了该溶剂法 CO<sub>2</sub>

收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2022-10-05

基金项目: 国家能源集团科技创新项目(CF9300190059, ST930022003N)

作者简介: 王保登(1990-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为 CCUS, baodeng.wang@chnenergy.com.cn; 熊日华(1978-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为 CCUS、水处理及大气环保, 通讯联系人, rihua.xiong@chnenergy.com.cn。

捕集装置较好的运行条件,掌握了装置稳定运行的关键参数,验证了该溶剂捕集装置的可靠性,为后续溶剂的测试奠定了基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

片状 NaOH(质量分数 99%) 和 HCl 溶液(质量分数 37%) 均购自国药试剂,分别用于脱除烟气中的  $\text{SO}_x$  和酸碱滴定测定 MEA 溶液浓度,工业级 MEA 购自巴斯夫,稀释至质量分数为 30% 后用于  $\text{CO}_2$  捕集测试。测试中所用烟气为江油电厂 9# 机组脱硫后烟气(主要成分见表 1),蒸汽为  $190^\circ\text{C}$  饱和辅热蒸汽。

表 1 烟气主要成分

组分	$\text{N}_2$ 体积 分数/%	$\text{CO}_2$ 体积 分数/%	$\text{O}_2$ 体积 分数/%	$\text{H}_2\text{O}$ 体积 分数/%	$\text{SO}_x$ 含量/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
数值	74.43	11.94	6.04	7.499	<30

### 1.2 分析仪器

$\text{CO}_2$  浓度分析仪, GXH-3011 型,北京市华云分析仪器研究所有限公司;气相色谱, GC-450 型,上海辉世仪器设备有限公司;酸碱滴定装置,自制。

### 1.3 实验系统

溶剂法  $\text{CO}_2$  捕集装置主要由吸收塔、再生塔、贫富液换热器、再沸器、风机、泵及  $\text{CO}_2$  分析仪等组成,具体流程如图 1 所示。

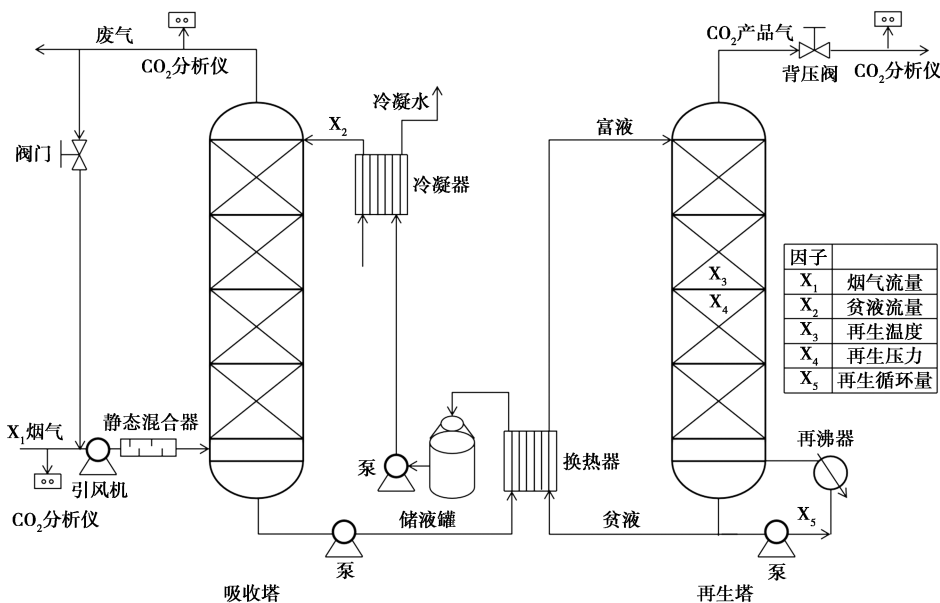


图 1 溶剂法  $\text{CO}_2$  捕集系统示意图

### 1.4 关键指标

鉴于溶剂法  $\text{CO}_2$  捕集产品气体积分数较容易达到  $\geq 99\%$  的需求,本文中侧重研究  $\text{CO}_2$  脱除率和再生能耗 2 个关键指标。此外,吸收剂浓度和  $\text{CO}_2$  负载量是监测系统运行是否稳定的重要指标,在现场测试过程中以甲基橙为指示剂,采用  $0.1 \text{ mol/L}$  的稀盐酸进行滴定测试。

#### 1.4.1 $\text{CO}_2$ 脱除率

烟气进入该捕集装置前,会经预处理塔去除烟气中自带的少量  $\text{SO}_x$ , 处理后的烟气温度在  $20 \sim 25^\circ\text{C}$ , 因此假设进入吸收塔的烟气为理想气体,则  $\text{CO}_2$  脱除率可用公式(1)计算:

$$\eta = (V_{\text{in}} - V_{\text{out}}c_{\text{out}})/(V_{\text{in}}c_{\text{in}}) = 1 - [(1 - c_{\text{in}})/(1 - c_{\text{out}})](c_{\text{out}}/c_{\text{in}}) \quad (1)$$

式中,  $V_{\text{in}}$ 、 $V_{\text{out}}$  分别为吸收塔入口和出口气体流量,

$\text{m}^3/\text{h}$ ;  $c_{\text{in}}$ 、 $c_{\text{out}}$  分别为吸收塔入口和出口  $\text{CO}_2$  体积分数, %。

#### 1.4.2 再生能耗

由于蒸汽显热在本研究测试中占总能耗的 1% 左右,因此在本研究中忽略了显热,只对蒸汽的潜热进行计算,再生能耗可用公式(2)计算:

$$E = (m_{\text{steam}} \times H)/(1000 \times m_{\text{CO}_2}) \quad (2)$$

式中,  $m_{\text{steam}}$ 、 $m_{\text{CO}_2}$  分别为蒸汽消耗量和  $\text{CO}_2$  捕集量, kg;  $H$  为单位蒸汽的焓值, kJ/kg。

#### 1.4.3 $\text{CO}_2$ 负载量

在测试现场,以甲基橙为指示剂,采用  $0.1 \text{ mol/L}$  稀盐酸对溶剂中  $\text{CO}_2$  负载量进行滴定分析,  $\text{CO}_2$  的负载量可用公式(3)计算:

$$\alpha = n_{\text{CO}_2}/n_{\text{Amine}} \quad (3)$$

式中,  $n_{\text{Amine}}$  和  $n_{\text{CO}_2}$  分别为滴定过程中使用 MEA 和释放  $\text{CO}_2$  的物质的量, mol。

## 2 测量系统分析

### 2.1 测量系统可靠性实验

测量系统的可靠性对中试装置十分重要, 本研究中的测量系统主要由  $\text{CO}_2$  分析仪、烟气流量计、吸收剂流量计、压力表、热电偶等组成。运行过程中最佳再生温度和再生压力基本接近溶剂的沸点<sup>[11-12]</sup>, 在实际运行中发现, 当再生温度、压力、吸收剂流量、烟气流量等出现小幅波动时,  $\text{CO}_2$  脱除率和能耗会出现较大波动, 这表明  $\text{CO}_2$  脱除率和能耗对这些操作因素十分敏感。基于前期运行经验, 初选再生温度  $114^\circ\text{C}$ , 再生压力  $0.15\text{ MPa}$ , 液气比分别为  $2.8$ 、 $3.2$ 、 $3.6\text{ L/m}^3$ , 3 组操作人员分别对每个工艺条件进行 3 次重复测试以验证测量系统的可靠性(如表 2 所示)。

表 2 溶剂法  $\text{CO}_2$  捕集装置  $\text{CO}_2$  脱除率及再生能耗测试情况

测试编号	操作人员	液气比/ ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\text{CO}_2$ 脱除率/%	捕集能耗/ ( $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$ )
1	A	2.8	72.07	3.97
2	A	2.8	72.03	3.99
3	A	2.8	71.97	3.99
4	B	2.8	71.77	4.03
5	B	2.8	70.89	4.05
6	B	2.8	72.05	3.98
7	C	2.8	70.97	4.09
8	C	2.8	71.47	4.01
9	C	2.8	71.50	3.99
10	A	3.2	82.70	3.77
11	A	3.2	82.93	3.76
12	A	3.2	82.59	3.78
13	B	3.2	83.22	3.74
14	B	3.2	83.69	3.75
15	B	3.2	83.32	3.73
16	C	3.2	83.39	3.75
17	C	3.2	84.08	3.72
18	C	3.2	83.53	3.71
19	A	3.6	66.60	3.56
20	A	3.6	66.96	3.58
21	A	3.6	65.65	3.59
22	B	3.6	65.96	3.58
23	B	3.6	66.27	3.59
24	B	3.6	67.86	3.61
25	C	3.6	67.64	3.61
26	C	3.6	66.03	3.59
27	C	3.6	65.79	3.60

### 2.2 测量系统可靠性分析

对表 2 数据进行测量系统重复性和再现性(gauge repeatability & reproducibility)分析, 一般认为误差小于 10% 表示测量系统没有问题, 小于 30% 表示测量系统可接受, 大于 30% 则为不可接受<sup>[13]</sup>。通过分析发现, 脱除率结果重复性较好, 误差为 9.71%, 表明脱除率的测量系统可靠; 再生能耗的重复性误差为 17.25%, 表明再生能耗的测量系统是可接受的。通过分析表明测量系统可靠, 可以开展后续测试。

## 3 结果与讨论

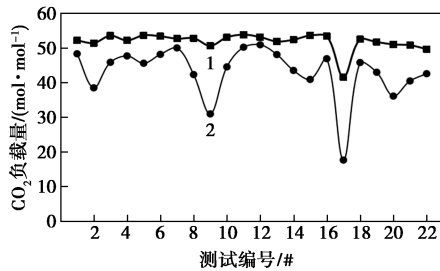
### 3.1 DOE 实验测试情况

在江油电厂  $\text{CO}_2$  捕集现场运行中, 经过反复调试,  $\text{CO}_2$  脱除率可达到 90% 以上, 但再生能耗远高于  $4.0\text{ GJ/t}$ 。为了能够有效预测该装置的较好操作条件区间, 减少试错时间, 结合文献报道和本装置基本情况, 对烟气流量  $X_1$ 、贫液流量  $X_2$ 、再生温度  $X_3$ 、再生压力  $X_4$ 、再生循环量  $X_5$  几个关键操作变量进行了 Design of Experiment (DOE) 实验设计(如表 3 所示)。

表 3 DOE 实验设计测试方案及测试情况

测试编号	烟气流量 $X_1$	贫液流量 $X_2$	再生温度 $X_3$	再生压力 $X_4$	再生循环量 $X_5$	MEA 质量分 数/%	$\text{CO}_2$ 脱除 率/%	捕集 能耗/ ( $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$ )
1	20	100	110	0.2	30	30.49	50.14	8.77
2	20	80	115	0.175	40	31.04	76.57	7.53
3	25	80	110	0.175	30	30.41	37.57	5.91
4	20	60	110	0.2	50	31.13	29.26	13.29
5	25	60	105	0.15	50	29.74	27.66	11.73
6	30	100	105	0.15	30	31.62	34.66	10.77
7	30	80	105	0.2	50	31.12	23.29	9.87
8	25	60	115	0.2	30	32.04	44.02	8.77
9	30	100	115	0.15	30	30.50	85.77	5.89
10	25	80	110	0.175	40	31.04	50.04	8.72
11	25	80	105	0.2	40	31.77	29.04	11.90
12	30	60	105	0.2	30	32.03	19.81	12.90
13	25	100	115	0.2	50	31.06	46.95	13.02
14	20	100	105	0.175	50	31.62	54.78	7.54
15	30	80	110	0.15	50	31.06	49.76	7.92
16	20	60	105	0.15	30	31.48	36.62	14.96
17	20	60	115	0.15	50	31.90	98.53	7.89
18	30	100	110	0.175	40	31.06	42.53	10.50
19	30	80	115	0.2	30	30.92	44.79	8.50
20	30	60	115	0.175	50	31.31	46.28	10.16
21	30	60	110	0.15	30	30.78	39.44	7.67
22	20	100	110	0.15	40	30.92	83.37	8.28

测试过程中溶液中 MEA 质量分数维持在 30% 左右,表明整个测试系统液相体系水平衡基本稳定,可以开展相关测试。从图 2 中可以看出,富液中  $\text{CO}_2$  负载量基本维持在  $0.5 \text{ mol/mol}$ ,与文献中报道的 MEA 吸收  $\text{CO}_2$  的情况及理论吸收能力基本一致<sup>[12,14]</sup>,表明在测试过程中吸收剂对  $\text{CO}_2$  的吸收能力基本达到饱和。而贫液中  $\text{CO}_2$  负载量的高低是由再生程度决定的,负载量越低,表明再生得越彻底,文献中报道的较理想的运行工况下,贫液中  $\text{CO}_2$



1—富液中负载量;2—贫液中负载量

图 2 贫富液  $\text{CO}_2$  负载量变化

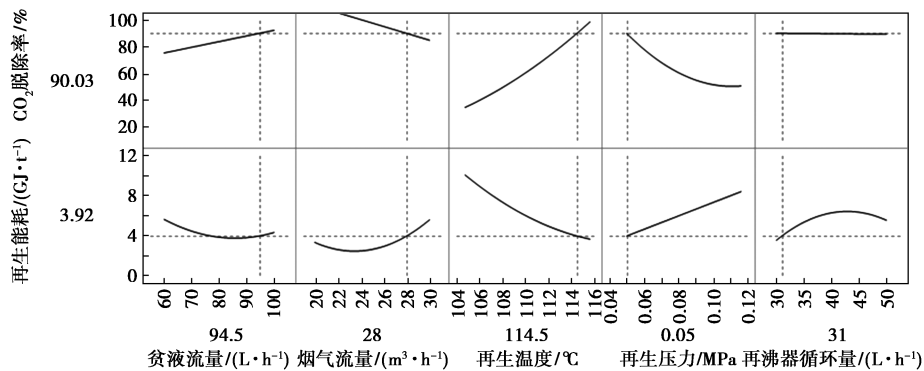


图 3 操作参数对  $\text{CO}_2$  脱除率和再生能耗的影响规律

根据预测,当液气比约为  $3.4 \text{ m}^3/\text{L}$  (烟气流量  $28 \text{ m}^3/\text{h}$ 、贫液流量  $94.5 \text{ L/h}$ )、再生温度  $114.5^\circ\text{C}$ 、再生压力  $0.15 \text{ MPa}$  时,装置将达到较好的运行状态, $\text{CO}_2$  脱除率达到  $90.03\%$ ,再生能耗低至  $3.92 \text{ GJ/t}$ 。

### 3.3 装置操作空间预测

在实际现场运行中,操作变量的变化会给装置运行带来较大波动。液气比是装置运行过程中经常变动的参数,为了保证装置的动态稳定运行,有必要给出一个合理的烟气流量和贫液流量操作范围。图 4 预测了本装置可实现  $\text{CO}_2$  脱除率  $\geq 90\%$  和再生能耗  $\leq 4.0 \text{ GJ/t}$  需求的“理论操作空间”(图 4 白色和黑色区域所示)。但在实际运行过程中,为了捕集尽可能多的  $\text{CO}_2$ ,后续测试过程中应将烟气流量保持在尽可能大的水平,实际满足需求的操作空间如

负载量约为  $0.25 \text{ mol/mol}$ <sup>[14]</sup>,但本轮测试中贫液中  $\text{CO}_2$  负载量波动较大,涵盖了再生不足、再生适中、再生过度的几种情况,表明了实验设计的科学性。

### 3.2 操作条件对脱除率和能耗影响

采用 JMP 软件对 5 个操作变量对  $\text{CO}_2$  脱除率和再生能耗的影响进行拟合(如图 3 所示),可以得到以下规律:①再生温度越高、再生压力越低, $\text{CO}_2$  脱除率越高,这是因为高温和低压有助于溶剂沸腾,促进吸收态  $\text{CO}_2$  解吸,提高贫液对  $\text{CO}_2$  的吸收,致使  $\text{CO}_2$  脱除率升高;②随着再生温度的升高,能耗呈现下降趋势,这说明再生温度的升高对  $\text{CO}_2$  解吸影响大于能耗增加的影响,而能耗则随着再生压力的升高而升高,这是因为压力的升高抑制了  $\text{CO}_2$  解吸;③贫液流量越高、烟气流量越低时, $\text{CO}_2$  脱除率越高,这是因为高液气比有助于  $\text{CO}_2$  脱除率的提升,保障了  $\text{CO}_2$  的脱除,但过高或过低的贫液流量与烟气流量都会增加捕集能耗;④再沸器循环量对  $\text{CO}_2$  脱除率基本没有影响,但对能耗有一定影响。

图 4 中“实际操作空间”所示(图 4 黑色区域)。

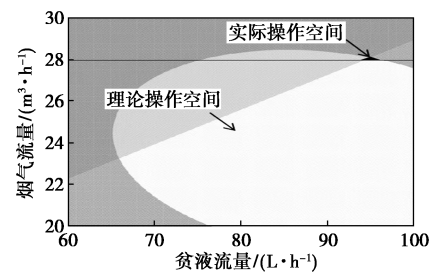


图 4 预测烟气流量和贫液流量操作空间

### 3.4 装置可靠性验证

为了验证预测的准确性,选取了“实际操作空间”内的一组操作条件进行  $24 \text{ h}$  连续测试,情况如图 5 所示。在  $24 \text{ h}$  的连续运行中,虽然  $\text{CO}_2$  脱除率有所波动,但基本维持在  $90\%$  以上,而捕集能耗的波动较大,这是因为现场蒸汽消耗是通过人工计量

的,在短时间内会出现一定偏差,但 24 h 内平均捕集能耗约为 4.0 GJ/t。图 5 有效说明了图 4 中给出的操作区间的合理性,证明了预测的准确性。

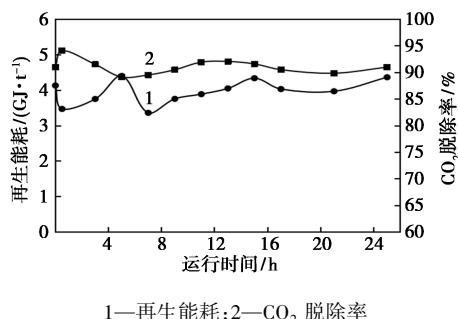


图 5 24 h 连续测试 CO<sub>2</sub> 脱除率和捕集能耗

#### 4 总结与建议

通过对江油电厂溶剂法 CO<sub>2</sub> 捕集装置操作条件的研究,分析了捕集装置测量系统的可靠性,预测了该捕集装置的可操作区间,可实现 CO<sub>2</sub> 脱除率 ≥ 90%,再生能耗 ≤ 4.0 GJ/t 的运行目标,高效地指导了中试现场的运行。通过本研究,初步得到以下结论与建议。

(1)证实了捕集装置的可靠性。实现了 CO<sub>2</sub> 脱除率 90%时,平均再生能耗 4.0 GJ/t 的动态稳定运行,与国内外报道情况基本一致,证实了该捕集装置的可靠性,为该装置后续溶剂的测试奠定了坚实基础。

(2)降低了人、财、物的投入。通过本文中的研究方法,快速获得了较好的运行条件,大大缩减了捕集装置摸索时间,显著降低了人、财、物的投入,该方法在江油电厂溶剂法 CO<sub>2</sub> 捕集装置上的成功应用,也将为国内更大规模类似装置的调试运行提供宝贵的借鉴意义。

(3)指明了系统升级改造方向。本研究中的捕集装置蒸汽计量、吸收剂浓度监测、贫富液 CO<sub>2</sub> 负载量非实时在线监测,数据的分析具有一定的滞后性,会给装置的运行操作条件的调整带来一定误差;同时“实际操作空间”偏小,应降低烟气引风机压头,增加引风机流量。

(4)本研究方法具有一定的局限性。燃煤电厂中烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度会受到煤质、锅炉效率、发电负荷等诸多因素的影响,而本研究中并未对这些因素的波动进行分析,将会增大预测的不准确性。

#### 参考文献

[1] Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector [M/

OL]. International Energy Agency (IEA), <https://netzero.unfccc.int/wp-content/uploads/2021/06/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector.pdf>, May, 2021.

- [2] Gao W, Liang S, Wang R, *et al.* Industrial carbon dioxide capture and utilization: State of the art and future challenges [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49 (23): 8584–8686.
- [3] Wilson M, Tontiwachwuthikul P, Chakma A, *et al.* Test results from a CO<sub>2</sub> extraction pilot plant at boundary dam coal-fired power station [C] // *Greenhouse Gas Control Technologies-6th International Conference*. Pergamon, 2003: 31–36.
- [4] Mantripragada H C, Zhai H, Rubin E S. Boundary dam or petra nova-which is a better model for CCS energy supply? [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 82: 59–68.
- [5] Zhao R, Zhang Y, Zhang S, *et al.* The full chain demonstration project in China—Status of the CCS development in coal-fired power generation in GuoNeng Jinjie [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110: 103432.
- [6] Wang J, Xu S. CO<sub>2</sub> capture RD&D proceedings in China Huaneng Group [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2014, 1(1): 129–134.
- [7] 郑学栋, 张松涛. 燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 捕集技术与经济分析 [J]. *上海化工*, 2011, 36(5): 19–23.
- [8] Dong Y, Jiang X, Liang Z, *et al.* Coal power flexibility, energy efficiency and pollutant emissions implications in China: A plant-level analysis based on case units [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 134: 184–195.
- [9] Idem R, Wilson M, Tontiwachwuthiku P, *et al.* Pilot plant studies of the CO<sub>2</sub> capture performance of aqueous MEA and mixed MEA/MDEA solvents at the University of Regina CO<sub>2</sub> capture technology development plant and the boundary dam CO<sub>2</sub> capture demonstration plant [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 45(8): 2414–2420.
- [10] Nwaoha C, Tontiwachwuthiku P, Benamor A. A comparative study of novel activated AMP using 1, 5-diamino-2-methylpentane vs MEA solution for CO<sub>2</sub> capture from gas-fired power plant [J]. *Fuel*, 2018, 234: 1089–1098.
- [11] Artanto Y, Jansen J, Pearson P, *et al.* Performance of MEA and amine-blends in the CSIRO PCC pilot plant at Loy Yang Power in Australia [J]. *Fuel*, 2012, 101: 264–275.
- [12] Brigman N, Shah M I, Falk P O, *et al.* Results of amine plant operations from 30 wt% and 40 wt% aqueous MEA testing at the CO<sub>2</sub> Technology Centre Mongstad [J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 6012–6022.
- [13] Tsai P. Variable gauge repeatability and reproducibility study using the analysis of variance method [J]. *Quality Engineering*, 1988, 1(1): 107–115.
- [14] Arne G, Neils F, Philip L, *et al.* Pilot scale absorption experiments with carbonic anhydrase-enhanced MDEA-Benchmarking with 30 wt% MEA [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 82: 69–85. ■