

# MEA 吸收电厂烟气 CO<sub>2</sub> 流程模拟与优化

黄卫清<sup>1\*</sup>, 刘伟煌<sup>1</sup>, 苏奎<sup>1</sup>, 梁建东<sup>1</sup>, 赵颖星<sup>1</sup>, 钱宇<sup>2</sup>

(1. 东莞理工学院化学与环境工程学院, 广东 东莞 523808;

2. 华南理工大学化学与化工学院, 广东 广州 510641)

**摘要:**从吸收剂浓度、吸收剂进料温度、解吸塔的压力和解吸塔再沸器热负荷等影响因素对乙醇胺(MEA)吸收电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 的过程进行模拟分析, 从而提出合理的吸收和解吸条件, 为乙醇胺吸收燃煤电厂排放的 CO<sub>2</sub> 的工艺过程优化提供理论指导。

**关键词:**乙醇胺; CO<sub>2</sub>; 吸收; 流程模拟

中图分类号: TQ028

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2015)07-0139-04

## Simulation and optimization of CO<sub>2</sub> capture process by

## MEA for the flue gas from coal-fired power plant

HUANG Wei-qing<sup>1\*</sup>, LIU Wei-huang<sup>1</sup>, SU Kui<sup>1</sup>, LIANG Jian-dong<sup>1</sup>,

ZHAO Ying-xing<sup>1</sup>, QIAN Yu<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Environmental Engineering, Dongguan University of Technology,

Dongguan 523808, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, South China

University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The capture efficiency of CO<sub>2</sub> in the flue gases from coal-fired power plant by using MEA absorbent is focused in this study. The effect of the concentration of absorbent, absorbent temperature, pressure of desorber and the thermal load of reboiler in the desorber are investigated. The simulation results can provide some advice for the CO<sub>2</sub> capture process by MEA in coal-fired power plant.

**Key words:** MEA; CO<sub>2</sub>; absorption; process simulation

温室气体的增多导致地球温度上升, 而地球温度上升会给地球的环境带来严重的恶劣影响。要防止地球环境继续恶化, 全球平均气温增长幅度需控制在 2℃ 以内。而要实现这一目标, 到达 2020 年全球 CO<sub>2</sub> 排放总量需控制大约只排放 440 亿 t。全球气温变暖与现代化城市的电力需求有直接的关系, 而在我国, 由于拥有丰富的煤炭资源, 这样的能源结构决定了在很长时间内我国供电系统采用煤炭为主要的生产电的方式<sup>[1]</sup>。燃煤发电厂通过把煤炭气化合成 CO, 再氧化成 CO<sub>2</sub> 放出热量, 其中有大量的 CO<sub>2</sub> 直接向大气排放。因此, 中国目前的发电厂排放的烟气是温室效应中一大关键因素。根据数据统计, 每年有 30 亿 t 左右的 CO<sub>2</sub> 是由我国燃煤电厂排放的, 几乎占据了我国 CO<sub>2</sub> 排放总量的 1/3<sup>[2]</sup>。因此结合中国的电力需求和燃煤电厂行业的实际情况, 研究分析我国的燃煤电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 的吸收技术, 寻找 CO<sub>2</sub> 的减排方法, 已成为燃煤电厂的一项重要任务<sup>[3-4]</sup>。国内一些专家对烟气 CO<sub>2</sub> 捕集过

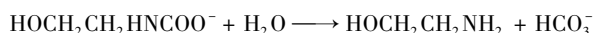
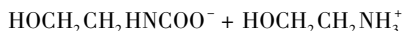
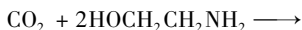
程节能技术进行了相关研究<sup>[5-7]</sup>, 利用乙醇胺对烟气 CO<sub>2</sub> 进行捕集的吸收性能和工艺也得到重视<sup>[8-10]</sup>。本研究对乙醇胺(MEA)吸收电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 过程的主要影响因素进行模拟分析, 从而为乙醇胺吸收燃煤电厂排放的 CO<sub>2</sub> 的工艺过程优化提供理论指导。

## 1 MEA 脱碳原理

燃煤电厂烟气中的 CO<sub>2</sub> 吸收方法主要有膜分离、低温精馏、物理吸收、吸附、化学吸收等方法。化学吸收法是指通过合适的化学吸收液与气体混合物充分接触, 选择性地吸收混合气体中的某种气体成分, 并生成弱或一般的配合物的化学吸收方法。化学法脱除 CO<sub>2</sub> 的原理是碱性吸收剂与 CO<sub>2</sub> 发生化学反应, 形成不稳定的盐类, 从而清除烟气中的 CO<sub>2</sub>。化学吸收法具有分离纯度高、吸收效果好等优点, 因此被广泛应用于燃煤电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 的处理中。由于单乙醇胺(MEA)化学稳定性好、碱

度高、分子质量低、热降解小、容易回收等优点,使 MEA 成为目前研究最多的溶剂,使用 MEA 吸收燃煤电厂烟气中的  $\text{CO}_2$  是目前工业较能接受的模式。

乙醇胺 (monoethanolamine, MEA), 化学式为  $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$ , 是一种常见的伯胺有机化合物, 有毒, 易燃, 具有腐蚀性和吸湿性。常温下是无色黏稠状带氨水味的液体, 溶于水呈强碱性。常用于酸性气体吸收的吸收剂, 具有吸收速率快、价格低廉等优点, 广泛应用于燃煤电力工业中  $\text{CO}_2$  的捕集过程中。乙醇胺 (MEA) 吸收剂吸收燃煤电厂烟气中的  $\text{CO}_2$  主要的化学反应过程为:

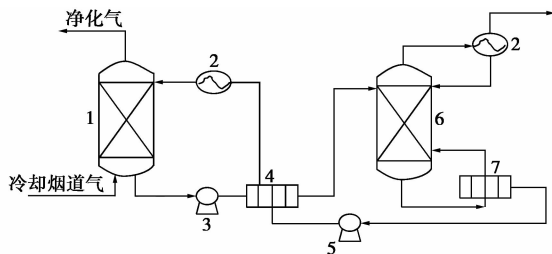


以上 3 个反应式都是可逆反应, 反应的平衡过程与溶液的温度以及气体中的  $\text{CO}_2$  的分压有关系。另外, MEA 吸收  $\text{CO}_2$  的过程中除了主反应外也存在其他不可逆的化学反应, 大多数 MEA 吸收剂反应生成高分子质量的化学聚合物, 增大了 MEA 吸收剂的消耗, 并且使吸收剂溶液变成浅褐色, 会有发泡现象, 对设备具有腐蚀性作用, 大大降低了吸收剂 MEA 的可循环次数。

## 2 MEA 吸收电厂 $\text{CO}_2$ 的工艺流程设计

燃煤电厂烟气中的  $\text{CO}_2$  被 MEA 吸收的工艺流程如图 1 所示。经过脱硫和脱硝预处理的燃煤电厂烟气在鼓风机的动力下从吸收塔的底部进入, 富含  $\text{CO}_2$  的电厂烟气从塔底向塔顶流动, 与从塔顶往塔底流动的吸收剂 MEA (贫液) 对流接触, 烟气中的  $\text{CO}_2$  与吸收剂 MEA 发生化学反应并生成弱联结化合物, 烟气被脱除了  $\text{CO}_2$  后变成净化气体从吸收塔的顶部排出, 生成弱联结化合物的 MEA (富液) 通过富液泵的作用被输送到解吸工段。输送过程中, 在贫富液热交换器处与从解吸塔塔底流出来的 MEA 吸收液 (贫液) 进行热量交换, 温度升高, 然后再被送到解吸塔中进行解吸再生。吸收了  $\text{CO}_2$  生成弱联结化合物的 MEA (富液) 从解吸塔的塔顶往下流, 与从塔底上升的水蒸汽逆流接触, 弱联结化合物分解即 MEA 富液中的  $\text{CO}_2$  逐渐解吸出来, MEA 富液就变成 MEA 贫液。从塔顶排出的混合气体成分主要是水蒸汽和  $\text{CO}_2$  这 2 种气体, 混合气体进入冷凝器, 水蒸汽被冷凝成液体回流入解吸塔, 循环用于解

吸的过程, 而  $\text{CO}_2$  气体就被干燥并压缩储存。完成解吸工段的 MEA 贫液从解吸塔的塔底流出, 通过贫液泵的作用, 再通过贫富液热交换器把热量传给 MEA 富液, 最后经过冷却器的冷却作用, 冷却到吸收塔需要的反应温度, 再次从吸收塔的塔顶流入, 进行二次循环吸收。



1—吸收塔; 2—冷却器; 3—富液泵; 4—贫富液热交换器;  
5—贫液泵; 6—解吸塔; 7—再沸器

图 1 MEA 吸收电厂  $\text{CO}_2$  的工艺流程示意图

## 3 MEA 吸收电厂 $\text{CO}_2$ 的流程模拟

### 3.1 进料条件确定

$\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等几种气体是燃煤电厂烟气中的主要气体成分。但是不同的燃煤电厂烟气的气体组分稍微有些不同, 为了对电厂烟气  $\text{CO}_2$  的吸收过程进行模拟和分析, 采用的流程物料参数值如表 1 所示。

表 1 单元操作模块以及参数的设定

模块参数	设计值
烟气体积流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	20000
$\text{N}_2$ 体积分数/%	79.7
$\text{CO}_2$ 体积分数/%	9
$\text{O}_2$ 体积分数/%	4
$\text{H}_2\text{O}$ 体积分数/%	7.3
温度/ $^{\circ}\text{C}$	40
压力/MPa	0.101325
MEA 质量流量/ $(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	100
塔级数	20
填料类型	IMTP
填料高度/m	6
塔直径/m	0.5
馏出速率/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	90
回流比	1

### 3.2 物性计算方法的选择

得到可靠模拟结果的关键是正确选择物性模

型<sup>[11]</sup>, MEA溶液吸收燃煤电厂烟气中的CO<sub>2</sub>组成一个电解质混合溶剂的气-液平衡体系,体系含有化学反应。物性模型 Elecrtl -NRTL模型精度较高,适用非常范围广泛,能很好地处理液液、气液、固液等电解质溶液的平衡体系以及混合溶剂电解质体系,可应用于热力学非理性计算酸性气体(CO<sub>2</sub>)与醇胺水溶液(MEA)所构成的弱电解质系统。该研究以MEA水溶液为吸收剂,采用热力学物性模型 Elecrtl -NRTL,建立吸收和解吸CO<sub>2</sub>的过程模拟。

### 3.3 吸收、解吸衡量标准

通过CO<sub>2</sub>吸收率可用来衡量CO<sub>2</sub>被处理的效果,通过CO<sub>2</sub>解吸率可用来衡量MEA再生的效果,吸收率与解吸率定义如下:

$$\text{CO}_2 \text{ 吸收率} = \frac{\text{吸收塔吸收的 CO}_2 \text{ 的质量流量 (kg/h)}}{\text{原烟气体中的 CO}_2 \text{ 质量流量 (kg/h)}} \times 100\%$$

$$\text{CO}_2 \text{ 解吸率} = \frac{\text{解吸塔出口中的 CO}_2 \text{ 的质量流量 (kg/h)}}{\text{富液中的 CO}_2 \text{ 质量流量 (kg/h)}} \times 100\%$$

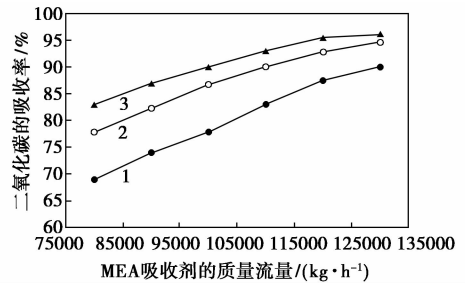
根据CO<sub>2</sub>吸收率和CO<sub>2</sub>解吸率的大小可以看出MEA吸收剂吸收CO<sub>2</sub>的能力和解吸效果。通过对影响CO<sub>2</sub>吸收率和CO<sub>2</sub>解吸率的因素进行分析,着重分析吸收剂浓度、吸收剂温度、再沸器的热负荷和解吸塔压力这4方面的因素,得出最适宜的捕集条件。

### 3.4 吸收剂MEA质量分数变化对CO<sub>2</sub>吸收率的影响

模拟条件:吸收剂流量100 t/h,吸收温度为40℃,常压吸收;MEA溶液质量分数分别为20%、25%、30%。

由图2可以看出,增大MEA吸收剂的质量流量,CO<sub>2</sub>吸收率也随着增大;在相同质量的MEA吸收剂下,增加MEA吸收剂溶液的质量分数,CO<sub>2</sub>的吸收率也随着增大。即吸收剂质量分数越大,MEA吸收电厂烟气中的CO<sub>2</sub>的效果就越好。在达到相同的CO<sub>2</sub>吸收率的情况下,质量分数较高的MEA吸收剂的贫液循环量相对质量分数低的MEA吸收剂的贫液循环量较低。但是,质量分数30%MEA的CO<sub>2</sub>吸收率已经基本大于90%,继续增加吸收剂的质量分数,吸收效率增大幅度很小,而且吸收剂质量分数增大的不足之处是质量分数高的吸收剂MEA在吸收和解吸的运转过程中非常容易产生鼓泡现象,造成对设备较为严重的腐蚀,吸收剂损耗严重,不可以很好地长期运行,大大增加了经济成本。所以在实际的吸收CO<sub>2</sub>的过程中,吸收剂MEA的质量分数不适宜过大,也不适宜太小,吸收剂MEA

吸收燃煤电厂烟气中的CO<sub>2</sub>时,最适宜选择的质量分数是25%~30%。

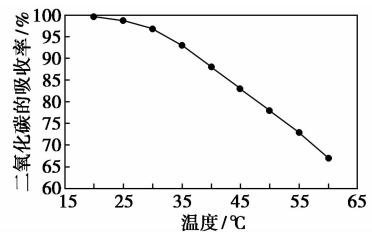


MEA质量分数:1—20%;2—25%;3—30%

图2 不同浓度的MEA对CO<sub>2</sub>吸收率的影响

### 3.5 吸收剂温度对CO<sub>2</sub>吸收率的影响

模拟条件:吸收剂MEA溶液的质量分数为25%,吸收剂MEA流量为100 t/h;吸收剂温度为20~60℃。图3为吸收剂温度变化对CO<sub>2</sub>吸收率的影响情况。



MEA质量分数为25%

图3 吸收剂温度对CO<sub>2</sub>吸收率的影响

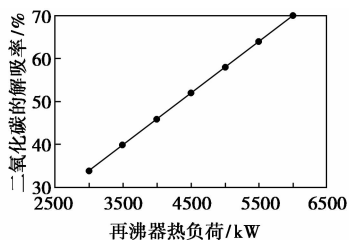
从图3中可以看出,CO<sub>2</sub>的吸收率随着吸收剂的温度升高而降低,在20~30℃,吸收剂温度的变化不怎么影响CO<sub>2</sub>的吸收率,当温度高于30℃时,吸收剂温度变化明显影响CO<sub>2</sub>的吸收率,CO<sub>2</sub>的吸收率随着吸收剂的温度升高而下降得较快。一般烟气进入吸收塔的温度为40℃左右,而在30℃的MEA吸收剂吸收效率大于90%,已经可得到良好的脱碳效果。若想通过降低吸收剂的温度来增大吸收效率,则需消耗能耗来降低吸收剂的温度,而且在30℃以下的吸收剂的温度变化对吸收效果影响不明显。为了节省能耗,又得到预期的脱碳效果,认为30℃左右的吸收温度较为合适。

### 3.6 再沸器热负荷对CO<sub>2</sub>解吸率的影响

模拟条件:吸收剂MEA溶液的质量分数为25%,吸收剂MEA的流量为100 t/h;解吸塔压力为0.15 MPa,再沸器热负荷的最小值为3 000 kW,最大值为6 000 kW。

在解吸CO<sub>2</sub>的过程中,解吸CO<sub>2</sub>的所需热量是

由再沸器提供的,供热量增加,被解吸出来的  $\text{CO}_2$  就越多,MEA 贫液的贫富程度基本是由再沸器的热负荷的大小决定的。增大再沸器的热负荷,MEA 解吸就越完全,流出的 MEA 贫液中含有的  $\text{CO}_2$  就越少,解吸效率更高,图 4 表达了  $\text{CO}_2$  解吸率受再沸器热负荷影响的关系。



MEA 质量分数为 25%

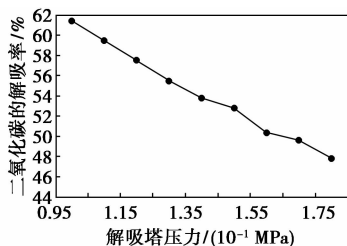
图 4 再沸器热负荷对  $\text{CO}_2$  解吸率的影响

由图 4 可以看出,增加再沸器的热负荷, $\text{CO}_2$  的解吸率呈直线函数增大。但是再沸器的热负荷的增大,产生的高温会对吸收剂进行破坏或促进了其他副反应的进行,降低了 MEA 的再生率,而且在工业应用上,为了很好地控制能耗,减少处理费用,解吸率不宜过大,贫液中  $\text{CO}_2$  含量为  $0.2 \text{ mol CO}_2/1 \text{ mol MEA}$  是解吸后最理想的效果,但是一般工业要求  $0.45 \sim 0.60$  的解吸率就能满足,重要的是能耗不高,所以在工业应用中,选择  $3\,000 \sim 5\,000 \text{ kW}$  是较为合适的再沸器负荷范围。

### 3.7 解吸塔压力对 $\text{CO}_2$ 解吸率的影响

模拟条件:吸收剂 MEA 溶液的质量分数为 25%,吸收剂 MEA 流量为  $100 \text{ t/h}$ ;吸收温度为  $40^\circ\text{C}$ ;解吸塔压力变化范围为  $0.10 \sim 0.18 \text{ MPa}$ 。

由图 5 可以看出, $\text{CO}_2$  的解吸率变化是与解吸塔的压力呈反比关系的,但是解吸塔的压力升高可以增加吸收剂 MEA 的稳定性,防止吸收剂的分解,也有利于后期回收  $\text{CO}_2$  时压缩能耗的降低,总体考虑, $0.15 \text{ MPa}$  是 MEA 吸收剂解吸塔压力设置的较佳参数。



MEA 质量分数为 25%

图 5 解吸塔压力对  $\text{CO}_2$  解吸率的影响

## 4 结论

通过对 MEA 吸收燃煤电厂烟气  $\text{CO}_2$  的吸收与解吸工艺过程进行模拟研究,得出以下相关参考结论。

(1)  $\text{CO}_2$  的吸收率与吸收剂 MEA 的质量分数呈正比关系,但工业应用中常常要考虑高质量分数 MEA 对设备有较大腐蚀性等因素,所以建议最适宜选择的质量分数在  $25\% \sim 30\%$ 。

(2)  $\text{CO}_2$  的吸收率与吸收剂 MEA 的进料温度呈反比关系,在  $30^\circ\text{C}$  的进料温度时,吸收效率大于  $90\%$ ,已经得到良好的处理效果,综上判断使用  $30^\circ\text{C}$  左右的吸收剂温度最为合适。

(3) 解吸塔的再沸器热负荷增加会使  $\text{CO}_2$  的解吸率直线增大,但是一般工业要求在  $0.45 \sim 0.60$  的解吸率就能满足,重要的是能耗不高,所以在工业应用中, $3\,000 \sim 5\,000 \text{ kW}$  是较为合适的再沸器负荷范围。

(4) 解吸塔压力增大时, $\text{CO}_2$  的解吸率随着降低。在质量分数 25% 的 MEA 溶液的情况下, $0.15 \text{ MPa}$  是较佳的解吸塔反应压力,此时解吸率达到  $52.4\%$ 。

## 参考文献

- [1] 赵明德. 火电厂尾部  $\text{CO}_2$  回收系统设计及电厂的集成研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
- [2] 许世森,郜石旺. 燃烧电厂二氧化碳捕集、利用与封存技术[J]. 上海节能,2009,(9):8-13.
- [3] 张哲. 吸收法和吸附法联合脱除模拟烟气中二氧化碳气体的研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2013.
- [4] 陈健,罗伟亮,李晗. 有机胺吸收二氧化碳的热力学和动力学研究进展[J]. 化工学报,2014,65(1):12-21.
- [5] 郑碣,董立户,陈健,等.  $\text{CO}_2$  捕集的吸收溶解度计算和过程模拟[J]. 化工学报,2010,61(7):1740-1746.
- [6] 王照亮,王成运,李清方,等. 电厂  $\text{CO}_2$  捕集工艺夹点分析与过程集成节能[J]. 化工学报,2012,63(2):593-598.
- [7] 李晗,陈健. 单乙醇胺吸收  $\text{CO}_2$  的热力学模型和过程模拟[J]. 化工学报,2014,65(1):47-54.
- [8] 肖九高. 烟道气中二氧化碳回收技术的研究[J]. 现代化工,2004,24(5):47-49.
- [9] 李小飞,王淑娟,陈昌和. 胺法脱碳系统流程改进及优化模拟[J]. 化工学报,2012,63(2):593-598.
- [10] 胡辉,李芳,邹妍晖,等. 碱性离子液体-NaOH/MEA 混合体系的  $\text{CO}_2$  吸收性能[J]. 现代化工,2013,33(9):79-82.
- [11] 陆恩锡,张慧娟. 化工过程模拟及相关高新技术-化工过程动态模拟(II)[J]. 化工进展,2000,(1):76-78. ■