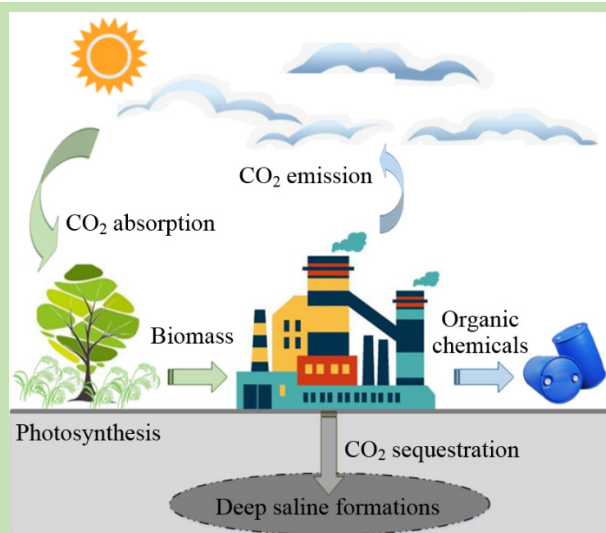


## Simulation and techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> capture during biomass-to-methanol

Shiying YANG\*, Jingwei ZHENG, Baoxia LI

College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract:** China ranks first in methanol production around the world, occupying approximately 50% of the global production. But the dominant coal-to-methanol technology in China suffers from serious CO<sub>2</sub> emission, which aggravates the global climate change. On the other hand, the development of biomass-to-methanol technology provides a method to reduce the CO<sub>2</sub> emission of methanol production from sources, as the biomass feedstock is carbon neutral. And the application of CO<sub>2</sub> capture and storage technology to biomass-to-methanol can further propose a low-cost way to capture, utilize and partially sequester CO<sub>2</sub> from the atmosphere indirectly. In this work, the CO<sub>2</sub> capture process in biomass-to-methanol production was conceptually designed and simulated by using



ASPEN PLUS software. A Rectisol process integrated with a CO<sub>2</sub> capture unit was provided. A techno-economic analysis was carried out to reveal the cost of different CO<sub>2</sub> capture ratio and the effect on the biomass-to-methanol production. The results showed that moderately increased CO<sub>2</sub> capture ratio could reduce the average cost per unit of CO<sub>2</sub> capture, but excessive CO<sub>2</sub> capture could also lead to a sharp increase in consumption and cost. 85% of CO<sub>2</sub> capture was the most cost-effective choice for biomass-to-methanol. It indicated energy consumption of 453 MJ/t CO<sub>2</sub>, water consumption of 193 kg/t CO<sub>2</sub>, and cost of 135 CNY/t CO<sub>2</sub>, which were much lower than that of directly collecting CO<sub>2</sub> from the atmosphere. The total production cost of methanol would also increase by 154 CNY/t, because of the CO<sub>2</sub> capture and storage, and had a greater effect on the economic benefits of the biomass-to-methanol system. Therefore, policy-related subsidies were urgently needed. The cost of CO<sub>2</sub> capture and storage in biomass-to-methanol could be offset when the subsidy of carbon abatement was around 40~50 CNY/t CO<sub>2</sub>. And once the subsidy was higher than 100 CNY/t CO<sub>2</sub>, the total production cost of biomass-to-methanol could be reduced to the same level as conventional coal-to-methanol.

**Key words:** biomass; methanol; carbon capture and storage; process simulation

收稿: 2019-03-29, 修回: 2019-05-26, 网络发表: 2019-07-02, Received: 2019-03-29, Revised: 2019-05-26, Published online: 2019-07-02

基金项目: 华侨大学高层次人才科研启动基金(编号: 16BS703)

作者简介: 杨时颖(1988-), 男, 广东省潮州市人, 博士, 讲师, 化学工程专业, Tel: 15080319202, E-mail: y.shiying@hqu.edu.cn.

**引用格式:** 杨时颖, 郑经纬, 李宝霞. 生物质制甲醇系统 CO<sub>2</sub> 捕集过程的设计模拟及技术经济性分析. 过程工程学报, 2019, 19(6): 1250-1256.  
Yang S Y, Zheng J W, Li B X. Simulation and techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> capture during biomass-to-methanol (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(6): 1250-1256, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219168.

# 生物质制甲醇系统 CO<sub>2</sub> 捕集过程的设计模拟及技术经济性分析

杨时颖\*, 郑经纬, 李宝霞

华侨大学化工学院, 福建 厦门 361021

**摘 要:** 通过 ASPEN PLUS 过程系统建模模拟, 设计了生物质制甲醇系统中 CO<sub>2</sub> 的捕集工艺流程, 并分析了其技术经济性能, 研究了不同 CO<sub>2</sub> 捕集率的成本及其对生物质制甲醇能耗、水耗的影响。结果表明, 捕集率为 85% 时生物质制甲醇系统 CO<sub>2</sub> 捕集封存较佳, 单位捕集量的成本最低, 有效能耗为 453 MJ/t、水耗为 193 kg/t、成本为 135 元/t, 远低于直接从大气中捕集 CO<sub>2</sub>。虽然这将使生物质制甲醇的生产成本增加 154 元/t, 但当 CO<sub>2</sub> 减排补贴价格为 40~50 元/t 时, 则可抵消该部分成本增量。

**关键词:** 生物质; 甲醇; 碳捕集与封存; 流程模拟

**中图分类号:** TK6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2019)06-1250-07

## 1 前 言

化石燃料的开发利用导致大量 CO<sub>2</sub> 排放, 将增加大气中 CO<sub>2</sub> 浓度, 加剧温室效应。因此, CO<sub>2</sub> 的减排研究已成为全球焦点。如 2017 年瑞士建立了世界上首座从大气中直接吸附捕集 CO<sub>2</sub> 的示范装置, 每年可捕集 900 t CO<sub>2</sub>, 但该技术运行成本非常高, 超过 200 瑞郎/t (约 1350 元/t)<sup>[1]</sup>。

我国甲醇产量居世界首位<sup>[2]</sup>, 其中煤制甲醇为主要制备方式<sup>[3]</sup>, CO<sub>2</sub> 排放量达 1.9~2.5 t/t 甲醇<sup>[4-6]</sup>。而生物质制甲醇则提供了一种从源头减少 CO<sub>2</sub> 排放且可持续生产甲醇的方案<sup>[7,8]</sup>。生物质原料<sup>[9-11]</sup>具有可再生性, 其所含碳元素皆来自短期植物生长过程中从大气吸收的 CO<sub>2</sub>, 而非地质固定碳, 如图 1 所示。因此, 其转化过程排放的 CO<sub>2</sub> 并不会增加大气 CO<sub>2</sub> 浓度, 加剧温室效应, 可视为“碳中性”。这使生物质热化学转化制甲醇引起国内外关注, 其技术经济性能逐渐得到论证<sup>[12,13]</sup>, 潘贤齐等<sup>[14]</sup>进行了多项生物质气化制甲醇/二甲醚的中试实验。

生物质制甲醇过程中 CO<sub>2</sub> 排放主要在生物质源合成气净化工段, 该工段通过物理吸收法脱除合成气中的 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 等酸性气体, 典型工艺如低温甲醇洗法 (Rectisol) 和聚乙二醇二甲醚法 (Selexol)<sup>[13,15]</sup>。该系统排放的生物源 CO<sub>2</sub> 因具有碳中性的特点, 不增加大气中 CO<sub>2</sub> 浓度, 可认为近乎零 CO<sub>2</sub> 排放。而若在净化工段引入 CO<sub>2</sub> 捕集流程, 对 CO<sub>2</sub> 捕集纯化、液化封存, 可实现制甲醇过程 CO<sub>2</sub> 负排放, 并可能形成一种低成本、间接从大气环境中捕集利用并部分封存 CO<sub>2</sub> 的模式。

Liu 等<sup>[16]</sup>设计了煤制甲醇 Rectisol 净化工段的 CO<sub>2</sub> 捕集流程并研究其性能, 结果表明捕集单位 CO<sub>2</sub> 需增加总能耗约 930 MJ/t、成本约 150 元/t。Gatti 等<sup>[17]</sup>对煤制油系统单级和双级 Rectisol 过程中 CO<sub>2</sub> 捕集进行建模并

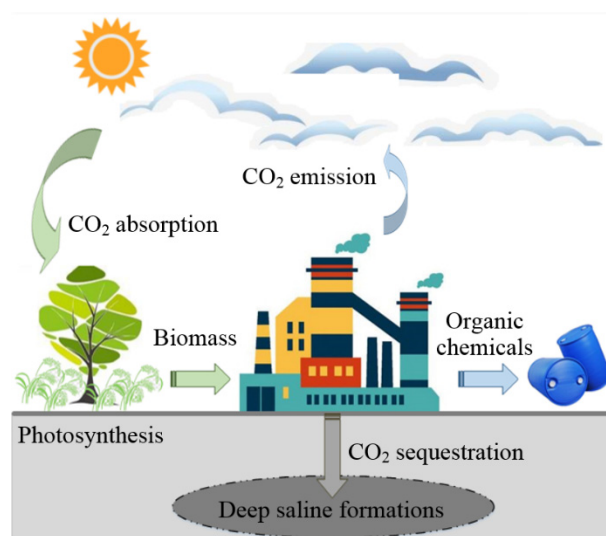


图 1 生物质化工的碳元素代谢示意图

Fig.1 Schematic diagram metabolism of carbon in biomass chemical engineering

研究其热集成, 实现 CO<sub>2</sub> 捕集率约 98%, 但有效能耗高达 714 MJ/t。Porter 等<sup>[18]</sup>对比了煤电厂燃烧前捕集 CO<sub>2</sub> 的 Rectisol 和 Selexol 工艺的技术经济性, 发现 Selexol 工艺成本较低, 但所得 CO<sub>2</sub> 纯度较低且含 H<sub>2</sub>S 杂质较多, 而 Rectisol 工艺捕集 CO<sub>2</sub> 纯度较高 (≥99.5mol%), 根据工艺和优化条件不同, 实现 95% 捕集率成本约为 170~500 元/t。Gao 等<sup>[19]</sup>优化了煤制甲醇 Rectisol 工段中 CO<sub>2</sub> 捕集过程, 使 92% CO<sub>2</sub> 捕集率的有效能耗降至 388 MJ/t, 但未考虑 CO<sub>2</sub> 的后续压缩液化能耗。

目前对生物质制甲醇系统 CO<sub>2</sub> 捕集封存过程研究较少, 其对甲醇生产能耗、水耗和成本的影响有待确定。本工作通过过程系统建模, 设计了生物质制甲醇系统中捕集 CO<sub>2</sub> 流程, 并分析了其技术经济性。通过研究 CO<sub>2</sub> 捕集率对生物质制甲醇的影响, 从碳捕集角度探讨了生物质制甲醇的技术竞争力。



的回流比,可调节 CO<sub>2</sub> 捕集量。捕集的 CO<sub>2</sub>(CO<sub>2</sub> 摩尔含量大于 99.5%且 H<sub>2</sub>S 摩尔含量小于 20×10<sup>-6</sup>)由塔顶排出,经多级压缩(B7)至 15 MPa 后,冷凝液化(B8)并送往封存。优化预热器(B2)和冷却器(B5/B6)的温度可降低相应过程的能耗。

下游 CO<sub>2</sub> 汽提塔在 0.2 MPa 下通过 N<sub>2</sub> 汽提脱除甲醇溶液中剩余 CO<sub>2</sub>, 夹杂 N<sub>2</sub> 的 CO<sub>2</sub> 废气排入大气。塔底甲醇溶液则送往 H<sub>2</sub>S 解吸塔,再沸深度脱除 H<sub>2</sub>S,塔顶 H<sub>2</sub>S 酸气送往克劳斯硫回收工段,而塔底贫甲醇部分精馏脱水,循环回到 CO<sub>2</sub> 吸收塔。

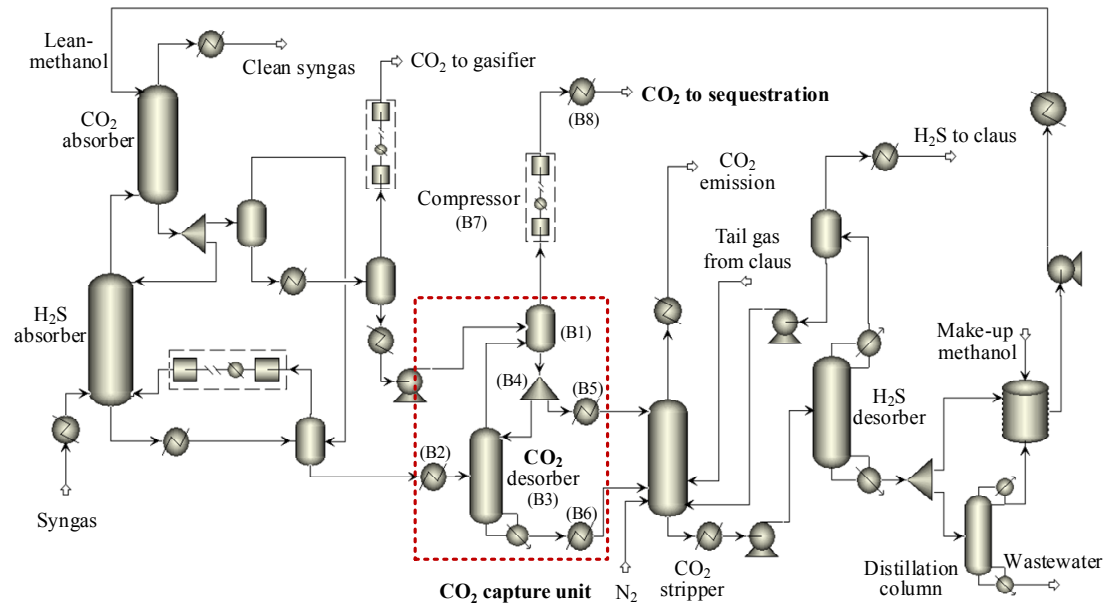


图 3 基于 ASPEN PLUS 软件新增 CO<sub>2</sub> 捕集过程的低温甲醇洗工段流程示意图  
Fig.3 Flow diagram of Rectisol integrated with CO<sub>2</sub> capture unit in ASPEN PLUS

表 3 CO<sub>2</sub> 捕集过程模块  
Table 3 Models for the CO<sub>2</sub> capture unit

Label	Description	Model in the ASPEN PLUS
B1	Overhead mixer	Flash 2 (heat duty=0)
B2	Pre-heater	Heater
B3	CO <sub>2</sub> desorption column	RadFrac (condenser=none, stages=16)
B4	Overhead splitter	FSplit
B5/B6	Chiller	Heater
B7	Multistage compressor	Mcompr (stages=3)
B8	Condenser	Heater

2.3 CO<sub>2</sub> 捕集模块的能耗、水耗及成本计算模型

CO<sub>2</sub> 捕集模块(B1~B8)增加了原生物质制甲醇系统的能耗,主要包括压缩机功耗、低温制冷及再沸器供热等。通过夹点热集成减少公用工程消耗,所需公用热工程采用低压蒸汽,公用冷工程采用制冷循环。CO<sub>2</sub> 捕集增加的总有效能(焓)耗  $E_x$  计算如下:

$$E_x = Q_{\text{steam}}\eta + Q_{\text{cool}}\varphi + Q_{\text{chill}} / \zeta + E_{\text{compr}} \tag{1}$$

式中,  $Q_{\text{steam}}$  为低压蒸汽热负荷(kW),  $\eta=0.314$  为卡诺效率,  $Q_{\text{cool}}$  为冷却水热负荷(kW),  $\varphi=8.5\times10^{-3}$  为冷却水循环泵的功耗系数,  $Q_{\text{chill}}$  为制冷负荷(kW),  $\zeta=2.4$  为制冷系数,  $E_{\text{compr}}$  为压缩机功耗(kW)。

新增 CO<sub>2</sub> 捕集模块使系统循环冷却水负荷增加,由

此增加的水耗  $W$  计算如下:

$$W = Q_{\text{cool}}\theta / \omega \tag{2}$$

式中,  $\omega=60 \text{ MJ/t}$  为冷却水的冷却能力,  $\theta=3\%$  为循环水系统的水损耗率。

生物质制甲醇系统捕集封存 CO<sub>2</sub> 增加的成本包括设备成本、操作成本及液化 CO<sub>2</sub> 的后续运输及封存成本。CO<sub>2</sub> 捕集模块流程短、设备简单,设备成本与生物质制甲醇系统相比所占比例小,可忽略,CO<sub>2</sub> 捕集总成本  $C$  如下:

$$C = Q_{\text{steam}}V_{\text{steam}} / \varepsilon + (Q_{\text{cool}}\varphi + Q_{\text{chill}} / \zeta + E_{\text{compr}})V_{\text{elec}} + WW_{\text{water}} + FV_{\text{seq}} \tag{3}$$

式中,  $V_{\text{steam}}=150 \text{ 元/t}$ ,  $V_{\text{elec}}=0.75 \text{ 元/kW}\cdot\text{h}$ ,  $V_{\text{water}}=1.0 \text{ 元/t}$ ,

分别为低压蒸汽、电和水的单价,  $\epsilon=2.2$  GJ/t 为蒸汽的供热能力,  $F$  为  $\text{CO}_2$  捕集量,  $V_{\text{seq}}$  为液化  $\text{CO}_2$  的后续运输及封存成本, 根据刘佳佳等<sup>[22]</sup>的研究, 假设经 400 km 管道运输送至地下 2 km 深处地质封存, 平均成本约 40 元/t。

### 3 结果与讨论

该生物质制甲醇案例年产甲醇 43.5 万 t, 其中原合成气净化工段每年排放生物源  $\text{CO}_2$  58.4 万 t。在净化工段加入  $\text{CO}_2$  捕集模块, 根据捕集率不同, 可实现不同的  $\text{CO}_2$  捕集量。生物源  $\text{CO}_2$  来自近期植物生长过程中吸收大气中的  $\text{CO}_2$ , 因此生物质制甲醇系统中碳的捕集可认为是间接从大气环境中捕集封存  $\text{CO}_2$  的过程。

#### 3.1 $\text{CO}_2$ 捕集率对生物质制甲醇能耗的影响

新增  $\text{CO}_2$  捕集模块一定程度增加了生物质制甲醇系统的能耗。捕集过程的有效能(焓)耗随  $\text{CO}_2$  捕集率提

高而增加, 其中超过 70% 用于压缩液化  $\text{CO}_2$ 。由图 4(a)可知, 捕集单位  $\text{CO}_2$  的有效能耗随捕集率升高先减后增。60%  $\text{CO}_2$  捕集率所需单位有效能耗为 489 MJ/t, 而 85% 捕集率时降至 453 MJ/t。原因是  $\text{CO}_2$  捕集总量分摊了单位捕集量的平均能耗, 从而效率提高。但  $\text{CO}_2$  捕集率超过 85% 时, 单位有效能耗逐渐上升。过高的  $\text{CO}_2$  捕集率导致  $\text{CO}_2$  解吸塔塔顶回流比、塔底再沸器温度及热负荷显著上升, 使有效能耗明显增加。从能源利用效益考虑, 85%  $\text{CO}_2$  捕集率较佳, 可使捕集单位  $\text{CO}_2$  的有效能耗最低。图 4(b)显示, 引入  $\text{CO}_2$  捕集模块导致生产甲醇的总有效能耗随  $\text{CO}_2$  捕集率提高而增加。其中 60%  $\text{CO}_2$  捕集率时单位甲醇产品有效能耗增加 394 MJ/t, 而 85%  $\text{CO}_2$  捕集率时甲醇有效能耗增加 518 MJ/t, 90%  $\text{CO}_2$  捕集率时增加 555 MJ/t, 约相当于原生物质制甲醇过程能耗的 65%~90%。

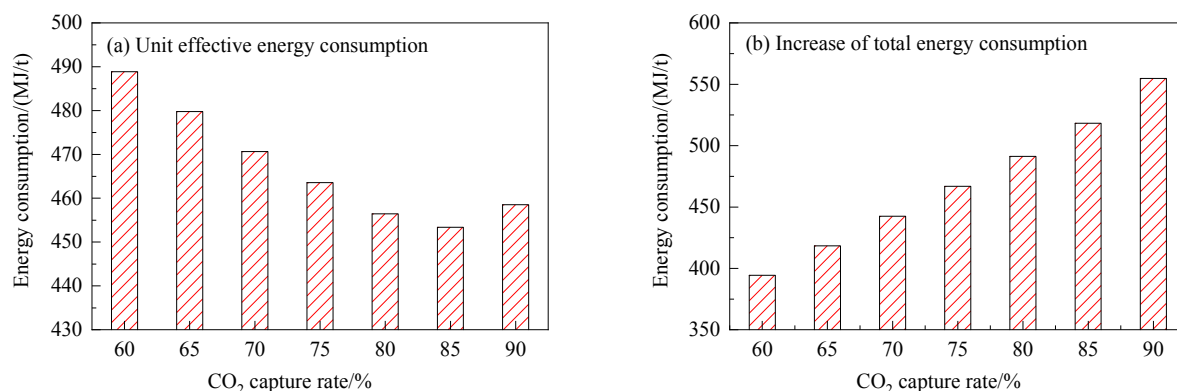


图 4 生物质制甲醇中不同  $\text{CO}_2$  捕集率所需的有效能耗

Fig.4 Energy consumption of  $\text{CO}_2$  capture rate in biomass-to-methanol

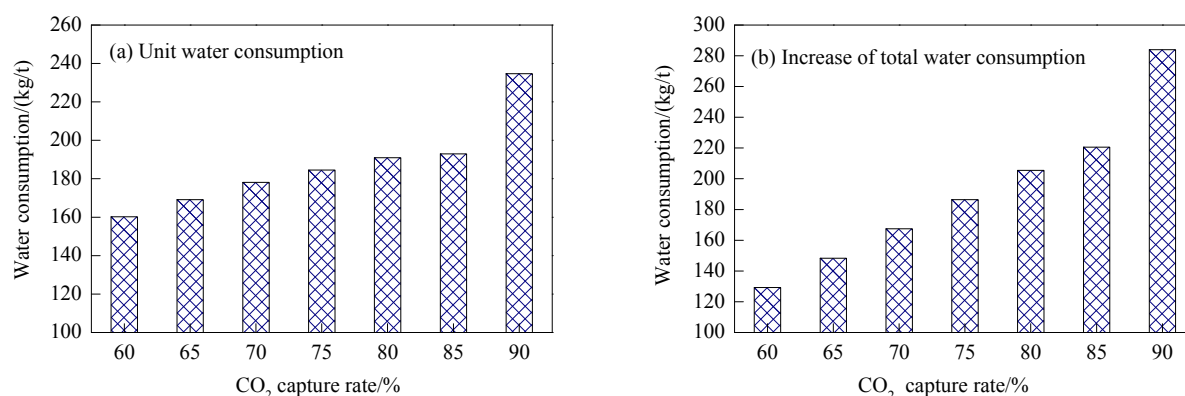


图 5 生物质制甲醇中不同  $\text{CO}_2$  捕集率所需的水耗

Fig.5 Water consumption of  $\text{CO}_2$  capture rate in biomass-to-methanol

#### 3.2 $\text{CO}_2$ 捕集率对生物质制甲醇水耗的影响

生物质制甲醇系统集成  $\text{CO}_2$  捕集模块使系统循环冷却水增加, 导致相应的水耗增加。图 5(a)显示, 捕集

单位  $\text{CO}_2$  所需水耗随捕集率提高而持续增加, 60%  $\text{CO}_2$  捕集率所需单位水耗为 160 kg/t, 85%  $\text{CO}_2$  捕集率所需单位水耗升至 193 kg/t。  $\text{CO}_2$  捕集率超过 85% 时, 单位

水耗明显增加, 90% CO<sub>2</sub> 捕集率所需单位水耗达 235 kg/t。原因是过高的 CO<sub>2</sub> 捕集率导致 CO<sub>2</sub> 解吸塔出料送往下游前降温冷却所需水量大幅增加。图 5(b)显示, CO<sub>2</sub> 捕集模块导致甲醇生产总水耗随 CO<sub>2</sub> 捕集率提高而增加。60% CO<sub>2</sub> 捕集率使单位甲醇产品水耗增加 129 kg/t, 85% CO<sub>2</sub> 捕集率使甲醇水耗增加 221 kg/t, 90% CO<sub>2</sub> 捕集率使单位甲醇水耗增加 284 kg/t, 但总体不超过原生物质制甲醇水耗的 5%。

### 3.3 CO<sub>2</sub> 捕集率对生物质制甲醇成本的影响

生物质制甲醇系统捕集 CO<sub>2</sub> 增加的成本取决于 CO<sub>2</sub> 捕集率。图 6(a)为单位 CO<sub>2</sub> 捕集成本与捕集率的关系, 由图可知, 随捕集率升高, 单位 CO<sub>2</sub> 捕集成本先减少后增加。60% CO<sub>2</sub> 捕集率所需单位成本为 142 元/t, 而 85% 捕集率仅需 135 元/t, 原因是 CO<sub>2</sub> 捕集总量增加分摊了

单位捕集量的平均成本。但 CO<sub>2</sub> 捕集率超过 85% 时, 由于能耗和水耗激增, 单位成本逐渐上升, 90% 捕集率所需单位成本增至 136 元/t。因此, 85% CO<sub>2</sub> 捕集率可使单位 CO<sub>2</sub> 捕集成本最低。而这通过生物质制甲醇系统间接从大气中捕集 CO<sub>2</sub> 的成本更是大大低于直接从大气中捕集 CO<sub>2</sub><sup>[1]</sup>。图 6(b)为甲醇产品成本与 CO<sub>2</sub> 捕集率的关系。由图可知, CO<sub>2</sub> 捕集封存导致甲醇产品成本随 CO<sub>2</sub> 捕集率升高而增加, 单位甲醇产品成本 60% CO<sub>2</sub> 捕集率时增加 115 元/t, 85% CO<sub>2</sub> 捕集率时增加 154 元/t 甲醇, 90% CO<sub>2</sub> 捕集率时增加 164 元/t, 约相当于原生物质制甲醇成本的 6%~10%。由于生物质制甲醇成本高于常规煤制甲醇(1700~1900 元/t)<sup>[13]</sup>, 因此 CO<sub>2</sub> 捕集封存对系统的经济效益有较大影响, 必须依靠政策性补贴改善, 如碳税减免和碳排放权交易等。

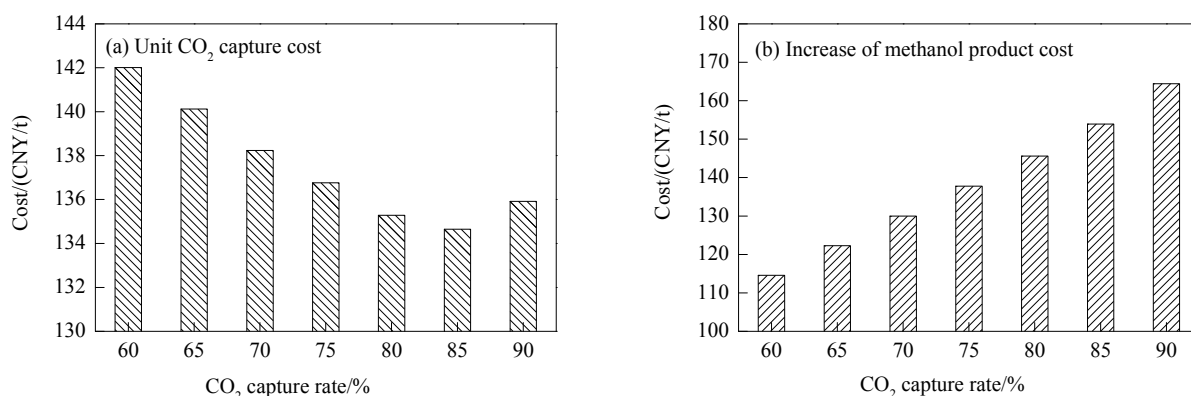


图 6 生物质制甲醇中不同 CO<sub>2</sub> 捕集率所需的成本

Fig.6 Cost of different CO<sub>2</sub> capture rates in biomass-to-methanol

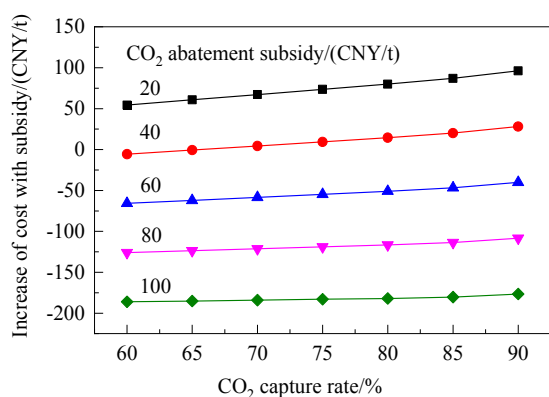


图 7 CO<sub>2</sub> 捕集率及减排补贴对生物质制甲醇成本的影响

Fig.7 Effect of CO<sub>2</sub> capture rate and carbon abatement subsidy on the production cost of biomass-to-methanol

我国的碳减排补贴机制正在逐步建设中, 目前碳排放权交易市场成交价格较低, 约 20~70 元/t CO<sub>2</sub><sup>[23,24]</sup>。生物质制甲醇由于原料的碳中性, 具有过程零 CO<sub>2</sub> 排放特点, 加入 CO<sub>2</sub> 捕集模块可进一步实现甲醇生产的 CO<sub>2</sub> 负排放。根据国内甲醇产业(以煤制甲醇为主体)平均

CO<sub>2</sub> 排放量及不同 CO<sub>2</sub> 减排补贴价格, CO<sub>2</sub> 捕集封存对生物质制甲醇成本的最终影响见图 7。由图可见, 减排补贴可极大地弥补 CO<sub>2</sub> 捕集封存的额外成本。CO<sub>2</sub> 减排补贴价格为 40~50 元/t 时, CO<sub>2</sub> 捕集封存几乎不增加生物质制甲醇的成本, 而当 CO<sub>2</sub> 减排补贴价格达 100 元/t 时, 甚至可使生物质制甲醇成本降至常规煤制甲醇的水平, 同时具有经济竞争力和环境价值。

## 4 结论

对生物质制甲醇系统中 CO<sub>2</sub> 的捕集工艺流程进行设计、模拟及技术经济性研究, 得到如下结论:

(1) CO<sub>2</sub> 捕集率过高将导致系统能耗、水耗及成本等激增, 而过低则使系统的捕集效率低下。

(2) 85% CO<sub>2</sub> 捕集率是较佳选择, 可使单位 CO<sub>2</sub> 捕集量的能耗及成本最低。其成本为 135 元/t, 远低于直接从大气中捕集 CO<sub>2</sub> 的成本。

(3) CO<sub>2</sub> 捕集封存将使甲醇的生产成本增加约 6%~10%, 但当 CO<sub>2</sub> 减排补贴价格超过 40~50 元/t 时,

可抵消该部分成本增量。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国科学技术部. 世界首座直接从大气中捕集二氧化碳装置在瑞士投入运行 [EB/OL]. (2017-6-26)/[2019-3-25]. [http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201706/t20170626\\_133727.htm](http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201706/t20170626_133727.htm).
- [2] 蒋子龙, 姜博洋, 王金鹏, 等. 国内外甲醇市场分析及展望 [J]. 化学工业, 2017, 35(6): 29-34.  
Jiang Z L, Jiang B Y, Wang J P, et al. Analysis and prospect of methanol market at home and abroad [J]. Chemical Industry, 2017, 35(6): 29-34.
- [3] 柏锁柱. 天然气制甲醇竞争力分析及应用前景展望 [J]. 炼油与化工, 2017, 28(6): 7-9.  
Bai S Z. Analysis of methanol production from natural gas and application prospect [J]. Refining and Chemical Industry, 2017, 28(6): 7-9.
- [4] Li C H, Bai H G, Lu Y Y, et al. Life-cycle assessment for coal-based methanol production in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 1004-1017.
- [5] Qin Z, Zhai G F, Wu X M, et al. Carbon footprint evaluation of coal-to-methanol chain with the hierarchical attribution management and life cycle assessment [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 168-179.
- [6] 张媛媛, 王永刚, 田亚峻. 典型现代煤化工过程的二氧化碳排放比较 [J]. 化工进展, 2016, 35(12): 4060-4064.  
Zhang Y Y, Wang Y G, Tian Y J. Comparative studies on carbon dioxide emissions of typical modern coal chemical processes [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(12): 4060-4064.
- [7] Liu Z L, Peng W X, Motahari-Nezhad M, et al. Circulating fluidized bed gasification of biomass for flexible end-use of syngas: a micro and nano scale study for production of bio-methanol [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129: 249-255.
- [8] Carvalho L, Furusjö E, Kirtania K, et al. Techno-economic assessment of catalytic gasification of biomass powders for methanol production [J]. Bioresource Technology, 2017, 237(S1): 167-177.
- [9] 蔡亚庆, 仇焕广, 徐志刚. 中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1637-1646.  
Cai Y Q, Qiu H G, Xu Z G. Evaluation on potentials of energy utilization of crop residual resources in different regions of China [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(10): 1637-1646.
- [10] 陆强, 赵雪冰, 郑宗明. 液体生物燃料技术与工程 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013: 4-9.  
Lu Q, Zhao X B, Zheng Z M. Technology and engineering for liquid biofuels [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2013: 4-9.
- [11] 石祖梁, 李想, 王久臣, 等. 中国秸秆资源空间分布特征及利用模式 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(7): 202-205.  
Shi Z L, Li X, Wang J C, et al. The spatial distribution characteristics and utilization model of crop straw in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(7): 202-205.
- [12] Peduzzi E, Tock L, Boissonnet G, et al. Thermo-economic evaluation and optimization of the thermo-chemical conversion of biomass into methanol [J]. Energy, 2013, 58: 9-16.
- [13] Yang S Y, Li B X, Zheng J W, et al. Biomass-to-methanol by dual-stage entrained flow gasification: design and techno-economic analysis based on system modeling [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 364-374.
- [14] 潘贤齐, 苏德仁, 周肇秋, 等. 生物质流化床气化中试实验研究 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 175-179.  
Pan X Q, Su D R, Zhou Z Q, et al. Experimental investigation of biomass gasification in a pilot-scale fluidized bed gasifier [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 175-179.
- [15] Jiang Y, Bhattacharyya D. Process modeling of direct coal-biomass to liquids (CBTL) plants with shale gas utilization and CO<sub>2</sub> capture and storage (CCS) [J]. Applied Energy, 2016, 183: 1616-1632.
- [16] Liu X, Yang S Y, Hu Z G, et al. Simulation and assessment of an integrated acid gas removal process with higher CO<sub>2</sub> capture rate [J]. Computers and Chemical Engineering, 2015, 83: 48-57.
- [17] Gatti M, Martelli E, Marechal F, et al. Review, modeling, heat integration, and improved schemes of Rectisol-based processes for CO<sub>2</sub> capture [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(2): 1123-1140.
- [18] Porter R T J, Fairweather M, Kolster C, et al. Cost and performance of some carbon capture technology options for producing different quality CO<sub>2</sub> product streams [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017, 57: 185-195.
- [19] Gao H X, Zhou L P, Luo X, et al. Optimized process configuration for CO<sub>2</sub> recovery from crude synthesis gas via a rectisol wash process [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 79: 83-90.
- [20] Blades T, Rudloff M, Schulze O. Sustainable SunFuel from CHOREN's Carbo-V® process [EB/OL]. (2010-9-8)/[2018-1-4]. <http://www.choren.com>.
- [21] ASPEN Technology, INC. Aspen Plus V8.4 [EB/OL]. (2012-6-15)/[2018-12-5]. <http://www.aspentech.com>.
- [22] 刘佳佳, 赵东亚, 田群宏, 等. CO<sub>2</sub>捕集、运输、驱油与封存全流程建模与优化 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(10): 1-5.  
Liu J J, Zhao D Y, Tian Q H, et al. Modeling and optimization of the whole process of CO<sub>2</sub> capture, transportation, oil displacement and storage [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37(10): 1-5.
- [23] 王穗子, 刘帅, 樊江文, 等. 碳交易市场现状及草地碳汇潜力研究 [J]. 草业学报, 2018, 27(6): 177-187.  
Wang S Z, Liu S, Fan J W, et al. Research on the current situation of carbon trading markets and the potential of grassland carbon sinks [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(6): 177-187.
- [24] Slater H, De Boer D, 王庶, 等. 2018年中国碳价调查 [R]. 北京: ICF 国际咨询公司, 2018: 3-9.  
Slater H, De Boer D, Wang S, et al. Survey of China carbon trading prices in 2018 [R]. Beijing: ICF International, Inc., 2018: 3-9.