

## 工业技术

# 利用风电进行 CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇与天然气和煤路线对比的技术经济分析

刘健, 李英楠, 贾贺, 杨宇航, 王义松, 那洪明, 杜涛\*

(东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:**将水电解、CO<sub>2</sub> 捕集、风力发电引入甲醇生产, 在 200 t/d 的产能下, 利用 Aspen Plus 对天然气重整、煤气化、CO<sub>2</sub> 直接加氢 3 种路线生产甲醇进行流程模拟, 并依据模拟结果进行成本估算、碳排放分析和敏感性分析, 分析引入电解水、CO<sub>2</sub> 捕集和风力发电的经济和环境效益。结果显示, 在 200 t/d 的产能下, 路线三(CO<sub>2</sub> 直接加氢)的成本高达 9 944.1 元/t, 远高于路线一(天然气重整, 2 595.2 元/t)和路线二(煤气化, 2 266.5 元/t), 但路线三每 t 甲醇生产可减少 CO<sub>2</sub> 排放 0.57 t, 相比另外 2 种方式的高额碳排放(0.67 t CO<sub>2</sub>/t MeOH 和 2.29 t CO<sub>2</sub>/t MeOH)具有巨大的优势。当电解水成本下降和高额碳税存在时, 路线三有望实现商业应用。

**关键词:**甲醇; 风电; 碳捕集; 流程模拟; 技术经济分析

**中图分类号:** TQ-9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2024)01-0216-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.01.039

## Technical economic analysis on comparing CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol using wind power with natural gas and coal routes

LIU Jian, LI Ying-nan, JIA He, YANG Yu-hang, WANG Yi-song, NA Hong-ming, DU Tao\*

(SEP Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Water electrolysis, CO<sub>2</sub> capture, and wind power are used in methanol production. Under a production capacity of 200 tons per day, three methanol production routes, including natural gas reforming, coal gasification, and CO<sub>2</sub> direct hydrogenation, are simulated by Aspen Plus software. Based on the simulation results, cost estimation, carbon dioxide emission analysis and sensitivity analysis are carried out. The economic and environmental benefits in using water electrolysis, CO<sub>2</sub> capture, and wind power are analyzed. It is shown that under a production capacity of 200 tons per day, the cost of CO<sub>2</sub> direct hydrogenation route is as high as RMB 9 944.1 per ton, much higher than RMB 2 595.2 per ton of natural gas reforming route and RMB 2 266.5 per ton of coal gasification route. CO<sub>2</sub> direct hydrogenation route can reduce CO<sub>2</sub> emissions by 0.57 tons per ton of methanol production, on the contrary, natural gas reforming route will discharge 0.67 tons of CO<sub>2</sub> per ton of methanol production, and coal gasification route will discharge 2.29 tons of CO<sub>2</sub> per ton of methanol production. CO<sub>2</sub> direct hydrogenation route is expected to achieve commercial application if the cost of water electrolysis falls further and high carbon taxes execute.

**Key words:** methanol; wind power; carbon dioxide capture; process simulation; technical economic analysis

甲醇是能源行业的一种关键原料, 每年的产量接近 9 000 万 t, 并且还在逐年增加<sup>[1]</sup>。甲醇是一种高级溶剂<sup>[2]</sup>, 有多种用途, 也是许多化学过程的关键成分<sup>[3]</sup>。在储氢方面, 甲醇也表现出了极大的潜力。天然气重整和煤气化是当前甲醇生产的 2 种主要方式, 但两者都会消耗大量能源, 还伴随着大量 CO<sub>2</sub> 的排放。CO<sub>2</sub> 直接加氢制甲醇作为一种 CO<sub>2</sub> 利用技术, 近年来受到了广泛的关注。与天然气重整和煤气化相比, CO<sub>2</sub> 直接加氢制甲醇不仅在过程中

产生更少的 CO<sub>2</sub>, 而且还可以利用各种化工过程中排放的 CO<sub>2</sub>, 在生产甲醇的同时做到减碳。此外, 风能、太阳能、水能等低 CO<sub>2</sub> 排放的可再生能源越来越受欢迎, 将其与甲醇生产相结合, 将是 CO<sub>2</sub> 减排的重要方向。

Lee 等<sup>[4]</sup>利用 Aspen HYSYS<sup>®</sup> 模拟了利用从各种工业过程中捕获的 CO<sub>2</sub> 和电解水生产的 H<sub>2</sub> 加氢制甲醇的工艺流程, 并对该过程进行了经济分析, 结果显示单位甲醇成本远远高于商业甲醇成本。但在

收稿日期: 2023-03-20; 修回日期: 2023-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52270177)

作者简介: 刘健(1997-), 男, 硕士生; 杜涛(1964-), 女, 博士, 教授, 研究方向为工业系统节能减排、CO<sub>2</sub> 捕集与利用(CCUS), 通讯联系人, dut\_

smm\_neu@126.com。

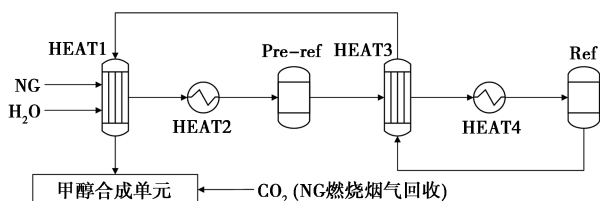
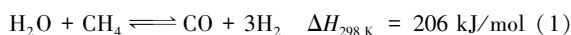
较低的H<sub>2</sub>生产成本和较高的碳税下,未来可再生甲醇的生产可能具有一定的潜力。

本文中在相同的生产条件下,对天然气重整(路线一)、煤气化(路线二)和直接CO<sub>2</sub>加氢(路线三)3路线进行了经济分析、碳排放分析和敏感性分析,并通过Aspen Plus对3种方式进行了模拟,系统评价了各种成本对甲醇生产成本的影响,分析了引入可再生能源对甲醇成本和CO<sub>2</sub>排放量的影响,从多角度分析甲醇生产的可变性,希望为今后甲醇生产的改进提供参考。

## 1 3种方式的甲醇流程模拟

### 1.1 天然气重整

如图1所示,天然气重整制甲醇主要由重整、CO<sub>2</sub>回收和甲醇合成3部分组成,其中甲醇合成过程的合成气是通过天然气与水蒸汽的重整反应生成的,反应式如下:



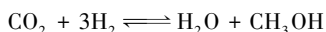
HEAT1-4—换热器;Pre-ref—预重整反应器;Ref—重整反应器

图1 天然气重整制甲醇的流程示意图

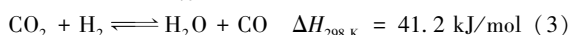
反应后气体的主要成分为CO和H<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>/CO摩尔比约为2.9。一般来说,为了提高转化率,需要保证SN值在2.05~2.15<sup>[5]</sup>:

$$\text{SN} = (\text{H}_2 - \text{CO}_2) / (\text{CO} + \text{CO}_2)$$

为保证合适的碳氢比,天然气燃烧加热时产生的CO<sub>2</sub>被选择回收,与合成气一起进入甲醇反应器,重整反应后生产甲醇。反应产物再经精馏塔提纯,得到高纯甲醇。反应器中的主要反应如下:



$$\Delta H_{298\text{K}} = -49.5 \text{ kJ/mol} \quad (2)$$



本文中天然气重整和煤气化制甲醇路线中的甲醇合成部分与CO<sub>2</sub>直接加氢制甲醇的流程相同,故不再详细描述。在重整部分,天然气和水按一定比例混合,与重整后的气体先进行一次换热,之后通过预重整器,再与重整后的气体进行二次换热并通入重整器中,生成的合成气与回收后的CO<sub>2</sub>混合后进

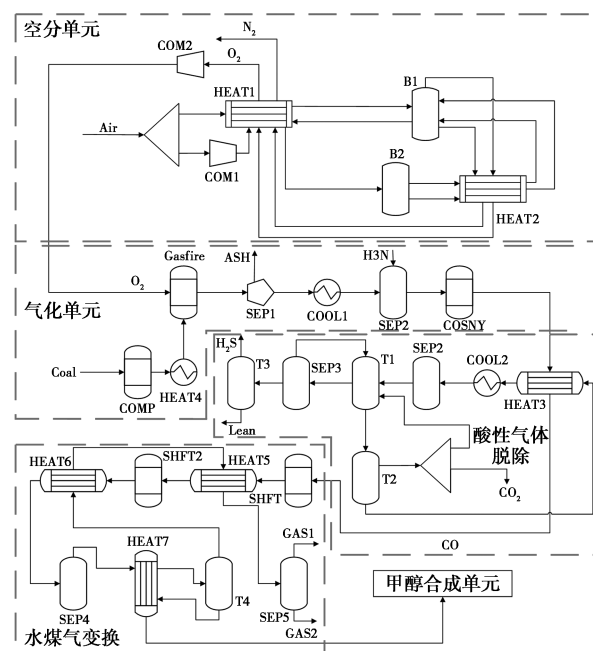
入甲醇合成流程合成甲醇。主要设备采用的模块及参数如表1所示。

表1 天然气重整中主要设备的模块选择及技术参数

设备	模块	主要参数
换热器	HeatX	
预重整器	RGibbs	压力0.5 MPa,温度550℃
重整器	RGibbs	压力0.5 MPa,温度900℃

### 1.2 煤气化

如图2所示,煤气化制甲醇工艺主要由空分单元、煤气化单元、酸性气体脱除、水煤气变换和甲醇合成几部分组成。其中甲醇合成部分与CO<sub>2</sub>直接加氢流程相同,将在后边介绍。



HEAT1-7—换热器;COM1-2—压缩机;B1、B2—深冷分离塔;  
COMP—热解罐;SEP1—气固分离器;SEP2-5—闪蒸罐;  
COOL1-2—冷凝器;Gasfire—气化炉;T1-4—精馏塔;  
SHFT1-2—平衡反应器

图2 煤气化制甲醇的流程示意图

空分单元制得的O<sub>2</sub>输入到煤气化单元之中,通过换热之后与煤热解之后的产物一起进入气化炉中反应,产物经过气固分离器之后将灰分去除,合成气经过换热和冷凝之后进入酸性气体脱除部分,本文中采用的是低温甲醇洗的方式,在吸收塔中甲醇将CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>S等气体脱除,在进入脱除塔中将气体分离,之后清洁气体经换热后进入水煤气变换部分。通过水煤气反应以制取合适碳氢比的合成气通过甲醇合成部分制取甲醇,其中水煤气变换反应如下

所示:



煤气化制合成气部分主要设备的模块选择和主要参数如表 2 所示。

表 2 煤气化过程中主要设备的模块选择及技术参数

设备	模块	主要参数
换热器	HeatX	
热解罐	RStoic	压力 0.5 MPa 温度 550℃
气化炉	RGibbs	压力 3.1 MPa, 热负荷 0
吸收塔、脱除塔	RadFrac	
WGS 反应器	REquil	压力 2.5 MPa, 温度 400℃

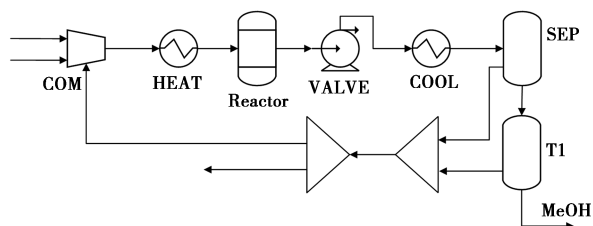
### 1.3 CO<sub>2</sub> 加氢

该过程是将 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 以适当比例通入反应器中通过反应(2)~(4)生成甲醇,其中 CO<sub>2</sub> 的主要来源是燃煤电厂的烟气,通过 CaO 捕集烟气中的 CO<sub>2</sub>, Shimizu 等<sup>[6]</sup>于 1999 年首先提出钙环 CO<sub>2</sub> 捕集系统,并主要使用 CaO 作为 CO<sub>2</sub> 吸附剂。

CaO 作为 CO<sub>2</sub> 吸附剂和脱硫剂进入碳化器,与燃煤电厂排放的烟气反应生成 CaCO<sub>3</sub>,产物经气固分离器分离,固体进入焙烧炉再生产生 CO<sub>2</sub> 和 CaO。为了弥补焙烧机随着炭化/焙烧循环次数的增加而损失的 CaO 活性,同时加入新的 CaO,炭化焙烧反应如下:



为生产绿氢,采用电解水法生产 H<sub>2</sub>;产物只有 H<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>,无污染物释放,其中电力供应由风电提供。本文中电解法采用碱性电解水。该技术现在已经非常成熟并完全工业化,已实现兆瓦级应用<sup>[7]</sup>。如图 3 所示,捕获的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 经加压升温后通入甲醇反应器中,产物经精馏塔分离产生高纯度的甲醇,未反应的合成气取约 10%左右的排出用作燃料,避免惰性气体沉积,其余部分经加压升温后循环到反应器中继续参与反应。流程中主要设备的模块选择和参数如表 3 所示。



COM—压缩机;HEAT—换热器;Reactor—甲醇反应器;  
VALVE—减压阀;COOL—冷凝器;SEP—闪蒸罐;T1—精馏塔

图 3 CO<sub>2</sub> 加氢流程示意图

表 3 CO<sub>2</sub> 加氢流程主要设备模块选择及技术参数

设备	模块	主要参数
换热器	HeatX	
压缩机	MCompr	压力 5 MPa
甲醇反应器	RPlug	压力 5 MPa, 温度 225℃
精馏塔	RadFrac	塔板数 11, 回流比 0.8

采用技术经济分析方法,对上述 3 种制甲醇方式在产能为 200 t/d 的情况下的成本、碳排放进行了计算,并进行了敏感性分析以寻找主要影响因素。

### 1.4 成本分析

总投资(TCI)是基于主要设备资本投资的比率估算计算的,如式(8)所示:

$$TCI = I \times \left( 1 + \sum_{i=1}^n R_i \right) \quad (8)$$

其中 I 为主要设备的设备成本, R<sub>i</sub> 为比例系数,具体的比例系数如表 4<sup>[8]</sup>所示。本文中主要设备的资本投资估算由 Aspen Economic Analyzer 进行计算,然后使用年度化工厂成本指数(CEPCI)将成本更新到 2020 年。

表 4 单位甲醇生产成本估算系数

成本组成	比例系数
1 直接成本	
1.1 采购设备	1.00
1.2 设备安装	0.47
1.3 控制仪表	0.36
1.4 管道	0.68
1.5 电气系统	0.11
2 间接成本	
2.1 工程监督	0.33
2.2 建设工程	0.41
2.3 法律服务	0.04
2.4 承包商费用	0.22
2.5 意外开销	0.44
3 操作与维护	
3.1 人工	根据不同方式确定
3.2 监督与文书	人工的 20%
3.3 维护与修理	固定资本投资的 6%
3.4 运营费用	维护与修理(3.3)的 15%
3.5 实验费用	人工的 15%
4 专利及使用费	总产品成本(TPC)的 1%
5 地方税和保险	
6 工厂管理	(3.1+3.2+3.3)的 60%

最后的总产品成本(*TPC*)由式(9)计算:

$$TCI = C_D + C_{O\&M} + C_{RM} + C_U - C_{BY} \quad (9)$$

$C_D$ 、 $C_{O\&M}$ 、 $C_{RM}$ 、 $C_U$ 、 $C_{BY}$ 分别是年度资本成本、运营和维护、公用事业、原材料成本以及副产物售价,副产物主要为电解水所产生的O<sub>2</sub>,主要原材料的价格在表5中标注。对于CO<sub>2</sub>直接加氢制甲醇的方式,用于制氢和碳捕集的公用事业成本包含在原材料成本中,不包含在总公用事业成本中。

表5 主要原材料、产品价格及假设

项目	经济假设	项目	经济假设
原材料		公用工程	
NG/(元·GJ <sup>-1</sup> )	27	H <sub>2</sub> O/(元·t <sup>-1</sup> )	2.3
Coal/(元·t <sup>-1</sup> )	600	风电成本/(元·kWh <sup>-1</sup> )	0.7
CaO/(元·t <sup>-1</sup> )	150	运行年限/a	20
O <sub>2</sub> /(元·t <sup>-1</sup> )	420	年工作时长/h	8000

其中年度资本成本使用公式(10)、(11)计算:

$$\text{年度资本成本}(CRF) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

$$C_D = CRF \times TCI \quad (11)$$

式中, $CRF$ 为年化资本系数; $i$ 为贴现率,本文中设定为8%; $n$ 为经营年度。

假定除电解水系统外,所有设备的运行年限为20 a。运营和维护成本包括人工、维护和维修、专利和保险、工厂管理、销售和研发成本等。

本文中,可再生氢的生产成本为美国能源部采用H2A模型计算得出的2020年目标值。系统能效和电解槽效率分别设置为75%和77%,系统整体耗电为44 kWh/kg,其中电解槽耗电为43 kWh/kg,H<sub>2</sub>的固定和可变运维成本分别为1.5、0.5元/kg。

表6为3种制甲醇方式在200 t/d的产能下的单位甲醇成本,本文中选择了商业甲醇成本(2 800元/t)<sup>[9]</sup>作为参考,以验证可行性并提供一定的成本参考。结果表明,天然气重整(2 595.2元/t)和煤气化(2 265.5元/t)制甲醇成本低于商用甲醇成本,而

表6 3条路线在200 t/d产能下的成本估算 元

路线	一	二	三
年化资本	550.2	1010.9	7706.7
运营	916.1	503.2	1392.2
公用工程	581.3	401.2	427.6
原材料	547.6	351.3	417.7
总成本	2595.2	2266.5	9944.1

CO<sub>2</sub>直接加氢(9 944.1元/t)的成本则远大于商用甲醇成本。

### 1.5 碳排放分析

3种方式的CO<sub>2</sub>排放总量由文献和Aspen Plus的模拟结果确定。天然气重整、煤气化和CO<sub>2</sub>直接加氢制甲醇的CO<sub>2</sub>排放量分别为0.67、2.29、-0.57 t/t,因为煤气化过程中会排放大量的CO<sub>2</sub>,所以煤气化制甲醇的CO<sub>2</sub>排放量很高,而CO<sub>2</sub>直接加氢达到了CO<sub>2</sub>负排放,每吨甲醇可以减排0.57 t CO<sub>2</sub>。

### 1.6 敏感性分析

本文中为3种制甲醇方式选择了不同的项目成本,通过敏感性分析考察关键成本因素。每个项目改变量为±20%,而其他项目保持不变。对于天然气重整,项目被确定为天然气、电力、设备成本、维护、人工和工程用水。煤气化的项目被确定为煤、甲醇、电、工程用水、设备成本、维护和人工。CO<sub>2</sub>直接加氢的项目被确定为风电成本、碳捕集成本、加氢设备成本、维护、人工、O<sub>2</sub>售价和电解槽成本。

图4显示了3种方式制甲醇的灵敏度分析结果。3种方式中,对单位甲醇成本影响最大的项目分别是天然气、煤炭和风电成本。当这些项目的成本变化20%时,对单位甲醇成本的影响分别达到5.7%、5.7%和16.9%,在天然气重整和煤气化中,电力成本的影响也很大,变化20%时,对天然气重整和煤气化制甲醇成本的影响分别为4.0%和4.5%。在CO<sub>2</sub>直接加氢制甲醇的方式中,影响第二大的项目为O<sub>2</sub>,价格变化20%时对单位甲醇成本的影响为3.4%。

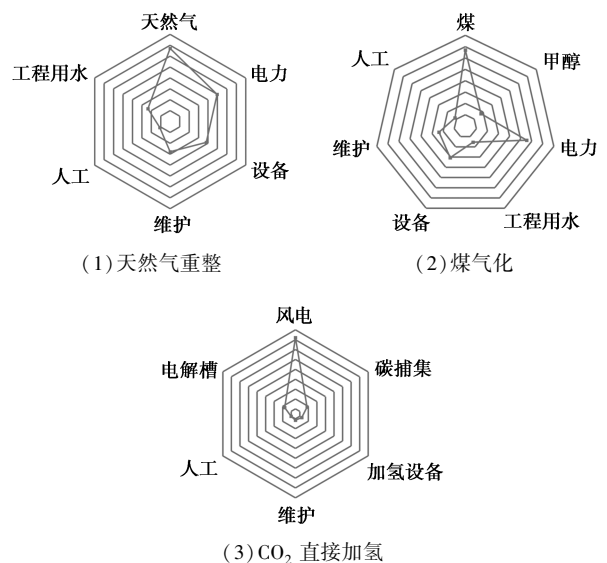
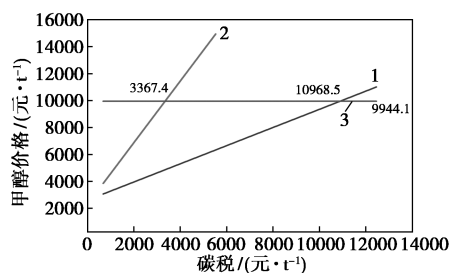


图4 3种路线制甲醇方式的敏感性分析结果

## 2 结果与讨论

目前,甲醇生产有多种方法,但由于技术、经济和环境问题,在世界范围内天然气仍然是主要的甲醇生产方法,而在国内由于资源限制煤气化则成了主要方式。本文中在产能为 200 t/d 的条件下对天然气重整、煤气化和 CO<sub>2</sub> 直接加氢 3 种制甲醇方式进行经济分析、碳排放分析和敏感性分析。

在 200 t/d 的产能下,路线一(天然气重整)和路线二(煤气化)的单位甲醇成本分别为 2 595.2、2 266.5 元/t,而路线三(CO<sub>2</sub> 直接加氢)的成本却高达 9 944.1 元/t,显然在成本上 CO<sub>2</sub> 直接加氢制甲醇与另外 2 种方式相比毫无竞争力,但从环境角度来说,路线三能够做到每吨甲醇减少 CO<sub>2</sub> 排放 0.57 t,相比另外 2 种方式的高额碳排放,显然具有巨大的优势。因此,本文中在碳税存在的条件下对 3 种方式进行了考量,如图 5 所示,当碳税分别为 10 968.5、3 367.4 元/t 时,CO<sub>2</sub> 直接加氢制甲醇的方式才与天然气重整和煤气化在成本上持平。



1—路线一;2—路线二;3—路线三

图 5 碳税对 3 种路线的单位甲醇成本的影响

## 3 结论

基于以上结果,天然气重整(路线一)是甲醇生

产中最具竞争力的生产方法。但是,随着风能、电解水的发展,CO<sub>2</sub> 直接加氢制甲醇的方式在减少碳排放方面作用显著,随着技术的成熟和成本的下降,在未来有望在商业上应用。

### 参考文献

- [1] Nestler F, Schütze A R, Ouda M, *et al.* Inetic modelling of methanol synthesis over commercial catalysts: A critical assessment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 394: 124881.
- [2] Jia P, Lan X, Li X, *et al.* Highly selective hydrogenation of furfural to cyclopentanone over a NiFe bimetallic catalyst in a methanol/water solution with a solvent effect [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(18): 15221–15229.
- [3] Yarulina I, Chowdhury A D, Meirer F, *et al.* Recent trends and fundamental insights in the methanol-to-hydrocarbons process [J]. *Nature Catalysis*, 2018, 1(6): 398–411.
- [4] Lee B, Lee H, Lim D, *et al.* Renewable methanol synthesis from renewable H<sub>2</sub> and captured CO<sub>2</sub>: How can power-to-liquid technology be economically feasible? [J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115827.
- [5] Chen Q, Gu Y, Tang Z, *et al.* Comparative environmental and economic performance of solar energy integrated methanol production systems in China [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 187: 63–75.
- [6] Shimizu T, Hiramata T, Hosoda H, *et al.* A twin fluid-bed reactor for removal of CO<sub>2</sub> from combustion processes [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1999, 77(1): 62–68.
- [7] Buttler A, Spliethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2440–2454.
- [8] Group C E W. Plant Design and economics for chemical engineers [J]. *Chemical Engineering World*, 2004, (5): 39.
- [9] Lee B, Lee H, Lim D, *et al.* Renewable methanol synthesis from renewable H<sub>2</sub> and captured CO<sub>2</sub>: How can power-to-liquid technology be economically feasible? [J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115827. ■
- [10] acrylic acid synthesis via condensation of propionic acid with formaldehyde [J]. *Applied Catalysis*, 1993, 102: 215–232.
- [11] 李洁, 谭平华, 赖崇伟, 等. Cs-ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 催化剂用于甲基丙烯酸甲酯合成的研究 [J]. *应用化工*, 2015, 44(6): 1083–1087.
- [12] Zhao H, Zuo C C, Yang D, *et al.* Effects of support for vanadium phosphorus oxide catalysts on vapor-phase aldol condensation of methyl acetate with formaldehyde [J]. *J Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(50): 12693–12702.
- [13] 郭志军. 丙酸甲酯和甲醛合成甲基丙烯酸甲酯 Cs-P 基催化剂研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2020.
- [14] 李国松, 王连月, 张毅, 等. 纳米 Au-CoO<sub>x</sub> 催化剂的制备及其催化甲基酯化法制备甲基丙烯酸甲酯动力学研究 [J]. *石油化工*, 2018, 47(9): 969–975.
- [15] 胡秀英, 马迪, 杨廷海, 等. K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化餐饮废油脂交换制备生物柴油的动力学 [J]. *食品科技*, 2014, 39(9): 203–207. ■

(上接第 215 页)

- [16] Albanesi G. Methyl methacrylate by gas phase catalytic condensation of formaldehyde with methyl propionate [J]. *Applied Catalysis*, 1983, 6: 293–306.
- [17] Tai J, Davis R J. Synthesis of methacrylic acid by aldol condensation of propionic acid with formaldehyde over acid-base bifunctional catalysts [J]. *Catalysis Today*, 2007, 123(1–4): 42–49.
- [18] Li B, Yan R, Wang L, *et al.* Synthesis of methyl methacrylate by aldol condensation of methyl propionate with formaldehyde over acid-base bifunctional catalysts [J]. *Catalysis Letters*, 2013, 143(8): 829–838.
- [19] 杨小林, 冯裕发, 周鹏鹏. Cs/SiO<sub>2</sub> 催化丙酸甲酯合成甲基丙烯酸甲酯工艺 [J]. *精细石油化工*, 2020, 37(2): 5–10.
- [20] 赖崇伟, 李洁, 熊国焱, 等. 丙酸甲酯和甲醛合成甲基丙烯酸甲酯的 Cs/SiO<sub>2</sub> 催化剂的研究 [J]. *天然气化工(C1 化学与化工)*, 2014, 39(6): 1–4, 20.
- [21] Yoo J S. Silica supported metal-doped cesium ion catalyst for meth-