

# 炼油厂 CO<sub>2</sub> 分离技术的研究

宋倩倩, 蒋庆哲, 宋昭峥\*

(中国石油大学重质油国家重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**对可能终端应用的 CO<sub>2</sub> 分离技术进行了简要概述,同时结合我国炼油厂烟道气的特点,筛选出3种适合我国炼油厂的可行的分离技术,即适合回收低浓度 CO<sub>2</sub> 的化学吸收法和膜吸收法,适合回收制氢尾气的变压吸附法(PSA法),并进行了系统阐述。根据我国炼油厂碳排放现状,提出了相应的发展建议。

**关键词:**炼油厂;减排;CO<sub>2</sub> 分离技术;化学吸收法;膜吸收法;PSA法

中图分类号:TQ028

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)03-0012-06

## CO<sub>2</sub> separation technologies in oil refineries

SONG Qian-qian, JIANG Qing-zhe, SONG Zhao-zheng\*

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. CNPC Research Institute of Safety and Environment Technology, Beijing 102206, China)

**Abstract:** To ease global warming, CO<sub>2</sub> emissions from large sources must be limited. The petroleum refining industry as one of the largest contributors to anthropogenic CO<sub>2</sub> emission is forced to implement CO<sub>2</sub> mitigation measures. At present, CO<sub>2</sub> separation from point source emissions has been recognized as one of several strategies necessary for mitigating unfettered release of greenhouse gases (GHGs) into the atmosphere. Therefore, the possible CO<sub>2</sub> separation technologies for end-of-pipe applications are briefly reviewed. According to the characteristics of flue gas from the refineries in China, three feasible CO<sub>2</sub> separation technologies are selected, such as the chemical absorption and membrane absorption methods for low concentration flue gas and pressure swing adsorption (PSA) for off gases of hydrogen manufacturing unit. Based on the current status of CO<sub>2</sub> emission from petroleum refineries in China, some suggestions are proposed as well.

**Key words:** petroleum refineries; emission reduction; CO<sub>2</sub> separation technologies; chemical absorption; membrane absorption; PSA

政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第三次气候变化科学评估中提出,CO<sub>2</sub>对全球气候变暖的贡献率为60%<sup>[1]</sup>。人为燃烧化石燃料导致全球大气中CO<sub>2</sub>体积分数激增,由1860年工业化前的约280×10<sup>-6</sup>到1958年的316×10<sup>-6</sup>左右,再到当今的369×10<sup>-6</sup>左右<sup>[2]</sup>。据IPCC预测,到2100年大气中CO<sub>2</sub>体积分数将达到570×10<sup>-6</sup>,由此引发全球平均温度约升高1.9℃,平均海平面增加3.8 m<sup>[3]</sup>。

炼油行业是世界主要的CO<sub>2</sub>排放源头之一,其排放总量约占全球总排放量的4%(质量分数,下同),每年接近10亿t<sup>[4-5]</sup>。我国是世界上仅次于美国的第二炼油大国,且随着炼油规模的不断扩大,高品质油品需求的增长以及轻质原油供应的紧缺,我国炼油厂CO<sub>2</sub>排放量增长迅猛,2013年CO<sub>2</sub>总排放量达到1.36亿t。2009年我国政府已公开承诺,到2020年我国单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放要比2005年下降40%~45%。在倡导低碳的今天,高能耗、

高排放的炼油行业,已成为我国节能减排的重点。

目前,CO<sub>2</sub>减排主要有3种途径:改善优化能源结构、提高化石燃料利用效率、发展和应用CO<sub>2</sub>捕集与封存技术(CCS)。就炼油厂而言,短期内,每年因燃料替代和能效提高总排放仅可降低6%~26%,即减排9 Mt~40 Mt CO<sub>2</sub>,而实施碳捕集可减少13%~80%的碳排放<sup>[6]</sup>。因此,从中长期发展来看,研究CO<sub>2</sub>分离技术对实现炼油厂碳减排具有重要的指导意义与现实意义。

## 1 CO<sub>2</sub> 分离技术

当前的CO<sub>2</sub>分离方法有:化学吸收法、物理吸收法、物理吸附法、膜分离法、膜吸收法、低温蒸馏法、化学链燃烧法等(见图1)。即使是同一种方法,又因分离源、分离要求等的不同,有多种不同的技术及其相应的工艺流程,各工艺主要优缺点如表1所示<sup>[8-11]</sup>。这就使得针对某一特定CO<sub>2</sub>排放源,究竟

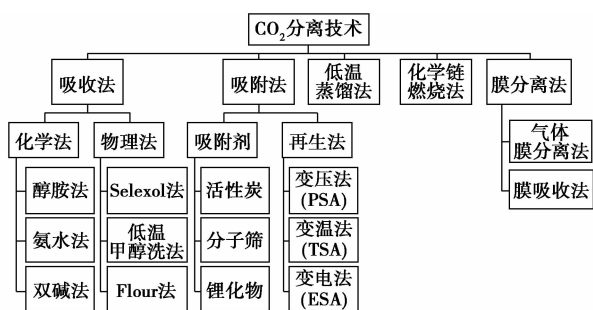
收稿日期:2014-10-10

基金项目:中国石油低碳重大专项——低碳关键技术研究(2011E-2411);中国石油大学(北京)基础基金

作者简介:宋倩倩(1983-),女,博士研究生,从事碳减排及能源发展战略等研究, classmatesong@163.com;宋昭峥(1970-),男,博士,副教授,从事油田化学、碳减排及能源发展战略等方面的研究,通讯联系人, song@cup.edu.cn。

表1 各种CO<sub>2</sub>分离方法优缺点

分离方法	适用情形	优点	缺点
化学吸收法	中等或较低CO <sub>2</sub> 分压	选择性高、应用广泛、溶剂可再生、反应速度快	吸收剂损失大、再生能耗高、腐蚀性强
膜吸收法	较低CO <sub>2</sub> 分压	接触面积大,无鼓泡、液泛和夹带等问题,膜的渗透性和选择性均较好、能耗低、模块化良好	膜孔易被浸润和堵塞,大多处于试验研究阶段
PSA法	较高CO <sub>2</sub> 浓度	工艺简单、能耗低、无污染、无腐蚀、适应力强、产品纯度高	回收率低、投资高、占地大
物理吸收法	总压和CO <sub>2</sub> 分压均较高	能耗小、吸收剂易再生、吸收剂用量少、腐蚀性低	选择性低、分离效率低、高压更理想
低温蒸馏法	CO <sub>2</sub> 体积分数约为60%、油田现场	分离效率与纯度均高	成本高、能耗高
膜分离法	CO <sub>2</sub> 分压较高	装置简单、无污染、能耗低、效率高	高选择性和高渗透性不易同时达到、CO <sub>2</sub> 纯度不高、膜不耐高温、不易清洗
化学链燃烧法	尚处于试验研究阶段	尾气可直接排放、无NO <sub>x</sub> 、能耗低、操作成本低	尚无大规模工业应用

图1 CO<sub>2</sub>分离技术

采用何种技术可实现分离效果最好,综合效益最优,则必须结合具体的实际情况进行仔细地考察与斟酌,最终筛选出最有利的回收分离技术。

(上接第11页)

氧化物调解氧化成醛。该方法使活跃的和不活跃的醇相融合,包含杂环化合物和多样化的氧、氮、含硫官能团,使伯醇分子内未受保护的仲醇进行氧化。研究生詹妮尔·施特费斯(Janelle Steves)对这些反应机理进行了研究,随后发现一个新的催化剂体系,并提出该工艺可在更宽的范围内对一级和二级醇进行氧化。这些催化剂体系的简单性和化学试剂的少量性大大简化了产品的分离并减少废物产生,也不必再使用氯化物溶剂。

斯特尔教授与撒切尔·根教授(Professor Thatcher Root,威斯康星大学麦迪逊分校化学和生物工程部门)以及一些制药公司的科学家们合作,对安全、可伸缩的有氧氧化反应制药合成方法的实现进行了战略性的探索。一种用于实现醇有氧氧化成醛的连续流动反应过程,在5 min内即可实现。

对这类安全性与扩展性出色的方法的研究,使

## 2 炼油厂CO<sub>2</sub>排放及其烟道气特点

### 2.1 CO<sub>2</sub>排放概况

炼油厂的CO<sub>2</sub>排放源多且分散,一个复杂炼油厂会超过20多个,一般可分为直接排放和间接排放两大类。直接排放又可分为燃烧排放、工艺排放和逃逸排放;燃烧排放包括锅炉、加热炉、汽轮机、火炬等固定源的CO<sub>2</sub>排放;工艺排放包括催化裂化、催化重整、制氢等装置生产过程中排放的CO<sub>2</sub>;逃逸排放主要指生产过程中各设备因泄漏导致的排放。间接排放是指外购的电、蒸汽因消耗化石燃料而产生的排放<sup>[7,12]</sup>。典型炼油厂的CO<sub>2</sub>排放源如图2所示。

氧气成为氧化剂的方法提供了一类广泛、安全、特殊的原材料。这类实用、安全、可伸缩的氧化方法的发展,为广泛利用氧分子制药、精细氧化和特种化学品的制造奠定了基础。

### 参考文献

- [1] 熊健,床臻善,叶君. 第十一届美国总统绿色化学挑战奖介绍[J]. 精细化工, 2006, 23(12): 1145-1147.
- [2] 顿静斌,张晓昕. 2007年美国总统绿色化学挑战奖获奖介绍[J]. 精细化工, 2007, 24(12): 1145-1147.
- [3] 杨双春,杨兰英. 2008年美国总统绿色化学挑战奖项目介绍[J]. 精细化工, 2008, 25(8): 729-732.
- [4] 潘一,魏义正. 2009年美国总统绿色化学挑战奖项目介绍[J]. 精细化工, 2009, 26(7): 625-628.
- [5] 杨双春,潘一. 2010年美国总统绿色化学挑战奖项目介绍[J]. 精细化工, 2010, 27(7): 625-628.
- [6] 杨双春,潘一. 2011年美国总统绿色化学挑战奖项目介绍[J]. 当代化工, 2011, 40(8): 831-834.
- [7] 程海涛. 2012年美国总统绿色化学挑战奖项目评述[J]. 现代化工, 2012, 10: 4-8. ■

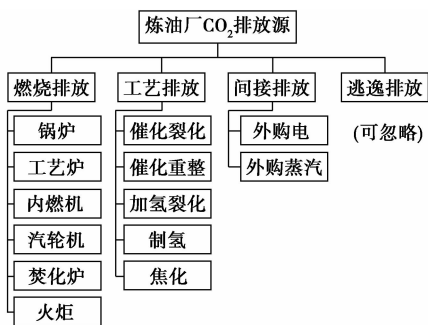


图 2 炼油厂的 CO<sub>2</sub> 排放源

从排放量来看,主要以直接排放为主,其量超过总排放量的 85%;其中,又以燃烧排放量最多,约占直接排放量的 60%;工艺排放中,以催化剂烧焦排放为主,占总工艺排放的 78%,制氢装置工艺排放占 22% 左右<sup>[12]</sup>;逃逸排放因其量较小且难以统计,常可忽略。

### 2.2 炼油厂烟道气特点

由排放源的分析可知,炼油厂 CO<sub>2</sub> 主要来自燃料燃烧和工艺排放,除了制氢装置工艺排放的 CO<sub>2</sub> 外,其他烟道气中的 CO<sub>2</sub> 体积分数一般均小于

表 2 炼油厂典型烟道气组成 体积分数/%

组成	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub> (10 <sup>-6</sup> )	其他可燃气体 (如甲烷,低碳烷烃和烯烃)
催化裂化尾气	16.6	82	0.8	—	0.6	20	—
制氢尾气	50	—	—	30	—	—	20

表 3 不同化学吸收法的比较

类别	吸收剂	工艺名称	主要特点	适用性
醇胺法	醇胺溶液	MEA 法、DEA 法、MDEA 法、混合胺法、位阻胺法等	吸收量大、吸收效果好、成本低、吸收剂可循环使用并能回收到高纯产品,工业经验十分丰富;缺点是设备腐蚀率高,溶剂损失大,再生能耗高	对低浓度 CO <sub>2</sub> 烟道气吸收有广泛的适应性
热钾碱法	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 溶液(加有活化剂)	G-V 法、Benfield 法、Catacarb 法等	在较高温度下吸收酸气,能耗比醇胺法低,但净化度不如醇胺法	宜用于合成氨厂的合成气中脱除 CO <sub>2</sub>
氨水法	氨水	冷冻氨水工艺、常温氨水工艺	成本低,有较高的 CO <sub>2</sub> 脱除效率和 CO <sub>2</sub> 负荷能力,再生能耗低;主要缺点是氨气易挥发	目前处于中试阶段,大规模工业应用需进一步研究

从表 3 中可以看出,当前醇胺法在回收低浓度 CO<sub>2</sub> 的工业应用中较其他方法更有优势。表 4 列出了常用醇胺法的优缺点及适用范围。此外,醇胺溶液尤其是 MEA 吸收液,在天然气工业中已有 60 年的商业应用,是目前公认的最成熟的 CO<sub>2</sub> 分离技术。在国际上被业界广泛应用<sup>[14]</sup>,国内以中石化南化集团研究院研制出的复合吸收剂(MEA 为主溶

剂,添加活性胺、抗氧化剂和缓蚀剂)为溶剂的低分压 CO<sub>2</sub> 回收技术,已成功应用于 20 多套不同类型的烟道气 CO<sub>2</sub> 回收,包括电厂、水泥厂、化工厂、炼油厂等烟道气,装置的最大 CO<sub>2</sub> 回收能力为 12 000 m<sup>3</sup>/h<sup>[15]</sup>。因此,本文选择化学吸收法中 MEA 法作为其中一种分离技术。具体工艺流程如图 3 所示。

### 3 炼油厂 CO<sub>2</sub> 分离技术的选择

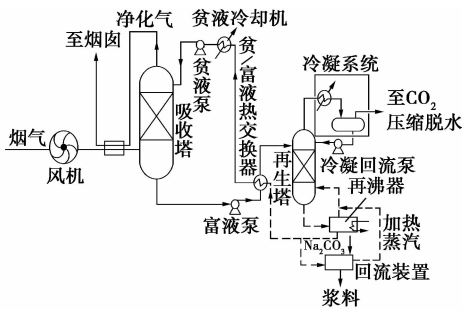
根据炼油厂烟道气的特点,结合各分离方法的适用情况(表 1),初步筛选出适宜我国炼油厂的 CO<sub>2</sub> 分离方法:化学吸收法、膜吸收法、PSA 法。其中前两者适用于低 CO<sub>2</sub> 含量气源(<20%,体积分数),PSA 法适用于天然气制氢尾气。

#### 3.1 化学吸收法

化学吸收技术的历史悠久,技术成熟,运行稳定,并不断地推陈出新,气体回收率和纯度可达 99%(质量分数)以上,是一种最具有工程可行性的 CO<sub>2</sub> 分离技术。其脱除 CO<sub>2</sub> 的原理是利用混合气中的 CO<sub>2</sub> 与碱性化学溶剂接触,发生酸碱中和反应形成弱键中间体化合物,此物质在加热条件下逆向分解再生释放出 CO<sub>2</sub>,从而实现从烟道气中脱除 CO<sub>2</sub> 的目的。常用的吸收溶剂主要有钾碱或钠碱、氨水、醇胺类水溶液(如单乙醇胺 MEA、二乙醇胺 DEA 和甲基二乙醇胺 MDEA 等)。表 3 列出了醇胺法、热钾碱法、氨水法的主要特点及适用范围等<sup>[7-11,13]</sup>。

表4 常用醇胺溶剂的比较

溶剂名称	优点	缺点	适用情况
MEA	反应能力强,吸收速度快,价格低,工业应用广泛	溶剂损失比较大,负载能力有限,再生能耗大,腐蚀性较强	低中酸性气体分压的尾气吸收
MDEA	高适用浓度,不易降解变质,高酸气负荷,溶液腐蚀性低	对CO <sub>2</sub> 产生共吸,反应速率慢	应用较广泛,但吸收CO <sub>2</sub> 速度较慢

图3 MEA法回收烟道气CO<sub>2</sub>的工艺流程图

### 3.2 膜吸收法

膜吸收技术是将膜和普通吸收/解吸相结合而出现的一种新型膜分离过程。该技术主要采用疏水性微孔中空纤维膜作为反应介质,与膜分离技术相比,在薄膜的另一侧有化学吸收剂存在,气体和吸收剂不直接接触,分别在膜两侧流动,膜本身对气体没有选择性,只起隔离气体和吸收剂的作用;通过吸收剂的选择性吸收达到气体分离的目的<sup>[16-17]</sup>。

自1995年,Matsumoto等第一个提出将膜吸收技术应用于火电厂烟气中CO<sub>2</sub>的脱除后,国际上对膜气体吸收技术脱除火电厂烟气中CO<sub>2</sub>的研究变得非常活跃。虽然至今多处于实验室基础研究阶段,但日、欧等国一直致力于其工业化应用;日本东京电力公司与三菱重工业公司合作开发了回收电厂烟气CO<sub>2</sub>的膜气体吸收技术;2007年,挪威科技大学开发了低成本能效CO<sub>2</sub>过滤膜脱除烟气中CO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>回收纯度为90%(质量分数),分离效率达到85%,累积已进行了5年的实验室研究,并建立了小型中试,课题组计划将在近3年内进行较大规模的中试,5年内将在欧洲4座大型电厂采用这种能效CO<sub>2</sub>过滤膜进行中型规模试验<sup>[18-19]</sup>。

国内现阶段膜吸收法大多处于试验研究阶段,其中以浙江大学能源清洁利用国家重点实验室方梦

祥课题组技术最成熟,课题组利用浙江大学热能工程研究所开发的燃煤烟气CO<sub>2</sub>膜吸收技术和相应中试运行操作参数,对烟气流量为10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/h的某燃煤电厂烟气中的CO<sub>2</sub>采用膜吸收分离工艺进行了初步设计和经济性分析<sup>[20-21]</sup>。

膜吸收法结合了膜分离法和化学吸收法的优点,具有接触面积大、模块性良好、操作弹性大、装置规模小、传质效率高的特点,成为一种非常有潜力替代化学吸收法的技术<sup>[20-23]</sup>。此外,膜吸收法还可以解决夹带、液泛和鼓泡的问题,这意味着可减少溶剂的损失,从而降低溶剂补给费用。虽然该技术目前尚未在炼油厂中应用,随着廉价膜的开发应用、膜孔浸润等问题的解决,未来在炼油厂中应用潜力巨大。该工艺与化学吸收法类似,最大的区别在于吸收塔装置,通常采用中空纤维膜接触器组件作为吸收装置。具体工艺流程如图4。

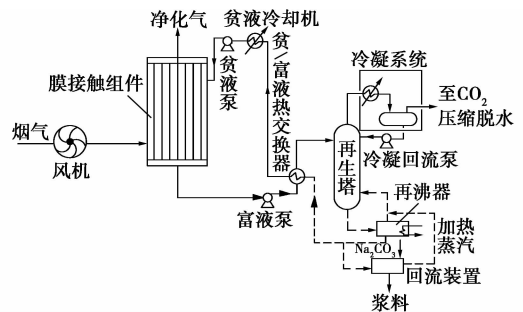
图4 典型膜吸收过程脱除烟道气CO<sub>2</sub>工艺流程图

表5对MEA法和膜吸收法进行了系统对比。从表5中可以看出,当回收低浓度CO<sub>2</sub>时,膜吸收法确实是一种非常有潜力的替代化学吸收法的新技术。Yeon等<sup>[23]</sup>研究证实,单位体积膜接触器CO<sub>2</sub>吸收速率比MEA填料吸收塔高2.7倍。在使用新膜时,由于传质系数较大,膜吸收法较传统MEA吸

表5 CO<sub>2</sub>分离技术对比

项目	MEA法	膜吸收法
产能/(万t·a <sup>-1</sup> )	5~16	13~16
占地面积/m <sup>2</sup>	1800~2000	1800~2200
CO <sub>2</sub> 回收率/%	~90	~90
分离纯度/%	99.0~99.9	99.0~99.9
产品规格	食品级、工业级	食品级、工业级
总投资/万元	1550~4836	2600~5316
年运行费用/万元	2700~3031	1816~2896
吨CO <sub>2</sub> 回收成本/元	183.6~380.0	137.5~175.5
年效益/万元	1420~3032	2100~3940

收法的吨 CO<sub>2</sub> 回收成本低 20 ~ 30 元。但膜被浸润或膜孔堵塞达 50% 时,膜吸收法在成本上就没有优势,加上膜的价格与寿命、SO<sub>2</sub> 浓度等影响,可能出现传统 MEA 法成本更低。因此,未来如果不能解决膜浸润和堵塞问题、开发更低成本的膜,就不能笼统地说哪种方法更好。

### 3.3 PSA 法

PSA 法脱除 CO<sub>2</sub> 是基于填充于填料塔的固体吸附剂与 CO<sub>2</sub> 热气体接触时,在相对高压条件下,吸附剂优先或选择吸附 CO<sub>2</sub>。被吸附的 CO<sub>2</sub> 在较低压力下从吸附剂中解吸,使吸附剂得以再生。从技术的角度看,PSA 法几乎可用以回收各种浓度烟道气中的 CO<sub>2</sub>。许多研究者采用该法对电厂烟道气 CO<sub>2</sub> 回收进行了系统研究<sup>[24-25]</sup>,在当前商业条件下,该技术不适合大量捕集电厂烟道气中的 CO<sub>2</sub><sup>[26-27]</sup>。然而,PSA 法具有相对能耗低及易于操作的优点,特别是在回收较高浓度 CO<sub>2</sub> (体积分数为 20% ~ 80%) 方面非常有潜力<sup>[25-26]</sup>。

炼油厂中的制氢单元通常采用 PSA 法从合成气中回收 H<sub>2</sub>,且只能回收 75% ~ 90% 质量分数的 H<sub>2</sub>。含有 CO<sub>2</sub>、未回收 H<sub>2</sub> 及可燃气体的 PSA 尾气(表 2 所示),通常作为燃料直接燃烧,不仅造成能源的浪费而且向大气中排放了大量的 CO<sub>2</sub>。因此,炼油厂无论从经济角度还是减排角度,均应该回收这部分 H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>。Reddy and Vyas<sup>[28]</sup> 研究了利用 CO<sub>2</sub> LD Sep<sup>SM</sup> 单元回收 PSA 尾气中的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>。北京燕山石化已建立 1 套 PSA 装置用以回收制氢尾气,每年可生产 20 万 t 食品级 CO<sub>2</sub>、64.8 Mm<sup>3</sup> 可燃气体及 36 Mm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>,年利润可达 3 600 万元<sup>[29]</sup>,具体的工艺流程如图 5。此外,我国变压吸附分离提纯 H<sub>2</sub> 以及压缩分离生产 CO<sub>2</sub> 的技术和工艺现已十分成熟。因此,选择 PSA 法分离制氢单元尾气。

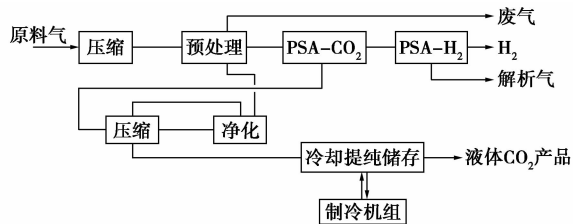


图 5 PSA 法脱除烟道气 CO<sub>2</sub> 工艺流程图

## 4 结论及建议

限制炼油厂碳回收积极性最主要的原因是居高不下的回收成本,如 MEA 法为每 1 t CO<sub>2</sub> 为 183.6 ~

380 元(见表 4)。在回收低浓度 CO<sub>2</sub> 方面,MEA 法在工业上已有 60 年的商业化经验,但因再生能耗高、吸收剂损失大、设备腐蚀等问题一直限制着应用,未来的发展方向是研发高效吸收剂和优化工艺来降低过程能耗,根据 Steeneveldt 等<sup>[30]</sup> 研究可知,未来尤其是对现有炼油厂而言,胺类吸收法是最有可能实施的分离技术;然而,膜吸收法当前虽无大规模工业化应用,但作为一种有前景的分离技术,解决好膜浸润及孔堵塞等问题,经济前景是相当广阔的。PSA 法在回收高浓度 CO<sub>2</sub> 方面优势显著,随着我国原油加工中原料重质化程度的加深、产品环保要求的提高,炼油厂对 H<sub>2</sub> 的需求量不断增加,制氢工艺排放比重逐渐升高,且尾气中含有大量高附加值的 H<sub>2</sub> 及其他可燃气体,回收这部分尾气具有明显的环境和经济双重效益,但该法仍存在投资及回收成本高、回收率低等问题,除了优化工艺外,加快研发新型吸附剂是关键。

实现技术的真正进步以降低分离成本的前景存在许多不确定性,反过来,亦可清晰看到其中所蕴含的“商机”,就是将回收的 CO<sub>2</sub> 作为二次产品发展下游产业,如注入 CO<sub>2</sub> 捕集气流来提高石油采收率(EOR)、气体采收率(EGR)、煤层甲烷采收率(ECBM),合成绿色有机化学中间体碳酸二甲酯(DMC)、可降解塑料,发展微藻生物燃料等。

## 参考文献

- [1] Song C S. Global challenges and strategies for control, conversion and utilization of CO<sub>2</sub> for sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing[J]. Catalysis Today, 2006, 115(1/2/3/4): 2-32.
- [2] United Nations Environment Programme. Introduction to climate change [EB/OL]. 2005. <http://www.grida.no/climate/vital/06.htm>.
- [3] Stewart C, Hessami M. A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration-the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(3): 403-420.
- [4] de Mello L F, Pimenta R D M, Moure G T, et al. A technical and economical evaluation of CO<sub>2</sub> capture from FCC units[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 117-124.
- [5] Van Straelen J, Geuzebroek F, Goodchild N, et al. CO<sub>2</sub> capture for refineries: A practical approach[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(2): 316-320.
- [6] Johansson D, Rootzén J, Berntsson T, et al. Assessment of strategies for CO<sub>2</sub> abatement in the European petroleum refining industry [J]. Energy, 2012, 42(1): 375-386.
- [7] 马敬昆, 蒋庆哲, 宋昭峥, 等. 低碳经济视角下炼厂碳产业链的

构建[J]. 现代化工, 2011, 31(6): 1-6.

- [8] Figueroa J D, Fout T, Plasynski S, *et al.* Advances in CO<sub>2</sub> capture technology: The U. S. department of energy's carbon sequestration program[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 2(1): 9-20.
- [9] Yang H Q, Xu Z H, Fan M H, *et al.* Progress in carbon dioxide separation and capture: A review[J]. Journal of Environmental Science, 2008, 20(1): 14-27.
- [10] Olajire A A. CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end-of-pipe applications: A review[J]. Energy, 2010, 35(6): 2610-2628.
- [11] Mondal M K, Balsora H K, Varshney P. Progress and trends in CO<sub>2</sub> capture/separation technologies: A review[J]. Energy, 2012, 46(1): 431-441.
- [12] 孟宪玲. 炼厂二氧化碳排放估算与分析[J]. 低碳经济, 2010, (2): 13-16.
- [13] Darde V, Thomsen K, van Well W J M, *et al.* Chilled ammonia process for CO<sub>2</sub> capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(2): 131-136.
- [14] Wang M, Lawal A, Stephenson P, *et al.* Post-combustion CO<sub>2</sub> capture with chemical absorption: A state-of-the-art review[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(9): 1609-1624.
- [15] 毛松柏, 叶宁, 朱道平. 低分压 CO<sub>2</sub> 回收新技术捕集燃煤电厂烟气 CO<sub>2</sub>[J]. 化学工程, 2010, 38(5): 95-97.
- [16] Feron P H M, Janson A E. The production of carbon dioxide from flue gas by membrane gas absorption[J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38: 93-98.
- [17] Li J L, Chen B H. Review of CO<sub>2</sub> absorption using chemical solvents in hollow fiber membrane contactors[J]. Separation and Purification Technology, 2005, 41(2): 109-122.
- [18] Nguyen P T, Lasseguette E, Medina-Gonzalez Y, *et al.* A dense membrane contactor for intensified CO<sub>2</sub> gas/liquid absorption in post-combustion capture[J]. Journal of Membrane Science, 2011, 377(1/2): 261-272.
- [19] Luis P, Gerven T V, der Bruggen B V. Recent developments in membrane-based technologies for CO<sub>2</sub> capture[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(3): 419-448.
- [20] 晏水平. 膜吸收和化学吸收分离 CO<sub>2</sub> 特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 1-206.
- [21] Yan S P, Fang M X, Zhang W F, *et al.* Comparative analysis of CO<sub>2</sub> separation from flue gas by membrane gas absorption technology and chemical absorption technology in China[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(11): 3188-3197.
- [22] de Montigny D, Tontiwachwuthikul P, Chakma A. Comparing the absorption performance of packed columns and membrane contactors[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2005, 44(15): 5726-5732.
- [23] Yeon S H, Lee K S, Sea B, *et al.* Application of pilot-scale membrane contactor hybrid system for removal of carbon dioxide from flue gas[J]. Journal of Membrane Science, 2005, 257(1/2): 156-160.
- [24] Beum H, Kim J, Cho S. Numerical analysis on the power consumption of the PSA process for recovering CO<sub>2</sub> from flue gas[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2002, 41(16): 4122-4131.
- [25] Martunusa, Helwania Z, Wiheebc A D, *et al.* In situ carbon dioxide capture and fixation from a hot flue gas[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 6: 179-188.
- [26] Ho M T, Allinson G W, Wiley D E. Reducing the cost of CO<sub>2</sub> capture from flue gases using pressure swing adsorption[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2008, 47(14): 4883-4890.
- [27] Reiner P, Audus H, Smith A R. Carbon dioxide capture from fossil fuel power plants, report SR2, IEA greenhouse gas R&D programme [R]. Cheltenham: U. K. 1994.
- [28] Reddy S, Vyas S. Recovery of carbon dioxide and hydrogen from PSA tail gas[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 149-154.
- [29] 周一兵. 燕山石化可大幅减少碳排放[N]. 中国石化报, 2009-12-11.
- [30] Steeneveldt R, Berger B, Torp T A. CO<sub>2</sub> capture and storage: Closing the knowing-doing gap[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2006, 84(9): 739-763. ■

## 浙江丰利废塑料复合材料综合利用技术装备 进入浙江省高端装备制造业发展重点领域(2015)

日前,浙江省经信委发布了《浙江省高端装备制造业发展重点领域(2015)》的通知,旨在进一步推动全省高端装备制造业发展,加快重点领域突破,提升装备制造业整体水平。国家高新技术企业浙江丰利粉碎设备有限公司研发的“废塑料复合材料回收处理成套设备及综合利用技术装备”入选其中,列为第五类大型环保、节能及资源综合利用设备,成为重点发展的资源综合利用技术装备。

此次入选的项目突破了粉体化回收废塑料技术(不会改变化学成分,造成二次环境污染);高压静电分选技

术;智能化自动控制技术和贵金属提取技术等关键技术,从而有效破解铝塑复合膜、铝塑板、塑料复合膜、光缆电缆等复合制品的回收处理这一亟待解决的社会化问题,攻克了国内无法用物理方法来解决废塑料复合材料回收利用的技术难题,实现资源再生综合利用,为废塑料复合材料回收利用提供强有力技术支撑的绿色环保装备。回收后的塑料组分具有纯度高、性能好、金属(铝等)回收率及纯度高等特点,是废铝塑复合材料回收利用技术发展的方向。(吴红富)