

“双碳”背景下石油化工城市的发展路径

——以山东省东营市为例

林名桢 代晓东 李洪言 李 雷 张 昕 刘 飞 董 燕

山东石油化工学院油气工程学院, 山东 东营 257061

摘 要:随着中国“碳达峰”“碳中和”目标(以下简称“双碳”目标)的提出,加快石油化工城市的低碳转型发展势在必行,这对于石油化工城市而言既是重要机遇也是极大挑战。以典型的石油化工城市山东省东营市为例,分别对其区位特色及产业概况、城市实现“双碳”目标的可行性、碳减排的主要途径和主要途径的关键技术及存在问题进行了分析。经分析认为,东营市以其丰富的自然资源及良好的新旧动能转换基础等特点在实现“双碳”目标的过程中存在较大优势,而碳捕集、利用与封存(CCUS)技术则是石油化工城市进行碳减排的高效之路。分析结果可为该类石油化工城市的发展提供理论依据和政策建议。

关键词:碳达峰;碳中和;石油化工城市;发展路径;关键技术

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.01.018

The development path of petrochemical cities under the background of “peak carbon dioxide emissions” and “carbon neutrality” —taking Dongying city, Shandong province as an example

LIN Mingzhen, DAI Xiaodong, LI Hongyan, LI Lei, ZHANG Xin, LIU Fei, DONG Yan

College of Oil and Gas Engineering, Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology,
Dongying, Shandong, 257061, China

Abstract: After China announced her goals of “peak carbon dioxide emissions” and “carbon neutrality” (hereinafter referred to as “dual carbon” goal), cities dominated by petrochemical industry have to accelerate their low-carbon transformation and development. This is not only a big challenge but also an important opportunity to these cities. This paper took Dongying city, a typical petrochemical city in Shandong province as an example, and analyzed the following problems including location characteristics and industry profile, the feasibility of the city to achieve the “dual carbon” goal the main ways of carbon emission reduction and the key technologies and existing problems. An analysis of the research result shows that Dongying city, with its rich natural resources and good foundation for new and old kinetic energy

收稿日期:2021-10-10

基金项目:2019 年山东省高等学校“青创科技计划”项目(2019KJA024)

作者简介:林名桢(1981-),女,山东胶州人,高级工程师,博士,主要从事油气集输及处理技术、CO₂回收及处理技术方面研究。E-mail:linmz1221@126.com

通信作者:代晓东(1980-),男,辽宁瓦房店人,教授,博士,主要从事油气储运和炼油方面的研究。E-mail:xiaodongdai1980@163.com

conversion, has great advantages in achieving the dual goals of “peak carbon dioxide emissions” and “carbon neutrality”, while CCUS technology is an efficient way for petrochemical cities to reduce CO₂ emission. This research result could provide theoretical basis and policy recommendations for the development of such type of petrochemical cities.

Keywords: Peak carbon dioxide emissions; Carbon neutrality; Petrochemical city; Development path; Key technology

0 前言

石油化工产业是以石油、天然气为原料,生产石油产品、基本有机化工原料等的能源产业。以石油化工产业为主的城市常被称为石油化工城市。这类城市虽然在国家和地区的发展过程中做出了不可磨灭的贡献,但普遍存在城市污染严重等问题。在 2020 年 9 月召开的第七十五届联合国大会一般性辩论上,中国首次明确,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和(以下简称“双碳”目标)。随着这一目标的提出,低碳转型发展对石油化工城市提出了极大的挑战。基于此,本文以山东省东营市为例,对“双碳”背景下石油化工城市的发展路径进行了详细探讨,以期对该类城市的转型发展提供理论依据和政策建议。

1 东营市区位特色及产业概况

1.1 区位特色及总体产业布局

东营市位于山东省东北部,是黄河三角洲的中心城市。城市区位优势突出,自然资源丰富。近年来,东营市抢抓山东省新旧动能转换、黄河流域生态保护和高质量发展等重大机遇,在传统石油工业发展的基础上,确定构建了“5+2+2”产业体系(即以石化、橡胶、石油装备、有色金属、新材料五大优势产业,以现代高效农业、文化旅游两大特色产业,以及以生物医药、航空航天两大未来产业为主导产业的产业体系。)^[1]。2020 年全市生产总值达 2 981.19 亿元。

1.2 石油产业概况

东营市是中国第二大石油工业基地胜利油田崛起之地。截至 2021 年,胜利油田共发现油气区块 81 个,探明石油地质储量 55.87×10^8 t,累计为国家贡献原油 12.5×10^8 t,为国家“稳定东部、发展西部”石油战略做出了重要贡献^[2]。胜利油田历年石油产量见图 1^[3]。

虽然近 30 年来,胜利油田一直保持着稳产在 $2\,300 \times 10^4$ t 以上的良好记录,但目前面临剩余储量减少,勘探开发难度增大及常规开发方式难以满足采油需求等问题。故自 2008 年起,胜利油田就开始进行了二氧化碳驱油的先导性试验探索。目前油田已累计注入二氧化碳 42×10^4 t,累计增油 10×10^4 t,为二氧化碳大规模

模驱油和封存的实施奠定了基础。

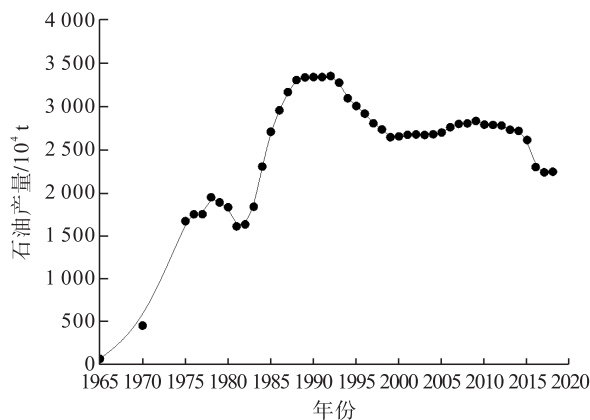


图 1 胜利油田石油产量变化趋势图

Fig. 1 Variety trend of oil production for Shengli Oilfield

1.3 炼化产业概况及年产二氧化碳分析

随着胜利油田的快速发展,东营市炼化产业也不断发展壮大^[4],其产能已达到 $7\,000 \times 10^4$ t,占据全国炼化产业产能的 1/10。

对炼化产业而言,可通过综合能耗估算其二氧化碳排放量。据统计^[5],石化行业平均炼油综合能耗为 2 491 MJ/t, 1 kg 标准油的低位热值为 42.62 MJ/kg,经计算可得出单位炼油能耗为 58.45 kg 标准油。而原油中的碳组含量为 83%~87%,按 90% 的碳转换为二氧化碳,可得出消耗 1 kg 原油约产生 2.81 kg 的二氧化碳。而东营市 $7\,000 \times 10^4$ t 产能产生的二氧化碳量约为 $1\,150 \times 10^4$ t。

炼化企业甲醇制氢过程中排放的二氧化碳纯度较高,不需经过复杂的分离提纯就可直接作为炼油企业的原料投入使用。通过走访调研发现,目前有部分企业建有甲醇制氢装置^[6]。据统计,这些企业产氢量为 10.7×10^4 m³/h,据式(1)可得出产生二氧化碳为 3.57×10^4 m³/h (56.1×10^4 t/a)。



1.4 城市总体碳排放量形式分析

东营市是以重化工为主体的工业化城市^[7],碳排放具有总量大、人均高、效率低的特点。据统计数据显示,全市二氧化碳排放总量接近 $6\,000 \times 10^4$ t,单位 GDP 排放量高达 1.7 t/万元。

2 东营市实现“双碳”目标的可行性分析

减少二氧化碳的排放,目前主要有四种途径:1)提高能源的利用率;2)利用清洁能源、新能源等来替代化石能源;3)生态碳封存技术;4)碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术。

虽然东营市在碳减排方面压力较大,但通过对东营市自身条件分析,发现其在实现“双碳”目标的过程中具有较大优势。

2.1 可再生能源资源丰富

东营市热水资源、潮汐能、太阳能、风能等自然资源丰富,其中区域内热能储量^[8]折合标准煤 $20.09 \times 10^8 \text{ t}$ 。

2.2 生态碳封存技术前景广阔

东营市拥有未开发利用土地面积 $30.12 \times 10^8 \text{ m}^2$,湿地面积 $45.81 \times 10^8 \text{ m}^2$,森林面积 $3.65 \times 10^8 \text{ m}^2$,还包括滩涂等众多自然资产。

2.3 新旧动能转换基础良好

东营市通过构建“5+2+2”现代产业体系,使制造业迈向中高端,石化产业实现由炼油型向化工型转型,现代农业快速发展,现代服务业迈出新步伐。

2.4 CCUS 技术商业化探索初具成效

东营市有关企业开展 CCUS 技术的相关商业化探索已有 10 余年,并取得一定成效。目前东营市港城热力公司 $10 \times 10^4 \text{ t/a}$ 碳捕集项目、胜利电厂 $50 \times 10^4 \text{ t/a}$ 碳捕集项目、石化总厂 $36 \times 10^4 \text{ t/a}$ 碳捕集项目等正在顺利开展,并已与齐鲁石化启动建设中国首个 $100 \times 10^4 \text{ t/a}$ 的 CCUS 项目。

3 东营市碳减排主要途径

3.1 优化能源结构,构建清洁低碳安全高效的能源体系

3.1.1 推进煤炭高效清洁利用

针对用煤大户火电行业,持续实施深度治理措施,推进燃煤机组超低排放改造^[8]。所有 200 MW 以下燃煤机组全部实施改造,分批逐步淘汰 25 MW 及以下的燃煤机组。

3.1.2 推进高碳能源逐步过渡为低碳能源

扎实推进煤炭减量替代工作,大力发展工业余热供暖,适度提高清洁能源在产业生产中的消费量。

3.1.3 大力发展可再生能源

1)合理推进地热能利用。加快推进地热能资源普查,加强地热能产学研用协同攻关,形成资源高效开发与循环利用的集成技术模式。

2)稳步发展生物质发电。开发区域固体废弃物资源化处置技术,推进农林生物质热电联产项目,加快生活垃圾焚烧发电项目建设。

3)建设风、光、电多能互补工程。实施源网荷储一体化和多能互补项目,在确保生态环境的前提下,发展风电和分布式光伏发电。

4)加快推进氢能产业布局。

3.1.4 优化城市电网,构建新型电力系统

合理改造城市电网,优化电网能源结构分布,推动智能电网、智能用电终端协同发展,稳步提高供电可靠性,降低线路损耗,节省输电走廊。

3.2 实施重点行业减污降碳行动

3.2.1 推进产业绿色升级

1)做好石化、橡胶轮胎等传统产业绿色转型,促进技术改造,推进产能整合转移。

2)加快布局新一代信息技术、新材料、新能源、生物医药等战略性新兴产业^[8]。

3.2.2 推动建筑行业低碳发展

1)提升新建建筑能效。新建民用建筑 100% 执行建筑节能标准,因地制宜发展超低能耗建筑。

2)实施既有建筑绿色改造。在城镇老旧小区改造领域开展建筑节能专项改造。

3)推广绿色建材。开发应用品质优良、节能环保、功能良好的新型建筑材料。

3.2.3 积极推广 CCUS 技术,探索绿色发展新路径

在试验示范、初步商业化的基础上,不断完善 CCUS 技术,扩大应用,形成产业优势。

3.3 提升生态碳汇能力

1)大力推进国土绿化行动。重点建设沿黄生态廊道、沿海防护林带等,深入推进国土绿化行动,持续发挥森林碳汇效益。

2)统筹推进生态保护修复。实施湿地生态修复与保护工程,发挥综合固碳能力。

3)积极推进特色碳汇。发挥滨海滩涂、盐碱地等特有资源的优势,充分释放滨海湿地、盐碱地等未利用土地的碳汇潜力。

3.4 积极倡导绿色消费

1)积极促进绿色消费服务业。扩大特色旅游产业,提高服务业绿色发展水平,集中推进自然体验等精品项目^[8]。

2)加速发展绿色交通物流业。加快调整优化运输结构,打造绿色高效的“公转铁”“散改集”物流模式;加快数字物流基础设施建设;大力推广低能耗绿色运输工具,完善公共交通体系^[8]。

4 碳减排主要途径的关键技术及存在问题

碳减排途径的顺利实施与其本身的关键技术及存在问题密切相关。因此对各种碳减排途径的关键技术

进行了详细分析。

4.1 提高能源的利用率

通过提高能源利用率来减少二氧化碳排放虽然是目前成本最低的减碳路线,也是最应该优先做的,但只要仍然使用化石能源,仅依靠能效的提高难以从实际上解决“碳中和”问题。

4.2 新能源的利用

风能、太阳能等新能源虽已发展了近 40 年,也取得了较大成绩,但这类自然能源无法提供稳定供电,受目前电网技术只能容纳 15% 非稳定电源的限制,这类能源无法在短时间内完全取代化石能源^[9]。另外氢能的研究虽已成为热点^[10-12],但由于氢气的能量密度较小、容易泄漏以及爆炸范围较宽等特点,在一定程度上限制了它的发展和应用。

4.3 生态碳封存技术

虽然生态碳封存需要的成本较低,也具有一定的经济、社会效益,但这种吸收二氧化碳的方式是较为缓慢的生物反应过程,同时陆地生态系统所占比例有限,因此生态碳封存技术仅能作为一种辅助手段,难以从根本上解决“碳中和”问题。

4.4 CCUS 技术

CCUS 技术可以将二氧化碳资源化,更具现实操作性。在众多 CCUS 技术中,二氧化碳加氢制甲醇技术^[13]和二氧化碳驱油技术的产业化应用前景广阔。

4.4.1 二氧化碳加氢制甲醇技术

甲醇是应用广泛的化工原料,除了可直接用作燃料,还是一种重要的安全储氢方式,此外甲醇在交通领域的应用也可减少部分二氧化碳的排放。李灿院士课

题组一直致力于液态阳光甲醇的研究,即利用太阳能等可再生能源通过光催化、光电催化和电解水获得氢气,再通过二氧化碳加氢制甲醇等燃料以及烯烃、芳烃等化学品,从而实现可再生能源和二氧化碳的资源化利用,具体技术路线见图 2^[14]。据了解,目前利用可再生能源还原二氧化碳制甲醇(液态阳光甲醇)已经成功完成规模化工程示范项目,且成本已逐步接近市场水平,完全具备了向工业界应用推广的条件。但对于东营市而言,关于利用可再生能源还原二氧化碳制甲醇的相关研究还比较缺乏,项目实施还需科研人员的进一步努力。

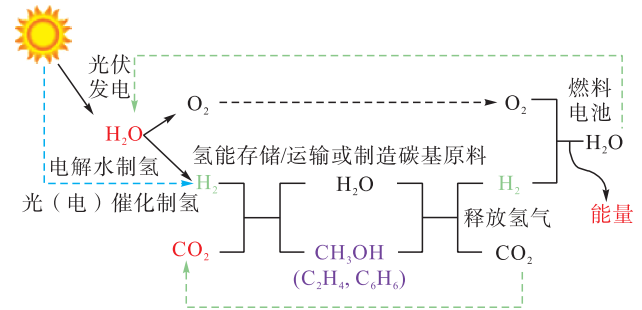


图2 以太阳能为代表的液态太阳燃料技术路线图
Fig.2 Technical route of liquid solar fuel represented by solar energy

4.4.2 二氧化碳驱油技术

二氧化碳驱油是一种把二氧化碳注入油层中以提高油田采收率的技术。下面对其流程的关键技术及存在问题进行详细分析。

4.4.2.1 二氧化碳捕集方法

二氧化碳捕集方法主要包括化学吸收法、物理吸收法、变压吸附法、低温分馏法、膜分离法、水合物法^[15-17]。各方法具体介绍见表 1。

表 1 二氧化碳捕集方法对比表

Tab.1 Comparison of CO₂ capture methods

捕集方法	优点	缺点	适用范围	应用情况
化学吸收法	工艺成熟,应用广泛,二氧化碳产品纯度高	设备占地面积大,投资高,能耗高,溶液腐蚀性强	二氧化碳含量在 3% ~ 20%	国内已建示范装置多采用该工艺
物理吸收法	吸收容量大,吸收剂用量少	吸收剂选择性差,分离效率低,运行成本过高	—	国内无现场应用
变压吸附法	原料适应性广,无设备腐蚀和环境污染,能耗低	吸附解吸频繁,自动化程度要求高	二氧化碳含量在 20% ~ 80%	吉林油田、胜利油田均有装置
低温分馏法	流程简单,投资小	需要低温操作,分离效果较差	二氧化碳含量超过 60%	胜利油田、草舍油田均有装置
膜分离法	装置紧凑,占地少,操作简单,发展前景良好	膜材料对二氧化碳的分离效率低,且难以得到高纯度的二氧化碳	二氧化碳含量超过 75%	长庆油田、吉林油田均有装置
水合物法	节能,环保,高效	耗能高、运行成本高	—	处于理论研究阶段

目前应用较为广泛的是化学吸收法和低温分馏法,化学吸收法存在的主要问题是投资成本和系统能耗较

高^[18],同时存在低能耗的吸收剂种类较少和新型低能耗吸收剂开发难度大的问题。

对于低温分馏法,二氧化碳分离效率和冻堵现象的预防,都与其相平衡特性有关。目前关于二氧化碳相平衡的研究虽取得了一系列的成果^[19-20],但理论研究较多,实验数据较少,且与实际应用联系较少。

此外,目前国内虽已建成碳捕集示范工程近20座,但处理规模多以几万吨级或十万吨级为主。同时碳捕集装置的数字化、智能化程度不高。故大规模处理装置工艺包的研发、大型设备及大尺寸管道的开发及应用、装置的数字化及智能化设计等技术对碳捕集装置的工业化推广和应用也意义重大。

4.4.2.2 二氧化碳输送技术

二氧化碳输送是其驱油过程的重要环节。受各种因素限制,中国二氧化碳运输主要以槽车等小规模运输方式为主。经研究及国外实践证明,大规模、长距离的二氧化碳输送应首选管道输送^[21-22]。虽有不少学者在该方面进行了大量研究^[21-23],但仍存在以下不足:1)大多研究偏向于理论性和理想化,缺少与各种实际工况的结合;2)研究多采用纯二氧化碳作为实验介质,与实际输送过程中的二氧化碳混合气体差别较大。

4.4.2.3 二氧化碳增压及注入技术

目前二氧化碳驱油流程中需在加注站对二氧化碳增压。相平衡的控制、设备腐蚀和冻堵的预防是二氧化碳增压注入过程的研究重点。

4.4.2.4 二氧化碳驱采出物集输及处理技术

二氧化碳驱采出物需被输送至处理站场进行油、气、水分离。在该过程中存在的问题及研究重点:1)采出物气液比较大,二氧化碳含量较高,易形成水合物,造成管道冻堵^[24];2)采出液的油水乳化程度更稳定,普通破乳剂分水效果较差,油中含水指标难以满足要求;3)采出油的流变特性更为复杂;4)二氧化碳影响油水分离效果,常规处理净化效果差,采出水中油等颗粒物难以达到回注标准,且导致污水整体呈酸性,处理设备及沿程输送系统腐蚀加剧。

因此,研究采出流体中二氧化碳水合物的形成条件和采出油的流变特性,开发适合二氧化碳驱采出液的破乳剂和适合二氧化碳驱采出水的处理技术,明确二氧化碳驱采出物的腐蚀规律、机理及相应的防腐措施^[25],对二氧化碳驱油技术的推广和应用具有重要意义。

5 结论

随着中国“碳达峰”“碳中和”目标的提出,加快低碳城市的建设对石油化工城市提出了一个极大的挑战。分别对东营市城市特色及产业概况、城市实现“双碳”目标的可行性、碳减排的主要途径和主要途径的关键技术及存在问题进行了分析,认为CCUS技术是石油化工城

市进行二氧化碳减排的一条必行的高效之路。而要保证CCUS技术的顺利开展,针对其关键技术中存在的不足重点攻关,逐步完善各种关键技术才是重中之重。

参考文献:

- [1] 刘冬辉. 东营市为什么要构建“5+2+2”产业体系[EB/OL]. (2020-05-26) [2021-10-06]. http://dongying.dzwww.com/dyxw/202005/t20200526_5894910.htm.
LIU Donghui. Why should Dongying build a “5+2+2” industrial system [EB/OL]. (2020-05-26) [2021-10-06]. http://dongying.dzwww.com/dyxw/202005/t20200526_5894910.htm.
- [2] 栗建昌, 吴书光, 张武岳, 等. 解锁12亿吨的“胜利”密码——写在胜利油田发现60周年之际[EB/OL]. (2021-04-17) [2021-10-06]. <https://news.china.com/zw/news/13000776/20210417/39487677.html>.
LI Jianchang, WU Shuguang, ZHANG Wuyue, et al. Unlock the “victory” password of 1.2 billion tons: Written on the 60th anniversary of the discovery of Shengli oilfield [EB/OL]. (2021-04-17) [2021-10-06]. <https://news.china.com/zw/news/13000776/20210417/39487677.html>.
- [3] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
Shandong Provincial Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shandong. Shandong statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [4] 代晓东, 刘青山, 宋壮志, 等. 东营市地方炼油企业原油物流分析及发展研究[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2016, 30(4): 83-86.
DAI Xiaodong, LIU Qingshan, SONG Zhuangzhi, et al. Research on crude oil logistics analysis and development of local oil refining enterprises in Dongying City [J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2016, 30(4): 83-86.
- [5] 戴慧慧. 安庆石化炼油综合能耗简析[J]. 安徽化工, 2019, 45(2): 103-105.
DAI Huihui. Brief analysis of comprehensive energy consumption of Anqing Petrochemical Refinery [J]. Anhui Chemical Industry, 2019, 45(2): 103-105.
- [6] 朱嘉慧, 路用瑞, 刘飞, 等. 地方炼化产业CO₂排放及回收利用[J]. 节能, 2019, 38(8): 95-97.
ZHU Jiahui, LU Yongrui, LIU Fei, et al. CO₂ emissions and recycling for local refinery [J]. Energy Conservation, 2019, 38(8): 95-97.
- [7] 李俊峰, 李广. 碳中和——中国发展转型的机遇与挑战[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 50-57.
LI Junfeng, LI Guang. Carbon Neutrality: opportunities and challenges for development transformation in China [J].

- Environment and Sustainable Development, 2021, 46 (1): 50-57.
- [8] 张利波,周广学. 碳达峰、碳中和,东营在行动[EB/OL]. (2021-09-14) [2021-10-06]. <http://news.dongyingnews.cn/system/2021/09/14/010756634.shtml>.
ZHANG Libo, ZHOU Guangxue. "Peak Carbon Dioxide Emissions" and "Carbon Neutralization", Dongying is in action [EB/OL]. (2021-09-14) [2021-10-06]. <http://news.dongyingnews.cn/system/2021/09/14/010756634.shtml>.
- [9] 刘科. 碳中和误区及其现实路径[R]. 深圳:创新发展研究院,2021.
LIU Ke. Misunderstanding and the practical path of Carbon Neutralization [R]. Shenzhen: China Institute of Innovation and Development, 2021.
- [10] 陈石义,龙海洋,李天雷,等.天然气管道掺氢探讨[J]. 天然气与石油,2020,38(6):22-26.
CHEN Shiyi, LONG Haiyang, LI Tianlei, et al. Discussion on blending hydrogen into natural gas pipeline networks [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (6): 22-26.
- [11] 高丹慧,李汶颖,廖勇,等.基于氢源与交通网络的加氢站规划布局方法[J]. 天然气与石油,2020,38(4):36-42.
GAO Danhui, LI Wenying, LIAO Yong, et al. Development planning of hydrogen refuelling stations network based on hydrogen supply locations and road transportation network [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (4): 36-42.
- [12] 刘贵洲,窦立荣,黄永章,等.氢能利用的瓶颈分析与前景展望[J]. 天然气与石油,2021,39(3):1-9.
LIU Guizhou, DOU Lirong, HUANG Yongzhang, et al. Analysis on hydrogen energy utilization bottlenecks and future prospect [J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39 (3): 1-9.
- [13] MENG Chao, ZHAO Guofeng, SHI Xuerong, et al. Oxygen-deficient metal oxides supported nano-intermetallic In Ni₃C_{0.5} toward efficient CO₂ Hydrogenation to Methanol [J]. Science Advances, 2021, 7 (32): 1102-1106.
- [14] 李灿.实现碳中和任务艰巨、绿色氢能及其二氧化碳加氢制甲醇将成为实现目标的最佳路径[EB/OL]. (2021-03-18) [2021-10-06]. <https://www.163.com/dy/article/G5CDJ34C0519BMQA.html>.
LI Can. The task of carbon neutralization is arduous, and green hydrogen energy and its carbon dioxide hydrogenation to methanol will be the best way to achieve the goal [EB/OL]. (2021-03-18) [2021-10-06]. <https://www.163.com/dy/article/G5CDJ34C0519BMQA.html>.
- [15] 韩鹏飞. EOR伴生气低温分离CO₂回收工艺改进研究[D]. 成都:西南石油大学,2017.
HAN Pengfei. Improvement of CO₂ recovery process for EOR associated gas low temperature separation [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [16] 住房城乡建设部标准定额研究所. 烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准:GB/T 51316—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2018.
Institute of Standards and Quotas, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Standard for design of carbon dioxide capture and purification engineering for flue gas: GB/T 51316—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [17] ABU-ZAHRA M R M, NIEDERER J, FERON P H M, et al. CO₂ capture from power plants: part II. A parametric study of the economical performance based mono-ethanolamine [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, 1 (2): 135-142.
- [18] 刘珍珍. 燃煤烟气二氧化碳捕集吸收剂的研究及工艺优化运行模拟[D]. 杭州:浙江大学,2021.
LIU Zhenzhen. Research on mixed absorbent and optimization of CO₂ capture process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [19] KAMATH G, POTOFF J J. Monte Carlo predictions for the phase behavior of H₂S + n-alkane, H₂S + CO₂, CO₂ + CH₄, and H₂S + CO₂ + CH₄, mixtures [J]. Fluid Phase Equilibria, 2006, 246 (1): 71-78.
- [20] 单贵苏. 含CO₂混合物在低温分离过程中的热力学特性分析[D]. 南京:东南大学,2018.
SHAN Guisu. Thermodynamic properties of CO₂ mixtures during cryogenic separation [J]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [21] MOLAG M, DAM C. Modelling of accidental releases from a high pressure CO₂ pipelines [J]. Energy Procedia, 2011, 4: 2301-2307.
- [22] 赵青. 含杂质CO₂不同相态管输节流及减压特性研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2015.
ZHAO Qing. Throttling process and decompression property for pipeline transportation of anthropogenic CO₂ in different phase [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2015.
- [23] 郭晓璐. CO₂管道泄漏中介质压力响应、相态变化和扩散特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.
GUO Xiaolu. Pressure response, phase transition and dispersion characteristics during CO₂ pipeline releases [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [24] 黄延强. CO₂水合物形成室内模拟实验研究[J]. 油气田地面工程,2017,36(6):29-31.
HUANG Yanqiang. Laboratory experiment and study of the formation of carbon dioxide hydrate [J]. Oil-Gasfield surface engineering, 2017, 36 (6): 29-31.
- [25] 张洲,易勇刚,同航,等. CO₂驱地面采输系统缓蚀阻垢剂优选研究[J]. 天然气与石油,2021,39(3):88-94.
ZHANG Zhou, YI Yonggang, TONG Hang, et al. Study on corrosion and scale inhibitor selection for surface production and transportation system of CO₂ flooding [J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39 (3): 88-94.