



二氧化碳捕集及封存技术探索研究

肖江 宋世杰 刘兰兰 白治学

引用本文：

肖江, 宋世杰, 刘兰兰, 等. 二氧化碳捕集及封存技术探索研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 316–323.

XIAO Jiang, SONG ShiJie, LIU Lanlan. Research on carbon dioxide capture and storage technology: a case study of Shaanxi Coal Group Yulin Chemical Co., Ltd.[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 316–323.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0808>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二氧化碳用于地质资源开发及同步封存技术综述

Review on technologies of geological resources exploitation by using carbon dioxide and its synchronous storage
煤炭科学技术. 2022, 50(6): 84–95 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/58d0743e-3072-4e36-b83c-4e337b79a401>

超临界二氧化碳对煤体增透的作用机理及影响因素分析

Analysis of the mechanism and influencing factors of supercritical carbon dioxide on coal permeability enhancement
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 204–216 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2259>

中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展

Research advances on evaluation of CO₂ geological storage potential in China
煤炭科学技术. 2021, 49(11): 10–20 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6115e5c2-065e-491a-bce4-5e6c7810ff1e>

竖井二氧化碳“二阶二段”筒形掏槽爆破技术及应用

Application and carbon dioxide two-step barrel cut blasting technology in coal mine shaft
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 65–71 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0468>

二氧化碳相变爆破致裂机理与应用研究进展

Mechanism and application of carbon dioxide phase change blasting fracturing
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 63–78 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1842>

视频直击《煤炭科学技术》“二氧化碳捕集、利用与封存”专题重磅上线！

煤炭科学技术. 2022, 50(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/40184d16-b903-45f9-96f3-7edca5e2c8e8>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



肖江,宋世杰,刘兰兰,等.二氧化碳捕集及封存技术探索研究——以陕煤集团榆林化学公司为例[J].煤炭科学与技术,2024,52(5):316-323.

XIAO Jiang, SONG ShiJie, LIU Lanlan, et al. Research on carbon dioxide capture and storage technology: a case study of Shaanxi Coal Group Yulin Chemical Co., Ltd.[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 316-323.

移动扫码阅读

二氧化碳捕集及封存技术探索研究 ——以陕煤集团榆林化学公司为例

肖江,宋世杰,刘兰兰,白治学

(陕西煤业化工集团榆林化学有限责任公司,陕西榆林 719000)

摘要: 践行减排降碳措施,落实“双碳”目标是煤化工企业走向高端化、多元化、低碳型发展的重要契机。陕煤集团榆林化学有限责任公司谋划 400 万 t/a 二氧化碳捕集、运输及封存(CCS)示范项目及开展 40 万 t/a 先导试验项目助力国家碳达峰、碳中和。在借鉴神华 10 万 t CCS 示范项目经验基础上,依据已建 180 万 t/a 乙二醇项目中产生的 CO₂,设计了高纯(98.94%)和低纯(77.78%)2 种超临界 CO₂ 封存流程;结合对鄂尔多斯盆地东部三叠系、二叠系咸水层的认识,找寻了 3 套物理性较好且 CO₂ 封存潜力巨大的地质咸水层(刘家沟组、石千峰组、石盒子组);在深入 CO₂ 储存层盖层及存储容量评估分析,认为 CO₂ 在超过 1 000 m 的咸水层封存环境最佳;通过设计 4 口注入封存井并结合数值模拟方法对 40 万 t/a CO₂ 的封存运行机制进行研究分析得出理论可行;设计采用 PNX 测井、井下光纤传感及地表 InSAR 等监测方法搭建起 CO₂ 从井筒到储层再到储层扩散一体化的监测监控管理平台;从 CCS 当前经济技术成本、产业政策发展以及机遇挑战现状展望出煤化工开展 CCS 非常具有潜力。

关键词: 减碳降碳;二氧化碳捕集、运输及封存;咸水层;“双碳”目标

中图分类号:TQ536; X701 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2024)05-0316-08

Research on carbon dioxide capture and storage technology: a case study of Shaanxi Coal Group Yulin Chemical Co., Ltd.

XIAO Jiang, SONG ShiJie, LIU Lanlan, BAI Zhixue

(Shaanxi Coal Group Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: The implementation of emission reduction and carbon reduction measures and the implementation of the “double carbon” goal are important transformation opportunity for coal chemical enterprises to move towards high-end, diversified and low-carbon development. Shaanxi Coal Industry Group Yulin Chemical planned a 4 million ton/year carbon dioxide capture, transportation and storage (CCS) demonstration project and carried out a 400 000 ton/year pilot test project to help the country reach carbon peak and carbon neutrality. Based on the experience of Shenhua 100 000 ton CCS demonstration project and CO₂ produced in the 1.8 million ton/year ethylene glycol project, two supercritical CO₂ storage processes, high purity (98.94%) and low purity (77.78%), are designed in this paper; Based on the understanding of Triassic and Permian salt water layers in the eastern Ordos Basin, three sets of geological salt water layers (Liujiagou Formation, Shiqianfeng Formation and Shihezi Formation) with good physical properties and great CO₂ storage potential were found. After in-depth evaluation and analysis of CO₂ storage layer cover and storage capacity, it is believed that the best storage environment for CO₂ in salt water layer over 1 000 meters. By designing four injection and storage Wells and combining with the numerical simulation method, the storage operation mechanism of 400 000 ton/year CO₂ is studied and analyzed, and it is theoretically feasible; It is designed to use PNX

收稿日期:2023-06-01 责任编辑:黄小雨 DOI:10.12438/cst.2023-0808

基金项目:陕煤集团榆林化学百万吨级 CCS 技术开发与工程示范资助项目(2022 SMHKJ-A-J-07-06);陕煤集团榆林化学 400 万 t/a CCS 示范项目资助项目(2202-610835-04-01-203463)

作者简介:肖江(1990—),男,陕西榆林人,工程师,硕士研究生。E-mail: xiaojiang@shccig.com

logging, downhole optical fiber sensing and surface InSAR monitoring methods to build an integrated monitoring and management platform for CO₂ from wellbore to reservoir and then to reservoir diffusion; From the perspective of CCS's current economic and technological costs, industrial policy development, opportunities and challenges, the development of CCS in coal mining chemical industry has great potential.

Key words: carbon reduction; CCS; salt water layer; carbon peaking and carbon neutrality goals

0 引言

近年来以煤为资源升级转型的煤化工企业在能源变革的发展进程中已涌现出大量的示范先例,由单一的煤炭开采、供热发电逐步延伸至向高端化工原料产品转变,但在“煤转化”的工业发展过程中对大气环境产生不同程度的慢性污染,如大众经常提到的CO₂大气污染。对有关环境及大气污染的统计指标分析,在2022年5月份大气中CO₂浓度已高达 421×10^{-6} ^[1],同时过度的CO₂排放导致全球平均气温不断升高,所引发的天气、地质等自然灾害已经成为全球性重大生态问题^[2-3]。目前中国作为以化石燃料为主要能源动力的工业发展大国,近年来CO₂的排放量逐年上升,2019年已跃升至全球首位,在出于人类命运共同体共发展的理念考虑,中国践行减碳政策势在必行,2020年习近平总书记首次提出“30·60”双碳目标,即2030年实现“碳达峰”,2060年实现“碳中和”目标^[4-6]。

早在2010年神华煤制油化工公司首次在国内鄂尔多斯盆地开展10万t/a CO₂的捕集、运输及封存(Carbon dioxide capture and storage, CCS)示范项目,为石化能源企业践行绿色低碳发展奠定可行性示例,尤其该项目在利用捕集、提纯、压缩、液化等工艺装置收集到适合地下封存的CO₂,再到升压后注入到具有较致密盖层的地下咸水层,以及依靠监测井实现CO₂扩散、运移以及有无泄露等的科学技术经验为后来者开展CCS项目做出指导性建议和典范。在查阅近年来对CO₂地下封存及扩散的研究,如封存CO₂在蓄积层中泄漏迁移的模拟研究^[7-8];CO₂泄漏对生态系统的影响研究^[9-10];地质封存CO₂的单井源泄漏风险及建立评估模型以及董华松等总结CO₂地质封存技术并对相关监测技术的扩展研究^[11-13],也为实施CO₂地下封存及监测CO₂埋存扩散提供一定理论支撑。

在响应国家“双碳”目标及借鉴神华10万t/a CCS示范项目成功经验,陕煤集团榆林化学有限责任公司(以下简称“陕煤集团榆林化学”)定位为“煤炭分质利用制化工新材料示范工程”的大型煤化工公司,深远谋划400万t/a CCS示范项目,用以打造

国内第一大CO₂咸水层封存示范点,形成涵盖地质评价、库容产能计算、井网优化、运行监测设计及配套钻井、压裂、注入等一体化的大规模CO₂咸水层地质封存技术体系,同时探索构建以陕煤集团榆林化学为枢纽的区域CO₂封存中心,在实现自身净零排放的同时,协助周边企业埋存CO₂,探索发展碳埋存产业的可行性,从而进一步配套煤化工生产技术的发展,逐步让煤炭资源利用向“集约化、规模化、清洁化”的现代洁净煤技术转型,并通过率先开展40万t/a先导试验项目为煤化工行业碳减排提供典型示范及实践意义。

1 二氧化碳捕集与运输

1.1 二氧化碳捕集封存技术

当前CO₂捕集、封存是碳减排的主要技术手段之一,常见的CO₂捕集方式主要有燃烧前捕集、富氧燃烧和燃烧后捕集,根据捕集工艺又分为生物、物理和化学吸收法,其中生物吸收法通过植物的光合作用进行CO₂的吸收;物理吸收法是在低温高压下通过CO₂在溶液中的溶解度变化来吸收或解吸,适用于高CO₂分压的气体处理,其再生热耗低,常见工艺有膜分离法、催化燃烧法、变压吸附法(PSA);化学吸收法主要是利用化学溶剂吸收CO₂进行碳脱离,常用于CO₂分压较低的气体处理,其再生热耗高,常见工艺方法有:氨吸收法、热钾碱法及有机胺法等^[14]。

CO₂的封存探索已在多方面涉及,如在油气田开发可通过注入CO₂达到提高原油采收率及封存CO₂的目的;在地质深部咸水层、盐水层可实现CO₂的永久封存;在海洋深水条件可做到CO₂“碳湖泊”形态等的封存。就当前研究认识而言,CO₂地质封存最被广泛认可,其本质上是利用已开采完毕的枯竭油气藏或通过找寻具有良好圈闭及封闭盖层的咸水层作为CO₂的封存场所,通过系列钻完井工艺手段实现CO₂的输送,直至到地下进行埋存,并利用储层孔喉通道及咸水层中的镁、钙等离子实现CO₂的物理和化学封存^[15-18]。

1.2 二氧化碳的来源及特性

陕煤集团榆林化学开展的40万t/a CCS先导试验项目中CO₂来源为180万t/a乙二醇工程中煤气

化装置生产的两股不同粗合成气,一股为净化装置 CO₂ 压缩机富余的高纯 CO₂(体积分数为 98.94%), 10 万 t/a; 另一股为净化装置的低纯尾气 CO₂(体积分

数为 77.78%), 30 万 t/a。其中: 高纯 CO₂ 气源来自 CO₂ 解析塔载气富余量, 而低纯混合 CO₂ 气源来自硫化氢浓缩塔尾气, CO₂ 特性详见表 1。

表 1 CO₂ 来源和特性
Table 1 Source and characteristics of CO₂

CO ₂ 来源	组分	分子量	体积分数/%	总流量/(m ³ ·h ⁻¹)	温度/℃	压力/MPaG (G为表压)
净化装置压缩机富余CO ₂ (高纯)	CO ₂	44	98.94	6 433.56	100.00	8.10
	N ₂	28	0.80			
	H ₂	2	0.12			
	CH ₃ OH	32	0.02			
净化装置尾气CO ₂ (低纯)	CO ₂	44	77.78	24 559.00	17.37	30.00
	N ₂	28	20.36			
	H ₂	2	0.10			
	H ₂ O	18	1.73			

由表 1 知, 高纯 CO₂ 气体几乎不含水分, 即可加压后进行运输封存, 而低纯 CO₂ 水分为 1.73%, 则需进行干燥脱水处理(结合现有工艺, 采用空冷+水冷+变温吸附), 同时考虑氮气的存在会增加压缩功耗等影响, 通过对比真空解吸和惰性气体(氮气)气提工艺, 优选出采用真空解吸来分离低温甲醇洗中的 CO₂, 回收高纯度 CO₂ (CO₂ 体积分数可达 99.9%), 尾气中含极少的 N₂。

另外, 考虑 CO₂ 运输成本及其输送性能指标(CO₂ 黏度、流速等)参数后, 选用管输的方式进行超临界状态的 CO₂(临界压力为 7.39 MPaG (G 为表压),

临界温度为 31.04 ℃)地质封存, 故在整体的管输过程中 CO₂ 的压力和温度均要大于等于其临界压力和临界温度。

1.3 二氧化碳的捕集及运输工艺

常见 CO₂ 捕集工艺的选择及优缺点对比分析, 具体见表 2。

考虑陕煤集团榆林化学 180 万 t/a 乙二醇工程中 CO₂ 的来源特性以及开展 40 万 t/a CCS 项目目的是将 CO₂ 永久封存在地下, 所以结合上述 2 种 CO₂ 气源来源, 按捕集输运工艺设计了高纯和低纯 2 种封存流程。

表 2 CO₂ 捕集工艺及优缺点
Table 2 CO₂ capture technologies and its advantages and disadvantages

捕集工艺技术	优点	缺点
变压吸附法	技术成熟	投资高、能耗高、脱附气体量大
氧化法	吸收容量较大, 再生能力及稳定性好	成本较高, 反应时间长
膜分离法	工艺简单, 便于气体运输	对原料气要求高, 分离能耗高
吸收剂法	运行成本低, 吸收容量较高, 回收CO ₂ 纯度高	热稳定性差, 转化率较低
胺化合物法	工艺成熟, 吸收速率快, 能耗低, 投资最低	吸收剂使用量大, 再生能耗大

1) 高纯 CO₂ 注入: 采用 1 台往复式压缩机的方案设计。从低温甲醇洗装置得到高纯 CO₂(8.1 MPaG), 然后进入 CO₂ 往复式压缩机提升至注入压力 27 MPaG, 注入地下永久封存。当 CO₂ 往复式压缩机故障或注入封存井出现异常导致封存试验不能正常运行, CO₂ 在净化装置 CO₂ 压缩机入口前放空, 如图 1 所示。

2) 低纯 CO₂ 注入: 采用 1 台离心式压缩机+2 台往复式压缩机(一用一备)的方案设计。净化装置放

空尾气进入离心式压缩机, 在离心式压缩机二段出口进入尾气干燥单元(TSA), 脱除尾气中夹带的水, 然后返回离心式压缩机三段入口, 升压至 16 MPaG 后, 进入往复式压缩机, 压缩至 27 MPaG, 注入地下永久封存。当离心式压缩机故障或注入封存井出现意外导致封存试验不能正常运行, CO₂ 从净化装置原放空处放空; 若低纯 CO₂ 尾气注入量减少, 则通过流量控制调整捕集的尾气, 离心式压缩机和往复式压缩机降负荷运行, 如图 2 所示。

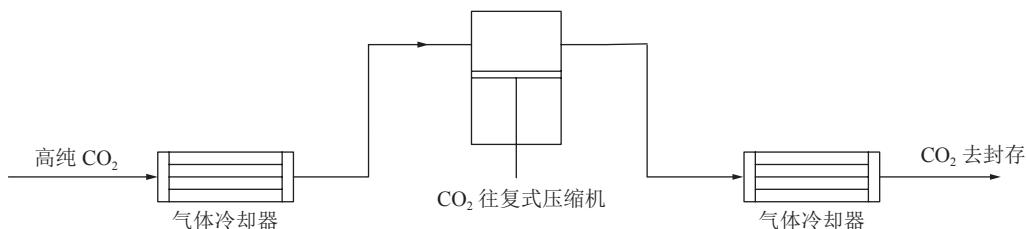


图 1 高纯 CO_2 封存方案设计
Fig.1 High-purity CO_2 storage scheme design

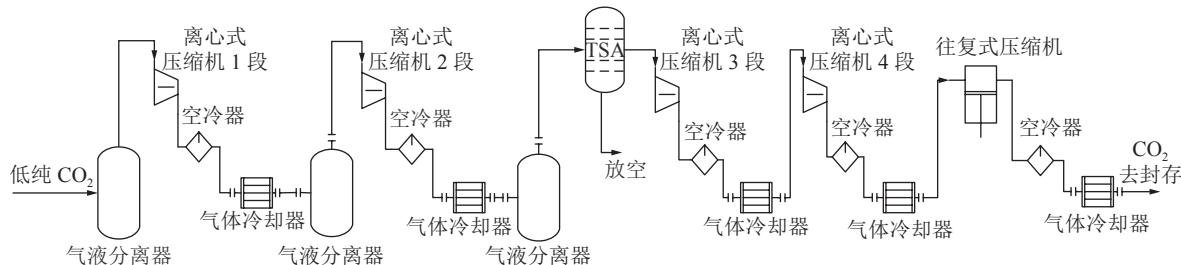


图 2 低纯 CO_2 封存方案设计
Fig.2 Low purity CO_2 storage scheme design

2 二氧化碳的地质封存

2.1 二氧化碳封存地质构造

40万t/a CCS先导试验项目的封存场地位于榆林化学生厂区临界区(距离生产区域约6km,属项目规划用地,已通过并取得相关评审报告),地表为风沙地貌,沙丘连绵起伏,地势较为平坦,交通便利。根据邻区钻探资料显示,CO₂封存井可能钻遇的地层自上而下为:第四系、第三系、侏罗系、三叠系、二叠系等,地层整体上是一个比较稳定的地质构造,新活动性不强,无深大断裂及活动性构造。研究表明CO₂一般在地层800m左右进入超临界状态,为保障超临界CO₂地下封存的稳定性和安全性,选取埋深超过800m的地层作为CO₂埋存的最佳场所^[19]。本项目为实现超临界CO₂的地质永久封存,选择CO₂的封存储层为埋深超过1000m的干层和咸水层为主力封存场所,即CO₂储层选择纸坊组以下地层为宜。

2.2 二氧化碳封存储层设计

2.2.1 封存储层选择原则

具有良好物性的岩层、封闭盖层及圈闭构造的地质储层是影响CO₂库容量的重要因素,在参考地质封存构造特征,考虑实现CO₂长期稳定地质封存要求,按照优选封存储层的原则:①储层远离断裂发育区;②潜在封存地层露头距离封存场地超过50 000 m;③优先选择正常压力系统地层;④考虑到CO₂超临界储存,设计储层埋深超过1 000 m;⑤为增加CO₂

封存量,优先考虑具有高渗透性、高孔隙度、厚度大的咸水层,及测井解释为干层的地层;⑥尽量选择远离城市和地面设施区域,距离较近时降低封存压力。

2.2.2 储存二氧化碳地层划分设计

考虑埋深、储层物性、封盖关系和实际注入情况等,根据埋藏自下而上的顺序,将储存CO₂地层划分为3套:第1套CO₂储存层组为二叠系山西组顶部、下石盒子组全部及上石盒子组下部,地层埋深厚度约为190 m,CO₂潜力封存的有效厚度约为77 m;第2套CO₂储存层组为二叠系上石盒子组中部、石千峰组全部及三叠系刘家沟中部,地层埋深厚度近410 m,CO₂潜力封存的有效厚度约为112 m;第3套CO₂储存层组为三叠系刘家沟组顶部、和尚沟组全部、纸坊组全部及延长组底部,地层埋深厚度近650 m,CO₂潜力封存有效厚度约为167 m。

2.2.3 封存二氧化碳盖层设计

考虑CO₂封存层的储盖组合关系,根据上述3套储存CO₂地层之间的地层分布及特性,将封存CO₂盖层划分为3套:第1套盖层,层段为二叠系上石盒子组中部(第1储存层与第2储存层之间),盖层结构及岩性:紫红色、灰绿色泥质结构;纯泥岩盖层,盖层埋深2 270~2 330 m,泥岩厚度近60 m;第2套盖层,层位为3叠系刘家沟组上部(第2储存层与第3储存层之间),盖层结构及岩性:紫红、暗紫红、灰绿色、灰色、深灰色泥质结构;纯泥岩盖层,盖层埋深1 720~1 870 m,泥岩厚度近150 m;第3套盖层位于第3储存层组至地面,包括3叠系延长组、延安

组等整套地层,属于多套泥岩和细砂岩互层的组合盖层,厚度超过1000 m。

2.2.4 封存二氧化碳的存储容量评估

CO_2 的地质封存主要利用物性好、构造圈闭完整的储层来实现,本文在对 CO_2 地质封存存储容量评估研究上,借鉴了油气储层中圈闭构造体积、孔隙率和剩余水饱和度等物性指标参数,即:假设储层的物性发育均质,则理论上可估算 CO_2 存储容量 V 可用式(1)—式(3)^[20]表示:

$$V = V_{\text{trap}} \phi (1 - S_{\text{wirr}}) = Ah\phi (1 - S_{\text{wirr}}) \quad (1)$$

式中: V_{trap} 为圈闭构造体积; ϕ 为孔隙度; A 为储层面积, m^2 ; S_{wirr} 为剩余水饱和度; h 为储层平均厚度,m。

实际上,地质储层在一定间距的空间上为各向异性,其层理构造及层间特性以及理化特性均存在

差异,为能更深入描述及估算 CO_2 存储容量,可采用公式(2)计算:

$$V = \iiint \phi (1 - S_{\text{wirr}}) dx dy dz \quad (2)$$

再结合油气储层评估中的经验方法可进一步估算有效 CO_2 储存容量 V_e :

$$V_e = C_C V \quad (3)$$

式中: C_C 为表征有效储存容量综合系数。

2.2.5 二氧化碳封存试验井设计

为深入研究 CO_2 在咸水层及干层中封存能力及进一步探索 CO_2 的地质封存潜力,陕煤集团榆林化学规划开展40万t/a先导试验项目,并按不同实验目的部署4口封存井。项目设计按3 a试验时间注入,总计注入量120万t CO_2 ,每年按8000 h生产运行,平均分解到日注入量为1212 t/d,见表3。

表3 40万t/a先导试验 CO_2 封存井
Table 3 400 000 tons per year pilot test CO_2 storage well

试验井	井型	钻探目的	注入 CO_2 来源
榆碳1井	直井	全井段取心分析,落实地层和咸水层纵向分布,了解咸水层的厚度、岩相变化情况等	高纯度 CO_2 气源
榆碳2井	直井	探究注入混合 CO_2 能力,了解附近咸水层厚度、岩相变化情况	低纯混合 CO_2 气源
榆碳3井	水平井	研究分析水平井混合 CO_2 注入能力及水平段咸水层的岩性分布	低纯混合 CO_2 气源
榆碳4井	直井	全井段取心,落实直井混合 CO_2 注入能力,进一步落实地层和咸水层纵向分布及岩相变化情况	低纯混合 CO_2 气源

为充分释放深部地层的注入潜力,提高 CO_2 注入能力,本文设计将三叠系刘家沟组中部作为首层破裂压力的限制边界,即主要探索第2储存层和第

1储存层在高压下的注入能力,分别设计2套储层的流压变化(储层压力系数)1.2、1.4、1.6、1.8共计4组模拟实验的比选如图3所示。

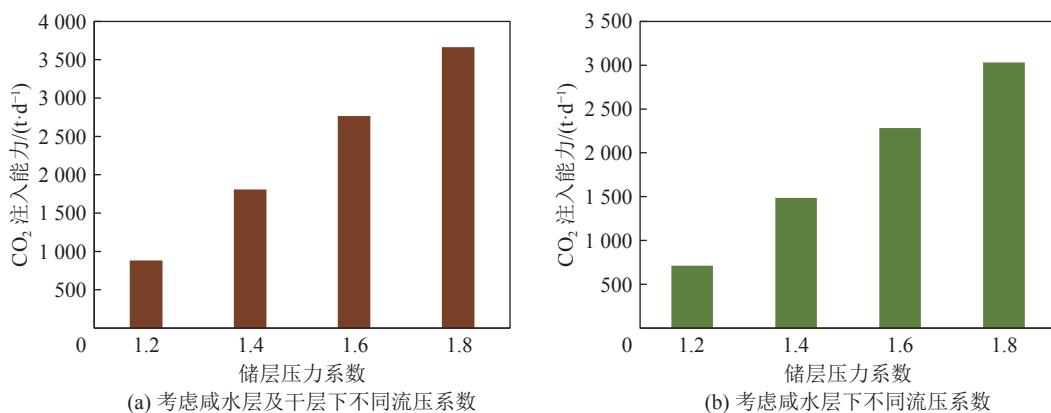


图3 不同流压系数下 CO_2 注入能力分析

Fig.3 Analysis of carbon dioxide injection capacity under different current pressure coefficients

图3模拟结果显示,流压1.2方案中第1和第2储存层的总注入能力和扣除干层后的注入能力均无法满足先导试验1212 t/d的注入需要,而流压1.4、1.6以及1.8方案获得的咸水层注入能力均可满足注入要求。

2.2.6 注入能力分解与设计

考虑气源中 CO_2 含量、源汇匹配和4口试验井的封存任务目标,通过设计2020 t/d的注入能力来保障先导试验1212 t/d的注入任务需要,并模拟4口试验井的 CO_2 封存库容量(考虑2套储层流压系

数)及地面管输设施后,估算得出不同井的设计注入能力,其中榆碳1井为528 t/d、榆碳2井为401 t/d、

榆碳3井为690 t/d、榆碳4井为 401×10^4 t/d,具体见表4及图4。

表4 40万t/aCCS先导试验CO₂注入方案设计Table 4 Design of CO₂ injection scheme for 400 000 ton per year CCS pilot trial

试验井	井口压力/MPa	封存库容任务量/ 10^4 t	注入任务量/(t·d ⁻¹)	设计注入量/(t·d ⁻¹)
榆碳1井	<19.0	49.5	500.0	528.0
榆碳2井	<20.0	19.8	200.0	401.0
榆碳3井	<17.0	30.9	312.0	690.0
榆碳4井	<20.0	19.8	200.0	401.0
合计	<27.0(气源)	120.0	1 212.0	2 020.0

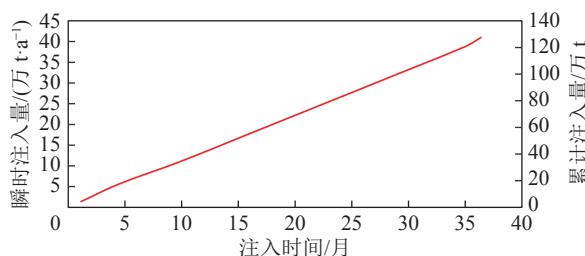


图4 40万t/aCCS先导试验封存运行机制

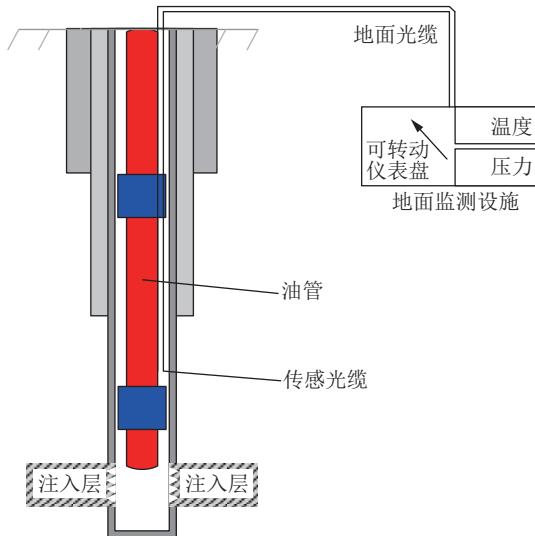
Fig.4 400 000 tons per year CCS pilot test storage operating mechanism

3 二氧化碳封存环境监测

CO₂的地质封存主要目的是减轻工业生产给大气环境带来的碳排放,进而减少因温室效应、大气污染带来的各种灾害,所以在开展CO₂地质封存的同时,做好环境监测极为重要,尤其是对地下的水资源,地表的土壤、植被、大气等。一般来说,进行CO₂地质封存环境监测主要目标包括:①确定CO₂地质封存对大气的减排效果;②评估泄漏对于生态环境的影响;③科学研判,提高大众对于CO₂地质封存的认识;④检验对CO₂的封存量;⑤获得其他环保及技术政策方面的支持。在陕煤集团榆林化学40万t/aCCS先导试验项目上进行CO₂封存全过程监测也是为掌握CO₂运移扩散情况以及了解CO₂扩散对注入井井筒完整性的评价,为后续大规模开展碳埋存项目奠定有效的理论基础,也为开展相关项目的监测内容、监测设备以及监测频次的合理配置提供一定的实践经验和指导。

本研究主要在CO₂注入封存层后对CO₂的注入、扩散、运移、井筒完整性、地表土壤等方面进行长周期监测,采用PNX(脉冲星)测井+井下光纤传感(振动、温度)配套设施,其原理结构如图5所示。其监测监控原理是通过地下部署永久式全井段光纤,地

面部署4条线8方向Walkaway VSP(米字线)和1个零井源距VSP的采集等装置设备,并结合PNX测井来监测井底水样、气样、温度、压力及储层含气饱和度等参数,进一步评价分析注入CO₂的扩展情况,并在4口试验井附近、潜在CO₂扩展区的地表区域中选择CO₂气体浓度较高的测点采集进行同位素比值的分析测试,同时采用InSAR技术掌握因注入CO₂引发地表微形变情况。

图5 CO₂地质封存光纤传感监测监测Fig.5 CO₂ Geological storage of optical fiber sensing monitoring and monitoring

4 展望

4.1 二氧化碳捕集、运输及封存的经济技术分析

当前国内外在对绿色低碳发展方面的认识越来越重视,同时碳交易价也呈现向上发展的趋势。按照当前国内、国外CO₂捕集、运输及封存技术的发展,相信未来CO₂在捕集成本、管道运输以及封存成本将大幅减低,可进一步为CO₂地质永久封存并形

成经济产业链项目奠定有利支撑依据,而陕煤集团榆林化学在探索 CCS 减碳项目以及前瞻性分析企业未来绿色发展方向,一方面出于 400 万 t/aCCS 示范项目中 CO₂ 来源不需要增加过多的成本投入,另一方面是所选取的 CO₂ 封存环境得天独厚,位于鄂尔多斯盆地腹部深部咸水层,对 CO₂ 封存及防逸散效果良好,对开展 CCS 项目很具有价值及经济意义。

4.2 二氧化碳捕集、运输及封存的产业政策分析

CCS 作为碳中和目标下减碳、降碳重要措施之一,当前越来越多的研究团队致力于降低 CO₂ 捕集成本、运输成本以及攻关 CO₂ 封存难点的技术研究,与此近年来“碳排放权交易、CCER 方法学”等口号政策的提出也进一步推动 CCS 等减碳项目的加速发展,这也为煤化工等高能耗排放企业向绿色低碳发展打开了新视野,也促使 CCS 向产业化、商业化推进。陕煤集团榆林化学立足煤化工高端企业目标,在规划开展 400 万 t/aCCS 示范项目一方面为践行国家减排降碳目标做出实效模范,另一方面也为走出适合本行业范围内的 CCER 方法学体系,进一步为 CCS 从产业化向商业化目标迈进。

4.3 二氧化碳捕集、运输及封存的挑战

煤化工作为国家高速发展且极具有重要能源战略意义的化工产业,如何向高端化、多元化、低碳化发展极具有挑战性,相比石油天然气企业在 CCUS 的发展研究认识,煤化工企业在 CCS 尤其在对 CO₂ 地质封存的专业领域上如:CO₂ 封存的储层评价、库容量估算、碳迁移扩散、CO₂ 外溢及泄露等监测方面都是弱项短板,缺乏系统性研究,也正因此陕煤集团榆林化学开展 40 万 t/aCCS 先导试验项目以及规划 400 万 t/aCCS 示范项目希望突破行业枷锁,打开绿色发展新路子,为国家出台碳封存相关政策、标准以及体系建设提供实质性借鉴意义。

5 结 论

1)高能耗、高排放是当前煤化工企业向绿色低碳转型发展主要克服问题之一,以陕煤集团榆林化学为例开展的二氧化碳捕集、运输及封存试验项目是落实国家减排降碳政策有效措施之一。

2)对比 CO₂ 的捕集工艺技术,认为胺化合物吸收法工艺成熟,吸收速率快,能耗低,投资低;对比利用海相等碳封存环境,认为陆地咸水层地质封存更具有优势,封存更稳定。

3)通过 2 种不同气源组分的 CO₂,给出了高纯(98.94%)和低纯(77.78%) 2 种超临界 CO₂ 封存工艺

流程,并分别加压至 27 MPa 进行地质封存。

4)根据 CO₂ 封存的地质环境,分析了鄂尔多斯盆地 1 000 m 以下纸坊组至山西组三套储层可作为 CO₂ 的封存环境;并通过数值模拟分析,利用 4 口封存注入井可以实现 40 万 t/aCO₂ 的封存运行。

5)根据 CO₂ 的扩散监测分析,采用 PNX 测井、井下光纤传感及地表 InSAR 等监测方法,建立起 CO₂ 从输送到进入地质封存再到扩散的全动态监测体系。

参考文献(References):

- [1] 刘 霞.比工业化前水平高 50% 以上,421ppm! 大气中二氧化碳浓度 5 月攀新高 [N]. 科技日报, 2022-06-08(04).
- [2] 邹才能, 吴松涛, 杨智, 等. 碳中和战略背景下建设碳工业体系的进展、挑战及意义 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 1-18.
ZOU Caineng, WU Songtao, YANG Zhi, et al. Progress, Challenges, and significance of building a carbon industry system in the context of carbon neutrality strategy [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 1-18.
- [3] 周健, 邓一荣. 中国碳捕集与封存(CCS): 现状、挑战与展望 [J]. 环境科学与管理, 2021, 46(8): 5-8.
ZHOU Jian, DENG Yirong. China's carbon capture and storage (CCS): present situation, challenges and prospects [J] Environmental Science and Management, 2021, 46 (8): 5-8.
- [4] 孙国超, 祁建伟, 袁圣娟. 我国碳捕集利用与封存技术现状及中国石化集团南京工程有限公司“双碳”相关技术研发进展 [J]. 磷肥与复肥, 2021, 36(10): 6-10.
SUN Guochao, QI Jianwei, YUAN Shengjuan. Current situation of carbon capture, utilization and storage technology in china and research and development progress of “double carbon” related technologies of sinopec nanjing engineering Co., Ltd.[J]. Phosphate Fertilizer and Compound Fertilizer, 2021, 36 (10): 6-10.
- [5] 赵雪会, 黄伟, 李宏伟, 等. 促进“双碳”目标快速实现的 CCUS 技术研究现状及建议 [J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(6): 26-32.
ZHAO Xuehui, HUANG Wei, LI Hongwei, et al. Research status and suggestions on CCUS technology to promote the rapid implementation of the “Double Carbon” goal [J]. Petroleum Pipe and Instrument, 2021, 7(6): 26-32.
- [6] 钟骅. 面向未来的二氧化碳捕集、利用和封存技术 [J]. 中国工业和信息化, 2022(2): 16-22.
ZHONG Hua. Future oriented carbon dioxide capture, utilization, and storage technology [J]. China Industry and Information Technology, 2022(2): 16-22.
- [7] ZOU Caineng, XIONG Bo, XUE Huaqing, et al. The role of new energy in carbon neutral [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411-420.
- [8] 彭新晶, 刘孟骐, 夏祥斌, 等. 储层砂岩-盐水-超临界 CO₂ 体系相互作用 [J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(2): 302-307.
PENG Xinjing, LIU Mengqi, XIA Xiangbin, et al. Interaction of reservoir sandstone brine supercritical CO₂ system [J]. Journal of

- China University of Mining and Technology, 2013, 42(2): 302–307.
- [9] 崔振东, 刘大安, 曾荣树, 等. CO₂ 地质封存工程的潜在地质环境灾害风险及防范措施[J]. 地质论评, 2011, 57(5): 700–706.
- CUI Zhendong, LIU Da'an, ZENG Rongshu, et al. Potential geological environmental disaster risks and prevention measures of CO₂ geological storage engineering[J]. Geological Review, 2011, 57(5): 700–706.
- [10] ZOU Caineng, PAN Songqi, ZHAO Qun. On the connotation, challenge and significance of China's "energy independence" strategy[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 416–426.
- [11] 汪黎东, 顿小宝, 张天赢, 等. CO₂ 地质封存中单井源泄漏风险的评估方法及模型[J]. 化工环保, 2013, 33(1): 76–79.
- WANG Lidong, DENG Xiaobao, ZHANG Tianying, et al. Evaluation method and model for single well source leakage risk in CO₂ geological storage[J]. Chemical Environmental Protection, 2013, 33(1): 76–79.
- [12] 董华松, 黄文辉. CO₂ 捕捉与地质封存及泄漏监测技术现状与进展[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 123–128.
- DONG Huasong, HUANG Wenhui. Current status and progress of CO₂ capture, geological storage, and leakage monitoring technology[J]. Resources and Industry, 2010, 12(2): 123–128.
- [13] 任韶然, 任博, 李永钊, 等. CO₂ 地质埋存监测技术及其应用分析[J]. 中国石油大学学报, 2012, 36(1): 106–111.
- REN Shaoran, REN Bo, LI Yongzhao, et al. Analysis of CO₂ geological burial monitoring technology and its application[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(1): 106–111.
- [14] 王小丰. 探究 CO₂ 捕集, 运输和封存技术的现状、发展与挑战[J]. 当代化工研究, 2017(5): 111–112.
- WANG Xiaofeng. Exploring the current status, development, and challenges of CO₂ capture, transport, and storage technologies[J]. Contemporary Chemical Research, 2017(5): 111–112.
- [15] 丁根. 国际油服公司碳捕集、利用与封存业务的现状与展望[J]. 世界石油工业, 2022, 29(4): 28–33.
- DING Gen. Current situation and prospects of carbon capture, utilization, and storage business of international oil services company[J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(4): 28–33.
- [16] 郭妍杉. 油气行业碳捕集、利用与封存技术分析[J]. 测试技术学报, 2022, 36(1): 86–92.
- GUO Yanshan. Analysis of carbon capture, utilization, and storage technologies in the oil and gas industry[J]. Journal of Testing Technology, 2022, 36(1): 86–92.
- [17] ZHANG X, ZHANG Y. Environment-friendly and economical scheduling optimization for integrated energy system considering power-to-gas technology and carbon capture power plant[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123348.
- [18] 张颖, 郭嘉宁, 李慧明. 油气领域碳捕集与封存利用技术综述[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(23): 191–192.
- ZHANG Ying, GUO Jianing, LI Huiming. Overview of carbon capture and storage utilization technology in oil and gas field[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2021, 41(23): 191–192.
- [19] 徐友发. 煤炭地下气化耦合二氧化碳封存围岩变形与裂隙发育模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- XU Youyou. Simulation study on deformation and fracture development of surrounding rock by coupling underground coal gasification with carbon dioxide storage [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [20] 张炜, 李义连, 郑艳, 等. 二氧化碳地质封存中的储存容量评估: 问题和研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 32(10): 1061–1069.
- ZHANG Wei, LI Yilian, ZHENG Yan, et al. Assessment of storage capacity in carbon dioxide geological storage: issues and research progress[J]. Progress in Earth Science, 2008, 32(10): 1061–1069.