

责任编辑:秦紫函
电 话:59964339
邮 箱:
qinzih@sinopec.com
审 校:张春燕
版式设计:王强

CCUS: 驱油封碳协同推动油田绿色转型



胜利油田
CCUS油藏开发研究
高级专家 张传宝



江苏油田
勘探开发研究院
副院长 葛政俊



华东油气
二氧化碳综合开发利用
专家 刘方志

问:当前,CCUS技术的研究与应用取得了哪些成果?

张传宝:近年来,中国石化CCUS(二氧化碳捕集、利用与封存)创新团队持续攻关,针对CCUS全链条的关键技术和装备,研发了低成本低能耗不同浓度气源高效捕集技术,创建数字孪生距离二氧化碳管输设计、运维等技术,创建陆相油藏二氧化碳高压混相提高采收率与封存率协同技术,研发了自主可控的长输管道增压泵、高压密相注入泵等核心工艺装备。

2022年8月,胜利油田建成投产了国内首个百万吨级CCUS全流程示范工程。2023年7月,建成了国内首个百万吨级百公里超临界压力二氧化碳长输管道,打造形成了全国最大的CCUS全产业链示范基地。目前,示范区日产油从220吨上升至450吨,二氧化碳动态封存率100%。

葛政俊:江苏油田注二氧化碳工作起步于20世纪90年代,先后经历了技术探索、扩大试验、规模推广3个阶段。针对复杂断块油藏CCUS技术瓶颈,开展技术攻关及多类型矿场试验,形成了以重力稳定驱、驱替协同等为特色的复杂断块油藏二氧化碳驱油四种差异化模式,配套形成了地下“四防”及地面“四移一循环”工艺技术,成功开展了花26#“防水平井”重力稳定驱等技术先导试验,建成了10万吨级复杂断块油藏CCUS示范工程。目前,已形成二氧化碳封存10万吨/年、增油2.5万吨/年规模,实现了提高采收率及有效碳封存双重目标。

刘方志:华东油气深耕CCUS技术40余年,1984年开始二氧化碳提纯基础研究,1987年起在复杂油藏开展吞吐试验,2005年草舍油田混相驱试验获得关键突破,2013年后在16个开发单元规模化应用。华东油气构建了核心技术支撑体系,形成了覆盖CCUS全流程的技术矩阵,如今技术研究正在向非常规领域延伸。

华东油气通过“技术-工程-标准-示范”全链条布局,建成四大示范基地:长三角35万吨级捕集基地探索区域协同减排,咸水层封存基地为二氧化碳长期安全归宿提供解决方案,CCUS-EOR一体化基地实现增油与封碳“双赢”,千万吨级调峰库为国家碳战略储备打造了“地下粮仓”。

问:推进相关技术时遇到了哪些挑战?如何突破技术瓶颈?

张传宝:我国陆相油藏原油轻烃含量低,难以实现混相;储层非均质性强,二氧化碳驱油气窜;研究人员分散,难以形成合力;理论技术与矿场实践还未完全融合,存在技术壁垒。

针对这些难题,胜利油田强化顶层设计,打造协作攻关团队,有效整合内部资源,彻底打通室内实验、方案优化、矿场实施、动态监测一体化研究之路。夯实基础研究,解决核心技术难题,研发了不同维度的气驱物理模拟、地质安全、气驱提效等实验装置,创新形成二氧化碳高压混相驱油理论,研发压驱高压压力场重构、全领域全程二氧化碳前缘控制等关键技术,为规模

化矿场应用提供理论支持。加速矿场规模化、产业化应用,在高891-樊143区块开展二氧化碳高压混相驱应用,油藏达到1.2倍混相压力,区块日产量由24吨提高到89吨,为规模化推广提供了示范。

葛政俊:江苏油田是典型的复杂小断块油田,地下具有“小、碎、贫、散、窄”的地质特点,油藏规模小,构造破碎,资源丰度低,窄条带多;地面上湖荡众多,河网密布。探索适应这种复杂地质及地面特点的注气模式及配套工艺,是苏北盆地CCUS技术攻关的挑战目标。

复杂断块油藏的特点对井网及开发模式提出了差异化要求。江苏油田针对典型油藏关键问题,尤其针对窄条带、极复杂两类复杂断块油藏,优化注气方式、驱替介质、注气部位等,形成了具有小断块油藏特色的4种注气模式,即“防水平井”重力稳定驱、气顶边水双向驱、驱替吞吐协同、“二氧化碳+吞吐”。

在配套工艺方面,形成了注、采、输全流程工艺技术。在地下,攻关形成了防腐防垢、防杆管失效、防气窜、防气举升等技术;在地上,开展“橇装化、低成本”的地面工艺技术研究,形成移动注气、移动回收、移动控压、移动集输技术,实现了同井场注入、产出、回收、再注入的闭合环路,以及“净零”排放目标。

刘方志:面对储层非均质性难题,华东油气通过多尺度建模与动态分析精耕细划油藏机理;面对气体窜流难题,创新了分级封窜技术,为碳流构建“定向通道”;面对技术成本高、难以规模化应用难题,攻关低成本捕集与多元

输送技术,2025年建成了江苏省首条二氧化碳长输管线。

问:未来的重点工作是什么?

张传宝:一是统筹谋划CCUS中长期发展规划。基于CCUS/CCS发展潜力及源汇匹配优势,对产业发展进行整体系统谋划,根据技术可行性与空间合理布局,有序推进CCUS/CCS产业发展。

二是加大推进关键核心技术攻关力度。聚焦拓展CCUS/CCS应用领域和“二氧化碳+”关键技术环节,攻关高含水油藏二氧化碳驱、页岩油二氧化碳提高采收率、咸水层封存等技术,突破驱油封存协同、长效封窜与防腐、地质安全等技术瓶颈,扩大CCUS/CCS阵地与领域。

三是加快CCUS/CCS产业集群化体系建设。以胜利油田第二个百万吨CCUS项目建设为契机,推动炼油化工、煤电等减排行业与油气+新能源开发利用一体化协同,依据源汇匹配原则,规划CCUS/CCS集群建设,引领碳利用与封存规模化应用。

葛政俊:下一步,江苏油田将以驱油封存协同、近混相驱、混相驱为主要方向,以水气协同控窜为技术手段,深化基础理论研究,攻关提升驱油封存模式,完善提升配套工艺,降低项目成本,实现二氧化碳驱的规模化、效益化推广,助力绿色低碳发展。同时,加快断层开启、活化评价技术攻关,推进复杂断块地质体大规模碳封存工作。

(沈志军 吴 琨 整理)

企业实践

华东油气:既能让“以碳增油”,又能“以碳增气”

□本报记者 沈志军 通讯员 刘方志 陈 菊

一直以来,华东油气加速构建CCUS-EOR(二氧化碳捕集、利用与封存-提高原油采收率)与CCUS-EGR(二氧化碳捕集、利用与封存-提高天然气采收率)全链条协同创新模式。近日,华东油气在武隆向斜页岩气区块顺利完成隆页1HF井首钻二氧化碳吞吐作业,累计注入液态二氧化碳超500吨,在探索利用二氧化碳高效开发常压页岩气的新路径上迈出了坚实一步。

CCUS-EOR:累计封碳160万吨,采收率提高4.5个百分点

在原油开发领域,华东油气CCUS-EOR技术已构建起成熟的规模化应用体系。针对苏北盆地主力油田剩余油高效开发这一行业性难题,该技术通过油藏精准注入二氧化碳,充分利用其在低渗透储层中的优异驱替特性与重力稳定效应,显著提升了原油采收率。

该技术核心作用机理体现在三个维度:混相驱替,依托特定温压条件,二氧化碳与原油形成稳定混相体系,大幅降低油水界面张力,有效扩大油藏体积;体积驱替,通过高压注入的二氧化碳在地层中构建气顶,借助气体弹性膨胀能量持续驱动原油迁移;膨胀降黏,二氧化碳溶解于原油后,降低原油黏度、提升溶解气含量,还能有效改善油水流度比,产生多维度增产协同效应。

目前,华东油气已在苏北盆地建成从捕集、运输、三次采油、防腐、穿透气回利用到地质封存的全产业链,年注入二氧化碳能力超20万吨,累计封存二氧化碳逾160万吨,油藏平均采收率提升4.5个百分点,为复杂断块油藏开发提供了切实可行的低碳解决方案。相关技术成果已形成标准化设计体系,为区域推广应用奠定了坚实基础。

CCUS-EGR:累计注碳4000吨,增产天然气300万立方米

面对南川常压页岩气田平桥南和武隆

向斜区块储量基数大但采收率偏低的挑战,华东油气创新性地将CCUS技术拓展至气藏开发领域,启动了CCUS-EGR矿场试验。

依托自主研发的“四效协同”技术体系,该试验实现了页岩气采收率的有效提升:二氧化碳在页岩矿物表面的吸附能力显著强于甲烷(通常为4~20倍),可通过竞争置换吸附态天然气;注入的二氧化碳能补充地层能量,维持甚至提升储层压力,克服天然能量衰减以实现储层增压膨胀;二氧化碳溶解于页岩有机质后,会引发基质溶蚀及纳米孔隙网络重构,进而促进气体解吸与有机质溶胀释气;二氧化碳与甲烷形成的混合流体能降低气体渗流阻力,改善开发动态。

华东油气在焦页201-3HF井区开展多轮次吞吐试验,累计注入二氧化碳超4000吨,增产天然气300多立方米。隆页1HF井开井后初期产量较措施前提升近100%,验证了该技术的工程可行性。

全链条协同:同步实现“三位一体”目标

华东油气以“技术研发-工程实施-效益评价”为主线,构建了CCUS-EOR与CCUS-EGR协同发展模式。EOR与EGR共享二氧化碳捕集、输送与注入基础设施,有效降低单位成本;EOR驱油后,二氧化碳封存于油藏,EGR作业后,二氧化碳可封存于气藏;通过跨油田、气田的二氧化碳资源化调配,实现“以碳增油”与“以碳增气”的双重效益。

实践表明,CCUS技术不仅是实现碳减排的战略性工具,更是驱动油气田高质量开发的核心引擎。通过EOR与EGR全链条协同,可同步实现二氧化碳资源化利用、油气采收率提升与地质碳封存的“三位一体”目标,为能源行业绿色转型贡献了“华东经验”。

接下来,华东油气将持续深化室内机理研究及矿场动态监测,重点攻关页岩气井重复吞吐工艺优化与页岩气井间驱工艺优化,并计划在南川地区建设CCUS-EGR综合试验基地,为非常规油气资源绿色高效开发及实现碳中和目标提供系统化的“华东方案”。



南川常压页岩气田在阳51平台进行注二氧化碳施工。沈志军 摄

专家视点

CCUS成为绿色转型与气候安全“核心关键”技术

□中国石化石油勘探开发研究院 王 锐

CCUS角色实现三重跃迁

在COP29(第29届联合国气候变化大会)达成《巴黎协定》第六条关于国际碳交易市场机制后,全球CCUS产业迎来了爆发式增长期,CCUS角色实现了三重跃迁:早期,CCUS被当作化石能源低碳利用的“战略储备”技术,由于经济成本高、应用场景受限、政策支持缺乏,关注度较低,仅被看作辅助性减排技术;后来,CCUS被视作“净零”排放的“兜底保障”技术,在全球主要经济体发布“净零”排放承诺后,各国有CCUS作为实现碳中和目标的托底技术选项;近期,CCUS被逐步认定为全球绿色转型与气候安全的“核心关键”技术,是“净零”排放路径中不可或缺的支柱性技术,尤其在解决减碳减排领域问题和创造负排放方面具有不可替代性。

CCUS作为实现“双碳”目标的关键技术,是保障能源安全的压舱石,可实现煤炭清洁化利用和大幅提高原油采收率,并能规模化降低碳排放总量;是推进工业脱碳的攻坚器,可推动工业摆脱高碳路径依赖,实现传统产业链提升与绿色低碳转型;是耦合新能源的调节阀,通过“CCUS+碳基调峰电厂”与新能源耦合,可在提供灵活电力的同时实现近零排放;是培育新质生产力的催化剂,可孵化一批交叉前沿原创技术,带动一批新材料、新装备、新方法跨越式发展,助推构建CCUS战略性新兴产业,为我国经济社会高质量发展提供强劲动力。

我国CCUS产业挑战与机遇并存

目前,全球处于各阶段CCUS项目共有1017个,年捕集封存二氧化碳能力23.83亿吨。全球CCUS产业发展呈现以下新特征:一是技术迭代逐步加速,新一代金属有机框架(MOFs)、

相变吸收剂等低能耗捕集技术加速商业化,直接空气捕集(DAC)成本降至300美元/吨;二是应用场景多元化拓展,示范应用项目加速向水泥、钢铁、氨、炼油、玻璃等多个行业深度延伸;三是政策金融协同作用显现,欧盟通过碳排放交易体系(ETS)、碳边境调节机制(CBAM)、创新基金等,为CCUS项目提供资金支持和市场激励,衍生出“碳即服务”(Carbon-as-a-Service, CaaS)新型商业模式,形成“碳基础设施运营商”新范式;四是区域竞争格局加速演进,全球CCUS产业格局呈现“北美放缓、欧亚加速、中东崛起”三驾齐驱的显著特征。

我国CCUS项目已快速增长至126个,具备年捕集二氧化碳能力600万吨,实现二氧化碳年注入300万吨,多个百万吨级以上项目正在规划和建设中。我国CCUS产业技术路径多样,覆盖行业广泛,部分领域已接近或达到商业应用水平,政策体系初步呈现“顶层设计+部门协同+地方配套+金融支持”的立体化格局。

但我国CCUS发展仍面临一系列挑战,如技术代际差异大,全产业链集成创新不足;单体项目规模偏小,产业化模式创新不够;政策法规仍需完善,市场机制还需激活;战略布局有待强化,国际交流合作还需深化等。

二氧化碳驱油封存具备显著优势

二氧化碳驱油封存是目前唯一经济可行的规模化CCUS技术。二氧化碳驱油之所以能有效提高原油采收率,核心在于超临界二氧化碳与原油间复杂的物理-化学作用机制,这些作用可显著改善原油流动性、扩大油藏体积、降低残余油饱和度,从而在地层中实现更高效的驱替,使其成为当前提高原油采收率最具潜力的驱替介质之一。

与水驱、化学驱相比,二氧化碳驱油技术具有以下优势:一是油藏适应性更强,对水驱难以

有效开发的低渗/特低渗油藏具有良好的适应性,且对于化学驱难以适用的高温高盐油藏也具有较好适用性;二是开发阶段更广,二氧化碳驱油既可在衰竭开发后直接实施,也可在水驱后实施,还可与化学驱协同,有效降低混相压力,抑制气窜,大幅提高采收率;三是驱油封存兼顾、新一代二氧化碳驱油技术不仅关注采收率,而且注重封存率,通过提高二氧化碳注入量,实施化学辅助增效,配合智能井技术,能够进一步大幅提高采收率和封存率,为规模化封存提供有力支撑。

负碳技术扮演重要作用

二氧化碳地质封存是未来最具前景的规模化负碳技术,其主要通过构造封存、残余封存、溶解封存、矿化封存等机制,实现地下永久封存。

常见的封存类型主要是枯竭油气藏、深部咸水层、不可采煤层、玄武岩地层等。其中,枯竭油气藏以其翔实的地质信息、工程实践、可利用基础设施等,成为理想封存场所。深部咸水封存以分布范围广、封存潜力巨大等特点,成为未来碳中和的负碳兜底技术。目前,国内外已建成多个咸水层封存示范项目,证实了封存的有效性,在经济性改善条件下将具有广阔应用前景。

直接空气捕集封存技术(DACCS)是一项通过人工装置“反向呼吸”,直接从大气中分离浓缩二氧化碳,并注入封存到地下,实现负排放的技术。它实现了二氧化碳点源捕集到分布式部署,被认为是未来碳中和的负碳兜底技术。2025年,该技术已经从千吨级示范迈入百万吨级规划阶段,有130多个项目处于在建或规划阶段,2030年规模有望达到6500万吨/年。目前直接空气捕集技术的成本持续降低,已从早期的1000美元/吨降为目前的300~600美元/吨。未来在规模效应支撑下,成本有望降低至200美元/吨以下,具备商业化运营能力。

