



## CCUS:驱油封碳协同推动油气田绿色转型

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碳捕集技术,创建数字孪生长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“仿水平井”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年阜余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,二氧化碳驱易气窜;研究人员分散,难以形成合力;理论与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、全链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,窄条状多;地面上湖荡众多,河网密集。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“仿水平井”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、再注入的闭环循环,以及“净零”排放目标。

刘方志:面对储层非均质难题,华东油气通过多尺度建模与动态分析精细刻画油藏肌理;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产业集群化体系化发展。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相协同,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 珉 整理)

华东油气:  
既能“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,华东油气在武陵向斜页岩气区块顺利完成隆页1HF井首轮二氧化碳吞吐作业,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,该技术通过向油藏精准注入二氧化碳,充分利用其在低渗透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,有效扩大波及体积;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运移;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动比,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、穿透气回收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陵

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,会引发基质溶胀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多万立方米。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

## 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,各国将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或支柱性技术,尤其在解决难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油气采收率,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,实现传统产业提质升级与绿色低碳转型;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,扩大波及体积、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,成为未来规模封存的主要方式。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。



华东油气在南化公司建设的年捕集20万吨二氧化碳项目。沈志军 摄