

齐鲁石化-胜利油田CCUS关键技术及装备



01 高效捕碳手——高浓度气源低温精碳捕集技术

将煤制氢排放尾气冷却加压至液态,再利用二氧化碳与其他气体的沸点差异,在精馏塔内完成分离——低沸点杂质先气化排出,最终得到高纯度液态二氧化碳。通过研发大型高效精馏、梯级制冷与能量回收工艺技术装备,实现大规模、低能耗、低成本捕集,将吨二氧化碳捕集成本从传统工艺的170元降至99元。



齐鲁石化-胜利油田百万吨级CCUS示范工程装置夜景。



02 安全大动脉——含杂质二氧化碳数字孪生长距离超临界压力管道输送技术

压缩二氧化碳属于危化品,管输安全要求极高,其中含杂质二氧化碳的相态控制更是世界级难题。经过持续研究和大量试验,研发出管输流动保障计算软件系统,模拟精度达95%;创建大直径长距离超临界压力管道设计、止裂控制及全相态腐蚀的护技术,成功研发世界首套二氧化碳管输数字化系统,实现管输智能化运行。该技术已应用于胜利油田百万吨级二氧化碳长输管道,在投运、首站操作、末端加注、停输再启等复杂工况下均实现安全平稳运行,获得国内外同行高度认可。

感言

胜利油田二氧化碳驱油藏工程管理部高级专家 吕广忠: CCUS从示范走向规模化,是技术、工程、管理的系统工程,绝非单一环节的技术堆砌。需打破研发、输送、注入、采出、封存各环节壁垒,通过全链条协同优化,实现工艺参数、能源供给、运输调度一体化联动,杜绝局部优化、全局低效的问题。集控系统作为连接碳源与碳汇的“动脉”,需坚持先行布局,保障CCUS全流程贯通、快速见效。同时,从源头降耗、过程提效、余热回收、智能调控四方面精准发力,优化系统结构,降低运行成本,并围绕碳利用效率、油藏采收率、系统运行效率三维度提质增效,拓宽CCUS盈利空间。

科研层面,针对多源气源捕集成本偏高、跨源汇管同集群薄弱、陆相中质原油驱强增储致效、碳利用高值化路径不清四大瓶颈,高排单举—实验室科研模式,推行科研融创一体化控制。以技术攻关与产业布局、技术融合与产业配套、技术迭代与产业示范、技术推广与产业落地为主线,做实技术创新驱动产业发展的实施路径。联动科研、产业、人才、资本多方协同聚力,靶向破解现场工程难题,加快关键技术迭代落地,着力解决科技成果转化率低问题,为CCUS规模化、高效化、低碳化发展提供坚实支撑。

胜利油田勘探开发研究院气驱试验室经理 郑文宽: 胜利油田主力碳驱油藏为陆相油藏,油质稠,混相压力高,曾被国外专家判定为无法实现混相驱。CCUS项目难有经济效益。面对难题,油田几代科研人员接续攻关,从非混相驱起步,逐步突破混相驱、混相驱,最终攻克高压混相驱技术,以科技创新与产业建设深度融合,走出了独具胜利特色的绿色低碳发展路径。

2021年10月21日,习近平总书记视察胜利油田CCUS实验室,作出“既要绿色低碳发展,又要保障能源安全”的重要指示,为基层科研工作注入强大动力,更坚定了我们攻坚克难的信心与决心。没有现成的图纸,我们就自己画,买不来核心设备,我们就自己设计,成功研制出高温高压二维物理模拟等关键实验装置,持续深化二氧化碳高压混相驱油封存理论研究,推动二氧化碳驱油封存基础研究向更宏观拓展,向更微观深入。如今,CCUS示范区已连续3年实现平稳、安全、高效、绿色运行,日产量从220吨攀升至460吨,实现“量变翻倍”。

胜利油田石油工程技术研究院CCUS研究所 副经理 魏伟: 作为CCUS注采技术研发人员,我深切体会到这项工作的艰辛。攻关之路艰难险阻,但我们始终坚守初心、直面技术瓶颈,从高压注气工具密封、气密防窜、举升过程效率提升到筒壁防蚀,每一个环节都充满挑战,每一次突破都需反复探索。

攻关期间,我们深耕细作,历经无数次日井工具设计优化、防窜防窜体组合成调及试验验证,持续迭代技术方案,逐步形成高压注气、高气液比举升、气密分驱调控、高效防窜等系列核心技术,成功支撑胜利油田首个百万吨级CCUS示范区顺利建成投产。

技术突破没有终点。面对复杂储层均质差、低成本防窜防窜等尚未突破的难点,我们将持续深耕、迎难而上,不断探索创新推进技术迭代升级,为中国石化高质量发展筑牢技术根基。

胜利油田注汽技术服务中心经理 武八锁: 我们秉持“绿色胜利”建设要求,按照“扩、建、提、备”思路推进CCUS全链条产业化,成立CCUS全链条产业化工作专班。

在“扩”的主阵地,油田首个百万吨级CCUS示范项目今年将加大力度持续实施6个区块扩建,增配20-40口井的地面注入系统,同步开展注入全过程、全口径成本评价优化,不断提升CCUS运行经济性。

“建”的步伐同步跟进。电厂百万吨级CCUS项目将遵循信息化先行、“大站制”建设原则,优化采217等区块地质CCUS方案并分批推进建设,年内将以先导试验方式形成10万吨注入能力。我们还将全面启动第一个百万吨级项目积累的工艺与运行经验,“再升级”注入工艺、液陆平衡智能匹配调控平台正在探索实施中。

在“提”的方面,东营中质原油排放改造高达7000万吨,为油田开发提质增效提供了广阔空间。我们将配合编制先导试验方案,全程跟进对接重点区域试验验证。

在“备”的方面,中心正以矿场实施配套油回加快海上、高等区域成层封固技术储备,形成CCS技术系列,为未来产业布局蓄势赋能。



03 驱油新利器——二氧化碳高压混相驱油与封存技术

陆相深层低渗透油藏是我国增产主力阵地,原油黏度大、混相压力高、渗透率低、非均质性强,国外现有二氧化碳驱油技术难以适用。自主创新陆相深层低渗透油藏二氧化碳高压混相驱油与封存理论,形成基于二氧化碳前缘控制的全过程动态调控技术,研发国内首套(套)40兆帕级二氧化碳高压混相驱油泵,实现全链全程混相开发,显著提升原油采收率与二氧化碳一次封存率。



胜利油田—陆相油藏百万吨级CCUS示范项目首套40兆帕级二氧化碳驱油泵正在调试。

04 监控千里眼——“空-天-地-井”一体化二氧化碳封存监测技术

高效监测是实现二氧化碳长期安全封存的核心保障。构建“空-天-地-井”一体化二氧化碳封存监测技术体系,重点监测封存区域大气、土壤、地下水二氧化碳浓度,以及地表沉降、隆起等异常情况,一旦出现故障,系统立即预警,如同一张从天空延伸至地层深处的立体监控网,将二氧化碳置于严密守护中。

近日,齐鲁石化-胜利油田百万吨级二氧化碳碳捕集、管输及封存关键技术装备,在第51届瑞士日内瓦国际发明展上斩获特别嘉许金奖,特别创新奖两项重磅荣誉,以硬核实力彰显我国CCUS全链条技术装备的国际领先地位。这不仅是中国石化多年深耕CCUS领域、攻克全产业链技术瓶颈的里程碑式成果,而且向世界贡献了可复制、可落地的“碳减排”中国方案。

在2026年中国ESG盛典上,中国石化更提出在“十五五”期间实现二氧化碳捕集、利用与封存600万吨以上的目标。这既是中国石化践行能源报国、履行“双碳”使命的郑重承诺,也标志着中国石化正以技术为依托,引领石化产业向绿色低碳全面升级。

从技术攻关到工程示范,从单点突破到集群布局,我国CCUS产业正加速迈向规模化、绿色化发展新阶段。本期《能源导刊》聚焦这一领域,重点展现中国石化领跑CCUS全产业链的实践担当,探寻“CCUS赋能”“双碳”目标、助力全球气候治理的广阔前景。

5、8版文图除署名外,由 庞 勇、贾玉涛任原稿,高恒超、杨北镇、李海霞、代岭村、崔国章、章克民、王敬华、朱作清、陈秀芳提供。

“只要付出,总会有收获。”李宗阳的感慨源自日内瓦之行,更源于CCUS攻坚之旅。

对于胜利油田CCUS来说,拿到国际大奖不是终点,而是一个新的起点。

目前,胜利油田CCUS项目已累计获得中美发明专利78件,牵头制定3项国家标准,但科研脚步没有停下,油藏开发、工程工艺集输处理、管理体系、安全监测、智能化管控的迭代升级已然开始。

每一次迭代升级的背后,都是胜利油田对CCUS技术发展规律的深刻把握,对CCUS领域认知边界的重新定义,对CCUS技术极致的硬核挑战,更是对“既要绿色发展又要能源安全”这一时代命题的有力回答。

更大的蓝图正在展开。胜利油田系统谋划了“百、千、亿”发展目标,“十五五”期间将实施四个百万吨级示范工程,持续推进CCUS产业规模化、集群化发展。

渤海湾的春风里,二氧化碳正沿着百公里管道奔涌向前,在地下3000米深处与原油相拥——那是碳的归宿,也是全新征程的起点。

AI制图

故事

是碳的归宿,也是全新征程的起点

胜利油田CCUS关键技术装备获第51届瑞士日内瓦国际发明展特别嘉许金奖

为全球碳减排贡献“中国方案”

CCUS进入集群化发展新阶段 政策技术双轮驱动产业提速

中国工程院院士 李阳

CCUS技术链和产业链长,可与能源、工业等深度融合,支撑化石能源清洁化利用及工业深度减排,已成为全球应对气候变化和实现碳中和目标不可或缺的关键技术。

全球CCUS发展步入快车道,规模、技术与政策协同推进

当前,全球CCUS项目数量与规模呈现快速增长态势。据国际能源署数据库统计,截至2026年4月,全球各阶段CCUS项目总数达1110个,碳捕集封存能力24.64亿吨/年,较上年同期增加8200万吨/年。

CCUS呈集群化发展趋势。CCUS集群具有规模化、基础设施共享、能量资源交互利用等优势,可实现封存集中监管,大幅降低碳减排单位成本。目前,全球有超140个CCUS集群项目组处于开发阶段;挪威北海极光项目一期成功投运,二期500万吨/年完

成最终投资决策(FID);英国HyNet和东海岸集群进入实质性建设阶段,北海地区CCUS集群组网已建成规模。

CCUS技术快速发展。碳捕集技术加速迭代升级,第一代化学吸收法已实现工业化应用,再生能耗3.5-4吉焦/吨二氧化碳;第二代复合溶剂技术,能耗降至2.4-2.6吉焦/吨二氧化碳;第三代技术凭借新型材料与工艺突破,能耗进一步降至2吉焦/吨二氧化碳。电化学捕集、水凝胶基碳捕集材料、金属有机框架(MOFs)等新技术和新材

料取得突破性进展,直接空气捕集技术成本快速下降。输送技术成熟度高,罐车、船舶和管道输送方式已实现商业化,美国二氧化碳碳源管道超过8000千米。地质利用与封存规模不断扩大,美国年注入二氧化碳超4000万吨,成为全球首个累计注入量超10亿吨的国家。二氧化碳资源化利用路径多样化发展,二氧化碳制备合成燃料、二氧化碳“矿化”制绿色建筑材料、二氧化碳合成高端化学品等技术展现良好前景。

CCUS政策不断完善。全球碳定价机制

呈现多元化发展态势,据世界银行分析,全球目前有113个碳定价机制,其中包括37个碳市场、43个碳税制度、33个政府碳信用机制。欧洲采取“碳税+碳市场+创新基金支持”组合政策,对区域内CCUS产业予以支持;美国依据合规市场、税收减免与自愿市场三类机制叠加,提升CCUS项目经济性,同时大幅提升CCUS税收抵免额度,450(美国《国内税法》第45D条)法案补贴力度不断加大,CCUS项目补贴提升至60美元/吨二氧化碳,CCS项目补贴达到85美元/吨。

我国CCUS产业政策与示范提速,助力碳中和目标实现

我国是碳排放大国、化石能源消费大国,实现“双碳”目标时间紧、任务重、挑战大。据评估,到2060年实现碳中和目标时,仍有10亿吨级二氧化碳减排需求待CCUS解决。

近年来,随着政策与行动的推进,我国出台了系列CCUS政策文件,国家“十四五”发展规划中明确,开展近零能耗建

筑、近零碳排放、碳捕集利用与封存(CCUS)等重大示范项目。国家部委出台《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2035年)》《工业领域碳达峰实施方案》等系列专项政策,支持加快CCUS技术攻关和产业化示范基地建设。2026年政府工作报告首次将“单位国内生产总值二氧化碳减排降

低”作为年度约束性指标,“十五五”发展规划纲要提出,“全面实施碳排放总量和强度双控制度,2030年单位国内生产总值二氧化碳减排累计下降17%”。绿色能源转型步伐加快,将进一步推动CCUS产业化、规模化建设。

目前,我国已建成多个CCUS示范项目,覆盖电力、钢铁、水泥等重点领域。据估计,我国已规划并规划中的CCUS示范项目超过120个,二氧化碳捕集能力约940万吨/年,注入能力约590万吨/年,实际年二氧化碳注入量400万吨;项目单体规模逐步扩大,捕集封存能力100万吨/年以上的项目占40.4%。

中国石化CCUS全产业链领跑,技术与示范工程达国际领先水平

工程示范领域成果显著。2022年,中国石化建成国内首个百万吨级齐鲁石化-胜利油田CCUS全流程示范工程,实现连续安全平稳运行近4年。2023年,该项目获颁全球首个超1000天;高压混相驱油封存技术在深层低渗透油藏实现规模化应用;二氧化碳加氢转化、二氧化碳与甲烷重整、二氧化碳加氢制航煤、矿化利用等技术具备工业化应用基础,二氧化碳制碳酸酐实现工业化。

工程示范领域成果显著。2022年,中国石化建成国内首个百万吨级齐鲁石化-胜利油田CCUS全流程示范工程,实现连续安全平稳运行近4年。2023年,该项目获颁全球首个超1000天;高压混相驱油封存技术在深层低渗透油藏实现规模化应用;二氧化碳加氢转化、二氧化碳与甲烷重整、二氧化碳加氢制航煤、矿化利用等技术具备工业化应用基础,二氧化碳制碳酸酐实现工业化。

工程示范领域成果显著。2022年,中国石化建成国内首个百万吨级齐鲁石化-胜利油田CCUS全流程示范工程,实现连续安全平稳运行近4年。2023年,该项目获颁全球首个超1000天;高压混相驱油封存技术在深层低渗透油藏实现规模化应用;二氧化碳加氢转化、二氧化碳与甲烷重整、二氧化碳加氢制航煤、矿化利用等技术具备工业化应用基础,二氧化碳制碳酸酐实现工业化。

当前,CCUS已迈入规模化应用新阶段,我国加快推进经济社会绿色低碳转型为其提供了重要发展机遇。

当前,CCUS已迈入规模化应用新阶段,我国加快推进经济社会绿色低碳转型为其提供了重要发展机遇。

当前,CCUS已迈入规模化应用新阶段,我国加快推进经济社会绿色低碳转型为其提供了重要发展机遇。

“十四五”规划纲要明确提出培育氢能、绿色燃料等新增长点,催生新质生产力。CCUS在绿色燃料等化工领域具备显著的循环经济替代优势,有望推动形成碳循环产业生态体系。碳封存空间潜力巨大,我国

“十四五”规划纲要明确提出培育氢能、绿色燃料等新增长点,催生新质生产力。CCUS在绿色燃料等化工领域具备显著的循环经济替代优势,有望推动形成碳循环产业生态体系。碳封存空间潜力巨大,我国

“十四五”规划纲要明确提出培育氢能、绿色燃料等新增长点,催生新质生产力。CCUS在绿色燃料等化工领域具备显著的循环经济替代优势,有望推动形成碳循环产业生态体系。碳封存空间潜力巨大,我国

科普

二氧化碳为什么不驱油?

二氧化碳注入油层后,会快速扩散并溶解于原油,一方面使原油体积膨胀,增加油层内部弹性性能,为原油提供额外驱油动力,推动原油生产并流动;另一方面可溶解原油胶质,改善原油流动性,减弱原油与油藏岩石间的力和黏附力,让原本难以流动的重组质分离并随流动,有效提升驱油效率。

在高压条件下,二氧化碳可与原油发生混相作用,形成单一均相体系,彻底消除油相与水相间的界面张力,最大限度减小驱油阻力,实现对残余油的高效驱替。二氧化碳还能溶解原油中的轻质组分,优化原油组分构成,进一步降低原油密度和黏度,助力残余油高效采收。

二氧化碳还能改善油流渗流环境,其溶解于地层水后形成弱酸液,可溶解油藏岩石中的碳酸盐矿物,扩大孔隙半径,提高地层渗透率,从而扩大驱油范围。同时,二氧化碳密度低于原油和地层水,具有明显重力分离特性,可在油层上部形成气顶层,持续对下部原油产生驱替作用,减少油层顶部剩余油滞留。

二是作用于地层流体。超临界二氧化碳的扩散系数是液体的100倍,极易溶于原油,与原油混相后可使原油黏度下降80%,大幅提升原油流动性。通过二氧化碳对地层进行预处理,能提高不同尺寸孔隙对原油的动用程度,使采收率提升30个百分点以上。

三是实现改变地层非均质性。二氧化碳注入后可实现改善地层非均质性,提高岩石孔隙压力,降低水相主力产出,增加驱油驱替数倍量,促进地层非均质消除,提升驱替效率。在高压条件下,二氧化碳可与原油发生混相作用,形成单一均相体系,彻底消除油相与水相间的界面张力,最大限度减小驱油阻力,实现对残余油的高效驱替。二氧化碳还能溶解原油中的轻质组分,优化原油组分构成,进一步降低原油密度和黏度,助力残余油高效采收。

二是作用于地层流体。超临界二氧化碳的扩散系数是液体的100倍,极易溶于原油,与原油混相后可使原油黏度下降80%,大幅提升原油流动性。通过二氧化碳对地层进行预处理,能提高不同尺寸孔隙对原油的动用程度,使采收率提升30个百分点以上。

四是提高地层能量与驱排效率。液态二氧化碳注入可补充地层能量,伴生气可降低井筒流注密度,改善压后返排,减少压裂液滞留造成的储层伤害,延长油井产油期与稳产期。

四是提高地层能量与驱排效率。液态二氧化碳注入可补充地层能量,伴生气可降低井筒流注密度,改善压后返排,减少压裂液滞留造成的储层伤害,延长油井产油期与稳产期。

我国CCUS潜力有多大?

1. 捕碳潜力

电力、钢铁、水泥、化工、油气五大行业是我国主要碳排放源。从理论潜力看,我国年二氧化碳主要捕集规模超100亿吨,其中,煤电领域约40亿吨,钢铁行业约15亿吨,水泥行业约18亿吨,化工行业约12亿吨,油气行业约5亿吨。

我国二氧化碳利用路径日益增多,正形成“以促碳、创收碳”的良好循环。

我国二氧化碳利用路径日益增多,正形成“以促碳、创收碳”的良好循环。



胜利油田百万吨级CCUS示范工程储罐。沈志军摄