

引用格式:舒华文. 胜利油田百万吨级CCUS输注采关键工程技术[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(1): 10-17.

SHU Huawen. Key engineering technologies of one-million-ton CCUS transportation-injection-extraction in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(1): 10-17.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.01.002

胜利油田百万吨级CCUS输注采关键工程技术

舒华文

(中国石化胜利石油工程有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 碳捕集、利用与封存(CCUS)是实现“双碳”目标的重要手段, 涵盖捕集—输送—注入—采出—回注等关键环节。胜利油田经过多年探索和攻关, 形成了输注采系列关键工程技术。针对压损温差带来的CO₂相变与长距离泄漏风险, 建立了基于相态控制的长距离CO₂管道安全输送工艺技术, 实现高效经济输送; 研发了中国首台套管道输送泵; 建成了中国最长的超临界压力CO₂长输管道, 补齐了国内CO₂长距离输送的短板。为满足示范工程大排量CO₂高压注入的需要, 研发了国内首台套高压密相注入泵, 实现了40 MPa高压密闭注入; 针对注气压力高、气液比高、泵效低以及CO₂腐蚀等问题, 形成了免压井安全注气管柱、多功能采油管柱、CO₂驱腐蚀防护等注采配套工程工艺技术, 实现了高效安全注采和长效腐蚀防护。建成了中国首个集管输工程、注入装备、驱油封存、注采工艺、集输回注为一体的, 多领域、多节点的百万吨级CCUS示范工程, 目前各环节运行良好, 实现“平稳、安全、高效、绿色”运行。对胜利油田百万吨级CCUS输注采工艺及配套装备进行了总结, 以为后续CCUS工程建设提供借鉴和指导。

关键词: 驱油封存; 全链条; 管道输送; 地面工程; 注采工艺; 胜利油田

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Key engineering technologies of one-million-ton CCUS transportation-injection-extraction in Shengli Oilfield

SHU Huawen

(Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: CCUS technology is a crucial technology for achieving the goal of “dual carbon”, involving process such as capture, transportation, injection, extraction and re-injection. Shengli Oilfield has developed essential engineering technologies for transportation and injection through years of exploration. To manage the phase changes of CO₂ and the risks of long-distance leakage due to pressure loss and temperature variations, a safety transportation technology for long-distance CO₂ pipelines was established. This technology is based on phase state control, ensuring efficient and cost-effective transportation. developed China's first casing pipeline transport pump; and built China's longest long-distance supercritical pressure CO₂ pipeline, which makes up for the shortcomings of the long-distance CO₂ transport in China. In order to meet the needs of high-pressure injection of large-displacement CO₂ in the demonstration project, China's first high-pressure dense-phase injection pump has been developed, realizing high-pressure dense-phase injection of 40 MPa. In view of the problems of high injection pressure, high gas-to-liquid ratio, low pumping efficiency, and corrosion of CO₂, the engineering process technology of injection and extraction supporting such as safe injection of gas pipeline columns for pressure-free wells, multi-functional oil recovery pipeline columns, and corrosion prevention of CO₂ repulsion has been formed to realize high-efficiency, safe injection and extraction and long-lasting corrosion protection. China's first multi-field, multi-node, one-million-ton CCUS demonstration project integrating pipeline transport engineering, injection equipment, flooding and sequestration, injection-extraction process, and gathering-transmission and

收稿日期: 2023-10-23。

作者简介: 舒华文(1972—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事CO₂捕集、管输、驱油与封存相关研究。地址: 山东省东营市东营区济南路258号, 邮政编码: 257000。E-mail: shuhua.wen.oss@sinope.com

基金项目: 国家重点研发计划“区域二氧化碳捕集与封存关键技术研发与示范”(2022YFE0206800)。

re-injection, has been operating well and realizing “smooth, safe, efficient and green” operation in all aspects. This summary of the one-million-ton CCUS transportation-injection-extraction process and supporting equipment in Shengli Oilfield is intended to provide reference and guidance for the construction of subsequent CCUS project.

Keywords: flooding and sequestration; full chain; pipeline transportation; ground engineering; injection-extraction process; Shengli Oilfield

近年来,全球气候变暖加速,世界各地极端天气频发,对社会经济发展造成了明显影响,人类活动排放的温室气体是造成气候变化的主要原因,尤其是温室气体中的CO₂含量快速上升^[1-3]。为此,世界各国纷纷出台减碳政策,并相继提出碳中和目标^[4-5]。2020年9月,习近平主席在第75届联合国大会上提出:“采取更加有力的政策和措施,CO₂排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。”碳捕集、利用与封存(CCUS)在实现碳永久封存的同时,可提高石油采收率,具有巨大的社会效益和经济效益,是目前经济可行的碳封存途径^[4-7]。

为了响应“双碳”目标,中国已投运和规划建设中的CCUS示范项目规模正逐年扩大^[8-10]。2022年8月,中国首个百万吨级CCUS项目——齐鲁石化-胜利油田项目正式建成投产。华能集团正在建设煤电百万吨级CCUS全流程示范工程,预计建成后可捕集并封存CO₂超过150×10⁴ t/a。中国石油集团正在建设包括大庆油田140×10⁴ t/a和吉林油田100×10⁴ t/a示范工程在内的多个CCUS示范项目,并且与油气行业气候倡议组织(OGCI)共同策划的新疆CCUS产业集群也在推进中,预计2030年驱油利用与封存规模可达千万吨。陕西延长石油集团规划建设500×10⁴ t/a的CCUS项目。2022年6月,广东省发改委、中海油、壳牌与埃克森美孚通过“线上+线下”共同签署大亚湾区CO₂捕集、利用与封存集群项目谅解备忘录,预计年捕集和封存CO₂规模将在千万吨级以上。2022年11月,中国石化将在华东地区启动中国首个开放式千万吨级CCUS项目,为临近工业企业提供一体化CO₂减排方案,合作方有壳牌、中国宝武、巴斯夫公司。

为实现“双碳”目标,碳捕集、利用及封存技术逐渐规模化并商业推广,必须突破CO₂长距离输送技术难题^[11]。中国有关CO₂运输技术的研究刚刚起步,尚没有大规模的CO₂输送管线,而国外在CO₂的管道输送方面已经积累了比较多的经验,并且有超过7 000 km的CO₂输送管线,但CO₂管道输送没有统一的标

准^[12]。鉴于需减少向大气中排放包括CO₂在内的温室气体,中国在CO₂管输技术方面的研究很少,国内各油田陆续进入开发中后期容易开采的原油越来越少等现状,为提高采收率,各油田将CO₂驱作为开发油田的主要接替技术。在此背景下,CO₂长输管道的建设将是解决碳运输必然的选择,在国内有良好的发展前景,且CO₂管道输送技术的研究正是实现运输的关键。目前,国内对管输技术的研究处于起步阶段,物性模拟、水力热力计算、管输相态选取、安全泄放、管材止裂等方面关键技术欠缺。大规模、长距离CO₂管道投运技术,管输增压泵、密相泵等关键设备国产化方面也存在空白。

注采工艺是CO₂驱需优化的关键环节,起着承上启下的作用,具有保证油藏工程方案制定的重要作用,同时还关系到地面工程的建设^[13]。CO₂驱注采井和完井管柱区别于常规管柱,大庆油田在1990年引进了4口注入井和9口采油井的完井管柱,并于1991年开展了CO₂驱先导试验,井场选在萨南东部过渡带,项目进行了接近2年。为生产本土CO₂驱注采井完井管柱,研究人员对管柱及其配套工艺做了大量的工作^[14]。经过长期研究,中国已对CO₂驱注采工艺进行了系统研究与实验,并推广到矿场,进行先导试验。目前中国CO₂驱注采工艺技术处于起步阶段,与发达国家还存在差距。CO₂驱注采井完井管柱的技术关键在于注入井管柱的气密性和采油井管柱的防腐性^[15]。早在2004年中国石化华东油气田研制出国内首套整体式注气管柱,并在5口井进行了先导试验。中国石油大庆油田设计出分体可钻式注气管柱以提高注入井管柱的气密性,密封原理是用液压坐封封隔器,这种方式可以改善封隔器的受力达到密封的作用^[16-17],此类管柱应用于大庆榆树林油田,起到了较好的作用。根据CO₂驱油注采井保护套管的技术思路,华东油气田研制出“分体式采油管柱”^[18],并在草舍油田泰州组油藏CO₂驱先导试验C31等井应用。近年来,国内油田在CO₂腐蚀与防护缓蚀剂上开展了大量科学实验,一系列的高效缓蚀

剂被研制出来,并进行了矿场试验,效果显著^[19-21]。影响防腐效果的因素主要取决于缓蚀剂的配方、含量及其注入工艺。

然而,由于CCUS是复杂的庞大系统工程,涵盖输送—注入—采出—回注等关键环节,传统工艺装备难以支撑CCUS平稳高效运行,且国产化程度低,亟须自主研发输注采关键装备,实现全过程CO₂平稳安全运行。胜利油田百万吨级CCUS工程建设过程中面临长距离管输易相变、注气压力高、采油端气油比高、腐蚀性强等问题,经过持续攻关,胜利油田形成了输注采关键技术。对胜利油田百万吨级CCUS输注采工程工艺与装备技术进行了系统总结与论述,以期为后续CCUS工程建设提供借鉴和指导。

1 长距离CO₂管道安全输送工艺技术

长距离CO₂管道输送受温度、压力、位差、组分等因素影响易发生相变^[22-28],运行过程存在水击、泄漏、腐蚀、水合物堵塞等安全风险,影响CO₂高效安全管输^[29-33]。针对长距离管道输送CO₂容易发生相变的问题^[34],经过持续攻关及工程实践,建立了基于相态控制的长距离CO₂管道安全输送工艺技术。

1.1 基于相态控制的CO₂管输流动保障技术

为了研究CO₂输送管道中微量杂质对CO₂混合物相态的影响,采用蒙特卡洛分子模拟方法建立了含杂质CO₂相关物性与相特性参数库^[35],以立方型状态方程为框架建立CO₂状态和闪蒸计算模型,形成微量杂质扰动下的CO₂混合物相(图1),揭示N₂对CO₂

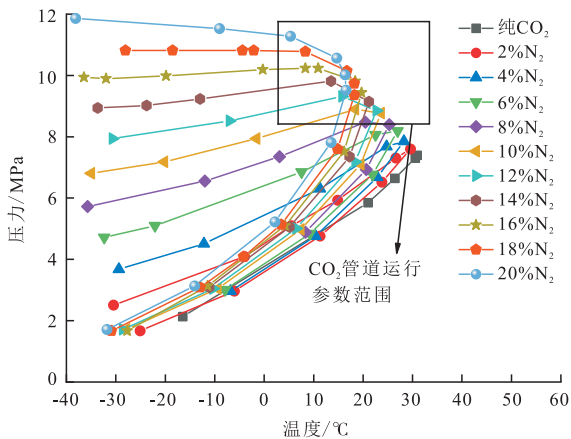


图1 不同杂质含量CO₂混合物相

Fig. 1 CO₂ mixture phase with different impurity contents

物性与相特性的协同作用机制。研究发现,当杂质含量逐渐上升时,含杂质CO₂的两相区域面积增大。根据CO₂管输环境的温压条件,优化控制CO₂密度介于900~1 200 kg/m³,易于保证CO₂相态稳定,实现100 km内压降小于1.0 MPa。

1.2 管道安全泄放与管材止裂技术

在CO₂长距离管输过程中,杂质、温压、地形、操作等要素会诱发CO₂温度和压力波动,接近临界点时,管内气泡不断生成和泯灭,形成冲击性段塞流,管内压力瞬间突变,造成水击和管道震动,管道意外发生泄漏导致管内压力瞬间突变,CO₂快速发生相态变化,从密相转变为气相、液相甚至干冰的多相共存状态,管内产生低温恒压窗口,造成管道冰堵和大范围低温撕裂。

通过开展含杂质CO₂泄放试验,明确了不同CO₂杂质组成以及泄放条件下的流体相变特点和流动参数变化规律,进而明确对管输工艺和管材设备的影响规律,指导放空系统管材选型。在此基础上进行管道安全泄放系统设计,梳理超临界CO₂管道输送过程中面临的超压泄放、紧急泄放、检修泄放场景,制定相应的安全泄放操作与控制流程,指导CO₂管道的安全泄放。

基于天然气管道裂纹扩展控制,考虑CO₂管道和天然气管道的主要区别,结合CO₂管道减压波计算模型对比分析,完成了CO₂管道断裂减压波计算模型优选和含杂质CO₂减压波速度特征调研。在选定减压速率模型算法和关键系数修正基础上,进行止裂韧性评估软件开发,输入条件考虑了介质组分、设计、管材等参数,能够评估管道能否依靠自身止裂,并可以计算出抗延性断裂扩展所需最小的冲击韧性要求。

1.3 CO₂管道泄漏检测与腐蚀防护技术

基于CO₂输送管道泄漏周边温度场及振动场测试分析试验,制定可靠的泄漏监测方案和光缆敷设位置,形成CO₂泄漏检测技术;以超临界CO₂腐蚀机理为基础,由外及里、从局部微观到整体宏观地建立了管道内腐蚀规律与材料组织特性之间的构效关系;充分调研国外标准及工程经验,确定管道干燥指标及干燥介质,降低管道腐蚀风险。

通过埋地CO₂输送管道泄漏试验,得到泄漏点周边温度场以及感温、感振、感声光纤监测数据,明确

了穿硅芯管对光纤检测的影响,验证了感温、感振、感声光纤对泄漏参数表征的适用性,形成了埋地CO₂管道泄漏检测方案。

自主研发了基于多相流的冲蚀试验环道与插入式腐蚀挂片监测探针与测试系统。实现了井下多相流的腐蚀原位监测与相关测试系统的国产化,为超临界CO₂腐蚀监测打下坚实基础;开发了基于油田采出液与井口装置的多相流试验环道平台,可实现模拟油田采出液对管路的腐蚀行为研究,相关技术可应用于超临界CO₂宏观腐蚀行为的研究。

1.4 CO₂管输增压泵

针对增压过程温压变化大、CO₂比热小、润滑性差等问题,在离心泵结构优化的基础上,重点优化增压比和流道结构来控制流速,控制增压过程中的焓焓变化来控制升温过程,同时选用自润滑性强且溶胀性低的聚醚醚酮(PEEK)复合材质,解决了易相变、自润滑性差等问题。CO₂管输增压泵的排量125 m³/h,扬程1 km,与国外相比节能10%,投产后运行稳定,运行效率达到72%(国外同类泵在65%左右),优于设计指标(图2)。

创建离心泵内部流动的CO₂水热力学计算和焓焓控制模型,建立最优增压比以及温控界限、回流控制的计算方法,创新镶嵌式蜂窝状口环结构和泵轴系自平衡型结构,保证离心泵获得优越输送效率和增压过程中的振动精准控制。设计多重机械密封冲洗系统、动压性循环隔离液循环压力在线监测系统、隔离液泄漏收集装置,自动判别机械密封运行状态,确保输送介质CO₂和隔离液“双零”泄漏。CO₂管道输送增压泵额定出口压力12 MPa,额定排量125 m³/h,

额定效率不小于72%,振动位移0.6~1.3 mm,实现平稳高效运行。

2 CCUS地面注入工程技术

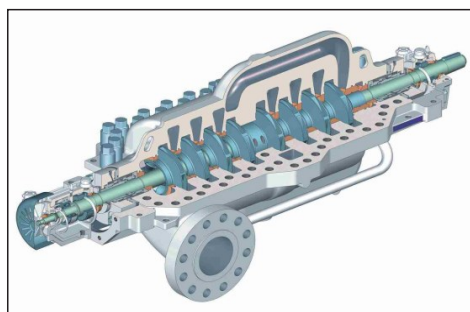
国内外地面注入工艺不足主要表现为:固定注入模式不适应区块条件,在用CO₂储罐不合理,稳定供液能力不足,增压工艺复杂且效率低,注入系统易气化,多井同注流量分配不平衡等问题。为满足油田大排量CO₂注入的需要,本着简单、快捷、高效的原则,完成了注入设备的模块化、系列化研发工作,并自主研发了国内首台套CO₂高压密相注入泵及低温密闭注入泵。

2.1 标准化建设模式

形成模块化设计、系列化装备、自动化配套、标准化制造模板:①根据注入流程的特点,将系统分成存储、注入、计量控制3个模块,3个模块单独成撬,可以灵活组合;②设计多种排量的注入模块,配套形成注入能力互相覆盖、互相补充的系列化注入系统,满足区块注入多样化需求;③每个模块集成自动化、信息化功能,实现数据采集远传,自动控制;④采用统一的尺寸外形,标准的接口和组件,实现标准化制造与快速拆装,便于管理维护。

2.2 撬装多井式计量调流装置

创新体积流量的全相态CO₂温压密度补偿算法、CO₂偏流控制技术,研发撬装多井式计量调流装置,计量误差小于7%,实现多井精准计量与分配,解决了一泵对多井同时注入的难题,填补了国内在该领



a.CO₂管输增压泵结构



b.CO₂管输增压泵照片

图2 CO₂管输增压泵

Fig. 2 CO₂ pipeline booster pump

域装备应用的空白。该装备配合管道CO₂运输,实现管道与井口注入无缝连接。目前26台设备同步运行,整体运行平稳。

2.3 高压CO₂密相注入泵

CO₂在高压注入过程中存在以下挑战:①温压上升快,CO₂管道出口端压力为9 MPa,假如将CO₂注入地层,需要增压到40 MPa,压力增加3倍以上,此过程CO₂的温度由20℃快速上升到40℃,CO₂由密相状态快速转变为超临界状态;②超临界CO₂具有较大的压缩性,在柱塞泵往复运行过程中CO₂会被反复压缩,占据一定体积的泵腔,使得进入泵的密相CO₂量少,呈现出较强的气缚现象,泵效低;③高压下泵的密封难度大,同时柱塞两端压差大、易气化。

针对上述难题,胜利油田经过持续攻关,研发了国内首台套CO₂高压密相注入泵。通过采用变直径的柱塞结构和低转速控制技术,缩小柱塞远端冲程与气缸端部空间间隙,最大限度地减少增压过程中的气缚现象。采用聚醚醚酮(PEEK)抗溶胀密封复合材料,泵头加装了高压气液分离装置,解决高压超临界CO₂密封问题,实现了全过程高效密闭注入。设计特定结构的压力平衡管,把一部分高压端的气体引入低压端,解决了压力变化大、易气化的问题。该注入泵实现了CO₂密相状态下高压(40 MPa)稳定注入,矿场试验泵容积效率90%以上,填补国内在该领域装备应用的空白。

3 CO₂注采工艺技术

注采工程是CCUS的关键技术环境,CO₂驱油与封存注采工艺主要面临高压下安全注入困难、高气油比条件下举升效率低、高温高盐复杂条件下腐蚀控制难度大、产出气处理效率低等问题。胜利油田通过室内研究及矿场试验,自主研发了免压井安全注气管柱、CO₂驱多功能采油管柱、CO₂驱腐蚀防护、产出气回收回注等注采配套工程工艺技术,为深层低渗透油藏CO₂高压混相驱油与封存提供支撑。

3.1 免压井安全注气管柱

当注气井转为生产井或其他原因需要更换管柱时,由于CO₂具有较高的膨胀性使施工过程存在较大安全隐患,因此设计出了免压井安全注气管柱。在

免压井注气管柱中反洗阀的功能是在正常注气时保持油管连通和环空关闭,而在反洗井时反洗阀通过与环空连通可以替换保护液;水力锚的功能是锚定管柱;密封插头的组成包括插头及“O型”圈,主要作用是与回接筒配套,把丢手管柱与密插管柱连接起来,并能发挥密封的功能;蝶阀的工作规律是当有上部外力作用时,蝶板可翻转一定角度,进而实现内部的连通,当施加在蝶板的外力消除后,在弹簧力的作用下蝶板可以恢复原状,进而实现井内气体密封。

免压井安全注气管柱主要有4个特点:①运用锚定式管柱结构,可避免管柱蠕动,保障正常进行注气作业,同时对丢手管柱上部套管进行保护;②可用于反洗井作业时更换环空保护液,当含有缓蚀剂的环空保护液注入油套环空时,利用反洗阀液体可以直接进入油管,然后通过油管返出井筒,进而起到保护油层的作用;③利用分体式丢手结构,在上部注气管柱需要更换时,不需要起出下部丢手管柱;④利用多功能注气阀和蝶阀单向阀可以保障上部管柱不压井作业。

3.2 CO₂驱多功能采油管柱

生产井采用CO₂驱开发时,随着开采时间的增加,气窜和结垢等问题会逐渐出现,按照油藏工程方法进行计算,见气时间因生产井不同而不同。针对不同阶段见气情况,同时考虑后期方便换泵换管,设计了兼具高气油比、丢手、关闭等功能作用的采油管柱(图3),该管柱可以实现高气油比深抽、腐蚀监测、

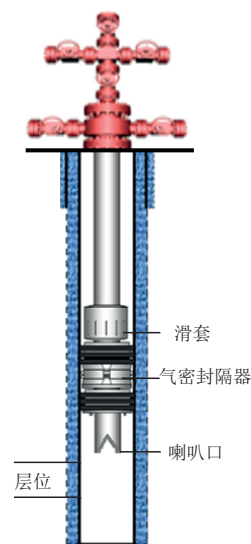


图3 采油管柱结构

Fig. 3 Structure of oil recovery pipeline

实时测压、油层保护、安全作业等。其适用条件为：井径介于121~125 mm,井深不大于3 500 m,油藏压力不大于30 MPa,油藏温度不高于150 °C。

3.3 CO₂驱腐蚀防护配套技术

油田开发过程中,腐蚀是造成油管穿孔、断脱失效的主要原因之一。在含水及CO₂酸性环境下,钢铁腐蚀程度加剧,腐蚀速率可高达20 mm/a。随着CO₂驱油与封存矿场规模不断扩大,生产井产出气中CO₂含量变得越来越高,大量油管因腐蚀问题而失效。CO₂驱油过程中的管柱腐蚀受多种因素影响,主要包括管材成分、CO₂分压、含水率、pH值、温度、原油性质、多相流体的流速与流态等因素。根据腐蚀的形式可分为全面腐蚀和局部腐蚀2类。室内实验研究表明:当含水小于30%时,管材轻度腐蚀;当含水介于30%~50%时,腐蚀形式由均匀腐蚀转变为局部腐蚀,注采管材腐蚀速度随温度增加先增大后减小,在50~80 °C达到最大值。随CO₂分压增加,包括N80、J55、25CrMnVA在内的不同管材钢种腐蚀速率整体上呈曲折上升的趋势,这主要由于随着CO₂分压增加,CO₂在介质中溶解量增加,CO₂与水反应生成的碳酸量增加,氢离子去极化腐蚀作用增强,腐蚀反应速率加快。

基于腐蚀机理研究,形成以添加缓蚀剂为主、耐蚀材料为辅的油井防腐配套技术,优化了油井添加缓蚀剂防腐工艺。采用计量泵加注缓蚀剂或光杆控制柱塞泵加注缓蚀剂的方式,满足井口压力高于大气压力时的缓蚀剂加注需求。举升管柱尾管下到油层以下,使缓蚀剂能流到油层部位,保护泵以下的套管。井口连续监测Fe²⁺含量、缓蚀剂残余含量,根据监测结果调整缓蚀剂注入质量分数、加注量。缓蚀剂溶液的运动黏度一般应小于2 mm²/s。预膜的质量分数为最佳加药质量分数的5~7倍。在超临界CO₂环境下,碳钢表面的过剩电荷由负转正,常规阳离子咪唑啉CO₂缓蚀剂的缓蚀性能显著下降;原油与咪唑啉类缓蚀剂具有协同作用,能显著增强套管钢表面的疏水性,从而显著提升缓蚀剂缓蚀性能;常规咪唑啉缓蚀剂在高温CO₂体系会失效,是由于高温下咪唑啉部分水解,碳钢表面快速形成的腐蚀产物层阻碍了缓蚀剂的吸附。在130 °C条件下,研发的缓蚀剂含量100 mg/L时,管材钢种N80的腐蚀速率低于0.076 mm/a,缓蚀效率为91%。

3.4 CO₂驱采出液回收处理工艺技术

通过分析含CO₂原油发泡理论机理,微观分析含CO₂原油的泡沫特性、演变过程等,研究不同内部结构部件对分离效率的影响,形成了气液分离及原油密闭脱碳技术。采出油采用“热化学沉降脱水+微正压密闭脱碳”工艺,最大限度脱除原油中溶解CO₂;采出水采用气提脱碳工艺,脱除采出水中溶解CO₂量不大于50 mg/L,用于油田开发。通过分析饱和烃组分以及大分子沥青质、胶质等对乳状液稳定性的影响,确定主要的影响因素并分析稳定机理;从破乳剂加入后,乳状液中粒径增长及迁移规律、界面张力、界面膜强度(界面黏度及界面黏弹性)等方面研究破乳剂的作用机理,形成了适用于CO₂驱采出液的高效破乳剂,游离态CO₂脱除率90.3%,游离水脱除率小于90%,水中含油率小于500 mg/L;通过分析高含CO₂采出水的特性,分析采出水中CO₂含量、压力、温度、矿化度对腐蚀速率的影响规律,形成了采出水高效气提脱碳技术,采出水处理后游离CO₂含量不大于25 mg/L;通过对压缩机基本工作特性研究,总结压缩机主机与机组系统设计关键技术要点、机组系统控制与保护工作逻辑、级间相态控制与稳压匹配手段,形成了伴生气高效处理技术,伴生气处理及回注装置适用的CO₂含量介于30%~95%。采出气高含CO₂,开发形成变压吸附脱碳、低温液化精馏、直接增压回注的产出气再利用工艺,实现产出气100%回收再利用,提高CO₂利用率。

针对产出气处理成本高、处理工艺复杂多样、产出气规模和CO₂含量差异的问题,形成低成本、规模化的地上地下一体化产出气回收利用技术。采出液实现全程密闭集输与处理,确保“油不落地,水不外排,气不上天”。目前,上述技术已在胜利油田高89—樊142地区CO₂驱油与封存示范工程、广利油田莱113块沙四上段CO₂驱提高采收率先导试验工程等项目上进行应用,其中高89—樊142项目已投入运行,运行状况良好。

4 胜利油田百万吨级CCUS示范工程

2022年8月,中国石化建设的首个百万吨级CCUS全产业链示范工程在胜利油田高89—樊142地区注气投产全面建成,该工程是集CO₂捕集工程、

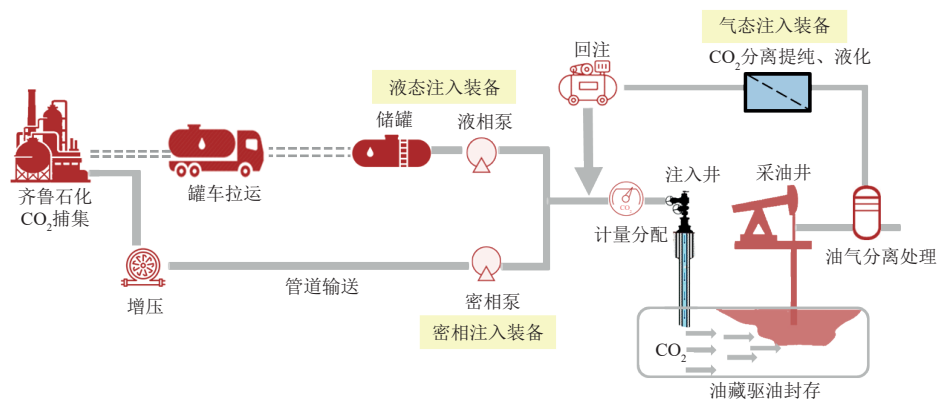


图4 胜利油田百万吨级CCUS示范工程流程

Fig. 4 Process of million-ton level CCUS demonstration project of Shengli Oilfield

管输工程、注入装备、驱油封存、注采工艺、集输回注为一体的多领域、多节点的系统工程, 工程流程如图4所示。

该工程建成国内最长超临界压力CO₂长输管道, 补齐了中国CCUS全链条规模化技术短板, 减少车辆运输4×10⁴辆次, 单位距离运输成本降低35%, 减少天然气约200×10⁴ m³。安全注气管柱可满足50 MPa高压注入需求, 平均有效期提高5.8倍, 矿场累计实施88井次。高气液比井防气提效举升技术实施68口井, 平均气油比130 m³/m³, 平均泵效35.1%, 比示范区常规机抽管柱泵效提高6%, 满足目前见气机抽井举升需求。

地面工程以“清洁低碳、安全环保”为原则, 按照“五化建设”标准, 提升工程建设水平。其中注入系统依托现有井场, 无新增征地, 新建15座注入站; 采用撬装化装备, 实现快速搬迁安装; 打造区域信息化指挥中心, 实现集中监控、无人值守、机动维保。集油系统依托现有站场, 东西分设2座区域中心, 原油就近插输; 采出气液实现全过程密闭集输与处理, 确保“油不落地、气不上天、水不外排”。伴生气脱水后, 通过注气压缩机回注至正南油田。预计CO₂一次封存率60%~70%, 二次封存率达90%以上, 多次循环回注, 可实现CO₂封存。同时完成监测点位布设504个, 获取了注入井、油井、管线等周边大气、土壤气、浅层地下水环境监测值2000多个, 为CO₂泄漏评估提供数据支撑。

2022年8月25日, 国内首个百万吨级CCUS示范工程全面建成投产。示范区目前平均注气压力29 MPa, 日注气量(0.12~0.18)×10⁴ t, 累计注气量

55.4×10⁴ t, 日产油量331 t, 产量稳中有升, 含水保持平稳, 各环节运行良好, 环境监测无异常, 实现“平稳、安全、高效、绿色”运行。

5 结论

胜利油田百万级CCUS工程建设过程中面临长距离管输易相变、注气压力高、采油端气油比高、腐蚀性强等问题, 经过持续攻关, 胜利油田形成了输注采关键工程技术, 支撑了百万吨级CCUS示范工程建设, 为CCUS规模化推广奠定了良好基础。

1) 针对压损温差带来的CO₂相变、长距离泄漏风险, 建立了基于相态控制的长距离CO₂管道安全输送工艺技术, 实现高效经济输送。研发了国内首台套管道输送泵, 建成了国内最长的超临界压力CO₂长输管道, 补齐了中国CCUS全链条规模化技术短板。

2) 为满足示范工程大排量CO₂高压注入的需要, 完成了注入设备的模块化、系列化研发, 研发了国内首台套高压密相注入泵, 实现了高效注入。

3) 针对CCUS示范区注气压力高、气液比高、腐蚀强等问题, 研发了免压井安全注气管柱、CO₂驱多功能采油管柱、CO₂驱腐蚀防护和产出气回收回注工艺技术, 实现了高效安全注入和长效腐蚀防护。

4) 建成了中国首个集CO₂管输工程、注入装备、驱油封存、注采工艺、集输回注为一体的, 多领域、多节点的CCUS示范工程, 目前各环节运行良好, 实现“平稳、安全、高效、绿色”运行。

参考文献

- [1] 施雅风. 全球和中国变暖特征及未来趋势[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 5-14.

- SHI Yafeng. Features and tendency of global warming and its implications for China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(2): 5-14.
- [2] 王嘉豪, 黄季夏, 杨林生, 等. 环北极地区自然灾害多尺度时空格局分析[J]. *灾害学*, 2023, 38(2): 226-234.
- WANG Jiahao, HUANG Jixia, YANG Linsheng, et al. Multi-scale temporal and spatial pattern analysis of natural disasters in the circum-Arctic region[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(2): 226-234.
- [3] AALST M K V. The impacts of climate change on the risk of natural disasters[J]. *Disasters*, 2010, 30(1): 5-18.
- [4] 杨美娟. 欧盟温室气体减排政策的发展及其成效[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- YANG Meijuan. The development and effect of European Union's policy on reducing greenhouse gas emission[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [5] HAUGEN H A, ELDRUP N, BERNSTONE C, et al. Options for transporting CO₂ from coal fired power plants case Denmark[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1665-1672.
- [6] HASAN M M F, ZANTYE M S, KAZI M K. Challenges and opportunities in carbon capture, utilization and storage: A process systems engineering perspective[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2022, 166: 107925.
- [7] MCCOY S T, RUBIN E S. An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂, with application to carbon capture and storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2(2): 219-229.
- [8] 顾永正, 王天堃, 黄艳, 等. 燃煤电厂二氧化碳捕集利用与封存技术及工程应用[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(4): 98-108.
- GU Yongzheng, WANG Tiankun, HUANG Yan, et al. Carbon dioxide capture, utilization and storage technology and engineering application for coal-fired power plants[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(4): 98-108.
- [9] 费维扬, 艾宁, 陈健. 温室气体CO₂的捕集和分离——分离技术面临的挑战与机遇[J]. *化工进展*, 2005, 24(1): 1-4.
- FEI Weiyang, AI Ning, CHEN Jian. Capture and separation of greenhouse gases CO₂: The challenge and opportunity for separation technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2005, 24(1): 1-4.
- [10] 韩学义. 电力行业二氧化碳捕集、利用与封存现状与展望[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(2): 110-117.
- HAN Xueyi. Current situation and prospect of carbon dioxide capture, utilization and storage in electric power industry[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2020, 38(2): 110-117.
- [11] 王喜平, 唐荣. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存商业模式与政策激励研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(8): 29-41.
- WANG Xiping, TANG Rong. Research on business model and policy incentives for carbon capture, utilization and storage in coal-fired power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(8): 29-41.
- [12] 李娜娜, 赵晏强, 秦阿宁, 等. 国际碳捕集、利用与封存科技战略与科技发展态势分析[J]. *热力发电*, 2022, 51(10): 19-27.
- LI Nana, ZHAO Yanqiang, QIN Aning, et al. Analysis of international carbon capture, utilization and storage strategy and scientific development trend[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(10): 19-27.
- [13] 桑树勋, 刘世奇, 陆诗建, 等. 工程化CCUS全流程技术及其进展[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(5): 711-725.
- SANG Shuxun, LIU Shiqi, LU Shijian, et al. Engineered full flowsheet technology of CCUS and its research progress[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(5): 711-725.
- [14] 张绍辉, 王凯, 王玲, 等. CO₂驱注采工艺的应用与发展[J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(6): 869-875.
- ZHANG Shaohui, WANG Kai, WANG Ling, et al. Development and application of CO₂ flooding[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(6): 869-875.
- [15] 刘建新, 田启忠, 张瑞霞, 等. 耐CO₂腐蚀油井管材的选用[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2012, 24(1): 77-78.
- LIU Jianxin, TIAN Qizhong, ZHANG Ruixia, et al. Selection of CO₂ resistant oil well tubing[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2012, 24(1): 77-78.
- [16] 关宏业. CO₂驱配套采油工艺设计及问题的解决思路[J]. *内蒙古石油化工*, 2013, 23(22): 48-50.
- GUAN Hongye. Design of CO₂ flooding supporting oil recovery process and problem-solving ideas[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2013, 23(22): 48-50.
- [17] 熊涛. 榆树林油田CO₂驱采油配套工艺[J]. *油气田地面工程*, 2013, 23(5): 49.
- XIONG Tao. CO₂ flooding oil recovery supporting technology in Yushulin Oilfield[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2013, 23(5): 49.
- [18] 俞凯, 刘伟, 陈祖华, 等. 陆相低渗油藏CO₂混相驱技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2015.
- YU Kai, LIU Wei, CHEN Zuhua, et al. CO₂ miscible flooding technology for low-permeability terrestrial reservoirs[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2015.
- [19] 张燕芬, 刘鹤鸣. 国内外油气井抗CO₂腐蚀缓蚀剂的研究进展[J]. *石油和化工设备*, 2007, 10(4): 53-57.
- ZHANG Yanfen, LIU Heming. The research and developing situation of carbon dioxide corrosion inhibitor used for oil and gas field[J]. *Petro & Chemical Equipment*, 2007, 10(4): 53-57.
- [20] 王林海, 沈靖, 孙爱平. 南海西部某气田防CO₂腐蚀缓蚀剂研发[J]. *全面腐蚀控制*, 2010, 24(11): 21-25.
- WANG Linhai, SHEN Jing, SUN Aiping. Anti-CO₂ corrosion inhibitor development of a western South China Sea gas field[J]. *Total Corrosion Control*, 2010, 24(11): 21-25.
- [21] 舒作静, 刘志德, 谷坛. 气液两相缓蚀剂在油气田开发中的应用[J]. *石油与天然气化工*, 2001, 30(4): 200-201.
- SHU Zuojing, LIU Zhide, GU Tan. Application of gas-liquid two-phase corrosion inhibitors in oil and gas field development[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2001, 30(4): 200-201.
- [22] CLAUSEN S, OOSTERKAMP A, STRØM K L. Depressurization of a 50 km long 24 inches CO₂ pipeline[J]. *Energy Procedia*, 2012, 23: 256-265.
- [23] WIEBE R, GADDY V L. Vapor phase composition of carbon dioxide-water mixtures at various temperatures and at pressures to 700 atmospheres[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1941, 63(2): 475-477.

- Engineering, 2018(3): 125-129.
- [18] XING D S, SHEN J Y. A new Markov model for web access prediction[J]. *Computing in Science & Engineering*, 2002, 4(6): 34-39.
- [19] 娄彦江, 马艳丽, 韩丽飞. 基于马尔科夫链的区域综合交通客运结构预测[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2012, 12(3): 1-5
LOU Yanjiang, MA Yanli, HAN Lifei. Regional integrated passenger transport structure prediction based on Markov chain [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2012, 12(3): 1-5.
- [20] 靳春玲, 王运鑫. 基于灰色马尔科夫模型的突发水污染事故预测[J]. *兰州交通大学学报*, 2018, 37(2): 110-115.
JIN Chunling, WANG Yunxin. The prediction of sudden water pollution accident based on gray Markov model[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2018, 37(2): 110-115.
- [21] SHEN F S. Prediction of farmland irrigation water demand by grey GM(1, 1) model[J]. *Water Resources Protection*, 2007, 23(3): 33-35.
- [22] UMURZAKOV U P. Prediction of prices for agricultural products through Markov chain model[J]. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 2020, 24(3): 293-303.
- [23] 王伟民, 汪沅, 张国安. 基于灰色马尔科夫模型的全国卷烟需求预测研究[J]. *中国烟草学报*, 2009, 15(6): 66-69.
WANG Weimin, WANG Yun, ZHANG Guoan. Grey Markov predicting in the analysis of cigarette demand in China[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2009, 15(6): 66-69.
- [24] 陈飞宇, 董利飞, 王苗, 等. 基于灰色马尔科夫模型的地基承载力预测[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 222-227.
CHEN Feiyu, DONG Lifei, WANG Miao, et al. Prediction of foundation bearing capacity based on grey Markov model[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 222-227.
- [25] 赵振武, 麻建军. 基于灰色马尔科夫模型的机场安检危险品数量预测[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(1): 51-53.
ZHAO Zhenwu, MA Jianjun. Prediction of the amount of dangerous goods to be inspected by the airport security department via the grey Markov model[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(1): 51-53.
- [26] WANG X, PAN L, WU K Q, et al. Experiment based modeling of CO₂ solubility in H₂O at 313.15 ~ 473.15 K and 0.5 ~ 200 MPa[J]. *Applied Geochemistry*, 2021: 105005.
- [27] WANG J L, HE B B, XIE L F, et al. Determination of CO₂ solubility in water and NaCl solutions under geological sequestration conditions using a fused silica capillary cell with in situ Raman spectroscopy[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2019, 64(6): 2484-2496.

(编辑 尹淑容)

(上接第17页)

- [24] VESOVIC V, WAKEHAM W A, OLCHOWY G A, et al. The transport properties of carbon dioxide[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1990, 19(3): 763-808.
- [25] 吕家兴, 侯磊, 吴守志, 等. 含气体杂质超临界CO₂管道输送特性研究[J]. *低碳化学与化工*, 2020, 45(5): 77-82.
LU Jiaying, HOU Lei, WU Shouzhi, et al. Research on impact of gas impurities on pipeline transportation characteristics of supercritical CO₂[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2020, 45(5): 77-82.
- [26] BUIT L, AHMAD M, MALLON W, et al. CO₂ EuroPipe study of the occurrence of free water in dense phase CO₂ transport[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4(22): 3056-3062.
- [27] AURSAND P, HAMMER M, MUNKEJORD S T, et al. Pipeline transport of CO₂ mixtures: Models for transient simulation[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 15(3): 174-185.
- [28] MAHGEREFTEH H, BROWN S, MARTYNOV S. A study of the effects of friction, heat transfer, and stream impurities on the decompression behavior in CO₂ pipelines[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2012, 2(5): 369-379.
- [29] 孔韦海, 艾志斌, 胡盼, 等. L320原油输送管道静置段的腐蚀机理[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(7): 502-506.
KONG Weihai, AI Zhibin, HU Pan, et al. Corrosion mechanism of the stationary section of L320 crude oil pipeline[J]. *Corrosion and Protection*, 2019, 40(7): 502-506.
- [30] SIM S, COLE I S, CHOI Y S, et al. A review of the protection strategies against internal corrosion for the safe transport of supercritical CO₂ via steel pipelines for CCS purposes[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 29(29): 185-199.
- [31] KING G G, KUMAR S. Designing CO₂ transmission pipelines without crack arrestors[C]// *Symposium on 2010 8th International Pipeline Conference*, September 27-October 1, 2010, International Petroleum Technology Institute and the Pipeline Division, Calgary, Alberta. New York: ASME, 2010: 923-934.
- [32] GALE J, DAVISON J. Transmission of CO₂-safety and economic considerations[J]. *Energy*, 2004, 29(9): 1319-1328.
- [33] ZHAO Q, LI Y X, LI S L. Safety control on the choking process of supercritical carbon dioxide pipeline[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014: 1-10.
- [34] 刘敏. 超临界二氧化碳管道输送瞬变特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
LIU Min. The transient characteristics of supercritical carbon dioxide pipelines[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [35] 吴其荣, 陶建国, 范宝成, 等. 燃煤电厂开展大规模碳捕集的技术路线选择及经济敏感性分析[J]. *热力发电*, 2022, 51(10): 28-34.
WU Qirong, TAO Jianguo, FAN Baocheng, et al. Technical route selection and economic sensitivity analysis of large-scale carbon capture in coal-fired power plant[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(10): 28-34.

(编辑 黄颖)