

# 基于 CCUS 的二氧化碳无水压裂与驱油技术 体系设计及产业化应用研究

祁贤业, 姚孔, 袁小萌, 郭蕴瑾, 汪可

(兰州资源环境职业技术大学智能制造学院, 甘肃 兰州 730123)

**摘要** 碳捕集、利用与封存(CCUS)技术作为一种重要的碳减排手段,通过捕集工业排放的二氧化碳并将其用于油气开采,从而实现油气资源高效开发与碳封存的双重目标。二氧化碳无水压裂技术利用液态二氧化碳替代传统水基压裂液,通过高压注入地层形成裂缝,建立油气渗流通道,提高原油产量。二氧化碳驱油技术则通过降低原油黏度、增加地层弹性能量,提升原油采收率。重点对二氧化碳无水压裂及驱油技术的工艺装备配置、装备参数、工艺参数、实施流程进行详细设计,并从二氧化碳捕集、处理、运输、封存与利用全流程建立 CCUS 在油气开采行业的技术体系架构。在东北某页岩油平台和新疆某油田的技术应用验证表明:二氧化碳无水压裂后,原油产量比作业前提高 1.5 倍以上,二氧化碳有效封存量占注入量的 65%;二氧化碳驱油后,采收率可达到 28%,是注水驱油的 2 倍,封存二氧化碳约占注入量的 85%左右。两项技术在提高油气采收率的同时,有效降低了碳排放,产业化应用前景广阔。

**关键词** CCUS 技术 二氧化碳无水压裂 二氧化碳驱油 提高采收率 碳封存 产业化应用

## 1 前言

面对全球气候变化挑战的不断升级,碳排放控制已成为国际社会的核心议题。作为全球能源消费的主要国家之一,中国在降低碳排放方面肩负着重大责任<sup>[1]</sup>。为实现这一目标,中国政府和企业正致力于研究和推广多种碳排放控制技术,在此大背景下,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术备受关注。尤其是在油气行业,CCUS 技术通过实施二氧化碳(CO<sub>2</sub>)无水压裂和二氧化碳驱油技术手段,不仅有效降低了碳排放,还大幅提升了油气资源的开采效率,对于我国能源战略的成功实践具有重大现实意义<sup>[2]</sup>。

二氧化碳强化油气开采技术的核心在于将二氧化碳注入油气藏,借助其与原油及天然气的物理和化学反应,在提高油气产量的同时实现二氧化碳的持久封存<sup>[3]</sup>。该技术通过增加油藏压力、减小原油黏度与密度,大幅提升了油气产量和采收率,同时为油气开采行业带来了显著的经济和环境收益。

与传统开采方法相比,二氧化碳无水压裂和二氧化碳驱油技术不仅提升了油气资源开采效率,更在封存二氧化碳方面发挥了地质优势,有效阻断了二氧化碳与大气之间的长期交互,在降低碳排放方

面发挥了极其重要的作用。本文重点聚焦二氧化碳强化开采技术中的无水压裂以及二氧化碳驱油技术,探讨其工艺装备的构成与工艺应用技术体系的建立,旨在推进 CCUS 技术在油气开采领域的广泛深入应用。这不仅有助于确保国家能源安全,更是对“双碳”战略的积极响应,也是对提升油气采收率的积极探索和实践<sup>[4,5]</sup>。

## 2 油气 CCUS 技术体系构建

CCUS 技术通过一系列技术手段,将二氧化碳从工业排放源头捕集,然后加以利用或者封存于地下,以减少二氧化碳排放量,从而达到减缓气候变化的目的。

### 2.1 二氧化碳捕集

利用高效装置与工艺,对钢铁厂、化肥厂、发电厂及化工厂等排放源排放的二氧化碳进行有效捕

**基金项目:** 2024 年度兰州资源环境职业技术大学校级科研能力提升计划项目“CCUS 在油气开采领域中的技术研究与应用”(编号: X2024A-35)。

**作者简介:** 祁贤业,副教授,2008 年毕业于兰州理工大学机械设计制造及其自动化专业,主要研究方向为产品数字化设计与制造。

**通讯作者:** 姚孔。E-mail: yaokongnewemail@163.com

获并收集。

## 2.2 二氧化碳处理与运输

对捕集的二氧化碳进行分离、压缩及提纯,通过专用管道或二氧化碳槽车或储罐车进行集输,运输到油气田施工区域。

## 2.3 二氧化碳封存与利用

① 二氧化碳无水压裂技术。将捕集的二氧化碳通过集输管道或二氧化碳槽车运输到油气井区域,二氧化碳替代传统水基压裂中的水基压裂液,通过压裂成套装置增压,将二氧化碳注入地层。二氧化碳在地层中会形成泡沫或干冰,借助二氧化碳能量使地层产生裂缝,沟通油气储集层,建立油气高效导流通道,从而提高油气藏的渗透性,降低油

气流动阻力,最终有效提升油气采收率<sup>[6,7]</sup>。

② 二氧化碳驱油技术。通过向地下油藏注入二氧化碳,实现降低原油黏度、增加原油体积膨胀、提高原油采收率等多重效应,从而达到油田增产的目的。将捕集的二氧化碳送入压缩机组,压缩至所需的压力和温度,通过注射泵装置将二氧化碳注入油井,有效提升原油的流动性,使得原本难以开采的原油得以有效开采<sup>[8,9]</sup>。同时,二氧化碳还能永久滞留地下,实现减碳固碳的环保目标。相较于传统的水驱方式,二氧化碳驱油技术具有更高的效率和更低的成本。

建立油气二氧化碳利用与封存的CCUS技术体系架构,如图1所示。

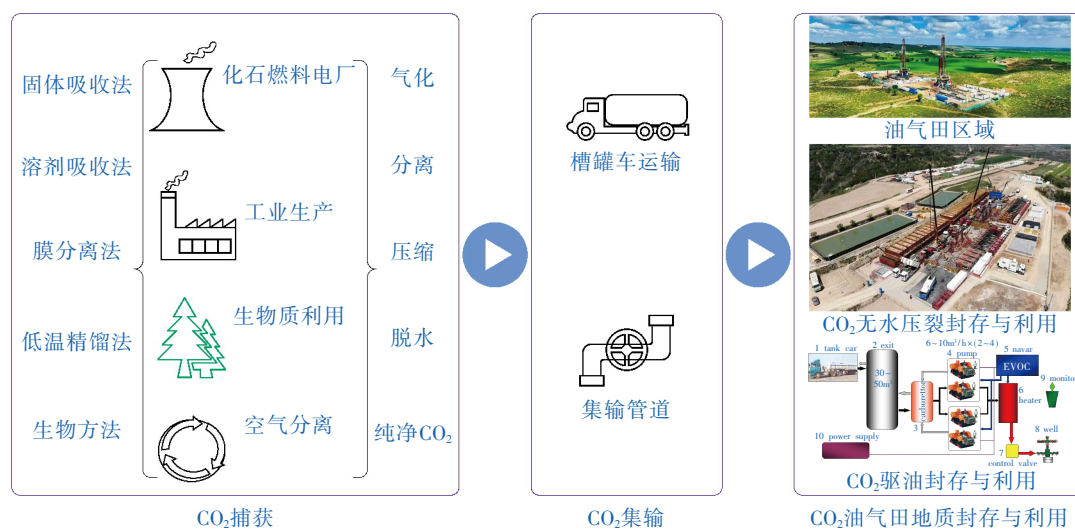


图1 油气二氧化碳利用与封存的CCUS技术体系架构

## 3 二氧化碳无水压裂工艺装备技术设计

纯液态二氧化碳无水压裂技术充分利用临界态二氧化碳作为压裂破岩介质,初始将石英砂支撑剂增压冷却至纯液态二氧化碳的槽罐或静态储罐下的压力和温度,然后通过密闭混砂装置将石英砂支撑剂预冷及与纯液态二氧化碳充分均匀混合,最后用高压压裂柱塞泵注入井筒进行施工作业。

### 3.1 工艺装备技术设计

依据油气绿色开发要求,建立绿色低碳环保装备体系。

① 二氧化碳槽罐:根据油气井作业设计流量,配置30m<sup>3</sup>槽罐车5台以及50m<sup>3</sup>静态储罐10套,槽罐车、静态储罐集输储存一定压力和温度的纯液

态二氧化碳,二氧化碳温度和压力保持在-34.4℃和1.45MPa。

② 二氧化碳增压泵装置:将1.45MPa纯液态二氧化碳加压至2~2.2MPa,要求每台增压泵装置流量不低于2m<sup>3</sup>/min,配置2台。主要包括橇体、电动机、柱塞增压泵、气液分离装置、吸入和排出管汇、润滑系统、控制系统等组件。

③ 密闭混砂装置:纯液态二氧化碳无水压裂的核心关键装置,密闭承压容器,实现石英砂支撑剂与纯液态二氧化碳的充分均匀混合,耐受压力达到2.3MPa以上、容积2.65m<sup>3</sup>、最大输砂速率3000kg/min。设备组成包括橇体、电动机、密闭承压容器、输砂装置、二氧化碳输送管汇、控制系统等组件。

④ 柱塞泵装置:2800hp(1hp≈0.7457kW)压裂柱塞泵,将纯液态二氧化碳增压至50~70MPa注入油气井,要求单台输出水功率<1862kW(2500hp),施工总流量不低于8m<sup>3</sup>/min,配置数量≥8台。设备包括橇体、电动机、高压变频器、柱塞泵、润滑系统、吸入和排出管汇等组件。二氧化碳具有低温、高压、单位能量密度高等特点,柱塞泵使用高强度耐低温密封圈。

⑤ 管汇装置:根据纯液态二氧化碳吸入与排出的压力和流量要求,配置低温低压、低温高压管汇。

### 3.2 工艺技术方案设计

① 根据施工流量设计,将二氧化碳动态槽罐车和静态储罐并联,依次与二氧化碳增压泵装置、密闭混砂装置、高压压裂柱塞泵增压装置、压裂管汇及井口装置连接,通过仪表与上述各装置通信并控制和监督作业工作状态。

② 通过输砂装置将石英砂支撑剂输送到密闭混砂承压容器中,同时注入液态二氧化碳对石英砂进行充分预冷。

③ 对高压管汇、井口采油树输入装置通过高压压裂泵进行试压,同时对二氧化碳低压管汇进行试压。

④ 纯液态二氧化碳以-25~-15℃的温度、50~70MPa的压力注入油气地层,使底层破岩建立油气渗流裂缝网,接下来开启密闭混砂装置注入石英砂支撑剂,石英砂顶替并支撑裂缝,预防底层应力使裂缝闭合,石英砂完全进入地层后,高压柱塞泵停止作业。

⑤ 作业结束后,关井2~3h。

⑥ 二氧化碳返排:需精准控制二氧化碳返排速率,预防石英砂回流,利用二氧化碳检测仪监测出口二氧化碳浓度变化。

⑦ 对于返排的二氧化碳重新进行捕集,用于循环重复作业。通过测试评估,纯液态二氧化碳无水压裂后的二氧化碳返排体积量占到作业总体积的65%~75%,封存在井下的二氧化碳体积量占比为25%~35%。

建立纯液态二氧化碳无水压裂工艺装备技术体系,如图2所示。

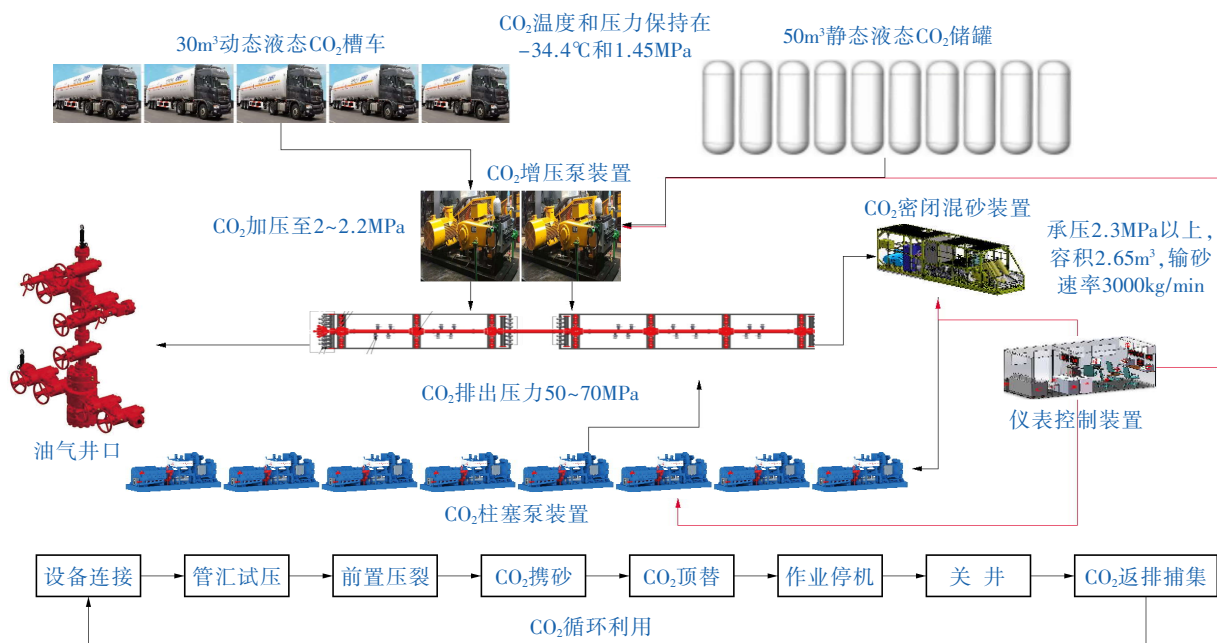


图2 纯液态二氧化碳无水压裂工艺装备技术体系

### 4 二氧化碳驱油工艺装备技术方案设计

二氧化碳驱油技术是有效增加油藏地层能量,旨在提高原油采收率的核心关键技术。其工作机理为:①降黏:二氧化碳与原油互溶性较好,能显著降

低原油黏度,提高原油流动性;②膨胀:二氧化碳使原油体积膨胀,提高地层的弹性能量<sup>[10]</sup>;③萃取:在适宜的压力、温度下,二氧化碳可有效将原油中的轻质组分萃取,有效降低原油密度和黏度<sup>[11]</sup>。

#### 4.1 工艺装备设计

① 二氧化碳槽罐车:根据作业设计流量,配置35m<sup>3</sup>槽罐车5台,在温度-20℃、压力2MPa下运输储存液态二氧化碳。

② 灌注泵装置:为注入泵组提供具有一定压力和流量的二氧化碳。配置2台,作业压力为3~5MPa,流量40~780m<sup>3</sup>/h,水功率7~220kW。装置包括螺杆泵、电动机、控制系统、润滑系统等组件。

③ 注入泵装置:用于将纯液态二氧化碳注入到油井底层。配置数量2台,作业压力15~50MPa,流量4~350m<sup>3</sup>/h,水功率45~2200kW。装置包括柱塞泵、电动机、控制系统、润滑系统等组件。

④ 驱油管汇:根据纯液态二氧化碳吸入与排

出的压力和流量要求,配置低温低压、低温高压管汇。

#### 4.2 工艺技术方案设计

通过高低压管汇连接二氧化碳槽罐车、灌注泵装置、注入泵装置、阀门、流量计、压力表、温度表及井口管汇装置,将二氧化碳注入到地下油藏中。启动装置注入,过程中精准控制注入压力、注入速度和注入流量参数,确保二氧化碳能够均匀地分布在油藏中并达到预期的驱油效果。建立纯液态二氧化碳驱油工艺装备技术体系,如图3所示,作业工艺参数见表1。按照10口井同时注入,连续工作300天,全年工作时间可达到8000h,全年可封存二氧化碳100×10<sup>4</sup>t。

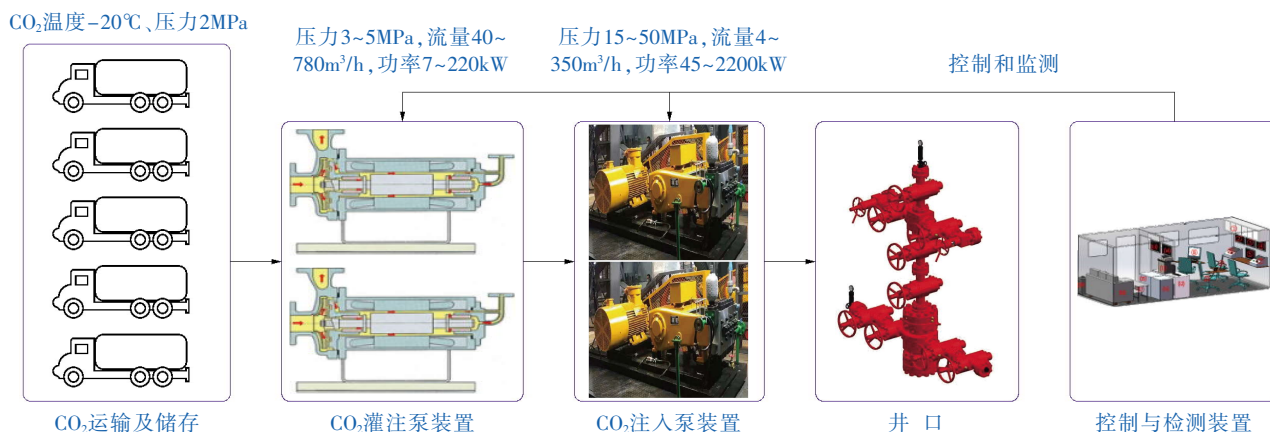


图3 纯液态二氧化碳驱油工艺装备技术体系

表1 纯液态二氧化碳驱油作业工艺参数

项目	工艺参数
作业介质	高纯度液体 CO <sub>2</sub> (≥99.9%)
注入 CO <sub>2</sub> 工作压力	15~35MPa
注入 CO <sub>2</sub> 工作流量	1~50m <sup>3</sup> /h
灌注 CO <sub>2</sub> 工作压力	3.5~4.5MPa
灌注 CO <sub>2</sub> 工作流量	25~250m <sup>3</sup> /h
作业环境温度	-40~45℃
输入 CO <sub>2</sub> 温度	-20~-16℃
输出 CO <sub>2</sub> 温度	-20~20℃

#### 5 产业化应用分析

鉴于全社会对环境保护和可持续发展的日益关注,尤其是CCUS技术在实现碳封存利用及提高油气采收率方面的技术优势,国内已在东北、长庆及新疆等油田区域实现了二氧化碳无水压裂技术初步规模化应用,同时在大庆、胜利、新疆、大港、中

原等油田推广应用二氧化碳驱油技术。根据初步统计结果,国内适合二氧化碳驱油的原油地质储量约130×10<sup>8</sup>t,可提高采收率15个百分点左右,封存二氧化碳(47~55)×10<sup>8</sup>t。

##### 5.1 二氧化碳无水压裂工艺技术体系应用分析

该技术在国内外东北某页岩油平台作业得到技术应用验证,作业装备配置2台二氧化碳泵装置、4台2500型压裂装置、1台密闭混砂装置、1台仪表监控装置、10台50m<sup>3</sup>二氧化碳静态储罐及1套高低压管汇装置。施工作业工艺参数:注入纯液态二氧化碳500m<sup>3</sup>,石英砂加砂量12m<sup>3</sup>,平均砂比5.2%,施工压力45~50MPa,作业流量4.2m<sup>3</sup>/min,有效作业时间2h,具体参数见表2。

作业后效果评估与分析:①二氧化碳破岩能力是水力破岩能力的1.5倍,建立了更加高效的缝网

导流通道,日均原油产量 18t,相比作业前提高了 1.5 倍以上。②通过数据采集,压后返排收集到的二氧化碳为 175m<sup>3</sup>,地质有效封存二氧化碳 325m<sup>3</sup>,有效封存量占注入量的 65%,可以连续动态循环实施作业,实现二氧化碳全部封存,进而实现油气开发过程中高效的地质碳利用与封存<sup>[12]</sup>。

表 2 二氧化碳无水压裂作业工艺流程参数

工艺段及评估名称		技术参数
CO <sub>2</sub> 总液量		500m <sup>3</sup>
前置液量		231m <sup>3</sup>
携砂液量		245m <sup>3</sup>
支撑剂用量		12m <sup>3</sup>
动态裂缝高度		65m
支撑裂缝高度		49.4m
裂缝深度	顶界	3243.2m
	底界	3256.3m
破裂压力		60MPa
压裂液沿程摩阻		16MPa
作业总水功率		7450kW
井口压力		45~50MPa
浓度		1.9kg/m <sup>2</sup>
有无多裂缝		无
动态裂缝长度		285.6m
支撑裂缝长度		234.7m
动态裂缝宽度		18.7m
支撑裂缝宽度		2.2m
作业流量		4.2m <sup>3</sup> /min
平均砂比		5.2%

## 5.2 二氧化碳驱油工艺技术体系应用分析

该技术在国内外新疆某油田开发区块作业得到技术应用验证,作业装备配置 50m<sup>3</sup> 二氧化碳静态储罐 20 台、灌注泵装置 4 台、注入泵装置 10 台、高低压管汇 1 套、仪表监控装置 1 台。施工作业参数:注入二氧化碳 20t/d(10000m<sup>3</sup>),灌注流量 104m<sup>3</sup>/h,灌注压力 4MPa,注入作业流量 41.6m<sup>3</sup>/h,注入压力 28MPa,每天连续作业时间在 23h 以上,具体作业参数见表 3。

作业后效果评估与分析:①二氧化碳驱油后的日均产量为 15.8t,相比作业之前采收率可以达到 28%,是注水驱油的 2 倍。②通过数据采集,返排收集到的二氧化碳为 1500m<sup>3</sup>,地质有效封存二氧化碳 8500m<sup>3</sup>,约占注入二氧化碳的 85%左右,有效实现

了碳封存与利用。

表 3 二氧化碳驱油作业工艺流程参数

工艺段及评估名称	工艺参数
作业介质	高纯度液体 CO <sub>2</sub> (≥99.9%)
注入 CO <sub>2</sub> 工作压力	28MPa
注入 CO <sub>2</sub> 工作流量	41.6m <sup>3</sup> /h
灌注 CO <sub>2</sub> 工作压力	4.1MPa
灌注 CO <sub>2</sub> 工作流量	104m <sup>3</sup> /h
装机功率	4500kW
运行电源	三相交流 380V
环境温度	15℃
输入 CO <sub>2</sub> 温度	-18℃
输出 CO <sub>2</sub> 温度	10℃

## 6 结语

本文深入探讨了强化油气开采技术中的二氧化碳无水压裂及驱油技术,分析设计了其工艺装备构成与工艺应用技术体系。研究表明,二氧化碳无水压裂技术和二氧化碳驱油技术不仅能够有效提升油气资源的开采效率,而且在封存二氧化碳、降低碳排放方面展现出了显著优势。通过国内油田实际作业应用,两项技术均取得了良好的作业效果。二氧化碳无水压裂技术通过高效破岩,建立油气渗流通道,显著提高了原油产量;二氧化碳驱油技术则通过降低原油黏度、增加地层弹性能量等机制,有效提升了采收率。二氧化碳强化油气开采技术产业化应用前景广阔,有望成为未来油气开采领域的重要发展方向。同时,为 CCUS 技术在油气行业实现绿色化、碳减排提供了切实可行的技术体系和实施路径,有助于“双碳”目标的早日实现。

## 参考文献:

- [1] 王震,张晓舟,周彦希.碳中和目标下 CCUS 产业特征和趋势及支持政策分析[J].天然气与石油,2024,42(5):1-7.
- [2] 王林星.CCUS 技术在油田提高采收率应用及展望[J].石油石化节能与计量,2024,14(9):110-114.
- [3] 王光付,李阳,王锐,等.二氧化碳地质封存与利用新进展[J].石油与天然气地质,2024,45(4):1168-1179.
- [4] 刘贵洲,方瑞瑞,窦立荣,等.中国 CCS/CCUS 发展瓶颈与应对策略[J].天然气与石油,2024,42(5):8-14.
- [5] TASLEEM S, BONGU C S, KRISHNAN M R, et al. Navigating the Hydrogen Prospect: A Comprehensive Review of Sustainable Source-Based Production Technologies, Transport Solutions, Advanced Storage Mechanisms, and CCUS Integration[J].

- Journal of Energy Chemistry, 2024, 97(10): 166–215.
- [6] 罗成. CO<sub>2</sub> 准干法压裂技术研究及应用[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(2): 83–87.
- [7] 蔡灿, 周圣文, 陈浩, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 压裂物理模拟实验研究进展[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2024, 26(4): 11–19.
- [8] 周国梁. 低渗透油藏储层改造条件下 CO<sub>2</sub> 驱油提高采收率研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [9] 韩文成. 注入方式对特低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 驱油与封存影响的实验研究[C]//中国地质大学(武汉), 西安石油大学, 陕西省石油学会. 2023 油气田勘探与开发国际会议论文集 III. 2023: 927–929.
- [10] 王文东. 特低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 驱油效果影响因素实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- [11] 陈欢庆. CO<sub>2</sub> 驱油与埋存技术新进展[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(2): 18–26.
- [12] 王磊. 超临界 CO<sub>2</sub> 清水压裂起裂及裂缝扩展试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- (编辑 谢守国)

## Research on Design and Industrial Application of Carbon Dioxide Waterless Fracturing and Oil Displacement Technology System Based on CCUS Technology

Qi Xianye, Yao Kong, Yuan Xiaomeng, Guo Yunjin, Wang Ke

(College of Intelligent Manufacturing, Lanzhou Resources & Environment  
Voc-Tech University, Lanzhou Gansu 730123)

**[Abstract]** As an important technical means for carbon reduction, Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) achieves the dual goals of efficient oil and gas development and carbon sequestration by capturing industrial CO<sub>2</sub> emissions and utilizing them in oil and gas extraction. In the waterless CO<sub>2</sub> fracturing technology, liquid CO<sub>2</sub> replaces traditional water-based fracturing fluids, which are injected into the formation at high pressure to create fractures, establish flow channels for hydrocarbons, and increase crude oil production. In contrast, CO<sub>2</sub> flooding improves oil recovery by reducing crude oil viscosity and increasing reservoir elasticity. This study provides a detailed design of equipment configuration, operating parameters, and implementation processes for waterless CO<sub>2</sub> fracturing and oil displacement technologies. Furthermore, it establishes an integrated technological framework for CCUS in the oil and gas industry, covering the entire process from CO<sub>2</sub> capture, treatment, transportation, and sequestration to utilization. Field applications at a shale oil platform in Northeast China and an oilfield in Xinjiang demonstrate that waterless CO<sub>2</sub> fracturing increases crude oil production by more than 1.5 times compared to before operations, with effective CO<sub>2</sub> sequestration accounting for 65% of the injected volume. Similarly, CO<sub>2</sub> flooding achieves a recovery rate of 28%, double that of waterflooding, and approximately 85% of the injected CO<sub>2</sub> is effectively stored. These technologies enhance oil and gas recovery and significantly reduce carbon emissions, exhibiting promising prospects for industrial application.

**[Keywords]** CCUS technology; carbon dioxide waterless fracturing; CO<sub>2</sub> flooding; enhance oil recovery; carbon sequestration; industrial application