

# 延长油田二氧化碳驱注采工艺应用及改进

王祎婷, 史鹏涛, 明丽婷, 王士豪, 高卓林

(延长油田股份有限公司勘探开发技术研究中心, 陕西 延安 716000)

**摘要:** 为助力国家“双碳”目标顺利实现和油田提高采收率技术深度探索, 延长油田先后建立 2 个先导试验区、一个工程示范点, 确定启动 500 万 t/a 注入量的 CCUS(碳捕集、利用与封存)项目规划, 但现有的 CO<sub>2</sub> 驱注采工艺还存在一些局限和不足。系统阐述目前油田 CO<sub>2</sub> 驱注采工艺技术现状及特点, 深入探讨现场应用过程中出现的问题, 并从注采井口、管柱、配套工具和防腐措施等方面提出一系列改进和完善措施, 形成满足延长低渗透油藏 36 万 t/a 注入量需求的注采工艺技术。提出 CO<sub>2</sub> 驱注采工艺技术下一步攻关方向, 以期为延长后续百万吨级 CCUS 注采工艺和配套工艺的发展提供借鉴和指导。

**关键词:** 延长油田; CO<sub>2</sub> 驱; 注采工艺; 封隔器; 注气管柱

**中图分类号:** TE357 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)03-0026-05

碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization, and storage, CCUS)技术是中国实现碳中和目标的重要手段, 是有效实现碳减排的技术之一<sup>[1]</sup>。为响应国家“双碳”目标, 大庆、胜利、吉林、中原、华东、长庆等各大油田开展了不同规模的 CO<sub>2</sub> 驱油与封存(CCUS-EOR)项目先导试验, 取得了良好的矿场应用效果<sup>[2-3]</sup>。延长油田先后建立了 2 个先导试验区和 1 个工程示范点, 确定了启动 500 万 t/a 注入量的 CCUS 项目规划。

注采工艺是 CO<sub>2</sub> 驱油技术的关键环节, 具有承上启下的作用, 是完成油藏工程方案部署的基本保证, 也是地面工程建设的依据<sup>[4-6]</sup>。CO<sub>2</sub> 驱注采工艺的关键在于注入管柱的气密封性和采油管柱的防腐性能<sup>[7-8]</sup>, 各大油田在注采管柱及配套工艺方面做了大量的工作。笼统注气方面, 早在 2004 年华东油气田研制出 Y211 型整体式管柱<sup>[9-10]</sup>, 为提高注气管柱气密封性、降低作业难度和施工成本, 长庆油田采用 Y441 型注气管柱<sup>[11]</sup>, 大庆油田设计出 Y443 型分体可钻式注气管柱<sup>[12-13]</sup>, 胜利油田研制出 JY445 型免压井注气管柱<sup>[14-16]</sup>, 苏北油田先后试验了自平衡式注气管柱、Y221 型机械锚定式注气管柱、Y455 型插管桥塞式注气管柱和 Y445 型二次压缩防返吐式注气管

柱<sup>[17-18]</sup>, 吉林油田采用连续油管+插管式封隔器<sup>[19]</sup>。在分层注气方面, 苏北油田先后试验了油套分层注气、同心测调一体分层注气和有缆式智能分层注气工艺<sup>[20]</sup>。延长油田目前处于笼统注气阶段, 采用 Y221 型整体式注气管柱, 在使用过程中存在管柱整体稳定性差、气密封性差、反洗阀打不开、无法循环更换油套环空缓蚀剂等问题, 已经不能满足生产需要; 自平衡式助其关注结构复杂、施工过程中遇卡风险大; Y445 型插管式注气管柱结构简单, 但插管与注气插管桥塞之间依靠密封胶圈密封, 对于高压注气井适应性差, 且适用于深井; Y445 型二次压缩防返吐式注气管柱需要丢手后进行打捞解封作业, 封隔器易发生丢手失败和打捞遇卡问题, 增加了施工作业成本; 连续油管+插管式封隔器这种结构, 气密封效果好、作业效率高, 但因封隔器需要国外进口定制、作业过程中需要现场具备连续油管作业条件, 前期投入成本和作业成本很高, 不能满足延长实际。生产管柱方面, 华东油气田研制出分体式采油管柱<sup>[21-23]</sup>, 吉林油田研制出防腐防气一体化采油管柱<sup>[24-26]</sup>, 胜利油田采用多功能采油管柱<sup>[27]</sup>, 而延长油田试验区目前采用的是常规生产管柱。注采井防腐方面, 目前各大油田多采用优化管柱结构、选用耐腐蚀材料、注缓蚀剂、外加电流阴

**收稿日期:** 2024-06-26

**基金项目:** 延长油田股份有限公司自主科技项目(ycsy2022xjs-C-03)

**作者简介:** 王祎婷(1993—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士, 工程师, 研究方向为注采工程; 史鹏涛(1982—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为油田注水(气)工艺及配套技术研究与应用; 明丽婷(1996—), 女, 山西运城人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为油田注(水、气)采工艺; 王士豪(1995—), 男, 陕西延安人, 硕士, 工程师, 研究方向为注水工艺技术; 高卓林(1994—), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为油气田开发技术。

极保护等方式来延缓  $\text{CO}_2$  对于管材的腐蚀<sup>[28-32]</sup>。可见,试验区目前注采工艺与国内油田应用水平存在一定差异,因此亟须基于示范区注采工艺特点和试验中存在问题,开展注采工艺技术改进。

在注采井口的选择上,目前国内设计参数主要为耐压等级和材料等级。本文从压力等级、温度等级、材料等级、规范级别和性能等级 5 个参数综合考虑,将井口耐压等级由 35 MPa 降低到 21 MPa、CC 级变为 EE 级,并对温度级别、规范和性能等级做出了具体要求,在满足防腐和气密封要求的同时降低了井口装置采购成本。注入管柱方面,采用 Y441 型注气管柱,并有针对性地对 Y441 封隔器内部结构进行改进,同时封隔器与安全接头采用一体化设计,有效避免了因注入环境影响导致封隔器胶筒变形及注气过程中管柱蠕动对胶筒的影响,提高了管柱的气密封性,防止了作业中封隔器卡瓦不能技术收回,无须压井作业。采油工艺方面,采用防气防腐抽油泵及泵下多级分离器,可有效控制套压、解决因高气油比造成抽油泵气锁问题,在提高泵效的同时,延长了检泵周期。

## 1 $\text{CO}_2$ 驱注采工艺应用现状

### 1.1 注气工艺

(1)注入井口:KY35/65-65 井口,材质采用 CC 级,压力等级为 35 MPa,阀门采用手动平板闸阀;老井套管与井口连接处密封性差;且 CC 级井口通体采用不锈钢材质,硬度较低,适用于一般工况,而对于  $\text{CO}_2$  驱对防腐、气密封性能要求较高的工况适应性较差。

(2)注入管柱从上到下: $\phi 73$  mmN80-BGT1 气密封油管+滑套开关+Y221 型封隔器+ $\phi 73.02$  mmJ55 普通油管(图 1)。

在现场试验中,发现该管柱气密封性差、封隔器失效等问题,大多数注气井在 6 个月内出现较高套压。起出管柱分析认为,由于管柱腐蚀严重,造成封隔器胶筒气侵,且管柱锚定性能不佳、整体性较差,造成管柱气密封性降低;Y221 封隔器采用单向卡瓦,坐封力来自油管重量,采用气水交替时,油管存在伸缩导致封隔器坐封失效。因此该注气管柱的适应性较差。

### 1.2 采油工艺

试验区采油井口选用 KY25/65-50 井口,压力等级为 25 MPa,温度等级为 L(-46~82  $^{\circ}\text{C}$ ),规范等级为 PSL3,性能级别为 PR1, $\text{CO}_2$  突破前材料等级为 AA 级, $\text{CO}_2$  突破后为 CC 级别。这种设计要根

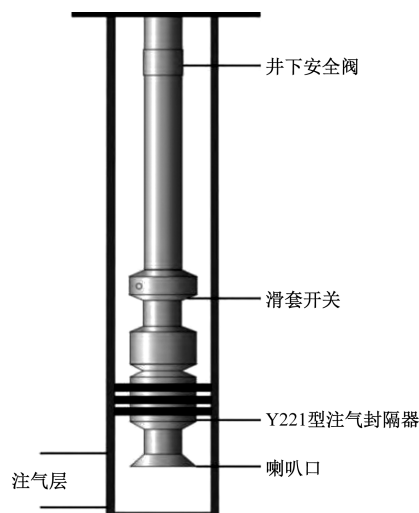


图 1 Y221 型整体式管柱

据注气情况调整井口,增加了施工难度和成本。AA 级井口采用碳钢材质,不能满足酸性工况需求。

试验区目前采油工艺主要依靠常规举升方式,管柱结构为:丝堵+尾管+筛管(或气锚)+尾管+油泵组合(固定凡尔总成+泄油器+泵筒)+油管至生产井口。在试验过程中,陆续出现套压和气油比升高、泵效低的现象,有些井甚至出现“气锁”,导致抽油泵无法正常工作。

### 1.3 腐蚀结垢治理

试验区注入井和采油井均未加腐蚀挂环,腐蚀情况由井筒故障后起出管柱观察,部分注入井采用加咪唑啉类缓蚀剂防腐,而采油井未作任何防腐措施。

## 2 $\text{CO}_2$ 驱注采工艺技术改进

### 2.1 注气工艺

目前试验区块主要采用笼统注气工艺,采用水气交替注入方式。通过计算,井口最大注气压力为 15 MPa,因此井口耐压等级由 35 MPa 降低到 21 MPa;考虑到  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  分压,材料等级由原来的 CC 级变为 EE 级,温度等级由 L(-46~82  $^{\circ}\text{C}$ ) 变为 PU(-29~121  $^{\circ}\text{C}$ );考虑到井口气密封要求,规范等级选用 PSL3G;从经济角度考虑,性能级别选 PR1。最终选用 KQ21/65-65 型、EE 级、PU(-29~121  $^{\circ}\text{C}$ )、PSL3G 气密封井口,综合选择后,单台设备节约费用 5 万元左右,性能更稳定。水气交替注入井口装置示意图如图 2 所示。

根据试验区现场实践经验,结合其他油田矿场试验结果,对 Y441 型注气管柱结构进行了优化改进(图 3)。考虑到气密封要求及后期卡瓦不能收回、无法起出管柱的问题,采用 Y441 气密封封隔器

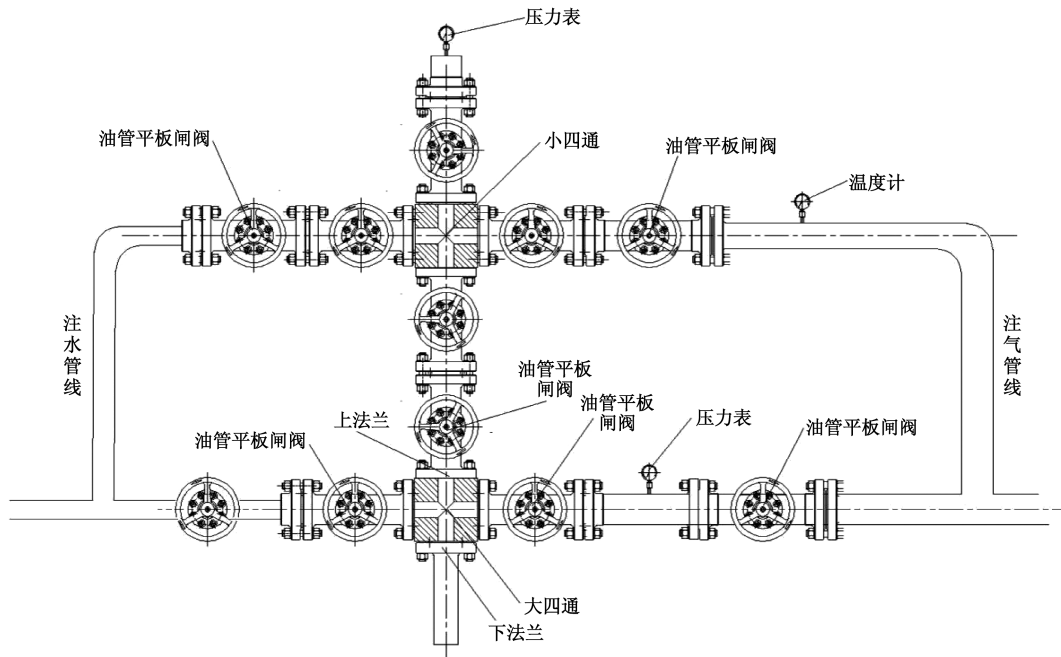


图 2 水气交替注入井口装置示意图

和安全接头一体化设计,安全接头采用旋转打开方式;将 BGT1 扣改为 BGT2 扣,油套环空加注 15# 白油环空保护液;注入管柱组合为:喇叭口+滑落球座+Y441-115 气密封封隔器(与安全接头一体化设计)+BGT2 扣气密封油管+腐蚀挂片装置(监测井)+井口,在一定程度上解决了注气管柱气密封差和腐蚀问题,无须压井作业。

Y441-115 封隔器为双向卡瓦锚定,可有效避免注气过程中管柱蠕变对胶筒的影响,可实现双向承压,避免气体沿油套环空气窜,与安全接头一体化设计,防止封隔器卡瓦不能及时收回,便于起出管柱。

## 2.2 采油工艺

结合采油井生产现状和井筒情况,井口温度等级由 L(-46~82℃)变为 PU(-29~121℃),CO<sub>2</sub> 突破前后材料级别均为适用于酸性工况的 DD 级,规范级别由 PSL3 降低为 PSL2,性能级别为 PR1,井口装置增加了套压止回阀,考虑到后期管输增加了油压止回阀和压力表,最终设计井口:KY21/65-50(图 4)。该井口设计在满足实际生产需要的同时,降低了装置成本和现场作业难度。

为了控制套压,避免抽油泵气锁,在井口装置低压端和生产管柱之间连接了地面套压控制器,当套压超过弹簧力和回压时,套压超过弹簧力和回压时,定压凡尔球被顶开,套管气放出,套压保持预设值,压力降到预设值以下,凡尔球关闭。

为解决气油比高的问题,通过控制井底合理流

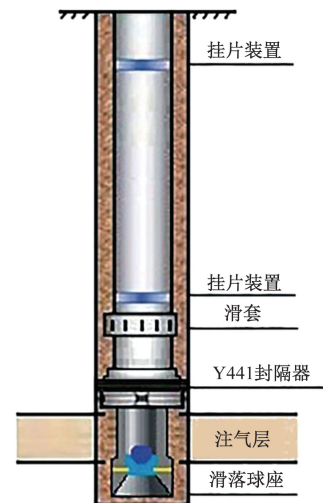


图 3 Y441 型注气管柱

压来提高泵吸入口压力,开展油井合理生产制度优化,同时在泵下距抽油泵 1 或 2 根油管的距离安装泵下多级分离器,代替防砂,防气工具;采用具有防气、防腐功能的中空(置换腔)防气泵,相比于常规泵增加了一个集气管,上冲程时气体上行储存在集气管中,下冲程柱塞下行,气体从集气管和泵筒内空间排出,有效避免了气锁现象,提高了泵效。

综上所述,在生产初期采用常规生产管柱,CO<sub>2</sub> 突破后管柱结构为:井口+地面套压控制器+油管+腐蚀挂环+中空(置换腔)防气泵+腐蚀挂环+井下多级分离器(图 5)。该工艺配套合理流压控制和合理生产制度调整后,不仅可以减少气锁、提高泵效,还能有效控制油井套压、延长检泵周期。

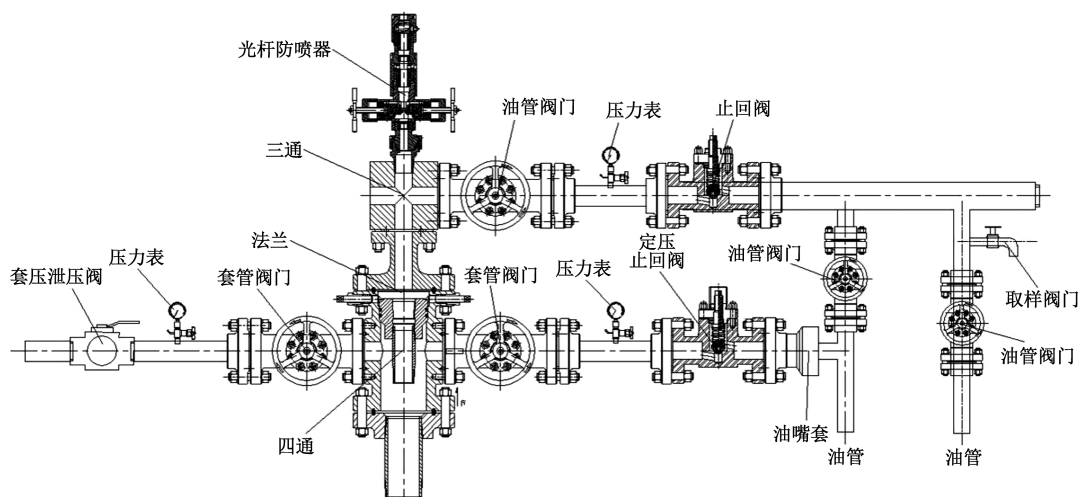
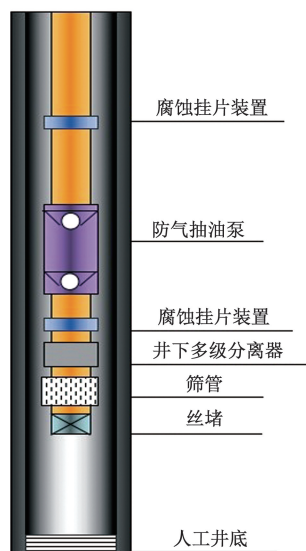


图4 采油井口装置

图5 CO<sub>2</sub>突破后注气管柱示意图

### 2.3 防腐设计

油管材料:N80 油管配合环空保护液使用。

封隔器材质:钢体采用 13Cr 主体,密封胶件采用氢化丁腈橡胶材质。

套管环空防腐:定期注 15# 白油环空保护液。

注入井筒治理:对水泥返高不够的井采用高强度复合材料二次固井;作业前开展套损井排查及治理。

采油井防腐:根据油井实际情况,分井组、分区块分别制定添加咪唑啉季铵盐类缓蚀剂和阴极保护法两种防腐措施。

### 3 下步攻关方向

(1)老井固井水泥失效。目前延长油田 CO<sub>2</sub> 驱注入井基本为原注水井或采油井转注气井,部分注气井固井质量差、水泥未返高到地面、胶结质量差,固井质量较好的井在固井时也没有考虑 CO<sub>2</sub> 的影

响,在注气过程中可能存在水泥失效的情况<sup>[25]</sup>,为保护套管,需要开展水泥失效研究。

(2)CO<sub>2</sub> 驱注气井油管 and 套管错断。受低温、注气管柱气密封性差、注气方式等因素影响<sup>[26-28]</sup>,注入井油管和套管容易发生脆断,因此有必要从注气管柱改进、注入方式优化、油套环空保护液研究等方面开展治理油套管错断对策研究。

(3)CO<sub>2</sub> 多层分注技术。目前普遍使用的笼统注气工艺,无法解决层间吸气差异造成的气窜现象,因此需要从气密性、防回流、防腐蚀、提高调配精度和调配成功率等方面,探索适合延长实际的分层注气技术。

## 4 结论

(1)通过矿场试验总结和室内研究,延长油田初步形成 CO<sub>2</sub> 驱技术体系,为 36 万 t/a 注入量实施提供了技术支撑。

(2)注采工艺的关键是解决气密封性和腐蚀问题,Y441 封隔器与安全接头一体化设计、耐腐蚀材料、气密封油管、防腐方案制定可满足目前生产状况,但仍需改进工艺组合,满足延长油田低成本战略要求。

(3)系统开展了采油井合理工作制度优化,并针对区块油井井况开展防偏磨治理对策研究,为 CO<sub>2</sub> 驱采油井优化设计提供了理论依据。

## 参考文献

- [1] 王香增,杨红,王伟,等.低渗透致密油藏 CO<sub>2</sub> 驱油与封存技术及实践[J].油气地质与采收率,2023,30(2):27-35.
- [2] 王维波,汤瑞佳,江绍静,等.延长石油煤化工 CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存(CCUS)工程实践[J].非常规油气,2021(2):1-7.
- [3] 孙腾民,刘世奇,汪涛.中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J].煤炭科学技术,2021,49(11):10-20.

- [4] 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.
- [5] 王峰, 黎政权, 张德平. 吉林油田 CCUS-EOR 技术攻关与实践新进展[J]. 天然气工业, 2024, 44(4): 76-82.
- [6] 郭肖, 刘瑞璇, 高振东, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 储层致密油水平井 CO<sub>2</sub> 补充能量与吞吐参数优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1033-1041.
- [7] 李四海, 夏玉磊, 兰建平, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 致密油储层二氧化碳驱油实验[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2251-2257.
- [8] 张宗樟, 吕广忠, 王杰. 胜利油田 CCUS 技术及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(6): 812-822.
- [9] 曹银萍, 林文文, 冯佳佳, 等. 注 CO<sub>2</sub> 井管柱腐蚀速率预测[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(2): 75-80.
- [10] 程百利, 钱卫明. CO<sub>2</sub> 驱油注入管柱的研制与应用试验[J]. 油气藏评价与开发, 2012, 2(2): 58-60, 75.
- [11] 钱卫明, 曹力元, 胡文东, 等. 我国 CO<sub>2</sub> 驱油注采工艺技术现状及下步研究方向[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 66-72.
- [12] 于世春, 胡改星, 刘笑春, 等. 长庆油田 CO<sub>2</sub> 驱注采工艺技术现状及技术攻关方向[J]. 石油化工应用, 2023, 42(12): 15-19.
- [13] 才庆, 张华春. 大庆油田低渗透储层 CO<sub>2</sub> 驱油采油工程技术评价与展望[J]. 采油工程, 2022(3): 89-94, 104.
- [14] 才庆, 张丹丹, 张华春, 等. 榆树林油田 CCUS 采油工程方案优化设计与实践[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(1): 135-141.
- [15] 张瑞霞, 刘建新, 王继飞, 等. CO<sub>2</sub> 驱免压井作业注气管柱研究及应用. 钻采工艺, 2014, 37(1): 78-80.
- [16] 王世杰. 二次压缩 Y445 型封隔器的研制[J]. 石油机械, 2014, 42(11): 163-165.
- [17] 张春栋. 注 CO<sub>2</sub> 工艺管柱的现状与优化[J]. 内蒙古石油化工, 2015(1): 75-76.
- [18] 曹力元, 钱卫明, 官平, 等. 苏北油田二氧化碳驱油注气工艺应用实践及评价[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(2): 46-50.
- [19] 曹力元. 一种新型 CO<sub>2</sub> 驱油注气管柱的研制及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 73-76.
- [20] 李璇. 特低渗透油藏超临界 CO<sub>2</sub> 分层注入工艺技术研究[J]. 采油工程, 2021(2): 79-84, 99-100.
- [21] 曹力元. 苏北油田 CO<sub>2</sub> 驱油同心双管分层注气技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 109-113.
- [22] 张绍辉, 王凯, 王玲, 等. CO<sub>2</sub> 驱注采工艺的应用与发展[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(6): 869-875.
- [23] 张瑞霞, 刘建新, 田启忠, 等. CO<sub>2</sub> 驱注气管柱技术研究[J]. 石油机械, 2013, 41(12): 88-91.
- [24] 邓祥龙, 刘少胡, 张磊. CO<sub>2</sub>-EOR 井中低温对封隔器及密封圈性能影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10244-10252.
- [25] 张成龙, 胡丽莎, 牛兆轩, 等. CO<sub>2</sub>-EOR 在低渗透滩坝砂油藏的应用初探: 以高 89 为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6393-6401.
- [26] 马冬梅, 张德平, 辛涛云, 等. 一种新型防气举升工艺在 CO<sub>2</sub> 驱油井中的应用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(5): 252-253.
- [27] WAN F Z, GAO C L, LIU H. Anti-corrosion technique of injection well in CO<sub>2</sub> flooding[R]. Houston: SPE, 2010: 129589.
- [28] 傅海荣, 韩重莲, 于中奇, 等. 大庆油田二氧化碳驱注气井油管断裂失效分析[J]. 化学工程与装备, 2018, 30(5): 213-214.
- [29] 曹力元. 苏北油田 CO<sub>2</sub> 驱油注气井套管错断原因分析及治理[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(3): 118-121.
- [30] 于中奇, 李金禹, 王海静, 等. 二氧化碳驱压井工艺技术在 Y93-C16 井的应用[J]. 化学工程与装备, 2018, 41(8): 196-197.
- [31] 任南南, 商永滨, 陈军斌, 等. 灰色模型在采油井管材腐蚀速率预测中的应用[J]. 热加工工艺, 2020(4): 34-37.
- [32] 吕雷, 杨志刚, 李辉, 等. 高含 CO<sub>2</sub> 油田腐蚀环境下 16Mn 管线钢电化学腐蚀行为[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(34): 14532-14538.

## Application and Improvement of CO<sub>2</sub> Flooding Injection-Production Technology in Yanchang Oilfield

WANG Yiting, SHI Pengtao, MING Liting, WANG Shihao, GAO Zhuolin

(Exploration and Development Technology Research Center, Yanchang Oilfield Co., Ltd, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to help realizing the national "double carbon target", it is necessary to explore oilfield recovery technology in-depth. Yanchang Oilfield has established two pilot test areas, an engineering demonstration site, and determined to start the planning of CCUS(carbon capture, utilization, and storage) project with an annual injection volume of 5 million tons, but there are some limitations and deficiencies in the existing CO<sub>2</sub> injection and extraction process. The current situation and characteristics of CO<sub>2</sub>-driven injection and extraction technology in oilfields were systematically described, the problems in field application were thoroughly discussed. A series of improvements and refinements are proposed in injection and extraction wellheads, tubing columns, ancillary tools and anticorrosion measures, etc., to form an injection and extraction technology that meets the demand of prolonging the 360 000 ton annual injection volume of low-permeability reservoirs. The next direction of CO<sub>2</sub> drive injection and extraction technology is proposed in order to provide reference and guidance for the development of the subsequent million-ton CCUS injection and extraction technology and supporting technology of Yanchang.

**Keywords:** Yanchang Oilfield; CO<sub>2</sub> flooding; injection-production technology; packer; gas injection string