

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2022087

引用格式: 曹力元. 苏北油田 CO₂ 驱油同心双管分层注气技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 109-113.

CAO Liyuan. A stratified gas injection technique with concentric double pipe for CO₂ flooding in Subei Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 109-113.

苏北油田 CO₂ 驱油同心双管分层注气技术

曹力元

(中国石化华东油气分公司泰州采油厂, 江苏泰州 225300)

摘 要: 为了解决苏北油田 CO₂ 驱油常规笼统注气工艺在实际应用中存在的吸气剖面不均匀、高渗层气窜严重和低渗层动用程度低等问题, 在分析常规分层注气工艺特点的基础上, 通过设计双级锚定式管柱、优选防腐蚀材质和质量流量计、改进分注器等井下工具, 形成了 CO₂ 驱油同心双管分层注气技术。根据现场实际情况, 研究解决了管柱失稳、封隔器失效等问题, 实现了准确分层注气。该技术在草舍油田 C1 井进行了现场试验, 利用地面装置调节分层注入量, 各项指标均满足分层配注要求, 取得了良好的现场应用效果。试验结果表明, 该技术具有操作简单、可靠性高和调配精度高等优点, 可有效实现精细注气, 为苏北油田 CO₂ 驱油有效开发提供了新的技术手段。

关键词: 苏北油田; CO₂ 驱油; 同心双管分注; 质量流量计; 注气管柱

中图分类号: TE357 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2022)04-0109-05

A Stratified Gas Injection Technique with Concentric Double Pipe for CO₂ Flooding in Subei Oilfield

CAO Liyuan

(Taizhou Oil Production Plant, Sinopec East China Oil & Gas Company, Taizhou, Jiangsu, 225300, China)

Abstract: Conventional gas injection techniques of CO₂ flooding in Subei Oilfield face uneven suction profiles, serious gas channeling in high permeability layers, and low production degrees in low permeability layers in the techniques' application. In order to address these issues, we analyzed conventional stratified gas injection techniques and developed a stratified gas injection technique with concentric double pipe for CO₂ flooding. It contains a two-stage anchored pipe string design, anti-corrosion materials and a mass flowmeter selection, with optimization of a gas injection separator and other downhole tools. According to the actual situation of field, the instability of the pipe string and the failure of the packer were solved, and an accurate stratified gas injection was accomplished. The technique has been tested in Well C1 of Caoshe Oilfield, and all indexes met the design requirements of stratified gas injection by adjusting the stratified gas injection volume with ground devices. The good test results showed that the technique has the advantages of convenient operation, high reliability, and high dispensing accuracy. Therefore, it can bring about fine gas injection and provide a new technical method for effective development of CO₂ flooding in Subei Oilfield.

Key words: Subei Oilfield; CO₂ flooding; stratified gas injection with concentric double pipe; mass flowmeter; gas injection pipe string

CO₂ 驱油作为三次采油的重要手段, 可在提高采收率的同时实现 CO₂ 捕集和封存, 有助于“双碳”目标的实现, 为绿色低碳环保开发提供了技术支撑^[1-4]。苏北油田低渗透油藏较多, 注水驱油困

难, 于 2005 年在草舍油田泰州组油藏进行了 CO₂ 驱油先导试验, 鉴于前期增油效果较好, 目前苏北油田 CO₂ 驱油开发的单元已增至 15 个, 其中草中阜三段、台南阜三段等油藏均取得了较好的开发效果^[5-7]。

收稿日期: 2021-12-28; 改回日期: 2022-06-10。

作者简介: 曹力元 (1989—), 男, 江苏泰州人, 2012 年毕业于中国地质大学 (武汉) 资源勘查工程专业, 工程师, 主要从事采油工艺和二氧化碳驱油技术研究工作。E-mail: caoly.hdsj@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“苏北低渗透油藏 CO₂ 驱注采配套工艺技术应用研究” (编号: P16074) 资助。

苏北油田 CO₂ 驱油开发单元使用常规笼统注气工艺时存在吸气剖面不均匀、高渗层气窜严重和低渗层动用程度低等问题,严重制约着 CO₂ 驱油的增产效果,限制了 CO₂ 驱油技术的进一步推广。针对上述问题,在分析传统分层注气工艺特点的基础上,结合苏北油田注气井地层情况和完井结构,借鉴国内分层注气技术,设计了分层注气管柱和配套了调配等技术,形成了 CO₂ 驱油同心双管分层注气技术,提升了长期注气可靠性和调配精度。该分层注气技术操作简单可靠,可实现高精度分层调配。

1 常规分层注气工艺

1.1 油套分层注气工艺

常规油套分层注气管柱采用水力锚+封隔器+喇叭口组合,利用油套环空通道和油管通道分别对上下层注气;井口安装 2 套地面定量配气装置,分别控制上下层段的注气量。

油套分层注气管柱结构简单,可实现分层注气量地面调配,但存在以下缺点:油套分层注气管柱气密封性和可靠性较差,长期注气易造成封隔器解封困难,影响修井作业;上部油层套管长期承受注气高压,且 CO₂ 易腐蚀套管,造成套管错断等问题。

1.2 同心测调一体分层注气工艺

同心测调一体分层注气工艺利用测试电缆将测调仪下入井筒内,与可调气嘴对接后根据地面指令进行调节,并将井下流量、压力等数据传输至地面。

该工艺能够满足多段分注的要求,但存在以下缺点:配气器的气嘴易刺坏,对材质要求较高;井下测调需采用特制钢管电缆,以保证密封性,成本较高;井下测调施工复杂,井口操作风险较高;CO₂ 在地层条件下为超临界状态,常规流量计不能正常工作,新型井下 CO₂ 流量计设计难度大。

1.3 有缆式智能分层注气工艺

有缆式智能分层注气设备主要包括有缆智能配气器、过电缆封隔器和地面控制系统等。每个注气层段对应一个智能配气器,利用电缆连接地面控制系统,通过控制气嘴开度控制各层注气量。

该工艺具有可实时调配注气量、操作方便等优点,但电缆需随井下工具入井,对施工质量要求较高;电子元件在井下高温高压环境下易失效,可靠性较低,且更换井下电子元件时需要起下注气管柱,成本较高;井下环境中 CO₂ 流量计计量误差较大。

2 同心双管分层注气技术设计思路

针对传统分层注气工艺存在的不足,为保证分层注气管柱在高压差下保持不失稳,分层注管气柱需具有较好的稳定性;为保证套管起压率较低,同心双管分层注气管柱需具有较好的气密封性;为降低后期作业成本和缩短施工周期,同心双管分层注气管柱应具有防回流的功能;为保证同心双管分层注气管柱的使用寿命,需具有一定的防腐蚀性能;为保证注气量调配施工安全高效,保证较高的调配成功率和调配精度,流量误差需控制在 10% 以下。

2.1 技术原理

同心双管分层注气管柱设计了 2 条注气通道,分别通过外管柱与内管柱的环空和内管柱对上、下层位注气。同心双管分层注气管柱主要由注气外管柱、注气内管柱、注气封隔器、注气阀、注气丢手接头和分注器等构成(见图 1)。注气丢手接头和 Y445 型注气封隔器的丢手机构使同心双管分层注气管柱具备了较好的丢手性能,能够满足后期施工不同工况下的丢手要求。

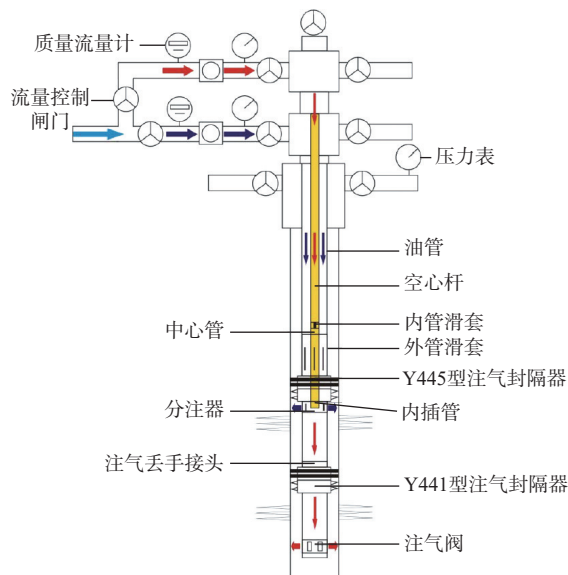


图 1 同心双管分层注气管柱结构示意图

Fig.1 stratified gas injection pipe string structure with co-ncentric double pipe

2.1.1 同心双管分层注气管柱结构

注气外管柱从下至上由多功能注气阀+Y441 型注气封隔器+注气丢手接头+分注器+Y445 型注气封隔器+外管滑套+ $\phi 73.0$ mm 气密封油管组成。注气内管柱从下至上由内插管+中心管+内管滑套+ $\phi 36.0$ mm 空心杆组成。

同心双管分层注气管柱中,分注器起枢纽作用,将内外管来气分别输送到不同层位,在外管下入完毕后,再下内管,最终通过插入密封机构完成内外管连接。分注器设置有侧流道和中心流道,在径向上外壳和密封外管之间形成侧流道,密封内插管和密封外管轴向芯部共同构成中心流道。多功能注气阀使注气管柱具备了防回流的功能。注气井停注时,井底流体压力将球压紧在球座上,无法回流至油管内,实现了注气管柱的安全控制。

2.1.2 管柱气密封性设计

1) 注气油管设计。注气油管使用笼统注气工艺广泛使用的 $\phi 73.0$ mm 气密封特殊螺纹油管,以保证注气管柱的气密封性。该油管的上扣扭矩为 2 580~3 030 N·m,最佳扭矩为 2 810 N·m。为使气密封油管上扣达到规范要求,使用扭矩控制记录仪控制气密封油管上扣扭矩,设定扭矩范围,要求油管上扣扭矩曲线符合标准。

气密封油管入井前需进行气密封性检测。气密封油管完成上扣后,内部下入带有上、下 2 个胶筒的封隔器,卡封油管丝扣两端形成密封空间,然后注入含有氮气的混合气。若探测设备在外部未测到氮气泄漏,说明油管丝扣气密封性符合要求;若探测到氮气泄漏,说明油管丝扣的气密封性不合格。

2) 空心杆设计。内管选用 $\phi 36.0$ mm 空心杆,采用氢化丁腈橡胶材质的 O 形密封圈,以保证气密封及耐 CO₂ 腐蚀性能。空心杆上扣后,需测试其气密封性,以确保满足分层注气要求。

2.1.3 防腐性能

为保证注气管柱防腐性能,选用 3Cr 材质的油管,井下工具钢体采用 30Cr13 不锈钢材质。注气封隔器的胶筒和井下工具的密封部件采用抗 CO₂ 气侵的氢化丁腈橡胶。向油套环空注入咪唑啉类 CO₂ 缓蚀剂,增强套管防 CO₂ 腐蚀性能^[8-13]。

2.1.4 施工步骤

1) 组配并下入注气外管柱,管柱下至设计深度后,向油套环空注入 CO₂ 缓蚀剂。

2) 通过磁定位调整管柱下入深度,坐封封隔器,打开多功能注气阀。

3) 组配并下入注气内管柱,管柱下至设计深度后,打开分注器,加压,验证封隔器、空心杆等的气密封性。

4) 连接地面分注调配系统,调整阀门试注。

5) 开始注气,调整地面流量控制闸门,控制上、下层位的注气量。

2.2 技术特点

该工艺能够实现细分层注气的目的,主要具有以下特点:1) 调配效率高。免去了仪器调配工序,大幅提高了工作效率,降低了成本。2) 调配成功率高。利用地面节流阀调节注气量,调配成功率和调配精度较高^[14-17]。

2.3 技术优化

2.3.1 长期注气可靠性

初期设计了 2 种同心双管分层注气管柱,分别是“Y441 型注气封隔器+Y341 型注气封隔器”管柱和“Y445 型注气封隔器+Y441 型注气封隔器”双级锚定式管柱。前 1 种管柱包括 Y441 型注气封隔器、Y341 型注气封隔器和配注器等。因 Y341 型封隔器坐封后无锚定功能,在一定压差下油管存在失稳风险,可能会导致封隔器失封。

为此,研制了“Y445 型注气封隔器+Y441 型注气封隔器”双级锚定式管柱。Y445 型和 Y441 型注气封隔器坐封后双向卡瓦锚定,密封、锚定性能可靠,能够长期承受 35 MPa 的压力,满足长期分层注气要求。同心双管分层注气管柱上部采用 Y445 型注气封隔器(见图 2),其主要通过液压和管柱自身重量坐封,封隔器胶筒发生应力松弛时,管柱自身重量可以迅速增补载荷,使套管与胶筒的接触应力维持恒定,具备双向承压能力,可长期承受高压差,预防管柱发生蠕变,进一步提高封隔器的密封性能^[18-21]。同心双管分层注气管柱下部采用 Y441 型注气封隔器(见图 3),其具备双向承压能力,并附加了管柱自身重量持续压缩胶筒功能,提高了其密封性能。

2.3.2 封隔器胶筒“气爆”

分层注气井层间矛盾大,注气压力较高,注气封隔器需具备可靠的耐高压性能。前期现场试验时,部分注气封隔器在压力达到 30 MPa 左右时会出现突然失封现象。室内试验结果表明,在 120 ℃ 温度下,注气压力升至 30 MPa 时,部分注气封隔器胶筒发生损坏。

检查发现,胶筒表面损坏较小,肩部损坏较严重。分析认为,胶筒损坏是由一种特殊的“气爆”现象引起。由于径向上套管内壁的支撑作用,使胶筒表面橡胶不会径向膨胀,避免了外表面“气爆”。为解决胶筒内部“气爆”问题,胶筒两端设置钢性支撑,设计了双层钢碗,改进后的注气封隔器能承受 35 MPa 压差,避免了“气爆”现象的发生。

2.3.3 流量计精度

CO₂ 流量计一般由注水用涡轮流量计改进而

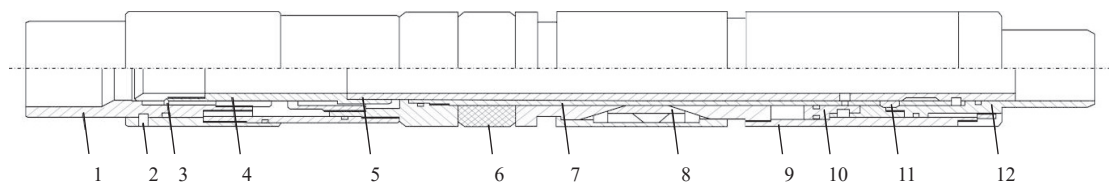


图2 Y445型注气封隔器的结构

Fig.2 Structure of Y445 gas injection packer

1. 上接头; 2. 剪钉; 3. 丢手剪环; 4. 打捞筒; 5. 内中心管; 6. 胶筒总成; 7. 外中心管; 8. 卡瓦; 9. 活塞套; 10. 坐封活塞; 11. 锁块; 12. 下接头

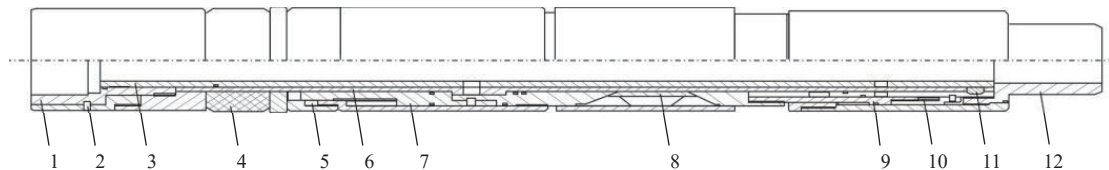


图3 Y441型注气封隔器的结构

Fig.3 Structure of Y441 gas injection packer

1. 上接头; 2. 剪钉; 3. 内中心管; 4. 胶筒总成; 5. 上锁环; 6. 外中心管; 7. 上活塞; 8. 卡瓦; 9. 下活塞; 10. 下锁环; 11. 锁块; 12. 下接头

成, 由于 CO_2 流体特性与水差异较大, 涡轮流量计不能满足 CO_2 的流量计量要求。为提高注气量调配的精度、降低误差, 使用精度较高的质量流量计, 并进行了质量流量计精度检测试验, 结果见表1。由表1可看出, 质量流量计的测量误差最大0.45%, 符合流量测量标准, 满足分层注气的调配精度要求。

表1 质量流量计精度检测试验结果
Table 1 Accuracy test results of mass flowmeter

流量/($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	标准质量/kg	测量质量/kg	误差, %
5.27	15.4	15.33	-0.45
18.13	16.3	16.25	-0.31
25.38	23.0	22.97	-0.13

3 现场试验

草舍油田 C1 井注气层段为 3 087.40~3 104.00 m、3 112.00~3 132.00 m, 吸气剖面显示层间吸气量差异大, 下层为主要吸气层, 相对吸入量 100%, 已形成气窜通道。2021 年 C1 井进行了同心双管分层注气试验, 注气外管柱下至设计深度, 管柱上提 1.50 m, 投球, 依序加压 5~20 MPa, 坐封封隔器, 给管柱施加 100 kN 下压力, 打开注气阀; 下入注气内管柱, 内管柱插入分注器后, 油管环空加压至 26 MPa 打开分注器; 继续挤液, 压力在 30 MPa 稳定, 油套环空、空心杆无返液, 验封合格。

依照地质方案, 分为上、下 2 套注入层系, 配注量分别为 20 和 10 t/d, 通过调整地面控制阀门, 控制

注气内外管柱的注入量, 从而调节上、下层的注入量。施工前上层注入量为 0, 下层为 30.09 t/d; 施工后上层注入量为 20.12 t/d, 下层为 9.9 t/d。

C1 井应用同心双管分层注气技术后, 各项指标均达到了设计要求, 实现了分层注气的目的, 目前该井累计注 CO_2 达 6 500 t, 应用效果较好。

4 结论及建议

1) 通过设计“Y445 型注气封隔器+Y441 型注气封隔器”双级锚定式管柱、优选质量流量计、改进注气阀等井下工具, 形成了 CO_2 驱油同心双管分层注气技术, 基本满足了分层注气的要求。

2) 为保证注气管柱的气密封性, 需使用气密封油管、扭矩控制记录仪等设备, 并进行气密封性检测, 同时采取防 CO_2 腐蚀措施。

3) CO_2 驱油同心双管分层注气技术应用效果较好, 对解决同类型的问题具有指导和借鉴意义。但由于井况复杂, 实际应用中, 部分井下工具仍存在适应性不足等问题。建议进一步提高注气封隔器等井下工具长期处于高压环境下的可靠性。

参考文献

References

- [1] 王敏生, 姚云飞. 碳中和约束下油气行业发展形势及应对策略[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 1-6.
WANG Minsheng, YAO Yunfei. Development situation and countermeasures of the oil and gas industry facing the challenge of carbon neutrality[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 1-6.

- [2] 胡永乐, 郝明强. CCUS 产业发展特点及成本界限研究 [J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 15–22.
HU Yongle, HAO Mingqiang. Development characteristics and cost analysis of CCUS in China[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 15–22.
- [3] 唐人选, 梁珀, 吴公益, 等. 苏北复杂断块油藏二氧化碳驱油效果影响因素分析及认识 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 98–103.
TANG Renxuan, LIANG Po, WU Gongyi, et al. Analyzing and understanding the influencing factors of CO₂ flooding in the Subei complex fault block reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 98–103.
- [4] 秦积舜, 韩海水, 刘晓蕾. 美国 CO₂ 驱油技术应用及启示 [J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 209–216.
QIN Jishun, HAN Haishui, LIU Xiaolei. Application and enlightenment of carbon dioxide flooding in the United States of America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 209–216.
- [5] 陈祖华, 孙雷, 杨正茂, 等. 草舍泰州组油藏 CO₂ 混相驱效果及二次气驱可行性研究 [J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 47–50.
CHEN Zuhua, SUN Lei, YANG Zhengmao, et al. Effects of CO₂ miscible displacement and feasibility study of secondary gas flooding of Taizhou Formation in Caoshe Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3): 47–50.
- [6] 陈祖华, 孙雷, 杨正茂, 等. 苏北低渗透油藏 CO₂ 驱油开发模式探讨 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 97–106.
CHEN Zuhua, SUN Lei, YANG Zhengmao, et al. Discussion on the development model of CO₂ flooding in low permeability reservoir in North Jiangsu[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2020, 42(3): 97–106.
- [7] 王海妹. CO₂ 驱油技术适应性分析及在不同类型油藏的应用: 以华东油气分公司为例 [J]. 石油地质与工程, 2018, 32(5): 63–65.
WANG Haimei. Adaptive analysis of CO₂ flooding technology and its application in different types of reservoirs[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2018, 32(5): 63–65.
- [8] 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.
- [9] 俞凯, 刘伟, 陈祖华, 等. 陆相低渗透油藏 CO₂ 混相驱技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2016: 7–146.
YU Kai, LIU Wei, CHEN Zuhua, et al. CO₂ miscible flooding technology in continental low permeability reservoir[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2016: 7–146.
- [10] 贺三, 向栗林, 夏兴宇, 等. CO₂ 驱油下非金属材料耐蚀性能初步评价 [J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 86–91.
HE San, XIANG Sulin, XIA Xingyu, et al. Preliminary evaluation for corrosion resistance of non-metallic pipes by CO₂ flooding[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 86–91.
- [11] 孙银娟, 王潜忠, 张志浩, 等. 316L 不锈钢在模拟含二氧化碳原油中的耐腐蚀性能 [J]. 油气储运, 2020, 39(1): 86–91.
SUN Yinjuan, WANG Qianzhong, ZHANG Zhihao, et al. Corrosion resistance of 316L stainless steel in simulated CO₂-bearing crude oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 86–91.
- [12] 周伟强, 李旭光, 熊培祺. 渤海油田常用套管 CO₂ 腐蚀室内研究 [J]. 石油地质与工程, 2017, 31(3): 124–126.
ZHOU Weiqiang, LI Xuguang, XIONG Peiqi. Laboratory CO₂ corrosion study of common casing in Bohai Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(3): 124–126.
- [13] 刘博, 任呈强, 贺三, 等. 20 钢和 L245NS 钢在 CO₂ 驱油反排水中的腐蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(6): 418–424.
LIU Bo, REN Chengqiang, HE San, et al. Corrosion behavior of carbon steels 20 and L245NS in drainage of CO₂ enhanced oil recovery[J]. Corrosion and Protection, 2018, 39(6): 418–424.
- [14] 李阳. 低渗透油藏 CO₂ 驱提高采收率技术进展及展望 [J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(1): 1–10.
LI Yang. Technical advancement and prospect for CO₂ flooding enhanced oil recovery in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 1–10.
- [15] 姜燕, 罗洪林, 张旭, 等. 管外缆控式智能分注技术 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(6): 803–810.
JIANG Yan, LUO Honglin, ZHANG Xu, et al. External cable-controlled intelligent separate-layer water injection technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(6): 803–810.
- [16] 李永康, 贾贻勇, 张广中, 等. 胜利油田注水井分层酸化管柱研究现状及发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 129–134.
LI Yongkang, JIA Yiyong, ZHANG Guangzhong, et al. Research progress and development suggestion of stratified acidizing strings in water injection wells of Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 129–134.
- [17] 赵广渊, 季公明, 杨树坤, 等. 液控智能分注工艺调配及分层注水量计算方法 [J]. 断块油气田, 2021, 28(2): 258–261.
ZHAO Guangyuan, JI Gongming, YANG Shukun, et al. Allocation method and calculation of layered injection rate of liquid control intelligent layered water injection process[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(2): 258–261.
- [18] 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.
WANG Shijie. Design of secondary compressive Y445 packer[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(11): 163–165.
- [19] 王世杰. 双向三力加载注气封隔器的研制 [J]. 石油机械, 2016, 44(12): 90–92.
WANG Shijie. Two-way three-force loading packer for gas injection[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(12): 90–92.
- [20] 贾庆升. 无线智能分层注采技术研究 [J]. 石油机械, 2019, 47(7): 99–104.
JIA Qingsheng. Intelligent separate layer injection and production technology based on wireless telemetry[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(7): 99–104.
- [21] 于九政, 王子建, 罗必林, 等. 深井多级分注工艺管柱研制及应用 [J]. 石油机械, 2012, 40(10): 88–90.
YU Jiuzheng, WANG Zijian, LUO Bilin, et al. Development and application of multistage separate injection technological string for deep well[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(10): 88–90.

[编辑 曹耐]