

引用格式:许国晨,刘晓文.提高水井分注测试成功率配套技术研究与应用[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):773-780.

XU Guochen, LIU Xiaowen. Research and application of supporting technologies for improving success rate of water injection well testing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 773-780.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.06.008

## 提高水井分注测试成功率配套技术研究与应用

许国晨,刘晓文

(中国石化华东油气分公司泰州采油厂,江苏泰州 225300)

**摘要:**为解决苏北复杂断块油田同心分层注水在实际应用中存在测试仪器遇阻、分层注水量调配不到位等问题,创新采用空心杆冲洗清管,研究应用防返吐配水器、化学防砂技术来保持注水管柱清洁;设计聚合物冻胶调剖体系来缓解层间矛盾,避免层间级差影响测调效果。各项配套技术累计应用13井次,矿场试验证明其在避免测试仪器遇阻、降低分层注水量调配难度方面具有良好效果,年度配套措施井测试成功率达100%,同心分层注水井整体测试成功率由74.4%提升至84.4%,做优精细注水工作的同时实现降本增效,具有良好的推广应用前景。

**关键词:**同心分层注水;测试成功率低;空心杆清洗;防砂;防返吐配水器;聚合物调剖

中图分类号:TE357

文献标识码:A

### Research and application of supporting technologies for improving success rate of water injection well testing

XU Guochen, LIU Xiaowen

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

**Abstract:** To address the challenges of test instrument obstruction and the suboptimal deployment of concentric stratified water injection in the Subei complex fracture block oilfields, an innovative approach involving the use of a hollow rod for pipe cleaning was introduced. This method focused on two key areas: the implementation of a flowback preventing water dispenser and the application of chemical sand control technology to maintain the cleanliness of the water injection pipe. In addition, a polymer gel profile control system was designed to mitigate the disparities between layers, aiming to minimize the influence of stratum grade differences on measurement and adjustment processes. This suite of supporting technologies has been applied to testing wells a total of thirteen times. The on-site tests have demonstrated that this approach is effective in preventing the obstruction of testing instruments and in simplifying the deployment process for layered water injection. Notably, the success rate of testing wells for these annual supporting measures reached 100%, marking a significant achievement. Furthermore, the overall success rate of concentric layered water injection wells increased from 74.4% to 84.4%. The implementation of this method offers a dual advantage of reducing costs and enhancing efficiency, particularly in the context of optimizing fine water injection.

**Keywords:** concentric stratified water injection; low testing success rate; hollow rod cleaning; sand control; flowback preventing water dispenser; polymer gel profile control

分层注水是实现均衡水驱的重要技术手段<sup>[1-2]</sup>,苏北复杂断块油田主要应用同心分注测调一体化技术,相较于传统偏心投捞工艺,极大提高了分层测试

施工效率,实现了提质增效<sup>[3-6]</sup>。近年来,受产出水处理回注、井下出砂、地面管理等因素的影响,致使井筒状况愈加复杂,测试仪器无法到达指定位置,另

收稿日期:2023-07-11。

第一作者简介:许国晨(1980—),男,硕士,高级工程师,主要从事油气田开发管理工作。地址:江苏省泰州市海陵区南通路99号,邮政编码:225300。E-mail:xugc.hdsj@sinopec.com

通信作者简介:刘晓文(1992—),男,本科,工程师,从事采油注水管理及工程工艺工作。地址:江苏省泰州市海陵区南通路99号,邮政编码:225300。E-mail:liuxw2059@163.com

基金项目:中国石化华东油气分公司“GS油田‘2+3’深部调驱工艺技术研究与与应用”(HDF/KJ2020-29);“溱潼凹陷西斜坡浅层油藏出砂防控技术研究”(HDF/KJ2020-28)。

外,还存在部分井分层注水量调配难度大的问题。目前电缆携带测试仪器下井测调仍为各油田主流分注测试手段,行业内针对注水管柱内不清洁问题试验了小直径连续油管冲洗清垢<sup>[7]</sup>、替酸酸浸等方法,能够达到清洗注水管柱的效果,但存在连油作业施工费用高以及酸洗损伤井下工具的问题。电缆携带机械或机电通管工具进入油管内部进行处理也可清理注水管柱内壁<sup>[8]</sup>,但无法在油管内部形成洗井循环通道,清洗不彻底。另外,近年来在苏北复杂断块油田研究试验了无缆智能分注技术<sup>[9]</sup>,无需下入测试仪器,依靠压力波传送指令和反馈数据,避免测试仪器遇阻,该工艺受限于单井设备成本太高,无法大面积推广应用。

为了提高同心分层注水井测试成功率,结合苏北复杂断块油田注水情况,从保持注水管柱清洁与降低层间级差两方面出发,设计应用小接箍空心抽油杆,冲洗井下注水管柱,实现不动管柱恢复分层注水测试;改进配水器结构,增加单流功能防止地层返吐;改进化学防砂技术治理注水井出砂;实验设计了适应苏北复杂断块地质条件的聚丙烯酰胺-有机铬冻胶调剖体系来缓解层间矛盾,降低分层注水量调配难度。2022年各项配套技术累计应用13井次,措施井后续测试成功率达100%,同心分层注水井整体测试成功率由74.4%提升至84.4%,总体形成了标本兼治的低成本配套治理技术,降本增效的同时实现精细化注水。

## 1 同心分层测试成功率低原因分析

同心分层测试成功率低主要原因为测试仪器遇阻,占比78.3%。受注水管柱内部不清洁影响,仪器无法达到指定位置,分层注水井检管作业中发现,CX、GZ区块仪器遇阻主要原因为井下管柱及工具内壁结垢、油污附着沉积致使通道缩颈,NH、JG、C8区块仪器遇阻主要原因为地层出砂进入注水管柱,尾管及工具串内砂堵。

另外,分注井测试过程中发现部分井受层间大级差影响,分层注水量难以调整到配注要求导致测试失败,占比17.4%。例如GS区块G1-3井,采取两级三段同心分层注水工艺,层间矛盾导致分层调配难度大,吸水剖面监测显示(表1),调配后分层吸水差异仍然较大,单靠同心分注工艺无法满足分层配注要求。

表1 苏北复杂断块油田GS区块G1-3井分层注水情况  
Table 1 Stratified water injection of Well G1-3 in GS block of Subei complex fault block oilfield

测井层号	厚度/ m	相对吸水量/ %	各层吸水量/ (m <sup>3</sup> /d)	分层情况	配注量/ (m <sup>3</sup> /d)
11	3.0	72.7	18.18	上层	10
13	1.7	18.2	4.55	中层	10
14	1.7	0	2.27	下层	5
15—16	6.0	9.1			

## 2 井筒清洁与调剖技术研究

提高分层注水井测试成功率需从源头抓起,加强水质提升工作,加大注水干线冲洗力度,加强稳定注水管理等工作<sup>[10-11]</sup>,在持续做好基础工作的情况下,开展保持井筒清洁与降低测调难度配套技术研究。

### 2.1 井筒清洁技术

#### 2.1.1 空心杆冲洗清管

##### 1) 技术方案

注水管柱内通径62 mm,尝试在管柱内部建立一条循环通道,下入空心抽油杆进行通径冲洗。常规空心抽油杆主要用于螺杆泵举升井,其本体外径36 mm,内通径25 mm,接箍外径为50 mm,现场试验其能够形成有效冲击力将管柱内沉积物冲出,但注水管柱底部配水器内通径为46 mm,通径受限,空心杆接箍无法通过。

##### 2) 改进方案

在保障连接强度及密封性前提下,将常规空心抽油杆接箍外径加工为44 mm(图1)。该特制空心抽油杆仅需配合第一级配水器至注水管柱最下部这段距离长度即可,上端仍采用常规空心抽油杆,中间变扣连接,充分利用现有材料节省成本的同时实现分层注水管柱通径冲洗。

##### 3) 实施方法

分层注水井测试遇阻后,首先,根据水井未动管柱时间、测试情况、注水情况分析小接箍空心杆冲洗免动管柱复注可行性。然后,水井停注扩散压力,下入小接箍空心抽油杆进行通径冲洗。针对结垢较为严重、配水器水嘴开关困难等情况可以利用空心抽

油杆实施小体量定点替酸酸浸。小接箍空心抽油杆通径冲洗后,下测试仪器下井对接配水器开关水嘴测试,若测试正常则可不动管柱作业恢复分层注水。利用小接箍空心抽油杆冲洗施工成本低,可有效延长注水井检管周期。

### 2.1.2 防返吐配水器辅助平稳注水

苏北复杂断块油田注水采用单干管多井注入方式,高低压注水井同干线。而分层注水井普遍注入压力高,井口单流阀维保工作量大,易出现干线停注遇到井口单流阀失效的情况,引起注入水回流、地层返吐,导致地层泥砂等进入管串,造成测试仪器遇阻。

#### 1) 改进方案

常规配水器无单流机构,水嘴打开后,油管内外连通,对此设计在配水器水嘴外侧加装一道防返吐结构(图2、图3)。

#### 2) 实现功能

防返吐配水器能够实现停注时,在弹簧力作用下,凡尔球关闭过流通道,防止注入水返吐,减弱高

低压层之间干扰,辅助平稳注水,可有效防止地层返吐携带泥沙等进入油管内部。

### 2.1.3 化学固砂剂固砂防砂

苏北复杂断块油田浅层阜三段油藏储层岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,泥质含量较高,岩石胶结差,胶结类型为孔隙式-线接触,扫描电镜显示矿物颗粒疏松接触,粒间孔极为发育,储层易出砂。注水井储层出砂不仅能造成测试遇阻、砂埋管柱,严重时造成储层的支撑结构损坏,导致储层坍塌,挤压套管变形<sup>[12]</sup>,在做好防返吐以及加强注水管理情况下,固砂防砂工作也很有必要。

传统精密滤砂管结合砾石充填防砂工艺影响分注管柱的下入,并且存在防砂后堵塞问题。新型环氧树脂型化学防砂剂耐介质稳定性和耐高温性较高,对细粉砂有较好的适应性,措施后地层渗透率损失小<sup>[13]</sup>,但室内实验发现,对含油砂样的固结效果不理想,推断可能受油膜影响,需对固砂剂进行改性提升。

#### 1) 改性方案

环氧树脂的分子结构中,环氧基团的存在使它具有一定的分子链活性,而含有活性氢的化合物则是在分子链上形成支链结构,这些支链结构可以与其他分子链交联,发生接枝聚合反应,反应生成改性的含有亲水基团羧基、长链亲油基团的环氧树脂,起到降低表面张力,剥离砂粒表面油膜的作用,强化固砂效果。

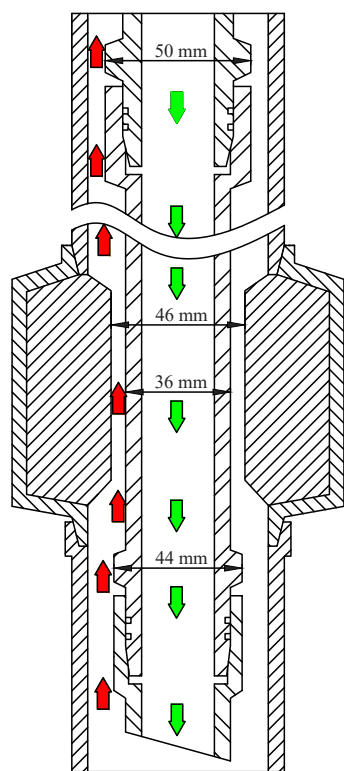


图1 空心抽油杆冲洗  
Fig. 1 Hollow rod flushing

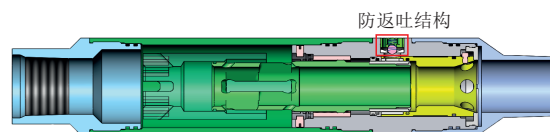
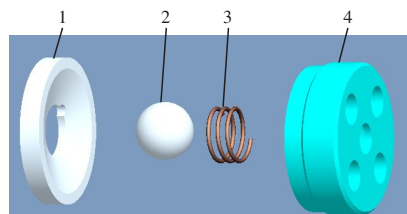


图2 防返吐配水器  
Fig. 2 Anti backflow water distributor



注:1.球座;2.凡尔球;3.弹簧;4.球罩。

图3 防返吐结构  
Fig. 3 Backflow prevention structure

## 2) 固砂强度试验

取NH区块砂样做固砂强度实验:砂样粒径中值0.28 mm,泥质含量14.57%,使用NH区块原油配制不同体积分数含油砂样,分别使用改性前后的固砂剂固砂,按相同比例混配后在50℃水浴环境中固结,按照石油天然气行业标准《化学防砂人工岩心抗折强度、抗压强度及气体渗透率的测定:SY/T 5276—2000》用抗折抗压试验机测试岩心的抗压强度。

试验结果表明,改性后的固砂剂明显提高了固砂强度,含油量越大,提升效果越显著(图4)。针对出砂严重注水井使用改性固砂剂进行治砂防砂施工。

固砂剂用量计算公式:

$$V_1 = A\pi(R_2^2 - R_1^2)h_1\varphi_1 \quad (1)$$

式中: $V_1$ 为防砂剂用量,单位 $m^3$ ;A为附加系数(根据出砂严重程度取值1.1~1.5); $R_2$ 为防砂半径,单位m; $R_1$ 为井筒半径,单位m; $h_1$ 为出砂层厚度,单位m; $\varphi_1$ 为出砂层的原始孔隙度,单位%。

## 2.2 降低分层测试调配难度技术

多层系开发油藏渗透率级差大,层间矛盾大,导致低渗层难吸水,水驱效果差<sup>[14]</sup>。GS区块IV油组渗透率级差达到67.2,层间吸水严重不均,测试调配难度大,水驱开发效果差。

### 1) 技术方案

聚合物溶液在水驱过程中调整吸水剖面、改善油水流量比方面发挥重要作用。聚合物调剖体系的成胶时间与黏度可以根据现场实际需求在措施过程中随时进行动态调整,体系的成胶条件由地面控制,在降低层间矛盾影响,提高采收率方面有较好的效

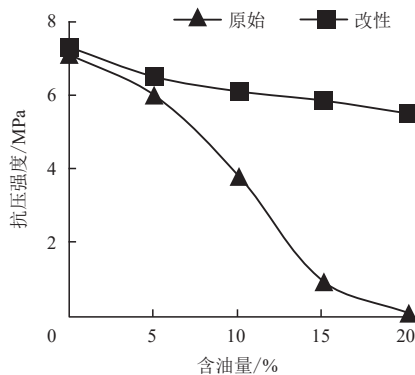


图4 固砂效果对比

Fig. 4 Comparison of sand consolidation effects

果<sup>[15-20]</sup>。GS区块为中、高渗油藏,储层温度在80℃左右,聚丙烯酰胺-有机铬冻胶调剖体系可适用于GS区块。

### 2) 最佳体系配方研究

采用控制变量的实验方法,针对多种因素(聚合物、交联剂质量分数,环境因素)对冻胶性能的影响进行了实验研究,确定调剖体系最佳配方。主要评价体系的成胶时间和最终成胶强度,评价成胶时间采用落球法、评价成胶强度采用旋转黏度计法/真空压力突破法。

通过实验确定聚丙烯酰胺-有机铬冻胶调剖体系主体成分的最佳配方为:聚合物(0.4%~0.5%)+交联剂(0.35%~0.4%)(图5、图6),添加氯化钠(0.3%~0.4%)可提高体系性能(图7),温度影响实验表明GS区块地层温度能够适用该调剖体系(图8)。

堵剂用量计算公式:

$$V_2 = \pi(R_q^2 - R_h^2)h_2\varphi_2\alpha\beta \quad (2)$$

式中: $V_2$ 为堵剂用量,单位 $m^3$ ; $R_q$ 为体系在高渗透层前沿的半径,单位m; $R_h$ 为体系在高渗透层后沿的半

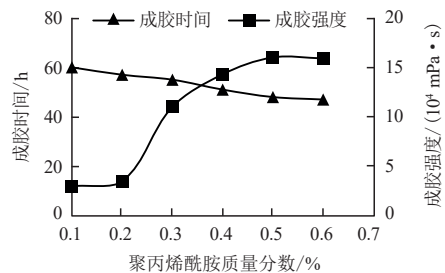


图5 聚丙烯酰胺影响实验

Fig. 5 Experiment on influence of HPAM

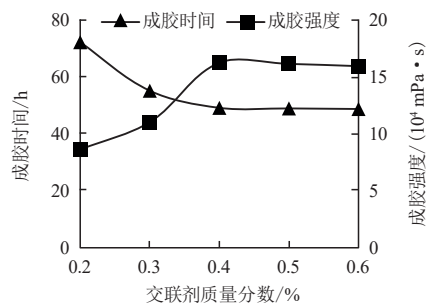


图6 交联剂影响实验

Fig. 6 Experiment on influence of crosslinking agent

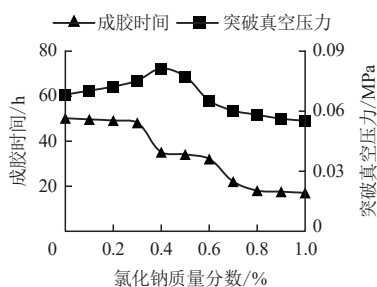


图7 氯化钠影响实验

Fig. 7 Experiment on influence of sodium chloride

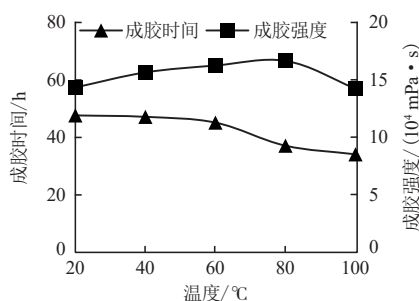


图8 温度影响实验

Fig. 8 Experiments on temperature effects

径,单位m; $h_2$ 为油层厚度,单位m; $\varphi_2$ 为油层的孔隙度,单位%; $\alpha$ 为高渗透层厚度占地层厚度的百分数; $\beta$ 为方向系数。

### 3 矿场应用效果

#### 3.1 井筒清洁

##### 3.1.1 空心杆冲洗清管效果

NH2-11、CX3-26、G3-1井测试过程中出现仪器遇阻状况,起出测试仪器发现表面附着一层硬质油蜡,井下注水管柱内不清洁甚至缩径导致测试仪器到达不了指定位置,3口井距上次作业时间均不足1a,对此实施小接箍空心抽油杆冲洗施工,清洗干净后测试队重新上井下测试仪器调配水嘴,成功恢复正常注水及分层测试,3口井平均延长检管周期312d。

采用空心杆冲洗清管单井作业费用仅4.2万元,相较于动管柱作业单井节省施工、材料等费用10.5万元,相较于连续油管冲洗作业单井节省施工费用9.8万元,降本增效明显。

##### 3.1.2 防返吐配水器应用效果

NH、JG、CX区块注水井多,且地层易出砂,稳定注水管理难度大,压力波动、注入水回流已加剧了多口井出砂状况,针对易出砂且井口单流阀频繁失效的注水井,检管作业时下入防返吐配水器,配合使用防砂筛管,防止泥砂进入注水管柱内部,分注管柱组配见图9。

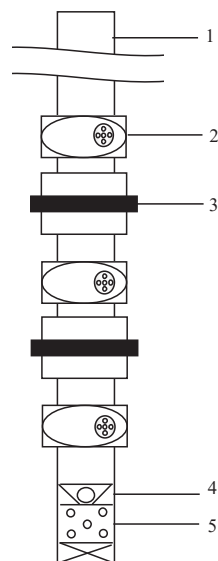
防返吐配水器试验应用了5口井,截止到统计之日均正常注入,且能够保障每季度1次的正常分注测试,累计测试22井次,测试成功率100%。

##### 3.1.3 化学固砂剂防砂效果

改性环氧树脂固砂剂设计为A液、B液分装送至施工现场,施工准备齐全后按照比例混配乳化,泵送至地层,在地层温度下遇砂固结,施工方便、安全性高。

评价化学固砂效果主要考虑渗透率损失率及后续井筒出砂情况。在2口分注井C4-3、NH2-19进行了矿场试验,对比措施前后视吸水指数(表2),渗透率损失控制在10%以内,防砂结束后水井注入正常,未出现高压难注情况。

截止到统计之日,2口井已正常注水超300d,分层测试暂未出现仪器遇阻状况。



注:1.油管;2.防返吐配水器;3.反洗井封隔器;4.高压球座;5.防砂筛管。

图9 分注管柱结构

Fig. 9 Structure of stratified water injection string

### 3.2 聚合物冻胶调剖

地面装置配套关系到堵剂配制质量和能否顺利注入目的层,充分考虑泵注排量、配液速度、堵剂溶胀熟化所需时间等工艺要求,研制了“储水-交替配液”一体化调剖罐(图10),利用文丘里效应研制了射流配液泵实现聚合物与配液水的充分混合(图11、图12),整体形成一套适合单井调剖堵水施工的撬装式调堵设备。

储水罐内清水经过射流泵与丙烯酰胺干粉、添

加剂混合进入配液罐,交联剂单独加入,启动搅拌机,堵剂体系混配均匀并进行溶胀熟化,熟化后通过配液罐出口进入压注泵注入地层。该撬装式调堵设备能够满足1~6 m<sup>3</sup>/h排量的堵剂注入速度,通过交替配液实现堵剂不间断注入。

在GS区块顺利完成3口注水井调剖施工,采取调剖措施后继续实施同心分层注水工艺,分层测试调配难度明显降低,后期多次测试各层注水量均能调配到位,提高了测试调配效率,吸水剖面监测显示各层基本满足配注要求(图13),实现均衡注入。另外,区块整体开发效果明显变好,3个井组年度累计增油2 609 t。

为提高同心分层注水井测试成功率而实施的配套工艺技术经矿场验证均取得较好的效果,2022年苏北油田同心分注测试成功率整体为84.4%,较2021年提升10%。现阶段各项技术处于推广期,待其余井普及应用配套工艺技术后测试成功率还有较大的提升空间。前期各项技术单独进行了矿场试验,后期对于井况复杂分层注水井也可多项配套措施结合使用。

表2 化学固砂剂防砂效果  
Table 2 Sand control effect of chemical sand consolidation agent

井号	措施前测吸水		最高 施工 压力/ MPa	防砂剂 用量/ m <sup>3</sup>	措施后测吸水	
	测试 压力/ MPa	视吸水指数 [L/(MPa·min)]			测试 压力/ MPa	视吸水指数 [L/(MPa·min)]
C4-3	8	28.75	13.0	18.0	8.0	27.38
NH2-19	17	8.00	20.8	10.5	17.5	7.50

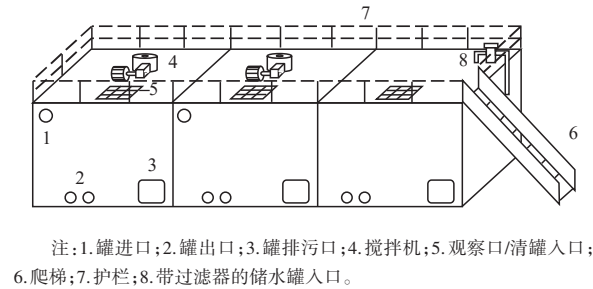


图10 调剖罐

Fig. 10 Profile control tanks

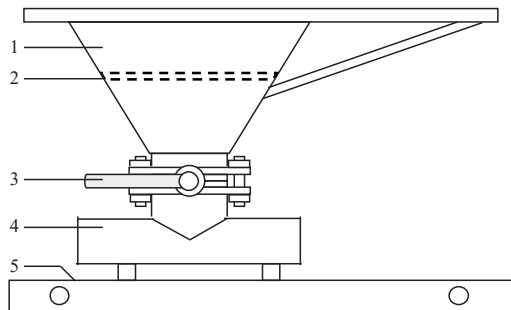


图11 射流配液泵结构示意图

Fig. 11 Structure of jet pump



图12 射流配液泵

Fig. 12 JET pump

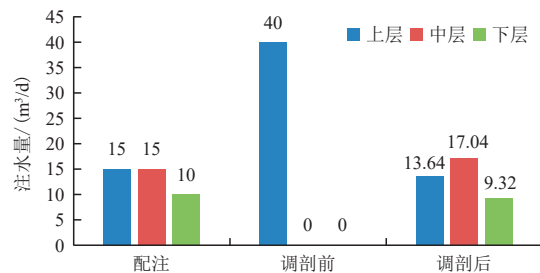


图13 苏北复杂断块油田GS区块GG1井调剖后分注效果

Fig. 13 Stratified water injection effect after profile control of Well-GG1 in GS block of Subei complex fault block oilfield

## 4 结论

1) 通过矿场应用证明小接箍空心抽油杆冲洗清管能够有效解决测试仪器遇阻问题,能够大幅度降低作业成本并延长分注井检管周期;另外,防返吐配水器与改性环氧树脂固砂剂在保持分注井注水管柱内清洁方面起到良好作用,形成了较为可靠的提高测试成功率配套技术。

2) 针对多层系、层间矛盾严重的注水开发区块,先调剖,再分注能够明显降低分注测试调配难度,提高测试效率;聚丙烯酰胺(0.4%~0.5%)+有机铬交联剂(0.35%~0.4%)冻胶调剖主剂体系能够较好地适应苏北复杂断块油藏,改善层间矛盾方面效果良好;配套研制的堵调设备能够满足聚合物冻胶堵剂体系的配制与高效注入,已推广至油田油水井堵调控水增油工程中。

3) 做好注水工作是一个综合工程,注入过程中腐蚀结垢问题也严重影响分注井测试成功率,因此加强水质提升、强化注水管理等基础工作也尤为重要,在此基础上还要继续完善配套工艺,使同心分注井的分层测试成功率迈上一个新台阶。

### 参考文献

- [1] LIU H GAO Y, SUN F C. et al. Overview of key zonal water injection technologies in China[C]// Paper IPTC-16868-MS presented at the International Petroleum Technology Conference, Beijing, China, March 2013.
- [2] 姚振杰, 赵洋, 李剑, 等. J区块注水开发储层物性变化规律研究[J]. 非常规油气, 2021, (6): 46-51.  
YAO Zhenjie, ZHAO Yang, LI Jian, et al. Study on the change law of physical properties after water flooding in J reservoirs block[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, (6): 46-51.
- [3] 杨玲智, 刘延青, 胡改星, 等. 长庆油田同心验封测调一体化分层注水技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 113-117.  
YANG Lingzhi, LIU Yanqing, HU Gaixing, et al. Technology of integrated stratified water injection in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 113-117.
- [4] 张伟杰, 雷宏, 关竹林, 等. 桥式同心分层注水技术在ZD油田的应用效果分析[J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(8): 66-70.  
ZHANG Weijie, LEI Hong, GUAN Zhulin, et al. Application effect analysis of bridge concentric stratified water injection technique in ZD oilfield[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2022, 38(8): 66-70.
- [5] 杨玲智, 胡改星, 王明, 等. 桥式同心验封测调一体化技术研究与应用[J]. 测井技术, 2019, 43(5): 550-553.  
YANG Lingzhi, HU Gaixing, WANG Ming, et al. Research and application of bridge concentric sealing test and commissioning integration technology[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(5): 550-553.
- [6] 王琪华. 苏北油田同心分注工艺的应用实践与评价[J]. 油气藏评价与开发, 2016, 6(1): 67-70.  
WANG Qihua. Application practice and evaluation of concentric injection separation process in Subei oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2016, 6(1): 67-70.
- [7] 李旭, 付振, 刘兴达. 连续油管除垢技术在处理测试问题井中的研究与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(8): 250-251.  
LI Xu, FU Zhen, LIU Xingda. Research and application of continuous tubing descaling technology in treating testing wells [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2019, 39(8): 250-251.
- [8] 唐珂, 鞠岳军, 宗晓军. 机械式震击旋转除垢器在乾安采油厂测试的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(4): 49.  
TANG Ke, JU Yuejun, ZONG Xiaojun. Application of mechanical shock rotary descaler in Qianan oil production plant [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(4): 49.
- [9] 曹力元, 林刚, 刘晓文, 等. 注水井无缆智能分注技术在苏北油田的应用[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(1): 38-41.  
CAO Liyuan, LIN Gang, LIU Xiaowen, et al. Application of cableless intelligent separate injection technology for water injection wells in Subei Oilfield[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(1): 38-41.
- [10] 李本双, 司远征, 李连群, 等. S井区低渗油藏注水系统优化调整技术[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(4): 62-66.  
LI Benshuang, SI Yuanzheng, LI Lianqun, et al. Optimization and adjustment technology for water injection system in low permeability reservoirs in S well area [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(4): 62-66.
- [11] 雷西俊, 周李乾, 牛斌莉, 等. 油田注水管理方式的研究[J]. 石油工程, 2018, 44(2): 17.  
LEI Xijun, ZHOU Liqian, NIU Binli, et al. Research on water injection management in oilfield[J]. Petroleum Engineering, 2018, 44(2): 17.
- [12] 董旭, 李冲, 吴宝路, 等. 油水井出砂套变研究及治理对策[J]. 石油知识, 2022, 38(2): 52-53.  
DONG Xu, LI Chong, WU Baolu, et al. Research on sand casing deformation in oil and water wells and its control measures[J]. Petroleum Knowledge, 2022, 38(2): 52-53.
- [13] 彭正强, 华泽君, 李勇, 等. 新型化学固砂技术研究及在渤海油田的应用[J]. 辽宁化工, 2022, 51(7): 1026-1029.  
PENG Zhengqiang, HUA Zejun, LI Yong, et al. Research on new chemical sand consolidation technology and its application in Bohai Oilfield[J]. Liaoning Chemical Industry, 2022, 51(7): 1026-1029.
- [14] 符静宇, 何宏, 付平, 等. 渗透率级差对多层非均质油藏水驱油影响规律研究[J]. 能源化工, 2018, 39(5): 31-36.  
FU Jingyu, HE Hong, FU Ping, et al. Study on the effect of permeability stage difference on water displacement of multi-layer heterogeneous reservoirs[J]. Energy and Chemical Industry, 2018, 39(5): 31-36.

- [15] 胡俊杰. GD油田聚合物驱调剖技术研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2019.  
HU Junjie. Research on polymer flooding and profile control technology in GD Oilfield[D]. Dongying: China University of Petroleum(East China), 2019.
- [16] 张昕. 低渗透油藏凝胶调剖体系优选及注入参数优化研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.  
ZHANG Xin. Study on optimization of gel profile control system and injection parameters for low permeability reservoirs[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [17] 陈玲玲. 聚合物凝胶调剖剂运移特性及封堵效果[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(4): 122-130.  
CHEN Lingling. Migration characteristics and plugging effect of polymer gel profile control agent[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(4): 122-130.
- [18] CAO W J, XIE K, LU X G, et al. Effect of profile-control oil-displacement agent on increasing oil recovery and its mechanism[J]. Fuel, 2019, 237: 1151-1160.
- [19] 张娜, 元福卿, 魏翠华, 等. 普通稠油油藏聚合物驱提高采收率研究与实践—以孤岛油田B21单元为例[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 101-106.  
ZHANG Na, YUAN Fuqing, WEI Cuihua, et al. Research and practice of enhanced oil recovery by polymer flooding in ordinary heavy oil reservoirs: Taking Block B21, Gudao Oilfield as an example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 101-106.
- [20] 郑昕, 姚秀田, 夏海容, 等. 稠油化学堵调降黏复合驱油体系构建及驱油机理分析[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 122-128.  
ZHENG Xin, YAO Xiutian, XIA Hairong, et al. Establishment of combined viscosity reduction flooding system for chemical water shutoff and profile control in heavy oil reservoirs and analysis of its mechanism[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 122-128.

(编辑 尹淑容)

(上接第764页)

- LI Jianning, MA Hantian, WANG Ying, et al. Karst groundwater investigation report in the Hejin-Hancheng Region of Shanxi Province and Shaanxi Province[R]. Taiyuan: Geological Survey Institute of Shanxi Province, 2004.
- [20] 阎凤忠, 贺勇, 安卫平, 等. 韩城——侯马断陷区主要活动断裂的调查[J]. 山西地震, 1987, 15(3): 9-13.  
YAN Fengzhong, HE Yong, AN Weiping, et al. Investigation of main active faults in the Hancheng-Houma fault depression zone[J]. Earthquake Research in Shanxi, 1987, 15(3): 9-13.
- [21] 代革联. 地质构造对韩城矿区水文地质特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 62-67.  
DAI Gelian. The effect of geology structure on hydrogeology characteristics of Hancheng Mining Area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(7): 62-67.
- [22] 周武. 鄂尔多斯地块东南缘与汾渭地堑接壤地带寻找深部岩溶地热水新突破[J]. 地下水, 2020, 42(4): 106-107.  
ZHOU Wu. A new breakthrough was made in the search for deep karst geothermal water in the Southeastern edge of the Ordos block and the border zone of Fenwei Graben[J]. Ground Water, 2020, 42(4): 106-107.
- [23] 能源行业地热专业标准化技术委员会. 热储示踪试验技术规程: NB/T 10703—2021[S]. 北京: 中国石化出版社, 2022.  
Energy industry geothermal energy standardization technical committee. Technical specification for thermal storage tracer test: NB/T 10703—2021[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2022.
- [24] The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems[R]. USA: United States Office of Research and EPA, 2002.
- [25] 杨平恒, 袁道先, 蓝家程, 等. 基于在线高分辨率监测和定量计算的岩溶地下水示踪试验[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 103-108.  
YANG Pingheng, YUAN Daoxian, LAN Jiacheng, et al. Tracing test of karst aquifer based online, high-resolution monitoring and quantitative calculation[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(2): 103-108.
- [26] 姜光辉, 郭芳, 林玉石, 等. 岩溶管道流示踪试验的定量解析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(增刊1): 384-387.  
JIANG Guanghui, GUO Fang, LIN Yushi, et al. Analysis of quantitative tracing test in karst conduit[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(suppl. 1): 384-387.
- [27] 徐尚全, 王鹏, 焦杰松, 等. 高精度在线示踪技术在岩溶地下水文调查中的应用[J]. 工程勘察, 2013, 41(2): 40-44.  
XU Shangquan, WANG Peng, JIAO Jiesong, et al. Application of high-precision online tracer technique in the hydrogeological investigation of karst groundwater[J]. Geotechnical Investigation & surveying, 2013, 41(2): 40-44.
- [28] 张志强, 张强, 班兆玉, 等. 基于示踪试验的岩溶管道及水力参数定量解析[J]. 人民长江, 2015, 46(11): 80-83.  
ZHANG Zhiqiang, ZHANG Qiang, BAN Zhaoyu, et al. Quantitative analysis of karst conduit and its hydraulic parameters based on tracer test[J]. Yangtze River, 2015, 46(11): 80-83.
- [29] GOLDSCHIEDER N, PRONK M, MEIMAN J, et al. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology[J]. International Journal of Speleology, 2008, 37(1): 27-40.
- [30] 李腾芳, 覃小群, 黄奇波, 等. 岩溶区地下水示踪试验及曲线特征[J]. 中国矿业, 2019, 28(增刊2): 497-498  
LI Tengfang, QIN Xiaoqun, HUANG Qibo, et al. Groundwater tracer test and curve characteristics in karst area[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(suppl. 2): 497-498.

(编辑 郭群)