

· 储层改造与完井技术 ·

文章编号: 1004-4388(2024)04-0044-05

# 基于示踪剂监测的水平井高泥质含量段压裂可行性分析

齐丹, 高秀丽, 李国良, 刘庆, 林倩

中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气合作开发分公司 天津 300450

通讯作者: Email: qidan@cnpc.com.cn

项目支持: 渤海钻探工程公司 2022 年指导性项目“西南油气田致密气项目子课题‘甜点’层评价及录井配套技术研究”(2022D34Y-01)

引用: 齐丹, 高秀丽, 李国良, 等. 基于示踪剂监测的水平井高泥质含量段压裂可行性分析[J]. 油气井测试, 2024, 33(4): 44-48.

Cite: QI Dan, GAO Xiuli, LI Guoliang, et al. Feasibility analysis of fracturing in high shale content intervals in horizontal wells based on tracer monitoring [J]. Well Testing, 2024, 33(4): 44-48.

**摘要** 针对研究区块储层非均质性强, 水平段泥岩钻遇率高, 影响水平井产能发挥的问题, 开展示踪剂产能监测试验研究。选取 YQ8 井三段泥质含量较高压裂段作为试验段, 两段砂岩储层段作为对比段, 随压裂液加入气相、液相示踪剂, 在地面取样分析, 获取各压裂段产气、产水相关信息, 获得泥质含量较高水平段压后产气贡献率分别为 36.6%、39.8%、0.1%, 表明水平段泥质含量较高时, 压后仍具有产能贡献, 甚至高于部分测井响应特征较好分段, 需要加深对泥质含量较高分段的厚度、应力差等因素研究, 优化压裂施工参数。研究证明水平井高泥质含量段的压裂可行性, 以及示踪剂监测技术评价水平井分段压裂效果的可行性。

**关键词** 示踪剂监测; 水平井; 压裂可行性; 高泥质含量; 砂泥岩互层; 产能分析; 致密气**中图分类号**: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.04.007

## Feasibility analysis of fracturing in high shale content intervals in horizontal wells based on tracer monitoring

QI Dan, GAO Xiuli, LI Guoliang, LIU Qing, LIN Qian

Oil and Gas Cooperative Development Branch, CNPC Bohai Drilling and Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China

**Abstract:** In addressing the strong heterogeneity of reservoirs and the high mudstone encounter rate in horizontal sections, which impact the productivity of horizontal wells, a tracer-based productivity monitoring tests was conducted. In Well YQ8, three intervals with high shale content were selected as fracturing intervals, and two sandstone intervals were selected as comparison intervals. Gas-phase and liquid-phase tracers were added to the fracturing fluid, and surface sampling analysis was performed to provide information on gas and water production for each fractured interval. The results show that the gas production contribution rates after fracturing in the horizontal intervals with higher shale content are 36.6%, 39.8%, and 0.1% respectively, indicating that even intervals with high shale content can contribute to gas production, sometimes exceeding intervals with better logging response characteristics. It suggests a need for deeper investigation into factors like thickness and stress differences in high shale content intervals to optimize fracturing parameters. The study demonstrates the feasibility of fracturing in high shale content intervals in horizontal wells and the effectiveness of tracer monitoring technology in evaluating the effect of staged fracturing in horizontal wells.

**Keywords:** tracer monitoring; horizontal well; fracturing feasibility; high shale content; interbedded sandstone and mudstone; productivity analysis; tight gas

四川盆地具有丰富的天然气资源, 前期勘探开发主要集中于三叠系上统须家河组, 而侏罗系中统沙溪庙组地层泥岩多为红色, 砂岩普遍致密, 多数学者认为其很难形成有效储集层。但是公山庙油田、新场气田、成都气田以及中江气田的相继发现, 证明了沙溪庙组的勘探开发潜力。金秋气田位于川北低平构造区西南与川中低平构造区西北交汇

处, 属于典型的致密砂岩气藏, 主要目的层位为侏罗系中统沙溪庙组。区域上地层稳定, 发育 23 期河道砂体, 砂体纵向叠置, 控制储层展布, 岩性以紫红色~暗紫红色泥岩为主, 间夹中厚层块状灰色、灰绿色粉、细砂岩或泥质粉砂岩。储层整体表现出“泥包砂”的特征, 纵向上发育多期河道, 储层厚度大, 且发育相对集中, 横向上分布相对稳定, 同时目前

已开发井出水现象较少,具备水平井开发条件。

水平井开发过程中,分段压裂井各段的压裂效果直接影响气井的产能。针对高含泥岩段水平井压裂,形成了“压泥找砂”、“一缝穿多层”等穿层压裂技术,但是由于穿层压裂效果受隔层厚度、泥质含量、应力差等因素影响,不同区块应用效果差异较大。刘志远等<sup>[1]</sup>基于流固耦合及岩石弹塑性断裂力学理论,建立巨厚多层一体化穿层压裂三维有限元数值模型,对泥夹层层厚、层数及射孔位置对水力裂缝垂向扩展形态的影响进行分析。万军凤等<sup>[2]</sup>结合大牛地单井数据,对工区内隔层厚度和水平主应力差进行对比计算,以分析储、隔层性质、人为可控因素对穿层压裂的影响。研究区块储层纵横向非均质性强,水平井钻进过程中经常钻遇泥岩段或者泥质粉砂岩段,钻遇这些层段是否一定要调整轨迹以及钻遇后是否射开一直有较大争议。孟令韬等<sup>[3]</sup>提出了示踪剂技术作为一种新兴压裂效果评价手段,在非常规储层压裂改造中有广阔的应用前景。申宝剑等<sup>[4]</sup>初步验证了微量元素示踪技术是一项简单、有效的页岩气井连通性评价的示踪技术,可以方便、高效地判断页岩气井的井间连通情况。吕国胜等<sup>[5]</sup>以渤海某油田活化水驱井组 B1 为例,对该井组实施了井间示踪剂监测,并分别利用半解析法及飞行时间法对监测结果进行了定量解释,获取了水窜通道渗透率、波及体积等参数。针对油气田开发中水平井分段压裂后各段产能评价问题,以及油气井多层合采中各层产能认识等问题,示踪剂分段(分层)产能测试技术可以进行产气、产液剖面监测,进而评价单井多段、多层压后各段、各层的气、水产量、贡献率等信息,同时反馈储层信息,深化地质认识,进而为水平井导向跟踪以及压裂设计等工作提供指导<sup>[6]</sup>。

## 1 示踪剂产能跟踪评价机理

示踪剂产能跟踪评价技术通过将水相、气相示踪剂随压裂液均匀注入各压裂段,然后在井口采样、分析,进而确定各段的压裂液返排率、产气贡献率等信息。通过示踪测试可以直接获得地层各段的产能贡献率,帮助评价压裂效果、优化压裂方案,从而降低勘探开发成本,提高作业效率<sup>[7-11]</sup>。与传统产能测试技术相比,示踪剂产能跟踪评价技术不需要下入仪器,因此对井筒、井深等没有任何限制条件,并且可以连续检测近 30 d 的产液、产气剖面,

可以提供更为全面、直接的产出数据。

## 2 现场试验

针对本次试验目的及试验井情况,选择水相、气相两类示踪剂,示踪剂性能具有检测精度高、不与储层流体发生反应、不影响压裂液性能等特点。水相示踪剂主要成分为稀土元素和金属元素,溶于水,不溶于油,在各试验压裂段随压裂液加入不同的水相示踪剂,检测返排压裂液中的示踪剂,进而确定各段的产水贡献情况。气相示踪剂主要成分为烃类与酯类、醇类合成的物质,不溶于水,高温汽化,在各试验压裂段随压裂液加入不同的气相示踪剂,其进入地层后,随着地层温度升高逐渐汽化成气态,汽化的气相示踪剂随着天然气一同产出,检测气样中的示踪剂,进而确定各段产气贡献。

### 2.1 试验设计

本次试验目的是为分析水平井高泥质含量段压后产能情况,以及高泥质含量段压裂是否会造成其他压裂段流动通道受阻等情况。试验选取 YQ8 井,该井完钻层位沙二段,岩性以灰色细砂岩为主,全烃 0.04%~66.22%,水平段钻遇砂岩厚度 1 052 m,钻遇率 87.67%,钻遇三段泥岩,厚度约 148 m。砂岩段泊松比 0.18~0.21,泥岩段 0.20~0.26 m,最大主应力方向主要为北西-南东向,约 100°,与区域内的最大主应力方向基本一致。该井采用射孔完井,水平段长 1 200 m,桥塞分 14 段进行加砂压裂,第 3、5、8 段为泥岩层段,开展压后分段产气、产水剖面测试,对比第 3、5、8 段压后是否有压裂液返排、是否产气以及产气、产水贡献率变化,为今后此类储层的施工参数优化提供依据(见表 1)。另外,第 2 段紧邻第 3 段,可对比相邻砂岩层段、泥岩层段压裂效果,第 14 段为本井地质条件最好的层段,可监测砂岩地质条件好的层段与泥岩压后产水、气贡献,因此选择第 2、14 段为对比层段。综上所述,本次试验选择第 2、3、5、8、14 段为该井检测层段,分别加入 5 种水剂、5 种气剂进行试验研究。

示踪剂随压裂液同时注入,设计压裂 14 层,示踪剂监测 5 层,5 种水相、气相示踪剂按照设计均匀加入目标层段。现场取样共计 39 d,监测期间取得并检测水样 38 个、气样 22 个。

水样在排液管线出口用标准取样瓶直接取样;气样需将取样瓶中装入三分之二的捕聚剂,然后连

接取样装置或在三相分离器气样取样口取样,取样时,打开气阀,使气体通过捕聚剂并排出气瓶,通过不断的用气体冲刷捕聚剂,让气体中的气相示踪剂

吸附在捕聚剂中,每次取样“冲刷”1 h。这种吸附式的取样方法避免了单次取气样的误差,使结果更接近真实的产气剖面。

表 1 YQ8 井示踪剂用量  
Table 1 Tracer dosage in well YQ8

投加顺序	压裂参数			水相示踪剂设计		气相示踪剂设计	
	压裂层/段	支撑剂量/ $\text{m}^3$	压裂液量/ $\text{m}^3$	型号	用量/L	型号	用量/kg
1	第 2 段	500	1 470	CPHT-01	73.5	CPGT-01	30
2	第 3 段	450	1 350	CPHT-02	67.5	CPGT-02	30
3	第 5 段	300	910	CPHT-03	45.5	CPGT-03	30
4	第 8 段	450	1 350	CPHT-04	67.5	CPGT-04	30
5	第 14 段	450	1 350	CPHT-05	67.5	CPGT-05	30
合计		2 150	6 430		321.5		150

2.2 试验结果

取样周期分为三个阶段,分别为气井生产初期、生产中期和生产后期,整体呈现出产水量逐渐降低,产气量逐渐上升特征。水相示踪迹浓度、气象示踪剂浓度变化整体呈现特征如图 1、图 2 所示。

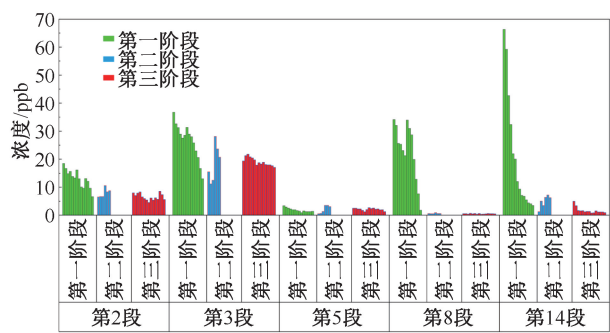


图 1 YQ8 井水剂产出浓度柱状图

Fig. 1 Water agent production density histogram of YQ8 well

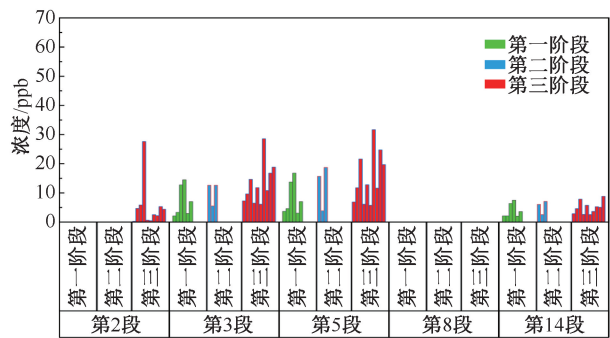


图 2 YQ8 井气剂产出浓度柱状图

Fig. 2 GAS agent production density histogram of YQ8 well

水相示踪剂浓度变化整体呈现以下特征:第一阶段,各段均有产出,第 5 段浓度最低,第 2、3、8、14 段浓度下降较快,说明本阶段监测的第 5 段产出液量逐渐减少或其余未检测层段大量出液;第二阶段,钻塞过程中浓度相对平稳,除第 8 段以外,各段

浓度有不同程度上升;第三阶段,第 3、14 段浓度持续降低,其余层段保持平稳。

气相示踪剂浓度变化整体呈现以下特征:第一阶段,第 2、8 段未产气,第 3、5 段气剂浓度较高,其余层段规律相似;第二阶段,第 2、8 段未产气,第 3、5、14 段气剂浓度起伏较大;第三阶段,第 8 段未产气,第 2 段开始产出,随着压力的变化,气剂浓度变化很大。

3 试验分析

为了评价各压裂段整体产气、产水情况,分阶段对比分析了各压裂段的产气、产水贡献率特征。

3.1 分段产水贡献率分析

第一阶段,各段均有产出,第 5 段产出最低;第 2、3 段产水贡献逐渐上升,第 14 段产水贡献逐渐下降,第 8 段产水贡献先上升后下降。第二阶段,各段贡献率波动较大。第三阶段,产水贡献波动不明显(见图 3)。

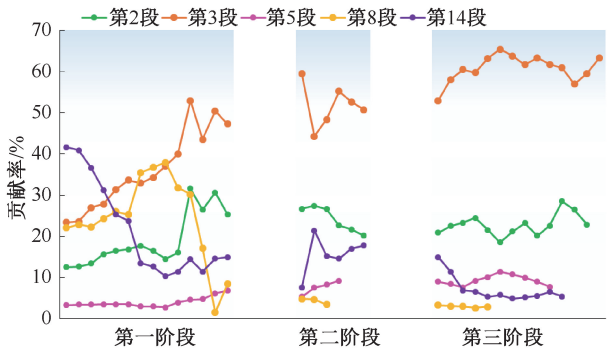


图 3 YQ8 井产水贡献率曲线图

Fig. 3 YQ8 well yield contribution curve

3.2 分段产气贡献率分析

第一阶段,第 2、8 段未产气,第 3 段产气贡献上升趋势,第 5 段产气贡献波动下降,第 14 段相对平稳。第二阶段,第 2、8 段未产气,第 3、5 段产气贡献



起伏较大。第三阶段,第 8 段未产气,第 2 段开始产气,随着压力的变化,各段产气贡献变化较大(见图 4)。

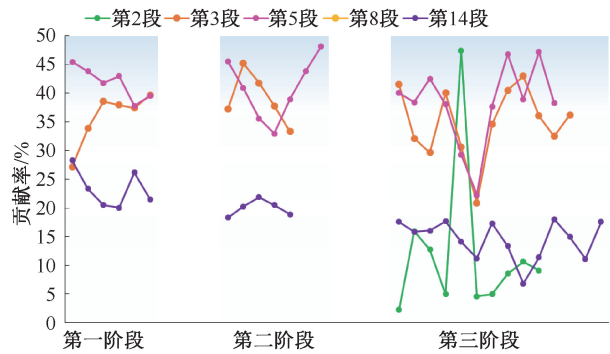


图 4 YQ8 井产气贡献率曲线图

Fig. 4 Gas production contribution curve of YQ8 well

3.3 综合分析

第 2、3、5、8、14 段的产水贡献分别为 18.8%、42.9%、5%、15.2%、18.1%,产气贡献分别为 5.5%、36.6%、39.8%、0.1%、18%(见图 5)。

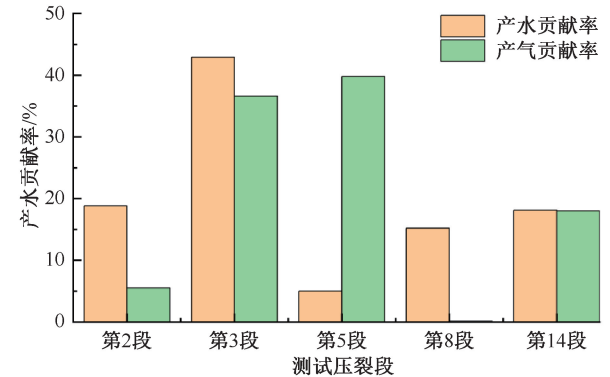


图 5 YQ8 井监测期间总贡献率

Fig. 5 Total contribution rate during YQ8 well monitoring

第 2 段为对比层段,产水贡献 18.8% 接近本井平均水平,贡献相对平稳;产气较晚,贡献率波动较大,产气贡献 5.5%,低于本井平均水平。本段压裂改造效果较好。

第 3 段是穿层压裂层段,产水贡献逐渐上升,贡献 42.9%;产气贡献率先上升,后平稳,产气贡献 36.6%,远高于本井平均水平。本段穿层压裂取得了很好的效果。

第 5 段是穿层压裂层段,产水贡献 5%,低于本井平均水平;产气贡献率相对平稳、波动较大,贡献 39.8%,高于本井平均水平。本段穿层压裂取得了很好的效果。

第 8 段是穿层压裂层段,产水贡献先高后低,贡献 15.2%,低于本井平均水平。本段未产气,穿层压裂效果一般。

第 14 段是对比层段,产水贡献率逐渐降低,贡献 18.1%;产气贡献率逐渐降低,贡献 18%,接近本井平均水平。日产水量逐渐降低,日产气量逐渐上升。本段产量不及预期,可能与监测时间短、产能未完全释放有关。

4 结论

(1) 分别在不同压裂段随压裂液注入水相、气相示踪剂,监测气井产液剖面,评价单井多段压后各段气、水产量、贡献率信息,实现了高泥质含量段压裂可行性评价。

(2) 作为对比层段的第 2、14 段中,第 2 段全程都有压裂液返排,井筒畅通,产气较晚,产量不及预期;第 14 段产液量逐渐下降,产气量每个阶段都呈上升趋势,受限于生产监测时间较短,产气量低于穿层压裂的第 3、5 段。

(3) 穿层压裂的第 3、5、8 段中,第 3、5 段穿层压裂取得了很好的效果,主力返排层段为第 3 段,主力产气层段为第 3、5 段;第 8 段产水量初期较高,下降很快,中后期基本不产水,全程不产气,穿层压裂效果一般;整体证明了水平井高泥质含量段压裂对产能的贡献作用,但是仍需加深对高泥质含量段厚度、应力差等影响因素研究,合理设计施工参数。

致谢:感谢中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气合作开发分公司及相关单位同意公开发表;感谢渤海钻探工程公司 2022 年指导性项目组相关领导和同事给予的支持和帮助。

参考文献

[1] 刘志远,陈勉,金衍,等. 泥夹层对巨厚砂泥互层储层一体化压裂的影响[J]. 科学技术与工程,2014,14(9):34-38.  
LIU Zhiyuan, CHEN Mian, JIN Yan, et al. The effect of argillaceous interlayers on integrative fracturing of sandstone-mudstone interbedding reservoir with huge thickness [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(9):34-38.  
[2] 万军凤,肖阳,王明. 大牛地气田泥砂岩间互层穿层压裂影响因素分析[J]. 石油化工高等学校学报,2017,30(3):32-38.  
WAN Junfeng, XIAO Yang, WANG Ming. Effect factors for layer penetration fracturing of thin interbeds in Daniudi gas field [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30(3):32-38.  
[3] 孟令韬,鲍文辉,郭布民,等. 示踪剂技术在压裂效果评价中的研究进展[J]. 石油化工应用,2022,41(3):1-

4,23.

MENG Lingtao, BAO Wenhui, GUO Bumin, et al. Research progress of tracer technology in fracturing effect evaluation [J]. Petrochemical Industry Application, 2022,41(3):1-4,23.

[4] 申宝剑,潘安阳,张俊,等. 一种页岩气井连通性评价的新型示踪剂应用研究[J]. 石油实验地质,2021,43(5):855-861.

SHEN Baojian, PAN Anyang, ZHANG Jun, et al. Evaluating the connectivity of shale gas wells by new rare element tracers [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021,43(5):855-861.

[5] 吕国胜,王天慧,王殿武. 两种井间示踪剂定量解释方法应用对比研究[J]. 精细与专用化学品, 2021, 29(7):32-35.

LYU Guosheng, WANG Tianhui, WANG Dianwu. Comparative study on the application of two different quantitative interpretation methods [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2021, 29(7):32-35.

[6] 常青,刘音,卢伟,等. 微量物质示踪剂对页岩油水平井压后排液诊断技术[J]. 油气井测试,2021,30(3):32-38.

CHANG Qing,LIU Yin,LU Wei,et al. Diagnostic technology of trace substance tracer for backflow liquid after fracturing in shale oil horizontal well [J]. Well Testing, 2021, 30(3):32-38.

[7] 李克智. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩气藏水平井压裂“甜点”识别方法[J]. 大庆石油地质与开发,2022,41(6):124-132.

LI Kezhi. Horizontal well fracturing “sweet spots” identification method for tight sand-stone gas reservoir in Daniudi gas field in Ordos basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022,41(6):124-132.

[8] 邓大伟. 水平井压后示踪剂监测技术应用研究[J]. 中外能源,2021,26(4):48-51.

DENG Dawei. Application of tracer monitoring technology after fracturing in horizontal well [J]. Sino-global Energy, 2021,26(4):48-51.

[9] 朱洪征,常莉静,雷宇,等. 低渗透油藏水平井贴片示踪剂找水技术与应用[J]. 大庆石油地质与开发,2021,40(1):68-73.

ZHU Hongzheng, CHANG Lijing, LEI Yu, et al. Water detection technology with patch tracer in the horizontal well in low permeability reservoirs and its application [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40(1):68-73.

[10] 常青,李青一,赵鹏,等. 镧系金属示踪剂的研制及其在苏里格地区的应用[J]. 钻井液与完井液,2018,35(3):114-118,123.

CHANG Qing, LI Qingyi, ZHAO Peng, et al. Lanthanide series metal tracers: development and application in Sulige area [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2018, 35(3):114-118,123.

[11] 丁卯,郝军慧,魏千盛,等. 基于新型痕量化学示踪剂的产气剖面测试技术在苏里格气田应用[C]//2020 油气田勘探与开发国际会议论文集. 成都:西安石油大学,2020:339-345.

DING Mao, HAO Junhui, WEI Qiansheng, et al. Application of new trace chemical tracer-based gas production profile testing technology in Sulige gasfield [C]. 2020 International Field Exploration and Development Conference in Chengdu:Xi'an Shiyou University,2020:339-345.

编辑 穆立婷

**第一作者简介:**齐丹,女,1991 年出生,高级工程师,2020 年获得中国科学院大学流体力学专业博士研究生学位,现从事气藏工程研究。电话:15711341607,Email: qidan@cnpc.com.cn,通信地址:天津市滨海新区开发区第二大街 83 号,邮政编码:300457。