

基于分配型示踪剂的压裂效果评价技术与应用

周 超

(中国石油集团测井有限公司长庆分公司, 西安 710200)

摘要:针对油田开发过程中分段、分层压裂产能测试难题, 研究了基于分配型示踪剂监测和评价压裂效果的基本原理与配套工艺技术, 在压裂过程中注入不同种类的分配型示踪剂, 通过监测压裂返排液中示踪剂的浓度变化, 计算各段(层)示踪剂的产出量、返排液产液量和贡献率等参数, 确定油水产出剖面及裂缝信息, 进而分析和判断油气井分段(层)压裂效果。最后, 应用该技术监测和评价了长庆油田涧 * 井的压裂效果。研究结果表明: 涧 * 井 27 个压裂段的 54 条示踪剂产出浓度曲线可分为四大类: 抛物线形单尖峰曲线、抛物线形单宽峰曲线、抛物线形多峰曲线和无峰曲线; 通过分配型示踪剂监测, 可以获得水平井分段产能贡献的直观结果。该技术可用于水平井多段压裂和直井多层压裂过程中地层水、压裂液、原油的产出动态监测, 有助于准确评价压裂效果、优化压裂方案、判断井间连通状况。

关键词:压裂; 示踪剂; 分配型; 压裂效果; 产液贡献率

DOI:10.48014/cpngr.20220824001

引用格式:周超. 基于分配型示踪剂的压裂效果评价技术与应用[J]. 中国石油天然气研究, 2022, 1(2):23-31.

0 引言

随着油田勘探开发的不断深入, 油气井增产措施应用数量和规模逐年增加, 增产措施的效益越来越受到关注, 尤其是投入资金较大的非常规压裂、分层压裂井的效果备受关注^[1]。由于工艺的特殊性及受井下工具的限制, 目前国内外常规的测井、测试方法无法有效地监测和识别压裂后出液层位、井段和出液量, 即便能够监测, 实施起来也存在效率低、效果差、风险高等问题。

目前, 油气井压裂效果评价监测目前常用的方法有三类: 压裂裂缝监测技术、分层产出评价技术、示踪剂产能跟踪与评价技术^[2-6]。(1)压裂裂缝监测技术——井中微地震监测: 可监测裂缝长度、宽度、高度、倾角、方位、改造体积、导流能力、支撑剂分布等; 优点: 刻画裂缝几何参数; 缺点: 受井距、信噪比

影响大, 施工要求高, 需要占用井位, 且施工成本较高^[7]。(2)分层产出评价技术——水平井产液剖面: 可监测压裂液返排情况、判别压裂液与地层水、判断产出流体类型、量化油和水产量等; 优点: 量化产出油水层位; 缺点: 受井身结构、完井方式、井下工况及复杂多相流影响, 低液量下解释准确性较差^[8]。(3)示踪剂产能跟踪与评价技术——分配型示踪剂: 通过压裂示踪剂进行水平井(直井)多段压裂后的产油、产水情况监测, 根据监测结果再进行综合分析, 可得到地层各层(段)产能贡献的数据, 从而判断井筒堵塞情况, 指导油(气)井射孔及储层改造方案优化, 实现区块水平井的高质高效开发, 可应用于水平井多段压裂、直井多层压裂; 优点: ①与压裂施工同步, 无需占用井位, 对产油及工作制度无影响; ②实施效率高, 取样时间可以灵活调整; ③信息丰富, 可得到每段产出情况, 评价压裂效果; ④示

通讯作者 Corresponding author:周超, zhouchaosccj@cnpc.com.cn

收稿日期:2022-08-24; 录用日期:2022-09-18; 发表日期:2022-09-28

踪剂无毒、无污染、无放射性,环保安全;⑤检测灵敏度高,下限可以达到 ppb 级^[9,10]。

针对常规测井、测试方法存在的问题,本文旨在研究利用分配型示踪剂评价分层(段)压裂中储层改造效果,研究了压裂示踪剂监测原理和配套工艺技术,并论述了该技术在长庆油田涧*井的应用,以评价涧*井压裂施工效果。

1 压裂示踪剂监测原理和工艺技术

1.1 监测原理

分配型示踪剂分为水基示踪剂和油基示踪剂。水基示踪剂是主要以只溶于水不溶于油的稀土元素为主体,经化学工艺合成的种类多、无毒、无放射性的新型示踪剂。油基示踪剂主要以只溶于油不溶于水的烃类、酯类有机物为基体,经过取代、置换、聚合、复配等系列改造,制成既易于被水携带又可接触原油后瞬间溶入、可用于高精度检测、无毒、无放射性的新型示踪剂。

在分层(段)压裂过程中,针对不同层(段)选择不同种类的水基/油基示踪剂跟随压裂液一同进出油藏,通过对返排液检测、分析和处理,得到示踪剂浓度曲线,计算出各层段压裂后的产液贡献率,并以此来分析不同层(段)的返排效果,分析判断井筒流体通道的畅通情况,评价压裂效果,示踪剂压裂效果监测示意图见图 1。

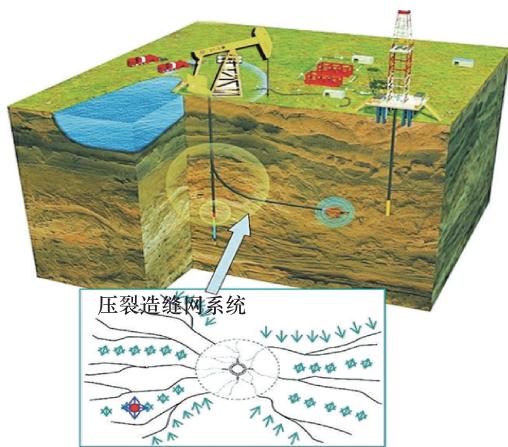


图 1 示踪剂压裂效果监测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tracer fracturing effect monitoring

通过分析压裂返排液中不同类型示踪剂的浓

度,描述压裂渗流通道特征(先主缝、后微缝),分析各压裂层(段)油、水的运移规律(产油和水情况),得到采样期间高产出段、低产出段及不产出段,并结合测井、地质、物探资料综合判断各层段产油和产水的持续能力。

1.2 监测工艺

1.2.1 注剂方式及要求

水平井压裂分配型示踪剂监测的现场施工过程是将配制好的各种示踪剂溶液通过专用泵输送到混砂车,再同压裂液一起注入地层,示踪剂注入设备在注入示踪剂时不改变压裂地面流程、不改变压裂注入程序,也不接触示踪剂,现场施工工艺科学环保,简单高效。一般,使用示踪剂加注泵(电子蠕动泵),将各段不同示踪剂溶液,按照施工时间顺序均匀加入到各段压裂液中,在压裂过程中将各层(段)不同示踪剂随压裂液一起注入不同压裂层(段)。

1.2.2 注剂时机

分配型压裂示踪剂根据现场压裂工艺情况选择最佳注入时机。一般开始压裂程序后,在注入前置液时开始注入油基(水基)示踪剂,按照各段压裂的时间长短调整水基示踪剂注入泵速,在压裂结束停止加砂时完成水基示踪剂的注入,保证示踪剂与压裂液的均匀注入。

(1) 分配型示踪剂(油基):油基示踪剂与原油具有极高的互溶度,不溶于水,一旦进入指定油层遇到油后,立即与油吸附并互溶。为了让油基示踪剂处于裂缝的最前端,标记更多的原油,在开始压裂程序地层破压,压裂液排量相对稳定后一次性将分配型油基示踪剂加入到混砂车搅拌池,随压裂液一起进入地层。

(2) 分配型示踪剂(水基):水基示踪剂是在油基示踪剂加入完成后立即加注。当油基示踪剂加注完成后马上启动示踪剂专用泵,将水基示踪剂按照一定排量泵入混砂车搅拌池,随压裂液一起进入地层。水基示踪剂泵入排量按照各段压裂的时间长短调节大小,停止加砂时完成注入,保证水基示踪剂与压裂液的均匀注入。

2 压裂示踪剂监测结果解释方法

- (1) 客观评价单井的产油、产水剖面
 ① 各段产水贡献率;
 ② 各段产油贡献率;
 ③ 各段示踪剂回采率等。
- (2) 压裂后的返排效果(各层/段产油、产水的相对量和绝对量)
 检测浓度劈分单瓶样品各类示踪剂的贡献率(即相应各段的产液贡献率),直接绘制单段以及各段叠加贡献率曲线。
 单瓶样品各类示踪剂的贡献率通过加权平均得到各段各种示踪剂的日贡献率,结合试采的日产量数据劈分到每天每段的产液量。
 每天每段的产液量累加得到各段监测期的总产液量,再结合每段压裂施工注入液量,得出每段压裂液返排率等信息。
 平均回采率:单井示踪剂采出量总和/单井投

加量总和 $\times 100\%$

返排率:单段压裂液的返排量与注入量的比值。

第 N 段贡献率:第 N 段产液量/本井总产液量 $\times 100\%$

主产液层段:单段贡献率 $\geq K\%$ (K%为单井平均贡献率)的层段为主产液层段;

次产液层段: $3\% \leq \text{单段贡献率} < K\%$ 的层段为次产液层段;

微产液层段:单段贡献率 $< 3\%$ 的层段为微产液层段。

(3) 结合测井解释,分析不产出层/段和产出层/段的原因

(4) 压裂施工参数对产量的影响(指导优化储层改造方案)

(5) 是否存在天然裂缝或断层

(6) 如果同时进行临井取样,还可判断窜层及窜层位置

压裂示踪剂计算解释流程如图 2 所示。

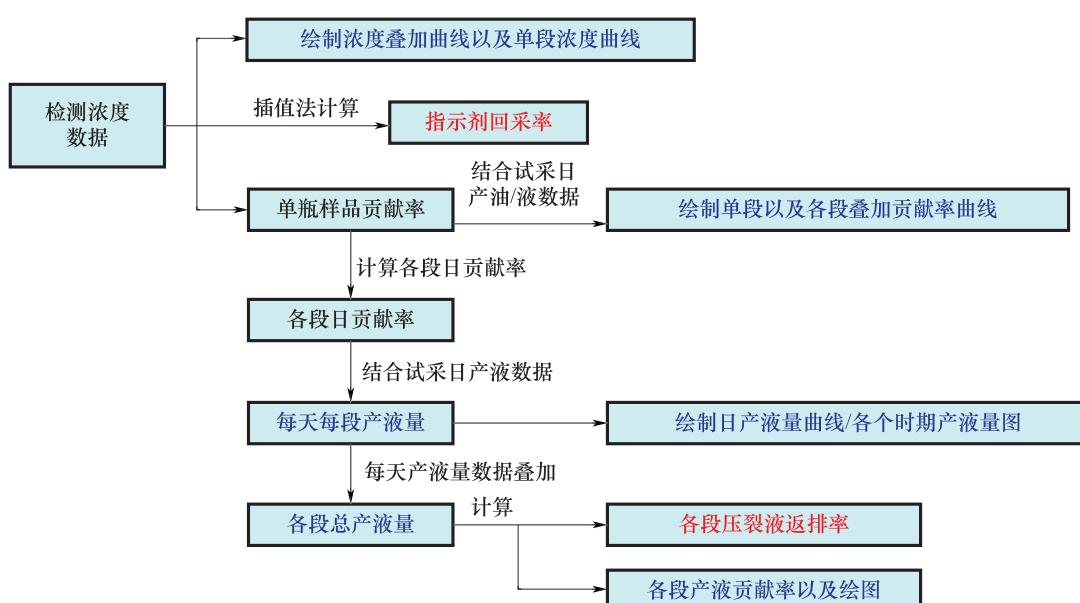


图 2 压裂示踪剂计算解释流程图

Fig. 2 Flow chart of fracturing tracer calculation and interpretation

3 应用实例

3.1 监测井基本情况

润 * 井地理位置位于陕西省榆林市定边县,补心海拔 1640.086m,井别为预探井,井型为水平井。

该井于 2021 年 6 月 18 日开钻,2021 年 7 月 18 日完钻,完钻井深 4100.00m,水平段长 1400.00m,钻遇率 57.04%。润 * 井采用连续油管水力喷射精准分段压裂投产,全井设计为 27 段喷射改造。润 * 井压裂工程概况如表 1 所示。

表 1 涧 * 井压裂工程概况表

Table 1 Overview of the fracturing project of Jian * well

段数	喷射点位置 /m	有效液量 /m ³	前置液量/m ³		携砂液量/m ³		顶替液量/m ³	
			油管	环空	油管	环空	油管	环空
第 1 段	4020	439.5	17.5	140	34	248	5.6	45.1
第 2 段	3930	439.5	17.5	140	34	248	5.5	44.1
第 3 段	3826	327.9	14.6	102	28.3	183	6.1	42.9
第 4 段	3698	327.9	14.6	102	28.3	183	5.9	41.5
第 5 段	3678	327.9	14.6	102	28.3	183	5.9	41.3
第 6 段	3636	327.9	14.6	102	28.3	183	5.8	40.9
第 7 段	3616	327.9	14.6	102	28.3	183	5.8	40.6
第 8 段	3591	233.9	12.7	70	25.2	126	7.3	40.4
第 9 段	3484	233.9	12.7	70	25.2	126	7.1	39.2
第 10 段	3464	439.5	17.5	140	34	248	4.9	39
第 11 段	3442	439.5	17.5	140	34	248	4.8	38.7
第 12 段	3417	327.9	14.6	102	28.3	183	5.5	38.5
第 13 段	3392	327.9	14.6	102	28.3	183	5.5	38.2
第 14 段	3338	327.9	14.6	102	28.3	183	5.4	37.6
第 15 段	3310	327.9	14.6	102	28.3	183	5.3	37.3
第 16 段	3286	327.9	14.6	102	28.3	183	5.3	37
第 17 段	3260	233.9	12.7	70	25.2	126	6.7	36.7
第 18 段	3140	233.9	12.7	70	25.2	126	6.4	35.4
第 19 段	3116	327.9	14.6	102	28.3	183	5	35.2
第 20 段	3089	327.9	14.6	102	28.3	183	5	34.9
第 21 段	3053	327.9	14.6	102	28.3	183	3.6	25.2
第 22 段	3030	327.9	14.6	102	28.3	183	3.6	25.1
第 23 段	3005	233.9	12.7	70	25.2	126	6.2	33.9
第 24 段	2932	233.9	12.7	70	25.2	126	6	33.1
第 25 段	2896	327.9	14.6	102	28.3	183	3.4	24
第 26 段	2876	327.9	14.6	102	28.3	183	3.4	23.8
第 27 段	2829	327.9	14.6	102	28.3	183	3.4	23.5
合计		8735.7						

针对涧 * 井压裂效果评估的需要,在各压裂段(27段)投入不同种类的分配型示踪剂,包括油基和水基示踪剂共54种,测试该井压裂改造后裂缝间的影响以及所投示踪剂层段的产液情况。

压裂示踪剂监测从2021年10月21日开始,2022年2月20日截止,总共历时123天。2021年10月21日至2021年11月23日有油产出,2021年11月23日后不出油,2022年1月2日产水基本稳定在25m³(基本不产油)。期间,总共累计产油

99.7m³,累计产水3304m³,共采集样品160次,包括水样156个、油样40个,对采集的样品开展示踪剂浓度测试,总共获得了27个压裂段的54条示踪剂浓度曲线。

3.2 示踪剂浓度曲线形态分析

根据分配型油水基示踪剂产出浓度曲线形态的差异,将27个压裂段的54条示踪剂浓度曲线分为四大类,不同的曲线形态具有不同的特点。

3.2.1 抛物线单尖峰型示踪剂浓度曲线

分配型示踪剂(水基)产出浓度曲线呈现抛物线单尖峰型的总共有 7 段,它们分别是第 6 段、第 11 段、第 13 段、第 22 段、第 23 段、第 26 段、第 27 段。分配型(水基)示踪剂产出浓度曲线形态特征为抛物线单峰型的情况(图 3),表现为渗流通道类型为大量微裂缝和主裂缝,生产特点为初期产液依靠主缝为主,后期动用微缝,在微缝网络持续动用

情况下,导致压力和出液量下降速度慢。

分配型示踪剂(油基)产出浓度曲线呈现抛物线单尖峰型的总共有 9 段,它们分别是第 2 段、第 6 段、第 11 段、第 12 段、第 13 段、第 22 段、第 24 段、第 26 段、第 27 段。分配型(油基)示踪剂产出浓度曲线形态特征为抛物线单峰型的情况(图 3),表现为产油层开始在主裂缝里出油量大,产况好,后期随着压力和能量的改变,出油量有所下降。

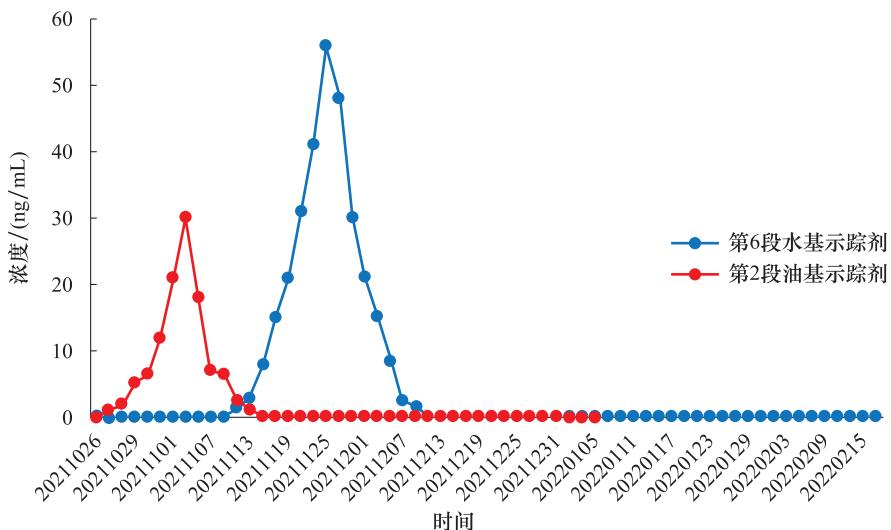


图 3 抛物线单尖峰型示踪剂产出浓度曲线

Fig. 3 Parabolic single sharp peak tracer output concentration curve

3.2.2 抛物线单宽峰型示踪剂浓度曲线

分配型示踪剂(水基)产出浓度曲线呈现抛物线单宽峰型的总共有 12 段,它们分别是第 1 段、第 2 段、第 3 段、第 4 段、第 5 段、第 7 段、第 8 段、第 9 段、第 10 段、第 14 段、第 15 段、第 18 段。分配型(水基)示踪剂产出浓度曲线形态特征为抛物线单宽峰型时(图 4),表现为:渗流通道类型为小裂缝和主裂缝,生产特点为初期产液以主缝为主,当生产压差提高后,小裂缝开始动用。

分配型示踪剂(油基)产出浓度曲线呈现抛物线单宽峰型的总共有 11 段,它们分别是第 3 段、第 4 段、第 7 段、第 8 段、第 9 段、第 14 段、第 16 段、第 18 段、第 19 段、第 23 段、第 25 段。分配型(油基)示踪剂产出浓度曲线形态特征为抛物线单宽峰型时(图 4),表现为:产油层开始在主裂缝里出油量一般,产层压力和能量的变化不大。

3.2.3 抛物线多峰型示踪剂浓度曲线

分配型示踪剂(水基)产出浓度曲线呈现抛物线多峰型的总共有 3 段,它们分别是第 12 段、第 16 段和第 24 段。分配型(水基)示踪剂产出浓度曲线形态特征为抛物线多峰型时(图 5),表现为:渗流通道类型为主裂缝,生产特点为产液以主裂缝为主,压降速度和出液量比单峰慢。

3.2.4 无峰型示踪剂浓度曲线

分配型示踪剂(水基)产出浓度曲线呈现无峰型的总共有 5 段,它们分别是第 17 段、第 19 段、第 20 段、第 21 段和第 25 段。分配型示踪剂(水基)产出浓度曲线形态特征为无峰情况下(图 6),表现为:渗流通道类型为无渗流通道,生产特点为无裂缝动用特征,分配型示踪剂(水基)返排量很小。

分配型示踪剂(油基)产出浓度低(小于 30 ppb)曲线呈现无峰型的总共有 7 段,它们分别是第 1 段、第 5 段、第 10 段、第 15 段、第 17 段、第 20 段和第 21

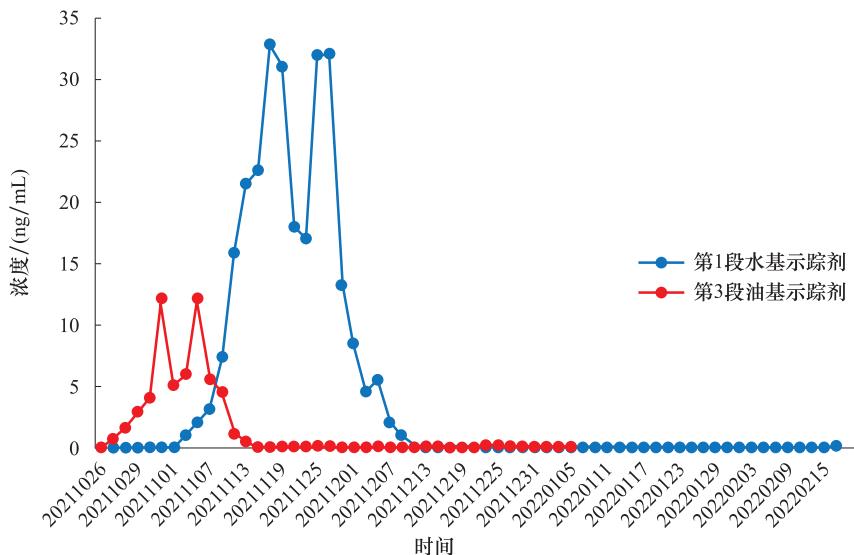


图 4 抛物线单宽峰型示踪剂产出浓度曲线

Fig. 4 Parabolic single broad peak tracer output concentration curve

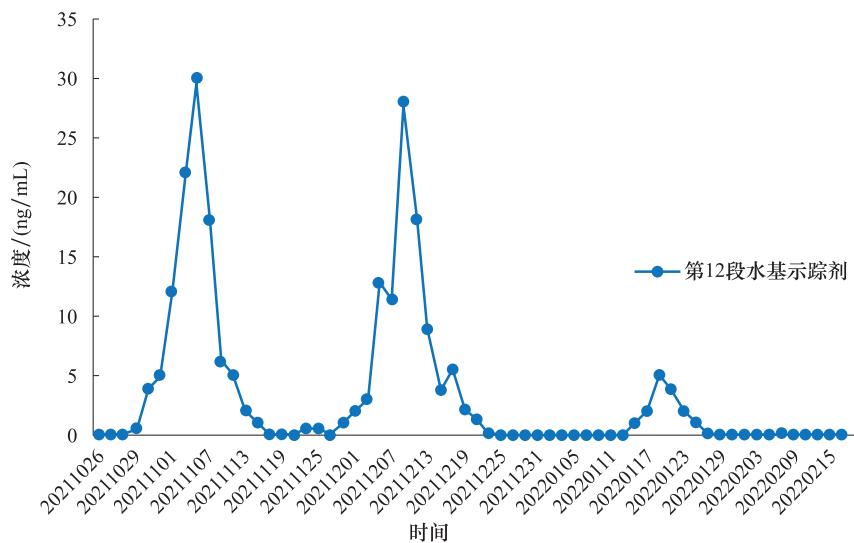


图 5 抛物线多峰型示踪剂产出浓度曲线

Fig. 5 Parabolic multi-peak tracer output concentration curve

段。分配型示踪剂(油基)产出浓度曲线形态特征为无峰情况下(图 6),表现为产油层产油量很少,分配型示踪剂(油基)产出量很小或者完全不产出。

3.3 各段产液贡献率分析

根据图 7 可得, 润 * 井由各段水基示踪剂浓度计算的产液贡献率。从产液剖面数据来看, 注示踪剂的主力产水段为第 6 段、第 22 段、第 11 段、第 13 段、第 16 段、第 8 段、第 1 段、第 10 段、第 2 段、第 24 段、第 5 段、第 3 段和第 12 段; 其次为第 4 段、第 9 段、第 14 段、第 7 段和第 23 段; 其中第 18 段、第 15

段、第 26 段、第 27 段、第 19 段、第 20 段、第 17 段、第 21 段和第 25 段贡献率比较低

由各段油基示踪剂浓度计算的产油贡献率得到各段的产油静态剖面。产油剖面数据显示,注示踪剂的主力产油段为第 13 段、第 2 段、第 12 段、第 11 段、第 22 段、第 6 段和第 24 段;其次为第 8 段、第 16 段、第 19 段、第 9 段、第 3 段、第 24 段、第 14 段、第 27 段、第 18 段和第 1 段;其中第 5 段、第 23 段、第 7 段、第 26 段、第 10 段、第 21 段、第 17 段、第 20 段、第 25 段和第 15 贡献率不高。

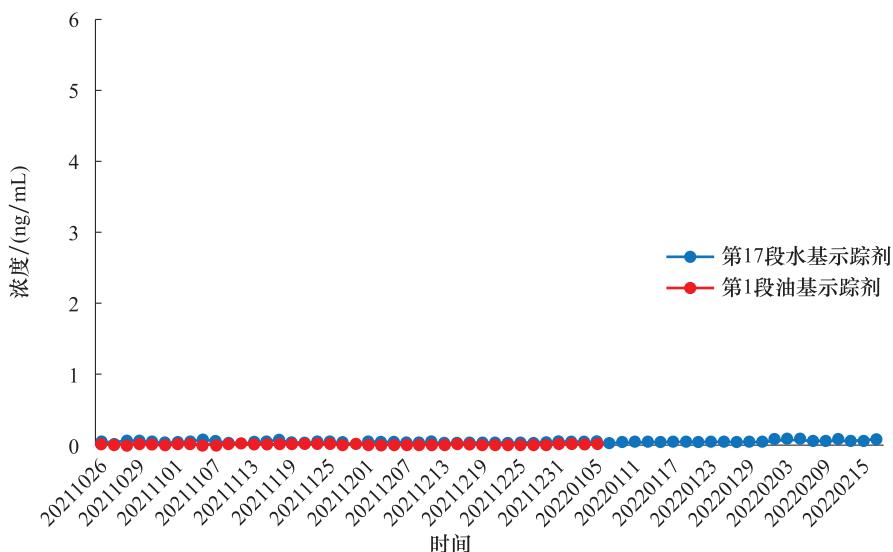


图 6 无峰型示踪剂浓度曲线

Fig. 6 Peakless tracer concentration curve

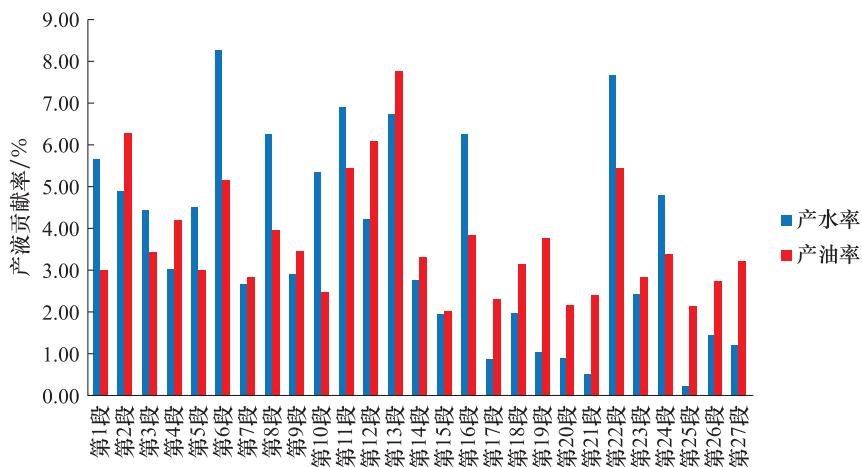


图 7 涧 * 井各段产液贡献率

Fig. 7 Contribution rate of fluid production in each segment of Jian * well

4 结 论

(1) 分配型示踪剂可应用在水平井(直井)多段压裂。通过压裂示踪剂监测技术可以对水平井(直井)多段压裂后的返排液进行监测并综合分析,计算各段示踪剂的产出量、返排液的产液量和贡献率等,从而确定水平段的产液剖面情况,为分析判断压裂效果提供参考依据。

(2) 通过对涧 * 井的压裂示踪监测实践表明,不同种类之间的分配型示踪剂具有检测灵敏度高、稳定性好、耐酸碱、彼此之间无干扰等特点,与压裂液配伍性好,示踪剂的物理化学性质可满足多层次

(段)压裂井的示踪剂监测需求。

(3) 根据涧 * 井各段的产油贡献率情况,被监测的 27 段中,第 13 段、第 2 段、第 12 段、第 11 段、第 22 段、第 6 段和第 24 段为主力产油段;第 8 段、第 16 段、第 19 段、第 9 段、第 3 段、第 24 段、第 14 段、第 27 段、第 18 段和第 1 段为中产油层段;第 5 段、第 23 段、第 7 段、第 26 段、第 10 段、第 21 段、第 17 段、第 20 段、第 25 段和第 15 段为低产油层段。

(4) 从涧 * 井的产油量和油基示踪剂监测情况来看。总体产油很少。120 多天总产油 99.7 m^3 ,但从示踪剂产出曲线来看有 11 段单宽峰和 9 段单尖峰,还有 7 段无明显峰型表现,可以判断可能是由于

井筒工程原因，导致地层各层（段）油没有顺利产出，后期随着工程问题的排除，地层产油量会增加。

利益冲突：作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] 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.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5285.2022.03.001>
- [2] 泽梅尔. 油田示踪技术 [M]. 赵培华等译, 北京: 石油工业出版社, 2005: 55-81.
- [3] 邱德家, 庞伟, 毛军, 等. 水平井产出剖面测试技术现状及发展建议 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(1): 56-62.
<https://doi.org/10.13639/j.odpt.2022.01.009>
- [4] 曹鹏. 多层压裂示踪剂监测解释方法分析 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
<https://doi.org/10.27643/d.cnki.gsybu.2020.000651>
- [5] 韩云龙, 罗明良, 马宇奔, 等. 压裂裂缝示踪监测技术研究与应用进展[C]//2020油气田勘探与开发国际会议论文集, 2020: 276-281.
<https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2020.042234>
- [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.
<https://doi.org/10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.03.006>
- [7] 赵超峰, 周治岳, 田建涛, 等. 疏松砂岩气藏压裂井中微地震监测应用研究——以涩北气田为例[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1919-1925.
<https://doi.org/10.6038/pg2020DD0390>
- [8] 张波, 孙波, 武清钊. 水平井产出剖面测井技术在塔河油田的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(6): 740-744.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7940.2010.06.019>
- [9] 陈福利, 刘立峰, 林旺, 等. 致密油水平井分级压裂示踪剂监测与评价技术[C]//2017油气田勘探与开发国际会议(IFEDC 2017)论文集, 2017: 2345-2356.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7940.2010.06.019>
- [10] 许建华, 安娜, 白洛娃, 等. 致密气藏压后各段产能定量长期检测技术及应用[C]//第32届全国天然气学术年会(2020)论文集, 2020: 1572-1578.
<https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2020.065036>

Fracturing Effect Evaluation Technology and Application based on Distributive Tracer

ZHOU Chao

(Changqing Branch, China National Logging Co., Ltd., Xi'an 710200, China)

Abstract: In order to address the difficulty of testing the segmented and layered fracturing productivity in the process of oilfield development, the basic principle of monitoring and evaluating the fracturing effects based on distribution tracer and the supporting process technology are researched, and different types of distribution tracers are injected during the fracturing process. According to the parameters such as the output of tracers, flowback liquid production, and contribution rate, the oil-water production profile and fracture information are determined, thus the segmented (layered) fracturing effect of oil and gas wells are analyzed and judged. Finally, this technology is applied to monitor and evaluate the fracturing effect of Jian * well in Changqing Oilfield. The research results show that the 54 tracer production concentration curves of 27 fracturing sections in Jian * Well can be divided into four categories: parabolic single sharp peak curve, parabolic single broad peak curve, parabolic multi-peak curve, and peakless curve. By monitoring distributive tracer, intuitive results of horizontal well's segmented productivity contribution can be obtained. This technology can be used for dynamic monitoring of formation water, fracturing fluid, and crude oil production during segmented fracturing in horizontal wells and layered fracturing in vertical wells, conducive to accurately evaluating the effectiveness of fracturing, optimizing fracturing schemes and determining inter-well connectivity.

Keywords: Fracturing; tracer; distributive; fracturing effect; fluid production contribution rate

DOI: 10.48014/cpngr.20220824001

Citation: ZHOU Chao. Fracturing effect evaluation technology and application based on distributive tracer [J]. Chinese Petroleum and Natural Gas Research, 2022, 1(2): 23-31.

Copyright © 2022 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

