

英雄岭页岩油藏水力压裂效果评价方法及应用

雷丰宇^{1*}, 万有余¹, 毕雪丽^{2#}, 乔星宇¹, 江昊炎¹, 郭得龙¹, 冯昕媛¹

¹中国石油青海油田公司钻采工艺研究院, 甘肃 酒泉

²长江大学油气钻采工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年7月1日; 录用日期: 2024年8月12日; 发布日期: 2024年8月22日

摘要

页岩油藏多段多簇水平井压裂缝网结构的复杂化使得准确评价压裂效果难度大。针对压裂施工过程中数据来源和解释原理差异性大, 评价方法间各有优劣且可互相补充, 需要综合考虑地质条件、压裂参数和评价目标等因素, 提出联合多种评价方法进行综合评估。以英雄岭英页2平台H14-2井为例, 采用压裂停泵高频压力测试、示踪剂测试、井中微地震测试等联合评价方法对压裂缝规模、压裂缝渗流特征、压裂缝产能进行压裂效果评价; 联合录测并对岩性岩相的解释成果, 深层揭示油相示踪剂反映的压裂水平井段供液存在差异化动用的特征。综合评估表明, 停泵降压法反演得到的裂缝规模可以通过微地震验证并补充, 示踪剂返排浓度曲线结合微地震的三种缝网模型可以评价压裂水平井产能水平, 压裂段动用状况先启动的岩性主要为纹层状灰云岩, 后启动的岩性主要为层状灰云岩。采用联合评价方法可以满足页岩油井压裂改造效果评价的挑战, 并为页岩油藏的高效开发提供科学依据。

关键词

页岩油藏, 水力压裂, 压裂效果, 压裂规模, 评价

Evaluation Method and Application of Hydraulic Fracturing Effect in Yingxiongling Shale Reservoir

Fengyu Lei^{1*}, Youyu Wan¹, Xueli Bi^{2#}, Xingyu Qiao¹, Haoyan Jiang¹, Delong Guo¹, Xinyuan Feng¹

¹Drilling and Production Technology Research Institute, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Jiuquan Gansu

²Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Production Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei

Received: Jul. 1st, 2024; accepted: Aug. 12th, 2024; published: Aug. 22nd, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 雷丰宇, 万有余, 毕雪丽, 乔星宇, 江昊炎, 郭得龙, 冯昕媛. 英雄岭页岩油藏水力压裂效果评价方法及应用[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(8): 1070-1079. DOI: 10.12677/ag.2024.148098

Abstract

In shale reservoirs, due to the complexity of the fracture network structure of multi-section and multi-cluster horizontal wells, it is difficult to accurately evaluate the fracturing effect. In response to the problem of the great variability of data sources and interpretation principles in the process of fracturing construction, each evaluation method has its own advantages and disadvantages and can be complementary to each other. It is necessary to consider factors such as geological conditions, fracturing parameters and evaluation objectives, and to propose a comprehensive evaluation by combining multiple evaluation methods. Taking YY2H14-2 well as an example, joint evaluation methods such as high-frequency pressure test of fracturing stop pump, tracer test and microseismic test in the well were adopted to evaluate the fracturing effect on the fracture scale, seepage characteristics of the fracture and fracture production capacity. Combined with the results of logging interpretation of lithology and lithofacies, it deeply reveals the characteristics of differential utilization of liquid supply in fractured horizontal well section reflected by oil phase tracer. The comprehensive evaluation shows that the fracture scale obtained from the inversion of the stop-pump pressure drop method can be verified and supplemented by microseismic, the tracer flowback concentration curve combined with the three types of fracture network models from microseismic can evaluate the productivity level of the fractured horizontal wells. The lithology of the first start-up of the fracturing section is mainly lamellar limestone, and the lithology of the second start-up is mainly lamellar limestone. The joint evaluation method can meet the challenge of evaluating the fracturing effect of shale oil wells and provide a scientific basis for the efficient development of shale reservoirs.

Keywords

Shale Reservoir, Hydraulic Fracturing, Fracturing Effect, Fracturing Scale, Evaluation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

压裂技术助力非常规油气藏的增产已经成为一项成熟的技术。日益蓬勃的页岩油气资源的勘探开发水平[1]使得压裂技术由初期的单一技术逐渐向综合技术发展,在页岩甜点储层中多级多簇水平井压裂的大规模复杂缝网结构成为有效开发的关键手段[2]-[5],评价压裂效果方法相应也由初期针对常规低渗透储层而转为非常规油气藏更为复杂多样化[6]-[9]。

根据压裂施工全过程收集到的数据可以细分为全井段随钻测井数据,压裂段施工压力数据,压裂段施工停泵压力波动数据,压裂段示踪剂返排浓度数据,全井段微地震监测数据等。针对不同数据相应地应运而生了多种压裂效果评价方法,诸如声波测井、停泵压降分析法、微地震监测、示踪剂监测和生产动态法等方法[10]-[14]。李宁等[15]通过反射斯通利波提取和成像技术定量表征近井筒压裂缝,并利用叠前深度偏移成像算法实现远井压裂缝的高精度成像,以提高储层压裂效果评价的精度。周珺等[16]开发并验证了一种基于停泵压降分析的数学模型,用于快速准确地评估致密砂岩气井的压裂效果,并通过实例应用证实了该方法的有效性。李鹏等人[17]通过微地震监测技术评估复兴地区压裂效果,并分析影响因素,进而通过调整施工工艺参数来降低应力阴影效应,优化压裂效果。邓大伟[18]采用气示踪剂监测技术,通

过测量水平井多段压裂后每段的产气贡献占比,来评价储层改造效果,并利用该技术优化压裂施工参数。刘文超等[19]利用反褶积算法对页岩气井的生产动态数据进行归一化处理,并通过建立的渗流模型和特征曲线分析方法,量化评估压裂液返排阶段与生产阶段压裂裂缝特征的差异,以优化页岩气藏的增产措施。这些评价方法由于资料收集和处理方式不同,方法间各有优劣并可以互相补充,在实际应用中为提高储层压裂效果综合评价的准确性和可靠性,需要综合考虑地质条件、压裂参数和评价目标等因素,联合多种评价方法进行综合评估,以满足页岩油井压裂改造效果评价的挑战,并为页岩油藏的高效开发提供科学依据。

本文以柴达木盆地英雄岭页岩油藏压裂水平井为研究对象,按照压裂改造过程的科学程序,从系统角度对压裂施工过程中压前评估、压中监测及压后产能评估中涉及到的压裂效果评价方法进行具体运用及分析,为水平井多段实时压裂技术优化提供重要的参考依据。

2. 英雄岭页岩油藏概况

柴达木盆地英雄岭地区勘探始于上世纪 50 年代,经历了浅层到深层、碎屑岩到碳酸盐岩、构造到岩性、常规到非常规等 4 个阶段。研究区 E_3^{IV-VI} 油组页岩油藏原油主要赋存在晶间孔、纹层缝中,层状/纹层灰云岩赋存的原油中含轻质烃多,以游离态和吸附态并存,纹层状粘土质页岩赋存的原油中以滞留重烃为主,以吸附态为主。纹层状云灰岩和层状灰云岩的组合含油性好,岩心含油饱和度平均 54%,其它岩性含油饱和度偏低。地质研究结合试油验证,形成了英雄岭页岩油甜点区、甜点段评价标准。综合地质品质、工程品质、产能特征及经济等因素,对 23 个箱体进行评价,初步明确了储量规模。

继采用不断成熟的配套压裂工艺在上、中、下甜点区探评水平井试采 8 口井均获工业油流获得勘探突破后,先后在上甜点启动英页 1H 开发先导试验平台和中甜点英页 2H 开发平台,通过开展最优靶层、井网井距、水平段长度、压裂工艺、合理排采制度等试验研究。

利用生产动态资料无法反映和满足水平井多段压裂效果的评价需求,且对于试采阶段仅有几个月之久的压裂生产井无法展开研究工作。针对多段压裂水平井需要开展实时压裂评价并有效指导后续的压裂工作,鉴于在英页 1 平台联动 7 口压裂水平井的压裂经验,对 2 平台多口压裂水平井开展多种压裂效果评价方法的联合使用,综合研究过程中兼顾多种评价方法重点对英页 2 平台 H14-2 井开展了压裂效果讨论。

3. 压裂效果评价方法对比

压裂改造可以提高储层渗透性和导流能力,扩大有效泄油空间和能力,然而页岩储层特有的储集体采用多段多簇压裂方式形成的裂缝网络十分复杂,评价压裂效果的难度远大于常规储层压裂,且评价方法众多评价目标不够明确唯一,得到的评价结果准确客观性欠佳,主观因素占比成分较大,导致效果评价的结果对于实际勘探开发工作指导性不强,不能正确反映压裂设计的优化方向。通过对各种评价方法的对比,认为页岩储层多段多簇压裂效果评价应采用联合评价方法。

生产动态法中生产数据受到多因素影响,如油藏的复杂性、井筒干扰以及生产条件等,兼顾多方影响因素得到的结果多是定性认识,可能存在误差较大的情况。由于分析数据源自长期的生产动态数据,压裂效果评价是有一定时效性,且压裂评价结果笼统不明确,对于现代多段多簇压裂技术的分段评价工作不具备指导意义。

声波测井法可能受到测井仪器的限制以及声波测井数据的解释复杂性的影响。此外,该方法目前还需要更多的实际应用和验证,以评估其准确性和可靠性。

由于受限于假设渗流模型,停泵压降分析法的解释结果无法反映复杂的裂缝形态且呈多解性特点,

因此需要结合其他裂缝监测进行综合评价。

示踪剂技术也存在一些限制。首先，示踪剂的选择需要考虑其与压裂液的相容性，并且在地下环境中稳定性和可追踪性需要得到保证。其次，示踪剂返排曲线的解读需要丰富的现场经验和专业技术人员，为避免某些技术人员的经验论仍需要结合其他裂缝监测进行综合评价。

微地震监测技术可细分为井间和地面微地震监测。井间微地震监测需要选择合适的监测井和布置传感器，施工复杂且成本较高。而地面微地震监测在施工上更为简便和经济，但可能受到地面噪声的干扰，所获得的地下破裂信息相对粗略。

4. 英雄岭页岩油藏压裂效果综合评价

4.1. 生产动态分析法

针对试采周期较长的上甜点收集整理相应 5 口压裂水平井生产动态资料，绘制了图 1 油压与累计产液百分比关系曲线[20]，反映排出液量比例相同体积之条件下分析井口油压的变化规律，统计生产过程中压裂变化情况表 1 所示。

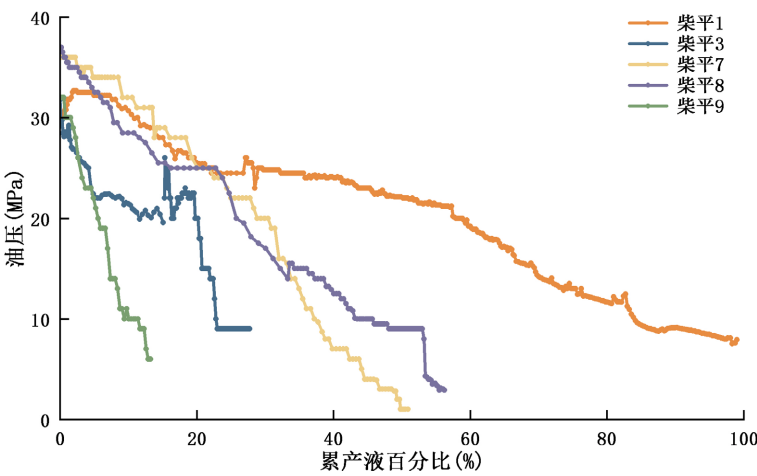


Figure 1. The relationship curve between oil pressure and cumulative liquid percentage of fracturing horizontal well in upper sweet spots production test
图 1. 上甜点试采压裂水平井油压与累产液百分比关系曲线

Table 1. Pressure change of fracturing horizontal well in upper sweet spots production test
表 1. 上甜点试采压裂水平井开井压力变化

井号	开井压力(Mpa)	累产液百分比为 20%时的压力(Mpa)	压力变化百分数(%)
柴平 1	30.2	25.5	15.6
柴平 3	31.77	20.0	37.0
柴平 7	36.0	25.0	30.6
柴平 8	37.0	25.0	32.4
柴平 9	32.0	/	/

当累计产液百分比达到 20%，柴平 1 井、柴平 3 井、柴平 7 井和柴平 8 井的压力变化百分数分别为 15.6%、37.0%、30.6%和 32.4%，可以看出，压力变化越大，缝网体积与压裂液的体积匹配越差，即压裂液的体积与形成的缝网体积未呈良好的正比关系，初步判定柴平 3 井的压裂形成的缝网体积相对小，压

裂效果差。

4.2. 停泵压降与微地震监测联合法

英页 2H14-2 井是处于柴达木盆地柴西坳陷英雄岭构造 E32IV-VI 油组中甜点区的压裂水平采油井。完钻井深 4970.00 m (垂深 3333.38 m), A 靶点为 3420.00 m (垂深 3200.07 m), B 靶点为 4970.00 m (垂深 3333.38 m), 造斜点 1000.00 m (垂深 999.89 m)。2023 年 8 月采用桥塞 - 射孔联作技术实施分段分簇体积压裂改造, 分 23 段/138 簇, 平均段长 65.6 m, 单段 6 簇。

常规微地震、广域电磁等当前主流的裂缝监测方法对储层压裂认识是只要入地液量大, 压裂规模就大(可用压裂液波及体积表示)。本质上地面压裂施工参数仅是给出压裂液用量, 在地层中到达的位置不代表裂缝规模, 其值与裂缝长度、渗透率、压力等有关。青海油田采用压裂停泵期间由井口采集到的高频压力波动信号反演地下裂缝起裂情况和起裂位置。

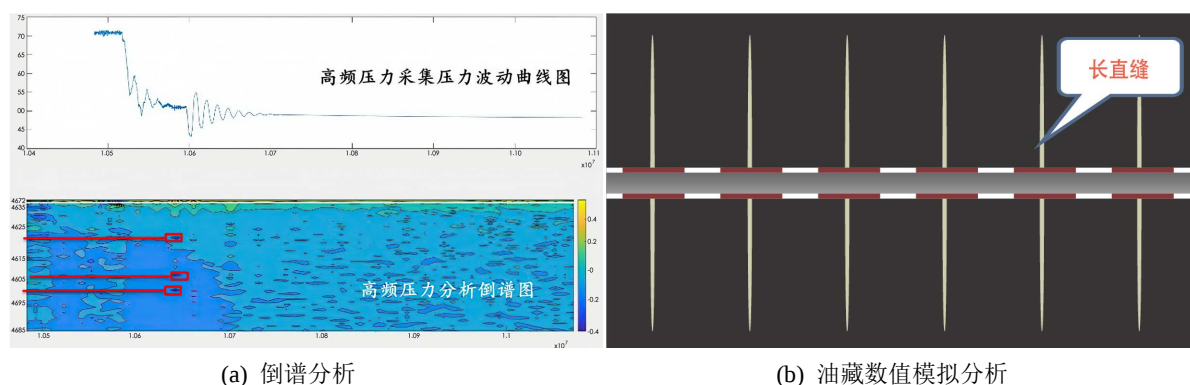


Figure 2. Schematic diagram for analysing high-frequency pressure drop in fractured horizontal wells with pump stopping
图 2. 压裂水平井停泵高频压降分析示意图

英页 2H14-2 井压裂第 5 段解释结果为例, 图 2 显示该压裂停泵高频压力计算过程, 主要是三种方法的集成: 1) 倒谱算法判断进液点; 2) 试井软件拟合获得裂缝长和高、渗透率、地层压力及地质特征等参数; 3) 油藏数值模拟计算压裂期间的地层压力分布(每段裂缝长度及渗透率都由试井给出), 由压力分布确定“压裂液波及范围”, 从而得到 SRV 体积 - 相当于泄油范围。计算解释结果表明压裂段共暂堵前有 4 个进液点, 位于井深 4627 m、4614 m、4607 m、4595 m 处, 最终停泵有 3 处进液点, 分别位于井深 4621 m、4608 m、4601 m 处, 4607 m 处暂堵效果稍差。支撑缝总长度 236.93 m, 压裂液波及总长度 417.41 m, 裂缝高度 26.04 m。地层局部能量提升 43.91%; 改造 SRV 区渗透率提高到 4.71 md; 改造裂缝核心附近 SRV 体积 9.27 万方。压裂效果总体评价为第 5 压裂水平段射孔 6 簇, 开启主裂缝 6 条, 裂缝为以长直缝为主, 缝网欠发育。

此种解释评价方法可以获得支撑缝总长度、压裂液波及总长度、裂缝高度、改造 SRV 区渗透率、改造裂缝核心附近 SRV 体积等压裂效果评价中所有参数, 但无法判断裂缝方位, 且多簇压裂中每簇裂缝长宽信息可以获得, 但存在多解性。为了将油藏数值模拟得到的多解可能性明确化, 采用井中微地震监测方法对该压裂水平井进行压裂缝立体刻画。

如图 3 所示井中微地震监测平台示意图。以柴平 11 井作为监测井, 对英页 2H14-1、英页 2H14-2、英页 2H15-1、英页 2H15-2 井进行实时压裂微地震监测。其中英页 2H14-1 井监测距离 300~1140 m、英页 2H14-2 井监测距离 697~1155 m、英页 2H15-1 井监测距离 335~1130 m、英页 2H15-2 井监测距离 487~1164 m, 确定了英页 2H 平台 4 口井 98 段压裂形成的缝网方位、高度、长度等方面的空间展布特征

信息，压裂施工过程获得了实时监测裂缝形态，指导压裂施工，通过后期处理解释对英页 2H 平台的压裂效果予以评价。

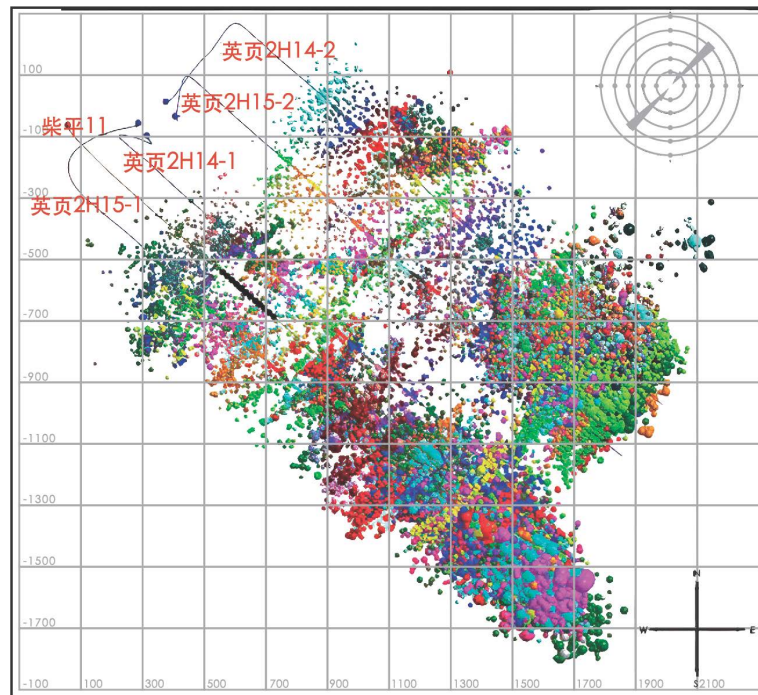


Figure 3. Top view of the overall monitoring results of the YY2 platform

图 3. 英页 2 平台整体监测成果俯视图

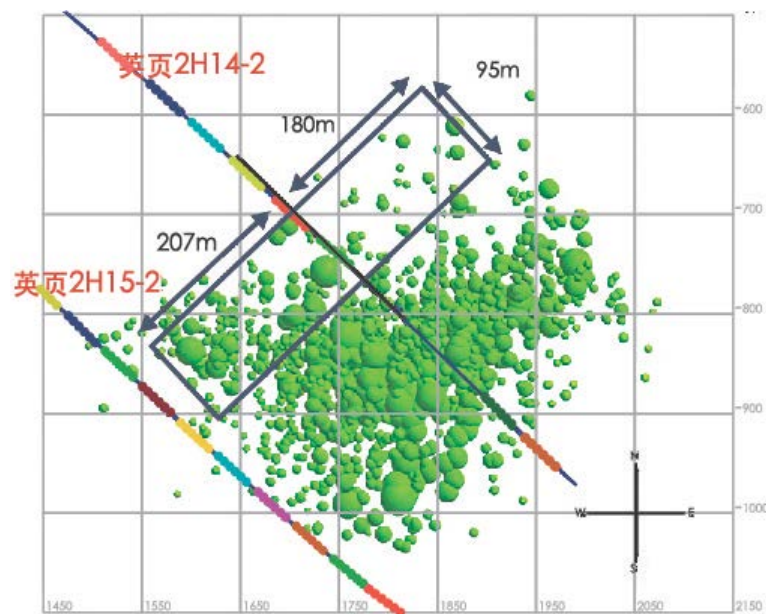


Figure 4. Top view of microseismic monitoring results of section 5 of H14-2 well on YY2 platform

图 4. 英页 2 平台 H14-2 第 5 段微地震监测成果俯视图

仍以页 2H14-2 井压裂第 5 段解释结果为例，图 4 显示压裂施工过程压裂缝分布及扩展情况。井下微

地震监测得到事件点 1425, 缝长 387 m, 缝高 39m, 缝宽 95 m, 其中南翼长 207 米, 北翼长 180 米, 裂缝网络走向(北东) 48° , 微地震事件震级区间-3.20 至-1.01。相较于采用压裂施工高频压力计算结果, 微地震监测成果更具有立体可视性, 但对于压裂效果评价中涉及生产能力的预判, 高频压力计算法可以对流体导流能力及渗透率等参数是后续压裂生产效果评价的关键参数。

4.3. 示踪剂与微地震监测联合法

采用示踪剂监测方法可以对监测压裂后各井段产液性质, 评价实验平台井间人工裂缝连通性。为此英页 2 平台 H14-2 井全井段投放油水示踪剂, 以监测分析全井各段产液能力, 示踪剂监测曲线如图 5 所示。英页 2H14-2 井水示踪剂在第一批主要主要为第 12 段、第 23 段、第 13 段、第 21 段、第 8 段见剂量大。第二批主要主要为第 21 段、第 13 段、第 8 段见剂量大; 油剂示踪剂第 21 段初期见剂量大(次坐标), 后逐渐降低; 第 23 段后期见剂量高, 波动大; 其次是第 16、2、3、17、22 段, 见剂量较高, 且平稳。

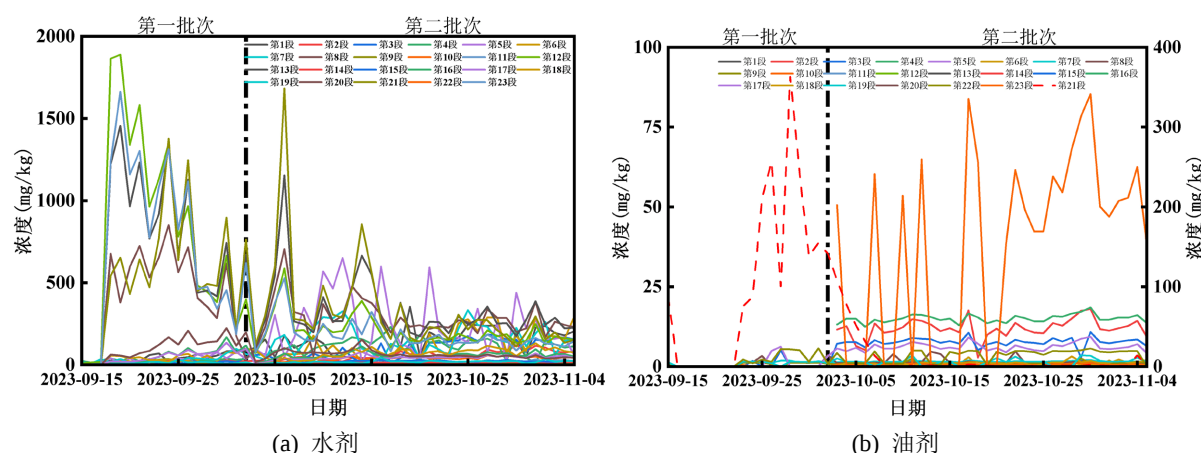


Figure 5. Tracer concentration monitoring curve for YY2 platform H14-2 well

图 5. 英页 2 平台 H14-2 井示踪剂浓度监测曲线

图 5 可知示踪剂曲线形态总体分为正态峰型、单峰型、单峰抛物线型[21]。单峰型反映压裂缝主要以一条或几条大裂缝组成(图 6(a)), 裂缝导流能力高, 故大裂缝中示踪剂快速产出, 示踪剂浓度迅速升高; 在较短的时间内, 裂缝内示踪剂全部产出后, 产出液中示踪剂的浓度迅速下降, 并且产出速度越快, 峰形越尖锐。

单峰抛物线型反映为大裂缝与微裂缝叠合缝网系统(图 6(b))。由于大裂缝裂缝导流能力高, 缝内示踪剂早于微裂缝产出, 故初始见剂浓度比较高。随着时间推移, 大裂缝内示踪剂产出量迅速降低, 微裂缝产出的示踪剂所占比例逐渐升高, 油井的示踪剂总体产出浓度逐渐下降。此阶段示踪剂产出的曲线形态与微裂缝为主的缝网系统示踪剂产出形态相似。因此, 在大裂缝与微裂缝共存的缝网系统中, 示踪剂产出浓度随时间变化的曲线形态为初始浓度较高, 后逐渐下降的单峰抛物线形。

示踪剂浓度曲线正态峰型反映以微裂缝为主的复杂缝网系统(图 6(c)), 压裂液由微裂缝流向相邻裂缝, 由于其裂缝导流能力有限, 示踪剂浓度逐渐上升, 后续微裂缝内压裂液与示踪剂逐渐减少, 示踪剂浓度在升高到一定值后又逐渐降低。

联合 H14-2 井示踪剂和微地震监测结果, 反映第 21 压裂段峰形尖锐, 产出示踪剂浓度高, 为大裂缝模型; 第 9 段、第 12、13、23 段初始见剂浓度较高, 随后示踪剂浓度降低, 这 4 段为大裂缝与微裂缝叠合模型; 其余井段示踪剂曲线分布较为均匀, 以微裂缝为主的缝网系统。

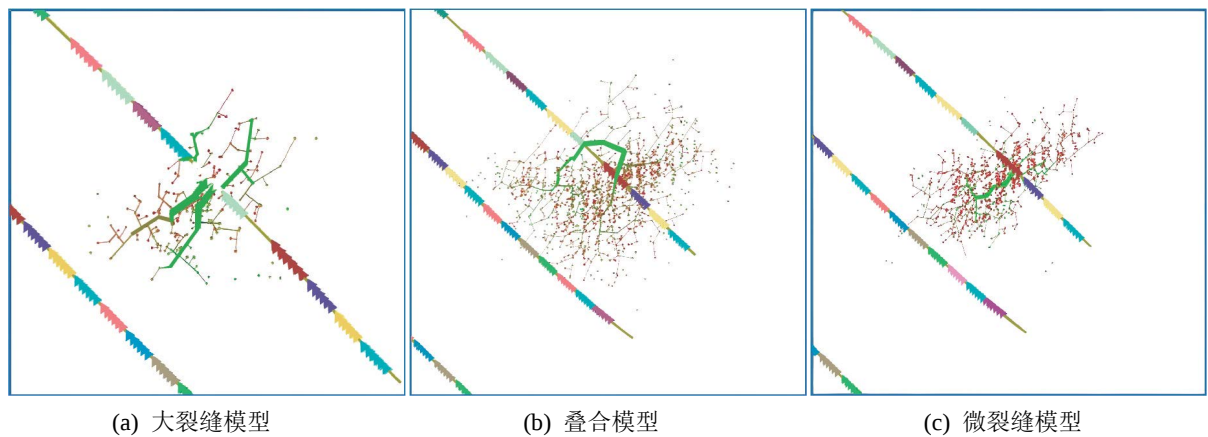


Figure 6. Schematic diagram of the corresponding suture network structure for the microseismic interpretation of the YY2 platform H14-2 well

图 6. 英页 2 平台 14-2 井微地震解释对应缝网结构示意图

4.4. 测井与示踪剂监测联合法

综合 H14-2 随钻 GR、元素录井和测井资料对储层岩性识别, 结合示踪剂监测资料显示, 油相示踪剂主要见剂 12 段, 岩相以纹层状灰云岩、碳酸盐含量高的层状泥岩为主。其中 7 段见剂较明显, 岩相为纹层状灰云岩, 第 21 段初期浓度异常高, 岩相为纹层状灰云岩。

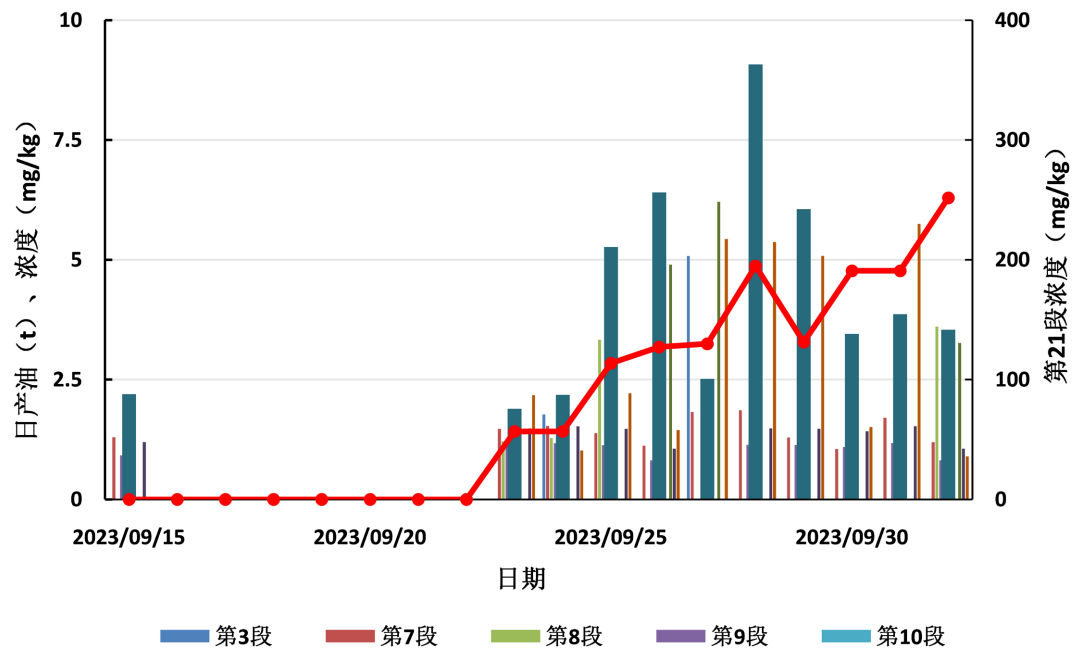


Figure 7. Correspondence between tracer and oil production in fractured section of H14-2 well

图 7. H14-2 井压裂段示踪剂与日产油量对应关系

图 7 所示 H14-2 井日产油量曲线对应压裂示踪剂监测结果表明, 见油相示踪剂返排的 12 段压裂水平段供液存在差异化动用的特征。12 段整体分为二批次差异化动用, 第一批次为投产 10 天内, 第 7、9、12、13、14、19、21 等 7 段优先供液; 第二批次为投产 10~25 天内, 第 3、8、10、17、22 等 5 段逐步供液。在分段差异化启动的基础上, 深入研究不同阶段启动的岩性, 先启动的岩性主要为纹层状灰云岩,

后启动的岩性主要为层状灰云岩。生产初期纹层状灰云岩段优先启动,随着排液含水下降,层状灰云岩井段启动供液,随着继续排液,含水逐渐下降,最后各段供液趋于均匀,日产油量持续上升。

4.5. 综合评价的效果

通过生产动态分析法得到油压与累计产液百分比的关系,可以初步判断压裂水平井压裂生产效果,但该方法无法满足多段压裂效果的实时评价需求。通过停泵压降法得到的裂缝规模是微地震监测的验证和补充,表明该方法在评价裂缝规模方面的有效性。示踪剂返排浓度曲线结合微地震监测结果,可以评估压裂水平井的产能水平,为压裂效果提供了直接的生产能力评价。通过综合录测井和示踪剂监测结果,分析了压裂水平井段供液的差异化动用特征,有助于评估岩性在压裂段对产能贡献能力。

5. 结论

1) 以英雄岭页岩油藏英页 2 平台 H14-2 井为例,采用压裂停泵高频压力测试、示踪剂测试、井中微地震测试等联合评价方法对压裂缝规模、压裂缝渗流特征、压裂缝产能进行压裂效果评价。停泵压降法反演得到的裂缝规模可以通过微地震验证并补充,示踪剂返排浓度曲线结合微地震的三种缝网模型可以评价压裂水平井产能水平。

2) 根据生产动态分析法可初步判定柴平 3 井的压裂形成的缝网体积相对小,压裂效果差。

3) 基于停泵压降法进行压裂效果总体评价为英页 2H14-2 井第 5 压裂水平段射孔 6 簇,开启主裂缝 6 条,裂缝为以长直缝为主,缝网欠发育。联合井中微地震监测提供了英页 2H14-2 井压裂缝的立体刻画。

4) 联合英页 2H14-2 井的示踪剂和微地震监测结果,反映第 21 压裂为大裂缝模型;第 9 段、第 12、13、23 为大裂缝与微裂缝叠合模型;其余井段为以微裂缝为主的缝网系统。

5) 联合录测井对岩性岩相的解释成果,深层揭示油相示踪剂反映的压裂水平井段供液存在差异化动用的特征,表现为先启动的岩性主要为纹层状灰云岩,后启动的岩性主要为层状灰云岩。

基金项目

中国石油天然气股份有限公司“十四五”前瞻性项目“柴达木盆地页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(2021DJ1808);中国石油天然气股份有限公司油气和新能源分公司科技项目“水平井分段压裂体积改造技术 V2.0 现场试验”(2022ZS0610)。

参考文献

- [1] 赵文智,朱如凯,刘伟,等.中国陆相页岩油勘探理论与技术进展[J].石油科学通报,2023,8(4):373-390.
- [2] 刘合,孟思炜,王素玲,等.古龙页岩力学特征与裂缝扩展机理[J].石油与天然气地质,2023,44(4):820-828.
- [3] 刘成林,刘新菊,张洪军,等.鄂尔多斯盆地安塞地区页岩油地质-工程一体化技术实践[J].石油与天然气地质,2022,43(5):1238-1248.
- [4] 焦方正.鄂尔多斯盆地页岩油缝网波及研究及其在体积开发中的应用[J].石油与天然气地质,2021,42(5):1181-1188.
- [5] 谢贵琪,林海,刘世铎,等.柴达木盆地西部英雄岭页岩油地质工程一体化压裂技术创新与实践[J].中国石油勘探,2023,28(4):105-116.
- [6] 陈斌,蔺敬旗,李兆春,等.阵列声波测井在页岩油体积压裂效果评价中的应用[J].断块油气田,2021,28(4):550-554.
- [7] 温杰雄,田伟,毕全福,等.基于数字滤波的压裂停泵数据反演方法[J].中国科学技术大学学报,2018,48(5):392-399.
- [8] 吴嘉伟,张长好,司丹,等.柴达木盆地狮子沟构造下干柴沟组上段有效裂缝与地应力关系及其意义[J].地球科学,2023,48(7):2557-2571.

-
- [9] 李亨, 张金发, 管英柱, 等. 水平井分段压裂各段产能评价技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 8916-8927.
- [10] 邵晓光, 董宏丽, 代丽艳. 微地震监测技术综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2018, 36(1): 55-61.
- [11] 王晓强, 赵立安, 王志愿, 等. 基于水锤效应与倒谱变换的停泵压力分析方法[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 108-116.
- [12] 蒋国斌, 才庆, 杨景海, 等. 基于大规模多段压裂水平井返排数据的压裂效果评价方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(2): 14-19.
- [13] 缪思钰, 张海江, 陈余宽, 等. 基于微地震定位和速度成像的页岩气水力压裂地面微地震监测[J]. 石油物探, 2019, 58(2): 262-271, 284.
- [14] 邢岳堃, 黄炳香, 陈大勇, 等. 压裂裂缝非线性断裂的声发射全波形多参量监测[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3470-3487.
- [15] 李宁, 刘鹏, 范华军, 等. 基于阵列声波测井的井下多尺度压裂效果评价方法[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 1-7.
- [16] 周珺, 邓睿, 韩旭, 等. 基于停泵压降分析的致密砂岩压裂效果评价[J]. 特种油气藏, 2017, 24(2): 165-169.
- [17] 李鹏, 宋慧娟, 李硕, 陈坤. 基于微地震监测技术分析影响压裂效果的因素——以复兴地区为例[C]//中国石油学会石油物探专业委员会. 第二届中国石油物探学术年会论文集(下册). 2024: 4.
- [18] 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.
- [19] 刘文超, 乔成成, 汪洋, 等. 页岩气井压裂液返排与生产阶段的压裂裂缝特征差异研究[J]. 力学学报, 2023, 55(6): 1382-1393.
- [20] 梁成钢, 唐伏平, 谢建勇, 等. 致密油藏水平井压裂后油压特征及压裂效果分析——以昌吉油田3口水平井为例[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(1): 63-66.
- [21] 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.