

微地震监测在非常规气藏压裂转向中的应用

程晓艳^{1*}, 刘 飞^{2,3}, 周安富¹, 唐 建^{2,3}, 秦 俐^{2,3}, 肖 科¹, 王子云¹, 周 慰²

¹四川页岩气勘探开发有限责任公司, 四川 成都

²中油奥博(成都)科技有限公司, 四川 成都

³东方地球物理公司中新兴物探开发处, 河北 涿州

收稿日期: 2025年6月24日; 录用日期: 2025年8月22日; 发布日期: 2025年9月5日

摘 要

微地震地面监测技术在非常规气藏压裂施工参数动态调整及暂堵转向时机优化中发挥关键支撑作用。然而, 当前基于微地震评价暂堵效果的方法存在局限性: 仅依赖暂堵后事件点外延、事件数增加或SRV增长等单一指标易导致误判(统计表明未暂堵段也可能出现类似变化)。研究表明, 客观评估暂堵效果需综合三方面参数: 1) 暂堵前后微地震事件空间位置迁移特征; 2) 暂堵球到位时刻的压力突变响应; 3) 后续压裂泵压整体波动形态。本文以川南页岩气藏压裂施工暂堵转向为例, 系统阐述了该综合评价方法的应用流程, 并指出地面微地震在深层非常规气藏监测中存在信号分辨率不足的缺陷。建议在非常规气藏压裂中融合光纤DAS/DTS技术实时监测各簇进液与加砂状态, 结合微地震事件空间演化规律, 构建多参数协同的暂堵转向效果评价体系, 从而进一步提升评估准确性。

关键词

非常规气藏, 微地震监测, 暂堵转向, 压裂效果, 光纤监测, 效果评价

Application of Microseismic Monitoring in Fracture Diversion for Unconventional Gas Reservoirs

Xiaoyan Chen^{1*}, Fei Liu^{2,3}, Anfu Zhou¹, Jian Tang^{2,3}, Li Qin^{2,3}, Ke Xiao¹, Ziyun Wang¹, Wei Zhou²

¹Sichuan Shale Gas Exploration and Development Co. Ltd., Chengdu Sichuan

²Optical Science and Technology (Chengdu) Ltd., Chengdu Sichuan

³New Resources Geophysical Exploration Division, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou Hebei

Received: Jun. 24th, 2025; accepted: Aug. 22nd, 2025; published: Sep. 5th, 2025

*第一作者。

文章引用: 程晓艳, 刘飞, 周安富, 唐建, 秦俐, 肖科, 王子云, 周慰. 微地震监测在非常规气藏压裂转向中的应用[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 330-340. DOI: 10.12677/jogt.2025.473037

Abstract

Microseismic surface monitoring technology plays a pivotal supporting role in the dynamic adjustment of fracturing operation parameters and the optimization of temporary plugging and diversion timing for unconventional gas reservoirs. However, current methods for evaluating plugging effectiveness based solely on microseismic data exhibit limitations: Relying exclusively on single indicators such as outward extension of event points post-plugging, an increase in event count, or growth in Stimulated Reservoir Volume (SRV) can lead to misjudgment (statistics indicate that similar changes can occur in unplugged intervals). Studies have demonstrated that an objective assessment of plugging effectiveness requires the integration of three key parameters: 1) The spatial migration characteristics of microseismic events before and after plugging; 2) The pressure surge response at the moment diverters reach the target location; and 3) The overall fluctuation pattern of the subsequent fracturing pump pressure. Using temporary plugging and diversion operations in the fracturing of the Southern Sichuan shale gas reservoir as an example, this paper systematically details the application workflow of this comprehensive evaluation method. It further points out the limitations of surface microseismic monitoring for deep unconventional reservoirs due to inadequate signal resolution. To enhance the accuracy of plugging effectiveness evaluation, it is recommended to integrate fiber optic Distributed Acoustic Sensing (DAS) and Distributed Temperature Sensing (DTS) technologies during unconventional reservoir fracturing. This enables real-time monitoring of fluid intake and proppant placement status per cluster. Combined with the spatial evolution patterns of microseismic events, a multi-parameter collaborative evaluation system for temporary plugging and diversion effectiveness should be established.

Keywords

Unconventional Gas Reservoirs, Microseismic Monitoring, Temporary Plugging and Diversion (TPD), Fracturing Effectiveness, Fiber-Optic Monitoring, Effectiveness Evaluation

Copyright © 2025 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

微地震监测技术主要应用于压裂现场实时指导和储层改造效果评价,评价页岩气等非常规储层压裂施工过程中的暂堵转向效果即是微地震监测现场支撑作用的重要体现之一。页岩气等非常规储层存在较强的各项异性及非均质性,加之在天然裂缝发育储层,压裂液滤失往往较为严重,从而在压裂改造过程中,出现单段部分孔眼进液不充分,甜点体积压裂有效性参差不齐,造成前期缝网有效改造动用低,页岩产量难以持续。为实现深层页岩气的效益开发,暂堵转向压裂技术日益受到人们的重视。该技术是通过在压裂施工过程中加入暂堵材料,达到缝口暂堵转向和缝端暂堵转向的目的,从而保证各簇水力裂缝有效伸展、提高裂缝复杂程度[1]。压裂过程中投暂堵球封堵孔眼是一种现场操作简便实用的工艺,能有效解决段内改造不充分的问题,通过一次或多次向井段内投送可溶性暂堵球,暂堵球被带到孔道进液量大的孔眼处座封封堵射孔炮眼,从而在井段内形成憋压迫使压裂液进入新的孔眼压开新层位,促使新缝的产生以达到段内各射孔簇均匀造缝的目的[2][3]。暂堵剂缝内暂堵是采取添加暂堵剂颗粒对缝内进行暂堵,提高缝内净压力,从而开启新裂缝或转向裂缝,增加整体改造体积,其主要针对页岩气天然裂缝发育的井段[3]。为更好地形成复杂裂缝,目前页岩气藏的开发主要选用“段内多簇+复合暂堵转向”技术

进行体积压裂。

如何评价压裂期间暂堵转向效果,目前压裂期间主要根据投球到位后压力是否有突然上涨来进行判断,在有微地震监测压裂井,往往根据微地震现场初步定位结果分析,认为实施暂堵的井段较未实施暂堵的井段事件点更多,暂堵后有新的区域破裂产生事件点,同时裂缝复杂指数最高,反应裂缝更加复杂,说明暂堵转向效果明显。然而研究表明,仅仅采用单一压力变化指标,或采用暂堵前后微地震事件的空间位置变化、事件数增长率、计算的SRV增长率或复杂指数增长率等[4][5],容易误判暂堵转向效果。通过在川南地区多个未采用暂堵施工压裂段统计结果表明,未暂堵段压裂后半段同样较多出现类似微地震事件数增长、计算SRV增长等一系列变化特征。因此仅仅依靠微地震监测单一因素评价压裂暂堵转向的效果可能面临失效。研究表明,客观评估暂堵效果需综合多方面的参数:除了暂堵前后微地震事件空间位置拓展特征外,必须结合暂堵球到位时刻的压力突变响应和后续压裂泵压整体波动形态综合评判。本文以川南页岩气藏压裂施工暂堵转向为例,系统阐述了该综合评价方法的应用流程,同时指出地面微地震在深层非常规气藏监测存在监测信号分辨率不足而导致的评价缺陷。建议在非常规气藏压裂中融合光纤DAS/DTS技术实时监测各簇进液与加砂状态,结合微地震事件空间演化规律,构建多参数协同的暂堵转向效果评价体系,进一步提升暂堵转向评估的准确性。

2. 暂堵工艺发展

非常规页岩气藏通常采用“桥塞+射孔联作”压裂分段改造技术,目前四川页岩气藏压裂改造主要采用段内多簇、大排量、高强度加砂改造模式,压前会根据水平段巷道位置、储层参数、裂缝特征、应力特征、工程因素等进行压裂分段设计,将储层参数、工程参数相近的井段划分为同一压裂段,避免同一段内由于储层、工程参数差异过大而导致的压裂改造不均匀、不充分。施工期间往往采用可溶桥塞进行层间封堵,从下而上逐级开展转层压裂,同时为提高页岩气藏单段压裂效果,保证改造段内多个射孔簇均匀开启,往往压裂施工中途投入合适粒径的暂堵球或暂堵剂进行暂堵转向,暂堵转向压裂工艺技术相对较成熟,包括对暂堵球材质、数量、大小等都做了大量的理论探索和矿场实践[6][7],目前施工通常采用投暂堵球和配合暂堵剂的复合暂堵工艺[8]。国内外常用的暂堵材料主要分为酸溶性暂堵材料、油溶性暂堵材料和水溶性暂堵材料等,川渝区块页岩气藏暂堵主要选用不同粒径的水溶性暂堵球,或水溶性暂堵粉末及颗粒,对暂堵材料承压能力、最长封堵时间、耐温性能、高温降解率等都会有明确的要求,对于深层页岩气藏往往需要更高强度、高承压差和抗高温的可降解暂堵剂材料,这是提高深层页岩气藏体积压裂改造效果的关键。暂堵材料具体投入量、投入时间在不同时期认知可能有差异,同时也会根据现场压力响应、施工具体情况、微地震实时监测结果等进行及时调整。

暂堵工艺随压裂工艺改进或升级而出现调整。川渝地区早期改造理念总体以扩大波及体积,形成复杂裂缝为目标,采用“大液量、大排量、大砂量、低粘度、小粒径、低砂比”的改造模式[9],压裂中途采用投注暂堵球,提高压裂段改造效果。该阶段压裂主要采用单一投暂堵球的施工方式,针对水平应力差大、天然裂缝较发育段,对压后形成复杂裂缝增加了难度,可加注一定量暂堵剂。为进一步保证段内多个射孔簇均匀开启,最大程度上提高射孔簇效率,压裂主体工艺逐渐采用“段内多簇、高强度、大排量、暂堵转向”压裂改造模式,根据实际射孔参数,设计各主体段每段投入多颗15 mm或其他直径暂堵球和暂堵剂,颗粒暂堵剂通常在压裂总液量达到500 m³左右加注,压裂总液量达到1000 m³左右则投入暂堵球加粉末暂堵剂。该阶段压裂主要采用投暂堵球同时加注暂堵剂的施工模式,以实现缝口暂堵和缝内转向的目的,同时该时期进一步尝试了三次加入暂堵材料的工艺,即在压裂主体段早中后期三次分别加入暂堵剂、暂堵球+暂堵剂、暂堵剂,在风险段则三次分别加入暂堵剂、暂堵球+暂堵剂、暂堵球+暂堵剂。第三阶段现场压裂施工则按照有利于形成复杂缝网的原则,主体段及渐进防控段采用差异化射

孔, 风险段采用均匀射孔, 每段根据孔密等级及总孔数采用不同的分阶段复合暂堵方式, 风险段则不暂堵的压裂施工工艺。低射孔簇低孔密压裂段采用一次暂堵分两批投入一定数量暂堵球和暂堵剂, 投放间隔 1~5 分钟, 高射孔簇高孔密压裂段采用二次暂堵, 每次分别暂堵球 + 暂堵剂, 第一次暂堵同样可以采用前述的一次暂堵实施方式分批次投入。

如前所述, 在四川盆地页岩气藏的压裂改造中, 经过多轮的摸索, 逐渐形成了“多簇射孔 + 复合暂堵 + 高强度连续加砂”工艺认识[10][11], 多簇射孔有利于开启新缝, 降低加砂难度, 裂缝开启条数多, 优势裂缝形成砂桥后利用更高压力开启新缝, 配合暂堵转向, 降低加砂风险和提高加砂强度。在早期多个页岩气平台井施工表明, 非暂堵情况下裂缝易形成 2~3 簇裂缝主导扩展, 裂缝长度差异大, 复合暂堵转向可大幅降低各簇缝长差异, 实现长段多簇裂缝均匀扩展。同时复合暂堵转向可以抑制主裂缝长度, 降低井间干扰风险, 簇间裂缝覆盖度有效提升, 井周裂缝复杂增加, 从而提升改造效果。暂堵措施在页岩气藏的压裂施工中已逐渐常态化, 从前期的暂堵剂或暂堵球转向, 发展形成“暂堵球 + 暂堵剂”暂堵转向、“多粒径暂堵球 + 暂堵剂”暂堵转向、“多粒径暂堵球 + 粉末暂堵剂 + 颗粒暂堵剂”暂堵转向等多种工艺。

目前川南龙马溪组页岩气藏压裂改造逐渐形成了以“多缝换缝网、粉砂换陶粒、暂堵换排量”为核心的压裂工艺 2.0 技术系列[10][11], “暂堵换排量”是指可通过人工暂堵干预先期扩展的优势裂缝, 在适当排量下保证裂缝分级均匀起裂[10], 复合暂堵通常采用一次暂堵或二次暂堵工艺, 一次暂堵是指在压裂中途一次投入不同粒径暂堵球 + 粉末暂堵剂 + 或颗粒暂堵剂组合(如图 1)。应用复合暂堵已成为非常规气藏提产增效的主要手段之一, 该技术可以实现压裂时多簇射孔的分次开启, 有效提高射孔簇开启效率, 实现各簇裂缝均匀扩展, 以暂堵提升页岩气藏改造效果已经得到业内共识。

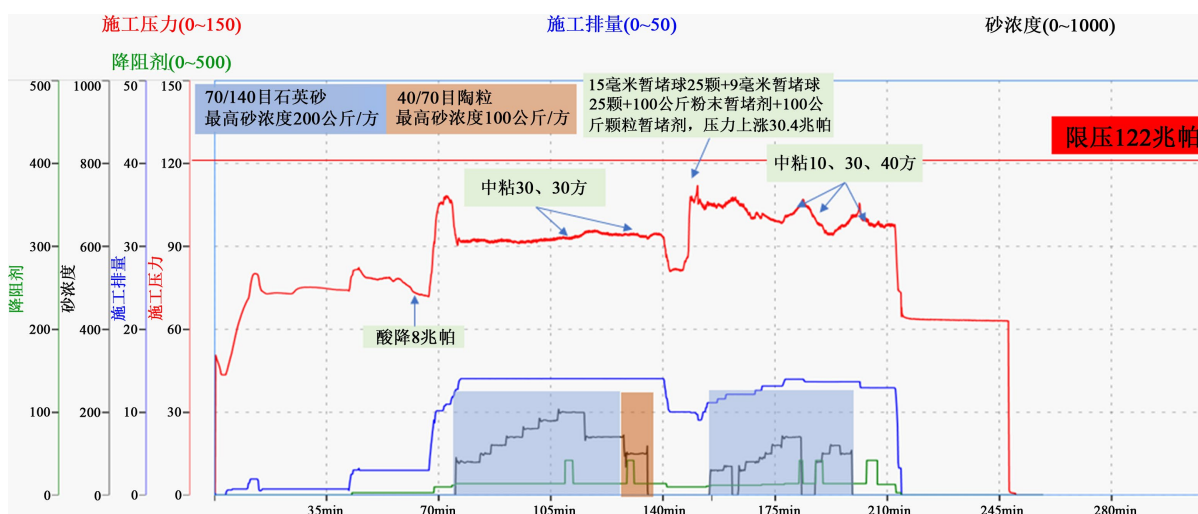


Figure 1. Schematic plot of composite temporary plugging fracturing operation for a shale gas well in the southern Sichuan basin

图 1. 川南地区某页岩气井复合暂堵压裂施工曲线示意图

3. 暂堵效果评价

3.1. 暂堵转向判定准则

页岩气藏体积压裂改造效果的好坏往往不能在压裂时进行准确评价, 通常只能通过后期开发情况进行评价, 根据压裂作业后增产了, 就认为压裂成功; 压裂后不增产或增产少, 就认为不成功。页岩气

藏暂堵体积压裂改造主要致力于提升压裂改造的 ESRV，增加裂缝复杂程度，在天然裂缝发育差异大的井段，能够及时应对天然裂缝滤失，加砂困难等，同时必要时控制天然裂缝过度延伸、以防压窜邻井等。确定压裂期间暂堵有效转向有助于认识改造效果，因此我们可以采用微地震监测技术，通过实时监测压裂期间压裂缝的发生、拓展，即压裂缝的分布形态，利用压裂微地震事件判识有效人工压裂裂缝与地层局部天然构造裂缝及断层活动特征，对暂堵转向形成复杂缝网与否进行有效的评价，并结合加砂规模的大小，可对压裂改造效果进行初步预判。但切记不能仅仅依据微地震事件在新区域开启，即判断转向有效，因为即使不采用转向技术，微地震事件也会在新区域发生发展。

下面我们举例说明，为什么不能简单依据微地震事件点的分布变化作为判断暂堵是否有效的必要条件。**图 2** 是四川盆地川南地区某页岩气井其中一段(第 13 段)的压裂施工曲线及其对应微地震事件分布图，该段压裂段长 85 m，采用 7 簇射孔，施工一般泵压 76~82 MPa，最高施工压力 86.5 Mpa，施工排量 12~14 m³/min，该段施工累计注入净液量 1749.5 方，累计注入支撑剂 258.1 吨，其中 70/140 目石英砂 219.1 吨，40/70 目陶粒 26 吨，施工期间未实施暂堵，整体施工泵压较为平顺且加砂顺利。该井采用了地面微地震监测，从压裂期间微地震事件分布来看，射孔位置两翼微地震事件的延伸正常，事件延伸长度范围约 360 m，其中西侧约 194 m，东侧约 166 m。图中蓝色事件点为该段前半段累计压裂液量达到 880 方时微地震事件响应结果，红色事件点为该段后半段压裂时的微地震事件响应结果，前半段压裂期间，射孔簇附件事件点在井筒两翼均有分布且延伸距离基本相当，事件延伸方位约 106°，事件点主要分布在井筒下方；后半段压裂期间事件延伸方位变为 95°，从深度位置看射孔簇上方出现较多新的事件响应；此外压裂后半段期间，在之前压裂的第 9 段西侧出现较多强能量的天然裂缝事件响应。虽然该段压裂期间没有采用暂堵施工，但从压裂前后半段施工期间微地震事件的分布变化来看，后半段施工期间微地震事件的响应在空间位置上也发生了明显变化。因此从该实例中我们可以看出，在没有采用暂堵转向的压裂段，在压裂后半段相较于压裂的前半段，微地震事件点随着压裂推进也会出现在之前没有响应的区域，因此我们不能仅仅依靠微地震事件点在暂堵前后分布区域有无变化来判断暂堵转向的效果。

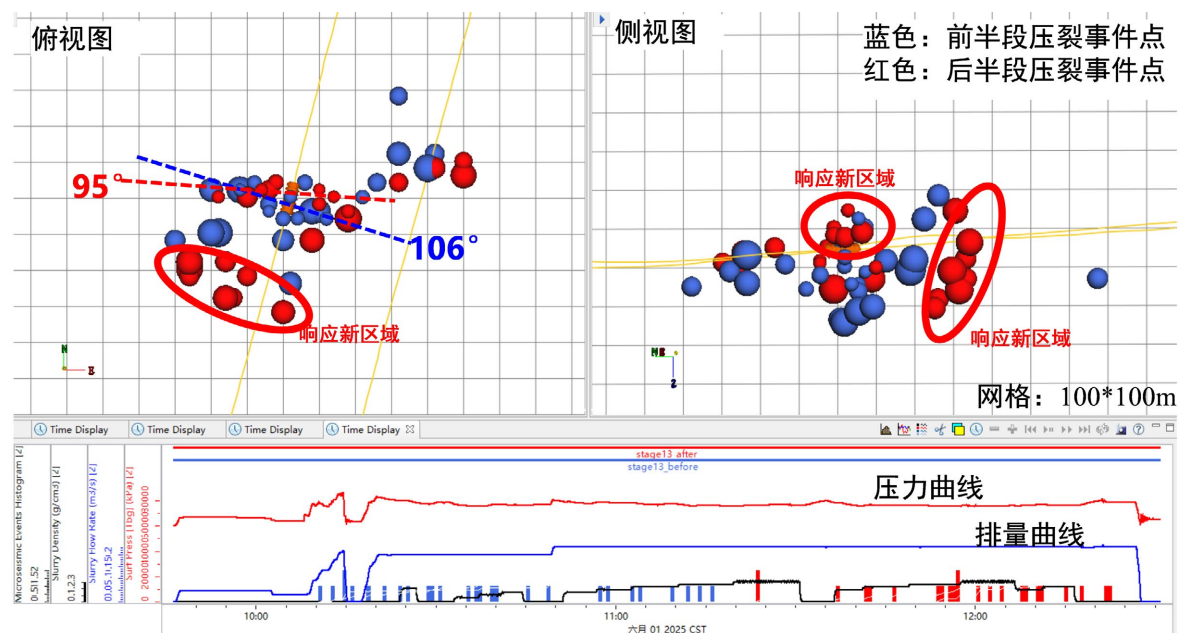


Figure 2. Schematic diagram of fracturing operation plot and corresponding microseismic event distribution for stage 13 in a shale gas well, southern Sichuan basin

图 2. 川南地区某页岩气井第 13 段压裂施工曲线与微地震事件分布示意图

目前压裂指挥人员主要基于泵压曲线判断是否形成暂堵,采用单一因素判断暂堵是否有效,往往不易判断或容易产生误判,就和只根据微地震事件响应判断暂堵是否有效一样。因此为了准确判断压裂期间是否暂堵转向成功,我们建议根据暂堵前后泵压变化特征结合微地震监测裂缝发展建立多因素的判定准则,来判断暂堵转向是否有效,其原理认识如下:压裂过程中足够的压力上升是实现转向的基本条件,压力上升后又下降,后续压裂曲线趋势较暂堵前发生明显变化,并有足够多的微地震事件响应区域发生显著变化,三个条件同时具备说明暂堵转向起到实质性的作用,判定压裂期间暂堵转向是否有效的请参考表 1:

Table 1. Multi-parameter evaluation criteria for temporary plugging and diversion (TPD)
表 1. 多因素暂堵转向判定依据

序号	暂堵判别依据			结论
	① 暂堵材料到位时刻泵压变化特征	② 暂堵后半段压裂期间泵压整体变化趋势	③ 暂堵后微地震事件响应空间位置变化	暂堵是否有效?
(一)	泵压明显上升	同排量下后半段平均泵压显著变化或泵压趋势显著变化	事件点在新的区域响应	暂堵有效
(二)	泵压无明显变化	同排量下后半段平均泵压显著变化或泵压趋势显著变化	事件点在新的区域响应	暂堵基本有效 (概率大于 80%)
(三)	泵压明显上升	同排量下后半段平均泵压几乎无变化	事件点在新的区域响应	暂堵基本有效 (概率大于 80%)
(四)	泵压明显上升	同排量下后半段平均泵压显著变化或泵压趋势显著变化	事件点响应区域无明显变化	暂堵可能有效或无效
(五)	泵压无明显变化	同排量下后半段平均泵压几乎无变化	事件点响应区域无明显变化	暂堵无效

3.2. 暂堵实例分析

(1) X1 井第十五段暂堵效果

X1 井第 15 段压裂施工期间(如图 3),当加砂量达到 45.7t、注液量达到 656 m³ 时,在排量 14 m³/min 投 19 mm 暂堵球 15 颗,随后降排量到 10.5 m³ 送球,送球液量约 68 m³ 时暂堵球到位,此刻泵压从 89 MPa 上升至 94 MPa,上涨 5 Mpa,球到位特征明显。暂堵后泵压曲线的走势也较暂堵前发生明显变化,同排量条件下,暂堵后泵压波动更加明显,平均泵压较暂堵前上升 2 Mpa 左右。本段压裂施工地面微地震监测响应事件点共 90 个(暂堵前 24 个,暂堵后 66 个),投放暂堵球前主要在射孔段附近区域监测到多个事件响应,深度位于目的层及其偏下方位置;投放暂堵球后,强能量事件首先从射孔东侧向外延伸,后期事件点向东南、南侧区域发展,暂堵后沟通了大面积的天然裂缝区域(天然裂缝产生的微地震事件能级较水力压裂破裂产生的微地震事件能级偏大)。结合微地震监测结果和压裂施工曲线变化趋势,暂堵转向判定依据中三个条件同时满足暂堵有效的基本判定,在暂堵前微地震事件全集中于射孔段附近东西两翼,通过实施投球暂堵工艺后,沟通或开启东侧大面新的天然裂缝区域,压裂后期泵压呈现缓慢降低趋势,说明暂堵明显有效。

(2) X2 井第四段暂堵效果

X2 井第 4 段压裂施工(如图 4),当加砂量 85.47t、注液量 1039.53 m³ 时,在排量 11.92 m³/min 投 19mm 暂堵球 16 颗,并保持该排量送球,送暂堵球到位时,虽然泵压上涨不明显,但暂堵后加砂(排量 15 m³/min)

过程中施工泵压较暂堵前(排量 14 m³/min)还略有升高, 暂堵后泵压曲线波动更加明显。本段压裂施工微地震地面监测响应事件共 435 个, 暂堵前事件点主要分布在井筒东侧及射孔段西北方向, 暂堵后原微地震事件响应区域事件点显著减少, 在射孔位置西侧及西南方向出现大量事件点响应, 暂堵后微地震事件点展布方向与暂堵前成发生了显著的变化。结合微地震监测结果和压裂施工曲线变化趋势, 暂堵转向判定依据中同时两个条件满足暂堵基本有效的判定, 与表 1 中情形(二)吻合, 因此判定此段暂堵大概率有效。

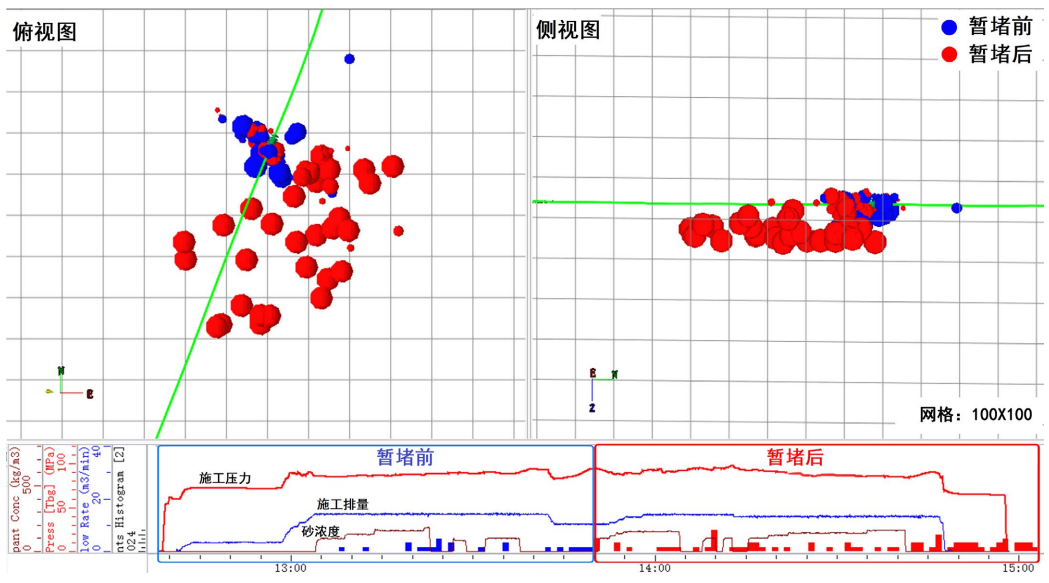


Figure 3. Schematic diagram of fracturing operation plot and corresponding microseismic event distribution for stage 15 of well X1, southern Sichuan basin

图 3. X1 井第十五段压裂施工曲线与微地震事件分布示意图

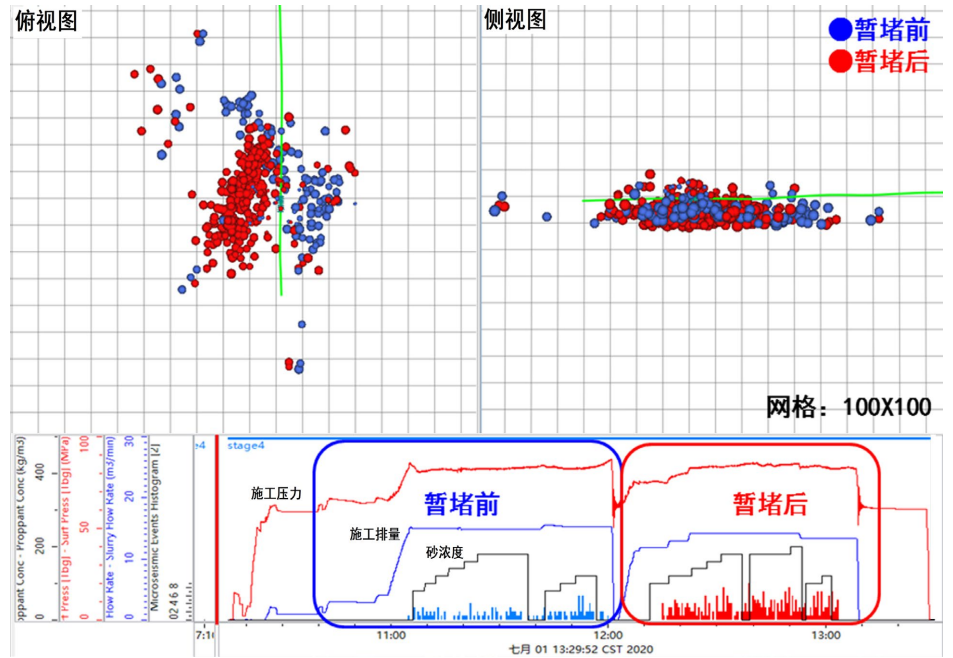


Figure 4. Schematic diagram of fracturing operation plot and corresponding microseismic event distribution for stage 4 of well X2, southern Sichuan basin

图 4. X2 井第四段压裂施工曲线与微地震事件分布示意图

暂堵工艺目前在川南地区页岩气藏的压裂施工中使用较普遍,应用暂堵技术一方面期望提高裂缝的复杂程度,增大储层的改造体积。同时在压裂过程中,有时沟通天然裂缝带可能给压裂施工带来不利的影响,因此施工过程中会根据微地震监测响应及施工工况,调整暂堵剂的加入时间,以起到堵老缝起新缝的目的,防止天然裂缝滑动沟通邻井或对套管带来不利影响。在压裂期间通过微地震监测结果与压裂工程参数的变化,可以很好的判断暂堵是否实现转向目的,但暂堵最终能否提高改造效果需要结合其他手段才能进行更直观的评价。

4. 地面监测评价暂堵存在的问题

如前所述,压裂期间地面微地震监测到的事件点响应区域随着压裂进行可能都会发生变化,即使不采用暂堵转向技术,压裂中后期的微地震事件分布区域相比之前的响应位置可能也会不同,因此我们不能仅仅依据微地震事件在新区域开启这单一因素来判断转向是否有效,必须结合压裂期间工程参数的变化综合判断,才能得出更可靠的结论。

此外,随着川南地区页岩气藏埋藏深度越来越大,深层破裂信号传回地面后衰减更加厉害,微地震地面监测能识别和定位的压裂缝事件数量较少,特别是井轨迹周边高角度缝欠发育井,压裂期间能识别和定位的微地震事件可能会非常少。压裂缝事件少,主要表现在地面监测定位出的事件点个数和压裂期间地层破裂、裂缝扩展的真实频次不匹配,此时仅仅靠监测定位结果不能很好的展示暂堵前后事件点的空间位置变化情况,因此在深层页岩气藏的压裂过程中,用微地震地面监测结果评价压裂暂堵效果应该更加谨慎。

下面我们举例来说明微地震地面监测在深层页岩气藏暂堵评价中的局限。在川南某平台页岩气藏的压裂中,同时开展了微地震地面监测和井中监测,压裂目的层位为龙马溪组,最大垂深约 4160 m,在该平台 1 井下入 12 级检波器对该平台 6、7、8 井进行微地震井中监测,检波器位置测深 3000~3220 m,级间距为 20 m,距 6、7、8 井压裂段距离分别为 1018~2437 m、1032~2576 m、1132~2560 m。同时该平台也采用了微地震地面监测,以平台井口为中心布设 10 条线,共 1136 道,测线总长度 50,670 m,道距 45m。该平台 6、7、8 井基质段设计根据裂缝监测解释结果,裂缝簇开启率低于 70%,开展投球暂堵压裂,暂堵时机为注入单段总液量 50%~60%,暂堵球数量为孔眼数的 60%,暂堵次数及时机可根据现场施工及监测实际情况调整。下图 5 是该平台 7 井其中一段微地震井中和地面监测结果的对比,左图为微地震井中监测结果,右图为微地震地面监测结果,蓝色事件点表示暂堵前的响应结果,红色事件点则为暂堵后的响应结果。本段井中监测距离 1740 m,共监测到 93 个微地震信号,射孔位置附近监测到 35 个微地震事件点,裂缝形态刻画较为完整。本段地面监测共有 43 个微地震事件响应,射孔位置附近监测到 11 个微地震事件点。图 6 是该段的压裂施工曲线,本段实施一次停泵和一次投球暂堵转向,本段投 14 颗暂堵球(直径 20 mm 和 25 mm 各 7 颗),投球在 2 m³/min 排量坐球,球落座后压力 63.4 MPa↑64.2 MPa,投球后同排量下施工压力上涨 2.3~2.7 MPa。同时不管从微地震井中监测还是地面监测结果来看,在射孔段附近,投暂堵球前,事件点在射孔段两侧均有响应,投完暂堵球后事件点主要在射孔段东侧响应。结合前述的压裂转向判定依据,该段压裂投放暂堵球后,暂堵转向判定依据中三个条件同时满足暂堵有效的基本判定,说明该段暂堵明显有效。虽然微地震地面监测和井中监测结果都显示该段暂堵转向效果较好,但从微地震地面监测结果来看,射孔段附近微地震地面监测响应事件点明显较井中偏少,当射孔段附近响应的压裂缝事件点特少时,并不能很好展示暂堵前后裂缝的延伸与拓展路径,是否暂堵后射孔段西侧的事件未能有效识别出来?从而可能造成对暂堵效果的误判。虽然深层页岩气藏微地震地面监测存在局限性,但相比微地震井中监测,因其观测孔径大,能准确定位的范围相比井中监测有明显优势,比如该井 B 点以南监测到的强能量天然裂缝事件点,地面监测到的事件点聚焦特征更明显,与该处地震预测多级裂缝

吻合度更高，而井中监测因其监测距离远、平面观测角度受限等原因，在该位置监测到的事件点明显不聚焦，定位误差相对更大。

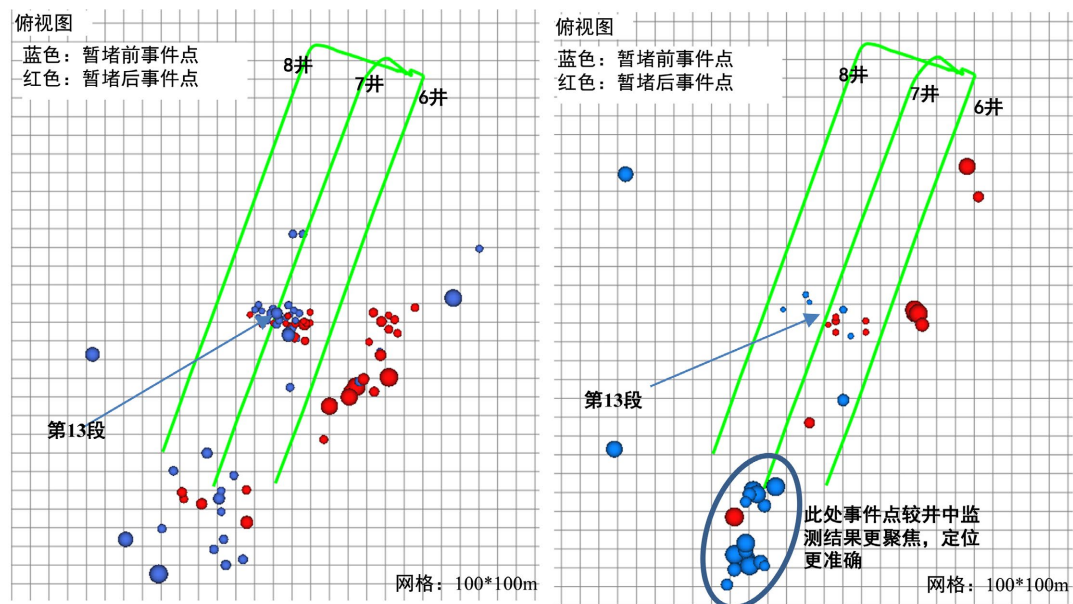


Figure 5. Microseismic monitoring results for stage 13 of well 3-7 on X3 Pad (Left: Downhole; Right: Surface)
图 5. X3 平台 7 井第 13 段微地震事件监测结果(左图：井中；右图：地面)

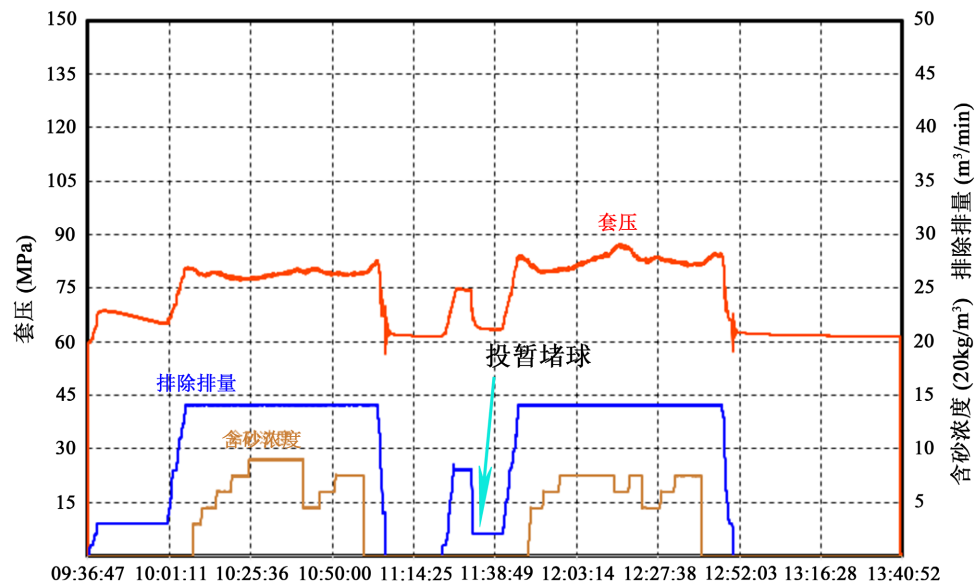


Figure 6. Fracturing operation plot for stage 13 of well X3-7 on X3 Pad
图 6. X3 平台 7 井第 13 段压裂施工曲线

5. 压裂暂堵效果评价新技术

压裂过程中的暂堵转向效果评价至关重要，除上述微地震等监测技术外，光纤监测技术在压裂暂堵评价中的应用正日益成为油气行业提高压裂效率和储层改造效果的关键手段。光纤监测在压裂暂堵评价中的应用，核心原理是通过光纤传感器对声波振动、温度、应变等物理量的分布式感知，结合光信号解

译技术,实现对封堵效果及裂缝动态的实时监测,通过实时、连续的分布式传感,为暂堵作业提供了前所未有的精细数据支撑。

通常光纤监测技术通过 DTS (分布式温度传感)和 DAS (分布式声传感)的协同作用[12],为压裂暂堵效果评价提供了实时、高分辨率的动态透视能力。压裂过程中,暂堵材料封堵部分射孔孔眼后,流体转向新的射孔簇,原孔眼及层段温度因流体停滞而缓慢恢复趋近地温,新孔眼位置随着井筒压力升高压开新层位,流体不断注入出现低温异常。同时暂堵成功后,原射孔簇入口处声能量显著衰减,而新射孔簇位置出现高频振动信号,声能显著增强。因此通过压裂过程中光纤监测温度剖面变化和声波震动能瀑布图,分析压裂期间温度和声波的变化,就能直接清晰显示哪些射孔簇被封堵,哪些射孔簇被重新打开,从而验证缝口封堵及转向的有效性。

现以图 7 光纤监测为例来说明如何应用 DAS 信号评价暂堵转向效果。图中横坐标为压裂或监测时间,该段共有 11 个射孔簇,编号从下至上分别为 N01~N11,压裂声波震动瀑布图左侧坐标对应各射孔簇的深度。瀑布图颜色表示监测声波信号强弱程度,颜色越红声波信号越强,表示该射孔簇位置的进液量和进砂量越大。该段压裂送球阶段,压力和能量显示成功封隔上一压裂层段,随着排量提升进入主压裂阶段,压裂和加砂正常,暂堵前光纤监测显示以第 4~8 簇和第 10 簇进液为主,第一次降排量添加暂堵剂后,施工压裂无明显升高现象,各簇进液情况与之前压裂加砂阶段基本保持一致。后续实施了第二次暂堵,第二次暂堵采用复合暂堵,投入一定数量暂堵球的同时注入暂堵剂材料,暂堵球到位后施工泵压(套压)上升明显,井筒净压力上升达到第 11 簇的破裂压力,第 11 簇开始进液,该簇声波能量信号明显增强,同时第 10 簇声波能量信号明显减弱,该簇进液量显著降低。暂堵后压裂施工曲线在同排量情况下,压力升高明显且波动较大,综合压裂施工工程参数及光纤 DAS 监测结果表明,该段第二次复合暂堵起到了一定的转向效果。

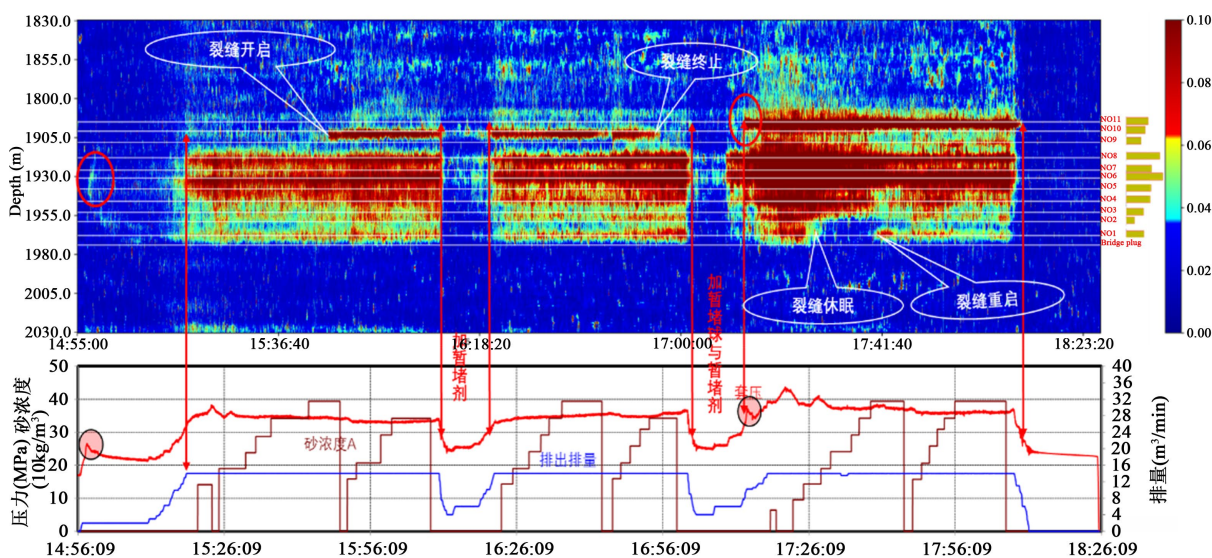


Figure 7. Fracturing operation plot and corresponding per-cluster acoustic signals before and after plugging for a stage of well X4
图 7. X4 井某段压裂施工曲线与对应各簇暂堵前后声波信号

实例结果表明,光纤监测声波信号可以直观监测各射孔簇实时进液情况,为实时暂堵效果分析提供依据。但光纤暂堵监测主要监测缝口进液进砂情况的变化,对缝内裂缝扩展及转向的实际效果需要结合微地震监测结果,才能对暂堵转向的效果给出更全面与客观的评价。随着光纤监测技术不断进步和推广应用,未来微地震 + 光纤综合监测手段将在非常规气藏的开发中发挥越来越重要的作用。

6. 结论

复合暂堵工艺是目前页岩气等非常规气藏提升改造效果的关键手段之一, 施工期间压裂暂堵转向成功与否与后期增产效果密切相关, 因此如何评价压裂期间暂堵转向效果至关重要。因微地震监测技术能实时监测压裂期间压裂缝的发生、拓展, 常被人们用作评价压裂暂堵转向的主要手段。但目前往往依据暂堵后微地震事件点外延、事件数增加或 SRV 增长等单一指标来评价暂堵效果, 容易产生误判, 针对单一微地震指标评价暂堵效果存在的局限性, 建立了压裂期间多因素综合判定暂堵转向的依据, 压裂过程中足够的压力上升是实现转向的基本条件, 暂堵材料到位时刻的压力上升突变响应, 暂堵后相同排量下平均泵压较暂堵前发生明显变化或泵压整体波动趋势显著变化, 并有足够多的微地震事件响应在新的空间位置区域, 三个条件同时具备才能明确说明暂堵转向起到实质性的作用。文中同时对比了深层页岩气藏微地震井中监测与地面监测在评价暂堵转向时的差异, 指出微地震地面监测在深层非常规气藏监测存在监测信号分辨率不足而可能导致的评价缺陷, 建议在非常规气藏压裂中融合光纤 DAS/DTS 技术实时监测各簇进液与加砂状态, 结合微地震事件空间演化规律, 构建多参数协同的暂堵转向效果评价体系, 进一步提升暂堵转向评估的准确性。

参考文献

- [1] 陈挺, 徐昊垠, 张源, 等. 深层页岩储层转向压裂用暂堵材料研究及应用[J]. 石油化工应用, 2024, 43(11): 18-20.
- [2] 曾韦, 廖进, 李先军, 张书玲, 路明昌. 浅层页岩气投球转向压裂工艺及应用[J]. 石油化工应用, 2023, 42(9): 57-60.
- [3] 田宝刚, 邱伟. 泸州阳 101 井区深层页岩气压裂技术研究[J]. 石油化工应用, 2023, 42(8): 72-76.
- [4] 衡峰, 刘腾蛟, 李晓峰, 等. 微地震监测技术在老井暂堵重复压裂中的应用[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). 保定: 中国石油集团东方地球物理公司, 2024: 128-131.
- [5] 储仿东, 王林生, 张华, 等. 利用微地震井中监测技术实时分析玛湖平台井水力压裂效果[C]//中国石油学会石油物探专业委员会, 中国地球物理学会勘探地球物理委员会. 2022 年中国石油物探学术年会论文集(下册). 2022: 274-277.
- [6] 赵金洲, 陈曦宇, 刘长宇, 等. 水平井分段多簇压裂缝间干扰影响分析[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 533-538.
- [7] 周彤, 陈铭, 张士诚, 等. 非均匀应力场影响下的裂缝扩展模拟及投球暂堵优化[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 82-91.
- [8] 宋志同, 王峻源, 徐伟宁, 等. 天然断裂带干扰下的复合暂堵压裂工艺参数优化[J]. 钻采工艺, 2023, 37(5): 115-119.
- [9] 曹学军, 王明贵, 康杰, 等. 四川盆地威荣区块深层页岩气水平井压裂改造工艺[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 81-85.
- [10] 李彦超, 王一萱, 张庆, 等. 体积压裂工艺 2.0 技术与实践-以威远页岩气为例[C]//中国石油学会天然气专业委员会. 第 33 届全国天然气学术年会(2023)论文集(03 非常规气藏). 2023: 296-304.
- [11] 郑新权, 何春明, 杨能宇, 等. 非常规油气藏体积压裂 2.0 工艺及发展建议[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(3): 7-15.
- [12] 吕振虎, 吕蓓, 罗垚, 等. 基于光纤监测的段内多簇暂堵方案优化[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 114-121.