

· 储层改造与完井技术 ·

文章编号: 1004-4388(2025)01-0035-08

基于微地震监测的长宁区块页岩气水平井压裂效果评估

胡俊杰^{1,5}, 宋毅^{1,5}, 朱炬辉², 周小金³, 邓琪^{1,5}, 梅花浪雪⁴

1. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院 四川成都 610056
2. 中国石油川庆钻探工程有限公司井下作业公司 四川成都 610066
3. 中国石油西南油气田公司工程技术部 四川成都 610056
4. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院 四川成都 610041
5. 页岩气评价与开采四川省重点实验室 四川成都 610056

通讯作者: Email: hujunjie127@petrochina.com.cn

项目支持: 国家自然科学基金企业联合重点支持项目“页岩气藏体积压裂缝网表征及复杂裂缝动态交互机理研究”(U23B20156); 中国石油天然气股份有限公司科技专项“非常规储层改造关键技术研究—页岩气复杂防控及高效压裂技术与试验”(2023ZZ28YJ05)

引用: 胡俊杰, 宋毅, 朱炬辉, 等. 基于微地震监测的长宁区块页岩气水平井压裂效果评估[J]. 油气井测试, 2025, 34(1): 35-42.

Cite: HU Junjie, SONG Yi, ZHU Juhui, et al. Evaluating hydraulic-fracture effectiveness in Changning shale gas block from microseismic monitoring [J]. Well Testing, 2025, 34(1): 35-42.

摘要 针对长宁区块页岩气天然裂缝预测和地应力预测等成果图的预测精度验证和深化的问题, 选取 50 口页岩气水平井的井下微地震监测数据进行系统分析。通过不同地质和压裂工艺条件下微地震响应特征及其与气井产能关系, 开展水力裂缝的扩展规律预测并评价压裂工艺和压裂效果。结果表明, 天然裂缝发育储层更易产生大能级事件点, 且微地震事件点方位易沿曲率异常走向展布; 同时, 储层高应力特征不利于水力裂缝扩展, 储层体积改造难度大。为了达到更好的储层体积改造效果, 采用段内多簇压裂工艺更能激活近井区域内的天然裂缝, 增加缝网的复杂程度。依据该研究结果形成了一套适应川南页岩气井的微地震监测压后评估方法, 对今后页岩气开发技术优化、压裂工艺调整提供了有力支撑。

关键词 四川盆地南部; 长宁区块; 页岩气水平井; 微地震监测技术; 水力压裂; 缝网复杂程度; 压裂效果评估; 气井产能

中图分类号: TE377

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.01.006

Evaluating hydraulic-fracture effectiveness in Changning shale gas block from microseismic monitoring

HU Junjie^{1,5}, SONG Yi^{1,5}, ZHU Juhui², ZHOU Xiaojin³, DENG Qi^{1,5}, MEI Hualangxue⁴

1. Shale Gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610056, China
2. Downhole Operation Company of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610066, China
3. Engineering Technology Department of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610056, China
4. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China
5. Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Extraction, Chengdu, Sichuan 610056, China

Abstract: Although prediction maps of natural fractures and geostress in this block have been formed, there is still much content that needs further research and verification. The underground microseismic monitoring data of 50 shale gas horizontal wells in Changning block were selected for unified and systematic analysis in this research. Through the relationship between microseismic response characteristics and different geological conditions, fracturing techniques, gas well productivity, the breaking and developing rules of hydraulic fractures were effectively predicted, fracturing effects were evaluated. The research results indicate that natural fractured reservoirs are more prone to generating large energy level event points, and the orientation of microseismic event points is easily distributed along the direction of curvature anomalies of natural fracture. At the same time, the high stress characteristics of the reservoir are not conducive to the expansion of hydraulic fractures, and the volume transformation of the reservoir is difficult. In order to achieve better reservoir volume transformation effects, the use of multi-cluster fracturing technology within the well section can activate natural fractures in the near wellbore area and increase the complexity of the fracture network. Based on the research results, a set of microseismic monitoring methods of post-fracturing effect evaluation suitable for shale gas wells in southern Sichuan shale gas field has been developed, providing strong support for optimizing shale gas development technology and adjusting fracturing



techniques in the future.

Keywords: southern Sichuan basin; Changning block; shale gas horizontal well; microseismic monitoring technology; hydraulic fracturing; complexity of fracture network; fracturing effect evaluation; gas well productivity

页岩储层具有低孔隙度、低渗透率等特征,现阶段,四川盆地南部(以下简称川南)页岩气资源开发多以水平井和大型压裂技术为主,而压裂效果的好坏直接影响着页岩气井的产能效果,这是页岩气开发的关键^[1]。微地震监测技术作为有效监测裂缝与评价油气井压裂效果的手段之一^[2],从2015年开始,被正式应用到川南长宁区块页岩气水平井井区。

微地震监测技术是一种以地震学和声发射学为基础的地球物理技术^[3]。其技术原理是将高灵敏性的传感器安装在最接近于震源的井眼中,在水力压裂期间,当岩石发生破裂或者滑移形成裂缝,会产生一系列向四周传播的微地震波^[4],其信号将被传感器采集记录;最后通过数据处理,可获取震源的相关信息,帮助完成接下来的评价、分析工作^[5]。

近年来,随着技术的不断发展和研究的深入,基于微地震监测的页岩气压裂效果评估领域取得了显著的进展。KHADHRAOUI 等^[6]提出了改进的微地震事件定位算法,利用此算法能够更准确地确定微地震事件的空间分布特征。赵富城^[7]深入探讨了微地震监测技术及应用的关键问题,提出了一套完整的数据处理和解释方法,包括事件定位和分析、裂缝网络展布规律等。PANJAITAN 等^[8]提出了一种基于微地震监测的页岩气压裂效果评估方法,该方法首先利用微地震事件的数量和能量释放大小评估压裂效果的强度,进而利用裂缝密度、长度和宽度等参数评价裂缝网络的发育情况。LIU 等^[9]运用人工智能技术对微地震事件与裂缝网络发育之间的关联规律,并提出了一种基于深度学习的裂缝网络模拟方法。田建涛等^[10]运用多尺度监测方法,对裂缝网络形态和特征进行了全面评估,从而为压裂效果的评估提供了更加精确的数据支持。JING 等^[11]进行了实地案例研究,验证了微地震监测技术在不同页岩气田应用的可行性和有效性。梁雪莉等^[12]提出了一种新的微地震事件特征参数评价方法,随后,LUO 等^[13]运用机器学习技术对微地震监测数据进行分析,建立了微地震参数与产量之间的关联模型。这些研究成果丰富了该领域的理论研究和实践经验,为页岩气开发提供了重要的技术支持。

截至目前,微地震监测作为压裂改造重要的实时分析和调控依据,已广泛应用于页岩气压裂改造,获得了丰富的微地震监测数据。尽管现阶段已形成了长宁区块天然裂缝预测和地应力预测等成果图,但仍有许多内容有待进一步验证和深化,例如天然裂缝和地应力预测精度亟待通过微地震监测成果加以验证、天然裂缝和地应力对水力裂缝扩展影响规律还有待进一步攻关深化、不同天然裂缝尺度对微地震事件点的形成还有待于研究、基于微地震监测成果的水力裂缝形态表征还有待于深化、压裂工艺调整对水力裂缝扩展亟待深入研究、微地震监测成果与压后产量指标相关性还有待深入分析等。井下微地震监测接近于震源位置,获取的井下数据信噪比更高、信号准确性和可靠性也更强^[14]。为此,选取长宁区块 50 口页岩气水平井的井下微地震监测数据进行统一、系统地分析,明确不同地质和压裂工艺条件下微地震响应特征及其与页岩气井产能的关系,为未来页岩气开发技术优化、压裂工艺调整和压裂效果评估提供有力支撑。

1 长宁区块页岩气水平井微地震特征

微地震监测技术可定量获取裂缝尺寸、储层改造体积(Stimulated Reservoir Volume,物理量的符号为 SRV)、震级、P/S 值(纵波振幅与横波振幅的比值)、B 值(频率-震级分布线性部分的斜率的绝对值)等数据信息^[15]。其中,微地震事件的震级是地震波在传播过程中能量的衰减,震级越大,地层释放的能量越大^[16]。微地震事件的 P/S 值反映了裂缝的剪切特性,P/S 值越小,裂缝剪切特性越强^[17]。古登堡-里克特关系指出,在一定区域的足够时间段内,不同的震级大小的地震数量遵循着一定的相关性,而微地震事件的 B 值可以用来评估压裂是否激活了天然裂缝,当区域 B 值越接近 1 或越小,表明该区域大震级事件点越多,大的天然裂缝被激活,为挤压应力环境,反之则表明为拉伸应力环境。

位于四川盆地南缘构造复杂带的长宁区块页岩气储量丰富,上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩储层裂缝、断层发育程度高,影响页岩气井压裂效果的因素较多且复杂,在一定程度上制约着该区块页岩气资源的高效开发^[18]。其主体区内单



井埋深为 2 000~3 800 m,五峰组~龙一₁ 亚段 I 类储层连续厚度为 5~20 m。

从 50 口井井下微地震监测结果来看,长宁区块整体微地震监测能级范围介于-3.5~1.73,P/S 值介于 0~24.05,B 值介于 0.74~1.90。结合长宁区块裂缝带、曲率异常、断层多级裂缝叠合图,天然裂缝发育且地层挠曲和断层交错的区域被视为天然裂缝发育区;反之,裂缝带少有出现的区域则被视为天然裂缝欠发育区。对长宁区块微地震事件震级和 P/S 值的统计结果表明(见图 1),天然裂缝发育的储层更易产生大能级事件点,但不一定以剪切破坏为主,而主体剪切破坏特性有可能对天然裂缝发育储层改造效果产生负面影响。

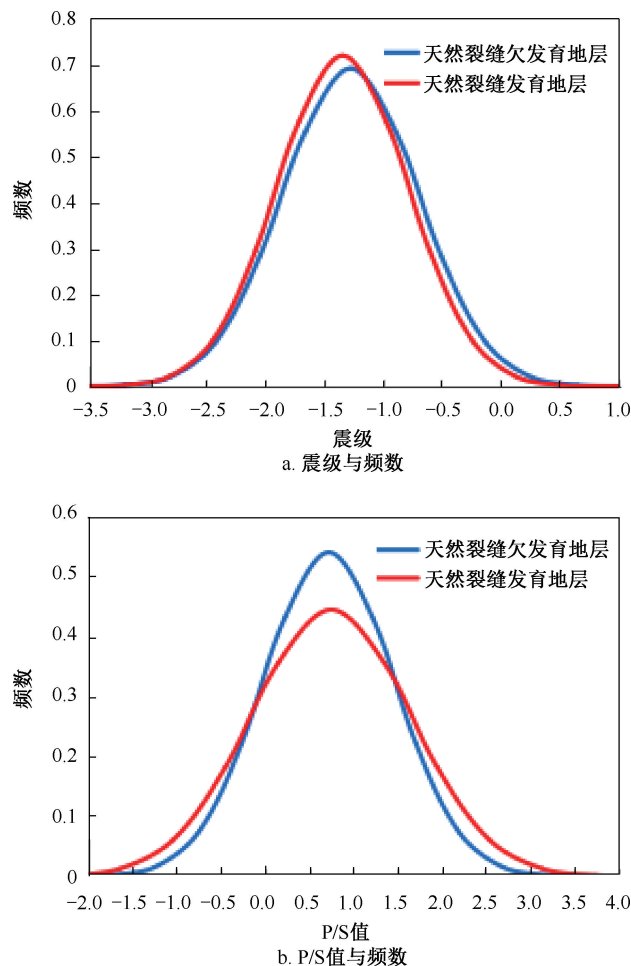


图 1 长宁区块微地震事件震级、P/S 值正态分布曲线图
Fig.1 Microseismic event magnitude and P/S value normal distribution curve in Changning block

2 不同地质条件下的微地震特征分析

针对复杂地质条件下压裂水力裂缝的形态特征,通过微地震监测成果,围绕天然裂缝、地应力和储层特性对水力裂缝的扩展认识加以验证和提升。

2.1 天然裂缝对水力裂缝扩展的影响

相关实验结果和理论研究表明,天然裂缝为结构弱面,当水力裂缝与天然裂缝相遇时,水力裂缝容易受到天然裂缝的影响,并相互之间存在着 3 种主要关系:水力裂缝突破天然裂缝,继续沿原始方向扩展;水力裂缝受天然裂缝诱导作用的影响,沿天然裂缝方向扩展;水力裂缝沟通天然裂缝,并在天然裂缝某些弱点重新转向^[19]。

长宁区块区内整体以网状缝为主,微幅构造发育区域、断层附近则以单向缝为主,曲率体密度较大。岩心观察厘米级裂缝,主要为层理缝,发育少量高角度缝,多被方解石充填。在微地震监测井中,绝大部分平台井都位于天然裂缝发育区。根据微地震监测统计结果显示,与天然裂缝欠发育区的井相比,欠发育区井微地震事件能级平均为 0.73,天然裂缝发育区井的微地震事件能级普遍偏高,平均 0.91,P/S 值并无太大差异,B 值普遍小于且接近于 1。由此说明,天然裂缝发育区的井大能级事件点较多,且大尺度的天然裂缝易被激活。

此外,借助长宁区块天然裂缝预测成果图,基于裂缝尺度和能量释放的特征,通过微地震事件点能级强弱、展布方向、密度大小等进行叠合分析,结果发现:在天然裂缝发育区,微地震事件点展布方向易向曲率异常走向偏移(见图 2),证明了水力裂缝易受大尺度天然裂缝诱导,发生转向或沿天然裂缝方向扩展。而天然裂缝欠发育区的事件点则沿近似垂直井筒方向均匀分布(见图 3),证明了水力裂缝突破天然裂缝,沿层理面开裂,继续按原始方向展布的情况。

2.2 地应力对水力裂缝扩展的影响

裂缝性储层中地应力差是影响水力裂缝扩展的另一个重要因素^[20]。KRESSE 等^[21]的模拟结果表明,对于相同的初始天然裂缝,增加水平应力差,可以诱导裂缝几何结构由复杂裂缝网格改变为完全双翼裂缝。长宁区块区内最小水平主应力为 44~81 MPa,压力差为 7.3~16.7 MPa,其中区内存在两个高应力区,最小水平主应力大于 75 MPa。此次监测井中绝大部分处于低应力区,最小水平主应力低于 70 MPa。为了验证储层低应力特征下水力裂缝缝网是否更复杂,借助裂缝复杂指数(微地震裂缝监测的缝宽与缝长之比,物理量的符号为 FCI)能够在一定程度上反映出裂缝的复杂程度,FCI 值越大,裂缝网络越复杂,证明储层改造越充分。如图 4 所

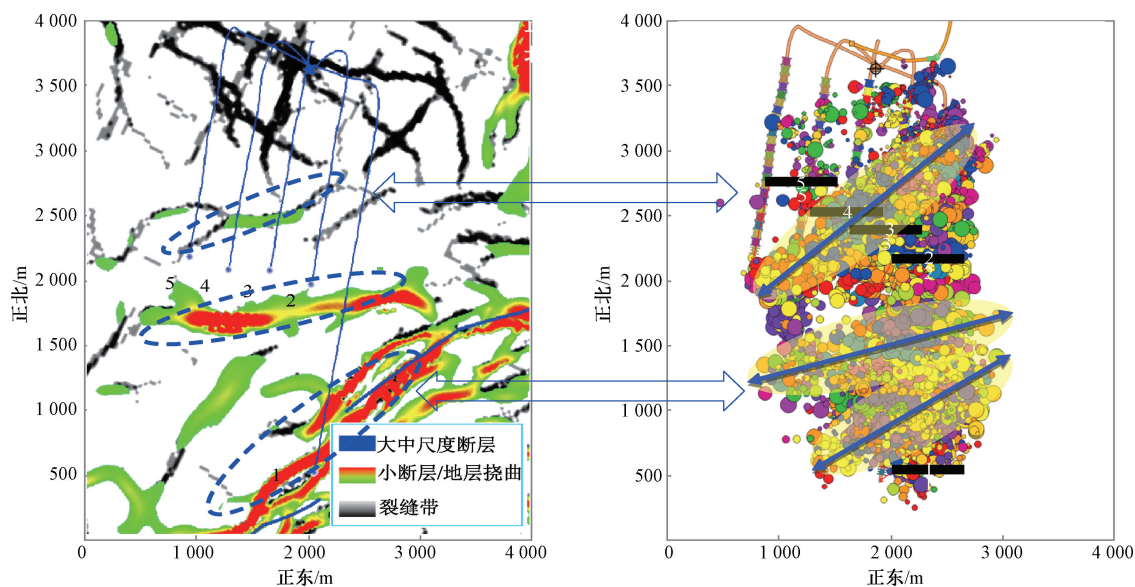


图 2 天然裂缝发育区井多级断裂识别与监测结果对比图

Fig. 2 Comparison diagram of multi-level fault identification and monitoring results in natural fractured area

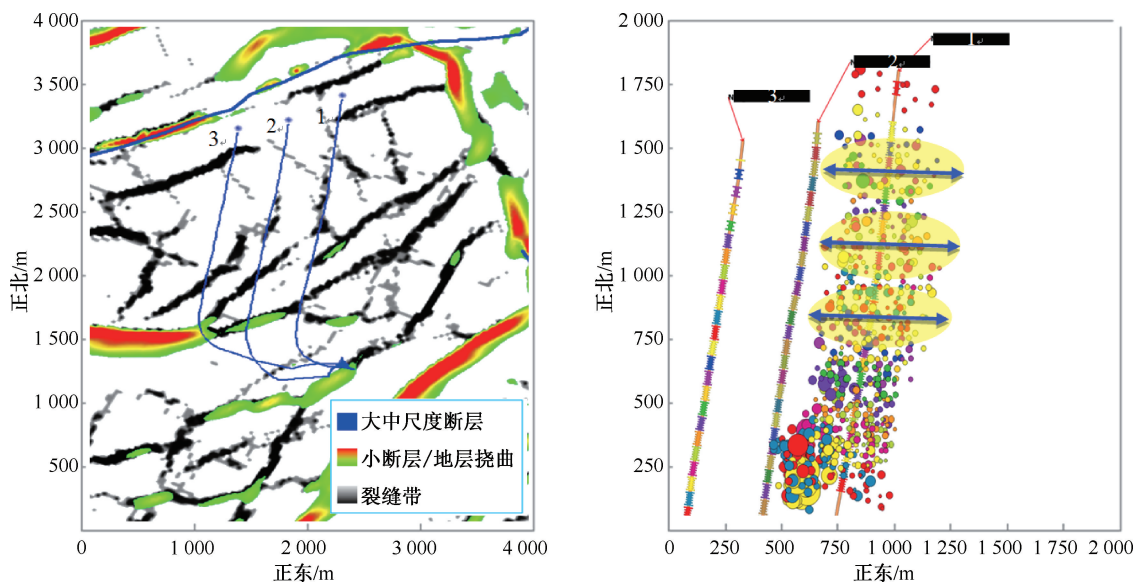


图 3 天然裂缝欠发育区井多级断裂识别与监测结果对比图

Fig. 3 Comparison diagram of multi-level fault identification and monitoring results in underdeveloped natural fractured area

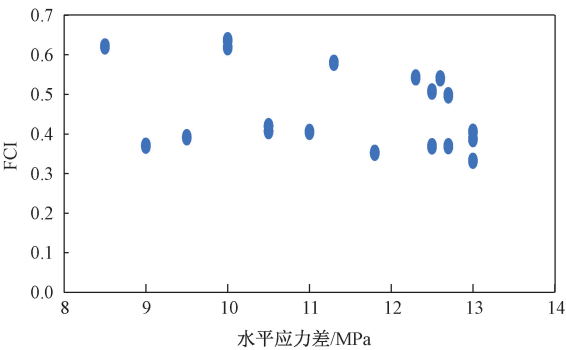


图 4 水平应力差与 FCI 的关系图

Fig. 4 Diagram of the relationship between horizontal stress difference and FCI

示,其规律大致符合数值模拟的结果。水平应力差较小的区域,缝内净压力更易突破应力差转向,从而形成更复杂的裂缝网络。

2.3 储层特征对水力裂缝扩展的影响

微地震事件的时空分布、震级大小等地震学参数与储层介质的特性也有着直接的关系^[22]。从长宁区块储层特征来看,区内脆性矿物 60%~75%, TOC 含量 3.0%~4.5%,孔隙度 4.5%~7.0%,含气量 4.5~7.0 m³/t,整体储层品质较好。笔者将微地震监测结果与测井资料综合解释结果进行定性和定量分析后发现,压裂区域中部和储层特性交界处

的微地震事件点震级相对较小且密集,而压裂区域两侧监测事件点震级则偏大且分散,显示出区内储层的非均一性特征。通过统计分析储层脆性矿物含量(含碳酸盐矿物)、杨氏模量与百米事件点的关系(见图 5)可知,储层脆性与百米事件点未呈现出明显的相关性,而杨氏模量与百米事件点则呈正相关性。

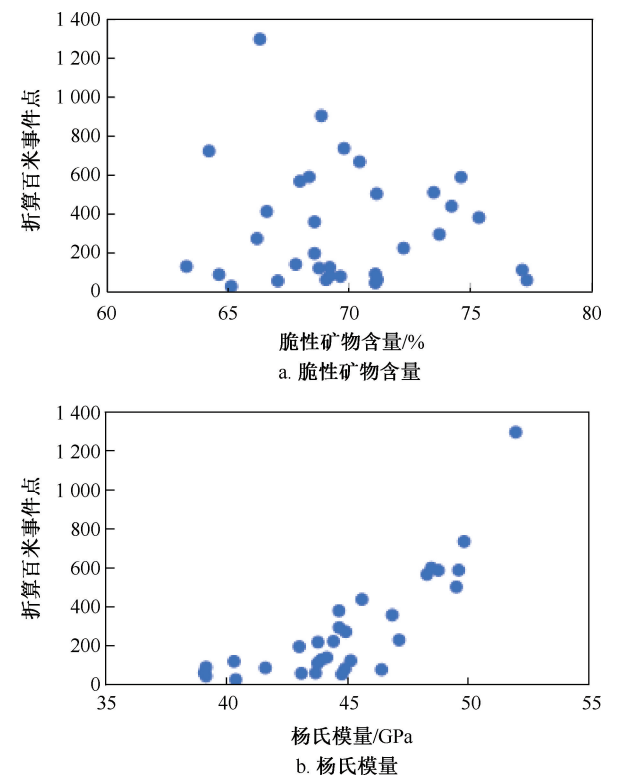


图 5 脆性矿物含量、杨氏模量与折算百米事件点的关系图
Fig. 5 Relationship diagram between brittle mineral content, Young's modulus, and converted hundred meter event points

但是如图 6 所示,杨氏模量与百米 SRV 并未呈现出明显的相关性。

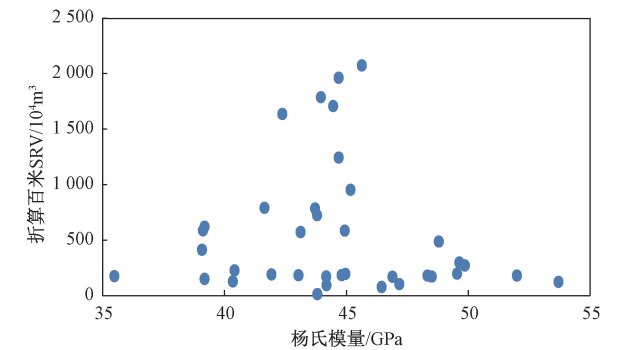


图 6 杨氏模量与折算百米 SRV 的关系图
Fig. 6 Relationship diagram between Young's modulus and converted hundred meter SRV

进一步证明了由于页岩储层内部矿物组分复

杂,存在大量天然裂缝和层理面,且结构具有明显的各向异性,使得水力裂缝扩展路径通常受到多种因素的影响。

3 不同压裂参数下的微地震特征分析

早期,长宁区块页岩气水平井常规压裂工艺主要以段内簇数 3 簇为主,单段总孔数 48 孔,簇间距介于 20~25 m^[23],段长 60~75 m。主体排量 12~14 m³/min,单段液量 1 800 m³,单段砂量 80~120 t,其中采用 70/140 目粉砂+40/70 目陶粒支撑剂组合。后来随着整个水力压裂工艺的不断进步,为了进一步增加缝网复杂程度、获得最大的储层改造体积、提高页岩气开采效益,段内多簇压裂工艺得到广泛的推广和应用,目前在 300~400 m 巷间距下段内簇数增加到 6~8 簇,单段总孔数 48~64 孔,簇间距缩短至低于 10 m^[24],段长 70~80 m,呈现长段多簇特点。主体排量 14~18 m³/min,用液强度 25~30 m³/m,加砂强度 2.5~3.0 t/m,其中支撑剂全程使用石英砂。

统计结果表明,长宁页岩气区块井下微地震监测下的常规压裂工艺井(段内簇数 3 簇)施工排量为 14.91 m³/min,平均用液强度为 29.81 m³/m,平均加砂强度为 2.01 t/m;段内多簇压裂工艺井(段内簇数 6~8 簇)排量为 16.79 m³/min,平均用液强度为 29.83 m³/m,平均加砂强度为 2.62 t/m。近几年,段内多簇压裂工艺技术在长宁页岩气区块成功应用,在增加缝网复杂程度、提高储层动用率上取得了显著成果,形成了更多可流通的通道,提高了加砂强度,有效增强了储层改造效果。

微地震监测结果显示,常规压裂工艺井平均波及长度 553 m,平均波及宽度 249 m,平均波及高度 169 m;段内多簇压裂工艺井平均波及长度 391 m,平均波及宽度 157 m,平均波及高度为 101 m。由此可知,常规压裂工艺井波及范围普遍大于段内多簇压裂工艺井。另外,常规压裂工艺井平均百米改造段长事件点为 393 个,平均百米改造段长 SRV 为 164.94×10⁴ m³;段内多簇压裂工艺井平均百米改造段长事件点为 175 个,平均百米改造段长 SRV 为 947.39×10⁴ m³,可见段内多簇压裂工艺井百米改造段长事件点普遍较少,但百米改造段长 SRV 远高于常规压裂工艺井。同时,结合其他地震学统计参数可知,与常规压裂工艺相比,段内多簇压裂工艺井微地震能级普遍偏高、P/S 值普遍相等、B 值普遍接近于

1。因此,可以得出结论:相同压裂规模下,段内多簇压裂工艺造出的水力裂缝波及范围远低于常规压裂工艺,但更容易在近井区域内激活天然裂缝造出复杂缝网,并且大能级事件点多、储层改造更充分。

再者,基于长宁区块井下微地震监测数据,选取施工排量、用液强度和加砂强度作为主要参考压

裂参数,为了达到最大化的页岩储层改造目的,同时实现低成本压裂路径,分析上述三个关键压裂参数与折算百米改造段长 SRV 的关系,如图 7 所示。长宁区块页岩气水平井常规 I 类储层条件下,推荐采用段内多簇压裂工艺,主体排量 $\geq 16\text{ m}^3/\text{min}$,用液强度 $30\text{ m}^3/\text{m}$,加砂强度 $2.5\sim 3.0\text{ t}/\text{m}$ 。

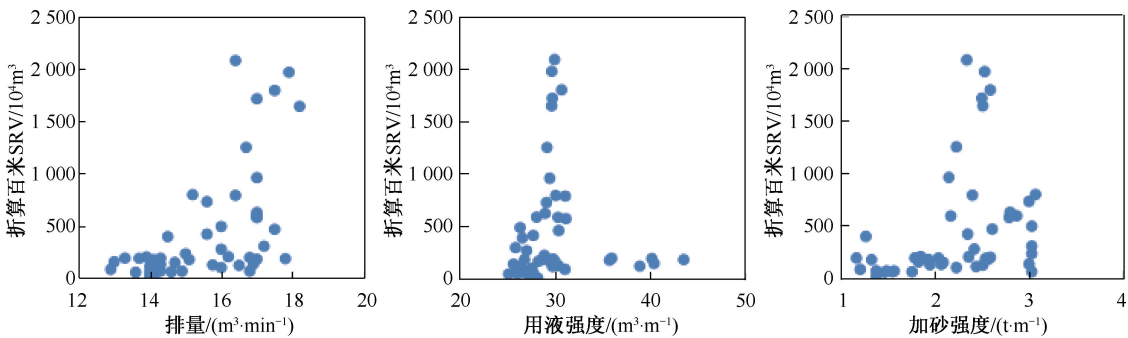


图 7 施工排量、用液强度、加砂强度与折算百米 SRV 的关系图

Fig. 7 Diagram of the relationship between construction displacement, liquid intensity, sand addition intensity, and converted hundred meter SRV

4 微地震监测的压后产量评估

微地震监测技术是定量实时监测和评估水力压裂改造效果的主要方法,为提高单井的产量和页岩气田的高效经济开发提供了有力的技术支撑^[25]。但受到地质条件、压裂工艺参数、生产数据等多种因素的综合影响,微地震监测结果难以全面准确地预测产能。在长宁区块,井下微地震监测井平均测试产量为 $25.01\times 10^4\text{ m}^3$,气井估算的最终可采储量(Estimated Ultimate Recovery, 物理量符号 EUR)井

均为 $1.17\times 10^8\text{ m}^3$,折算千米 EUR 井均为 $0.76\times 10^8\text{ m}^3$ 。取 $\text{EUR}\geq 1.30\times 10^8\text{ m}^3$ 为高产井,长宁区块高产井的微地震能级介于 $-3.50\sim 1.73$,P/S 值介于 $0\sim 24.05$,B 值介于 $0.74\sim 1.90$,与低产井微地震参数并无太大差异性。另外,统计结果表明(见图 8),微地震监测百米 SRV 与测试产量、首年累计产量、EUR 之间并未表现出明显的相关性,而且微地震参数也无法准确反映产能规律。因此,微地震监测结果作为直接评估压后产能方面存在一定的局限性,需结合其他监测技术进行综合评估。

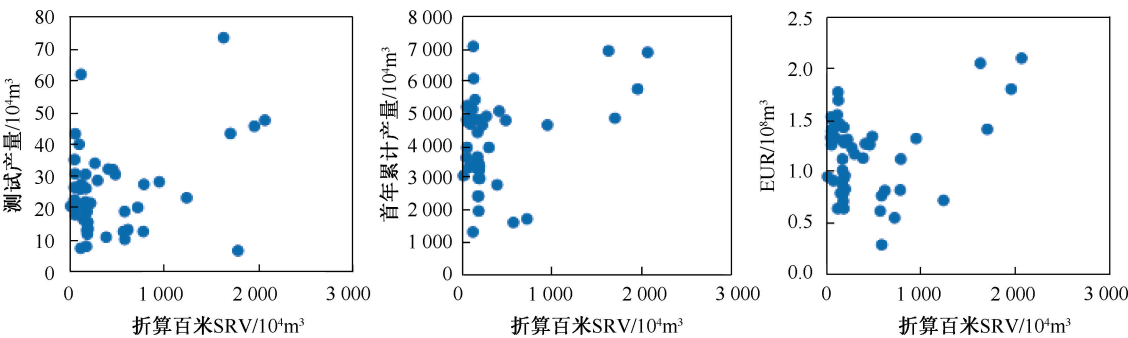


图 8 折算百米 SRV 与测试产量、首年累计产量、EUR 的关系图

Fig. 8 Diagram of the relationship between converted hundred meter SRV and test production, cumulative production in the first year, EUR

5 结论

(1)微地震监测技术可定量获取裂缝尺寸、储层改造体积(SRV)、震级、裂缝复杂指数(FCI)、P/S 值、B 值等关键数据信息,通过对这些数据进一步深

入挖掘分析,可为长宁区块页岩气水平井压裂过程中裂缝网络的扩展路径和复杂性变化提供精确的评估,从而有效评价压裂工艺的实施效果,为后期优化压裂参数和提高储层改造效果奠定了坚实的基础。



(2)微地震监测结果揭示了长宁区块不同地质条件下压裂效果存在显著的差异,在相同初始天然裂缝条件下,水平应力差较小的区域,缝内净压力更易突破应力差转向,从而形成更复杂的裂缝网络。特别是在天然裂缝发育区,微地震事件点分布和能量释放特征表明,压裂过程能够有效激活天然裂缝,进而显著提升储层的渗透性和页岩气井的产能。

(3)段内多簇压裂工艺更容易在近井区域内激活天然裂缝,从而显著提升裂缝网络的复杂性和储层改造效果。在长宁区块多口井的实际应用中,通过优化多参数组合,发现为了达到更好的页岩气高效低成本开发路径,长宁区块页岩气水平井常规 I 类储层条件下,宜采用段内多簇压裂工艺,主体排量 $\geq 16 \text{ m}^3/\text{min}$,用液强度为 $30 \text{ m}^3/\text{m}$,加砂强度介于 $2.5 \sim 3.0 \text{ t/m}$,全程石英砂,这一工艺优化将有助于进一步提升页岩气井的产量和经济效益。

(4)尽管微地震监测在评估裂缝网络和储层改造体积方面具有独特优势,但在直接评估压后产能方面存在一定的局限性。因此,在实际应用中,建议将微地震监测、其他监测技术和生产数据相结合,以全面评估压裂效果,确保页岩气资源的高效开发和利用。

致谢:本文完成过程中得到了何冶教授级高级工程师、以及四川长宁天然气开发有限责任公司、中国石油西南油气田公司页岩气研究院专家和同事的指导和帮助,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 马新华,谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. 石油勘探与开发,2018,45(1):161-169.
MA Xinhua, XIE Jun. The progress and prospects of shale gas exploration in southern Sichuan basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 161-169.
- [2] 刘旭礼. 井下微地震监测技术在页岩气“井工厂”压裂中的应用[J]. 石油钻探技术,2016,44(4):102-107.
LIU Xuli. The Application of downhole microseismic monitoring technology in shale gas “well factory” hydraulic fracturing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 102-107.
- [3] 赵博雄,王忠仁,刘瑞,等. 国内外微地震监测技术综述[J]. 地球物理学进展,2014,29(4):1882-1888.
ZHAO Boxiong, WANG Zhongren, LIU Rui, et al. Review of microseismic monitoring technology research [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4): 1882-1888.
- [4] 吕世超,郭晓中,贾立坤. 水力压裂井中微地震监测资料处理与解释[J]. 油气藏评价与开发,2013,3(6):37-42.
LYU Shichao, GUO Xiaozhong, JIA Likun. Microseismic monitoring data processing and interpretation of horizontal fracturing wells [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(6): 37-42.
- [5] 全少凯,高德利. 波动注入水力压裂诱发微地震的力学机制及其对压裂效果的影响[J]. 石油钻采工艺,2020,42(1):98-113.
TONG Shaokai, GAO Deli. Mechanical principles of the fluctuation injection based hydraulic fracturing to induce microseismic and its influence on the fracturing effect [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(1): 98-113.
- [6] KHADHRAOUI B, LESLIE D, DREW J, et al. Real-time detection and localization of microseismic events [C]// Paper presented at the SEG Annual Meeting, October 2010, Denver, Colorado, USA; SEG-2010-2146.
- [7] 赵富城. 有关井下微地震监测技术的研究与应用[J]. 石化技术,2017,24(2):159.
ZHAO Fucheng. Research and application of downhole microseismic monitoring technology [J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(2): 159.
- [8] PANJAITAN M L, MORIYAMA A, MCMILLAN D, et al. Qualifying diversion in multi clusters horizontal well hydraulic fracturing in Haynesville Shale using water hammer analysis, step-down test and microseismic data [C]// Paper Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, January 2018, The Woodlands, Texas, USA; SPE-189850-MS.
- [9] LIU Z, REYNOLDS A C. History matching an unconventional reservoir with a complex fracture network [C]// Paper Presented at the SPE Reservoir Simulation Conference, April 2019, Galveston, Texas, USA; SPE-193921-MS.
- [10] 田建涛,赵超峰,张伟,等. 水力压裂井中监测方法不对称压裂裂缝分析[J]. 石油物探,2019,58(4):563-571.
TIAN Jiantao, ZHAO Chaofeng, ZHANG Wei, et al. Analysis of asymmetric hydraulic fracture for borehole microseismic monitoring [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 563-571.
- [11] JING C, CHEN Y, JING X, et al. Utilizing surface microseismic monitoring to improve understanding of natural fractures in Sichuan shale gas play [C]// Paper Presented at the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, November 2020; SPE-202319-MS.
- [12] 梁雪莉,刘海龙,承宁,等. 微地震监测解释技术在非常规油气储层的研究与应用[J]. 新疆石油天然气,2021,17(3):53-58.
LIANG Xueli, LIU Hailong, CHENG Ning, et al. Study and application microseismic monitoring and interpretation



- technology in unconventional oil and gas reservoirs [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2021, 17(3): 53–58.
- [13] LUO Y, KANG B, GUO J, et al. Production forecast for multistage hydraulically fractured shale gas well based on integration of domain knowledge and deep learning algorithm [C]//Paper Presented at the SPE Canadian Energy Technology Conference and Exhibition, March 2024, Calgary, Alberta, Canada; SPE-218105-MS.
- [14] 任朝发. 井中微地震监测质量控制与微地震事件筛选方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 44–52.
REN Chaofa. Quality control of downhole micro-seismic monitoring and interpretation method of micro-seismic events [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 44–52.
- [15] MAXWELL S. Microseismic imaging of hydraulic fracturing: Improved engineering of unconventional shale reservoir [M]. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2014.
- [16] 胡杨, 贾志坤. 微地震数据预处理方法研究[J]. 科技视界, 2016(16): 276.
HU Yang, JIA Zhikun. Research on microseismic data processing methods [J]. Science & Technology Vision, 2016(16): 276.
- [17] 赵炜, 辛维, 毛中华, 等. 利用单井微地震波形能量反演震源机制[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(5): 945–953.
ZHAO Wei, Xin Wei, Mao Zhonghua, et al. Focal mechanism inversion with single-well microseismic wave energy [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(5): 945–953.
- [18] 赵福豪, 黄维安, 雍锐, 等. 地质工程一体化研究与应用现状[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(2): 131–138.
ZHAO Fuhao, HUANG Weian, YONG Rui, et al. Research and application status of geology-engineering integration [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 131–138.
- [19] 周小金, 雍锐, 范宇, 等. 天然裂缝对页岩气水平井压裂的影响及工艺调整[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 94–104.
ZHOU Xiaojin, YONG Rui, FAN Yu, et al. Influence of natural fractures on fracturing of horizontal shale gas wells and process adjustment [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 94–104.
- [20] 张广清, 周大伟, 窦金明, 等. 天然裂缝群与地应力差作用下水力裂缝扩展试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(5): 157–162.
ZHANG Guangqing, ZHOU Dawei, DOU Jinming, et al. Experiments on hydraulic fracture propagation under action of natural fractures and crustal stress difference [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(5): 157–162.
- [21] KRESSE O, COHEN C, WENG X, et al. Numerical modeling of hydraulic fracturing in naturally fractured formations [C]//Paper presented at the 45th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, June 2011, San Francisco, California, USA; ARMA-11-363.
- [22] 李政, 常旭, 姚振兴, 等. 微地震方法的裂缝监测与储层评价[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 707–719.
LI Zheng, CHANG Xu, YAO Zhenxing, et al. Fracture monitoring and reservoir evaluation by micro-seismic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 707–719.
- [23] 赵志恒, 郑有成, 范宇, 等. 页岩储集层水平井段内多簇压裂技术应用现状及认识[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(4): 499–504.
ZHAO Zhiheng, ZHENG Youcheng, FAN Yu, et al. Application and cognition of multi-cluster fracturing technology in horizontal wells in shale reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(4): 499–504.
- [24] 胡俊杰, 周小金, 周拿云, 等. 井筒听诊器技术在川南页岩气田的应用研究[J]. 钻采工艺, 2022, 45(6): 65–69.
HU Junjie, ZHOU Xiaojin, ZHOU Nayun, et al. Application and research of wellwatcher technology in southern Sichuan shale gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(6): 65–69.
- [25] 陈海潮, 唐有彩, 钮凤林, 等. 利用微地震参数评估水力压裂改造效果研究进展[J]. 石油科学通报, 2016, 1(2): 198–208.
CHEN Haichao, TANG Youcai, NIU Fenglin, et al. Recent advances in microseismic monitoring and implications for hydraulic fracturing mapping [J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(2): 198–208.

编辑 方志慧

第一作者简介: 胡俊杰, 男, 1992 年出生, 工程师, 硕士, 2020 年毕业于美国南加州大学石油工程专业, 现主要从事非常规油气储层改造研究相关工作。电话: 13558867227, Email: hujunjie127@petrochina.com.cn。通信地址: 四川省成都市成华区建设北路一段 83 号页岩气研究院, 邮政编码: 610056。