

# 井下微地震监测技术在页岩气“井工厂”压裂中的应用

刘旭礼

(中国石油长城钻探工程有限公司四川页岩气项目部, 四川成都 610051)

**摘 要:**通过井下微地震监测可以获得页岩气井压裂过程中水力裂缝的展布方向、波及长度和地层破裂能量,从而指导压裂方案的实时调整,增大压裂改造体积。为此,威 202 井区 5 个平台进行页岩气“井工厂”压裂施工时,应用井下微地震监测技术进行了裂缝监测。在介绍井下微地震监测技术基本测量原理的基础上,以威 202 井区 A 平台 6 口井的应用为例,详细介绍了该技术在有效识别地层中潜在天然裂缝、监测暂堵转向体积压裂效果、指导射孔参数优化等方面的机理与效果。研究表明,应用井下微地震监测技术可以增大页岩气储层改造体积,提高储层均匀改造程度,这对于页岩气的经济有效开发具有重要作用。

**关键词:**页岩气;水平井;井工厂;压裂;微地震;裂缝监测;威远区块

**中图分类号:**P631.4<sup>+</sup>14 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2016)04-0102-06

## The Application of Downhole Microseismic Monitoring Technology in Shale Gas “Well Factory” Hydraulic Fracturing

LIU Xuli

(Sichuan Shale Gas Project Department, CNPC Great Wall Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan, 610051, China)

**Abstract:** Downhole microseismic monitoring technology can help determine the hydraulic fracture propagation direction, length and formation crack energy during shale gas well hydraulic fracturing, and thus can guide the adjustment of real-time fracturing operations and increase the fracturing volume. Therefore, downhole microseismic monitoring technology has been applied to the hydraulic fracturing operation in shale gas “well factory” on five pads of Block Wei 202 to detect fractures. The basic measurement principle of downhole microseismic monitoring technology was applied to the six wells on the platform A of Block Wei 202. The results function as a useful case study and an example, and both the mechanism and effect of the technology are evaluated in detail. The technique proved effective in identifying potential natural fractures in the formation, monitoring the effect of temporary plugging and diverting volume fracturing, and guiding perforation parameter optimization. Studies and applications showed that the downhole microseismic monitoring technology could increase the shale gas reservoir reconstruction volume, and even out the reservoir reconstruction degree, thus playing an important role in cost-effective development of shale gas.

**Key words:** shale gas; horizontal well; well factory; fracturing; microseismic; fracture monitoring; Weiyuan Block

20 世纪 90 年代,微地震技术被应用到石油工业中,主要用于油藏驱动监测和储层压裂监测<sup>[1-4]</sup>。21 世纪以来,微地震监测技术开始广泛应用于页岩油气开发中<sup>[5-9]</sup>。页岩油气资源开发时多采用水平井及大型压裂技术,压裂效果的好坏直接影响到最

收稿日期:2015-05-25;改回日期:2016-06-15。

作者简介:刘旭礼(1963—),男,辽宁阜新,1994年毕业于大庆石油学院钻井工程专业,2009年获电子科技大学软件工程专业硕士学位,高级工程师,主要从事钻完井工程、压裂及采油技术方面的研究和管理工作。E-mail:liuxuli2005@126.com。

终的开发效果。因此,对页岩油气水平井的压裂效果进行监测和评价,可为下一步水平井压裂方案的制定和压裂参数的优化设计提供依据。井下微地震监测技术作为监测压裂效果的有效手段之一,可以实时监测裂缝的展布方向、波及长度和地层破裂能量,并且可以通过分析压裂参数与微地震监测参数对人工裂缝延伸方向和长度进行追踪定位,客观评价压裂效果,有助于井网优化、“井工厂”布局、井眼轨道设计、压裂方案设计和调整,从而提高储层压裂改造效果,实现页岩油气资源的经济高效开发<sup>[10]</sup>。因此,在威 202 井区 5 个平台“井工厂”压裂过程中,利用井下微地震监测技术对压裂效果进行了监测,并根据监测结果对后续压裂方案进行了优化和调整,从而提高了页岩气井压裂改造效果。

## 1 井下微地震监测技术

微地震监测技术通过采集压裂引发的微地震信号形成图像,显示压裂裂缝的延伸方向、高度、长度和对称性等,有助于帮助油气藏开发人员监测压裂施工效果,优化压裂设计及开发方案。目前,微地震监测技术主要包括地面微地震监测技术和井下微地震监测技术<sup>[6,11-12]</sup>。与干扰因素更多的地面微地震监测技术相比,威远地区和焦石坝南区 3 000.00 m 以深的页岩气储层压裂时,井下微地震监测技术获取的数据信噪比更高,信号的准确性和可靠性更强,应用也更广泛<sup>[12-13]</sup>。

### 1.1 基本原理

水力压裂时,当井筒压力迅速升高并超过岩石强度时,岩石发生破裂或剪切滑动形成裂缝。裂缝延伸扩展时,产生一系列向四周传播的微震波<sup>[14]</sup>。微震波可以用精密的 Maxiwave 井下三分量检波器在井周围接收到,根据各微震波的到达时差,结合地层模型和声波模型,形成一系列方程组,求解这一系列方程组,通过数据处理分析得到有关震源的信息就可确定震源位置,进而确定出裂缝的方位、长度、高度及地应力方向等参数。

### 1.2 “井工厂”压裂的监测方法

“井工厂”压裂中的微地震事件是页岩气储层因水力压裂而引发的,由于其激发能量弱,通过地层传播后,地表检波器接收到的微地震波场能量

已经很弱,导致微地震监测记录数据的信噪比低。利用单个三分量检波器接收微地震波的方法通常称为矢量端图技术,检波器和微震震源间的位置关系可以通过直达纵波/横波初至的微小运动来确定。检波器到震源的距离可以通过直达纵波和横波初至的时间差以及这 2 种波的速度来确定。利用多个位置的检波器接收到的信号和有关勘查区域的微地震波的波速,就可以根据矢量端图法准确确定震源位置。

在对井下微地震信息进行处理之前,需要对微地震事件进行分析,通过微地震事件识别和筛选有效信号,在建立地质模型和速度模型的基础上进行空间定位,最终获得裂缝解释成果<sup>[6,15]</sup>。

#### 1.2.1 背景噪音分析

在对页岩气井压裂进行实时监测以前,需要监测该井的背景噪音,并对背景噪音信号进行分析,得出合理的滤波方案,提高信噪比。地震检波器非常灵敏,地面噪音有可能沿着井内液体传播到井下,对地层破裂信号造成干扰。为降低地面噪音的干扰,需将井内液面降至 300.00 m 以深。在开始实时监测时,往往还需对获得的早期信号、微地震信号和背景噪音进行对比,以获得微地震信号和背景噪音之间的差别,帮助修正滤波参数。

#### 1.2.2 破裂事件的监测

在压裂监测初期,要不断查看微地震信号的波形特征,分析微地震信号,筛选模块,修改压制噪音模块参数,使筛选出的模块既能基本满足实时监测到压裂破裂事件的要求,又不丢失能量较低的压裂破裂事件。

检查压裂初期获得的较清晰微地震事件的定位结果,微地震事件一般应位于压裂段射孔位置附近,必要时需检测每个事件纵波和横波初至时间的自动拾取结果的合理性,如果自动拾取结果不合理,需要调整纵波和横波初至自动拾取的参数,降低自动拾取时的误差<sup>[14,16]</sup>,对自动拾取结果进行必要的修正,确保定位结果满足要求。

## 2 现场应用

威远构造位于川中隆起区的川西南低陡褶皱带<sup>[12]</sup>,储层埋深 2 700.00~3 200.00 m。井下微地震监测技术在威 202 井区 A、B、C 等 5 个平台页岩

气水平井“井工厂”压裂中进行了应用。其中,威202井区A平台共有6口井,是威远地区第一个实现“井工厂”压裂的井组,上下半支各3口井,分两轮进行压裂,利用相对应的邻井进行井下微地震监测。第一轮压裂监测采用12级Maxiwave三分量检波器接收微地震波,级间电缆长10.00m,检波器位于202H2-2井的2670.00~2780.00m井段,与目的层的垂向距离约为250.00m(见图1)。第二轮压裂监测采用12级Maxiwave三分量检波器接收微地震波,级间电缆长20.00m,检波器位于202H2-6井的2650.00~2870.00m井段,与目的层的垂向距离约为69.00m(见图2)。

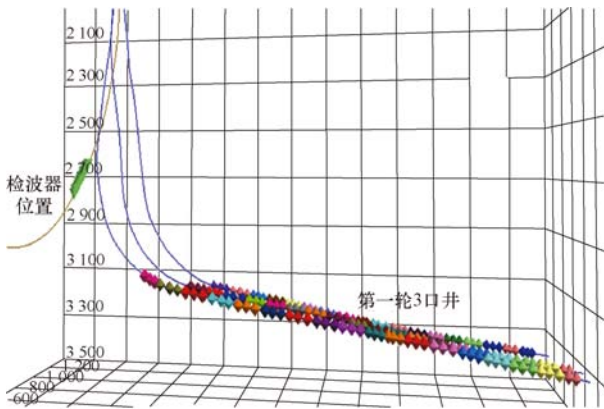


图1 威202井区A平台第一轮压裂监测位置示意

Fig.1 The monitoring location at first round of hydraulic fracturing on platform A of Block Wei202

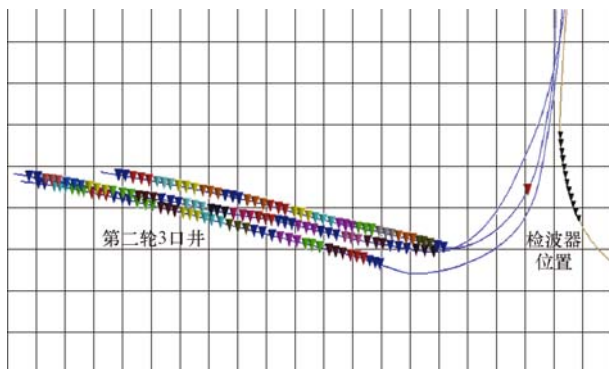


图2 威202井区A平台第二轮压裂监测位置示意

Fig.2 The monitoring location at second round of hydraulic fracturing on platform A of Block Wei202

2.1 潜在天然裂缝的监测

威202井区龙马溪组页岩气储层微断层及天然裂缝较为发育,压裂过程中水力裂缝的延伸容易受到天然裂缝诱导作用的影响,造成储层改造

程度不够,影响压裂效果<sup>[12,14,16-17]</sup>。因此,在预测天然裂缝的基础上,利用井下微地震监测技术,在压裂过程中实时观测和分析天然裂缝对压裂效果的影响。微地震监测过程中,根据微地震事件点的能量强弱、密度大小、事件点出现时机以及响应时间等参数,结合压裂参数和地震曲率属性预测裂缝情况,可以较为准确地识别压裂过程中遇到的天然裂缝或断层。

202H2-6井压裂过程中有明显的天然裂缝或断层显示,距离断层越近停泵压力越低,且压裂过程中有压力突降的现象。从微地震事件点可以看出,在井筒下方有大量的微地震事件发生,压裂时采取了降排量、大段塞加砂、高黏胶液处理等技术措施,取得了一定的效果,但对于规模相对较大的天然裂缝应以沟通为主,实现储层均匀改造的难度相对较大。

压裂过程中遇到天然裂缝,会使液体效率大大降低,容易出现加砂困难或发生砂堵事故,合理的液体组合和支撑剂配比是应对天然裂缝对压裂施工不利影响的重要技术措施。通过蚂蚁体追踪预测天然裂缝,结合地震资料相似性的变化和曲率变化,预测潜在天然裂缝或破碎带,再与压裂过程中发生的微地震事件相结合(见图3),就可以在压裂过程中指导液体黏度、支撑剂用量、砂比或砂浓度、段塞液量等参数的优化和调整<sup>[18-19]</sup>。

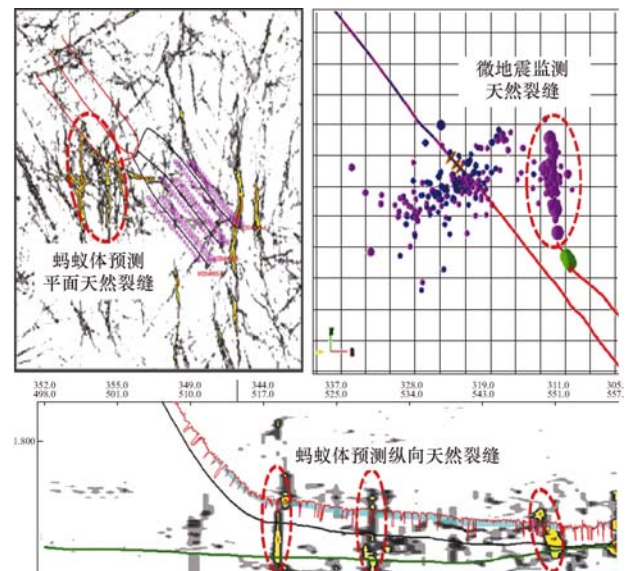


图3 威202井区A平台蚂蚁体裂缝预测和微地震裂缝监测的压裂综合评估处理技术

Fig.3 The comprehensive evaluation and treatment technology for the microcrack prediction and microseismic fracture monitoring at platform A of Block Wei202



## 2.2 暂堵转向体积压裂效果的监测

暂堵转向体积压裂技术是指在合适的时机,通过添加可溶性的、对储层损害极低的裂缝暂堵剂,控制压裂裂缝的延伸,实现储层均匀改造。

威 202 井区 B 平台 1 井第 17 压裂井段水力裂

缝主要在井筒西侧延伸(见图 4,蓝色为暂堵前微地震事件点,紫色为暂堵转向后微地震事件点),在合适的时机加入了一定量的 100/120 目和 60/80 目可溶性裂缝暂堵剂(见图 5)。微地震监测解释结果显示,暂堵转向作用明显,降低了天然裂缝的诱导作用,实现了储层的均匀改造。

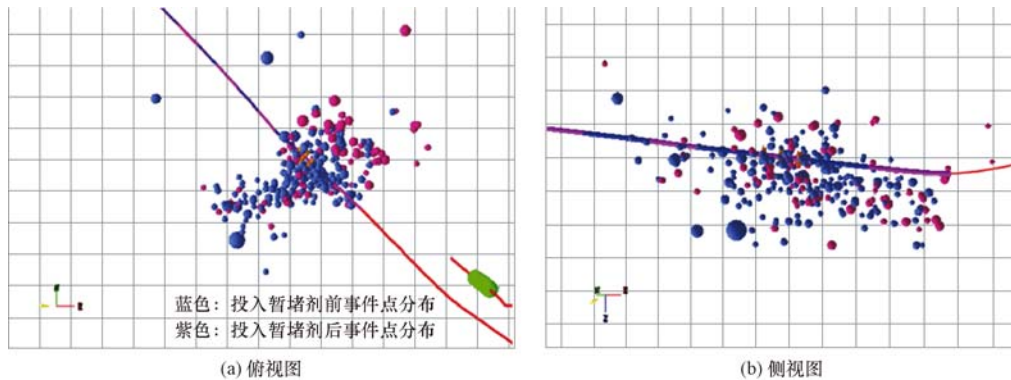


图 4 威 202 井区 B 平台 1 井第 17 段微地震监测解释结果

Fig. 4 The interpretation results for microseismic monitoring at stage 17 of Well 1 in platform B of Block Wei 202

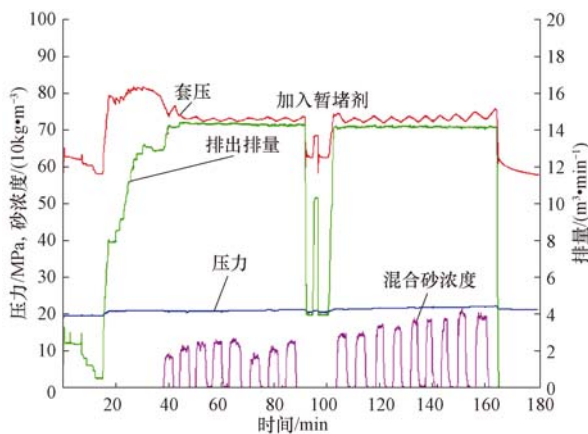


图 5 威 202 井区 B 平台 1 井第 17 段压裂施工曲线

Fig. 5 The fracturing curve at stage 17 of Well 1 in platform B of Block Wei 202

## 2.3 射孔参数的优化

射孔位置的选择对于页岩气水平井压裂效果的影响非常大。威 202 井区某水平井龙马溪组页岩压裂时井下微地震监测事件的统计结果表明,高伽马和高脆性指数地层微地震事件的密度较大,说明脆性相对好的地层可压性更高,岩石更容易发生剪切破坏,更有利于形成复杂网络裂缝。

射孔簇数和孔数的选择决定了相同排量下的储层压裂改造强度,簇数和孔数越少,单孔流速越大,缝内净压力和液体携砂效率越高,对于缝长和缝高的扩

展越有利。威 202 井区 C 平台 6 井第 13 段射孔 3 簇,孔密 16 孔/m,射 48 孔,微地震监测水力裂缝缝高 60 m;第 14 段射孔 2 簇,孔密 16 孔/m,射 32 孔,微地震监测水力裂缝缝高 85 m。由此可知,减少射孔簇数和孔数在一定程度上有利于提高压裂裂缝高度。

## 2.4 现场应用效果

受地层平面和纵向非均质性的影响,威 202 井区 A 平台 5 井 1—5 压裂井段压裂后水力裂缝扩展不均。通过分析其井下微地震监测资料,在后续井段压裂时采取了优化射孔参数、调整压裂液和支撑剂组合、应用暂堵转向技术等技术措施,监测结果显示,微地震事件点增多,储层获得较理想的压裂缝网,微地震监测参数见表 1。由表 1 可以看出:1—5 压裂井段的東西两翼裂缝长度差最大达到 338.00 m,而 10—18 压裂井段的東西两翼裂缝长度差最大 105.00 m;在加砂量相当的情况下,压裂液用量由 1 800~2 200 m³ 下降为 1 700~1 900 m³。由此可知,该井后续压裂井段采取的技术措施具有很好的针对性,基本实现了储层的均匀改造。

威 202 井区 A 平台 6 口井均获得较好的压裂效果,其中 4 井和 5 井采用  $\phi 9.0$  mm 油嘴进行放喷返排测试,最高井口压力分别为 36.74 和 43.96 MPa,最高日产气量  $31.87 \times 10^4$  和  $20.83 \times 10^4$  m³,刷新了威远地区页岩气井产气量最高纪录,取得了较好的开发效果。

表 1 威 202 井区 A 平台 5 井微地震监测裂缝参数

Table 1 The microseismic monitoring fracture parameters of well 5 in platform A of Block Wei 202

压裂井段	压裂液用量/m <sup>3</sup>	砂量/m <sup>3</sup>	裂缝长度/m		改造宽度/m	裂缝高度/m	裂缝走向/(°)	微地震事件数量
			东翼	西翼				
1	1 890.01	50.80	142	158	130	56	90	73
2	2 190.05	80.64	419	81	90	40	90	45
3	2 004.96	73.64	94	196	130	30	90	18
4	2 261.37	71.92	62	108	90	23	90	9
5	2 104.49	80.28	62	78	42	28	104	8
6	1 871.84	79.09	182	118	98	29	79	20
7	1 724.37	70.78	123	95	64	26	82	18
8	1 803.90	84.31	96	98	68	20	103	27
9	1 857.13	80.55	97	110	57	23	99	22
10	1 907.65	80.61	146	136	79	30	91	39
11	1 836.15	75.36	149	186	100	41	79	45
12	1 851.77	60.31	52	208	65	36	88	29
13	1 737.79	61.34	101	193	76	42	99	65
14	1 942.49	80.83	244	180	186	51	88	114
15	1 740.22	76.80	251	274	263	62	82	156
16	1 905.41	63.25	259	210	118	48	97	111
17	1 879.46	52.19	158	246	150	55	90	232
18	1 800.00	47.79	158	133	84	31	83	63

### 3 结论与建议

1) 利用井下微地震监测技术可以获得裂缝的长度、方向、产状等参数,能够为压裂施工参数的实时调整提供依据。

2) 根据微地震监测资料的解释结果,优化射孔参数、实时调整压裂液和支撑剂组合、应用暂堵转向技术,可以提高页岩气水平井的压裂效果。

3) 页岩气储层在平面和纵向上具有较强的非均质性,建议进一步提高天然裂缝预测的精准度,并根据微地震监测结果采取有针对性的技术措施,以提高页岩气水平井的压裂效果。

#### 参 考 文 献

#### References

[1] 陈凤,罗美娥,张维平,等. 大庆外围油田地应力特征及人工裂缝形态分析[J]. 断块油气田,2006,13(3):13-15.  
CHEN Feng, LUO Meie, ZHANG Weiping, et al. Terrestrial stress characteristics and artificial fracture pattern analysis of Daqing Periphery Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2006,13(3):13-15.

[2] 白晓虎,齐银,陆红军,等. 鄂尔多斯盆地致密油水平井体积压裂优化设计[J]. 石油钻采工艺,2015,37(4):83-86.  
BAI Xiaohu, QI Yin, LU Hongjun, et al. Optimization design for volume fracturing of horizontal wells in tight oil reservoir of Ordos Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(4):83-86.

[3] 彭娇,周德胜,张博. 鄂尔多斯盆地致密油层混合压裂簇间干扰研究[J]. 石油钻采工艺,2015,37(5):78-81.  
PENG Jiao, ZHOU Desheng, ZHANG Bo. Inter-cluster interference in hybrid fracturing of tight oil reservoirs in Ordos Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015,37(4):78-81.

[4] 毕曼,杨映洲,马占国,等. 混合压裂在苏里格致密气藏水平井的应用[J]. 断块油气田,2014,21(5):644-647,659.  
BI Man, YANG Yingzhou, MA Zhanguo, et al. Application of hybrid fracturing in horizontal well of tight gas reservoir in Sulige Gas Field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(5): 644-647, 659.

[5] 李红梅. 微地震监测技术在非常规油气藏压裂效果综合评估中的应用[J]. 油气地质与采收率,2015,22(3):129-134.  
LI Hongmei. Application of micro-seismic monitoring technology to unconventional hydrocarbon reservoir fracturing evaluation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22 (3):129-134.

[6] 梁兵,朱广生. 油气田勘探开发中的微震监测方法[M]. 北京:

- 石油工业出版社, 2005: 15-28.
- LIANG Bing, ZHU Guangsheng. Microseismic monitoring methods of oil and gas field exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 15-28.
- [7] 段银鹿, 李倩, 姚韦萍. 水力压裂微地震裂缝监测技术及其在应用[J]. 断块油气田, 2013, 20(5): 644-648.
- DUAN Yinlu, LI Qian, YAO Weiping. Microseismic fracture monitoring technology of hydraulic fracturing and its application[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(5): 644-648.
- [8] 周健, 张保平, 李克智, 等. 基于地面测斜仪的“井工厂”压裂裂缝监测技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 71-75.
- ZHOU Jian, ZHANG Baoping, LI Kezhi, et al. Fracture monitoring technology based on surface tiltmeter in “well factory” fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 71-75.
- [9] 郭廷亮, 王海东, 黄明林, 等. 超深井微地震监测用声源发生装置的研制[J]. 石油机械, 2015, 43(5): 101-103, 110.
- GUO Tingliang, WANG Haidong, HUANG Minglin, et al. Development of acoustic source generating device for micro-seismic monitoring of super-deep wells[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(5): 101-103, 110.
- [10] 李雪, 赵志红, 荣军委. 水力压裂裂缝微地震监测测试技术与应用[J]. 油气井测试, 2012, 21(3): 43-45.
- LI Xue, ZHAO Zhihong, RONG Junwei. Microseismic monitoring technology of hydraulic fracture and its application[J]. Well Testing, 2012, 21(3): 43-45.
- [11] MAXWELL S C, URBANCIC T I, STEINSBERGER N, et al. Microseismic imaging of hydraulic fracture complexity in the Barnett shale[R]. SPE 77440, 2002.
- [12] MOHAMMAD N A, MISKIMINS J L. A comparison of hydraulic fracture modeling with downhole and surface microseismic data in a stacked fluvial pay system[R]. SPE 134490, 2010.
- [13] NEUHAUS C W, MISKIMINS J L. Analysis of surface and downhole microseismic monitoring coupled with hydraulic fracture modeling in the Woodford Shale[R]. SPE 154804, 2012.
- [14] 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.
- [15] 张山, 刘清林, 赵群, 等. 微地震监测技术在油田开发中的应用[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 226-231.
- ZHANG Shan, LIU Qinglin, ZHAO Qun, et al. Application of microseismic monitoring technology in development of oil field [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(2): 226-231.
- [16] YANG Ruizhao, ZHAO Zhengguang, PENG Weijun, et al. Integrated application of 3D seismic and microseismic data in the development of tight gas reservoirs[J]. Applied Geophysics, 2013, 10(2): 157-169.
- [17] 赵常青, 谭宾, 曾凡坤, 等. 长宁-威远页岩气示范区水平井固井技术[J]. 断块油气田, 2014, 21(2): 256-258.
- ZHAO Changqing, TAN Bin, ZENG Fankun, et al. Cementing technology of horizontal well in Changning-Weiyuan shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(2): 256-258.
- [18] 吴有亮. 复杂构造地区三维微地震监测技术研究及其在工程中的应用[D]. 成都: 成都理工大学地球物理学院, 2007.
- WU Youliang. 3D micro-seismic monitoring technology research in complicated structure area and its application in engineering[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, College of Geophysics, 2007.
- [19] 邱健, 段树法. 微地震监测技术在阳 201-H2 井压裂中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(4): 49-53.
- QIU Jian, DUAN Shufa. Application of microseismic monitoring technology to Yang 201-H2 Well fracturing[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2013, 36(4): 49-53.

[编辑 刘文臣]

## 适用于封堵丝扣泄漏的压差激活密封剂

在油气井生产过程中, 油气中含有的砂、水、盐、酸、碱以及表面活性剂等会对油管、套管、安全阀、海底控制系统造成冲蚀及腐蚀, 使其损坏, 传统的维修方式不但维修时间长、费用高, 而且对生产影响较大。为此, W&T Offshore 公司根据人体创伤流血自身修复的原理, 研发了一种压差激活密封剂。该密封剂像人体血液一样, 只在创伤处凝固, 即只在存在压差的泄漏点凝固, 而在其他条件下保持正常的流动状态。当密封剂流到泄漏点时, 压差引发聚合反应形成一种具有柔韧性的固体, 封固泄漏点。因此, 密封剂只有在油管及井下工具有泄漏的地方发生聚合反应形成密封, 而多余的密封剂不发生反应, 仍为液态, 不会阻塞液压系统、管线及液体输送系统, 也不会与电子元件及金属发生化学反应。

现场试验证明, 压差激活密封剂封堵泄漏点的成功率超过 84%。压差激活密封剂的成功应用, 降低了油气井长期保持密封完整性的成本, 使泄漏可以迅速有效地得到控制, 是解决油井、气井丝扣泄漏的有效方法。

[供稿 曾敏]