

四川长宁页岩气水平井压裂套管变形实例分析*

陈朝伟¹, 宋毅², 青春³, 杨扬⁴, 项德贵¹

(1. 中国石油集团工程研究院有限公司, 北京 102206; 2. 中国石油股份有限公司西南油气田分公司页岩气研究院, 成都 610051; 3. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司通信与信息技术中心, 成都 610051; 4. 四川长宁天然气开发有限责任公司, 成都 610051)

摘要: 选择一口典型井作套管变形实例分析。套管变形是在压裂期间发生的, 压裂是套管变形的工程原因。套管变形位置接近小断层, 邻井套管变形具有剪切特征, 表明套管变形是由小断层滑动引起的。利用微地震监测数据和蚂蚁体追踪数据, 识别小断层的倾角和倾向, 根据地应力和施工压力数据分析该断层的力学活动性, 结果表明应力状态满足滑动条件。分析该井固井质量数据、压裂施工曲线和微地震数据的特征, 由于固井质量差, 压裂时压裂液可能会突破套管和地层之间的间隙, 侵入断层, 最终激活断层。因此, 为了避免套管变形, 建议提高固井质量和避开小断层。

关键词: 页岩气; 长宁-威远; 套管变形; 断层滑动; 微地震; 井壁通道

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)01-0513-12

A Case Study on Casing Deformation of Horizontal Well during Hydraulic Fracturing in Sichuan Changning

Chen Zhaowei¹, Song Yi², Qing Chun³, Yang Yang⁴, Xiang Degui¹

(1. CNPC Engineering Technology R&D Co., Ltd., Beijing 102206, P.R. China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company Shale Gas Research Institute, Chengdu 610051, P.R. China; 3. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company Communication and Information Technology Center, Chengdu 610051, P.R. China; 4. Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd., Chengdu 610051, P.R. China)

Abstract: This paper selected a typical well as an example of casing deformation for analysis. Casing deformation occurs during fracturing, and fracturing is the engineering cause of casing deformation. The casing deformation position is close to the small fault, and the adjacent well casing deformation has shear characteristics, which indicates that the casing deformation is caused by small fault sliding. Using Microseismic monitoring data and ant body tracking data, the dip angle and inclination of small faults were identified, and the mechanical activity of the fault was analyzed based on the ground stress and construction pressure data. The results showed that the stress state satisfies the sliding conditions. The characteristics of well cementing quality data, fracturing construction curves and microseismic data were analyzed. Due to poor cementing quality, fracturing fluid may break through the gap between the casing and the formation, intrude into the fault, and finally activate the fault. Therefore, in order to avoid casing deformation, it is recommended to increase cementing quality and avoid small faults.

Keywords: shale gas; Changning-Weiyuan; casing deformation; fault slip; microseismic; wellbore channel

* 收稿日期: 2018-07-31(修改稿)

作者简介: 陈朝伟(1979-), 男, 辽宁葫芦岛人, 博士, 高级工程师, 主要从事储层地质力学研究。

E-mail: chenzwdri@cnpc.com.cn

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05022001, 2016ZX05020002); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2016E-0612)

0 引言

从2009年开始,中国石油在长宁、威远和昭通3个页岩气示范区建产。截至2016年3月,长宁-威远区块共压裂101口井(其中水平井90口),32口井压裂期间套管发生变形(其中水平井30口),套管变形点达47个,总设计段数1666段,压裂段数1505段,放弃110段,导致桥塞无法坐封到位,压裂段数减少,单井产量降低,加上井筒完整性差,井生命周期降低,从而影响页岩气开发整体经济效益。套管变形成为制约长宁-威远页岩气高效开发的关键问题。

许多学者开展了页岩气水平井套管变形问题的研究。中国石油大学廖华林等^[1]针对套管几何参数、力学性能和外载存在随机性的特点,对传统套管安全系数设计与评价方法不足之处进行了分析,根据结构可靠性理论,建立了套管抗外挤强度和抗内压强度的失效风险评价方法。沈新普等^[2]针对西南地区页岩气藏套管失效问题进行了数值模拟研究,全面分析了影响套管完整性的诸多因素,包括地层初始裂纹的分布情况、套管固井质量、地层力学特性参数以及套管几何参数等,认为影响页岩气藏套管完整性的主要影响因素为地层初始裂纹的分布情况以及地层力学参数特性。于浩等^[3-4]针对地应力场重新分布、岩石力学性能降低以及固井质量的好坏进行了数值模拟研究,认为地应力场的重分布以及岩石力学性能下降是导致套管失效的主要因素,固井质量的好坏对套管失效的影响较小。王永亮等^[5]对页岩气分段水力压裂开采过程中的套管损坏问题进行有限元分析,应用页岩储层受热膨胀比拟水力压裂导致岩体膨胀的物理过程,建立模型并采用ABAQUS进行求解。数值结果表明,套管的拐点(竖直井和水平井交点)附近出现比其他处套管更大应力水平,随压裂顺序进行,拐点处应力有不断累积、变大的趋势。蒋可等^[6]统计了某井固井质量和套管变形的相关性,指出固井质量差是该井套管损坏的主要原因,并应用ABAQUS有限元软件,结合现场实际参数建立模型,对水泥环窜槽缺失、套管偏心和井径变化等3种固井质量差的形式进行了数值计算,认识到水泥环缺失和套管偏心会在套管内壁上产生较严重的应力集中。刘奎等^[7-8]建立了非均匀地应力条件下水平井压裂过程中套管-水泥环-围岩系统各接触面的受力表达式,得到了水泥环达到屈服时的

最大套管内压力,讨论了套管及水泥环参数变化对系统受力行为的影响规律,认识到压裂时套管内压高,水泥环比套管更易达到屈服。研究认为,压裂过程的温度应力及由套管内压周期性变化导致的局部载荷是页岩气井套管变形的主要因素。田中兰等^[9]建立了多因素耦合套管应力计算评价模型,研究了温度效应、套管弯曲、轴向压力等多因素耦合对套管损坏的影响机理,初步分析了页岩层滑移机理及与套管剪切变形的关系。戴强^[10]将套损原因初步分为强度削弱和外载荷变化两种类型,前者包括弯曲应力、强度疲劳、套管损伤,后者包括井筒附近地应力变化、纵向上岩层变形差异的剪切作用和水泥环破坏后形成的局部应力集中。练章华等^[11]对包含射孔段套管的压裂改造页岩地层进行了有限元分析,认为在体积压裂的过程中会出现拉应力区和零应力区,这会造成射孔段套管“悬空”并导致套管发生弯曲变形和轴向S形变形。陈朝伟等^[12]在现场资料分析的基础上,提出套管变形是裂缝滑动引起的。以上研究有的针对某一个方面展开了深入分析,有的讨论了多个影响因素,都为现场提供了参考。

本文选择一口典型井宁201-H1井作套管变形分析。首先介绍该井钻井和压裂的基本情况。其次,分析套管变形的发生经过和相关特征,并指出套管变形是由小断层滑动引起的。再次,识别该断层倾角和倾向,进行地质力学活动性分析。最后,结合固井、压裂施工和微地震数据,分析引起断层滑动的可能原因。

1 宁201-H1井基本情况

宁201-H1井是长宁区块第一口页岩气水平井。垂深2500 m,井深3790 m,最大井斜96.28°,井底闭合距1452.19 m,闭合方位7.15°(图1)。水平井段套管外径139.7 mm,壁厚9.17 mm,抗内压强度为96.94 MPa,抗外挤强度为100.2 MPa。

该井采用电缆带分簇射孔工具+桥塞压裂工艺进行多段改造,按照从脚趾到脚跟的顺序压裂(图2)。分12段,段长75~100 m,压裂施工前,使用114 mm通井规通井顺利。

对该井进行了实时微地震监测,监测井为宁201井,检波器级数为8级,检波器间距30 m,底部检波器深度为2305 m,波器定位方式为射孔+爆炸等位,速度模型基于宁201井偶极子声波测井资料建立的。

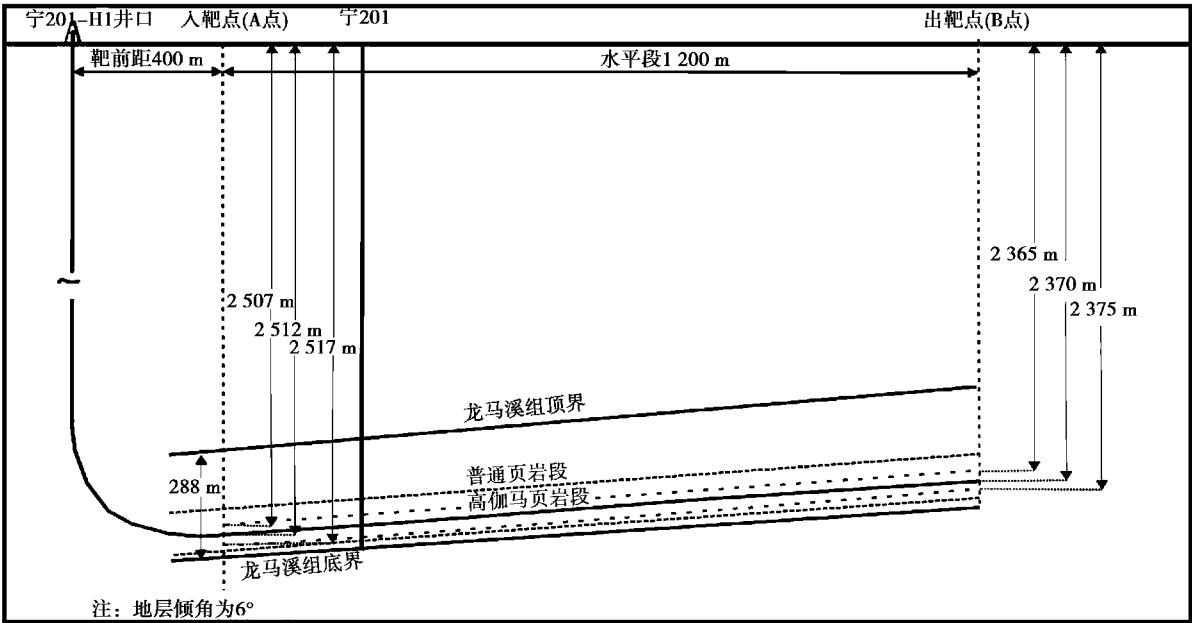


图 1 井身结构和井眼轨迹

Fig. 1 Wellbore configuration and well track

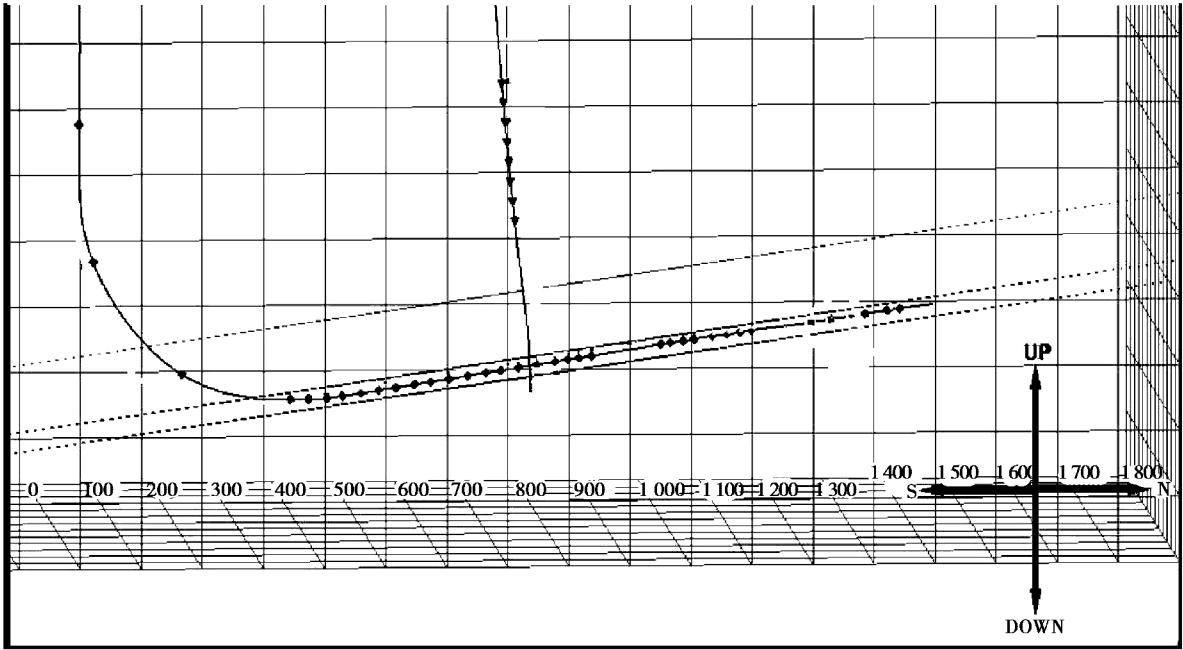


图 2 压裂施工段示意图

Fig. 2 Section schematic of the fracturing operations

2 套管变形特征和原因

2.1 套管变形过程

本井设计 12 压裂段,段长 75~100 m,前 2 段深度范围、射孔和桥塞位置见表 1。在顺利完成第 1 段和第 2 段施工之后,泵送 2#桥塞过程中,在 3 490 m 处遇阻。起出桥塞后,用连续油管带

114.3 mm 平底磨鞋通井,在桥塞遇阻的 3 490 m 处遇卡。起出铣锥后根据划痕可初步判定发生了套管变形(图 3)。在变形处就地坐封桥塞,桥塞位置为 3 491 m。最终,根据现场实际情况,由设计施工 12 段调整到实际施工 10 段,同时调整部分段数的射孔簇数。因此,套管变形是在压裂期间发生的,压裂是套管变形的工程原因。

表 1 宁 201-H1 井设计和实际的压裂段和射孔位置

Table 1 Design and actual fracturing section and perforating position of Ning 201-H1 well

段数	设计			实际		
	设计施工井段/m	射孔井段/m	桥塞位置/m	设计施工井段/m	射孔井段/m	桥塞位置/m
1	3 663~3 750	3 745~3 746	3 671	3 663~3 750	3 742.4~3 743.0	3 671
		3 724~3 725			3 724.0~3 724.7	
		3 677~3 678			3 677.0~3 677.7	
		3 656~3 657			3 656.0~3 656.7	
2	3 583~3 663	3 619~3 620	3 577	3 583~3 663	3 619.0~3 619.7	3 491
		3 586~3 587			3 586.0~3 586.7	



图 3 起出铣锥划痕图

Fig. 3 Milling cone scratches

2.2 套管变形位置

微地震监测数据显示,第 1 级压裂立刻产生了高强度的微地震事件条带,随后的几级压裂阶段,微地震事件均有向此发育带深入的趋势。该裂缝发育带可以被解释为开放式的自然裂缝发育带或小断层^[13]。

根据图 4 中坐标数据分析,套管的变形点发生在小断层附近。微地震是在直井中实施的监测,水平方向的位置可能存在一定的偏差。因此,将套管变形与小断层联系在一起是合理的推断。

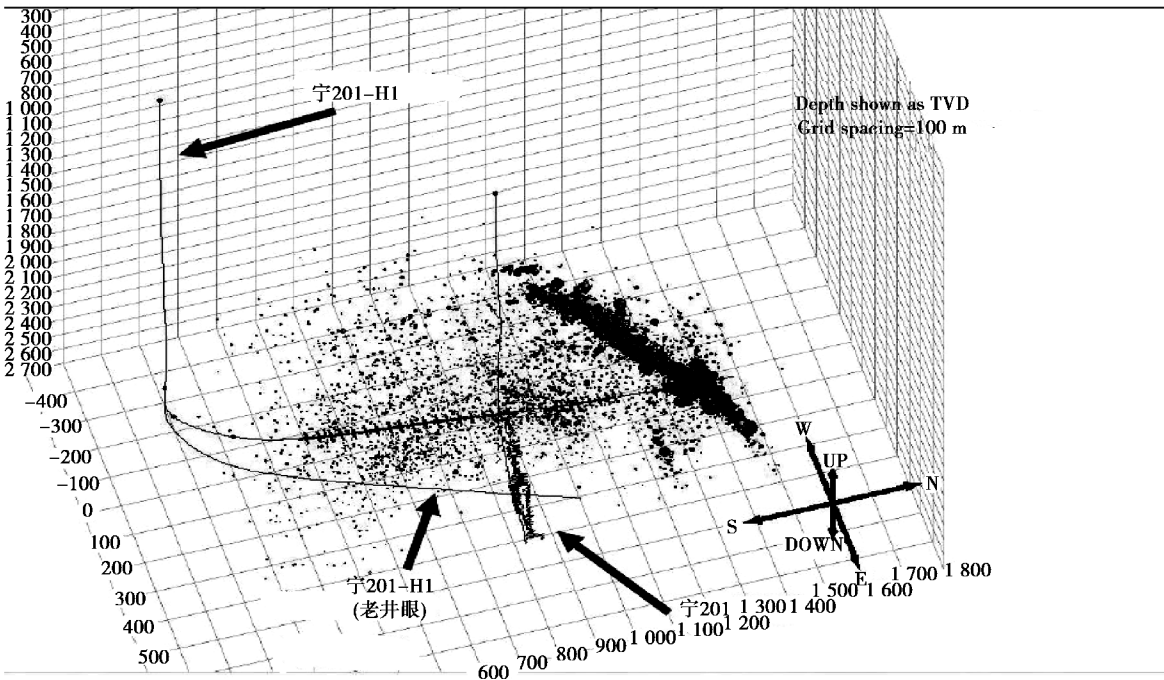


图 4 三维微地震图

Fig. 4 Three-dimensional microseismic schematic

2.3 套管变形形状

对该区块 3 口套管变形井实施了 MIT 24 臂井径测井作业,实测数据如图 5 所示,套管表现

为为凸凹形或 S 形,这表明套管发生了剪切变形。

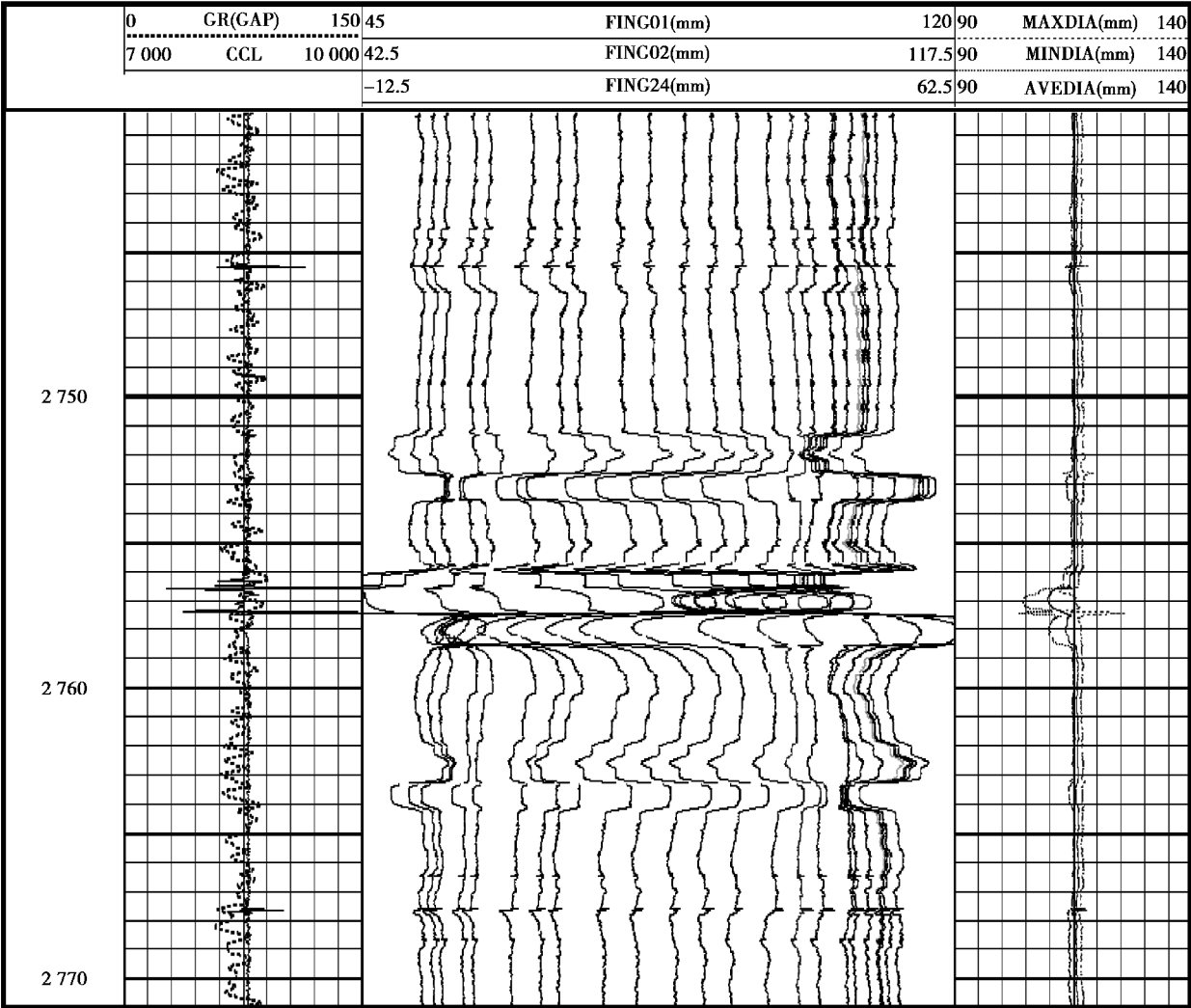


图 5 邻井多臂井径测井图

Fig. 5 Adjacent well multi-arm caliper logging

综合套管变形的位置和形状,认为套管变形是由小断层滑动引起的。

3 断层力学活动性分析

3.1 断层识别

整个压裂作业结束后,微地震监测数据的正视图和侧视图分别如图 6 和图 7 所示。估算小断层的走向为 N57°E,倾角约为 70°,长度约 860 m,高度约 290 m。

用蚂蚁追踪技术^[14]分析宁 201-H1 区块的断层,发现在宁 201-H1 水平井的底部,存在一条走向为 N55°E 断层,这和微地震监测见到的断层基本一致。

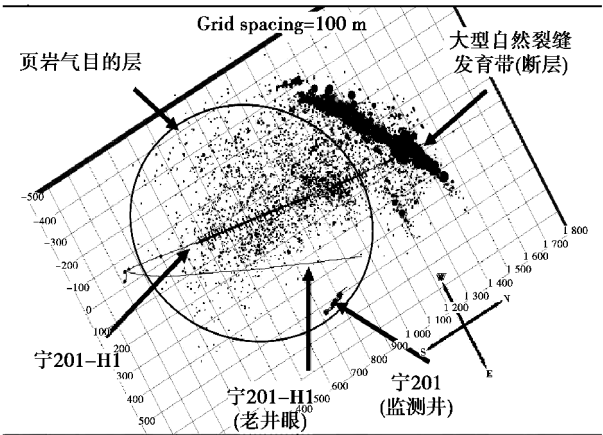


图 6 微地震俯视图

Fig. 6 Top view of microseismic

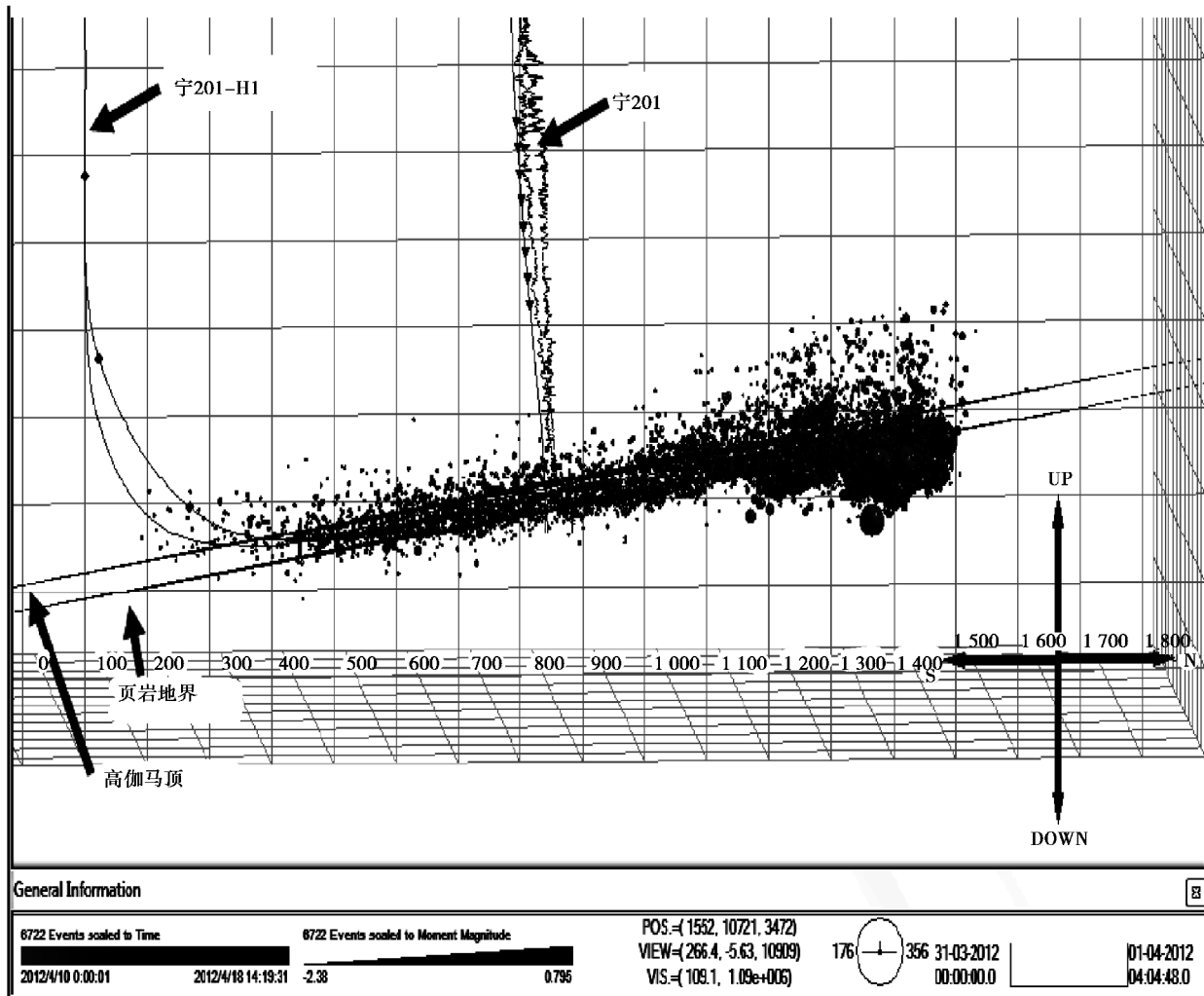


图 7 微地震侧视图

Fig. 7 Side view of microseismic

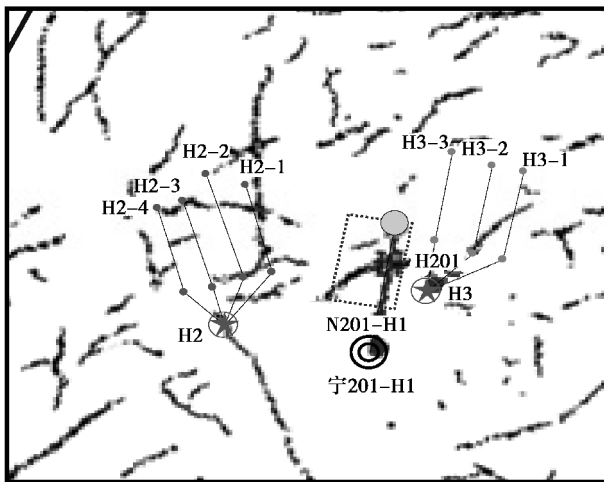


图 8 宁 201-H1 井蚂蚁追踪技术图

Fig. 8 Ant tracking technology schematic of Ning 201-H1 well

3.2 断层滑动力学分析

利用该断层的走向、倾角以及地应力,分析该断层的力学活动性。该井垂直应力当量密度 $S_v = 2.6 \text{ g/cm}^3$, 水平最大地应力当量密度 $S_{h\max} = 3.46 \text{ g/cm}^3$, 水平最小地应力当量密度 $S_{h\min} = 1.9 \text{ g/cm}^3$, 孔隙压力当量密度 $p_p = 1.4 \text{ g/cm}^3$, 水平最大地应力方向为 109°N 。在原地应力和孔隙压力条件下,该断层应力状态如图 9 中的黑点所示,断层处于临界应力状态。因此,仅需要较小的压力扰动就可能被激发。

事实上,在水力压裂过程中,施工压力达到 $64 \sim 65 \text{ MPa}$,井底的孔隙压力达到 2.65 SG ,莫尔圆向左移动,断层超出临界应力状态,具备了发生滑动的力学条件。

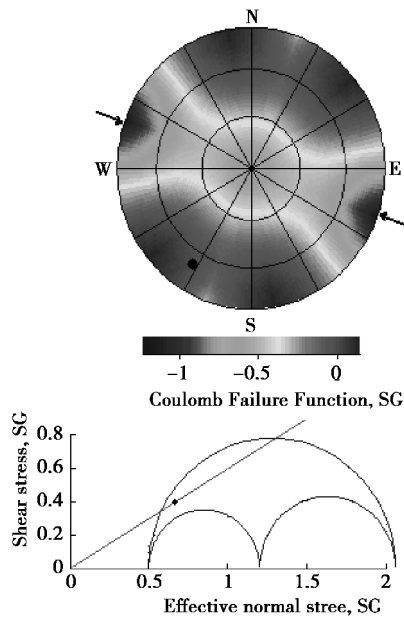


图 9 天然裂缝滑动分析

Fig. 9 Sliding analysis of natural crack

4 断层滑动原因分析

4.1 流体通道分析

触发断层滑动需要增加断层内的孔隙压力,而孔隙压力的增加意味着流体的增多,因此,外来流体是裂缝滑动的必要条件。那么压裂液是通过什么通道进入断层的呢?最常见的通道是水力裂缝,即水力裂缝和断层直接沟通,井壁和层理也可能形成流体的通道^[12]。

该井一共实施了 10 级压裂,对比每一级压裂的微地震监测数据,可以分成 2 类,第 1 类,从第 1 级至第 8 级,不仅在射孔附近监测到微地震信号,而且在断层带监测到了强烈的微地震信号,以第 5 级压裂微地震监测数据为例,如图 10 所示。第 2 类,9~10 级,基本上仅在射孔附近监测到了微地震信号,以第 10 级压裂微地震监测数据为例,如图 11 所示。

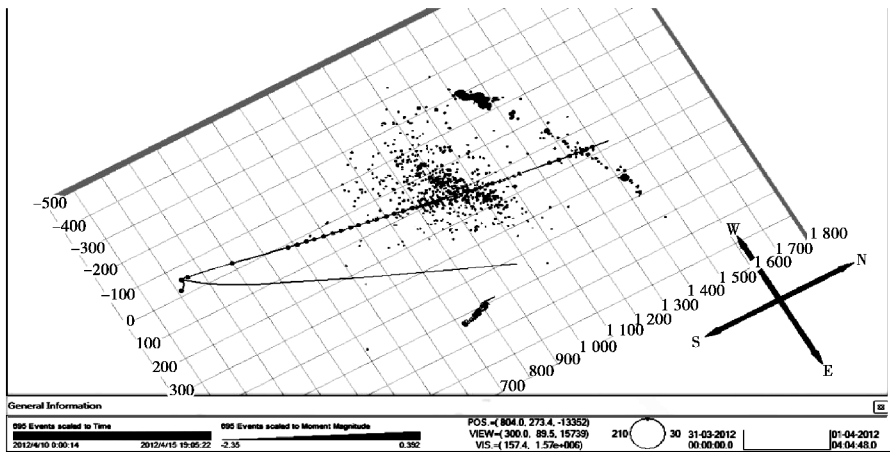


图 10 第 5 级压裂微地震监测图

Fig. 10 Microseismic monitoring of Grade 5 fracturing

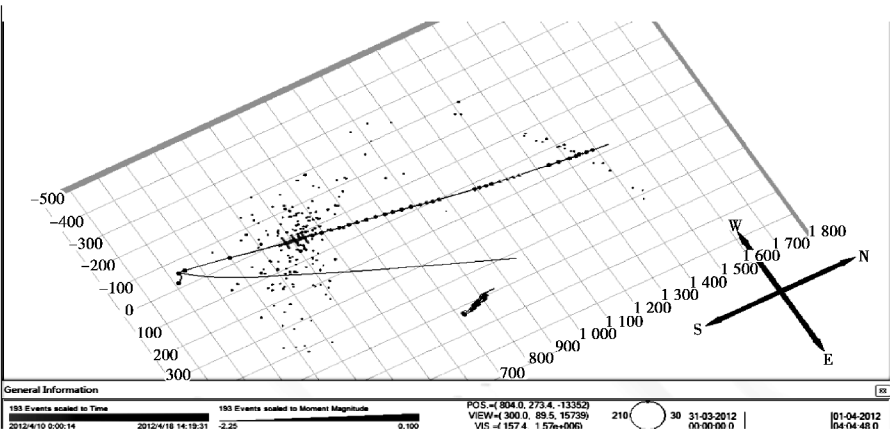


图 11 第 10 级压裂微地震监测图

Fig. 11 Microseismic monitoring of Grade 10 fracturing

在第 5 级压裂,射孔位置距离小断层 500 m 左右,在水力裂缝和小断层微地震信号带之间,没有看到明显的连接,因此,水力裂缝通道和层理通道的可能性并不大。

在第 2 级和第 3 级之间,设计了连续管泵压,只监测到了微弱的微地震信号(图 12),这说明,“余震”的影响是很小的。

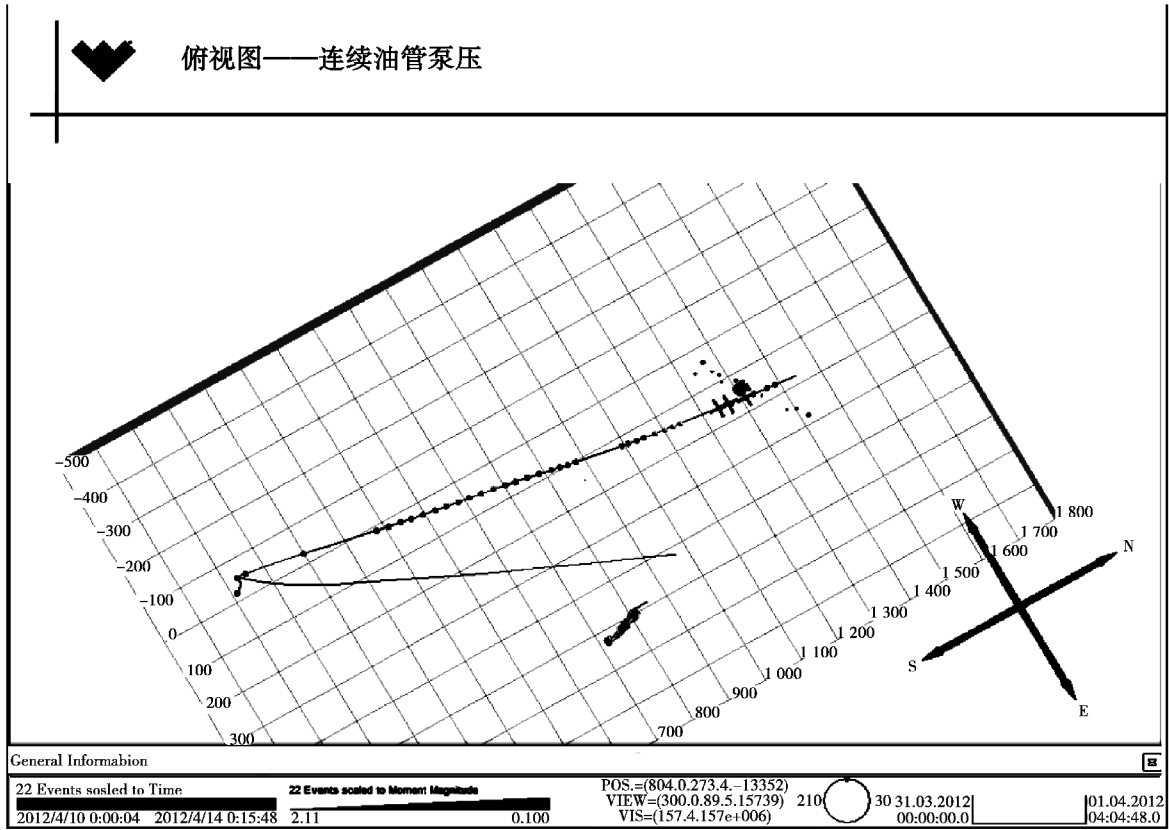


图 12 连续油管泵压微地震监测图

Fig. 12 Microseismic monitoring of continuous coiled tubing pump

那么压裂液是否可能沿着井壁通道进入小断层从而激活断层呢?

出宁 201-H1 井的固井质量较差,水平井段存在大段窜槽现象,水泥环被大量液体充填,因此,井壁有较大的可能为流体提供了通道。

宁 201-H1 井固井质量见表 2。从表中可以看

表 2 固井质量解释结果

Table 2 Interpretation results of cementing quality

深度/m	长度/m	第一界面	窜槽最大宽度/%	备注
1 630~1 645	15	差	10	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
1 645~1 665	20	中等	0	小窜槽,液体充填
1 665~1 686	21	差	20	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
1 686~1 709	23	中等	0	小窜槽,液体充填
1 709~1 833	124	差	50	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
1 833~1 836	3	好	0	零星未胶结液体
1 836~1 839	3	差	30	基本连续大窜槽,液体充填
1 839~1 851	12	中等	0	小窜槽,液体及少量气体充填
1 851~1 857	6	差	25	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
1 857~1 861	4	好	0	零星未胶结液体
1 861~1 888	27	差	40	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填

续表2

深度/m	长度/m	第一界面	窜槽最大宽度/%	备注
1 888~1 898	10	中等	0	小窜槽,液体充填
1 898~2 440	542	差	80	环空基本为液体、气体和少量固体混杂
2 440~2 453	13	中等	0	小窜槽,液体充填
2 453~2 467	14	差	0	基本连续大窜槽,液体充填
2 467~2 474	7	好	0	零星未胶结液体
2 474~2 532	58	差	60	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
2 532~2 550	18	中等	0	小窜槽,液体充填
2 550~2 602	52	差	40	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
2 602~2 604	2	好	0	零星未胶结液体
2 604~2 624	20	差	40	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
2 624~2 627	3	好	0	零星未胶结液体
2 627~2 665	38	差	40	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
2 665~2 667	2	好	0	零星未胶结液体
2 667~2 671	4	差	0	基本连续大窜槽,液体充填
2 671~2 677	6	中等	0	小窜槽,液体充填
2 677~2 690	13	差	45	基本连续大窜槽,液体充填
2 690~2 692	2	好	0	环空基本为固体
2 692~2 726	34	差	50	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
2 726~2 742	16	好	0	零星未胶结液体
2 742~2 750	8	差	0	基本连续大窜槽,液体充填
2 750~2 767	17	好	0	零星未胶结液体
2 767~2 773	6	差	25	基本连续大窜槽,液体充填
2 773~2 791	18	好	0	零星未胶结液体
2 791~2 794	3	差	25	基本连续大窜槽,液体充填
2 794~3 300	506	好	0	零星未胶结液体
3 300~3 306	6	差	15	基本连续大窜槽,液体充填
3 306~3 323	17	好	0	环空基本为固体
3 323~3 326	3	差	0	基本连续大窜槽,液体充填
3 326~3 342	16	好	0	零星未胶结液体
3 342~3 346	4	差	0	基本连续大窜槽,液体充填
3 346~3 539	193	好	0	零星未胶结液体
3 539~3 541	2	中等	0	小窜槽,液体充填
3 541~3 558	17	好	0	零星未胶结液体
3 558~3 564	6	差	20	基本连续大窜槽,液体充填
3 564~3 600	36	好	0	零星未胶结液体
3 600~3 617	17	差	0	基本连续大窜槽,液体充填
3 617~3 623	6	好	0	零星未胶结液体
3 623~3 628	5	差	20	基本连续大窜槽,液体充填
3 628~3 645	17	好	0	零星未胶结液体
3 645~3 650	5	差	0	基本连续大窜槽,液体充填
3 650~3 658	8	好	0	零星未胶结液体
3 658~3 667	9	差	20	基本连续大窜槽,液体充填

续表2

深度/m	长度/m	第一界面	窜槽最大宽度/%	备注
3 667~3 678	11	好	0	零星未胶结液体
3 678~3 685	7	差	0	基本连续大窜槽,液体及少量气体充填
3 685~3 689	4	好	0	零星未胶结液体
3 689~3 695	6	差	15	基本连续大窜槽,液体充填
3 695~3 699	4	好	0	零星未胶结液体
3 699~3 708	9	差	30	基本连续大窜槽,液体充填
3 708~3 715	7	中等	0	小窜槽,液体充填
3 715~3 718	3	好	0	环空基本为固体
3 718~3 722	4	差	35	基本连续大窜槽,液体充填
3 722~3 725	3	好	0	零星未胶结液体

观察压裂施工曲线,可以看到一些特征。和微地震监测数据相对应,也可以将 10 级压裂的压裂施工曲线分成 2 类,第 1 类,从第 1 到第 8 段,加砂压裂施工曲线有一个共性,即泵注压力出现了比较大的波峰,有时伴随着排量降低。仍以第 5 级压裂为例,施工压力排量曲线见图 13 所示,压力波动接近 10 MPa。第 2 类,第 9 和第 10 级压裂,泵注压力呈小波浪形变化,仍以第 10 级压裂为例,如图

14 所示,这种类型的压力波动是由加砂引起的,这是正常的加砂压裂施工曲线。与之相对照,第 5 级施工压力波动远大于正常的压力波动。这是因为,当压裂液沿井壁通道流向小断层时受到阻碍,压力不断升高,造成憋压,当压裂液突破井壁通道后,压力快速下降。因此,从压裂施工曲线图似乎说明井壁通道确实是存在的。

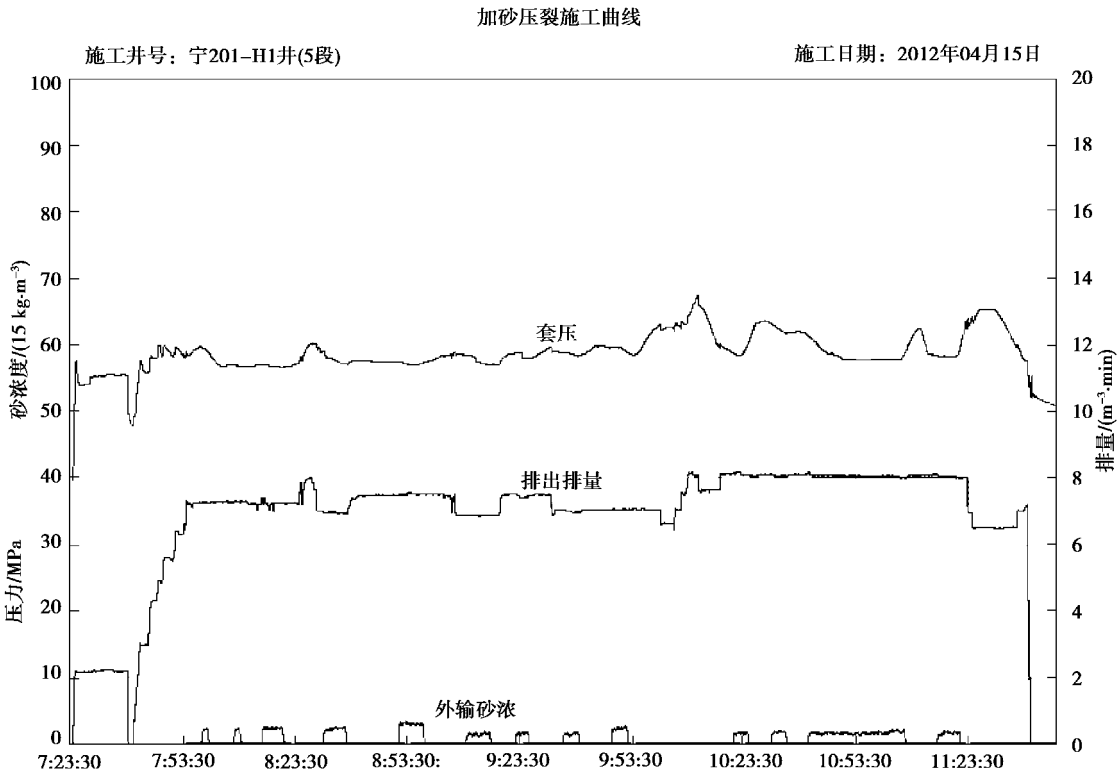


图 13 第 5 段加砂压裂施工曲线
Fig. 13 Sand fracturing construction curves of Section 5

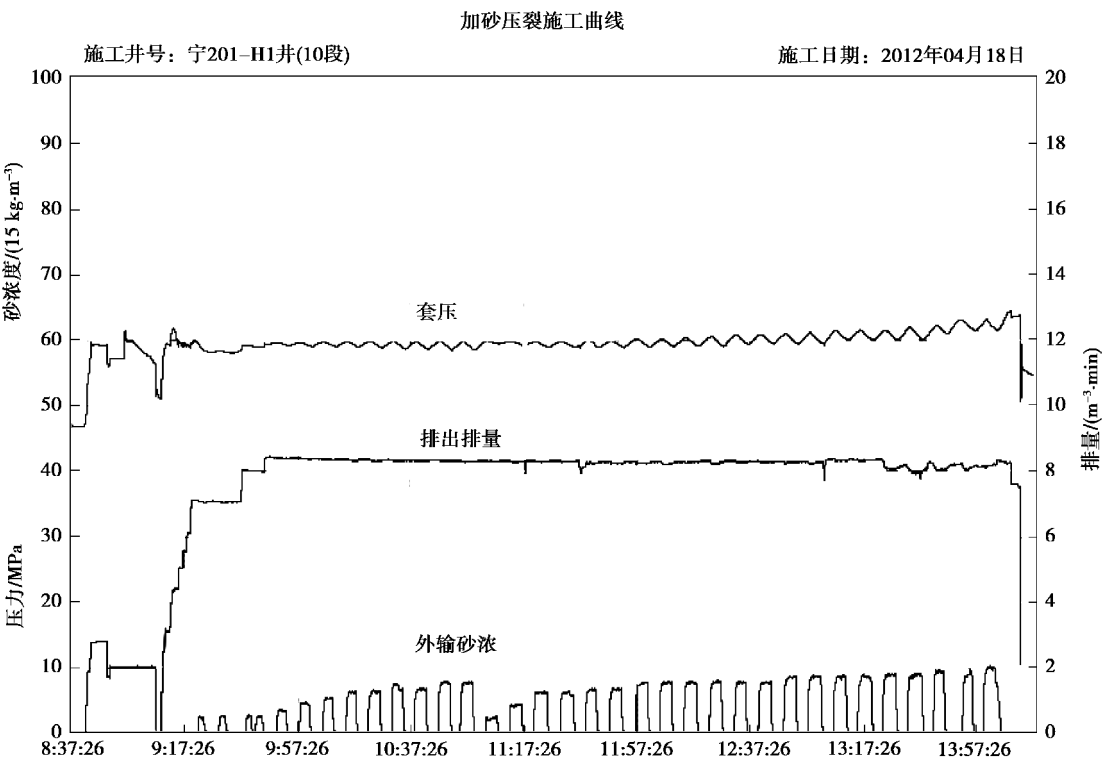


图 14 第 10 段加砂压裂施工曲线

Fig. 14 Sand fracturing construction curves of Section 10

4.2 通道-断层模型

总结前面的认识,可以用通道-断层模型解释断层滑动和套管变形的原因,如图 15 所示,散点表示套管和地层之间水泥环中残存的液体。当进行压裂作业时,压裂液突破了套管和地层之间的间隙,侵入小断层,从而激活了小断层,造成了套管变形。

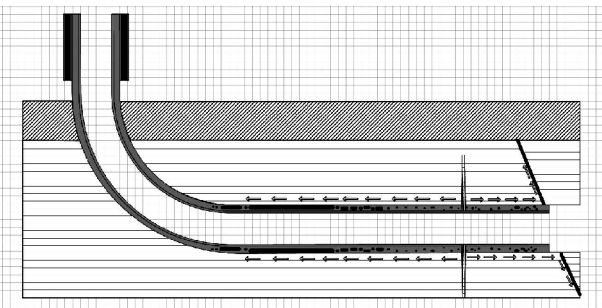


图 15 压裂液沿着井壁通道进入小断层

Fig. 15 Fracturing fluid enters small faults along the wellbore channel

5 结语

结合套管变形的位置和形状特征,套管变形是

由小断层滑动引起的。

断层力学活动性分析表明,断层处于临界应力状态,在较小的压力扰动条件下即可激活断层。

综合分析该井固井质量数据、压裂施工曲线和微地震数据的特征,认为压裂时压裂液可能会突破套管和地层之间的间隙,侵入断层,最终激活断层。

为了防止激活小断层和套管变形,建议:提高固井质量,不给压裂液提供导流通道;钻水平井时尽量避开断层或裂缝发育带。

参考文献 (References)

[1] 廖华林,管志川,闫振来,等. 基于可靠性理论的套管失效风险评价方法[J].石油学报, 2010, 31(1): 161-164, 172. (Liao Hualin, Guan Zhichuan, Yan Zhenlai, et al. Assessment method of casing failure risk based on structure reliability theory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 161-164,172.(in Chinese))

[2] 沈新普. 页岩气储层压裂引起的套管完整性数值评价[A] // 第 21 届全国结构工程学术会议论文集[C].北京:《工程力学》杂志社, 2012: 425-428. (Shen Xinpu. Numerical estimation on casing integrity in

- hydraulic fracturing of shale gas formation [A] // Proceedings of the 21st National Conference on Structural Engineering [C]. Beijing: Journal of Engineering Mechanics, 2012: 425-428. (in Chinese))
- [3] 于浩, 练章华, 林铁军. 页岩气压裂过程套管失效机理有限元分析[J]. 石油机械, 2014, 42(8): 84-88, 93. (Yu Hao, Lian Zhanghua, Lin Tiejun. Finite element analysis of failure mechanism of casing during shale gas fracturing [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(8): 84-88, 93. (in Chinese))
- [4] 于浩. 体积压裂过程中套管失效机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. (Yu Hao. Study on casing failure mechanism in volume fracturing [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015. (in Chinese))
- [5] 王永亮. 热膨胀模拟页岩分段水力压裂的套管损坏有限元分析[A] // 北京力学学会第21届学术年会暨北京振动工程学会第22届学术年会论文集[C]. 北京力学学会、北京振动工程学会, 2015: 103-104. (Wang Yongliang. Finite element analysis of casing damage of thermal fractured shale hydraulic fracturing [A] // The 21st Academic Annual Meeting of Beijing Mechanics Society and the 22nd Academic Year of Beijing Society of Vibration Engineering Conference Proceedings [C]. Beijing Institute of Mechanics, Beijing Society of Vibration Engineering, 2015: 103-104. (in Chinese))
- [6] 蒋可, 李黔, 陈远林, 等. 页岩气水平井固井质量对套管损坏的影响[J]. 天然气工业, 2015, 35(12): 77-82. (Jiang Ke, Li Wei, Chen Yuanlin, et al. Influence of cementing quality of shale gas horizontal well on casing damage [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(12): 77-82. (in Chinese))
- [7] 刘奎, 王宴滨, 高德利, 等. 页岩气水平井压裂对井筒完整性的影响[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 406-414. (Liu Kui, Wang Yanbin, Gao Deli, et al. Effects of hydraulic fracturing on horizontal wellbore for shale gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 37(3): 406-414. (in Chinese))
- [8] 刘奎, 高德利, 王宴滨, 等. 局部载荷对页岩气井套管变形的影响[J]. 天然气工业, 2016, 36(11): 76-82. (Liu Kui, Gao Deli, Wang Yanbin, et al. Influence of local loads on casing deformation in shale gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 76-82. (in Chinese))
- [9] 田中兰, 石林, 乔磊. 页岩气水平井井筒完整性问题及对策[J]. 天然气工业, 2015, 35(9): 70-76. (Tian Zhonglan, Shi Lin, Qiao Lei. Research of and countermeasure for wellbore integrity of shale gas horizontal well [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9): 70-76. (in Chinese))
- [10] 戴强. 页岩气井完井改造期间生产套管损坏原因初探[J]. 钻采工艺, 2015, 38(3): 22-25. (Dai Qiang. Analysis of production casing damage during testing and completion of shale gas well [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(3): 22-25. (in Chinese))
- [11] Lian Z H, Yu H, Lin T J, et al. A study on casing deformation failure during multi-stage hydraulic fracturing for the stimulated reservoir volume of horizontal shale wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 538-546.
- [12] 陈朝伟, 石林, 项德贵. 长宁-威远页岩气示范区套管变形机理及对策[J]. 天然气工业, 2016, 36(11): 70-75. (Chen Chaowei, Shi Lin, Xiang Degui. Mechanism of casing deformation in the Changning-Weiyuan national shale gas project demonstration area and countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 70-75. (in Chinese))
- [13] 李健, 吴顺川, 高永涛, 等. 露天矿边坡微地震监测研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增2): 3998-4013. (Li Jian, Wu Shunchuan, Gao Yongtao, et al. Review of slope micro-seismic monitoring in Open-pit mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Supp. 2): 3998-4013. (in Chinese))
- [14] 杜文凤, 彭苏萍, 师素珍. 基于三维地震勘探研究地裂缝空间展布特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 778-783. (Du Wenfeng, Peng Suping, Shi Suzhen. The spatial distribution characteristics of ground fissures based on 3D seismic exploration [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 778-783. (in Chinese))