

保德区块中低阶煤层压裂施工砂堵 原因分析及技术对策

师 伟¹, 李 孟², 樊洪波³

(1. 中石油煤层气有限责任公司临汾分公司, 山西 太原 030000; 2. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095; 3. 中石油煤层气有限责任公司忻州分公司, 山西 太原 030000)

摘要:针对保德区块中低阶煤储层压裂过程中容易出现砂堵影响储层改造效果的问题,根据研究区块的地质条件,结合水力压裂时裂缝在煤层中的扩展规律,分析了保德区块煤层水力压裂出现砂堵的 4 类主要原因,分别为煤储层裂隙相对发育造成压裂液滤失量增加、压裂沟通高渗透性的顶底板、煤储层本身有效厚度大滤失量增大及多层合压造缝不充分。在此基础上,提出了相应的技术对策,使用清洁压裂液、适当提高并稳定施工排量及优化压裂施工设计,为现场的水力压裂施工和提高煤储层改造效果提供重要指导。

关键词:中低阶煤层;水力压裂;砂堵;储层改造;清洁压裂液

中图分类号:TD825 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)12-0012-06

Causes Analysis and Technical Countermeasures of Sand Plug in Coal-bed Hydraulic Fracturing Construction in Baode Block/SHI Wei¹, LI Meng², FAN Hong-bo³ (1. Linfen Branch of PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Taiyuan Shanxi 030000, China; 2. National Engineering Research Center of China United Coalbed Methane, Beijing 100095, China; 3. Xinzhou Branch of PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Taiyuan Shanxi 030000, China)

Abstract: Sand plug occurred in the fracturing process of low and middle rank coal reservoir in Baode block, which affected the reservoir reconstruction. Based on the geological features of this block, combined with the extension law of hydraulic fracturing in coal seams, the main factors caused sand plugging are analyzed, such as the increase of fracturing fluid loss caused by development of coal reservoir fractures and high permeability roof and floor fracturing and so on. The corresponding technical countermeasures are put forward on this basis, by using clean fracturing fluid, appropriately increasing and stabilizing the fracturing fluid displacement in construction and optimizing fracturing design, the reservoir reconstruction effect can be improved.

Key words: low and middle rank coal seams; hydraulic fracturing; sand plugging; reservoir reconstruction; clean fracturing fluid

0 引言

煤层气水力压裂是在煤储层中造出具有一定导流能力和长度的填砂裂缝,改变地层中流体的渗流方式,提高煤储层压裂改造的效果。由于裂缝中支撑剂的分布会直接影响到裂缝的导流能力,如果施工过程中出现砂堵而不得不得地面放压,将会降低近井地带填砂裂缝的导流能力。如何才能尽可能地按照设计中的加砂程序,确保煤储层水力压裂的改造效果,需要对砂堵原因进行深入分析,并采取有效措施。本文从保德区块的地质情况和煤储层的特征入

手,在介绍煤层水力裂缝扩展规律的基础上,结合测井资料的解释,重点分析了各井出现砂堵的主要原因^[1-4],并提出了相关的技术对策,以期对中低阶煤层压裂施工提供理论指导。

1 保德区块地质概况及煤层特征

保德区块是我国探明的首个中低阶煤层气藏,位于鄂尔多斯盆地东缘北段,构造比较简单,无大型的褶皱和断裂构造。总体形态为走向近南北,向西倾的单斜构造,地层产状比较平缓。

收稿日期:2016-01-04; 修回日期:2016-08-30

基金项目:国家重大专项示范工程 19“鄂尔多斯盆地东缘煤层气开发示范工程”(编号:2011ZX05062)

作者简介:师伟,男,汉族,1986 年生,研究所副所长,工程师,硕士,从事煤层气增产技术研究工作,山西省太原市新化路 7 号,shiwei_0902@163.com。

通讯作者:李孟,男,汉族,1987 年生,油气井工程专业,硕士,从事煤层气、致密砂岩气钻井工程现场管理和技术研究工作,北京市海淀区地锦路 7 号 1 栋,lm362176317@163.com。

该区块的主力煤层发育于二叠系下统,分别为山西组的4+5号煤和太原组的8+9号煤,局部发育7号煤层,以中低阶煤为主,割理比较发育。同时,煤层渗透率介于0.3~12 mD,一般为2.5~8 mD^[5];弹性模量为10501.9 MPa,泊松比为0.23,机械强度较高。

2 煤层中水力裂缝的扩展规律

与常规的砂岩储层相比,煤层在压裂过程中裂缝的形态相对比较复杂,常出现水平裂缝与垂直裂缝共存的现象,甚至是复杂的网状裂缝,如图1^[6]。其主要原因是煤储层中割理相对发育、压裂过程中产生的煤粉影响裂缝的扩展及煤储层与其顶底板的岩性差异较大。根据对其他区块煤矿采掘至已压裂井的井下观察,证实压裂后的煤储层支撑剂沿着构造煤和与顶底板之间的结合面展布。

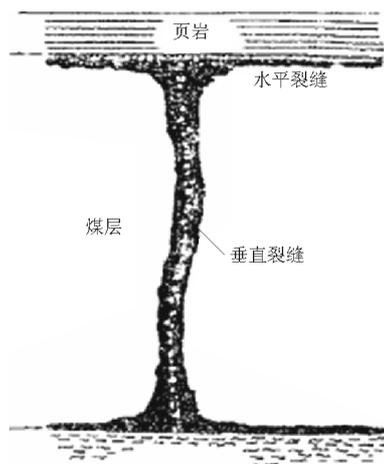


图1 压裂后煤层中的裂缝形态^[6]

煤储层裂缝在扩展过程中,往往会发生迂回转向,但其主裂缝大体上仍会沿着最大水平主应力的方向延伸。主要原因是由于煤储层中割理相对发育,且非均质性强。由于压裂液在弯曲转向过程中流动阻力增加,大大降低了裂缝的扩展长度。因此,煤储层压裂形成的裂缝形态主要为宽而短,造成压裂效果不理想。

3 砂堵实例分析

3.1 煤层天然裂缝发育

保德区块煤储层基质渗透率相对较低,天然裂缝的传导率明显高于煤储层基质。当主裂缝中的净压力大于使天然裂缝闭合的有效应力时,大量的天

然裂缝会张开,造成压裂液大量滤失侵入地层,使主裂缝中的净压力基本不变,此时,如果砂比控制不当或排量不稳定,容易造成砂堵。

图2为B32-3井压裂施工的曲线。从图中看出,在37 min左右时,当前置液中加入两段粉砂段塞之后,在排量基本保持不变情况下,压力明显降低;在90 min左右时,排量7.5 m³/min,砂比5.36,施工压力突然由26 MPa降为21 MPa左右;在后续施工过程中无法实现连续加砂,直至出现砂堵停泵。在第一次压力突然降低时(37 min),施工排量由8.0 m³/min提高至8.6 m³/min,压力出现小幅回升,说明煤层被压开后,压裂液滤失量增大。在56 min时施工排量重新提高至7.5 m³/min左右,但因造缝不充分,加砂后压力明显升高,待压力增至26~27 MPa时,形成新的裂缝,造成滤失量增大,施工压力骤降,但形成的裂缝较短,在加砂过程中,频繁出现砂堵现象。

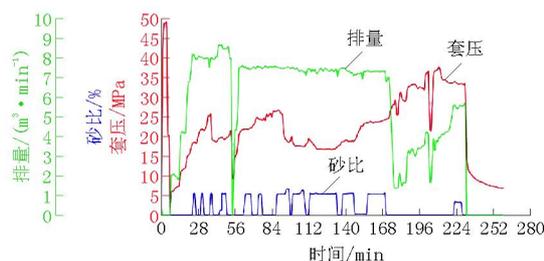


图2 B32-3井7+8+9号煤层压裂施工曲线

根据测井资料(图3)解释,该井的7号和8+9号煤层之间的夹层和顶底板为岩性致密、厚度较大以及应力较高的泥页岩层,因此,压裂过程缝高可以得到较好控制。同时,根据图3中净压力与注入时间在双对数坐标系中的关系曲线,结合PKN模型裂缝的延伸规律,在缝高不变的情况下,主裂缝沿缝长方向不断地延伸,压裂液在缝中的流动阻力逐渐增加,使净压力逐渐变大^[7-10]。但该井施工过程中的压力升高的主要原因是由于形成新的水力裂缝时,沟通天然裂缝,造成滤失量增加,加砂相对困难。因此,在施工过程中,应该将施工排量提高至8 m³/min以上,在造新缝的同时,提高压裂液的携砂能力,减少出现砂堵问题。

3.2 缝高扩展至高渗透砂岩层

由图4的测井曲线解释可知,B32-3井4+5号煤层射孔段为674.5~680 m,煤底板为9 m的泥岩层,顶板是19 m厚的砂岩层,渗透率2.79 mD。

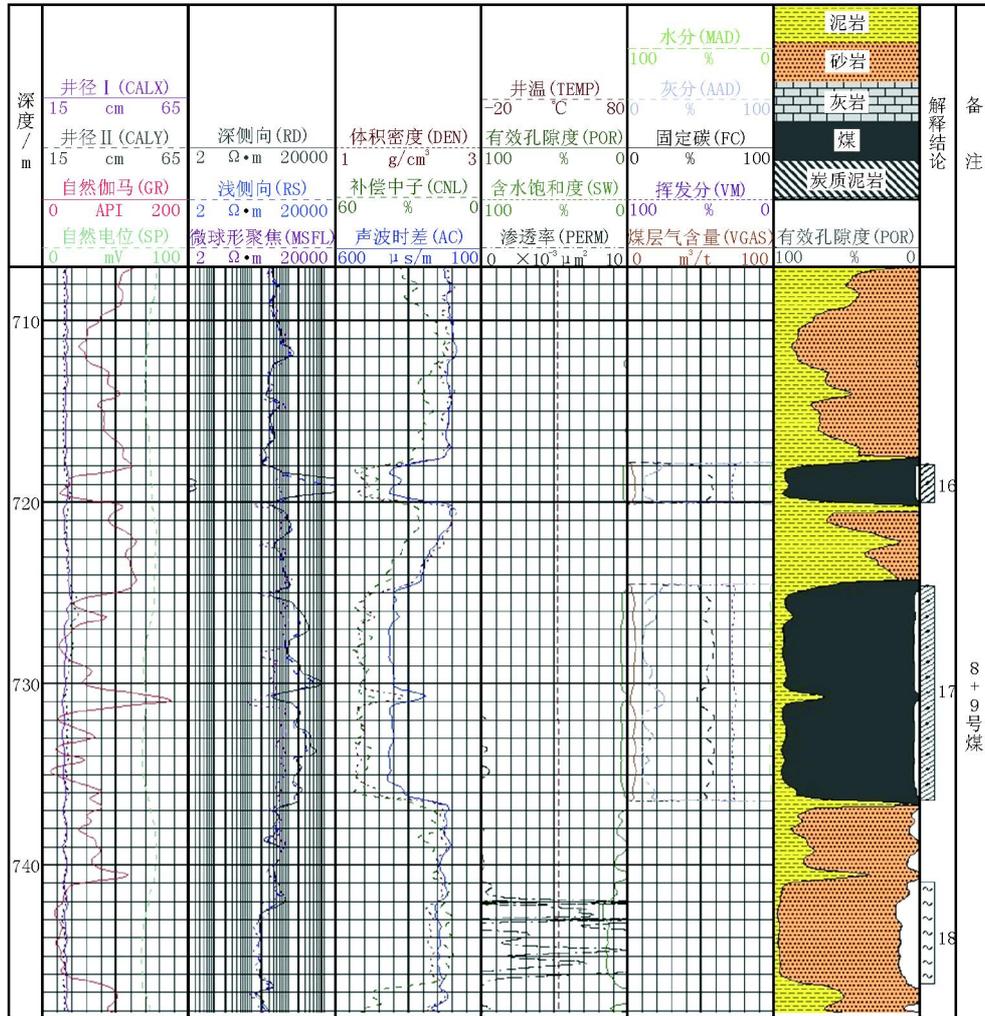


图3 B32-3井7+8+9号煤层的测井曲线

如图5所示,该井在压裂施工过程中,28 min时,排量为 $8.25 \text{ m}^3/\text{min}$,压力由29.30 MPa降至25.09 MPa。根据PKN模型,压力降低是由缝高不断扩展引起的。当缝高向上延伸至顶板砂岩层段时,由于渗透率较高,活性水滤失量大幅增加,使注入量和滤失量基本相当,压力保持平稳状态,此时,很容易造成脱砂。此外,在泵注携砂液阶段,现场的施工排量出现明显波动,导致在95 min左右时,出现砂堵。

3.3 目的煤层有效厚度大,滤失严重

如图6所示,B34-1井8+9号煤层视厚度12.3 m,中间存在2个夹矸;同时,煤层底板有高渗透率的水层。因此,该井将射孔段定为744~745 m和748.5~754.0 m。在压裂施工前期,排量为 8.7 m^3 左右,但是施工压力基本保持在16 MPa,说明注入量与滤失量大致相当,很可能发生端部脱砂而造

成砂堵。由图7的施工压力、排量以及砂比可以看出,在81 min和89 min出现砂堵预兆,但现场的施工排量却降至 $8.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右,同时平均砂比仍保持在7.31%,最终导致砂堵。该井出现加砂遇阻的主要原因是由于目的煤层有效厚度大,活性水滤失严重,在出现压力波动时,现场未及时采取提高排量或降低砂比的措施;相反,却使施工排量减小,继续保持较高砂比施工。

3.4 多层合压,造缝不充分

B32-11井将7号煤层和8+9号煤层合起来实施压裂作业,该井射孔段1037.00~1038.50和1068.50~1073.50 m,其中8+9号煤层有效厚度达13.40 m,中间有5层夹矸。从图8看出,由于8+9号煤层厚度大,并且和7号煤层进行合压,造成压裂液的造缝效率低下,裂缝扩展不充分,或无法形成有效裂缝,使整个施工过程加砂困难。

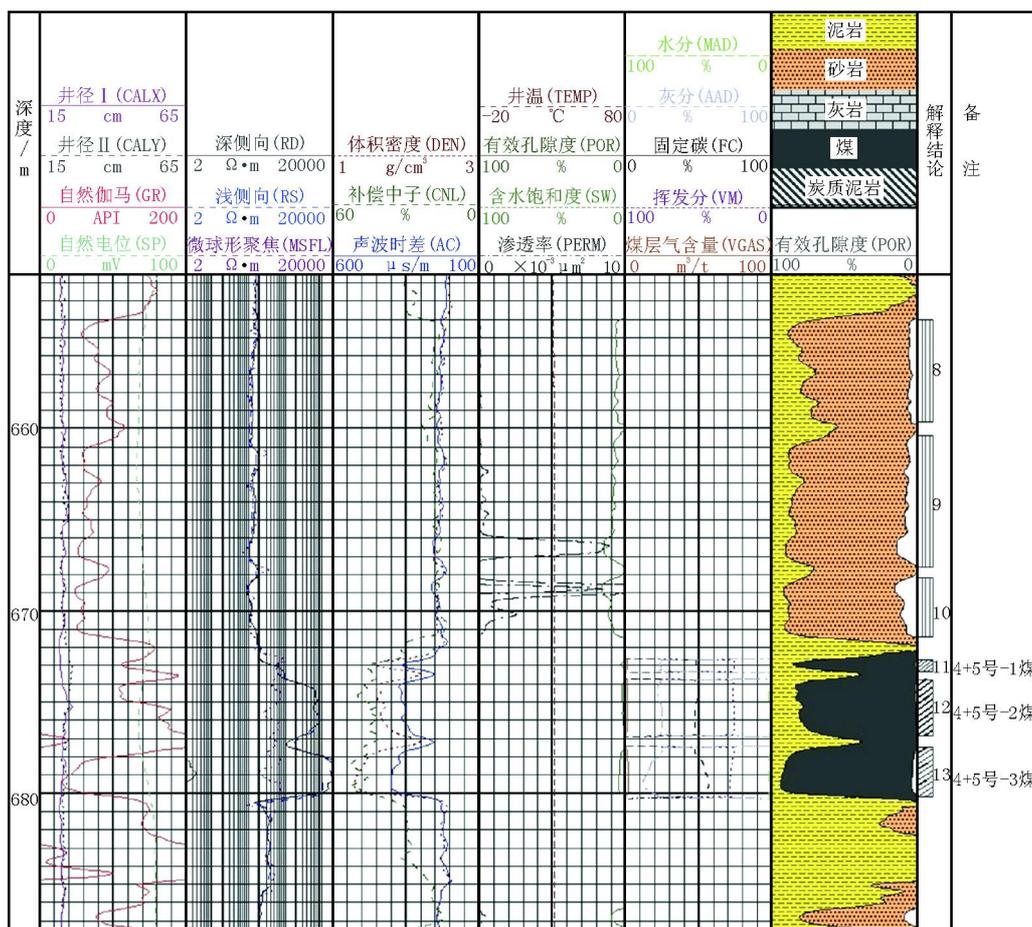


图 4 B32-3 井 4+5 号煤层测井曲线解释

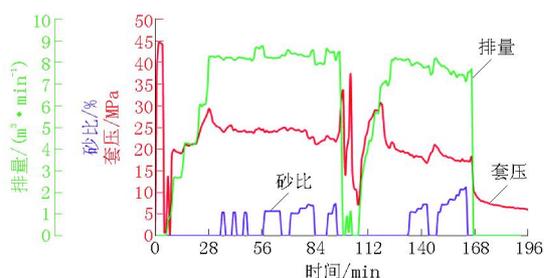


图 5 B32-3 井 4+5 号煤层压裂施工曲线

4 技术对策

针对上述煤层压裂改造过程中,造成砂堵或无法正常加砂的主要原因是煤层滤失严重、压裂液携砂能力差以及造缝不充分,现提出如下技术对策。

4.1 清洁压裂液技术

压裂液粘度的增加使其携砂性能增强,进而影响支撑剂在裂缝中的沉降速度和输运效果;同时,压裂液粘度越高,滤失量显著降低。据文献[11]的计算结果,在不同粘度条件下,煤层水力裂缝内支撑剂

的分布状况如表 1 所示。

压裂液粘度的增加,使其携砂能力增加和支撑剂的沉降速度减小,同时降低滤失量,既增加了支撑裂缝体积,改善压裂效果,又降低了砂堵的风险。但油田常用具有一定粘度的胍胶压裂液在煤层中破胶往往不彻底,对煤储层的污染比较严重。采用水基清洁压裂液^[12],配方为:0.4%小阳离子防膨剂+(0.06%~0.18%)有机钠盐+(0.2%~0.6%)阳离子表面活性剂+水,抗剪切能力强,在较低粘度下仍具有良好的携砂能力^[13];同时,对煤层中的粘土有良好的防膨效果,能够降低粘土膨胀对煤层的伤害。此外,清洁压裂液不产生滤饼,破胶后没有固相残渣。室内试验和现场应用的结果表明,清洁压裂液配制简单,用量少,具有良好的应用前景。

4.2 合理提高施工排量

在裂缝扩展过程中,支撑剂的沉降和铺置与施工排量密切相关。支撑剂的运移距离与压裂液粘度、施工排量的关系如下式所示^[9]:

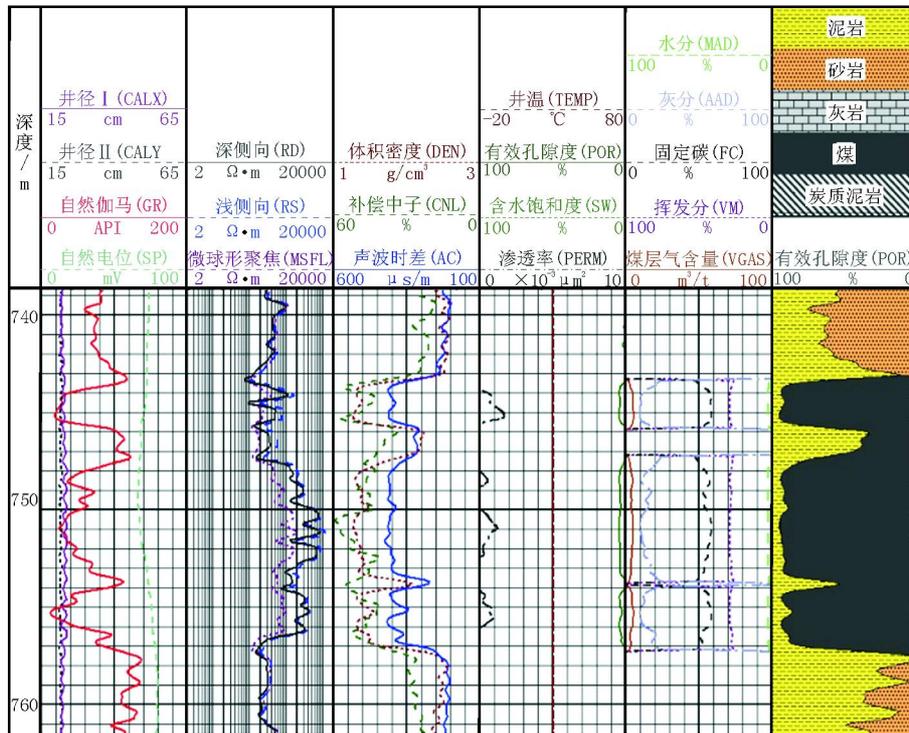


图6 B34-1井测井曲线解释

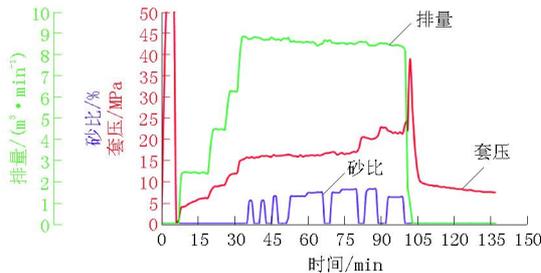


图7 B34-1井8+9号煤层压裂施工曲线

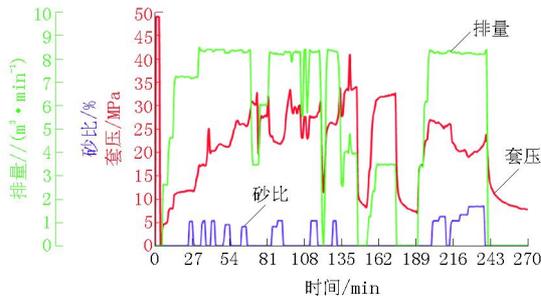


图8 B32-11井7+8+9号煤层压裂施工曲线

表1 不同粘度条件下缝内的支撑剂分布情况

压裂液粘度/ (mPa·s)	缝内平均砂比/ %	缝内最大砂比/ %	砂堤高度/ m
1	30.65	59.33	8.14
15	31.31	57.09	4.35
30	32.43	55.43	2.47

$$L \propto (\mu q)^{3/4}$$

式中： μ ——压裂液粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； q ——施工排量， m^3/s 。

从中看出，支撑剂运移的水平距离与裂缝高度无关；同时，若是使用低粘度的压裂液，在较高的排量条件下，同样可以获得相同的距离。因此，在煤层气压裂过程中，压裂液为活性水，粘度普遍较低，提高施工排量同样可获得较好的输砂效果。但有时为了避免缝高扩展至高渗透层，或者缝高延伸过高而缩短缝长，也需要适当控制施工排量的增加。

4.3 优选支撑剂和加砂程序

保德区块煤层割理发育^[1]，影响到煤层气藏中的地应力分布格局，水力裂缝不再是沿着最大地应力方向扩展的单一裂缝，甚至可能形成多裂缝，严重影响了主裂缝宽度^[14]，造成支撑剂难以进入人工裂缝。因此，选择合适的支撑剂规格是压裂成功的关键。考虑到支撑剂粒径越大，沉降速度越大，支撑裂缝的导流能力越好，因此，在泵注入初期，先采用小粒径的支撑剂，确保裂缝端部能够被支撑；尾注粗砂可以在保证支撑剂浓度的基础上，尽量提高充填砂裂缝入口的导流能力，同时，可避免排采时粉砂返吐堵塞裂缝。

此外,为了降低砂堵的风险,实现平稳、连续加砂操作,从裂缝内支撑剂的优化组合实验结果来看,可以将不同类型支撑剂的粒径均缩小一个数量级,且不会明显降低裂缝的导流能力。

5 结论

(1)保德区块煤储层以中低阶煤为主,煤层天然裂缝发育、目的层有效厚度大、压裂施工中压力控制不当压穿顶底板高渗透性砂层,是造成砂堵的主要原因。采用水基清洁压裂液,适当提高施工排量,采用“先小后大”的加砂程序,可以有效解决砂堵问题,同时确保施工压力不至于过高,而且能有效减少压裂液对煤储层的污染。

(2)保德区块中低阶煤层压裂施工实践表明,对4+5号、8+9号以及4+5+7号煤层进行合层压裂改造,特别是单个煤层厚度较大时,易造成压裂液滤失量增大,难以形成主裂缝或裂缝宽度有限,造成加砂困难。因此,为了提高压裂液的造缝效率,彻底改造目的煤层,应尽量采用分层压裂的方式。

参考文献:

- [1] 彭少涛,刘川庆,朱卫平,等.保德区块中低阶煤压裂存在的问题及技术对策[C]//中国煤炭学会煤层气专业委员会、中国石

油学会石油地质专业委员会.2011年煤层气学术研讨会论文集,2011:303-307.

- [2] 李勇明,李崇喜,郭建春,等.M气藏压裂施工砂堵原因剖析[J].钻采工艺,2008,31(2):55-57.
- [3] 郑彬涛,郭建春.YQ探区气井压裂砂堵分析与对策研究[J].复杂油气藏,2010,3(1):70-72.
- [4] 张高玖,赵德勇,刘欣,等.安棚油田压裂砂堵因素分析及解决方法[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2007,9(2):1-3.
- [5] 接铭训.鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景[J].天然气工业,2010,20(6):1-6.
- [6] 李林地,张士诚,庚勤.煤层气藏水力裂缝扩展规律[J].天然气工业,2010,30(2):72-75.
- [7] 陈小新,魏英杰.粉砂在压裂施工中的应用效果显著[J].钻采工艺,2002,25(4):99-100.
- [8] 尹清奎,李玉魁,杨清荣,等.煤层压力施工过程中压力分析及应用[J].中国煤层气,1999,(2):52-54.
- [9] 韩庆,孙建平,张帆.压裂施工中压力异常波动原因分析及处理[J].石油化工设备,2012,15(1):36-38.
- [10] 米卡乐丁·埃克诺米德斯著.油藏增产措施[M].张保平,蒋阔,译.北京:石油工业出版社,2002:534-606.
- [11] 张鹏.煤层气压裂液流动和支撑剂分布规律研究[D].山东青岛:中国石油大学(华东),2011.
- [12] 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司.压裂用低成本水基清洁压裂液及破胶液:中国,CN101693830B[P].2013-04-24.
- [13] 崔会杰,王国强,冯三利,等.清洁压裂液在煤层气井压裂中的应用[J].钻井液与完井液,2006,23(4):58-60.
- [14] 李安启,姜海,陈彩虹.我国煤层气井水力压裂的实践及煤层裂缝模型选择分析[J].天然气工业,2004,24(5):91-93.

(上接第11页)

(2)三维水平井剖面类型和井眼曲率确定后,最小纵向靶前距随之确定。设计井给定的纵向靶前距的大小决定了是否出现负位移和扭方位量。工厂化水平井多井设计中,应利用最小纵向靶前距概念布置水平井组及井口平台,设计中应尽量不采用负位移设计,有负位移的井眼轨道,各井在造斜井段相互关系复杂,增加了钻井施工风险。

(3)三维水平井横向靶前距不受纵向靶前距或井眼曲率的影响,横向位移可通过一定井斜角下的稳斜钻进实现。横向靶前距的设计可根据开发方案确定。

(4)大庆油田致密油气藏目的层薄,储层变化快,宜采用6段制水平井轨道剖面,在井斜30°左右完成扭方位钻进,以降低扭方位井段的轨迹控制难度,探评井预留30~50m探顶段保证准确钻入目的层。

参考文献:

- [1] SY/T 5435—2012,定向井轨道设计与轨迹计算(中文/English)[S].
- [2] SY/T 5955—2004,定向井井身轨迹质量[S].
- [3] SY/T 6332—2012,定向井轨迹控制[S].
- [4] SY/T 6963—2013 大位移井钻井设计指南[S].
- [5] 韩志勇.定向钻井设计与计算[M].山东东营:中国石油大学出版社,2007:321-328.
- [6] 刘修善.井眼轨道几何学[M].北京:石油工业出版社,2006:149-152.
- [7] 苏义脑.水平井井眼轨道控制[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [8] 刘修善,张海山.欠位移水平井的设计方法[J].天然气工业,2008,28(10):61-63.
- [9] 李增乐.中浅层水平井井眼轨道优化设计与现场施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):43-45.
- [10] 窦玉玲.长水平段大位移井井眼轨道优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):50-52.
- [11] 宋执武,高德利,李瑞营.大位移井轨道设计方法综述及曲线优选[J].石油钻探技术,2006,34(5):24-27.
- [12] 卢明辉,管志川.大位移井摆线轨道设计方法[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(6):33-35.
- [13] 卢明辉,管志川.大位移井轨道设计中关键参数的确定[J].石油钻探技术,2003,31(5):70-71.