

# 就 XS-02 井压裂情况谈煤层气井完井及增产措施

席先武 宋生印 张 群 韩宝山 (煤炭科学研究总院西安分院 710054)

**摘要** 在对 XS-02 井完井压裂进行总结的基础上,分析了 3 种完井方式和 3 种压裂液在煤层气井中的适应性,结合 XS-02 井压裂施工的具体情况,解释煤层气井压裂时高滤失和高施工压力的原因,为以后各井的工作提供可参考的依据。

**关键词** 煤层气 完井 压裂

**中国图书资料分类法分类号** 618.11

**作者简介** 席先武 男 27 岁 助理工程师 采油工程

## 1 引言

由于煤层的低渗性,欲从煤层气井中生产出工业性气流来,对煤层气井进行合理的完井和增产措施是极其关键的一个环节,针对不同的地层地质条件,选择不同的完井和改造措施。XS-02 井是国家“九五”科技攻关项目——“新集浅层煤层气示范开发及配套技术研究”的第一口生产试验井。该井的 3 个生产目标层段均采用了套管射孔完井和水力加砂压裂的增产措施。本文将对 XS-02 井压裂前后所遇到的问题进行讨论。

## 2 XS-02 井简介

XS-02 井完钻于 1998 年 11 月,采用套管完井。本次压裂目标层是:1#煤、5# + 6#煤和各自的底板砂岩以及 8#煤。3 个目标层的地层参数及施工参数如表 1 所示。

## 3 几种完井增产措施在煤层气井中的适应性分析

煤层气井的完井工艺和增产措施主要是借鉴目前石油上成熟的工艺技术,在分析目标层地质条件的基础上,选择最佳的完井、增产措施。

### 3.1 煤层气井完井工艺

完井是为了有效地连通井底和产层、防止各层之间的相互窜扰、克服井壁坍塌和气井的长期稳定生产,并为下一步工作(改造、排采)提供条件。目前煤层气井中常用的完井方式有:

#### 3.1.1 裸眼完井

它是一种产层完全裸露的完井方式,只能适用于那些渗透率高而无需压裂措施、岩性坚固稳定且无煤、水夹层的单一产层。煤层往往是煤岩稳定性差、渗透率低,需要进行压裂措施。因此裸眼完井一般不适用于煤层,但它是动力裸眼完井的基础。

表 1 目标层地层参数和施工参数

目标层	I		II				III
射孔井段	1#煤		5#底砂岩	5#煤	6#底砂岩	6#煤	8#煤
埋深/m	779.95~784.90	785.80~790.20	683.5 ~687.80	681.60 ~682.7	669.80 ~679.35	668.80 ~669.80	617.40 ~620.85
渗透率/mD	0.057		—	—	—	0.086 2 *	0.388 *
表皮系数	4.78		—	—	—	—	—
地层压力/MPa	7.57		—	—	—	7.36 *	7.34 *
压力梯度/kPa·m <sup>-1</sup>	9.65		—	—	—	10.0 *	10.0 *
地层温度/℃	39		—	—	—	37.78 *	35.1 *
闭合压力/MPa	13.3		—	—	—	13.1 *	13.98 *
厚度/m	4.95	4.40	4.3	1.1	9.55	1.0	3.45
射孔数	82	70	69	18	153	16	55
砂量/m <sup>3</sup>	35		30				18
压裂液	1%KCl		HPG				1%KCl

\* 借鉴于 CQ-2 井试井结果

3.1.2 动力裸眼完井

动力裸眼完井又称洞穴完井,它是在裸眼完井的基础上发展起来的用于煤层改造的一种独特完井技术。其方法是利用煤层的不稳定性,通过人工向井筒内高速注气、水或气水混合物,然后瞬间排放;或者是,在井中下入喷咀射流冲刷煤层,在井底形成物理洞穴,在洞穴外形成剪切破坏带和张性破坏带以及远场干扰带,使煤块松动、破坏,使原始闭合的天然裂缝重新开启,从而形成纵横交错的裂缝网络,使近井处的渗透率大大提高,同时应力得到释放,煤的比表面积增加,便于煤中吸附气的解吸和扩散。从理论上讲,动力裸眼完井是一种极好的煤层改造方法,但是它仅适用于高渗易碎,(按美国的经验:煤层渗透率大于 5~10 mD)特别是结构完整的煤层。因此这种改造措施在我国煤层(大部分煤层  $K=0.1\sim 0.01$  mD)中的应用将会受到一定的限制,目前还没有动力裸眼完井成功的报道。

3.1.3 套管射孔完井

它是目前煤层气方面使用最广泛的一种完井方法,它能有效地封隔和支持疏松易塌的地层,能够分隔不同压力 and 不同特点的地层,是一种最经济的完井方法。但是在钻井和固井过程中,产层受洗井液和水泥浆的侵害较为严重,由于射孔数目有限,产层与井底连通面积小,气、水流入井内的阻力较大。(完善系数小于 1)根据我国煤层地质条件以及现在煤层气井完善的完井技术,射孔完井是煤层气井的首选完井方式。

煤层完井方式的选择需要考虑:渗透率、孔隙度、煤岩力学性质、煤层产能、煤层厚度、煤的脆性和硬度、煤层是否含水等因数。

XS-02 井的 3 个目标层 8#、5#+6#、1#煤岩稳定性差,特别是 6#煤上部为粉煤、在钻井过程中 8#煤曾出现过坍塌现象、1#煤上部和下部均有 1~2 m 多的构造煤,8#和 1#煤渗透率分别为 0.28、0.057 mD。(5#+6#煤没有实测渗透率值)因此 XS-02 井采用了套管射孔完井,这样就有效地封隔和支撑了疏松易塌的煤层。(表 2)

3.2 增产措施

增产措施作用的对象——煤层,与常规储层(砂岩、碳酸盐岩)相比,有许多独特之处。煤既是生气岩又是储气岩,煤层的沉积环境和埋藏史影响着煤层气的含量、扩散性、渗透率和孔隙度,同时煤与其它常规储集岩相比,压缩性大、渗透率和孔隙度对应力敏感性强,杨氏模量小而泊松比大,正是这些特点决定了措施方式的选择。

表 2 XS-02 井压裂设计所用的物性参数  
(由中原油田煤层气工程部提供)

层 段	孔隙度 /%	杨氏模 量/MPa	泊松比	最小主 应力/MPa
1#煤顶板		9 925	0.19	14.9
1#煤	1	3 200	0.36	16.0
1#煤底板		9 431	0.19	18.8
5#+6#顶板		22 220	0.18	16.5
5#+6#层段	1	16 750	0.29	9.9
5#+6#底板		16 705	0.29	15.3
8#顶板		22 220	0.18	15.5
8#煤	5	3 200	0.36	9.9
8#煤底板		22 220	0.18	16.5

3.2.1 活性水压裂

主要成分是清水。活性水的表面张力一般为 3.2 mN/N 左右。由于活性水对煤层污染相对较轻,返排时间不受限制,甚至可以在排水采气时随地层水一同采出。主要不足是:携砂能力相对较差,滤失大。

本次 XS-02 井的 1#煤和 8#煤采用的是活性水(1%KCl 水溶液)压裂,排量均在 7 m<sup>3</sup>/min 以上,最高砂比(体积比)达 22%,施工过程中没有出现脱砂情况,从压裂液返排情况来看,压裂效果较好。

3.2.2 水基压裂液

在煤层气井压裂中使用的水基压裂液主要是线型胶和交联胶。与活性水相比,水基压裂液具有携砂能力强、滤失低、相对造缝长等优点,能相对大幅度提高产气量,缩短排水期,提前高产峰期。但水基压裂液致命的弱点是在煤层中返排难、对煤层污染严重。

考虑到 5#+6#层段煤层薄而大部分是砂岩段,大胆地进行了交联胶压裂尝试。压裂液返排粘度低,(3<sub>cp</sub>,中原油田煤层气工程部提供)说明这次尝试是成功的,解决了低温破胶难题,这一成果还有待于进一步向单一厚煤层中推广使用。

3.2.3 泡沫液压裂

泡沫压裂液是用酸、甲醇和水混合物或是油类与水起泡的一种乳白色乳化液。这种压裂液中的气泡提供了较高的粘度和优良的支撑剂携带能力,其干度可达 70~80,这意味着压裂液中的 70%~80%是气,而只有 20%~30%的液体。压力下降后气体膨胀而使泡沫破裂。其优点是:可进入地层的液量少、气体固有的能量能改善压裂液的返排情况、泡沫压裂液自身具有良好的防滤失作用、造缝和携砂能力强、摩阻低。(只有水的一半左右)泡沫压裂液特别适用于低压、低渗、浅层需要增能的地层中。在煤层气

开发中,美国多次成功地使用了泡沫压裂液进行煤层增产措施。在国内,由于受到设备和泡沫稳定性技术的限制,泡沫压裂液在煤层气开发上的应用仍只能处在探索和试验研究阶段。

4 压后分析

本次压裂的 3 个目标层极具代表性:1<sup>#</sup>煤是单一的厚煤层(9.55 m)、8<sup>#</sup>煤是单一的薄煤层(3.45 m)、5<sup>#</sup>+6<sup>#</sup>层段有两个薄煤层和两个较厚的砂岩层。

4.1 单一煤层中压裂液滤失大

在压裂 1<sup>#</sup>和 8<sup>#</sup>煤时前置液占总液量的近一半,排量都达到了 7 m<sup>3</sup>/min 以上。高滤失是煤层压裂中普遍存在的问题,主要原因是:煤层的渗透率和孔隙度对应力特别敏感,有效应力的改变将会导致渗透率和孔隙度的变化。换句话说,在压裂时,压裂液重新开启了闭合的原始天然裂缝,使煤层渗透率和孔隙度因压裂液的注入而增加。压裂液粘度控制的滤失系数和地层流体压缩性控制的滤失系数都与渗透率和孔隙度的平方根成正比。通过计算,在压裂过程中,动态孔隙度可增加到原地层孔隙度的几倍,动态渗透率可增加到原地层渗透率的几十倍甚至上百倍。

本次 3 段压裂都是连续性地加砂,阶梯形地改变砂比。在 1<sup>#</sup>煤施工 40~56 min 和 5<sup>#</sup>+6<sup>#</sup>段施工 14~35 min 时,由于有两台泵泵速不稳定,施工压力出现波动。(图 1) 总的来看,施工是顺利的,没有出现脱砂及其压力异常。

压裂施工曲线记录了压裂过程中泵压、排量随时间的变化关系,它不仅能指导现场的施工,还可以从曲线上估计出压裂设计中有用的参数。从施工曲线来看,3 层段施工的破裂峰压没有类似于一般砂岩或碳酸盐岩压裂中峰压明显超出处理压力许多的现象,而是类似于微缝高渗岩石地层的施工曲线,由此也说明了压裂时压裂液的注入使近井地带原始天然裂缝重新开启,使地层渗透率和孔隙度增加。

4.2 处理压力大

1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>+6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>3 层段的处理压力梯度分别为:0.036 MPa/m、0.036 MPa/m、0.045 MPa/m、都大于 0.0226 MPa/m(1Psi/ft)。煤层压裂压力比常规储层压裂压力大的主要原因是:煤层中产生了多裂缝;煤粉随压裂液运移增大了压裂液在裂缝中的摩阻,并且可能有部分煤粉运移到了裂缝前端阻止裂缝延伸。特别是这 3 个层段中都含有构造煤,产生多裂缝和煤粉运移的现象就更加突出。

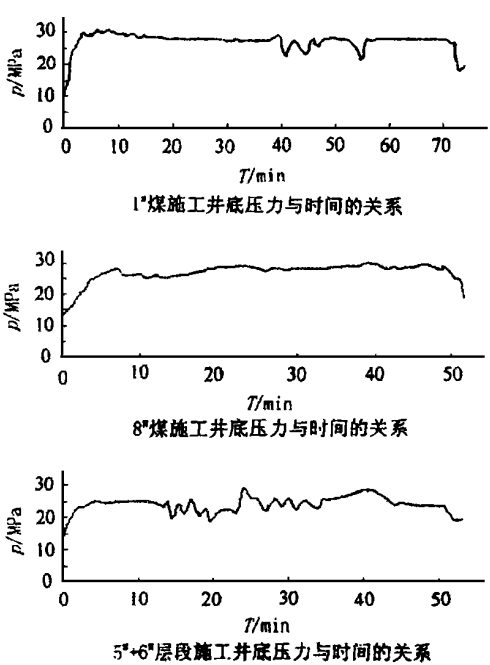


图 1 XS-02 井压裂施工曲线图

4.3 裂缝限制推测

由于条件的限制,没有对 XS-02 井进行裂缝监测,现在只能根据施工压力来推测裂缝的限制情况。煤层压裂应避免缝高度延伸沟通目标层的上下含水层。决定裂缝是否延伸出目标层的因素有:目标层与上下地层应力差、有效模量差和内部抗剪切强度。但很难得到这些参数,目前一条可参考的经验是:如果小型压裂最后裂缝闭合应力梯度超过 0.0226 MPa/m,表明将裂缝只在目标层中发育;否则,裂缝将突破目标层。1<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>两层段的闭合压力梯度分别为:0.0220 MPa/m 和 0.0286 MPa/m,由此推测 1<sup>#</sup>煤施工中裂缝高度已超出了煤层厚度,而 8<sup>#</sup>煤裂缝限制在目标层中发育。

5 总结

由上面的讨论与分析,可以得出 5 点体会:

- a. 动力裸眼完井在国内煤层中应用应慎重,对于含有构造煤的地层应采用套管射孔完井方式。
- b. 活性水压裂技术日趋成熟,还可以适当增加 KCl 的浓度,(2%~5%) 应加速低温破胶在单一煤层中的应用和泡沫液压裂煤层的研究。
- c. 由于压裂液的注入,近井地带原始天然裂缝重新开启,使动态渗透率和动态孔隙度都随之而增加,导致滤失较大,因此较大的前置液量和较高的施工排量是必须的。
- d. 由于近井地带煤层中多裂缝的产生和煤粉伴随压裂液运移及部分煤粉对裂缝前端产生堵塞作

# 开平—涧河地区煤层气勘探前景

汪泽成 (石油勘探开发研究院廊坊分院 廊坊 065007)  
郑红菊 范文科 (冀东石油勘探开发公司 唐山 063200)

**摘要** 开平—涧河地区石炭二叠系煤层以 9<sup>#</sup> 和 12<sup>#</sup> 煤层分布最稳定,煤岩组分以镜质组为主,平均达 70% 以上。煤热演化成熟度  $R_o$  值在 0.85%~1.26% 之间,煤阶分布具有从北往南、向斜轴部向两翼降低的特点。煤层割理倾向稳定,不受构造线影响,大多未被充填。等温吸附实验表明,煤的兰氏体积和兰氏压力分别为 30.05 m<sup>3</sup>/t, 3.13 MPa。煤微孔结构根据吸附等温线和孔径分布特征可分为 3 类。煤层上覆地层有效厚度具有由北向南减薄特点,北部向斜两翼断层带附近水体交替活跃,矿化度低,南部水体不活跃,矿化度高。煤层瓦斯分化带下限为 600 m。煤层含气量 6~12 m<sup>3</sup>/t,估算煤层埋深在 600~1 500 m 范围内煤层气资源量为  $705 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。城坨—小营地区可作为煤层气试验区。

**关键词** 煤层气 等温吸附线 资源量 开平—涧河

**中国图书资料分类法分类号** P618.11

**作者简介** 汪泽成 男 33 岁 博士后 石油煤层气地质

## 1 引言

煤层气作为非常规能源已日益引起人们的高度重视。开平—涧河地区地处京津唐经济发达地区,能源需求紧张。该地区的煤层气勘探对缓解该区能源紧张状况、大力发展国民经济具有重要意义。本文从煤层分布、煤储层特性以及煤层气的保存条件等方面,分析煤层气勘探的资源前景。

## 2 区域地质背景

开平—涧河地区地处燕山南麓,南邻黄骅拗陷,是一个由古生界、中生界及新生界覆盖的构造盆地。北部开平地区构造简单,呈向斜形态;南部涧河受后期构造运动破坏严重,断层发育,第三系厚度相对较大。从现今的构造单元来看,开平地区位于燕山褶皱带的南端,而涧河地区位于黄骅拗陷的北端,因此前

用,煤层压裂的处理压力梯度往往高于 0.022 6 MPa/m。

e. 根据小型压裂最终关井闭合压力梯度可以大致判断裂缝是否延伸出了目标层,但这只是条参考经验,决定裂缝高度是否超出煤层的因素是应力差、模量差和内部抗剪强度。在现场最好采用物探的手段对裂缝发育情况进行观测。

## 参考文献

1 王鸿勋,张琪等.采油工艺原理.北京:石油工业出版社.1986

2 王鸿勋.水力压裂原理.北京:石油工业出版社,1986

3 刘长延等.煤层压裂改造配套工艺技术.煤层气,1998;(2):19~21

4 尹清奎,李玉魁等.煤层压裂施工过程中压力分析及应用.煤层气 1998;(2):27~30

5 Acharga A. R. 低压油气井的泡沫压裂.天然气勘探与开发,1990;(1):63~69

6 Durucan S et. Numerical Modelling and Verification of Stress and Pore Pressure Dependent Dynamic Permeability Behaviour of Coal Seams Around Wellbores, INTERGAS'95

(收稿日期 1999-06-22)

## THE COMPLETION AND STIMULATION OF CBM WELL WITH RESPECT OF FRACTURING OF XS-02 WELL

Xi Xianwu Song Shengyin Zhang Qun Han Baoshanch(Xi'an Branch of CCRL)

**Abstract** Based on the summary of completion and fracturing of XS-02 well, three completion patterns and the adaptability of three fracturing fluids for CBM well are analyzed. Combining with the concrete situation of fracturing operation of XS-02 well, the causes for high fluid loss and high operation pressure during fracturing of CBM well are explained, providing the reference for the well construction in the future.

**Keywords** coalbed methane; completion; fracturing