

山西沁水煤层气压裂施工的横向效应

李梦溪, 张 聪

(中国石油山西煤层气勘探开发分公司, 山西晋城 048000)

[摘要] 介绍了在山西沁水盆地煤层气压裂时监测到的压裂施工的横向效应, 监测使用微地震方法。发现沿人工裂缝法向方向的邻井在施工时出现气量减少、枯竭、出水等反应, 沿人工裂缝走向方向的邻井反应滞后。这一发现使笔者注意到煤层气压裂施工的横向挤压作用可能即时影响邻井产量, 压裂设计时应该注意到这一反应的不良影响。

[关键词] 煤层气; 裂缝; 水力压裂

[中图分类号] TE37 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)04-0016-04

1 前言

随着我国的经济起飞与快速发展, 对能源的渴求越来越迫切。我国煤田多、储量大, 煤层气成为最重要的清洁能源。煤层气开采成为获得能源的重要途径。

煤层气开采必须压裂, 目的有 3 个: 对吸附在煤层上的气体形成扰动, 形成游离气体流出通道; 降低煤层中气体压力, 为束缚煤层气逸出创造条件; 在井距比较大时, 压裂以裂缝的走向、形态、沟通对地层进行改造, 影响气井生产状态。

山西是我国煤炭大省, 煤层气储量巨大, 是我国重要的煤层气开发基地。笔者对煤层气井压裂过程进行了微地震监测。通过监测发现, 不仅沿人工裂缝方向的邻井对压裂施工有反应, 而且与压裂裂缝方向夹角很大的邻井也有反应, 并且反应是即时的。这里的反应特指邻井产气量变小, 甚至枯竭, 产水量上升。这一发现使我们在分析煤层气井压裂效果时, 不得不考虑煤层特有的力学特性, 压裂对人工裂缝法向邻井的影响, 增加了压裂设计必须考虑的因素。

2 煤层气井压裂的微地震监测结果

在华加区块监测了 9 口煤层气压裂井, 压裂、监测深度 400~600 m。监测的井中, 有两口井没有对比资料, 有一口井对比资料不足以说明问题; 余下的 6 口井中, 邻井有 5 井次对压裂施工即时反应。经对比, 这 5 井次均在压裂裂缝的法向位置上; 有 4 井次滞后反应, 这 4 井次均在与压裂裂缝走向夹角较小的位置上(见图 1, 图 2)。规律如此强, 必然反映了一个必有的内在因素, 探讨这个因素将对煤层气井压裂、煤层气田改造带来重要影响。图 1 给出 3 条压裂裂缝与邻井的相对位置; 图 2 给出另外 6 条压裂裂缝与邻井的相对位置。

图 1、图 2 中, 黑色井是压裂气井, 灰色井是即时反应气井, 白色井是邻近气井。即时反映气井(灰色)通常表现为产气量降低。黑色线连接压裂井与即时反应的邻井, 灰色线连接压裂井与滞后反应的邻井。黑色箭头、黑色线方向是压裂裂缝的主方向。可以看到: 即时反应的邻近井与压裂井的连线与压裂裂缝方向夹角大, 滞后反应的邻近井与压裂井的连线与压裂裂缝方向夹角小。统计上述结果可以看出, 邻井、压裂井连线与压裂裂缝的夹角越

[收稿日期] 2012-02-14

[作者简介] 李梦溪(1971—), 男, 内蒙古集宁市人, 高级工程师, 中国石油山西煤层气勘探开发分公司总地质师, 主要从事煤层气勘探开发技术研究与管理工作; E-mail: mcq_lmx@petrochina.com.cn

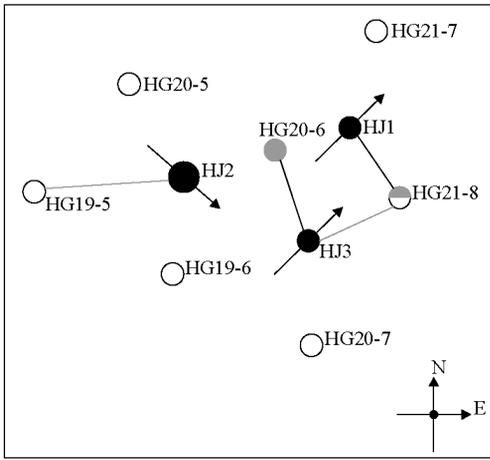


图1 华加1井、华加2井、华加3井人工裂缝方向与邻井

Fig. 1 Hydraulic fracture directions of HJ1, HJ2 and HJ3 and adjacent wells

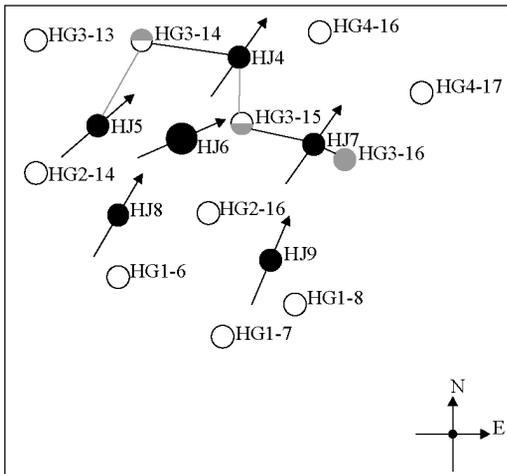


图2 华加4井、华加5井、华加6井、华加7井、华加8井、华加9井人工裂缝方向与邻井

Fig. 2 Hydraulic fracture directions of HJ4, HJ5, HJ6, HJ7, HJ8 and HJ9 and adjacent wells

小,反应滞后时间越长,见表1。

表1 邻井反应时间随邻井、压裂井连线与压裂裂缝的夹角的变化

Table 1 The changes of adjacent well reaction time with the angle between hydraulic fracturing and the connected line of adjacent well and fractured well

即时	滞后 1~7 d	滞后大于 8 d
5 井次	5 井次	1 井次
均为与裂缝走向夹角大的井	与裂缝走向夹角大的 1 井次	与裂缝走向夹角小

3 煤层气井压裂对邻井影响的原因分析

压裂对邻井的影响有两种可能:一是压裂裂缝的沟通及对地层的改造作用;二是压裂裂缝的增宽及内压作用。第二种作用与介质的力学性质有关。在油田压裂中,从未观察到沿压裂裂缝法向方向的作用与影响,但在煤层气压裂中沿压裂裂缝法向方向的作用明显、即时。挤压作用的直接影响可以表示为^[1]

$$T_z = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^2 \psi \quad (1)$$

式(1)中, T_z 是经地层传递的挤压力, R 是距离, P 是压裂时作用在裂缝侧面的水压, ψ 是的作用点与压裂井连线与人工裂缝方向的夹角。由式(1)可以看出,越近于法线方向,经地层传递的挤压力 T_z 越大。如式(2)所示,这个挤压力使邻井的裂缝关闭,出现我们看到的反应:

$$w = w_0 - \frac{4L(\sigma_N - \sigma_0)(1 - \nu_s^2)}{\pi E_s} \quad (2)$$

式(2)中, w 是裂缝即时宽度; w_0 是裂缝受到挤压作用前的宽度; L 是裂缝高度; E_s 是介质的杨氏模量; ν_s 是介质的泊松比; $\sigma_N - \sigma_0$ 是挤压作用增加的裂缝面有效法向应力增量,是 T_z 法向分量。可以看到,挤压力使裂缝宽度变小,变小程度与杨氏模量成反比。

在煤层,煤介质杨氏模量小,裂缝抗压能力也小,如果井距过小,压裂过程中附加的地层压力,应力状态的改变成为不可忽视的因素^[2](见表2)。

表2 油田、煤层常见介质的岩石力学参数

Table 2 Rock mechanical parameters of common medium of oil and coal

岩石	杨氏模量 $\times 10^3 / \text{MPa}$	泊松比
煤(平均)	1.275	0.265
泥岩	1.24	0.285
砂岩	16.25	0.305

由表2可以看出,常见油层介质砂岩的变形模量是煤层的10倍以上,这是只在煤层压裂时监测到压裂施工横向影响的重要原因。由于压裂时,以很大的压力把裂缝二侧地层推开,即时增大不沿裂缝方向的应力,越接近法向,应力增加的量值也大。后者以近于即时的速度向裂缝二侧传去,影响是即时的。

从监测资料中,与压裂井压裂裂缝走向夹角较

大的邻井多为即时反应,反映了应力状态改变的影响。该影响会使已有裂缝关闭,增大气体流动阻力;煤层游离气压力升高,降低煤层气从束缚态逸出的速率;挤压地层中原有的水向低压位置流动。理论分析表明,压裂附加的应力应该与压裂裂缝走向的夹角、邻井与压裂裂缝的垂直连线与压裂裂缝中点的距离相关,最大可以达到井底压裂压力的一半。由于煤层较软,裂缝本身刚度低,在应力增加时,开闭程度变化显著,加剧了这一影响。例如,华加1井压裂,裂缝方向北东向,在华加1井北西位置的华固21-8井与裂缝走向大体垂直,与裂缝走向的垂直连线近于中点,压裂当天气量降为零。华加3井压裂,华固20-6井大体垂直压裂裂缝方向,气量即时降低 100 m^3 。已有的资料中,有5井次出现相同的反应。

裂缝走向、形态、沟通的影响是以把井与裂缝、裂缝与裂缝对接起来为前提,即使走向一致,也很难

即时沟通,总是要通过渗流、涌流、连通几个过程才可以实现沟通,以裂缝沟通影响气井产量,相对压裂时间应该有足够的滞后。我们在安棚碱矿对井连通实验时,从监测到连通到事实上的连通,接近 $30\text{ d}^{[3]}$ 。

监测资料中显示,与压裂井压裂裂缝走向夹角较小的邻井多为滞后反应,反映了裂缝沟通的影响。从压裂裂缝尺度、走向,压裂裂缝与邻近气井沟通应该有一个时间过程。沟通后,邻井通常表现为水量变化。例如,华固21-8井,大体沿压裂裂缝方向,8 d后气量降,10 d后降为零,存在明显的滞后。

上述对比资料见表3,比较动态资料,仅有华固3-13井压裂,华加5井的结果略偏离这一结论。但是,与压裂裂缝走向夹角大的井位响应时间仍然小于与压裂裂缝走向夹角比较小的井位,彼此相差5 d。这可能与华固3-13井在区块边缘有关。

表3 不同相对方位的压裂响应

Table 3 Response from different directions to hydraulic fracturing

井名	压裂日期 月/日	主缝方位	支缝方位	邻井动态描述	备注
华加1井	10/20	北东	北东东、东西	与其北西向的华固21-8井当天气量降为0	华固21-8井与裂缝走向夹角大,即时反应
华加2井	10/18	北西	北西、北东	与其南西西向的华固19-5井10月23日报表气水量为0	华固19-5井与裂缝走向夹角小,滞后5 d
华加3井	10/23	北东	北东东	与其北西向的华固20-6井当天气量降了约 100 m^3 ,与其北东向的华固21-8井10月31日气量降,11月2日降为0	华固20-6井与裂缝走向夹角大,即时反应;华固21-8井与裂缝走向夹角小,滞后7 d
华加4井	10/10	北东	北西西	西侧的华固3-14井压裂当天自动化瞬时气量降为零,10月14日水量增加 $4\sim 5\text{ m}^3$,15日气量降为0;东南侧的华固3-15井于10月16日水质由清变深灰,水量增大,北西西向近水平支缝可能与华固3-14、华固3-15井沟通	华固3-14井与主裂缝走向夹角大,气量即时反应,水量降低滞后4 d,后者可能是支裂缝沟通的结果;华固3-15井与裂缝走向夹角小,可能与北西西向近水平裂缝沟通,水量增大滞后6 d
华加5井	10/4	北东	北东东	北西向华固3-13井,10月9日气量降,11日水量升,北东方向的华固3-14井10月14日报告水量升,15日气量降	华固3-13井与裂缝走向夹角大,气量降低滞后5 d,水量增滞后7 d;华固3-14井与裂缝走向夹角小,水量增滞后10 d,气量降滞后15 d

井名	压裂日期 月/日	主缝方位	支缝方位	邻井动态描述	备注
华加7井	10/5	北东	北东东、东西	西侧的华固3-15井,压裂当天自动化瞬时气量为零,10月16日水质由清变深灰水量增大;东南侧的华固3-16井,压裂当天自动化瞬时气量为零,10月11日气量降水量升,水质由清变深灰,10月14日气量降213 m ³	华固3-15井与主裂缝走向夹角大,气量即时反应,水量增大滞后11 d,后者可能是支裂缝沟通的结果;华固3-16井与主裂缝走向夹角大,气量即时反应,水量增大滞后6 d,后者可能是支裂缝沟通的结果
华加9井	10/7	北东	北东东、北东	北西西向的华固2-16井10月8日水量降了0.3 m ³ ,16日水量增加0.5 m ³	水量变化过小,不足以看做压裂反应

表3中列出了比较规律,即时相应的均为与压裂裂缝夹角较大的井位,与压裂裂缝夹角越小的井位响应越滞后,这反映了响应模式的不同。

4 结语

分析以上监测结果,煤层气井压裂存在沿裂缝面法向方向的即时反应。这种反应是煤层杨氏模量偏小、邻井裂缝易于关闭的结果,只有测得人工裂缝方位可靠才能表现出这一规律。这一结果反映煤层气压裂裂缝多为直立裂缝,对水平传递的压裂施工井的横向挤压有较大的受力面,反应才会如此强烈。

压裂设计时应该考虑横向挤压这个负面作用。

压裂附加应力对生产的影响时间通常有限,会随着时间的推移调整应力场,逐渐恢复原来的产能。

参考文献

- [1] 刘建中. 油田应力测量[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [2] 申卫兵,张保平. 不同煤阶煤岩力学参数测定[J]. 岩石力学与工程学报(增刊),2000,19:860-862.
- [3] 齐铁新,刘建中,秦桂林. 井下裂缝连通技术在安棚碱矿的应用[J]. 中国工程科学,2006,8(7):63-67.

Horizontal effects in fracturing operation of coal bed methane in Qinshui, Shanxi Province

Li Mengxi, Zhang Cong

(CBM Exploration and Development Company of PetroChina, Jincheng, Shanxi 048000, China)

[Abstract] This paper describes horizontal effects of CBM (coal bed methane) fracturing, obtained from microseismic monitoring in Qinshui Basin. It indicates that adjacent wells perpendicular to man-made fractures have adverse effects, including reduced production flow rate, depletion, and watering during fracturing operation simultaneously, while wells along man-made fractures response lag. This discovery shows that the horizontal compression of fracturing could have adverse impact on production of adjacent wells, and fracturing designer should be aware of it.

[Key words] coal bed methane; fracture; hydraulic fracturing