

注液速率及压裂液黏度对煤层水力裂缝形态的影响

范铁刚¹, 张广清²

(1. 中国石油大学机械与储运工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学石油工程学院, 北京 102249)

摘要:注液速率及压裂液黏度是煤层气井压裂设计中两个重要的可控参数,其不仅影响水力裂缝起裂压力及压裂施工压力,而且控制水力裂缝形态。采用鄂尔多斯盆地东南缘大宁-吉县地区天然煤岩,基于试验室物理模拟试验研究注液速率及压裂液黏度对水力裂缝形态及施工压力的影响。结果表明:注液速率及压裂液黏度较小时,主裂缝与分支缝连通形成沿最大水平主应力方向的复杂裂缝网络系统;随着注液速率及压裂液黏度的增加,水力裂缝复杂程度降低,形成平直单裂缝。提高注液速率或压裂液黏度会增大施工压力。对注液速率及压裂液黏度进行合理控制,可先在井筒附近生成平直裂缝,后在远离井筒处生成复杂裂缝网络,有利于增大煤层气单井排采体积。

关键词:煤岩压裂模拟; 注液速率; 压裂液黏度; 水力裂缝形态; 煤层气

中图分类号:TE 371 **文献标志码:**A

引用格式:范铁刚,张广清. 注液速率及压裂液黏度对煤层水力裂缝形态的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(4):117-123.

FAN Tiegang, ZHANG Guangqing. Influence of injection rate and fracturing fluid viscosity on hydraulic fracture geometry in coal[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(4):117-123.

Influence of injection rate and fracturing fluid viscosity on hydraulic fracture geometry in coal

FAN Tiegang¹, ZHANG Guangqing²

(1. College of Mechanical and Oil-Gas Storage and Transportation Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Injection rate and fracturing fluid viscosity are two important controllable parameters in the fracturing design of coalbed methane (CBM) well. They not only are the factors that affect the breakdown pressure of the borehole and treatment pressure during the fracturing treatment, but also can control the geometry of hydraulic fracture. Through several groups of large scale true tri-axial tests, influences of injection rate and fracturing fluid viscosity on hydraulic fracture geometry and treatment pressure in coal specimens collected from Daning-Jixian coal field, southeast of Ordos Basin were studied. The results show that low injection rate and low fracturing fluid viscosity reopen the coal cleats, and branch joints connect with the main fractures to form fracture networks with a dominating direction along the direction of maximum horizontal stress. With injection rate or fracturing fluid viscosity increasing, hydraulic fracture complexity is greatly reduced and a planar fracture tends to form. Increasing injection rate or fracturing fluid viscosity will also increase the treatment pressure. Optimal design of the injection rate and fracturing fluid viscosity can enhance the drainage volume of single CBM well by generating a complex fracture network at a certain distance from the wellbore after the creation of a planar fracture near the wellbore.

Key words: coalbed fracturing physical simulation; injection rate; fracturing fluid viscosity; hydraulic fracture geometry;

收稿日期:2013-12-18

基金项目:国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51322404);国家自然科学基金面上项目(51274216);国家科技重大专项(2011ZX05037-004,2011ZX05044)

作者简介:范铁刚(1985-),男,博士研究生,主要从事岩石力学及岩土工程等方面研究。E-mail:ftg33377@163.com。

通讯作者:张广清(1975-),男,教授,博士,主要从事石油工程岩石力学与岩土工程研究。E-mail:zhangguangqing@cup.edu.cn。

coalbed methane

中国煤层气资源潜力巨大,近年来,通过自主研发和技术引进,煤层气产能得到了快速增长^[1]。目前煤层气开发的主体增产技术之一是水力压裂^[2],然而在水力压裂开发煤层气时,除了煤层本身的力学和结构特性以及储层地应力条件外,压裂液和压裂工艺也是影响开发效果的重要因素。与常规储层不同,煤基质渗透率极低,煤层气在储层中的流动主要通过煤体自身的裂隙系统^[3-4],因此如何有效地连通井筒与煤层天然裂缝系统成为煤层气增产的关键因素。针对煤层水力压裂,国内外学者进行了大量研究^[5-16]。由于煤岩软、变形大且割理十分发育等特点,形成的水力裂缝形态十分复杂^[6-13]。Diamond 和 Oyler^[6]及 Jeffrey^[13]等通过巷道开挖观察到煤层中的水力裂缝受到煤岩节理及割理的影响。Abass 和 Holditch^[8, 10]进行了煤层水力压裂室内试验。Palmer 等^[11]研究认为,煤层埋深、层厚对水力裂缝形态有显著影响。目前,煤层水力压裂的研究主要涉及地应力状态及煤岩本身性质对裂缝的影响^[8-10, 17-18],而压裂液性质对煤层水力裂缝的影响研究较为欠缺。笔者采用鄂尔多斯盆地东南缘大宁-吉县地区天然煤岩,基于实验室物理模拟试验研究注液速率及压裂液黏度对水力裂缝形态及施工压力的影响。

1 煤层水力压裂物理模拟试验

1.1 试验准备及装置

1.1.1 试件制备

试件采用取自鄂尔多斯盆地东南缘大宁-吉县地区的天然煤岩加工而成。取样层位属于二叠系山西组 5 号煤层,该地区煤岩内生裂隙发育,变质程度中等,属于焦煤。由于煤岩中裂隙发育程度较高,且性质较脆容易碎裂掉块,因此将其加工成试验要求的标准尺寸立方体难度较大。为了克服这一困难,采用大型岩石切割机协助加工,将原岩切割至适当大小,然后在煤块外部浇铸水泥包裹层,用来填补加工过程中由于掉块形成的不规则表面,使试件整体外形尺寸满足试验要求(试件整体外形尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm),同时包裹层还能在试件的搬运过程中起到保护层的作用。

在试件制作过程中,根据取样地点实际地层天然裂缝产状特征,将煤岩调整为层理面与水平面平行,面割理和端割理分别平行于试件侧面外表面。试件外形尺寸及内部形态示意图如图 1 所示。

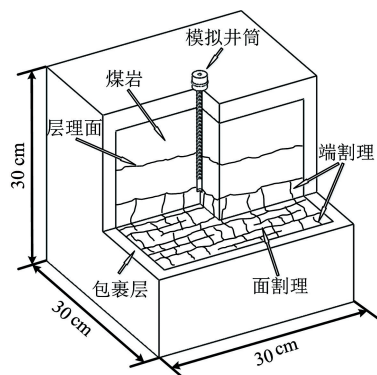


图 1 试件示意图

Fig. 1 Schematic drawing of specimen

1.1.2 压裂液

水力压裂试验中,为了便于试验结束后观察水力裂缝的形态及范围尺寸,常采用在压裂液中添加染色剂的方法实现裂缝示踪。对于不含复杂天然裂缝的模拟试件或只产生单条水力裂缝的模拟试验,该方法可以满足试验要求。但是,对于煤岩等天然裂缝发育程度较高的岩石,有时仅靠染色剂很难识别出微小水力裂缝,难以区分天然裂缝与水力裂缝。为此,在本研究中使用荧光粉作为示踪剂,制作压裂液。采集试验结果时,经过紫外线灯照射,荧光粉可清晰地显示出水力裂缝的范围,尤其可以显示出肉眼无法观察到的细微裂缝。

1.1.3 测试装置系统

采用的模拟压裂试验装置是中国石油大学(北京)岩石力学实验室设计组建的一套大尺寸真三轴模拟试验系统^[19]。模拟压裂试验系统由大尺寸真三轴试验架、MTS 伺服增压泵、数据采集系统、稳压源、油水隔离器及其他辅助装置组成。模拟压裂过程中 MTS 数据采集系统可自动监测和记录泵注压裂液过程中压力、排量和注液体积,并以时间-排量曲线、时间-压力曲线、排量-压力曲线的方式进行实时输出显示,从而对裂缝扩展过程进行监测。

1.2 试验方案

水力压裂模拟试验要求模拟地层条件,其中关键因素之一是地层应力的分布。取样地区水平地应力差为 3~6 MPa,本试验不考虑不同水平应力差对水力裂缝的影响,因此试验中水平应力差统一为 3 MPa,其中沿面割理方向施加最大水平主应力,研究在该工况下煤岩水力裂缝的扩展情况。在水力压裂施工过程中压裂液性质及泵注排量是重要

的施工参数,为了考察不同压裂液黏度及泵注排量条件下水力裂缝在煤岩中的扩展行为及水力裂缝形态、分布情况,选用两种不同黏度的压裂液及 3 种注液速率。具体试验参数见表 1。为了模拟地层含水条件,同时减小滤失,在施加围压至预设值后以低注液压力(<0.8 MPa)向试件内部进行预注水。

表 1 试验参数设置

Table 1 Summary of experimental parameters					
试件 编号 <i>n</i>	垂向应力 σ_v / MPa	最大水平 主应力 σ_H /MPa	最小水平 主应力 σ_h /MPa	注液速率 Q /(mL· min ⁻¹)	压裂液黏 度 μ / (mPa·s)
1	10	5	2	10	133
2	10	5	2	20	133
3	10	5	2	30	133
4	10	5	2	10	65
5	10	5	2	20	65
6	10	5	2	30	65

2 试验结果及其分析

2.1 试验结果

试验过程中观察到水力裂缝延伸压力为 1.5 ~ 5.0 MPa,且延伸压力与注液速率呈正比关系。裂缝延伸压力随注液时间增加而持续增大。部分试件测试过程中未观察到显著的破裂压力,而另一些在测试中观察到了二次破裂现象。

试验结束后,沿裂缝面将试件劈裂,观察形成的水力裂缝形态。发现大部分水力裂缝均由相互连通的割理构成,而不是单一的平直裂缝。典型试验结果如图 2 所示。

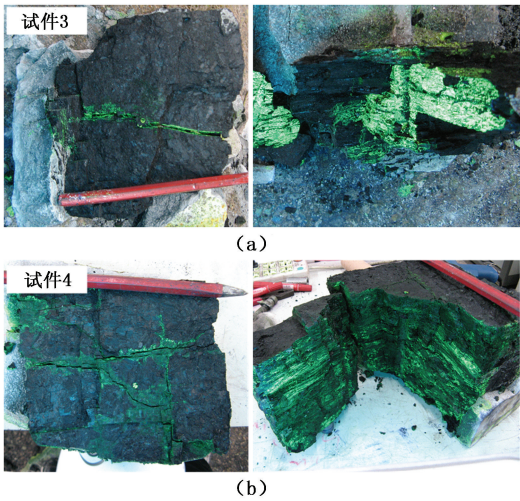


图 2 试件 3、4 试验结果

Fig. 2 Photo results of specimen 3 and 4

由图 2(a)发现,在高注液速率及高压压裂液黏度条件下,试件 3 只形成了一条沿最大水平主应力方

向的垂直裂缝。裂缝在沿水平方向延伸过程中受割理影响,左翼末端出现阶梯状偏移错动,右翼裂缝较为平直。在沿垂直方向扩展过程中,受层面影响裂缝在层间出现条带状凹凸,且右翼裂缝缝高明被限制在层理面之间。试件 3 中产生的水力裂缝整体表现为缝面凹凸起伏、粗糙不平的平直垂直裂缝。

由图 2(b)观察发现,在低注液速率及低压压裂液黏度条件下,试件 4 中形成了一个纵横交错的复杂裂缝网络系统。在水平方向延伸过程中水力裂缝出现分支及偏移,并不断连通面割理与端割理,从而形成了以沿面割理方向延伸的裂缝为主裂缝,带有大量沿端割理方向的分支缝的裂缝系统。尤其值得注意的是,由于水力裂缝沿着面割理与端割理之间交替行进的阶梯状路径延伸,当对远离井筒处的裂缝进行反向追溯时,某些裂缝不与井筒相交,这与 Diamond 和 Oylar^[6]通过巷道开挖观察到的结果相一致。在沿垂直方向延伸过程中,试件 4 的结果与试件 3 相一致,裂缝面由于受层面影响在层间出现条带状凹凸。试件 4 中产生的水力裂缝整体表现为缝面粗糙不平、水平面内纵横交错的复杂垂直裂缝网络。

2.2 注液速率对水力裂缝形态的影响

对各个试件中部经过裸眼段的水平剖面上水力裂缝的分布形态进行了数字化处理,处理结果如图 3 所示。

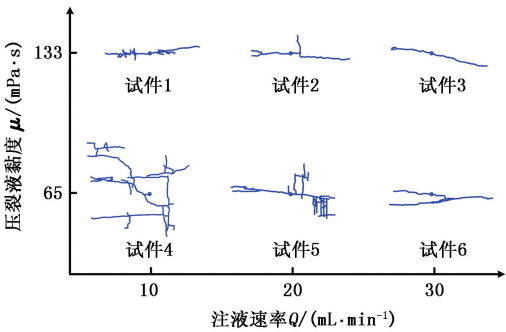


图 3 水力裂缝分布形态图

Fig. 3 Schematic drawing of hydraulic fracture geometry

从图 3 可知,在相同试验条件下,随着注液速率增加水力裂缝分支及偏移现象减少,裂缝形态由复杂逐渐转变为单一。C. J. de Pater 等^[20]曾使用含热缩裂缝的水泥块试件研究了注液速率对裂缝性地层中水力裂缝扩展的影响,发现在高流速下易产生新裂缝,而低流速条件下则容易使天然裂缝张开。虽然在一定程度上这些结论与本研究中所观察到的结果相一致,但由于煤岩自身独特的力学及结构特性,

水力压裂所得到的水力裂缝系统也具有一些独特的性质。

(1) 煤岩中水力裂缝大多数沿面割理或端割理延伸,少数裂缝为煤岩基质破裂形成的新裂缝,且新裂缝在与割理相交时易沿割理扩展或偏移。

(2) 由于煤岩不仅具有宏观层理且在很小的厚度范围内也具有因煤岩成分不同而形成的微厚条带,煤层中规模较小的割理沿高度方向往往被局限在煤岩微厚条带中。水力裂缝在沿垂向延伸时在层面处会发生偏移,从而使得裂缝表面呈现出条带状凹凸,再加上因割理造成的沿水平方向的错动,煤层水力裂缝表面往往较为粗糙。

(3) 在低注液速率(10 mL/min)条件下煤岩中会产生多条沿面割理方向延伸的平行主裂缝,各主裂缝之间由端割理相互连通,沿主裂缝两侧还有大量沿端割理的分支裂缝。

(4) 在中高注液速率($20、30\text{ mL/min}$)条件下煤岩中产生单条主水力裂缝,且主裂缝两侧分支裂缝随注液速率增加而减少,裂缝更加平直,缝面更为平整。

2.3 压裂液黏度对水力裂缝形态的影响

压裂液黏度是控制流体滤失的主要因素,直接影响到液体的造缝能力。在同一地层条件、同一排量下,黏度越高,携砂性能越好,滤失系数越低,压裂液效率越高,因此可获得较大的水力裂缝面积,且裂缝缝宽大,利于形成高导流裂缝。但是,压裂液黏度

并非越高越好,黏度太高也有很多弊端:易使摩擦升高,造成高施工压力,不利于泵注;缝高容易失去控制,导致压裂失败;对地层污染加重,降低压裂效果。因此,为了获得最佳的压裂效果,施工中需要对压裂液黏度进行优化设计。

选取两种黏度的压裂液进行试验,对比黏度对水力裂缝形态的影响。对于基质渗透率较低的煤岩,压裂液主要通过煤岩中的割理系统滤失。在低黏度条件下,由于压裂液大量滤失到割理系统中,割理内部液体压力增加使得割理缝隙增大,随着液体压力不断增加,与水力裂缝相交的割理不断开启,最终形成复杂的裂缝系统。增大压裂液黏度之后,流体滤失减小,水力裂缝缝宽有所增加,但分支裂缝减少,裂缝形态相对简单,为常规平直单裂缝。

从图3可见,压裂液黏度对水力裂缝形态影响显著。在相同试验条件下,随着压裂液黏度增加,水力裂缝复杂程度大大降低,尤其是在黏度较高($133\text{ mPa}\cdot\text{s}$)条件下,即使注液速率较低,主水力裂缝两侧也只有少量分支裂缝,且分支裂缝延伸长度较短。

2.4 压力曲线特征分析

图4为压裂液黏度 $65\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 条件下不同注液速率时各试件的压力曲线。压力曲线可反映出在压裂液作用下试件中水力裂缝的产生及天然裂缝发生的变化,对其进行适当的分析和解释有助于了解压裂过程中一些无法直接观测到的现象。

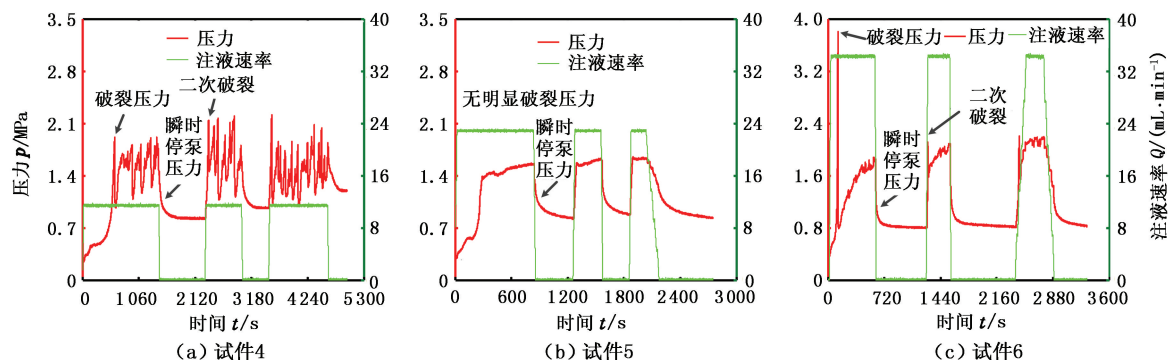


图4 试验压力曲线

Fig.4 Experimental pressure profile

观察图4(a)发现,试件4破裂压力显著,在整个水力裂缝延伸过程中压力波动频繁,且波动幅度大。结合图3所示水力裂缝分布形态图可知,注液过程中水力裂缝不断连通煤岩割理,在泵注压力和液体滤失作用下,临近主水力裂缝的割理频繁张开、闭合,导致压力曲线上表现出频繁的大幅波动。而对于试件5(图4(b)),与试件4相比压力变化缓

慢,压力曲线平缓。结合试件5水力裂缝分布形态图可知,虽然随着压裂液的不不断注入有一些分支裂缝生成,但是液体注入与滤失之间达到了平衡状态,使得裂缝可以稳定扩展。在试件5的压裂过程中未观察到显著的水力裂缝破裂点,考虑到煤岩内部存在的大量割理,结合试验后对井筒附近的观察结果进行分析认为,在钻孔过程中,井眼与煤岩中的割理

相交,受钻孔机械扰动井壁处割理开启,在压裂过程中压裂液渗入井壁处开启裂缝中,裂缝逐渐张开,因此并未出现显著的破裂压降。与此相反,试件 6 井筒未与割理相交,因此表现出显著的破裂压力点(图 4(c))。试件 6 水力裂缝右翼延伸一段距离后发生偏移,与一条面割理连通,形成一条与初始裂缝平行、贯穿煤岩的垂直裂缝。

对比各试件压力曲线还发现,所有试验中的裂缝延伸压力均随注液时间增加而持续增大。在对同一试件进行第二次注液时,试件 4 及试件 6 均出现了显著的二次破裂现象,试件 5 的延伸压力也高于第一次注液时的延伸压力。造成这些现象的原因一方面是由于随着裂缝延伸流体在裂缝中流动的摩阻增大,另一方面是由于暂时停止注液时压裂液会渗透到割理系统中,当再次开始注液时多条裂缝会同时开始扩展。此外,水力裂缝产生时会伴随有煤粉生成,随着流体滤失,煤粉会聚集在裂缝尖端,这也会造成注液压力升高。

图 5 为大宁-吉县地区 X 井的压裂施工曲线。

压裂液为活性水,压裂过程中排量保持在 $4\text{ m}^3/\text{min}$ 。与试验结果对比发现,X 井压力曲线特征与试件 4 测试结果具有相似特征,施工过程中压力波动显著(最大压力突降值约 5 MPa),表明水力裂缝延伸过程中不断连通煤岩割理,在泵注压力和液体滤失作用下割理张开,形成分支裂缝,压裂产生了复杂的水力裂缝系统。

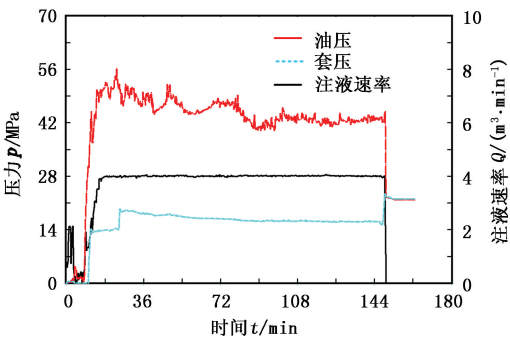


图 5 现场施工压力曲线

Fig.5 Field treatment pressure profile

表 2 中列出了不同试件的试验结果。

表 2 试验结果

Table 2 Experimental results

试件 编号 n	注液速率 $Q/$ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	压裂液黏度 $\mu/(\text{mPa} \cdot \text{s})$	$Q\mu/$ ($10^{-9}\text{ N} \cdot \text{m}$)	破裂压力 p_b/MPa	平均注液压力 p_e/MPa	瞬时停泵压力 $p_{\text{ISI}}/\text{MPa}$
1	10	133	22.167	2.764	2.205	1.834
2	20	133	44.333	2.682	2.523	1.771
3	30	133	66.500	5.502	4.432	3.564
4	10	65	10.833	1.912	1.534	1.096
5	20	65	21.667	1.385	1.506	1.154
6	30	65	32.500	3.805	1.496	1.269

综合考虑所有试验结果,注液速率 Q 和压裂液黏度 μ 对施工压力的影响可以用这两个参数的乘积 $Q\mu$ 的形式来表示。第一次注液阶段裂缝稳定扩展过程中的注液压力 p_e 及瞬时停泵压力 p_{ISI} 与 $Q\mu$ 之间的关系如图 6 所示。井眼与煤岩割理之间的空间关系对破裂压力有显著影响,所以在此未对破裂压力 p_b 与 $Q\mu$ 之间的关系进行探讨。

由图 6 可知,注液压力及瞬时停泵压力均随 $Q\mu$ 值增加而呈非线性增大趋势,且注液压力的增加速率略大于瞬时停泵压力的增加速率。

对 p_e 及 p_{ISI} 与 $Q\mu$ 之间的关系进行多项式拟合,得

$$p_e=0.0012(Q\mu)^2-0.0426Q\mu+2.0017,$$

$$p_{\text{ISI}}=0.001(Q\mu)^2-0.0351Q\mu+1.5665.$$

压裂施工过程中的瞬时停泵压力消除了摩阻的影响,代表了裂缝的延伸压力。由此可见,提高注液

速率或压裂液黏度不仅会导致液体摩阻增加,还会增大水力裂缝延伸压力,从而导致压裂作业施工压力显著增大。

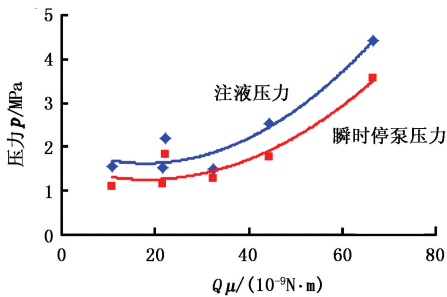


图 6 特征压力与 $Q\mu$ 值关系

Fig.6 Relationship between characteristic pressures and $Q\mu$ value

另外,瞬时停泵压力是小型压裂中用于估算闭合压力的一个重要参数。闭合压力是缝内流体作用在裂缝壁面的平均压力,它不同于地层的最小主应

力,但与最小主应力有关。在均质、单层内进行压裂时,闭合压力就等于压裂层的最小主应力;当裂缝穿过多个非均质层时,由于各层或各层内的最小主应力不同,作用于裂缝高度剖面上的应力也不同,这时裂缝的闭合压力就是穿过各层的最小主应力的平均值。在压裂设计中,裂缝闭合压力值关系到支撑剂类型的选择,还影响裂缝导流能力、压裂后产量的预测及经济净收益等参数的计算,最终影响到压裂设计方案的优选。

通过分析试验所得瞬时停泵压力结果可知,高 Q_{μ} 值会导致瞬时停泵压力增大,从而使得闭合压力估算值偏高,进而影响压裂设计方案优选。因此,建议在小型压裂中采用低黏度压裂液及低注液速率进行测试。

3 讨 论

煤层气井压裂施工中,为了降低储层伤害,减少环境污染,常采用低黏度的活性水或清洁压裂液进行施工。在压裂液黏度较低的情况下,要产生单条长裂缝就需要增大注液速率,而这也是煤层气井压裂施工中常采用的方法。但是,考虑到煤层独特的割理系统及煤层气产出的“解吸—扩散—渗流”理论,要想提高煤层气产出效率,不仅需要具有高导流能力的裂缝通道,还需要尽可能多的连通煤层中的割理系统,从而增大单井的排采体积。因此,常规的单条水力裂缝已经无法满足煤层气生产的要求,具有高导流能力的网络裂缝更适合于煤层气井压裂设计的要求。

根据本文中试验结果可知,由于煤岩割理十分发育,且层理显著,在很小的厚度范围内也存在煤岩分层,因此煤层水力压裂裂缝断面十分粗糙,加之水力裂缝在割理及层理面处的偏移,使得水力裂缝在施工结束后难以完全闭合,能够产生“自支撑”,有利于保持裂缝张开及其导流能力。注液速率越低,压裂液黏度越低,水力裂缝表面越粗糙,越有利于裂缝保持张开。因此,施工过程中可以采用混合压裂的方法,在压裂初始阶段采用高黏度压裂液(如清洁压裂液),在井筒附近形成较宽的单条主裂缝;随后采用低黏度压裂液(如活性水压裂液),在距离井筒一定距离的位置形成复杂裂缝网络,这样既可以提高水力裂缝与天然裂缝的连通,增大改造体积,同时还可提高水力裂缝与井筒的连通性,达到优化裂缝形态,提高压裂效果的目的。

关于水力压裂模拟试验中的相似准则,国内外

学者均进行了研究^[21-22],但这些研究成果均基于各向同性的线弹性体及理想的椭圆形水力裂缝面的假设,对于非均质及非连续性较强的煤层,这些相似准则不再适用。因而,能够将材料性质及水力裂缝形态均十分复杂的煤层水力压裂试验结果定量地放大到实际现场尺寸的压裂施工中的相似准则还有待进一步研究。虽然本文中所得结果不能直接定量地应用于现场施工,但这些定性的结论对于改进煤层压裂设计具有重要的指导作用。

4 结 论

(1)煤岩中水力裂缝大部分由割理扩展构成,少数裂缝为煤岩基质破裂形成的新裂缝,且新裂缝在与割理相交时,易沿割理扩展或偏移。受割理及层理影响,煤层水力裂缝表面较粗糙。

(2)相同试验条件下,随着注液速率增加,煤层水力裂缝分支及偏移现象减少,裂缝形态由复杂逐渐转变为单一。低注液速率条件下天然裂缝容易开启,多条主裂缝与大量分支裂缝形成以最大水平主应力方向为主导方向的复杂裂缝网络系统;高注液速率条件下易产生新裂缝,形成单条水力裂缝,裂缝平直,缝面平整。

(3)压裂液黏度对水力裂缝形态影响显著,相同试验条件下,随着压裂液黏度增加,水力裂缝复杂程度降低。低黏度条件下,与水力裂缝相交的割理易开启,形成复杂的裂缝系统;随着压裂液黏度增大,分支裂缝减少,裂缝形态趋于简单,易形成常规单条平直裂缝。

(4)提高注液速率或压裂液黏度导致液体摩阻增加,水力裂缝延伸压力增大,从而导致压裂施工压力显著增大。

(5)对注液速率及压裂液黏度进行合理控制,可先在井筒附近生成平直裂缝,后在远离井筒处生成复杂裂缝网络,有利于增大煤层气单井排采体积。

参考文献:

- [1] YUN Jian, XU Fengyin, LIU Lin, et al. New progress and future prospects of CBM exploration and development in China[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(3): 363-369.
- [2] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. 石油学报, 2012, 33(s1): 149-158.
WANG Yonghui, LU Yongjun, LI Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(s1): 149-158.

- [3] SOLANO-ACOSTA W, MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A. Cleats and their relation to geologic lineaments and coalbed methane potential in Pennsylvanian coals in Indiana [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 72(3/4): 187-208.
- [4] MOORE T A. Coalbed methane: a review [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 101: 36-81.
- [5] MAVKO B B, HANSON M E, NIELSEN P E, et al. Hydraulic fracture model for application to coal seams: the 27th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Tuscaloosa, AL, 1986 [C]. [S. L.]: American Rock Mechanics Association.
- [6] DIAMOND W P, OYLER D C. Effects of stimulation treatments on coalbeds and surrounding strata-evidence from underground observations, RI 9083 [R]. U. S. Bureau of Mines, 1987.
- [7] MORALES R H, MCLENNAN J D, JONES A H, et al. Classification of treating pressures in coal fracturing: the 31th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Golden, CO, 1990 [C]. [S. L.]: American Rock Mechanics Association.
- [8] ABASS H H, VAN DOMELEN M L, EL RABAA W M. Experimental observations of hydraulic fracture propagation through coal blocks [R]. SPE 21289, 1990: 239-252.
- [9] HOLDITCH S A, ELY J W, SEMMELBECK M E, et al. Hydraulic fracturing accelerates coalbed methane recovery [J]. *World Oil*, 1990, 211(5): 41-45.
- [10] ABASS H H, HEDAYATI S, KIM C M. Mathematical and experimental simulation of hydraulic fracturing in shallow coal seams [R]. SPE 23452, 1991.
- [11] PALMER I D, SPARKS D P. Measurement of induced fractures by downhole TV camera in black Warrior Basin coalbeds [R]. SPE 20660, 1991.
- [12] PALMER I D, LAMBERT S W, SPITLER J L. Coalbed methane well completions and stimulations: hydrocarbons from coal [M]. Tulsa: AAPG, 1993: 303-339.
- [13] JEFFREY R G, VLABOVIC W, DOYLE R P, et al. Propped fracture geometry of three hydraulic fractures in Sydney Basin coal seams [R]. SPE 50061, 1998.
- [14] 邓广哲, 王世斌, 黄炳香. 煤岩水压裂缝扩展行为特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(20): 3489-3493.
DENG Guangzhe, WANG Shibin, HUANG Bingxiang. Research on behavior character of crack development induced by hydraulic fracturing in coal-rock mass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3489-3493.
- [15] PALMER I D, MOSCHOVIDIS Z A, CAMERON J R. Coal failure and consequences for coalbed methane wells [R]. SPE 96872, 2005.
- [16] 陈振宏, 王一兵, 杨焦生, 等. 影响煤层气井产量的关键因素分析——以沁水盆地南部樊庄区块为例 [J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 409-412, 416.
CHEN Zhenhong, WANG Yibing, YANG Jiaosheng, et al. Influencing factors on coal-bed methane production of single well: a case of Fanzhuang Block in the south part of Qinshui Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(3): 409-412, 416.
- [17] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(1): 65-69.
TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(1): 65-69.
- [18] 杨焦生, 王一兵, 李安启, 等. 煤岩水力裂缝扩展规律试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(1): 73-77.
YANG Jiaosheng, WANG Yibing, LI Anqi, et al. Experimental study on propagation mechanism of complex hydraulic fracture in coal-bed [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 73-77.
- [19] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(s1): 868-872.
CHEN Mian, PANG Fei, JIN Yan. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(s1): 868-872.
- [20] de PATER C J, BEUGELSDIJK L J L. Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock: Alaska Rocks 2005: The 40th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Anchorage, AK, 2005 [C]. [S. L.]: American Rock Mechanics Association.
- [21] de PATER C J, CLEARY M P, QUINN T S, et al. Experimental verification of dimensional analysis for hydraulic fracturing [J]. *SPE Production & Operations*, 1994(11): 230-238.
- [22] 柳贡慧, 庞飞, 陈治喜. 水力压裂模拟试验中的相似准则 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2000, 24(5): 45-48.
LIU Gonghui, PANG Fei, CHEN Zhixi. Development of scaling laws for hydraulic fracture simulation tests [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2000, 24(5): 45-48.