

文章编号: 1001-1986(2019)02-0051-07

不同煤体结构煤的水力压裂裂缝延伸规律

贾奇锋¹, 倪小明^{1,2}, 赵永超¹, 曹运兴³

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000; 3. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 查明不同煤体结构煤水力压裂时裂缝延伸规律能为合理井网部署奠定基础。以沁水盆地柿庄区块为研究对象, 对钻井煤心裂隙进行观测, 划分出 4 种裂隙发育程度煤。基于岩体力学理论, 建立了水力压裂过程中裂缝尖端应力场计算模型和水力裂缝能否穿过天然裂隙的判断准则。根据煤层气井实测资料, 验证了理论分析的可靠性, 得出了不同煤体结构煤的水力压裂裂缝延伸规律。结果表明: 考虑诱导应力前后, 2 组天然裂隙发育煤的水力裂缝延伸规律不同, 随着缝长增加, 诱导应力随之增大, 水力裂缝单一延伸方向变为双向延伸; 1 组天然裂隙发育煤的发育方向与最大主应力方向夹角较小, 导致考虑诱导应力前后水力裂缝的延伸方向变化不明显, 整体延伸趋于天然裂隙发育方向; 在粒状偶见及粉状无裂隙发育煤中, 水力裂缝总是沿着最大主应力方向延伸。研究成果为该区不同应力和裂隙发育下井网合理布置提供了理论依据。

关键词: 裂缝延伸; 柿庄; 水力裂缝; 诱导应力; 天然裂隙; 沁水盆地

中图分类号: TD353 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.009



Fracture extension law of hydraulic fracture in coal with different structure

JIA Qifeng¹, NI Xiaoming^{1,2}, ZHAO Yongchao¹, CAO Yunxing³

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region Henan Province, Jiaozuo 454000, China; 3. College of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: To find out the fracture extension law of coal hydraulic fracturing with different coal body structures can lay a foundation for reasonable well pattern deployment. Taking Shizhuang block of Qinshui basin as the research object, the fracture of coal core was observed, and four kinds of coal with fracture development degree were divided. Based on the theory of rock mass mechanics, the stress field calculation model of fracture tip and the judgment criterion of whether hydraulic fracture can pass through natural fracture in hydraulic fracturing process were established. According to the measured data of CBM wells, the reliability of theoretical analysis was verified, and the fracture extension law of hydraulic fracturing of coal with different coal body structures was obtained. The results show that the hydraulic fracture extension of two groups of natural fracture development is different before and after the induced stress is considered. With the increase of fracture length, the induced stress increases, and the hydraulic fracture extends from single direction to bidirectional direction. For a group of coal with natural fracture development, because the angle between the development direction of natural fracture and the direction of maximum principal stress is small, the extension direction of hydraulic fracture before and after considering induced stress is not obvious, and the overall extension tends to the natural fissure development direction. Hydraulic fractures always extend along the direction of maximum principal stress for granular occasional and powdery fractured coal. The research results provide a theoretical basis for the reasonable arrangement of the well network under different stress and fracture development in this area.

Keywords: crack extension; Shizhuang; hydraulic fracture; induced stress; natural fracture; Qinshui basin

收稿日期: 2018-05-20

基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX05064-002)

Foundation item: National Science and Technology Major Project(2017ZX05064-002)

第一作者简介: 贾奇锋, 1994 年生, 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 从事煤系储层改造方面的研究。E-mail: 1322128315@qq.com

引用格式: 贾奇锋, 倪小明, 赵永超, 等. 不同煤体结构煤的水力压裂裂缝延伸规律[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 51-57.

JIA Qifeng, NI Xiaoming, ZHAO Yongchao, et al. Fracture extension law of hydraulic fracture in coal with different structure[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 51-57.

煤储层改造中水力压裂裂缝延伸特征将直接影响着煤层气井的水压传播规律及气体运移产出路径^[1]。煤层天然裂隙发育程度、地质构造部位、应力大小等的不同,可能导致采用相同的压裂工艺会产生不同的裂缝延伸规律。关于压裂裂缝延伸规律的研究,国内外研究者主要采用了实验室模拟测试法、FDEM-Flow 和 RFPA 等软件模拟法、扩展有限元与白光散斑实验实时跟踪法等。实验室主要是通过在大尺寸真三轴实验系统模拟现场条件,对制作的煤样进行压裂裂缝延伸实验^[2-5],结果表明,水力裂缝和天然裂隙的逼近角度是影响水力裂缝走向的主要因素,逼近角度越大,水力裂缝更容易穿过天然裂隙。但实验条件要求苛刻,制样时容易造成样品损坏,观测范围有限,无法考虑诱导应力对裂缝扩展的影响。数值模拟方法是将影响裂缝扩展的各参数赋予各单元^[6-10],认为裂缝的起裂、延伸主要由最大主应力控制。当侧压系数 $\lambda < 1$ 时,主要产生竖直裂隙,且裂隙在拉应力集中的区域起裂,该方法能够很好地反映材料的非均质性,理论上较好地反映了裂缝延伸过程,但由于现场实际条件与理论分析存在一定差异,使得部分模拟结果与现场情况差距较大。扩展有限元与白光散斑实验实时跟踪法是在有限元框架下引入预设虚节点并利用白光散斑对扩展裂缝延伸实时跟踪^[11-13],结果表明,裂缝层形态主要受到界面层力学性能的影响,当储层与围岩层性质较接近时裂缝穿过界面扩展方向变化较小,且扩展速率变化也不大^[14],该方法实现了储层中裂缝复杂变化扩展的研究,提供了较为直观的裂缝扩展方式,但由于该方法是通过单元边界与非连续边界相协调并在相应位置设置双节点实现的,裂缝的扩展极大程度上受到了人为的限制。

以往研究主要是基于原始地应力下的数值模拟或实验室实测研究,且没有考虑诱导应力对水力裂缝延伸规律的影响,而水力压裂过程中随着缝长的变化,产生的诱导应力会导致应力差值发生变化,进而对裂缝延伸方位产生影响。为了研究不同裂隙发育程度煤水力压裂整个过程裂缝延伸规律,笔者以柿庄区块 3 号煤层为研究对象,在对不同裂隙发育程度煤划分基础上,建立了水力裂缝穿过天然裂隙、沿着天然裂隙延伸判断准则,考虑压裂过程中诱导应力变化,得出了不同裂隙发育程度煤水力压裂过程裂缝延伸变化规律,以期对煤储层合理井网布置研究奠定基础。

1 柿庄区块不同煤体结构煤裂隙发育程度划分

柿庄区块是沁水盆地中南部煤层气开发活跃的区块之一。该区块整体为西倾的单斜构造,地层由老到新依次为古生界二叠系,中生界三叠系及新生界古近系、新近系和第四系。目前主要开发 3 号煤层。3 号煤埋深一般 496~1 260 m,平均 780 m;煤层厚度一般 3~11 m,平均 6.39 m;含气量一般 4.1~23.3 m³/t,从资源条件和埋深看,较适合进行煤层气开发。3 号煤层形成后,依次经历了印支期、燕山期、喜马拉雅期构造运动作用,煤层主要以碎裂煤、碎粒煤为主,小范围内煤层变形差异较大。大量研究表明,煤层煤体结构不同,裂隙发育程度不同,水力压裂时裂缝延伸可能存在差异。通过对研究区 20 口煤层气参数井的煤体结构进行观测描述,并对取样煤心进行 GSI 标定,建立测井参数与 GSI 的关系模型,即:

$$GSI = 72.9DEN + 1.2GR - 6.9CALX + 6.5CALY - 77.6 \quad (1)$$

式中 GSI 为地质强度指标^[15]; DEN 为视密度, g/cm³; GR 为自然伽马, API; CALX 和 CALY 分别为井径 X 和井径 Y, cm。

依据式(1)将煤层裂隙发育程度分为 4 类,即: 2 组天然裂隙发育煤(45≤GSI<60)、1 组天然裂隙发育煤(GSI≥60)、粒状偶见裂隙发育煤(30≤GSI<45)和粉状无裂隙发育煤(GSI<30)。部分煤岩裂隙描述见表 1,代表性裂隙发育煤心见图 1,典型煤层气井测井曲线与 GSI 对应值见图 2。

2 水力压裂时裂缝能否穿过天然裂隙判断准则

水力压裂时,压裂裂缝能否沿天然裂隙延伸,主要取决于剪切失稳、拉张破坏所需力的大小。压裂过程中已形成裂缝的诱导应力与原有应力的耦合作用,导致压裂裂缝形成条件可能发生变化,进而导致裂缝延伸方向有所不同。为了更准确地计算压裂形成了一定长度裂缝后裂缝延伸方向,首先需对压裂裂缝引起的诱导应力进行表征,进而提出水力压裂时裂缝能否穿过天然裂隙的判断准则。

2.1 压裂裂缝周边诱导应力计算模型

水力压裂过程中已经形成的裂缝,其周围产生的诱导应力与原始地应力共同决定了煤岩中的应力状态。同时建立平面直角坐标系和极坐标系如图 3 所示,则极坐标系内任意一点 P(d,α)的受力状态为:

表 1 部分煤岩裂隙描述结果
Table 1 Results of fracture description of some coal and rock

井号	取心段/m	颜色、层理和粒度	煤体结构	煤岩裂隙描述
TS-006	558.50~558.80	黑色，金刚光泽。煤岩成分以亮煤为主，含镜煤条带，带宽0.5~0.8 cm；以厘米级块状为主，块长1.0~7.0 cm。棱角状，阶梯状断口	碎裂煤	发育2组裂隙，主裂隙5~8条/5 cm，长0.8~3.5 cm，次裂隙与主裂隙垂直，7~9条/5 cm，长0.2~1.5 cm
TS-004	766.03~766.28	黑色，金刚光泽。煤岩成分以亮煤为主，厘米级块状居多，块长1.0~6.5 cm，板状、六面体状、楔状断口	原生结构煤	发育1组裂隙，7~8条/4 cm，长3~6 cm，裂隙无填充
SN-005	891.00~891.35	黑色，金刚光泽。煤岩成分以亮煤为主。以厘米级块状为主，块的大小在1~3 cm，毫米级颗粒少量。层理不清晰，板状断口	碎粒煤	裂隙不发育
SN-003	1 087.47~1 088.07	黑色，玻璃光泽。以粉末状为主，少量为块状(大小1~2 cm)。煤体疏松，手捏易碎	糜棱煤	裂隙不发育

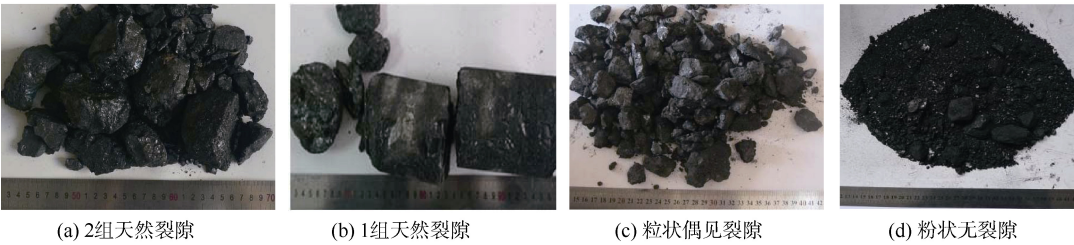


图 1 不同裂隙发育程度煤样

Fig.1 Coal sample with different fracture development degree

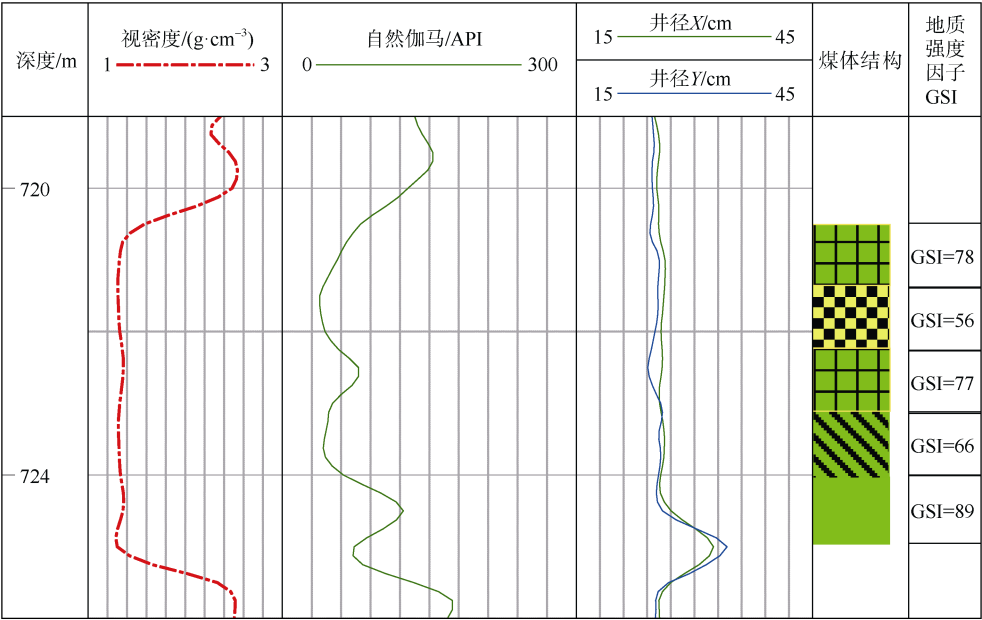


图 2 典型煤层气井测井曲线与 GSI 对应值

Fig.2 Well logs and corresponding GSI values of typical CBM well

$$\begin{cases} \sigma_a = \sigma_{xx} \cos^2 \alpha + \sigma_{yy} \sin^2 \alpha + \tau_{yx} \sin \alpha \cos \alpha \\ \tau_a = \sqrt{(\sigma_{xx} \cos \alpha + \tau_{yz} \sin \alpha)^2 + (\sigma_{yy} \sin \alpha)^2 - \sigma_a^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 σ_a 为 P 点的原始地应力，MPa； τ_a 为 P 点的诱导应力，MPa； σ_{xx} 、 σ_{yy} 分别为 P 点在 x 轴和 y 轴方向上的应力，MPa； τ_{yx} 为 P 点在 x 轴方向的剪应力，MPa； τ_{yz} 为 P 点在 z 轴上的剪应力。其中：

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \Delta\sigma_{xx} + \sigma_h \cos^2 \beta + \sigma_H \sin^2 \beta \\ \sigma_{yy} = \Delta\sigma_{yy} + \sigma_H \cos^2 \beta + \sigma_h \sin^2 \beta \\ \tau_{yx} = \Delta\tau_{yx} + (\sigma_H - \sigma_h) \sin(\frac{\pi}{2} - \beta) \cos(\frac{\pi}{2} - \beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中 σ_H 、 σ_h 分别为地层原始最大、最小主应力，MPa； $\Delta\sigma_{xx}$ 、 $\Delta\sigma_{yy}$ 、 $\Delta\tau_{yx}$ 分别为 P 点水力裂缝的诱导

应力, MPa; β 为原始最大主应力 σ_H 和 y 轴的夹角, ($^\circ$)。

其中, 水力裂缝诱导应力的计算属于二维平面应变问题^[16], 则水力裂缝周围诱导应力为:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{xx} = -p_{\text{net}} \left[\frac{r}{\sqrt{r_1 r_2}} \cos\left(\theta - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) + \frac{a^2 r}{\sqrt{(r_1 r_2)^3}} \sin\theta_1 \sin\left(\frac{3}{2}\theta_1 + \frac{3}{2}\theta_2\right) - 1 \right] \\ \Delta\sigma_{yy} = -p_{\text{net}} \left[\frac{r}{\sqrt{r_1 r_2}} \cos\left(\theta - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) - \frac{a^2 r}{\sqrt{(r_1 r_2)^3}} \sin\theta \sin\left(\frac{3}{2}\theta_1 + \frac{3}{2}\theta_2\right) - 1 \right] \\ \Delta\tau_{yx} = -p_{\text{net}} \left[\frac{a^2 r}{\sqrt{(r_1 r_2)^3}} \sin\theta \cos\left(\frac{3}{2}\theta_1 + \frac{3}{2}\theta_2\right) \right] \end{cases} \quad (4)$$

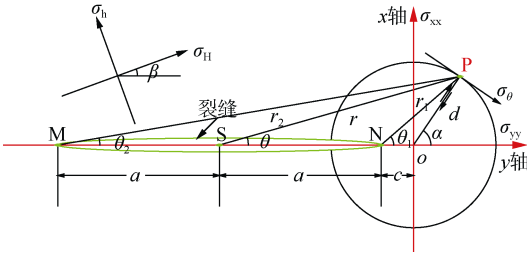


图 3 水力裂缝延伸端部应力分布

Fig.3 Stress distribution at extending end of hydraulic fracture

式中 θ 为受力点 P 和裂缝中点 S 连线与裂缝延伸方向 (y 轴) 的夹角, ($^\circ$); a 为裂缝半长, m; p_{net} 为施工净压力, MPa; θ_1 为受力点和裂缝右端点连线 PN 与裂缝延伸方向 y 轴的夹角; θ_2 为受力点和裂缝左端点连线 PM 与裂缝延伸方向 y 轴夹角。 r 为受力点 P 到裂缝中点 S 的距离; r_1 为受力点 P 到裂缝右端点 N 的距离; r_2 为受力点 P 到裂缝左端点 M 的距离。

根据图 3 所示几何关系, 其中:

$$\begin{cases} r = \sqrt{(a + r_1 \cos\theta_1)^2 + (r_1 \sin\theta_1)^2}, \theta = \arctan \frac{r_1 \sin\theta_1}{r_1 + d \cos\theta_1} \\ r_2 = \sqrt{(2a + r_1 \cos\theta_1)^2 + (r_1 \sin\theta_1)^2}, \theta = \arctan \frac{r_1 \sin\theta_1}{2a + r_1 \cos\theta_1} \end{cases} \quad (5)$$

进而得出压裂裂缝延伸距离 a 后裂缝周围应力大小为:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \sqrt{\tau_{yx}^2 + \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2} \\ \sigma_3 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \sqrt{\tau_{yx}^2 + \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2} \\ \psi = \sin^{-1} \left[\frac{-\tau_{yx}}{\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_3)^2 + \tau_{yx}^2}} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中 σ_1 和 σ_3 分别为局部最大、最小主应力, 当 $\sigma_3 < 0$ 时, σ_3 为局部最大拉应力, MPa; ψ 为最大拉应力方向, 单位是弧度。

2.2 水力压裂能否穿过天然裂缝判断准则

a. 水力压裂裂缝沿天然裂隙延伸判断准则

水力压裂形成的裂缝与天然裂隙斜交时, 天然裂隙面相交点两侧的受力状态不同。假设天然裂隙和水力裂缝延伸方向呈锐夹角的一侧为 A 侧, 钝夹角的一侧为 B 侧, 如图 4 所示。

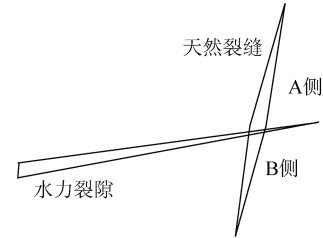


图 4 水力裂缝和天然裂隙相交示意图

Fig.4 Schematic diagram of intersection of hydraulic fracture and natural fracture

当水力裂缝逼近天然裂隙的角度小于水力裂缝穿过天然裂隙所需的临界角度时, 水力裂缝会优先在天然裂隙面发生剪切或者拉张破坏。根据莫尔—库伦剪切破裂准则, 在水力裂缝逼近天然裂隙的过程中, 天然裂隙发生剪切失稳的条件为:

$$|\tau_n| > \tau_0 + K_f(\sigma_n - p_p) \quad (7)$$

式中 K_f 为天然裂隙内摩擦系数; p_p 为地层孔隙压力, MPa; τ_0 为天然裂隙固有抗剪切强度, MPa。

压裂液进入天然裂隙的条件为:

$$p > \sigma_n + \sigma_0 \quad (8)$$

b. 水力压裂裂缝穿过天然裂隙的判断准则

水力压裂裂缝能够穿过天然裂隙, 必须同时满足: 该点处所受最大周向拉应力大于煤岩的抗拉强度; 该点未发生沿天然裂隙面的剪切或者拉张破坏。即:

$$\begin{cases} |\sigma_3| > \sigma_t \\ |\tau_n| < \tau_0 + K_f(\sigma_n - p_p) \\ \sigma_n + \sigma_0 > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中 σ_t 和 σ_0 分别为煤岩和天然裂隙面的抗拉强度, MPa; σ_n 和 τ_n 分别为天然裂隙面所受到的正应力和

剪应力。

3 不同裂隙发育程度下水力压裂裂缝延伸规律

煤层裂隙发育程度不同，天然裂隙走向与水平最大主应力的夹角不同，导致压裂时裂缝延伸方向也有所不同。对柿庄区块节理进行野外实测，得出最大主应力方向约为 NE50°。应用水力压裂曲线与 G 函数^[17]结合法得出水平最大和最小主应力，进而得出 σ_{xx} 和 σ_{yy} 。根据判断准则结合诱导应力，以柿庄区块实际各参数为例，对不同裂隙发育程度煤的裂缝延伸规律进行探讨。

3.1 2 组天然裂隙发育情况下水力压裂裂缝延伸规律

2 组天然裂隙发育煤以柿庄 SZ1 井为例进行分析，该井 2 组裂隙发育方向分别为 NE48°和 NW50°。由该井的水力压裂曲线可知施工压力为 14.35 MPa，结合 G 函数法求得水平最大、最小主应力分别为 20.70 MPa 和 13.84 MPa，进而得出未考虑诱导应力时的原 σ_{xx} 和原 σ_{yy} 分别为 13.31 MPa 和 15.86 MPa。根据式(2)和式(3)，计算出不同裂缝长度下应力情况，结合式(6)—式(8)，得出了不同裂缝延伸长度下的主裂缝延伸方向(表 2)。

表 2 SZ1 井不同延伸长度下水力裂缝与天然裂隙的关系
Table 2 Relationship between hydraulic fracture and natural fracture with different extension length in CBM well SZ1

夹角/ (°)	裂缝半 长/m	原 σ_n / MPa	与天然裂 隙关系	x 方向诱导应 力 $\Delta\sigma_{xx}$ /MPa	y 方向诱导应 力 $\Delta\sigma_{yy}$ /MPa	正应力变化 量 $\Delta\sigma_n$ /MPa	x 方向应力 σ_{xx} /MPa	y 方向应力 σ_{yy} /MPa	正应力 σ_n /MPa	与天然裂 隙关系
2	10	13.31	沿着	6.37	6.36	6.38	6.94	9.50	6.93	沿着
2	20	13.31	沿着	9.41	9.39	9.41	3.90	6.47	3.90	沿着
2	30	13.31	沿着	11.74	11.72	11.75	1.57	4.14	1.57	沿着
2	40	13.31	沿着	13.71	13.68	13.72	0.40	2.18	-0.40	沿着
2	50	13.31	沿着	15.44	15.41	15.45	2.13	0.45	-2.14	沿着
2	60	13.31	沿着	17.01	16.98	17.02	3.70	1.12	-3.71	沿着
80	2	15.78	穿过	2.94	0.21	0.15	10.37	15.65	15.63	穿过
80	5	15.78	穿过	5.20	0.81	0.72	8.11	15.05	15.06	穿过
80	10	15.78	穿过	7.75	1.52	1.39	5.56	14.34	14.39	沿着
80	20	15.78	穿过	11.38	2.53	2.36	1.93	13.33	13.42	沿着
80	30	15.78	穿过	14.16	3.32	3.11	0.85	12.54	12.67	沿着
80	40	15.78	穿过	16.51	3.98	3.74	3.20	11.88	12.04	沿着

由表 2 可知，诱导应力考虑前后水力裂缝延伸情况不同，未考虑诱导应力时，整个压裂过程中水力裂缝延伸趋势为穿过与最大主应力夹角较大的一组天然裂隙，并沿着与最大主应力夹角较小一组天然裂隙延伸。考虑诱导应力后，刚开始压裂时，水力裂缝穿过了与最大主应力夹角较大的天然裂隙，并沿着与最大主应力夹角较小的天然裂隙方向延伸；随着压裂的进行，裂缝延伸方向由单方向逐渐变为双向延伸，即 2 组天然裂隙方向，之后水力裂缝一直沿着 2 组方向延伸，并逐渐在煤层中形成复杂裂缝网络。究其原因为刚开始压裂时由于缝长较短，导致诱导应力较小，进而使水力裂缝穿过与最大主应力夹角较大的一组天然裂隙并沿着与最大主应力夹角较小的另一组天然裂隙方向延伸，随着压裂的进行，水力裂缝缝长增大，促使诱导应力随之增大，导致水力裂缝无法穿过与最大主应力夹角较大的那组天然裂隙，从而水力裂缝延伸方向由单

一方向变为双向延伸。

通过对 SZ1 井进行裂缝监测，发现水力裂缝延伸整体有两种趋势，即 NE48°和 NW50°，且在其他方向未发现裂缝延伸趋势，说明基于诱导应力的变化来判断 2 组天然裂隙发育煤的水力裂缝延伸情况比较符合实际。SZ1 井微地震裂缝监测结果见图 5。

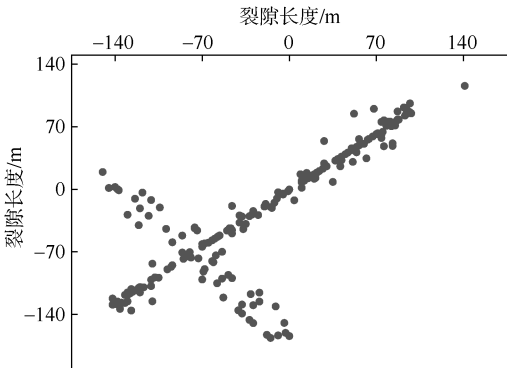


图 5 SZ1 井微地震监测结果
Fig.5 Microseismic monitoring results of CBM well SZ1

3.2 1 组天然裂隙发育情况下水力压裂裂缝延伸规律

1 组天然裂缝发育煤以柿庄 SZ2 井为例进行分析, 这口井的天然裂隙发育方向为 NE51°, 由该井的水力压裂曲线可知施工压力为 12.64 MPa ,结合 G

函数法求得水平最大、最小主应力分别为 19.36 MPa 和 11.90 MPa , 进而得出未考虑诱导应力时的原 σ_{xx} 和原 σ_{yy} 分别为 12.25 MPa 和 14.60 MPa。结合式 (6)—式(8), 得出了不同裂缝延伸长度下的主裂缝延伸方向, 见表 3。

表 3 SZ2 井不同天然裂隙处水力压裂裂缝延伸方向
Table 3 Extension direction of hydraulic fractures at different natural fractures in CBM well SZ2

夹角/ (°)	裂缝半 长/m	原 σ_n / MPa	与天然裂 隙关系	x 方向诱导应 力 $\Delta\sigma_{xx}$ /MPa	y 方向诱导应 力 $\Delta\sigma_{yy}$ /MPa	正应力变化 量 $\Delta\sigma_n$ /MPa	x 方向应力 σ_{xx} /MPa	y 方向应力 σ_{yy} /MPa	正应力 σ_n /MPa	与天然裂 隙关系
1	10	12.25	沿着	-2.39	-2.39	-2.39	9.86	12.21	9.86	沿着
1	20	12.25	沿着	-3.53	-3.52	-3.53	8.72	11.08	8.72	沿着
1	30	12.25	沿着	-4.40	-4.40	-4.40	7.85	10.20	7.85	沿着
1	40	12.25	沿着	-5.14	-5.13	-5.14	7.11	9.47	7.11	沿着
1	50	12.25	沿着	-5.79	-5.78	-5.79	6.46	8.82	6.46	沿着
1	60	12.25	沿着	-6.37	-6.37	-6.38	5.88	8.23	5.87	沿着

注：表中-2.39 中的负号表示即诱导应力与应力方向相反，其他负号相同。

由表 3 可知，诱导应力考虑前后水力裂缝延伸的整体趋势均为沿着天然裂隙，此为柿庄区块的特殊性所致，即 1 组天然裂隙发育煤的裂隙方向与最大主应力方向的夹角较小，导致诱导应力考虑前后水力裂缝延伸方向变化不明显。但如果天然裂隙发育方向与最大主应力夹角较大时，诱导应力考虑前后水力裂缝的延伸情况截然不同，因而针对任何区块的实际判断过程中均应考虑诱导应力。

对 SZ2 井进行微地震实测，发现该井水力裂缝延伸方向整体趋势为 NE51°，且在其他方向未发现水力裂缝延伸趋势，说明运用上述判断准则来验证一组天然裂隙发育煤的水力裂缝延伸情况基本是正确的。SZ2 井微地震监测结果见图 6。

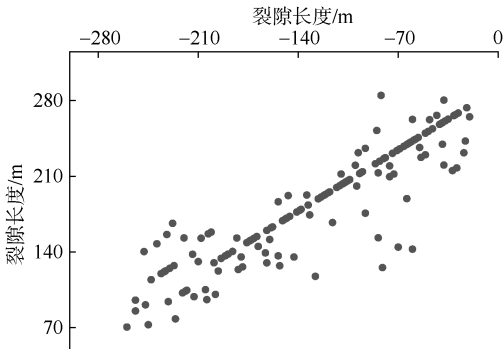


图 6 SZ2 微地震监测结果

Fig.6 Microseismic monitoring results of CBM well SZ2

3.3 粒状偶见及粉状无裂隙发育情况下水力压裂裂缝延伸规律

当煤层段主要以粒状偶见裂隙煤为主时，因煤粒与煤粒之间的间隙较大，水力压裂时，压裂液容

易在煤粒间的空隙中流动。根据最低能量原理可知，压裂裂缝容易沿着水平最大主应力方向延伸。在这样的煤层中压裂时，裂缝延伸方向几乎是与水平最大主应力平行的。由于压裂液更多是在煤粒间的空隙流动，煤层中营造出的大裂隙较多，煤层气赋存空间及与外界沟通的微裂隙较少，排水降压时煤层气基本以扩散形式运移，因此，粒状煤层采用水力压裂时气体运移速度慢，难以实现较高的日产气量。

当煤层段主要以粉状无裂隙煤为主时，水力压裂过程中，煤粉容易与压裂液结合形成糊状物，容易堵塞煤层气运移的裂隙通道，压裂时这些糊状物会与压裂液一起流动，使流动阻力增加，进而施工压力增加，当压力升高到一定程度后，能冲破这些糊状物形成的“堵塞带”继续前进，因此施工压力容易表现出“升高-下降-再升高-再下降”的波状曲线，且裂缝容易沿着水平最大主应力方向延伸。

4 结 论

a. 2 组天然裂隙发育煤，诱导应力考虑前后水力裂缝的延伸情况不同，缝长较小时，水力裂缝延伸趋势为穿过与最大主应力夹角较大的天然裂隙，并沿着与最大主应力夹角较小的天然裂隙方向延伸；随着缝长的增大，促使诱导应力随之增大，水力裂缝无法穿过天然裂隙，导致水力裂缝延伸方向由单方向变为双向延伸。

b. 1 组天然裂隙发育煤，当天然裂隙与最大主应力夹角较小时，诱导应力考虑前后水力裂缝的延伸方向变化不明显，整体延伸趋势均为沿着天然裂隙发育方向。

c. 粒状偶见及粉状无裂隙煤,因煤粒间的间隙较大,水力裂缝总会沿着最大主应力方向延伸。

参考文献

- [1] 陈勉. 页岩气储层水力裂缝转向扩展机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 88–94.
CHEN Mian. Re-orientation and propagation of hydraulic fractures in shale gas reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 88–94.
- [2] 王素玲, 姜民政, 刘合. 基于损伤力学分析的水力压裂三维裂缝形态研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2205–2210.
WANG Suling, JIANG Minzheng, LIU He. Study of hydraulic fracturing morphology based on damage mechanics analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2205–2210.
- [3] 侯冰, 谭鹏, 陈勉, 等. 致密灰岩储层压裂裂缝扩展形态试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 219–225.
HOU Bing, TAN Peng, CHEN Mian, et al. Experimental investigation on propagation geometry of hydraulic fracture in compact limestone reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 219–225.
- [4] WU X R, CARLSON A J. Weight functions and stress intensity factor solutions[M]. Oxford: Pergamon Press, 1991.
- [5] 潘林华, 程礼军, 陆朝晖, 等. 页岩储层水力压裂裂缝扩展模拟进展[J]. 特种油气藏, 2014, 21(4): 1–6.
PAN Linhua, CHENG Lijun, LU Zhaohui, et al. Simulation of hydraulic fracture propagation in shale reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 1–6.
- [6] 严成增, 郑宏, 孙冠华, 等. 基于 FDEM-Flow 研究地应力对水力压裂的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 237–246.
YAN Chengzeng, ZHENG Hong, SUN Guanhua, et al. Effect of in-situ stress on hydraulic fracturing based on FDEM-Flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 237–246.
- [7] 袁志刚. 煤岩体水力压裂裂缝扩展及对瓦斯运移影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [8] 魏宏超, 乌效鸣, 李粮纲, 等. 煤层气井水力压裂同层多裂缝分析[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 20–23.
WEI Hongchao, WU Xiaoming, LI Lianggang, et al. Multiple fractures in the same seam in hydraulic fracturing of CBM well[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(6): 20–23.
- [9] 倪小明, 林然, 张崇崇. 晋城矿区煤层气井连续多次压裂裂缝展布特征[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 747–754.
NI Xiaoming, LIN Ran, ZHANG Chongchong. Characteristics of fracture distribution after continuous and repetitive hydraulic fracturing of CBM wells in Jincheng mining area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5): 747–754.
- [10] 赵立强, 刘飞, 王佩珊, 等. 复杂水力裂缝网络延伸规律研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 562–569.
ZHAO Liqiang, LIU Fei, WANG Peishan, et al. A review of creation and propagation of complex hydraulic fracture network[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 562–569.
- [11] JOIE G. Numerical simulation of coupled fluid-low/geomechanical behavior of tight gas reservoirs with stress sensitive permeability[J]. SPE, 1997, 39(5): 1–15.
- [12] 赵金洲, 李勇明, 王松, 等. 天然裂缝影响下的复杂压裂裂缝网络模拟[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 68–73.
ZHAO Jinzhou, LI Yongming, WANG Song, et al. Simulation of a complex fracture network influenced by natural fractures[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 68–73.
- [13] 张士诚, 郭天魁, 周彤, 等. 天然页岩压裂裂缝扩展机理试验[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 496–503.
ZHANG Shicheng, GUO Tiankui, ZHOU Tong, et al. Fracture propagation mechanism of hydraulic fracturing in natural shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 496–503.
- [14] 陈立超. 沁水盆地南部煤储层压裂裂缝延展机制及充填模式[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2016.
- [15] 郭红玉, 苏现波, 夏大平, 等. 煤储层渗透率与地质强度指标的关系研究及意义[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1319–1322.
GUO Hongyu, SU Xianbo, XIA Daping, et al. Relationship of the permeability and geological strength index(GSI) of coal reservoir and its significance[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1319–1322.
- [16] 楼一珊. 岩石力学与石油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [17] 陈峥嵘, 刘书杰, 张滨海, 等. 沁水盆地北缘煤层气井地应力模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 136–142.
CHEN Zhengrong, LIU Shujie, ZHANG Binhai, et al. Study on geostress model of coalbed methane wells in north edge of Qinshui basin[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 136–142.

(责任编辑 范章群)