

地应力与孔隙压力对定向水力压裂效果影响研究

贾文超^{1,2}, 张明杰^{1,2,3}, 梁锡明^{1,2}, 解帅龙^{1,2}

(1. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—

省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000;

2. 河南理工大学 瓦斯地质研究所, 河南 焦作 454000;

3. 全国煤炭行业瓦斯地质与瓦斯防治工程研究中心, 河南 焦作 454000)



扫码移动阅读

摘要:为了实现突出煤层井下水力压裂均匀卸压增透消突, 达到压裂设备小型化的目的, 提出了基于非对称孔隙压力场的多孔控制定向水力压裂新工艺。采用理论分析结合数值试验的方法, 以鹤壁矿区二₁煤层矿井地质条件为基础, 利用 RFPA-2D 数值模拟软件, 研究了水平应力比、孔隙压力场以及地应力与孔隙压力场组合影响下的裂隙扩展规律, 结果表明: 水平应力比对煤体破坏类型、裂隙形态及扩展方向影响突出; 利用孔隙压力场分布特征可以提高控制孔定向控制作用, 降低起裂水压。根据矿区目前地质条件, 水平主应力比在 1.0~1.8, 控制水压为 6~12 MPa, 在非对称孔隙压力场下, 采用多孔控制定向水力压裂技术增透效果最佳。

关键词: 多孔控制; 水平应力比; 孔隙压力; 裂隙扩展

中图分类号: TD711

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)12-0151-07

Study on geostress and pore pressure affected to directional hydraulic fracturing effect

JIA Wenchao^{1,2}, ZHANG Mingjie^{1,2,3}, LIANG Ximing^{1,2}, XIE Shuailong^{1,2}

(1. Henan Provincial Key Lab of Gas Geology and Gas Control - Cultivation Base, Provincial and Ministry Joint Established Key Lab,

Jiaozuo 454000, China; 2. Research Institute of Gas-geology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. National Coal Industry Engineering Research Center of Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to realize the uniform pressure released, permeability improved and outburst elimination with the hydraulic fracturing in the outburst seam of the underground mine and to reach a miniaturized purpose of the fracturing equipment, a new technique of the porous controlled directional hydraulic fracturing was provided based on the asymmetric pore pressure field. With the theoretical analysis combined with the numerical experiment method, based on the mine geological condition of No. II-1 seam in Hebi Mining Area, the RFPA-2D numerical simulation software was applied to study the crack expansion law under the combined influences of the horizontal stress ratio, pore pressure filed as well as the geostress and pore pressure filed. The results showed that the horizontal stress ratio would have remarkable influences to the failure type of the coal, pore shape and pore expansion direction. The distribution features of the pore pressure field could be applied to improve the direction control function of the control borehole and could reduce the hydraulic pressure of the initial fracturing. According to the present geological conditions of the mining area, the horizontal principal stress ratio was ranging from 1.0~1.8 and the controlled water pressure was ranging from 6~12 MPa. Under the asymmetric pore pressure field, when the porous controlled directional fracturing technology was applied, the effect would be best.

Key words: porous control; horizontal stress ratio; pore pressure; crack expansion

0 引言

定向水力压裂技术是实现煤岩体均匀卸压、增

透, 防治煤与瓦斯突出的一项主要技术措施, 目前, 有关定向水力压裂的技术和工艺比较多, 但在控制裂隙定向扩展方面仍旧处在探索和完善阶段。李全

收稿日期: 2018-07-25; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.12.024

作者简介: 贾文超(1990—), 男, 陕西铜川人, 硕士。Tel: 18392395254, E-mail: 409509400@qq.com

引用格式: 贾文超, 张明杰, 梁锡明, 等. 地应力与孔隙压力对定向水力压裂效果影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 151-157.

JIA Wenchao, ZHANG Mingjie, LIANG Ximing, et al. Study on geostress and pore pressure affected to directional hydraulic fracturing effect[J].

Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 151-157.

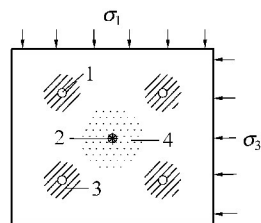
贵等^[1]提出:通过在2个压裂孔连线的中心上施工1个控制孔,利用该控制孔卸压导控作用,引导裂隙定向扩展,该方法控制范围较小,控制方向单一。文献[2-3]提出预置导向槽的定向水力压裂技术,通过导向槽引导裂隙扩展贯通,实现煤体整体卸压增透,但该技术工艺过于复杂。文献[4-5]对常规水力压裂、轴向楔形槽导控压裂、环形楔形槽导控压裂、控制孔水力压裂技术进行了对比研究,结果表明,3种压裂方式都对裂隙的扩展具有导控作用,同时降低了煤体破裂水压。文献[6-7]提出:通过在2个压裂孔连线方向上施工若干控制孔,引导裂隙沿着该方向扩展延伸,但仍未解决控制方向单一的问题。文献[8]提出多点控制定向水力压裂技术,通过在压裂钻孔周围布置多个导向孔,利用钻孔卸压在更多方向形成辅助自由面,即人为创造更多裂隙扩展弱面和尖端效应,诱导裂隙沿多个方向相互贯通,形成复杂裂隙网络,避免了局部瓦斯超限或卸压盲区的情况。文献[9-10]针对多点控制定向水力压裂技术的研究结果表明:该技术实现定向压裂的效果更加明显,煤岩体破裂水压更小。

多孔控制定向水力压裂技术的研究多集中在技术工艺上,包括控制孔数量、布孔方式、孔径大小等,而地应力特征的影响规律研究尚不够深入和全面,特别在进入深部后,地应力作用逐渐凸显,对其影响规律的研究将更加重要。笔者以提高定向水力压裂效果,保障煤岩体均匀卸压增透,降低压裂水压,提高该技术的工程应用性为目的,就地应力以及孔隙压力场分布特征影响下的多孔控制定向水力压裂效果展开研究,对裂隙形态特征、扩展方向、煤体破坏类型以及起裂水压等多重指标进行了考察和分析,并指导现场应用。

1 多孔控制定向水力压裂机理

多孔控制定向水力压裂技术,是以压裂孔为中心,在其周围一定范围内布置孔径相同的若干控制孔(通常为4个),如图1所示,依靠控制孔形成的自由面,使得控制孔周围的煤体得到初步的卸压增透,形成卸压圈,在压裂的过程中,随着高压水的不断向前渗透,当进入控制孔的卸压圈时,裂隙迅速扩展,并且逐渐偏向于控制孔一侧,以此实现对煤体的定向压裂。

当控制孔与压裂孔应力集中带没有连接或重



σ_1 —第一水平主应力; σ_3 —第二水平主应力;

1—控制孔;2—压裂孔;3—控制孔卸压圈;4—压裂孔影响范围

图1 多孔控制定向水力压裂示意

Fig.1 Schematic diagram of porous control directional hydraulic fracturing

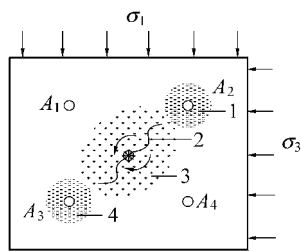
叠,即控制孔与压裂孔应力集中带之间存在一段原始应力区时,控制孔不能及时发挥导向作用。随着压裂进行,压裂孔卸压范围逐渐增加,控制孔与压裂孔应力集中带必定连接,此时控制孔导向作用开始显现。因此,控制孔卸压范围大小对实现裂隙定向扩展至关重要。地应力又是决定钻孔应力集中带的重要因素,通常地应力越大,钻孔卸压范围越大,其次还与钻孔长度、孔径、排间距、煤体强度等因素有关^[11-12]。因此,地应力是该技术在应用中需要考虑的一项关键因素。同时,探索如何提高控制孔导向作用对提高定向压裂效果至关重要。

文献[13-14]采用试验的方法研究分析了孔隙压力场对裂隙扩展路径的影响,结果表明:裂隙的扩展不仅受裂隙尖端局部孔隙水压的影响,并且受到孔隙压力梯度^[15]在宏观上分布的影响。文献[16]研究了4个控制孔内均施加有恒定水压下的控制孔导控作用,结果表明:孔隙压力场对控制孔的导控作用具有积极作用。基于以上分析,笔者认为,可以利用煤体内孔隙压力场分布特征来提高控制孔的作用。

水力压裂是个复杂的过程,裂隙通常沿垂直于最小主应力方向扩展,但裂隙形态、扩展方向并不仅取决于某一个因素,如煤体均质性、原生裂隙分布特征、地应力状态等都可能对压裂效果产生影响^[17-18]。在多孔控制定向水力压裂技术中,孔隙水压的分布特征与地应力组合影响下煤体起裂、裂隙扩展规律有待研究。

水力压裂模型中,压裂孔位于中心位置,周围均匀布置4个控制孔,依次编号为 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 。笔者通过在控制孔 A_2 和 A_3 内施加恒定的控制水压, A_1 、

A_4 孔内无水压,以此促使煤体孔隙压力场表现出非对称分布的特征,如图 2 所示,以此研究孔隙压力场分布特征对煤体起裂以及裂隙扩展规律的影响。



1、4—控制水压场;
2—扩展裂隙;3—压裂影响范围
图 2 非对称分布孔隙压力场示意

Fig.2 Schematic diagram of asymmetric distribution pore pressure field

2 地应力特征影响的数值分析

2.1 建立模型

为了确定地应力特征不同对多孔控制定向水力压裂效果的影响,笔者以鹤壁矿区二₁煤层地质条件为基础,研究不同矿井的地应力特征变化对裂隙扩展的影响规律。鹤壁矿区煤层水平应力场占据主导,煤岩体受到的水平构造应力较大,其中三矿、四矿水平应力比较大,六矿、八矿水平应力比较小。基于对以往突出的研究,地应力特征是煤层突出危险性的重要影响因素之一。二₁煤层为矿区全部可采煤层,煤层平均厚度 7.82 m,煤层内部多以压扭性断层结构面为主,容易对瓦斯的运移、扩散形成封堵,因而在断层附近通常伴随有瓦斯压力、含量较高,煤体普氏系数较小,发生突出的可能性较大。目前,实测二₁煤层最大原始透气性系数在 2.6 ~ 4.7 m²/(MPa² · d),属可抽采煤层矿区-400 m 以下深部埋深煤、岩参数见表 1,4 组模型边界荷载见表 2。

表 1 煤、岩体参数

Table1 Parameters of coal and rock

力学参数	均值	强度/度	泊松比	弹性模量/MPa	内摩擦角/(°)	压拉比	渗透系数/(m · d ⁻¹)	孔隙率
煤体	2	5	0.30	6 000	25	7	0.200 0	0.100
围岩	4	50	0.25	25 000	30	10	0.000 1	0.001

建立 10 m×10 m 的正方形模型,划分为 300×300 个单元网格,采用水平主应力比 $\lambda = \sigma_1/\sigma_3$,作为地应力特征变化参数,模型沿平行于第二主应力方

向设置有厚度 1 m 的围岩层,边界渗透性为零。孔径均为 94 mm,钻孔间距设置为 5 m,如图 3 所示。压裂孔初始水压为 6 MPa,每步以 0.5 MPa 的速度增加。

表 2 地应力参数

Table2 Ground stress parameters

模型编号	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	$\lambda = \sigma_1/\sigma_3$
1	8	8.8	1.1
2	8	10.4	1.3
3	8	12.8	1.6
4	8	14.4	1.8

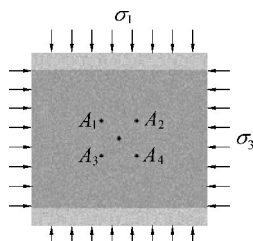


图 3 数值模型

Fig.3 Numerical model

2.2 模拟结果及分析

2.2.1 水平应力比对裂隙形态特征及扩展方向影响
水平应力比的不同对裂隙扩展规律产生影响,如图 4 所示。

1) 当水平应力比 $\lambda < 1.5$ 时:①第一、第二水平主应力越接近,初期阶段出现裂隙越晚,扩展缓慢,随着水压继续增大裂隙扩展方向增多,最终发散不集中;②地应力越小,控制孔发挥作用越晚,并且控制作用不够明显,裂隙最终沿垂直最小主应力方向扩展。

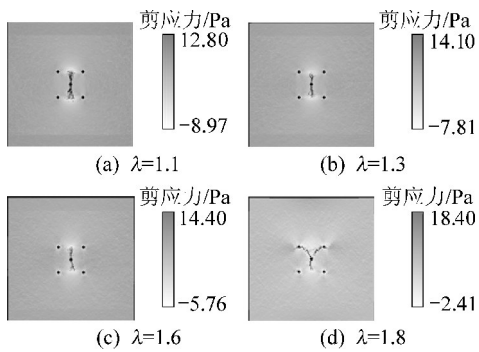


图 4 应力分布云图

Fig.4 Stress emission diagram

2) 当水平应力比 $\lambda > 1.5$ 时:①应力比 λ 越大,初期出现裂隙的时间越早,随着水压增大,当进入裂隙扩展阶段时,形成的扩展方向单一,整体集中,呈

现条带状;②地应力越大,控制孔导控作用越明显,如 $\lambda=1.8$ 的模型中,控制孔充分发挥作用,裂隙最终与控制孔相互贯通。

究其原因,通常地应力大小与钻孔卸压范围呈正比例关系^[19]。因此,水平地应力较小时,控制孔的卸压范围有限,其控制作用不明显;随着水平地应力的增大,控制孔足以影响到压裂孔,裂隙定向扩展效果明显。

2.2.2 煤体破坏类型

裂隙扩展方向上发散程度存在的差异在于,水平地应力比不同时煤体破坏类型不同。声发射结果(图5)表明:应力比为1.1的模型中,代表煤体产生拉伸破坏的红色区域占比最大,拉伸破坏使得煤体中主要形成张型裂纹,导致裂隙扩展方向发散不集中;随着水平应力比增大,煤体破坏类型由拉伸破坏逐渐转向压剪破坏,在应力比为1.8的模型中,白色、黑色能量圈占据主导,煤体中新裂隙形成释放能量最大。

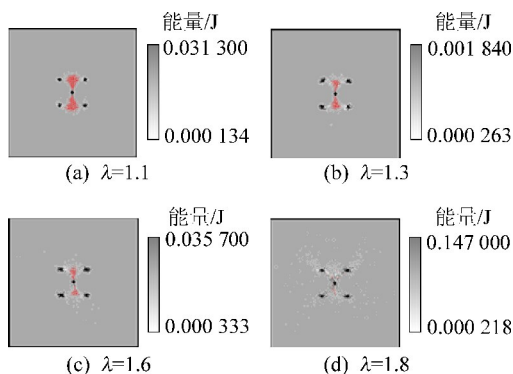


图5 不同应力比下的煤体破坏类型

Fig.5 Failure types of coal bodies with different stress ratios

3 孔隙压力影响的数值分析

数值模型中,仅在 A_2 和 A_3 两个控制孔内设置恒定控制水压,以此改变煤体中孔隙压力分布,形成非对称的孔隙压力场,如图6所示。模型边界荷载为定值,分别为8、12 MPa;控制水压为一变量,分别为0~10 MPa,每个模型控制水压相差2 MPa,煤、岩体各项参数见表1。模拟结果及分析如下。

1) 煤岩体破裂压力与其自身性质、孔深、孔径及埋深等因素有关,通过对比发现:在没有设控制水压的模型中,第9~1步(压裂孔水压10.5 MPa)进入裂隙萌生阶段,裂隙扩展缓慢、形态发散,第12~3步(压裂孔水压12 MPa)进入失稳破坏阶段;而控制

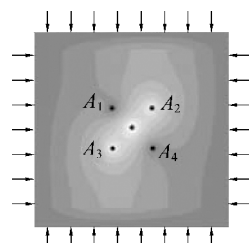


图6 非对称孔隙压力场模型

Fig.6 Asymmetric pore pressure field model

水压为4 MPa模型中,加载至第7~2步(压裂孔水压9.5 MPa)时,裂隙就开始萌生,之后裂隙迅速扩展,第10~1步(压裂孔水压11 MPa)时,就已进入失稳破坏阶段。裂隙起裂水压与控制水压呈反比关系,如图7所示。分析原因有,非对称孔隙压力场提高了控制孔的控制作用,煤体起裂水压降低,迅速进入失稳破坏阶段,压裂周期持续时间越短。

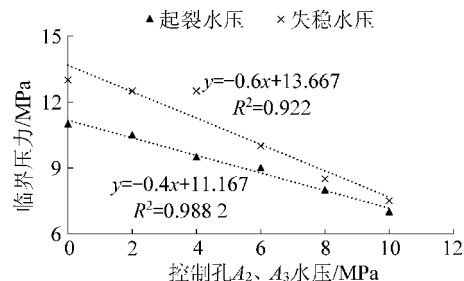


图7 控制水压与裂隙起裂、失稳关系

Fig.7 Relationship between control water pressure and crack initiation and instability

当改变煤体内孔隙压力分布后,裂隙偏向孔隙压力较高的方向扩展,其扩展方向与最大主应力方向的夹角大小可以反映出控制孔导控作用的强弱。如图8所示,控制水压为10 MPa时,裂隙偏角最大并与控制孔贯通,之后地应力占据主导作用,裂隙逐渐沿垂直最小主应力方向延伸,如图8d所示。

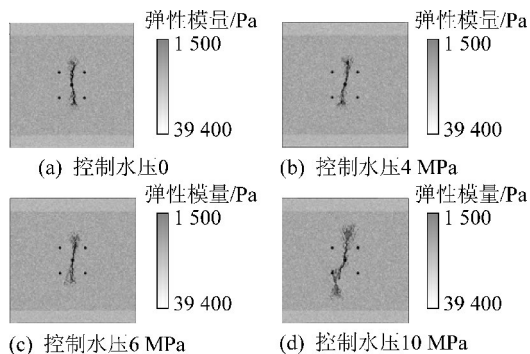


图8 不同控制水压下裂隙扩展特征

Fig.8 Characteristics of crack extension under different controlled water pressure

2) 非对称孔隙压力场模型在 A_2 和 A_3 连线方向上压裂产生的位移量要大于不设控制水压的模型,如图 9 所示;分析该方向上最大主应力分布发现,控制水压越大,在 A_2 和 A_3 连线方向上应力越小,这是由于增加 A_2 和 A_3 连线方向孔隙水压时,裂隙沿该方向扩展所需水压降低,并且在连线垂直方向上会产生拉伸应力,促使裂隙向着孔隙水压较高的方向偏转,当该方向煤体卸压越充分,残余应力则越小,如图 10 所示,控制水压为 10 MPa 的曲线位于最下端。

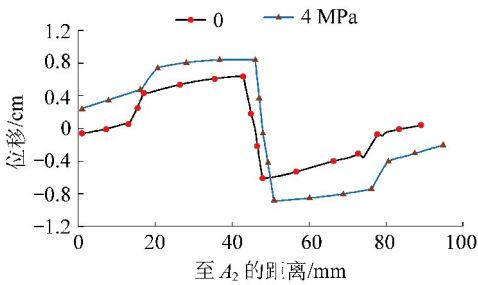


图 9 A_2 和 A_3 连线方向位移

Fig.9 Displacement in the connection direction of A_2 and A_3

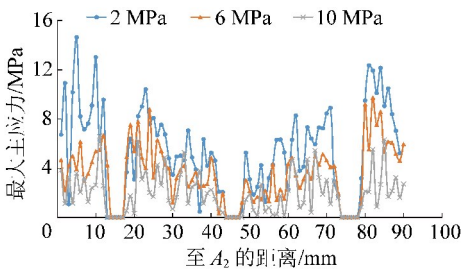


图 10 A_2 和 A_3 连线方向最大主应力

Fig.10 Maximum principal stress in the connection direction of A_2 and A_3

4 孔隙压力与地应力组合影响的数值分析

不同地应力条件下,高压水渗透进入煤体中对裂隙扩张效果有所差别,并且地应力又对起裂压力、起裂位置产生影响^[20-21]。因此,当孔隙水压和水平应力比组合影响时,定向压裂效果有待研究。延用图 6 的模型,控制水压设定为 8 MPa。试验中,通过改变模型边界荷载形成不同水平应力比,具体参数见表 3。以此,研究非对称孔隙压力场与不同地应力比共同影响下裂隙的起裂、扩展规律。

表 3 边界荷载参数

Table3 Boundary load parameters

控制 水压/MPa	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	λ
8	8	8.8	1.1
	8	10.4	1.3
	8	12.8	1.6
	8	14.4	1.8
	8	16.0	2.0
	8	17.6	2.2

4.1 裂隙扩展方向影响效果

孔隙压力场的非对称性分布与水平应力比对裂隙扩展方向的影响存在竞争关系(图 11)。如应力比为 1.1 的模型中,裂隙扩展方向不仅发散,并且偏转幅度最大;随着水平应力比的增大,裂隙偏转幅度不断减小,应力比特征的影响作用逐渐显著,如 $\lambda = 1.8$ 时裂隙沿着垂直第二主应力方向扩展;当水平应力比继续增大,超过 1.8 时,形成条带状裂隙,此时,裂隙则开始向孔隙水压较低的 A_1 、 A_4 钻孔连线方向偏转,当 λ 为 2.2 时,裂隙与控制孔 A_1 贯通,这是由于地应力特征占据了绝对优势,高应力下未设控制水压的 A_1 和 A_4 控制孔卸压影响范围足够大所导致。

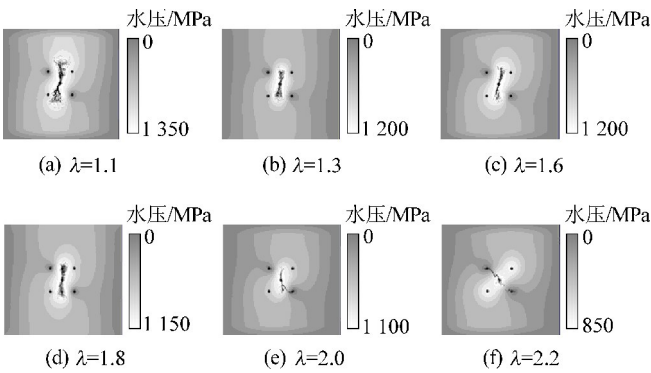


图 11 水压分布及裂隙扩展方向示意

Fig.11 Schematic diagram of water pressure distribution and crack expansion direction

4.2 煤体破坏类型及裂隙形态特征

当改变煤体孔隙压力场分布特征,形成非对称的孔隙压力场时,煤体破坏类型依旧表现出应力比较小时,以拉伸破坏为主,应力比越大压剪破坏越多的特征,如图 12 所示。因此,孔隙压力场的分布特征对煤体破坏类型影响较小,地应力特征则是主要影响因素。

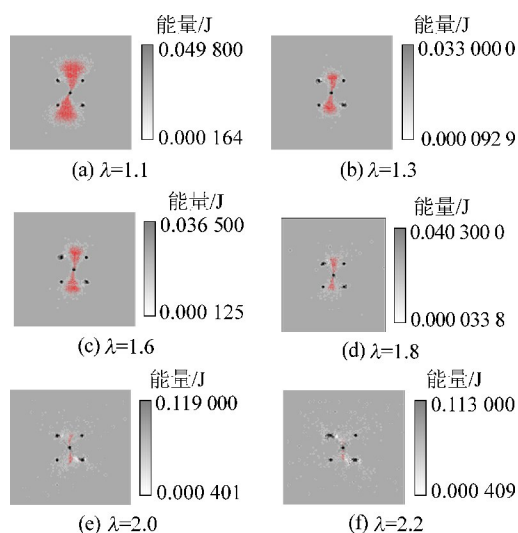


图 12 非对称孔隙压力场下煤体破坏类型

Fig.12 Type of coal body failure in asymmetric pore pressure field

基于对地应力与非对称孔隙压力场对多孔控制定向水力压裂效果的研究,现场应用时,应先施工控制孔,后施工压裂孔,每 4 个控制孔中心 1 个压裂孔,确保控制孔卸压充分,后期控制孔可以作为抽采钻孔使用,压裂孔尽可能确保孔口以里 30 m 保持笔直,在压裂孔施工完成后尽快进行压裂,以免孔坍塌造成压裂失败。利用三通将控制孔串联并与 1 台压裂泵连接,压裂过程中,确保控制孔压力小于煤体起裂水压并保持稳定。压裂孔内的压力缓慢加压,记录压力表读数的变化情况,统计压裂周期、注水量,压裂结束后及时封孔并跟进测试观测孔瓦斯涌出速度以及抽采浓度变化。

5 结 论

1) 水平地应力比对煤岩体的破坏方式、裂隙形态及扩展方向影响突出。当水平应力比较小时,煤体以拉伸破坏为主,形成的裂隙扩展方向发散,控制孔导向作用不明显;随着水平应力比的增大,压剪破坏增加,形成条带状裂隙,控制孔导向作用增强,定向压裂效果显著。

2) 孔隙压力场的分布特征对裂隙扩展方向具有诱导控制作用,孔隙压力梯度越大,控制作用越明显,并且裂隙起裂水压也越小,压裂周期短。

3) 孔隙压力场的非对称性分布与水平应力比对裂隙扩展方向的影响存在竞争关系;孔隙压力对煤体破坏类型影响不大,水平地应力比则是主控因素。

4) 利用非对称孔隙压力场可以提高煤体定向压裂效果,控制水压与水平应力比需要控制在合理的范围内。研究表明:鹤壁矿区内,煤岩体水平地应力比在 1.0~1.8,控制水压 6~12 MPa 时定向压裂效果明显。

参考文献 (References):

- [1] 李全贵,翟成,林柏泉,等.定向水力压裂技术研究与应 [J].西安科技大学学报,2011,31(6):735-739.
LI Quanguai, ZHAI Cheng, LI Boquan, et al. Research and application of directional hydraulic fracturing technology [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31 (6): 735-739.
- [2] 李艳增.导向槽定向水力压穿增透技术研究与应 [J].煤炭科学技术,2016,44(4):50-54.
LI Yanzeng. Study and application of guide slot directional hydraulic pressurized penetration and permeability improved technology [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 50-54.
- [3] 王耀锋,李艳增.预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用 [J].煤炭学报,2012,37(8):1326-1331.
WANG Yaofeng, LI Yanzeng. Technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (8): 1326-1331.
- [4] 王志军,张瑞林,张森,等.含瓦斯煤体定向水力压裂裂隙导控的数值分析 [J].河南理工大学学报:自然科学版,2013,32(4):373-379.
WANG Zhijun, ZHANG Ruilin, ZHANG Sen, et al. Numerical analysis of fracture guide & control of directional hydraulic fracturing in coal body containing gas [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2013, 32(4): 373-379.
- [5] 夏彬伟,胡科,卢义玉,等.井下煤层水力压裂裂隙导向机理及方法 [J].重庆大学学报,2013,36(9):8-13.
XIA Binwei, HU Ke, LU Yiyu, et al. Mechanism of crack-oriented of hydraulic fracture and its technique in mine [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(9): 8-13.
- [6] 徐幼平,林柏泉,翟成,等.定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应 [J].中国安全科学学报,2011,21(7):104-110.
XU Youping, LIN Boquan, ZHAI Cheng, et al. Analysis on dynamic characteristics of cracks extension in directional hydraulic fracturing and its application [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(7): 104-110.
- [7] 陈学习,徐永,金文广,等.低透气性煤层定向水力压裂增透技术 [J].辽宁工程技术大学学报,2016,35(2):124-128.
CHEN Xuexi, XU Yong, JIN Wenguang, et al. Permeability improvement technology of directional hydraulic fracturing in low permeability coal seam [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2016, 35(2): 124-128.
- [8] 张明杰,段亚超,杨硕,等.多点控制水力压裂增透快速消突技术研究及应用 [J].安全与环境学报,2015,15(6):39-44.

- ZHANG Mingjie, DUAN Yachao, YANG Shuo, *et al.* Research and application of the multipoint control hydraulic fracturing technology for improving permeability and rapidly eliminating outburst [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(6): 39-44.
- [9] 王春霞, 徐文, 彭斌, 等. 基于导向孔的水力压裂技术数值模拟及应用[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(9): 160-162.
- WANG Chunxia, XU Wen, PENG Bin, *et al.* Numerical simulation and application of hydraulic fracturing on directional drillings [J]. *Coal Technology*, 2015, 34(9): 160-162.
- [10] 张明杰, 李永生. 煤层多点控制水力压裂机理及应用研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(1): 143-144.
- ZHANG Mingjie, LI Yongsheng. Research on multipoint controlling hydraulic fracturing mechanism and application [J]. *Coal Technology*, 2017, 36(1): 143-144.
- [11] 王猛, 王襄禹, 肖同强. 深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5): 1138-1145.
- WANG Meng, WANG Xiangyu, XIAO Tongqiang. Borehole destressing mechanism and determination method of its key parameters in deep roadway [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1138-1145.
- [12] 贾传洋, 蒋宇静, 张学朋, 等. 大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(6): 1115-1122.
- JIA Chuanyang, JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng, *et al.* Laboratory and numerical experiments on pressure relief mechanism of large-diameter boreholes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(6): 1115-1122.
- [13] 杨天鸿. 岩石破裂过程的渗流特性[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [14] 周大伟, 张广清, 刘志斌, 等. 致密砂岩多段分簇压裂中孔隙压力场对多裂缝扩展的影响[J]. *石油学报*, 2017, 38(7): 830-839.
- ZHOU Dawei, ZHANG Guangqing, LIU Zhibin, *et al.* Influences of pore-pressure field on multi-fracture propagation during the multi-stage cluster fracturing of tight sandstone [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2017, 38(7): 830-839.
- [15] 李波, 孙东辉, 魏建平, 等. 孔隙压力梯度对煤的渗透性影响实验[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(1): 35-40.
- LI Bo, SUN Donghui, WEI Jianping, *et al.* Experimental study on the effect of gas pressure gradient on coal permeability [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(1): 35-40.
- [16] 邹庆, 夏冬, 梁文勛. 水压力作用下煤层内控制孔对裂隙扩展影响[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(3): 168-174.
- ZOU Qing, XIA Dong, LIANG Wenxu. Influence of controlholes in coal seam on fracture propagation under hydraulic fracturing [J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(3): 168-174.
- [17] 刘大猛, 周三栋, 蔡益栋, 等. 地应力对煤储层渗透性影响及其控制机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(6): 1-8.
- LIU Dameng, ZHOU Sandong, CAI Yidong, *et al.* Study on effect of geo-stress on coal permeability and its controlling mechanism [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 1-8.
- [18] 马海峰, 程志恒, 曹家明. 千米深井高瓦斯煤层 W-S-W 水力压裂强化增透试验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(7): 1757-1764.
- MA Haifeng, CHENG Zhiheng, CAO Jiaming. Intensive permeability enhancement experiment through hydraulic fracturing by way of water-sand-water in kilometer deep well with high gas seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(7): 1757-1764.
- [19] 兰永伟, 高红梅, 陈学华. 钻孔卸压效果影响因素数值模拟研究[J]. *矿业安全与环保*, 2013, 40(3): 6-9.
- LAN Yongwei, GAO Hongmei, CHEN Xuehua. Numerical simulation study on influence factors of borehole pressure relief effect [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2013, 40(3): 6-9.
- [20] 邓广哲. 封闭型煤层裂隙地应力场控制水压致裂特性[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(5): 478-482.
- DENG Guangzhe. Controlling hydraulic fracturing characteristics of fractured ground stress field in closed seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(5): 478-482.
- [21] 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*, 2001, 36(1): 65-69.