

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.002

# 井下煤层水力压裂裂缝导向机理及方法

夏彬伟, 胡科, 卢义玉, 刘勇, 宋晨鹏

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;  
b. 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

**摘要:**针对井下煤层水力压裂裂缝扩展无序导致抽采效率低的问题,提出水力压裂裂缝导向方法,即采用高压水射流割定向缝导向裂缝起裂及扩展。在压裂孔周边合理布置导向钻孔,压裂孔及导向钻孔均采用水射流割缝技术在煤孔中形成定向缝隙。在地应力作用下缝隙尖端形成剪切破坏区,在内水压的作用下裂缝在缝隙尖端起裂;通过计算射流割缝缝隙水平延长方向最大主应力方向得出,裂缝在尖端起裂后沿水平方向延伸;在此基础上研发了裂缝导向技术工艺,即钻孔布置工艺、封孔工艺及压裂工艺,并成功应用于典型低透气性煤层;试验结果表明:该方法能够导向裂缝的延伸,压裂半径为 25 m 以上;抽采数据表明瓦斯抽放平均浓度为 68%,单孔平均抽放纯量为 0.037 m<sup>3</sup>/min;采用裂缝导向技术后相比普通孔瓦斯抽放纯量提高了 11.26 倍,抽放浓度提高了 2.12 倍。

**关键词:**煤层;水力压裂;裂缝导向;瓦斯抽采

**中图分类号:**TD712

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2013)09-008-06

## Mechanism of crack-oriented of hydraulic fracture and its technique in mine

XIA Binwei, HU Ke, LU Yiyu, LIU Yong, SONG Chenpeng

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control;

b. National & Local Joint Engineering Laboratory of Gas Drainage in Complex Coal Seam,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Drainage is inefficient of coal seam treated by hydraulic fracture due to disordered propagation of fracture. Therefore, we propose a novel approach of fracture-oriented via slotting a slitting in coal seam by high pressure water jet. Firstly, boreholes-oriented are drilled around the borehole of hydraulic fracture. Then we slot the coal seam via high pressure water jet. Finally, we carry out hydraulic fracture in the borehole. Shear destruction area which is formed under geostress is located on crack tip. And crack propagates along horizontal direction because the major principal stress direction is horizontal. Besides, we develop the technique of crack-oriented and apply it in typical low permeability coal seam. The results show that the technique is efficient. The diameter of hydraulic fracture is larger than 25 m, the concentration of gas drainage is 68% on average, and the gas flow is 0.037 m<sup>3</sup>/min. The concentration and flow of gas increase 2.12 times and 11.26 times respectively comparing to those of traditional technique.

**Key words:** coal seam; hydraulic fracture; crack-oriented; methane extraction

**收稿日期:**2013-04-02

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51104191);重庆市自然科学基金资助项目(cstcjjA90004);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100191120001);国家自然科学基金委创新群体基金资助项目(50921063)

**作者简介:**夏彬伟(1978-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事采矿及地下工程方面的研究工作,  
(E-mail)xbwei33@cqu.edu.cn。

瓦斯抽采作为预防瓦斯灾害治理及能源综合利用的有效手段受到越来越多的重视<sup>[1]</sup>,近年来学者们针对不同赋存条件煤层研发了有效的井下瓦斯抽采方法,如密集钻孔<sup>[2]</sup>、深孔预裂爆破<sup>[3]</sup>、水力冲孔、高压水射流割缝<sup>[4]</sup>、水力压裂<sup>[5]</sup>等。井下水力压裂近年来得到广泛应用,国内外学者进行了大量的研究。薛莉莉<sup>[6]</sup>通过数值模拟建立了煤层水力压裂单井数值模型。王东浩<sup>[7]</sup>建立了考虑弹性变形和水力冲刷作用下的裂缝三维延伸模型。张国华<sup>[8]</sup>研究了煤层中水力压裂起裂机理,乌效鸣<sup>[9]</sup>提出了煤层气井水力压裂的计算原理。李兆敏等<sup>[10]</sup>及李玮等<sup>[11]</sup>进行了压裂裂缝起裂和扩展规律研究。陈勉等<sup>[12]</sup>通过试验研究了天然裂隙影响下的压裂特征。刘建军等<sup>[13]</sup>将损伤理论引入了水力压裂的研究中。E. Chekhonin等<sup>[14]</sup>研究了端部脱砂压裂中的裂隙扩展,黄炳香等<sup>[15]</sup>研究了水压控制爆破后裂纹扩展情况。A. G. Olovyanny<sup>[16]</sup>提出了煤层水力压裂的数学模型。Lekontsev等<sup>[17]</sup>对Berezovskaya煤定向水力压裂进行了实验研究。目前,针对煤矿水力压裂裂缝导向的研究鲜见报道。

煤矿井下水力压裂技术能够实现煤层较大范围内卸压,在压裂后初期瓦斯流量及浓度均能达到较高的水平;但是瓦斯抽采流量衰减较快,一般在抽采一周后恢复到原始水平。受煤层地应力分布复杂影响,通过钻孔实施压裂时裂缝的起裂位置及延伸方向不明确,在地层复杂煤层中裂缝会出现转向或向顶底板延伸,造成裂隙无序扩展,不能对沿煤层实施有效压裂。因此,提出水力压裂裂缝导向技术,即在压裂孔周边布置导向钻孔,压裂孔和导向钻孔均采用高压水射流割缝技术在煤层中间形成一定深度预裂缝和导向缝,裂缝的形成能够改变煤层受力分布状态,从而导向裂缝沿煤层起裂及延伸。笔者在分析水射流割缝煤体受力状态、计算割缝煤体所受最大主应力角度的基础上,研究水射流割缝导向压裂裂缝起裂及延伸规律,提出井下煤层水力压裂导向技术工艺,并在逢春煤矿进行现场试验。

## 1 煤层水力压裂裂缝导向机理

### 1.1 水射流割缝煤体力学特性分析

采用高压水射流对煤体割缝,在煤体中形成类圆盘状孔隙,如图1所示。根据裂缝扩展原则,即当垂直应力大于水平应力时,煤层实施压裂时裂缝均为垂直裂缝。在研究水射流割缝煤体起裂及延伸机理时,只需研究裂缝在水平方向的起裂及延伸。据此,对射流割缝形成的缝隙在直径最大处进行水平

剖切,剖切平面及其受力情况如图2所示。

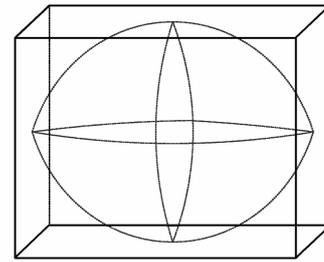


图1 水射流切割煤体裂缝空间几何形态示意图

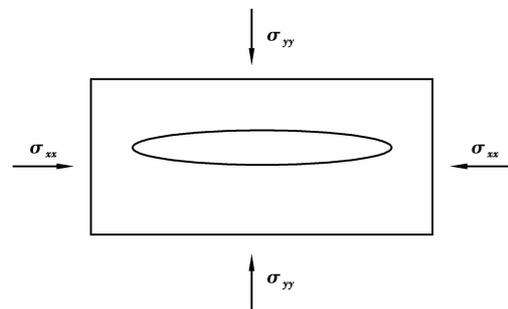


图2 水射流割缝缝隙剖面图

将煤体视为理想弹塑性体,屈服准则符合库伦摩尔准则。采用FLAC<sup>3D</sup>对水射流割缝缝隙平面剖面进行受力分析,模型大小为20 m×20 m,缝隙长轴半径为2 m,纵向半径为0.2 m。假定模型平面两向受力相同,均为10 MPa,模型参数如表1所示。

表1 模型参数

参数	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
数值	2.08	0.97	1.02	0.5	17

计算采用默认精度,计算过程中对不平衡力进行监测。图3为射流割缝形成后缝隙尖端剪切破坏区,其形状为典型的耳状。在地应力的作用下水射流割缝缝隙尖端的形成,使缝隙尖端产生应力集中。当所受应力超过煤体抗拉强度时产生破坏区。在实施水力压裂时,在内水压的作用下缝隙尖端首先破坏,即裂缝在缝隙尖端起裂。与此相对应,圆柱形钻孔在成孔后受地应力作用在孔边缘由里向外依此形成圆环状破坏区、塑性区、弹性区,孔周边应力相等,在内水压的作用下钻孔起裂位置随机,导致裂缝扩展的无序性。

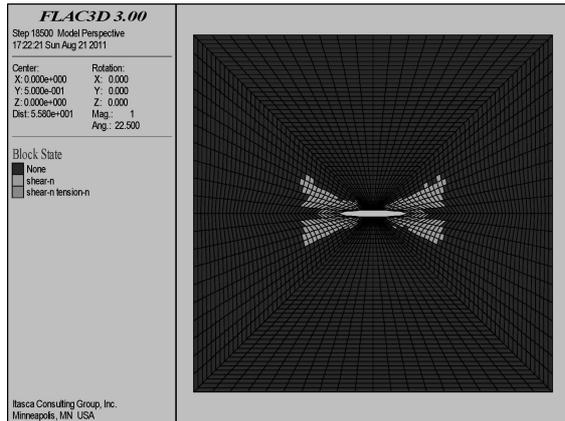


图 3 射流割缝尖端剪切破坏区

## 1.2 水射流割缝媒体水力压裂裂缝延伸规律

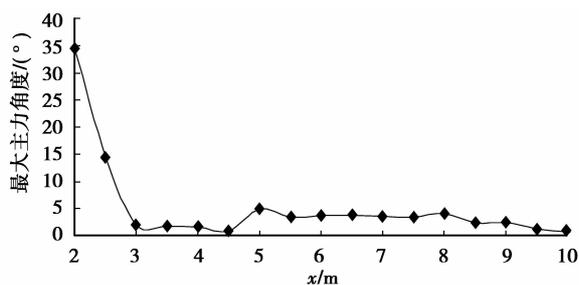
裂缝在水射流割缝缝隙尖端处起裂后,裂缝的延伸方向受最大主应力方向控制,即裂缝延伸方向平行于最大主应力方向,垂直于最小主应力方向。为研究水射流割缝媒体水力压裂裂缝延伸规律,需要对水射流割缝后媒体的最大主应力方向进行分析计算。最大主应力方向可由下式计算:

$$\tan 2\theta = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为最大主应力法向与 $x$ 的夹角; $\tau_{xy}$ 为平面剪应力; $\sigma_{xx}$ 为任意点 $x$ 方向应力值; $\sigma_{yy}$ 为任意点 $y$ 方向应力值。

已知在水平应力相等的煤层中裂缝的起裂位置位于水射流割缝缝隙尖端处,在缝隙尖端处附近裂缝会沿着水平方向发展,但受最大主应力方向的影响,裂缝的延伸会出现变化,如转向等。所以为研究裂缝的扩展是否会出现转向,需要对 $x$ 轴方向最大主应力方向进行计算。

通过拾取 $x$ 正轴(2,0)、(2.5,0)、(3,0)、(3.5,0)、(4,0)、(4.5,0)、(5,0)、(5.5,0)、(6,0)、(6.5,0)、(7,0)、(7.5,0)、(8,0)、(8.5,0)、(9,0)、(9.5,0)、(10,0)处 $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 的值,采用式(1)计算以上个点的最大主应力的方向,结算结果如图4所示。

图 4  $x$ 轴最大主应力角度

由于在射流割缝缝隙尖端处 $\sigma_{yy}$ 存在应力集中,导致尖端处最大主应力与 $x$ 轴夹角较大。但离开尖端0.5~1 m之后,主应力角度突然减小,远离尖端处最大主应力方向基本与 $x$ 轴平行,说明裂纹在尖端处起裂后,沿着 $x$ 方向延伸。

依此可以得出在水平应力相等的条件下,水射流割缝影响范围内水力压裂裂缝起裂位置位于射流割缝缝隙尖端处,裂缝在起裂后沿裂缝尖端延伸方向扩展。

## 2 水力压裂裂缝导向技术工艺

高压水射流割缝媒体压裂工艺主要由钻孔布置工艺、高压水射流割缝工艺、封孔工艺及水压致裂工艺组成。

### 2.1 钻孔布置工艺

通过前述研究可知,水压致裂裂缝延伸方向与割缝缝隙影响范围有关,即与水射流割缝媒体所形成塑性区的大小有关。在射流割缝媒体所形成的塑性区内,裂缝的延伸方向与起裂位置延伸角度相同。如使水压致裂裂缝不出现转向或向临层扩展,须保证裂缝始终处于塑性媒体中延伸,即水射流割缝在媒体中形成连续塑性区,使割缝缝隙形成的塑性区相互衔接(如图5)。根据经验公式,塑性区半径是射流割缝缝隙半径的3~5倍;通过判断射流割缝半径的大小,可以确定钻孔布置间距。

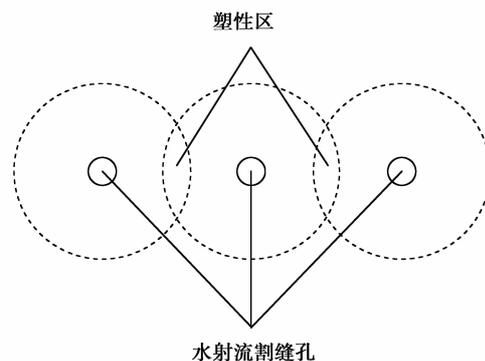


图 5 水力压裂钻孔布置示意图

### 2.2 水力压裂钻孔封孔工艺

水压致裂封孔装置主要由封孔器、压裂管及筛管组成。封孔器由封孔木楔、压裂管及注浆管组成,注浆管与注浆泵相连,注水管进口采用U型销式快速接头与高压胶管相连,出口与压裂管相连,注浆管采用4分镀锌管,注浆管螺纹采用G1/2管螺纹。注水管采用外径为30 mm,内径为14 mm的 $\phi 30 \times 8$ 厚壁无缝钢管。压裂管材

料和注水管材料相同。处于煤层中的压裂管加工成筛管,筛管的主要作用为避免压裂孔末端出口形成射流。

封孔材料主要有马丽散、白色硅酸盐水泥(325)和普通硅酸盐水泥组成(425)。马丽散主要用途为封堵密封孔口。白色酸盐水泥和普通硅酸盐水泥加水混合对钻孔进行封堵,比例为1:3.5。

压裂孔孔口采用 $\phi 94$  mm直径钻头扩孔至孔深方向2 m处,以方便木楔、压裂管、筛管放入钻孔。将筛管采用纱布用纱布包裹50~100 cm,防止砂浆

回流堵塞压裂管。将筛管和压裂管连接,放入钻孔直至送入压裂钻孔孔底。当压裂管筛管送至孔底时停止送管。之后向孔外方向拉动压裂管使棉纱收缩,起到封堵水泥砂浆及过滤水的作用;棉纱长度不小于0.4 m,数量以与孔壁较紧密接触为准,为与压裂管绑捆结实,可在压裂管上焊接小齿。压裂钻孔孔口采用马丽散加棉纱封堵,长度不低于1.5 m,同时在孔口打入木楔(如图6所示)。采用注浆泵将调配的水泥浆注入钻孔,直至压裂管中有水流出,停止注浆。

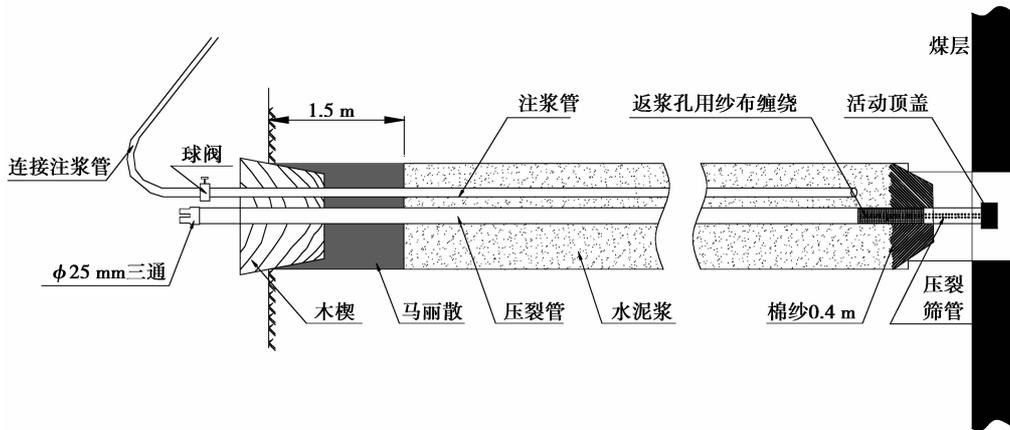


图6 压裂孔封孔示意图

### 2.3 水力压裂裂缝控制技术工艺

水压致裂系统装置由乳化泵组、水表、压力表、高压管、封孔器及相关装置连接接头等组成(如表2所示)。

表2 水压致裂系统装置

序号	用途	名称	规格	数量
封孔设备	1	专用封孔器(配套接头)		若干
	2	煤矿用漏斗下料注浆泵		1台
	3	水泥		4包
	4	水泥砂浆封孔器	DXSLYL-012	2套
参数测定设备	5	流量计	矿用煤气表	若干
	6	压力表		2个
压裂设备	7	乳化泵	BRW31.5/200	1台
	8	高压水管	32 mm、40 MPa	500 m
	9	水表	$\phi 100$ mm	1个
	10	压力表	高压耐震	1个

乳化泵安设在正反向风门外的新鲜风流中;流量表安设在乳化泵进水侧;将井下供水管连接至高压注水泵的水箱进水口,水箱出水口采用专用胶管与高压注水泵连接,压裂孔孔口处高压注水管必须安设高压闸门、卸压阀等,详见图7。

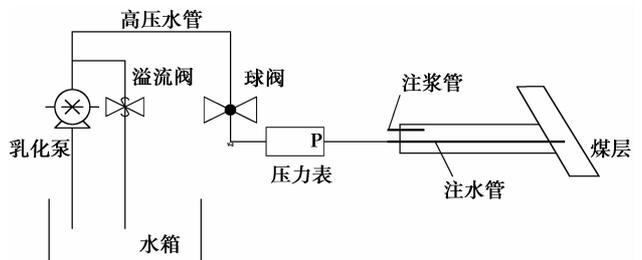


图7 水力压裂设备连接示意图

在钻孔进行水射流割缝之后进行水压致裂,分为以下几个步骤:首先在钻孔中放入注水管,然后采用封孔材料进行封孔,待封孔材料养护期过后进行压裂。

### 3 现场试验

#### 3.1 试验地点概况

试验地点选择在张狮坝扩区 S11203 下顺槽内进行,井下标高为 +610.3~+613.4 m,埋深为 281.7~449.9 m。压裂其上邻近层 M8 煤层。M8 煤层原始瓦斯含量为 18.58 m<sup>3</sup>/t,水分为 0.47%,孔隙率为 4.79%,顶底板均为粉质砂岩。

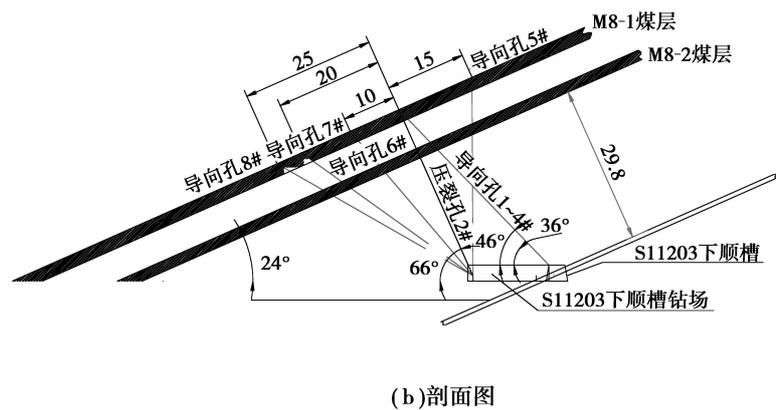
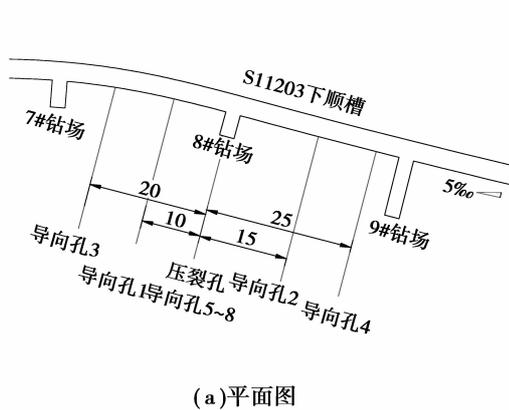


图8 压裂孔及导向孔布置图

#### 3.3 试验结果分析

压裂范围的确定通过观察导向孔出水情况可以确定。10:40 导向孔 6# 孔、导向孔 1# 孔有大量水流出;11:00 导向孔 2# 有水流出;11:07 时,8# 孔有水流出,可以判断在煤层倾向上压裂半径超过 25 m。在上述压裂的基础上,于 10 月 27 日继续对 M8-1 煤层实施压裂,注入水量 36 m<sup>3</sup>,注水时间为 250 min,最后乳化泵内水位下降非常缓慢,压力上升至 25 MPa 时停止压裂,导向孔 3# 孔(走向 25 m)的压力表压力升至 8 MPa,即说明该压裂孔的影响半径在走向上已达到 25 m。可以总结出 8# 钻场定向压裂半径在走向和倾向上均超过了 25 m。

抽放钻孔布置在 S11203 下顺槽 8#、6#、5# 钻场内,每个钻场施工抽放钻孔 5 个,均终孔于 M8-1 煤层,控制压裂钻孔上、下各 20 m,所有钻场的参数均一致,其中 8#、6# 钻场的钻孔不进行高压水力割缝;5# 钻场的钻孔进行高压水力割缝。所有抽放钻孔施工完成后,均使用  $\phi 50$  mm PVC 管和水泥砂浆机械封孔方式进行封孔,封孔深度为 8 m。

水力压裂抽放孔(8# 钻场 6 个)共抽放瓦斯纯量为 13 492.21 m<sup>3</sup>(抽放 42 d),抽放瓦斯平均浓度

#### 3.2 钻孔布置

在 8# 钻场顶板进行开孔,垂直于煤层施工,终孔于 M8-1 煤层。导向孔分别布置在 S11203 下顺槽 8# 钻场内和 8# 钻场南北,共设计导向孔 8 个,分别检验横向 10~25 m、纵向 10~25 m 的压裂效果,横向导向孔终孔点与压裂孔处于同一标高,纵向导向孔与压裂孔处于同一中线,如图 8 所示。

为 68%,单孔平均抽放纯量为 0.037 m<sup>3</sup>/min。作为对比的普通孔(6# 钻场 5 个)抽放瓦斯纯量为 3 053.55 m<sup>3</sup>(抽放 42 d),抽放瓦斯平均浓度为 32%,单孔平均抽放纯量为 0.003 3 m<sup>3</sup>/min。压裂之后,相比普通孔瓦斯抽放纯量提高了 11.26 倍,抽放浓度提高了 2.12 倍。

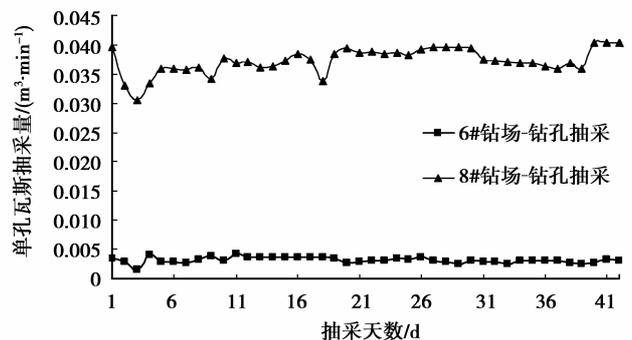


图9 抽放纯量对比图

### 4 结论

1) 提出了水力压裂裂缝导向技术,即在压裂孔周边合理布置导向钻孔,压裂孔及导向钻孔均采用高压水射流割缝技术在煤孔中间形成深度缝隙,从而导向裂缝的延伸。

2)数值分析了射流割缝缝隙受力状态,发现了尖端在地应力作用下形成剪切破坏区,在内水压的作用下裂缝在射流割缝尖端处起裂;并计算出裂缝水平延伸方向最大主应力角度小于 $5^\circ$ ,即裂缝在尖端起裂后沿水平方向延伸;从而得出了在射流割缝影响范围内,裂缝受导向孔控制并向导向孔方向延伸。

3)应用结果表明,试验结果表明:导向孔能够控制裂缝的延伸,压裂范围为50 m以上;抽采数据表明瓦斯抽放平均浓度为68%,单孔平均抽放纯量为 $0.037 \text{ m}^3/\text{min}$ ;采用裂缝控制技术后相比普通孔瓦斯抽放纯量提高了11.26倍,抽放浓度提高了2.12倍。

### 参考文献:

- [1] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004.
- [2] 易丽军,俞启香. 突出煤层密集钻孔瓦斯预抽的数值试验[J]. 煤矿安全,2010(2):1-4,9.  
YI Lijun, YU Qixiang. Numerical test of gas pre-drainage with dense boreholes in outburst coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2010(2):1-4,9.
- [3] 王志亮. 煤层深孔预裂爆破裂隙扩展机理与应用研究[D]. 北京:中国矿业大学博士学位论文,2010.
- [4] 李晓红,卢义玉,赵瑜,等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报,2008,33(12):1386-1390.  
LI Xiaohong, LU Yiyu, ZHAO Yu, et al. Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12):1386-1390.
- [5] 张国华,魏光平,侯凤才. 穿层钻孔起裂注水压力与起裂位置理论[J]. 煤炭学报,2007,32(1):52-55.  
ZHANG Guohua, WEI Guangping, HOU Fengcai. Theory of start-split affusion stress and start-split location about through coal delaminaions' bore of hydraulic fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1):52-55.
- [6] 薛莉莉. 煤层气储层压裂数值模拟技术研究[D]. 山东:中国石油大学硕士学位论文,2009.
- [7] 王东浩. 煤层气压裂裂缝数值模拟研究[D]. 成都:西南石油大学硕士学位论文,2009.
- [8] 张国华. 本煤层水力压裂致裂机理及裂隙发展过程研究[D]. 辽宁:辽宁工程技术大学硕士学位论文,2003.
- [9] 乌效鸣. 煤层气井水力压裂计算原理及应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [10] 李兆敏,蔡文斌,张琪,等. 水平井压裂裂缝起裂及裂缝延伸规律研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2008,23(5):46-48,52.  
LI Zhaomin, CAI Wenbin, ZHANG Qi, et al. Study on the initiation and propagation laws of the fractures in horizontal well fracturing [J]. Journal of Shiyou University, 2008, 23(5):46-48, 52.
- [11] 李玮,闫铁,毕雪亮. 基于分形方法的水力压裂裂缝起裂扩展机理[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(5):87-91.  
LI Wei, YAN Tie, BI Xueliang. Mechanism of hydraulically created fracture breakdown and propagation based on fractal method [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(5):87-91.
- [12] 陈勉,周健,金衍,等. 随机裂缝性储层压裂特征实验研究[J]. 石油学报,2008,29(3):431-434.  
CHEN Mian, ZHOU Jian, JIN Yan, et al. Experimental study on fracturing features in naturally fractured reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3):431-434.
- [13] 刘建军,杜广林,薛强. 水力压裂的连续损伤模型初探[J]. 机械强度,2004,26(Sup1):134-137.  
LIU Jianjun, DU Guanglin, XUE Qiang. Discussion on continue damage model of hydraulic fracturing [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(Sup1):134-137.
- [14] Chekhonin E, Levonyan K. Hydraulic fracture propagation in highly permeable formations, with applications to tip screenout [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, 50:19-28.
- [15] Huang B X, Liu C Y, Fu J H, et al. Hydraulic fracturing after water pressure control blasting for increased fracturing [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(6):976-983.
- [16] Olovyan A G. Mathematical modeling of hydraulic fracturing in coal seam [J]. Journal of Mining Science, 2005, 41(1):61-67.
- [17] Lekontsev Y M, Sazhin P V. Application of the directional hydraulic fracturing at Berezhovskaya Mine [J]. Journal of Mining Science, 2008, 44(3):253-258.

(编辑 郑洁)