

# 非均匀孔隙压力场导向水压裂纹扩展机制

卢义玉<sup>1,2</sup>,贾云中<sup>1,3</sup>,汤积仁<sup>1,2</sup>,宋晨鹏<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030;  
2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室,重庆 400030;  
3. Department of Energy and Mineral Engineering, EMS Energy Institute and G3 Center,  
The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA)

摘 要:为揭示非均匀孔隙压力场对水压裂纹扩展的影响,采用多孔弹性力学、断裂力学、渗流力学和热弹性力学理论,建立了考虑孔隙压力的水压裂纹尖端应力强度因子计算模型,并采用室内实验和 RFPA<sup>2D</sup>-Flow 数值模拟软件进一步分析了非均匀孔隙压力场对水压裂缝扩展的导向机制.研究结果表明:孔隙压力场的存在可以增大水压裂纹尖端的应力强度因子,从而诱导水压裂缝沿高孔隙压力方向扩展;同时,水压裂纹尖端的应力强度因子会随着孔隙压力增大而增大,孔隙压力越大,裂纹的偏转幅度也会越大.

关 键 词:非均匀孔隙压力场;水压裂纹;应力强度因子;裂纹导向;RFPA<sup>2D</sup>-Flow

中图分类号:TD 712 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)07-1028-06

## Mechanism of Hydrofracture Propagation Control by Non-uniform Pore Pressure Field

LU Yi-yu<sup>1,2</sup>, JIA Yun-zhong<sup>1,3</sup>, TANG Ji-ren<sup>1,2</sup>, SONG Chen-peng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. National & Local Joint Engineering Laboratory of Gas Drainage in Complex Coal Seam, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. Department of Energy and Mineral Engineering, EMS Energy Institute and G3 Center, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA.  
Corresponding author: JIA Yun-zhong, E-mail: cqjyz@gmail.com)

**Abstract**: To reveal the effect of non-uniform pressure on hydraulic fractures propagation, the porous elasticity mechanics, fracture mechanics, seepage mechanics and thermal elasticity mechanics were used to build a hydrofracture crack tip stress intensity factor calculation model considering the pore pressure. Then, through laboratory experiments and numerical simulation, the guiding mechanism of pore pressure on hydrofracture was verified. The research results showed that pore pressure can increase the crack tip stress intensity factor of hydrofracture, which causes the fractures extend to the high pore pressure region; at the same time, stress intensity factor of hydrofracture will be enlarged with the increase of pore pressure. A larger pore pressure will lead to larger deflection amplitude of fractures.

**Key words**: non-uniform pore pressure field; hydrofracture; stress intensity factor; fracture propagation control; RFPA<sup>2D</sup>-Flow

水力压裂技术是广泛应用于石油工程、采矿工程和地质勘探中的常规技术手段.很多学者已经对水力压裂技术开展了研究,并作出了丰富的研究成果<sup>[1-3]</sup>.现有的研究表明,当水力压裂的井筒内水压大于井壁的抗拉能力时,水力压裂方法可以在井壁周围地区产生一定的裂缝.在实际的水力压裂施工作业中,水压裂纹的无序扩展将会带来很多问题,例如煤矿开采过程中导致顶底板

的破坏,石油开采过程中导致压裂效果不明显,采收率较低.因此,如果能够人为地控制裂纹的扩展方向,在工程上具有重要意义.所以,各国学者针对如何控制裂缝走向开展了一定的研究.利用在压裂孔底部开楔形环槽,产生应力集中来控制裂缝发展方向的方法已经初步应用于波兰煤矿<sup>[4]</sup>;刘勇提出了结合射流割缝和水力压裂的优势,利用高压水射流在钻孔轴向或径向预割出给定方向的裂缝,然后对预割裂缝进行水力压裂的定向压裂技术<sup>[5]</sup>.但是,上述研究都局限于在压裂孔周围进行改造,水压裂缝在持续扩展过程中,天然裂缝、煤岩交界面和地层界面等非连续性结构面也会导致水压裂缝的转向<sup>[6-7]</sup>.文献[8]指出在解决水力压裂问题时,不能忽视孔隙压力场对水压裂缝扩展的影响.一些学者也研究了对称或者均匀孔隙压力场作用下裂缝的扩展规律,并基于此提出了考虑孔隙压力的水力压裂扩展模型<sup>[9]</sup>.但是,现阶段的研究大多基于均匀孔隙压力场.在这种情况下,水压裂缝通常会沿着最小水平主应力的方向扩展而不会发生偏转.如果可以人为地制造出非均匀的孔隙压力场,将可能使得裂缝发生转向,而国内外较少有这方面的理论和实验研究报道.因此,有必要从理论和实验上对非均匀孔隙压力场影响水压裂缝扩展的机制进行分析,为后期提出一种新的水压裂缝导向方法奠定一定的理论和实验基础.

本文将基于多孔弹性力学,从传统断裂力学中的裂缝尖端应力场的角度出发,使用热弹性力学和渗流力学的方法求解得到考虑了孔隙压力的水压裂缝尖端应力强度因子,并从应力角度分析了非均匀孔隙压力场对水压裂缝扩展的影响,通过非均匀孔隙压力场条件下的水压裂缝扩展实验研究和数值模拟实验,分析非均匀孔隙压力场对水压裂缝扩展的导向机制.基于以上理论分析和实验研究,提出了一种新的裂缝导向方法.

### 1 考虑孔隙压力的裂纹尖端应力强度因子

可以将砂岩材料当作多孔介质.当砂岩中存在水介质时,在毛细管力的作用下,水会沿着砂岩的毛细管运动,并将孔隙充满,这将对材料的强度特征产生较大的影响.在水中,电荷的相互作用力比在空气中小 81 倍,因此粒子间是离子键的材料(黏土、盐和酸的晶体和大多数的岩石的粒子间均为离子键)在有水作用的情况下,其断裂韧性

也会减小相应的倍数.

需要指出的是,弹性骨架中的内应力无法直接通过理论推导获得.因此,考虑采用热弹性力学的方法求解考虑孔隙压力条件下裂纹的尖端应力强度因子.如果渗透理论的稳态问题满足 Darcy 定律,那么只需要用孔隙压力  $p$  代替热弹性应力因子解中的  $\alpha ET/(1-2\nu)$  ( $\alpha$  是热膨胀系数,  $E$  是弹性模量,  $T$  是温度,  $\nu$  是泊松比),就可以得到弹性骨架中的内应力<sup>[10]</sup>.根据这种类比,可以在求解到热弹性应力强度因子的情况下,求得多孔材料断裂问题的解.

为了简化计算,可以假设以下模型:设含圆盘状细缝的无限体,细缝平面垂直于远离细缝处的温度梯度为  $\nabla T$  (图 1).

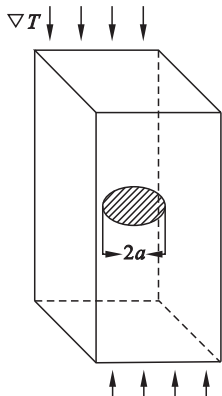


图 1 热应力场模型  
Fig. 1 Model under thermal stress field

当  $Q(r) = -Q_0$ , I 型应力强度因子为

$$K_I = (1/2 [1 + \nu] (1 - \nu)) [\alpha_1 T_\infty Q_0 \sqrt{\pi a \mu}] \quad (1)$$

式中:  $Q(r)$  表示在  $r$  处的热量;  $\alpha_1$  为热线性膨胀系数;  $Q_0$  为初始热量;  $\mu$  为系统化学势.

如果在细缝处给定常值温度,即  $\theta = -\theta_0$ ,当  $0 < r < a, z = 0$ ; 当  $\partial\theta/\partial z = 0, r > a, z = 0$ , 则

$$K_I = -[\chi(1 + \nu) \pi(1 - \nu)]^{-1} \alpha T_\infty Q_0 \sqrt{\pi a \mu} \quad (2)$$

若细缝不受载,则应力强度因子如下<sup>[11]</sup>:

$$K_I = E \alpha_1 a^{\frac{3}{2}} \nabla T [3\pi(1 - \nu)] \quad (3)$$

式中假设热流不能通过细缝.

设有孤立圆盘状细缝,  $z = 0, r < a$  是分布热源,如图 2 所示.

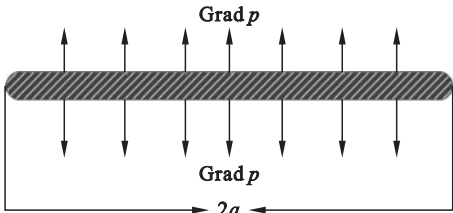


图 2 细缝模型  
Fig. 2 Model of minor crack

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \begin{cases} a^{-1} Q(r/a), & 0 < r < a, z=0; \\ 0, & r > a, z=0. \end{cases} \quad (4)$$

而物体中任意一点的温度为  $T_{\infty}[1+\theta(r,z)]$ , 其中  $T_{\infty}$  是远离细缝处的物体的定常温度, 则此时<sup>[12]</sup>:

$$K_I = -[(1+\nu)(1-\nu)]\alpha T_{\infty}\sqrt{\pi a}\int_0^1 sQ(s)ds. \quad (5)$$

这样, 就得到了给定温度场条件下, 裂纹扩展的应力强度因子. 如前所述, 考虑如下多孔介质的断裂问题.

考虑图 3 所示的模型, 可以将孔 2 简化为无穷的多孔空间内有一个盘状裂缝  $x^2+y^2 < a^2, z=0$ . 在裂缝中有恒定压强为  $p_0$  的液体, 在空间内的某处孔隙压强为  $p_0(r)$ , 根据渗流力学的基本理论, 该问题可采用基本的平面径向流的问题, 根据达西定律  $p_0$  和  $p_0(r)$  的关系可以表示为

$$p_0(r) = p_0 - \frac{p_0}{\ln \frac{R}{r_w}} \ln \frac{r}{r_w}. \quad (6)$$

式中  $r_w$  为注水孔的半径,  $R$  为假设的圆形地层的半径. 令远离裂缝的孔隙中的液体压强为  $p_{\infty}$ . 借助于式 (5) 并进行前述类比, 可以得到孔 2 由于液体产生的体积力造成的应力强度因子  $K_I''$ :

$$K_I'' = -\frac{(1-2\nu)}{\pi(1-\nu)}(p_0(r)-p_{\infty})\sqrt{\pi a}. \quad (7)$$

同时, 对于孔 1, 将其简化为无载荷的圆盘状细缝无限体, 在单向均匀压缩作用下的应力强度因子为

$$K_I' = -2\sigma\sqrt{a/\pi}. \quad (8)$$

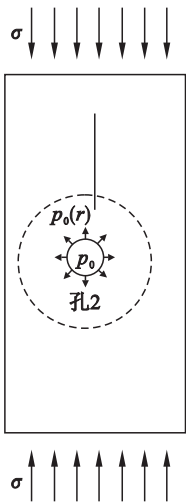


图 3 应力强度因子计算模型

Fig. 3 Calculation model of stress intensity factor

根据叠加原理, 将式 (7) 和式 (8) 进行叠加, 可以得到有非均匀水压作用下的孔 1 裂纹尖端应

力强度因子:

$$K_I = -(2\sigma\sqrt{a/\pi} + \frac{(1-2\nu)}{\pi(1-\nu)}p_0(r)\sqrt{\pi a}). \quad (9)$$

通常情况下, 水压裂纹会沿着扩展所需能量最小的方向进行, 这也就解释了为什么在对称远场应力场的情况下, 裂纹会沿着平行于最大压应力的方向扩展. 但是当远场应力场是非对称的, 地应力场就不能完全决定裂纹的扩展方向了.

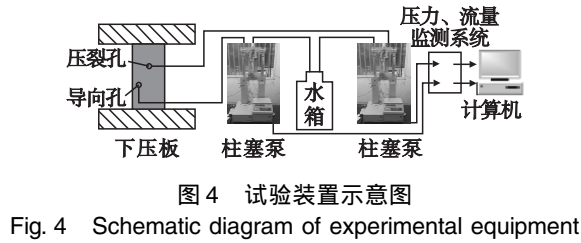
从式 (9) 可以看出, 由于孔隙压力的存在, 使得裂纹尖端的应力强度因子除了原有的压应力造成的  $2\sigma\sqrt{a/\pi}$  项之外, 增加了由孔隙压力导致的  $\frac{(1-2\nu)}{\pi(1-\nu)}p_0(r)\sqrt{\pi a}$  项. 这就导致了裂纹尖端的应力强度因子增加, 也就意味着裂纹尖端的应力场强度增加, 这就决定了裂纹偏向高孔隙压力的区域. 同时可以发现, 随着孔隙压强  $p_0$  的增加,  $r$  处的孔隙压力  $p_0(r)$  也会增加, 这个裂纹尖端的应力场强度增加的幅度也变大, 使得裂纹的偏转幅度也变大.

2 非均匀孔隙压力场条件下的水压裂纹扩展试验

如前所述, 理论研究表明非均匀孔隙压力场将会导致水压裂纹偏向高孔隙压力场的区域. 为了验证这一结论, 本文使用 100 mm × 100 mm × 200 mm 的砂岩试件进行水压裂纹扩展试验.

试验装置示意图如图 4 所示: 试验采用的轴压加载装置为普通岩石力学试验机, 压裂介质和保压介质均采用蒸馏水, 柱塞泵采用美国 ISCO 生产的 260D 型高精度双高压柱塞泵, 该柱塞泵的容积为 266 mL, 可提供的最大压力为 51.7 MPa, 单泵的流速范围是 0.001 ~ 107 mL/min, 双泵同时工作时流速范围为 0.001 ~ 80 mL/min. 工作模式可采用定压控制和定流控制, 本次实验压裂孔 1 采用定流控制, 而导向孔 2 采用定压模式控制. 由于 ISCO 260D 型柱塞泵采集的实验数据只能实时观察, 而不能导入到计算机中. 为了使得实验数据更加真实可信, 实验采用了德国西门子公司生产的压力测量计(编号为 7MF4033-1GA10-2A80)实时记录实验过程中的压力变化, 并导入到电脑进行数据分析处理, 该仪器可以实时记录液体压力并存储在数据卡中, 以 Excel 表格形式导入到计算机中, 测量范围为 0.1 ~ 60 MPa, 测量精度为 0.000 1 MPa, 可

以满足实验要求.



实验所用的砂岩取自重庆市北碚区 ,并加工

表 1 试件压裂试验前基本力学参数				
Table 1 Basic mechanic parameters of specimens before hydraulic fracturing				
试件	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	孔隙度/%	泊松比
试件 1	63. 537	4. 245 801	9. 13	0. 25
试件 2	59. 900	4. 713 964	8. 24	0. 27
试件 3	65. 478	4. 660 423	11. 22	0. 25
平均	62. 972	4. 540 063	9. 53	0. 25

加工好的试件实物图如图 5 所示.

共进行了 5 组实验来验证非均匀孔隙水压对水压裂纹扩展的影响. 实验中 ,轴向压力为 4 MPa ,导向孔水压分别为 0 1 2 3 4 MPa.

实验中 ,首先对导向孔 2 施加水压 ,并且保压 5 min 之后 ,再向压裂孔 1 中注水进行压裂实验. 这样做的目的是让孔 2 中的水充分渗入到岩石中 ,形成实验所需的非均匀孔隙压力场.

实验完成后水压裂纹扩展如图 6 所示.

成 100 mm × 100 mm × 200 mm 的长方体 ,在试件的前表面分别钻两个孔. 其中孔 1 为压裂孔 ,孔 2 为导向孔. 需要说明的是 ,试件只加载了竖直方向的轴压 ,为了控制裂纹只在垂直方向扩展 ,在压裂孔的底部使用刀片刻出了一个深度约为 2 mm 的槽 ,使得水压裂纹在此处起裂 ,并垂直向下扩展.

砂岩试件压裂试验前 ,首先对试件的基本性质进行了测量 ,基本数据见表 1.

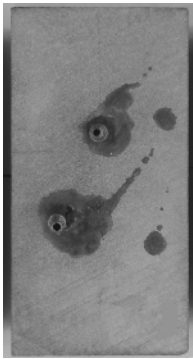


图 5 试件实物图

Fig. 5 Actual picture of sample

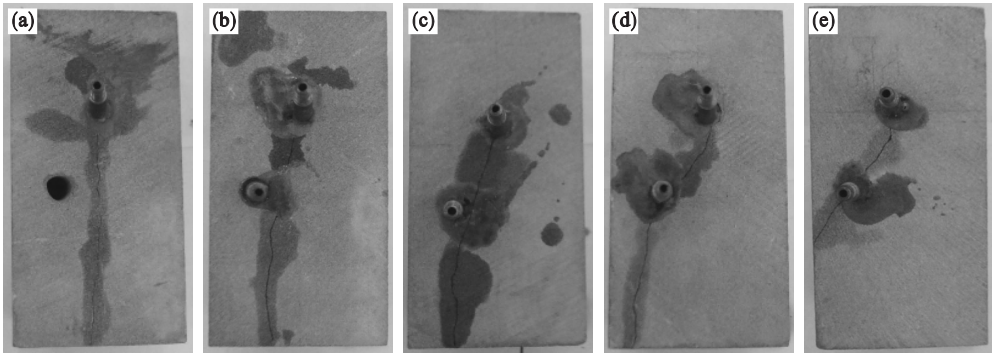


图 6 水压裂纹扩展图

Fig. 6 Diagram of hydraulic crack extension

( a )—水压 0 MPa ;( b )—水压 1 MPa ;( c )—水压 2 MPa ;( d )—水压 3 MPa ;( e )—水压 4 MPa.

可以看出 :当对导向孔 2 不加压时 ,裂纹会基本沿着垂直于压应力的方向扩展 ,这与现有的水压扩展理论是相符的. 当孔 2 的水压为 1 MPa 时 ,裂纹的扩展有偏向于孔 2 的趋势 ,但并没有穿过孔 2 ,仍以向下的趋势发展. 当孔 2 的水压增加到

2 MPa 时 ,裂纹在扩展过程中已经经过孔 2 的边缘 ,并继续向下扩展. 当孔 2 的水压增加到 3 MPa 时 ,水压裂纹穿过了孔 2 ,并继续扩展. 当孔 2 的压力为 4 MPa 时 ,裂纹穿过孔 2 后明显偏转至试件的左侧面.

从上述实验现象明显可以看出孔 2 的压力对水压裂纹扩展的影响,并且裂纹偏转的幅度与导向孔 2 的压力直接相关,随着孔 2 压力的增大,裂纹偏转幅度明显变大.这与理论分析结果是一致的.

### 3 非均匀孔隙压力场条件下的水压裂纹扩展数值模拟实验

为了进一步验证理论和室内实验的结果,本

文采用岩石破裂失稳的渗流应力耦合分析软件 RFPA 进行了数值模拟实验.

建立 200 mm × 100 mm 的矩形区域,划分 400 × 200 = 80 000 个单元.孔 1 的水压以 0.1 MPa 的步长递增,孔 2 施加与室内实验相同的水压.模型的力学参数如表 2 所示.

数值模拟实验的结果如图 7 所示.

表 2 模型力学参数表  
Table 2 Mechanical parameters of model

参数	参考值	载荷控制方式
均质度/m	5	耦合方式 $\beta = 0.02$
弹性模量均值 $E/\text{MPa}$	30 000	加载方式为应力加载
摩擦角/( $^{\circ}$ )	30	应力 - 渗透率耦合方程为负指数方程
抗压强度均值/MPa	63	破坏后孔隙压力系数为 0.6
渗透系数/( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )	0.1	破裂后渗透率系数 $\xi = 20$
泊松比 $\mu$	0.25	破坏后残余强度百分比为 0.1
孔隙压力系数 $\alpha$	0.1	连通单元破坏后孔隙压力系数 $\alpha = 1$

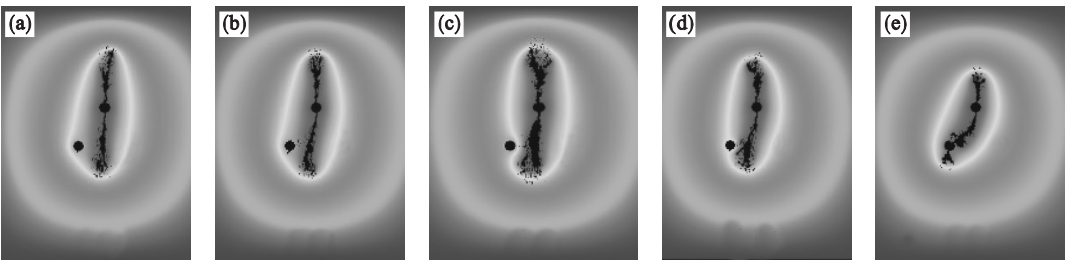


图 7 数值模拟结果  
Fig. 7 Results of numerical simulation

( a )—水压 0 MPa ;( b )—水压 1 MPa ;( c )—水压 2 MPa ;( d )—水压 3 MPa ;( e )—水压 4 MPa.

由图 7 可以看出,当导向孔 2 不注水时,裂纹基本沿着垂直方向扩展.当导向孔 2 中施加了不同的恒定水压,裂纹的扩展都会偏转向孔 2 的方向,孔 2 中的水压越大,裂纹的偏移趋势也越明显,这与前面的实验结果一致.

该结果说明,由于导向孔 2 形成的非均匀孔隙压力场,对裂纹的扩展形成了导向作用.基于理论分析,导向孔 2 的存在导致了裂纹尖端应力场的提高,所以,裂纹就更容易偏向于这个方向扩展了.

### 4 应用与展望

如图 8 所示,如果在压裂作业之前,在附近区域先钻孔并且施加一定的水压,形成高孔隙压力区,再进行水力压裂施工作业,可以使得裂纹沿着

预设的方向扩展.但是,本文的研究仅对该现象的原理做了初步的解释与分析.在实验过程中,也发现导向孔具有一定的范围,这是压裂施工中非常重要的参数.后续的工作将对此进行更深入的研究.

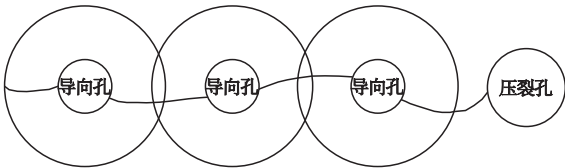


图 8 裂纹导向示意图  
Fig. 8 Schematic diagram of inducing crack extension

### 5 结 论

1) 理论研究表明,非均匀孔隙压力场的存在可以增加水压裂纹的尖端应力强度因子,这也就



意味着增加了裂纹尖端的应力场强度,为裂纹的转向扩展提供了条件,使得裂纹偏转向高孔隙压力的区域.

2) 非均匀孔隙压力场条件下的水压裂纹扩展实验和数值模拟分析证明了理论分析的正确性,同时随着孔隙压力的提高,水压裂纹的偏转幅度将会变大.

3) 本文提出了基于非均匀孔隙压力场的裂纹导向方法,水力压裂施工前,通过预先钻井注水保压,形成高孔隙压力区域,使得裂纹沿预设方向扩展.

参考文献：

[ 1 ] Zoback M D ,Rummel F ,Jung R ,et al. Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock[ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* ,1977 ,14( 2 ) :49 – 58.

[ 2 ] Bruno M S ,Nakagawa F M. Pore pressure influence on tensile fracture propagation in sedimentary rock [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* ,1991 ,28( 4 ) :261 – 273.

[ 3 ] Bohlooli B ,De Pater C J. Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks :influence of fluid rheology and confining stress [ J ]. *Journal of Petroleum Science and Engineering* ,2006 ,53( 1 ) :1 – 12.

[ 4 ] 孙守山 ,宁宇 ,葛钧. 波兰煤矿坚硬顶板定向水力压裂技术 [ J ]. *煤炭科学技术* ,1999 ,27( 2 ) :51 – 52.

( Sun Shou-shan ,Ning Yu ,Ge Jun. Directional hydraulic fracturing technology for hard roof in Poland coal mines[ J ]. *Coal Science and Technology* ,1999 ,27( 2 ) :51 – 52. )

[ 5 ] 刘勇. 煤矿井下导向压裂裂缝扩展及增透机理[ D ]. 重庆：重庆大学,2012 :71 – 73.

( Liu Yong. A novel approach of crack propagation orientation of hydraulic fracture in mine and its mechanism of improving permeability [ D ]. Chongqing : Chongqing University,2012 :71 – 73. )

[ 6 ] Warpinski N R , Teufel L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation[ J ]. *Journal of Petroleum Technology* ,1987 ,39( 2 ) :209 – 220.

[ 7 ] 宋晨鹏 ,卢义玉 ,贾云中 ,等. 煤岩交界面对水力压裂裂缝扩展的影响 [ J ]. *东北大学学报 ( 自然科学版 )* ,2014 ,35( 9 ) :1340 – 1344.

( Song Chen-peng ,Lu Yi-yu ,Jia Yun-zhong ,et al. Effect of coal-rock interface on hydraulic fracturing propagation[ J ]. *Journal of Northeastern University( Natural Science )* ,2014 ,35( 9 ) :1340 – 1344. )

[ 8 ] Detournay E ,Cheng A H D ,Roegiers J C ,et al. Poroelasticity considerations in in situ stress determination by hydraulic fracturing[ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* ,1989 ,26( 6 ) :507 – 513.

[ 9 ] Renshaw C E ,Pollard D D. Are large differential stresses required for straight fracture propagation paths ?[ J ]. *Journal of Structural Geology* ,1994 ,16( 6 ) :817 – 822.

[ 10 ] Pabst W. The linear theory of thermo-elasticity from the viewpoint of rational thermo-mechanics [ J ]. *Ceramics* ,2005 ,49( 4 ) :242 – 251.

[ 11 ] Brown W F Jr ,Srawley J E. Fracture toughness testing methods [ C ]//Fracture Toughness Testing and Its Applications. Chicago ,1964 :133 – 196.

[ 12 ] Sneddon I N ,Lowengrub M. Crack problems in the classical theory of elasticity [ M ]. New York :Wiley ,1969.