

煤岩交界面对水力压裂裂缝扩展的影响

宋晨鹏^{1,2}, 卢义玉^{1,2}, 贾云中^{1,2}, 夏彬伟^{1,2}

(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)

摘 要: 针对井下煤层压裂过程中, 压裂裂缝扩展至煤岩交界面处, 受多种力学因素的综合影响, 扩展方向可能会发生偏转. 通过建立压裂裂缝遇煤岩交界面二维模型, 采用理论分析结合数值模拟的方法, 对煤岩交界面的破坏机理及压裂裂缝扩展规律进行研究. 结果表明: 煤岩交界面与水平剖面的相交角、水平主地应力差、最小水平主地应力、煤岩交界面的黏聚力及煤岩层弹性模量差异等是影响裂缝扩展方向的主要因素. 随着相交角或水平主应力差的增加, 裂缝直接穿过煤岩交界面的可能性增加; 最小水平主地应力越大, 裂缝直接穿过煤岩交界面的可能性越小; 煤层交界面的黏聚力越小或煤层与顶板岩层的弹性模量差异越大, 裂缝沿煤岩交界面扩展的趋势越明显.

关 键 词: 水力压裂; 裂缝扩展; 煤层; 煤岩交界面; 临界水压

中图分类号: TD 712.6

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)09-1340-06

Effect of Coal-Rock Interface on Hydraulic Fracturing Propagation

SONG Chen-peng^{1,2}, LU Yi-yu^{1,2}, JIA Yun-zhong^{1,2}, XIA Bin-wei^{1,2}

(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. Corresponding author: SONG Chen-peng, E-mail: songchenpeng@163.com)

Abstract: During hydraulic fracturing in coal seams, fractures expand to coal-rock interface and the direction of fracture growth may change because of the effects of many mechanical factors. Based on the 2D model of coal-rock interface in hydraulic fracturing, the theoretical analysis and numerical simulation were conducted to investigate the failure mechanism of coal-rock interface and the propagation characteristics of fractures induced by hydraulic fracturing. It is shown that: the main factors which affect the development direction of fractures are intersecting angle between coal-rock interface and horizontal profile, horizontal stress difference, minimum horizontal in-situ stress, cohesive strength of coal-rock interface and elastic modulus difference between coal and rock. With the decrease of intersecting angle or horizontal stress difference, the probability of fractures crossing coal-rock interface will raise; while the minimum horizontal in-situ stress increases, the probability of fractures crossing coal-rock interface will reduce; with the decrease of cohesive strength of coal-rock interface or increase of elastic modulus difference between coal and rock, the fractures will tend to extend along the coal-rock interface.

Key words: hydraulic fracturing; fractures propagation; coal seam; coal-rock interface; internal critical water pressure

水力压裂作为一种适用于低透气性油气储层抽采的成熟技术, 近年来被应用于煤矿井下煤层瓦斯抽采. 但由于煤系地层的赋存特点与油气储

层显著不同, 具体表现在煤系地层受构造运动作用普遍为倾斜地层, 当压裂裂缝在水平方向扩展至煤岩层交界面时, 裂缝扩展方向会发生偏转; 而

油气储层普遍为近水平地层,产层厚度是煤层的几倍到十几倍,一般不考虑水压裂缝在水平方向扩展至层间界面的问题。

目前对煤矿井下压裂的研究起步较晚,主要基于油气系统压裂相关原理,而对于煤岩交界面对裂缝水平扩展影响的研究更未见相关报道.在油气压裂方面,国内外学者对非均质地层中裂缝垂向扩展问题做了相应研究,与本文涉及的问题有一定共性. Merle 等^[1]的研究认为,断裂韧性和水平主应力差是水压裂缝止裂的重要因素. Hanson 等^[2]和 Anderson^[3]就层间界面性质对裂缝垂向扩展影响的试验研究发现,裂缝扩展到层间界面后能否沿着界面发生滑移,主要取决于界面所受到的垂向压应力大小以及界面的粗糙程度. 我国学者陈勉、周健等^[4-5]对分层物性参数影响裂缝垂直扩展的研究发现,储隔层的弹性模量和断裂韧性是裂缝能否穿透层间界面的主要因素. 上述学者的研究与煤岩层裂缝水平扩展的问题有以下两点不同:上述研究只针对水平油气地层水压裂缝垂向扩展问题,未涉及裂缝水平扩展及地层倾角因素;此外煤层与顶底板力学性质的差异比油气地层中产层与隔层的力学差异性更大。

因此,本文基于煤系地层压裂特点,对煤岩界面水压破坏机理和裂缝扩展规律进行研究,揭示煤岩层力学参数对压裂裂缝水平扩展的影响。

1 煤岩层水压裂缝模型

煤层水力压裂通常形成垂直于最小水平主地应力方向扩展的垂直裂缝^[6]. 据此,对裂缝进行水平剖切,剖切平面及其受力情况如图 1 所示. 图 1 中 σ_H 为最大水平主地应力, σ_h 为最小水平主地应力, θ 为煤岩层理面与水平剖面的相交角。

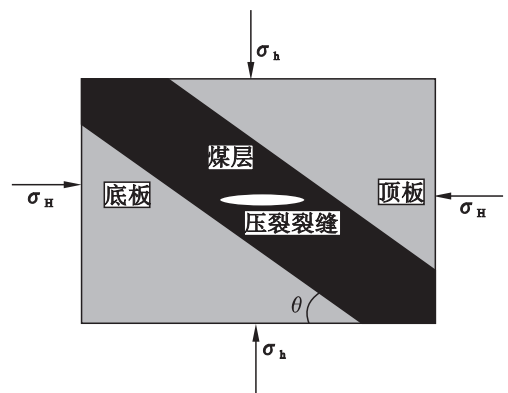


图 1 压裂裂缝遇煤岩交界面二维模型
Fig. 1 The 2D model of coal-rock interface during hydraulic fracturing

2 裂缝扩展分析

2.1 水压裂缝扩展的临界水压

延伸中的水压裂缝受 σ_H, σ_h 和裂缝内水压 p 的共同作用,由应力状态分析可得裂缝水平上的正应力 σ_n 和剪应力 τ_n 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= p - \sigma_h, \\ \tau_n &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据断裂力学相关理论^[7],水压裂缝的扩展失稳属于张开型(Ⅰ型)裂缝问题. 目前,现有水力压裂裂缝扩展分析大多采用 Irwin 裂缝扩展准则^[8],对于Ⅰ型裂纹,应力强度因子 K_I 达到临界值 K_{IC} ,裂缝发生扩展,即

$$K_I = K_{IC}. \quad (2)$$

式中: K_I 为Ⅰ型裂纹应力强度因子; K_{IC} 为临界应力强度因子(断裂韧性). K_I 和 K_{IC} 是两个不同的概念, K_I 由载荷及裂缝的几何形状决定,表示裂缝尖端应力场强度的一个力学量,其计算式为

$$K_I = \sigma_n \sqrt{\pi a}. \quad (3)$$

其中: σ_n 为裂缝面上的正应力; a 为裂缝的半长. 对于本文涉及的问题将式(1)中 σ_n 的表达式带到式(3)可得

$$K_I = (p - \sigma_h) \sqrt{\pi a}. \quad (4)$$

K_{IC} 表示为某种岩石材料抵抗断裂的能力,与岩石的弹性模量、泊松比和单位面积表面能存在如下关系:

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{1-\nu^2}}. \quad (5)$$

其中: E 为岩石的弹性模量; γ 为单位面积表面能; ν 为泊松比。

将式(4),式(5)带入式(2),整理后可得裂缝发生扩展的临界水压,并设定在煤层中的裂缝扩展临界水压为 p_{m1} ,在岩层中的临界水压为 p_{m2} ,即

$$\left. \begin{aligned} p_{m1} &= \sqrt{\frac{2E_1\gamma_1}{(1-\nu_1^2)}\pi a} + \sigma_h, \\ p_{m2} &= \sqrt{\frac{2E_2\gamma_2}{(1-\nu_2^2)}\pi a} + \sigma_h. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: E_1, γ_1, ν_1 分别为煤体的弹性模量,单位面积表面能,泊松比; E_2, γ_2, ν_2 为岩体的弹性模量,单位面积表面能,泊松比. 由于煤层抵抗断裂的能力 K_{IC} 远小于顶底板岩层,故煤层中的临界扩展水压 p_{m1} 始终小于岩层中的临界扩展水压 p_{m2} .

2.2 煤岩交界面破坏机理

当水压裂缝未延伸至煤岩交界面,根据二维线弹性理论,交界面的剪切应力 τ_t 和正应力 σ_t 可以表示为

$$\tau_t = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\theta, \tag{7}$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\theta. \tag{8}$$

关于水压对层间界面的破坏机理,Daneshy^[9]和 Warpinski^[10]等研究认为,层间界面易发生滑移产生剪切破坏.因此,采用 Mohr – Coulomb 强度准则,作用于煤岩交界面的应力方程为

$$\tau_t = c + K_f (\sigma_t - p_0). \tag{9}$$

式中: τ_t 和 σ_t 分别为煤岩交界面上的剪切应力和正应力; c 为交界面的黏聚力; K_f 为交界面的摩擦系数; p_0 为煤岩界面上的孔隙压力.

当水压裂缝缝端与煤岩界面连通,水进入交界面时,煤岩界面内的孔隙压力为

$$p_0 = \sigma_h + p_{m3}. \tag{10}$$

式中, p_{m3} 为煤岩界面内的水压.将式(7),式(8)和式(10)带入式(9)并整理,可得在水压作用下,煤岩界面发生剪切破坏的临界水压:

$$p_{m3} = \frac{2c - (\sigma_H - \sigma_h) [\sin 2\theta - K_f (1 - \cos 2\theta)]}{2K_f}. \tag{11}$$

2.3 裂缝扩展方向判断

1) 如果 $p_{m3} < p_{m1} < p_{m2}$,则水压裂缝与煤岩界面相交后沿煤岩界面扩展.

2) 如果 $\min(p_{m1}, p_{m2}, p_{m3}) = p_{m1}$,则水压裂缝与煤岩界面相交后,裂缝内水压上升,裂缝将沿 p_{m2} 和 p_{m3} 中临界水压较小的裂缝方向延伸;若 p_{m2} 和 p_{m3} 相差不大,将可能出现水压裂缝部分穿过界面,并同时沿界面扩展.

水压裂缝与煤岩界面相交后的扩展方向由裂缝扩展临界水压 p_{m1}, p_{m2}, p_{m3} 的相对大小决定,而根据式(6)和式(11)的分析结果,三者的相对大小实质上是由煤岩层力学性质所决定,主要受水平主应力差、煤岩界面与水平剖面的相交角 θ 、最小水平主地应力 σ_h 、煤岩交界面的黏聚力 c 和煤岩层弹性模量差异等因素的影响.

3 数值模拟研究

本节将采用岩石破裂失稳的渗流应力耦合分析系统 RFPA^{2D} – Flow^[11–12],就以上因素对裂缝扩展的影响进行数值模拟研究,验证理论结果的正确性,定性得出各因素对水压裂缝扩展的影响规律.

建立 12 m × 9 m 的矩形区域,划分 400 × 300 = 120 000 个单元,如图 2 所示,开挖一个长轴为 1.0 m,短轴为 0.2 m 的椭圆,表示扩展中的裂缝,中部为煤层,上下部分为顶底板岩层.将模型的水平地应力以位移边界条件的方式施加于模型的两边,由于裂缝扩展的主延伸方向垂直于最小水平主应力方向,故在左右两侧加载最大水平主应力 σ_H ,上下方向加载最小水平主应力 σ_h .注入水压作用于扩展中裂缝内部边缘,水压以 0.2 MPa 的步长递增.初始水压视各模型的初始边界条件而定.

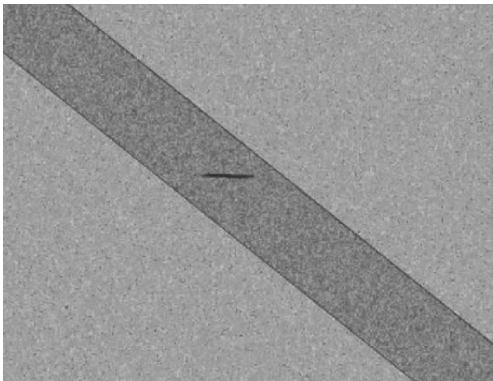


图 2 压裂裂缝遇煤岩交界面模型
Fig. 2 The model of coal-rock interface during hydraulic fracturing

3.1 水平主应力和相交角的影响

根据式(6)和式(11)的研究结果,相交角或水平主应力差的增加,水压裂缝在岩层中扩展的临界水压保持不变,而煤岩界面发生剪切破坏的临界水压将增大,这说明在低相交角、低水平主应力差的条件下,由于煤岩界面发生剪切破坏的临界水压较小,裂缝趋于沿煤岩交界面扩展,并随着相交角或水平主应力差的增加,裂缝的扩展方向将出现沿煤岩交界面和穿过煤岩界面共同存在;当相交角和水平主应力差增加到一定程度时,水压裂缝只沿原有方向穿过交界面继续扩展.本节共进行 12 组模拟,水平主应力和相交角的参数如表 1 所示,煤岩层力学参数如表 2 所示.

模拟结果如图 3 所示,在相交角 $\theta = 30^\circ$ 的 1[#] ~ 3[#]组模拟中,扩展中的裂缝趋于沿煤岩交界面扩展;当相交角为 $\theta = 45^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$ 的第 4[#] ~ 9[#]组模拟中,随着主应力差的增加,裂缝在沿煤岩交界面扩展一段距离后终止而沿最大主应力方向延伸,说明随着主应力差或相交角的增大,水力压裂裂缝趋向直接穿过煤岩交界面扩展.而在 $\theta = 90^\circ$ 的 3 组模拟中,裂缝都直接穿过交界面沿原有方向扩展.

表 1 水平主应力和相交角

Table 1 The horizontal in-situ stress and intersecting angles				
编号	σ_H/MPa	σ_h/MPa	$\theta/(\text{^\circ})$	$(\sigma_H - \sigma_h)/\text{MPa}$
1	10	9	30	1
2	10	7	30	3
3	10	5	30	5
4	10	9	45	1
5	10	7	45	3
6	10	5	45	5
7	10	9	60	1
8	10	7	60	3
9	10	5	60	5
10	10	9	90	1
11	10	7	90	3
12	10	5	90	5

表 2 煤岩层力学参数

Table 2 Mechanical parameters of coal seam and rock stratum			
力学参数	煤层	岩层	界面
均值度	3	3	3
弹性模量/MPa	3 000	40 000	2 000
内摩擦角/(^\circ)	30	30	30
抗压强度/MPa	10	40	7
压拉比	10	10	10
残余强度系数	0.1	0.1	0.1
孔隙水压系数	0.6	0.6	0.6
渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	0.1	0.01	0.15
泊松比	0.35	0.20	0.4
孔隙率/%	4	2	5

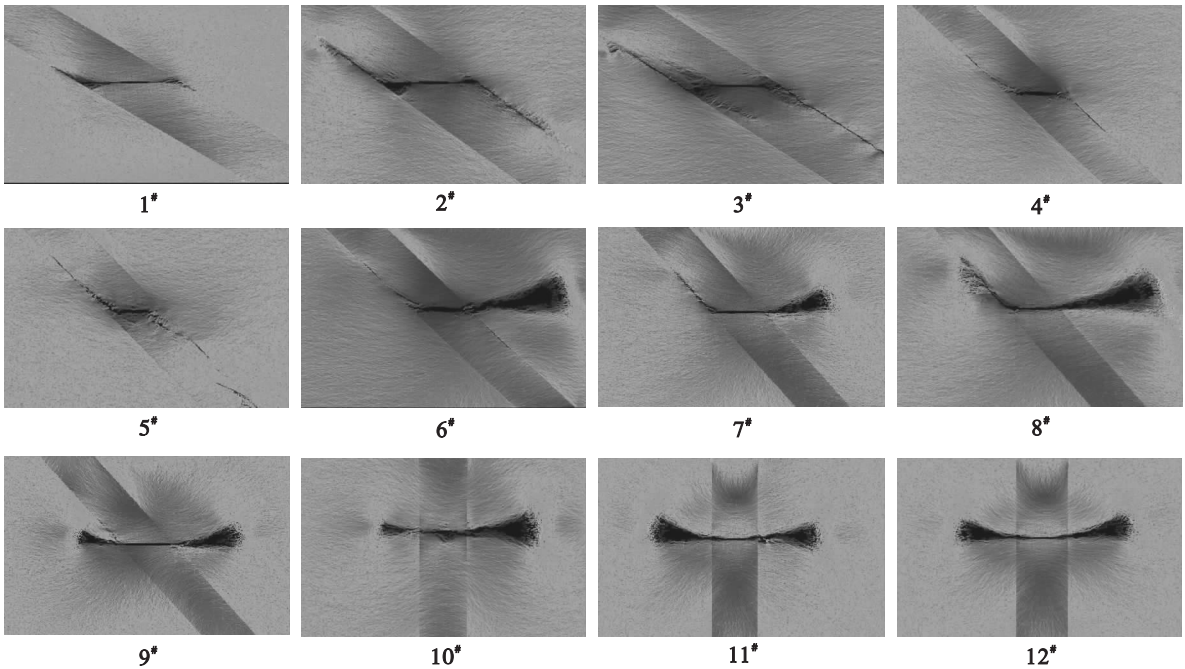


图 3 压裂裂缝扩展模拟结果

Fig. 3 The simulation results of fracture propagation during hydraulic fracturing

3.2 最小水平主地应力的影响

根据式(6)和式(11)的分析结果,当最小水平主应力增加,水平主应力差保持不变时,在岩层中扩展的临界水压将增加,而煤岩界面发生破坏的临界水压不变.因此,改变3.1节数值模拟中第8[#],9[#]两组的最小水平主地应力,其余参数同3.1节,考察其对裂缝扩展的影响(如表3所示).

表 3 地应力参数

Table 3 Parameters of in-situ stress MPa			
编号	σ_H	σ_h	$\sigma_H - \sigma_h$
13(与8对照)	7	4	3
14(与9对照)	13	8	5

两组模拟结果如图4所示,并与8[#],9[#]两组的裂缝扩展情况对比发现,当水平主应力差不变而最小主地应力发生变化时,确实对裂缝的扩展结果产生了影响;最小水平主地应力越大,裂缝穿过煤岩交界面沿原方向扩展的可能性越小.

3.3 煤岩界面黏聚力的影响

根据裂缝扩展的理论分析,煤层交界面的黏聚力越小,裂缝沿煤岩交界面扩展的可能性越大.由于在RFPA^{2D}-Flow系统中无法直接设定材料的内聚力,故通过改变交界面的抗拉/压强度反映内聚力变化对裂缝扩展的影响.由于篇幅所限仅对第3.1节中第4[#],6[#]组模拟中煤岩界面的参数进行改变做定性分析(见表4).

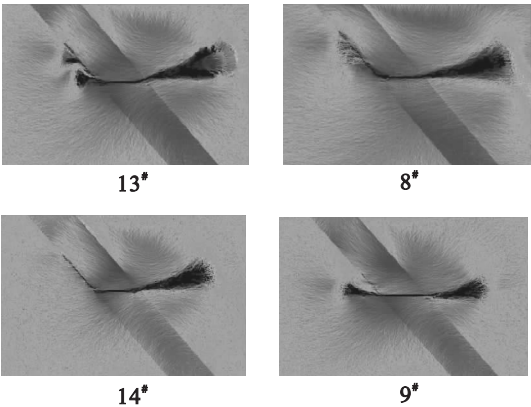


图 4 压裂裂缝扩展模拟结果

Fig. 4 The simulation results of fracture propagation during hydraulic fracturing

表 4 抗压强度参数

Table 4 Parameters of compressive strength

编号	抗压强度/MPa	压拉比
15(与 6 对照)	2	10
16(与 4 对照)	15	10

图 5 是压裂裂缝扩展模拟结果. 从图中看出, 煤岩界面的胶结程度对裂缝扩展影响明显. 由于裂缝的扩展结果是多因素共同作用, 所以无法定量说明界面胶结程度对裂缝扩展具体的影响.

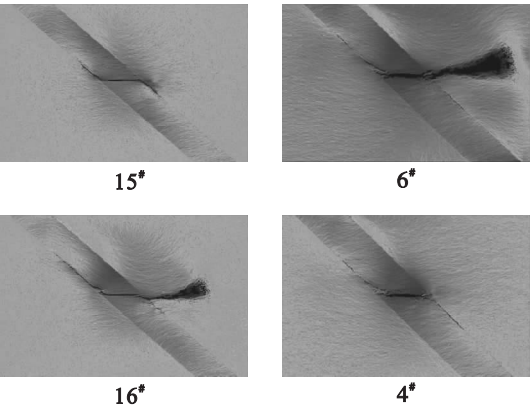


图 5 压裂裂缝扩展模拟结果

Fig. 5 The simulation results of fracture propagation during hydraulic fracturing

3. 4 煤岩层弹性模量差异的影响

由公式(6)可知, 煤层与顶板岩层的弹性模量差异越大, 裂缝在顶板中扩展所需的临界水压越大, 水压裂缝越易改变原有方向沿煤岩界面扩展; 反之越容易直接穿过界面扩展, 由于篇幅所限, 仅做说明.

4 结 论

1) 压裂裂缝扩展至煤岩界面处受多种力

学因素的综合影响, 扩展方向可能会发生偏转. 其中煤岩界面与水平剖面的相交角、水平主地应力差、最小水平主地应力、煤岩界面的黏聚力及煤岩层弹性模量差异等因素是影响裂缝扩展方向的主要原因.

2) 在低相交角和低水平主地应力差的条件下, 水压裂缝易沿煤岩界面扩展. 随着相交角或水平主地应力差的增加, 裂缝直接穿过煤岩界面沿原有方向扩展的趋势增加.

3) 最小水平主地应力的变化将影响在顶底板岩层中裂缝扩展的临界水压, 最小水平主地应力越大, 裂缝扩展的临界水压越大, 裂缝直接穿过煤岩界面扩展的可能性越小.

4) 煤层界面的黏聚力越小或煤层与顶板岩层的弹性模量差异越大, 裂缝沿煤岩界面扩展的趋势越明显.

参考文献:

[1] Hanson M E, Shaffer R J, Anderson G D. Effects of various parameters on hydraulic fracturing geometry [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1981, 21 (4) : 435 – 443.

[2] Hanson M E, Shaffer R J. Some results from continuum mechanics analyses of the hydraulic fracturing process [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1980, 20 (2) : 86 – 94.

[3] Anderson G D. Effects of friction on hydraulic fracture growth near unbonded interfaces in rocks [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1981, 21 (1) : 21 – 29.

[4] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究 [J]. *石油学报*, 2007, 28 (5) : 109 – 113.

(Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, *et al.* Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28 (5) : 109 – 113.)

[5] 陈治喜, 陈勉, 黄荣樽, 等. 层状介质中水力裂缝的垂向扩展 [J]. *石油大学学报*, 1997, 21 (4) : 23 – 26.

(Chen Zhi-xi, Chen Mian, Huang Rong-zun, *et al.* Vertical growth of hydraulic fracture in layered formations [J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1997, 21 (4) : 23 – 26.)

[6] 陈勉, 金衍, 张广青. 石油工程岩石力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.

(Chen Mian, Jin Yan, Zhang Guang-qing. *Petroleum engineering rock mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2008.)

[7] 埃沃尔兹 H L, 汪希尔 R J H. 断裂力学 [M]. 北京: 北京航天航空大学出版社, 1998.

(Ewalds H L, Wanhill R J H. *Fracture mechanics* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 1998.)

[8] 李宗利, 张宏朝, 任青文, 等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算 [J]. *岩土力学*, 2005, 26 (8) : 1216 – 1220.

(Li Zong-li, Zhang Hong-chao, Ren Qing-wen, *et al.* Analysis of hydraulic fracturing and calculation of critical internal water pressure of rock fracture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26 (8) : 1216 – 1220.)

[9] Daneshy A A. Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness [R]. Amsterdam: SPE 4852, 1974: 157 – 182.

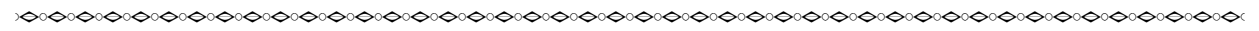
[10] Warpinski N R, Teufel L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1987, 39 (2) : 209 – 220.

[11] 冷雪峰,唐春安,杨天鸿,等. 岩石水压致裂过程的数值模拟分析 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2002, 23 (11) : 1104 – 1107.

(Leng Xue-feng, Tang Chun-an, Yang Tian-hong, *et al.* Numerical simulation and analysis on heterogeneous and permeable rocks under hydraulic fracturing [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2002, 23 (11) : 1104 – 1107.)

[12] 黄明利,唐春安,梁正召. 岩石裂纹相互作用的应力分析 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2001, 22 (4) : 446 – 449.

(Huang Ming-li, Tang Chun-an, Liang Zheng-zhao. Stress analysis of interaction of rock cracks [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2001, 22 (4) : 446 – 449.)



(上接第 1334 页)

参考文献:

[1] Rossi A, Lanzetta M. Scheduling flow lines with buffers by ant colony digraph [J]. *Expert System with Applications*, 2013 (40) : 3328 – 3340.

[2] Liao C J, Liao L M, Tseng C T. A performance evaluation of permutation vs non-permutation schedules in a flowshop [J]. *International Journal of Production Research*, 2006, 44 (20) : 4297 – 4309.

[3] Ying K C, Gupta J N D, Lin S W, *et al.* Permutation and non-permutation schedules for the flowline manufacturing cell with sequence dependent family setups [J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48 (8) : 2169 – 2184.

[4] Liao L M, Huang C J. Tabu search for non-permutation flowshop scheduling problem with minimizing total tardiness [J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2010, 217 (2) : 557 – 567.

[5] Lin S W, Ying K C. Applying a hybrid simulated annealing and tabu search approach to non-permutation flowshop scheduling problems [J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47 (5) : 1411 – 1424.

[6] Ying K C. Solving non-permutation flowshop scheduling problems by an effective iterated greedy heuristic [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 38 (3/4) : 348 – 354.

[7] Ying K C, Lin S W. Multi-heuristic desirability ant colony system heuristic for non-permutation flowshop scheduling problems [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33 (7/8) : 793 – 802.

[8] Mehravaran Y, Logendran R. Non-permutation flowshop scheduling in a supply chain with sequence-dependent setup times [J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135 (2) : 953 – 963.

[9] Rossi A, Lanzetta M. Native metaheuristics for non-permutation flow shop scheduling [J/OL]. *Journal of Intelligent Manufacturing (JIMS)*. (2013 – 01 – 06) [2013 – 04 – 1]. [http://dx. doi. org/10. 1007/s10845 – 012 – 0724 – 8](http://dx.doi.org/10.1007/s10845-012-0724-8).