

# 煤岩缝网改造关键因素分析及应用研究

刘 晓<sup>1,2</sup>, 张 帆<sup>1</sup>, 马 耕<sup>1,3</sup>, 苏现波<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003;  
3. 河南能源化工集团研究院有限公司, 河南 郑州 450046)

**摘 要:**为提高低渗煤层瓦斯抽采效率,在分析页岩气“缝网压裂”基础上,提出了煤矿井下煤岩储层缝网压裂的技术思路。通过分析影响缝网形成的关键因素,采用 Mshale 模拟水力压裂脆性指数-泊松比-单一水力裂缝体积三者关系,判断天然裂缝发生张性断裂和剪切断裂的力学条件,试验模拟不同地应力差水力裂缝特征。研究表明:在注入量一定条件下,随着脆性指数增加,单一水力裂缝体积减小,水力裂缝数量增加;随着主应力差的增大,试样破裂面表面积增加且渐为粗糙,裂缝张开度减小;水力裂缝和天然裂缝相交角越小,水力裂缝越易沿天然裂缝剪切破坏;主应力差较小时,水力裂缝易出现转向、分叉等。在鹤壁中泰矿业有限公司进行了缝网压裂试验,压裂有效面积达 21 666 m<sup>2</sup>,钻孔日抽采量是缝网压裂前的 13 倍,是常规水力压裂的 2.6 倍,采用 CYT 探测了水平剖面和垂直剖面视电阻率的变化,证实了水力压裂缝网的存在。

**关键词:**缝网压裂;脆性指数;天然裂缝;储层应力差

中图分类号:TD712;P618

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2017)06-0085-05

## Analysis and applied study on key factors of coal and rock crack network reconstruction

Liu Xiao<sup>1,2</sup>, Zhang Fan<sup>1</sup>, Ma Geng<sup>1,3</sup>, Su Xianbo<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Provincial Collaborative Innovation Center of Coal Bed Methane and Shale Gas in Central Plains Economic Zone, Jiaozuo 454003, China;  
3. Research Institute Company Limited of Henan Energy and Chemical Group, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** In order to improve the gas drainage efficiency of low permeable seam, based on an analysis on a “crack network fracturing” of shale gas, fracturing technical idea of a crack network in the coal and rock reservoir of an underground coal mine was provided. With an analysis on the key factors affected to the crack network formation, the Mshale was applied to simulate the three relationship of the hydraulic fracturing fragility index-Poisson's ratio-single section hydraulic crack volume, the mechanics conditions of the tensile breakdown caused by the natural cracks were judged and the study was conducted on the experiment simulation of the hydraulic fracturing features with different geostress difference. All above showed that under the certain condition of the injection volume, with the fragility index increased, the single section hydraulic fracturing volume would be decreased and the number of the hydraulic fractures would be increased. With the main stress difference increased, the surface area of the sample breaking surface would be increased and would be steadily rough and the fracture opening would be decreased. The smaller intersectional angle between the hydraulic fracture and the natural fractures was, the more easy of the hydraulic fractures would be sheared and damaged along the natural fractures. When the main stress difference was small, the hydraulic fractures would easily have the turn off, bifurcation and other conclusion. Finally, a fracturing experiment of the crack network was conducted in Hebi Zhongtai Mining Company Limited. The effective scope of the fracturing was 21 666 m<sup>2</sup>, the daily gas drainage volume of a borehole was 13 times higher than before the fracturing of the crack network and was 2.6 times higher than the conventional hydraulic fracturing. CYT was applied to detect the apparent resistivity variation of the horizontal cross section and the vertical cross section

收稿日期:2017-03-11;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.06.013

基金项目:2015 年河南省科技攻关资助项目(152102310095);焦作市科技局科技攻关资助项目(应用基础研究)(2014400018)

作者简介:刘 晓(1981—),男,河北怀安人,副教授,博士。Tel:18639919163, E-mail:lx1224lx@163.com

引用格式:刘 晓,张 帆,马 耕,等.煤岩缝网改造关键因素分析及应用研究[J].煤炭科学技术,2017,45(6):85-89,169.

Liu Xiao, Zhang Fan, Ma Geng, et al. Analysis and applied study on key factors of coal and rock crack network reconstruction[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 85-89, 169.

and to confirm the existence of the hydraulic fractured crack network.

**Key words:** crack network fracturing; fragility index; natural cracks; reservoir stress difference

## 0 引言

随着北美页岩气的开发及裂缝监测技术的发展,文献[1-2]提出压裂可以形成复杂的非平面裂缝网络,即主裂缝以外包含大量具有一定随机性且相互搭接的分支裂缝。2009年,雷群等<sup>[3]</sup>提出了缝网压裂技术,并对其进行了定义:水力压裂过程中,当裂缝延伸净压力大于2个水平主应力的差值与岩石的抗张强度之和时,容易产生分叉缝,多个分叉缝就会形成“缝网”系统。这种实现“网状”裂缝系统效果的压裂技术称为“缝网压裂”技术。受此启发,结合煤矿井下钻孔水力压裂特点,提出了煤岩储层的缝网改造技术,是指采用重复压裂、吞吐压裂、分段压裂等技术方法最大限度地扰动原始地应力场,使裂缝的起裂与扩展不仅是储层的张性破坏,还存在“剪切”、“滑移”、“错断”等复杂的力学行为<sup>[4]</sup>。由于应力场不断被扰动,在主干裂缝外还可形成次级和更次一级裂缝。同时储层自身形成的脆性颗粒可起到自我支撑作用,壁面位移也可实现裂缝增容,造成裂缝壁面与储层基质块的接触面积最大化,使得流体从任意方向的基质到裂缝的渗流距离最短,为储层流体运移产出提供了最佳、最畅通道。

## 1 煤岩缝网压裂关键因素分析

煤岩缝网压裂受岩石矿物组分及脆性、弱面结构、储层应力差、煤层厚度、煤层倾角等客观因素的制约<sup>[5-9]</sup>。也受到水力压裂钻孔布置、注入排量、注入方式等主观因素的影响<sup>[10-13]</sup>。其中,岩石矿物组分及脆性、煤岩体弱面结构、煤岩储层应力差是最为关键的3个客观因素。

### 1.1 煤岩矿物组分及脆性

储层具有显著的脆性特征是实现体积改造的物质基础。当岩石中石英碳酸岩等矿物含量较高时,表明脆性矿物质量分数较高,岩石的脆性特征强,有利于形成裂缝网络。脆性特征可采用脆性指数表征,一般采用杨氏模量和泊松比计算<sup>[14-15]</sup>:

$$\beta = \frac{(0.6895E - 28\mu - 1)}{14} \times 10^2 + 80 \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为脆性指数; $E$ 为杨氏模量, $10^4$  MPa; $\mu$ 为泊松比。

采集测试平顶山、焦作、鹤壁、峰峰、淮南、淮北矿区石炭—二叠系含煤岩系煤岩试验,得煤、砂岩、粉砂岩、砂质泥岩的弹性模量分别为0.70~4.74、16.13~86.44、30.00~34.00、7.60~44.00 GPa,泊松比分别为0.11~0.38、0.11~0.33、0.28~0.33、0.10~0.30。以此数据为基础,依据式(1),采用水力压裂模拟软件 MShale 进行模拟,得到脆性指数—泊松比—单一水力裂缝体积三者关系,如图1所示。

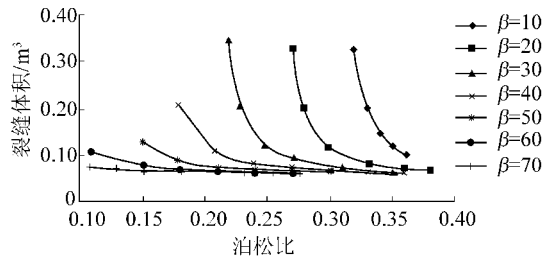


图1 脆性指数与开启裂缝体积关系

Fig. 1 Relationship between brittleness index and fracture volume

由图1可知,在注入液量一定条件下,随着脆性指数增加,单一水力裂缝体积减小,水力裂缝数量增加,且水力裂缝数量增大区域多为低泊松比、高脆性指数区域。整体而言,煤表现出低弹性模量和高泊松比的岩石力学性质,在水力压裂过程中,易形成短而宽的扁平缝,裂缝体积大;而在其顶板砂岩、砂质泥岩等进行压裂时,易形成长而细的窄条缝,裂缝体积小。若利用煤层及其顶板岩层水力压裂裂缝特征,取长补短,则易在煤岩层中形成较为均一的裂缝缝网。

### 1.2 煤岩体结构弱面

天然裂缝的存在,是煤岩体形成多级多类裂缝的一个客观有利条件,尤其是在多孔裂隙的煤储层中,其为形成水力缝网创造了条件。

根据 Warpinski 和 Teufel 的破裂准则<sup>[16]</sup>,当水力裂缝穿过天然裂缝,天然裂缝发生张性断裂时:

$$p > \sigma_n \quad (2)$$

当天然裂缝剪应力较大,天然裂缝发生剪切滑移,此时:

$$|\tau| = \tau_0 + K_f(\sigma_n - p) \quad (3)$$

根据二维弹性理论,天然裂缝所受剪应力和正应力可表示为

$$\tau = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\theta \quad (4)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\theta \quad (5)$$

式中:  $p$  为天然裂缝的孔隙水压, MPa;  $\sigma_n$  为作用于天然裂缝的正应力, MPa;  $\tau$  为作用于天然裂缝面的剪应力, MPa;  $\tau_0$  为天然裂缝内岩石的黏聚力, MPa;  $K_f$  为天然裂缝的摩擦因数;  $\sigma_H$  为最大水平主应力, MPa;  $\sigma_h$  为最小水平主应力, MPa;  $\theta$  为水力裂缝和天然裂缝夹角。

当水力裂缝缝端和天然裂缝沟通, 压裂液进入天然裂缝, 此时, 天然裂缝内缝面孔隙水压为<sup>[17]</sup>

$$p(x, t) = \sigma_h + p_{\text{net}}(x, t) \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{net}}(x, t)$  为缝内净压力。

1) 天然裂缝发生张性断裂的力学条件。将式(4)一式(6)代入式(2)得:

$$p_{\text{net}}(x, t) > \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} (1 - \cos 2\theta) \quad (7)$$

当  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ,  $p_{\text{net}}(x, t)$  有最大值, 为  $\sigma_H - \sigma_h$ , 因此天然裂缝发生张性断裂的力学条件最大值为水平主应力差。

2) 天然裂缝发生剪切断裂的力学条件。将式(4)一式(6)代入式(3)得:

$$p_{\text{net}}(x, t) > \frac{1}{K_f} \left[ \tau_0 + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} (K_f - \sin 2\theta - K_f \cos 2\theta) \right] \quad (8)$$

当  $\theta = \frac{\pi}{2} \arctan K_f$  时有最小值为

$$p_{\text{net}}(x, t) = p_{\text{min}} = \frac{\tau_0}{K_f} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2K_f} [K_f - \sin(\arctan K_f) - K_f \cos(\arctan K_f)] \quad (9)$$

当  $\theta = \frac{\pi}{2}$  时有最大值为

$$p_{\text{net}}(x, t) = p_{\text{max}} = \frac{\tau_0}{K_f} + (\sigma_H - \sigma_h) \quad (10)$$

由式(10)可知: 当水力裂缝遇到天然裂缝, 决定是否沿天然裂缝延伸的影响因素除煤体自身力学特性外, 主要与水平主应力差、水力裂缝和天然裂缝相交角及天然裂缝的发育程度有关, 应力差和相交角越小, 水力裂缝越易沿天然裂缝剪切破坏。使天然裂缝张开形成水力裂缝的力学条件为: 裂缝内净压力超过储层水平主应力差。

### 1.3 煤岩储层地应力差

通过进行不同主应力差条件下的水力压裂模拟试验, 表明: 随着主应力差的增大, 试样破裂压力降低, 破裂时间缩短, 破裂面表面积增加且渐为粗糙, 裂缝张开度减小; 当地应力差较小时, 压裂液的动力效应明显, 水力裂缝易出现转向、分叉, 如图2所示。

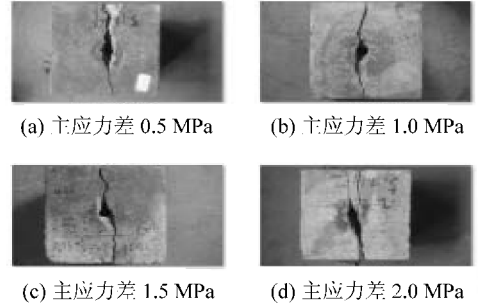


图2 不同主应力差条件下水力压裂裂缝偏转角  
Fig. 2 Deflection angle of hydraulic fracture under the condition of different horizontal stress difference

在煤矿井下进行水力压裂时, 可根据煤岩所受应力及差值大小、天然裂缝展布特征判断其是否具有形成缝网的基础。即使不具备条件, 也可充分利用采掘巷道部署施工钻孔, 将钻孔作为“主裂缝”, 通过调整钻孔与天然裂缝夹角, 为形成裂隙缝网创造条件。

### 1.4 煤层顶板压裂可行性分析

煤层顶板水力压裂除受物性特征及裂隙特征影响外, 与岩石的抗拉强度密不可分。砂岩、粉砂岩、砂质泥岩的抗拉强度一般为 1.77~10.67 MPa, 1.20~9.20 MPa, 0.70~8.70 MPa, 在煤层现有埋深条件下, 注水压力完全能够使其破裂; 在煤层顶底板压裂时, 更易形成长而细的窄条缝, 增大渗流通道; 由于煤层天然弱面的存在及影响, 在煤层顶底板进行水力压裂时, 易形成“T”形缝或“工”形缝, 从而沟通煤层和岩层, 缩短了煤层瓦斯运移距离, 提高了产出效率。同时, 煤层顶板钻孔不易垮落, 提高了抽采的有效时间。

## 2 现场试验研究

### 2.1 矿井概况

鹤壁中泰矿业有限公司主采山西组二<sub>1</sub>煤, 41011工作面埋藏深度 578.5~626.6 m, 平均煤厚 8.1 m, 煤体结构以碎裂煤为主, 局部发育原生结构煤, 煤层瓦斯含量 8.57~15.42 m<sup>3</sup>/t, 瓦斯压力 1.15~1.44 MPa, 煤层透气性系数 0.013 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d),

主应力差 4 MPa, 钻孔瓦斯流量衰减系数  $0.081 \text{ d}^{-1}$ 。煤层顶板为砂岩, 抗压强度 2 MPa, 通过煤层节理裂隙描述, 绘制节理走向玫瑰花图, 并在该图上标绘主应力和钻孔施工方向, 如图 3 所示。钻孔施工方向与主应力方向和节理走向基本一致, 具备“缝网改造”的工程条件。

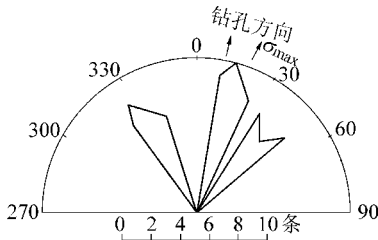


图3 二<sub>1</sub>煤层节理走向玫瑰花图及钻孔施工方向

Fig. 3 Joint orientation rose diagram and construction drilling direction of No.2<sub>1</sub> coal seam

## 2.2 缝网压裂实现途径

为实现煤岩层非平面缝网改造, 在充分考虑煤岩脆性、裂隙发育、地应力展布等的基础上, 利用砂岩钻进易、维护佳、好封孔、易成细长缝的特点, 提出了在煤层顶板砂质泥岩中施工钻孔进行变排量重复水力压裂, 在煤层中施工顺层钻孔抽采的技术思路。采用 HTB500 型水力压裂泵组分 4 次进行了变排量重复压裂, 施工曲线如图 4 所示。

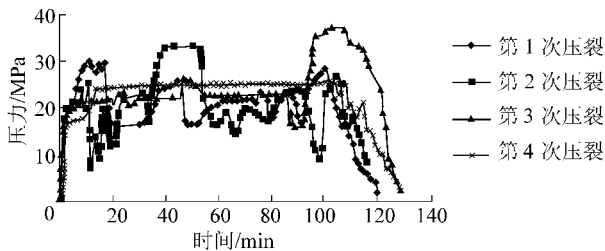


图4 变排量重复压裂施工压力变化曲线

Fig. 4 Pressure Curves of variable displacement multiple fracturing

由图 4 可知: 第 1 次压裂采用  $0.4 \text{ m}^3/\text{min}$  的注入排量, 破裂压力 30.2 MPa, 延伸压力 15~16 MPa, 延伸时间持续近 20 min, 产生较大水力裂缝, 压裂液达到裂缝尖端后, 由于压力损失难以持续开启裂缝, 但注入量仍大于滤失量, 压力持续升高, 达到了 25 MPa 时产生了第 2 次破裂, 伴随产生了新的水力裂缝; 第 2 次压裂注入排量  $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ , 初始阶段伴随有小裂缝产生, 当压力达 33.07 MPa 后, 岩石发生破裂并产生较大裂缝; 第 3 阶段注入流量  $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$ , 在注入 100 min 时, 压力达峰值 37 MPa, 压力峰值的

来临具有显著的滞后性; 产生裂缝后压力迅速降低 (非人为停泵), 疑为沟通煤层大裂隙; 第 4 次压裂注入流量  $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$ , 压力升至 24 MPa 后基本平稳, 提高注入流量后压力并未上升, 确定第 3 次压裂已沟通煤层大裂隙, 滤失大于注入, 第 4 次压裂只起到了清洗裂缝的目的。

## 2.3 试验效果分析

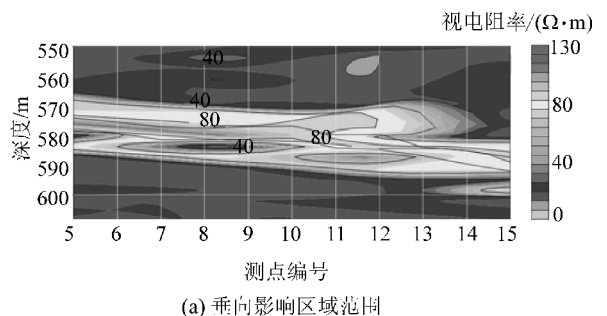
通过钻孔瓦斯流量分析、水分分析、CYT 探测等技术手段, 对水力压裂效果进行了评价: 水力压裂范围形状近似椭圆, 长轴在北偏西方向, 长度约 201 m, 短轴 138 m, 面积约  $21\,666 \text{ m}^2$ , 掩护掘进工作面前方长度 104 m; 有效抽采时间共 36 d (后巷道封闭), 影响范围内有 58 个钻孔, 抽采瓦斯总量  $89\,735 \text{ m}^3$ , 日均抽采瓦斯纯度  $2\,400 \text{ m}^3$ , 是水力强化前的 13 倍。顶板围岩抽采层储层孔总量  $9\,923 \text{ m}^3$ , 日均抽采纯度  $354 \text{ m}^3$ 。

1) 在本次水力压裂中仅有第 1 次压裂其注入压力急速上升至破裂压力, 表明其为脆性指数相对较大的岩层破裂, 第 2 次压裂和第 3 次压裂上升至破裂压力相对较为缓慢, 为煤层的破裂。

2) 在水力压裂过程中形成的煤岩粉也堵塞了水力裂缝尖端, 加之注入排量的变化, 使应力场重新分布, 为多级多类裂缝的形成创造了条件。

3) 每次压裂的延伸压力差别并不大, 约为 3 MPa, 一方面是由于增大排量本身造成的延伸压力增大, 另一方面是裂缝扩展造成了压力增大, 但裂缝的缝高和缝宽的增大也降低了延伸压力。

4) 通过多次变排量重复压裂煤层顶板砂岩裂缝破裂、开启、沟通, 形成了较为复杂的裂缝缝网, 缝网不仅在平面上展现, 同时, 通过在地面预计压裂范围沿长轴方向布置测线 2 条, 总计 25 个 CYT 测点, 通过探测视电阻率的交错变化, 形成了较为复杂的缝网, 如图 5 所示。



(a) 垂向影响区域范围

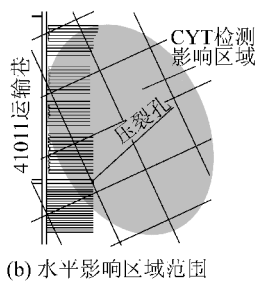


图5 CYT 探测水力压裂影响区域范围

Fig. 5 Influencing range of hydraulic fracturing detected by CYT

### 3 结 论

1) 煤岩缝网压裂是提高煤层瓦斯抽采效率的有效途径,通过采用数值模拟、推导分析、室内试验、现场试验等方法对矿物组分及脆性、弱面结构、储层主应力差等影响煤岩形成缝网的关键因素进行了相关研究。缝网改造是一项复杂的系统工程,有必要结合煤层瓦斯赋存特征及采掘工程部署,对不同条件下的不同因素与形成缝网的关系进行全面详尽的研究。

2) 鹤壁中泰矿业有限公司煤岩具有形成缝网的客观条件,通过现场试验也验证了缝网的存在,但限于目前的研究手段只能对煤岩缝网的形态进行定性判识,单一裂缝的缝长、缝宽、裂缝夹角及相互位置关系等定量指标尚没有科学有效的研究方法和证实手段,需要进一步完善。

3) 有必要开展基于缝网改造的煤层渗透率模拟及数值计算等研究工作,建立煤岩缝网改造与煤岩渗透率动态变化之间的理论模型,为缝网改造程度的判别提供借鉴。

#### 参考文献 (References) :

[1] Maxwell S C, Urbancic T I, Steinsberger N, *et al.* Microseismic Imaging of hydraulic fracture complexity in the Barnett shale [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, San Antonio, United States, Society of Petroleum Engineers, 2002; 112-180.

[2] Fisher M, Wright C, Davidson B, *et al.* Integrating fracture mapping technologies to improve stimulations in the Barnett shale [J]. *SPE Production & Facilities*, 2005, 20(20): 85-93.

[3] 雷 群, 胥 云, 蒋廷学, 等. 用于提高低-特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术 [J]. *石油学报*, 2009, 30(2): 237-241. Lei Qun, Xu Yun, Jiang Tingxue, *et al.* "Fracture network" fracturing technique for improving post-fracturing performance of low and ultra-low permeability reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 237-241.

[4] 苏现波, 马 耕, 郭红玉, 等. 煤矿井下水力强化理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[5] 才 博, 丁云宏, 卢拥军, 等. 非常规储层体积改造中岩石脆性特征的判别方法 [J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2012, 14(5): 86-88. Cai Bo, Ding Yunhong, Lu Yongjun, *et al.* Study of rock brittleness for stimulated reservoir volume fracturing technology [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition*, 2012, 14(5): 86-88.

[6] 胡永全, 贾锁刚, 赵金洲, 等. 缝网压裂控制条件研究 [J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 35(4): 126-132. Hu Yongquan, Jia Suogang, Zhao Jinzhou, *et al.* Study on controlling conditions in network hydraulic fracturing [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2013, 35(4): 126-132.

[7] 张小东, 张 鹏, 刘 浩, 等. 高煤级煤储层水力压裂裂缝扩展模型研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(4): 573-579. Zhang Xiaodong, Zhang Peng, Liu Hao, *et al.* Fracture extended model under hydraulic fracturing engineering for high rank coal reservoirs [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(4): 573-579.

[8] 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 fracture [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(1): 68-73.

[9] 郭建春, 周鑫浩, 邓 燕. 页岩气水平井组拉链压裂过程中地应力的分布规律 [J]. *天然气工业*, 2015, 35(7): 44-48. Guo Jianchun, Zhou Xinhao, Deng Yan. Distribution rules of earth stress during zipper fracturing of shale gas horizontal cluster wells [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(7): 44-48.

[10] 刘 晓, 马 耕, 苏现波, 等. 煤矿井下水力压裂增透抽采瓦斯存在问题分析及对策 [J]. *河南理工大学学报: 自然科学版*, 2016, 35(3): 303-308. Liu Xiao, Ma Geng, Su Xiaobo, *et al.* Problems analysis and countermeasures of hydraulic fracturing and gas drainage in coal mine [J]. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*, 2016, 35(3): 303-308.

[11] 姜振泉, 季梁军. 岩石全应力-应变过程渗透性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(2): 153-156. Jiang Zhenquan, Ji Liangjun. The laboratory study on behavior of permeability of rock along the complete stress-strain path [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(2): 153-156.

[12] 苏现波, 林晓英. 煤层气地质学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.

[13] Sharma A, Chen H Y, Teufel L W. Flow-Induced stress distribution in a multi-rate and multiWell reservoir [C]//SPE Rocky Mountain Regional, United States, Low-Permeability Reservoirs Symposium, 1998: 357-371.

[14] Rickman R, Mullen M J, Petre J E, *et al.* A practical use of shale (下转第 169 页)

- [8] Ma D, Bai Haibo, Wang Yanmeng. Mechanical behavior of a coal seam penetrated by a karst collapse pillar: mining - induced groundwater inrush risk [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75: 2137 - 2151.
- [9] Ma D, Bai Haibo, Miao Xiexing, *et al.* Compaction and seepage properties of crushed limestone particle mixture: an experimental investigation for Ordovician karst collapse pillar groundwater inrush [J]. *Environ Earth Sci*, 2016, 75: 11 - 19.
- [10] 姚邦华, 茅献彪, 魏建平, 等. 考虑颗粒迁移的陷落柱流固耦合动力学模型研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(1): 30 - 34.  
Yao Banghua, Mao Xianbiao, Wei Jianping, *et al.* Study on coupled fluid-soild model for collapse columns considering the effect of particle transport [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2014, 43(1): 30 - 34.
- [11] 童世杰, 段中稳, 张乃宏. 任楼井田岩溶陷落柱成因研究 [J]. *淮南职业技术学院学报*, 2004, 1(4): 27 - 29.  
Tong Shijie, Duan Zhongwen, Zhang Naihong. Study on the genesis of karst subsided column in Renlou Coalfield [J]. *Journal of Huainan Vocational and Technical College*, 2004, 1(4): 27 - 29.
- [12] 周建军, 王经明, 侯大勇. 任楼煤矿陷落柱的成因与分布规律探讨 [J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(S1): 112 - 114.  
Zhou Jianjun, Wang Jingming, Hou Dayong. Discussion on genesis and distribution rules of subsidence column in Renlou coal mine [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2005, 33(S1): 112 - 114.
- [13] 李 颖, 王经明, 蔡东红. 蚌埠隆起北翼陷落柱的发育规律及其导水性判别; 以刘桥一矿为例 [J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(S1): 212 - 214.  
Li Ying, Wang Jingming, Cai Donghong. The distribution and water conductivity distinguish of karst collapse columns at north limb of Bengbu uolift; a case study in No.1 Liuqiao Coal Mine [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2005, 33(S1): 212 - 214.
- [14] 吴文金, 杨为民, 范春学, 等. 刘桥一矿岩溶陷落柱成因特征及岩体力学条件 [J]. *北京工业职业技术学院学报*, 2005, 4(4): 1 - 5.  
Wu Wenjin, Yang Weimin, Fan Chunxue, *et al.* Genetic feature of karst collapse column and rock mechanical condition in No. 1 Liuqiao Coal Mine [J]. *Journal of Beijing Vocational and Technical Institute of Industry*, 2005, 4(4): 1 - 5.
- [15] 虎维岳. 华北东部岩溶及煤矿岩溶水害特征 [J]. *煤田地质与勘探*, 2010, 38(2): 23 - 27.  
Hu Weiyue. The characteristics of karst and deep coal mine karst water hazards in eastern north China [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2010, 38(2): 23 - 27.
- [16] 赵庆彪, 蒋勤明, 高春芳. 邯邢矿区深部煤层底板突水机理研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(3): 117 - 121, 176.  
Zhao Qingbiao, Jiang Qinming, Gao Chunfang. Study on floor water inrush mechanism of deep seam in Hanxing Mining Area [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(3): 117 - 121, 176.
- [17] 赵庆彪, 赵兵文, 付永刚, 等. 大采深矿井地面区域治理奥灰水害关键技术研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(8): 14 - 20.  
Zhao Qingbiao, Zhao Bingwen, Fu Yonggang, *et al.* Research on key technology to control Ordovician limestone water disaster on-surface region of deep mining depth mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(8): 14 - 20.
- [18] 王桂梁, 曹代勇, 姜 波, 等. 华北南部的逆冲推覆伸展滑覆与重力滑动构造 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.

## (上接第 89 页)

- petrophysics for stimulation design optimization; all shale plays are not clones of the Barnett shale [C] // SPE Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, San Antonio, United States, Society of Petroleum Engineers, 2008: 226 - 238.
- [15] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏 媛. 页岩可压性指数评价新方法及应用 [J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(5): 16 - 20.  
Jiang Tingxue, Bian Xiaobing, Su Yuan. A new method for evaluating shale fracability index and its application [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 16 - 20.
- [16] Warpinski N R, Teufel L W. Laboratory measurements of the effective-stress law for carbonate rocks under deformation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 1169 - 1172.
- [17] 翁定为, 雷 群, 胥 云, 等. 缝网压裂技术及其现场应用 [J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 280 - 284.  
Weng Dingwei, Lei Qun, Xu Yun, *et al.* Network fracturing techniques and its application in the field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 280 - 284.