

文章编号:1000-582X(2010)07-102-06

# 水力压裂技术在高瓦斯低透气性矿井中的应用

吕有厂

(中平能化集团能源化工研究院,河南 平顶山 467000)

**摘要:**针对高瓦斯低透气性矿井瓦斯难以抽放的问题,结合高压水动力特性,提出采用高压水力压裂煤层提高煤层透气性。根据第一强度理论,通过分析压裂孔周围应力状态,建立煤体破裂条件,研究煤体在高压水作用下的破裂机理,推导出压裂孔起裂压力临界值公式;另根据平煤十矿煤层赋存特性,计算出煤层水力压裂所需的启裂压力,优化水力压裂参数;研制出水力压裂设备及工艺,并成功应用于该矿;数据分析表明,压裂后煤层瓦斯抽采流量、浓度均提高5倍以上。

**关键词:**高瓦斯低透气性;水力压裂;瓦斯抽放

**中图分类号:**TD821

**文献标志码:**A

## Application the hydraulic fracturing technology in the high pressure and low permeability mine

LV You-chang

(Research Institutes for Energy and Chemical Industry of Zhong Ping Energy Chemical Group, Pingdingshan 467000, P. R. China)

**Abstract:** To solve the gas drainage problem of the high gas and low permeability mine, based on the features of the high pressure water, the hydraulic fracturing technology is proposed to improve the gas drainage rate. According to the first strength theory, through analyzing the stress around the borehole, the broken mechanism of the coal under high pressure is studied and the function of critical value is obtained. In addition, based on the coal features of the tenth mine of the Pingdingshan, the fracturing pressure is calculated and the hydraulic fracturing parameter is optimized. The equipment of the hydraulic fracturing technology is developed and applied successfully in the mine. And it is found that the gas drainage flux and concentration are improved with more than 5 times.

**Key words:** high pressure and low permeability; hydraulic fracturing; gas drainage

我国煤矿多为高瓦斯低透气性矿井<sup>[1]</sup>,在矿井各类重、特重大事故中,瓦斯事故所占比重最大,对矿井造成的损失最严重。且随着煤层开采深度增加,突出煤层的数量也呈增加趋势,煤与瓦斯突出矿井也随之增多,在许多矿区,例如天府、松藻、淮南、徐州、平顶山、焦作、鹤壁、郑州等,煤与瓦斯突出已成

为制约煤矿安全生产的瓶颈问题。

解决高瓦斯低透气性煤层煤与瓦斯突出问题的关键在于提高煤层渗透率,有效进行瓦斯抽采<sup>[5]</sup>。当前的方法主要包括突出煤层钻深孔、深孔预裂爆破和一些水力化措施<sup>[6-7]</sup>。突出煤层钻深孔的方法在松软煤层钻孔过程中往往会出现塌孔、喷孔和夹

收稿日期:2010-01-07

基金项目:国家创新群体基金资助项目(50921063);重庆市杰出青年基金资助项目(CSTC,2009BA6047)

作者简介:吕有厂(1964-),男,中平能化集团能源化工研究院教授级高工,主要从事瓦斯治理和综合利用技术方向的研究,(E-mail)leo.liuyong@163.com。

钻等问题,致使钻孔长度小,钻孔数量多,而达不到预定抽采效果;深孔爆破虽然能够起到松动原始煤体达到提高渗透率的作用,但在具有煤与瓦斯突出危险的煤层中采用时常会诱发突出灾害的发生;水力压裂技术在石油工业中已经有较成熟的应用,然而在煤矿瓦斯抽采中应用相对滞后,特别是针对高瓦斯低透气性煤层鲜有研究,并缺少系统的现场应用成果资料。针对平顶山十矿煤层瓦斯压力高、含量高及透气性低的特点,通过研究煤层水力压裂机理,优化水力压裂参数,增加煤层相互贯通裂隙的数目和增大单一裂隙面的张开程度从而达到提高煤层渗透率的目的。

### 1 煤层水力压裂机理及起裂压力计算

水力压裂过程是流体与外力共同作用下岩石内部裂隙与裂缝发生、发展和贯通的过程<sup>[8-10]</sup>。水力压裂破裂前的孔周应力分布由原始地应力场和孔内流体压力所构成<sup>[11]</sup>,因此,压裂孔周围应力状态可按照图 1 计算。

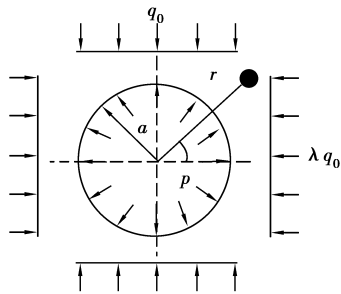


图 1 压裂孔周围应力状态计算图

#### 1.1 煤层水力压裂机理

为简化分析,煤层视为各向同性弹性材料,分别考虑煤层单独在水压作用和地应力作用下的应力状态。则若以压应力为正,则由弹性力学相关知识,煤层单独在水压作用下的应力状态为

$$\sigma_{rr} = \frac{a^2 p}{r^2}, \tag{1}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -\frac{a^2 p}{r^2}, \tag{2}$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0. \tag{3}$$

煤层单独在地应力作用下的应力状态为

$$\sigma_{rr} = \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1-\lambda}{2}q_0 \times \left(1-4\frac{a^2}{r^2}+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta, \tag{4}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta, \tag{5}$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1+2\frac{a^2}{r^2}-3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin 2\theta. \tag{6}$$

根据叠加原理,煤层在水压和地应力双重作用下内部任意点处的应力状态为

$$\sigma_{rr} = \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1-\lambda}{2}q_0 \times \left(1-4\frac{a^2}{r^2}+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta + \frac{a^2 p}{r^2}, \tag{7}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta - \frac{a^2 p}{r^2}, \tag{8}$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1+2\frac{a^2}{r^2}-3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin 2\theta. \tag{9}$$

钻孔围岩内的切向应力

$$\sigma_{\theta} = \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta - \frac{a^2 p}{r^2}. \tag{10}$$

钻孔周边的切向应力

$$\sigma_{\theta}|_{r=a} = (1+\lambda)q_0 + 2(1-\lambda)q_0\cos 2\theta - p. \tag{11}$$

由于煤的抗拉强度远小于抗压强度,随着钻孔内水压力增大,钻孔周边的切向应力导致孔壁发生拉伸破坏。因此,在计算过程中,煤体断裂失效准则可采用最大拉应力理论<sup>[12]</sup>,即

$$|\sigma_{\theta}| > |R_t|, \tag{12}$$

其中, $R_t$ 为煤的单轴抗拉强度,代入到上式(12)中得

$$\left| \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta - \frac{a^2 p}{r^2} \right| > |R_t|, \tag{13}$$

由于钻孔围岩只受垂直和水平两个方向的力,所以现取方向角  $\theta=0$  和  $\theta=90^\circ$  2 种情况进行讨论  $\theta=0$  时,

$$\sigma_{\theta}|_{r=a,\theta=0} = (3-\lambda)q_0 - p, \tag{14}$$

若发生孔壁起裂, $\sigma_{\theta}$  必须小于零即为拉应力,且满足条件,

$$|\sigma_{\theta}| > |R_t|, \tag{15}$$

式中, $R_t$  为煤的抗拉强度。

暂不考虑正负号,只考虑数值大小,则应满足

$$p - (3-\lambda)q_0 > R_t, \tag{16}$$

即

$$p > (3-\lambda)q_0 + R_t, \tag{17}$$

同理  $\theta=90^\circ$  时,

$$\sigma_{\theta}|_{r=a,\theta=90^\circ} = (3-\lambda)q_0 - p, \tag{18}$$

孔壁起裂条件为

$$p > (3\lambda-1)q_0 + R_t, \tag{19}$$

综上,孔壁起裂压力临界值可写为

$$\min\{(3-\lambda)q_0 + R_t, (3\lambda-1)q_0 + R_t\}. \quad (20)$$

在注入压力水压力的增加时,起裂的位置应发生在先满足起裂条件 1 或 2 的位置处,这决定于哪个起裂条件先得到满足。根据布朗和霍克根据全球资料的统计结果<sup>[13]</sup>,其中侧压力系数  $\lambda$  为

$$\lambda = \frac{1\ 500}{H} + n, \quad (21)$$

式中  $H$  为埋深,  $n$  为一常数,取值 0.3~0.5。

由于煤矿埋深一般在 1 500 m 以内,所以根据以上公式,侧压力系数  $\lambda$  在一般情况下取大于 1 的值,这时式(17)的右端的值大于式(19)的右端的值,此时起裂的位置应位于孔壁上  $\theta=0$  和  $\theta=180^\circ$  处。然而,由于煤体中本身具有原生裂隙、加之钻孔过程中又产生新裂隙,都会使研究区域的煤强度降低。往往在现场试验中注入水的压力并不需要如理论计算的那样大,而是普遍小于理论计算值。

基于以上原因,在计算原岩应力时中引入地层应力系数  $k$ <sup>[5]</sup>,  $k$  为一无量纲量

$$k = \frac{\sigma_3}{q_0}, \quad (21)$$

式中,  $\sigma_3$  为实际铅垂方向上应力值的大小

用  $\sigma_3$  取代以上各计算式中的  $q_0$ , 得修正后的孔壁起裂压力临界值为

$$\min\{k(3-\lambda)q_0 + R_t, k(3\lambda-1)q_0 + R_t\}. \quad (22)$$

## 1.2 起裂压力计算

煤抗拉强度通过现场取煤样后由实验室劈裂实验测出;地勘资料显示,煤层上覆岩层以砂岩为主,因此,计算中取砂岩容重近似上覆岩层容重。计算中各参数取值如表 1,

表 1 起裂压力计算中参数取值

上覆岩石 平均容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	煤抗拉强度 $R_t/\text{MPa}$	煤层埋深 $H/\text{m}$	地层应力 系数 $k$	常数 $n$
22.0	1.7	1 000	0.8	0.3

侧压力系数  $\lambda$  可由式(21)计算得到

$$\lambda = \frac{1\ 500}{H} + n = \frac{1\ 500}{1\ 000} + 0.3 = 1.8,$$

垂直地应力值为

$$q_0 = \gamma H = 22.0 \times 1\ 000,$$

将以上各数值代入式子(q)中得到

$$\begin{aligned} & \min\{k(3-\lambda)q_0 + R_t, k(3\lambda-1)q_0 + R_t\} = \\ & \{0.8(3-1.8) \times 22\ 000 + 1.7 \times 10^6, \\ & (0.8(3 \times 1.8 - 1) \times 22\ 000 + 1.7 \times 10^6)\} \end{aligned}$$

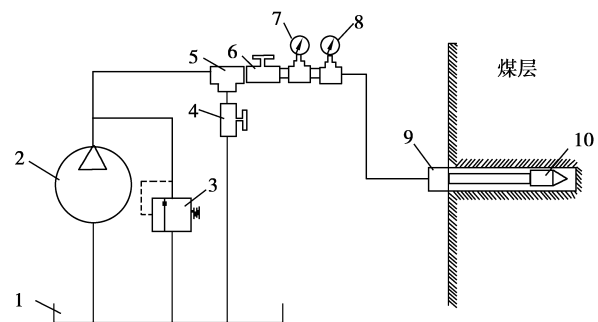
$$= 22.82 \text{ MPa}$$

该煤层在水力压裂条件下,孔壁起裂压力临界值为 22.82 MPa,即在孔内水压力达到 22.82 MPa 后,煤层被压裂。

## 2 煤层水力压裂设备及压裂参数设置

### 2.1 煤层水力压裂设备

煤层水力压裂系统由注水泵、水箱、压力表、专用封孔器、注水器等组成,如图 2。



1. 水箱; 2. 注水泵; 3. 溢流阀; 4. 卸压阀;  
5. 三通接头; 6. 截止阀; 7. 压力表; 8. 水表;  
9. 封孔器; 10. 注水器。

图 2 煤层水力压裂系统装置示意图

### 2.2 压裂参数设置

#### 2.2.1 注水压力选择

根据煤层力学参数,由计算可知,当注入压力大于 22.82 MPa 时煤层在高压水作用下开始起裂,应变能开始释放。结合现场高压泵的实际平稳供压能力,最终将压裂的压力保持在 25 MPa。起始压力初步设定为 15 MPa,在钻孔周边煤体逐渐湿润后逐步加动压,直至压力升至 25 MPa。

#### 2.2.2 压裂时间控制

压裂时间与注水压力、注水量等参数密切相关<sup>[14-15]</sup>。注水过程中,煤体被逐渐压裂破坏,各种孔裂隙不断沟通,高压水在已沟通的裂隙间流动,注水压力及注水流量等参数不断发生着变化,注水时间可根据注水过程中压力及流量的变化来确定。若稳定一段时间后,压力迅速下降,并持续加压时压力无明显上升,或者检验孔附近瓦斯浓度明显升高或有水涌出时,即说明压裂孔和检验孔之间已经完成压裂,此时即可停泵。

## 3 现场试验及试验结果分析

### 3.1 实验地点概况

中国平煤神马集团十矿属于高瓦斯低透气性矿

井,煤层透气性系数  $0.0001 \sim 0.0061 \text{ mD}$ ,瓦斯压力  $1.5 \sim 2.4 \text{ MPa}$ ,瓦斯含量  $12.7 \sim 30 \text{ m}^3/\text{t}$ ,最大埋深超过  $1000 \text{ m}$ 。十矿矿井瓦斯涌出量逐年增加,2008 年从鉴定结果看,矿井瓦斯绝对涌出量为  $130.20 \text{ m}^3/\text{min}$ ;相对涌出量为  $33.48 \text{ m}^3/\text{t}$ ,是河南省瓦斯涌出量最大的矿井。

井下水力压裂试验地点为平煤股份十矿已四采区已<sub>15-24 080</sub>采面机巷。已<sub>15-24 080</sub>采面位于十矿已四采区西翼第三阶段,该采区东靠已四轨道,设计走向长度  $1804 \text{ m}$ ,倾斜长度  $180 \text{ m}$ ,煤层厚度  $1.6 \sim 2.3 \text{ m}$  之间。整个采区抽放能力  $450 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

已<sub>15-24 080</sub>机巷煤层瓦斯含量  $30 \text{ m}^3/\text{t}$ ,瓦斯压力  $2.4 \text{ MPa}$ 。

### 3.2 现场试验钻孔布置

自 2008 年 10 月至 2009 年 2 月在平煤神马集团十矿已<sub>15-24 080</sub>机巷实施压裂孔钻进,布置图如图 3。压裂孔顺煤层施工,孔深  $40 \sim 50 \text{ m}$ ,仰角  $11^\circ \sim 15^\circ$ ,孔径  $100 \text{ mm}$ ,采用专用胶囊封孔器封孔,封孔器长度  $15 \sim 20 \text{ m}$ ,封孔深度  $19 \sim 25 \text{ m}$ ,泵站注水压力  $25 \sim 30 \text{ MPa}$ ,注水量  $21 \text{ m}^3$ ,压裂范围内压裂孔与检验孔采用聚氨酯封孔并接入机巷 8 寸抽放管进行抽放。

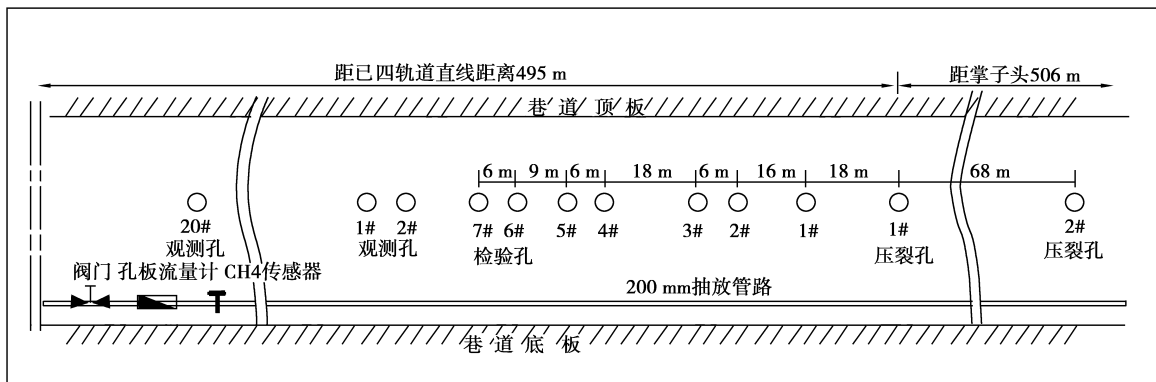


图 3 现场试验钻孔布置示意图

### 3.3 试验结果分析

在十矿已<sub>15-24 080</sub>采面试验过程中分别在压裂前后对已<sub>15-24 080</sub>机巷煤层施工的检验孔抽放情况进行统计分析,由于压裂前采用传统抽放方法瓦斯流量小,浓度衰减速度快,一般 7 天内浓度衰减到  $0 \sim 3\%$ ,为充分体现压裂前后的对比分析,每个检验孔分别取压裂前后各 15 d 的抽放瓦斯平均流量和瓦斯浓度进行对比,如图 4、5。

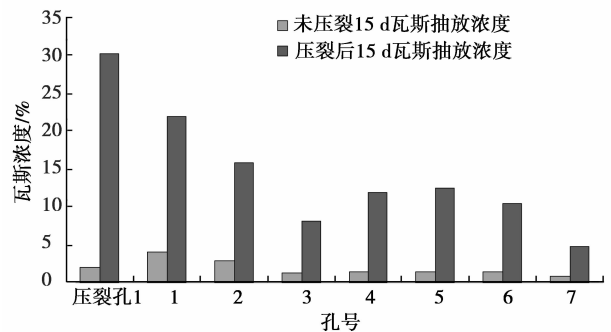


图 5 压裂前后检验孔平均瓦斯浓度对比图

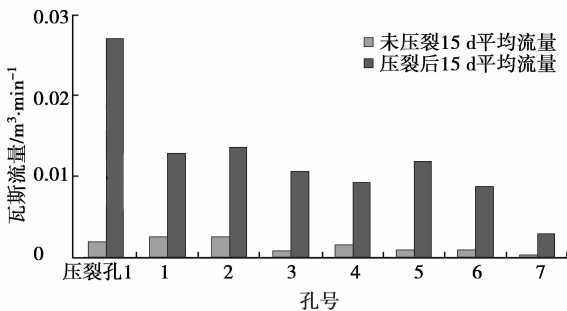


图 4 压裂前后检验孔平均瓦斯流量对比图

煤层压裂孔在高压水作用下,内部裂隙扩展且相互贯通,在压裂区域内形成畅通的瓦斯通道,瓦斯

抽放流量和浓度都有大幅度提高。其中,压裂孔 15 d 平均瓦斯抽放流量和平均瓦斯抽放浓度分别增加 13 和 14 倍,检验孔最大增幅分别为:3 号检验孔 15 d 平均瓦斯抽放流量增加 13.6 倍;5 号检验孔 15 天平均瓦斯抽放浓度增加 7.9 倍。

同时,结合各检验孔与 1 号压裂孔位置可知,1、2 号检验孔与 1 号压裂孔位置较近,分别为 18 和 34 m,其瓦斯抽放流量和浓度要远远高于离 1 号压裂孔较远的 7 号检验孔,其值基本上与至压裂孔距离呈反比关系。但在煤层不同位置处又有所不同,

比如,3、4号检验孔到1号压裂孔的距离小于5号检验孔到1号压裂孔的距离,而3、4号检验孔瓦斯抽放流量和浓度要明显高于5号检验孔。分析其原因为:煤层受地层构造应力影响,同一煤层不同位置处受力不均导致煤层疏密程度不同,煤层致密区域煤层透气性要低于疏松区域而强度高于疏松区域,这就导致致密区域难以压裂形成贯通裂隙,瓦斯难以排出。

以1号检验孔为例,压裂前后15 d内瓦斯抽放流量和浓度随时间变化曲线如图6、7。

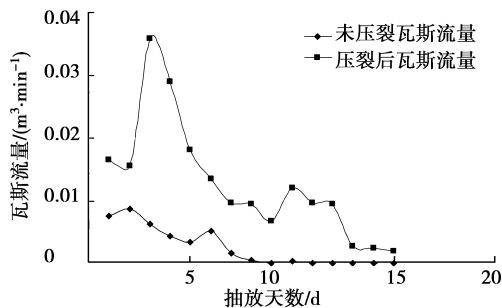


图6 1号检验孔压裂前后瓦斯流量随时间变化图

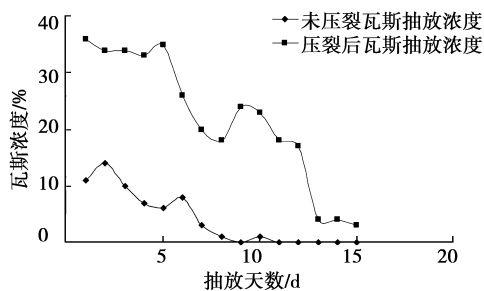


图7 1号检验孔压裂前后瓦斯浓度随时间变化图

1号检验孔在未压裂时瓦斯流量和浓度衰减速度非常快,在第7天后,瓦斯流量基本衰减至0,浓度衰减到0~3%;压裂后,1号检验孔瓦斯流量和浓度都有大幅度提高,瓦斯抽放时间也相对延长。其中1号检验孔瓦斯流量有10天左右保持在 $0.02 \text{ m}^3/\text{min}$ 以上,且抽放浓度有12天保持在15%以上。

## 4 结论

1)通过分析压裂孔周围的应力状态、水力压裂机理计算出平煤十矿已<sub>15-24 080</sub>采面煤层起裂压力为22.82 MPa。

2)煤层进行压裂后15 d内平均瓦斯抽放流量提高13.6倍、平均瓦斯抽放浓度增加7.9倍;且煤

层瓦斯流量衰减系数较低,直到压裂后也未均衰减为零。

3)对于低透气性高瓦斯煤层,采用水力压裂技术,可以显著提高瓦斯抽放效果,有效避免煤矿瓦斯灾害发生。

## 参考文献:

- [1] 刘俊杰,乔德清.对我国煤矿瓦斯事故的思考[J].煤炭学报,2006,31(1):58-62.  
LIU JUN-JIE, QIAO DE-QING. Some aspects on the gas outburst/explosion hazard in coal mine of China [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 58-62.
- [2] 袁亮.高瓦斯矿区复杂地质条件安全高效开采关键技术[J].煤炭学报,2006,31(2):174-178.  
YUAN LIANG. Key technique to high efficiency and safe mining in highly gassy mining area with complex geologic condition[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 174-178.
- [3] 李晓红,卢义玉,向文英.水射流理论及在矿业工程中的应用[M].重庆,重庆大学出版社,2007.
- [4] 周心权,陈国新.煤矿重大瓦斯爆炸事故致因的概率分析及启示[J].煤炭学报,2008,31(1):42-46.  
ZHOU XIN-QUAN, CHEN GUO-XIN. The probability analysis of occurrence causes of extraordinarily serious gas explosion accidents and its revelation[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 31(1): 42-46.
- [5] 张国华.本煤层水力压裂致裂机理及裂隙发展过程研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2004.
- [6] 申宝宏,刘见中,张泓.我国煤矿瓦斯治理的技术对策[J].煤炭学报,2007,32(7):673-679.  
SHEN BAO-HONG, LIU JIAN-ZHONG, ZHANG HONG. The technical measures of gas control in China coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 673-679.
- [7] 赵玉岐,齐黎明.突出煤层透析解突技术研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(1):110-113.  
ZHAO YU-QI, QI LI-MING. Research on avoiding outburst by gas dialysis of coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1):110-113.
- [8] 杨新安,章梦涛.岩石水力压裂机理的研究[J].山西矿业学院学报,1991,9(1):26-31.
- [9] 张国华,葛新.水力压裂钻孔始裂特点分析[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(6):789-792.  
ZHANG GUO-HUA, GE XIN. Analysis of start-split characteristic of hydraulic fracture bore[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(6): 789-792.
- [10] 连志龙,张劲,王秀喜,等.水力压裂扩展特性的数值

- 模拟研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 169-174.  
LIAN ZHI-LONG, ZHANG JIN, WANG XIU-XI, et al. Simulation study of characteristics of hydraulic fracturing propagation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 169-174.
- [11] 李传亮,孔详言. 油井压裂过程中岩石破裂压力计算公式的理论研究[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(2): 54-57.  
LI CHUAN-LIANG, KONG XIANG-YAN. A theoretical study on rocks breakdown pressure calculation equation of fracturing process [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(2): 54-57.
- [12] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [13] NOACK K. Control of gas emissions in underground coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35 (1/4): 57-82.
- [14] BRUMLEY J L, ABASS H H. Hydraulic fracturing of deviated wells: interperretation of breakdown and initial fracture opening pressure[C]// SPE Eastern Regional Meeting, October 23-25, 1996, Columbus, Ohio, USA.. [S. 1]: Society of Petroleum Engineers, Inc, 1996: 37363-MS.
- [15] HOSSAIN M M, RAHMAN M K, RAHMAN S S. A comprehensive monograph for hydraulic fracture initiation from deviated wellbores under arbitrary stress regimes[C]// SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, April 20-22 1999, Jakarta, Indonesia. [S. 1]: Society of Petroleum Engineers, Inc, 1999: 54360-MS.

(编辑 赵 静)

## (上接第 101 页)

- [7] 叶敬福, 詹永照. 基于 Gabor 小波变换的人脸表情特征提取[J]. 计算机工程, 2005, 31(15): 172-174.  
YE JING-FU, ZHAN YONG-ZHAO, Facial expression features extraction based on Gabor wavelet transformation [J]. Computer Engineering, 2005, 31 (15): 172-174.
- [8] YANG J, ZHANG D, FRANGI A F, et al. Two-dimensional PCA: a new approach to appearance-based face representation and recognition [J]. IEEE Trans PAMI 2004, 26(1): 131-137.
- [9] 刘晓东, 孙军, 周军. 优化 Gabor 小波权重的 EBGm 算法[J]. 信息技术, 2009, 33(1): 59-62.  
LIU XIAO-DONG, SUN JUN, ZHOU JUN. EBGm algorithm with optimized Gabor wavelet weight [J]. Information Technology, 2009, 33(1): 59-62.
- [10] 罗飞, 王国胤, 杨勇. 一种基于 Gabor 小波特征的人脸表情识别新方法[J]. 计算机科学, 2009, 36(1): 181-183.  
LUO FEI, WANG GUO-YIN, YANG YONG, New approach for facial expression recognition based on Gabor features[J]. Computer Science, 2009, 36(1): 181-183.
- [11] 刘伟锋. 人脸表情识别研究[D]. 安徽: 中国科技大学, 2007.
- [12] SUGENO M. Fuzzy measures and fuzzy integrals; a survey [J]. Fuzzy Automata and Decision Processes, 1977, 78(33): 89-102.
- [13] KELLER J M, GADER P, TAHANI H, et al. Advances in fuzzy integration for pattern recognition [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 65 (2/3): 273-283.
- [14] 姚明海, 何通能. 一种基于模糊积分的多分类器联合方法[J]. 浙江工业大学学报, 2002, 30(2): 156-159.  
YAO MING-HAI, HE TONG-NENG. Dynamic combination method of multiple classifiers [J] Journal of Zhejiang University of Technology, 2002, 30(2): 156-159.

(编辑 赵 静)