

# 煤储层水力压裂后渗透率预测模型建立及应用

倪小明<sup>1,2</sup> 李哲远<sup>1</sup> 王延斌<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院 河南 焦作 454000; 2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地 河南 焦作 454000; 3. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院 北京 100083)

**摘要:** 为得到煤储层水力压裂后的渗透率, 基于水力压裂施工曲线和注入/压降试井测试渗透率原理, 建立了水力压裂后渗透率预测模型。根据晋城矿区潘庄区块和焦作矿区恩村区块煤层的勘探开发资料, 验证了模型的准确性和有效性。结果表明: III、IV 类煤体所占比例、压裂后裂缝是否连通构造异常带对预测结果的准确性影响较大; III、IV 类煤体比例比较小时, 压裂液容易在硬煤中形成裂缝, 预测结果较准确; 当 III、IV 类煤体比例较大时, 压裂液容易在煤粒间流动, 预测结果不能真实反映压裂效果。

**关键词:** 水力压裂; 渗透率; 压降曲线; 滤失量

**中图分类号:** TD712.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2014)06-0092-04

## Establish and Application on Prediction Model About Permeability of Coal Reservoir After Hydraulic Fracture

NI Xiao-ming<sup>1,2</sup>, LI Zhe-yuan<sup>1</sup>, WANG Yan-bin<sup>3</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454000, China;

3. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to obtain the permeability of the coal reservoir after hydraulic fracture based on the pressure curve of the hydraulic fracturing and the principle of testing permeability by injection/fall-off well-test, the prediction model about the permeability of the coal reservoir after hydraulic fracture was established. According to the data of the exploration and development about coalbed methane in Pan-zhuang Block of Jincheng Mine Area and in Encun Block of Jiaozuo Mine Area, the accuracy and effectiveness of the model was verified. The results showed that the proportion of III and IV class in the coal seam section and whether connecting the anomaly structure belt after hydraulic fracturing were important influence on the accuracy of the prediction results. When the proportion of III and IV class in the coal seam section was small, the fracturing could easily form in the hard coal, the prediction results were accurate. When the proportion of III and IV class in the coal seam section was larger, the fracturing fluid could easily flow in the coal particles and coal particles, the prediction results could not reflect the fracturing effect.

**Key words:** hydraulic fracture; permeability; pressure fall-off curve; filter loss

## 0 引 言

我国煤储层低渗透率的特点决定了开采煤层瓦斯时, 需要采取储层强化工艺技术。水力压裂工艺技术是目前煤储层改造的主要方式之一, 水力压裂

施工过程的压力曲线及压降曲线中蕴含着大量的煤层信息, 为了挖掘这些蕴含的煤层信息, 国内外研究者从不同的角度进行了相关研究。文献 [1-3] 基于 KGD、PKN、Radial 模型, 结合水力压裂施工过程压力曲线, 得出不同情况下的裂缝延伸方式, 为水力

收稿日期: 2014-03-15; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.06.019

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-005); 河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14A440005); 河南理工大学杰出青年基金资助项目(J2013-03)

作者简介: 倪小明(1979—), 男, 山西临汾人, 副教授, 博士。Tel: 13598539437 E-mail: nxm1979@126.com

引用格式: 倪小明, 李哲远, 王延斌. 煤储层水力压裂后渗透率预测模型建立及应用[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 92-95, 139.

NI Xiao-ming, LI Zhe-yuan, WANG Yan-bin. Establish and Application on Prediction Model About Permeability of Coal Reservoir After Hydraulic Fracture[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 92-95, 139.

压裂施工工艺参数的优化提供了依据。文献[4-6]基于数学拟合法、G函数分析法等对裂缝闭合期的压力进行解释;文献[7-8]根据压力曲线,结合KGD、PKN模型对煤层的弹性模量、泊松比进行预测,为不同力学性质下压裂施工提供了指导。文献[9-12]采用加权平均法、数值模拟等方法,对水力压裂后的效果进行了评价。煤体结构、煤层与围岩力学性质、泵注程序等的差异造成压裂施工结束时瞬时压降的差异,为了更准确地评价压裂后储层改造效果,笔者根据水力压裂施工压力曲线结合注入/压降试井测试渗透率原理,建立水力压裂后渗透率预测模型,以期验证模型的准确性和有效性。

## 1 水力压裂后渗透率预测模型的建立

### 1.1 模型建立的思路

煤层气井水力压裂一般经过“小型压裂—前置液造缝—携砂液撑缝—顶替液顶替—停泵测压降”等5个关键过程。水力压裂停泵后,通过压力传感器可实时记录停泵后的压力,停泵后压力降低的快慢在一定程度上反映了煤层内裂隙的发育程度,基于此思想来构建水力压裂后渗透率预测模型。模型基于以下假设,即压裂停泵后压裂液在煤层中的流动服从达西定律;压裂时压裂液未突破煤层顶、底板;在煤层中的压裂裂缝可以采用KGD模型表示。建模思路可表述为:①根据KGD模型和压裂施工曲线,结合渗流理论,对压裂过程的滤失量进行计算。②根据水力压裂停泵后的压降曲线,结合Horner曲线,得出停泵后压降压力与时间的关系。③根据水力压裂的总压裂液量、压裂过程中的滤失量、压降压力等,耦合得出水力压裂后的渗透率数学模型。

### 1.2 水力压裂后渗透率预测模型

1) 水力压裂过程滤失量的确定。水力压裂过程滤失量的计算基于以下假设,即水力压裂时,压裂液进入煤层后,由煤层的顶板向底板滤失;滤失过程服从平板条带模型中的平面平行流动规律;压裂施工过程中施工压力取其平均值;压裂改造范围内的渗透率均相等,由达西定律可得流动速度 $v$ 为

$$v = Q_1 / (At_1) = -k\mu dp/dx \quad (1)$$

式中: $Q_1$ 为水力压裂过程的滤失量; $A$ 为压裂裂缝面积; $t_1$ 为水力压裂施工时间; $k$ 为压裂改造后的平均渗透率; $\mu$ 为水的黏度; $p$ 为在压裂液滤失流动距离 $x$ 处的流动压力。

由KGD模型可知,压裂过程中 $x$ 处缝宽可表示

为<sup>[13]</sup>

$$w(x) = 4(1-f^2) \sqrt{L^2 - x^2} \sigma / E \quad (2)$$

其中: $f$ 为煤岩泊松比; $L$ 为裂缝半长; $\sigma$ 为净压力; $E$ 为煤岩弹性模量。根据压裂时的体积守恒,可得:

$$Q_1 = 2 \int_0^L hw(x) dx + Q_1 \quad (3)$$

式中: $Q_1$ 为水力压裂的压裂液量; $h$ 为煤层厚度。

联立式(2)和式(3),得出 $L$ 为

$$L = \sqrt{E(Q_1 - Q_1) / [2\pi h \sigma (1 - f^2)]} \quad (4)$$

联立式(1)和式(4)得

$$Q_1 = 2k(\sigma - p_c) t_1 Q_1 / [2k(\sigma - p_c) t_1 + \mu h^2] \quad (5)$$

式中, $p_c$ 为储层压力。

2) 压降与时间的关系。假设煤储层为连续均质储层,由水力压裂的施工曲线可获得瞬时停泵压力值。若水力压裂停泵后,且压裂后不沟通断层等异常构造时,停泵后压力开始下降,根据注入/压降试井测试渗透率原理及Horner曲线<sup>[14]</sup>,得出压降与时间的半对数拟合曲线,即可得出停泵后压降与时间的关系:

$$p(t) = -2.12 \times 10^{-3} Q_2 \mu B / (\Delta t k h) \lg t + [p_i - \frac{2.12 \times 10^{-3} Q_2 \mu B}{\Delta t k h} \lg \frac{k}{\varphi \mu C_1 r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S] \quad (6)$$

式中: $Q_2$ 为停泵后开始滤失的压裂液量; $B$ 为水的地层体积系数; $\Delta t$ 为从停泵开始时的压力降到储层压力的时间间隔; $t$ 为压裂停泵后测试时间; $p_i$ 为原始储层压力; $\varphi$ 为孔隙度; $C_1$ 为体积综合压缩系数; $r_w$ 为井筒半径; $m$ ;  $S$ 为表皮系数。

令 $a = -2.12 \times 10^{-3} Q_2 \mu B / (\Delta t k h)$ ,  $b = p_i - 2.12 \times 10^{-3} Q_2 \mu B p_i / (\Delta t k h) \{ \lg [k / (\varphi \mu C_1 r_w^2)] + 0.9077 + 0.8686S \}$ ,则式(6)可简化为

$$p(t) = a \lg t + b \quad (7)$$

根据压裂施工曲线,可得出压裂过程中瞬时停泵压力 $p_1$ 以及停泵时所对应的的时间 $t_2$ 。当压力降低到储层压力时,代入式(7)得出停止滤失的时间 $t_3$ ,即 $\Delta t = t_3 - t_2$ ,即:

$$\Delta t = [10^{-(p_1 - p_c)/a} - 1] t_2 \quad (8)$$

3) 水力压裂后渗透率预测模型,由Horner曲线可得:

$$hk = -2.12 \times 10^{-3} Q_2 B \mu / (a \Delta t) \quad (9)$$

根据体积守恒可得:

$$Q_1 + Q_2 = Q_1 \quad (10)$$

联立式(5)和式(10)可得:

$$Q_2 = Q_1 \mu h^2 / [2k(\sigma - p_e) t_1 + \mu h^2] \quad (11)$$

联立式(9)、式(10)和式(11)得出水力压裂后渗透率预测模型为

$$k = -\mu \{ a \Delta t h^2 + [h^4 a^2 \Delta t^2 - 16.96 \times 10^{-3} a B h t_1 \times \Delta t Q_1 (\sigma - p_e)]^{1/2} \} / [4 a t_1 \Delta t (\sigma - p_e)] \quad (12)$$

## 2 水力压裂后渗透率预测模型工程应用

### 2.1 工程概况

沁南地区是我国目前煤层气开发最成功的地区之一,以寺头断层为界,分为东、西两大部分。在寺头断层的东部,由南向北,煤层破坏程度逐渐加大,笔者主要是对煤体破坏不太严重的潘庄区块进行研究。潘庄区块位于山西省晋城市西北约80 km处,本区发育低缓平行褶皱,断层不太发育,褶皱展布方向以NNE向和近SN向为主。3号和15号煤层为本区主要目的煤层,3号煤层是目前该区煤层气开发的主要煤层,3号煤层厚6 m左右,埋深260~580 m,含气量16.32~27.96 m<sup>3</sup>/t,平均21.92 m<sup>3</sup>/t,煤体结构主要以原生结构煤(I类)和碎裂煤(II类)为主。

焦作矿区位于华北板块的南部,太行山隆起带的南段,小秦岭~嵩山东西向构造带的北侧。区内断裂构造发育,一般以东北、北西和东西向的高角度正断层为主。恩村区块位于焦作矿区;井田南部为盘古寺断层,西部至九里山断层,北部为凤凰岭断层,井田的主体构造为墙南向斜,轴向近东西向。二叠系山西组二<sub>1</sub>煤层厚6 m左右,埋藏深度525~900 m,含气量一般超过20 m<sup>3</sup>/t,是该区煤层气勘探开发的主要煤层。

### 2.2 煤层段不同煤体结构组合特征

为了得出不同煤层段煤体结构所占比例不同导致压裂曲线形态的差异,首先对研究区煤层段的煤体结构进行统计。煤体结构的分类方法很多,本次主要以瓦斯地质学中根据煤体的破坏程度把煤体结构划分为原生结构煤(I类)、碎裂煤(II类)、碎粒煤(III类)和糜棱煤(IV类)4种<sup>[15]</sup>。笔者根据煤层气井测井曲线的声波时差、密度、视电阻率,主要以0.5 m为间隔,对测井响应值进行统计,结合钻井取心观察描述,得出不同煤体结构的响应值范围,将I类和II类煤统称为硬煤,III类和IV类煤统称为软煤,

对2个区块40余口井煤层段的煤体结构进行了划分,研究区部分井软煤所占比例统计结果见表1。

表1 研究区部分井软煤所占比例统计结果

区块	井号	软煤所占比例/%	区块	井号	软煤所占比例/%
潘庄	P1	17.77	恩村	E1	7.00
	P2	10.50		E2	10.00
	P3	9.89		E3	50.00
	P4	6.17		E4	35.00
	P5	11.79		E5	80.00
	P6	8.40		E6	77.00
	P7	22.80		E7	15.00
	P8	7.28		E8	20.00
	P9	16.58		E9	17.00
	P10	14.67		E10	39.00
—	—	E11		31.00	

从表1可看出,潘庄区块软煤所占比例为6.17%~22.8%,平均为12.59%。恩村区块软煤所占比例为7%~80%,平均为38.1%,除个别井外,煤层段软煤比例较高。

### 2.3 水力压裂后渗透率预测结果

为了验证水力压裂后渗透率预测模型的准确性,笔者选择潘庄区块水力压裂过程未出现施工异常的4口井和测压降阶段压力下降到储层压力以下的2口井,恩村区块分别在软煤比例<35%、35%~65%、>65%的区域选择2口井进行渗透率预测,研究区部分井渗透率预测所需基本参数见表2。根据表2中的基本参数,代入式(12)计算得研究区部分井渗透率预测结果见表3。

因大部分井未进行压裂后渗透率测试,仅焦作E6井利用注入压降法进行了水力压裂后渗透率测试,测试结果为 $13.4 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ,预测结果与实际结果差别不大。潘庄区块煤层气井产气5年内的平均产气量为3 082 m<sup>3</sup>/d,一定程度上说明了该渗透率预测结果具有较好的可信度。P3井施工压力比较高,可能是由于固井时泥浆对储层的污染较严重,造成后期压裂施工压力高,压裂效果不理想。

### 2.4 预测结果影响因素分析

1) 施工压力异常对渗透率预测结果的影响。水力压裂是在钻井、固井完成后进行的,煤层段岩石力学性质与顶板岩石力学性质差异性、地应力、钻井过程中的操作的失误等可能造成煤层段井径的扩径,固井可能进一步加剧了煤层段井径的扩大。井径扩大后,水力压裂初期可能造成施工压力过大。

这种情况下,施工的平均液压力取值比实际要大,滤失量计算值比实际偏大。该模型中,渗透率的大小

与停泵后的斜率关系最密切,施工压力异常影响停泵压力大小,进而影响着预测结果。

表2 研究区部分井渗透率预测所需基本参数

区块	井号	煤厚/m	压裂施工时间/s	裂缝内净压力/MPa	停泵压力/MPa	储层压力/MPa	水黏度/ ( $10^{-10}$ MPa·s)	地层体积分系数	压裂液量/ $m^3$
潘庄	P1	6.10	4 320	12.0	9.00	2.86	9.358	1.03	346.1
	P2	6.30	5 152	14.0	10.40	3.18	9.358	1.03	442.5
	P3	6.00	3 410	12.3	9.70	2.83	9.358	1.03	426.1
	P4	6.60	3 860	10.0	6.60	1.93	9.358	1.03	447.1
	P5	6.80	5 280	16.0	13.60	2.68	9.358	1.03	584.1
	P6	6.00	1 500	8.6	7.20	2.60	9.358	1.03	233.0
恩村	E1	6.65	3 310	14.6	10.30	5.78	9.358	1.03	440.1
	E2	7.80	3 780	15.8	12.13	6.09	9.358	1.03	474.2
	E3	5.00	4 466	18.2	14.86	6.92	9.358	1.03	507.2
	E4	7.00	4 000	19.6	15.59	7.05	9.358	1.03	491.1
	E5	4.78	2 770	12.4	7.80	6.00	9.358	1.03	306.1
	E6	8.08	3 050	18.6	16.92	6.44	9.358	1.03	391.2

表3 研究区部分井渗透率预测结果

区块	井号	滤失量/ $m^3$	时间间隔/d	渗透率/ $10^{-15} m^2$
潘庄	P1	1.24	0.490	1.60
	P2	4.76	0.190	3.67
	P3	0.19	5.800	0.23
	P4	0.96	0.780	1.42
	P5	32.40	0.040	21.50
	P6	1.20	0.037	9.84
恩村	E1	0.46	1.480	0.75
	E2	0.12	3.813	0.21
	E3	13.86	0.080	6.61
	E4	1.50	0.331	1.41
	E5	19.61	0.031	41.82
	E6	3.72	0.027	8.01

2) 煤层段软煤所占比例对渗透率预测结果的影响。随着软煤比例的增加,煤层段岩石力学性质的差异性增加,导致压裂时压裂液对煤层的选择性增加,当软煤比例比较大时,储层污染严重,压裂初期施工压力很大,压裂液更多的在软煤中延伸,硬煤中很少。这种情况下,渗透率的预测结果实际上没有真实反映储层的改造效果。当软煤比例较小时,一般情况下储层污染较小,压裂液更多的在硬煤中延伸,预测结果较准确。

3) 压裂后裂缝沟通构造异常带对渗透率预测结果的影响。在压降测试过程中,当施工压力降低到储层压力以下时,一定程度上说明水力压裂后的

裂缝与构造异常带沟通了。裂缝与构造异常带沟通后,导致压裂液滤失量增加,施工压力下降速度增加,计算出的斜率值增大,渗透率预测结果比实际值偏大。针对这种情况,在数据处理时,缩短停泵后施工压力降低的时间段,以便读取的数据尽量是未滤失到构造异常带的的数据,根据这样的数据进行计算,预测结果更接近煤储层实际的渗透率。

### 3 结 论

1) 煤层段软煤所占比例影响着压裂过程中裂缝延伸的选择性,进而影响水力压裂改造的效果。

2) 煤层段软煤比例较小且压裂未沟通构造异常时,可以根据所建数学模型进行水力压裂后渗透率的预测;软煤比例较大时,不能用所建模型进行水力压裂后渗透率的预测。

3) 水力压裂后渗透率预测模型适用于煤体结构变形微弱区,为煤层气井产能的计算、水力压裂效果评价提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 王玉海,夏克文,孙国库,等.根据压裂施工曲线判断煤层气井压后裂缝展布及产气效果方法研究[J].油气井测试,2011,20(2):25-29.
- [2] 肖中海,刘巨生,陈义国.压裂施工曲线特征分析及应用[J].石油地质与工程,2008,22(5):99-102.

(下转第139页)

钻孔位置选择是保证含量测定高效的关键因素。

修正后的瓦斯含量与钻孔深度关系如图 2b 所示,参考式(10) — (12) 提供的计算方案,统计发现,钻屑质量扩容比  $\gamma = 0.14 \sim 0.21$ ,对图 3 中的测试数据进行补偿修正(图 3),修正参数见表 1。比较发现,煤层瓦斯含量测试精度较原方法提高 8% 以上,有的高达 15% 以上。以 25 采区 3 号钻孔瓦斯含量测定为例,采用该方案计算煤层瓦斯含量 ( $16.48 \text{ m}^3/\text{t}$ ) 与实验室进行的瓦斯等温吸附试验得到特定压力下的瓦斯含量 ( $16.86 \text{ m}^3/\text{t}$ ) 更加接近,误差小于 2.5%。同时经过实验室对比研究,其余 2 个瓦斯含量测试结果与实验室测定结果吻合,证实了该方案的可行性。

表 1 修正参数

钻孔 编号	塑性软 化系数	扩容 系数	弹性模 量/GPa	内摩擦 角/(°)	抗压强 度/MPa	围岩压 力/MPa	泊松 比
25 采区 3 号	-0.48	1.1	2.92	28	1.41	7.72	0.32
26 采区 7 号	-0.52	1.1	2.94	29	1.37	8.10	0.33
26 采区 11 号	-0.52	1.1	2.94	29	1.32	8.62	0.33

## 4 结 论

1) 钻孔钻屑量由实体钻孔钻屑量和钻孔扩容钻屑量两部分构成,钻孔深度与钻屑量之间存在非线性关系。

2) 煤层地质稳定性和钻孔深度影响瓦斯含量测试结果,地质构造发育程度决定测试钻孔深度。

3) 根据扩容理论,采用瓦斯含量补偿系数法可以有效提高瓦斯含量测试精度。

4) 不同变质程度煤样的解吸时间和解吸效率差异明显,建议低煤阶煤采用压力反演计算,中高煤阶煤采用直接测试法测量,保证测定效率。

### 参考文献:

- [1] 张子敏. 瓦斯地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [2] 韩颖, 蒋承林. 初始释放瓦斯膨胀能与煤层瓦斯压力的关系[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 650-654.
- [3] 秦勇, 袁亮, 胡千庭, 等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 1-6.
- [4] 苏现波, 张丽萍, 林晓英. 煤阶对煤吸附能力的影响[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 19-21.
- [5] 路学荣, 郭献林. 瓦斯钻孔排放半径测定方法的探讨与优化[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(12): 65-68.
- [6] 冯文光. 煤层气藏工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] Jacek Sobczyk. A Comparison of the Influence of Adsorbed Gases on Gas Stresses Leading to Coal and Gas Outburst[J]. Fuel, 2014, 115: 288-294.
- [8] 夏大平, 苏现波, 吴昱, 等. 不同预处理方式和模拟产气实验对煤结构的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 129-133.
- [9] 张玉贵, 张子敏, 谢克昌. 煤演化过程中力化学作用与构造煤结构[J]. 河南理工大学学报, 2005, 24(2): 95-99.
- [10] 陈振宏, 王一兵, 宋岩, 等. 不同煤阶煤层气吸附、解吸特征差异对比[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 30-32.
- [11] 切尔诺夫奥依. 瓦斯突出危险煤层井田的准备[M]. 宋世钊, 于不凡, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1980: 73-97.
- [12] 张飞燕, 韩颖. 煤屑瓦斯扩散规律研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1589-1596.
- [13] 陈向军, 程远平, 王林. 水分对不同煤阶煤瓦斯放散初速度的影响[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(12): 62-65.
- [14] 佩冈霍夫. 煤矿冲击地压[M]. 王佑安, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [15] 赵本钧, 章梦涛. 钻屑法的研究和应用[J]. 阜新矿业学院学报, 1985, 4(50): 13-28.
- [16] 任山, 慈建发. 考虑动态滤失系数的压裂井裂缝闭合及返排优化[J]. 中国石油大学学报, 2011, 35(3): 103-107.
- [17] 郭建春, 路千里, 曾凡辉. 楔形裂缝压裂井产能预测模型[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 346-351.
- [18] 孟庆民, 张士诚, 王莉, 等. 数据挖掘技术在气田压裂效果评价中的应用[J]. 中国石油大学学报, 2008, 32(5): 165-168.
- [19] 李建波, 戴平生, 张松革. 低渗透油气层压裂效果分析新方法[J]. 油气井测试, 2002, 11(1): 25-27.
- [20] 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: 15-58.
- [21] 付春权. 现代试井分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 3-59.
- [22] 焦作矿业学院瓦斯地质研究室. 瓦斯地质概论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990: 100-180.
- [23] 马新仿. 水力压裂参数优化的解析方法[J]. 中国石油大学学报, 2011, 35(1): 102-105.
- [24] 王腾飞, 胡永全, 赵金洲, 等. 两种新型闭合压力确定方法的分析及应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 81-83.
- [25] 黄志文, 王益维, 孙良田, 等. 加砂裂缝闭合点的确定方法[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 104-106.
- [26] 毛国扬, 胡永全, 赵金洲, 等. 裂缝性油藏压后降压分析[J]. 断块油气田, 2009, 16(1): 69-71.
- [27] 蒋廷学, 汪永利, 丁云宏, 等. 由地面压裂施工压力资料反求储层岩石力学参数[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(14): 2424-2429.
- [28] 郭建春, 刘登峰, 宋艾玲. 用地面压裂施工资料求取煤岩岩石力学参数的新方法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 136-140.

(上接第 95 页)

- [3] 马新仿. 水力压裂参数优化的解析方法[J]. 中国石油大学学报, 2011, 35(1): 102-105.
- [4] 王腾飞, 胡永全, 赵金洲, 等. 两种新型闭合压力确定方法的分析及应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 81-83.
- [5] 黄志文, 王益维, 孙良田, 等. 加砂裂缝闭合点的确定方法[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 104-106.
- [6] 毛国扬, 胡永全, 赵金洲, 等. 裂缝性油藏压后降压分析[J]. 断块油气田, 2009, 16(1): 69-71.
- [7] 蒋廷学, 汪永利, 丁云宏, 等. 由地面压裂施工压力资料反求储层岩石力学参数[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(14): 2424-2429.
- [8] 郭建春, 刘登峰, 宋艾玲. 用地面压裂施工资料求取煤岩岩石力学参数的新方法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 136-140.