

文章编号: 0253-9985(2007)04-0523-05

# 开关井不同程度应力敏感效应对井底压力动态的影响

刘启国<sup>1</sup>, 唐伏平<sup>2</sup>, 冯国庆<sup>1</sup>, 颜泽江<sup>2</sup>, 胡新平<sup>2</sup>, 陈 军<sup>1</sup>, 李 允<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610500)

(2. 中国石油 新疆油田分公司 采油三厂, 新疆 克拉玛依 833600)

**摘要:** 依据渗流实验建立的应力敏感效应经验关系式, 从渗流力学基本理论出发, 建立了考虑渗透率应力敏感、井筒储存效应和表皮效应影响的均质气藏试井分析数学模型。应用摄动技术和拉普拉斯变换方法求解数学模型, 据此研究应力敏感性气藏的渗流特征以及开关井不同程度应力敏感效应对井底压力动态的影响。研究表明, 随着渗透率应力敏感效应的增大, 压降压力导数曲线向上翘起的幅度增大, 而压恢压力导数曲线则可能出现下掉。当升、降压对渗透率的应力敏感不可逆时, 升压过程不能使渗透率完全复原, 其压力恢复的程度则更低。

**关键词:** 摄动技术; 拉普拉斯变换; 渗流特征; 压力导数; 应力敏感; 试井模型

中图分类号: 353.1 文献标识码: A

## Influence of different stress sensitivities on bottom hole pressure behaviors during well opening and shut-in

Liu Qiguo<sup>1</sup>, Tang Fuping<sup>2</sup>, Feng Guoqing<sup>1</sup>, Yan Zejiang<sup>2</sup>, Hu Xinping<sup>2</sup>, Chen Jun<sup>1</sup>, Li Yun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation • Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500)

(2. No. 3 Oil Production Plant, PetroChina Xinjiang Oil Company, Karamay, Xinjiang 833600)

**Abstract** Basing on the empirical equation of pressure stress-sensitive effect and the basic theory of fluid flowing mechanics in porous medium, a mathematical model for well testing analysis in homogeneous gas reservoirs is established with considerations of permeability sensitivity to stress effect of wellbore storage and skin effect. The perturbation technique and Laplace transform method are employed in the calculation of the model to study the features of percolation in stress-sensitive gas reservoirs and the influence of different stress sensitivities on bottom hole pressure behaviors during well opening and shut-in. The results show that along with the stress sensitivity of permeability increases, derivative curve may upturning higher during drawdown test while the derivative curve may drop down during pressure build-up test. If the damage to permeability caused by stress sensitivity during drawdown/build-up test is irreversible, the permeability can not be fully recovered through pressure boosting and the degree of pressure buildup is still lower.

**Keywords** perturbation method; Laplace transform; percolation feature; pressure derivative; stress sensitivity; well test model

当假设岩石物性参数是常数时, 在很多情况下得出了压力不稳定分析结果<sup>[1~4]</sup>。但随着从低

收稿日期: 2007-06-08

第一作者简介: 刘启国 (1969—), 男, 副教授, 油气藏渗流理论及应用

基金项目: 中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金项目 (04E7047), 四川省学术和技术带头人基金项目 (2200320)

渗透地层和裂缝性地层开发石油资源和地热资源的增加,这些假设需要重新评价。例如,孔隙压力的减少将导致有效岩石应力增加,使得孔隙直径减小、流体储容能力降低、渗透率降低及流体流动阻力增加。在应力改变的条件下,大多数实验证明,在低渗透地层中这些效应更为明显<sup>[5-6]</sup>。

采用扰动技术, Pedrosa<sup>[7]</sup>解析地求解了应力敏感地层中圆柱对称系统流动方程; Kikani 和 Pedrosa<sup>[8]</sup>改进了 Pedrosa<sup>[7]</sup>的扰动技巧解非线性流动方程,其结果精确到三阶。同登科<sup>[9]</sup>、石丽娜<sup>[10]</sup>、段永刚<sup>[11]</sup>等研究了应力敏感性双重介质油气藏的压力动态特征,廖新维<sup>[12]</sup>、宁正福<sup>[13]</sup>等研究了应力敏感性双区复合油气藏的井底压力响应,赵冬梅<sup>[14]</sup>和王文环<sup>[15]</sup>分别研究了压敏三重介质油藏和砂岩地层三区复合凝析气藏的压力响应特征。所有这些研究都是基于等产量压降过程进行的,未对压力恢复的特征进行分析。笔者以应力敏感性均质气藏压降模型为基础,应用叠加原理,研究了开关井不同程度应力敏感效应对井底压力动态的影响。该研究对我国深层低渗透应力敏感性气藏的试井分析具有指导意义。

## 1 应力敏感均质气藏不稳定试井模型

### 1.1 模型假设条件

基于均质气藏的不稳定试井解释数学模型假设条件如下:

- 1) 储层均质、等厚、各向同性,顶、底为不渗透隔层,外边界为无限大;
- 2) 储层中流体为单相气体;
- 3) 流体在储层中作平面径向等温渗流,流动服从线性达西定律;
- 4) 忽略重力和毛管力影响;
- 5) 投产前地层中各处压力恒为原始压力  $p$ ;
- 6) 考虑井筒储存效应、表皮效应和应力敏感效应的影响;
- 7) 井位于气藏中心,完全打开储层,并以恒定产量  $q_{sc}$  生产。

### 1.2 不稳定试井解释数学模型的建立及求解

实验研究表明,渗透率随有效应力变化关系可用下式描述:

$$\gamma' = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial k}{\partial p} \quad (1)$$

式中:  $\gamma'$ ——渗透率模量(按压力定义),  $1/\text{MPa}$ ;

$k$ ——渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;

$p$ ——应力,  $\text{MPa}$ ;

进一步考虑渗流过程中流体性质随有效应力变化的影响,上式可用式(2)代替:

$$\gamma = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial k}{\partial \phi} \quad (2)$$

式中:  $\gamma$ ——渗透率模量(按拟压力定义),  $\text{mPa} \cdot \text{s} / \text{MPa}^2$ ;

$\phi$ ——压力  $p$  对应的拟压力,  $\text{MPa}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。

对式(2)积分得:

$$k = k_i e^{-\gamma(\phi_i - \phi)} \quad (3)$$

式中:  $k_i$ ——原始地层压力下的储层渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;

$\phi_i$ ——原始地层压力下的拟压力,  $\text{MPa}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。

于是,由运动方程、状态方程和物质平衡方程可以建立起考虑渗透率应力敏感效应的渗流微分基本方程:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] + \left[ \frac{\partial \phi}{\partial r} \right]^2 = \frac{\phi \mu_i C_{gi}}{3.6 k_i} e^{\gamma(\phi_i - \phi)} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (4)$$

式中:  $\phi$ ——储层孔隙度, 小数;

$\mu_i$ ——原始压力下的气体粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;

$C_{gi}$ ——原始压力下的综合压缩系数,  $1/\text{MPa}$ ;

$r$ ——半径,  $\text{m}$ ;

$t$ ——时间,  $\text{h}$ 。

将上式无量纲化,并加上适当的定解条件,可以得到考虑应力敏感效应的均质无限大气藏试井解释数学模型:

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D} \cdot \frac{\partial}{\partial r_D} \left[ r_D \frac{\partial \phi_D}{\partial r_D} \right] - \gamma_D \left[ \frac{\partial \phi_D}{\partial r_D} \right]^2 = e^{\gamma_D \phi_D} \frac{\partial \phi_D}{\partial t_D} \\ \phi_D(r_D, 0) = 0 \\ C_D \frac{d\phi_{wD}}{dt_D} - \left[ r_D e^{-\gamma_D \phi_D} \frac{\partial \phi_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} = 1 \\ \phi_{wD} = \left[ \phi_D - S r_D e^{-\gamma_D \phi_D} \frac{\partial \phi_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} \\ \lim_{r_D \rightarrow \infty} \phi_D(r_D, t_D) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $r_D$ ——无量纲距离,  $r_D = r/r_w$ ;

$r_w$ ——井半径,  $\text{m}$ ;

$\phi_D$ ——无因次拟压力,  $\phi_D = \frac{78.55 k_i h (\phi_i - \phi)}{q_{sc} T}$ ;

$h$ ——储层厚度, m;

$T$ ——储层温度, K;

$\gamma_D$ ——无因次渗透率模量,  $\gamma_D = \frac{q_{sc} T}{78.55 k_i h} \gamma$

$t_D$ ——无因次时间,  $t_D = 3.6 k_i t / (\phi \mu_i C_{ii} r_w^2)$ ;

$C_D$ ——无因次井筒储集常数,  $C_D = C / (2\pi \phi h C_{ii} r_w^2)$ ;

$C$ ——井筒储存常数,  $m^3 \text{ MPa}$

$\phi_{wD}$ ——井底压力对应的无因次拟压力;

$S$ ——表皮系数, 无量纲。

为了求解上述模型, 引入如下变换关系式:

$$\phi_D(r_D, t_D) = \frac{1}{\gamma_D} \ln[1 - \gamma_D \eta_D(r_D, t_D)] \quad (6)$$

或改为:

$$\eta_D(r_D, t_D) = \frac{1 - e^{\gamma_D \phi_D(r_D, t_D)}}{\gamma_D} \quad (7)$$

考虑到较小无因次渗透率模量, 针对 (7) 式只要取零阶摄动解即可, 于是试井解释模型 (5) 式化简为:

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D} \cdot \frac{\partial}{\partial r_D} \left| r_D \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} \right| = \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial t_D} \\ \eta_{0D}(r_D, 0) = 0 \\ C_D \frac{d\eta_{0D}}{dt_D} - \left| r_D \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = 1 \\ \eta_{0wD} = \left| \eta_{0D} - S r_D \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} \\ \lim_{r_D \rightarrow \infty} \eta_{0D}(r_D, t_D) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\eta_{0D}$ —— $\eta_D$  的零阶摄动解;

$\eta_{0wD}$ —— $\eta_{0D}$  在井底处的值。

对式 (7) 进行拉普拉斯 (Laplace) 变换, 可得其 Laplace 空间解:

$$\eta_{0wD} = \frac{K_0(\sqrt{u}) + S\sqrt{u}K_1(\sqrt{u})}{u[\sqrt{u}K_1(\sqrt{u}) + C_D u/K_0(\sqrt{u}) + S\sqrt{u}K_1(\sqrt{u})]} \quad (9)$$

式中:  $\eta_{0wD}$ —— $\eta_{0D}$  在 Laplace 空间中的解;

$K_0, K_1$ ——零阶、一阶修正贝塞尔函数;

$u$ ——Laplace 变量。

于是, 考虑应力敏感效应的均质无限大气藏井底无因次压力解为:

$$\phi_{wD} = -\frac{1}{\gamma_D} \ln[1 - \gamma_D L^{-1}[\eta_{0wD} + O(\gamma_D)]] \quad (10)$$

式中:  $L^{-1}$ ——Laplace 逆变换;

$O(\gamma_D)$ —— $\eta_{0D}$  零阶解以上的余量。

### 1.3 不稳定试井解释模型曲线特征

通过 Laplace 数值反演方法, 可将以上 Laplace 空间解析解转化为实空间的数值解。应力敏感均质无限大气藏试井解释模型的特征曲线如图 1 所示。从图中可以看出, 存在与不存在应力敏感效应的均质无限大气藏试井解释模型特征曲线可分为两部分来说明。

第 iv 阶段为纯井筒储存效应控制阶段, 无因次压力 ( $\phi_{wD}$ ) 及其导数  $\left| \phi'_{wD} = \frac{d\phi_{wD}}{d \ln(t_D/C_D)} \right|$  为一条

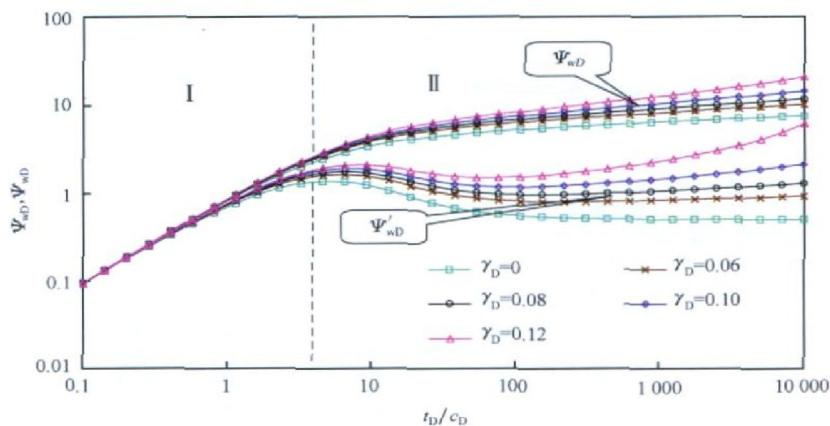


图 1 应力敏感无限大均质油气藏试井模型特征曲线

Fig. 1 Characteristic curve of well test model of homogeneous hydrocarbon reservoirs with infinite stress sensitivity

斜率为 1.0 的直线段。存在与不存在应力敏感效应的均质无限大气藏试井解释模型特征曲线在这一阶段是一样的。

在第 ③ 阶段, 存在与不存在应力敏感效应的均质无限大气藏试井解释模型特征曲线开始出现差别。随着无因次渗透率模量数值的增加, 无因次压力及其导数往上翘起, 无因次渗透率模量数值越大, 无因次压力及其导数往上翘越明显。这种特征和不存在应力敏感效应的均质气藏加不渗透外边界试井模型以及低渗透油气藏存在启动压力梯度的情形相类似。

## 2 开关井不同程度应力敏感效应对井底压力动态的影响

应力敏感渗流实验表明, 不同序次的压力升、降过程对岩心渗透率的影响是不一样的, 即渗透率的变化在压力升、降过程中是不可逆的 (图 2)。

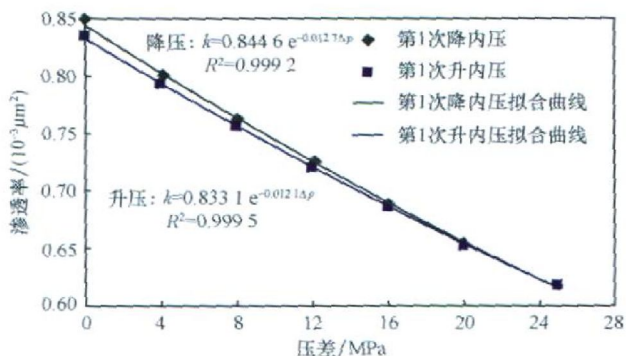


图 2 一降一升应力敏感渗透率曲线

Fig. 2 Stress-sensitive permeability curves during pressure drawdown and buildup

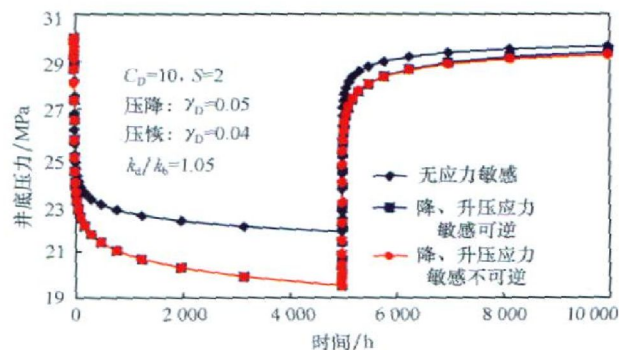


图 3 一开一关井底压力随时间变化的关系

Fig. 3 Bottom hole pressure changes with time during well opening and shut-in

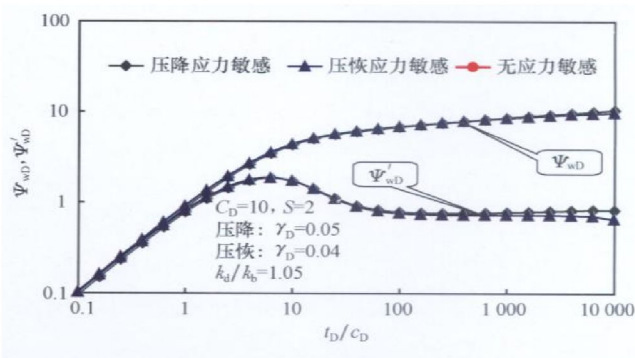


图 4 压降与压恢压力及导数双对数

Fig. 4 Dimensionless pressure and derivative curves of pressure drawdown and buildup

随着升、降压次数的增多, 升、降压应力敏感效应对渗透率的影响渐弱。

图 3 是 3 种情形下一开一关井底压力随测试时间的变化关系图, 参数  $k_d/k_b$  为压降与压 (力) 恢 (复) 在  $\Delta p = 0$  时的渗透率之比。从图中可以看出, 当存在应力敏感效应影响时, 在开井生产过程中为了维持相同的气井产量, 其生产压差要增大; 而在关井恢复压力的过程中, 其压力恢复的程度则降低。当升、降压对渗透率的应力敏感不可逆时, 基于升压过程不能使渗透率完全复原, 因此其压力恢复的程度则还要降低。

图 4 是 3 种情形下井底无因次压力和无因次压力导数与测试时间的双对数图。从图中可以看出, 应力敏感效应使储层渗流能力下降。在压降过程中生产压差增大, 压力和压力导数曲线上抬; 在压力恢复过程中压力恢复速度变慢, 压力导数曲线则可能下掉。大量计算表明, 即使开、关井过程中压力变化对渗透率的影响是可逆的, 压降和压力恢复过程气井井底压力响应曲线也有所差异; 而当开、关井过程中压力变化对渗透率的影响是不可逆时, 由于压力恢复阶段储层平均渗透率更低而使得这一差异更大。

## 3 结论

1) 应力敏感特性对井底压力动态特征的影响表现在纯井筒储集效应以后, 会致使压降压力导数曲线向上翘的特征, 须与不渗透边界影响区分开。

2) 随着渗透率模量的增大, 压降压力导数曲

线向上翘起的幅度增大。

3) 压降测试的双对数曲线会出现导数曲线上翘的应力敏感特征, 而压力恢复则可能出现下掉。因此, 压力恢复测试资料的解释需要参考岩心分析结论和地质认识, 才能确定正确的解释模型。

4) 当开、关井过程中压力变化对渗透率的影响是不可逆时, 由于压力恢复阶段储层平均渗透率更低, 而使得压降和压力恢复过程气井井底压力响应曲线差异更大。

### 参 考 文 献

- 1 付维署, 何顺利, 冉盈志, 等. 多区不等厚横向非均质复合气藏试井分析模型及压力特征 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27 (1): 124~130
- 2 王安辉, 宇淑颖, 张英魁, 等. 神经网络在低渗透油田试井解释中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25 (3): 338~343
- 3 黄学锋, 杨世刚. 深层低渗凝析气藏试井解释方法及其应用探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25 (3): 333~337, 343
- 4 Ostensen R W. Microcrack permeability in tight gas sandstone [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1983, 919~927
- 5 Vairogs J. Effect of rock stress on gas production from low permeability reservoirs [J]. Journal of Petroleum Technology, 1971, 23

(9): 1 171~1 167

- 6 廖新维, 王小强, 高旺来. 塔里木深层气藏渗透率应力敏感性研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (6): 93~94
- 7 Pedrosa O A Jr. Pressure transient response in stress-sensitive formation [R]. Oakland USA: The 1986 SPE California regional meeting (SPE 15115), 1986, 2~4
- 8 Kikani J, Pedrosa O A Jr. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6 (4): 379~386
- 9 同登科, 姜东梅, 陈钦雷. 变形双重介质油藏动态特征 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25 (5): 53~56
- 10 石丽娜, 同登科. 具有井筒储集的变形介质双孔模型压力动态分析 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24 (2): 50~52
- 11 段永刚, 黄诚, 陈伟, 等. 应力敏感裂缝性油藏不稳态压力动态分析 [J]. 西南石油学院学报, 2001, 23 (5): 19~22
- 12 廖新维, 冯积累. 超高压低渗气藏应力敏感试井模型研究 [J]. 天然气工业, 2005, 25 (2): 110~112
- 13 宁正福, 廖新维, 高旺来, 等. 应力敏感裂缝性双区复合气藏压力动态特征 [J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28 (2): 34~36
- 14 赵冬梅, 姚军, 王子胜. 压敏三重介质油藏压力响应特征 [J]. 计算物理, 2005, 22 (5): 444~448
- 15 王文环. 应力敏感砂岩地层三区复合凝析气藏不稳定试井模型 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32 (3): 117~119

(编辑 李 军)

(上接第 519 页)

### 参 考 文 献

- 1 Guo Xia, Du Zhi in. Coalbed methane development in China [R]. Beijing China The WPC 1st Youth Forum (Session 5), 2004
- 2 Guo Xia, Fu Yu, Du Zhi in. Coupled flow simulation in coalbed methane reservoirs [R]. Charleston West Virginia USA: The 2004 SPE Eastern Regional Meeting (SPE 91397), 2004
- 3 孙万禄, 陈召佑, 陈霞, 等. 中国煤层气盆地地质特征与资源前景 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (2): 141~146, 154
- 4 中国煤田地质总局. 中国煤层气资源 [M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1998
- 5 孙万禄, 应文敏, 樊明珠, 等. 我国煤层气储量、资源量级别分类 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18 (4): 305~308
- 6 汤达祯, 秦勇, 胡爱梅. 煤层气地质研究进展与趋势 [J]. 石油

与天然气地质, 2003, 25 (6): 644~647

- 7 张建博, 汪泽成. 中国煤层气勘探开发前景分析 [J]. 石油与天然气地质, 1996, 17 (3): 217~220
- 8 林宗虎. 煤层气——一种亟待开发利用的清洁能源 [J]. 工业锅炉, 2006, (3): 1~5
- 9 Gray I. Reservoir engineering in coal seams (Part 2) — observations of gas movement in coal seams [J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 28~34
- 10 Warren J E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs [J]. SPE, 1963, 245~255
- 11 郭肖, 付玉. 一个煤层气储层数值模拟器 [J]. 天然气工业, 2003, 23 (1): 75~77
- 12 付玉. 煤层气储层数值模拟研究 [D]. 四川成都: 西南石油大学, 2004

(编辑 李 军)

1中可以看出, 由于煤层中含有大量的水, 所以煤层气井日产气量先升高、后降低, 日产水量逐渐降低; 累计产气量随压裂缝半长的增加逐渐增加, 当裂缝半长在 100 m 时出现拐点, 累计产气量增加变缓。本井的压裂缝半长在 100 m 比较合适, 压裂缝长度进一步增加对产量的贡献较小。

## 2) 裂缝导流能力对产能的影响

图 3 为裂缝导流能力与累计产气量关系图。由图中可以看出, 随裂缝导流能力的增加, 累计产气量逐渐增加; 当裂缝导流能力达到  $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$  时出现拐点, 累计产气量增加变缓。本井的裂缝导流能力在  $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$  效果较好, 导流能力继续增加对产量增加影响不大。

## 3) 扩散系数对产能的影响

图 4 为扩散系数与累计产气量关系图。从图

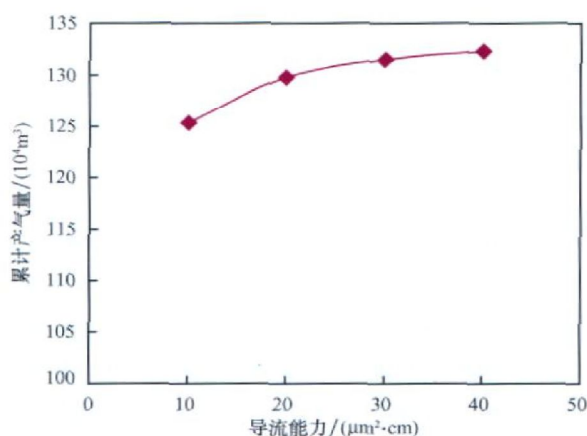


图 3 裂缝导流能力与累计产气量的关系

Fig. 3 Fracture conductivity vs. cumulative gas production

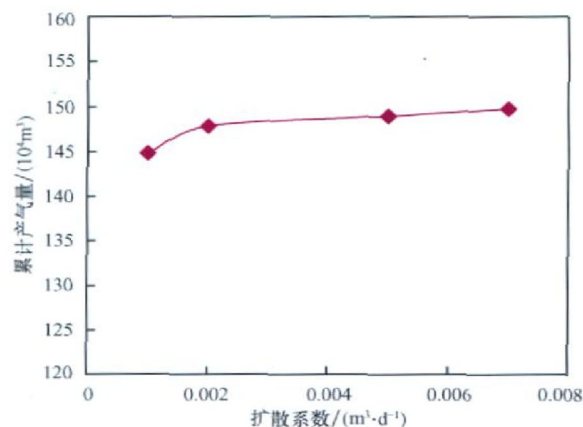


图 4 扩散系数与累计产气量的关系

Fig. 4 Gas diffusion coefficient vs. cumulative gas production

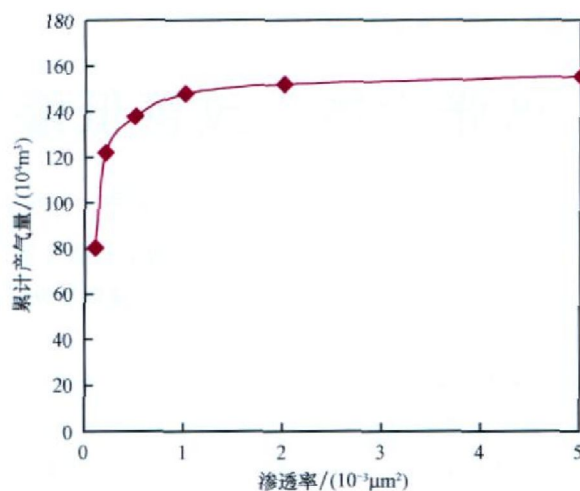


图 5 割理渗透率与累计产气量的关系

Fig. 5 Permeability of cleat vs. cumulative gas production

中可以看出, 随扩散系数的增加, 累计产气量增加; 当扩散系数为  $0.002 \text{ m}^2 / \text{d}$  时曲线出现拐点, 累计产气量增加变缓; 扩散系数从  $0.001 \sim 0.007 \text{ m}^2 / \text{d}$  累计产气量增加不到  $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 可见扩散系数对产量影响较小。

## 4) 割理渗透率对产能的影响

图 5 为割理渗透率与累计产气量关系图。从图中可以看出, 割理渗透率增加, 累计产气量增加; 在割理渗透率为  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时出现拐点, 产量增加变缓; 割理渗透率大于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  后, 割理渗透率的增加对产量贡献较小。

# 5 结论

1) 文中建立的模型可以模拟煤层气的解吸、扩散和渗流等产出过程。

2) 裂缝半长不是越长越好。当裂缝半长增加到一定程度后, 裂缝半长对产能的影响较小。文中实例的裂缝半长在 100 m 时较好。

3) 裂缝的导流能力越大, 产能增加越高。文中实例的裂缝导流能力超过  $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$  后, 产能增加不明显。因此, 裂缝的导流能力为  $20 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$  就能达到较好的开发效果。

4) 分子扩散系数对煤层气产能影响较小; 割理渗透率对煤层气产能影响较大。

5) 对于不同的煤层气井在投产时, 应合理优选压裂缝半长和导流能力。

(下转第 527 页)