

文章编号: 0253-9985(2007)04-0539-05

启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透气藏水平井产能的影响

郭肖, 伍勇

(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)

摘要: 由于低渗透气藏具有低孔、低渗特征, 导致其气水渗流特征较为复杂, 传统意义上的经典渗流规律不再适用于低渗透气藏。大量实验研究和现场应用证实低渗透气藏中存在渗流的非线性和流态的多变性, 流体渗流不仅需要克服启动压力梯度, 同时气体渗流还要受制于应力敏感效应影响。由于水平井是开发低渗透气藏最有效的方法之一, 目前低渗透气藏水平井产能研究大多局限于传统意义上的经典渗流理论, 通常忽略了应力敏感效应和启动压力梯度作用。针对低渗透气藏渗流特征, 引入变换方法建立了低渗透气藏水平井产能模型, 模型考虑了应力敏感效应和启动压力梯度的影响。并以某低渗透气藏为例, 研究了应力敏感效应和启动压力梯度对低渗透气藏水平井产能的影响。结果表明: 1) 启动压力梯度和压力敏感对水平气井产量影响分别呈线性下降关系和幂函数下降关系; 2) 压力敏感效应比启动压力梯度对水平气井产量影响更为强烈; 3) 启动压力梯度达到 $0.000\ 25\ \text{MPa/m}$, 水平气井产量将降低 77%; 当介质变形系数达到 $0.15\ \text{MPa}^{-1}$, 水平气井将停产; 4) 建议低渗透气藏水平井产能预测时必须考虑启动压力梯度和应力敏感效应的影响。

关键词: 低渗透气藏; 启动压力梯度; 应力敏感; 水平井产能

中图分类号: TE33

文献标识码: A

Influence of start-up pressure gradient and stress sensitivity on productivity of low-permeability gas reservoirs

Guo Xiaowu Yong

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

Abstract Water/gas percolation in low-permeability gas reservoirs is rather complicate because of the reservoirs' low porosity and low permeability. As a result, the traditional percolation law is inapplicable to this kind of reservoirs. Laboratory research and field application testify the nonlinearity of percolation and multi-variability of fluidal in the low permeability gas reservoirs. The percolation of fluid will not only need to overcome start-up pressure gradient, but will also be enslaved to stress sensitivity. Horizontal well technique is an effective method in low permeability gas reservoirs development. However, prediction of productivity of horizontal well in low permeability gas reservoirs is mostly carried out within the framework of traditional percolation theory and therefore fails to take start-up pressure gradient and stress sensitivity into consideration. In an attempt to fix the flaw, the conformal transformation is introduced in the establishment of a productivity model for horizontal wells in low-permeability reservoirs and the effects of start-up pressure gradient and stress sensitivity is studied based on the real data from a low-permeability gas reservoir. Results indicate that productivity of horizontal wells in low-permeability gas reservoirs decreases with start-up pressure gradient and stress sensitivity at a linear and an exponential relationship respectively. The stress sensitivity has a stronger impact on the productivity compared with start-up pressure gradient. When start-up pressure gradient

收稿日期: 2007-06-08

第一作者简介: 郭肖(1972—), 男, 博士, 教授, 油气藏开采、油气藏工程

基金项目: CNPC 石油科技中青年创新基金(06E1016), 四川省教育厅自然科学基金重点项目(2006A120)

reaches 0.000 25 MPa/m, the productivity will be reduced to 77%; while when rock elastic distortion coefficient exceeds 0.15 MPa^{-1} , the horizontal gas well will have to be shut down. It suggests that start-up pressure gradient and stress-sensitivity effect should be considered to correctly predict the productivity of horizontal gas well in low permeability reservoirs.

Key words low-permeability gas reservoir; start-up pressure gradient; stress sensitivity; productivity of horizontal well

低渗透气藏气水流动通道很窄,在细小的孔隙喉道处易形成水化膜。地层孔隙中的气体从静止到流动必须克服水化膜的束缚,作用于水化膜表面两侧的压力梯度必须突破一临界值时气体才能流动,该临界值即为气体渗流时的启动压力梯度。国内外研究证实了启动压力梯度的存在,研究表明渗透率越低启动压力梯度越大^[1~4]。贺伟^[3]开展了低渗气藏真实岩样特殊渗流实验,分析了低渗岩石气体低速非达西渗流规律,实验发现了含水状态下岩样渗流偏离达西定律的现象,并提出用“启动压差”和“临界压力梯度”两个参数来描述其渗流规律。刘晓旭^[5]等对低渗砂岩气藏气体特殊渗流机理进行了实验研究与分析。吴凡^[6]利用天然岩心进行了实验室试验,通过拟合试验数据发现,气相启动压力梯度和平均渗透率倒数存在线性关系。刘高波^[7]研究了启动压力和滑脱效应共同作用存在非达西效应消失现象。

低渗透气藏更容易出现压力敏感性效应,压敏效应能够对低渗透气藏开发造成巨大的影响,郑维师^[8]研究结果表明:井底压力下降 10 MPa 产量下降可达 30% 左右。康毅力^[9]以大牛地气田致密砂岩为研究对象,采用应力敏感性系数评价法对岩石组分、裂缝、温度、含水饱和度以及施压次数等应力敏感损害因素进行了分析研究。宋传真^[10]通过实验方法建立了大牛地致密低渗气藏应力敏感性的幂函数关系式,研究了储层渗透率随气藏压力的变化规律,结果表明大牛地致密低渗气藏在考虑储集层应力敏感性的条件下气藏单井产能降低明显。郭肖^[11]建立了考虑非达西效应和介质变形影响的低渗气藏耦合流动数学模型,研究表明:低渗气藏孔隙度、渗透率参数变化降低气井产能的幅度比非达西流动影响大得多,不考虑耦合比考虑耦合计算的日产气量高出 27% ~ 39%。罗瑞兰^[12]研究了启动压力梯度与低渗气藏应力敏感的相互关系,由于启动压力梯度的存在,使得低渗透储层比中高渗透储层具有更强的应力敏感性,当初始渗透率小于某

一临界值时,渗透率越低应力敏感性越强,而大于次临界值时,渗透率随应力的变化幅度与渗透率初始值无关。韩文功等^[14~17]对低渗透油气藏及隐蔽的气藏开展了研究。

由于水平井是开发低渗透气藏最有效的方法之一,目前低渗透气藏水平井产能研究大多局限于传统意义上的经典渗流理论,通常忽略了应力敏感效应和启动压力梯度作用。本文针对低渗透气藏渗流特征,引入变换方法建立了低渗透气藏水平井产能模型,模型考虑了应力敏感效应和启动压力梯度的影响作用。并以某低渗透气藏为例,研究了应力敏感效应和启动压力梯度对低渗透气藏水平井产能的影响。

1 水平气井产能模型

1.1 直井产能

在引入启动压力梯度情况下,气体运动方程为:

$$\frac{dp}{dr} - \lambda = \frac{\mu_g}{K_g} \cdot \frac{Q'_{sc} B_g}{2\pi r h} \quad (1)$$

式中: p 为地层压力, MPa; r 为半径, m; λ 为气体启动压力梯度, MPa/m; μ_g 为气体粘度, $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$; K_g 为气层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; B_g 为气体体积系数; π 为圆周率; h 为气层有效厚度, m; Q'_{sc} 为考虑启动压力梯度的直井气体产量, m^3/d 。

进行积分化简得到考虑启动压力梯度直井产能公式:

$$Q'_{sc} = \frac{2\pi K_g h [p - p_{wf} - \lambda(r_e - r_w)]}{B_g \mu_g \ln \frac{r}{r_w}} \quad (2)$$

式中: p_{wf} 为井底流压, MPa; r_e 为水平井泄气半径, m; r_w 为井筒半径, m。

1.2 水平气井产能

根据郭肖^[13,14]的研究,引入变换方法分别对平

面水平气井流量和垂直面水平气井流量进行求取。

1.2.1 水平面水平气井流量

引入如图 1 的变换,将 Z 平面上长半轴为 a 短半轴为 b 的椭圆形区域变换成 ω 平面上半径为 $2(a+b)/L$ 的圆形区域,将线段 $(-L/2, 0)$ 到 $(L/2, 0)$ 映射成单位圆周。在 ω 平面上的流动,可以认为是半径 $2(a+b)/L$ 的圆形供给区域内有一口半径为 1 的直井的情形。考虑到气层厚度和椭圆性质 $b = \sqrt{a^2 - (L/2)^2}$, 得到水平井在水平平面的流量为:

$$Q_{gh} = \frac{2\pi K_g h [p - p_{wf} - \lambda(r_e - r_w)]}{B_g \mu_g \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2}} \quad (3)$$

$$a = 0.5L \left| 0.5 + \sqrt{0.25 + (2r_e/4)^4} \right|^{0.5} \quad (4)$$

式中: Q_{gh} 为水平井在水平平面的气体流量, m^3/d ; a 为泄气椭圆长半轴, m ; L 为水平井长度, m 。

1.2.2 垂直面水平井气体流量

引入保角变换 $\omega_1 = e^{\frac{\pi z}{h}}$, 将 Z 平面上带形区域变换成 ω_1 平面上右半平面,再经镜像反映变换为无穷大地层两个汇点问题。 Z 平面上汇点 $(0, 0)$ 在 ω 平面上变成原点 $A(1, 0)$ 和 $B(-1, 0)$ 。 Z 平面上的油井半径 r_w 在 ω 平面上相应为 ρ_w 。

通过变化处理得到垂直平面水平井气体流量为:

$$Q_v = \frac{2\pi K_g h [p - p_{wf} - \lambda(r_e - r_w)]}{B_g \mu_g \ln \frac{h}{2\pi r_w}} \quad (5)$$

式中: Q_v 为水平井在垂直平面的气体流量, m^3/d 。

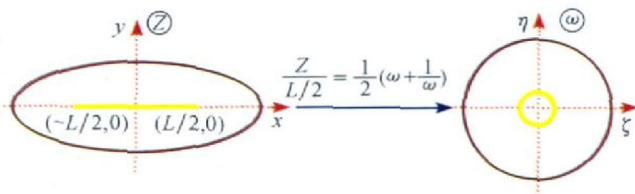


图 1 水平面变换关系

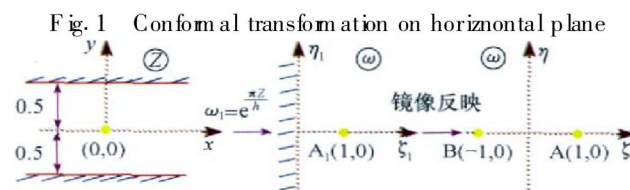


图 2 垂直平面保角变换关系

Fig. 2 Conformal transformation on vertical plane

1.3 水平气井产能模型

应用电模拟原理,忽略各向异性影响,在考虑启动压力梯度情况下水平井气体产量公式为:

$$Q_{sc} = \frac{2\pi K_g h [p - p_{wf} - \lambda(r_e - r_w)]}{B_g \mu_g \left| \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right|} \quad (6)$$

存在应力敏感时,根据宋传真^[10]的研究,有效渗透率变化为:

$$K_e = K_i \exp[-a_k(p_u - p)] \quad (7)$$

式中: K_e 为地层有效渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; K_i 为气层原始渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; a_k 为介质变形系数, MPa^{-1} ; p_u 为上覆地层压力, MPa 。

因此,在综合考虑应力敏感效应和启动压力梯度共同作用下水平井气体产量公式为

$$Q_{sc} = \frac{2\pi K_i \exp[-a_k(p_u - p)] h [p - p_{wf} - \lambda(r_e - r_w)]}{B_g \mu_g \left| \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right|} \quad (8)$$

2 实例分析

以某低渗透气藏为例,研究了应力敏感效应和启动压力梯度对低渗透气藏水平井产能的影响。计算所需参数如下:

$$L = 100 \ 200 \ 300 \ 400 \ 500 \ 600 \ m;$$

$$h = 5 \ m;$$

$$k = 0.5 \times 10^{-3} \ \mu m^2;$$

$$B_g = 0.001;$$

$$\mu_g = 0.015 \ \mu Pa \cdot s$$

$$p_u = 60 \ MPa$$

$$p = 23 \ MPa$$

$$p_{wf} = 10 \ MPa$$

$$r_e = 400 \ m;$$

$$r_w = 0.07 \ m;$$

$$a_k = 0 \ 0.03 \ 0.06 \ 0.09 \ 0.12 \ 0.15 \ MPa^{-1};$$

$$\lambda = 0 \ 0.000 \ 05 \ 0.000 \ 1 \ 0.000 \ 15 \ 0.000 \ 2$$

$$0.000 \ 25 \ MPa/m。$$

计算结果见图 3~图 9。由图可见: 1)启动压力梯度对水平气井产量影响呈一线性下降关系,

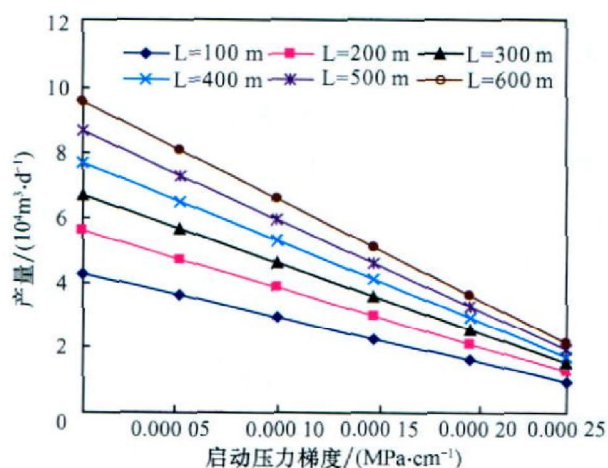


图 3 启动压力梯度对水平气井产量的影响 ($a_k = 0.06 \text{ MPa}^{-1}$)

Fig. 3 Impact of start-up pressure gradient upon the productivity of horizontal wells ($a_k = 0.06 \text{ MPa}^{-1}$)

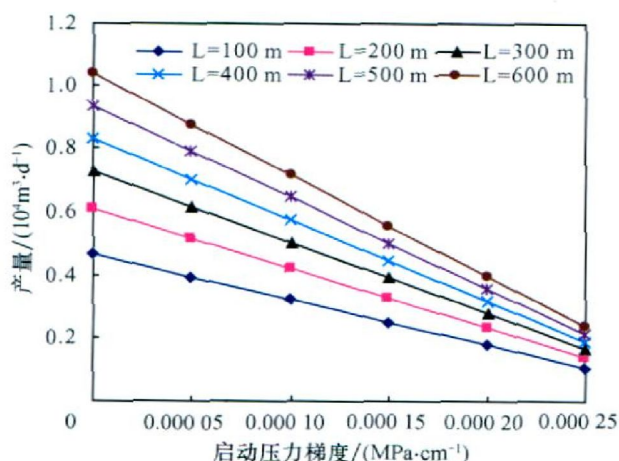


图 4 启动压力梯度对水平气井产量的影响 ($a_k = 0.09 \text{ MPa}^{-1}$)

Fig. 4 Impact of start-up pressure gradient upon the productivity of horizontal wells ($a_k = 0.09 \text{ MPa}^{-1}$)

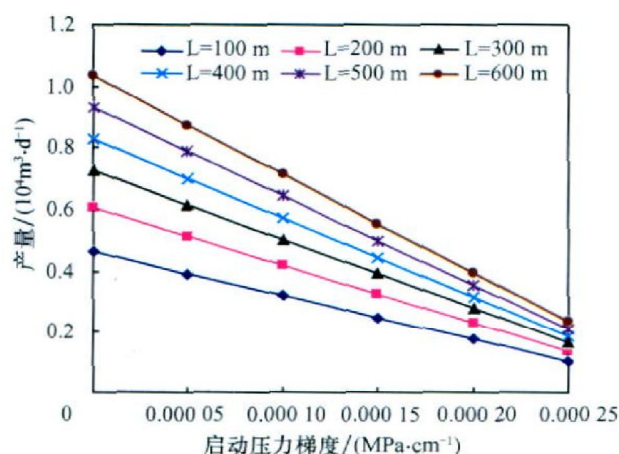


图 5 启动压力梯度对水平气井产量的影响 ($a_k = 0.12 \text{ MPa}^{-1}$)

Fig. 5 Impact of start-up pressure gradient upon the productivity of horizontal wells ($a_k = 0.12 \text{ MPa}^{-1}$)

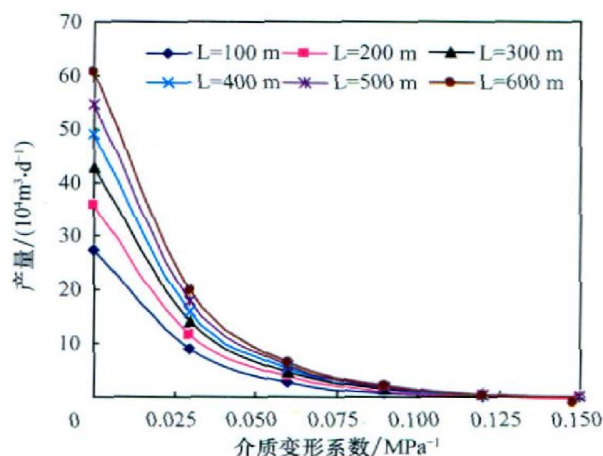


图 6 压力敏感对水平气井产量的影响 ($\lambda = 0.000 1 \text{ MPa/m}$)

Fig. 6 Impact of stress sensitivity upon the productivity of horizontal wells ($\lambda = 0.000 1 \text{ MPa/m}$)

而压力敏感对水平气井产量影响为一幂函数下降关系。2)随着启动压力梯度和介质变形系数增大,水平气井产量减少。3)当启动压力梯度分别取 $\lambda = 0.000 05, 0.000 10, 0.000 15, 0.000 20, 0.000 25 \text{ MPa/m}$ 时,对应水平气井产量比不考虑启动压力梯度影响分别降低了 15%, 31%, 46%, 62% 和 77%。4)当介质变形系数分别取 $a_k = 0.03, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15 \text{ MPa}^{-1}$ 时,对应水平气井产量比不考虑压敏效应分别降低了 67.0%, 89.1%, 96.4%, 98.8% 和 99.6%。5)压力敏感效

应比启动压力梯度对水平气井产量影响强烈地多。

3 结论

1)针对低渗透气藏渗流特征,引入变换方法建立了低渗透气藏水平井产能模型,模型考虑了应力敏感效应和启动压力梯度的影响作用。

2)启动压力梯度对水平气井产量影响呈一线性下降关系,而压力敏感对水平气井产量影响为一幂函数下降关系。

3)压力敏感效应比启动压力梯度对水平气井产量影响更为强烈。

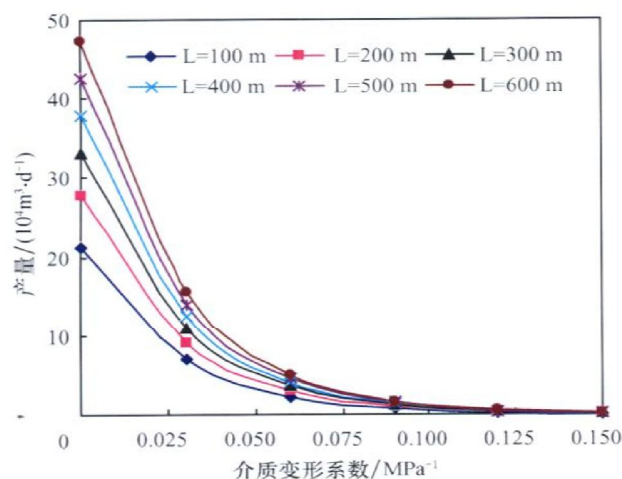


图 7 压力敏感对水平气井产量的影响 ($\lambda = 0.000\ 15\ \text{MPa/m}$)

Fig. 7 Impact of stress sensitivity upon the productivity of horizontal wells ($\lambda = 0.000\ 15\ \text{MPa/m}$)

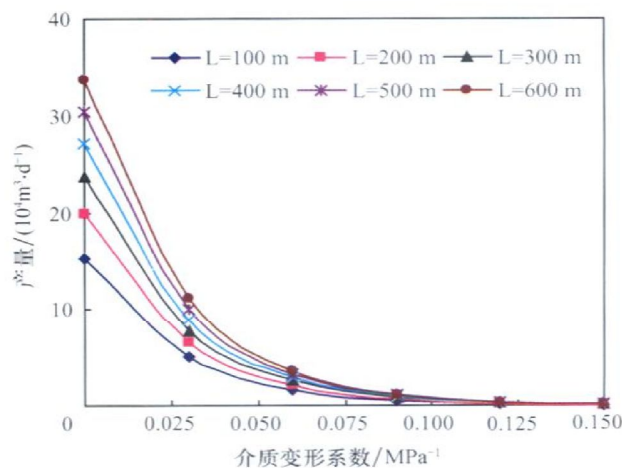


图 8 压力敏感对水平气井产量的影响 ($\lambda = 0.000\ 2\ \text{MPa/m}$)

Fig. 8 Impact of stress sensitivity upon the productivity of horizontal wells ($\lambda = 0.000\ 2\ \text{MPa/m}$)

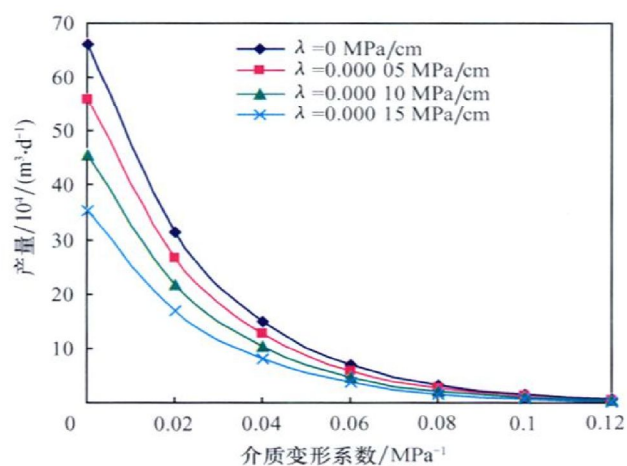


图 9 启动压力梯度和压力敏感效应对水平气井产量影响

Fig. 9 Impact of start-up pressure gradient and stress sensitivity upon the productivity of horizontal wells

4)对于实例气藏,启动压力梯度达到 $0.000\ 25\ \text{MPa/m}$,水平气井产量将降低 77%;当介质变形系数达到 $0.15\ \text{MPa}^{-1}$ 水平气井将停产。

参 考 文 献

- 冯曦,钟孚勋,罗涛.低渗透致密储层气井试井模型研究[J].天然气工业,1998,18(1):56~59
- 冯文光.非达西低速渗流的研究现状与进展[J].石油勘探与开发,1986,13(4):76~80
- 贺伟,冯曦,钟孚勋.低渗透储层特殊渗流机理和低渗透气井动态特征探讨[J].天然气工业,2002,22(增刊):91~94
- 刘建军,刘先贵.低渗透岩石非线性渗流规律研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(4):556~561
- 刘晓旭,胡勇,李宁,等.低渗砂岩气藏气体特殊渗流机理实

验研究与分析[J].特种油气藏,2007,14(1):80~83

- 吴凡,孙黎娟,乔国安.气体渗流特征及启动压力规律的研究[J].天然气工业,2001,21(1):82~84
- 刘高波,刘荣和,冯文光.低渗透气藏非达西渗流研究[J].大庆石油地质与开发,2007,26(1):65~67
- 郑维师,刘易非.低渗砂岩气藏中压敏效应对产能的影响[J].天然气工业,2004,24(12):113~115
- 康毅力,张浩,陈一健.鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩气敏感性综合研究[J].天然气地球科学,2006,17(3):335~338
- 宋传真,郑荣臣.致密低渗气藏储层压力敏感性及其对单井产能的影响[J].大庆石油地质与开发,2006,25(6):47~49
- 郭肖,杜志敏.低渗透气藏耦合流动模拟[J].天然气工业,2005,25(2):113~115
- 罗瑞兰,程松林.油气储层渗透率应力敏感性与启动压力梯度的关系[J].西南石油学院学报,2005,27(3):20~22
- 郭肖,杜志敏,疏壮志.裂缝性有水气藏水平井产能分析[J].天然气工业,2006(09):100~102
- 韩文功,张建宁,王金铎.济阳拗陷隐蔽圈闭识别与精细描述[J].石油与天然气地质,2006,27(6):849~859
- 王文环.提高薄互层低渗透砂岩油气藏采收率的有效开发技术[J].石油与天然气地质,2006,27(5):660~667
- 王昔彬,刘传喜,郑荣臣.大牛地致密低渗透气藏启动压力梯度及应用[J].石油与天然气地质,2005,26(5):634~639
- 宋子齐,程国建,杨立雷,等.利用测井资料精细评价特低渗透储层的方法[J].石油实验地质,2006,28(6):595~599

(编辑 陈喜禄)