

# 考虑应力敏感性的低渗气藏压裂气井产能模型

侯勇<sup>1,2</sup>, 汤睿<sup>3</sup>

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100
2. 非常规油气湖北省协同创新中心, 武汉 430100
3. 中海油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030

**摘要** 渗透气藏孔喉致密存在应力敏感性,而且气井投产前普遍进行压裂,因此建立考虑应力敏感性的气井产能模型具有一定的意义。选用塔里木低渗透气藏的岩心开展应力敏感性实验,实验表明低渗透气藏存在较强的应力敏感性,渗透率越低,应力敏感性系数越大,应力敏感性越强。将压裂气井的渗流区域划分为裂缝两端的径向流和裂缝两边的线性流推导了考虑应力敏感性的压裂气井产能模型。应力敏感对压裂气井产能有较大影响,应力敏感性越强的气藏,产能损失率越高,随着井底流压的降低,应力敏感性引起的产能损失增加。压裂是改善受应力敏感性影响的低渗气藏气井产能的有效途径。

**关键词** 低渗透气藏;应力敏感性;压裂;产能模型;产能损失率

低渗透气藏储层普遍具有喉道小、孔喉比大的特点,与中、高渗储层不同,天然气在低渗透气藏中的流动受孔吼变形影响较大<sup>[1-3]</sup>。而气藏开发过程中,随着地层压力的下降,储层受到的有效应力增加,会发生应力敏感现象,即孔吼受压缩后变得更为细小,从而引起渗透率下降,影响气井产能<sup>[4-6]</sup>。另外,由于低渗透气藏基质渗透率低,气藏开发过程中普遍对气井进行压裂措施来提高气井产能<sup>[7-9]</sup>。应力敏感性对这种压裂气井产能的影响需要论证。宋传真等<sup>[10]</sup>、郑维师等<sup>[11]</sup>、蒋艳芳等<sup>[12]</sup>分别并推导了考虑应力敏感性的产能模型,但是这些模型不适用于压裂气井。廉培庆等<sup>[13]</sup>、岳建伟等<sup>[14]</sup>分别建立了压裂气井的产能模型,但是这些模型没有考虑应力敏感性。熊健等<sup>[15]</sup>、张晓亮等<sup>[16]</sup>、田冷等<sup>[17]</sup>分别建立了低渗透油藏的压裂气井产能模型,但是由于气体的压缩性远远大于原油,因此这些模型不能适用于低渗透气藏。

为了分析应力敏感性对压裂气井的产能影响,本文选取塔里木低渗透气藏的岩心开展应力敏感性室内实验,推导考虑应力敏感性的压裂气井产能模型。

## 1 应力敏感性实验

采用表1中五块岩心开展了低渗气藏应力敏感性实验。实验方法参照《SY/T 5358—2002 中国石油天然气行业标准》设计<sup>[18]</sup>,手摇泵施加围压,皂泡流量计测量低流速气体流量,

表1 岩心基础物性数据  
Table 1 Core basic properties

岩心编号	直径/cm	长度/cm	孔隙度/%	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
M1	2.51	5.7	10.0	0.2
M2	2.50	6.3	11.2	0.8
M3	2.51	4.9	12.9	1.5
M4	2.51	6.7	14.1	2.2
M5	2.50	7.1	15.0	3.6

用浮子流量计测量高速气体流量。

图1分别为岩心应力敏感性曲线。由图1可见,随着有效应力的增加,无因次渗透率逐渐下降,有效应力增加的初期,渗透率下降速度较快,随着有效应力的逐渐增加,渗透率下降速度逐渐减慢。实验采用的5块渗透率不同的岩心的应力敏感性曲线表明,渗透率越低,应力敏感性造成的渗透率下降幅度越大。

参照渗透率敏感性评价方法,对实验测得的渗透率进行了归一化处理。对于发生应力敏感性的储层,无因次渗透率与有效应力可以用指数关系表示<sup>[19,20]</sup>:

$$\frac{k}{k_i} = e^{-\alpha \Delta P} \quad (1)$$

收稿日期:2015-09-17;修回日期:2015-10-11

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05007-001)

作者简介:侯勇,实验师,研究方向为计算机应用,电子信箱:877752174@qq.com;汤睿(通信作者),工程师,研究方向为油藏工程,电子信箱:4456109@qq.com

引用格式:侯勇,汤睿.考虑应力敏感性的低渗气藏压裂气井产能模型[J].科技导报,2016,34(2):152-155;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.024

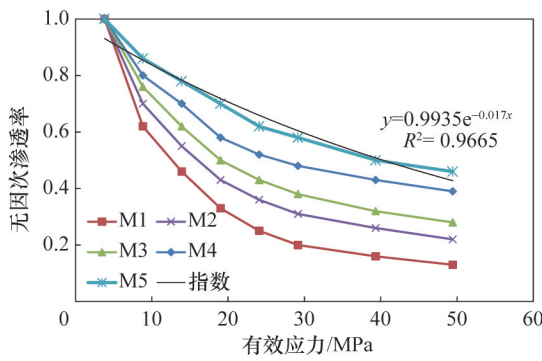


图1 应力敏感性曲线

Fig. 1 Curves of stress sensitivity

其中,  $k_i$  为初始渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $k$  为有效应力下的渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\alpha$  为应力敏感性系数,  $1/\text{MPa}$ , 反映渗透率对有效应力的敏感程度,  $\alpha$  越大, 应力敏感性越强。

## 2 考虑应力敏感性的压裂气井产能模型

模型假设条件: 气井在未压裂时, 储层内气体的流动为径向流; 当气井压裂后, 气井泄气范围内的气体流动模式发生了改变, 认为压裂后一部分气体的流动为径向流, 另一部分气体的流动变为线性流(图2)。为了研究方便, 对渗流模型作如下假设: 1) 裂缝为垂直裂缝, 在气井两侧对称分布, 为矩形剖面, 高度等于储层厚度; 2) 储层及裂缝内为单相气体流动, 且符合达西线性渗流定律; 3) 气井为稳态渗流, 不考虑储层的污染和垂直方向的流动; 4) 压裂裂缝无限导流。

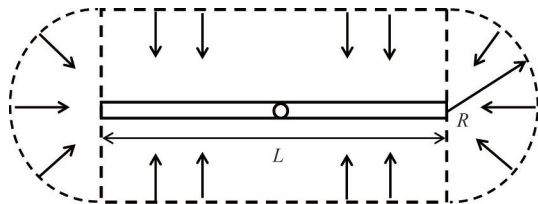


图2 低渗气藏压裂直井渗流场示意

Fig. 2 Schematic diagram of seepage area for the fractured gas well in low permeability gas reservoirs

设压裂裂缝长度为  $L_f$ , 气藏有效厚度为  $h$ , 气藏边界压力为  $p_e$ , 泄气半径为  $r_c$ , 井筒半径为  $r_w$ , 气体黏度为  $\mu$ , 地下气层温度为  $T$ , 气体偏差系数为  $Z$ , 储层有效渗透率为  $k$ , 裂缝宽度为  $W_f$ , 井底流压为  $p_w$ , 裂缝两边平面线性渗流区域气井的产气量为  $Q_{sc1}$ , 裂缝两端平面径向渗流区域气井的产气量为  $Q_{sc2}$ , 气井总产气量为  $Q_{sc}$ 。

气体的线性渗流微分方程为

$$q = \frac{kA}{\mu} \frac{dp}{dL} \quad (2)$$

式中,  $q$  为线性流截面处气体的体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $p$  为压力,  $\text{MPa}$ ;  $r$  为距井轴的任意半径,  $\text{m}$ ;  $A$  为气体渗流截面积,  $\text{m}^2$ ;  $L$  为气体渗流距离,  $\text{m}$ 。

根据质量连续方程和真实气体的状态方程:

$$\rho q = \rho_1 q_1 = \rho_2 q_2 = \text{常数} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{pM}{ZRT} \quad (4)$$

可得稳定渗流条件线性流的标准状态下的气井产量

$Q_{sc1}$ :

$$Q_{sc1} = 2L_f h \frac{Kp}{\mu Z} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{TP_{sc}} \frac{dp}{dL} \quad (5)$$

将气藏应力敏感表达式(1)代入式(5)得

$$Q_{sc1} = 2L_f h \frac{p}{\mu Z} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{TP_{sc}} k_i e^{-\alpha(p_e - p)} \frac{dp}{dx} \quad (6)$$

在矿场应用中,  $\mu$  和  $Z$  一般用平均值  $\bar{\mu}$ 、 $\bar{Z}$  代替, 并认为平均值  $\bar{\mu}$  和  $\bar{Z}$  在积分范围内为常数, 将式(6)分离变量并在  $(0, r_c)$  区间内积分, 得到平面径向流流量  $Q_{sc1}$ :

$$Q_{sc1} = 2L_f \frac{h}{r_c} \frac{k_i}{\mu \bar{Z}} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{TP_{sc}} \left[ \frac{1}{\alpha} \left[ p_e - p_w \cdot e^{-\alpha(p_e - p_w)} \right] - \frac{1}{\alpha^2} \left[ 1 - e^{-\alpha(p_e - p_w)} \right] \right] \quad (7)$$

在压裂气井裂缝两端的气体, 流动遵循径向渗流规律, 采用与上面类似的处理方法, 则考虑应力敏感的径向流区域产量方程可写为

$$Q_{sc2} = \frac{2\pi k_i Z_{sc} T_{sc} h e^{-\alpha p_e}}{\bar{\mu} \bar{Z} T_{sc} \ln \frac{r_c}{r_w}} \left[ \frac{1}{\alpha} \left( p_e e^{\alpha p_e} - p_w e^{\alpha p_w} \right) - \frac{1}{\alpha^2} \left( e^{\alpha p_e} - e^{\alpha p_w} \right) \right] \quad (8)$$

压裂气井总的流量公式为

$$Q_{sc} = Q_{sc1} + Q_{sc2} \quad (9)$$

同样可以得出不考虑地层应力敏感性的压裂气井产能公式

$$Q_{sc} = Q_{sc1} + Q_{sc2} = \frac{Z_{sc} T_{sc} k_i h}{p_{sc} T_{sc} \bar{\mu} \bar{Z}} \left( L_f + \frac{\pi}{\ln \left( \frac{r_c}{r_w} \right)} \right) (p_e^2 - p_w^2) \quad (10)$$

## 3 应力敏感性对压裂气井产能的影响

假设某低渗气藏的有效厚度为  $15 \text{ m}$ , 气藏温度为  $363 \text{ K}$ , 气体平均粘度为  $0.023 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 原始地层压力为  $35 \text{ MPa}$ , 泄气半径为  $600 \text{ m}$ , 储层绝对渗透率为  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 在应力敏感性系数  $\alpha$  分别为  $0.03$ 、 $0.05$ 、 $0.08$ , 裂缝长  $L_f$  分别为  $150$ 、 $200$ 、 $250 \text{ m}$  条件下通过式(9)、式(10)求得考虑应力敏感与不考虑应力敏感时压裂气井的流入动态曲线, 如图3、图4所示。

裂缝长度为  $200 \text{ m}$ , 不同应力敏感性系数情况下的压裂气井流入动态曲线如图3所示。随着井底流压的降低, 气井生产压差增加, 产气量升高。当井底流压等于  $19 \text{ MPa}$ , 应力敏感性系数分别为  $0$ 、 $0.03$ 、 $0.05$ 、 $0.08$  的情况下对应压裂气井的产能分别为  $66598$ 、 $54294$ 、 $47545$ 、 $39660 \text{ m}^3/\text{d}$ , 与应力敏感性系数为  $0$  的气井产能相比, 应力敏感性造成的产能损失率分别为  $18.5\%$ 、 $28.6\%$ 、 $40.4\%$ 。即井底流压一定的情况下, 应力敏感性系数越大, 产能越低, 应力敏感性引起的产能损失率越高。当井底流压等于  $11 \text{ MPa}$  时, 应力敏感性系数分别为  $0$ 、 $0.03$ 、 $0.05$ 、 $0.08$  的情况下对应压裂气井的产能分别为

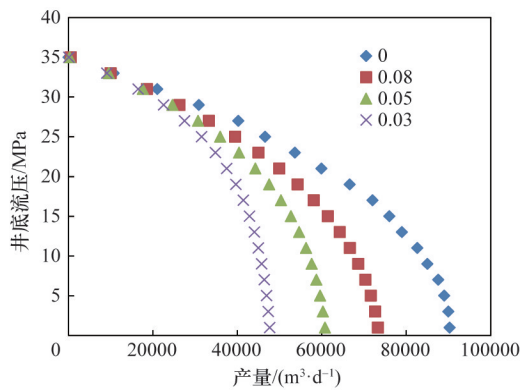


图3 不同应力敏感性系数下压裂气井流入动态曲线  
Fig. 3 IPR curves of fractured gas well under different  $\alpha$

82600、66656、56285、44992 m<sup>3</sup>/d,与应力敏感性系数为0的气井产能相比,应力敏感性造成的产能损失率分别为19.3%、31.9%、45.5%。可见,应力敏感性对产能的影响随着井底流压的降低而增强。

应力敏感性系数为0.05,不同裂缝长度分别为150、200、250 m情况下的压裂气井流入动态曲线如图4所示。3种裂缝长度的气井产量均随着井底流压的降低而升高。当井底流压等于19 MPa,裂缝长度分别为150、200、250 m情况下对对应压裂气井的产能分别为35731、47545、59359 m<sup>3</sup>/d,存在应力敏感的情况下,随着裂缝长度的增加,压裂气井的产能随之升高,可见,压裂是改善受应力敏感性影响的低渗气藏气井产能的有效途径。

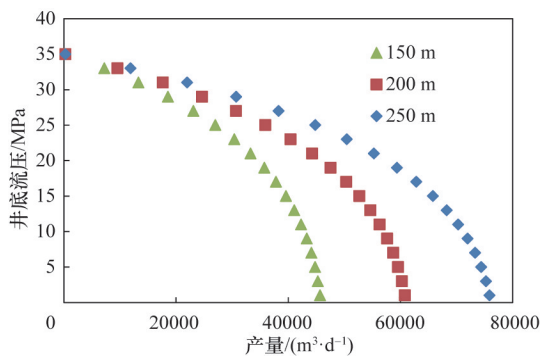


图4 不同裂缝半长下压裂气井流入动态曲线  
Fig. 4 IPR curves of fractured gas well under different  $L_f$

#### 4 结论

1) 选用塔里木低渗透气藏的岩心开展应力敏感性实验,实验表明低渗透气藏存在较强的应力敏感性,随着气藏开发,地层压力下降,储层受到的有效应力增加,渗透率随之降低。在有效应力增加初期,渗透率下降幅度较大,有效应力增加后期,渗透率下降幅度逐渐减小。

2) 将压裂气井的渗流区域划分为裂缝两端的径向流和裂缝两边的线性流,推导了考虑应力敏感性的压裂气井产

能模型,为科学准确评价低渗气藏压裂气井产能提供了理论依据。

3) 应力敏感对压裂气井产能有较大影响,应力敏感性越强的气藏,产能损失率越高,随着井底流压的降低,应力敏感性引起的产能损失增加。对于压裂气井,增加裂缝长度可以提高气井产能,改善应力敏感对气井产能的影响。

#### 参考文献 (References)

- [1] 杨建,康毅力,李前贵,等.致密砂岩气藏微观结构及渗流特征[J].力学进展,2008,38(2):229-235.  
Yang Jian, Kang Yili, Li Qiangu, et al. Characters of micro-structure and percolation in tight sandstone gas reservoirs[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 229-235.
- [2] 伊怀建,朱维耀,张明江,等.低渗透致密储层气体低速非达西渗流地层压力分布及产能分析[J].复杂油气藏,2012,19(1):70-73.  
Yi Huaijian, Zhu Weiyao, Zhang Mingjiang, et al. Analysis of formation pressure distribution and productivity of low permeability tight gas reservoirs with low-velocity non-Darcy flow[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 70-73.
- [3] 叶礼友,高树生,熊伟,等.储层压力条件下低渗砂岩气藏气体渗流特征[J].复杂油气藏,2011,4(1):59-63.  
Ye Liyou, Gao Shusheng, Xiong Wei, et al. Percolation characteristics of gas in sandstone gas reservoir with low permeability under reservoir pressure[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2011, 4(1): 59-63.
- [4] 茹婷,刘易非,范耀,等.低渗砂岩气藏开发中的压敏效应问题[J].断块油气田,2011,18(1):94-96.  
Ru Ting, Liu Yifei, Fan Yao, et al. Pressure-sensitive effect in development of low permeability sandstone gas reservoir[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 94-96.
- [5] 杨波,黄万书,朱洪涛,等.压敏效应对低渗透砂岩气藏产能的影响[J].天然气技术,2009,3(5):18-21.  
Yang Bo, Huang Wanshu, Zhu Hongtao, et al. Influence of pressure-sensitive effect on deliverability in low-permeability sandstone gas reservoir [J]. Natural Gas Technology, 2009, 3(5): 18-21.
- [6] 熊健,黄亮,崔玲.非线性流下井筒压降影响的水平井产能分析[J].科技导报,2012,30(35):33-38.  
Xiong Jian, Huang Liang, Cui Ling. Effect of wellbore pressure drop on the horizontal well productivity with non-linear seepage[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(35): 33-38.
- [7] 肖勇,郭建春.低渗透非均质油藏油井压裂裂缝参数优化研究[J].科学技术与工程,2012,12(33):9019-9022.  
Xiao Yong, Guo Jianchun. Optimization of fracturing parameters for low permeability and heterogeneous reservoir oil well[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(33): 9019-9022.
- [8] 才博,丁云宏,卢拥军,等.提高改造体积的新裂缝转向压裂技术及其应用[J].油气地质与采收率,2012,19(5):108-110.  
Cai Bo, Ding Yunhong, Lu Yongjun, et al. Study and application of new in-fissure fracturing technique for improving stimulated reservoir volume [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 108-110.
- [9] 张学文,方宏长,裴悻楠,等.低渗透率油藏压裂水平井产能影响因素[J].石油学报,1999,20(4):51-55.  
Zhang Xuewen, Fang Hongchang, Qiu, et al. A study on factors affecting the performance of hydraulically fractured horizontal well in low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 51-55.

- [10] 宋传真, 郑荣臣. 致密低渗气藏储层应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.  
Song Chuanzhen, Zheng Rongchen. Stress sensitivity of low permeability tight gas reservoir and its effect on single well productivity[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(6): 47-49.
- [11] 郑维师, 刘易非, 何秋轩. 压敏效应对低渗透砂岩气藏产能的影响[J]. 新疆石油地质, 2006, 26(2): 191-193.  
Zheng Weishi, Liu Yifei, He Qiuxuan. Effect of stress sensitivity on productivity of low-permeability sandstone gas pool[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 26(2): 191-193.
- [12] 蒋艳芳, 张烈辉, 刘启国, 等. 应力敏感影响下低渗透气藏水平井产能分析[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 54-56.  
Jiang Yanfang, Zhang Liehui, Liu Qiguo, et al. Productivity analysis of horizontal wells in low-permeability gas reservoirs considering stress sensitivity[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 54-56.
- [13] 廉培庆, 同登科, 程林松, 等. 垂直压裂水平井非稳态条件下的产能分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(4): 98-102.  
Lian Peiqing, Tong Dengke, Cheng Linsong, et al. Analysis of productivity in unsteady state of vertical fractured horizontal well[J]. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33(4): 98-102.
- [14] 岳建伟, 段永刚, 陈伟, 等. 含多条垂直裂缝的压裂气井产能研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(3): 46-48.  
Yue Jianwei, Duan Yonggang, Chen Wei, et al. Study on productivity performances of horizontal fractured gas well with many vertical fractures[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(3): 46-48.
- [15] 熊健, 王小军, 吕雷. 低渗油藏不对称垂直裂缝井产能模型[J]. 科技导报, 2013, 31(22): 40-43.  
Xiong Jian, Wang Xiaojun, Lv Lei. Productivity model for asymmetrical vertical fracture well in low-permeability oil reservoirs[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(22): 40-43.
- [16] 张晓亮, 李娣, 孙君书, 等. 低渗透油藏压裂井产能分析[J]. 科技导报, 2011, 29(19): 58-61.  
Zhang Xiaoliang, Li Di, Sun Junshu, et al. Fractured well productivity of low permeability reservoir[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(19): 58-61.
- [17] 田冷, 常铁龙, 郑荣臣, 等. 低渗油藏垂直裂缝油井产能计算新模型[J]. 科技导报, 2012, 30(28-29): 33-37.  
Tian Leng, Chang Tielong, Zheng Rongchen, et al. A new production calculation model for vertical fractured well in the low permeable reservoir[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(28-29): 33-37.
- [18] 于忠良, 熊伟, 高树生, 等. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 95-98.  
Yu Zhongliang, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. Stress sensitivity of tight reservoir and its influence on oilfield development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 95-98.
- [19] 王新海, 宋岩, 王玮, 等. 塔里木油田砂岩储层压力敏感系数变化规律研究[J]. 钻采工艺, 2008, 31(1): 66-67.  
Wang Xinhai, Songyan, Wangwei, et al. Variation law of coefficient of sensitivity to pressure in sandstone reservoir in tar oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(1): 66-67.
- [20] 赵明跃, 王新海, 雷霆, 等. 储层参数压力敏感性研究[J]. 油气井测试, 2001, 10(4): 3-4.  
Zhao Mingyue, Wang Xinhai, Lei Ting, et al. Study on sensitivity to pressure on reservoir factors[J]. Well Testing, 2001, 10(4): 3-4.

## Productivity model of fractured gas well considering stress sensitivity in low permeability gas reservoirs

HOU Yong<sup>1,2</sup>, TANG Rui<sup>3</sup>

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China
2. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Wuhan 430100, China
3. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200030, China

**Abstract** The low permeability gas reservoir exists stress sensitivity due to the tight pore throat, and the gas well is generally fractured before starting production. It is essential to establish the productivity model of gas well considering stress sensitivity in low permeability gas reservoirs. The cores from Tarim low permeability gas field were adopted for stress sensitivity experiments. The experiment results show that the low permeability cores present strong stress sensitivity. With the decline of permeability, the stress sensitivity coefficient rises, and the stress sensitivity becomes strongly. The seepage area of fractured gas well is divided into two parts: One part is the radial flow around the two ends of fractures; The other part is the linear flow along fractures. Then the gas well productivity model considering stress sensitivity is deduced. The stress sensitivity has a significant impact on the productivity of fractured gas well. The stronger the stress sensitivity of gas reservoirs is, the higher the productivity loss rate is. With the decline of flowing bottom hole pressure, the productivity loss increases due to the stress sensitivity. Fracturing is an effective method for improving the productivity of gas well affected by stress sensitivity in low permeability reservoirs.

**Keywords** low permeability gas reservoir; stress sensitivity; well fracturing; productivity model; productivity loss rate

(责任编辑 刘志远)