

文章编号:1000-582X(2011)04-095-06

应力敏感对致密压裂气井生产的影响

罗瑞兰^{1,2}, 雷 群¹, 范继武³, 廖红梅³, 王 哲³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100086; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007
3. 中国石油长庆油田公司 苏里格研究中心, 陕西 西安 710018)

摘 要:以苏里格气田为例,通过室内实验、气井生产动态分析、气藏数值模拟方法,综合研究了基质和人工压裂裂缝的应力敏感性对致密压裂气井生产造成的影响。研究表明:充填/加砂裂缝具有较强的应力敏感性,气井压裂裂缝的有效缝长和导流能力在生产早期(一年左右)会下降 50% 以上;随着气井配产提高,应力敏感对生产的影响增强,最大能使气井的最终采气量降低 18%,这其中压裂裂缝的应力敏感性起着重要作用。

关键词:应力敏感;致密气藏;压裂气井;苏里格气田

中图分类号:TE311

文献标志码:A

The influence of stress sensitivity on production of hydraulically-fractured tight gas wells

LUO Rui-lan^{1,2}, LEI Qun¹, FAN Ji-wu³, LIAO Hong-mei³, WANG Zhe³

(1. Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Beijing 100086, P. R. China;
2. Langfang Branch, Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Langfang 065007, He bei, P. R. China;
3. Sulige Research Center, Changqing Oil field Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shanxi, P. R. China)

Abstract: This paper takes Sulige Gas Field as a case study and used three methods including laboratory experiments, production performance analysis and reservoir simulation to study the influence of stress sensitivity on production of fractured tight gas wells. The results show that the fracture length and conductivity of hydraulically created fracture are reduced more than 50%, and the stress sensitivity of hydraulically created fracture is stronger than that of matrix. With the increase of gas production, the influence of stress sensitivity becomes stronger, and finally results in 18% reduction of gas production, and hydraulically created fractures play an important role in the influence of stress sensitivity.

Key words: stress sensitivity; tight sandstone gas; fractured gas well; Sulige gas field

致密气藏资源潜力巨大,近十几年来在我国得到了快速开发,在国内天然气工业中占有重要地位。由于储层致密,其自然产能很低。通过人工措施(如

压裂、酸化)改善气井的机械表皮后,致密气井的产能会大大提高,然而这种高产水平并不能持久,随着生产时间增长,人工压裂/酸化裂缝的导流能力会快

收稿日期:2010-11-19

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2008ZX05013-003);中国石油勘探开发研究院青年创新基金资助项目

作者简介:罗瑞兰(1974-),女,高级工程师,博士后,博士,主要从事天然气渗流机理及气藏动态分析,

(Tel)010-69213324;(E-mail)luoruilan222@163.com。

速下降,同时近井地带的地层压力和储层渗透率也会持续下降,由此导致致密压裂气井在生产初期表现出产量和压力随时间快速下降的特点,反映出一定的应力敏感性。

近岩石应力敏感性受到国内学者的普遍关注,成为研究的热点^[1-5]。张琰、崔迎春^[1-2]较早对砂砾性低渗透气藏应力敏感性方法作了研究,提出了低渗透气藏应力敏感性室内评价实验方法以及相应的评价指标;郑荣臣等人^[3]采用 3 种不同的实验方法对低渗致密岩石的应力敏感性进行评价,提出能够反映低渗致密气藏开采过程中储集层应力敏感变化特征的实验评价方法;康毅力^[4]等人考虑岩石组分、裂缝、温度、含水饱和度和施压次数等因素,对大牛地气田致密砂岩应力敏感性进行了评价;肖文联^[5]等人研究了不同围压下渗透率随孔隙流体压力的变化规律。这些研究主要以室内实验为主,大都是以储层基质的变形为着眼点,没有综合考虑人工压裂裂缝的应力敏感效应以及其在气井生产动态中的表现。

文中以我国内陆最大的致密气田苏里格气田为例,通过室内实验、气井生产动态分析、气藏数值模拟方法,综合研究了储层基质和人工压裂裂缝的应力敏感性对致密压裂气井生产造成的影响。

1 室内实验

为了对比储层基质和人工压裂裂缝的应力敏感性,在室内采用 CMS-300 覆压孔渗仪对柱塞岩样(直径为 2.5 cm)进行覆压测试,试验流体为氮气,孔隙压力不超过 1.0 MPa,实验中有效覆压范围为 3.5~60.0 MPa,每块岩样均取 8 个不同覆压点测试渗透率。对岩样分别进行了基质、裂缝不充填与充填的覆压测试实验。

首先对基质岩样进行覆压测试,测试完毕之后,把基质岩样从岩心夹持器取出,对其进行人工造缝。造缝时对岩样沿轴线方向施加集中载荷,产生贯通轴向的裂缝。用聚四氟乙烯胶带包裹造缝后的岩样,将其装在岩心夹持器内施加 30 MPa 的围压,预压 3 h,然后对岩样进行覆压测试。测试完毕之后,将裂缝岩样从夹持器中取出,将取样时得到的岩屑粉末作为充填物对裂缝进行充填,然后用聚四氟乙烯胶带将岩样包裹,装在岩心夹持器内施加 30 MPa 的围压,预压 3 h,再对岩样进行覆压测试。

表 1 列出了岩样的初始渗透率 K_0 值(初始有效覆压为 3.5 MPa),从测试结果可知基质岩样的渗透率较低,人工造缝后岩样渗透率有了大幅度的提高,

用岩屑粉末对裂缝进行填充后,充填裂缝岩样的渗透率与基质岩样的渗透率比较接近,约为基质岩样的 2~3 倍。

表 1 柱塞岩样初始渗透率(K_0)

岩样	基质	裂缝不充填	裂缝充填
X-1	1.290	22.701	2.168
X-2	0.411	26.824	0.857
X-3	0.303	133.170	0.600

为了便于比较,对渗透率作无因次处理(将覆压下的渗透率 K 除以初始渗透率 K_0 ,即得到 K/K_0),作出岩样的覆压关系曲线如图 1~图 3 所示。从图中可看出:1)当初始覆压较低时,不充填裂缝岩样的渗透率应力敏感性最强,其次是充填裂缝岩样,最后是基质岩样;2)有效覆压超过 20 MPa 后,基质与不充填裂缝岩样的渗透率下降幅度趋缓,覆压曲线呈水平状,而充填裂缝岩样则不同,渗透率下降幅度比前两者高,究其原因是在有效覆压增大的过程中,充填物发生了蠕变、破碎等结构性变形,且持续时间较长。由此可以判断在气藏生产过程中,有充填裂缝的储层,其应力敏感性强于基质。

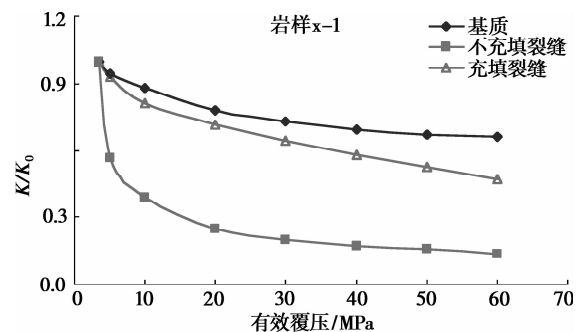


图 1 岩样 X-1 覆压关系曲线

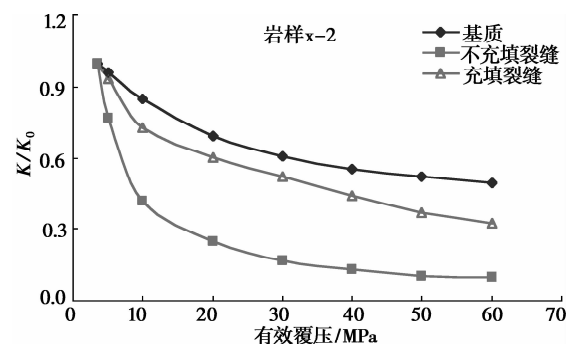


图 2 岩样 X-2 覆压关系曲线

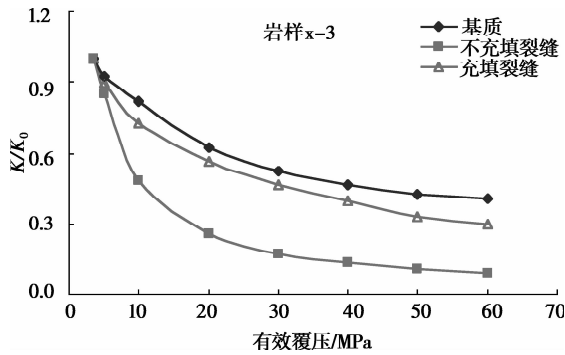


图 3 岩样 X-3 覆压关系曲线

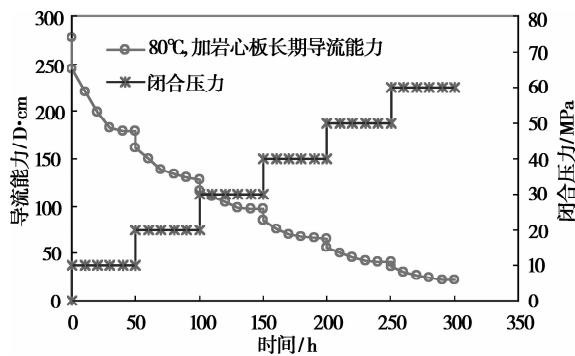


图 4 裂缝长期导流能力随闭合压力和时间变化曲线

在实际的压裂措施中,人工压裂裂缝中加入的是石英砂或陶粒。图 4 是采用 API 导流实验装置测试的中密度陶粒的长期导流能力随闭合压力和时间变化曲线(80 °C 条件下,加岩心板)^[6],从图中可以看出岩板的长期导流能力随时间和闭合压力的增加而大幅度下降,即裂缝的导流能力有很强的时效性和应力敏感性。从国内研究者进行的岩板长期导流能力测试实验可知^[7-9]:随着闭合压力增大,支撑剂在岩石中的嵌入和破碎对支撑剂导流能力的影响很大,这种结构性变形是造成裂缝应力敏感的主要原因。

对于实际气井,压裂裂缝应力敏感程度与铺砂浓度、储层岩性及陶粒规格有密切关系。温庆志、张士诚等人^[7]的研究表明:支撑剂在地层内的嵌入对裂缝导流能力的伤害非常严重,铺砂浓度越小,嵌入对导流能力的伤害程度越大;在相同地层条件下,支撑剂在砾岩中的嵌入最为严重,泥岩其次,粉砂岩最小。卢聪、郭建春等人^[8]在国内首次对支撑剂嵌入后的岩心进行了微观分析,测量了支撑剂的嵌入程度和嵌入状态,实验表明:支撑剂的嵌入会使裂缝宽度有较大幅度的减小,铺砂浓度越低,地层岩石越软,嵌入越严重;支撑剂破碎产生的碎屑会使裂缝的导流能力受到明显损害,碎屑达到一定浓度后会直接堵塞孔道。杨振周、陈勉等人^[9]的研究表明:支撑剂的嵌入和破碎会使裂缝导流能力明显下降,这种影响源于嵌入造成的碎屑进入支撑裂缝并随流体产

生长期的运移和沉积而造成的,随着闭合压力的增加,这种影响会变化更加明显。

2 气井动态分析

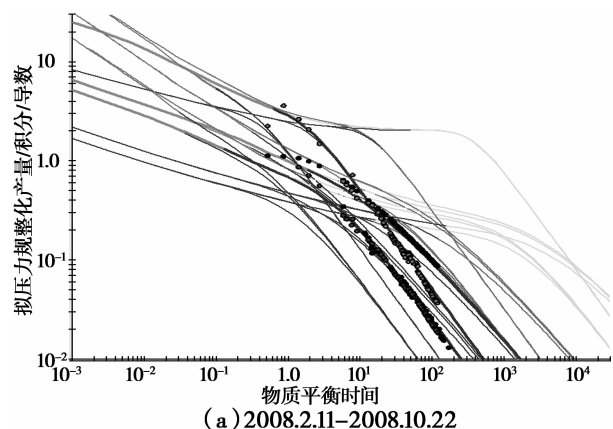
现代气井生产动态分析技术把不稳定试井原理应用到日常生产数据分析中,在传统产量递减分析技术的基础上,通过对压力、产量和时间函数进行相应的变换,建立典型图版,实现了不关井条件下利用日常生产数据对气井的渗流特征、井控储量、泄流面积等进行定量评价的目的^[10-12]。Matter L. 将以上现代生产动态分析理论编制成 FAST. RTA 软件,得到广泛的应用。

采用现代气井动态分析软件 RTA 对苏里格某区块气井不同时间段的生产数据进行分析,分析结果表明:致密压裂气井的压裂裂缝有效缝长在生产中逐渐变短,导流能力下降,而井控动储量和井控范围则逐渐增大。表 2 是采用不稳定流动特征曲线分析方法对苏里格 S-1 井 2 个不同时间段的生产数据进行分析得到的结果(气井在 2008 年 10 月 23 日—2008 年 12 月 23 日保持关井状态),从表中数据可看出压裂裂缝有效缝长在 16 个月内缩短了 60%,导流能力下降了 16 倍,井控半径略有增加,而井控动储量则增加近 50%。气井动态分析的结果与裂缝长期导流能力测试的结果是一致的,表明人工加砂裂缝具有较强的应力敏感性。

表 2 S-1 井动态分析结果

生产时段	2008. 2. 11 -2008. 10. 22	2008. 12. 24 -2009. 6. 25
有效裂缝半长 X_f/m	58.8	24.3
当量井控半径/ m	116.0	122.0
裂缝导流能力/ $mD \cdot m$	140.2	8.3
井控动储量/ $10^6 m^3$	4.92	7.19*

*注:此值等于模型(b)拟合动储量值加上 2008. 12. 24 之前已累计产出的气量。



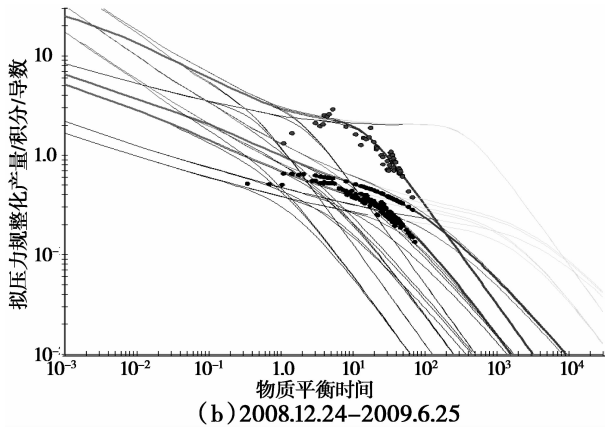


图 5 S-1 井生产动态分析曲线

3 气藏数值模拟

苏里格气田是典型的河流相沉积形成的致密砂岩气田,常常伴有条带形的岩性边界,储层具有强烈的非均质性。根据苏里格气田的非均质储层条件以及井距大小设计了如图 6 所示的非均质气藏单井模型:模型网格划分为 $21 \times 39 \times 1$, 网格步长为 $dx = 30 \text{ m}$, $dy = 30 \text{ m}$, 压裂气井的井点坐标为 (11, 20, 1); 桔红色和浅黄色代表不同的物性区域,其中桔红色代表物性较好的 I 类储层,浅黄色代表物性较差的 II、III 类储层;模型的天然气地质储量是 $8\ 287 \times 10^4 \text{ m}^3$;气井进行了人工压裂,裂缝半长为 105 m。气藏的原始压力为 29.6 MPa,埋深 3 200 m。采用能够考虑非均气藏压裂气井应力敏感效应的数值模拟软件对此模型进行了生产模拟,软件能够综合模拟基质和裂缝的应力敏感效应,或单独模拟基质的应力敏感性效应。

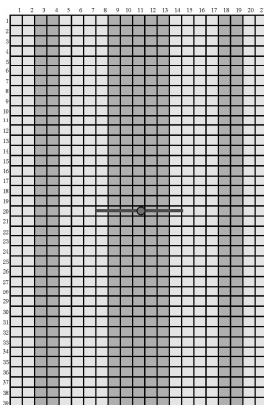


图 6 非均质气藏模型

储层渗透率随有效覆压的变化关系式是根据大量室内实验数据结果优化分析之后得到的^[13-14]:

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma_{\text{eff}0}} \right)^{-S_p} = \left(\frac{p_c - \alpha p}{\sigma_{\text{eff}0}} \right)^{-S_p}, \quad (11)$$

式中, K 为岩石所受有效覆压为 σ_{eff} 时的渗透率, mD ; K_0 为岩石初始渗透率,即岩样在低围压下 ($\sigma_{\text{eff}0} = 3.5 \text{ MPa}$) 测得的渗透率,也可称常规渗透率 mD ; p_c 为储层上覆压力, $p_c = \rho_r g H / 1\ 000$, MPa ; ρ_r 为上覆岩层平均密度,取值 $2.2 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$; H 为上覆岩层厚度,即储层深度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; p 为储层当前孔隙中的流体压力, MPa ; S_p 为应力敏感评价指标。

根据室内对基质岩样进行的覆压实验结果,得到苏里格储层基质的应力敏感评价指标 S_p 的表达式为^[15]

$$S_p = 0.437\ 2 K_0^{-0.4922}. \quad (12)$$

压裂裂缝的导流能力数据采用图 4 中的实验测试结果,在原始储层条件下,裂缝的导流能力为 $45 \text{ D} \cdot \text{cm}$,其应力敏感评价指标 S_p 等于 0.795 2。采用等效导流能力方法计算裂缝所在网格的渗透率。

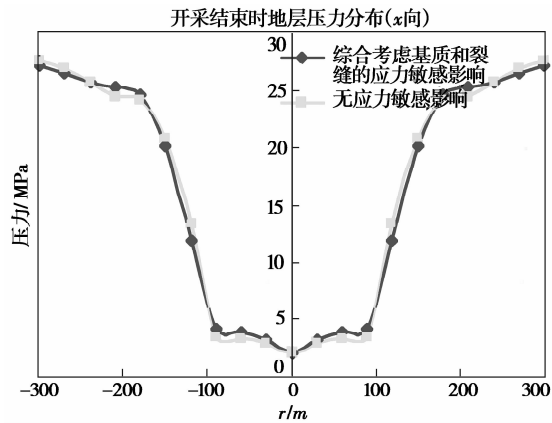
考虑不同配产条件以及有无应力敏感影响,气井连续生产,取废弃井底流压为 2.0 MPa,共模拟计算了 12 个对比方案,表 3 列出了不同方案时气井的最终采气量以及考虑应力敏感后产量的降低幅度。

从表 3 的数据可知:随着配产提高,应力敏感效应将增强,综合考虑基质和裂缝的应力敏感影响时,最大能使气井的最终采气量降低幅度达到 18% 左右,这其中压裂裂缝的应力敏感性起了重要作用。究其原因,是因为随着配产提高,气井生产压差增大,近井地带的压降漏斗加深,导致应力敏感效应增强。

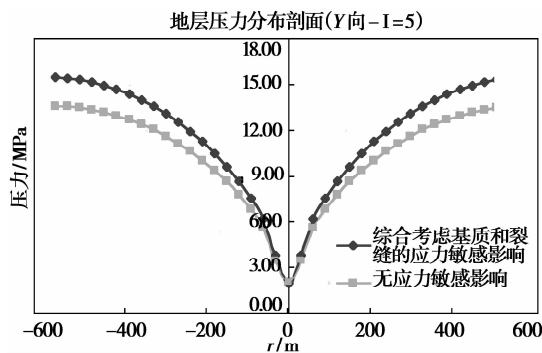
表 3 不同配产方案的最终采气量及产量降低幅度

配产/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	最终采气量/ 10^4 m^3		考虑应力敏感采 气量降低幅度/%		
	无应力 敏感	基质+裂缝 应力敏感	基质应 力敏感	基质+裂缝 应力敏感	
1	3 346	3 156	3 303	5.68	1.29
1.5	2 241	2 004	2 130	10.58	4.95
2	1 552	1 312	1 410	15.46	9.15
2.5	1 140	940	1 030	17.54	9.65

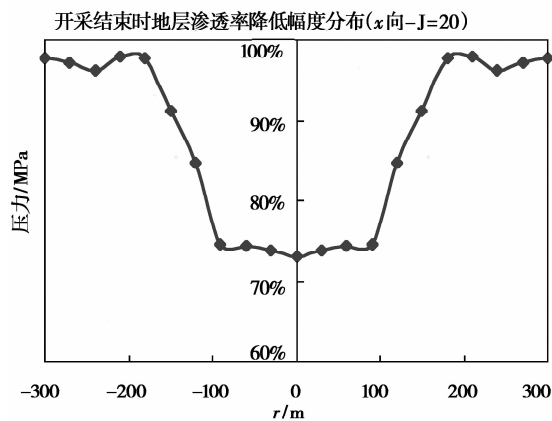
图 7 列出了配产为 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时气井生产结束时不同剖面上的气层压力分布图,图 8 则是配产为 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时生产结束时对应剖面上的渗透率下降幅度分布图,可以看出裂缝区域的渗透率下降幅度明显比其它区域高出很多。



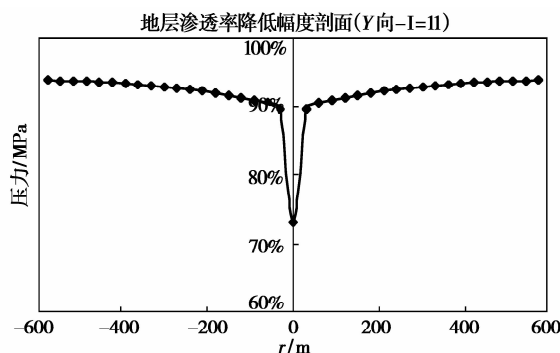
(a) 横轴剖面 I=20



(b) 纵轴剖面 J=11

图7 开采结束时气层压力分布图 ($Q=1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

(a) 横轴剖面 I=20



(b) 纵轴剖面 J=11

图8 开采结束时气层渗透率下降幅度分布图

($Q=1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

4 结论

通过室内实验、气井生产动态分析、气藏数值模拟综合研究了储层基质和人工压裂裂缝的应力敏感性对苏里格致密压裂气井生产造成的影响,结果表明:

1) 充填/加砂裂缝具有较强的应力敏感性,主要是由于充填物/支撑砂在裂缝内发生了蠕变、嵌入、破碎等结构性变形造成的;

2) 在生产动态中,压裂气井的有效裂缝长度和导流能力在生产早期(一年左右)会下降 50% 以上,表现出较强的应力敏感性;

3) 随着气井配产提高,应力敏感效应将增强,最大能使苏里格气井的最终采气量降低 18% 左右,这其中压裂裂缝的应力敏感性起了重要作用。

参考文献:

- [1] 张琰,崔迎春. 砂砾性低渗气层压力敏感性的实验研究[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(6): 1-6.
ZHANG YAN, CUI YING-CHUN. Experimental study on pressure sensitiveness of conglomerated gas reservoir with low permeability [J]. Oil Drilling & Production Engineering, 1999, 21(6): 1-6.
- [2] 张琰,崔迎春. 低渗气藏应力敏感性及其评价方法的研究[J]. 现代地质, 2001, 15(4): 453-456.
ZHANG YAN, CUI YING-CHUN. The stress sensitivity and the evaluating method of low-permeability gas reservoirs [J]. Geoscience, 2001, 15(4): 453-456.
- [3] 郑荣臣,王昔彬,刘传喜. 致密低渗气藏储集层应力敏感性试验[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 345-347.
ZHENG RONG-CHEN, WANG XI-BIN, LIU CHUAN-XI. The stress sensitivity test for dense reservoir rocks in low permeability gas pool [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(3): 345-347.
- [4] 康毅力,张浩,陈一健,等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩气层应力敏感性综合研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3): 335-338.
KANG YI-LI, ZHANG HAO, CHEN YI-JIAN, et al. Comprehensive research of tight sandstones gas reservoirs stress sensitivity in Daniudi gas field [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(3): 335-338.
- [5] 肖文联,李闽,赵金洲,等. 低渗致密砂岩渗透率应力敏感性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 775-779.
XIAO WEN-LIAN, LI MIN, ZHAO JIN-ZHOU, et al. Laboratory study of stress sensitivity to permeability in tight sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 775-779.

(下转第 106 页)

- QIAN QI-HU. The characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(1): 1-4.
- [17] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(2): 26-31.
ZHAO ZHONG-HU, XIE HE-PING. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(2): 26-31.
- [18] 何满潮, 王树仁. 大变形数值方法在软岩工程中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 185-188.
HE MAN-CHAO, WANG SHU-REN. Application of numerical method of large deformation to soft rock engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 185-188.
- [19] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D (Version 2.1) users manual [C]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 2002.
- [20] 贺永年, 韩立军, 邵鹏, 等. 深部巷道稳定的若干岩石力学问题[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 288-295.
HE YONG-NIAN, HAN LI-JUN, SHAO PENG, et al. Some problems of rock mechanics for roadways stability in depth[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35(3): 288-295.
- (编辑 陈移峰)
-
- (上接第99页)
- [6] 管保山, 王欣. 低渗透气藏压裂改造技术研究[R]. 廊坊: 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 2009.
- [7] 温庆志, 张士诚, 王雷, 等. 支撑剂嵌入对裂缝长期导流能力的影响研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 65-68.
WEN QING-ZHI, ZHANG SHI-CHENG, WANG LEI, et al. Influence of proppant embedment on fracture long-term flow conductivity [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 65-68.
- [8] 卢聪, 郭建春, 王文耀, 等. 支撑剂嵌入及对裂缝导流能力损害的实验[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 99-101.
LU CONG, GUO JIAN-CHUN, WANG WEN-YAO, et al. Experimental research on proppant embedment and its damage to fractures conductivity [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 99-101.
- [9] 杨振周, 陈勉, 胥云, 等. 火山岩岩板长期导流能力试验[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 42-44.
YANG ZHEN-ZHOU, CHEN MIAN, XU YUN, et al. An experimental study of long-term conductivity of volcanic rock core plate[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 42-44.
- [10] BLASINGAME T, JOHNSTON J, LEE W. Type-curve analysis using the pressure integral method [C]//SPE California Regional Meeting, April 5-7, 1989, Bakersfield, California, United States; Society of Petroleum Engineers, Inc, 1998.
- [11] AGARWAL R, GARDNER D, KLEINSTEIBER S. Analyzing well production data using combined-type curve and decline-curve concepts [C]// the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 27-30, 1998, New Orleans, United States; Society of Petroleum Engineers, Inc, 1999.
- [12] MATTER L, ANDERSON D. A systematic and comprehensive methodology for advanced analysis of production data [C]//the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 5-8, 2003, Denver, Colorado, United States; Society of Petroleum Engineers, Inc, 2003.
- [13] 罗瑞兰. 深层气藏变形介质渗流机理及气藏工程应用研究[D]. 北京: 中国石油大学博士学位论文, 2006.
- [14] 罗瑞兰, 程林松, 彭建春, 等. 确定低渗岩心渗透率随有效覆压变化关系的新方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 87-90.
LUO RUI-LAN, CHENG LIN-SONG, PENG JIAN-CHUN, et al. A new method of determining relationship between permeability and effective overburden pressure for low-permeability reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(2): 87-90.
- [15] 罗瑞兰, 朱华银, 万玉金, 等. 岩石应力敏感对苏里格气井产能的影响[J]. 天然气技术, 2008, 2(6): 19-22.
LUO RUI-LAN, ZHU HUA-YIN WAN YU-JIN et al. The effect of rock stress sensitivity on well deliverability in Sulige gas field [J]. Natural Gas Technology, 2008, 2(6): 19-22.
- (编辑 陈移峰)