

文章编号:0253-9985(2012)04-0640-06

# 基于 ANSYS 软件的降低破裂压力机理模拟

苏建政,黄志文,龙秋莲,刘长印

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:**针对深井压裂施工时各种降低破裂压裂方法的技术特点,基于 ANSYS 有限元软件,建立了裸眼完井和套管射孔完井两种应力计算模型,对压裂施工中井筒附近岩石应力变化进行了模拟计算,分析了不同深度的储层、不同岩石物性的储层及深穿透射孔和酸化预处理对储层的破裂压力的影响。结果表明,储层岩石力学性质中杨氏模量对破裂压力的影响较大,表现为随杨氏模量的增加,岩石破裂压力增加,而岩石的泊松比变化对破裂压力影响较小;酸化预处理可以降低岩石的杨氏模量;射孔深度不同,对降低破裂压力的作用随孔深的增加而减弱。在应用中应该根据情况选择优化孔眼长度。

**关键词:**ANSYS 软件;应力;水力压裂;破裂压力;压裂开采

**中图分类号:**TE357 **文献标识码:**A

## ANSYS-based simulation of fracturing pressure reducing mechanism

Su Jianzheng, Huang Zhiwen, Long Qiulian and Liu Changyin

(SINOPEC Exploration &amp; Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to characteristics of various fracturing pressure reducing techniques for fracturing operation in deep wells, this paper established stress calculation models for open hole completion and casing-perforated completion using the ANSYS software, and calculated the rock stress near the wellbore during fracturing. We also analyzed the effects of various factors on fracturing pressure, such as reservoir burial depth, reservoir rock physical property, deep penetration perforation and acidification pretreatment. The results show that the Yang's modulus of reservoir rock has great influence on the fracturing pressure. Fracturing pressure of rocks increases with the increasing Yang's modulus. In contrast, Poisson's ratio has less influence on the fracturing pressure. Acidification pretreatment may reduce the Yang's modulus. The effect of perforating depth on reducing fracturing pressure decreases as the perforating depth increases. In field operation, the perforating depth needs to be optimized based on the well condition.

**Key words:** ANSYS, stress, hydraulic fracture, fracturing pressure, fracturing production

随着油气勘探技术的进步,发现的超深特低渗储层越来越多<sup>[1]</sup>。压裂是低渗透储层最具进攻性的增产措施<sup>[2-3]</sup>,然而超深井压裂改造的成功率和有效率低,压裂改造技术已成为制约超深致密储层能否有效开采的瓶颈技术<sup>[4-6]</sup>。无论是酸化压裂还是水力加砂压裂,能否压开地层是压裂施工的关键,井越深,地层破裂压力越高,施工难度越大。目前,在现有地面施工设备能力下,降低破裂压力的方法主要有酸化预处理技术、优化射孔

参数、高能气体燃爆压裂等压前处理措施来降低地层本身的破裂压力<sup>[7-9]</sup>。

破裂压力与多种因素有关系<sup>[10]</sup>,但最主要的是地应力的大小及分布、杨氏模量和泊松比、有无射孔及射孔参数等因素。而深井储层改造难度大的根本原因就是由于储层深而导致的地应力高、岩石的杨氏模量和泊松比偏高,射孔施工难度大,降低了有效射孔深度,这些因素必然导致地层破裂压力高,压开地层的难度加大。

收稿日期:2012-01-10;修订日期:2012-07-09。

第一作者简介:苏建政(1968—),男,教授级高级工程师,压裂、采油工艺。

深井的储层改造施工过程是一个冲击动力学问题<sup>[11]</sup>,由于岩石的动态本构关系、泵入压裂液流体与岩石的耦合作用等诸多复杂关系的迭加,使得地层破岩机理十分复杂,目前地面无法实现物理模拟。随着计算机技术的发展,运用数值计算方法,基于较少假设来模拟实际物理过程是探索复杂事物运动变化规律的一个重要途径。本文利用有限元法,基于 ANSYS11.0 软件对深井储层改造破裂过程中井筒附近岩石内部应力的分布规律,地层应力分布、岩石物性、射孔参数等对破裂压力的影响进行数值模拟,以进一步探索深井储层改造的破裂机理。

## 1 模型建立及网格划分

ANSYS 软件是集结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件,已广泛应用于机械、能源、军工、水利、航空航天等许多领域<sup>[12]</sup>。该软件不断吸取新的计算方法和计算技术,随着交互方式的加入,简化了模型的生成和结果的评价。ANSYS 软件分析计算过程包括建立模型、施加载荷、求解计算和数据后处理。

### 1.1 基本物理模型及参数基准

为了克服理论分析的局限性,考虑复杂的边界条件,本文针对射孔井筒地层建立线弹性二维有限元模型,铅直井眼。对于裸眼井不存在套管和水泥环的影响,问题的边界条件相对简单;射孔井筒铅直,且射孔孔眼垂直于井筒轴线,由于求解

过程中必然要涉及套管、水泥环和地层岩石胶结状态的变化,由此引起的非线性问题大大增加了求解的难度,为了便于研究问题和从机理上讨论问题,本文以两个假设条件为基本进行模拟,其一是忽略套管和水泥环的影响,在研究的层段上,井筒和射孔内表面上作用着相同的液体压力;其二是认为套管是绝对刚性的,只在射孔内表面上作用着液体压力。

本文主要针对深井的压裂井进行分析,井深大于 800 m 的井压裂所形成的裂缝必然是垂直裂缝,而影响垂直裂缝起裂的原因是水平方向的地应力大小和储层岩石力学性质。因此,研究中可以不考虑垂向应力的影响,而只建立平面分析模型即可。

以准噶尔盆地中部Ⅲ区块某井白垩系 5 873.40~5 888.10 m 井段和 6 085.5~6 096.0 m 井段的数据为基准值来进行模拟分析。根据 5 873.40~5 888.10 m 井段的最小水平主应力为 97.27 MPa,最大水平主应力为 120.63 MPa,弹性模量为  $3.027 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.213。对于该井 6 085.5~6 096.0 m 井段,最小水平主应力为 88.90 MPa,最大水平主应力为 113.86 MPa,弹性模量为  $4.03 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.193。

### 1.2 计算模型建立及网格化

建立有限元计算模型时,为了便于计算及结果显示,根据建模的对称平面原理,可以只对 1/4 的局部建立模型,采用 ANSYS 软件的自动网格划分功能,对于裸眼井和射孔井分别得到的有限元计算模型(图 1)。

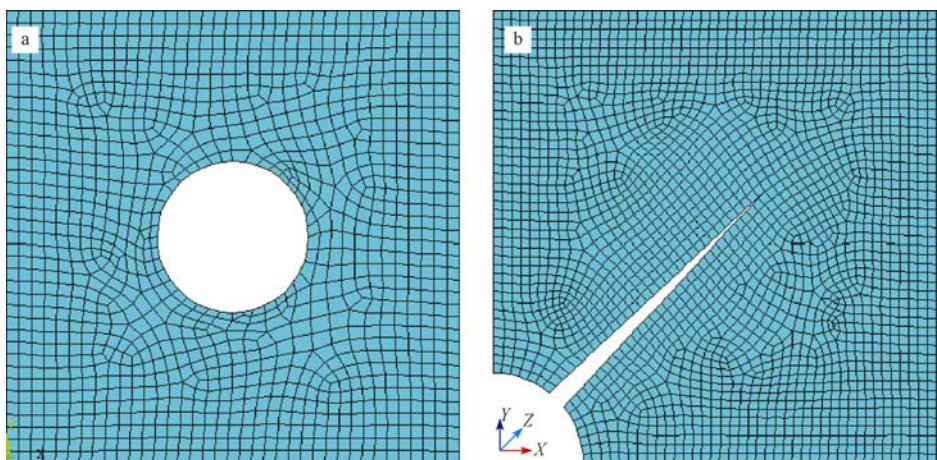


图 1 裸眼井(a)和射孔井(b)1/4 模型建立及网格划分

Fig. 1 A quarter modeling and gridding of open hole(a) and perforated(b) completion

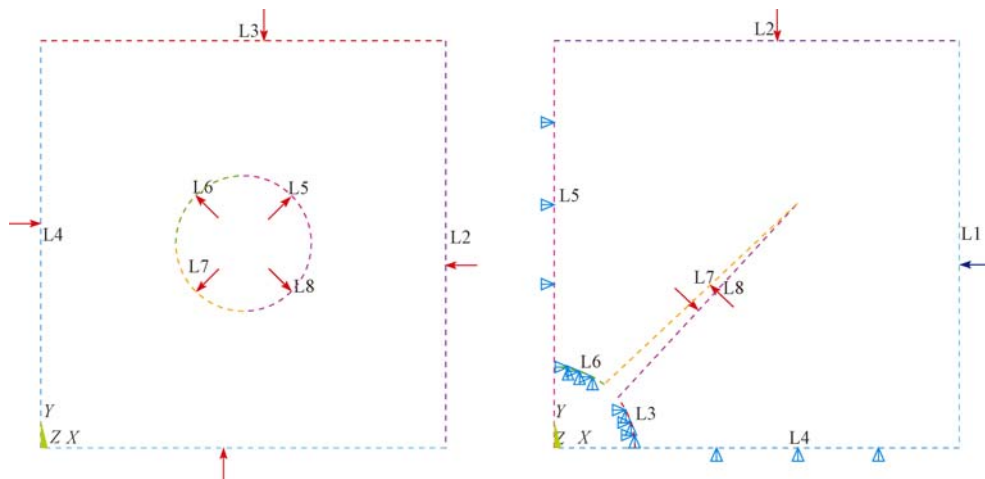


图2 裸眼井(a)和射孔井(b)1/4模型载荷及边界条件

Fig. 2 Load and boundary conditions of quarter models for open hole(a) and perforated(b) completion

确定准确合理的研究范围,是建立应力计算模型的重要原则之一。若计算范围取得较大,虽然可以提高计算精度,但同时会大幅度增加计算工作量。根据弹性力学相关知识和射孔孔眼几何参数共同确定计算边界,尽量使其应力大小能够更快地趋于平稳。对于选定的地层计算区域,按孔眼相位角为 $45^\circ$ 建模,并进行简化处理,取整体结构的1/4作为计算模型。采用的结构分析软件能根据有限元网格划分原则,自动生成的有限元网格进行计算。

### 1.3 载荷及边界条件

在进行结构有限元分析时,为了使数值解确定唯一,必须进行边界条件的约束处理,消除实体结构由于受外力作用而产生的刚体位移。因此,应该对结构施加足够合理的约束,以消除刚体位移。计算模型平面不允许有刚体位移,即在该面上结点的 $\delta_z = 0$ ,同时也在 $X$ 和 $Y$ 方向的某些特殊点施加了位移约束。而载荷的添加则根据裸眼完井和射孔完井的不同分别加以不同受力局部的载荷(图2),需要说明的一点是在射孔完井的模型中,认为套管是刚性的,尽管受力但不存在位移。

### 1.4 岩石破坏准则

岩石破坏准则是衡量有效主应力间的极限关系<sup>[13]</sup>。超过该极限值,就出现不稳定或破坏。水力压裂中用得最广泛的准则是最大张应力准则,认为一旦最小主应力达到物体的抗张强度 $\sigma_t$ 就

会破坏。

根据假设建立有限元模型,在井筒内壁和射孔内壁施加一组变化的内压值,其他载荷和边界条件保持不变。根据岩石的最大拉应力准则判断地层是否发生破裂,即某点的拉应力超过岩石的抗拉强度时,发生破裂。

## 2 不同影响因素下的模拟结果

在本文所建立的不同模型的基础上,分别对不同深度的储层、不同岩石物性的储层及深穿透射孔和酸化预处理对储层的破裂压力的影响进行了大量的模拟工作。

### 2.1 储层深度对破裂压力的影响

储层深度对破裂压力的影响主要反映在垂向应力与水平应力的大小上,岩石破裂压力大小根本是由平面最小主应力的大小所决定。为此,利用文中所建立的模型,对裸眼井在压裂时井筒周围的应力分布与平面应力分布的关系做了模拟(图3)。

从各个应力分布的模拟结果图可以看出,随着水平应力的增加,井筒局部应力分布的范围在不断缩小,从而将导致裂缝起裂的难度加大。

### 2.2 酸化预处理对破裂压力的影响

由于地层破裂压力受地应力及岩石性质的控

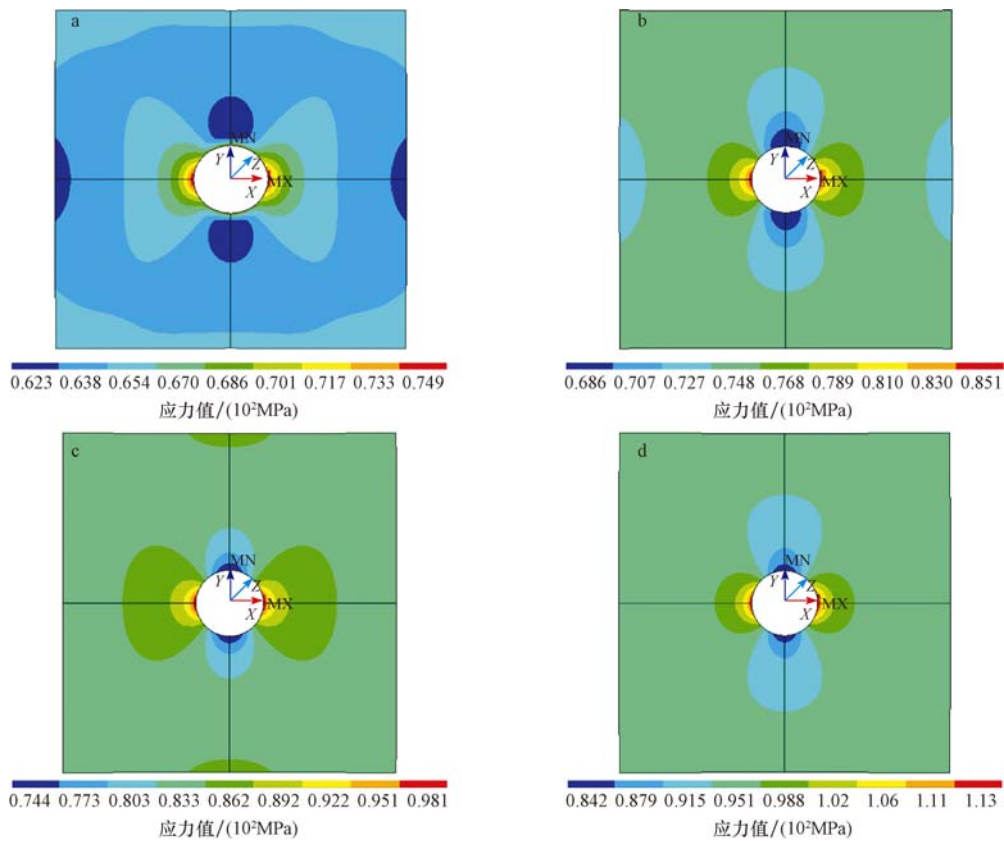


图3 裸眼井(a)和射孔井(b)1/4 模拟结果

Fig. 3 Results of quarter simulation of open hole(a) and perforated(b) completion

a. 水平应力为 60,70 MPa; b. 水平应力为 70,80 MPa;c. 水平应力为 80,90MPa; d. 水平应力为 90,100 MPa (各图中井筒压力均为 80 MPa。)

制,可以通过酸化预处理的方法降低地层本身的破裂压力。室内实验结果表明<sup>[14]</sup>,酸化预处理能够降低岩石的杨氏模量和泊松比,图4和图5给出了注酸前后杨氏模量和泊松比的变化对比。

为此,本文利用所建立的有限元模型,在地应力和井筒中的压力不变的情况下,在最小水平主应力为 88.90 MPa,最大水平主应力为 113.86 MPa 的应力条件下,分别以该井岩心实验测试的

弹性模量  $2.78 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,泊松比为 0.26 为基准值,对不同杨氏模量、泊松比对破裂压力的影响进行了分析(图6)。

从模拟分析结果可以得到,储层岩石力学性质中杨氏模量对破裂压力的影响较大,表现为随岩石杨氏模量的增加,破裂压力越高;而岩石的泊松比对破裂压力变化影响很小。

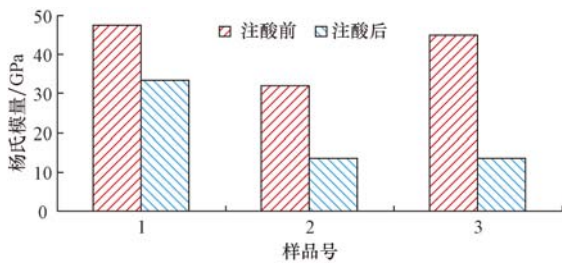


图4 注酸前、后杨氏模量变化对比

Fig. 4 Changes of Yang's modulus before and after acidification

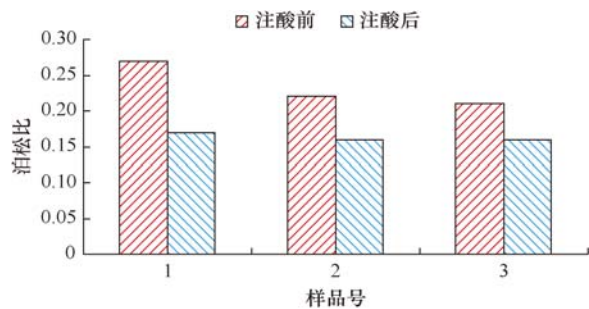


图5 注酸前、后泊松比变化对比

Fig. 5 Changes of Poisson's ratios before and after acidification

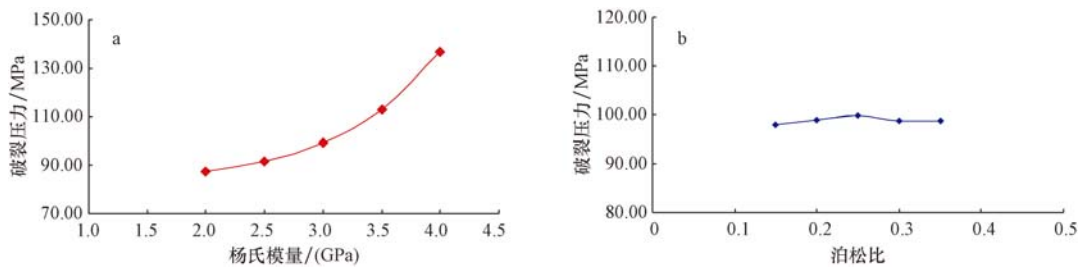


图 6 不同杨氏模量(a)和不同泊松比(b)对裸眼井模型破裂压力的影响

Fig. 6 Effects of different Yang's modulus(a) and Poisson's ratios(b) on fracturing pressure of open hole completion

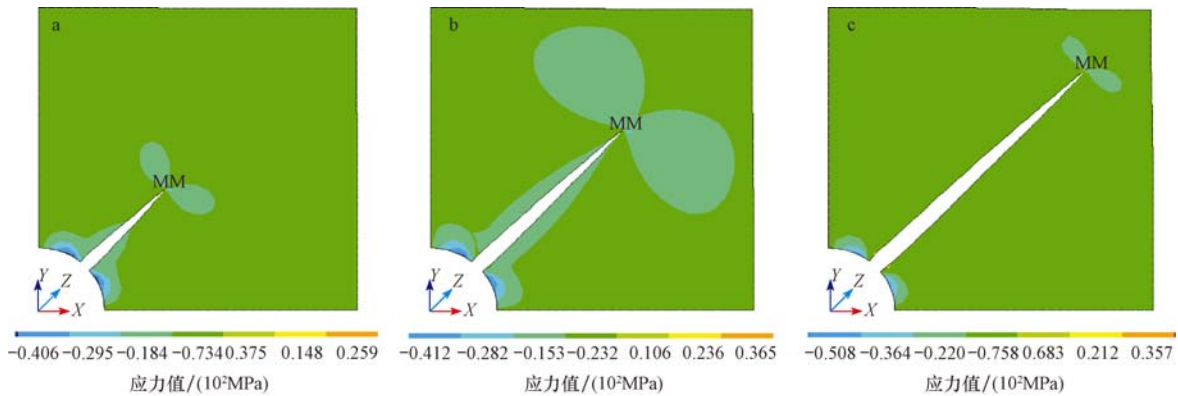


图 7 不同射孔深度对射孔完井模型应力分布的影响

Fig. 7 Effects of different perforating depth on fracturing pressure of perforated completion

a. 射孔长度为 0.5 m; b. 射孔长度为 1 m; c. 射孔长度为 1.5 m

### 2.3 深穿透射孔对破裂压力的影响

深穿透射孔一直被现场施工人员认为是解决压不开问题的一个较为有效的方法<sup>[15-16]</sup>。本文在地应力分布和井筒中压力不变的前提下,模拟了不同射孔深度对起裂处应力的影响,如图 7 中 3 种不同长度孔眼的模拟结果。

根据模拟结果,当井筒中压力为 80 MPa,地层最大主应力 70 MPa 时,当孔眼长度为 0.5 m 时,孔眼末端能形成的起裂应力值为 48.1 MPa;当孔眼长度为 1 m 时,孔眼末端能形成的起裂应力值为 62.4 MPa;当孔眼长度为 1.5 m 时,孔眼末端能形成的起裂应力值为 64.5 MPa。随着射孔孔眼长度的增加,孔眼末端能形成的起裂应力值越高,但孔眼深度超过 1 m 后起裂应力值的增幅并不明显,因此在实际应用中应该根据实际情况选择优化孔眼长度。

## 3 结论

本文将针对储层改造施工过程中裸眼完井和

射孔完井两种情况,应用 ANSYS11.0 有限元软件,建立了平面井筒起裂的应力场分析模型,结合现场实际数据对压裂施工破裂压力的影响因素和目前的降破压方法进行了模拟,为研究压裂施工压力提供了一种新的科学合理的研究方法。该方法的建模思路也可用于裂缝延伸规律的研究。

1) 储层岩石力学性质中杨氏模量对破裂压力的影响较大,表现为随杨氏模量的增加,岩石破裂压力增加,而岩石的泊松比变化对破裂压力影响较小。

2) 酸化预处理可以降低岩石的杨氏模量,射孔深度不同对降低破裂压力的作用效果随孔深的增加而减弱。

### 参 考 文 献

- [1] 郑和荣,尹伟,胡宗全,等. 中国中西部碎屑岩领域油气富集主控因素与勘探方向[J]. 石油与天然气地质,2010,31(6):753-762.

Zheng Herong, Yin Wei, Hu Zongquan, et al. Main controlling factors for hydrocarbon accumulation and potential exploration targets in clastic sequences in western, central China[J]. Oil &

- Gas Geology, 2010, 31(6): 753 - 762.
- [2] 李宗田, 李凤霞, 黄志文. 水力压裂在油气田勘探开发中的关键作用[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 76 - 81.  
Li Zongtian, Li Fengxia, Huang Zhiwen. Key role of hydraulic fracturing in oil-gas field exploration and development[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5): 76 - 81.
- [3] 李宗田. 水平井压裂技术现状与展望[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(6): 13 - 18.  
Li Zongtian. Prospect of horizontal well fracturing technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(6): 13 - 18.
- [4] 张永贵, 刘振峰. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩气藏储层建模[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 560 - 567.  
Zhang Yonggui, Liu Zhenfeng. Reservoir modeling of tight gas sands in the Upper Palaeozoic of the northern Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 560 - 567.
- [5] 姜辉. 浊流沉积的动力学机制与响应[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 428 - 435.  
Jiang Hui. Dynamical mechanism and depositional responses of turbidity current sedimentation [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 428 - 435.
- [6] 马国刚, 袁静. 济阳拗陷古近系深层自生矿物及其与孔隙发育的关系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 656 - 663, 670.  
Ma Guogang, Yuan Jing. Relationship between authigenic minerals and porosity in the deep Paleogene formations of the Jiyang depression[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 656 - 663, 670.
- [7] 李勇明, 郭建春, 赵金洲. 超深特低渗储层压裂改造技术关键与对策研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(2): 56 - 58.  
Li Yongming, Guo Jianchun, Zhao Jinzhou. Key and counter measure of fracturing technique in ultradeep and low permeability reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(2): 56 - 58.
- [8] 刘一江, 李相方. 深层低渗储层压裂工艺优化技术[J]. 天然气工业, 2005, 25(8): 94 - 96.  
Liu Yijiang, Li Xiangfang. Optimization of fracturing techniques for deep reservoirs with low permeability [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(8): 94 - 96.
- [9] 张广清, 陈勉, 殷有泉, 等. 射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 40 - 44.  
Zhang Guangqing, Chen Mian, Yin Youquan, et al. Study on influence of perforation on formation fracturing pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 40 - 44.
- [10] 任山, 蒲春生, 慈建发, 等. 深层致密气藏异常高破裂压力储层复合改造新工艺[J]. 钻采工艺, 2011, 34(3): 41 - 45.  
Ren Shan, Pu Chunsheng, Ci Jianfa, et al. New compound stimulation technology of deep tight gas reservoir with abnormal high fracture pressure [J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(3): 41 - 45.
- [11] 苏建政. 碳酸盐岩非均质性对水力裂缝起裂影响的有限元法研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(4): 63 - 66.  
Su Jianzheng. Studying the effect of carbonate heterogeneity on hydraulic fracture initiation by using finite element method [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(4): 63 - 66.
- [12] 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 27 - 50.  
Deng Fanping. ANSYS10.0 finite element analysis Self-study manual [M]. Posts & Telecom Press, 2009.
- [13] 谢润成, 韩振林, 周文, 等. 深层致密砂岩气藏高异常破裂压力影响因素分析[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(5): 60 - 65.  
Xie Runcheng, Han Zhenlin, Zhou Wen, et al. Analysis on factors inducing abnormal high fracture pressure of deep tight sandstone gas reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(5): 60 - 65.
- [14] 邓燕, 薛仁江, 郭建春. 低渗透储层酸预处理降低破裂压力机理[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 125 - 129.  
Deng Yan, Xuerenjiang, Guo Jianchun. The mechanism of high-pressure high-temperature and low permeability acid pre-treatment to reduce fracturing pressure [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(3): 125 - 129.
- [15] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 707 - 714.  
Cai Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone; an example from gas exploration in the Xujiache Formation of the western Sichuan Depression, the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707 - 714.
- [16] 程百利. 腰英台油田压裂改造工艺技术研究[J]. 断块油气田, 2011, 18(1): 123 - 125.  
Cheng Baili. Study on fracturing technology in Yaoyingtai Oil-field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 123 - 125.

(编辑 高岩)