

## 地应力对爆炸压裂影响规律的数值模拟研究

徐 鹏<sup>1,2</sup>, 刘新云<sup>1</sup>, 石李保<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘 要:**为了揭示地应力场对井内爆炸压裂作用下裂缝形成及分布的影响规律,进行了井内爆炸压裂室内模拟试验。基于弹塑性损伤理论建立了井内爆炸压裂数值计算模型,在借助试验结果验证模型准确性的基础上,研究探讨了地应力场对爆炸压裂作用下裂缝扩展规律的影响。研究表明:试验条件下,炮眼内炸药爆炸后并未对炮眼造成粉碎性破坏,且裂缝沿曲线扩展;爆炸压裂作用下井壁围岩中将产生长而宽的主裂缝和短而细的次裂缝;主裂缝扩展方向受地应力场控制,垂直于最小水平地应力方向;不同地应力场条件下,裂缝扩展范围及密度亦随之发生改变。研究表明,准确把握地应力大小及方位,有利于控制主裂缝的扩展及分布形态。

**关键词:**低渗透油气藏 爆炸压裂 地应力 压裂裂缝 数值模拟

**中图分类号:**TE357.1<sup>+</sup>4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)06-0065-05

## Numerical Simulation for the Effect of Ground Stress on Explosive Fracturing

Xu Peng<sup>1,2</sup>, Liu Xinyun<sup>1</sup>, Shi Libao<sup>1</sup>

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083, China;  
2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266580, China)

**Abstract:** In order to reveal the influence of ground stress on the fracture and propagation during explosive fracturing, the lab experiment of explosive fracturing was carried out, and the fracturing numerical model established based on elastic-plastic-damage theory. By means of the testing result and its accuracy verification of the numerical model, the influence of ground stress on fracture and distribution in explosive fracturing was studied. The study results show that the explosive did not crush the surrounding rock of the borehole, and cracks created and extended in curved forms; the primary long and wide cracks and secondary short and narrow cracks are formed by explosive fracturing in surrounding rocks of borehole, the propagation of primary cracks, which are perpendicular to the minimum horizontal in-situ stress direction, is controlled by ground stress; the length and quantity of cracks also vary with different ground stress. Consequently, learning about the magnitude and direction of the ground stress is helpful for the control of propagation and distribution of the primary cracks in explosive fracturing.

**Key words:** low permeability reservoir; explosive fracturing; ground stress; fracturing fracture; numerical simulation

在我国已探明原油地质储量中,低渗透油气储量占 50%,已成为我国石油工业稳定发展的重要资源<sup>[1-3]</sup>,如何合理、高效地对其进行开发,是当前亟待解决的问题。爆炸压裂技术是通过井眼内炸药爆炸产生的能量对井壁围岩造缝,达到改善低渗储层物性、提高油气采收率的目的。与水力压裂、酸化压裂等常规增产措施相比,具有施工工艺简单、无需大型压裂设备、不与地层发生化学反应产生二次沉淀和

**收稿日期:**2012-05-02; **改回日期:**2012-10-08。

**作者简介:**徐鹏(1982—),男,山东淄博人,2005 年毕业于潍坊学院计算机科学技术专业,2011 年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位,工程师,主要从事油气井岩石力学方面的研究工作。

**联系方式:**(010)83593088, xupg1982@163.com。

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“低渗透丰度油气田井内动载压裂开采新技术”(编号:2007AA06Z208)部分研究内容。

成本低等优势。20世纪50年代以来,由于爆炸压裂技术具有不安全性,该技术的发展几近停滞,截至目前,对该技术的研究只停留在理论机理及室内试验研究阶段<sup>[4-9]</sup>,有诸多问题需进一步研究。例如,对爆炸压裂作用下裂缝扩展方向是否受地应力控制这一问题的研究,目前就不够明确<sup>[9-15]</sup>。针对上述问题,笔者开展了室内爆炸压裂物理模拟试验,实地观察了爆炸压裂后试样中裂缝的产生及扩展情况,结合弹塑性损伤理论建立了井内爆炸压裂数值计算模型,并根据物理试验结果对该模型计算精度进行了验证,在此基础上,研究分析了地应力场对爆炸压裂作用下裂缝产生及扩展的影响规律。

## 1 室内爆炸压裂物理模拟试验

进行室内爆炸压裂物理模拟试验时,为了保证试验结果具备可比性,采用由相同标号水泥、经同一养护周期得到的水泥试样。为了便于验证期数值计算模型,在圆柱体水泥试样内部埋放了压力传感器,以记录真实的爆炸压力数据。传感器埋放位置如图1所示。为了使模拟试验更贴近井下真实情况,试验时将横截面直径1.6 cm、长40 cm的导爆索置于试样预留的炮眼内。

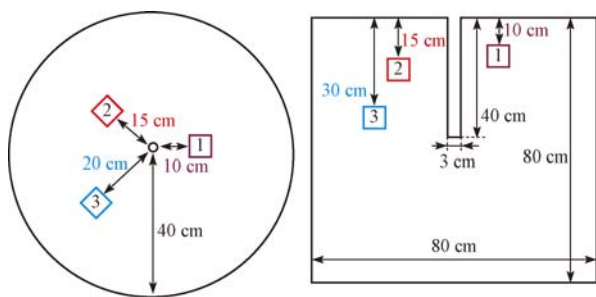


图1 传感器埋放位置示意

Fig. 1 Position of pressure transducers

完成准备工作后,分别进行了不同药量条件下的室内爆炸压裂模拟试验,试验结果如下:

1) 10 g 炸药。试样整体破坏明显,出现了明显的、径向贯穿整块试样的宏观裂缝,且裂缝并非沿直线扩展(弯曲、分叉),裂缝扩展长度达到了40 cm以上;除宏观裂缝外,在炮孔附近区域还出现了多条短而细的裂缝,长度都小于10 cm。为了区分同时存在的长而宽的宏观裂缝和短而细的宏观裂缝,定义前者为主裂缝,后者为次裂缝。

2) 15 g 炸药。试样表面同样出现扩展至试样边缘的主裂缝,并在炮眼附近区域出现数条次裂缝。

与10 g 炸药量下的爆炸情况相比,增大药量后裂缝缝宽明显增大。

由以上试验可知,炮眼并没有发生粉碎性破坏,只要控制好炸药量和装药方式,爆炸压裂不会破坏井眼,更不会对井壁的稳定性造成威胁。因此,爆炸压裂作为一种潜在的低渗油气藏改造技术,具有重要的研究价值。

## 2 井内爆炸压裂数值模型

针对不同地应力场下的裂缝扩展问题,借助弹塑性损伤理论,采用损伤因子对其进行表征。损伤是指在单调加载或重复加载下材料逐渐破坏、宏观力学行为逐渐劣化的现象,损伤因子是用于定量描述材料破坏程度的一个重要指标。损伤力学理论规定<sup>[16]</sup>:当材料均匀、连续且不存在微缺陷时,损伤因子等于0;当材料内部损伤发展到极限状态(断裂破坏)时,认为损伤因子等于1;而损伤因子大于0且小于1时,表示材料内部出现了不同程度的损伤。

### 2.1 数值计算模型

井壁围岩损伤力学模型应该能够反映地下岩石在高应变、高应变率与高压下的动态力学性能,能够累积损伤并能反映损伤对材料性能的影响,其本构关系表达式为:

$$\sigma^* = a(p^* + t^*)^n(1 + \ln \epsilon) - D[a(p^* + t^*)^n(1 + \ln \epsilon) - bp^*{}^m(1 + \ln \epsilon)] \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad D = \sum \Delta \epsilon^p / \epsilon_t^p \quad (2)$$

$$\epsilon_t^p = d_1(p^* + t^*)^{d_2} \quad (3)$$

式中:  $D$  为爆炸冲击载荷下的围岩累积损伤;  $\epsilon_t^p$  为围岩破裂时的塑性应变;  $\epsilon$  为围岩塑性应变率;  $\sigma^*$  为等效应力;  $p^*$ ,  $t^*$  分别为爆炸等效压力和等效最大拉伸静水压力;  $\Delta \epsilon^p$  为每个循环计算得到的塑性应变增量;  $a, b, c, d_1, d_2, m$  和  $n$  为与围岩自身性质有关的材料因数。

关于炸药爆炸时快速化学反应过程的描述,选用工程计算常用的 CJ 模型,具体表达式为:

$$p = Fp_{\text{EOS}}(V, E) \quad (4)$$

$$p_{\text{EOS}}(V, E) = A \left[ 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[ 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (5)$$

式中:  $p$  为炸药爆炸产生的压力, MPa;  $F$  为炸药燃

爆因数,当计算得到的  $F$  大于 1 时,将  $F$  值定为 1,即保证  $0 \leq F \leq 1$ ;  $p_{\text{EOS}}$  为炸药完全爆炸时的压力,MPa;  $V$  为相对比容;  $E$  为初始体积内能, J;  $A, B, R_1, R_2$  和  $\omega$  为通过实验测得的炸药参数。

对于井筒内介于炸药和井壁围岩之间的钻井液,采用以下状态方程来对其进行描述。

压缩时:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (6)$$

膨胀时:

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (8)$$

式中:  $\rho, \rho_0$  分别为当前钻井液密度和常温下的钻井液密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $C$  为声速,  $\text{m/s}$ ;  $S_1, S_2, S_3, \gamma_0$  和  $\alpha$  为 Gruneisen 因数。

## 2.2 模型求解

模型求解前,首先需要对整个计算模型进行有限元离散,然后根据质量守恒、动量守恒、能量守恒等基本控制方程以及边界条件,再结合上述材料状态方程,采用任意拉格朗日-欧拉算法即可实现对数值计算模型的求解。

## 2.3 模型验证

以 15 g 炸药为例,对该条件下实测爆炸压力数据和数值计算数据进行对比,结果如图 2 所示。

由图 2 中 3 个不同位置处的传感器实测数据与数值计算结果对比可知,虽然模拟数据与实测数据存在一定误差,但误差较小,可以认为该数值计算模型具备一定精度及可靠性。

## 3 地应力场影响规律

数值模型计算数据与试验数据对比表明,数值计算模型具备一定的准确度。因此,可以借助该数值模型对地应力场影响规律(主要是对裂缝扩展范围和裂缝密度)进行研究。

1) 裂缝扩展范围确定方法。根据损伤力学对损伤因子的规定,数值模拟结果中损伤因子达到 1 的区域即可认为是裂缝区,那么对损伤因子为 1 的

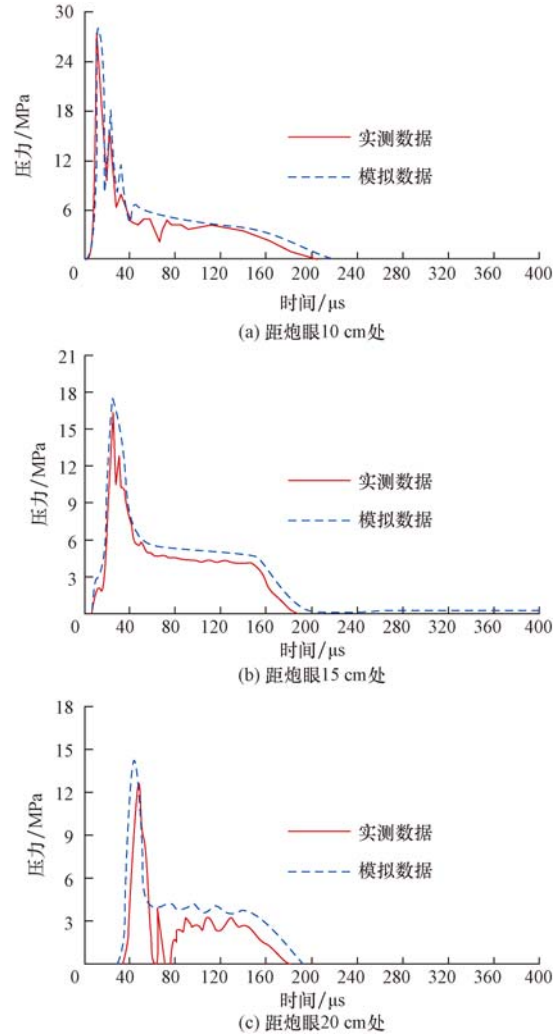


图 2 距离炮眼不同位置处的压力对比曲线

Fig. 2 Pressure curve comparison at different distance from the perforations

区域范围进行测量,即得到裂缝扩展长度。

2) 裂缝密度确定方法。按照 Grady 和 Kipp 的理论观点<sup>[17]</sup>,裂缝密度是裂纹影响区岩石体积与岩石总体积之比,即裂缝密度  $C_d$  可表示为:

$$C_d = \frac{V_a}{V_0} \quad (9)$$

式中:  $V_a$  为裂缝影响区岩石体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_0$  为岩石总体积,  $\text{m}^3$ 。

按照式(9)对裂纹密度的定义,对模型中损伤因子达到 1 的区域的体积进行统计,其与模型总体积的比值即可看作相应的裂缝密度。

为方便研究,选取某一地层段建立实体模型,具体尺寸是长、宽、高各为 20 m 的正方体地层内有直径 0.3 m、长 10 m 的井眼,井眼内装有圆柱状炸药,其直径 0.1 m、长 10 m。为减小计算量,按 1:10 比例缩放建立相应几何模型用于数值模拟。

按照油藏埋深范围,地应力分量大小的一般顺序为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 或 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ ,三向应力方向分别为 $\sigma_H$ 沿 $y$ 方向, $\sigma_h$ 平行于 $x$ 方向, $\sigma_v$ 沿 $z$ 方向。因此,按照地应力分量大小,分情况进行模拟分析。

在 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 的情况下,直井筒(井眼沿 $z$ 轴方向)内爆炸压裂后,通过数值计算模型模拟得到的损伤分布情况如图3所示。

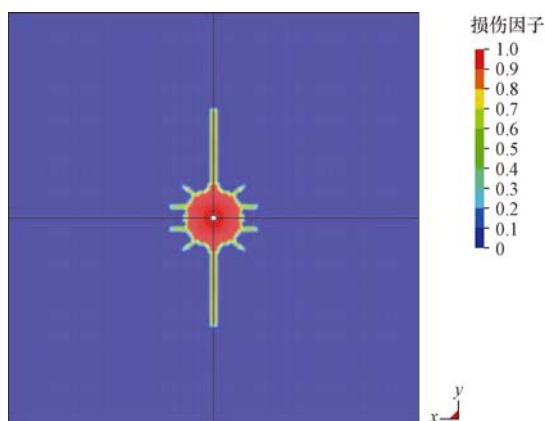


图3  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$  情况下模拟得到的损伤分布

Fig. 3 Damage distribution under the condition of  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$

由图3可知,在 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 情况下井筒内炸药爆炸后,次裂缝将集中出现在井筒周围1.7 m的区域内,而2条各长约5 m的主裂缝垂直于 $x$ 轴方向产生(垂直于最小水平地应力)。

在 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 情况下,直井筒内爆炸压裂后的损伤分布情况如图4所示。

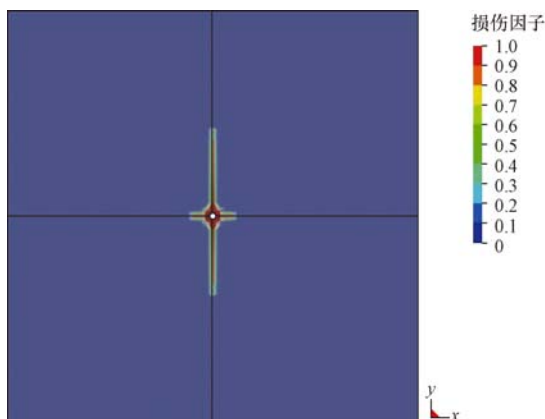


图4  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$  情况下模拟得到的损伤分布

Fig. 4 Damage distribution under the condition of  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$

对 $\sigma_v$ ,  $\sigma_H$ 和 $\sigma_h$ 赋予不同数值进行多次模拟计算,得到与图3、图4一致的结果:主裂缝的产生、扩展垂直于最小水平地应力方向,而次裂缝主要集中在井眼附近区域,其方向受地应力影响不明显。

为深入研究地应力场对裂缝扩展范围、裂缝密

度的影响规律,分别对直井、水平井2种情况不同地应力组合下的爆炸压裂情况进行模拟,对计算结果(损伤)进行统计、加工、整理,得到裂缝扩展范围和裂缝密度的计算结果,见表1。

表1 数值模拟计算结果

Table 1 Results of numerical simulation

井类别	$\sigma_v$ /MPa	$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_h$ /MPa	裂缝扩展范围/m	裂缝密度, %
直井	13	16	10	2.86	2.51
	13	17	10	3.45	3.72
	13	18	10	3.86	4.56
	13	19	10	4.20	5.41
水平井 (沿最大水平主应力方向)	15	18	9	3.04	4.12
	15	18	10	3.18	3.31
	15	18	11	2.80	2.64
	15	18	12	2.52	2.11
水平井 (沿最小水平主应力方向)	13	21	12	2.68	2.11
	14	21	12	2.42	1.79
	15	21	12	2.04	1.36
	16	21	12	1.86	1.18
	17	21	12	1.64	0.85
	26	14	12	3.10	3.05
	27	14	12	3.28	3.42
	28	14	12	3.52	3.91
	29	14	12	3.78	4.40
	30	14	12	4.16	5.31

由表1可知:对于直井井筒内的爆炸压裂,在保持炸药类型、炸药量、地层参数等条件不变的情况下,随着最大水平主应力的增大,直井井眼内所形成裂缝的平均长度及裂缝密度均会增加,且近似呈现线性递增趋势;沿最大水平主应力方向发展的水平井眼内发生爆炸时,随着最小水平主应力的增大,井壁开裂及裂缝扩展难度增大,裂缝长度及裂缝密度减小;在 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 条件下,沿最小水平主应力方向发展的水平井眼内发生爆炸时,随着垂向应力的增大,因爆炸压裂所形成的裂缝区平均长度以及裂纹密度呈减小趋势;在 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 条件下,沿最小水平主应力方向发展的水平井眼内发生爆炸时,随着垂向应力的增大,裂缝开裂、扩展变得更为容易,裂缝长度及裂缝密度也呈增大趋势。

## 4 结论与建议

1) 爆炸压裂物理模拟试验结果表明,只要合理选择炸药用量和装药方式,就可有效避免炸药爆炸



对井壁围岩造成的粉碎性破坏。

2) 室内物理模拟试验结果表明, 爆炸压裂技术造缝效果明显, 其产生的裂缝由井眼向外沿曲线扩展, 扩展过程中伴随有分叉现象。

3) 爆炸压裂后地层中产生的宏观主裂缝, 其产生及扩展方向受地应力场控制, 即垂直于最小水平主应力方向; 集中分布在井眼周围的次裂缝, 其发展方向不受地应力场影响。

4) 对裂缝参数的表征较为粗略, 建议开展爆炸压裂裂缝参数表征精细化研究, 以实现爆炸压裂效果更为客观、准确的评价。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] 丁雁生, 陈力, 谢燮, 等. 低渗透油气田“层内爆炸”增产技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 90-96.  
Ding Yansheng, Chen Li, Xie Xie, et al. On the stimulation of “exploding in fractures” in low permeability reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 90-96.
- [2] 李道品. 低渗透油田概念及其在我国的分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 1-10.  
Li Daopin. Conception and distribution of low permeability oilfield in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 1-10.
- [3] 杨俊杰. 低渗透油气藏勘探开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 23-45.  
Yang Junjie. Low permeability oil and gas reservoir exploration and development technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 23-45.
- [4] 林英松, 蒋金宝, 朱天玉, 等. 爆炸载荷对水泥试样损伤破坏规律研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 55-58.  
Lin Yingsong, Jiang Jinbao, Zhu Tianyu, et al. Research of cement sample's damage and fracture by exploding load[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(3): 55-58.
- [5] 程远方, 寇永强, 徐鹏, 等. 水泥试样爆炸压裂模拟试验[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(5): 69-72.  
Cheng Yuanfang, Kou Yongqiang, Xu Peng, et al. Explosive fracturing simulation test of cement samples[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(5): 69-72.
- [6] 徐鹏, 程远方, 张晓春, 等. 水泥试样爆炸压裂试验及裂纹分形评价[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 179-183.  
Xu Peng, Cheng Yuanfang, Zhang Xiaochun, et al. Fractal evaluation of explosive fracturing simulation test on cement samples[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2): 179-183.
- [7] 蒋金宝, 林英松, 张瑞英. 激波掠过岩石相对损伤度与裂缝渗透率关系模拟实验研究[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 947-950.  
Jiang Jinbao, Lin Yingsong, Zhang Ruiying. Simulation research on relationship between relative damage of rock and fracture permeability after exploding wave bypassing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 947-950.
- [8] 徐鹏, 程远方, 刘丹, 等. 爆炸压裂下围压对井壁破碎效果的影响[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 22-25.  
Xu Peng, Cheng Yuanfang, Liu Dan, et al. The effects of ambient pressure on wellbore crushing effect under explosive fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(6): 22-25.
- [9] 王京印, 程远方, 刘芳, 等. 围压对井内爆炸压裂损伤破坏尺度影响的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 81-86.  
Wang Jingyin, Cheng Yuanfang, Liu Fang, et al. Numerical simulation for the influence of confined pressure on the damage scale of explosive fracturing inside well bore[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 81-86.
- [10] 肖正学, 张志呈, 李端明. 初始应力场对爆破效果的影响[J]. 煤炭学报, 1996, 21(5): 497-500.  
Xiao Zhengxue, Zhang Zhicheng, Li Duanming. The influence of initial stress field on blasting[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(5): 497-500.
- [11] 戴俊, 钱七虎. 高地应力条件下的巷道崩落爆破参数[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 272-277.  
Dai Jun, Qian Qihu. Break blasting parameters for driving a roadway in rock with high residual stress[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 272-277.
- [12] 邵国建, 王东升. 岩体初始地应力场对地下洞室围岩变形及应力的影响[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 82-82.  
Shao Guojian, Wang Dongsheng. Influence of initial stress field of rock masses on deformations and stresses of surrounding rock of underground openings[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 82-82.
- [13] 林英松, 蒋金宝, 孙丰成, 等. 爆炸技术与低渗透油气藏增产[J]. 钻采工艺, 2007, 30(5): 48-52.  
Lin Yingsong, Jiang Jinbao, Sun Fengcheng, et al. Exploding technology and low permeability reservoir improvement[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(5): 48-52.
- [14] 刘向君, 罗平亚, 孟英峰. 地应力场对井眼轨迹设计及稳定性的影响研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 57-59.  
Liu Xiangjun, Luo Pingya, Meng Yingfeng. Influence of ground stress field on borehole trajectory design and well-face stability[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 57-59.
- [15] 陈德春, 吴晓东, 潘志华, 等. 爆燃压裂油井产能电模拟实验评价[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 73-77.  
Chen Dechun, Wu Xiaodong, Pan Zhihua, et al. Evaluation of exploding fracture wells productivity using electric analog experiment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 73-77.
- [16] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 199-220.  
Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004: 199-220.
- [17] 杨军. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 171-176.  
Yang Jun. Theoretical model and numerical calculation of rock blasting[M]. Beijing: Science Press, 1999: 171-176.