

文章编号: 0253-2697(2009)02-0295-05

不同体积高压气体对复合射孔压井液运动的影响

赵旭¹ 柳贡慧^{1,2} 张涛¹

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 北京联合大学, 北京 100010)

摘要: 利用复合射孔相似模拟实验装置, 探讨了复合射孔过程中上部压井液在井底高能气体作用下的运动规律, 观测了井底高能气体与上部压井液之间的作用过程及流型的变化规律, 考察了不同体积的气体作用下压井液的运动状态及变化机理。由实测的压力曲线分析结果表明, 高压气体与上部压井液之间的作用与空气中的气体爆炸作用有很大的区别。压井液的受力是逐层传播的, 压力波传到之处的压井液被压缩, 而压力波未传到之处的压井液不受影响。在其他作用条件不变而单独改变作用气体体积的条件下, 在气液作用的初期和中后期均会引起压力波动值、波动周期和波动次数的变化。但在不同的作用时期, 其变化的趋势有所不同。

关键词: 复合射孔; 高能气体; 气体体积; 压井液; 运动机理; 实验研究

中图分类号: TE257.1 **文献标识码:** A

Movement mechanism of control fluid in propellant perforation under the action of downhole high-pressure gas

ZHAO Xu¹ LIU Gonghui^{1,2} ZHANG Tao¹

(1. Key Laboratory for Petroleum Engineering of the Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Beijing Union University, Beijing 100010, China)

Abstract: The interaction mechanism between downhole high-pressure gas and top control fluid in propellant perforation was studied on a new testing device based on the similarity principle. The movement and variations of control fluid were investigated in different volume of high-pressure gas. The curves of pressure and flow regime identification of two-phase flow were analyzed. The experimental results indicate that the interaction between downhole high-pressure gas and top control fluid is very complicated and greatly different from gas explosion in air. The force acting on the control fluid spreads in the form of wave, and the fluid could be compressed by pressure wave, but it would not be changed without pressure wave arrival. The value, cycle and times of pressure fluctuation would be changed with the variation of high-pressure gas volume under the action of gas and liquid. However, the change trends are different in the various action periods of gas and liquid.

Key words: propellant perforation; high-pressure gas; gas volume; control fluid; movement mechanism; experimental study

井下地层的复合射孔是一个十分复杂的物理过程。首先, 聚能射孔弹爆轰形成高速金属粒子流撞击岩石, 形成一个很高的压力脉冲载荷, 在岩石中形成一个孔洞, 随后压裂火药爆燃产生高能气体, 进一步压裂地层同时推动压井液体上移^[1-8]。由于上部压井液体在气体推力作用下的运动状态无法直接观察, 只能借助于建立在种种假设和简化条件基础上的数值模拟和实验进行间接的分析。上部压井液运动的地面模拟实验是认识压井液运动规律和状态的重要手段。通过模拟实际井下的压井液运动实验, 可以对压井液的运动规律和气液两相流的过程进行监测, 并且可以对高能气体对压井液作用的整个运动状态进行直接观察, 这

对于正确认识复合射孔条件下压井液的运动规律及其影响具有重要的意义^[9-15]。笔者根据相似模拟原理建立了复合射孔室内模拟实验装置, 通过实验的方法研究了压井液在高压气体冲击作用下的运动情况及在不同体积的高压气体作用下的压井液的运动状态, 为深入研究复合射孔提供了实验依据。

1 实验材料与方法

1.1 基本思路

为避免用火药进行复合射孔实验的复杂性和危险性, 可根据几何相似和动力相似准则设计相似模拟实验装置, 利用高能气体发生装置模拟井下火药爆燃产

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目(IRT0411)资助。

作者简介: 赵旭, 男, 1981年7月生, 2004年毕业于辽宁石油化工大学, 现为中国石油大学(北京)在读博士研究生, 主要从事油气井理论及射孔完井方面的研究。E-mail: zhaoxu46@163.com

生的高能气体,用压力传感器和高速 A/D 卡采集记录压力数据。

1.2 实验装置和方法

实验中不考虑高能气体对地层的压裂作用,仅分析研究气体能量对上部压井液的作用和压井液的运动规律。在井下实际的复合射孔施工中,压裂火药爆燃产生的压力根据火药性质和射孔条件的不同一般在 40~70 MPa,最高可达 100 MPa。燃烧产生的部分气体通过压井液体排出井外,部分进入地层。为尽量保证实验装置及实验过程能够模拟现场施工情况,设计了如图 1 所示的实验装置。

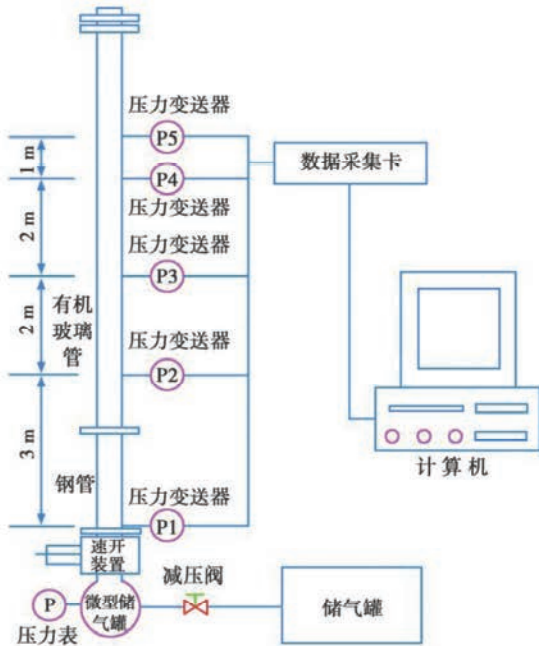


图 1 实验系统装置示意图

Fig. 1 Device sketch map of experimental system

实验装置主要包括 4 部分: 高压气体发生系统、模

拟井筒、容积可调节微型储气罐和数据采集及测量系统。为了保证实验的可行性及模拟的相似性,实验的模拟井筒全长为 11 m,内径为 30 mm,其中有机玻璃管部分长为 9 m,下端接长为 2 m 钢管。有机玻璃管的部分可以观测模拟井筒内的气液作用现象,下端的钢管可以保证实验的安全性。在模拟井筒下部的高压气体发生装置接有速开开关,速开开关可以在毫秒级的时间内全部打开,以便微型储气罐内的高压气体全部作用于上部液体。根据实验的要求和实际加工的条件,容积可调节微型储气罐其最大容积为 157.743 mL,最小容积可调至 30 mL,完全满足实验的要求。根据实际复合射孔压井液的应用状况,结合实验设备的具体条件,实验中用清水作为压井液,选用的高压气体压力为 2 MPa。

数据采集选用美国国家仪器有限公司 NI6009 高速采集卡,该数据采集卡是一款多功能便携高速采集卡,采用了 DMA 通道技术,并且在其驱动中含有缓存技术,从而保证了数据采集卡在所有通道同时工作时都能高速、稳定的对数据进行连续采集。采用了 HTP 420 压力变送器模拟井筒不同点的压力,根据测量位置的不同,分别选择了不同量程的压力变送器,精度为 0.1 级,输出的电压信号为 0~5 V,通过数据采集卡输入计算机。

1.3 井底压力模拟及实验参数设置

复合射孔上部压井液运动实验模拟实际井下复合射孔的施工条件,其中最主要的因素是模拟井底高能气体压力的大小、压井液的高度和作用气体的体积。考虑到实验装置的适用性,根据相似原理,实验总共分为 4 组,均采用恒定的高压气体压力和压井液高度,改变高压气体的作用体积。实验相关参数如表 1 所示。

表 1 实验相关参数

Table 1 Relevant parameters of the experiment

| 实验编号 | 实验参数 | | | 对应的模拟井底实际复合射孔参数 | | |
|------|----------|---------|---------|-----------------|---------|--------|
| | 气体压力/MPa | 压井液高度/m | 气量/mL | 爆燃压力/MPa | 压井液高度/m | 火药量/kg |
| I | 2 | 8 | 60 | 56 | 500 | 5.53 |
| II | 2 | 8 | 80 | 56 | 500 | 7.38 |
| III | 2 | 8 | 100 | 56 | 500 | 9.22 |
| IV | 2 | 8 | 157.743 | 56 | 500 | 14.54 |

2 实验分析

2.1 高压气体作用初期管内压力变化

图 2 为高压气体瞬时作用在前 150 ms 内模拟管道中各点测得的压力变化关系曲线。图 2 是指在模拟

管道的最底端和距最底端 3 m、5 m、7 m 处的压力传感器所测出的压力值。由图 2 可以看出:在井底高压气体的瞬时作用下,井底的压力迅速提升,然后又迅速下降,经过大约 50 ms 的波动后压力逐渐平稳,但在趋于平稳的过程中不断的伴随着小幅度的压力波动,不同位置的测压点(即压力传感器的安装点)测得的压力波

形曲线具有一定的相关性,只是时间上存在着一个很小的滞后,在压力的数值上存在着一定的减小。这说明高压气体与上部压井液之间的作用是一个十分复杂的气液作用现象,与空气中的气体爆炸作用有很大的区别。压井液的受力是逐层传播的,压力波传到之处的压井液开始运动并且被压缩,而压力波未传到之处的压井液不受影响,同时由于液体压缩和摩擦

阻力的影响,在传播过程中压力值也是在不断衰减的。

此外,由图 2 可以看出随着高压气体体积的增加,井底和压井液中各测点的压力波动的次数和压力波动值有增加的趋势,而且波动的高压持续时间也有所增加。由图 2 中的距井底 3 m 处的压力曲线可以看出,在稳定时期的压力值也有所提高。

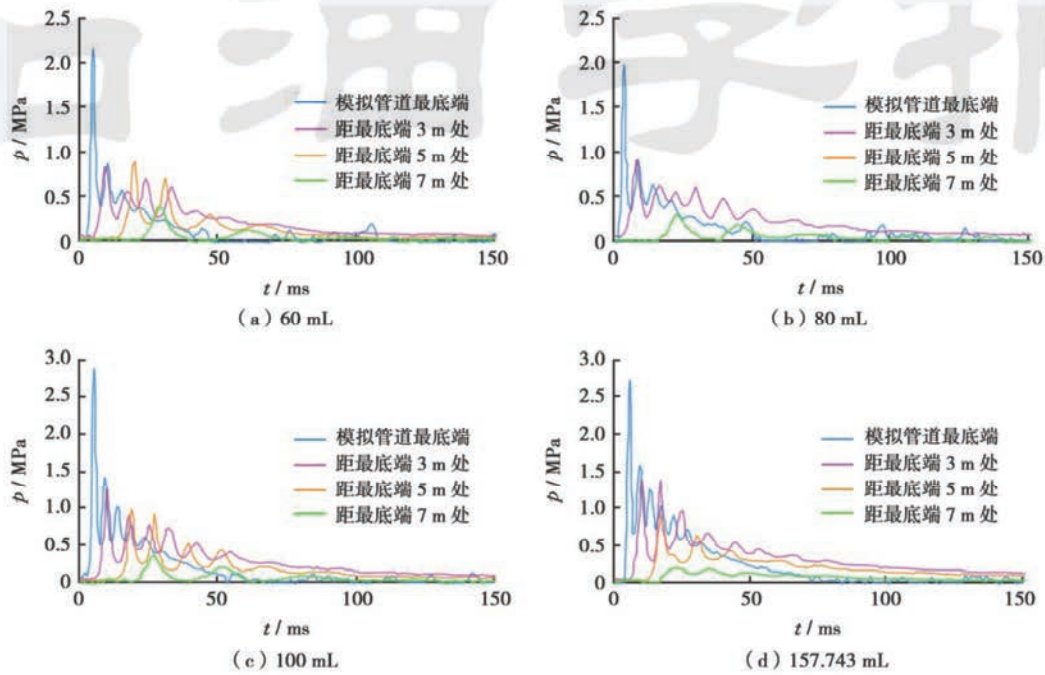


图 2 不同体积高压气体对压井液作用初期的压力变化曲线

Fig. 2 The pressure variety under the action of high-pressure gas on control fluid in initial stage

2.2 高压气体作用中后期管内压力变化

根据可视化观察和压力波动曲线的特征,表 1 中

的各组实验中高压气体与上部压井液之间气液作用产生的几种流型如图 3 所示。

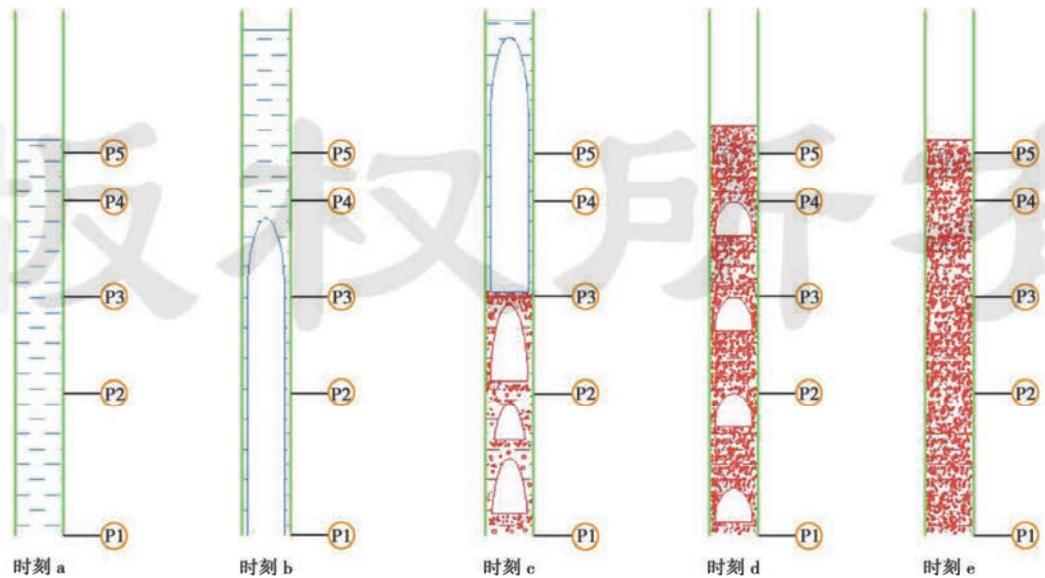


图 3 高压气体冲击压井液情况下的气液作用流型变化

Fig. 3 Flow regime identification of gas and liquid under the action of high-pressure gas on control fluid

(1) 时刻 a—时刻 b: 压井液在突然释放的高压气体作用下, 首先在压井液中产生冲击波, 模拟管道底部及压井液中各点处的压力迅速发生变化。从宏观上的表现可以看到压井液迅速提升然后迅速下降, 压井液的上液面出现了上、下波动的现象, 而在压井液中没有明显的变化。

(2) 时刻 b—时刻 c: 压井液在快速地脉动几次后, 由于气体的密度远低于液体, 井底聚集的高压气体膨胀后开始进入液体, 以环状流的形式开始上移并形成气柱, 伴随着气体的不断上移与膨胀, 气体上部的液体也在其推动下上移, 但其上移的速度较气体的上移速度慢, 并不断有液体在环状流的四周下落。而在气柱的上移过程中, 压井液中不断的进行着压力波动。实验中观测到气柱是以“顿一下、升一下”的方式来上移的, 上移气柱的长度也是在一缩一伸变化。

(3) 时刻 c—时刻 d: 由于作用的高压气体的体积有限, 随着气柱的不断上移和膨胀, 气柱内的压力不断下降, 由气柱周围下落的液体不断的冲击下部的液体, 致使在第一个长气柱的后面, 管路中又形成了几个长短不一小气段。气柱之间的液柱被密集的气泡填充, 形成气液充分混合的气泡柱, 气液界面变得模糊, 且沿着长气柱周围的下降液膜, 表面粗糙度增加。

(4) 时刻 d—时刻 e: 当第一个大气柱突破上液面后, 伴随着较大的弹状流的进一步向上运动, 当下降液膜提供的液体补给量低于气泡柱的尾流量时, 气柱会在上行的过程中逐渐缩短。受气流的作用, 这时就会看到短暂的搅混现象产生, 液块被气流夹裹上、下波

动, 气相在液块中蜿蜒穿行, 由于气流量不大, 这种现象持续的时间较短。

(5) 时刻 e: 当段塞流中的几个大的气体段突破压井液的上液面后, 段塞中的气体迅速排出, 其周围携带的液体下落, 继续冲击下端未能排出去的液体, 形成密集的泡状流并夹杂着小型的弹状流, 最后, 密集泡状流的不断进行, 模拟管道底部的高压气体逐渐耗尽, 压井液的上液面逐渐恢复到作用前的高度, 整个高压气体对压井液的一次作用过程结束。

实验中还观测到, 当用较小体积的气体作用时, 其流型变化较为简单, 压井液波动不明显, 在气液作用后期, 压井液体中往往只有一个长气柱。但随着作用气量的增加, 其气液流型变化越来越剧烈, 压井液体的波动也越来越明显, 如前所述, 一次作用中会出现多次的流型变化, 当用较大的气体体积作用时, 有时在气液初期就会形成多个气柱。

3 实验结果

为了进一步的研究高压气体冲击作用结束后, 上部压井液与底部高压气体之间的作用状态, 把与图 2 相对应的实验中 150 ms 至 12 s 之间的压井液中压力变化显示在图 4 中。图 4 显示了不同体积的高压气体在相同压力和相同压井液高度的条件下, 压力传感器所测出的压井液压力波动变化。

由图 4 可以看出, 对应着气液作用的各个阶段, 压力传感器测出压力值在不断的波动并且是不断衰减的, 直到 12s 后, 仍然有小幅的压力波动, 可能是由于

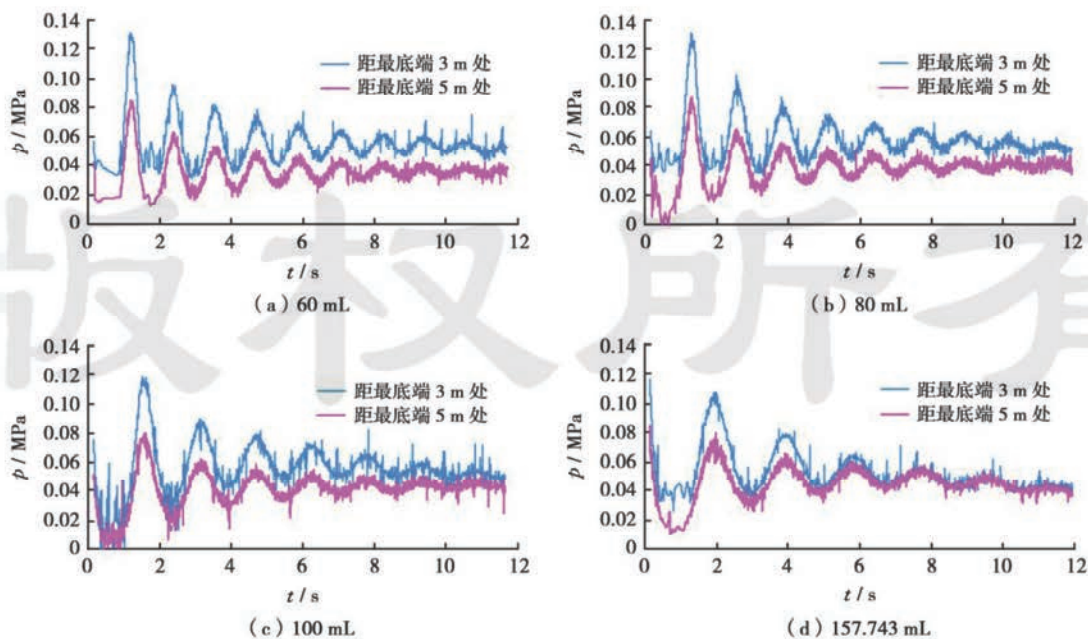


图 4 不同体积高压气体对压井液作用中后期的压力变化曲线

Fig. 4 The pressure variety under the action of high-pressure gas on control fluid in the late stage

液体中存在的弹状流和密集小气泡引起的。而且还可看出伴随着作用气量的增加,在同样的时间内压力波动的次数明显减少,波动一次的周期也有明显的增加,但最高波动压力有所下降。在波动几次后,3 m处测得的压力值与5 m处测得的压力值趋向一致。这说明随着作用气量的增加,压井液所提供的上覆压力越来越不能封住模拟管道底部的高压气体。当用60 mL的气量实验时,上部压井液在高压气体的作用下迅速提升,由于气量有限,随着管道底部气体压力的下降,压井液快速回落,故而形成了较快的波动速度和较高的波动压力,封住了大部分的高压气体能量。而当用157.743 mL的气量实验时,高为8 m的压井液提供的上覆压力已完全不能封住底部的高压气体,致使压井液不断上移,波动的周期大幅增加,实验中也观测到部分压井液被推出模拟管道的现象。

4 结论

(1) 高压气体与上部压井液之间的作用与空气中的气体爆炸作用有很大的区别,压井液的受力是逐层传播的,压力波传到之处的压井液开始运动并且被压缩,而压力波未传到之处的压井液不受影响。同时由于液体压缩和摩擦阻力的影响,在传播的过程中压力值不断衰减。

(2) 高压气体对压井液的作用在经过初期的冲击震荡后,会经历多次的流型变化,但随着作用气体体积的改变,流型的变化也略有不同。

(3) 在初始的冲击震动阶段,作用的高压气体的体积越大,压力波动的次数就越多,压力波动值就越大,而且波动的高压持续时间也就越长。在初期的冲击震荡结束后,作用的高压气体的体积越大,压力波动的次数就越少,波动周期就越长,最高波动压力值也越小,但其作用的最终效果与压井液提供的上覆压力有关。

参考文献

- [1] 刁刚田,刘志华,周家驹,等.复合射孔技术的应用[J].钻采工艺,2003,26(6):30-33.
Diao Gangtian, Liu Zhihua, Zhou Jiaju, et al. The application of compound perforation technology [J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26(6): 30-33.
- [2] 蒲春生,秦文龙,邹鸿江,等.高能气体压裂增产措施中一氧化碳气体生成机制[J].石油学报,2006,27(6):100-102.
Pu Chunsheng, Qin Wenlong, Zou Hongjiang, et al. Formation mechanism of carbon monoxide in high-energy gas fracturing [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 100-102.
- [3] 王海东,孙新波,梁纯,等.国内外射孔技术发展综述[J].爆破器材,2005,35(3):33-36.
Wang Haidong, Sun Xinbo, Liang Chun, et al. A summary of perforating technology development inside and outside of China [J]. Explosive Materials, 2005, 35(3): 33-36.
- [4] 孙新波,刘辉,王宝兴,等.复合射孔技术综述[J].爆破器材,2007,36(5):29-32.
Sun Xinbo, Liu Hui, Wang Baoxing, et al. Review of propellant perforation techniques [J]. Explosive Materials, 2007, 36(5): 29-32.
- [5] 李海涛,王永清,谭灿.超正压射孔动态模拟数学模型[J].石油学报,2008,29(2):304-307,312.
Li Haitao, Wang Yongqing, Tan Can. Dynamic simulation model for extreme overbalanced perforating operation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 304-307, 312.
- [6] 柳贡慧,李玉顺.考虑地应力影响下的射孔初始方位角的确定[J].石油学报,2001,22(1):105-108.
Liu Gonghui, Li Yushun. Initial perforating azimuth angle considering stress of stratum [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 105-108.
- [7] 李克明.高能复合射孔技术及应用前景[J].石油钻探技术,2002,30(3):72-74.
Li Keming. High power, multiplex perforation techniques and its prospect [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(3): 72-74.
- [8] 成建龙,孙宪宏,乔晓光,等.复合射孔枪泄压孔及装药量对环空动态压力的影响研究[J].测井技术,2007,31(1):50-55.
Cheng Jianlong, Sun Xianhong, Qiao Xiaoguang, et al. Influence of pressure released vent and power loading of composed perforator on dynamic casing annulus pressure [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(1): 50-55.
- [9] 李文魁,吴宏利,赵蔚.高能气体压裂最佳装药量与峰压设计计算[J].石油钻采工艺,1998,20(3):91-94.
Li Wenkui, Wu Hongli, Zhao Wei. Optimum charge and peak pressure calculation of high energy gas fracturing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(3): 91-94.
- [10] 陈莉静,李宁,王俊奇.高能复合射孔爆生气体作用下预存裂缝起裂扩展研究[J].石油勘探与开发,2005,32(6):91-93,120.
Chen Lijing, Li Ning, Wang Junqi. Initiation and extension of existing cracks under detonation gas loading in a high energy combined perforation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 91-93, 120.
- [11] 张国按,孙志明.高能复合射孔(FracGun)在国外A油田的应用[J].石油钻探技术,2006,34(1):62-64.
Zhang Guo'an, Sun Zhiming. Application of Fracgun in an overseas oil field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 62-64.
- [12] 项忠华.射孔压裂参数优化设计研究[D].北京:石油大学,2002.
Xiang Zhonghua. Study on perforation fracturing parameter optimization [D]. Beijing: University of Petroleum, China, 2002.
- [13] 王安仕,秦发动.高能气体压裂技术[M].西安:西北大学出版社,1998:66-145.
Wang Anshi, Qin Fandong. High energy gas fracturing technology [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1998: 66-145.
- [14] Yang D W, Risnes R. Numerical modelling and parametric analysis for designing propellant gas fracturing [R]. SPE 71641, 2001.
- [15] Yang D W, Risnes R. Experimental study on fracture initiation by pressure pulses [R]. SPE 63035, 2000.