

可控复合脉冲爆燃压裂动态加载模型

吴飞鹏¹, 贾 涵², 任 杨¹, 刘 敏¹, 蒲春生¹, 赵玉川³

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100;
3. 中原油田勘探局, 河南濮阳 457000)

摘要:针对单级火药爆燃速度单一、延迟点燃连接装置稳定性欠佳的问题,提出高低燃速火药串联装配、中心管同步点燃新型工艺,进而基于不同爆燃速度火药的燃速方程,借助火药结构几何模型、质量守恒方程、能量守恒方程和气体状态方程建立多级脉冲组合火药爆燃加载模型,据此定量计算不同比例组合火药爆燃加载压力与时间的动态变化。结果表明:组装火药可有效协同高低燃速火药爆燃加载优势,既可用少量高燃速火药迅速产生高压破裂储层,又不会产生过大峰值压力破坏套管,同时又能利用大剂量低燃速火药长时有效延伸裂缝;在确保迅速破裂储层基础上,尽量减少高速火药量、增加低速火药量,以便建立施工安全和措施效果的有效平衡,同时可在套管安全的前提下扩大整体装药量,提高措施效果。

关键词:气体压裂; 火药爆燃; 加载模型; 密闭空间

中图分类号:TE 355 **文献标志码:**A

引用格式:吴飞鹏,贾涵,任杨,等.可控复合脉冲爆燃压裂动态加载模型[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):120-125.

WU Feipeng, JIA Han, REN Yang, et al. Dynamic modeling of gas loading with controllable ignition of propellants for downhole blasting fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 120-125.

Dynamic modeling of gas loading with controllable ignition of propellants for downhole blasting fracturing

WU Feipeng¹, JIA Han², REN Yang¹, LIU Min¹, PU Chunsheng¹, ZHAO Yuchuan³

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. School of Earth Science in Yangtze University, Wuhan 430100, China;
3. Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang 457000, China)

Abstract: A new ignition technique was proposed for downhole blasting fracturing using high energy propellants, in which a high speed and a low speed propellant are loaded in series with simultaneous ignition in a central tube. The new technique can avoid the problems of the currently ones that use single speed and one-pulse propellant for its instability and ignition-delay. Based on the different deflagration speed equations, the mass and energy conservation equations, a dynamic gas loading model of the multi-pulse deflagration was established, which can be used to simulate the dynamic loading process with different ratios of the propellants. The results show that the packaged propellants work well with the dynamic loading of the combination of the high and low speed propellants, in which a small quantity of the high speed propellant is ignited to generate a high pressure for initializing fractures, and large amounts of the low-speed propellant are ignited for the enlargement and extension of the fractures. It is suggested that, in order to achieve initializing fractures quickly and the protection of the casing, the usage of the high deflagration speed propellant can be reduced, while the quantity of the low deflagration speed propellant can be increased.

Keywords: gas fracturing; propellant deflagration; loading model; confined space

随着深层、低渗、致密油气藏的不断投入开发,高能气体压裂及其复合作业技术越来越受到重视^[1-4]。压裂弹火药燃速偏快、燃速级别单一,致使该技术难以建立峰值压力与冲击能量的平衡,虽也研发了机械延时点火连接装置,但由于爆燃压裂机械装置的安全性和稳定性在高温、高冲击环境下难以保证,导致该技术在井身安全和裂缝延伸规模上顾此失彼,成为制约该技术进一步应用的关键因素之一^[5]。由此提出基于不同燃速级别火药,直接进行组合串联,舍弃延时点火连接装置,采取安全稳定的中心管同步点火,利用不同燃烧速度火药的冲击应力配合,实现低峰值冲击、长冲击时间和高冲击能量的协调,提高措施效果。笔者基于该新型组合装药结构,借助密闭空间单级爆燃加载模型,推导建立多级燃速火药串联的爆燃加载动力学模型,并据此研究复合装药结构对动态加载规律的影响敏感性,为该新型多级脉冲爆燃压裂技术的矿场应用提供技术指导。

1 多级脉冲火药爆燃速度及燃烧方式

多级燃速火药压裂弹示意图如图1所示。该新型多级脉冲压裂弹由3种由高到低的燃速火药组成,在中心点火药点燃后产生高温,借助同一中心铝管快速传热并同步引燃三级燃速火药柱,利用不同燃烧速度火药的脉冲式冲击应力配合,第一级高燃速火药产生高压,压裂储层岩石,第二和第三级中低燃速火药持续燃烧,维持高压环境,延长高压冲击时间,进一步延伸裂缝,达到低峰值冲击、长冲击时间和高冲击能量的效果^[17]。

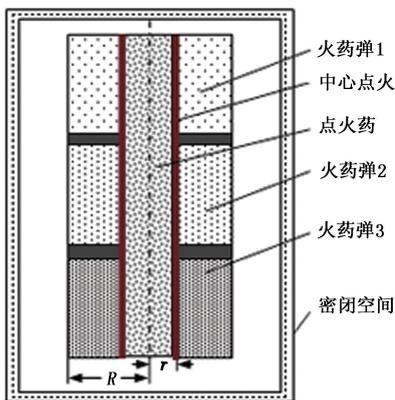


图1 多级燃速火药压裂弹示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-burning rate fracturing charge

2 多级火药燃爆加载模型

2.1 单级火药爆燃几何模型

单级火药爆燃原理模型示意图如图2所示。

高能气体压裂用压裂弹一般为圆筒状,内侧为金属铝管,管内为点火药。引爆时点火药燃烧产生高温高热,经铝管传导达到火药燃点后药柱由内向外按几何燃烧规律开始燃烧,即火药柱内表面沿径向方向向外层层燃烧。火药燃烧线速度与爆燃环境压力呈指数关系^[6],表达式为

$$u = \frac{d\delta}{dt} = w_0 p^n \quad (1)$$

若设在任意时刻 t 药柱的爆燃厚度为 δ ,则其爆燃几何模型为

$$\frac{dV_g}{dt} = 2\pi l u (\delta + r) \quad (2)$$

式中, p 为爆燃压力,MPa; w_0 为火药燃速系数(压力为1 MPa时的爆燃速度),m/(s·MPa); u 为火药爆燃线速度,m/s; n 为压力指数; V_g 为药柱爆燃体积, m^3 ; l 为药柱长度,m; r 为内中孔半径,m。

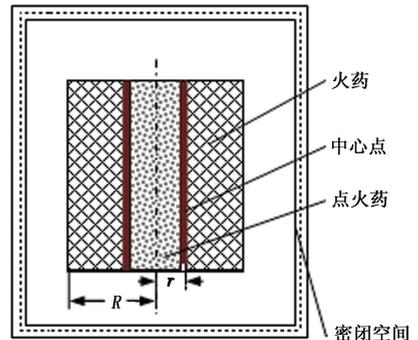


图2 单级火药爆燃原理模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of model of single-stage powder blasting theory

根据质量守恒定律,在密闭环境中火药爆燃的火药质量变化率等于燃气质量的生成率,则利用火药燃速方程和几何方程计算火药质量减小量,再利用密闭空间内的气体状态方程计算密闭空间内的燃气增加量,从而建立火药燃烧的质量守恒方程为

$$\frac{V_r dp}{RT dt} = 2\pi l u^2 (\rho_0 - \rho) + \frac{\bar{p} V_r dT}{RT^2 dt} \quad (3)$$

式中, ρ_0 为火药弹密度, kg/m^3 ; ρ 为火药燃气密度, kg/m^3 ; V_r 为爆燃密闭空间内燃气占据的自由容积, m^3 ; \bar{p} 为爆燃室内的平均压力,MPa。

火药爆燃释放能量转化为爆燃室内燃气温度和压力的提升以及系统内火药燃气体积增加所消耗的功,利用火药力计算火药爆燃释放能量,用系统压力与火药爆燃体积减少量计算燃气做功,用气体内能方程计算燃气内能的增加,建立能量守恒方程为

$$(f - C_g T - C_g) \frac{dm_r}{dt} = (C_g m_r) \frac{dT}{dt} + 2p \frac{dV_r}{dt} + V_r \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

式中, f 为火药力, J/kg ; T 为爆燃室内的温度, $^{\circ}C$; C_g 为火药燃气比热容, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$; m_r 为火药燃烧损耗的质量, kg 。

根据建立的密闭空间内单火药燃烧的几何方程(式(2))、质量守恒方程(式(3))和能量守恒方程(式(4)),结合复合火药燃速方程(式(1))和气体状态方程,可组建单级火药密闭空间内的爆燃加载模型,据此可计算一定装药结构、装药质量及密闭空间组合下的火药爆燃燃气压力随时间的变化关系。

2.2 多级脉冲火药组合爆燃加载模型

与单级火药爆燃物理模型相比,多级脉冲火药弹结构下爆燃物理模型具有相同的因素:火药均为相同半径的圆筒状、均为中心管同步点燃后由内向外线性层燃;火药燃气均置于同一密闭空间,燃气均假定为理想气体、均满足建立的守恒方程。各级火药不同因素为火药本身密度、火药力、装药长度、燃速方程(燃速系数、压力指数)、一定时刻的燃烧厚度、剩余火药质量。由物理叠加各燃烧几何方程、质量守恒方程和能量守恒方程,并结合燃速方程和气体状态方程建立多级脉冲火药组合爆燃加载模型^[17],即

$$\sum_{i=1}^n \frac{dV_{gi}}{dt} = 2\pi \sum_{i=1}^n (l_i u_i (\delta_i + r)),$$

$$\frac{V_r}{RT} \frac{dp}{dt} = 2\pi \sum_{i=1}^n (l_i u_i^2 (\rho_{0i} - \rho)) + \frac{pV_r}{RT^2} \frac{dT}{dt},$$

$$\sum_{i=1}^n \left[(f_i - C_g T - C_g) \frac{dm_{ri}}{dt} \right] = \left(C_g \sum_{i=1}^n (m_{ri}) \frac{dT}{dt} \right) +$$

表1 3级燃速火药燃速方程

Table 1 Propellant combustion rate equations of three-stage burning rate

| 高燃速火药 | | 中燃速火药 | | 低燃速火药 | |
|-------------|-----------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| 环境压 p/MPa | 燃速方程 | 环境压 p/MPa | 燃速方程 | 环境压 p/MPa | 燃速方程 |
| 0 ~ 15 | $u_{h1} = 4.4487p^{0.6549}$ | 0 ~ 11 | $u_1 = 3.3922p^{0.4634}$ | 0 ~ 20 | $u_1 = 2.7563p^{0.2597}$ |
| 15 ~ 45 | $u_{h2} = 1.8912p^{0.9840}$ | 11 ~ 45 | $u_2 = 1.1078p^{0.9330}$ | 20 ~ 65 | $u_2 = 0.2239p^{1.0975}$ |
| 45 ~ 120 | $u_{h3} = 37.09p^{0.1963}$ | 45 ~ 100 | $u_3 = 15.466p^{0.2206}$ | 65 ~ 110 | $u_3 = 5.0073p^{0.3555}$ |
| 120 ~ | $u_{h4} = 0.2152p^{1.2484}$ | 100 ~ | $u_4 = 0.5445p^{0.9398}$ | 110 ~ | $u_4 = 0.0537p^{1.3135}$ |

3.2 单级火药爆燃加载规律

设计直径 97.2 mm、长 1.0 m 的定容密闭圆柱空间,火药为内径 30 mm、外径 70 mm 的长圆环柱状,若忽略点火药对爆燃压力影响,不考虑密闭空间的能量散失,分别计算 15 kg 的 3 种火药的爆燃加载 $p-t$ 曲线,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出:3 种火药爆燃加载速率均随燃烧的进行快速增大,一方面由于火药燃烧速度随环境压力增加而快速提高,另一方面由于火药为由内向外层层燃烧,火药燃烧的面积逐渐增加;相同

$$2p \frac{dV_r}{dt} + V_r \frac{dp}{dt},$$

$$u_i = \frac{d\delta}{dt} = w_{0i} p^{n_i},$$

$$pV_r = nRT.$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$ 为火药种类。

3 多级脉冲加载规律及其影响因素敏感性

3.1 多级脉冲火药组合爆燃加载模型求解

模型中未知变量为任意时刻 t 时的 $p(t)$ 、 $T(t)$ 、 $V_r(t)$ 、 $u_i(t)$ 、 $\delta_i(t)$ 和 $m_{ri}(t)$,其中 $\delta_i(t)$ 和 $m_{ri}(t)$ 为相关量,则有 5 个未知数、5 个方程。结合模型初始压力、温度条件,以时间间隔离散加载过程的时间,以系统压力、温度为中心变量,联系组合火药燃烧线速度、燃气质量连续释放、火药燃烧能量释放、系统压力温度变化等各个耦合子物理过程,逐步迭代求解各时间内的物理量组合,从而最终得到火药爆燃加载应力随时间变化的关系。

据各级火药燃速的差异需求,选定的高、中、低 3 级燃速火药分别为:配方改进优化后的硝酸酯增塑的聚醚推进剂(NEPE)、端羟基聚丁二烯推进剂(HTPB)和聚氨酯推进剂^[7-11],该系列火药燃烧线速度与压力关系(燃速方程)见表 1。此外高、中、低 3 种燃速火药密度分别为 1.86、1.77 和 1.73 g/cm^3 ,火药力分别为 1.216、1.1008 和 1.0021 MJ。

质量的 3 种燃速火药最终的峰值压力基本接近(分别为 198、190 和 186 MPa),主要由于 3 种火药虽然燃速相差很大,但其火药力差异较小,而模拟系统又不考虑能量向外界散失,则火药爆燃能量全部转化为系统内能,故其峰值压力相近,但其完全爆燃所用时间差别较大,分别为 266、990 和 1428 ms,体现出 3 种火药爆燃速度的阶梯式差异。

3.3 三级脉冲火药爆燃加载规律

设计相同定容密闭空间和相同尺寸的长圆环柱装药结构,计算串联质量总和为 15 kg 的 3 种火药

($M_h : M_m : M_l$ 为3种燃速火药的装药质量比)的爆燃加载的 $p-t$ 曲线如图4所示。

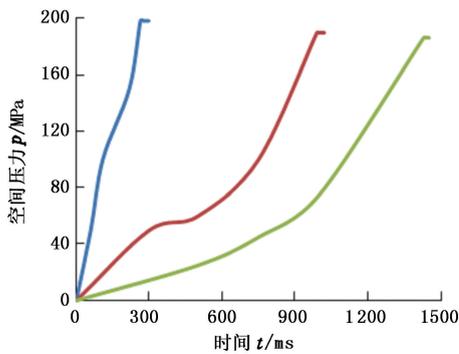


图3 3种火药密闭爆燃加载 $p-t$ 曲线

Fig.3 $p-t$ blasting loading curves for three kinds of powders in confined space

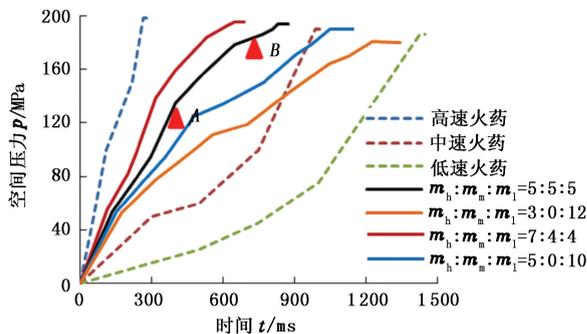


图4 串联相同质量3种火药爆燃加载 $p-t$ 曲线

Fig.4 $p-t$ blasting loading curves of cascade gunpowder with equal mass

由图4可以看出:①不同燃速火药组合后均呈现初始加载速率大、高压持续时间长的特点,如3种火药均为5 kg的 $p-t$ 曲线,明显分为3个阶段:A点前为快速加载阶段,此时3种火药同时燃烧,经过400 ms后高速火药爆燃完毕;随后加载速率降低,到达B点(652 ms)后中速火药爆燃完毕,加载速率进一步降低;B点之后低速火药燃烧,到876 ms后全部火药燃烧完毕;②复合组装火药较单一高速火药爆燃时间长,较单一低速火药爆燃时间短,这是由于不同火药组合燃爆,空间加载速率介于高低火药单独爆燃加载速率间,火药燃烧速度与环境压力成正比关系;③高速火药比例越大,初始加载越快,越容易破裂储层,而爆燃时间短,裂缝难以进一步延伸,高速火药比例越小,初始加载越慢,但爆燃时间则增长,可使裂缝得以充分延伸和拓展。

为提高爆燃压裂效果,既须快速加载达到高压破裂储层,又须尽量长时间地保持高压延伸拓展裂缝,而高低燃速火药组合恰好能满足这种需求,因此在进行装药量设计时,在确保破裂储层基础上,应尽

量减少高速火药量而增加低速火药量,以便既能产生高压破裂储层,又不至于峰值压力过高而损坏套管,同时又能有效增大裂缝长度和破裂规模,提高储层改造效果。

4 矿场应用

川西 WJ-2 井为一深层致密砂岩气井,前期对该井 3 550 ~ 3 560 m 段储层进行酸压预处理,起裂压力 85.5 MPa,施工压力 83 ~ 88 MPa,排量仅为 1.4 m³/min,且排液困难,表明油层未压开,作业失败。由此,对该井进行爆燃压裂预处理。

在实际燃爆压裂过程中,火药燃爆过程会伴随着孔眼泄流、裂缝起裂、裂缝延伸、裂缝壁面渗漏及上下压挡液柱的受冲击位移,这些物理过程均会对火药燃爆所处空间规模、系统压力等物理量产生影响,因此在实际耦合计算过程中应综合各系统表征模型,耦合求解。在该单井模拟设计过程中,基于文献已建有的燃爆压裂系统耦合模型^[6,12-16],将建立的火药燃烧过程模块替换原来的单级火药爆燃加载模块,然后进行以系统压力、温度为中间变量的逐步耦合迭代求解,可得到新的多级脉冲燃爆压裂的系统耦合模型及其求解技术。

基于上述模拟方法设计用高燃速火药 15 kg,低燃速火药 60 kg,合计两级脉冲压裂弹 75 kg,模拟该井底爆燃压力变化及裂缝延伸长度变化,结果如图5所示,可最终形成半缝长分别为 5.2 和 1.9 m 的两对 90°相位裂缝。

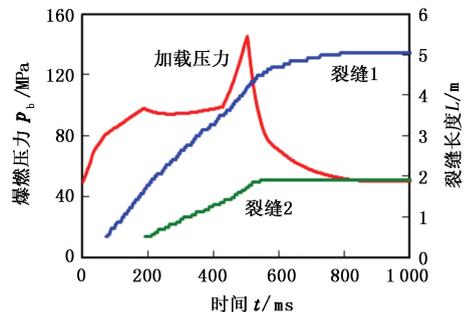


图5 爆燃压力和裂缝延伸动态预测曲线

Fig.5 Blasting pressure and fractures extension dynamic prediction curves

按设计药量对该层段进行燃爆、测试压裂,多级脉冲燃爆压裂前后测压得出:经过燃爆压裂后油井破裂压力从 85.5 MPa 降低到 71 MPa,且高能气体压裂后进行加砂压裂处理,施工压力约为 70 MPa,施工排量达 3 m³/min,且排液顺利,生产测试产气量达 5.6×10⁴ m³/d,措施效果明显。这表明在此次

设计的装药量下,燃爆压裂成功压裂油层,有效降低破裂压力,确保了后期措施的顺利进行。

5 结论及建议

(1)不同燃速火药串联组装、中心管同步点燃,既能规避同级火药延迟点火装置的不稳定性,又能产生多脉冲长时间有效持压,形成结构简单、稳定性高、安全性强的长时脉冲燃爆加载压裂。

(2)组装火药较单一高速火药爆燃时间长,较单一低速火药爆燃时间短,且高速火药比例越大,初始加载越快,但整体爆燃时间短;高速火药比例越小,初始加载越慢,但整体爆燃时间长。

(3)在确保初始快速火药爆燃加载制裂储层基础上,尽量减少高速火药量、增加低速火药量,以防止加载速率过快而致瞬间峰值压力过高破坏套管,同时又能长时有效持压,大规模延伸裂缝,提高改造效果。

(4)多级脉冲爆燃压裂是一个瞬态复杂过程,除火药爆燃加载外还包含压挡液柱运动、孔眼泄流、裂缝动载起裂及延伸等多个物理过程,故在后续研究中应改变加载模型的物理模型,综合考虑各物理过程对爆燃加载模型的影响和制约,以最终组建爆燃压裂全过程的耦合动力学模型。

参考文献:

- [1] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论[M]. 北京:石油工业出版社,2003:3-8.
- [2] 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.
- [3] 任山,黄禹忠,林永茂,等. 燃爆诱导及酸处理新技术在川西须家河气藏的应用[J]. 钻采工艺,2009,32(1):31-42.
REN Shan, HUANG Yuzhong, LIN Yongmao, et al. Application of propagated blast and acid treatment technology in Chuanxi Xujiahe gas reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2009,32(1):31-42.
- [4] 孟红霞,陈德春,潘志华,等. 爆燃压裂油井产能计算模型与增产效果分析[J]. 石油钻探技术,2012,40(6):62-66.
MENG Hongxia, CHEN Dechun, PAN Zhihua, et al. Productivity calculation models and stimulation ratio analysis for explosive fracturing wells[J]. Petroleum Drilling Tech-

niques, 2012,40(6):62-66.

- [5] 王安仕,秦发动. 高能气体压裂技术[M]. 西安:西北大学出版社,1998:98-134.
- [6] 吴飞鹏. 高能气体压裂过程动力学模型与工艺技术优化决策研究[D]. 青岛:中国石油大学石油工程学院,2009.
WU Feipeng. The kinetic model and the technology optimization of HEGF process[D]. Qingdao: School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2009.
- [7] 张续柱. 双基火药[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997:62-106.
- [8] 马庆云. 复合火药[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997:71-89.
- [9] 王克秀,李葆萱. 固体火箭推进剂及燃烧[M]. 北京:国防工业出版社,1983:3-26.
- [10] 张翠芳,陈炜,王中合,等. 硝酸酯增塑的叠氮胶粘剂研究进展[J]. 中国胶粘剂,2012,21(4):53-56.
ZHANG Cuifang, CHEN Wei, WANG Zhonghe, et al. Research progress of azide polymer adhesives plasticized by nitric acid ester[J]. China Adhesives, 2012, 21(4):53-56.
- [11] 李上文,赵凤起. 国外固体推进剂研究与开发的趋势[J]. 固体火箭技术,2002,25(2):36-42.
LI Shangwen, ZHAO Fengqi. Tendency of research and development for overseas solid propellants[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2002,25(2):36-42.
- [12] 吴飞鹏,蒲春生,陈德春,等. 高能气体压裂合理装药量的设计与应用[J]. 石油钻探技术,2009,37(1):80-82.
WU Feipeng, PU Chunsheng, CHEN Dechun, et al. Design and application of a reasonable charge of high-energy gas fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009,37(1):80-82.
- [13] 蒲春生,任山,吴飞鹏,等. 气井高能气体压裂裂缝系统动力学模型研究[J]. 武汉工业学院学报,2009,28(3):12-17.
PU Chunsheng, REN Shan, WU Feipeng, et al. The study on fracture system dynamics models of HEGF in gas wells[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2009,28(3):12-17.
- [14] 吴飞鹏,蒲春生,陈德春,等. 燃爆强加载条件下油井破裂压力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增2):3430-3434.
WU Feipeng, PU Chunsheng, CHEN Dechun, et al. Test study if oil well breakdown pressure under blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(sup 2):3430-3434.

- [15] 吴飞鹏,蒲春生,陈德春. 高能气体压裂载荷计算模型与合理药量确定方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(3):94-97.
WU Feipeng, PU Chunsheng, CHEN Dechun. Load calculation model and determination method of reasonable charge for high-energy gas fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(3):94-97.
- [16] 吴飞鹏,蒲春生,吴波. 燃爆压裂中压挡液柱运动规律的动力学模型[J]. 爆炸与冲击,2010,30(6):633-639.
WU Feipeng, PU Chunsheng, WU Bo. A dynamic model of the pressurized liquid column movement in the high energy gas fracturing process [J]. Explosion and Shock Waves,2010,30(6):633-639.
- [17] 吴飞鹏,蒲春生,陈德春,等. 多级脉冲爆燃压裂作用过程耦合模拟[J]. 石油勘探与开发,2014,45(5):605-611.
WU Feipeng, PU Chunsheng, CHEN Dechun, et al. Coupling simulation of multistage pulse conflagration compression fracturing [J]. Petroleum Exploration and Development,2014,45(5):605-611.

(编辑 李志芬)