DOI: 10.11883/bzycj-2016-0302 文章编号: 1001-1455(2018)03-0683-05

# 组合脉冲压裂加载过程耦合模拟及火药配比影响敏感性分析*

吴飞鹏,徐尔斯,刘 静,尉雪梅,蒲春生,任 扬
(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580)

**摘要**: 基于组合脉冲压裂物理过程,以三种燃速火药柱串联、中心管同步点燃方式,结合火药爆燃加载、压挡液柱运动、射孔孔眼泄流、裂缝起裂、高压气体裂缝内流动及裂缝扩展等子模型,组建多级爆燃压裂耦合模拟模型。并据此分析不同配比火药组合爆燃压裂时,井底压力变化及裂缝延伸情况。结果表明:不同燃速火药串联组合可实现一级火药快速爆燃,瞬间达到多方向射孔孔眼起裂压力,二、三级火药持续长时间燃烧维持高压以充分延伸裂缝的目的;在确定一级快速火药和总火药用量后,井底爆燃压力加载速率和各方向破裂压力均随第三级燃速火药质量比重的增加而呈现降低趋势,但变化不明显;而不同方向裂缝最终延伸长度对二、三级燃速火药的配比具有较强敏感性;在以多方向裂缝安全起裂为目标、设定一级燃速火药后,合理配比三种火药比单一配比高-中速、高-低速火药,可更有效地延长爆燃压裂过程的井底有效持压时间,从而可大幅扩展火药用量上限,提高爆燃压裂裂缝延伸规模。

**关键词**: 组合脉冲压裂;爆燃压裂;火药量配比;敏感性;加载过程耦合模拟
**中图分类号**: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

多级脉冲复合高能气体压裂技术[1]是通过串联不同燃速火药,来组合形成多级脉冲加载,以提高总火药用量、延长裂缝有效延伸时间、增强井筒爆燃压力控制程度的一种复合技术。该技术已被广泛应用在致密砂岩[2]、碳酸岩[3]、页岩[4]、煤层气储层[5]及地热储层[6]等多种岩性储层中。大多当前复合爆燃压裂实施过程中,简单地将双基火药、复合推进剂等成熟的火药压裂弹进行串联,采用同步点燃或延时点火器顺次点燃的方式实施。在火药选型配比、组合加载脉冲优化、裂缝扩展耦合模拟等方面,研究均相对薄弱,故该技术在参数设计上存在一定盲目性,措施效果稳定性欠佳。因此,本文中基于不同燃速火药串联、中心管同步点燃的装药结构,组建爆燃加载与裂缝扩展耦合模型,分析不同火药组合比例对复合多级脉冲压裂裂缝扩展的影响规律,探索以裂缝延伸尺度为指标的火药组合优化设计方法。

## 1 组合脉冲压裂耦合作用过程机理分析

如图 1 所示,组合多级脉冲压裂火药装药结构为中心点火管串联的多燃速火药柱,施工时整个火药柱串由中心管外侧同步点燃,逐层向外燃烧。所激发的高压脉冲,一方面迫使压裂弹上下部液柱运动,另一方面会通过射孔孔眼泄流入储层,破裂并延伸裂缝。由此,多级脉冲高能气体压裂是一个集多级火药同步燃烧、压挡液柱运动、孔眼泄流、裂缝起裂、高压气体裂缝内流动及裂缝动态延伸为一体的耦合过程。

其中,火药爆燃加载模拟模型可由火药与燃气间的质量守恒、能量守恒及火药燃速方程[7]组成。对于压挡液柱运动,可综合考虑爆燃压力对液柱冲击压缩作用、管柱摩阻作用及液柱自身的动能分布变化,采用拉格朗日微元分析方法,建立压挡液柱底面气液界面运动规律模型[8]。高能燃气在射孔孔眼中的泄流速度模型,可按压缩等截面一维定常流动理论推导建立[9]。假定裂缝均按射孔方位起裂,且起裂

* **收稿日期**: 2016-10-09; **修回日期**: 2017-01-17
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(51104173);国家科技重大专项(2011ZX05009-004);山东省自然科学基金项目(ZR2016EEQ04);中央高校基本科研业务费专项(17CX05004,18CX02095A)
**第一作者**: 吴飞鹏(1988— ),男,博士,副教授; **通信作者**: 刘 静,liujing4522009@163.com。

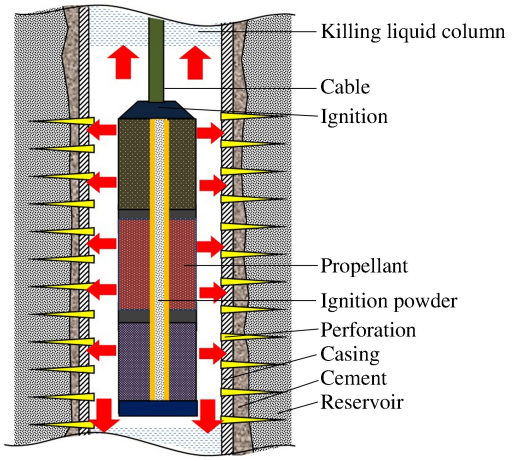



图 1 多级燃速火药压裂井下压裂弹结构示意图

Fig. 1 Schematic model of combined pulse fracturing structure

前射孔孔眼内的压力与井筒内压力保持一致，可由射孔井井周应力分布和高加载速率下岩石破裂强度动态试验回归模型来建立不同方向裂缝起裂判据[10]。若假定在瞬态加载条件下，裂缝一旦起裂便以 0.38 倍岩石纵波波速的恒定速率延伸[11]，进而可由裂缝内高压流体一维流动压力分布模型[12]、流体在裂缝壁面渗漏模型[13]、弹塑性岩石裂缝应力强度因子计算模型[18]和裂缝宽度模型[14]组合裂缝动态扩展耦合模型。

基于各子系统模型，以各子系统中压力、温度为主线变量，借助质量守恒和能量守恒，便可得出多级脉冲爆燃压裂全过程的耦合求解方法[15]。进而结合优配的三种燃速火药及其燃烧性质（见表 1），便可分析不同火药量组合下的裂缝动态延伸情况。本文模拟所用基础参数参见文献[15]。

**表 1 不同压力条件下三级燃速火药燃速方程**

**Table 1 Burning rate equations of three kinds of propellants under different pressures**

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

注：燃速方程中，$u$ 为燃速（km/s），$p$ 为压力（MPa）；高、中、低 3 种燃速火药的密度分别为 1.86、1.77、1.73 g/cm$^3$，燃烧能分别为 1 216、1 100.8、1 002.1 kJ。

## 2 三级火药配比设计及其对压裂效果影响敏感性分析

第一级快速火药主要用于快速起压以激发多方向裂缝起裂，同时其峰值压力又不能高于套管承压极限。因此合理装药量下的快速火药爆燃压力曲线应与油井各射孔方向破裂压力变化曲线相交，并始终处于套管极限内压曲线下方。由此得出，该井参数条件下，满足要求的一级火药质量范围为 12～68 kg。本文中选取一级火药为 30 kg，更改二、三级火药质量（见表 2），模拟爆燃压力随时间变化关系如

**表 2 不同燃速火药用量组合**

**Table 2 Combinations of three kinds of propellants**

| 组 | 火药用量/kg | | |
|---|---|---|---|
| | 高燃速火药 | 中燃速火药 | 低燃速火药 |
| 1 | 30 | 60 | 0 |
| 2 | 30 | 50 | 10 |
| 3 | 30 | 40 | 20 |
| 4 | 30 | 30 | 30 |
| 5 | 30 | 20 | 40 |
| 6 | 30 | 10 | 50 |
| 7 | 30 | 0 | 60 |

图 2 所示。随中、低燃速火药配比的不同，其井底爆燃压力变化规律差异较大，整体呈现出中速火药比重越大，随中、低燃速火药配比的不同，其井底爆燃压力变化规律差异较大，整体呈现出中速火药比重越大，后续压力越高，持压时间越短；由于一级快速火药均为 30 kg，各组合下自火药开始点燃到裂缝起裂（压力突降点）时间内（图 2 小框内压力变化曲线），各组合下压力-时间变化关系区别不大，整体上随低速火药比重加大，井筒内加载速率略为减小，对应起裂压力也略为降低，起裂时间稍延后。为提高裂缝延伸效果，井底压力既要保持较高水平又要尽可能延长爆燃加载时间，由此可选择表 2 中第 3、4、5 组作为施工药量组合。

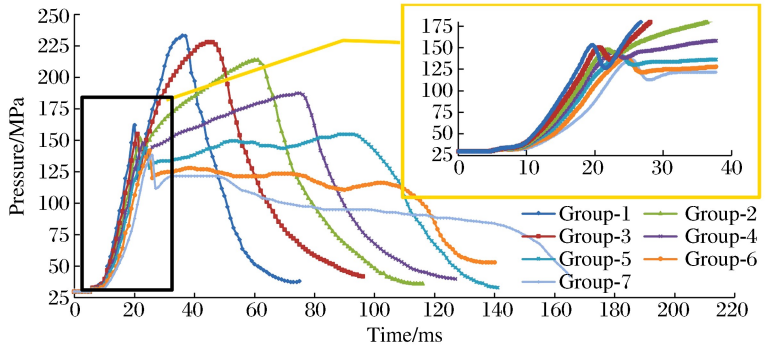



图 2　不同火药用量组合下燃爆加载曲线

Fig. 2　Loading curves in different combinations of three kinds of propellants

图 3 为表 2 中第 5 组火药组合下，井底爆燃压力与裂缝延伸长度的对应关系。燃爆过程可分为 4 个阶段。(1)初始加压阶段($t_a$ 时刻之前)：无裂缝起裂，系统唯一泄能因素为压挡液柱的受压运动，故井底燃气压力急速增大；(2)低延伸压力裂缝起裂延伸阶段($t_a$～$t_b$)：当井底压力在最大主应力方向达到射孔孔眼起裂压力时，裂缝起裂，并以非连续方式延伸，此时系统泄能速率仍小于火药爆燃的能量释放速率，井底压力持续稳定上升，但其升压速率明显较裂缝开裂前趋缓；(3)高延伸压力裂缝起裂延伸阶段($t_b$～$t_c$)：当井底燃气压力达到高破裂方向裂缝起裂压力时，所有方向裂缝开始同步延伸，而后由于裂缝扩展所耗散能量速率超过了火药爆燃所释放的能量速率，井底爆燃压力略有下降；随后由于能量的产生和泄放达到平衡，压力趋于稳定，裂缝延伸等效速率逐渐减小；(4)裂缝止裂阶段($t_c$ 时刻后)：当火药燃烧完全后，井筒内燃气压力急速下降，裂缝陆续止裂，随后在液柱运动和散热作用下，井底压力最终趋于初始压力水平，高能气体压裂过程结束。

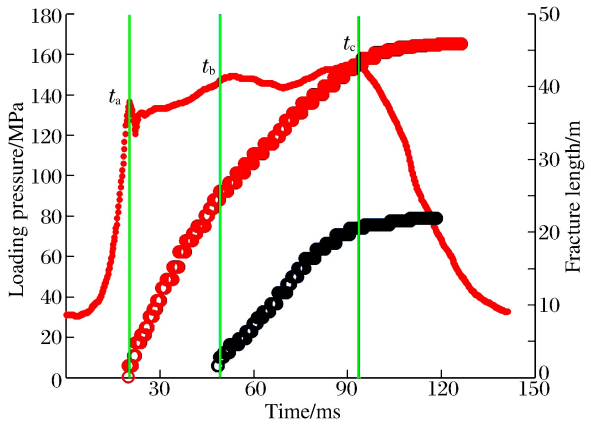



图 3　第 5 组燃爆过程爆燃压力与裂缝动态扩展曲线

Fig. 3　Deflagration pressure and dynamic expansion of fractures of the fifth combination

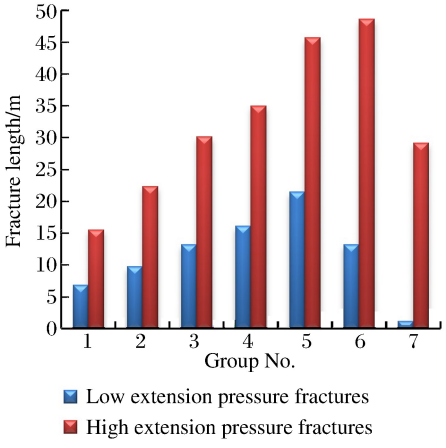



图 4　各组合方案下裂缝最终延伸长度

Fig. 4　Final lengths of fractures of all the propellants combinations

图 4 为表 2 所示的火药组合下,模拟计算最大、最小主应力方向爆燃裂缝的最终延伸长度。结果表明:随着低速火药比例增大,两个方向裂缝最终延伸长度均呈现先增大后减小趋势;大比例中速火药利于最小应力方向裂起裂延伸,大比例低速火药利于最大主应力方向裂缝延伸;在高速火药一定的情况下,合理混合中、低速火药达到的多方向裂缝延伸效果,要明显优于单一组分的中速或低速火药情形,如:第 5 组下两方向裂缝最终长度较单独使用高-中速火药延长 30.14 和 14.66 m,较单独使用高-低速火药延长 16.53 和 20.28 m。

## 3 结 论

(1) 组合脉冲压裂多方向裂缝起裂延伸过程中,多方向裂缝按其起裂压力由小到大顺序依次被启裂,起裂后将以非连续方式延伸,即当达到裂缝起裂临界因子时裂缝将以恒定速度延伸,反之则裂纹停止生长;随火药燃烧完全后,井筒内压迅速降低,多方向裂缝又以与起裂顺序相反的次序先后止裂。也就是说,如何更长时间维持高于裂缝延伸压力时间是提高裂缝规模的关键。因此,在按裂缝起裂为标准设定一级燃速火药后,需要合理设置中、低速火药配比,以有效维持井底压力在各方向裂缝延伸压力略高的水平,从而使裂缝充分延伸的同时又不会导致井底压力过高而致使火药燃烧过快。

(2) 高燃速火药配合中、低燃速火药使用,较单一中燃速或低燃速火药与高速火药配合,能更有效提高该合理延伸压力维持的可操作性,并可大幅度提高多方向裂缝的延伸规模。

## 参考文献:


[1] 蒲春生,孙志宇,王香增,等. 多级脉冲气体加载压裂技术[J]. 石油勘探与开发,2008,35(5):636-639.
PU Chunsheng, SUN Zhiyu, WANG Xiangzeng, et al. Technique of multi-pulse gas load fracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,35(5):636-639.

[2] BOSCAN J, ALMANZA E, FOLSE K, et al. Propellant perforation breakdown technique: eastern Venezuela field application[C]// SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific. Kuala Lumpur, Malaysia, 2003.

[3] RAMIREZ J, BARRERA J, ROMERO R. Propellant assisted perforating in high-pressure and temperature wells at Campo Bosque in Northern Monagas State[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, 2001.

[4] GUO B, SHAN J, FENG Y. Productivity of blast-fractured wells in liquid-rich shale gas formations[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014(18):360-367.

[5] ZHU W C, GAI D, WEI C H, et al. High-pressure air blasting experiments on concrete and implications for enhanced coal gas drainage[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016,36:1253-1263.

[6] GRUBELICH M C, KING D, KNUDSEN S, et al. An overview of a high energy stimulation technique for geothermal applications[C]// Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne Australia, 2015.

[7] 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(华东),2009:13-20.

[8] 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):633-641.
WU Feipeng, PU Chunsheng, WU Bo. A dynamic model of the pressurized liquid column movement[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(6):633-641.

[9] CUDERMAN J F. Tailored-pulse fracturing in cased and perforated bore-holes[C]// Tailored-Pulse Fracturing in Cased and Perforated Bore-Holes. Louisville, Kentucky, 1986.

[10] 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(增刊 2):3430-3434.
WU Feipeng, PU Chunsheng, CHEN Dechun. Test study of oil well breakdown pressure under blasting loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(suppl 2):3430-3434.

[11] 卢文波,陶振宇. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究[J]. 爆炸与冲击,1994,14(3):264-267.
LU Wenbo, TAO Zhenyu. A study of fracture propagation velocity driven by gas of explosion on products[J].

Explosion and Shock Waves, 1994,14(3):264-267.

[12] NILSON R H, PROFFER W J, DUFF R E. Modeling of gas driven fractures induced by propellant combustion within a borehole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985,22(1):3-19.

[13] GEERTSMA J. Estimating the coefficient of inertial resistance in fluid flow through porous media[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1974(10):445-450.

[14] GEORGE E, ZACHARIAS A, ELEFTHERIOS L. Effect the fracture process zone in directed crack propagation in borehole blasting[C]// Rock Mechanics in Petroleum Engineering. Delft, Netherlands, 1994.

[15] WU F, PU C, CHEN D, et al. Coupling simulation of multistage pulse conflagration compression fracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(5):663-670.

# Coupled loading simulation for combined pulse fracturing and the sensitivity analysis of different propellant ratios

WU Feipeng, XU Ersi, LIU Jing, WEI Xuemei,
PU Chunsheng, REN Yang
(*College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao* 266580, *Shandong, China*)

**Abstract**: In the present study, based on the physical process of combined pulse fracturing, we proposed a model for the coupling of the whole process of multi-pulse conflagration fracturing using different combinations of the multi-level pulse propellant conflagration loading model, the pressurized liquid column movement model, the perforation discharge model, the fracture initiation and the fracture dynamic extension model. Furthermore, we analyzed the wellbore pressure changes and the fractures propagation under single and combined propellants at different ratios. The calculated results demonstrated that fast deflagration fracturing could be initiated using combinations of the first-phase propellants with different burning rates and the multi-directional wellbore pressure was reached at once; a longer burning time of the propellant might be held to maintain the high pressure for the full extension of the fracture, using the second- and the third-phase propellants; when the amount of the first-phase propellants and the total amount of the propellants were determined, the deflagration loading rate and the multi-directional fracture initiation pressure tended to decrease slightly as the lowest burning rate of the third-phrase propellant's proportion rose up, though not obviously; the eventual extension lengths of the fracture in different directions were, however, very sensitive to the proportion of the second- and third-phase propellants. These results improved our understanding of the coupling mechanism of the combined pulse fracturing, and might be used to optimize the mass ratio of propellants.

**Keywords**: combined pulse fracturing; deflagration fracturing; mass ratio of propellants; sensibility; coupled loading simulation

（责任编辑　王小飞）