

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.005

高能气体压裂过程中压井液运动计算模型研究^{*}

赵 旭

中国石化石油工程技术研究院(北京,100101)

[摘 要] 针对压井液运动对高能气体压裂作用效果影响较大、现有技术对压井液运动过程研究不足的问题,开展了高能气体压裂过程中压井液运动特性及作用效果研究。按照压井液在高压气体压裂作用过程中的运动过程,分别建立了压井液运动流体压缩阶段、刚体运动阶段及压井液运动能量损耗计算模型;在此基础上,通过计算实例对高能气体压裂过程中的压井液运动及作用效果进行了进一步的分析。结果表明,所建立的描述高能气体压裂过程中压裂火药燃烧时间内的压井液运动计算模型具有较好的合理性和适用性,可以应用到现有的复合射孔高能气体压裂理论计算模型体系中。

[关键词] 高能气体压裂;压井液;理论分析;计算模型;计算实例

[分类号] TE257.1

Modeling of Controlling Fluid Movement during High-energy Gas Fracturing

ZHAO Xu

Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering (Beijing, 100101)

[ABSTRACT] Characterization on the movement of controlling fluid and its influence on the effectiveness of high-energy gas fracturing (HEGF) were studied. Based on the movement features of control fluid displayed during the gas-liquid interaction in HEGF, calculation models were established for fluid compression stage, rigid motion stage, and energy loss of control liquid motion, respectively. The movement and effect control fluid in the process of HEGF were further analyzed through calculation examples. Results show that the established model describing the control fluid movement during the combustion time of fracturing propellant in HEGF has good rationality, stability and applicability, and can be applied to the existing theoretical calculation model system of HEGF with composite perforation.

[KEYWORDS] high-energy gas fracturing (HEGF); control fluid; theoretical analysis; calculation model; calculation examples

引言

复合射孔技术是国内外油田新井和老井的重要辅助增产措施之一。该项技术巧妙地应用了炸药和火药爆速不同的特性,将用于射孔的射孔弹(内部装药为炸药)和用于压裂的固体推进剂(内部装药为火药)两种性质完全不同的高能量爆炸物同时引爆,在油气层产生射孔孔道;而固体推进剂在25~50 ms 有时甚至达到1 s 多的时间后才燃烧完毕,同时释放大 量高温、高压气体,并作用于上述射孔弹道,使其进一步加深,形成裂缝型深穿透孔道。这有

效地改善了井筒周围地层的渗透性,更好地实现了井筒与地层的理想沟通,消除了普通射孔对地层的二次污染;而且对射孔压实带进行有效解堵,使地层的流通性更好,最终达到油气井增产的目的^[1-3]。

近年来,随着页岩气、致密气等非常规储层开发的深入发展,开采难度不断增加,对复合射孔过程中的高能气体压裂效果的要求越来越高。为了追求更好的开发效果和更大的经济效益,高能气体压裂作用机理的研究得到了越来越多的重视^[4-5]。

高能气体压裂过程中,压井液的运动是影响井底高能气体压裂作用效果的重要因素,影响着高能气体对储层的压裂作用效果。为了获得较长的压裂

^{*} 收稿日期:2019-04-23

基金项目:国家科技重大专项课题,海相碳酸盐岩超深油气井关键工程技术(2017ZX05005-005);中石化科技部推广项目,自适应调流控水完井技术推广与工业化应用(P16117)

第一作者:赵旭(1981-),男,高工,主要从事井筒内复杂流动与控制、现代完井工程方面的研究。E-mail:zhaoxu46@163.com

时间和较高的压裂峰值压力,充分利用压裂火药燃烧产生的高能气体能量,需要对压井液的运动过程进行更为准确的描述^[6-7]。目前,国内对于高能气体压裂技术的研究主要集中在高能气体压裂的火药设计和压裂裂缝分析方面。张飞等^[8]对高能气体压裂的爆燃气体压力模型进行了优化;李海涛等^[9]对爆燃气体压裂裂缝的起裂及扩展进行了更为全面的研究。然而,对于上部压井液运动计算模型的研究文献相对较少,研究进展相对缓慢,现有的理论模型对上部压井液运动的描述还很不完善,需要进行深入的研究。

1 高能气体压裂的作用过程

在高压气体压裂过程中,上部压井液的运动过程是一个气液混相流动的复杂过程^[4]:压裂火药被点燃后,根据火药燃烧方式和布置方式的不同,压裂火药开始逐层燃烧,燃烧生成的高能气体迅速膨胀,压缩液体并推动压井液上移,同时压裂地层。水是通过自身的压缩性来体现和传播水的压强的;因此,在压井液体中,压力波所到之处的流体被压缩,而未到之处的流体不受影响。随着压裂火药的进一步燃烧,爆生气体的体积不断增大;当火药燃烧结束后,底部高能气体的能量迅速散失,燃烧产生的爆生气体开始进入到在压井液中的运动、变形及发展阶段。

高能气体压裂过程中,压裂火药的爆燃是在几千米深的压井液下进行的。根据爆燃理论,水下爆燃的流体主要有易流性、可压缩性和导热性 3 种性质^[10-11]。

2 压井液运动的计算模型

2.1 压井液运动模型

压裂火药燃烧的时间最长可以达到十几秒;因此,按照压井液运动状态的变化把压井液运动分为流体压缩和刚体运动两个阶段,分别建立计算模型^[12-13]。

2.1.1 流体压缩阶段

根据流体力学,受压缩流体的体积压缩系数为

$$C_p = \frac{-dV}{V dp} \quad (1)$$

式中: C_p 为体积压缩系数; V 为任意时刻 dt 时间内被压缩液体的原始体积, m^3 ; dV 为任意时刻 dt 时间内被压缩液体的体积, m^3 。

另有

$$V = c \cdot dt \cdot A \quad (2)$$

式中: c 是水击波的传播速度,即声波在液体中传播的速度;一般取 $1\,435\text{ m/s}$; A 为井筒截面积。

在 dt 时间内作用在压缩液体上的力为井下高能气体的压力与上方压井液的静压力的差值,则有公式

$$dp = \Delta p = p_a + \rho g(H_0 - ct) - p(t) \quad (3)$$

式中: p_a 为当地大气压, Pa ; $p(t)$ 为井底高能气体压力, Pa ; ρ 为压井液体的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; H_0 为压井液高度, m 。

考虑井筒中压井液的受力方式,忽略压井液截面的变化,将式(3)结合式(2)代入式(1),整理可得

$$v_0 = C_p \cdot c \{p(t) - [p_a + \rho g(H_0 - ct)]\} \quad (4)$$

式中: v_0 为压井液压缩速度, m/s 。

2.1.2 刚体运动阶段

设向上移动的液体的总长度为 H ,液柱质量中心的速度为 v ,气液作用过程中高能气体压力为 $p(t)$ 。根据动量守恒,得到

$$\frac{d(Mv)}{dt} = [p(t) - p_a]A - Mg - f \quad (5)$$

式中: $M = \rho HA$,为投入运动的液体质量, kg ; A 为井筒截面积, m^2 ; H 为压井液高度, m ; f 为运动液体在模拟管道中运动所受的黏滞阻力。

根据流体力学知识,可以得到

$$f = \lambda \frac{H}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\lambda \pi D H \rho v^2}{8} \quad (6)$$

把式(6)代入式(5),整理可得

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p(t) - p_a}{\rho H} - g - \frac{\lambda v^2}{2D} \quad (7)$$

式中: v 为液柱质量中心的运动速度, m/s ; D 为井筒内径, m ; λ 为沿程水力摩阻系数,井筒内表面粗糙度决定,可取 $0.000\,8$ 。

2.2 压井液的基本物性参数

油田的现场,高能气体压裂过程中所用到的压井液可能是地表水,也有可能是由较深地层抽出的地下水,并且在顶替泥浆的过程中,有少部分的泥浆混入到压井液中增加压井液体的矿化度。因此,针对现场的具体施工情况,有必要对计算模型中所涉及的压井液基本物性参数进行调整,正确使用压井液的基本物性参数,提高模型的计算精度^[14-15]。

2.2.1 矿化水密度

矿化水密度的计算公式为

$$\rho_{wb} = (1.083\,886 - 5.105\,46 \times 10^{-4}t - 0.306\,254 \times 10^{-5}t^2) \times 10^3 \quad (8)$$

式中: ρ_{wb} 为矿化水密度, kg/m^3 ; t 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.2 压缩系数

脱气水的等温压缩系数为

$$C_{wf} = 145.03 \times 10^{-6} (A + B\theta + C\theta^2) \quad (9)$$

式中: C_{wf} 为脱气水的等温压缩系数, $1/\text{MPa}$; $A = 3.8546 - 1.9434 \times 10^{-2}$; $B = -0.0105 + 6.9179 \times 10^{-5} p$; $C = 3.9267 \times 10^{-5} - 1.2763 \times 10^{-7} p$; $\theta = 1.8t + 32$ 。

饱和水的等温压缩系数为

$$C_{wg} = C_{wf} (1 + 5 \times 10^{-2} R_{sw}) \quad (10)$$

式中: C_{wg} 为饱和水的等温压缩系数, $1/\text{MPa}$; R_{sw} 为溶解度, mg/L 。

2.2.3 矿化度校正参数

利用矿化度校正系数对脱气水或饱和水等温压缩系数进行校正:

$$C_{wb} = C_{wg} S_c \quad (11)$$

式中: C_{wb} 为校正后的等温压缩系数, $1/\text{MPa}$; S_c 为矿化度校正系数, $S_c = (-0.052 + 2.7 \times 10^{-4} \theta - 1.14 \times 10^{-6} \theta^2 + 1.121 \times 10^{-9} \theta^3) S^{0.7} + 1$; S 为水的矿化度,%。

2.2.4 油田水黏度

油田水的黏度主要取决于油藏温度、油田水矿化度和天然气溶解度。地层压力的影响很小,可以忽略。

$$\mu_w = e^{(1.003 - 1.479 \times 10^{-2} \theta + 1.982 \times 10^{-5} \theta^2)} \quad (12)$$

式中: μ_w 为油田水的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

2.3 压井液运动能量损耗模型

高能气体压裂过程中,损耗在压井液上能量的合理计算是研究压井液运动的核心内容。目前,各种复合射孔器研制的最终目的都是要尽可能把火药燃烧产生的能量作用于地层。但是,确定损耗在压井液上的能量,首先就要合理地解释压井液的运动状态。根据上面建立的描述高能气体压裂过程中压井液运动的计算模型,在火药燃烧时间内,上部压井液处于压缩时段内的作用能量为^[16]

$$T = \int_0^t \{ p(t) - [p_a + \rho g (H_0 - ct)] \} \cdot A \cdot v_0 \cdot dt \quad (13)$$

井底高能气体驱动压井液的整体提升的时段内所做的功为^[16]

$$W = \int_0^t [p(t) - p_a] \cdot A \cdot v \cdot dt \quad (14)$$

则有在高压气体压裂过程中火药燃烧的时间内,上部压井液运动消耗的能量为

$$E_0 = T + W \quad (15)$$

在压裂弹燃烧过程中,火药燃烧过程是绝热的,与室壁没有热交换。因为压裂弹燃烧时间极短,在这极短的燃烧时间内,释放出大量的能量,来不及与外界热量进行交换,或即使有能量交换也很少,可以忽略不计。由火药、炸药理论可知,压裂弹爆燃产生的总能量为

$$E = \frac{\chi f M}{\gamma - 1} \quad (16)$$

式中: γ 为绝热指数; f 为火药力, J/kg ; M 为压裂火药质量, kg ; χ 为火药力修正系数。 χ 的大小与压裂弹的结构及井壁有关,且在压裂弹燃烧过程中应是变化的;但由于散热损失只占火药能量的极小一部分,其变化对结果影响不大;因而对某个确定的压裂弹而言,可认为是常数,一般 $\chi = 0.90 \sim 0.95$ 。

3 实例计算与分析

新疆油田某投产井,采用复合射孔作业进行增产,复合射孔器孔密度为16孔/m,井型为直井,完井井段为1423.84~1541.10m,储层破裂压力为23MPa,岩石的泊松比为0.2,岩石的杨氏弹性模量为43GPa,套管的直径为124.3mm,压裂火药为中空无壳弹,火药密度为1610 kg/m^3 ,压裂火药的质量为31.6kg,火药力为999992J/kg,绝热指数为1.17,施工中采用清水压井,压井液灌满整个井筒,压井液音速为1500m/s,分析计算结果如图1~图3所示。

图1显示的是用常规模型^[17]和本文中的高能气体压裂计算模型得出的压力随时间的变化情况。由图1可以看出,压力-时间曲线大致是先上升、后下降的趋势,上升段很陡,到达峰值压力后又快速地下降,降到破裂压力附近时又平缓下来。压力随时间的这种变化趋势与实际井下的高能气体压裂过程中作用层位的压力随时间的变化规律是基本一致

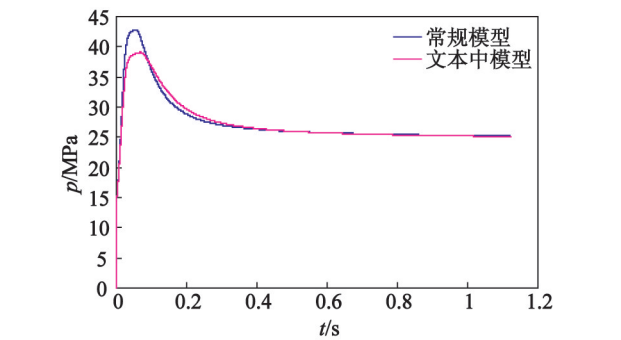


图1 压力随时间变化对比关系

Fig.1 Relationship between pressure and time

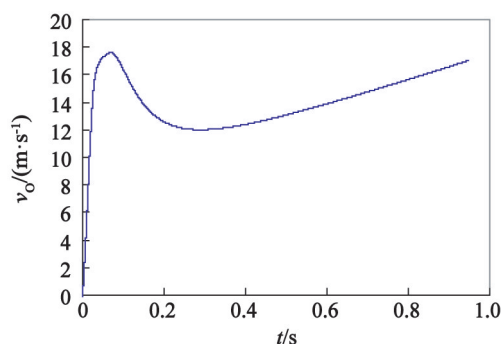


图 2 压井液压缩阶段速度与时间的关系

Fig. 2 Relationship between pelocity and time at fluid compression stage of control fluid

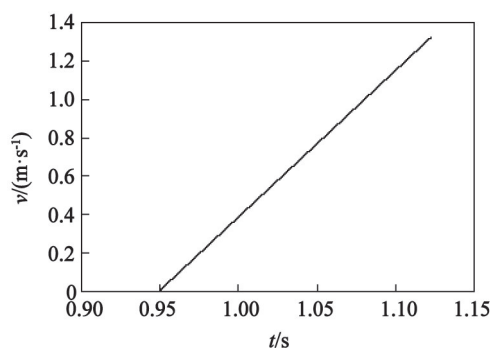


图 3 压井液刚体运动阶段速度与时间的关系

Fig. 3 Relationship between velocity and time at rigidmotion stage of control fluid

的。对比发现,图 1 中两条曲线的变化规律基本相同。在压裂火药开始爆燃的初级阶段,两个计算方法所算出的压力提升曲线基本重合;只是在进入到峰值压力附近的区域后,两条曲线变化有了一定的偏差。用常规模型计算出的峰值压力为 42.78 MPa;而用建立的压井液运动模型修正过的高能气体压裂理论计算模型计算出的峰值压力为 39.08 MPa。在压力下降段,修正模型所计算出的压力要稍高于常规模型的结果;相比之下,常规模型压力下降曲线的变化较为缓和。在压力变化的最后阶段,两条曲线的变化又趋于一致。

通过以上的对比分析可以看出,新建立的压井液运动模型对原有的高能气体压裂理论计算模型有一定的修正作用。通过其修正的高能气体压裂理论模型所计算出的压力随时间的变化及走向完全在合理的范围内。

图 2 是用前面建立的压井液运动计算模型所计算出的压井液压缩阶段速度随时间的变化。与之相对应的图 3 是用建立的压井液运动计算模型所计算出的压井液刚体运动阶段速度与时间的关系。

可以看到,压井液刚体运动阶段的速度变化是较为简单的直线关系;而压井液的压缩阶段速度的变化与底部气体压力的变化基本一致。

由图 2 可以看出,压井液的压缩速度在起始阶段提升很快,在很短的时间内就达到了速度峰值 (17.63 m/s),随后伴着高能气体压力的快速下降,压井液压缩速度快速下降。但随后速度变化在稳定一段时间后又开始了抬升,这是因为在底部高能气体作用的最后阶段,高能气体压力变化不大,但伴随着压力波的快速向上传播,将要被压缩的液体单元的上覆压力在快速地减小,这样,作用在其上面的压力相对增大;因此,在气液作用的最后阶段压井液的压缩速度有所提升。

根据所建立模型式(4)和式(7)的计算结果(图 2 和图 3 中显示),通过微分乘积计算可进一步得到,压裂火药的燃烧时间为 1.122 3 s。其中,压井液被压缩阶段为 0.949 1 s,被压缩了 13.307 m;在压裂火药燃烧的时间段内压井液刚体上移时间为 0.173 2 s,压井液被整体抬升了 0.114 m;压井液为井底的高能气体提供的空间高度为 13.421 m。可见在这个实例计算中,压裂火药燃烧的时间里,压井液大部分时间是在进行压缩,为井底高能气体提供的大部分空间是由上部压井液自身压缩提供的。

通过式(13)~式(16),可计算出压井液运动在火药燃烧时间内损耗的能量约为 3 546.5 kJ,约占压裂火药燃烧生成总能量的 2.12%。由于高能气体压裂作用的时间较长,压井液运动消耗的能量计算值较为合理。

通过以上的分析能够得出,在所建立的描述高能气体压裂过程中,压裂火药燃烧时间内的压井液运动模型具有较好的合理性、稳定性和适用性,可以应用到现有的高能气体压裂理论计算模型体系中。

4 结论

1)综合前人的研究结果及相关理论,对油田井筒内在底部高能气体作用下的压井液单相瞬变流动时的压力、速度分布进行了研究。根据质量、动量守恒定律,建立了考虑多因素的描述压井液运动的计算模型,并以此为基础,建立了压井液运动的能量损耗模型。

2)通过新建立的压井液运动计算模型得出,压井液的运动导致了高能气体压裂作用空间的增大,降低了高能气体压裂的峰值压力,但对后续的稳定阶段的压降影响相对较小。

3)所建立的压井液能量损耗模型,给出了高能气体压裂过程中上部压井液运动过程中的能量损耗,这对进一步提高高能气体压裂能量利用率、合理设计压井液高度、提高压裂效果具有重要的意义,为复合射孔设计和施工应用提供了理论基础。

参考文献

- [1] 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 X B, LIU H, WANG B X, et al. Review of propellant perforation techniques[J]. Explosive Materials, 2007, 36(5): 29-32.
- [2] 杨坤,于江. 多脉冲复合射孔器研制与应用[J]. 石油管材与仪器,2018,4(3):15-17,21.
YANG K, YU J. Development and application of multi-pulse compound perforator[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2018, 4(3): 15-17, 21.
- [3] 王海东,孙新波. 国内外射孔技术发展综述[J]. 爆破器材,2006,35(3):33-36.
WANG H D, SUN X B. A summary of perforating technology development inside and outside of China[J]. Explosive Materials, 2006, 35(3): 33-36.
- [4] 卢刚,杨晓莉,史雪枝. 川西地区复合射孔优化设计研究[J]. 测井技术,2018,42(4):484-488.
LU G, YANG X L, SHI X Z. Optimaization design of composite perforation in western Sichuan[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(4): 484-488.
- [5] 练章华,丁士东,赵旭,等. 元坝气井射孔完井近井壁渗流场分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 36(6):173-180.
LIAN Z H, DING S D, ZHAO X, et al. Analysis of the fluid flow field near wellbore wall of gas-well perforated completion in Yuanba[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 36(6): 173-180.
- [6] 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 K M. High power, multiplex perforation techniques and its prospect[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(3): 72-74.
- [7] YANG W Y, ZHOU C H, QIN F D, et al. High-energy gas fracturing (HEGF) technology: research and application[C]//European Petroleum Conference. Cannes, France, 1992.
- [8] 张飞,贾居红,蔡薇. 复合射孔器爆燃气体压力计算模型[J]. 兵工自动化,2016, 35(12): 41-44.
ZHANG F, JIA J H, CAI W. Calculation model for detonation gas pressure in compound perforation[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(12): 41-44.
- [9] 李海涛,罗伟,姜雨省,等. 复合射孔爆燃气体压裂裂缝起裂扩展研究[J]. 爆炸与冲击,2014,34(3):307-314.
LI H T, LUO W, JIANG Y S, et al. Initiation and extension of gas-driven fracture during compound perforation[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 307-314.
- [10] 梁龙河. 水下爆炸特性的数值研究[D]. 北京:应用物理与计算数学研究所,2001.
- [11] 贺礼清. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社, 2004:21-87.
- [12] 赵旭,柳贡慧. 复合射孔上部压井液运动理论模型研究[J]. 钻井液与完井液,2008,25(3):7-9,21.
- [13] 李文勋. 水力学中的微分方程及其应用[M]. 韩祖恒,郑开琪,译. 上海:上海科学技术出版社,1972: 162-170.
- [14] 于洋,任锋玥. 封隔器在复合射孔中的应用[J]. 西安科技大学学报,2007,27(3):423-426.
YU Y, REN F Y. Application of packer in fracture perforating[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(3): 423-426.
- [15] 汪志明,崔海清,何光渝. 流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,2006:75-142.
- [16] 恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京:国防工业出版社,2005:219-257.
- [17] 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.