

破碎燃烧无壳高能气体压裂弹 的作用研究

王宁飞 李旭利 崔跟尚 臧学锋 陈强 王大安

(西安近代化学研究所,西安 710065)

摘要 简要介绍了破碎燃烧无壳高能气体压裂弹的结构及设计原理,分析了高压气区长度及中心最大压力的计算方法,研究了井筒内压力分布及过程,讨论了压裂有效区域及裂缝延伸规律,提出了选井选层原则。

关键词 固体推进剂 燃烧 压裂 油井激励

1 引言

为了寻找油气井增产的方法,人们利用物理、化学等学科的研究成果,一直在不懈地努力。油井压裂就是其中的一种有效措施,它可以使油层的物理结构和物理化学性质发生变化,在含油岩层形成高渗透能力的裂缝,改善原油在岩层中的流动状况,降低流动阻力,使油井增产。

高能气体压裂是国际上近二十年来兴起的一种新型增产技术^[1],它可分为有壳压裂与无壳压裂。有壳压裂弹已在我国各个油田获得应用,但在使用过程中已暴露出其不可避免的缺陷:①施工工艺复杂;②偶尔出现掉弹、钢壳鼓胀卡住井壁无法打捞;③装药量少;④装药在高温下易自燃,不适宜做深井压裂。

无壳压裂弹以独联体的产品为代表,我国近几年来也开始仿制、研究使用,这种压裂弹施工工艺简单,可以克服有壳压裂弹的缺陷。但独联体产品的最大缺点是升压速度太慢,能量利用率低,很难在井下形成多条裂缝,只有通过增大装药量才能达到增产目的。

最新研制的破碎燃烧无壳高能气体压裂弹(CCCF)^[2],集有壳及无壳压裂弹的优点于一身,即压力加载速度快,可形成多裂缝,施工工艺简单、安全可靠、耐高温性能好,能用于中浅井压裂,更适用于深井压裂。

破碎燃烧高能气体压裂弹用电缆布弹,磁定位器准确定位压裂井段,点火系统保证中心管内装药在2ms以内同时点火燃烧,建立起高压以后使推进剂按预先设计的方式撕裂,并同时点燃,在井筒周围迅速建立起高压区,使岩石产生3~8条初始裂缝^[3]。主装药由速燃药和缓燃药组成,速燃药迅速补充初始裂缝所需的能量以及热损失,而缓燃药则提供延缝所需能量,保证延缝时间及裂缝长度。压裂弹分节装药、运输、贮存,现场装配布弹,施工工艺非常简单。

破碎燃烧无壳高能气体压裂技术提出并实施两年多以来,已在华北、辽河、胜利等油田实施 300 余井次的压裂施工,施工工艺可靠性 100%,压裂效果十分明显,增产率 80% 以上,明显增产率 70% 以上,经济效益增加超过亿元^[2],目前正在各油田推广使用,应用前景十分广阔。

破碎燃烧高能气体压裂是一门全新的技术,对其燃烧过程、井筒内压力建立及对岩石作用、开缝等机理的研究有着很重要的意义。

2 破碎燃烧无壳高能气体压裂弹的燃烧特性

为了施工方便,提高压裂弹的可靠性,国内外都推崇可燃壳体压裂弹,我们研制的压裂弹也采用可燃壳体,它是用可燃纸加防水胶挤压成形,壳体壁厚仅 2mm,以确保壳体燃尽,无残留物。但此薄壁耐压能力很有限,若用装药燃面变化控制燃烧规律和工作时间很难实现,弹体在深井中可能会被压碎,造成失误,因此,破碎燃烧无壳高能气体压裂弹采用密实装药。整体浇铸的装药结构适用于各种井深的施工,保证不会压碎漏水;避免部分装药燃烧不完全,而且装药量大大增加,能提高推进剂的燃烧效率。

若要在井筒周围产生 3~8 条径向裂缝,有效地消除近井带污染,初始压力峰的建立时间应小于 5ms。为了保证井筒周围在 5ms 内建立起峰值压力,使岩层起裂,CCCF 采用中心装药极快速燃烧结构。这可使其几乎同时燃烧并且在 2ms 以内产生大量气体,首先在药柱中心管中建立高压中心,高压气体作用于装药使其按预定规律撕裂,冲入井筒周围,在 5ms 内建立起足以使岩石破裂的压力,产生多条初始裂缝。高温燃气同时点燃主装药撕裂面,使主装药开始燃烧。

燃烧时间取决于井筒压力、装药燃烧厚度等。装药燃烧厚度用预制破碎方式来保证。实践表明压裂弹的工作时间随井深及其它条件的不同而在 500~1400ms 之间变化^[2]。

由图 1 所示 CCCF 典型井下 $p-t$ 曲线可以看出,CCCF 压力建立很快,但作用时间长达 1400ms,与设计方案相符。

推进剂燃烧后在井筒中产生的最大高压气区长度可用(1)式进行近似计算,它是施工设计很重要的参数。

$$L_g = \frac{m}{\frac{\pi}{4} d^2 \cdot \rho_g} \quad (1)$$

式中, L_g 为最大高压气区长度, m; m 为装药量, kg; d 为套管内径, m; ρ_g 为气体密度, kg/m^3 。

根据理想气体状态方程,气体密度可按(2)式计算:

$$\rho_g = \frac{p}{RT_g} \quad (2)$$

式中, p 为井筒压力, MPa; T_g 为燃气温度, K; R 为气体常数。将其代入(1)式得:

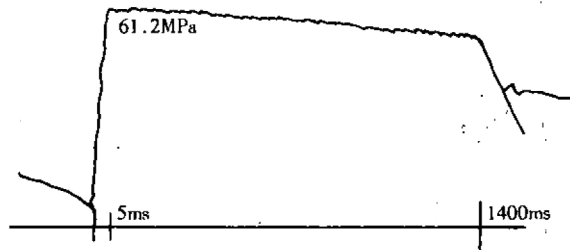


图 1 CCCF 的典型井下 $p-t$ 曲线(井深 1350m)
Fig.1 A typical $p-t$ curve of CCCF (well depth: 1350m)

$$L_g = \frac{4mRT_g}{\pi d^2 p} \quad (3)$$

对 CCCF 典型装药结构, $m = 35\text{kg}$, $T_g = 2700\text{K}$ (考虑热损失后)。当套管内径为 124mm, 井深为 2500m, p 为 80MPa 时, L_g 约为 25.9m。

需要指出的是, 这种计算方法没有考虑气体进入地层、井筒水汽化等损失因素, 给出的值仅为近似值。

3 破碎燃烧无壳高能气体压裂压力形成及过程分析

3.1 中心管内最大压力

中心管内装药同时点燃后, 内部高压作用于实心主装药, 撕裂并点燃主装药。如果内部压力过高, 会使主装药产生爆轰而不能正常燃烧, 对油井套管产生巨大冲击, 破坏套管, 因此有必要估算管内最大压力值。

如图 2 所示, 取四分之一块装药做受力分析。管内半径为 R_1 , 内压为 p_1 , 管外半径为 R_2 , 所受反压为 p_2 , 内壁受力在 x 方向的分量为:

$$F_{1x} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\alpha p_1 R_1 dz d\alpha = p_1 R_1 dz \quad (4)$$

外壁受力在 x 方向的分量为:

$$F_{2x} = -p_2 R_2 dz \quad (5)$$

当管内压力大到足以克服外界反压, 并使主装药应力大于其极限拉应力时, 主装药就会被撕裂, 管内最大压力值可按(6)式计算:

$$p_{1\max} = \left(\frac{R_1}{R_2} - 1\right)\sigma + \frac{R_1}{R_2}p_2 \quad (6)$$

式中, $p_{1\max}$ 为管内最大压力, MPa; σ 为主装药的应力, MPa。

对于标准 CCCF, $R_2 = 40\text{mm}$, $R_1 = 10\text{mm}$, $\sigma = 20\text{MPa}$, 当井深为 5000m, $p_2 = 50\text{MPa}$ 时, $p_{1\max} = 260\text{MPa}$, 此值远低于起爆压力极限值, 因此主装药不会因管内高压诱发爆轰或爆燃。

3.2 高压区建立过程

中心管内超高速燃推进剂点燃并撕开主装药后, 迅速在装药长度上建立起高压气区并点燃主装药, 主装药继续燃烧产生大量气体使高压气区扩展。高压气区建立时间极短, 压力远大于井筒中水柱静压, 瞬间顶起井筒水柱, 建立了一个无水高压气区。弹体下部为不可压缩水柱, 高压气区很难向下延伸, 而只能向上顶起水柱, 直至全部装药燃烧完毕。

装药总燃烧时间为 500 ~ 1200ms, 最大气区长度由(3)式给出, 气柱上部最大扩展速度为 32m/s 左右。由于高压气体一部分要进入岩层, 实际扩展速度会小于此数值。

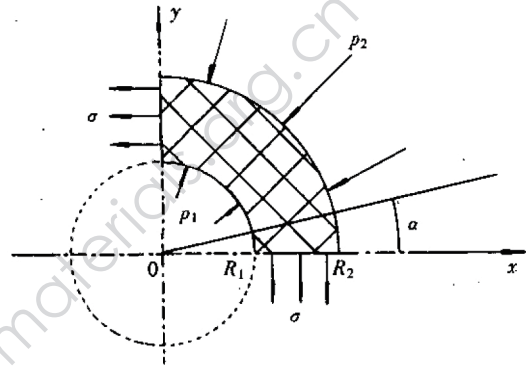


图 2 药柱截面应力图

Fig.2 Stress diagram of the charge section

3.3 井筒内压力分布及建立过程

在压力上升初始阶段,由于压力上升极快,压力波来不及很快传播出去,仅在弹体周围建立高压气区,压力达到最大。超高速燃药燃尽以后,地层开裂,大量燃气进入地层裂缝,气区峰值压力会有所下降。主装药燃烧时,补充气区能量,扩大高压气区,同时气区压力也向井筒周围传播,并在粘性力作用下,沿井筒方向递减。压裂弹周围压力变化规律如图3所示。

若压力波在水中传播速度为2000m/s,那么当弹体全部燃尽时,井筒口还不一定立即有所反映。数秒后,井口才会表现出来,如水柱喷出,有震动声。

4 压裂有效区域分析

由图3可以看出,点火后5ms以内高压区集中在弹体长度上,因此岩石初始裂缝仅在弹体区域内产生,继续燃烧产生的燃气会顺此薄弱环节进入地层,并沿此方向进行裂缝的延伸与扩展。

裂缝的延伸向两个方向扩展,一方面径向深入,另一方面也会随着裂缝的深入向轴向扩展。在射孔层位上,轴向扩展所受阻碍较小,能比较自由延伸,但对于有夹层的区域,轴向扩展所受限制很大,较难在轴向延伸。图4为岩石裂缝发生发展示意图。

对于破碎燃烧无壳高能气体压裂弹,裂缝长度可按Cuderman提出的裂缝长度公式(7)^[3]进行近似计算:

$$\gamma = \frac{1}{p} \sqrt{E_p \cdot E} \quad (7)$$

式中, γ 为裂缝长度,m; E 为地层弹性模量,MPa; E_p 为单位长度推进剂能量,其值可按(8)式计算:

$$E_p = \frac{m \cdot Q_p}{L} \quad (8)$$

式中, Q_p 为推进剂爆热,J/kg; L 为布弹长度,m; m 为装药量,kg。

对于标准结构, $m = 35\text{kg}$, $Q_p = 2698.6\text{J/g}$, $L = 5\text{m}$,井深4000m时, $p = 40\text{MPa}$, $E = 3.82 \times 10^3\text{MPa}$,计算得裂缝长度 γ 约为15m。

油层处理效果不只是岩层破裂特性,还有燃气对岩层的热化学作用,高温燃气会将油层的蜡质等粘性大的化合物等污染物烧尽或融化,起到疏通油路作用,提高油井产量。因此,在压裂过程中,应使高温气区作用于油层的面积尽可能大。

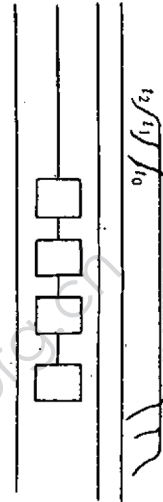


图3 井筒内动态压力分布
Fig.3 Dynamic pressure distribution in the oil well ($t_0 < t_1 < t_2$)

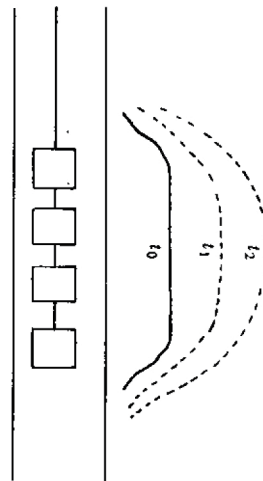


图4 岩石裂缝扩展示意图
Fig.4 The developing diagram of the rock crevice ($t_0 < t_1 < t_2$)

由以上 CCCF 压裂过程分析可以提出选层原则: 1) 压裂弹中心对准最有可能出油层的中心; 2) 如主力层位难以确定, 压裂弹对准最厚层位; 3) 压裂弹应接近下方层位, 以充分利用燃气热化学性质处理油层的特性。

5 结 论

破碎燃烧无壳高能气体压裂弹结构新颖, 设计合理, 采用了一系列创新技术。经过理论分析认为, CCCF 不会产生燃烧转爆轰现象, 它在弹体周围起裂并沿此初始裂纹延伸, 因此施工布弹时一定要对准主力层位并应尽可能利用其燃气热化学性质, CCCF 裂缝长度大于 10m, 对解除近井带污染有特殊意义。高温高压气区较长, 可以较好地清除气体掠过区域的孔道污染, 以进一步提高油井产量。

两年多的实践表明, 对于地质结构相同的井位, 用独联体压裂弹及原有国产压裂弹施工无效, 但经 CCCF 处理后产量大幅增加, 体现了 CCCF 巨大的推广潜力。

对 CCCF 作用研究还只是一个开端, 有待进一步研究, 以推广其应用。

参 考 文 献

- 1 张延汉, 李文魁. 高能气体压裂的机理研究概要. 中乌爆燃技术研讨会论文集, 西安, 1992.
- 2 李旭利, 王宁飞, 腾学锋, 王大安. 破碎燃烧无壳高能气体压裂技术. 推进技术, 1997(2): 78
- 3 韩常省, 张延汉等编. 高能气体压裂机理研究. 西安: 西安石油学院出版社, 1991.

A STUDY ON THE WORKING MECHANISM OF CASELESS CRACK COMBUSTION HIGH-ENERGY-GAS FRACTURORS

Wang Ningfei Li Xuli Cui Genshang

Teng Xuefeng Chen Qiang Wang Daan

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065)

ABSTRACT The design principle and structure of caseless crack combustion high-energy-gas fracturors are briefly reviewed. Based on analysing the method of calculation, the size of high pressure gas area and the maximum pressure in the tube center, the pressure distribution in the oil well and its variation with time were studied. The effective fracture area and the extending regularity of rock crevice is discussed, and a rule for choice of well and stratum is given.

KEYWORDS combustion, fracture, oil well stimulation, solid propellant.