

高效复合射孔技术*

史慧生¹, 王志信²

(1. 北京石油化工学院, 北京 102600; 2. 胜利石油管理局测井公司, 山东 东营 257096)

摘要: 高效复合射孔技术将传统的单纯射孔分成三个阶段作业, 即射孔、清堵造缝、裂缝延伸, 这三项作业分别由三个独立装药来完成。简要介绍了高效复合射孔技术装药结构和工作原理, 强调了油层孔道内随进装药二次爆炸的优点及作用。

关键词: 油气井; 射孔弹; 随进装药; 延缝装药

中图分类号: TP69 文献标识码: A

高效复合射孔技术是一种将射孔和高能气体压裂结合在一起的新的射孔技术^[1~4], 其特点是将能在瞬间产生高温高压气体的含能材料分成两部分: 一部分随着射流进入射孔弹射出的孔道中, 在孔道中燃烧爆炸, 造成无规则的多方位裂缝; 另一部分在射孔枪中滞后点火, 将前面孔道中二次爆炸造成的裂缝发展延伸。不仅扩展了射孔造成的裂缝, 而且有效地解决了近井区污染问题, 改善了射孔效率^[5~6]。

1 基本装药结构和工作原理

在高效复合射孔技术中, 射孔枪内装着多个射孔单元, 每个射孔单元由射孔弹、前仓、延缝增效装药三部分组成, 具体结构如图1所示。

高效复合射孔技术的工作原理是: 射孔弹起爆后, 射孔弹装药爆轰压垮药型罩形成金属射流。金属射流以数千米每秒的速度射出, 在射孔枪、套管、水泥环及油层中射出孔道。当射孔弹装药爆轰波到达射孔弹边缘时, 药型罩边缘在装药爆轰压力的作用下断裂成碎片, 以上千米每秒的速度向前飞散, 后面跟着射孔弹装药爆轰产物。这些飞散物不仅带有很高的温度, 而且带有很高的速度和能量。它们以很大的速度向前运动, 打在前仓外侧的助推药环上, 使助推药环点火燃烧。助推药环点火后, 产生巨大压力, 推动中心部分的随进装药向中心运动, 并从前仓前部的圆孔中喷出, 充填在射流打出的孔道中。随进装药在向前运动的过程中, 受枪内高压环境的作用, 已开始活化并部分点火。到孔道中后空间变小, 压力骤增, 随进装药开始剧烈反应, 燃烧爆炸, 在孔道中形成 80~100MPa 的压力。在这个压力作用下孔道周围的岩层产生多条裂缝。由于爆炸过程中, 孔道内压缩波和稀疏波交替作用, 孔道壁上接受的力即有压力又有拉力, 而岩层中的抗拉强度很低, 通

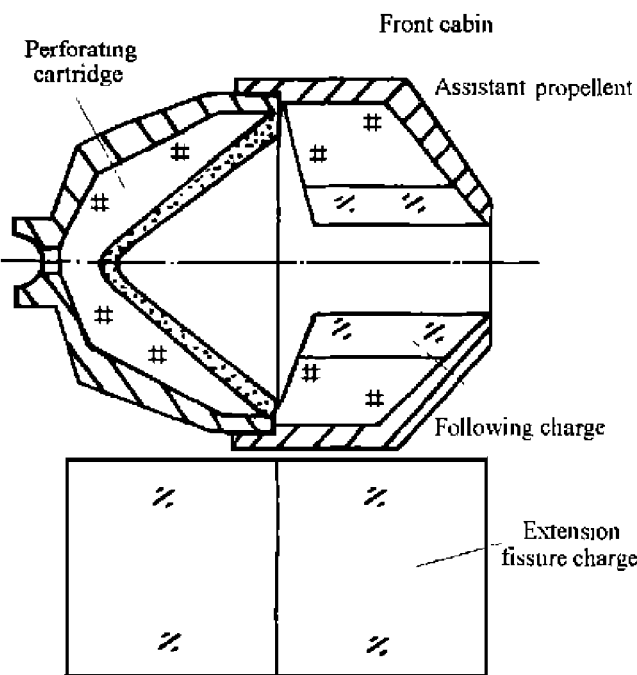


图1 典型的复合装药结构示意图
Fig.1 Schematic view of the structure of effective composite perforating technology

* 收稿日期: 2000-05-10; 修回日期: 2000-12-15
基金项目: 中国石油天然气总公司九五计划项目(970303-04)
作者简介: 史慧生(1953—), 男, 硕士, 高级工程师。

常只有抗压强度的几十分之一到十几分之一。因此,射孔过程中在孔道周围留下的污染带及压实层就在这个又压又拉的作用下被拉下来。这样在前仓内装药的作用下,孔道周围的污染带已清除,孔道周围的裂纹已产生,用于裂缝延伸的增效药块开始点火,大量的高能气体畅通无阻地进入孔道周围的岩层里,使岩层中的裂缝延伸,给岩层中油气的流出提供了更多的通道。

射孔弹的作用是在岩层中打出理想的孔道,这个孔道不仅要有一定的深度,还要求孔径足够大,以便前仓内的随进装药有足够的装填空间。射孔弹的另一个作用是利用它的装药爆炸产物的高温高压,点燃前仓内的助推火药,使之燃烧并产生足够的推力将前仓内的随进装药推入射流打出的孔道中。

前仓内装药的作用是在孔道周围造成多方位不规则的裂纹。它的装药分助推装药和随进装药两部分。助推装药的作用是在瞬间燃烧产生高压将前边的随进装药迅速推出填在射流打出的孔道中。对它的要求就是瞬时点火,并在最短的时间内烧完,以便瞬间在前仓内产生高压($> 60\text{MPa}$)推动随进装药以尽可能高的速度从前仓前部的孔中喷出。助推火药的另一个作用是将随进装药在运动中点燃,以保证随进装药在孔道中的二次爆炸如期完成。随进装药采用高密度粒状增面燃烧火药,它在助推火药的推动下,以 $50 \sim 100\text{m/s}$ 的速度进入射流打出的孔道,并在孔道中点燃爆炸。其作用是将射流射孔过程中造成的压实及污染层实行有效剥离,并在孔道周围形成放射性的裂纹。孔道中的爆炸不仅可以提高推进装药能量的利用率,而且可以减小对套管的伤害。

2 性能测试与地面试验结果

2.1 爆炸过程中系统压力的测定

高效复合射孔技术的效果取决于前仓及延缝装药的燃烧状况,取决于孔道及枪内的压力变化,因此,准确测定压力随时间的变化曲线是十分必要的。然而,由于试验条件、试验装置、检测方法等各方面的原因,直接测孔道内的压力几乎是不可能的,我们只能测在整个过程中枪内的压力随时间的变化。由于在整个试验过程中,射孔枪与孔道是相通的,因此以枪内压力代替孔道内的压力,误差不会很大。

试验中用的是模拟4英寸射孔枪,装弹密度10发/m,每发射孔弹装炸药32g,前仓内装填火药50g,延缝增效装药100g,测得的压力时间曲线如图2。试验装配方法及测试系统可见文献[6]。由图可见,压力的最大值明显向后推迟,出现在射孔弹起爆后的1.5~2.0ms处,曲线顶部比较平坦,高压时间维持较长。追究其原因,可以发现它实际是由三线曲线组成的,是三条曲线的包络线。这三条曲线代表三个不同的装药,是三个独立装药各自点火时对枪内压力的贡献。

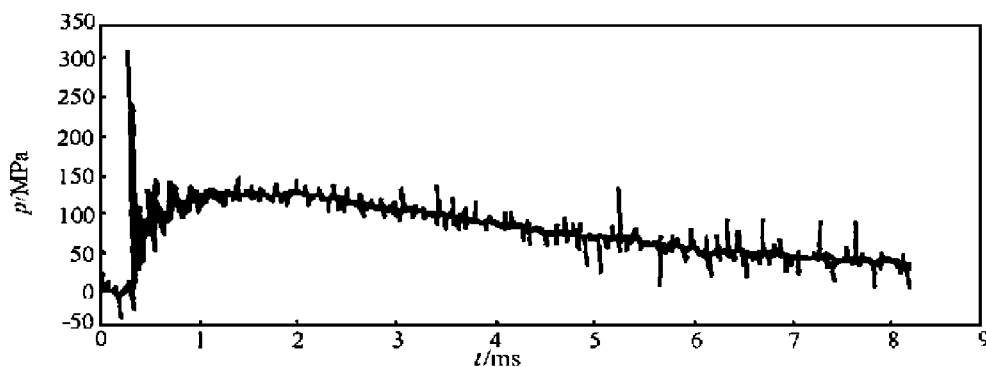


图2 枪内压力随时间的变化

Fig.2 The pressure of the system changes in gun during the test process

图3中曲线1是射孔弹起爆后炸药爆轰在枪内产生的压力曲线,其前沿很陡、衰减很快,曲线宽度不大于0.2ms;曲线2是前仓内助推装药和随进装药爆燃产生的压力曲线,其上升较快,但由于药量较小,衰减也很快;曲线3才是延缝增效装药燃烧产生的压力曲线,由于有点火延时系统,其上升较慢,但由于装药量较大,因此作用时间较长。2ms以后的曲线下降,是由于孔道的裂缝已产生,泄压通道已形

成,这时枪内压力开始下降,曲线缓缓下落。由于是三次作用的组合,使压力作用时间延长,岩层中裂缝有足够的时间扩展、延伸,进而大大地提高了射孔效率。这样可以提高能量利用率,对枪和套管的伤害变小,从而使增效射孔作业更科学合理。

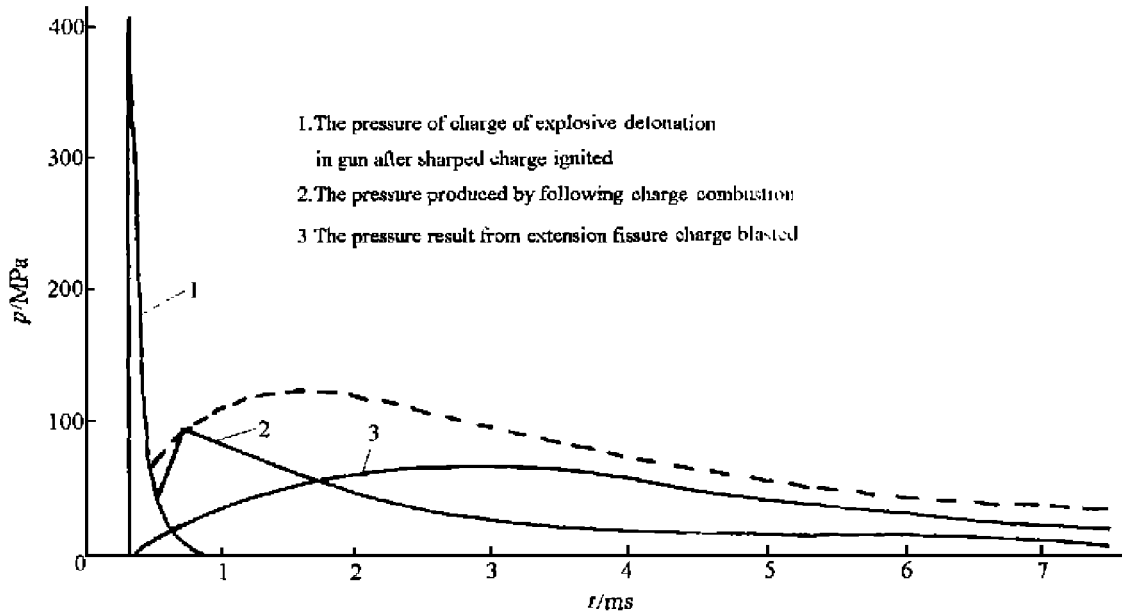


图 3 压力时间曲线的分解图

Fig.3 Decomposed figure of the pressure of the system changes in gun during the test process

2.2 随进装药喷出速度的测定

由于高效复合射孔技术的特点就在于随进装药的孔道内二次爆燃,因此随进装药能否如期进入孔

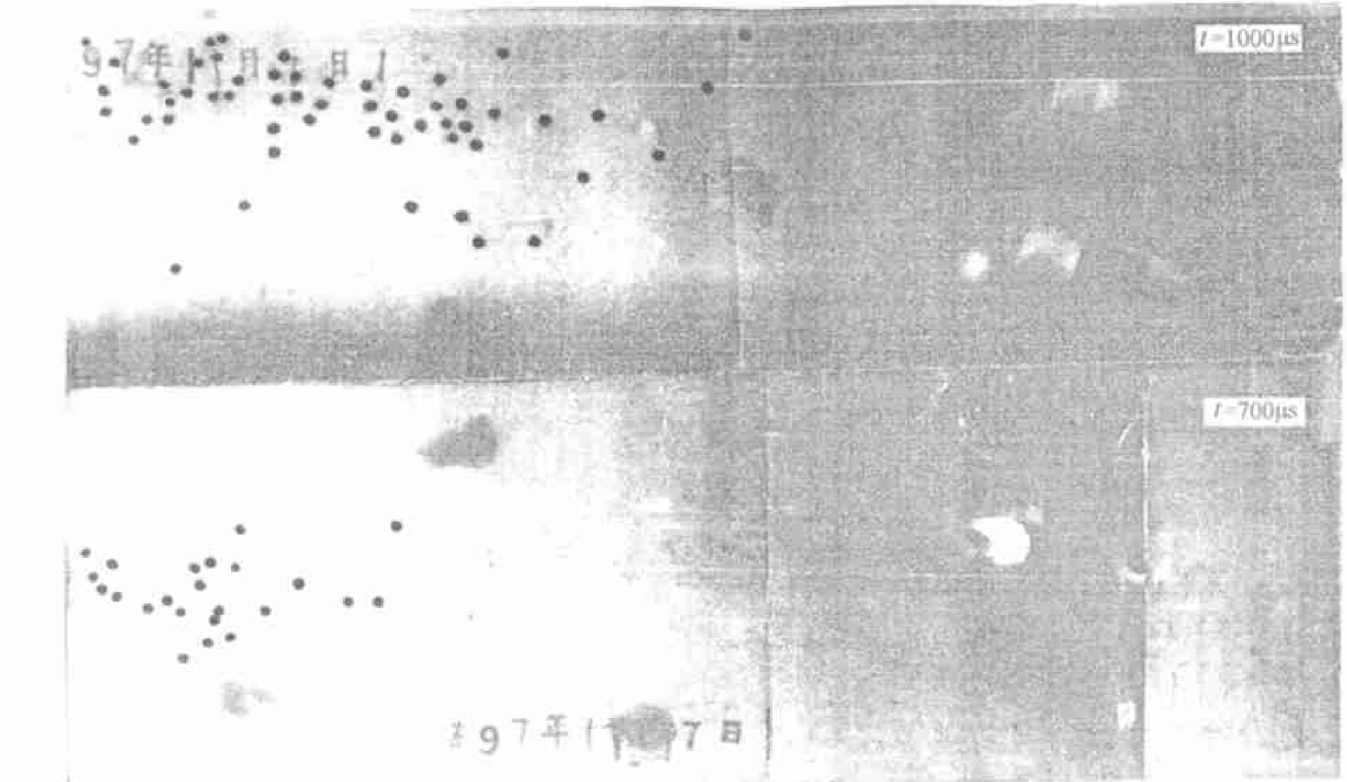


图 4 随进装药从前仓前部孔中喷出的 X 光照片

Fig.4 The X-ray photographs of the charge particles moved out of the front cabin

道,在孔道内燃烧还是在枪内燃烧是必须解决的问题。为此,专门用 X 光闪光照相记录了模拟随进装药的整个随进过程。为了使照片清晰,用 $\phi 3$ 的钢珠来模拟 $\phi 3$ 的随进装药颗粒,从闪光照相(图 4)中可以看出,随进装药开始从前仓喷出的时间大约是 0.5ms,喷出速度为约 100m/s,按枪上出孔孔径 15mm,随进装药 30cm^3 计算,随进装药全部推出约 2ms 就够了。而正常情况下随进装药(60MPa 的封闭燃烧室内燃烧)全部烧透大约要 4~8ms,因此即使是随进装药在枪内已有部分点火,但烧掉的只能是很小的一部分,而 80% 以上的装药及绝大部分能量消耗在油层里孔道之中。图 4 给出模拟随进装药从枪内喷出的 X 光照片。比较两张照片上随进装药颗粒的位置,参考辅助样块尺寸,可以算出随进装药先头部分的喷出速度为约 100m/s。照相时模拟射孔枪放在左方,复合弹在后起爆向右射孔并推出随进装药颗粒,两个 X 光发生器成一定角度放置在模拟射孔枪的右方,两者的轴线与复合弹的轴线垂直。照片上左边为模拟射孔枪的枪体右边缘。

2.3 地面靶试结果

在高效复合射孔技术现场实施以前,地面水泥靶试验是必不可少的。水泥靶试验的目的主要有两个:(1)验证复合射孔系统的威力,如孔径大小、孔道深度、制造裂缝的长度等;(2)检验复合射孔系统的安全性,如射孔枪是否炸裂,套管有无损害等。水泥靶的制作要尽可能地模拟油层岩芯,其抗压强度应大于 35MPa。为了保证试验结果真实科学,它的体积不能太小。试验中所使用的水泥靶的结构如图 5 所示。

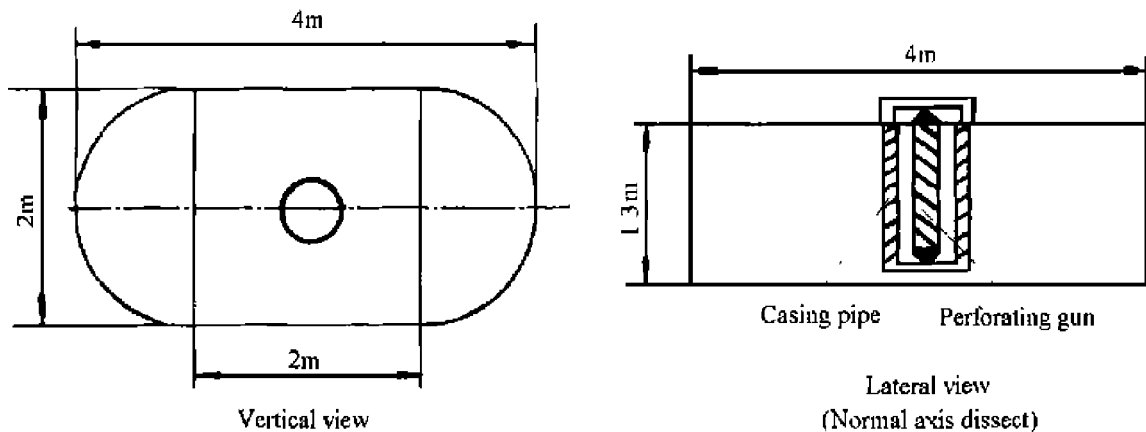


图 5 试验中使用的水泥靶的结构图

Fig. 5 Structure of the cement target used in experiment



图 6 整枪环形靶试验结果照片

Fig. 6 Result photograph of the cement target test

试验中所用水泥靶为椭圆柱,高 1.3m,长轴长度为 4m,短轴长度为 2m,中间放置一个 5.5 英寸的普通套管。靶内充填水泥,其中水泥与砂子的比例为 1:2,水泥标号为 425kg,砂子全部是经过水洗后的河砂,用 0.45 份的水搅拌后,用振动棒赶出气泡,保养一个月,其抗压强度大于 35MPa。试验时在长轴方向上放置图 1 所示的射孔单元 4 个,每侧面 2 个,复合射孔单元装在普通 102 射孔枪内。起爆后,水泥靶自长轴方向裂开,一分两半,而射孔枪和套管完好无损,试验后的靶子和射孔枪如图 6 所示。

3 初步结论

高效复合射孔技术是在普通射孔与增效射孔技术之后发展起来的一种新的复合射孔技术,它把部分装药送到射流打出的孔道中,使其在岩层中二次点火爆炸,把清堵与造缝作业引到油层中,提高了清堵造缝效果,降低了对射孔枪及井筒的伤害。污染层已得到处理,裂缝已经形成之后,点燃枪内的增效药块。增效药块点火反应产生大量高能气体,沿着前边已经打通的裂缝,畅通无阻地进入孔道周围的岩层里,作用在油层中,使原有的裂缝发展延伸,给岩层中油气的流出提供了更多更方便的通道。高效复合射孔技术于 1999 年 8 月开始在胜利油田试用,受到普遍欢迎和好评。这项技术有巨大的经济效益和广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] Ford F C, Hill G A, Vincent C T. High-velocity Jet and Propellant Fracture Device for Gas and Oil Well Production [P]. USA: 4391337, 1983.
- [2] 刘军, 李桂宝, 臧涛成, 等. 增效射孔器 [P]. 中国专利: 93246841.1, 1993.
- [3] 臧涛成, 刘军. 一种带后效作用的增效射孔弹 [J]. 爆破器材, 1996, 25(3): 32—34.
- [4] 王安仕, 吴晋军. 射孔——高能气体压裂复合技术研究 [J]. 西安石油学院学报, 1997, 8(4): 12—18.
- [5] 史慧生. 油井的射孔和压裂装置 [P]. 中国专利: 95101382.3, 1995.
- [6] 史慧生, 王志信. 增效射孔中火药装药的实验研究 [J]. 爆破器材, 2000, 29(3): 25—29.

Effective Composite Perforating Technology

SHI Hui-sheng¹, WANG Zhi-xin²

(1. Beijing Institute of Petrol-chemical Technology, Beijing 102600, China;

2. Logging Company of Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257096, Shandong, China)

Abstract: Effective composite perforating technology is a new method, which will have a enormous economic benefit and wider marketable prospect. It divides traditional perforating operation into three stages, which are perforation, pollution removal, formation fracturing and fissure extension. These works are accomplished by three independent charges separately. This paper describes the charge structure and the principle of the effective composite perforating technology, emphasizes the advantage and effect of the second explosion of the charge followed the jet into the hole which is perforated by the shaped charge.

Key words: gas and oil well; perforating cartridge; following charge; extension fissure charge