

文章编号: 1003-1480 (2008) 03-0032-04

复合射孔器压裂能力评价方法的探讨

李东传¹, 石健², 金成福¹, 余海鹰¹

(1. 石油工业油气田射孔器材质量监督检验中心, 黑龙江 大庆, 163853; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘 要: 为评价复合射孔器的作用效果, 根据在相同靶体、试验条件下复合射孔器的压裂能力决定作用效果, 探讨采用压裂能力指标评价复合射孔器性能的方法。通过对复合射孔器测试技术、复合射孔作用过程、裂缝形成机理和储层对复合射孔器性能的要求等方面进行研究, 得到在实验室条件下可以用复合射孔器产生高能气体的有效压力、有效作用时间来评价复合射孔器性能的结论, 为建立一套完整的复合射孔器评价体系打下基础。

关键词: 复合射孔器; $P-t$ 曲线; 有效压力; 有效作用时间; 评价体系

中图分类号: TJ45⁺9 文献标识码: A

Discussion on Evaluation for Fracture Ability of Composite Perforator

LI Dong-chuan¹, SHI Jian², JIN Cheng-fu¹, YU Hai-ying¹

(1. Oilfield Perforators Inspection Center of Petroleum Industry, Daqing, 163853; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: In order to evaluate the working effectiveness of composite perforator, based on the rule that the fracture ability of composite perforator can show the working effectiveness in the same target and under the same experimental condition, how to evaluate the working effectiveness by using fracture ability is discussed. This study includes composite perforator test technology, perforating process, forming mechanism of fracture and the demand of reservoir on the performance of perforators. The studies prove that the fracture ability of composite perforator can be evaluated by the effective pressure and effective working time of high-energy gas produced by composite perforator. The study helps to build a complete evaluation system.

Key words: Composite perforator; $P-t$ curve; Effective pressure; Effective working time; Evaluation system

复合射孔器是聚能射孔器与火药(推进剂)结合构成的一种射孔器, 由于其在射孔后立即进行高能气体压裂, 能有效地解除射孔损害, 改善射孔孔道周围区域导流能力, 提高注采效果, 因此在国内外得到广泛应用。

复合射孔器性能检验一般包括3个方面: 安全性检验、穿孔性能检验和作用(压裂)效果检验。由

于复合射孔破坏性强, 井下作用效果影响因素多, 地面很难进行模拟检验, 而利用检验聚能射孔器的混凝土靶^[1]来定性检验已不能满足生产、科研的需要。

复合射孔器的作用效果由复合射孔器性能、试验(井筒)条件和靶体(油层)性质3个方面决定。当试验条件和靶体性质一定时, 复合射孔器压裂能力即复合射孔器产生的高能气体的压力和作用时间决定

收稿日期: 2008-04-14

作者简介: 李东传(1969-), 男, 高级工程师, 从事射孔器材检测工作。

作用效果,因此可以用压裂能力评价复合射孔器的性能,现就压裂能力评价方法进行讨论。

1 测试技术现状

1.1 复合射孔器单元动态测试技术

试验主要针对用量最大的一体式(内置式)复合射孔器。假设复合射孔器起爆后内部压力分布均匀或差别可忽略,即可利用复合射孔器单元代替整体。复合射孔器单元是现场使用的复合射孔器的基本组成单位,由单发聚能射孔弹、相应长度的射孔枪及火药组合而成。

试验装置由与其匹配的模拟套管空间的釜体、测试系统等组成,在釜体上安装传感器,下部连接试验用靶体(一般为砂砾注入清水,也可以是混凝土靶或砂岩靶)。试验时,将一体式复合射孔器单元放置在试验装置中,环空注满清水后封闭,测试枪内及环空 $P-t$ 曲线^[2],用于对比复合射孔器的压裂能力。

1.2 多个复合射孔器单元动态测试技术

考虑到复合射孔器整体作用时火药点火时间差造成的火药燃烧百分比、燃烧速度的不同,以及产生的压力分布也不同等问题,利用复合射孔器的几个单元组成的一段复合射孔器代替复合射孔器整体。试验选用由4个复合射孔器单元组合形成的复合射孔器(复合射孔器中相邻的4个单元组成)。

试验装置为与其匹配的模拟套管空间的釜体,在釜体上安装传感器,下部连接试验用钢靶。试验时,将一体式复合射孔器单元放置在试验装置中,环空注满清水后封闭,测试环空 $P-t$ 曲线^[3],用于对比复合射孔器的压裂能力。

1.3 1m 复合射孔器动态测试技术

试验选用的复合射孔器为现场使用的1m复合射孔器,试验装置是与其匹配的模拟套管空间的混凝土靶,套管侧面埋进压力传感器,外部浇注混凝土;或双层套管靶(层间充填混凝土),内层套管侧面埋进压力传感器。

试验时,将1m复合射孔器放置在套管中,环空注满清水,套管上部安装防护帽并开直径为8mm的

泄压孔,测试环空 $P-t$ 曲线,用于对比复合射孔器的性能;或试验时,将混凝土靶放置在钢质密封容器中,然后将1m复合射孔器放置在套管中,射孔器与套管内注满清水,套管上部安装防护帽密封,混凝土靶与钢壳环空注满清水并加压,测试套管环空 $P-t$ 曲线,用于对比复合射孔器的性能。

1.4 井下动态测试技术

井下射孔作业时将复合射孔器与 $P-t$ 仪连接, $P-t$ 仪位于复合射孔器的下方,测试环空 $P-t$ 曲线^[4],用于监控复合射孔器的作用效果、施工前优化设计以及通过数值模拟技术进行效果预测等^[5]。

2 存在的问题

$P-t$ 曲线与火药的燃烧速度、药量密切相关,而火药的燃烧速度与试验条件的关系极为密切。由于复合射孔器、靶体和试验条件的不同,测得的 $P-t$ 曲线必然存在差别,且无法找到不同 $P-t$ 曲线间的关系。因此,生产厂家、油田用户只是用各自测得的结果对比分析不同产品间的差异,无法评价复合射孔器的作用效果。

3 原因分析

火药的燃烧速度与火药的组成、物理结构以及环境条件(初温和工作压力)密切相关,不同类型火药的燃烧速度各不相同、做功能力也不一样,同一类型的火药的燃烧速度也随火药成分、氧化剂含量等因素而变化。可见即使同一种复合射孔器当其长度不同时内部不同部位的燃烧速度也会有所差别,而燃烧速度又会导致压力分布的变化,因此即使在相同的试验条件下,射孔器单元、1m复合射孔器、2m复合射孔器内部压力分布有差别,目前尚无法确定这种差别对试验结果影响的大小。

复合射孔器射孔及随后的高能气体压裂是一个相互影响彼此关联的复杂的动态作用过程,其作用机理复杂、影响因素多,在实验室内模拟复合射孔器在井下的作用效果十分困难,因此无法评价复合射孔器

的作用效果。

4 储层对射孔器性能的要求

复合射孔器一般用在低孔低渗油层,作业时受到液柱压力和温度的作用。目的层中存在流体压力并受到上覆岩层压力、周围压力的作用。

施工时,一般根据套管、水泥环及油层特点设计复合射孔器性能参数。为了保证套管、水泥环安全,压力峰值必须小于其所能承受的破坏压力,射孔孔道产生裂缝则要求气体压力超过地层破裂压力,在此前提下有效作用压力越高越好、作用时间越长越好。

5 评价方法

5.1 复合射孔过程简介

施工时雷管起爆导爆索进而依次起爆聚能射孔弹。爆轰波以起爆点为中心沿药柱向开口部稳定传播,药柱爆轰形成高压将药形罩压垮向中心汇聚形成高速金属射流,射流穿透套管、水泥环,进入油层,经过约 100 μ s 孔道形成。

表 1 为体式复合射孔器参数表,药柱爆轰产生的强冲击波向周围传播,经空气到达距离约 2mm 处的火药,使火药迅速燃烧,约 20 μ s 后弹壳破裂^[6],随后爆轰产物、壳体破片先后到达火药饼处并将其击碎,加大了火药的燃烧面积。

表 1 体式复合射孔器参数^[6]

Tab.1 Parameters of integrated composite perforator

名称	复合射孔器外径/mm	孔密/(h·m ⁻¹)	射孔相位/角度	射孔弹边缘距/mm	弹间导爆索长度/mm	导爆索爆速/(m·s ⁻¹)	弹间起爆时间/ μ s	火药饼与弹壳距离/mm
A	102	16	四/90°	10.5	88.0	6 900	12.8	2
B	89	16	四/90°	16.5	75.5	6 900	10.9	5

试验表明聚能射孔弹爆轰引燃火药后燃烧约在 0.5~0.8ms 内完成,0.1ms 后可测试到射孔器内气体产生的压力波动。外径 102mm 的体式复合射孔器从第 1 发弹到第 16 发弹起爆时间约 0.2ms,复合射孔器

内部的火药燃烧是由起爆方向依次完成的,由于受先期燃烧火药的影响复合射孔器内部压力分布不均匀,应随起爆顺序逐渐上升。

复合射孔器在 140mm(5-1/2in.)套管居中时间隙分别为 11mm、18mm。复合射孔器内高压气体由射孔器孔眼以 1 000m/s 以上的速度喷射而出,体式复合射孔器有效作用时间约 10ms^[7]。

由于气体射流速度高、环空距离短,而射孔引起的复合射孔器动态响应时间远远大于气体作用时间,可以认为气体直接进入孔道,在孔道内迅速形成高压。当气体峰值压力大于 1.2 倍破裂压力时开裂,压力上升率决定裂缝的条数和几何形态,峰值压力越高形成的裂缝越长,作用时间越长压力地层的液体和气体量越多,在地层内形成的裂缝越长、越宽^[7],而油层泥质含量、孔隙度、油层厚度等因素均影响复合射孔器的作用效果^[8]。

复合射孔器与井筒间环空间压力上升推动井内液体向上、下运动,一般 $P-t$ 仪连接在复合射孔器下部, $P-t$ 仪内传感器距最近的射孔孔距约 0.25m,因此,其测试结果仅能反映复合射孔器某阶段的一个压力时间分布形式,理论上外推可以得到套管和储层岩石的压力响应,但实际上远不能反映复合射孔压力分布的细致特征。

5.2 影响压裂能力的主要因素

复合射孔的主要目的是解除射孔孔道周围的污染,在孔道周围形成微小的裂缝改造渗透性,而裂缝的数量、规模大小主要取决于复合射孔器产生的高能气体压力上升速率、有效压力和有效作用时间。

一般来讲,复合射孔器所用火药为发射药或推进剂,在井下燃烧能满足压力上升速率在 $10^3 \sim 10^5$ MPa/s 范围内的要求。研究表明内置式复合射孔器压力上升速率一般在 $2.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ MPa/s,下挂式复合射孔器压力上升速率一般在 $5.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$ MPa/s,外套式复合射孔器的压力上升速率介于内置式复合射孔器和下挂式复合射孔器之间^[7]。油田用户可以通过选择不同类型的复合射孔器来确定不同的压力上升速度,因此,对于某一类型的复合射孔器压裂能力主要影响因素为有效压力、有效作用时间。

5.3 评价方法

由于在实验室内模拟复合射孔器在井下的作用效果十分困难,因而无法评价复合射孔器的作用效果,但评价复合射孔器在一定实验条件下的压裂能力是可行的。

对于不同井下条件,目的层需要不同性能的复合射孔器,因此可以根据井下条件、地层条件的要求将复合射孔器的压裂能力指标分组评价。在一定条件下,复合射孔器产生的高能气体应满足以下要求:

$$P_f \geq P \geq P_d, t \geq t_0 \quad (1)$$

式(1)中: P 为高能气体有效压力,MPa; P_d 为套管、水泥环破坏压力,MPa; P_f 为油气层破裂压力,MPa; t 为高能气体有效作用时间,ms; t_0 为国内某类产品平均作用时间,ms。

有效压力、有效作用时间评价值应根据国内油层现状、产品水平现状等来确定,对某些特殊需要的产品,可与用户协商确定。

6 结论与建议

(1)在一定实验条件下,利用复合射孔器产生高能气体的有效压力和有效压力作用时间评价压裂能力是可行的;

(2)应建立标准试验装置和方法,开展复合射孔器产品检验工作,控制进入油田市场的产品质量;

(3)应进一步开展理论研究,建立实验室 $P-t$ 曲线与井下 $P-t$ 曲线间的关系,为射孔优化设

计提供基础数据;

(4)需要进一步试验以确定有效压力、有效作用时间的评价值。

致谢:本文在写作过程中得到西安通源石油科技股份有限公司成建龙副总工程师的帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] GB/T 20488-2006 油气井聚能射孔器材性能试验方法[S]. 中国标准出版社,2006.
- [2] 张国校.复合射孔器产品质量控制方法[J]. 测井技术, 2005, 29(增刊):17-19.
- [3] 袁吉诚,罗宏伟,朱涵超.复合射孔器检测容器探讨[J]. 测井技术, 2007, 31(1):72-75.
- [4] 刘河秀,郑长建,索明武. $P-t$ 仪的应用与发展[J]. 油气井测试, 2002, 11(4):69-70.
- [5] J.F.Schatz, John F.Schatz. High-speed downhole memory recorder and software used to design and confirm perforating/propellant behavior and formation fracturing[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas, USA: Society of Petroleum Engineers,1999.
- [6] 李东传,金成福,刘亚芬,余海鹰.射孔弹间干扰消除方法初探[J].测井技术, 2006, 30(5):476-478.
- [7] 赵开良,吴永清,魏永刚.复合射孔器效果监测、对比及优化[J].测井技术, 2007, 31(1):66-71.
- [8] 王志伟,史军,杨再新,等.复合射孔技术在低渗透油藏的应用[J].西部探矿工程, 2005, 108(5):62-64.