

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.06.009

# 复合射孔器在不同靶体上作用效果的试验研究<sup>\*</sup>

李东传 金成福 金 冶 余海鹰

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)

[摘 要] 在实验室条件下,用同种内置式复合射孔器单元在 4 种不同的靶上进行射孔并测试环形空间  $p-t$  曲线,然后检测靶体。通过实验结果的对比分析表明:相同的内置式复合射孔器单元在不同的靶上射孔时的  $p-t$  曲线不同,靶越致密则气体的峰值压力越高,持续时间越长,在孔隙度 18.4%、渗透率  $0.102\ \mu\text{m}^2$  的砂岩靶上形成了 3 条长裂缝。靶的性质决定  $p-t$  曲线特点,可以利用  $p-t$  曲线判断复合射孔效果。

[关键词] 复合射孔器 环形空间  $p-t$  曲线 裂缝

[分类号] TE257+.1 TJ413+.7

## 引言

复合射孔器在油田使用多年,工艺技术逐渐成熟,部分生产企业、服务公司等已编制了优化设计软件<sup>[1-2]</sup>,指导井下作业施工以期获得更好的作业效果。魏光辉等<sup>[3-5]</sup>利用产量对比的方法评价复合射孔效果,为部分油田用户所接受;但由于地层差异等诸多因素的影响,现场使用很不方便。

由于很难直接检测复合射孔的作用效果,井下一般使用  $p-t$  仪监测复合射孔器在井下产生的高压气体作用过程<sup>[6-9]</sup>,即复合射孔器产生的高压气体在井下的压力—时间( $p-t$ )曲线,用于描述复合射孔器能够提供的用于压裂的能量。

赵开良等<sup>[10]</sup>已监测、分析了一些复合射孔形成的压力作用过程,用于评价不同射孔方式的优缺点,一些作业公司利用复合射孔优化设计软件理论计算的峰值压力与实测峰值压力对比评价作业效果,均是定性地反映复合射孔器对地层的作用效果。

国内外均进行了一些室内模拟研究,以了解复合射孔的作用效果。李文魁等<sup>[11]</sup>采用不同标号的水泥、石英砂和水为原料,按不同比例制作模拟岩心,在混凝土上钻孔,研究火药压裂效果,表明高能气体压裂可产生 3~5 条裂缝。孙新波等<sup>[12]</sup>利用火药对射孔后的砂岩进行压裂。

以上研究均不是利用聚能射孔弹点燃火药,与目前国内大量使用的内置式复合射孔器压裂过程有明显差别。

为了真实地反映复合射孔的作用过程和效果,需要在模拟井筒条件下利用内置式复合射孔器单元

对砂岩靶进行复合射孔试验,并进行流动测试。这里主要研究内置式复合射孔的作用过程和影响因素,即在不同靶上的压裂过程和效果。

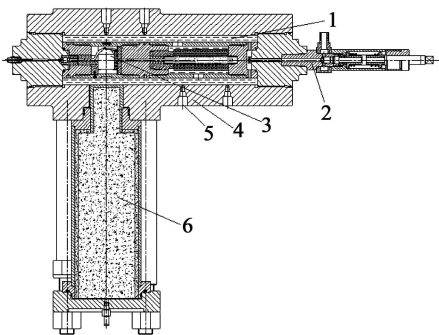
### 1 试验方案

#### 1.1 射孔作用过程分析

内置式复合射孔器射孔时,雷管起爆导爆索,导爆索起爆聚能射孔弹,聚能射孔弹爆轰形成射流,同时使火药爆燃。高压气体沿射孔孔道进入井筒、进入地层,对射孔孔道周围的射孔损害带进行冲击,以改善其导流能力。

#### 1.2 模拟试验

利用试验装置(图 1)在室内测试复合射孔器单元的  $p-t$  曲线<sup>[13]</sup>。复合射孔器单元居中放置在模拟外径 140 mm 套管的井筒环形空间(环空)位置,间隙为 11 mm,射孔方向正对靶中心,介质为清水,压力传感器安装在装置壁上,开孔与环形空间连通。



1—水介质;2—泄压阀;3—复合射孔器单元;  
4—模拟套管本体;5—传感器孔;6—试验靶

图 1 复合射孔器单元试验装置

Fig.1 Combined perforator unit testing device

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-06-07  
作者简介: 李东传(1969~),男,高级工程师,研究方向:油气井用射孔器材检测技术。E-mail: lidongchuan@petrochina.com.cn

靶放置在钢壳内,钢壳模拟靶在地层中的应力束缚,防止射孔时射流产生的裂缝,以获得高压气体产生的裂缝。

靶材料选用混凝土、砂岩 A、砂岩 B 和压裂砂加清水(表 1),其中砂岩靶放置在钢壳内,周围用混凝土浇注;混凝土靶是直接浇注而成的;压裂砂装填在钢壳内,加满清水。靶射孔端有钢靶模拟套管、水泥层模拟井下的水泥环层。砂岩样品用质量分数为 3% NaCl 溶液饱和后测试其性能参数,测量孔隙度后将砂岩放入靶套筒中,用水泥浆浇注,室温下至少养护 72 h。

表 1 靶材料性能参数

Tab. 1 Performance parameters of target material				
靶材料	长度/ mm	直径/ mm	孔隙度/ %	渗透率/ $\mu\text{m}^2$
混凝土	700	198	—	—
砂岩 A	700	178	13.6	0.023
砂岩 B	700	178	18.4	0.102
压裂砂+清水	700	198	—	—

内置式复合射孔器单元选用的是常用的 I102DP25C16-70 型复合射孔器,外径 102 mm,16 孔/米。复合射孔器单元(内径 83.6 mm,长 62.5 mm)内装 1 发 DP44RDX38-3 型聚能射孔弹(装药量为 38 g)、一个火药盒(装药量为 25 g)、1 发雷管和 60 mm 导爆索。

2 试验结果与分析

2.1 环空压力

数据采集系统主要由压力传感器、信号放大器、同步控制器和计算机等组成<sup>[14]</sup>,压力传感器(KISTLER 6213B 型)安装在与射流垂直且与靶轴心相交位置,以便准确测量环空中的气体峰值压力和作用时间。峰值压力和作用时间受靶体性质的影响,随着靶体孔隙度、渗透率的提高,环空气体峰值压力降低,压力下降时间明显缩短(表 2、图 2),表明复合射孔产生的高压气体进入靶体内的量越多,测得的环空压力越低,持续时间越短。

表 2 不同靶上的测试

Tab. 2 Test results of different targets			
靶材料	峰值压力/ MPa	持续时间*/ ms	裂缝
混凝土	98	>30	无
砂岩 A	80	27	无
砂岩 B	74	10	有
压裂砂+清水	65	2	—

注: \* 压力≥40 MPa 时的持续时间。

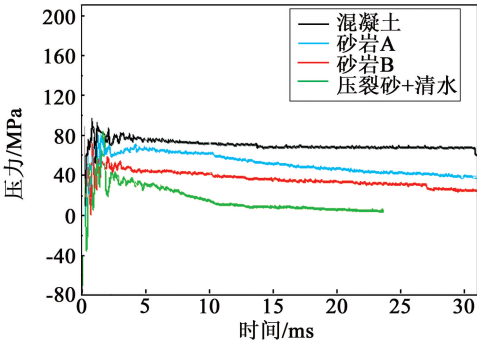
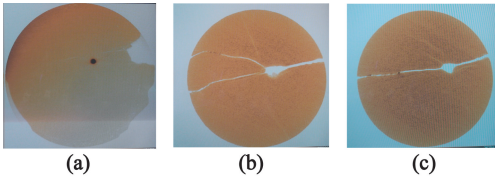


图 2 不同靶上的 p—t 曲线

Fig. 2 p—t curves of different targets

2.2 靶体分析

沿轴向剖开带钢壳的砂岩靶,剥去砂岩外表的混凝土层。利用分辨率为 512 的工业 CT(BT-500 型)径向扫描砂岩。砂岩 A 未观察到裂缝[图 3(a)];砂岩 B 距射孔端 20 cm 处有 3 条径向贯穿的裂缝[图 3(b)];距射孔端 100 cm 处有 2 条径向贯穿裂缝[图 3(c)];距射孔端 260 cm 处未观察到裂缝。



(a) 砂岩 A,距射孔端 40 cm;(b) 砂岩 B,距射孔端 20 cm;(c) 砂岩 B,距射孔端 100 cm

图 3 砂岩 CT 扫描图

Fig. 3 CT scan of sandstone

2.3 作用机理分析<sup>[15]</sup>

内置式复合射孔器单元射孔时,射流穿透射孔器壁、水、模拟套管的金属、模拟水泥环的混凝土后进入靶体,在 100 μs 左右形成射孔孔道。同时火药爆燃产生大量高压气体,由射孔器壁上的孔进入模拟套管的环形空间,引起环空压力上升(压力传感器实时采集),气体进入射孔孔道。当气体进入量远远大于气体由孔道壁渗入靶体内的量时,引起孔道内压力上升,当孔道内压力超过 1.2 倍靶体破裂压力时形成裂缝<sup>[10]</sup>,否则孔道内的气体会通过孔隙进入靶体。在内置式复合射孔器单元内火药燃烧、高压气体形成和膨胀过程中,部分气体已进入环空、射孔孔道和靶体,进入量(体现为压力波动)受内置式复合射孔器单元内压力、射孔器壁上的射孔和泄压孔直径、靶上孔道的几何尺寸和靶体性质等因素影响,整个过程是一个动态过程。环空压力波动(p—t 曲线)与气体进入靶体内的量、进入的方式密切相关,因此,可以用 p—t 曲线反映气体进入靶体

内的量与进入靶体内的方式,从而评价射孔、压裂效果。

混凝土的孔隙度、有效渗透率较差,测到的  $p-t$  曲线峰值压力高、持续时间长;砂岩 A 的孔隙度为 13.6%、渗透率为  $0.023 \mu\text{m}^2$ ,较混凝土好,但射孔后靶上没有形成裂缝,高压气体只能由孔道壁渗入靶体,导致环空压力下降缓慢,由 80 MPa 下降到 40 MPa 用了 27 ms;砂岩 B 的孔隙度为 18.4%、渗透率为  $0.102 \mu\text{m}^2$ ,较砂岩 A 好,射孔后靶上形成了 3 条长裂缝,气体进入靶体内的速度大大加快,环空压力下降速度也明显加快,由 74 MPa 下降到 40 MPa 用了 10 ms。如果靶是松散的压裂砂加水,其渗透性极好,气体进入速度就更快,测到的环空压力在 2 ms 左右下降到 40 MPa 以下。

利用  $p-t$  曲线可以评价内置式复合射孔器单元产生的气体压力在不同靶的作用射孔、压裂效果:当气体压力大于等于 40 MPa 的作用时间在 10 ms 左右能够在靶上形成裂缝,作用时间超过 27 ms 时表明靶体致密不能形成裂缝,作用时间不足 2 ms 时表明靶体物性较好不必进行复合射孔作业。

建议进一步开展高能气体压力、靶体上形成的裂缝、射孔孔道周围渗透率改善程度间的关系研究,以指导现场施工。

### 3 结论

1) 在相同的实验条件下,内置式复合射孔器单元在不同的靶体上的射孔效果不同,在孔隙度、渗透率等指标匹配的砂岩上可形成长裂缝,否则压裂效果不明显。

2) 可利用  $p-t$  曲线评价内置式复合射孔器单元产生的气体压力在不同靶的射孔、压裂效果。但仍须进一步研究以确定裂缝对应的压力持续时间区域的范围,提高判定的准确性,满足施工效果评价的需要。

致谢:本文 CT 扫描测试部分得到西安物华聚能爆破器材有限责任公司的帮助,在此表示衷心感谢!

### 参 考 文 献

- [1] 郭廷亮,陈锋,袁吉诚,等. Stimgun 外套式复合射孔器在塔里木 QL- $\times$  井的应用[J]. 测井技术,2005,29(3): 253-255.
- Guo Tingliang, Chen Feng, Yuan Jicheng, et al. Application of stimgun in well QL- $\times$  in tarim oilfield[J]. Well Logging Technology,2005,29(3):253-255.
- [2] 项忠华. 射孔压裂参数优化设计研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2002.
- [3] 魏光辉,王向公,乐幸福. 射孔新技术对优化产能的效

果分析[J]. 江汉石油学院学报,2004,26(增 2):286-287.

Wei Guanghui, Wang xianggong, Yue xingfu. Analysis of the effect of new perforation technology on optimal productivity[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004,26 (Supp2.):286-287.

- [4] 魏斌,张宏忠,黎荣剑,等. 长庆油田侏罗系油层增产措施及其效果评价[J]. 油气井测试,2001,10(2): 27-31.
- Wei Bin, Zhang Hongzhong, Li Rongjian, et al. Stimulant measure and efficiency evaluation for jurassic formation in Changqing oilfield[J]. Well Testing, 2001, 10(2):27-31.
- [5] 李保民,赵大华. 复合射孔技术在长庆油田的应用效果[J]. 石油勘探与开发,2005,32(1):103-104.
- Li Baomin, Zhao Dahua. Application of compound-penetration in Changqing oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(1):103-104.
- [6] 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):69-70,78.
- Liu Hexiu, Zheng Changjian, Suo Mingwu. Application and development of instrument  $p-t$  [J]. Well Testing, 2002,11(4):69-70,78.
- [7] 崔春生,马铁华,裴东兴. 新一代石油井下测试仪多采样策略研究[J]. 中国测试技术,2007,33(2): 74-76.
- Cui Chunsheng, Ma Tiehua, Pei Dongxing. Study of multi-sampling strategy of new type downhole testing gauge [J]. China Measurement Technology, 2007, 33 (2): 74-76.
- [8] 张杰,裴东兴,李新娥. 存储式石油射孔、压裂测试系统的设计[J]. 电子测量技术,2008,31(6):20-22.
- Zhang Jie, Pei Dongxing, Li Xin'e. Design of memory oil well downhole  $p-t$  measurement system [J]. Electronic Measurement Technology, 2008,31(6):20-22.
- [9] 崔敏,马铁华,崔春生. 油井测压器及其在射孔工艺研究中的应用[J]. 自动化仪表,2010,31(7):57-58,62.
- Cui Min, Ma Tiehua, Cui Chunsheng. Down-hole pressure tester and its application in researching perforation technology [J]. Process Automation Instrumentation, 2010,31(7):57-58,62.
- [10] 赵开良,吴永清,魏永刚. 复合射孔器效能监测、对比分析及优化[J]. 测井技术,2007,31(1):66-71.
- Zhao Kailiang, Wu Yongqing, Wei Yonggang. Effect monitoring correlating and optimizing of composite perforator [J]. Well Logging Technology, 2007, 31 (1):66-71.
- [11] 李文魁,吴宏利,赵蔚. 高能气体压裂技术试验研究[J]. 钻采工艺,1997,20(6):34-37.
- [12] 孙新波,赵敏,李东传,等. 实验室条件下聚能射孔损



害带研究[J]. 测井技术,2005,29(1):8-10.

Sun Xinbo,Zhao Min,Li Dongchuan,et al. Experiment study on perforating damage zones [J]. Well Logging Technology,2005,29(1):8-10.

[13] 王赞,李东传,金成福,等. 一种下挂式复合射孔器单元动态压力测试装置:中国,201020653644.8[P]. 2011-07-27.

[14] 李东传,金成福,余海鹰. 复合射孔器射孔后环空压力分布试验研究[J]. 爆破器材,2009,38(1):38-40.

Li Dongchuan, Jin Chengfu, Yu Haiying. Study on annulus pressure distribution after perforation of composite perforators [J]. Explosive Materials,2009,38(1):38-40.

[15] 吴焕龙,杜明章,杨超,等. 射孔弹聚能射流侵彻钢靶的数值仿真与实验分析[J]. 爆破器材,2012,41(2):30-33.

Wu Huanlong, Du Mingzhang, Yang Chao, et al. Numerical simulation and experimental analysis of shaped charge jet penetrating into steel target [J]. Explosive Materials,2012,41(2):30-33.

Experiment Study of the Effect of Combined Perforators on Different Targets

LI Dongchuan, JIN Chengfu, JIN Ye, YU Haiying  
Perforators Inspection Center of Petrochina (Heilongjiang Daqing, 163853)

[ABSTRACT] The same type of combined perforator unit perforated in 4 different kinds of targets in laboratory.  $p-t$  curves in annulus space and targets were tested. Comparative analysis of the test results show that different targets perforated by the same unit present different  $p-t$  curves, in which denser targets have higher peak pressures and longer duration. Three long fractures are generated in the sandstone targets with a porosity of 18.4% and a permeability of  $0.102\mu\text{m}^2$ . Characters of  $p-t$  curves, which are responded by the properties of targets, can be used to determine the combined perforation effects.

[KEY WORDS] combined perforators, annulus space,  $p-t$  curves, fracture

民爆专利信息

专利名称:乳化炸药基质连续敏化机  
专利申请号:CN200720033941.0 公开号:CN200995992  
申请日:2007.02.01 公开日:2007.12.26  
申请人:中钢集团马鞍山矿山研究院

本实用新型公开了一种乳化炸药基质连续敏化机,它由驱动装置、进料装置、混合输料装置、出料装置及机架组合而成。进料装置由进料斗、压料叶片、压料电机构成;混合输料装置由机体、输送螺杆组成;出料装置安装在混合输料装置的末端。本实用新型具有敏化效率高,适用性广,敏化密度、生产能力灵活可调,对乳化炸药基质破坏性小,安全可靠等优点。可广泛应用于高、中、低温敏化及物理、化学及物理化学联合敏化工艺,特别适用于自动化、机械化连续生产乳化炸药生产线的敏化工艺。

专利名称:用于工业炸药包装线的炸药封蜡机  
专利申请号:CN200720062246.7 公开号:CN200995993  
申请日:2007.01.19 公开日:2007.12.26  
申请人:湖南金能自动化设备有限公司

本实用新型提供了一种用于工业炸药包装线的炸药封蜡机,包括中间蜡池,还包括分蜡箱、若干分流嘴及喷气管,中间蜡池连通分蜡箱向分蜡箱供蜡,若干分流嘴安装在分蜡箱中将蜡液分流导出,分流嘴在分蜡箱中的分布使之流出的

蜡液形成蜡帘,喷气管对着蜡帘把蜡喷吹到药卷的端部,使药卷被蜡封。本实用新型不仅用蜡量少、喷层薄,且喷蜡很均匀,通过检测,完全符合工业炸药的封蜡标准,用于工业炸药包装线将彻底摆脱手工黏蜡的现状,从而实现工业炸药包的自动包装。

专利名称:扇形叶片式连续混药机  
专利申请号:CN200720047600.9 公开号:CN200992524  
申请日:2007.01.22 公开日:2007.12.19  
申请人:广东华威化工实业有限公司

本实用新型涉及一种扇形叶片式连续混药机,包括电动机、减速机、链轮、齿轮和槽体,槽体内设有两条空心轴,空心轴一端是空心轴出水口,另一端是空心轴进水口,槽体上设有加料口,下设有出料口,其特征在于空心轴内设有隔板,空心轴上设有错节有序的扇形空心叶片,扇形空心叶片两面相互平行,扇形空心叶片一面的一侧设有一定角度的直角三角形楔型,扇形空心叶片空腔与空心轴上的小孔相通。本实用新型由于采用上述结构,具有结构简便、物料升温快、冷却性能好、噪声小和能耗低的特点,能研磨并挤压炸药制造中的各种物料,使各种物料混合充分致密而均匀,从而制造出性能稳定,爆轰性能高的粉状硝铵炸药。

(王元荪)