

# Research and Application of Aftereffect-Based Compound Perforation Technique

Qigui Cheng<sup>1,2</sup>, Chaoya Ma<sup>2</sup>, Minjun Qin<sup>3</sup>, Lei Tian<sup>4</sup>, Wanying Luo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Key Laboratory of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>China Petroleum Logging Co., Ltd, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Xi'an Aoxing Energy Technology Co., Ltd, Xi'an Shaanxi

Email: [cqg\\_cq@petrochina.com.cn](mailto:cqg_cq@petrochina.com.cn)

Received: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Dec. 17<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 24<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In view of the incomplete discharge of the oil and gas reservoirs by the conventional perforation and deflagration perforation, this paper discusses the mechanism of aftereffect-based composite perforation, and analyzes the effect of the field test. Aftereffect-based composite perforation is a high temperature and high pressure environment formed by conventional perforation, which causes the reaction of the aftereffect particles in the reactor. The two times the high pressure impact environment is formed to remove the formation pollution and improve the permeability in the near well zone. The experiment shows that when the integrated perforating operation is carried out, the aftereffect has synergistic effect on the formation transformation. The technology can be applied to increase production and increase injection, and pre treatment measures for reducing fracturing pressure in tight reservoir or shale reservoir.

## Keywords

Aftereffect-Based Compound Perforation, Formation Pollution, Tight Reservoir, Reducing Fracture Pressure

---

# 后效体复合射孔增产增注技术研究与应

程启贵<sup>1,2</sup>, 马超亚<sup>2</sup>, 秦民君<sup>3</sup>, 田磊<sup>4</sup>, 雒婉莹<sup>4</sup>

<sup>1</sup>低渗透油气田国家重点实验室, 陕西 西安

<sup>2</sup>中国石油长庆油田公司, 陕西 西安

<sup>3</sup>中国石油测井有限公司, 陕西 西安

<sup>4</sup>西安奥星能源科技有限公司, 陕西 西安

Email: cqg\_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018年12月3日; 录用日期: 2018年12月17日; 发布日期: 2018年12月24日

## 摘要

针对常规射孔及爆燃复合射孔对油气储层的污染解除不彻底和地层改造较弱的状况, 本文探讨了后效体复合射孔技术机理及其现场试验效果。后效体复合射孔是利用常规射孔所形成的高温高压环境引起反应器中的后效粒子发生化学反应, 形成二次高压冲击环境, 达到解除地层污染, 提高近井地带渗透性目的。实验表明, 在实施集成复合射孔作业时, 后效体对地层改造还有协同增效作用。该技术可以应用于油井及注水井的增产增注措施, 以及致密油气层或页岩油气层降低破裂压力的前置处理措施。

## 关键词

后效体复合射孔, 地层污染, 致密油气层, 降低破裂压力

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

油气水井射孔完井及油田复合射孔增产增注技术是石油开采过程中的不可或缺的重要内容之一。油气井产量的高低和注水井吸水能力大小与射孔方式密切相关。近年来, 虽然各种先进射孔技术得到快速发展和应用, 但是常规射孔及爆燃复合射孔对油气井井筒附近油气储集层污染解除以及对地层渗透性增加不足[1]。油气井大型压裂虽然可以有效解除近井地带污染, 增大地层导流能力, 但在底水及油水隔层的油井作业与注水井污染解除等应用方面受到一定限制。在低渗透油田开发过程中, 不断增大的油井重复压裂对油藏注水驱替效果的影响也愈加严重[2]。对此, 需要研究探讨一种比一般复合射孔强度大, 但比压裂强度低的解除近井地带污染、增加地层渗透性的办法。

## 2. 国内外技术发展现状

油气层射孔是利用炸药爆炸产生高温、高压、高速的金属射流, 穿透套管和固井水泥环。在油气层中形成一定深度的孔眼, 储层中石油天然气通过射孔孔道流入井筒。高能气体压裂是通过控制固体推进剂的点火和燃烧过程, 产生的峰值压力作用于油层在短时间内产生多方位辐射状的裂纹, 改善油层的渗透和导流能力, 达到增产的目的。

爆燃复合射孔是射孔与高能气体压裂合二为一。机理是利用火药和炸药两者具有数量级之差的反应速度, 在井筒与地层之间形成射孔通道后, 火药随后产生燃气脉冲, 以冲击加载的形式沿射孔通道挤压地层, 使射孔通道以裂缝的形式延伸扩展。国内外射孔复合技术主要有一体式、分体式射孔爆燃复合技术等。一体式射孔爆燃复合技术的主要原理是在射孔弹与弹架之间的空间内填装成型的火药药盒, 射孔弹被导爆索引爆之后, 同时将填装于特定空间的火药药盒点燃, 增强射孔部位压力达到增加地层微裂缝的目的的作用。分体式射孔爆燃复合技术的主要原理是在射孔枪的下部, 安装了高能气体压力弹, 射孔

器与压力弹同步下入井内。不足之处在于前者弹架装药量有限，产生的气体有限，影响裂缝延伸。后者装药量大，但气体作用点分散，也影响裂缝延伸，地层污染带的解除及渗透性增加不足[3] [4]。负压自清洁射孔技术是通过降低井筒液柱，使地层和井筒存在较大的压差，达到清洁孔道，提高产能的目的。此技术在高渗透地层应用效果较好，中低渗透地层效果较差[5]。

### 3. 后效体复合射孔机理及实验

油气井产量的高低和注水井吸水能力大小与地层渗透率( $K$ )、射开程度( $A$ )、地层污染程度即表皮系数( $S$ )等要素相关。

$$Q \propto (K, A, S^{-1} \dots)$$

其中表皮系数( $S$ )表达式：

$$S = (K/K_s - 1) \ln(r_s/r_w)$$

式中： $r_w$ 为井筒半径； $r_s$ 为地层污染半径。

油层污染带的地层渗透率  $K_s$  大小受钻井工艺、完井工艺、射孔工艺、开发方法及修井作业等多种因素决定[6] [7]。表皮系数  $S$  越低，近井地带渗透率  $K_s$  越高。

后效体复合射孔机理是利用云雾爆轰理论[8] [9]，在常规射孔弹口部加装由化学材料微粒制成的后效体，借助射孔弹爆炸后产生的涡流场引力，将这些微粒定向聚集，以云雾状态曳入射孔孔道内，在局部强热作用下，化学微粒被激发并释放出大量化学能和热能，直接作用于孔眼地层，并形成次生导流裂缝，增加地层渗透性的过程。因此，后效体复合射孔所形成的高温高压环境引起反应器中的化学微粒发生化学反应，形成了二次高压冲击地层，解除泥浆浸入等地层污染，并形成次生导流裂缝，提高地层渗透性，达到增加油井产量和水井吸水能力的目的。

化学微粒后效做功过程的离散相和连续相耦合模型，可根据质量、动量、热量交换方程实现量能转化[10] [11]。后效体属于化学药剂，不含炸药基源。因此，具有耐高温、抗摩擦、抗撞击特点。高温下后效体物化性能稳定，低温下不脆裂失效。而且油水浸泡不失效，反应完成后无残留等优点。

图 1 是后效体复合射孔实验曲线。曲线表明常规射孔后后效体发生化学反应升压的过程。在完成射孔 23 毫秒时，发生了后效体的二次作用。压力由 6182 psi 上升到 8100 psi。

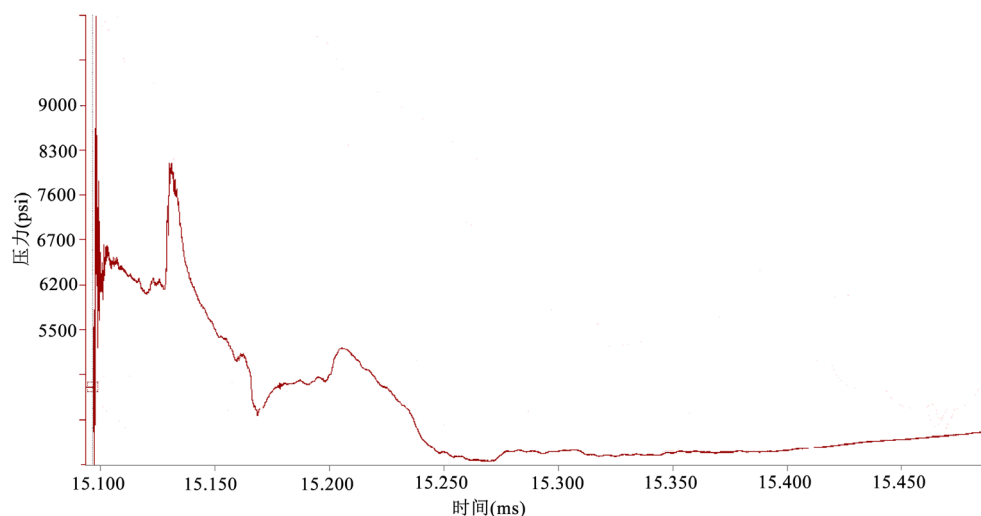
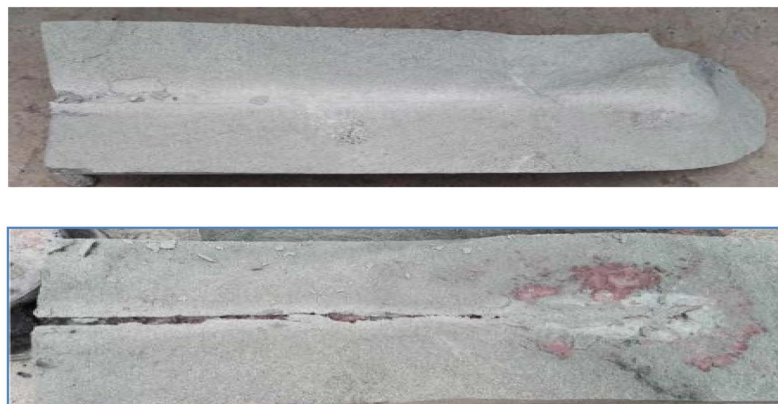


Figure 1. The curve of aftereffect-based compound perforation experiment

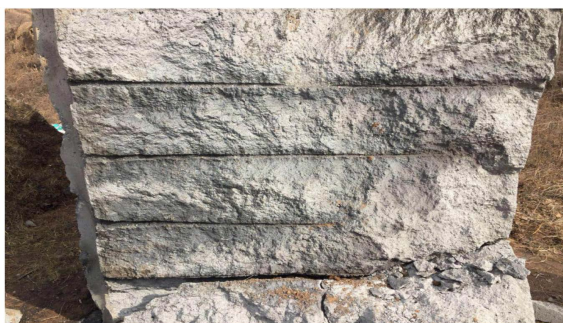
图 1. 后效体复合射孔实验曲线

从岩石打靶效果看(图 2), 对比常规射孔, 后效体明显提高了末端地层渗透性。



**Figure 2.** The effect of conventional perforating and aftereffect-based composite perforating  
**图 2.** 常规射孔与后效体复合射孔岩石打靶效果图

在实施集成复合射孔作业时, 还发现后效体对孔与孔之间的地层有协同增效作用, 进一步增大了裂缝覆盖面, 提升了改造地层的效果(图 3)。



**Figure 3.** The synergetic effect of aftereffect-based information in integrated perforating  
**图 3.** 集成射孔时后效体对地层的协同增效作用

#### 4. 现场应用效果

后效体复合射孔技术可以大面积应用于注水井采用酸化等解堵措施后仍然注不够、注不进的有效储层增注措施; 低渗透油层有底水或油水层间互难以实施压裂等改造措施的油井; 破裂压力很高的致密油层或页岩油气地层的降压处理。

后效体复合射孔技术在不同类型油田进行了试验性应用, 与常规射孔和爆燃射孔比较, 有特别明显的增产增注效果。其中低孔低渗储层增产幅度最高可达 2~5 倍以上; 中高渗透储层增产幅度在 60%~70%。

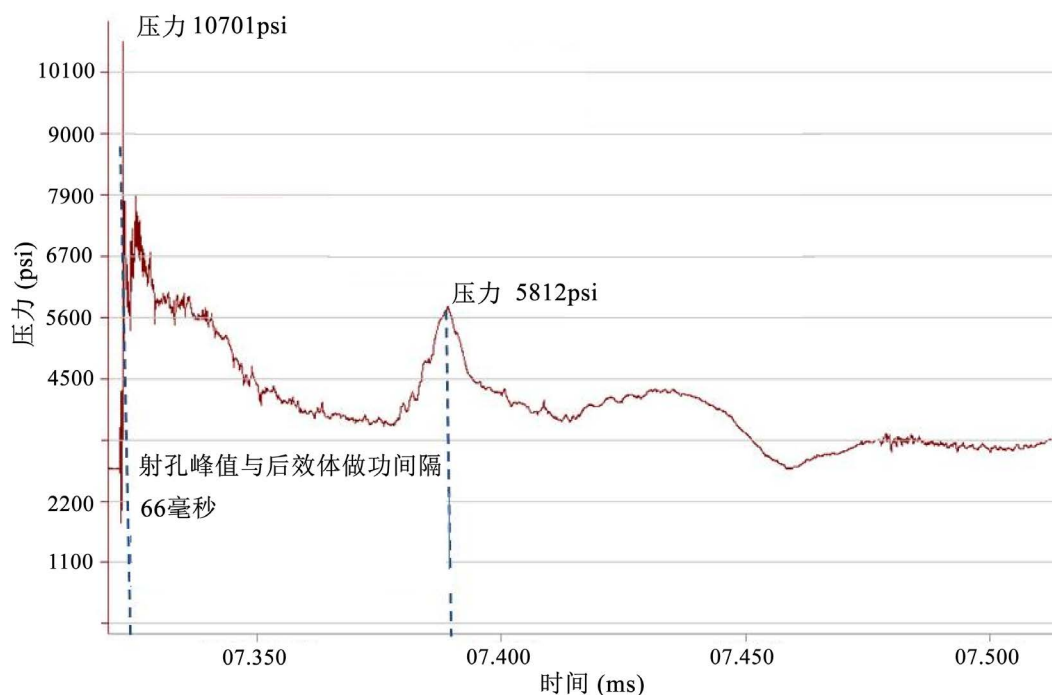
实例一: 低渗透油藏后效体复合射孔增产效果

xx 油田超低渗透油藏长 8 层, 孔隙度为 8%, 岩性为细粉砂岩, 岩心分析渗透率为  $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。2011 年该油田投入开发。油藏初期采用超前注水、油井压裂改造方式。2017 年在该油田 14 口油井采用后效体增产技术试验, 由措施前产液 30.3 吨/天上升到 53.6 吨/天, 日产油由 3.3 吨上升到 22.3 吨。平均单井日产液增加 1.67 吨, 日产油增加 1.36 吨。其中 9 口井平均单井日产油增加 2.04 吨。与采用其他直接压裂井增产比较多增产 1 倍。

实例二: 海油 NB19xx 井与 LF8xx 井后效体复合射孔增产效果

NB19xx 井 P10 层采用后效体复合射孔技术。测试数据表明射孔弹起爆产生了 10,464 psi (72.1 MPa) 压力峰值, 间隔 52 毫秒后效体发生反应, 出现了 8100 psi (55.84 MPa) 第二次的压力峰值。获得日产油 490 吨, 日产天然气 48 万方。同井对比测试结果, 采用常规负压射孔工艺的 P8 层表皮系数为 14, 采用后效体复合增产技术 P10 层表皮系数为 3。后效体复合射孔对解除井附近地层污染效果明显。

中海油 LF8xx 井采用后效体复合射孔技术后的实测井底压力曲线(图 4)。射孔弹起爆产生了 10,701 psi (73.7 MPa) 压力峰值, 间隔 66 毫秒后效体发生反应, 出现了 5812 psi (40.0 MPa) 二次峰值。措施后试井解释表皮系数-0.357。地层污染已解除。



**Figure 4.** The pressure curve of LF8xx well aftereffect-based composite perforating  
**图 4.** LF8xx 井后效体复合射孔实测井底压力曲线

#### 实例三：低渗透油层注水井后效体复合射孔增注效果

xx 油田属于低渗透油层, 注水量达不到配注要求较为普遍。一般多采用酸化和爆燃等改造措施提高注水能力。有效期较短, 且费用较高。在应用后效体复合射孔技术后, 达到了长期增注效果(如表 1)。

**Table 1.** The injection effect of aftereffect-based composite perforating  
**表 1.** 低渗透层后效体增注技术应用效果

井号	措施前		措施后	
	油压(MPa)	注水量(m <sup>3</sup> )	油压(MPa)	注水量(m <sup>3</sup> )
江 288-2*	22.0	3	12	27
江 288-*	20.7	3	15	15
宁 20-*	10	12	11.1	20
宁 16-*	14	10	9.5	15
宁 18-*	17.5	10	16	18
环 2-*	21.4	1	8.3	16
环 63-*	17.6	5	15.6	18

## 5. 结论

1) 后效体复合射孔所形成的高温高压环境引起反应器中的化学微粒子发生化学反应, 形成了二次高压冲击地层, 解除泥浆浸入等地层污染, 并形成次生导流裂缝, 提高油层渗透性, 达到增加油井产量和水井吸水能力的目的。在集成作业时, 后效体对孔与孔之间的地层改造还有协同增效作用。

2) 后效体复合射孔技术可以应用于中高渗透性地层油井增产措施; 低渗透油层注水井注不够、注不进的有效储层; 有底水或油水层间互难以实施压裂改造措施的油井增产; 以及破裂压力很高的致密油层或页岩油气地层前置降压处理。

## 参考文献

- [1] 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): 307-311.
- [2] 程启贵, 主编. 大型低渗透岩性油藏评价及开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015: 195-221.
- [3] 赵旭, 柳贡慧, 李中权. 复合射孔压裂火药爆燃后气液作用分析[J]. 西南石油大学学报, 2008, 30(5): 141-144.
- [4] 周翌, 赵开良, 张锋, 等. 多级脉冲增效射孔技术研究[J]. 测井技术, 2007, 31(1): 82-84.
- [5] 王艳萍, 黄寅生, 潘永新, 等. 复合射孔技术的现状与趋势[J]. 爆破器材, 2002, 31(3): 30-32.
- [6] Civan, F. (2015) Reservoir Formation Damage. Gulf Professional Publishing, Oxford, UK, 852-920.
- [7] Gilliat, J. (1999) A Review of Field Performance of New Propellant/Perforating Technologies. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, 3-6 October 1999.
- [8] 姚干兵, 解立峰, 刘家骢. 液体碳氢燃料云雾爆轰特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(6): 543-548.
- [9] 鲁建存, 张品秀, 金贞淑. 传爆管的爆轰参数计算[J]. 火工品, 1993(3): 39-41.
- [10] 殷清. 二次 FAE 燃料的理化性能分析[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [11] 王永顺, 南海, 赵省向, 等. HATO 爆轰性能的理论计算[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(13): 165-166.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)