

后效射孔技术在中原储气库高效建库中的应用

陶 莹

中原油田分公司天然气产销厂 河南濮阳 457001

摘 要: 随着中国经济的高速发展,对天然气的需求日益增长,储气库的建设变得尤为重要。中原储气库群作为我国华北地区重要的天然气储存和调峰设施,其建设效率和储气能力直接关系到区域能源供应的安全与稳定。后效射孔技术作为一种先进的射孔增效技术,在中原储气库的高效建库中发挥了重要作用。本文从后效射孔的技术原理、增效机理、特点,阐述了后效射孔技术在低孔低渗储气库建设中的增效作用,在此基础上,总结了一套低孔低渗储气库高效射孔的配套工艺技术,对中石化储气库建设具有重要意义。

关键词: 储气库;射孔;后效粒子;孔道内做功;注气能力

1 国内外射孔技术发展现状

射孔是整个完井工艺过程的“临门一脚”,对油气井的生产及后期措施有着非常重要的影响。为了提高射孔完井效果,国内外先后发展了多种类型的增效射孔技术,按发展历程分为三类:正压射孔、负压射孔及后效射孔。

正压射孔是最传统的射孔方式之一,其主要特点是在射孔过程中,井筒内的压力高于地层压力。这种射孔方式通过炸药爆炸产生的能量,直接将射孔弹穿透套管和水泥环,形成射孔孔道,使地层流体能够流入井筒。主要包括复合射孔、多级脉冲复合射孔等,该技术在一定程度上能够解决部分压实污染,但无法解除孔道内污染,对井筒有一定伤害。

负压射孔是在射孔过程中,通过降低井筒内的压力,使其低于地层压力。这种射孔方式利用地层压力与井筒压力之间的压差,促进地层流体流入井筒,同时减少射孔过程中产生的压实带和孔道污染。主要包括自清洁射孔、负压射孔等,该技术利用射孔孔内与井筒间的压差清洁射孔孔道,但不能解决孔道压实污染及孔道末梢形态。

后效射孔技术是在常规射孔技术的基础上,通过引入后效体微粒,实现射孔孔道内的二次做功。当射孔弹起爆后,高速射流将后效体微粒曳入射孔孔道内,后效体微粒在孔道内发生爆燃,释放出大量的化学能和热能,进一步瓦解压实带,扩大孔道,并产生次生导流裂缝,提高地层的渗透性。对近井地带地层有四种效用:解除孔道压实、优化孔道形态并去除孔道末梢杆堵、清洁孔道、利用微裂缝沟通相邻孔道,最终达到解除钻井、固井、完井及其他污染对近井储层造成

的伤害,恢复和提高地层的渗透性,达到油气井增产(高产)、注水井增注及措施井增效的目的。

2 后效射孔技术机理

根据军事上穿甲弹和破甲弹分仓做功的原理,常规射孔弹在开垦孔道(类似军事上“穿甲”)的同时,由高速射流引起的涡流场引力将后效体的高能粒子曳入到孔道内;这些被雾化的高能粒子在孔道内聚集、碰撞、相互作用,引起局部灼热点火,数毫秒内完成从爆燃到螺旋爆轰(云雾爆轰)。

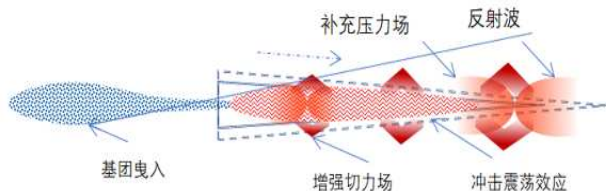


图 2-1 后效体射孔技术机理图

后效粒子在射孔孔道内爆轰做功有以下几方面的作用:

- (1) 当孔内压力 $>$ 围岩破裂压力时(一般孔道内峰值压力高达70MPa),孔道末梢产生横向裂缝,孔道末梢杆堵消除,孔道与地层天然裂缝沟通能力增加;
- (2) 中间产生纵向裂缝,裂缝长短与两者之间的压差成正比,射孔孔道的压实带解除;
- (3) 后效粒子在孔道二次做功同时,爆轰能量逆袭作用力,反冲清洗孔道,清除了孔道内碎屑污染;
- (4) 螺旋爆轰在侧向、横向增加有效孔容,同时清洗炮眼,增加泄油面积,提高流动能力。

3 后效射孔技术在中原油田储气库高效建库中的应用情况

2019 年开始，后效射孔技术先后在文 23、卫 11 及文 13 储气库开展了现场试验，以提高储气库的注入性，目前文 23 和卫 11 储气库已投注，文 13 储气库还没有开始试注。

3.1 文 23 储气库应用效果

2019 年 9 月，针对后效射孔技术在低孔低渗储层射孔

孔道二次做功的特点，选择文 23 储气库边缘、低部位且渗透率低的文 23 储 4-7、文 23 储 5-7 文 23 储 8-4 井进行现场试验，试验情况见表 3-1。

表 3-1 文 23 储气库注气情况统计分析表

井号	射孔方式	射孔米 m	平均渗透率 mD	日注气量 $1 \times 10\text{m}^3/$	油压 MPa	地层压力 MPa	每米每毫达西每 MPa 的日注气量 $1 \times 10\text{m}^3/\text{m}.\text{md}.\text{MPa}$
文 23 储 2-4	复合	142.2	7.98	29.98	29.1	6	0.001144
文 23 储 6-3	复合	110.9	10.27	33.98	29.2	6	0.001285
文 23 储 11-4	复合	213.7	7.68	40.74	29.3	13.2	0.001547
文 23 储 4-7	后效	87.7	5.3	26.87	27.6	7.2	0.002834
文 23 储 5-7	后效	145.7	5.1	33.98	28.2	7.7	0.002281
文 23 储 8-4	后效	136.7	3.34	26. 5	27.9	9.0	0.003071

从表中数据看，后效射孔注气井的注气能力要高于复合射孔井，其每米每毫达西每 MPa 的日注气量是复合射孔井的一倍左右。这说明后效高能粒子在射孔孔道内二次做功，产生了四个方面的作用：解除孔道压实、优化孔道形态并去除孔道末梢杵堵、清洁孔道及利用微裂缝沟通相邻孔道，达到解除钻井、固井、完井及其他污染对近井储层造成的伤害，恢复和提高地层的渗透性，增强了注气井注入性。

边缘井文 23 储 5-7 和文 23 储 8-4 井处于构造的低部位（见下图），物性差，渗透率低，且非均质性强，经过后效射孔后，其日注气量也能满足配注要求，这也证明了后效射孔技术具有将常规的射孔完井工艺提升到小型的油藏改

造技术的效能，这是射孔技术的一次重大突破。

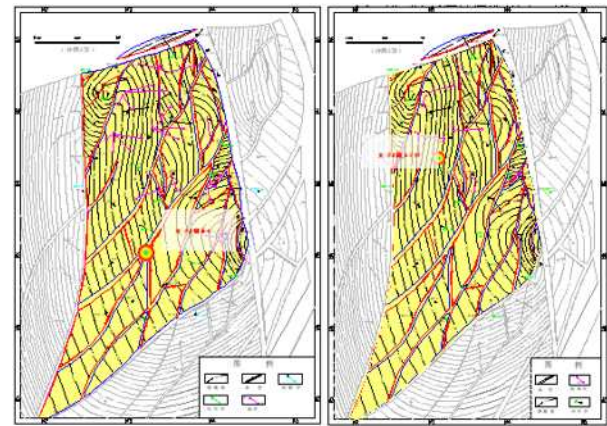


图 3-1 文 23 储 5-7 和文 23 储 8-4 井的井位图

表 3-2 卫 11 储气库注气情况统计分析表

井号	射孔方式	射孔米 m	平均渗透率 mD	日注气量 $1 \times 10\text{m}^3/$	油压 MPa	地层压力 MPa	每米每毫达西每 MPa 的日注气量 $1 \times 10\text{m}^3/\text{m}.\text{md}.\text{MPa}$
卫 11- 储 1	89-1 复合	45.0	7.78	20.1196	19.38	10.11	0.006193
卫 11- 储 2	89-1 后效	56.9	8.45	50.3	19.41	10.09	0.011230
卫 11- 储 3	89-1 复合	84.2	9.72	40.0855	19.32	4.50	0.003305
卫 11- 储 4	89-1 无深	75.8	30.26	40.4955	19.38	8.15	0.001554
卫 11- 储 5	89-1 无深	60.9	23.31	67.2052	19.20	3.76	0.003062
卫 11- 储 6	89-1 无深	78.1	24.5	51.0286	19.25	5.95	0.002005
卫 11- 储 7	89-1 无深	80.4	23.77	53.9591	18.52	6.94	0.002438
卫 11- 储 8	89-1 后效	64.1	19.14	34.0254	18.53	10.62	0.003506
卫 11- 储 9	89-1 复合	82.4	31.72	41.8011	18.57	13.13	0.002939
卫 11- 储 10	89-1 后效	81.7	17.59	36.5944	18.51	13.19	0.004722

3.2 卫 11 储气库应用效果

2021 年 2 月 15 日，卫 11 储气库完成可研方案编制并开始老井处置作业，2021 年 9 月 29 日建成并投运试注成功。其射孔完井方案采用了三种射孔技术 --- 深穿透、复合和后效射孔技术。具体情况见表 3-2。

高部位渗透率好的卫 11- 储 4 井、卫 11- 储 5 井、卫 11- 储 6 井及卫 11- 储 7 井采用深穿透射孔，物性差、渗透率低边缘井采用后效射孔和复合射孔。我们用每米每毫达西

每兆帕的日注气量来综合评价注气井的注气效果。

从表中数据可以看出，卫 11- 储 2 注入能力最好，每米每毫达西每兆帕的日注气量为 $0.011231 \times 10\text{m}^3/\text{m}.\text{md}.\text{MPa}$ 。该井位于卫 11 块东南部，2021 年 5 月 19 日开钻，6 月 15 日完钻，6 月 28 日完井，完钻并深 2865m，固井质量良好，电测解释气层 45.7m/22 层（气层、差气层、水淹气层），平均孔隙度 12.02%，平均渗透率为 9.75mD，属于低

渗透层带；2021年8月2日上作业投产，8月12日，采用后效射孔技术完井，10月10日注气，试注气不到12小时，近井地带就注通了，最大日注气量高达50.8万方，达到方案设计要求。

另外，渗透率相对较低的卫11-储8和卫11-储10井，也是采用后效射孔技术完井，从每米每毫达西每兆帕的日注气量看，注气效果也很好，都优于深穿透和复合射孔技术。

3.3 后效射孔技术在中原储气库应用经济、社会效益分析

后效射孔技术的经济效益主要体现在四个方面：①后效体孔道内做功位置精准，能量利用率高，能有效提高储层近井地带的注入性，增加单井日注气量；②提高单井注入能力，可以缩短注气设备运行时间，降低运行成本；③后效体为非火工品，不需要专门的防爆车辆押运，采用公共交通工具运输即可，也不需要特殊的库房存在，节省运输、存在费用。另一方面，使用安全方便，不会发生炸枪或卡井事故。其经济效益见表3-3。

表3-3 后效射孔技术在中原储气库应用效益分析表

井号	减少运输和储存费用(万元)	每日增加注气量增加效益(万元)
文23储4-7	1.37	14.3072
文23储5-7	1.72	14.2415
文23储8-4	1.56	15.0664
卫11-储2	1.26	36.5447
卫11-储8	1.29	4.2324
卫11-储10	1.39	12.8026

社会效益：随着油田勘探开发的不断深入，低渗透油气产量的比例逐年上升，已成为重要的接替能源。后效射孔技术能够有效降低射孔表皮系数，提高孔道轴向和径向的渗流效果，增加孔道渗流能力，射孔完善程度高，增产增注效果明显，在未来的油气开发中具有广阔的应用空间。

4 结论和建议

结论：后效射孔技术首次提出并实现了非爆炸性材料在射孔孔道内做功技术理念，它运输、储存方便，使用安全可靠；能量释放位置精准，利用率高，产生的压力峰值高（孔道内峰值压力高达70MPa），地层造缝能力，做功安全可靠，有效率高。胜利油田全面系统地评价了后效射孔技术在改善近井地带油层渗流能力的有效性，可对比井有效率达83%，油气井增液幅度超过20%，卫11-储气库应用的三口后效射孔井也见到了显著增注效果。

这些都验证了后效射孔技术在解除孔道压实、优化孔道形态并去除孔道末梢杆堵、清洁孔道及利用微裂缝沟通相邻孔道等方面具有的独特效用。

建议：下步在中原油田储气库建设射孔完井工艺优选过程中，在解除钻井、固井、完井及其他污染对近井储层造成的伤害，恢复和提高地层的渗透性方面可优先使用后效射孔技术。

参考文献：

- [1] 倪根生, 马廷虎, 倪奇, 等. 新型后效体射孔技术在深层致密储层压裂中的应用[J]. 石化技术, 2021, 28(05): 159-160.
- [2] 徐新华, 戴宗, 朱义东, 等. 基于复合油藏模拟的后效射孔产能评价方法[J]. 油气井测试, 2023, 32(02): 63-67.
- [3] 胡文丽, 徐新华, 闫正和, 等. 一种新型后效射孔技术及应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(07): 31-34+3.
- [4] 杨浩, 包智魁, 张继成. 低渗透油藏后效射孔产能模型建立及应用[J]. 中外能源, 2021, 26(02): 44-49.