

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.009

# 深层水平井多级复合深穿透定向射孔技术应用研究<sup>\*</sup>

赵 旭<sup>①②</sup>

①中国石化石油工程技术研究院(北京,100101)

②页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室(北京,100101)

[摘 要] 深层水平井多级复合深穿透定向射孔技术利用深穿透射孔和定向高能气体压裂技术在油层部位形成沟通孔眼及多个辐射状径向裂缝,以扩大泄油面积和降低生产压降。分析了该技术的原理,根据技术适用性对试验井进行选井选层论证,在此基础上提出了试验井的多级复合深穿透定向射孔设计方案,并从试验准备及施工工艺方面论述了试验井的现场实施情况。试验结果表明,施工过程达到了方案设计要求,试验井的产油量得到了提升,产油量由措施前的 0.4 t/d 提高到 7.2 t/d;含水率有了明显的下降,产液量由措施前的 33.4 t/d 降到了 7.8 t/d。分析认为,该技术成功的关键是射孔压裂深度、方位的控制、选井选层的合理性。该技术的成功应用为老油田剩余油挖潜提供一种经济、高效的途径,具有一定的应用前景。

[关键词] 水平井;复合射孔;气体压裂;施工工艺;现场应用

[分类号] TE257

## Application of Multi-stage Composite Deep Penetration Directional Perforation Technology for Deep Horizontal Wells

ZHAO Xu<sup>①②</sup>

① Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering (Beijing, 100101)

② State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development (Beijing, 100101)

[ABSTRACT] Deep penetration composite directional perforation technology in horizontal wells applies deep penetrating perforation and high energy gas fracturing to form a plurality of radial hole in the reservoir, thereby to enlarge the drainage area and decrease production pressure. Such technical principles were analyzed, and based on the technical applicability, tested well was selected. Accordingly, a deep composite directional perforation design plan was proposed on the tested well, and oilfield operation situation of tested well was detailed illuminated from the test preparation to construction techniques. The test results show that construction technology has met the design requirement, oil production of the tested well increases from 0.4 t/d to 7.2 t/d, and water content obviously decreases from 33.4 t/d to 7.8 t/d. By comprehensive analysis, the key factors of deep penetration composite directional perforation in horizontal well are fracturing depth, perforation orientation, well situation and reservoir condition. The successful application of this technology provides an economical and efficient way for producing the remaining oil potential in old oilfields, and it has a good application prospect.

[KEYWORDS] horizontal well; composite perforation; gas fracturing; construction technology; field application

### 引言

深层水平井多级复合深穿透定向射孔技术起源于 20 世纪 80 年代兴起的高能气体压裂技术。经过多年发展和完善,目前,该技术在压裂火药的性能、

排爆方式、定向压裂以及复合深穿透设计等方面得到了长足的发展,逐渐成为油田二次完井增产、致密储层和页岩储层深度开发的重要辅助手段之一<sup>[1-3]</sup>。该技术借助聚能射孔的定向穿透作用和高能爆燃气体的压裂破岩作用,在油层不同深度和方位压出多个辐射状径向裂缝,增产机理在于深穿透污染带及

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-02-11  
基金项目:国家科技重大专项课题,海相碳酸盐岩超深油气井关键工程技术(2017ZX05005-005);中石化科技部推广项目,自适应调流控水完井技术推广与工业化应用(P16117)  
第一作者:赵旭(1981-),男,高工,主要从事井筒内复杂流动与控制、现代完井工程方面的研究。E-mail:zhaoxu46@163.com

近井隔夹层,在井筒周围 2~4 m 内形成多个径向通道,以扩大泄油面积和降低生产压降,为低渗、边低水、老油田和边际油油田提供一种经济高效的开采途径<sup>[4-5]</sup>。

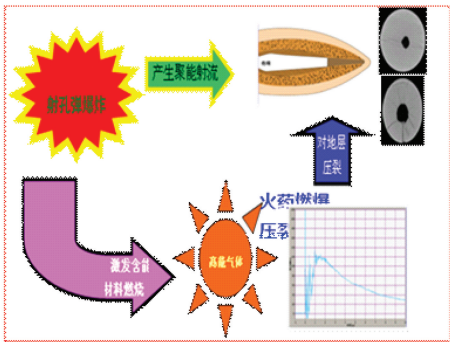
1 技术原理

深层水平井多级复合深穿透定向射孔二次增油完井技术采用两套管柱,如图 1 所示,其技术原理如下<sup>[6-10]</sup>:

- 1) 用油管或钻杆传送复合射孔枪至完井井段,用电缆传送磁性定位仪和自然伽玛校深仪测定深度位置,用电缆传送陀螺仪测斜,确定射孔方位。
- 2) 采用加压的方式,引爆射孔枪内的射孔弹,射孔弹爆炸产生的射流侵入形成孔道和爆炸冲击,在目的位置储层内定向射开直径为 10~12 mm、深为 0.6~1.0 mm 的孔眼。
- 3) 射孔弹爆炸引起射孔枪体内压裂火药的爆燃,同时点燃火药药柱,爆燃气体对地层产生 1~3 s 的压裂做功,使得沿射孔孔眼低层产生 3~8 条的主裂缝,促使射孔孔眼及裂缝进一步延伸,实现穿透低渗带和隔夹层的功能。
- 4) 同一深度、不同方位可开孔,同一方位、不同



(a) 定向射孔后效果



(b) 原理示意

图 1 多级复合深穿透定向射孔技术原理示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of multi-stage composite deep penetration directional perforation technology

深度可产生多条裂缝,形成多分支径向油气渗流通道,射孔与压裂相结合,在近井带形成孔缝结合型超穿深裂缝体系。

5) 完成多级复合深穿透定向射孔后,采用封隔器或桥塞等工具对原出水层进行堵水。

2 选井及方案设计

2.1 选井选层

YB566H 井直导眼油层厚度 11.5 m,为复合韵律储层。油层厚度 12.0 m,避水高度 11.3 m,该井控制储量  $9.42 \times 10^4$  t,累产油量  $1.53 \times 10^4$  t,措施前日产液 33.4 t,日产油 0.4 t,长期高含水,采出程度低。测井解释结果显示,该井水平段 4 835 m 以下地层为低渗含泥质夹层,岩性泥质含量较高,属于砂岩和夹层的界面处。结合对该区剩余油数值模拟计算分析和前期水平井钻井录井分析及电测结果,证实水平段后段夹层以下低渗段剩余油富集。

基于以上分析,对该水平井上部进行了封堵,对 4 835 m 以下的低渗含泥质夹层实施多级复合深穿透定向射孔技术,以期穿透水平井下部隔夹层,改善油层的渗流能力,扩大渗流面积,最终达到增产增效的目的。

2.2 工具参数

1) 射孔枪。该井为  $\varnothing 139.7$  mm 套管完井的水平井。 $\varnothing 96$  mm 多级复合射孔器同时满足射孔的安全和效果需要,综合性能最优;故采用该射孔器施工。

2) 射孔弹。YB946 H 井钻遇油层埋藏较深,地层温度约为 112℃。根据射孔弹装药类型与井下滞留时间的关系图表<sup>[11]</sup>,黑索今射孔弹在 115℃ 条件下最大滞留时间超越 80 h,说明从下枪到完成射孔不超过 80 h,能够保证射孔弹的性能和安全。考虑施工过程中可能出现的施工时间延长,推荐采用奥克托今射孔弹。通过对目前常用奥克托今射孔弹和黑索今射孔弹的穿深效果对比,同时结合成本分析,最终采用 SDP39HMX29-2 高温射孔弹。

3) 压裂火药装药量。利用多级复合射孔优化软件,根据射孔井段最大垂直深度 4 600 m,地层破裂压力为 78.5 MPa,地层温度为 112.77℃,结合射孔枪、射孔弹、井身数据、地质参数等进行优化分析<sup>[12]</sup>。见表 1。

射孔器装药量的优化结果见表 2。内装药 390 g/m,外装药 3.4 kg 时,主裂缝缝长 4.75 m,裂缝的宽度为 3.5 mm,峰值压力 119 MPa,裂缝扩展压力

表 1 YB566H 井优化设计的基础参数  
Tab. 1 Optimum design basic parameters for well YB566H

火药参数		井筒参数		岩石力学参数	
分级点火级数	2	垂直深度/m	4 600	岩石弹性模量/GPa	95.6
火药装药质量/kg	3.4	井筒半径/mm	107.25	岩石泊松比	0.25
火药柱密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 600	套管半径/mm	69.85	渗透率	0.1
火药力/( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	976	套管壁厚/mm	10.54	油藏厚度/m	11.5
火药爆温/K	2 600	套管钢级	P110	有效层顶深/m	4 601.5

表 2 装药量优化结果  
Tab. 2 Optimized results of fracturing propellant quantity

分段	射孔段/m	孔密度/ $\text{m}^{-1}$	相位	内装药量/ g	外装药量/ g	总装药量/ g
第一段	4 870 ~ 4 892	13	垂直向下	5 970	10 200	16 170
第二段	4 892 ~ 4 913	13	垂直向下, 左右 $\pm 15^\circ$	5 550	10 200	15 750
第三段	4 913 ~ 4 930	13	垂直向下	4 590	10 200	14 790

85 MPa。

2.3 管串设计

采用压力开孔延时起爆，一趟管柱下井完成 4 870 ~ 4 930 m 的射孔作业。整体射孔管柱结构如图 2 所示。

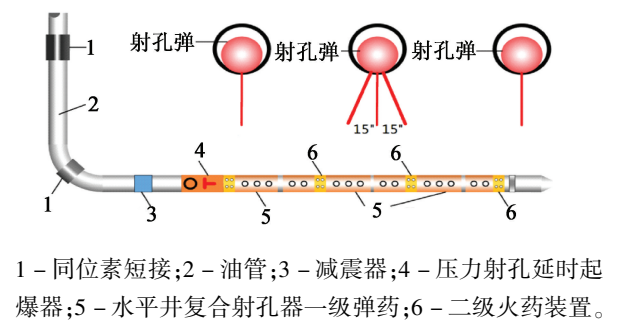


图 2 复合射孔工具及管串结构示意图  
Fig. 2 Composited perforating tool and pipe string structure sketch

如图 2 所示,深层水平井多级复合深穿透定向射孔完井管柱组成结构相对简单,由下至上分别为射孔枪短接、压力起爆装置、减震器、同位素短接和送入管柱;其中,射孔枪短接是整个管串的核心部分,射孔弹分别按照垂直向下和 15° 相位向下的排序方式安装在射孔枪中,压裂火药被安放在射孔弹间的空隙中,整个射孔枪短接自成一体。使用中,地面井口加压,启动压力射孔延时起爆器,点燃导爆索,进而引爆射孔弹,按照排布方式向下射孔,射孔弹爆炸形成的高温、高压气体引燃压裂火药,对射孔弹所形成的射孔孔眼进行进一步压裂,实现沟通深

部储层的目的。

3 效果与分析

3.1 效果评价

采用深层水平井多级复合深穿透定向射孔技术进行二次完井控水增油,成功进行了施工作业,组下多级复合射孔二次完井管柱及复合深穿透射孔压裂作业一次成功。这是该技术在国内同类型二次完井中的首次应用。

施工后,下入生产采油管柱对油井进行重新求产,水平井再次求产后的生产情况如表 3 所示。

从表 3 可以看出,YB566H 井生产后,产液量由措施前的 33.4 t/d,降到了 7.8 t/d;产油量由措施前的 0.4 t/d,增加到了 7.2 t/d;综合含水率由措施前的 99.1% 降到了 7.7%,下降了 91.4%;控水增油效果明显。从该井产液量的大幅度下降和产油量的提高能够得出,封隔器对水平井的原主要供液层进行了有效的封堵,致使水平井原供液层的地层流体无法产出,作业后的主供液段应为定向射孔新沟通的油气储层,多级复合深穿透定向射孔作业打通了水平井原控制储层内的隔夹层,建立了新的产液流动通道,达到了沟通剩余油储层的目的。另外,该井措施作业后,油井产出动液面随着生产的不断进行而逐渐降低,从原来的距井口 711 m 逐渐降低至距井口 2 358 m 的位置后稳定;这说明措施实施后,生产初期由于火药爆燃压裂造成的人工裂缝有一定



表 3 水平井多级复合射孔作业前、后产能对比

Tab. 3 Comparasion of productivity of horizontal well before and after multi-stage composite perforation					
时间节点	生产压差/MPa	产油量/(t·d <sup>-1</sup> )	产水量/(t·d <sup>-1</sup> )	产液量/(t·d <sup>-1</sup> )	含水率/%
施工前	2.0	0.4	33.0	33.4	99.1
施工后	2.5	7.2	0.6	7.8	7.7

闭合,导致射孔形成的裂缝导流能力下降,但下降至一定程度后能保持人工裂缝的沟通能力稳定,也进一步说明了深井多级复合深穿透定向射孔工艺技术的现场实施与理论设计基本一致。该井在措施实施后一直低含水率生产,累计增产达5 000 t 以上,新沟通的油层剩余油潜力较大,可采储量较高。采用多级复合深穿透定向射孔技术沟通新储层是一套可行的增产措施,整套技术现场试验取得了较好的成效,实现了控水增油。

3.2 技术评价

在技术应用方面,分析表 4 中 3 种作业方式可知,该工艺技术采用一趟管柱完成全部作业,相较于常规的机械找堵水作业和化学调剖堵水作业,具有施工简便、安全可靠、控水作业针对性高等特点,克服了常规机械找堵水作业难以在深井中完成、化学调剖堵水作业无法耐高温的技术难题,特别适合深井和超深井二次完井剩余油挖潜作业。此外,在经济方面,YB566H 井的工具作业费用约为 90 万元,相较于常规的二次完井增油作用节省费用约 30% 以上,实现了降低投入、提高产出的经济需求。

表 4 不同二次完井作业对比

Tab. 4 Comparison of different secondary completion operations			
结果	深穿透定向射孔	机械找堵水	化学调剖堵水
控水针对性	较高	高	较差
适应储层范围	小	中	大
施工难度	较小	随井深增大	较小
作业可靠性	中	较差	高
受温度影响	较小	较小	大
适用深度/m	6 000	3 000	6 000
作业成本	较低	随井深增大	较高

4 现场应用

按照步骤完成了施工作业,组装下入多级复合深穿透定向射孔完井管柱及定向射孔作业一次成功,将工艺措施作业结果与设计参数对比分析,检查、记录射孔起爆、射孔枪孔眼、定向及起爆情况。

结果表明:各径向孔方位误差均控制在±3°范围内,射孔起爆率大于 95%,一级火药及二级火药均充分燃烧。从工具应用及工艺角度评价,该试验井达到了深层多级,符合深穿透定向射孔方案设计要求,措施符合率为 100%。图 3 为施工中复合射孔枪。



图 3 复合射孔枪

Fig. 3 Composite perforator gun

值得注意的是,试验井 YB566H 的隔夹层厚度约为 1.5 m,措施作业成功打穿了该隔夹层,证明了采用多级复合射孔深穿透定向射孔能够在深部储层中穿深达到 1.5 m,适合于隔夹层厚度在 1.5 m 以内的沟通储层措施作业。但从多级复合定向射孔地面测试和其他应用的综合作用效果来看,该工艺技术的最大穿深在 1.5~2.5 m 之间。结合对储层的认识精确性、技术的成功率和安全性、深部储层井筒条件的复杂性等因素的综合考虑,建议多级复合深穿透定向射孔增油技术在隔夹层厚度小于 1.5 m 的水平井中应用,隔夹层厚度在 1.5 m 以上的水平井射孔打不穿隔夹层的可能性逐渐增加,导致工艺技术失败的风险较大。

基于以上,深层水平井多级复合深穿透定向射孔技术成功地在 YB566H 进行了应用,实现了二次控水完井增油,是一种可应用于深井的简单、可行和可靠的控水增油二次完井技术,但该技术的应用需要考虑井筒条件、油藏条件及工程条件的限制,在进

行综合评估满足使用条件后,才能够开展现场应用,是一种具有显著特点的深井和超深井二次完井剩余油挖潜增油作业技术。

## 5 结论

1)深层水平井多级复合深穿透定向射孔技术为老油田剩余油挖潜提供一种经济高效的途径,具有一定的应用前景。

2)深层水平井多级复合深穿透定向射孔技术实施成功的关键是射孔压裂深度和方位的控制,应用效果好坏的关键在于选井选层,设计时应根据技术适应性从油藏地质条件和工程条件方面进行详细论证。

3)建议开展深穿透大孔径多级复合定向射孔技术及配套工具设备的研发,以增大多级复合射孔的地层沟通能力,从根本上解决多级复合射孔作业中穿透深度有限的问题。

## 参考文献

- [1] 孙新波,刘辉,王宝兴,等. 复合射孔技术综述[J]. 爆破器材,2007,36(5):29-32.  
SUN X B, LIU H, WANG B X, et al. Review of propellant perforation techniques[J]. Explosive Materials, 2007, 36(5): 29-32.
- [2] 林英松,张宝康,蒋金宝,等. 爆生气体作用下孔壁岩石开裂的机理及影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(3): 50-54.  
LIN Y S, ZHANG B K, JIANG J B, et al. Mechanism and influencing factors on radial fractures' cracking and propagation under exploding gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(3): 50-54.
- [3] 张飞,贾居红,蔡薇. 复合射孔器爆燃气体压力计算模型[J]. 兵工自动化,2016, 35(12): 41-44.  
ZHANG F, JIA J H, CAI W. Calculation model for detonation gas pressure in compound perforation[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(12): 41-44.
- [4] 刁刚田,刘志华,周家驹,等. 复合射孔技术的应用[J]. 钻采工艺,2003,26(6):30-33.  
DIAO G T, LIU Z H, ZHOU J J, et al. The application of compound perforation technology [J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26(6): 30-33.
- [5] 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):307-314.  
LI H T, LUO W, JIANG Y S, et al. Initiation and extension of gas-driven fracture during compound perforation [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 307-314.
- [6] 李克明. 高能复合射孔技术及应用前景[J]. 石油钻探技术,2002,30(3):72-74.  
LI K M. High power, multiplex perforation technique and its prospect[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(3): 72-74.
- [7] 李东传,金成福,刘权民,等. 复合射孔检测技术现状及其发展趋势[J]. 测井技术,2011,35(2):164-166.  
LI D C, JIN C F, LIU Q M, et al. Status and trend of compound perforation test technology[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(2): 164-166.
- [8] 赵旭,丁士东,周仕明. 复合射孔气液作用后气体上移运动规律实验研究[J]. 测井技术,2011,35(2):167-170,191.  
ZHAO X, DING S D, ZHOU S M. Experimental study on gas movement mechanism in wellbore after compound perforation [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(2): 167-170, 191.
- [9] 练章华,丁士东,赵旭,等. 元坝气井射孔完井近井壁渗流场分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 36(6):173-180.  
LIAN Z H, DING S D, ZHAO X, et al. Analysis of the fluid flow field near wellbore wall of gas-well perforated completion in Yuanba [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 36(6): 173-180.
- [10] 张国按,孙志明. 高能复合射孔(FracGun)在国外A油田的应用[J]. 石油钻探技术,2006,34(1):62-64.  
ZHANG G A, SUN Z M. Application of fracgun in an overseas oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 62-64.
- [11] 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.
- [12] 赵旭,柳贡慧,张涛. 不同体积高压气体对复合射孔压井液运动的影响[J]. 石油学报,2009,30(2):295-299.  
ZHAO X, LIU G H, ZHANG T. Movement mechanism of control fluid in propellant perforation under the action of downhole high-pressure gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 295-299.