

东海气田高低压层分采一体化射孔技术

王友春

中海油田服务股份有限公司上海分公司 上海 200050

通讯作者: Email: 461000179@qq.com

引用: 王友春. 东海气田高低压层分采一体化射孔技术[J]. 油气井测试, 2022, 31(6): 22-26.

Cite: Wang Youchun. Integrated perforating technology for separate production of high and low pressure layers in East China Sea gas field[J]. Well Testing, 2022, 31(6): 22-26.

摘要 在同一口井中既存在异常高压储层, 又存在低压或常压储层, 为达到高低压储层分层开发目的, 研究出高低压层一体化射孔技术。在完井程序上, 首先采用常规负压射孔射开低压层, 然后在井筒充满低密度完井液情况下, 采用射孔管柱与分层生产管柱相结合的方式, 射开异常高压及以下层系的同时, 实现了分层开发的目的。针对高低压层一体化射孔管柱, 采用爆轰波波形叠加算法, 分析封隔器承载力, 保证高压气井井筒完整性。东海 X 井采用该技术负压射孔成功后, 井口压力快速上涨至 18.69 MPa, 直接达到自喷条件, 投产后保持天然气 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、凝析油 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ 的稳定产量, 达到配产预期的 3 倍, 效果显著。该技术为油气藏产能释放提供了新的思路, 有效防止异常高压层射开后的井涌或井喷事故, 具有较好的推广价值。

关键词 高低压层; 分层开采; 生产射孔一体化; 波形叠加算法; 井筒完整性; 储层保护; 产能释放; 井控风险

中图分类号: TE355

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.06.005

Integrated perforating technology for separate production of high and low pressure layers in East China Sea gas field

WANG Youchun

China Offshore Oilfield Services LTD., Shanghai 200050, China

Abstract: In the same well, there are both abnormally high pressure reservoirs and low pressure or normal pressure reservoirs. In order to achieve the goal of layered development of high and low pressure reservoirs, an integrated perforation technology for high and low pressure reservoirs was developed. In the well completion procedure, conventional negative pressure perforation is used to open the low pressure formation at first, and then, the method of combining perforation string with layered production string is used to open the abnormally high pressure and the following layers when the wellbore is full of low-density completion fluid, so as to achieve the goal of layered development. For the integrated perforation string in high and low pressure layers, the detonation wave waveform superposition algorithm is used to analyze the packer bearing capacity to ensure the wellbore integrity of the high-pressure gas well. After the successful negative pressure perforation of X Well with this technology in East China sea, the wellhead pressure rises rapidly to 18.69 MPa, which directly meets the condition of flowing. After being put into production, the natural gas is kept at $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ and the oil is kept at $60 \text{ m}^3/\text{d}$, the real production is three times of the expected production allocation, which has an obvious effect. This technology provides a new idea for the deliverability release of oil and gas reservoirs, and effectively prevents the well kick or blowout accident after the abnormal high pressure layer is opened, which has a good promotion value.

Keywords: high and low pressure formation; separate layer production; combination of production and perforation; waveform superposition algorithm; wellbore integrity; reservoir protection; capacity release; well control risk

东海海域地质条件复杂, 储层的非均质性较强, 且单个储量规模偏小的油气藏占比较高^[1-2]。而常规的完井程序中, TCP 射孔作业和下生产管柱作业是分开的。即: 首先进行 TCP 负压射孔打开目的油气层段, 循环压井后起出射孔枪, 然后再按照生产管柱设计下入生产管柱^[3-4]。这样的作业模式

建产周期长, 作业成本高, 不能很好的满足储量规模偏小的边际油气藏开发需要^[5]。

随着东海气田开发的不断深入, 在同一口井中, 存在多套压力层系、压力反转的现象, 高低压层完井分采的情况也就随之出现, 给传统海上气井完井技术带来了较大的挑战。为实现高低压分层完

井,李艳飞等^[6]研究的高低压分层完井技术,推荐在低压层采用暂堵液对低压射孔层进行暂堵,防止低压层漏失,保护储层;对高压层射孔时采用高密度无固相完井液。暂堵液和地层水、高密度无固相完井液均不会发生化学反应从而产生化学沉淀造成生产通道堵塞。高密度完井液配合暂堵液,较好的解决了井控问题和储层保护问题。但是高密度无固相完井液由于特殊的工艺要求,加工周期长,生产投入大,对于储量规模偏小的油气藏大规模使用存在较大的成本压力。

高低压气井分层开采,对于生产管柱的密封性能要求高。为实现高低压层的有效分隔,最重要的就是封隔器的选用。葛俊瑞等^[7]针对高压气井开发井筒完整性问题,根据封隔器的结构、气密性能以及使用方法,优选采用 VO 级生产封隔器,可以为气井生产提供封隔保障。此次使用的封隔器依然沿用之前使用的永久式生产封隔器,但是利用爆轰波波形叠加算法对封隔器的承载力进行了软件模拟,实现了良好的井筒完整性。

根据实际井况,从射孔管柱设计、负压设计和封隔器有效性模拟等方面进行了论证,提出了高低压分采一体化的完井射孔技术。在常规负压射孔射开低压层的基础上,采用分层完井管柱与射孔管柱一趟下井对高压层实施射孔的同时,实现分层开采的目的。高低压分采一体化的完井射孔技术,避免了因地层压差大,完井液不能同时满足高低层压井需要而导致的上漏下溢的井控问题,有效保护储层,释放油气产能。另外一体化管柱的应用,不再

需要高密度无固相完井液,缩短了完井周期,节省了大量的成本。

1 井况和射孔难点分析

X 井为东海某区块内的一口评价井,主要潜力层位为 P2~P9 层。根据前期区块内探井测试得知,该区块层组中,P3~P6 层为常压力系统,地层压力系数为 1.00~1.20,P7~P8 层为异常高压系统,地层压力系数为 1.37~1.48,P9 层出现压力反转,地层压力系数为 1.16。地层压力系数与深度关系见图 1。

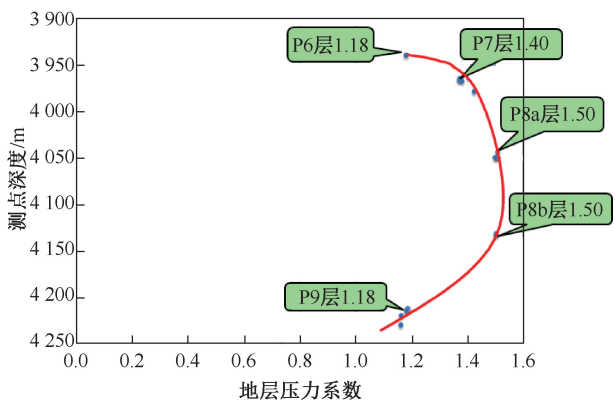


图 1 地层压力系数与深度关系曲线
Fig.1 relation curve between formation pressure coefficient and depth

为实现评价井转为生产井的目的,要求对该井进行完井开发。根据实际地层钻遇情况,X 井设计为两个层系开发生产。层系 1 为 P6a 气藏,层系 2 为 P7 及其以下气藏。射孔要求采用 TCP 负压射孔。具体射孔数据见表 1。

表 1 射孔层数据						
Table 1 perforation layer data						
层组	射孔层段/m	厚度/m	孔隙度/%	渗透率/mD	解释结论	
层系 1	P6	4 823.3~4 828.8	5.5	11.8	6.35	气层
		4 853.5~4 854.6	1.1	9.2	0.53	气层
层系 2	P7	4 884.2~4 885.3	1.1	9.1	0.51	气层
	P8	4 981.0~4 985.4	4.4	13.5	10.25	气层
		5 019.6~5 024.2	4.6	11.9	10.10	气层
	P9	5 072.0~5 081.8	9.8	10.3	1.69	气层

X 井要求射孔开发的 P6、P7、P8 和 P9 层,既存在常压地层,又存在压力反转高压层。若同时开发,会存在以下难点:

(1)井控风险大。由于 P6 层和下面的 P7、P8 层压力系数相差大,当射孔结束后,两个气层同时与井筒联通。如果选择高密度完井液会压漏压力系数低的 P6 层,如果选择低密度完井液则不能压

稳压力系数高的 P7、P8 层,甚至可能会出现上漏下溢的问题。

(2)储层受污染的风险大,气层产能受影响。射孔后压力系数低的 P6 层会严重漏失,而气层在完井时一旦出现漏失现象,就会直接影响到储层的保护,降低气井的产能。另外常规完井程序中,生产管柱是在射孔管柱起出以后再下入井中的,完井

液长期浸泡也会对储层二次污染。

(3) 井筒完整性要求高。为实现高低压气井分层开采,生产管柱的密封性能和封隔器封隔要求特别高,否则易引起环空带压或环空窜漏。

2 关键技术

为实现天然气藏高低压分层开发,同时达到保护储层的目的,完井工艺上首先采用了负压射孔射开 P6 常压层,然后在井筒充满低密度完井液情况下,采用分采一体化射孔工艺射开 P7、P8 高压层及以下层。

2.1 管柱设计

层系 1 射孔,设计采用常规负压射孔,射孔管柱见图 2。实际作业时直接环空加压,同时激发顶部和底部压力延时起爆装置。

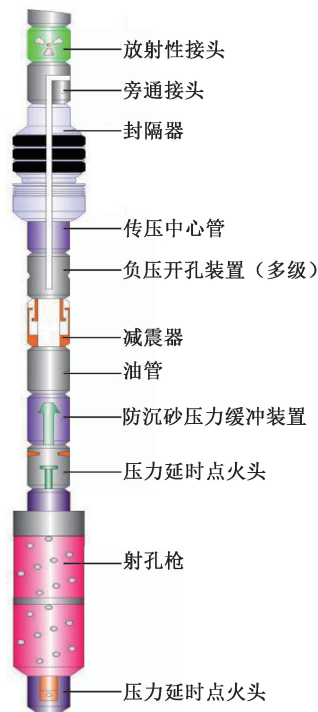


图 2 层系 1 射孔管柱

Fig. 2 Perforating string diagram of layer 1

层系 2 射孔,设计采用高低压分采一体化射孔技术。该技术是以油管输送射孔技术为基础,将射孔管柱与分层生产管柱相结合。管柱结构,主要包括了下部射孔管柱和上部生产管柱(见图 3)。下部射孔管柱包括:底部与顶部压力延时起爆装置、射孔枪、碎石循环接头、盲堵加压接头、减震器;上部生产管柱包括:带孔管、坐落接头、下永久封隔器、生产滑套、上永久封隔器和井下压力计、井下安全阀等。实际作业时,首先将射孔枪下入到预定射孔

层位,利用 GR/CCL 仪器进行电缆校深校定射孔枪位置;射孔枪精确定位后,先安装完井口采油(气)树,将生产管柱内替成轻质液垫从而达到造负压的目的(对于高压储层,因使用的是水基完井液,无需再进行替液作业程序);然后钢丝作业投堵塞器于坐落接头,管柱内加压座封上永久封隔器和下永久封隔器(此时生产滑套是关闭状态)后,打捞出堵塞器;最后通过管柱加压引爆射孔枪,射孔后直接开井生产。联作管柱的设计还必须能满足油气井后期生产测井、测压等需求。

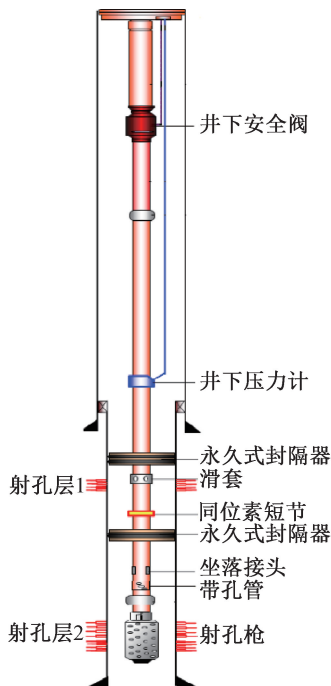


图 3 层系 2 联作射孔管柱

Fig. 3 Combined perforating string diagram of layer 2

2.2 负压设计

射孔负压设计一般采用两种方式实现。一种为采用过封隔器环空加压,管柱留空的方式;一种为生产管柱内替轻质液垫造负压。层系 1 射孔采用了留空管柱实现负压;层系 2 射孔时,上、下封隔器均为压力座封,分采一体化射孔工艺选择了生产管柱内替轻质液垫,实现静态负压。另外,为增加负压效果,改造射孔孔眼,可以采用后效体射孔工艺或自清洁射孔工艺,实现动态负压补充^[8-9]。

2.3 生产封隔器压力分析

油气井能否正常生产,管柱中的永久封隔器起着至关重要的角色。对于生产管柱和射孔联作技术来说,管柱的设计必须保证封隔器的密封性能不受射孔冲击波的影响。

射孔弹在井下被引爆后,爆轰作用下会产生大量的高压气体。随着气体的膨胀,井下液体压力随之发生变化^[10]。所以射孔爆轰波对封隔器的影响,主要就反映在压力上。封隔器上下两个界面,上端面需要承受管柱重力和井液液柱压力,下端面要承受爆轰波的冲击压力。

计算封隔器的承载压力公式为^[11-12]

$$\Delta P = P_2 - \frac{G}{S \times 10^6} - P_1 \quad (1)$$

式中: ΔP 为封隔器的承载压力, MPa; P_2 为封隔器下端面的冲击压力, MPa; G 为管柱重力, N; S 为封隔器环空截面积, m^2 ; P_1 为封隔器上端面井液静压力, MPa。

封隔器座封后,射孔管柱可以认为是一个密闭空间。炸药爆轰压力经验公式^[13]

$$P = \frac{f\omega}{V - \alpha\omega} \quad (2)$$

式中: f 为火药力, J/kg; V 为容器容积, dm^3 ; $\alpha = 0.001 \nu$, 其中 ν 为黑索金比容, cm^3/g ; ω 为射孔弹药量, g。

结合公式(1)和公式(2),可以看出封隔器在射孔弹爆轰后受到的冲击力与封隔器以下的环空空间、井底口袋长度、射孔弹装药量等因素密切相关。对于特定井况,一旦射孔井段确定后,射孔弹的数量及射孔弹装药量、射孔口袋长度、射孔枪与套管的环空尺寸是固定的,唯一能改变的只能是封隔器的座封深度。封隔器的座封深度直接决定了封隔器以下的环空体积。而环空体积 V 与炸药爆炸压力 P 成反比。所以为了保证封隔器密封性能完好,封隔器受到的爆轰压力应满足封隔器的承载能力,与射孔枪之间距离应足够大。当然,封隔器与射孔枪之间的距离也不是越大越好,还需要考虑到完井管柱的整体设计。

实际作业时,主要通过模拟软件来计算射孔管柱各个位置的压力峰值。其原理为:在射孔实验室进行射孔弹单发试验验证后,确定数值模型,并根据井的基础数据(射孔枪、射孔弹装药量、井筒尺寸等),数值分析井下工况(考虑压力)单发弹起爆产生的爆轰波,并获取距射孔弹起爆点不同距离的各点位置波形时间分布形态^[14]。模拟时忽略起爆过程中射孔弹之间的相互干扰,根据射孔长度,射孔弹孔密,人工井底长度等数据,采用波形叠加算法,分析射孔弹同时起爆情况下,不同时间任一点的波形,从而获得关键点压力峰值分布,其模拟曲线示例见图4。

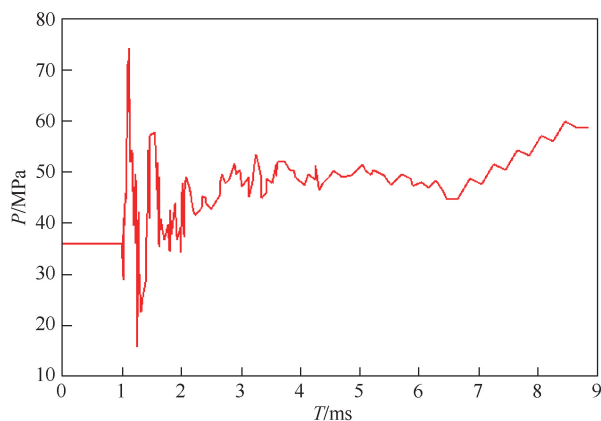


图4 关键点压力模拟曲线示例

Fig. 4 example of key point pressure simulation curve

3 现场应用及效果

X井在177.8 mm套管内射孔,共射孔两趟。第一趟为层系1常压层射孔,直径114.3 mm射孔枪,采用常规负压射孔,管柱留空实现负压;第二趟为层系2高压层射孔,采用分采一体化射孔方式,直径114.3 mm射孔枪,射孔跨度197.6 m,实际射孔30.9 m,使用射孔弹323发,下永久封隔器座封位置4 859.3 m,人工井底为5 216 m,采用 $1.26 \text{ g}/\text{cm}^3$ 液垫实现负压射孔,负压值为8.5 MPa。另外爆轰波峰值试验系数为110.3,爆轰波衰减系数为1.04,完井液声速为1 500 m/s。结合以上数据,根据波形叠加算法原理,采用了射孔爆轰压力与应力分析软件,模拟计算出封隔器下端面压力峰值 P_2 为61.74 MPa,见图5。另外,计算封隔器上端面液静柱压力 P_1 为47.5 MPa,管柱重力为455 437 N,封隔器环空截面积为 0.075 m^2 。根据公式(1)计算 ΔP 为8.24 MPa,远远小于封隔器的承载能力70 MPa。

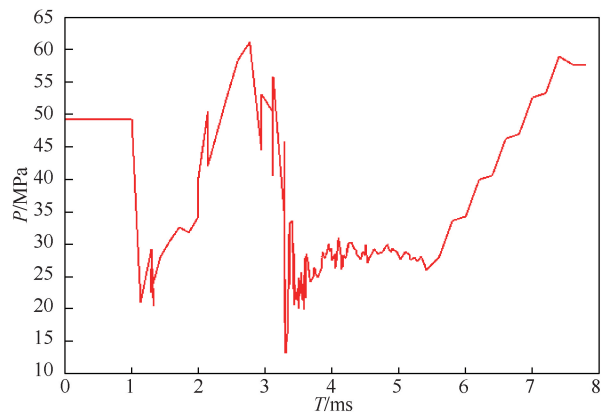


图5 封隔器压力计算

Fig. 5 Packer pressure calculation

本井在负压射孔成功后,井口压力快速上升至18.69 MPa,直接达到自喷条件,投产后保持天然气

$30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、凝析油 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ 的稳定产量,达到配产预期的 3 倍,验证了分采一体化射孔工艺良好的储层保护效果。另外,完井过程中不再需要使用高密度无固相完井液,大幅节约高密度完井液费用数百万元。

4 结论

(1) 高低压分采一体化射孔技术的成功应用,达到了高低压层分层开采的目的,同时实现了储层保护、释放产能的要求。

(2) 高低压分采一体化射孔施工中为保障井筒完整性,应充分考虑施工安全、生产需要和井筒屏障等因数,重点开展射孔爆轰波对封隔器的影响评价。

(3) 相比常规完井射孔,高低压分采一体化射孔技术,减少作业程序,缩短作业工期,可以有效防止异常高压层射开后井涌或井喷事故,在高压气层完井中具有现实推广意义。

致谢:感谢东海甲方公司相关部门从该技术的设计到现场应用,以及后期论文的撰写提供的帮助。

参考文献

- [1] 张水昌,汪泽成. 中国海相油气成藏特征与富集主控因素[J]. 中国石油勘探,2006,11(1):5-11.
ZHANG Shuichang, WANG Zecheng. Main controlling factors of reservoiring features of marine oil/gas and enrichment in China [J]. China Petroleum Exploration, 2006,11(1):5-11.
- [2] 连小翠. 东海西湖凹陷深层低渗-致密砂岩气成藏的地质条件与模式[J]. 海洋地质前沿,2018,34(2):21-30.
LIAN Xiaocui. A model of hydrocarbon accumulation in deeply buried low permeability-high density sandstone gas reservoirs in Xihu Sag, East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2018,34(2):21-30.
- [3] 陆大卫. 油气井射孔技术[M]. 北京:石油工业出版社,2012:121-124.
- [4] 《海洋完井手册》编委会. 海洋完井手册[M]. 北京:石油工业出版社,2019:18-26.
- [5] 陈光峰,张兴华,卢中原,等. 渤海某油田延长测试技术创新与实践[J]. 油气井测试,2019,28(1):46-51.
CHEN Guangfeng, ZHANG Xinghua, LU Zhongyuan, et al. Innovation and application of extended testing technology in an oilfield in Bohai Sea [J]. Well Testing, 2019, 28(1): 46-51.
- [6] 李艳飞,袁则名,和鹏飞,等. 东海气井高低压分层完井技术的研究与应用[J]. 石油化工应用,2018,37(2):89-92.
LI Yanfei, YUAN Zeming, HE Pengfei, et al. Study and application of high and low pressure gas wells stratified completion technology in the east China sea[J]. Petrochemical

Industry Application, 2018, 37(2):89-92.

- [7] 葛俊瑞,李艳飞,李三喜,等. 压力反转大压差气井分层完井延长测试技术[J]. 石油工业技术监督,2018,35(2):16-20.
GE Junrui, LI Yanfei, LI Sanxi, et al. Extended testing technology for layered completion of gas wells with pressure inversion and large pressure difference [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2018,35(2):16-20.
- [8] 葛俊瑞,李三喜,李艳飞,等. 后效复合射孔技术在海上低孔渗油气藏的探索应用[J]. 海洋石油,2018,38(4):52-56.
GE Junrui, LI Sanxi, LI Yanfei, et al. Exploration and application of aftereffect compound perforation technique in low-porosity & low-permeability reservoirs in offshore fields [J]. Offshore Oil, 2018,38(4):52-56.
- [9] 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(7):31-34.
HU Wenli, XU Xinhua, YAN Zhenghe, et al. A new aftereffect perforating technology an its application [J]. Journal of Yangtze University, 2019,16(7):31-34.
- [10] 于洋,任锋玥. 封隔器在复合射孔中的应用[J]. 西安科技大学学报,2007,27(3):423-435.
YU Yang, REN Fengyue. Application of packer in fracture perforating [J]. Journal of XI'AN University of Science and Technology, 2007,27(3):423-435.
- [11] 尹洪东,李世义,张建军. 射孔测试联作管柱受力分析及井下仪器保护技术[J]. 石油钻采工艺,2003,25(3):61-62,85.
YIN Hongdong, LI Shiyi, ZHANG Jianjun. Mechanics analysis of perforating combined well testing string and protection technology of downhole instrument [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003,25(3):61-62,85.
- [12] 高永德,王书华,王宪超,等. 封隔器在射孔管柱中的安全距离评估[J]. 测井技术,2016,40(3):382-384.
GAO Yongde, WANG Shuhua, WANG Xianchao, et al. Assessment packer in perforating string in safety distance [J]. Well Logging Technology, 2016,40(3):382-384.
- [13] 陈锋,陈华彬,唐凯,等. 射孔冲击载荷对作业管柱的影响及对策[J]. 天然气工业,2010,30(5):61-65.
CHEN Feng, CHEN Huabin, TANG Kai, et al. Influence of perforating impact load on the operating string and the countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(5):61-65.
- [14] 张伟,徐成,李明飞,射孔段管柱瞬态响应及应力强度分析[J]. 石油机械,2017,45(11):90-94.
ZHANG Wei, XU Cheng, LI Mingfei. Transient response and strength analysis of perforating string [J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(11):90-94.

编辑 吴志力

第一作者简介:王友春,男,1982 出生,高级工程师,学士学位,2005 年 7 月毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业,现主要从事套管井测井、射孔等工作。电话:021-22833535,Email:461000179@qq.com。通信地址:上海市长宁区通协路 388 号中海油大厦 D 座 605 室,邮政编码:200050。