

水平井封隔体充填调流控水筛管 完井技术研究与应用

张翼, 龙武, 宋海, 方俊伟

(中国石化西北油田分公司 石油工程技术研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 为了有效提高水平井调流控水筛管的调控精度, 实现全井筒封隔, 提出用封隔体颗粒代替传统封隔器对储层进行封隔, 阻挡井筒内流体的横向流动, 使调流控水筛管直接对地层起到阻水稳油的作用, 实现全水平井段动态调节入流剖面, 无限级控水。该技术成功应用于塔河油田二次完井中, 首次通过非机械工具实现管内封隔。目前已研发了耐高温、更经济的封隔体材质, 室内实验评价性能良好, 在新井和二次完井中具有推广价值。

关键词: 水平井; 封隔体颗粒; 调流控水; 二次完井; 管内封隔

中图分类号: TE257

文献标识码: A

Packers used in inflow control device (ICD) for completion of horizontal wells

Zhang Yi, Long Wu, Song Hai, Fang Junwei

(Research Institute of Engineering Technology, SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: We used packing grains to replace traditional packer in order to improve the precision of inflow control device (ICD) for the completion of horizontal wells, and to seal the whole well bore. Flows in horizontal directions can be blocked. In this way, ICD controls water flow and stabilizes oil production. It realizes the dynamic adjustment of flows in the whole horizontal well section. This new technique was applied in the second completion of the Tahe oil field. This was the first time adopting non-mechanical tools to realize packing in tube. We designed new packing materials, which can stand higher pressure and are more economic. The materials performed well in laboratory experiments, and have a good potential in new well completion and secondary completion.

Key words: horizontal well; packing grain; inflow control; secondary completion; packing in tube

水平井调流控水筛管完井是 20 世纪 90 年代发展起来的一项完井技术, 在国内外进行了大量的应用, 并取得了很好的应用效果^[1-3]。随着水平井调流控水筛管完井技术的深入研究和推广应用, 国内外对该技术的要求越来越高。如何最大限度地发挥调流控水筛管的阻水稳油功能, 实现水平井的全井段动态控制逐渐成为研究热点。在常规的水平井调流控水筛管完井中, 需要使用封隔器对储层分段来实现调流控水筛管对水平井产出层位的分段控制, 从而达到抑制高渗段产液、提高低渗段产液、均衡水平井入流剖面的目的^[4]。但采用封隔器对储层分段的数量有限, 封隔部位长度受封隔器胶筒长度限制, 有效封隔部位长度较小, 限制了水平井调流控水筛管的调控精度。另外, 对于水平井的二次完井, 采用封隔器配合调流控水筛管的完井

方法已经无法满足多种复杂情况并存的调整井完井施工, 在应用深井水平井二次完井阻水采油作业中问题更加突出。为此, 本文提出了一种新型的水平井封隔体颗粒充填调流控水筛管完井技术, 并通过关键工具的研发和完井工艺的设计, 在 T1 井成功实施了高难度、复杂地质条件下的水平井二次完井调流控水作业。

1 封隔体+调流控水筛管工艺原理

1.1 控水机理

水平井封隔体充填调流控水筛管完井技术是用封隔体颗粒来代替传统的封隔器对储层进行封隔, 在水平段调流控水筛管与井壁之间的环空充填封隔体颗粒, 在井筒中产生各向同性的流动阻力。储层中流体由地层向筛管流动的距离短、接触面积

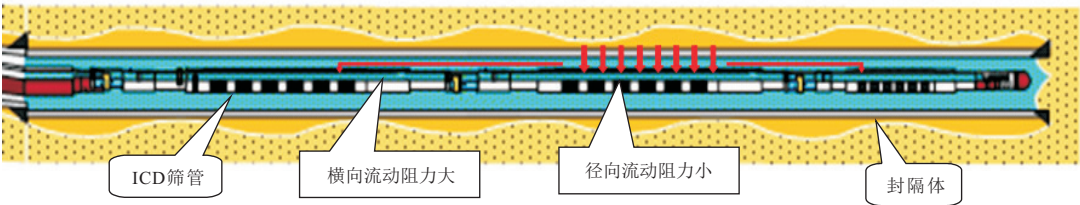


图 1 封隔体充填调流控水筛管原理示意

Fig.1 Packers used in inflow control device (ICD)

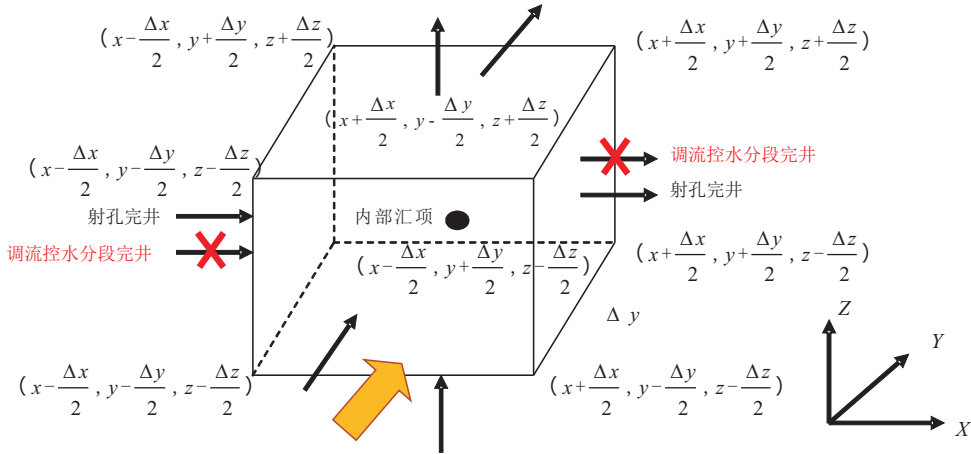


图 2 不同完井方式单元数值模型建立

Fig.2 Numerical modeling of different well completion methods

大,对于水平段径向流动阻力小;水平段流动单元间距离长、环空横截面积小,流体横向流动阻力大,使得地层流体单元内流动得到控制、单元间流动受到抑制。调流控水筛管可直接对所处位置的地层起到阻水稳油的作用,实现全水平井段动态调节入流剖面,无限级控水。其原理如图 1 所示。

1.2 数值模拟

为评价该工艺对油藏的影响,对比不同完井工艺对储层流体渗流的作用,开展了油藏数值模拟研究。根据油藏渗流力学原理,建立油藏数值模型描述流体在储层中的流动过程和动态特征,对比封隔体充填调流控水筛管完井方式与常规射孔完井方式下油藏的含油饱和度分布。

1.2.1 模型建立

假设:不考虑重力和毛细管力;岩石和流体不可压缩;油水两相流,两相间不存在质量交换,两种液体共同充满孔隙空间。

对水平段进行网格离散化,建立水平段单元数值模型(图 2)。由于封隔体可对水平段不同单元间起到封隔作用,所以在时间 dt 内,油、水相在 X 方向的传导性无限小,在六面体 Y, Z 方向的流入和流出会引起饱和度分布的变化。常规的射孔完井在 X, Y, Z 方向都具有流动性。

1.2.2 模拟结果对比

对 T1 井实际生产数据进行拟合,调整油藏参数,使模型符合真实油藏状况。通过插值计算与高斯-赛德尔迭代,结果表明:采用封隔体+调流控水筛管完井方式可增大泄油半径,延缓底水脊进,有效提高单井原油采收率(图 3);采用常规射孔工艺油井无水采油期短,造成大量剩余油未被挖潜(图 4)。

2 封隔体颗粒研发

封隔颗粒是一种超轻、有机聚合物材料。为评价

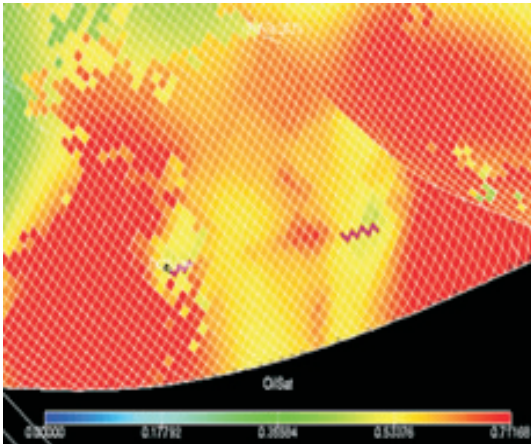


图 3 采用封隔体+控水筛管工艺

Fig.3 ICD with packer

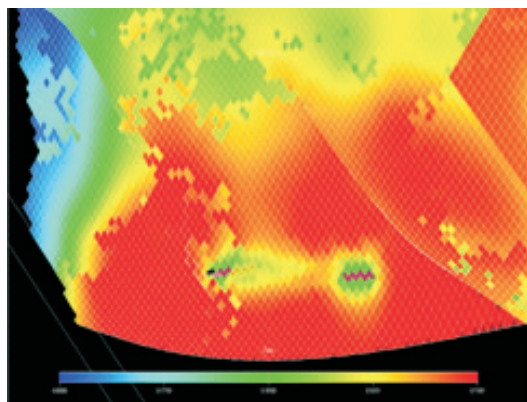


图 4 不采用封隔体+控水筛管工艺

Fig.4 ICD without packer

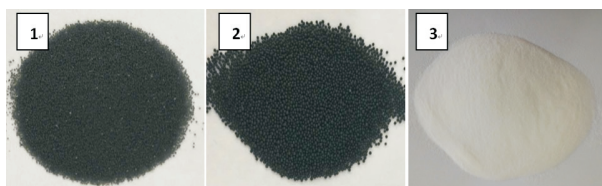


图 5 3 种封隔体颗粒实物

Fig.5 Three kinds of packing grains

该材质性能是否满足塔河油田的需求,开展了 3 种封隔体颗粒的性能评价试验(图 5),主要包括耐温、耐压、密度、粒度以及渗透性等 5 项指标。

2.1 试验评价

2.1.1 耐温试验

利用电热恒温干燥箱进行。其原理为:在颗粒放入干燥箱之前,先将抽取部分样品放入显微镜下观察,视其外观有无破损;将完好无损的颗粒放入干燥箱中,在一定温度下放置一定时间后取出,再次利用显微镜观察其破损率,以此来表征颗粒的耐温性。

2.1.2 耐压强度试验

利用高温高压稠化仪进行。其原理为:在颗粒放入高温高压稠化仪之前,先将抽取部分样品放入显微镜下观察,视其外观有无破损;将完好无损的颗粒放入高温高压稠化仪中,在一定压力、一定温度下放置一定时间后取出,再次利用显微镜观察其破损率,以此来表征颗粒的耐压强度。

2.1.3 密度试验

密度测量方法主要有称量法、比重杯法、阿基米德定律法、浮力法和密度计法。由于试验颗粒密度与水相当甚至比水还轻,该试验适宜采用称量法进行密度值的测取。

2.1.4 粒度试验

采用光学原理,通过测量颗粒群的空间频谱来

分析其粒度分布。考虑试验颗粒粒径较小(样品 3 号外观类似面粉),并结合实验室现有条件,本次粒度试验采用激光粒度仪进行分析。

2.1.5 渗透性试验

渗透试验是利用一些试验器具测定岩土渗透系数的试验,分为室内试验和野外测定试验 2 大类。本次试验采用室内试验的常水头试验方法,该方法在整个试验过程中保持水头为一常数,从而水头差也为常数。试验时,在透明塑料筒中装填截面为 A ,长度为 L 的饱和试样,打开水阀,使水自上而下流经试样,并自出水口处排出。待水头差 Δh 和渗出流量 Q 稳定后,量测经过一定时间 t 内流经试样的水量 V ,则 $V=Q\times t=\nu\times A\times t$,根据达西定律, $\nu=k\times i$,则 $V=k\times(\Delta h/L)\times A\times t$,从而得出 $k=q\times L/(A\times\Delta h)=Q\times L/(A\times\Delta h)$ 。

2.1.6 封隔性试验

开展以油、水为介质,轴向和径向的阻力测量实验,分别测取不同压差下通过装置的流量,以此评价封隔体的封隔性能,试验装置如图 6 和 7 所示。

2.2 实验结论

分别对 3 种颗粒开展了多组试验,试验结果表明(表 1):1 号颗粒与 2 号颗粒特性类似,稳定性强,3 号颗粒虽然具有足够的耐温和耐压特性,但其粒度、密度和渗透性均不满足要求。封隔体颗粒耐温可达 200℃,耐压 60 MPa,满足塔河油田碎屑岩油藏温度、压力及高矿化度环境使用要求。

对满足条件的 2 号颗粒开展封隔性试验,结果表明在轴向实验压差大于径向实验压差时,通过封隔体环形空间的流量远小于径向流量,可实现抑制

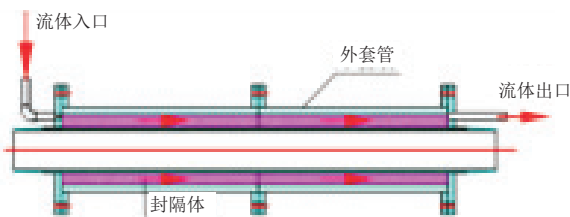


图 6 轴向试验装置示意

Fig.6 Axial test device

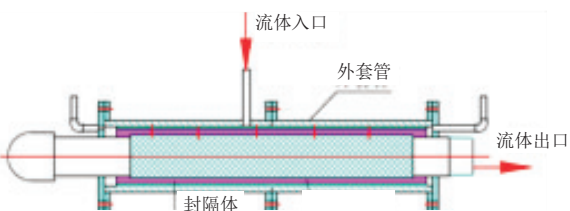


图 7 径向试验装置示意

Fig.7 Radial test device

表 1 颗粒试验参数汇总
Table 1 Parameters of test grains

颗粒 编号	耐温/ ℃	耐压/ MPa	密度/ (g·cm ⁻³)	粒度 D50/ D90/μm	拟渗透 系数/[mm· (mPa·s) ⁻¹]
1	≥200 (150℃ 环境下)	≥60	1.07	281/389	7.36
2		(150℃	1.02	324/518	26.72
3		环境下)	0.48	57.6/114	0.008 3

表 2 封隔体泵注施工程序设计
Table 2 Construction program for packer pumping

名称	排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	液量/ m ³	砂比/ %	加砂 量/m ³	累积 液量/ m ³	泵注 时间/ min
清水正循环	0.5	200	0	0	200	400
注携砂液-1	0.3	6	5	0.3	206	18
注携砂液-2	0.3↘0.03	34	5	1.7	240	280
修井液反洗	0.6	12	0	0	252	20

流体轴向流动的目的,有效地起到封隔作用,满足工艺要求。

2.3 泵注程序

2.3.1 泵注液体设计

由于封隔颗粒比重为 1.01,与清水比重相近,具有易携带、易充填的特点,因此可选用清水作为携砂液。

2.3.2 泵注程序设计

封隔体泵注程序为整个工艺核心。泵入过程分为 2 个阶段:第一阶段保持充填流量不变,目的是将封隔体带入井底;第二阶段保持充填压力不变,目的是使封隔体由趾端至跟端逐渐填满,泵注排量逐渐下降。

设计具体泵注程序如表 2 所示。

2.3.3 泵注效率评价

要求注入颗粒量达到全部井筒环空容积,充填率达到 100%。控水作业施工前后,地层的吸液量降低,表明封隔颗粒堆积紧实。

3 完井管柱设计

3.1 调流控水筛管设计

“油嘴式”控水筛管以其结构简单,可靠性高得到了更为广泛的应用。随着技术的不断发展,新一代的调流控水筛管具有“主动式”调流控水的功能,能够根据产液的情况自动调整附加阻力,实现自适应调流控水,有“流道式”和“浮动盘式”2 类^[10-12]。水平井封隔体充填调流控水筛管完井技术从控水稳油效果分析,选择自适应调流控水筛管的效果更佳,但前期的封隔体充填工艺要求调流控

水筛管具有一定的过流能力且在一定压力充填的工况下具有较高的可靠性,因此,选用“油嘴式”调流控水筛管。

调流控水筛管具体参数如表 3 所示。

开展了控水筛管工具室内试验,实验结果见图 8,表明通过筛管的流量越大,产生的附加压降就越大,从而达到抑制水平井高渗段产出,释放低渗段产出,均衡剖面的作用,满足控水要求。

3.2 完井管柱设计

对调流控水筛管完井管柱进行设计,主要包括:引鞋+调流控水筛管+反扣安全接头+……+调流控水筛管+反扣安全接头+充填滑套总成+充填封隔器(表 4)。该管柱结构具有以下特点:①在充填完毕后可实现丢手,提出上部工具,顺利下入生产管柱;②配合封隔体充填,可实现每根筛管为独立产液段,减少单元间窜流,均衡产出剖面。

4 现场应用

该技术在塔河油田 T1 井开展了先导试验。T1 井是碎屑岩底水油藏的一口典型高含水井,单井控制储量大、累产油少、采出程度低,单井后续挖潜潜力大。前期进行了 2 次化学笼统堵水,作业后累计增油分别为 120 t 和 144 t,有效期短。

该井作业前日产液 35.1 t,日产油 2.5 t,含水率 93.7%;作业后初期高含水,提高产液量后,含水率呈下降趋势。截止 2016 年 6 月,日产液 17.3 t,日

表 3 调流控水筛管设计参数
Table 3 Design parameters for ICD

名称	属性
控流装置规格型号	HE(中等控流能力)
单根长度	10 m 左右
外径	102 mm
内径	62 mm
过滤精度	150 μm
材质	N80

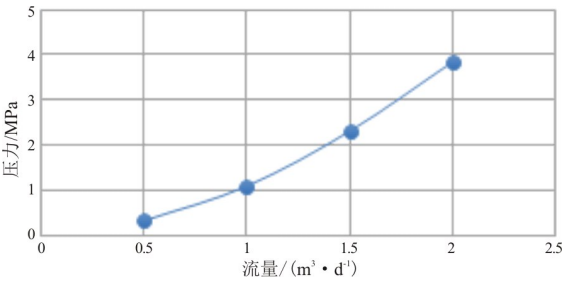


图 8 单根调流控水筛管节流量与节流压降关系曲线
Fig.8 Flow rate and pressure drop of single ICD

表 4 完井管柱参数设计
Table 4 Parameters of well completion pipe string

序号	描述	外径/ mm	内径/ mm	材质	耐压/耐温	扣型	备注
1	坐封工具	148	50	35CrMo	35MPa/150℃	210 B * 反扣	抗拉 58 t; 启动压力 6 MPa; 坐封压力 16 MPa; 丢手方式: 液压丢手 (21 MPa), 备用丢手方式: 倒扣丢手解封方式; 上提解封
2	顶部封隔器总成	148	76	35CrMo	35MPa/150℃	反扣 * 2-7/8" NU * P	抗拉 58 t
3	充填滑套总成	148	76	35CrMo	35MPa/150℃	2-7/8"NU B * P	抗拉 58 t;
4	等径控水筛管	102	62	N80	/	2-7/8"NU B * P	筛管缝宽 0.15 mm; 抗拉 60 t;
5	反扣安全接头	102	62	N80	35MPa/150℃	2-7/8"NU B * P	
6	导向丝堵	102	/	35CrMo	/	2-7/8"NU B * P	

产油 3.77 t,含水 78.2%,累增油 419 t。

该工艺在国内首次通过非机械工具实现管内封隔,也是塔河油田首次将调流控水筛管下入老井并取得了良好的控水效果,对大底水油藏水平井控水开发具有里程碑意义。

5 结论

- (1)水平井封隔体充填调流控水筛管完井技术,可用于新井完井以及前期裸眼完井、割缝衬管完井及射孔完井的水平井二次完井,整套工艺管柱结构简单、无活动部件,进入水平段的完井管柱外径尺寸小,施工可靠性高,具备后期起出的功能。
- (2)超轻封隔体颗粒,试验评价性能良好。采用封隔体充填的方式进行调流控水筛管完井储层分隔,相对于常规的封隔器对储层的封隔,实现了对储层的无限极封隔,达到了无限制控水。
- (3)采用调流控水筛管对地层出水进行动态控制,任何位置出水都自动控水,具有更高的控水增油效率。
- (4)现场应用表明,整套封隔体颗粒充填调流控水完井技术工艺可行,具有增大油井产量,降低水平井含水的功能,可实现水平井控水稳油生产。

参考文献:

[1] Tor Ellis, Alpay Erkal, Gordon Goh, et al. The well flow control device to improve flow profile[J]. Journal of oil field new technology, 2009, winter issue; 31-37.

[2] Ouyang Liangbiao. Practical consideration of an inflow control device application for reducing water production[R]. SPE 124154, 2009.

[3] Arfi S A, Mohamed O, Keshka A, et al. Inflow control device an innovative completion solution from “extended wellbore to extended well life cycle” [R]. SPE 119599, 2008.

[4] 王金忠, 肖国华, 陈雷, 等. 水平井管内分段调流控水技术研究与应用[J]. 石油机械, 2011, 39(1): 60-62.

[5] 王庆, 刘慧卿, 张红玲. 油藏耦合水平井调流控水筛管优选研究[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 346-350.

[6] 赵旭, 姚志良, 刘欢乐. 水平井调流控水筛管完井设计方法研究[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(1): 23-27.

[7] 王超, 张军杰, 刘广燕. 水平井分段控水完井试油技术[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 446-448.

[8] 郑永哲, 杨士明, 于学良, 等. 大港滩海赵东区块水平井裸眼砾石充填防砂完井技术[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(4): 88-92.

[9] 王登庆. 水平井砾石充填防砂工艺技术研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.

[10] 李良川, 肖国华, 王金忠. 冀东油田水平井分段控水配套技术[J]. 断块油气田, 2010, 17(6): 655-658.

[11] 强晓光, 姜增所, 宋颖智. 调流控水筛管在冀东油田水平井的应用研究[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(4): 77-79.

[12] 刘均荣, 于伟强. ICD/ICV 井下流量控制技术[J]. 石油矿场机械[J]. 2013, 42(3): 1-6.

(编辑 叶德燎)