

# 大港滩海赵东区块水平井裸眼砾石充填防砂完井技术

郑永哲<sup>1</sup> 杨士明<sup>1</sup> 于学良<sup>1</sup> 张宁霞<sup>2</sup> 宋丽<sup>3</sup>

(1. 渤海钻探工程有限公司 工程技术研究院, 天津 大港 300280; 2. 大港油田分公司 井下技术服务公司, 天津 大港 300280; 3. 大港油田分公司 钻采工艺研究院, 天津 大港 300280)

**摘要:**由于大港滩海赵东区块的储层具有高孔高渗的特点,加之采用大泵径电动潜油泵强采,易导致地层出砂,因此该区块采用水平井裸眼砾石充填防砂完井技术进行完井,以实现油井高产的目的。介绍了该区块的完井管柱及防砂工具,分析了水平井裸眼砾石充填的水动力学特征,进行了水平井循环砾石充填泵注排量的设计,并针对影响施工效果的各种因素,提出了技术措施。由于在实施水平井裸眼砾石充填防砂过程中,相互影响、相互制约的因素较多,因此建议综合考虑诸如井眼参数、完井液性能、防砂管柱、施工工具等因素之间的匹配。在低漏失的井眼条件下,建议采用合理的泵注排量,用低黏度携砂液以反循环方式对筛管与裸眼井眼间的环空进行砾石充填,以形成距离较长、密实的充填层。

**关键词:**水平井;裸眼;砾石充填;完井;防砂;赵东区块

**中图分类号:**TE257<sup>+</sup>.3 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0890(2009)04-0088-05

大港滩海赵东构造位于渤海湾西部赵家堡以东海域,是一个坡中隆的背斜构造,主要含油目的层为上第三系明化镇组下段和馆陶组。油藏埋深为1 180~1 960 m,属于砂岩油藏,具有高孔隙、高渗透的特点,孔隙度为30%~32%,渗透率为 $(225 \sim 5 900) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,泥质含量为1%~19%,压力系数1.0左右。赵东构造油藏属上第三系油藏,流体性质具有“两高两低”的特点,即高相对密度、高黏度,低凝固点、低含蜡量。

赵东区块是中外合作开发的区块,外方以缩短成本回收期、获得利益最大化为基本原则,因此在开采方式上采用大管径、电泵强采手段,单井产液量达到350~1 050 m<sup>3</sup>/d,带来了油层出砂、检泵频繁、生产周期短等风险,因而必须提前采取防砂措施,以达到合同期内的高效益。相比其它水平井防砂技术,裸眼砾石充填防砂成本低,更加经济,储层不受因固井而带来的水泥浆伤害,而且可有效防止地层砂运移,从而避免由于地层砂重新分布而形成近井眼低渗透带,同时对地层起支撑作用,防止井壁坍塌。另外砾石充填地层与筛管之间环空对地层砂形成第一级阻挡,减少了携砂液流对筛管的冲蚀,延长了筛管的使用寿命<sup>[1-3]</sup>。为此,大港滩海赵东区块水平生产井几乎全部采用裸眼砾石充填防砂工艺进行完井,平均砾石充填长度332.2 m,成功率100%,满足了该区块单井高产液量、高采液强度的需要。

## 1 水平井裸眼砾石充填防砂完井技术

赵东区块的水平井以开发单一油层为目的,在井身结构设计时,将技术套管下深设计在油顶实施油层专打,为安全钻进下部油层水平段和保护油气层奠定基础。油层段下入贝克休斯工具公司的Excluder 2000 精细防砂筛管组合,以筛管外砾石充填先期防砂方式完井。

### 1.1 完井管柱结构

赵东区块完钻的水平井,以开发单一油层为目的,采用两种尺寸裸眼进行完井。

1)  $\phi 244.5 \text{ mm}$  技术套管,用  $\phi 206.4 \text{ mm}$  钻头实行油层专打,悬挂  $\phi 139.7 \text{ mm}$  Excluder 2000 精细防砂筛管为主体的完井管柱,实施筛管外砾石充填防砂完井。管柱结构一般为:  $\phi 244.5 \text{ mm} \times \phi 177.8 \text{ mm}$  带卡瓦的顶部封隔器 +  $\phi 177.8 \text{ mm} \times \phi 139.7 \text{ mm}$  变扣接头 +

---

收稿日期:2008-11-16;改回日期:2009-05-14

作者简介:郑永哲(1970—),男,吉林舒兰人,2000年毕业于石油大学(华东)计算机应用专业,工程师,主要从事钻井完井工艺及工具的研发工作。

联系电话:(022)25971957

φ139.7 mm 盲管 + φ139.7 mm Excluder 2000 筛管 + 导流阀密封筒 + φ139.7 mm Excluder 2000 筛管 + 防液锁密封筒 + φ139.7 mm 盲管短节 + φ139.7 mm 冲洗引鞋。

2) 在 φ244.5 mm 技术套管内悬挂 φ177.8 mm 尾管后, 用 φ155.6 mm 钻头完成油层专打, 悬挂 φ101.6 mm Excluder 2000 精细防砂筛管为主体的完井管柱, 实施筛管外砾石充填防砂完井。管柱结构一般为: φ177.8 mm × φ127.0 mm 带卡瓦的顶部封隔器 + φ127.0 mm 带滑套的砾石充填短节 + φ127.0 mm × φ101.6 mm 变扣接头 + φ101.6 mm 盲管 + φ101.6 mm Excluder 2000 筛管 + φ101.6 mm 导流阀密封筒 + φ101.6 mm Excluder 2000 筛管 + φ101.6 mm 防液锁密封筒 + φ101.6 mm 盲管短节 + φ101.6 mm 冲洗引鞋。

## 1.2 Excluder 2000 防砂筛管的结构及性能

Excluder 2000 精细防砂筛管<sup>[4]</sup> 主要以标准套管为基管, 并按一定相位角度和间距钻孔, 然后以 ASME 焊接工艺在打孔管上焊接绕丝, 并在绕丝筛管上附上一层过滤筛网, 外表层设计有防护罩, 其结构特征与国内的精细微孔复合筛管大体一致, 如图 1 所示。

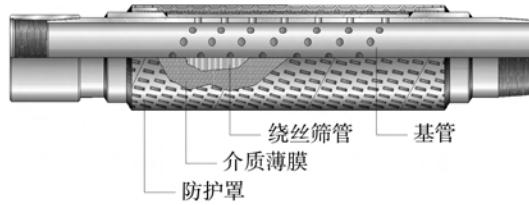


图 1 Excluder 2000 精细防砂筛管基本结构

Excluder 2000 精细防砂筛管比常规的绕丝筛管有更强的防砂机械性能和整体性。外表层防护罩起到防止筛管被井眼碎屑刮蹭和导流罩的作用(见图 2), 投产时, 导流结构可使地层产出携带砂的液体改变流向, 从而减缓对筛管的冲蚀。单层过滤网紧密置于绕丝和防护罩之间, 使携砂液体再一次改变流向, 减弱对筛管的冲蚀影响, 同时提供更大的过流面积, 并允许反冲洗作业, 以清除吸附在表面的细砂及泥饼。该防砂筛管损坏性试验达到 41.4 MPa, 拉伸伸长率 2%; 破碎试验达到原直径的 60%, 扭矩试验扭曲 3.3°/m, 使用寿命是标准预充填筛管的 8 倍。适用于裸眼井、短半径井和重入井完井。

国内裸眼砾石充填, 在裸眼段的处理上一般要用扩径钻头将油层段扩大到技术套管外径的 1.5~

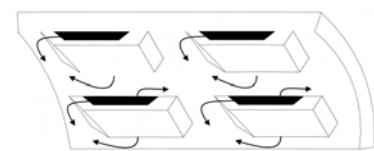


图 2 外部防护罩结构示意

2.0 倍, 以保证有较大的环空, 增加防砂层厚度, 提高防砂效果, 一般砾石层厚度不小于 50 mm。而 Excluder 2000 筛管要求其外径与井壁间的间隙仅为 50 mm, 由此可看出, Excluder 2000 筛管对井眼尺寸要求较低, 并且较小的间隙有利于提高砾石充填时携砂液的流速。

## 1.3 防砂施工工具的选择

水平井裸眼砾石充填施工中, 如果流体静压力减小到井底静压, 那么会显著增加泥饼剥离或井壁坍塌的风险, 因此防砂施工工具选用了贝克休斯公司的 SC-300 砾石充填系统。该系统的一个主要作用是在裸眼砾石充填期间, 可保持作用在储层上的流体静压力达到过平衡状态。此外, 该系统提供正向机械定位(定位过程中悬重载荷发生规律变化), 且机械定位时对地层不会产生冲击和抽吸作用。

SC-300 砾石充填系统主要由封隔器坐封机构、活瓣式防抽吸工具(FAS Tool)、防液锁密封筒、SC-300 砾石充填孔、Smart 底托等组成, 其技术参数见表 1。

表 1 SC-300 砾石充填系统技术参数

适用套管尺寸/mm	坐封工具型号	扭矩/N·m	张力/kN
177.8~193.7	70 SC	8 160.0	889.0
244.5~273.0	86 SC	10 880.0	1 755.8

SC-300 砾石充填系统具有以下特点: 1) 砾石充填孔有很高的使用寿命, 可以满足大砂量施工的需要; 2) 在裸眼砾石充填完井期间, 始终保持井筒内的流体静压力达到过平衡状态, 防止井壁坍塌和携砂液漏失; 3) 设计有旋转锁定装置, 必要时可转动筛管; 4) 能够在较大井斜位置实现坐封工具液压丢手, 并且对地层不产生冲击和抽吸作用; 5) Smart 底托配合完井管柱上的定位接箍, 通过载荷指示实现工具的机械定位(循环、反循环、挤注三个位置), 并允许在任何位置下放施工管柱载荷, 保证密封装置在泵注作业时不产生上下位移; 6) 活瓣式防抽吸工具(FAS Tool)可消除定位时引起的抽吸; 7) 防液锁密

封筒是一种单流阀机构,可避免工具动作时密封件下部产生液锁;8)SC-300砾石充填滑套,不但能实现砾石充填功能,还能捕获封隔器坐封球;9)可与Hydril 511无接箍冲洗管组成内施工管柱。

#### 1.4 水平井裸眼砾石充填水力学特征

水平井裸眼砾石充填是一个相对复杂的过程,携砂液通过油管被泵注到砾石充填孔,并以反循环方式进行充填。如图3所示,在向井底推进过程中,携砂液会发生滤失脱水,即部分液体漏失进地层;部分穿过筛管沿筛管和内施工管环空推进到位于施工管底部的冲洗引鞋,并流进内施工管返出井口;剩余液体携带着砾石到达井底充填位置,经过已充填砾石层和筛管的过滤后也流进冲洗引鞋,经内施工管返出井口。

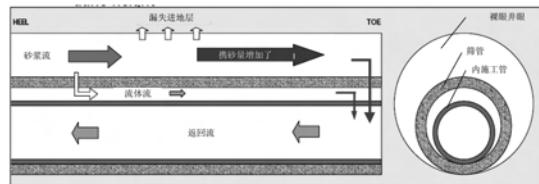
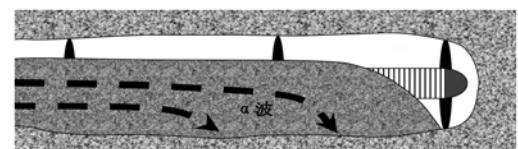


图3 水平井裸眼砾石充填

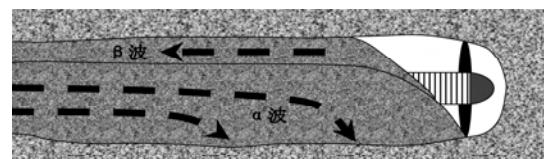
砾石的沉积充填过程分为正向充填的 $\alpha$ 波阶段和反向充填的 $\beta$ 波阶段<sup>[5-6]</sup>。

**$\alpha$ 波阶段** 该阶段砾石在沉降和冲砂两种方式共同作用下进行充填,见图4a。 $\alpha$ 波砂丘的高度是由流体速度决定的,不论任何排量和砂比的组合,在环空总会有一个临界速度使冲砂和沉积处于平衡状态,此时砂丘的高度相对稳定。改变井眼尺寸和结构将改变流速和砂丘的高度。初始沉降位置由流速和地层漏失量等因素共同决定,因此在地层漏失很大的情况下(如裂缝性或高渗透性地层),泥饼被冲蚀导致携砂液脱水,增加携砂液砂比,从而使 $\alpha$ 砂丘高度增加,在这个情况下砾石充填的有效距离非常短。 $\alpha$ 波阶段结束的标志是携砂液不能产生紊流,充填距离不再延长。

**$\beta$ 波阶段**  $\alpha$ 波阶段结束后,砾石充填继续进行,砾石逐步充填进 $\alpha$ 沙丘顶部与地层之间的间隙,但是与 $\alpha$ 波阶段不同,充填过程是以从内向外的反方向方式进行,该过程即 $\beta$ 波,见图4b。 $\beta$ 波过程使筛管完全被砾石覆盖,并直至完全填满井眼。 $\beta$ 波阶段结束的标志是泵注压力逐渐增高,直至达到一峰值接近地层破裂压力,此时,砾石完全将筛管与井眼环空填满。



a.  $\alpha$  波充填阶段



b.  $\beta$  波充填阶段

图4 水平井裸眼砾石充填过程示意

#### 1.5 泵注排量的设计

水平井裸眼循环砾石充填泵注设计所需要的参数包括地层物性参数、地层漏失量(砾石充填作业前,进行循环泵注测试,根据泵注压力和返排率之间的关系得到)、井斜角、井眼直径、筛管尺寸、冲管尺寸、砾石粒径、砂比和携砂液性能等。图5为赵东区块某水平井循环砾石充填泵注排量设计结果。

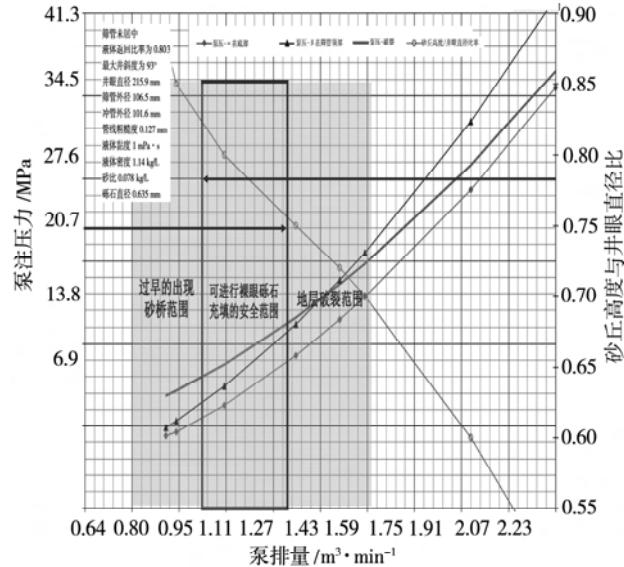


图5 某水平井循环砾石充填泵注排量设计结果

从图5可看出,泵注施工排量应在可进行裸眼砾石充填的安全排量范围内进行,排量低于安全范围下限会导致水动力不足,在筛管-井眼环空间过早地形成砂桥,不能充填全部井段;而排量高于安全范围上限则可能压开地层,地层破裂将使地层漏失急剧增加,亦会过早形成砂桥,导致砾石充填达不到设计长度。如果设计的泵注施工排量上、下限范围较窄,现场施工时难以实施,则需要对设计参数进行调整,修改诸如砂比、携砂液性能等参数。

## 2 砾石充填的影响因素及对应措施

### 2.1 完井液性能

在进行防砂施工时,携砂液在裸眼井段漏失量越少,充填效果越好,因此对完井液性能提出了要求,即:要能在井壁上迅速形成超低渗透泥饼,还要有较低的返排压力和较高的渗透率恢复率,利于投产后迅速达到最大产能。在地层漏失比较严重的情况下,采用低黏度携砂液进行砾石充填距离有限,只能降低砂比或选用较高黏度的携砂液,这样会增加作业周期和施工成本,并且使用较高黏度的携砂液有可能在井底位置造成充填欠压实的问题。

为避免上述情况的发生,在钻井阶段选用了性能优良的无固相、无  $\text{CaCO}_3$  的 Flopro 完井液,该完井液具有快速形成超低渗透泥饼、返排压力低、渗透率恢复率高和摩阻系数小等特点。超低渗透泥饼有助于减少携砂液的漏失,增加有效砾石充填距离。低返排压力和高渗透率恢复率又能在充填施工完成后,使表皮在短时间内恢复至地层渗透率,降低生产压差,利于高产稳产。

目前在国内,裸眼井段完钻后,由于各种杂质形成的地层污染情况比较复杂,下完防砂管柱后一般都要进行酸洗作业,以清除泥饼。但是在裸眼砾石充填完成的井实施这一措施难度较大,并且成本较高。因此,必须在钻井阶段选用优质钻井液和完井液。

### 2.2 井眼尺寸变化

1)上层套管鞋处由于变径作用,导致流速和流动方向发生变化产生涡旋,会产生鼠洞(见图 6),对砂浆流动形成旋流阻碍。

2)在冲蚀区,井眼直径变大,此时流速降低,会导致  $\alpha$  波阶段砂丘高度增加。另外,界面效应导致紊流,也会增加形成砂桥的风险。

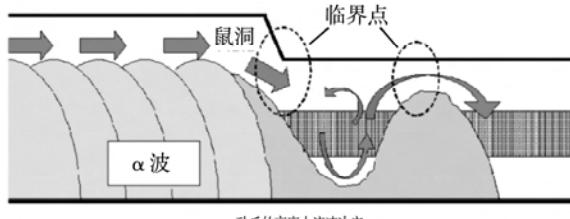


图 6 井眼尺寸变化对砾石充填的影响

因此,规则光滑的井眼对于延长砾石充填距离

是十分有利的。这需要在水平裸眼段反复大幅度活动钻具,大排量充分循环钻井液。

### 2.3 筛管居中

赵东地区水平井筛管管柱均不加扶正器,这主要是考虑减少扶正器对井壁泥饼的刮蹭破坏,减少携砂液的漏失。另外,由于筛管位于井眼的底部,利于筛管在  $\alpha$  波阶段即被砾石覆盖。

### 2.4 筛管悬挂位置

赵东区块水平井筛管管柱要求筛管顶部至少进入上一层套管 6 m,其目的主要是使砾石能够更多地进入筛管-套管环空,使砾石充填得更加密实,更好地稳定井壁,阻止地层砂接触筛管。

## 3 现场施工

### 3.1 裸眼砾石充填施工步骤

1)将防砂管柱和防砂施工工具组合下入井中,用盐水替出裸眼井段的 Flopro 完井液。

2)投封隔器坐封球,坐封砾石充填封隔器。

3)向工作管柱打压,丢手封隔器,即:内施工管柱与防砂管柱丢手。

4)上提工作管柱,使 Smart 底托通过下部定位接箍,在 Smart 底托上下压 110 kN,使其定位到挤压的位置。

5)关闭环空,打压验封封隔器。

6)打开环空闸板,上提使活瓣式防抽吸工具定位到砾石充填扩展短节的下部密封筒内,即上部反循环位置。

7)上提,使活瓣式防抽吸工具动作。

8)下放,使 Smart 底托定位到循环位置。

9)关闭环空,按照设计砂比泵注砾石直至脱砂。脱砂时,油管压力急剧上升,停止泵注,切换到反循环。

10)上提并将工具定位到反循环位置,反循环出管柱内的砾石。

11)将工具提出井口,完井。

### 3.2 施工曲线分析

图 7 是赵东区块某水平井裸眼砾石充填现场施工曲线。从图 7 可以看出,在整个泵注期间泵注排量和砂比稳定,随着填充段不断延长,油管压力逐渐升高,返出液流量逐渐减少(表示更多的液体进入了

地层),当充填至信号筛管时,形成脱砂,压力急剧升高,此时充填结束,停止施工。

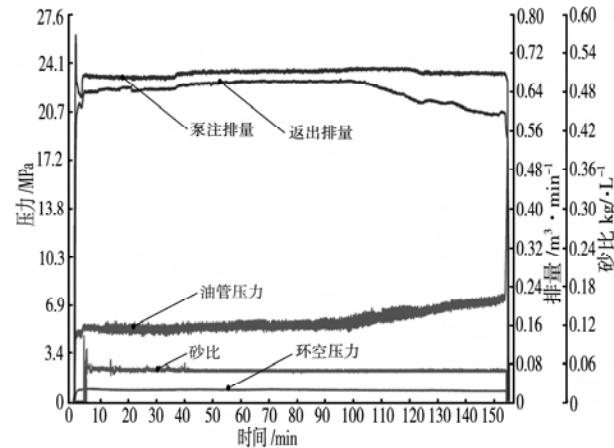


图 7 赵东区块某水平井裸眼砾石充填现场施工曲线

## 4 结论及建议

1)水平井裸眼砾石充填先期防砂完井技术适用于疏松易出砂地层,与常规防砂技术相比具有防砂效果好、工作寿命长、成本低等优点。

2)当地层漏失不严重时,可采用低黏液体(如盐水)作为携砂液,设计泵注排量时要综合考虑携砂液的冲砂能力和地层破裂压力,合理的泵注排量能够对长水平井段进行有效的充填。

3)控制地层漏失、规则光滑的井眼以及钻井阶段的油层保护是水平井裸眼砾石充填防砂顺利实施

和油井高产的必要条件,因此需要在裸眼钻进阶段,选用高性能的无固相钻井液、完井液,快速形成超低渗透泥饼,将对储层的伤害降至最低,并要求所形成的泥饼具有低返排压力、高渗透率恢复率、小摩阻系数等特点。

4)防砂施工工具的一个主要作用是保持作用在储层上的流体静压力达到过平衡状态,最大程度地避免井壁坍塌。另外,为了达到长期开采的目的,应选用高性能长寿命的防砂管柱。

5)目前国内对于水平井裸眼砾石充填先期防砂完井技术从理论研究、工艺技术和工具等方面开展了不同程度的研究和实践,建议将国内现有技术加以整合完善,以完善现有的完井技术手段。

## 参 考 文 献

- [1] 董长银,王滨,李志芬,等. Schwartz 砾石尺寸设计方法的解析、改进及应用[J]. 石油钻探技术,2008,36(3):77-80.
- [2] 闫相祖,王伟章,陈宗毅,等. 基于专家系统的高压砾石充填防砂方案智能设计[J]. 石油钻探技术,2008,36(2):67-71.
- [3] 李怀文,邹志新,赵亮,等. 水平井旁通分流砾石充填工具的研制[J]. 石油钻探技术,2007,35(6):99-100.
- [4] 万仁溥. 现代完井工程[M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [5] Jones L G. Shunts help gravel pack horizontal wellbores with leakoff problem[J]. JPT, 1998, 50(3): 68-69.
- [6] 梅庆文,陈孝贤,王玲娜,等. 文昌油田裸眼水平井砾石充填防砂技术应用及分析[J]. 特种油气藏,2007,14(3):95-98.

[审稿 程远方]

## Horizontal Well Open Hole Gravel Packing Sand Control Completion Technique Used in Zhaodong Block, Dagang Offshore

Zheng Yongzhe<sup>1</sup> Yang Shimeng<sup>1</sup> Yu Xueliang<sup>1</sup> Zhang Ningxia<sup>2</sup> Song Li<sup>3</sup>

(1. Engineering Technology Research Institute, Bohai Drilling & Exploration Engineering Company Ltd., Dagang, Tianjin, 300280, China; 2. Downhole Service Company, Dagang Oilfield Corporation, Dagang, Tianjin, 300280, China; 3. Drilling & Production Technology Research Institute, Dagang Oilfield Corporation, Dagang, Tianjin, 300280, China)

**Abstract:** Sand production is always a problem in Zhaodong block of Dagang Offshore due to high porosity and high permeability and use of large diameter electric pump. Therefore, sand control technique gravel packing well completion was used to meet the oil production requirement. This paper presents the well completion tubing and sand control tools, analyzes hydraulic dynamics features resulting from horizontal open hole gravel packing technique, designs the pump flow rate, and puts forward technical measurements considering factors affecting operation results. There are a lot of parameters impacting sand control, including wellbore parameters, well completion fluids, sand control tubing, operation tools. Therefore match among them should be considered. In wellbore with low loss, gravels are packed in annulus between screen pipe and barefoot borehole at reasonable injection flow rate with low viscosity carrying fluid through inverse circulation so that a long and dense packing interval is obtained.

**Key words:** horizontal well; open hole; gravel packing; well completion; sand control; Zhaodong block