

浅表层小井眼长水平段裸眼砾石防砂技术

杜卫刚,谢梦春,李博,陈肖帆,关利永,顾冰

中国石油集团海洋工程有限公司天津分公司 天津 300451

通讯作者:Email:duwg.cpo@cnpc.com.cn

引用:杜卫刚,谢梦春,李博,等. 浅表层小井眼长水平段裸眼砾石防砂技术[J]. 油气井测试,2020,29(2):50-55.

Cite: DU Weigang, XIE Mengchun, LI Bo, et al. Open-hole gravel sand control technology for long horizontal section of shallow slim hole [J]. Well Testing, 2020,29(2):50-55.

摘要 渤海油田某浅表层井水平段为 152.4 mm 小井眼,给防砂完井带来诸多困难。结合邻井防砂过程,对浅层小井眼防砂难点进行分析,总结出影响裸眼砾石充填的四大因素,优选出顶部砾石充填防砂工艺,形成了该井防砂方案。现场通过优化施工工序提高井壁稳定性,采用等密度携砂液保持泥饼稳定降低滤失,使用超轻质陶粒提高流动性减小滤失影响等措施,成功实施浅表层小井眼裸眼砾石充填防砂。投产后采用 4~5 mm 油嘴生产,产量逐渐稳定在 150 m³/d 左右,生产压力稳定,未见出砂征兆。该技术为浅表层小井眼防砂及类似复杂井防砂提供了借鉴。

关键词 水平井;裸眼砾石充填;超轻质陶粒;防砂;小井眼;完井

中图分类号:TE257 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.02.009

Open-hole gravel sand control technology for long horizontal section of shallow slim hole

DU Weigang, XIE Mengchun, LI Bo, CHEN Xiaofan, GUAN Liyong, GU Bing

Tianjin Branch of CNPC Ocean Engineering Limited Company, Tianjin 300451, China

Abstract: The horizontal section of a shallow surface well in Bohai Oilfield is slim hole with the diameter of 152.4 mm, which brings many difficulties to sand control and completion. Combining with the sand control process of adjacent wells, the difficulty of sand control in shallow slim hole is analyzed. Four factors affecting open hole gravel filling are summarized, the sand control technology of top gravel filling is optimized, and the sand control scheme of this well is formed. Through optimizing the construction process to improve wellbore stability, using equal density sand-carrying fluid to keep mud cake stable and reduce filtration, and using ultra-light ceramicsite to improve fluidity and reduce filtration effect, sand control by open-hole gravel filling in shallow slim hole was successfully implemented. After put into operation with 4-5 mm oil nozzle, the production rate was gradually stabilized at about 150 m³/d, the production pressure was stable, and there was no sign of sanding. This technology provides a reference for sand control in shallow slim holes and similar complex wells.

Keywords: horizontal well; open-hole gravel filling; ultra-light ceramicsite; sand control; slim hole; completion

海上油气田作业成本较高,低油价下生产压力较大。为挖潜增效,长水平段与裸眼完井工艺的结合使得油气藏的开发增效显著^[1-3]。长水平井在钻进过程中,由于储层、工程等原因经常会出现井身结构改变、井眼轨迹复杂等情况,给后续射孔、防砂、完井施工带来困难。渤海某区块浅表层长水平井二开 $\phi 244.5$ mm 套管下入过程中,在 2 567.0 m 位置遇阻,多次尝试无法下入。选择在该位置固井后,在 $\phi 244.5$ mm 套管内悬挂 $\phi 177.8$ mm 套管(2 409.0~2 680.0 m)到二开井底,固井、候凝,然后进行三开。三开钻进因悬挂 $\phi 177.8$ mm

套管悬挂器(内径 154.0 mm)造成原计划的 $\phi 215.9$ mm 钻头无法进入,更换为 152.4 mm 旋转导向钻头进行三开。原设计中的 215.9 mm 正常井眼变为 152.4 mm 的小井眼,实际完钻深度 3 260.0 m,裸眼段长 580.0 m。受二开套管悬挂器内径、套管段内部缩径及裸眼尺寸变小的影响,给后期防砂作业带来诸多问题和挑战,主要表现在以下几个方面:

(1) 钻井过程采用高清边界探测、精细控压钻井,井眼轨迹复杂,管柱下入摩阻大,下入困难,防砂筛管管柱易在狗腿度大的井段自锁,同时筛管黏

卡风险极大^[4-5]。

(2)套管内出现缩径,造成防砂管柱下入困难,循环替浆等作业压力高、难度大。

(3)目的层位于浅表层,岩芯疏松、破碎严重,胶结作用较弱,易井壁垮塌及地层漏失,砾石充填防砂施工作业难度大。

(4)地层破裂压裂低,裸眼井眼小,充填压力高,容易压漏地层^[6],充填过程压力控制困难。

(5)裸眼与筛管间隙小,压力大,容易造成筛管冲蚀破坏,对防砂筛管强度要求较高^[7]。

针对以上问题,根据该井的储层情况和工程设备情况,针对小井眼防砂关键技术进行研究分析,重点对影响长水平段裸眼砾石充填防砂主要因素进行研究,优选采用顶部砾石充填、超轻质陶粒及高效率携砂液,顺利完成了该井的防砂作业,形成了一套浅表层小井眼长水平段裸眼砾石防砂工艺。该井投产后,产量稳定,防砂效果良好,为其他小井眼及复杂井眼裸眼砾石防砂提供技术参考。

1 防砂方式优选

该井属于浅表层水平井,水平段 2 680.0 ~ 3 260.0 m,为浅表层高孔、高渗储集层,孔隙度为 23.5%~33.5%,平均渗透率 637.8 mD。地层砂粒度中值在 0.073~0.255 mm 之间,均质系数较高,分选性较差,细粉砂含量 5%~10%。原油为低凝重质稠油,地层温度低,压力小,易出砂。针对小井眼出砂问题,黄文民^[8]、贾宗华等^[9]采用人工井壁防砂技术,但人工井壁受固化强度影响,防砂有效期短,防砂效果差。赵峨松^[10]提出复合防砂技术,结合人工井壁和机械防砂。但该技术目前尚不成熟,施工程序复杂、作业时间长,不适用于海上作业。韦龙贵等^[11]提出精密微孔复合滤砂管防砂技术,该技术适用于套管射孔完井,不适用于裸眼完井。张得军等^[12]认为,在小井眼中进行砾石充填,施工难度极大。冯哲等^[13]则通过实际施工证明,水平井裸眼砾石充填在长水平段小井眼中可行,但需要结合实际情况进行优化。

为了实现防砂和增产双重目标,根据前期施工准备情况,采用裸眼砾石充填进行该井的防砂方案设计。防砂设计采用 Saucier 设计方法^[14],优选采用 20/40 目砾石进行充填。综合考虑区域稠油属性,优选 200 μm 精密筛管。施工工艺选择顶

部充填工艺,主要优点在于可以一次性下入防砂管柱,节省作业时间,降低作业成本;充填位置位于套管内,避免直接冲刷地层;下钻过程中,可正循环清洗、替浆,在井眼结构复杂时容易下入;后期产量不佳,可以打开充填滑套,进行解堵及洗井作业等。

2 顶部砾石循环充填工艺优化

该井井眼较小且水平段较长,长水平段砾石在充填过程中极易沉降形成砂桥堵塞^[15-16]。因此,施工难度较大。影响水平井砾石充填的因素较多,主要有施工排量、携砂比、携砂液黏度、冲筛比、滤失强度、固相颗粒密度,以及水平井长度等因素^[17]。该井施工前邻井进行了防砂,防砂过程中出现严重漏失。防砂初期压力平稳,漏失控制在 15% 左右。随着泵注的持续,漏失逐渐增大,漏失率最大达到 54.5%,压力迅速上涨至 10 MPa,停泵停砂后,两次尝试再次建立循环,很快出现脱砂压力。通过对该井砾石充填防砂的分析,总结出影响该区块砾石充填防砂的主要影响因素为:固相颗粒密度、冲筛比、泵注排量以及滤失率等。

2.1 固相颗粒密度

使用增稠剂增加携砂液的黏度可以显著提高携砂液的携砂性,但可能会带来对裸眼储层的污染。同等黏度、密度的携砂液情况下,陶粒的密度越小,携砂液的携砂性、流动性能越好。使用轻质陶粒可以极大的降低砾石充填液密度,支撑剂运移性大大提高^[18-19]。考虑到该井泥岩段较多、地层漏失情况严重,轻质陶粒会明显减小充填液密度,减小冲刷作用力,提高携砂液流动性和减少地层滤失。通过对同一密度携砂液不同密度陶粒流动性、沉降时间统计、综合密度测量等优选,选择使用超轻质陶粒。该陶粒主要由苯乙烯聚合树脂制成,视密度 1.06 g/cm³,体积密度 0.61 g/cm³,强度高,破碎率低,整体性能优越。通过现场配置 1.03 g/cm³、1.05 g/cm³ 和 1.07 g/cm³ 不同密度的携砂液,摇晃后静止 5 min,观察情况如图 1 所示,密度为 1.03 g/cm³ 的完井液全部沉淀;密度为 1.05 g/cm³ 的有一部分悬浮在携砂液中,大部分漂浮于表面;密度为 1.07 g/cm³,则全部漂浮于携砂液表面,随着液体的流动而流动。由于该井采用 1.07 g/cm³ 的钻井液,考虑到减小地层压力波动及泥饼保护,携砂液优选与钻井液等密度氯化钾溶液,提高井筒的

完善度,减少地层污染,保护泥饼。



a.1.07 g/cm³ b.1.05 g/cm³ c.1.03 g/cm³

图 1 超轻质陶粒在不同密度 KCl 中静态状态

Fig.1 Static state of ultralight ceramisite in KCl solution with different densities

2.2 冲筛比

携砂液经过充填滑套后,在水平段有两个流通通道:一个是裸眼井壁与筛管外壁环空,为充填环空;另外一个为筛管内壁与冲管外壁环空,脱砂后液体的返回通道。其中冲管外壁尺寸与筛管内壁尺寸的比值简称冲筛比。冲筛比越大,携砂液在冲筛环空中的流动面积越小,摩阻越大,迫使携砂液在充填环空流动,提高携砂液在环空中的流动速度,把砾石携带到井底,完成充填,降低发生砂堵的风险^[20-21]。由于充填结束后,冲管需要起出,只能减小冲管外壁接箍来提高冲筛比,增加携砂液流动速度,保证充填效果。

2.3 泵注排量

理论上施工泵注排量越大,砾石的悬浮性能越好,砾石充填成功率越高。但施工排量过大,造成回压过高,可能会刺穿筛管,导致整个防砂系统失效。施工排量小,可以有效的减少湍流程度及冲刷作用,利于固相颗粒沉积并充填密实,提高防砂有效性^[22-24]。但砾石的悬浮性会降低,导致施工时间变长,砂堵风险变大。许发宾等^[25]经过试验证明,充填速度、砂比对于砾石充填液冲刷泥饼影响效果较小,充填压差对砾石冲刷泥饼的影响严重,作业过程中应控制压差变化。根据该井的工艺参数,对施工过程进行模拟(表 1)。因为井眼较小,排量变化引起的压力波动较小。综合施工时间和压差,排量的选取结合地层测试排量,先期以较大排量施工给后期降排量留出空间,泵压严格控制,防止压开地层以及压差过大造成泥饼破损,滤失增大。

表 1 模拟泵排量与泵压关系

Table 1 The relationship between simulated pump displacement and pump pressure

序号	排量/(m ³ ·min ⁻¹)	泵压/MPa
1	0.08	6.70
2	0.13	6.76
3	0.22	6.93
4	0.33	7.18
5	0.43	7.51
6	0.54	7.92
7	0.64	8.40
8	0.73	8.96

2.4 滤失率

地层滤失率严重影响了 α 波充填的效率,进而直接影响到砾石充填率。滤失率太大,砂床高度会沿充填位置向上倾斜的速度越快,越容易出现提前砂堵,导致堵塞后面筛管亏空,砾石充填失败。通过对大量正循环测试结果以及充填结果的分析表明,如果地层滤失率小于 20%,可以正常充填;如滤失率太大,应考虑注入稠塞降低滤失量,同时提高排量、降低砂比,保证充填效率。但大多数地层滤失在前期钻井过程并不明显,后期砾石充填过程中由于冲刷作用、重力作用及压力过高引起的地层裂缝延伸,或较长时间浸泡引起的泥岩膨胀坍塌会造成严重漏失。降低携砂液密度、提高泥饼保护、减少裸眼压力波动及浸泡时间,可以有效降低滤失。在滤失发生时,泵注稠塞、减小砂比、提高排量,可以有效的降低滤失,提高充填成功率。

3 现场应用

根据该井的基本情况,在防砂方案制定过程中过砾石充填工艺的相关参数进行优化,同时对施工工序也进行优化。现场作业实施施工顺利,满足防砂设计要求。

3.1 施工工序优化

为了提高该井产量及砾石充填成功率,经扩眼钻井后,形成 177.8 mm 裸眼,防砂段长 575.0 m。为了最大程度的保证泥饼的稳定性,避免泥饼破坏导致的地层漏失,先进行刮管、酸洗作业,然后进行通井。采用同密度无固相优质泥浆,对裸眼段钻井泥浆进行顶替,避免密度差造成的压力变化对泥饼的影响。砾石充填采用同比重的氯化钾完井液施工,保证砾石的悬浮性减小压力波动。

3.1.1 刮削、酸洗管柱

下 177.8 mm 套管刮管器,在封隔器坐封位置上下 30 m 至少刮管 5 次。上提管柱底端到套管鞋

以上 45 m,进行酸洗钻杆作业,以 320 L/min 的泵速替入酸洗液,酸液 3 m³,用与钻井泥浆同比重过滤氯化钾盐水顶替酸液液柱到管柱刮削管柱底端,酸液不出钻杆。然后,改用反循环顶替酸液返出干净,返出的酸液中中和后回收。

3.1.2 通井、洗井

通井到底后,通井过程中每下入 5 柱钻具,记录一次悬重,直至通井到底;如中途遇阻,则准确记录好遇阻深度及遇阻载荷等数据,上提管柱,然后再次下放,加压最大不超过 50 kN。到底后,进行短起下 1 次,然后裸眼段内替入新配置的无固相钻井液,用与钻井液同比重的氯化钾盐水顶替原钻井液至套管鞋以上 150 m。

起钻到套管鞋以上 100 m 位置,正替入稠塞+碱水+清洗液,与钻井液同比重的氯化钾盐水正循环洗井,直至返出浊度小于 70 的钻井液,起钻。

3.1.3 下入防砂管柱

如图 2 所示,管柱组合:114.3 mm 双阀式引鞋+114.3 mm 短盲管+114.3 mm 循环密封筒+114.3 mm×101.6 mm 变扣+101.6 mm 优质筛管+101.6 mm 盲管+101.6 mm×114.3 mm 变扣+114.3 mm 快速接头下体。

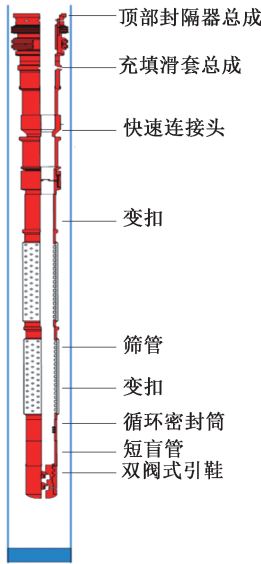


图 2 防砂管柱结构示意图
Fig.2 Structural sketch of sand control pipe string

用卡瓦坐在转盘上,并打好安全卡瓦下入内管柱。连接顺序:73 mm 服务工具总成+73 mm HYDRILL 511 冲管,下压 2~3 t 插入探底,根据探底结果配长。

连接下入 177.8 mm 顶部封隔器总成+充填滑套

总成+88.9 mm 短钻杆,如图 2 所示。为保证下入顺利,管柱在进入 177.8 mm 套管后使用 139.7 mm 钻杆。下钻进入裸眼段,放慢速度,下钻至井底。

3.1.4 顶替裸眼段钻井液

接顶驱,用相同比重的过滤氯化钾盐水(浊度小于 8)将裸眼内的钻井液顶至顶部封隔器以上 150 m。

3.1.5 坐封顶部封隔器

投坐封球,开泵小排量送坐封球,阶梯坐封。钻杆内正打压确认脱手,然后顶部封隔器验封,确认充填位置,上提至反循环位置,用同比重氯化钾盐水将井筒内钻井液全部循环出井,管柱内外液柱压力平衡后转入充填作业。

3.1.6 砾石充填作业

反循环测试结束后,缓慢下放管柱至充填位置点,做正循环测试。进行裸眼顶部砾石充填作业,砂比 5%,排量 0.36~0.60 m³/min,压力 1.7~6.3 MPa,地层入砂量 7.1 m³。

3.1.7 作业结束

反循环洗井,起出服务工具,作业结束。

3.2 施工总结

该井施工过程顺利,施工曲线如图 3 所示。由于该井属于浅表层储层,破裂压力较低,中间采取了两次降排量的措施控制压力,避免压力过高压开地层,最终实现砾石充填率 100%。

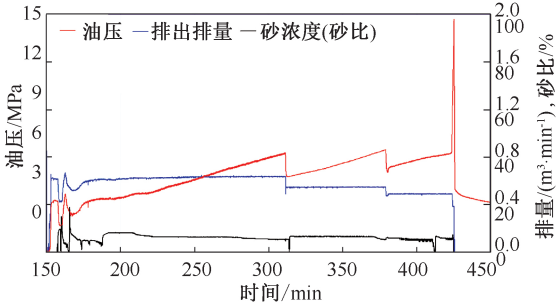


图 3 某井砾石充填施工曲线图
Fig.3 Gravel filling construction curve in a well

根据 α-β 波充填理论,当携带砾石的携砂液从充填滑套流出进入充填环空,通常由于砾石的密度大于携砂液密度,携砂液难以携带全部砾石,砾石开始沉积,达到平衡后形成砂丘。砂丘随着后来液体的进入逐步向前移动形成沉积砂床直到井筒末端,α 充填阶段结束,转入 β 充填阶段。β 充填阶段从末端开始,反向充填直到充满井段到充填滑套位置。由于该井采用超轻质陶粒,陶粒在充填过程一

直处于悬浮状态,未出现沉降,直至到达底部后,陶粒因无地方可流动开始沉积,从底部往回充填。因此,该井充填过程未出现 α 波阶段,直接进入 β 波阶段。该井充填过程中,后期滤失率在30%左右。由于良好的携砂液,充填过程未受到影响。该井投产后,先期采用8~10 mm油嘴,日产油量 210 m^3 ;后期改为4~5 mm油嘴生产,产量逐渐稳定在 $150\text{ m}^3/\text{d}$ 左右。生产压力稳定,电泵温度正常,未见任何出砂征兆。

4 结论

(1)针对浅表层长井段小井眼水平井防砂的难点,优化顶部砾石充填工艺,使用超轻质陶粒、高效率携砂液顺利实施了该井的砾石充填。投产后,产量稳定,防砂效果良好,为该类井及复杂井的防砂提供成功的经验。

(2)超轻质陶粒的使用有效解决了小井眼防砂和防砂过程中滤失量大的问题,在复杂井砾石充填中作用明显。但因价格较高,应根据油气井的情况,优选合适密度陶粒以提高产出投入比。

(3)长水平井段有利于提高油气井产量。但应结合储层特征,合理优化水平段长度,有助于单井成本降低。

(4)钻井过程中的钻井液、洗井液、压井液都会对储层造成影响,进而影响到裸眼砾石循环充填防砂成功率及后期产量。因此,对入井液统一优化,有助于提高防砂效果及产量。

致谢:本文在撰写过程中,得到了部门领导和同事的大力支持,对于论文中的不足,外审专家提出了指导意见,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 马明新. 水平井分段砾石充填技术及现场应用[J]. 石油机械, 2014, 42(7): 55-59.
MA Mingxin. Horizontal segmented gravel pack technology and filed application [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(7): 55-59.
- [2] 刘鹏, 许杰, 徐刚, 等. 渤中25-1油田低渗透储层水平井分段压裂先导试验[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 52-57.
LIU Peng, XU Jie, XU Gang, et al. Pilot test of horizontal well staged fracturing for low permeability reservoirs in BZ25-1 Oilfield [J]. Well Testing, 2018, 27(3): 52-57.
- [3] 任大明, 徐喜, 任耀军, 等. 水平井防砂筛管质量检测技术研究与应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(1): 70-72.
REN Daming, XU Xi, REN Yaojun, et al. Research and application of quality testing technology of sand control

screen in horizontal well [J]. Well Testing, 2017, 26(1): 70-72.

- [4] 魏安超, 冯雪松, 韩成, 等. 海上首口高温高压水平井小井眼打孔管下入技术[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(6): 762-765.
WEI Anchao, FENG Xuesong, HAN Cheng, et al. Running technology for perforation pipe in the slim hole of the first offshore HPHT horizontal well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(6): 762-765.
- [5] 崔海林, 陈建隆, 牛洪波, 等. 胜利油田首口小井眼长水平段水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(5): 14-18.
CUI Hailin, CHEN Jianlong, NIU Hongbo, et al. The first slim hole long horizontal-section horizontal well drilling technique in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5): 14-18.
- [6] 杨喜柱, 刘树新, 薛秀敏, 等. 水平井裸眼砾石充填防砂工艺研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(3): 76-78.
YANG Xizhu, LIU Shuxin, XUE Xiumin, et al. Research and application of open-hole gravel pack sand control technique optimization in horizontal well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(3): 76-78.
- [7] 林少宏, 刘良跃, 吴成浩, 等. 低压稠油出砂油田防砂完井方式的优选[J]. 中国海上油气(工程), 2002, 14(1): 40-45.
LIN Shaohong, LIU Liangyue, WU Chenghao, et al. Optimization of sand control for low pressure viscous oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 2002, 14(1): 40-45.
- [8] 黄文民. 人工井壁防治细粉砂技术研究[J]. 特种油气藏, 2003, 10(6): 65-66.
HUANG Wenmin. Fine silt control by artificial borehole wall [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2003, 10(6): 65-66.
- [9] 贾宗华, 贾宗建, 孟爱鲁, 等. JTS人工井壁防砂技术的研究与应用[J]. 中国西部科技, 2011, 10(20): 19-21.
JIA Zonghua, JIA Zongjian, MENG Ailu, et al. JTS artificial sand wall and application of technology [J]. Science and Technology of West China, 2011, 10(20): 19-21.
- [10] 赵峨松. 小井眼复合防砂技术的研究与应用[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(2): 76-79.
ZHAO Esong. Research and application of the composite sand control technology for slim hole well [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(2): 76-79.
- [11] 韦龙贵, 张崇, 曾春珉, 等. 南海西部小井眼完井关键技术优选及应用[J]. 中国海上油气, 2015, 27(4): 112-116.
WEI Longgui, ZHANG Chong, ZENG Chunmin, et al. Optimization and application of key technology for slim hole completion in western South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(4): 112-116.

- [12] 张得军,姚诚,白晨辰,等. 坨82特稠油区块出砂原因及防砂措施[J]. 断块油气田,2012,19(S1):96-99.
ZHANG Dejun, YAO Cheng, BAI Chenchen, et al. Reason and control measure of sand production on Tuo82 extra-heavy oil block [J]. Fault-Block Oil & Gas Filed, 2012,19(S1):96-99.
- [13] 冯哲,王宗明,王晓龙,等. 小井眼水平井裸眼砾石充填完井技术及其应用[J]. 石油科技论坛,2014,33(2):14-17.
FENG Zhe, WANG Zongming, WANG Xiaolong, et al. Open hole gravel packing completion technology of slim hole horizontal well and its application [J]. Oil Forum, 2014,33(2):14-17.
- [14] SAUCIER R J. Considerations in gravel pack design [J]. Journal of Petroleum Technology, 1974,26(2):205-212.
- [15] 董长银,贾碧霞,刘春苗,等. 机械防砂筛管挡砂介质堵塞机制及堵塞规律试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(5):82-88.
DONG Changyin, JIA Bixia, LIU Chunmiao, et al. Blocking mechanism and blocking laws experiments of sand retention media in mechanical screens [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(5):82-88.
- [16] 董长银,钟奕昕,武廷鑫,等. 水合物储层高泥质细粉砂筛管挡砂机制及控砂可行性评价试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):79-87.
DONG Changyin, ZHONGYixin, WUYanxin, et al. Experimental study on sand retention mechanism sand feasibility evaluation of sand control for gas hydrate reservoirs with highly clayey fine sands [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(6):79-87.
- [17] 白易,董长银,任闽燕. 水平井砾石充填可视化模拟及充填效果评价[J]. 科学技术与工程,2012,12(17):4149-4153.
BAI Yi, DONG Changyin, REN Minyan. Visual simulation of horizontal gravel-packing and its effect evaluation [J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(17):4149-4153.
- [18] 韩成,方达科,韦龙贵,等. 海上浅层压力衰竭储层长水平井裸眼砾石充填防砂实践[J]. 钻采工艺,2018,41(6):68-71.
HAN Cheng, FANG Dake, WEI Longgui, et al. Practice of open-hole gravel packing sand control in offshore depleted shallow long horizontal wells [J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(6):68-71.
- [19] 夏小春,胡进军,孙强,等. 环境友好型水基润滑剂 GreenLube 的研制与应用[J]. 油田化学,2013,30(4):491-495.
XIA Xiaochun, HU Jinjun, SUN Qiang, et al. Development and application of environment-friendly water-based lubricant-GreenLube [J]. Oilfield Chemistry, 2013,30(4):491-495.
- [20] 朱骏蒙. 水平井裸眼砾石充填防砂完井工艺在胜利海上油田的应用[J]. 石油钻采工艺,2010,32(2):106-108,112.
ZHU Junmeng. Application of horizontal wells openhole gravel pack sand-control completion technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010,32(2):106-108,112.
- [21] 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.
MEI Qingwen, CHEN Xiaoxian, WANG Lingna, et al. Application and analysis of open-hole gravel pack sand control in horizontal well in Wenchang Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2007,14(3):95-98.
- [22] 董长银,高凯歌,徐鸿志,等. 充填密实程度对砾石层挡砂效果及稳定性影响实验[J]. 石油钻采工艺,2018,40(1):123-130.
DONG Changyin, GAO Kaige, XU Hongzhi, et al. Experimental study on the influence of filling density on the sand blocking effect and stability of gravel [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40(1):123-130.
- [23] 董长银,崔明月,彭建峰,等. 气田水平井防砂筛管类型优选与精度优化试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(6):104-109.
DONG Changyin, CUI Mingyue, PENG Jianfeng, et al. Experimental study on selection of mechanical screens and sand retention precision design for horizontal wells in a gas field [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2015,39(6):104-109.
- [24] 董长银,张清华,高凯歌,等. 机械筛管挡砂精度优化实验及设计模型[J]. 石油勘探与开发,2016,43(6):991-996.
DONG Changyin, ZHANG Qinghua, GAO Kaige, et al. Screen sand retaining precision optimization experiment and a new empirical design model [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(6):991-996.
- [25] 许发宾,方达科,韩成,等. 海上压力衰竭储层长水平井砾石充填泥饼性能研究与应用[J]. 科学技术与工程,2017,17(25):211-215.
XU Fabin, FANG Dake, HAN Cheng, et al. Mud cake for long horizontal wells gravel packing with depleted reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(25):211-215.

编辑 王 军

第一作者简介:杜卫刚,男,工程师,2008年毕业于中国石油大学(华东)机械设计制造及自动化专业,现从事酸化、压裂、防砂等增产工作。电话:022-66306297,13512940743; Email:duwg.cpoe@cnpc.com.cn。通信地址:天津市塘沽区福建北路1019号石油科技大厦,邮政编码:300451。