

# 地层出砂井测试工艺优化

李军贤

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email:397636820@qq.com

引用:李军贤. 地层出砂井测试工艺优化[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 47-52.

Cite: LI Junxian. Optimization of testing techniques for wells with formation sand production [J]. Well Testing, 2018, 27(2): 47-52.

**摘要** 为减小地层出砂砂粒、钻屑、高冲蚀性固相杂质冲蚀测试工具,避免地层塌陷及工具卡堵等,分析了地层出砂的自然因素和人为因素,提出了地层出砂的力学机理,阐明了地层出砂对地面测试工作造成的设备损坏、套管损坏及测试数据不准确等不良影响。通过采取井下工具结合填砾滤砂及地面测试增加滤砂工艺等方式对常规测试工艺进行防砂滤砂优化,从而除去流体中携带的砂粒。通过A区块T#3探井测试,选用井下工具结合填砾滤砂在井下通道中进行第一道滤砂;地面流程中采用除砂器依靠离心力和重力作用进行第二道除砂,过滤后的流体通过滤网和除砂筒之间的环形空间进入下游测试流程,除砂后流体中砂比达到0.02%以下,保证了测试工作的连续性。该工艺能减少砂粒对套管和测试设备的损害,提高了测试施工成功率,在地层出砂井的测试施工中取得了较好效果。

**关键词** 测试工艺;地层出砂;出砂机理;防砂;工艺优化;除砂器

中图分类号:TE353

文献标识码:B

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.02.008

## Optimization of testing techniques for wells with formation sand production

LI Junxian

Well Testing Company of PetroChina Daqing Oilfield Company Limited, Daqing, Heilongjiang 163412, China

**Abstract:** To minimize the erosion on testing tools by sand, cutting, and highly erosive solids in formations and eliminate the possibility of formation collapse and tool sticking, the natural and human factors for formation sand production were analyzed, the mechanical mechanism of formation sand production was highlighted, and the negative impacts of sand production on surface testing (e.g. equipment damage, casing damage, and inaccurate testing data) were illustrated. Through application of downhole tools together with gravel packing, sand filtering, combination of surface testing with sand filtering and other techniques, conventional testing techniques were optimized in view of sand control and sand filtering in order to remove sands carried in fluids. In Well T#3 in Block A, downhole tools together with gravel packing and sand filtering techniques were used as the first defense against sand production in flowing channels. Desanders were used on ground surface to provide the second defense against sand production by removing sands under centrifugal and gravity. Filtered fluid was delivered to downstream testing procedures through the annulus between filter mesh and de-sand barrel. Sand ratio in filtered fluid was below 0.02%, so that continuous testing operation can be maintained. By minimizing damages of sands to casing and testing tools, the technique can enhance success rate of testing operations. It has been satisfactory applied in testing for wells with formation sand production.

**Keywords:** testing technique; formation sand production; sand production mechanism; sand control; process optimization; desander

油井出砂是油田开发急需解决的难题之一。由于岩层自身或作业导致结构破坏剥落的地层砂随地层流体进入井筒,对作业工具、流通通道、地层产量等造成不利影响,在其它领域也有地层疏松造成钻孔不稳定现象<sup>[1]</sup>。测试制度设计不合理,将会导致地层出砂、地层产水、应力敏感、凝析气藏反凝析等问题,严重影响测试参数的获取,导致建立的产能方程不可靠<sup>[2]</sup>。

尹邦堂等采用理论分析和数值模拟的方法,建立了测试参数设计方法<sup>[3]</sup>。丛洪良等根据液固多相渗流条件,应用库仑摩尔破坏准则和达西公式,导出了关于疏松砂岩油藏不同产液量下油井出砂量预测的数学模型<sup>[4]</sup>。左军等综合现有出砂预测方法,通过计算验证预测方法的可行性<sup>[5]</sup>。张红霞通过室内岩心实验研究出砂机理,并利用测井曲线及数值计算预测了新井出砂<sup>[6]</sup>。吕广忠等利用玻

璃板填砂平面模型,研究了地层非均质性、流体黏度、渗流速度等因素对出砂结果的影响,结果表明随流速的增大,出砂速度迅速提高;胶结强度越高,出砂量和出砂速度越小<sup>[7]</sup>。张广清等建立了应力场和压力场相互作用的三维弹塑性高压气藏地层出砂模型,研究了射孔井筒附近有效塑性应变、压力和流速的分布规律<sup>[8]</sup>。梁振华等从测试压差方面评价了抗压强度法、井口油压法、剪切强度法以及射孔流速法等地层出砂评价方法<sup>[9]</sup>。肖伟等建议在维持一定产液量携带砂粒出井筒的同时,采取黏土稳定剂、滤砂管和清蜡剂的综合治砂措施<sup>[10]</sup>。钟兵等提出了高孔密、大孔径射孔以及逐层叠加开采和多层压力平衡合采两种多层合采的开采方式和技术路线。实践表明,两种方式均能达到提高产量、防止地层出砂的目的<sup>[11]</sup>。Magalhaes 等应用砾石填充技术在水平井测试过程中降低了出砂量,保持了储层的平稳开发<sup>[12]</sup>。

根据上述专家学者对油井出砂的理论研究成果,总结近年来在 A 地区测试过程中遇到的出砂现象,发现其开采目的层的胶结情况较差,随着油气开发的进行,地层流体携砂情况变得越来越复杂。

1 出砂机理

油气水井出砂原因可分为先天和人为两种因素,刘先珊等认为先天因素主要是油藏埋藏较浅,形成地质年代较晚,并且胶结矿物数量少、分布不均匀,导致储层胶结强度差<sup>[13]</sup>,在地应力大于地层强度时,在流体冲刷之下,储层即会出砂。陈敏等分析人为因素主要有<sup>[14]</sup>:(1) 钻井过程及开采前后,油层部位受破坏而应力失衡;(2) 不合理的开采速度和油井工作制度突变或生产压差过大;(3) 射孔、压裂、修井冲砂和酸化等措施造成对储层强度的负面影响;(4) 中高含水期开发的储层,随着胶结物被溶解和冲刷,储层强度降低;(5) 固井质量差,对胶结物的溶解软化;(6) 油层渗透率高、流体渗流速度大、油粘度大、携砂能力强都会使油层出砂。为此通过分析地层受力情况,得出地层出砂机理如下:

1.1 拉伸破坏机理

水平方向上,随油藏投入开发,原有相对平衡的油藏压力与静液柱压力之间的平衡被打破<sup>[15]</sup>。

从图 1 中可以看出,油藏压力与静液柱压力差

增大时,流体流向井内的流速随之增大,对岩石的拖拽力也增大。当该拖拽力超过岩石抗拉伸强度时,岩石就会遭到拉伸破坏,破碎的地层岩石随流体一同进入渗流通道。

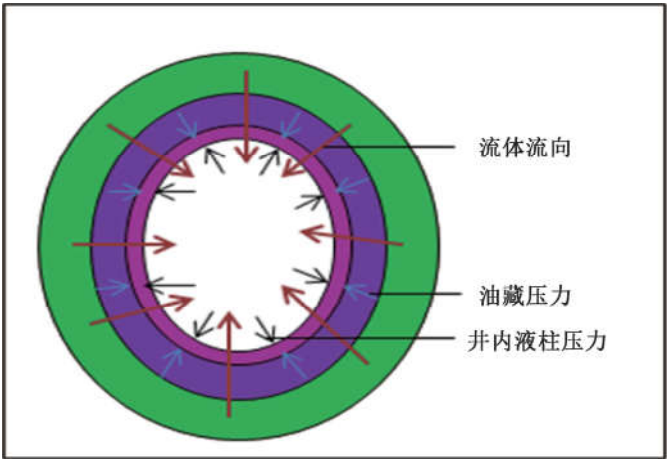


图 1 拉伸破坏机理  
Fig.1 Tensile failure mechanism

1.2 剪切破坏机理

垂直方向上,油藏上覆岩层压力与孔隙压力之和和支撑骨架应力共同作用保持相对平衡。随油藏的持续开采,孔隙中油气被采出后,孔隙压力逐渐降低,就使得施加在岩石骨架上的压力越来越大。

从图 2 中可以看出,当上覆压力超过岩石的抗剪切应力时,岩石就会受力而被剪切破坏,形成松散的地层砂,地层流通通道变得很脆弱。

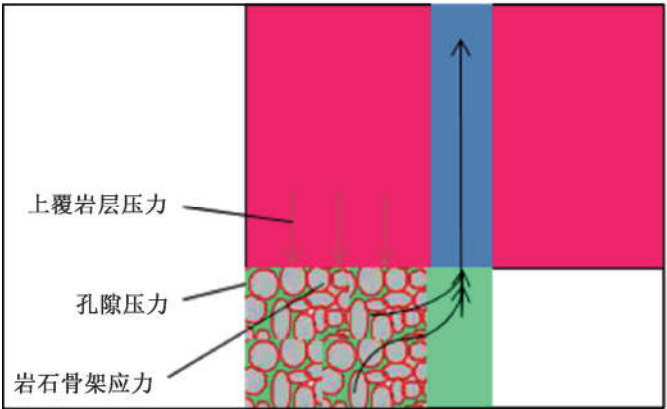


图 2 剪切破坏机理  
Fig.2 Shear failure mechanism

1.3 精细颗粒的影响

地层中存在诸如粘土之类的精细颗粒<sup>[16]</sup>,会随着产出液一起运移,造成井壁周围渗透率降低(地层损伤的一种),阻碍了流体通过,增加了流体的拖拽力,流体会将地层砂携带进入井筒,附着在井壁或沉积在井底,严重减缓地层流体的流动,为测试施工增加难度和不确定性,影响测试效果。

## 2 出砂对地层测试的影响

地层流体携带砂粒在运动过程中,由于压力很大,极易磨损测试阀等井下工具,导致测试阀密封失效,进而开关异常,长时间接触影响测试阀等入井工具的使用寿命<sup>[17]</sup>。

### 2.1 井下作业、地面测试设备的磨损和腐蚀

地层流体携带砂粒在运动过程中,由于压力很大,极易磨损测试阀等井下工具,导致测试阀密封失效,进而开关异常,长时间接触影响测试阀等入井工具的使用寿命<sup>[17]</sup>。

出砂对地面测试设备的管线、压力容器等都会造成不同程度的影响<sup>[18]</sup>。携砂流体长时间的冲刷,会对设备内壁形成磨损,大幅缩短设备的使用寿命。尤其测试树、油嘴管汇和紧急关井系统等承压设备除了受到磨损影响以外,沉积的砂粒还有可能堆积在阀的密封端面上,导致密封失效,开关井操作受到影响。

### 2.2 套管损坏

由于出砂使井眼处地层流体的压力发生变化,很容易使套管发生弯曲破坏、套管错断、套管变形等一系列的变化,久而久之使油井报废。

### 2.3 测试产量不准确

油井出砂,导致测试过程中压力、温度、流体速度等发生变化,很难准确地取得油藏相关的参数,无法取得真实可靠的资料<sup>[19]</sup>。

## 3 出砂井测试工艺优化

若井眼出砂,就要采取防砂措施,减少出砂对测试的影响。结合地层出砂的机理,优化测试工艺,采用井下工具结合填砾滤砂和地面测试工艺滤砂工艺,实现测试施工。

### 3.1 井下工具结合填砾滤砂

井下工具结合填砾滤砂是在测试管柱上采取防砂滤砂措施。如图 3 所示,下入防砂管柱(筛管)后将填充材料填充于筛管和井壁之间的环形空间并将部分砾石挤入井的地层内,阻止砂粒运移。这种防砂方法能有效地把地层砂限制在地层内,并能使地层保持稳定的力学结构,防砂效果好,寿命长。

从图 3 中可以看出,填充砾石于筛管和井壁,保持流通通道的骨架结构,可以将地层砂限制在地层内,防止地层砂随流体进入测试工具,一方面可以做到防砂;另一方面对地层通道加强支撑,保持稳

定的力学结构,延长开采寿命。

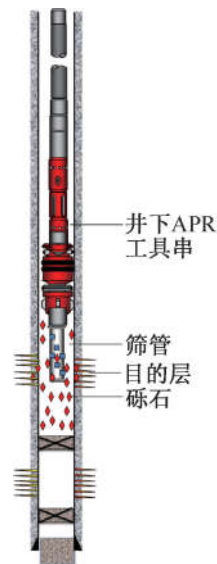


图 3 井下管柱滤砂示意图

Fig.3 Schematic sand prebention of downhole string

### 3.2 地面除砂器滤砂

地层流体从井筒进入地面测试树后,在测试树和地面安全阀之间加载除砂器<sup>[20]</sup>。除砂器包括两个可单独使用的立式滤筒,含砂流体通过滤砂筒,冲击到挡环上,流体折射到各个方向,依靠由此产生的离心力和重力,固相颗粒沉淀在滤网的底部,过滤后的流体通过滤网和除砂筒之间的环形空间进入下游测试流程,如图 4 所示。

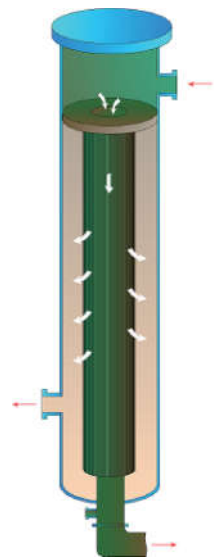


图 4 除砂器除砂原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of a sand remover

从图 4 可看出,含砂流体从砂筒的上部进入,冲击挡环进入滤网。由于离心力和重力的作用,砂粒下移到滤网的底部,除砂后的流体通过砂筒和滤网之间的环形空间进入下游流程,达到除砂的目的。

砂筒顶部可提滤网排砂,底部管汇可直接排砂。当滤网内外压差达到一定值时,切换流程到另一个砂筒,保养积累一定砂量的滤筒。此除砂器可



清洗流程中的所有颗粒杂质,避免油嘴、管线、控制阀等设备的机械磨损,避免砂粒沉积堵塞通道,造成设备处理能力的下降,录全取准油藏相关参数。

总的来说,采取井下工具结合填砾滤砂与地面除砂器滤砂相结合的方法对地层的适应能力强,无论产层薄厚、渗透率高低、夹层多少都能有效实施。

4 应用实例

T#3 井是 A 区块一口探井,井深 2 023.6 m。井身结构参数为:导管外径 473 mm,下深 42.6 m;表层套管外径 340 mm,内径 320 mm,下深 918.7 m;技术套管外径 244 mm,内径 222 mm,下深 1 381.7 m;生产套管内径 177.8 mm,内径 159 mm 下深 1 321.9 m~2 009.6 m;油管外径 73 mm,内径 62 mm。在 177.8 mm 套管中进行 8 个目的层的测试。设计为 TCP 射孔后,使用 APR 中途测试加地面测试,取得油藏参数。

第 2 层射孔后,地层返砂,砂比 10%。根据常用的油气井出砂经验预测方法——组合模量法,将该层数据进行计算。组合模量法预测地层出砂,根据声速及密度测井资料,得岩石的弹性组合模量为:

$$E_c = \frac{9.94 \times 10^8 \rho_r}{\Delta t_c^2} \quad (1)$$

式中: $E_c$ 为岩石的组合弹性模量,MPa; $\rho_r$ 为地层岩石的体积密度,g/cm<sup>3</sup>; $\Delta t_c$ 为岩石的纵波声波时差,μs/m。

根据某油田防砂中心预测结论:①当  $E_c > 2.0 \times 10^4$  MPa 正常生产时,油、气井不出砂;②当  $1.5 \times 10^4 < E_c < 2.0 \times 10^4$  MPa 正常生产时,油、气井轻微出砂;③当  $E_c < 1.5 \times 10^4$  MPa,正常生产时,油、气井严重出砂。该井  $E_c$  为  $1.77 \times 10^4$  MPa,属于微出砂。为了防砂,测试采用井下工具结合填砾滤砂和地面滤砂器除砂相结合的方法,实现测试施工。

由于该井属于微出砂井,用 18 MPa 泵压标准为 0.5~0.8 mm 的砾石,进行填砂,井下工具采用 APR 工具加缝隙为 0.3 mm 割缝筛管滤砂,地面测试设备在测试树和油嘴管线之间选用防砂级别为 0.07 mm 的双筒滤砂器进行除砂。通过两级除砂工艺对地层流体携带的砂粒进行清除,做到防砂的目的。经过上述除砂流程,测试时在数据头测得砂比 0.01%,防砂取得成功,井下压力计采全取准油藏相关参数,地面测试成功计量气产量  $3 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d。

对该井第 3、4、5、6、7 号层进行  $E_c$  计算结果见

表 1。由表 1 可知,这 6 层均属于微出砂级别,在测试施工中同样出现出砂情况,沿用第 2 层的除砂方法及参数,取得较好防砂效果的同时,取全录准各层段的油藏相关参数。

表 1 T#3 井防砂效果统计表  
Table 1 Sand control statistics of Well T #3

层号	层厚 /m	砂比 /%	砾石直径 /mm	砾量 /m <sup>3</sup>	泵压 /MPa	处理后砂 比/%
2	3	10	0.5	20	18	0.01
3	3	15	0.7	23	20	0.02
4	3	13	0.7	21	19	0.01
5	4	16	0.7	20	19	0.02
6	4	21	0.7	23	20	0.02
7	5	18	0.7	28	19	0.01

从表 1 中可以看出,6 个目的层出砂比都达到了高于 10%,尤其第 6 层达到了 21%。针对这一情况,选用不同规格的砾石,用泵将不同砾量的砾石泵入筛管和井壁之间的环形空间,采取井下工具结合填砾滤砂与地面除砂器滤砂后砂比减少到 0.02% 以下,说明此方法很有效果。

对比出砂井是否选用此方法的测试曲线,分析测试结果。下面就未进行防砂工艺的 D#1 井 DST#2 测试结果进行分析。

D#1 井 DST#2 采用 TCP 射孔后,使用 APR 中途测试加地面测试。结合具体施工对压力计回放曲线分析。DST#2 压力计曲线如图 5 所示。

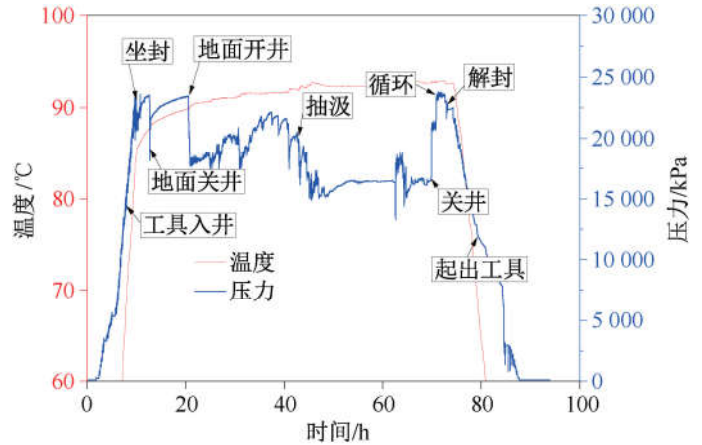


图 5 D#1 井 DST#2 压力计回放曲线  
Fig.5 Pressure playback curve of DST#2 gauge in Well D#1

从图 5 可以看出,D#1 井 DST#2 下入 DST 工具并坐封封隔器,2 h 后环空打压开 N 阀,开井后地面关井恢复压力。压力恢复高达 23.304 MPa,高于静液柱压力,再次开井后地层产天然气在燃烧坑着火 15 min 熄灭,井底压力骤降到 15.720 MPa。由于地层出砂的影响,井下压力表现为忽高忽低极不稳定。随后 48 h 内进行了数次抽汲后,地层压力降至

较低值并持续 10 h 轻微波动,分析流体已将通道严重堵塞。在经过 24 h 稳定后压力恢复波动,表明堵塞情况有所好转,6 h 后关井,11 h 后结束测试解封起管。油管上提后发现,距井口 310 m 深处出现砂堵,DST 工具全部堵塞,最大堵塞物直径达 12 mm。由于没有采用防砂工艺,地层流体堵塞通道造成测试压力不断波动,测试结果不能准确反映油藏的真实情况,对井下工具也造成了损伤。

采取防砂工艺的 T#3 井 DST#2 采用 TCP 射孔后,采用井下工具结合填砾滤砂和地面测试工艺除砂。结合具体施工对压力计回放曲线分析。DST#2 压力计曲线如图 6 所示。

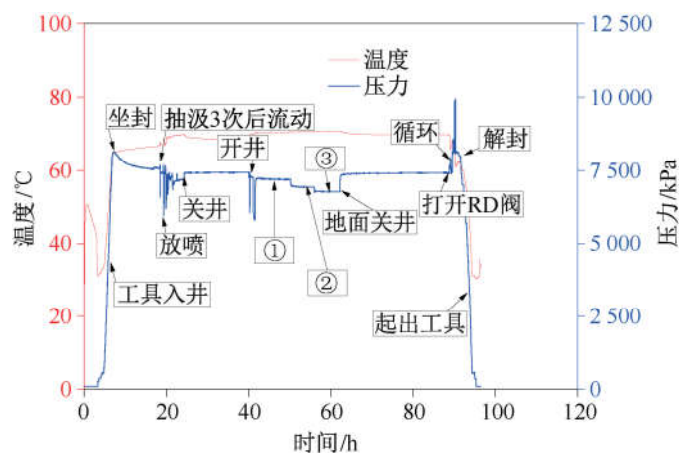


图 6 T#3 井 DST#2 压力计回放曲线

Fig.6 Pressure playback curve of DST#2 gauge in Well D#3

从图 6 可以看出,工具入井坐封后,开井抽汲 3 次后地面开始流动,放喷后关井 10 h 恢复压力,地面测试分别进行①6.35 mm、②9.525 mm 和③12.70 mm 油嘴控制下的流动测试 22 h,关井 27 h 后进行循环,1 h 后解封起管柱。对比发现,这口井的压力曲线比 D#1 井的要平滑,未出现压力波动不定,所进行的测试操作在压力曲线都能明显的反映出来,更加真实的反映了油藏的具体情况。井下工具到达地面后,检查工具内部没有砂砾存留,工具完好无损。

NE#1 井 DST#4 采用 TCP 射孔后,采用井下工具结合填砾滤砂和地面测试工艺除砂。结合具体施工对压力计回放曲线分析。DST#4 压力计曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出,井下工具入井坐封后,打开测试阀后进行抽汲,抽汲过程中取样分析,地面未发现砂粒。抽汲 11 h 后停抽恢复 12 h,再次抽汲 3 h,取样未发现砂粒,随后进行关井、循环、解封和起出井下工具。井下工具到达地面后,检查工具内部没有砂砾存留,工具完好无损。这口井的压力曲线比 D#1 井的要平滑,未出现压力波动不定,所进行的测

试操作在压力曲线都能明显的反映出来。

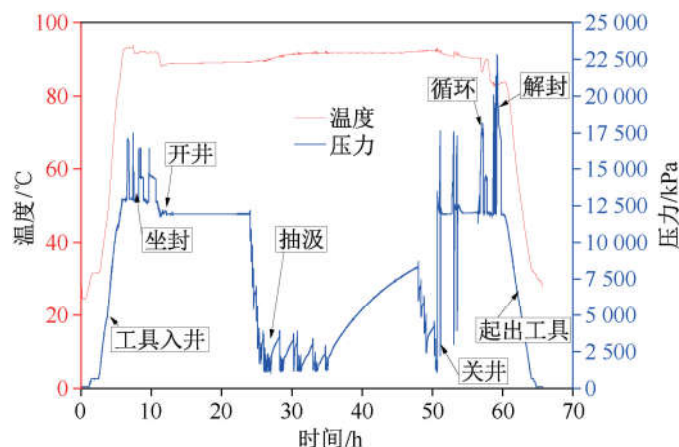


图 7 NE#1 井 DST#4 压力计回放曲线

Fig.7 Pressure playback curve of DST#4 gauge in Well NE#1

在 T#3 井和 NE#1 井的测试过程中,通过采取填砾滤砂与地面除砂器滤砂相结合的方法进行测试,既取全取准了地层参数,保证了测试工作的顺利进行,又杜绝了砂粒对套管、测试设备的损害,保护了测试设备,说明上述工艺在地层出砂井的测试施工中取得了较好效果。

## 5 结论

(1) 井下防砂工艺可下入筛管,并将砾石填充于筛管和地层之间,阻止砂粒运移,实现井筒防砂。

(2) 地面防砂工艺可将双筒除砂器安装在测试树和安全阀中间,做到测试中第二级防砂。

(3) 在油井测试施工前,根据声波及密度测井资料组合模量法预测地层出砂情况。根据出砂量大小选择采取不同的防砂除砂测试工艺,以经济最优方式,避免砂粒对工具损害,强化地层流体通道,取准相关测试参数。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司对本文所提供的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 白青波. 深部竖井 TBM 掘进开挖支护变形研究[J]. 铁道勘察, 2018, 44(1): 67-70.  
BAI Qingbo. Study on deformation of rock during the TBM excavation of deep shaft [J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, 44(1): 67-70.
- [2] 范兴沃,李相方,关文龙,等.国内外出砂机理研究现状综述[J].钻采工艺,2004,27(3):57-58,70.  
FAN Xingwo, LI Xiangfang, GUAN Wenlong et al. Research on sand production mechanism at home and abroad [J]. Drilling & Production Technology, 2004, 27(3): 57-58,70
- [3] 尹邦堂,李相方,杜辉,等.油气完井测试工艺优化设计方法[J].石油学报,2011,32(6):1072-1077.  
YIN Bangtang, LI Xiangfang, DU Hui et al. An

- optimization design for the well completion test technology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(6): 1072-1077.
- [4] 丛洪良, 盛宏至. 疏松砂岩油藏油井出砂量预测模型及应用[J]. *石油天然气学报*, 2006, 28(2): 120-122.  
CONG Hongliang, SHENG Hongzhi. A mathematic model for predicting sand production in unconsolidated sandstone reservoirs and its application [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28(2): 120-122.
- [5] 左军, 申军武, 李薇, 等. 油气井出砂预测方法综述[J]. *西部探矿工程*, 2006, (12): 93-94, 96.  
ZUO Jun, SHEN Junwu, LI Wei *et al.* Oil and gas well sand prediction methods summary [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2006, (12): 93-94, 96.
- [6] 张红霞. 地层出砂机理及出砂预测.[J]. *中国科技信息*, 2005, (8): 175-163  
ZHANG Hongxia. Formation sand production mechanism and sand production prediction [J]. *China Science & Technology Information*, 2005, (8): 175-163.
- [7] 吕广忠, 张建乔, 孙业恒. 疏松砂岩油藏出砂机理室内试验研究[J]. *石油钻采工艺*, 2005, 27(5): 63-66.  
LYU Guangzhong, ZHANG Jianqiao, SUN Yeheng. Experiment of sanding production mechanisms in unconsolidated sandstone reservoirs [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005, 27(5): 63-66.
- [8] 张广清, 陈勉, 金衍. 高压气藏地层三维出砂预测模型及方法[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(2): 198-201.  
ZHANG Guangqing, CHEN Mian, JIN Yan. Three-dimensional model and procedures for prediction of sand production in gas reservoirs [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(2): 198-201.
- [9] 梁振华, 王永清, 李海涛, 等. 高温高压气井测试地层出砂的评价方法[J]. *断块油气田*, 2007, 14(3): 87-88.  
LIANG Zhenhua, WANG Yongqing, LI Haitao *et al.* Evaluation method of formation sand production in gas well testing with high temperature and pressure [J]. *Fault Block Oil & Gas Field*, 2007, 14(3): 87-88.
- [10] 肖伟, 胥元刚, 刘顺. 低渗油田出砂机理分析[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2005, 20(4): 43-45.  
XIAO Wei, XU Yuangang, LIU Shun. Analysis of sanding mechanism of low-permeability oilfields [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2005, 20(4): 43-45.
- [11] 钟兵, 马力宁, 杨雅和, 等. 多层组砂岩气藏气井出砂机理及对策研究[J]. *天然气工业*, 2004, 24(10): 89-92.  
ZHONG Bing, MA Lining, YANG Yahe *et al.* Studying sand producing mechanism of gas wells and counter-measures for gas reservoirs with multilayer sand [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(10): 89-92.
- [12] MAGALHAES J V M, OLIVEIRA T J, FERNANDES P D *et al.* Gravel packing horizontal wells in reservoir oil flow equalization projects [C]. SPE 107612, 2007.
- [13] 刘先珊, 张林. 持续开采的储层砂岩出砂机理分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(6): 741-746.  
LIU Xianshan, ZHANG Lin. Continuous extraction influencing the mechanism of sand production for reservoir sandstone [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2013, 49(6): 741-746.
- [14] 陈敏, 周子淳, 刘欣荣. 大牛地气井出砂机理研究及解决措施[J]. *石化技术*, 2016, 23(11): 187, 219.  
CHEN Min, ZHOU Zichun, LIU Xinrong. Mechanism and solutions of sand production in Daniudi gas field [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2016, 23(11): 187, 219.
- [15] 孙辉, 李兆敏, 马丕梁, 等. 弱胶结油藏拟三维出砂预测模型及方法[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2008, 27(4): 526-528.  
SUN Hui, LI Zhaomin, MA Piliang *et al.* Pseudo-three-dimensional model and procedures for sand prediction in weakly consolidated reservoirs [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2008, 27(4): 526-528.
- [16] 范红招. 复杂出砂油藏多元开发部署与实践[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2014, 34(6): 196.  
FAN Hongzhao. Multi-development and practice of complex sand production reservoir [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2014, 34(6): 196.
- [17] 哈长鸣. 浅析油井出砂的危害及防砂技术[J]. *化工管理*, 2015(32): 136.  
HA Changming. Analysis of the hazards of oil well sand production and sand control technology [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2015(32): 136.
- [18] 匡韶华, 石磊, 于丽宏, 等. 防砂筛管测试技术现状及发展探讨[J]. *石油矿场机械*, 2013, 42(4): 83-88.  
KUANG Shaohua, SHI Lei, YU Lihong *et al.* Performance experiment evaluation research of adaptable and expandable sand control screen [J]. *Oil Field Equipment*, 2013, 42(4): 83-88.
- [19] 马建民, 刘永红, 李夯, 等. 可自适应膨胀防砂筛管性能评价试验研究[J]. *石油矿场机械*, 2011, 40(4): 57-61.  
MA Jianmin, LIU Yonghong, LI Hang *et al.* Performance experiment evaluation research of adaptable and expandable sand control screen [J]. *Oil Field Equipment*, 2011, 40(4): 57-61.
- [20] 丁强国, 王温桃, 张志刚, 等. 电子压力计存储试井工艺常见问题及解决方法[J]. *油气井测试*, 2010, 19(2): 70-72.  
DING Qiangguo, WANG Wentao, ZHANG Zhigang *et al.* Common problems and solutions of electronic pressure gauge storage in well test process [J]. *Well Testing*, 2010, 19(2): 70-72.

编辑 刘述忍

第一作者简介: 李军贤, 男, 1984年出生, 工程师, 2007年毕业于中国石油大学(华东) 勘查技术与工程专业, 现从事油气井测试和射孔相关工作。电话: 13836953673; Email: 397636820@qq.com。地址: 黑龙江省大庆市萨尔图区东风新村6-11号楼, 邮政编码: 163311。