

气田水平井防砂筛管类型优选与精度优化试验

董长银¹, 崔明月², 彭建峰³, 王 鹏², 蒋卫东², 张东峰⁴, 张清华¹, 付金杰¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007;
3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524000; 4. 中法渤海地质服务有限公司, 广东湛江 524000)

摘要:机械防砂筛管是疏松砂岩气藏防砂完井管柱的关键组成部分,其总体结构和挡砂介质性能决定了挡砂效果和气井防砂后产能以及总体服务期限。南海 X 气田为疏松砂岩易出砂气藏,为选择合适的水平井二次防砂机械筛管类型并优化挡砂精度,使用自行研制开发的挡砂介质性能评价径向流驱替试验装置,模拟该气田地层砂和生产条件,对单层网布复合筛管、双层网布复合筛管、复合绕丝筛管、多层精密筛管、孔网复合筛管等 5 种类型的筛管样品进行了综合性能评价试验;根据动态试验数据,提出筛管的流通性能、挡砂性能及其评价指标的计算方法,系统地评价 5 种筛管的各单项性能和综合性能,并得到具体的量化评价指标。为优化挡砂精度,使用从 0.08 ~ 0.18 mm 的 5 种不同精度的双层网布复合筛管分别阻挡粒度中值 0.08 mm 的模拟地层,测试与评价各精度筛管的综合防砂性能。结果表明,对于南海 X 气田不产水粉细砂气藏水平井,双层网布绕丝筛管和精密筛管的流通性能、挡砂性能等综合指标较高,依次推荐为气田二次防砂最佳筛管类型;最终推荐该气田二次防砂挡砂精度为 0.1 ~ 0.12 mm。

关键词:防砂筛管;性能评价;流通性能;挡砂性能;驱替试验;挡砂精度;气井防砂

中图分类号:TE 357.3 **文献标志码:**A

引用格式: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 (Edition of Natural Science), 2015, 39(6): 104-109.

Experimental study on selection of mechanical screens and sand retention precision design for horizontal wells in a gas field

DONG Changyin¹, CUI Mingyue², PENG Jianfeng³, WANG Peng²,
JIANG Weidong², ZHANG Dongfeng⁴, ZHANG Qinghua¹, FU Jinjie¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Langfang Branch of Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Langfang 065007, China;
3. CNOOC Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524000, China;
4. China France Bohai Geoservices Company Limited, Zhanjiang 524000, China)

Abstract: Mechanical screen is a key component for downhole sand control in unconsolidated sandstone reservoirs, and its type and comprehensive characteristics have a great impact on sand retention capability, well productivity and service life. In order to select a proper screen type and optimize sand retention for X gas filed in South Sea with typical sandstone formation and severe sanding problem during production, various parameters, such as screen conductivity, sand retention capability and a corresponding evaluation index, can be used to characterize the screen's comprehensive sand control capability. A series of sand control experiments were conducted using an in-house experimental set up with sand samples from the field and under the production conditions. Six types of screens were tested, including a single-layer mesh compound screen, a two-layer-

er mesh compound screen, a slotted linear screen, a wire-wrapped compound screen, a multi-layer mesh screen and a star-hole metal cotton screen. The performance index of each screen tested was calculated based on the experimental results. It indicates that, to control the fine sands from the gas reservoir with no water production, the two-layer mesh compound screen and the multi-layer mesh screen are the bests for use, which exhibited a good performance for sand retention, flow deliverability and anti-plugging. To optimize the sand retention precision, the two-layer mesh compound screens with six different sand retention accuracy from 0.1 to 0.15 mm were tested using simulated formation sands with median size of 0.08 mm. The experimental results show that the optimum sand retention accuracy is 0.1–0.115 mm for X gas field.

Keywords: sand control screens; characteristics evaluation; throughput capacity; sand retention ability; displacement experiment; sand retention accuracy; sand control in gas wells

南海西部 X 气田是典型的疏松砂岩气藏,水平井单井产量较高,正常生产过程中严重出砂。早期采用水平井裸眼筛管防砂完井,目前出现筛管腐蚀损坏导致的二次出砂问题,面临二次防砂。无论对于独立机械筛管二次防砂还是砾石充填类二次防砂工艺,机械防砂筛管都是水平井井下防砂管柱的关键组成部分,其主要作用是保证地层流体畅流入井^[1]同时阻挡地层产出砂进入井筒,这就要求机械筛管具有良好的挡砂效果和渗透性。目前的防砂筛管产品繁多,挡砂介质结构和材料各异;虽然洁净的筛管的渗透率都比较高,但防砂后投产一段时间被地层砂堵塞后的渗透性表现取决于筛管的抗堵塞性能和流通性。机械筛管的类型和性能决定了挡砂效果和油井防砂后产能以及总体服务期限。针对 X 气田的海上高产特点,要求防砂管柱防砂效果好、对产量影响小、有效期长,机械筛管类型的合理选择和挡砂精度优化是二次防砂决策的一个核心问题。利用试验手段对筛管进行性能检测与评价对比是针对特定油气藏选择合适筛管类型的主要技术手段之一。目前的筛管性能评价试验主要存在如下几个问题,一是主要进行筛管的挡砂性能测试,对于生产过程中的流通性能和抗堵塞性未作评价^[2-7];二是大多采用了预充填方式形成稳定桥架后再用流体驱替,不能模拟实际油气井出砂情况^[5-8];三是主要根据试验流量和压力动态定性评价筛管性能,在基于试验数据的定量评价指标及方法体系方面几乎空白,未形成规范的性能评价方法体系^[2-11]。X 气田目前可供使用的机械防砂筛管共有 5 种,分别为单层网布复合筛管、双层网布复合筛管、复合绕丝筛管、多层精密筛管和孔网复合筛管。笔者针对上述问题,使用自行研制开发的挡砂介质性能评价径向流驱替试验装置,对上述 5 种类型的筛管样品进行性能评价试验,为 X 气田水平井二次防砂优选合适的筛管类型;并对优选的筛管类型进行不同精度的防砂效果评价试验,优化挡砂精度。

1 试验原理与条件

1.1 试验装置与试验原理

本次试验使用挡砂介质性能评价径向流驱替试验装置,由主体装置、混砂器、滤砂器、空气压缩机、流量与压差传感器、数据采集系统及其他附件组成,如图 1 所示。



图 1 挡砂介质性能评价试验装置

Fig. 1 Experiment installation for screen test and evaluation

径向流驱替主体装置示意图如图 2 所示。将筛管短节放置于主体容器中,上下端面密封,流体携带地层砂从模拟套管射孔孔眼的入流口径向流入并冲击驱替筛管,流体携带的地层砂直接使用目标储层

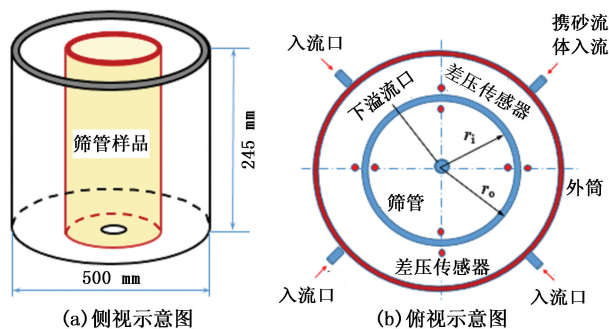


图 2 筛管测试主体装置示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of screen test apparatus

的地层砂,以稳定的含砂率长时间驱替,同时测量挡砂筛管短节管壁内外两侧的驱替流量和压差(通过如图 2 所示的对称 4 对差压传感器实现)以及过砂量和最大过砂粒径;驱替过程中筛管短节会阻挡地

层砂通过,起到挡砂作用;同时流体携带的地层砂会逐步堵塞筛管,阻力增大,压差和流量会发生变化。

通过测量筛管壁内外两侧压差,可计算筛管整体渗透性的变化:

$$k_{si}=\frac{q_i\mu}{2\pi h\Delta p_i}\ln\frac{r_o}{r_i}.$$
 (1)

式中, μ 为试验用流体的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; h 为试验筛管短节的有效渗滤长度, m ; r_o 为试验筛管短节外半径, m ; r_i 为试验筛管短节内半径, m ; q_i 为第 i 时刻通过筛管的流量, m^3/s ; Δp_i 为第 i 时刻筛管内外两侧压差,为 4 个差压传感器测量值的平均值, Pa ; k_{si} 为第 i 时刻筛管短节的渗透率, μm^2 。

1.2 试验方法与试验材料

对于同一气藏进行不同类型筛管性能对比评价试验,为了使试验结果有可对比性,试验时使用的流

体黏度、初始流量、含砂体积分数和地层砂应保持一致,各种筛管标称挡砂精度也必须相同。实时观察流量、压力随时间的变化,当流量、压力长时间(一般为 10 min)内几乎保持不变时,说明筛管的堵塞已经达到平衡状态,此时可结束试验。

本次试验在室温条件下实施,温度大约 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。装置出口压力为大气压(0.101 MPa),入口压力及压差取决于试验排量和筛管堵塞程度以及流动阻力。

X 气田不产水,试验驱替流体采用空气;储层岩性为粉细砂岩,粒度中值约为 0.08 mm ,根据地层砂筛析曲线粒度分布特征复配模拟地层砂,最大粒径 0.18 mm ,最小粒径为粉状,均匀系数 3.56;提供的筛管样品共 5 种,样品短节长度 245 mm ,有效渗滤长度 212 mm 。筛管样品信息见表 1。

表 1 试验筛管短节样品

Table 1 Samples of screen joint for test

编号	筛管名称	挡砂介质	标称精度/ μm
A	单层网布复合筛管	单层滤网与绕丝复合	80、100、120、150、180
B	双层网布复合筛管	双层滤网与绕丝复合	80、100、120、150、180
C	复合绕丝筛管	单梯形缝	80、100、120、150、180
D	多层精密筛管	多层复合滤网	80、100、120、150、180
E	孔网复合筛管	星孔状复合滤网	80、100、120、150、180

1.3 筛管性能及其评价对比方法

性能优良的防砂筛管除了具有良好的挡砂性能,而且在整个生产过程中需要不易被堵塞,保持良好的总体渗透性以保持气井产量。为了对比不同筛管的综合性能,提出使用挡砂性能和流通性能评价筛管的综合性能,相应的性能评价指标通过试验测试数据计算得到。

(1) 挡砂性能指标计算方法。筛管挡砂性能表征筛管阻挡地层砂的能力,使用试验过程中测量到的通过筛管的地层砂量表示。为了便于不同试验条件下的横向对比,首先提出“极限过砂率”的概念,即驱替试验使用的地层砂中粒径小于试验筛管标称精度的砂质量占总质量的百分比。在此基础上,提出无量纲筛管挡砂性能评价指标为

$$S_d=1-\frac{V_s}{V_lR}.$$
 (2)

式中, V_l 为试验中所使用地层砂的总质量, g ; V_s 为试验中通过筛管的地层砂总质量, g ; R 为极限过砂率; S_d 为筛管挡砂性能评价指标。

(2) 流通性能指标计算。筛管流通性能表征是整个生产过程中筛管允许流体通过的能力,使用综合渗透率 k_s 表征,使用筛管初始渗透率 k_{s0} 与试验全

过程平均渗透率 k_{sa} 按照系数 X_s (推荐取 0.25) 的加权平均计算得到:

$$k_s=k_{s0}X_s+k_{sa}(1-X_s).$$
 (3)

在进行多个筛管对比评价时,为了便于横向对比并与其他无量纲指标进行加权计算,须将单个筛管的综合渗透率转换为无量纲流通性能指标 S_l ,其计算公式为

$$S_{l(j)}=\frac{k_{s(j)}}{k_{s\max}}.$$
 (4)

式中, $k_{s(j)}$ 为第 j 个筛管的综合渗透率 μm^2 ; $k_{s\max}$ 为全部筛管的综合渗透率最大值, μm^2 ; $S_{l(j)}$ 为第 j 个筛管的流通性能评价指标。

(3) 综合性能指标计算方法。根据流通性能指标 S_l 、挡砂性能指标 S_d 和抗堵塞性能指标 S_k 的加权平均计算综合指标为

$$S=W_lS_l+W_dS_d.$$
 (5)

式中, W_l 为筛管流通性能评价权重系数,推荐取 0.5; W_d 为筛管挡砂性能评价权重系数,推荐取 0.5; S 为筛管防砂综合性能指标。

上述单项及综合评价指标皆位于 $0\sim1$,该指标越大表示性能越好。为了避免出现极高值和极低值

而干扰后续加权平均计算结果的准确性并便于加权平均计算,当计算出各单项指标后,对于多个筛管使用下式根据限定值 $\{Q_{\min}, Q_{\max}\}$ 进行匀整计算:

$$S'(i)=Y_{\min}+\frac{S(i)-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}}(Y_{\max}-Y_{\min}). \tag{6}$$

式中, $Y_{\max}$ 和 $Y_{\min}$ 分别为人工限定的单项性能指标的最大值和最小值,推荐分别取值 0.95 和 0.65; $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别为多个筛管中某单项性能指标的最大值和最小值; $S(i)$ 为原始计算得到的第*i*种筛管的单项性能指标; $S'(i)$ 为匀整后的第*i*种筛管的单项性能指标。

2 筛管评价与精度优化试验结果分析

2.1 试验挡砂与堵塞过程

根据南海西部 X 气田水平井单井产量和水平段长度和试验筛管短节长度,按照筛管外的气体流速等效原则,测算得到对应的试验驱替排量约为 11~12 m³/h。按照上述试验方法分别使用压缩空气携带 X 气田模拟地层砂驱替 0.10、0.12 和 0.15 mm 的 5 种筛管短节样品,合计 15 次试验。驱替过程即

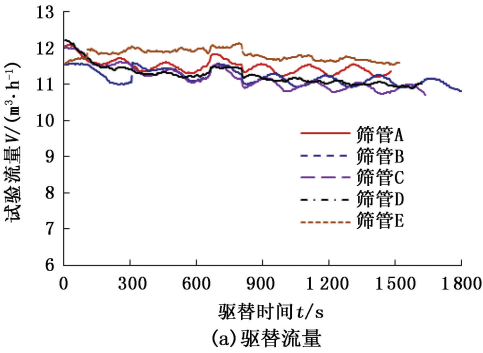


图 4 精度 0.1 mm 的 5 种试验筛管驱替流量和压差对比

Fig. 4 Tested flowing rate and pressure differential varying with time of five screens with precision of 0.1 mm

图 5 为根据试验测试数据计算得到的 5 种筛管渗透率随时间的变化关系,能够直观反映各筛管在试验过程中的堵塞情况,用于定量评价筛管总体流通性。在试验初期各筛管的初始渗透率不同,随着地层砂驱替开始,由于堵塞作用,筛管渗透率开始下降,直到趋于稳定。各种筛管渗透率下降的速度以及最终保持程度不同,体现其流通性能和抗堵塞性能差异。5 种筛管由于构造和介质类型不同,其被堵塞动态差异明显。编号 B 的双层网布复合筛管在驱替初期渗透率下降相对较平缓,并且最终保持较高的渗透率,说明其流通性和抗堵塞性较好;其余总体流通性从好到差排序依次为编号为 A、D、C、E 的单层网布复合筛管、多层精密筛管、复合绕丝筛管和孔网复合筛管。

为筛管挡砂和不断被堵塞的过程。图 3 为精度 0.1 mm 的孔网复合筛管和复合绕丝筛管试验完毕后的堵塞照片图像,大量的的地层砂被阻挡在筛管外部。精度 0.1 mm 的 5 种筛管驱替试验测量得到的驱替流量和压差随时间的变化对比如图 4 所示。试验开始加砂后在流量基本保持稳定的情况下,驱替压差逐步升高,表明筛管开始堵塞;到试验后期,驱替压差基本不再变化,表示堵塞达到平衡状态。

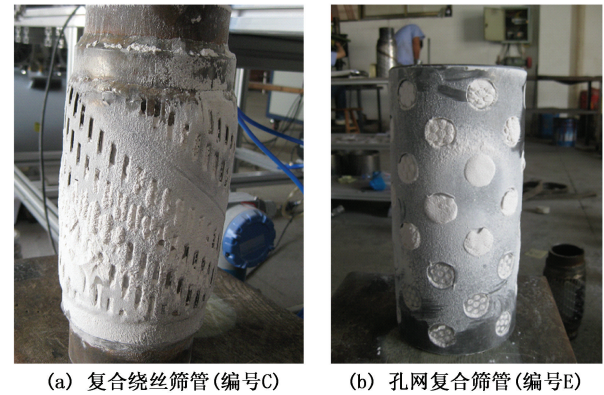


图 3 编号 C 和 E 的筛管试验后堵塞照片

Fig. 3 Photographs of plugged C and D screen after test

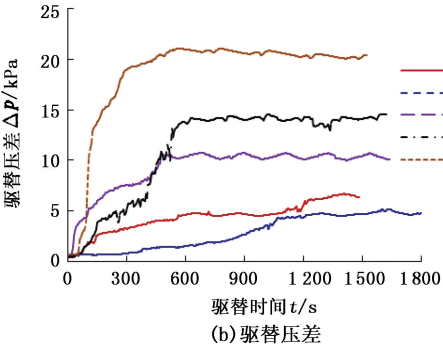


图 5 精度 0.1 mm 的 5 种筛管渗透率随时间变化对比

Fig. 5 Tested permeability varying with time of five screens with precision of 0.1 mm

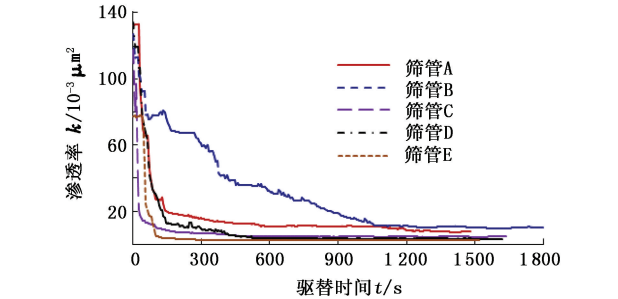


图 5 精度 0.1 mm 的 5 种筛管渗透率随时间变化对比

Fig. 5 Tested permeability varying with time of five screens with precision of 0.1 mm

2.2 不同筛管性能评价对比

图 6 为试验测量得到精度 0.1 mm 的 5 种筛管

的过砂率和最大过砂粒径对比结果。过砂率越低、最大过砂粒径越小表示筛管的挡砂性能越好。相同的标称精度下,编号 A、B、C、D、E 的 5 种筛管样品的过砂率分别为 0.73%、0.11%、0.44%、0.2% 和 0.4%;编号 B、D 的双层网布复合筛管和多层精密筛管由于为多层金属滤网复合结构,挡砂性能较好;5 种筛管的实际最大过砂粒径均小于标称精度,全部合格。

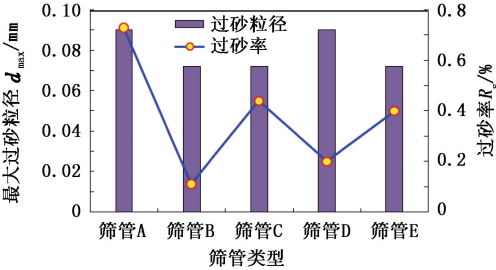


图 6 5 种试验筛管过砂率和最大过砂粒径对比
Fig. 6 Sand-passed ratio and maximum sand size of tested five screens

使用试验数据和上述方法计算得到 5 种筛管的流通性能、挡砂性能指标以及综合性能指标(3 种精度试验结果的平均值)对比如图 7 所示。

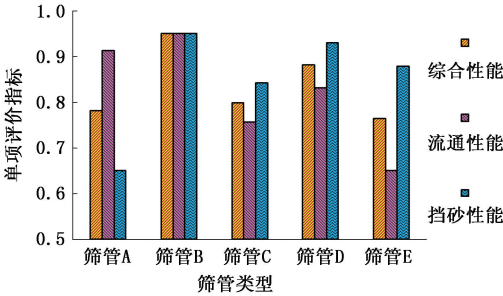
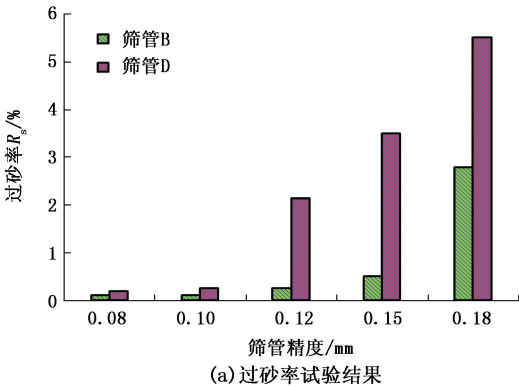


图 7 试验筛管单项及综合评价指标对比
Fig. 7 Individual performance index of tested screens



为了更直观地评价每种筛管的单项性能指标以及其均衡程度,将 5 种筛管的两种单项指标数据对比,如图 8 所示,图中数据点越靠近中心斜线以及右上角的筛管,表示单项性能指标越高并且均衡性越好。根据图 8 可知,编号为 B 和 D 的双层网布复合筛管和多层精密筛管的挡砂性能和流通性能相对均衡并均比较高,推荐作为 X 气田水平井二次防砂首选的机械防砂筛管类型。

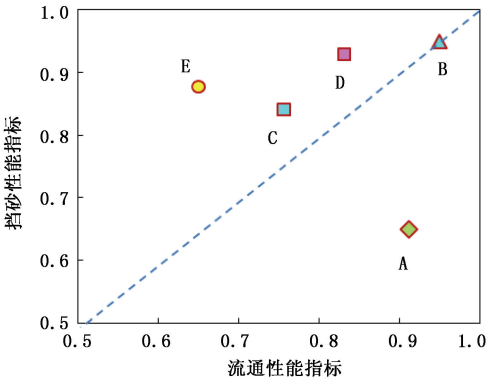


图 8 试验筛管单项性能指标均衡性对比
Fig. 8 Comparison of performance equilibrium of tested screens

2.3 筛管精度优化试验结果

X 气田地层砂粒度中值约为 0.08 mm,按照传统的挡砂精度设计方法(筛管精度选择为地层砂粒度中值)可选择精度 0.08 mm 左右,此种精度的筛管由于挡砂层孔喉结构致密,渗透性低,对气井产量影响较大。根据筛管性能评价优选试验推荐结果,对不同挡砂精度的双层网布复合筛管和多层精密筛管分别使用粒度中值 0.08 mm 的模拟地层砂进行气体挡砂驱替试验。试验测量两种筛管 5 种精度对地层砂的挡砂效果并计算评价指标,对比结果见图 9。

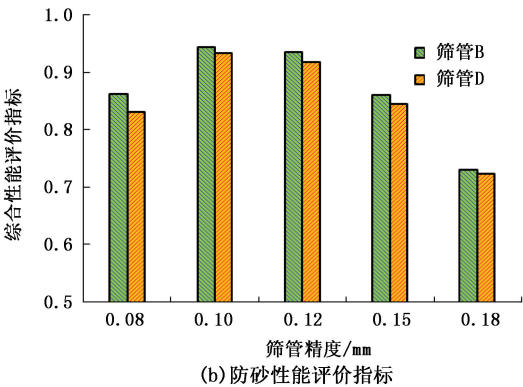


图 9 两种筛管不同精度下的过砂率试验结果和防砂性能评价指标

Fig. 9 Sand-passed ratio and comprehensive performance index of two screens with different precision

根据图 9 的试验结果,随着筛管挡砂精度的增

大,过砂量越来越大。筛管精度越小,挡砂效果越

好,但筛管渗透性也越低,对气井产能影响越大。对于双层网布复合筛管,当筛管精度超过 0.12 mm 后,过砂量开始明显增大;对于多层精密筛管,筛管精度超过 0.10 mm 后,过砂量急剧增加。低于 0.10 mm 和高于 0.12 mm 的筛管精度的挡砂综合指标都降低,反映挡砂和流通性对综合防砂效果的影响。对于 X 气田粒度中值为 0.08 mm 的地层砂,推荐双层网布复合筛管的挡砂精度为 0.10 ~ 0.12 mm,推荐多层精密筛管的挡砂精度为 0.10 mm。

3 结 论

(1)使用压缩空气驱替筛管样品测试流量、压差以及渗透率变化动态反映筛管防砂投产后的挡砂与堵塞特征,使用流通性能、挡砂性能和抗堵塞性评价筛管综合性能,并给出了计算方法。

(2)对于南海 X 气田不产水粉细砂岩气藏,双层网布复合筛管和多层精密筛管的流通性能和挡砂性能等综合指标较高,依次推荐为 X 气田二次防砂最佳筛管类型。

(3)对于南海 X 气田粒度中值为 0.08 mm 的地层砂,推荐双层网布复合筛管的挡砂精度为 0.1 ~ 0.12 mm,推荐多层精密筛管的挡砂精度为 0.1 mm。

参考文献:

- [1] 董长银. 油气井防砂理论与技术[M]. 东营:中国石油大学出版社,2011.
- [2] 董长银. 水平井防砂完井理论与技术[M]. 北京:中国石化出版社,2012.
- [3] UNDERDOWN D R, DICKERSON R C, VAUGHAN W. The nominal sand-control screen: a critical evaluation of screen performance [J]. SPE Drilling & Completion, 2001,16(4):252-260.
- [4] HODGE R M, BURTON R C, CONSTIEN V, et al. An evaluation method for screen-only and gravel-pack completions[R]. SPE 73722, 2002.
- [5] 陈宗毅,王伟章,陈阳,等. 防砂方法优选模拟试验装置[J]. 石油矿场机械,2006,34(6):8-10.
CHEN Zongyi, WANG Weizhang, CHEN Yang, et al. An experimental apparatus for selecting sand control methods[J]. Oil Field Equipment, 2006,34(6):8-10.

- [6] 唐玉宏,谭显忠,陈辉,等. 优质筛管模拟试验装置的研制与应用[J]. 石油矿场机械,2007,36(5):83-85.
TANG Yuhong, TAN Xianzhong, CHEN Hui, et al. Research & use of simulation test equipment for the mash screen[J]. Oil Field Equipment, 2007,36(5):83-85.
- [7] 朱春明,王希玲,邓金根,等. 防砂筛管性能评价实验方法的建立[J]. 新疆石油天然气,2011,7(4):69-72.
ZHU Chunming, WANG Xiling, DENG Jingen, et al. Establishment of the experimental evaluation methodology for property of sand control screen[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2011,7(4):69-72.
- [8] 王晓彬,唐庆,牛艳花,等. 水平井防砂筛管评价实验[J]. 石油钻采工艺,2011,33(5):49-52.
WANG Xiaobin, TANG Qing, NIU Yanhua, et al. Evaluation testing for sand control screen in horizontal wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33 (5):49-52.
- [9] 施进,李鹏,贾江鸿,等. 筛网式滤砂管挡砂效果室内试验[J]. 石油钻探技术,2013,41(3):104-108.
SHI Jin, LI Peng, JIA Jianghong, et al. Laboratory testing of sand control effect for mesh type screen[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(3):104-108.
- [10] LEE J, AHN T, LEE J Y, et al. Laboratory test to evaluate the performance of sand control screens during hydrate dissociation process by depressurization[C]//Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013.
- [11] 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. Discussion on state and development of testing methods for sand control screen[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42 (4):83-88.
- [12] 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实验[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.

(编辑 李志芬)