

文章编号:1673-5005(2010)02-0074-04

水平井及大斜度井砾石充填过程试验

董长银, 武 龙, 王爱萍, 刘春苗, 张 琪

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:根据水平井及大斜度井砾石充填机制与过程,考虑地层滤失、井筒倾斜、筛管偏置等特殊情况,建立水平井及大斜度井管内砾石循环充填试验模拟装置。利用该试验装置模拟水平井及大斜度井管内砾石循环充填全过程,分析 α 波及 β 波充填前沿特征,研究井筒倾角、筛管偏置度、流量、砂体积分数对充填动态及 α 波砂床平衡高度的影响规律及机制。试验结果表明: α 波充填前沿在低流量下规则稳定,在高流量下形状不规则; α 波充填结束前沉积砂床平衡高度会整体升高,导致 β 波充填空间较小;筛管偏置度与井筒倾角对充填动态有明显影响,井筒倾斜会降低砂床平衡高度,而筛管偏置则会加剧沉积砂床的形成并增大平衡高度;流量、砂体积分数是影响 α 波充填动态的直接因素。

关键词:水平井;大斜度井;砾石充填; α 波; β 波;砂床平衡高度;试验模拟

中图分类号:TE 257 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.015

Experimental simulation of gravel-packing in horizontal and highly deviated wells

DONG Chang-yin, WU Long, WANG Ai-ping, LIU Chun-miao, ZHANG Qi

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: According to the mechanism of gravel-packing in horizontal and highly deviated wells, an integral experimental system for inside-casing gravel-packing simulation was set up considering such complicated characteristics as carrier fluid loss off, wellbore deviating, screen bending. This experimental system can be used to simulate the whole α and β wave process of gravel-packing in horizontal and highly deviated wells. By a series of simulation experiments, α and β wave forehead characteristics were observed obviously. The influences of wellbore deviating, screen bending, flow rate, sand volume fraction on the packing performance and α wave sand bed height were analyzed. The experimental results indicate that α wave forehead is steady with low flow rate and not so regular with high flow rate. The space volume for β wave packing is very small ordinary. The wellbore deviating to the horizontal line tends to decrease α wave bed equilibrium height and screen bending accelerates the forming of α wave bed. Flow rate and sand volume fraction are the main two factors affecting the gravel-packing performance in horizontal and highly deviated wells directly.

Key words: horizontal well; highly deviated well; gravel-packing; α wave; β wave; sand bed equilibrium height; experimental simulation

砾石充填是疏松砂岩油气藏水平井及大斜度井的主要防砂完井方式之一,其充填过程是复杂条件下的固液两相流动过程,涉及井筒倾斜、冲筛环空结构、筛管偏置、地层滤失等诸多复杂条件,这些均会影响充填动态以及最终的充填效果^[1-3],并给整个施

工过程带来风险,限制了砾石充填这一理想的防砂完井工艺在水平井及大斜度井中的应用。水平井及大斜度井砾石充填过程包括 α 波充填和 β 波充填。充填过程中,井筒筛管环空存在沉积砂床,上部为固液两相流动,冲筛环空为携砂液单相流动。充填过

收稿日期:2010-01-22

基金项目:国家“863”计划项目(2006AA09Z351);国家自然科学基金项目(50704035)

作者简介:董长银(1976-),男(汉族),河南卫辉人,副教授,博士,从事采油工程、多相流、油气井防砂理论与技术研究。

程中的流体质量交换包括井筒环空中的携砂液向地层滤失以及携砂液通过筛管缝隙的窜流。近年来,对水平井及大斜度井砾石充填机制与试验研究较多^[4-7],但由于试验条件所限,以往研制的试验装置对水平井及大斜度井砾石充填的一些特殊情况考虑不足,如不能模拟筛管偏置、未考虑携砂液滤失等。另外,其试验目的主要针对某单一因素对充填动态的影响,对于水平井及大斜度井充填机制以及影响充填动态的各种因素研究尚不够系统全面。笔者在已有研究基础上^[8],分析水平井及大斜度井管内砾石循环充填机制,考虑地层滤失、井筒倾斜、筛管偏置等各种现场实际情况,研究建立一套全尺寸水平井及大斜度井砾石充填试验模拟装置,模拟水平井及大斜度井管内砾石循环充填全过程,分析 α 波及 β 波充填前沿特征,以及井筒倾角、筛管偏置度、流量、砂体积分对充填动态及 α 波砂床平衡高度的影响。

1 试验装置与试验方法

1.1 试验装置与流程

研制了全尺寸水平井及大斜度井砾石充填试验模拟系统,该系统主要由主体模拟井筒、泵后加砂装置、泵、储液罐、起升系统、控制面板及数据采集系统、流量计及压力传感器、管路与控制阀等组成,试验装置如图1所示。

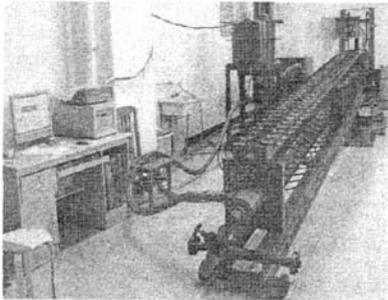


图1 试验模拟系统

Fig.1 Experimental simulation system

主体井筒模拟装置是该试验系统的核心,采用透明耐压材料制成,内径140 mm,外径200 mm,长5.5 m,耐压1.2 MPa;模拟井筒内安装不锈钢绕丝筛管,内径74 mm,外径95.2 mm,缝宽0.2 mm;筛管内安装外径45 mm的冲管。当筛管采用无中心管的筛管时,筛管会在重力作用下下沉造成偏置,可以模拟现场的筛管偏置情况。在主体井筒上设计两排滤孔,模拟射孔孔眼以及携砂液向地层的滤失,孔

密度16孔/m。滤失量通过微型阀门开度控制。模拟井筒及筛管、中心管的尺寸均与油田现场实际使用的尺寸相等或接近。

井筒起升系统用于调整井筒倾角($0^\circ \sim 30^\circ$)。试验系统采用泵后加砂设计,砂体积分率在 $0 \sim 15\%$ 内可调。在管路及主体井筒上安装流量计及压力传感器,试验数据采集到计算机系统。

1.2 试验材料与试验方法

试验用携砂液为清水或添加增黏剂形成的高黏携砂液,试验用固相充填材料为普通石英砂或陶粒砂。本次试验使用清水和普通石英砂(砾石),粒径为 $0.4 \sim 0.8$ mm,相对密度为2.632。

试验步骤如下:

- (1)用清水不加砂开泵循环至主体井筒清洁,并将井筒中气泡排出。
- (2)储液罐蓄满携砂液(清水),加砂装置的储砂罐装满石英砂。
- (3)打开控制箱电源,在控制箱上设置好加砂速度。
- (4)通过起升系统将模拟井筒调至水平,数据采集系统调零。
- (5)将模拟井筒调至试验要求的倾斜角度。
- (6)不加砂开泵循环,根据流量计指示调整流量控制阀至试验要求的流量。
- (7)启动数据采集软件,开始数据采集(流量、砂体积分率及压力)。
- (8)打开加砂主控阀,启动加砂开关,按照设定的加砂速度开始加砂。
- (9)观察记录井筒内充填情况,形成稳定的 α 砂床时,手动测量砂床平衡高度(需多次多点测量)。
- (10)待反向 β 波充填前沿即将到达井筒入口处时,关闭加砂阀与加砂开关,直到管路内无砂进入井筒,停泵。
- (11)更换至冲砂流程,冲出井筒内填砂,整理试验物品,一次试验结束。

2 试验结果分析

试验主要模拟无滤失条件下流量、砂体积分率、井筒倾角、筛管偏置对 α 波充填动态及砂床平衡高度的影响。

2.1 α 波与 β 波充填前沿特征

为了便于清晰观测 α 波与 β 波充填前沿特征,设定井筒倾角(θ) 0° ,砂体积分率(φ) 5% ,筛管偏置

度(δ)0 mm,关闭滤失,采用较低恒定流量 150 L/min 进行水平井段的充填试验。观察到如图 2,3 所示的充填前沿特征。

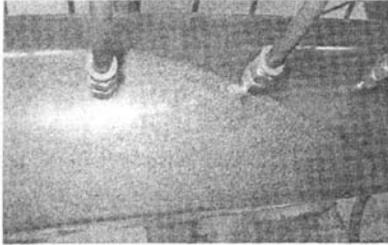


图 2 α 波充填前沿试验图像
Fig.2 Experimental image of α wave gravel-packing forefront

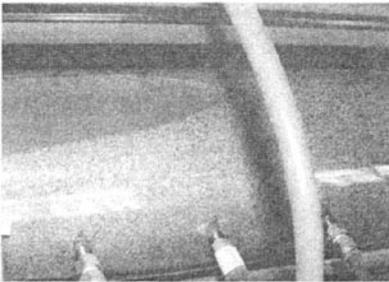


图 3 β 波充填前沿试验图像
Fig.3 Experimental image of β wave gravel-packing forefront

试验过程中能够形成稳定的 α 波与 β 波充填前沿。低流量条件下, α 波充填前沿非常稳定、规则(图 2),而在较高的流量下(大于 450 L/min),由于 α 波砂床前沿流动空间的突然改变导致的涡流,会使得 α 波充填前沿出现明显的不规则形状。 α 波前沿的坡度随着砂床平衡高度的增加而变陡。当 α 波充填前沿即将到达充填井段末端时, α 波充填形成沉积砂床平衡高度会出现整体逐步升高的现象(在此之前则保持稳定),无论低流量还是高流量,均能观测到这一现象,造成的结果是留给 β 波充填的空间较小,导致 β 波充填回返速度较快,但前沿都比较稳定(图 3)。

2.2 井筒倾角对 α 波砂床平衡高度的影响

设定砂体积分数 5%,关闭滤失,筛管偏置度 0 mm,测量平衡时的 α 波砂床高度,试验结果见图 4。

由图 4 可以看出,井筒倾角对于 α 波砂床平衡高度有明显的影响。井筒倾角越大,沉积砂床砾石颗粒在重力作用下沿流动方向(流动方向从高到底)滚动或滑动的趋势增加,不利于形成稳定

的砂床,因此形成的 α 波砂床平衡高度随着井筒倾角的增大而减小。不同井筒倾角下,砂床平衡高度随流量的变化趋势基本相同。在流量、砂体积分数一定的条件下,当井筒倾角达到某一临界值时,砂床平衡高度将达到 0,平衡砂床消失,即形成不稳定的 α 波与 β 波充填,而是类似于垂直井砾石充填的完全沉积充填方式。这一井筒倾角的临界值称为能够形成 α 波与 β 波充填的临界井筒倾角。

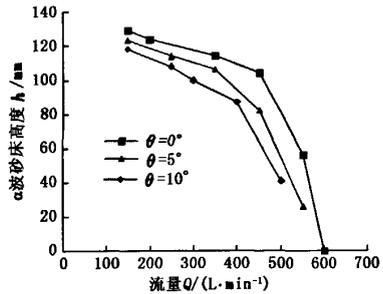


图 4 不同井筒倾角下 α 波砂床平衡高度随流量的变化

Fig.4 Variation of α sand bed height with flow rate in different wellbore angle

2.3 筛管偏置度对 α 波砂床平衡高度影响

对于水平井及大斜度井砾石充填,水平或接近水平放置的防砂筛管在重力作用下会不同程度的弯曲下垂,形成所谓的筛管偏置。为了研究筛管偏置对砾石充填动态的影响规律,在砂体积分数 5%、关闭滤失条件下进行了模拟充填试验,结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,无论在井筒水平还是倾斜条件下,筛管偏置对 α 波充填动态都有一定的影响。筛管向下偏置造成砂床平衡高度比无筛管偏置情况下略有升高。在井筒倾角为 0° 和 5° 条件下,偏置 20 mm 造成砂床平衡高度上升约 17%。筛管偏置尤其当筛管底部接触井筒底部井壁时,筛管偏置成为砾石颗粒流动的机械屏障,为砾石颗粒的沉积堵塞提供了条件,加剧了沉积砂床的形成。

图 6 为井筒倾角 5° 的充填试验过程中观测到的筛管偏置造成砾石颗粒提前沉积的现象。图 6 中点 A 为筛管偏置下垂最大点,由于其流动阻碍作用,在点 A 处首先造成砾石颗粒的沉积而形成砂床,A 点附近砂床的高度都逐渐降低。根据上述分析,在实际的水平井及大斜度井砾石充填作业中,防砂筛管的偏置都不利于充填过程的顺利完成,在防砂完井管柱设计中应尽量避免筛管的弯曲变形。

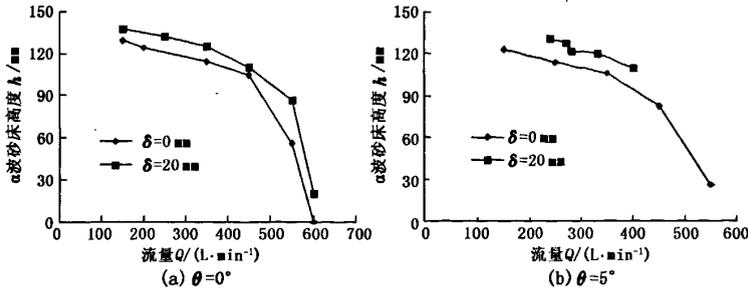


图 5 不同筛管偏置度与井筒倾角下的 α 波砂床平衡高度随流量的变化

Fig. 5 Variation of α sand bed height with flow rate in different screen bending degree and wellbore angle

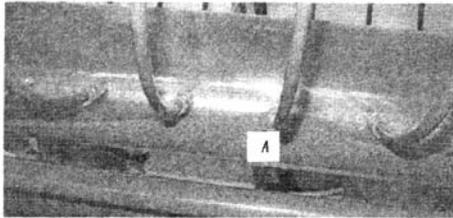


图 6 筛管偏置加剧砂床沉积试验照片

Fig. 6 Experimental image of screen bending accelerating sand bed forming

2.4 流量与砂体积分数对 α 波砂床平衡高度的影响

根据图 4,5 的试验结果,在各种条件下,流量都对 α 波砂床平衡高度有显著的影响。随着流量增大,砂床平衡高度逐渐降低。在低流量条件下,砂床平衡高度随流量的加减降低较缓,而在高流量条件下,这一变化趋势变得剧烈。在砂体积分数 5%、井筒水平、关闭滤失的条件下,当流量达到 600 L/min 时,砂床平衡高度趋近于 0,即不能形成稳定的 α 波充填。

在筛管偏置度 20 mm、流量 400 L/min、关闭滤失、井筒水平条件下,在 2% ~ 8% 范围内改变砂体积分数,测量砂床平衡高度的变化,结果如图 7 所示。

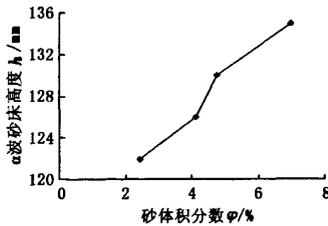


图 7 α 波砂床平衡高度随加砂体积分数的变化
Fig. 7 Variation of α sand bed height with sand volume fraction

增大砂体积分数会导致砂床平衡高度升高。在其他条件不变的情况下, α 波砂床平衡高度与砂体

积分数基本呈线性增长关系。在井身结构和井筒管柱固定的条件下,流量和砂体积分数对水平井及大斜度井砾石充填动态以致最终的充填效果有直接影响,这两个参数也是砾石充填施工时可以调节的参数。

3 结论

(1) α 波充填前沿在低流量下规则稳定,在高流量下会出现不规则现象。当 α 波充填前沿即到达充填井段末端时, α 波充填形成的沉积砂床平衡高度会出现整体逐步升高的现象,导致 β 波充填空间较小。

(2) 增大井筒倾角会降低 α 波砂床平衡高度。在给定流动条件下,存在能够形成稳定 α 波与 β 波充填的临界井筒倾角。筛管偏置会形成机械屏障,在下垂部位首先形成砂床沉积,造成砂床平衡高度比无筛管偏置情况下略有升高。筛管偏置不利于水平井及大斜度井砾石充填顺利完成。

(3) 流量和砂体积分数是影响 α 波砂床平衡高度的直接因素,随着流量的降低和砂体积分数的增加,砂床平衡高度均明显增加。

参考文献:

[1] 董长银,张琪. 水平井砾石充填过程实时数值模拟研究[J]. 石油学报, 2004, 25(6):96-100.
DONG Chang-yin, ZHANG Qi. Real-time numerical simulation of gravel-packing process in horizontal wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6):96-100.

[2] 董长银,张琪,张松亭. 水平井砾石充填过程中的变质量流[J]. 科学技术与工程, 2005, 5(2):69-72.
DONG Chang-yin, ZHANG Qi, ZHANG Song-ting. Variable mass flow during gravel-packing in horizontal wells [J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5(2): 69-72.

(2)地层中的矿物方解石、铁白云石和黏土颗粒,在含聚合物溶液的地层流体作用下运移到了防砂层,并在防砂层沉积造成堵塞。

(3)5%的AY-1和AY-2解堵剂对5.500 g/L的聚丙烯酰胺溶液的降黏率均可超过90%,对相对分子质量为1500万的聚丙烯酰胺凝胶降解效果好,明显优于过氧化氢对聚合物的降解效果。

参考文献:

- [1] 张岩,岳峰,汪正勇,等. 聚合物驱解堵增注技术与应用[J]. 海洋石油,2005,25(4):44-50.
ZHANG Yan, YUE Feng, WANG Zheng-yong, et al. Preparation and application of polymer broken down and water injectivity technology[J]. Offshore Oil, 2005,25(4):44-50.
- [2] 张绍东. 孤岛油田聚合物驱油技术应用研究[M]. 2版. 北京:中国石化出版社,2005:118.
- [3] 郭兰磊,李振泉,李树荣,等. 一次和二次聚合物驱驱替液与原油黏度比优化研究[J]. 石油学报,2008,29(5):738-741.
GUO Lan-lei, LI Zhen-quan, LI Shu-long, et al. Optimization of oil-to-polymer viscosity ratios in the primary and secondary polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(5):738-741.
- [4] 侯健,郭兰磊,元福卿,等. 胜利油田不同类型油藏聚合物驱生产动态的定量表征[J]. 石油学报,2008,29(4):577-581.
HOU Jian, GUO Lan-lei, YUAN Fu-qing, et al. Quantitative characterization of polymer flooding production performance in different reservoirs of Shengli Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(4):577-581.
- [5] 孙焕泉. 胜利油田三次采油技术的实践与认识[J]. 石油勘探与开发,2006,33(3):262-266.
- SUN Huan-quan. Practice and understanding on tertiary recovery in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006,33(3):262-266.
- [6] 李振泉. 胜利油田胜坨一区聚合物驱油的试验进展[J]. 石油炼制与化工,2006,33(3):262-266.
LI Zhen-quan. The progress on polymer flooding test in Shengtuo Oilfield[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2006,33(3):262-266.
- [7] HOUCHE L R, HUDSON L M. The prediction, evaluation treatment of formation damage caused by organic deposition[R]. SPE 14818,1986.
- [8] VAIDYS R N, FOGLE H S. Fines migration and formation damage:influence of pH and ion exchange[R]. SPE 19413,1992.
- [9] PHILLIP C. Harris and anupom sabhapondit, halliburtonl. Chemistry applied to fracture stimulation of petroleum wells[R]. SPE 120029,2009.
- [10] 王志刚,李爱芬,张红玲,等. 砾石充填防砂井砾石层堵塞机理实验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2000,24(5):49-51.
WANG Zhi-gang, LI Ai-fen, ZHANG Hong-ling, et al. Experimental study on pore-blocking mechanism in gravel packs of sand control well[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000,24(5):49-51.
- [11] 王建国,吴超. LS生物酶油水井解堵技术及应用[J]. 大庆石油学院学报,2009,33(5):82-85.
WANG Jian-Guo, WU Chao. Research and application on LS biological enzyme blocking removal technique[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009,33(5):82-85.

(编辑 刘为清)

(上接第77页)

- [3] 董长银,贾碧霞,张迎春,等. 大斜度井砾石充填机理[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(5):72-76.
DONG Chang-yin, JIA Bi-xia, ZHANG Ying-chun, et al. Mechanism of gravel-packing in highly deviated wells[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2008,32(5):72-76.
- [4] GRUESBECK C, SALATHIEL W M, ECHOLS E E. Design of gravel packs in deviated wellbores[J]. Journal of Petroleum Technology, 1979,31(1):109-115.
- [5] SHAYOCK S G. Gravel packing studies in a full-scale deviated wellbore[J]. JPT, 1983,35(2):603-609.
- [6] PENBERTHY W L. Gravel placement in horizontal wells[R]. SPE 31147,1995.
- [7] 胥锐一,魏斌,韩德民. 水平井砾石充填防砂模拟研究[J]. 油气采收率技术,1998,5(2):64-68.
XU Rui-yi, WEI Bin, HAN De-min. Simulation of gravel packing in horizontal well for sand control[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 1998,5(2):64-68.
- [8] 董长银,武龙,王爱萍,等. 基于平衡流速的水平井砾石充填 α 波砂床平衡高度预测与试验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(5):80-83.
DONG Chang-yin, WU Long, WANG Ai-ping, et al. Prediction and experiment for α wave bed height in horizontal well gravel-packing based on equilibrium velocity[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2009,33(5):80-83.

(编辑 李志芬)