文章编号: 1673-5005(2008)05-0072-05

大斜度井砾石充填机理

董长银[1], 贾碧霞[2], 张迎春[3], 武 龙[1], 邓 珊[1]

(1.中国石油大学 石油工程学院,山东 东营 257061; 2.青海石油公司 采油一厂,甘肃 敦煌 736202;
3.胜利油田 黄河钻井公司,山东 东营 257064)

摘要: 将大斜度井砾石充填过程分为 3个阶段,分析了各阶段的充填机理。考虑携砂液向地层的滤失以及井筒环空、冲筛环空之间的流体质量交换,分别建立了井筒环空、冲筛环空两个独立流动系统的砾石、携砂液的质量和动量守恒方程,以及各系统间的流动耦合方程,得到了描述大斜度井砾石充填过程的数学模型。算例分析表明:由于井筒滤失的存在,向井筒末端方向砂床高度逐步升高,其升高的速度随井筒滤失的增加而增加;在整个充填过程中,要保持充填顺利进行,井筒内流动压力是不断增加的,尤其在第 2个充填过程结束第 3个充填过程开始后,流动压力会有一个明显的增大以克服快速增加的流动阻力。

关键词: 大斜度井; 砾石充填; 数值模拟; 数学模型

中图分类号: TE 257.3; TE 358.1 文献标识码: A

Mechanism of gravel-packing in highly deviated wells

DONG Chang-yin[1], JIA Bi-xia[2], ZHANG Ying-chun[3], WU Long[1], DENG Shan[1]

(1.*College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying* 257061, *China*;
2.*1st Oil Production Plant, Qinghai Oilfield, Dunhuang* 736202, *China*;
3.*Huanghe Drilling Company, Shengli Oilfield, Dongying* 257064, *China*)

Abstract: The process including three stages and mechanism of gravel-packing in highly deviated wells were analyzed. During the gravel-packing process, the packing is always together with the filtration of carrier fluid into the formation and the exchanging flow through the screen slots. Considering these characteristics, the mass and momentum conservation equations of gravel and fluid were established for two flow systems, that is, solid-fluid two phase flow in wellbore annular and single phase flow in wash pipe and screen annular. With the coupling equations of the two flow systems, the time-dependent mathematical model for highly deviated well gravel-packing was evolved. The results show that the sand bed height increases in the wellbore end direction because the filtration exists, and the up speed increases with the wellbore filtration increasing. In the whole packing process, the flowing pressure increases step by step. In order to finish the packing, especially the second packing stage ending and the third packing stage beginning, the flowing pressure will obviously increase to overcome the increased flowing resistance.

Key words: highly deviated wells; gravel-packing; numerical simulation; mathematical model

大斜度井已成为油田尤其是海上油田开发的重要手段,砾石充填作为一种有效期长、效果好的理想防砂完井工艺,因其在大斜度井中的充填机理研究以及施工参数设计理论尚不成熟,导致在实际大斜度井中的应用受到了很大的限制。笔者在分析大斜度井砾石充填机理的基础上,建立描述填充过程的数学模型,并对模拟结果进行分析,为大斜度井砾石充填施工参数优化设计方法的研究提供理论基础。

1 大斜度井砾石充填机理及过程

大斜度井砾石充填可分为砂浆进入井筒, α充填, β充填 3个阶段[1-6]。

收稿日期: 2008-07-04

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、油气井防砂与多相流研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1) 砂浆进入井筒阶段。该阶段是指从泵入砂浆开始至砂浆到达套管鞋之前。在该阶段, 砂浆在油管中流动, 其流动截面积较小, 流速较高。随着砂浆前沿向井下推移, 井筒液体中高密度固相增加, 造成井筒内的静水压力和摩阻损失均增加, 但前者占主要地位。因此在排量稳定的情况下, 地面泵压稳定下降。

(2) α充填阶段。该阶段为砂浆进入大斜度井充填段并正向充填到井眼末端的过程。砂浆通过转换工具进入充填段筛管与套管 (套管完井)或裸眼井壁 (裸眼完井)的环形空间后, 流通面积加大, 流速降低, 并且逐步向近水平流动状态转换。由于砾石的密度通常大于携砂液的密度, 流体难以携带全部砂粒, 砾石颗粒开始沉积, 达到平衡状态后形成沉积砂床。随着砂浆继续泵入, 沉积砂床的前沿逐步向前移动, 如图 1所示。

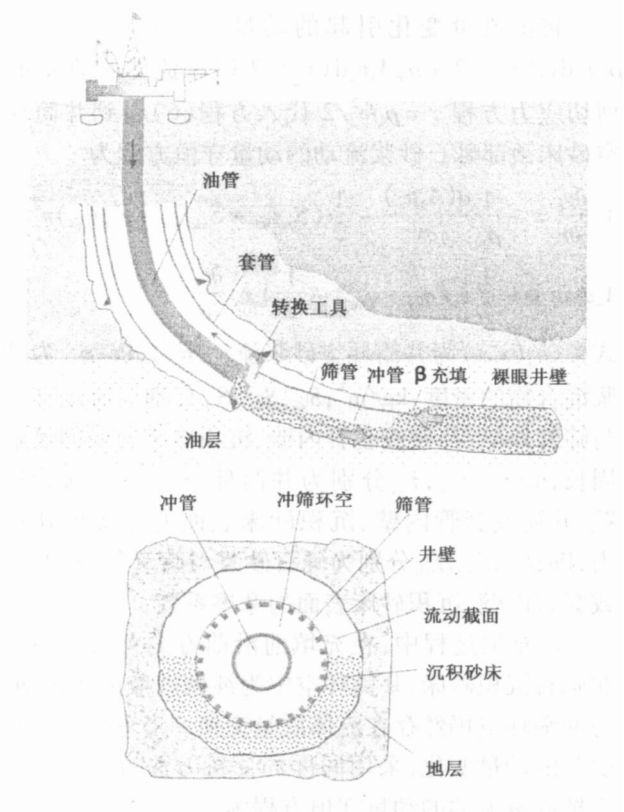

图 1 大斜度井砾石充填过程及剖面

Fig 1 Process and section of gravel-packing in highly deviated well

在α充填阶段, 由于井筒内压力高于地层压力, 沿流动方向存在携砂液向地层的滤失, 造成向井筒末端方向上, 携砂液的流量与流速逐步降低, 因此其携砂能力也逐步降低, 砾石沉积趋势加剧, 沉积砂床高度逐步增加, 形成平衡斜堤。如果在α充填前沿还未到达井筒末端时, 平衡砂床高度已经达到套管或裸眼井壁顶部高度, 则发生提前砂堵, 堵塞点后面的井段将得不到充填, 形成亏空, 充填失败。α充填过程中, 由于砾石沉积, 流通面积减小, 流动阻力增大, 排量稳定情况下地面泵压平稳上升。

(3) β充填阶段。当 α充填前沿到达井筒末端或当沉积床顶部接触到套管或井筒上壁时, 砂浆中固体颗粒无法再向前运移, 此时 α充填阶段结束; 如果继续泵入砂浆, 携砂液通过沉积砂床流入冲管上返到地面, 而砾石颗粒开始在 α沉积砂床顶部的环形空间内沉积, 并从井段末端开始进行反向充填, 直至充填井段的开始位置。这一过程称为 β充填阶段 (图 1)。

在 β充填阶段, 由于携砂液要克服环空、沉积砂床和冲管的流动阻力, 泵压有一次明显的上升, 然后平稳增加。

裸眼井砾石充填情况下的流动截面见图 1。

根据上述过程分析, 大斜度井砾石充填过程中, 存在砂浆通过油管的流动、井筒环空中的固液两相流动、冲管与筛管之间的携砂液单相流动、携砂液在冲管中的单相流动、携砂液在油套环空中的单相流动 5个流动系统[1-6]。这 5个流动系统并非独立流动系统, 而是存在流体质量交换[2]: 一是井筒环空固液两相流的携砂液向地层的滤失; 二是由于筛管阻挡砾石但允许流体通过造成的井筒环空与冲筛环空的携砂液质量交换。若忽略携砂液通过筛管缝隙的阻力, 则该质量交换量及交换方向受两个流动系统中摩阻压降梯度相等原则的控制。

由于沉积平衡砂床的形成与运移, 以及存在各流动系统之间的流体质量交换, 大斜度井砾石充填过程实质为复杂条件下的固液两相流动, 只有建立该条件下的流体流动模型以及砂床运移模型, 才可能使用计算机手段对该过程进行可视化模拟。

2 充填过程数学模型的建立

基本假设: (1)忽略地层对流体的温度影响, 整个系统为等温流动; (2)定井筒倾角, 曲率为 0, 筛管及冲管同心居中放置; (3)砾石颗粒沉积充填后达到密实充填, 极限体积浓度为 52%; (4)砾石及携砂液流体不可压缩。

2.1 数学模型

如图 2所示, 将井段沿垂直轴向的方向切割, 形成长度为 dx的柱状和环柱状微控制单元。

砂床上部环空砂浆流动的质量守恒方程[5]为

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\frac{\partial A_s(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial[A_s(x,t)v_s(x,t)]}{\partial x} - [q_{sw}(x,t) - q_{cs}(x,t)]. \quad (1)$$

以控制单元中的沉积砂床部分为研究对象, 得到井筒环空中砂床质量守恒方程为

$$\frac{\partial A_b(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial[A_b(x,t)v_b(x,t)]}{\partial x} + \frac{q_g(x,t)}{C_b}. \quad (2)$$

在冲筛环空中取一环柱状微控制单元, 可得到冲筛环空中纯携砂液的质量守恒方程为

$$A_c \partial v_c(x,t)/\partial x = -q_{cs}(x,t). \quad (3)$$

式中, t为时间, s; x为以大斜度井充填段起点为零点的轴向坐标, m; $A_s(x,t)$, $A_b(x,t)$, A_c分别为井筒环空砂浆、沉积砂床和冲筛环空流通截面积, m^2; $v_s(x,t)$, $v_b(x,t)$, $v_c(x,t)$分别为 t时刻 x位置井筒环空砂浆流动、沉积砂床移动、冲筛环空纯携砂液流动的速度, m/s; $q_{cs}(x,t)$为井筒环空与冲筛环空携砂液单位长度交换流量, $m^3/(s\cdot m)$; $q_{sw}(x,t)$为通过单位长度井筒内壁的滤失流量, $m^3/(s\cdot m)$; $q_g(x,t)$为单位长度上砂浆中砾石颗粒沉降的体积速度, $m^3/(s\cdot m)$; C_b为沉积砂床中的砾石体积浓度, $C_b = 0.52$。

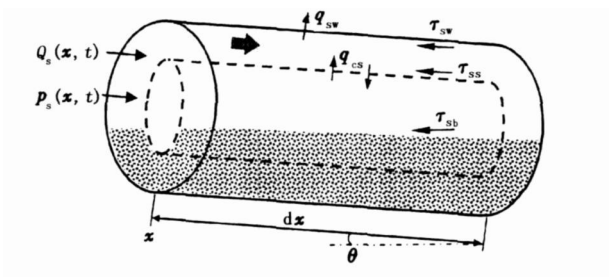

图 2　井筒环空流动单元

Fig 2　Wellbore annular flow unit

冲筛环空与井筒环空存在流体质量交换, 其流动压力损失除摩阻损失外, 还有流体质量交换引起的压力损失。流体受表面力和质量力的作用, 表面力包括微元段上、下端面压力, 冲管外壁和筛管内壁摩擦剪切阻力。微元段流体的动量守恒方程为

$$A_c p_c(x,t) - A_c p_c(x+\mathrm{d}x,t) = \rho_f A_c \mathrm{d}x \frac{\partial v_c}{\partial t} + \pi D_c \tau_{cc} \mathrm{d}x + \pi D_{si} \tau_{cs} \mathrm{d}x + A_c \rho_f g \sin\theta \mathrm{d}x + \mathrm{d}(mv). \quad (4)$$

将由流量变化引起的动量变化项 $\mathrm{d}(mv) = \rho_f A_c v_c \mathrm{d}(v_c)$以及流体与管壁的剪切应力方程 $\tau = \rho_f f v^2/2$代入方程(4), 得到的冲筛环空中携砂液动量守恒方程为

$$\frac{\partial v_c}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial p_c}{\partial x} - \frac{\pi}{2A_c}(D_c f_{cc} + D_{si} f_{cs}) v_c^2 - g\sin\theta + A_c v_c q_{cs}, \quad (5)$$

式中, $p_c(x,t)$为冲筛环空携砂液流动压力, Pa; D_c和 D_{si}分别为冲管外径和筛管内径, m; ρ_f为携砂液密度, kg/m^3; θ为水平井筒的倾角, rad; τ_{cc}和 τ_{cs}分别为携砂液与冲管外壁、筛管内壁的摩擦剪切应力, Pa; f_{cc}和 f_{cs}分别为携砂液与冲管外壁、筛管内壁的摩擦系数, 前者与普通粗糙管壁摩擦系数计算相同, 后者可按照带孔眼管壁的摩擦系数计算。

井筒环空砂床上方流体受表面力和质量力的作用, 表面力包括微元段上、下端面压力, 筛管外壁、井筒或套管内壁和沉积砂床表面的摩擦剪切阻力。动量守恒方程为

$$A_s(x,t)p_s(x,t) - A_s(x+\mathrm{d}x,t)p_s(x+\mathrm{d}x,t) = \rho_m A_s(x,t)\mathrm{d}x\frac{\partial v_s(x,t)}{\partial t} + S_{ss}\tau_{ss}\mathrm{d}x + S_{sw}\tau_{sw}\mathrm{d}x + S_{sb}\tau_{sb}\mathrm{d}x + A_s(x,t)\rho_m g\sin\theta\mathrm{d}x + \mathrm{d}(mv). \quad (6)$$

将由流量变化引起的动量变化项 $\mathrm{d}(mv) = \rho_m v_s \mathrm{d}(A_s v_s)/2 + \rho_m A_s v_s \mathrm{d}(v_s)/2$以及流体与管壁的剪切应力方程 $\tau = \rho_f f v^2/2$代入方程(6)得到井筒环空砂床顶部砾石砂浆流动的动量守恒方程为

$$A_s\frac{\partial v_s}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_m}\frac{\partial(A_s p_s)}{\partial x} - \frac{1}{2}(S_{ss}f_{ms} + S_{sw}f_{mw} + S_{sb}f_{mb})v_s^2 - A_s g\sin\theta - \frac{1}{2}v_s(q_{cs} - q_{sw}) - \frac{1}{2}A_s v_s\frac{\partial v_s}{\partial x}.$$

式中, $p_s(x,t)$为井筒环空砂浆流动压力, Pa; ρ_m为砂浆混合物的密度, kg/m^3; S_{ss}, S_{sw}, S_{sb}分别为流动砂浆与筛管外壁、井筒或套管内壁、沉积砂床表面的接触周长, m; τ_{ss}, τ_{sw}, τ_{sb}分别为井筒环空砂浆与筛管外壁、井筒或套管内壁、沉积砂床表面的摩擦剪切应力, Pa; f_{ms}, f_{mw}, f_{mb}分别为砾石砂浆与筛管外壁、井筒或套管内壁、沉积砂床表面的摩擦系数。

α充填过程中, 在充填前沿前方的井段中不存在砾石沉积砂床, 井筒环空中为纯携砂液单相流动, 与冲筛环空仍然存在流体质量交换。考虑质量变化引起的动量变化, 采用同样的分析方法得到筛套环空携砂液流动的动量守恒方程为

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial p_s}{\partial x} - \frac{\pi D_{so}\tau_{ss}}{\rho_f A_s} - \frac{\pi D_w \tau_{sw}}{\rho_f A_s} - g\sin\theta - v_s\frac{\partial v_s}{\partial x}.$$

式中, D_w为井筒或套管内径, m; D_{so}为筛管外径, m。

2.2　辅助方程

2.2.1　冲筛环空与井筒的流动耦合

忽略流体通过筛管缝隙的流动阻力, 冲筛环空、井筒环空之间的流体质量交换受两个系统的压力和压力梯度相等原则的控制, 即通过窜流达到两个流

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

动系统压力平衡。冲筛环空单相流动与井筒环空固液两相流动两个系统间的耦合方程[1,5]为

$$\frac{\partial p_c(x,t)}{\partial x}=\frac{\partial p_s(x,t)}{\partial x}.$$

2.2.2 地层与井筒环空流动的耦合

井筒内携砂液向地层的滤失主要受携砂液的粘度、油藏岩石和流体的压缩性影响[7]。考虑沉积砂床对滤失流体的渗流阻力, 用 R_f 表示有沉积砂床存在时的滤失速度与无沉积砂床时的滤失速度之比, 则单位长度上的携砂液滤失强度[6]可表示为

$$q_{sw}=\frac{C}{\sqrt{t}}[(\pi D_w-S_{bb})+S_{bb}R_f].$$

式中, C为综合滤失系数, m·s$^{-1/2}$; S_{bb}为沉积砂床与井筒的接触周长, m。

根据质量守恒方程, 井筒环空沉积砂床上部空间中任意时刻任意位置的砾石浓度为

$$C_s(x,t)=\frac{Q_{mi}C_{si}}{v_s(x,t)A_s(x,t)}.$$

式中, $C_s(x,t)$为井筒环空砂床顶部砂浆体积浓度, m^3/m^3; C_{si}为地面砂浆砾石体积浓度, m^3/m^3; Q_{mi}为地面砂浆排量, m^3/s。

筛套环空与冲筛环空之间的窜流量 q_{cs}可表示为

$$q_{cs}=-A_c\frac{\partial v_s}{\partial x}.$$

砂床上部流通面积 A_s以及接触周长 S_{ss}, S_{sw}, S_{sb}, S_{bb}与砂床高度 H_b之间存在定量的几何关系。平衡砂床高度与砂浆流量、携砂比、砂液物性、管径等参数有关, 计算方法见文献[7]~[9]。

3 模拟结果分析

算例基础数据: 油藏压力 29 MPa, 水平段长 350 m, 井眼直径 244 mm; 井筒与水平方向夹角 8°; 裸眼完井, 假设井壁粗糙度量级等同于充填砾石粒径; 筛管外径 89 mm, 内径 63.5 mm, 携砂液粘度 5 mPa·s, 携砂比 10%, 携砂液密度 1 g/cm^3; 砾石密度 2.632 g/cm^3; 砾石尺寸 0.4~0.8 mm, 冲筛比 0.8。

理想的大斜度井砾石充填过程不但要求达到 100%的充填率, 而且充填过程要安全稳定。前者用充填率评价, 后者用砂床高度指标评价。总评价指标为上述两个指标的加权平均, 评价指标越大, 表示充填效果越好。模拟充填评价指标随充填排量的变化如图 3所示。本算例条件下, 最低的泵注排量应该在 600 L/min左右才能得到最终较好的充填效果。

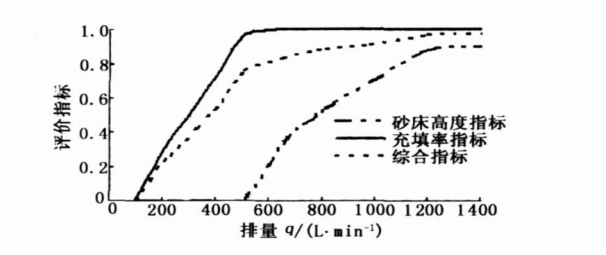

图 3 充填指标随排量的变化

Fig 3 Packing indexes varying with discharge

假设泵注排量 600 L/min, 经模拟 α充填结束用时大约 110 min, 砂床完全充填完毕需 230 min。α砂床高度比例(砂床高度与井眼直径的比值)沿井筒长度变化如图 4所示。由于井筒滤失的存在, 向井筒末端方向砂床高度逐步升高, 其升高的速度随井筒滤失的增加而增加。

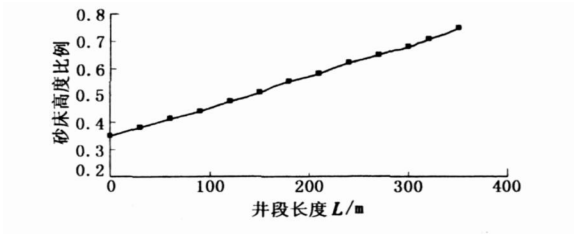

图 4 α充填砂床高度沿井筒长度的变化

Fig 4 Sand bed height of α packing varying with wellbore length

充填过程中的井筒入口压力变化如图 5所示。

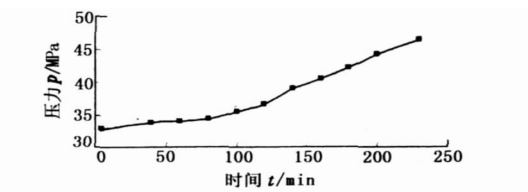

图 5 充填过程中的入口压力变化

Fig 5 Inflow pressure during packing process

随充填过程的继续, 井筒中的沉积砂床体积增加, 可供携砂液流体流动的空间减小, 流动阻力增加, 所需要的流动压力增大。图中的转折处为 α充填过程结束的时刻。开始 β充填过程后, 携砂液进入冲管的通道被完全堵塞, 流动压力会有一个明显的增大以克服快速增加的流动阻力。

4 结论与建议

(1)使用数学模拟手段研究大斜度井砾石充填过程及机理是可行的。

(2)由于井筒滤失的存在, 向井筒末端方向砂床高度逐步升高, 其升高的速度随井筒滤失的增加

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而增加。在整个充填过程中,要保持充填顺利进行,井筒内流动压力是不断增加的,尤其在 α 充填过程结束 β 充填过程开始后,流动压力会有一个明显的增大以克服快速增加的流动阻力。

(3)本文中所建数学模型还未考虑流体通过筛管缝隙的压力损失以及砂床顶部空间的固相浓度分布,这些因素会对计算结果产生影响,需要进一步加以考虑。数学模型只反映了充填过程的基本规律,其模拟结果的精度还有待进一步验证。

参考文献:

[1] MAGALHÃES J V M, CALDERON A. Gravel packing horizontal wells in reservoir oil flow equalization projects [R]. SPE 107612, 2007.

[2] MARTINS A L, MAGALHÃES J V M, CALDERON A, et al. A mechanistic model for horizontal gravel pack displacement[R]. SPE 82247, 2005.

[3] SANDERS M W. MS-gravel pack designs of highly-deviated well with an alternative flow-path concept[R]. SPE 73743, 2002.

[4] SUN I L N. Imaging gravel pack quality: application to deviated and horizontal wells[R]. SPE 78342, 2002.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 董长银,张琪. 水平固液两相管流平衡砂床高度计算的概率模型[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(3): 46-48.
DONG Chang-yin, ZHANG Qi. A new probability model for predication of equilibrium sand-bed height for liquid-solid two-phase flow in horizontal pipe[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 46-48.

[8] DORON P. A three-layer model for solid-liquid flow in horizontal pipes[J]. Int J Multiphase Flow, 1993, 19(6): 1029-1043.

[9] DORON P, SIMKHIS M. Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes[J]. Int J Multiphase Flow, 1997, 23(2): 108-113.

(编辑 李志芬)

(上接第 71页)

[2] van BUREN Mark, van den BROEK Léon. Trial of an expandable sand screen to replace internal gravel packing [R]. SPE 57565, 1999.

[3] PITTONI Enzo, DEVIA Fabrizio, JAMES Simon G, et al. Screenless completions: cost-effective sand control in the adriatic sea[R]. SPE 58787, 2000.

[4] KRISMARTOPO B D, NOTMAN L, KRITZLER T, et al. A fracture treatment design optimization process to increase production and control proppant flowback for low-temperature, low-pressure reservoirs[R]. SPE 93168, 2005.

[5] 董长银,张琪,曲占庆,等. 筛套环空砾石层压降的简化计算模型[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(2): 28-30.
DONG Chang-yin, ZHANG Qi, QU Zhan-qing, et al. A simplified method for predicting pressure drop across gravel pack[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2001, 25(2): 28-30.

[6] 董长银,张琪. 水平固液两相管流平衡砂床高度计算的概率模型[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(3): 46-48.
DONG Chang-yin, ZHANG Qi. A new probability model for predication of equilibrium sand-bed height for liquid-solid two-phase flow in horizontal pipe[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 46-48.

[7] ZHOU Fu-jian, ZONG Yi-ping, LIU Yu-zhang, et al. Application and study of fine-silty sand control technique using fiber-complex high-pressure pack in Sebei gas reservoir[R]. SPE 97832, 2006.

[8] 齐宁,张琪,周福建,等. 纤维复合防砂技术的机理研究及应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 98-101.
QI Ning, ZHANG Qi, ZHOU Fu-jian, et al. Mechanism and application of fiber-resin coated sand control technique[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2007, 31(2): 98-101.

[9] 杨佑发,许绍乾,钟正华. 纤维混凝土中应力传递机制的三维弹性理论分析[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(4): 425-434.
YANG You-fa, XU Shao-qian, ZHONG Zheng-hua, et al. Studies on stress transference mechanism of steel fibre reinforced concrete[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2001, 22(4): 425-434.

[10] 王兴业,肖加余,唐羽章,等. 复合材料力学分析与设计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999. 121-124.

(编辑 李志芬)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net