

水平井砾石充填可视化模拟及 充填效果评价

白易¹ 董长银¹ 任闯燕^{1,2}

(中国石油大学(华东)石油工程学院¹,青岛 266555;中国石化胜利油田分公司技术发展处²,东营 257000)

摘要 水平井砾石充填过程是复杂条件下的固液两相变质量流动,存在携砂液向地层的滤失以及井筒环空、冲筛环空间的流体质量交换。根据井筒、冲筛环空两个独立流动系统的砂、液质量和动量守恒方程,以及各系统间的流动耦合方程,建立了描述 α 充填过程的时间相关数学模型。补充辅助方程后可数值求解,并提出了充填效果综合评价指标的计算方法。利用数值模型开发软件可对整个充填过程进行可视化模拟。结果表明,模型和软件对顺利充填和提前堵塞两种情况均可适用,并能预测是否堵塞、堵塞位置、充填率以及计算充填效果综合评价指标。分析了充填过程中的各动态参数的变化规律,在充填前沿位置,由于沉积砂床消失,系统间窜流最为明显,各动态参数在充填前沿前后均有剧烈变化。

关键词 水平井 砾石充填 数值模拟 数学模型 可视化 效果评价

中图分类号 TE355.9; 文献标志码 B

水平井砾石充填一般分为 α (井筒底部“平衡堤”的正向充填过程)和 β (沉积砂床顶部的反向充填)前后两个充填阶段。 α 阶段的顺利充填是水平井砾石充填成功的关键。 α 阶段充填过程中存在井筒环空固液两相流和冲筛环空携砂液单相流两个流动系统,两者之间通过筛管缝隙存在流体质量交换,并且井筒环空携砂液向地层滤失,如图1所示。整个系统通过流体质量交换达到耦合平衡状态。

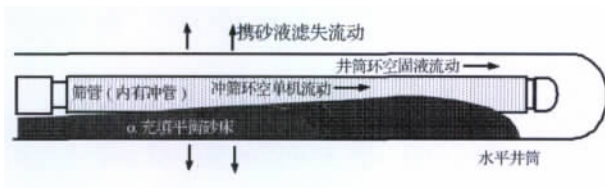


图1 水平井砾石充填过程示意图

携砂液向地层的滤失使沿井筒方向携砂液流量不断降低,携砂能力下降,导致沉积砂床高度不断升高。如果在 α 充填前沿还未到达水平井段末

端时,平衡砂床高度已经接触井壁顶部,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。影响水平井砾石充填效果的因素主要有砂浆排量、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段长度等,由于涉及复杂的固液两相流动且影响因素较多,目前尚缺乏有效的水平井砾石充填施工参数优化设计方法。笔者将建立描述水平井砾石充填过程的时间相关数学模型,对充填过程进行可视化模拟,并对充填效果进行评价,为施工参数的组合优化提供基础和手段。

1 数学模型

基本假设:(1)各流动系统中的流动为一维等温流动;(2)井筒水平,筛管及冲管同心放置;(3)砾石颗粒以正四面体排列,沉积充填后极限体积浓度为52%;(4)砾石及携砂液流体不可压缩。

将井筒环空固液两相流动、冲筛环空单相流动视为两个独立的流动系统,考虑流体质量交换,分别建立两个系统的固、液的质量和动量守恒方程,以及各系统间的耦合方程,得到充填沉积井段的水平井砾石充填数学模型:

2012年3月7日收到

国家自然科学基金项目

(50274055)、(50704035)资助

第一作者简介:白易(1980—),男,汉族,E-mail: rmy0808@sina.com。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial A_s}{\partial t} &= -\frac{\partial(A_s V_s)}{\partial x} - (q_{sw} - q_{cs}) \\ \frac{\partial A_b}{\partial t} &= -\frac{\partial(A_b V_b)}{\partial x} + \frac{q_g}{C_b} \\ A_c \frac{\partial V_c}{\partial x} &= -q_{cs} \\ \frac{\partial V_c}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P_c}{\partial x} - \frac{\pi}{2A_c} (D_c f_{cc} + D_{si} f_{cs}) \times \\ &\quad V_c^2 - g \sin \theta + A_c V_c q_{cs} \\ A_s \frac{\partial V_s}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_m} \frac{\partial(A_s P_s)}{\partial x} - \frac{1}{2} (S_{ss} f_{ms} + S_{sw} f_{mw} + S_{sb} f_{mb}) V_s^2 - \\ &\quad A_s g \sin \theta - \frac{1}{2} V_s (q_{cs} - q_{sw}) - \frac{1}{2} A_s V_s \frac{\partial V_s}{\partial x} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式(1)中 x —以水平井段开始位置为零点的轴向坐标, m ; t —时间, s ; A_s 、 A_b 、 A_c —井筒环空砂浆流动、沉积砂床和冲筛环空流通截面积, m^2 ; V_s 、 V_b 、 V_c —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流速, m/s ; C_b —沉积砂床中的砾石体积浓度, m^3/m^3 ; q_{cs} —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} —通过单位长度井筒内壁的滤失流体流量, $m^3/(s \cdot m)$; q_g —单位长度上砂浆中砾石颗粒沉降的体积速度, $m^3/(s \cdot m)$; P_c 、 P_s —冲筛环空携砂液流动、井筒环空砂浆流动压力, Pa ; ρ_l 、 ρ_m —分别为携砂液、砂浆混合物的密度, kg/m^3 ; D_c 、 D_{si} —冲管外径和筛管和内径, m ; f_{cc} 、 f_{cs} —冲筛环空中携砂液与冲管外壁、筛管内壁的摩擦系数; 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 ; f_{ms} 、 f_{mw} 、 f_{mb} —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; θ —水平井筒的倾角, 弧度。

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为^[1, 2]:

$$\frac{\partial P_c}{\partial x} = \frac{\partial P_s}{\partial x} \quad (2)$$

井筒内携砂液向地层的滤失主要受携砂液的黏度、油藏岩石和流体的压缩性两种机理控制^[3], 滤失方程即井筒环空固液两相流动与地层的耦合方程为:

$$q_{sw} = \frac{C(P_s)}{\sqrt{t}} [(\pi D_w - S_{bb}) + S_{bb} R_f] \quad (3)$$

有如下式(4)面积关系:

$$A_s + A_b = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_{so}^2) \quad (4)$$

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 之间的几何关系可简单表示为:

$$\begin{aligned} A_s &= A_s(H_b), \quad S_{ss} = S_{ss}(H_b), \\ S_{sw} &= S_{sw}(H_b), \quad S_{sb} = S_{sb}(H_b), \quad S_{bb} = S_{bb}(H_b). \end{aligned} \quad (5)$$

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。利用概率模型, 可由这些参数计算平衡砂床高度。计算平衡砂床高度的概率模型可参考文献^[4, 5]。砂床高度可简单表示为:

$$H_b = f(A_s, V_s, C, D_{so}, D_{ci}, \dots) \quad (6)$$

式(6)中, C —综合滤失系数, 是井筒压力的函数; D_w —井筒或套管内径, m ; D_{so} —筛管外径, m ; R_f —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, 无量纲; S_{bb} —沉积砂床与井筒或套管内壁的接触周长, m ; H_b —(最终)砂床高度, m 。

方程式(1)一式(6)组成水平井砾石充填砂床沉积井段的数学模型。共有十四方程, 十四个未知数: $A_s(x, t)$ 、 $A_b(x, t)$ 、 $V_s(x, t)$ 、 $V_c(x, t)$ 、 $P_s(x, t)$ 、 $P_c(x, t)$ 、 $C_s(x, t)$ 、 $q_{sw}(x, t)$ 、 $q_{cs}(x, t)$ 、 $q_g(x, t)$ 、 $S_{sw}(x, t)$ 、 $S_{ss}(x, t)$ 、 $S_{bb}(x, t)$ 和 $H_b(x, t)$, 数学模型封闭可解。

用 $L_b(t)$ 表示 t 时刻的砂床充填前沿位置, 当 $x < L_b(t)$ 时, 需使用砂床沉积井段的数学模型描述充填过程。在沉积前沿前方井段, 即 $x > L_b(t)$ 时, 由于没有沉积砂床和固相砾石颗粒存在, 井筒环空与冲筛环空中均为携砂液单相流动, 流动系统之间流体质量交换特征与沉积井段类似。沉积前沿前方井段流动的数学模型相对比较简单, 限于篇幅, 在此不再赘述。

2 充填效果评价

对于水平井砾石充填实际施工前的设计参数而言, 最优的施工参数组合要求不但能够达到

100% 完全充填, 而且还要能够保持 α 充填过程的稳定和安全。因此组合施工参数及其充填效果的评价既要反映充填率又要能够反映充填过程的稳定性和安全性。 α 充填过程是否安全稳定可用最终砂床平衡高度指标来评价。最终充填前沿砂床高度越高, 则提前堵塞的危险性越大; 相反, 如果过低, 则说明 α 充填过程中可能难以形成稳定的平衡砂床。最终砂床高度太高或太低都意味着较差的充填效果。因此可认为当 α 充填过程的平衡砂床高度等于井筒半径时的充填最稳定, 效果最好。根据上述分析, 得到如下无因次的最终砂床高度评价指标:

$$\Psi_{Hb} = 1 - \frac{|R_w - H_b|}{R_w} \quad (7)$$

指标 Ψ_{Hb} 越大, 表示充填过程越安全稳定。充填率本身为一无量纲量, 可直接作为充填率评价指标。综合评价指标可以通过分别取不同的权重系数加权平均得到:

$$V = \alpha_{Hb} \Psi_{Hb} + \alpha_p \Psi_p; \alpha_{Hb} + \alpha_p = 1 \quad (8)$$

式(8)中, R_w —井筒或套管内半径, mm; Ψ_p —充填率评价指标; Ψ_{Hb} —最终砂床高度评价指标, 无量纲; α_{Hb} 、 α_p —砂床高度、充填率评价指标的权重系数, 可分别取 0.25 和 0.75; V —水平井砾石充填效果综合评价指标, 无量纲。

综合评价指标越高, 施工参数组合即能达到 100% 充填, 而且充填过程越安全稳定, 充填效果越好。通过数值模拟手段以及上述综合评价指标可以采用正交数值试验法对水平井砾石充填施工参数进行组合优化设计^[6]。

3 可视化模拟结果分析

根据上述数学模型, 开发了水平井砾石充填可视化模拟软件 HoriPack Simulator。利用软件进行了模拟算例分析, 基础数据如表 1。使用不同的排量, 分别模拟得到了完全充填和提前堵塞两种结果。

3.1 完全充填的情况

3.1.1 可视化模拟结果

当砂浆排量为 650 L/min 时, 在水平井筒末端, α 充填平衡砂床的最终高度尚未接触井筒上壁, 得以完全充填。充填过程的可视化模拟如图 2 所示,

α 充填过程中出现的沿井筒不断升高的“平衡斜堤”。最终砂床高 172 mm, α 充填时间 116.06 min, 全部充填时间 155.04 min。无因次砂床高度评价指标 0.38, 充填率评价指标 1.0, 综合评价指标 0.845。充填效果良好, 但充填过程的安全与稳定性尚未达到最佳。

表 1 算例基础数据

水平段/口袋长度	350 m/50 m	砾石尺寸	(0.4~0.8) mm
井筒内径	200 mm	砾石密度	2 632 kg/m ³
筛管尺寸	89/63.5 mm	地面砂比	10%
油藏压力	29 MPa	砂浆排量	650/40(L·min ⁻¹)
携砂液密度	1 000 kg/m ³	冲蚀比	0.8
携砂液粘度	5 mPa·s	滤失速度	1.0 L/(min·m ⁻¹)

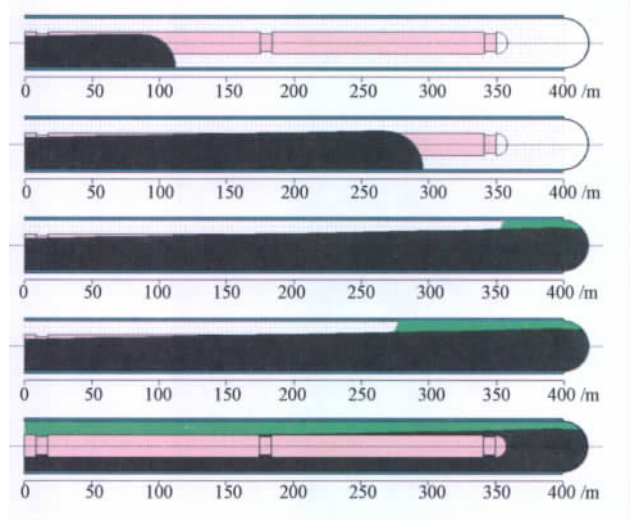


图 2 充填过程可视化模拟结果
(顺利充填、排量 650 L/min)

3.1.2 最大充填井段长度

假设水平井段足够长, 在某充填参数组合下, 由于 α 充填平衡砂床高度不断升高, 总会存在某位置处砂床高度接触井筒上壁而提前堵塞。这个堵塞位置即为该充填参数能够充填的最大井段长度。

根据图 2 的结果, α 充填过程中的平衡砂床高度变化的斜率基本不变。将砂床高度倾斜线向前延伸直到与井筒上壁相交, 相交的位置可近似为该充填参数的理论最大充填长度, 如图 3 所示。最大充填长度可以作为不同施工参数组合的充填能力的评价指标。对于水平井砾石充填参数设计, 首先就是要保证能够顺利充填的最大井段长度大于实

际水平井的水平段长。

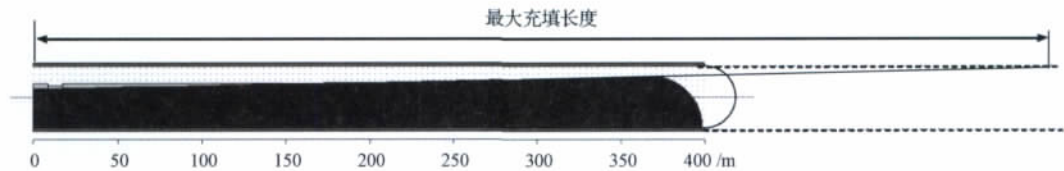


图3 最大充填长度示意图

3.1.3 充填动态分析

图4为 α 充填过程中冲筛环空流量以及冲筛、井筒环空之间的窜流量随 x 位置和时间变化的变化。图4(a)中曲线突变位置为 α 充填前沿位置。由于井筒环空中砂床高度逐渐升高使流通面积减小而导致更多的携砂液到冲筛环空中流动,冲筛环空流量增大;在充填前沿前方井段,沉积砂床消失,井筒环

空流通面积突然变大,原来在冲筛环空中流动的携砂液大部分通过筛管窜流到井筒环空中,冲筛环空流量突然降低。两个流动系统之间的流体质量交换在充填前沿位置非常明显,其它位置则相对稳定;其它动态参数如井筒环空流量、砾石颗粒浓度、压力梯度等都有与图4(a)相反或相似的变化特征。

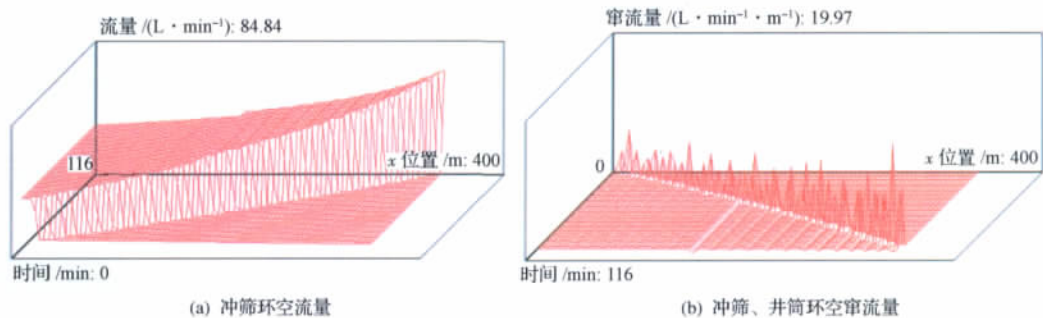


图4 α 充填过程动态特征

3.2 提前堵塞的情况

利用同样的数据,将入口砂浆排量降低到400 L/min时,在充填过程中平衡砂床前沿在约230 m处接触井筒上壁,发生提前堵塞。充填过程可视化模拟结果如图5所示。

最终砂床高度200 mm, α 充填时间122 min,砂床高度指标为0,充填率指标0.5667,综合评价指标0.425。从充填指标上也可以看出充填是失败的。在发生提前堵塞的情况下,砂床高度并不是缓缓接触井筒上壁,而是在将要接近井筒上壁时以较快速度升高,发生堵塞,如图5所示。砂床高度的这一变化特征出现的时机与具体的管柱结构、充填参数以及地层滤失特性有关。

4 结论

水平井砾石充填实质是复杂条件下的固液两

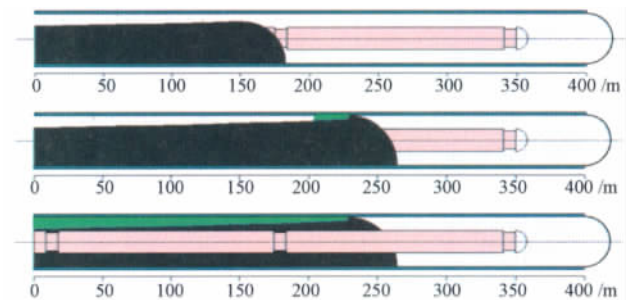


图5 堵塞情况下的可视化模拟结果
(排量400 L/min)

相变质量流动过程,涉及井筒环空、冲筛环空两个流动系统,并以携砂液滤失和窜流的形式进行流体质量交换。笔者根据两个独立流动系统的砂、液质量和动量守恒方程及其耦合方程,建立了描述 α 充填过程的时间相关数学模型并开发了可视化模拟软件。

结果表明,模型和软件可以可视化模拟顺利充填和提前堵塞两种情况,并能预测是否堵塞、堵塞位置、充填率以及计算充填效果综合评价指标。在充填前沿位置,由于沉积砂床消失,系统间窜流最为明显,各动态参数在充填前沿前后均有剧烈变化。使用本文的可视化模拟以及充填效果评价指标的计算方法,可以正交数值试验法对水平井砾石充填施工参数进行组合优化设计。

参 考 文 献

1 Gruesbeck C, Salathiel W M, Echols E E. Design of gravel packs in

deviated wellbores. *J Pet Tech*, 1979; 31(1): 109—115

2 Penberthy W L. Gravel placement in horizontal wells. SPE 31147, 1995: 741—751

3 张 琪. 采油工程原理与设计. 东营: 石油大学出版社, 2000: 260—263

4 董长银 张 琪 王海勇, 等. 管壁流体滤失条件下水平圆管中平衡砂床运移模拟. *科学技术与工程*, 2003; 3(5): 408—411

5 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. *石油大学学报(自然科学版)* 2004; 28(3): 46—48

6 董长银 张 琪 曲占庆. 水平井砾石充填参数优化设计的正交数值试验法. *石油钻采工艺* 2004; 26(2): 42—44

Visual Simulation of Horizontal Gravel-packing and Its Effect Evaluation

BAI Yi¹, DONG Chang-yin¹, REN Min-yan^{1,2}

(College of Petroleum Engineering¹, Qingdao 26655, P. R. China;

China University of Petroleum²(Eastern Chian), Dongying 266555, P. R. China)

[Abstract] The process of gravel-packing in horizontal wells is really a solid-liquid two-phase flow in complicated conditions, which concerns the filtration flow of carrier fluid into the formation and the exchange flow through the screen slots between two flow system. That is, solid-fluid two phase flow in wellbore annular and single phase flow in wash pipe and screen annular. According to the mass and momentum conservation equations of gravel and fluid, with the coupling equations, the time-dependent numerical model for α step in horizontal gravel-packing is evolved. And the calculation method for the evaluation index of packing effect is put forward. The model and software can be used to simulate the entire packing process visually for full packing and premature plugging, predict plugging point and packing efficiency, and calculation evaluation index. The change characters of dynamic parameters during the packing process are also analyzed. At the packing forehead, because of the sudden disappear of sand bed, the exchange flow rate is relatively very evident and other flow parameters also change obviously across the packing forehead.

[Key words] horizontal well gravel-pack numerical simulation mathematical model visually effect evaluation