

# 管壁流体滤失条件下水平圆管中平衡砂床运移模拟

董长银 张琪 王海勇<sup>1</sup> 曲占庆

(石油大学(华东)石油工程学院,东营 257061;E-mail:dongy@mail.hdpu.edu.cn;中石油吐哈油田分公司吐鲁番采油厂,吐鲁番 838202)

**摘要** 根据水流紊动理论和颗粒运动特征,将床层表面水流速度视为正态分布,得到床面颗粒的各运动状态概率。根据颗粒状态概率代表运动趋势的原理,建立了圆管中砂床平衡高度的计算模型,可以用于存在管壁流体正滤失、负滤失和无滤失条件下圆管砾石充填过程中砂床形成和运移过程的可视化模拟。

**关键词** 变质量流 固液两相流 平衡砂床 砾石充填 运移模拟 可视化

**中图分类号** O359.2; **文献标识码** A

优化施工参数以避免提前堵塞一直是水平井砾石充填研究的重点。水平井砾石充填防砂施工过程中由于存在携砂液向地层的滤失,随着充填前沿的推进,平衡砂床高度不断升高,当还未达到水平井段末端而砂床高度已经接触井筒或套管上壁时,充填因提前堵塞而失败。充填过程可视化模拟是检验是否会提前堵塞的有效手段之一。作为水平井砾石充填过程模拟的基础研究,将根据水流紊动特征,应用随机理论,建立水平圆管流动下砂床平衡高度计算模型,对存在携砂液滤失条件下的圆管中砂床运移过程进行可视化模拟。

## 1 颗粒运动的状态概率

### 1.1 颗粒状态基本转移事件及概率

固液两相水平管流中,固体颗粒的运动可分为静止、推移和悬浮三种状态<sup>[1]</sup>,分别用1、2、3表示。由于水流紊动作用,床层表面每个颗粒都可能从原来的状态转化为另外两种状态之一,形成图1所示的转移链,其中P代表转移概率,第一下标表示转移前的状态,第二下标表示转移后的状态。

将颗粒的状态转换视为随机事件。当静止颗粒周围水平流速大于起动临界流速时,颗粒由静止转换为推移,起动事件 $B_1$ 发生;当推移颗粒周围水平流速小于止动临界流速时,颗粒由推移变为静止,止动事件 $B_2$ 发生;当推移颗粒周围水流纵向流速大于沉降速度时,颗粒被悬浮,松动颗粒的悬浮事件 $B_3$ 发生;定义 $B_4$ 为起悬事件,即原来静止的颗粒转为悬浮,它是起动事件

与悬浮事件的组合。根据上述定义,有:

$$B_1 = [u_x > U_{c1}] \quad (1)$$

$$B_2 = [u_x \leq U_{c2}] \quad (2)$$

$$B_3 = [u_y > \omega] \quad (3)$$

$$B_4 = B_1 \cap B_3 = [u_x > U_{c1}] \cap [u_y > \omega] \quad (4)$$

式中 $u_x$ 、 $u_y$ 分别为水流底部瞬时水平和纵向速度,m/s; $U_{c1}$ 、 $U_{c2}$ 分别为砾石颗粒起动和止动临界瞬时流速<sup>[2]</sup>,m/s; $\omega$ 为砾石颗粒在动水中的沉降速度,m/s。

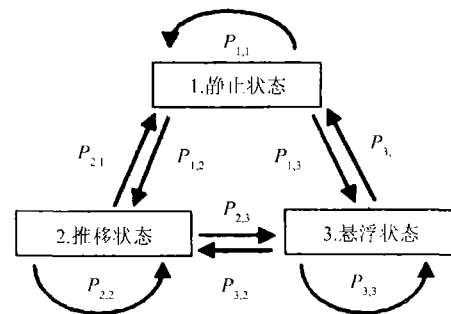


图1 砾石颗粒运动状态转移链

将瞬时流速 $u_x$ 、 $u_y$ 视为随机变量,根据床层表面水流紊动特征, $u_x$ 、 $u_y$ 分别服从 $X \sim N(\bar{u}_x, \sigma_x^2)$ 和 $X \sim N(0, \sigma_y^2)$ 的正态分布<sup>[2]</sup>,则上述四种事件的发生概率分别为

$$P[B_1] = 1 - P[u_x \leq U_{c1}] = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{-\infty}^{U_{c1}} e^{-\frac{(t-u_x)^2}{2\sigma_x^2}} dt \quad (5)$$

$$P[B_2] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \int_{-\infty}^{u_*} e^{-\frac{(t-\bar{u}_x)^2}{2\sigma_x^2}} dt \quad (6)$$

$$P[B_3] = 1 - P[u_v \leq \omega] = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \int_{-\infty}^{\omega} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_y^2}} dt \quad (7)$$

$$P[B_4] = P[B_1] \times P[B_3] \quad (8)$$

式中  $\bar{u}_x$  为床面水流时均水平流速, m/s;  $\sigma_x$  为水流横向脉动速度均方差, 可取<sup>[2]</sup>  $\sigma_x = 2u_*$ ;  $\sigma_y$  为水流纵向脉动速度均方差, 可取<sup>[3]</sup>  $\sigma_y = u_*$ ;  $u_*$  为摩阻流速, m/s

### 1.2 颗粒运动状态概率计算

根据上述四种基本运动概率, 可组合计算得到图 1 转移链中的九种转移概率, 如表 1 所示。

表 1 九种状态转移事件概率

转移事件	解释	概率计算公式
静止→静止	不起动且不起悬	$P_{11} = (1 - P[B_1])(1 - P[B_4])$
静止→推移	能起动但不起悬	$P_{12} = P[B_1](1 - P[B_4])$
静止→悬浮	只满足起悬条件	$P_{13} = P[B_4]$
推移→静止	不悬浮且止动	$P_{21} = P[B_2](1 - P[B_3])$
推移→推移	不止动且不悬浮	$P_{22} = (1 - P[B_2])(1 - P[B_3])$
推移→悬浮	只要达到悬浮条件即可	$P_{23} = P[B_3]$
悬浮→静止	不悬浮且止动	$P_{31} = P[B_2](1 - P[B_3])$
悬浮→推移	不悬浮且不止动	$P_{32} = (1 - P[B_2])(1 - P[B_3])$
悬浮→悬浮	只要满足悬浮条件即可	$P_{33} = P[B_3]$

由表 1 中的状态转移概率可得到床层表面颗粒运动状态转移概率矩阵, 根据马尔科夫定理, 床层表面颗粒运动状态转换的极限概率即状态概率存在。用  $P_i$  表示状态  $i$  的存在概率, 由柯尔莫哥洛夫方程得到<sup>[2]</sup>

$$P_j = \sum_{i=1}^3 P_i P_{ij} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^3 P_i = 1$$

求解方程(9)得到静止、推移、悬移三种状态概率  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$ 。

## 2 砂床平衡高度计算模型

### 2.1 平均流速 $\bar{u}_x$ 及摩阻流速 $u_*$ 的计算

床层表面水流平均流速及垂线平均流速与摩阻流

速的关系为<sup>[3]</sup>

$$\bar{u}_x = 5.5439 u_* \quad (10)$$

$$\frac{\bar{u}_m}{u_*} = 2.5 \ln\left(1 + \frac{20h}{\delta}\right) - 1.5 \quad (11)$$

根据 Newit 利用粗砂和砾石与水的混合物在水平管中的试验结果, 水面高度  $h$  用下式计算<sup>[4]</sup>

$$h = \frac{1}{2}(D - h_b) + 15.2(C_s u_* )^{1.81} \quad (12)$$

式中  $\bar{u}_m$ —垂线平均流速, m/s;  $h$ —水面高度, m;  $h_b$ —砂床高度, m;  $C_s$ —混合物中固相体积分数;  $\delta$ —床面粗糙度。

### 2.2 砂床高度 $h_b$ 的计算

当存在沉积砂床的固液两相管流达到平衡状态, 即砂床高度不再发生变化时, 整个流动分为悬浮层、推移层和静止层, 此时对于推移层的颗粒而言, 其转换为悬浮状态和转移为静止状态的概率相等, 以此为判据, 可以计算平衡砂床的高度。根据上述概率模型, 编制了计算程序计算得到颗粒状态概率随摩阻流速的关系, 如图 2 所示。对于给定的粒径, 悬浮状态概率曲线与静止状态概率曲线的交点处对应的摩阻流速和砂床高度即为平衡状态下的平衡流速和平衡高度。砂床平衡高度计算程序框图如图 3 所示。

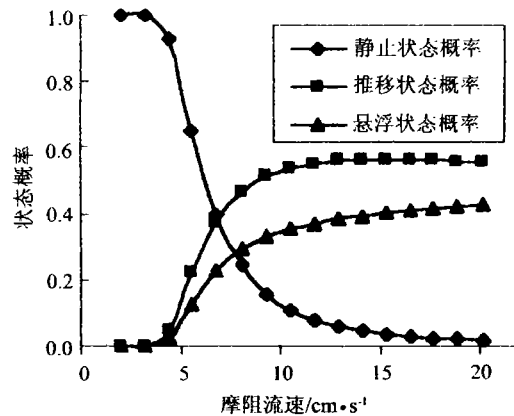


图 2 颗粒状态概率随摩阻流速变化关系

图 4 为管径 177.8 mm, 不存在管壁滤失、砾石颗粒浓度 10% 时计算得到的不同粒径条件下, 砂床平衡高度随砂浆排量的变化关系结果。随着砂浆排量的增加或砾石直径的减小, 管子中的平衡砂床高度不断减小。图 4 中各种粒径情况下砂床高度随排量变化曲线在管

子中心点位置处均出现明显的拐点,是因为圆管中砂浆顶部流动面积随砂床平衡高度的变化速率在管子中心位置处会发生变化所致。由于管子圆形截面的原因,当砂床高度低于管子中心位置时,上部流通面积的变化随着砂床高度增加越来越快,当砂床高度超过中心点位置后,流动面积增长的速度越来越慢。

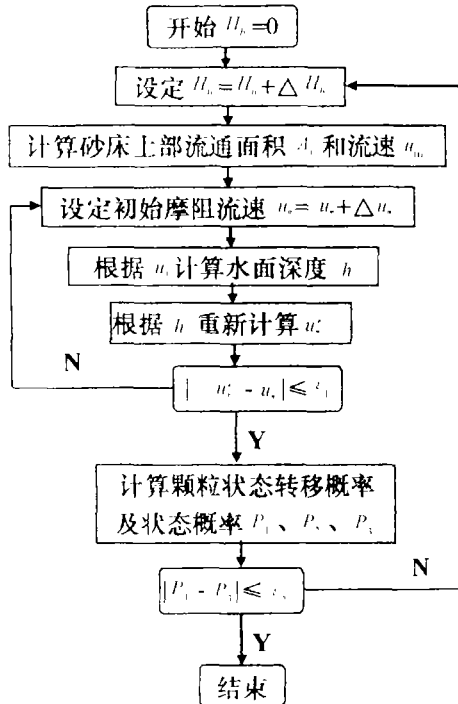


图3 砂床平衡高度计算程序

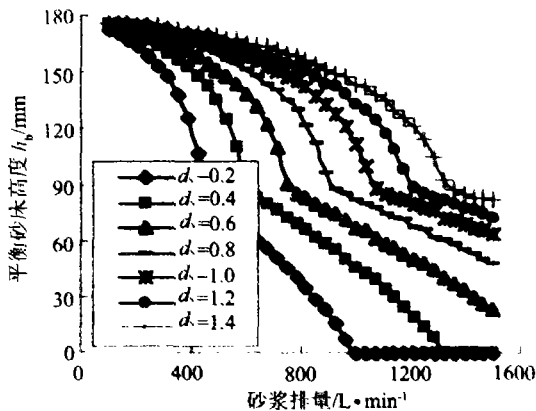


图4 不同砾径平衡砂床高度随排量变化

### 3 存在管壁滤失条件下砂床运移模拟

假设携砂液流体沿管壁向外滤失,无砂床时单位管长的滤失速度为常数  $q$ 。当圆管中有沉积砂床时,由于沉积砂床的渗流阻力,携砂液滤失速度比无砂床时要小一些,可简单地表示为

$$q' = q \left( 1 - \frac{S_b}{S} \right) + qR \frac{S_b}{S} \tag{13}$$

位置  $i$  处的砂浆流量为

$$Q_i = Q_{i-1} - q' \Delta l_i \tag{14}$$

式中  $Q_i$ —位置  $i$  处的砂浆流量,  $m^3/s$ ;  $q, q'$ —分别为不存在砂床和存在砂床时单位管长的滤失速度,  $m^3/m \cdot s$ ;  $S, S_b$ —分别为圆管周长和沉积砂床沿管壁周长,根据砂床高度  $h_b$  计算,  $m$ ;  $R$ —砂床沉积部分管壁滤失速度与无砂床部分滤失速度之比;  $\Delta l_i$ —第  $i$  个  $\Delta t$  时间砂床运移距离,  $m$ 。

忽略砂床上部悬浮质中的砾石体积浓度,根据固相质量守恒,假设在足够小的  $\Delta t$  时间内砂床推进的距离  $\Delta l$  内的砂床高度为常数,则  $\Delta t$  时间内平衡高度为  $h_b$  的砂床的推进距离为

$$\Delta l = \frac{Q_s C_s \Delta t}{A_b} \tag{15}$$

式中  $A_b$ —砂床截面积,  $m^2$ ,由管径和砂床高度  $h_b$  确定;  $\Delta t$ —时间间隔,  $s$ ;  $\Delta l$ — $\Delta t$  计算内砂床推进距离,  $m$ ;  $Q_s$ —管子入口砂浆流量,  $m^3/s$ ;  $L$ —管长,  $m$ ;  $L_b$ —砂床充填长度,  $m$ 。

根据上述模拟程序,编制计算程序对圆管中不同滤失条件下砾石充填过程进行了可视化模拟,结果如图5所示。模拟条件:清水、平均砾石直径  $0.6 \text{ mm}$ 、密度  $2632 \text{ kg}/m^3$ 、砾石体积浓度  $10\%$ 、管径  $D = 177.8 \text{ mm}$ 、管长  $L = 200 \text{ m}$ 。

正滤失条件下,若初始流量较小,而滤失速度又比较大的话,则可能当充填前沿还未达到管段末端时,砂床高度接近上管壁,形成堵塞。当管壁存在负滤失时,若初始流量较大,而负滤失速度又比较大的话,则可能当充填前沿还未达到管段末端时,由于砂浆流量越来越大,砂床高度不断减小而渐趋于  $0$ ,此时砂床消失。

图5的模拟结果中,无论正滤失还是负滤失的情况,当砂床高度越过圆管中心点位置时,其随充填位置的变化速度会有明显改变,这与图4中砂床高度曲线出现拐点的原因相同。

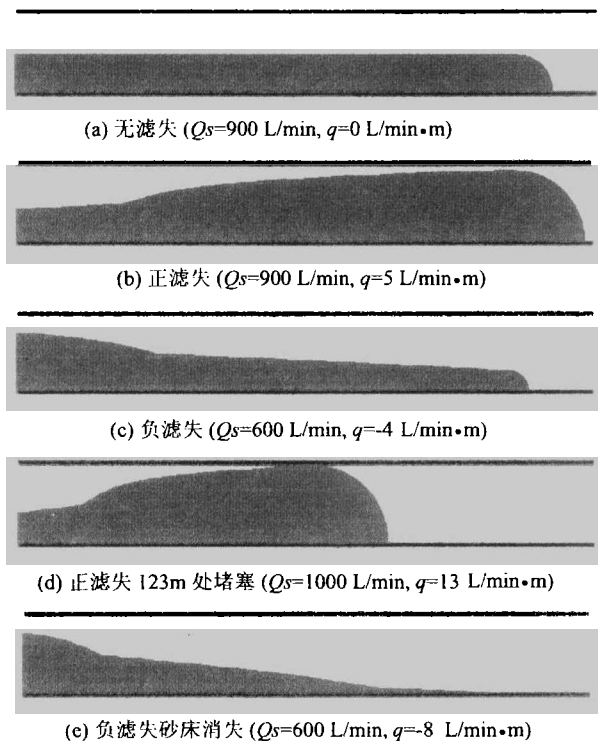


图5 不同滤失条件下的运移模拟结果

5(a)为无滤失条件充填,充填过程中砂床高度85.3 mm,为常数;5(b)为正滤失条件充填,充填过程中砂床高度不断升高,但可以顺利充填全部管段;5(c)为负滤失条件充填,充填过程中砂浆流量不断增加,砂床高度不断降低;5(d)为正滤失量  $q=13$  L/min·m条件下,当充填到 123 m 处时,砂床高接触上管壁,形成堵塞;5(e)为负滤失量  $q=-8$  L/min·m 条件下,砂床逐渐消失的模拟结果。

## Simulation of Bed Movement in Horizontal Pipeline with Wall Fluid Filtration

DONG Changyin, ZHANG Qi, WANG Haiyong<sup>1</sup>, QU Zhanqing

(University of Petroleum, Dongying 257061; E-mail: dongcy@mail.hqpu.edu.cn; Tuluwan Production Plant, CNPC<sup>1</sup>, Tuluwan 838202)

**[Abstract]** According to the turbulence theory and the behavior characteristics of the grains, the instantaneous velocity of fluid around the bed surface is regarded to accord the normal distribution and the finally movement status probability of grains on the bed surface are obtained. By the principle that the status probability implicates the coming behavior tendency, the equilibrium bed height calculation model is evolved, which can be used to simulate the bed moving process visually in horizontal solid-liquid two phase flow with wall fluid plus filtration, minus filtration and no filtration to judge whether slugging would occur or not.

**[Key words]** variable mass flow solid-liquid two phase flow equilibrium bed gravel packing movement simulation visual

## 4 结论

基于随机理论的砂床高度计算模型可用于任何滤失条件下圆管中固液两相流动中砂床运移的可视化模拟。计算和模拟结果表明,当砂床高度高于圆管中心位置时,砂床高度随砂浆排量的变化要比砂床高度低于圆管中心位置时明显,在变化曲线圆管中心点位置处会出现明显的拐点。这种特征也明显地体现在滤失条件下砂床高度随充填位置的变化关系上。作为水平井砾石充填数值模拟的基础研究,本模拟方法为更加复杂的水平井砾石充填过程中筛套环空砾石砂床运移的可视化模拟提供了有效手段。

**致谢:**采油研究室李明忠教授对本文的撰写提供了宝贵意见,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Doron P. A three-layer model for solid-liquid flow in horizontal pipes. *Int J Multiphase Flow*, 1993;19(6):1029—1043
- 2 韩其为,何明民.底层泥沙交换和状态概率及推悬比的计算. *水利学报*, 1999;(10):7—16
- 3 窦国仁.再论泥沙起动流速. *泥沙研究*, 1999;(6):1—8
- 4 戈威尔 G W.等.复杂混合物在管道中的流动.北京:石油工业出版社,1986:409