

大斜度井筒条件下沉积砂床表面颗粒 起动临界条件研究

董长银¹ 邓 珊¹ 李爱萍² 周生田³ 武 龙¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石化中原油田分公司采油五厂, 河南 濮阳 457001; 3. 中国石油大学(华东)数学与计算科学学院, 山东 东营 257061)

摘要:石油工程领域中,涉及到大斜度井筒条件下固液两相流动的作业,有大斜度井的钻井岩屑运移、管内砾石充填以及冲砂作业等,这些作业的过程其实质都是沉积砂床条件下的固体颗粒运移,其中固相沉积床表面的颗粒起动是其核心问题之一。将固相颗粒视为球形颗粒,考虑颗粒重力、水流推力、上举力、水柱静压力和粒间粘聚力,以及各力臂与沉没度的关系,通过力矩平衡分析建立了井筒倾斜条件下沉积床表面颗粒起动的临界流速模型,并进行了计算结果分析。该模型考虑了沉积床表面颗粒沉没位置的随机性及由此引起的颗粒起动的随机性,引入颗粒无因次沉没度随机变量,将其概率密度视为均匀分布,结合无因次沉没度的概率分布函数,在临界流速与颗粒直径及颗粒起动百分比之间建立了定量关系。该模型用于预测大斜度井条件下砂床表面颗粒在水流作用下的起动临界条件以及给定水流条件下的起动百分比。

关键词:大角度斜井; 两相流动; 沉积砂床; 颗粒; 临界速度; 砾石充填

中图分类号:T E358⁺. 1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)03-0022-05

大斜度井的钻井岩屑运移、管内砾石循环充填以及大斜度井冲砂作业等涉及到了倾斜井筒条件下带固相沉积床的固液两相流动,其中固相沉积床表面的颗粒起动是其核心问题之一^[1-3]。国内外学者通过理论分析和试验研究获得了许多固体颗粒的起动临界流速公式^[4-7],但这些研究大都集中在水平井筒方面,对于倾斜井筒条件下的砂床表面颗粒运动规律以及井斜角对起动临界条件的影响研究较少。为此,笔者在水平井筒条件下的研究成果的基础上,针对大斜度井的情况,建立了井筒倾斜条件下沉积床表面颗粒起动的临界流速模型,用于预测大斜度井条件下砂床表面颗粒在水流作用下的起动临界条件及给定水流条件下的起动百分比,为大斜度井钻井岩屑运移、砾石充填以及冲砂作业模拟提供了理论基础。

1 沉积床表面颗粒隐暴特征分析

假设条件: 1) 固相颗粒为半径为 r 的球形颗粒; 2) 形成沉积砂床时颗粒的沉积位置是随机的,形成的砂床层表面凹凸不平^[8]; 3) 水流作用下,最表层的颗粒会被首先冲起。

如图 1 所示,取水流方向为 x 轴方向,垂直于水

流方向为 y 方向。用沉没度来描述砂床表面颗粒的沉没位置,定义沉没度 E 为颗粒底部到与水流方向一侧相邻颗粒接触点的垂直距离^[4],如图 1(a)所示;当颗粒暴露最充分时,沉没度 E 达到最小值, $E_{\min} = 0.134r$,如图 1(b)所示;颗粒暴露最小时,沉没度 E 最大, $E_{\max} = r$,如图 1(c)所示。定义床层表面颗粒是指那些沉没度 $E < E_{\max}$ 的颗粒。

根据沉积砂床表面颗粒位置的随机特征,将沉没度 E 视为一均匀分布的随机变量。采用无因次沉没度 E' 表示颗粒的沉没度, $E' = E/r$,则有 $E'_{\min} = 0.134$, $E'_{\max} = 1.000$ 。

砂床表面颗粒无因次沉没度随机变量的概率分布函数为^[4]:

收稿日期: 2009-12-08; 改回日期: 2010-03-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“大斜度井砾石充填模拟及工艺技术”(编号: 2006AA09Z351)及国家自然科学基金项目“复杂条件下大斜度井砾石充填机理”(编号: 50704035)资助

作者简介: 董长银(1976—),男,河南卫辉人,1998年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,2003年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士学位,副教授,硕士生导师,主要从事油气井防砂完井及固液两相流等方面的教学与研究工作。

联系方式: (0546) 8395860, dongcy@upc.edu.cn

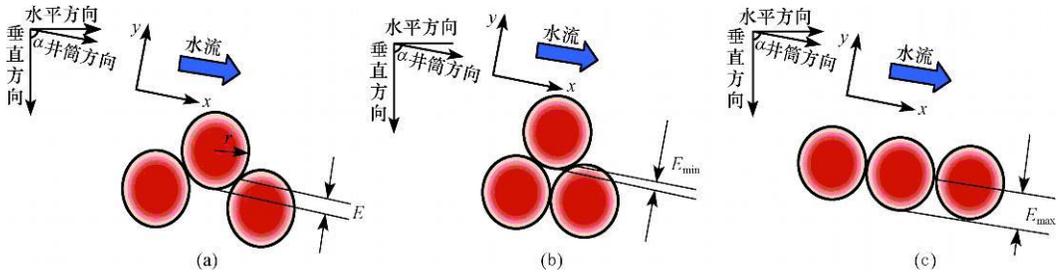


图 1 平衡砂床表面颗粒的沉没度

$$F(E') = \begin{cases} 0 & E' < E'_{\min} \\ \frac{E' - E'_{\min}}{E'_{\max} - E'_{\min}} & E'_{\min} \leq E' < E'_{\max} \\ 1 & E' \geq E'_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

沉积砂床层表面颗粒在水流冲刷作用下, 相对沉没度越小即颗粒暴露越充分, 则越容易被水流携带而起动。由式(1)可计算床层表面颗粒相对沉没度 $E' < E^*$ 的概率 $F(E^*)$, 就床层表面全体颗粒而言, 可以认为形成床层后, 其表面颗粒相对沉没度 $E' < E^*$ 的颗粒占表面总颗粒的百分比为 $F(E^*)$ 。显然, $F(E^*)$ 即为该水流速度下能够冲刷携带起动的颗粒百分比。

以下在颗粒起动临界流速公式和颗粒沉没度之间建立联系, 根据概率分布函数则可建立临界流速与床层表面颗粒起动量(即起动百分比)之间的定量关系。

2 床层表面颗粒的受力分析

沉积砂床表面颗粒在流体中的受力分析如图 2 所示。根据钻井、砾石充填、冲砂作业中的固相颗粒粒径范围及特征, 水流条件下的颗粒受力需要考虑浮重、水流正面推力、水流上举力、静水压力及颗粒间粘结力等。

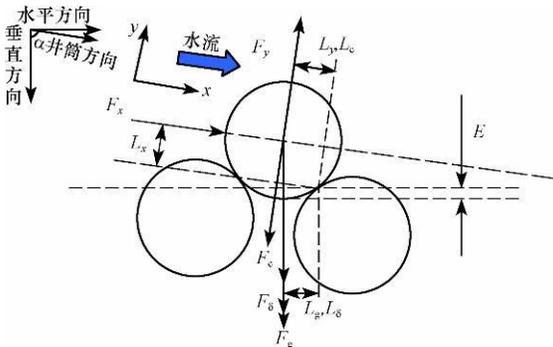


图 2 倾斜井筒条件下砂床表面颗粒受力分析

固体颗粒在水流中的浮重为:

$$F_g = \frac{\pi}{6}(\rho_s - \rho)gd_s^3 \quad (2)$$

式中: ρ_s 、 ρ 分别为砾石密度和液体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; d_s 为颗粒直径, mm 。

水流对床面固体颗粒的正面推力 F_x 和上举力 F_y 分别为^[9]:

$$F_x = \lambda \frac{\pi}{4} d_s^2 \frac{\rho u^2}{2} \quad (3)$$

$$F_y = \lambda \frac{\pi}{4} d_s^2 \frac{\rho u^2}{2} \quad (4)$$

式中: u 为作用于床面颗粒的瞬时流速, cm/s ; λ_x 、 λ_y 分别为推力阻力系数和上举力阻力系数^[7]。

固体颗粒间由于物理化学作用引起的粘结力为^[7,9]:

$$F_c = a_c \left(\frac{Y_0}{Y_0^*} \right)^{2.5} \frac{\pi}{2} \rho \varepsilon d_s \quad (5)$$

式中: a_c 为粘结力系数, 无因次; Y_0 、 Y_0^* 分别为床面砾石颗粒干容重和稳定干容重, kg/m^3 ; ε 为粘结力参数, m^2/s , 其值与颗粒材料的物理化学性质有关^[9]。

沉积砂床层表面固体颗粒所受静水压力为^[10]:

$$F_\delta = a_w \left(\frac{Y_0}{Y_0^*} \right)^{2.5} \rho g h \pi d_s \delta \left(\frac{\delta}{d_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: a_w 为水柱静压力系数, 无因次; h 为水深, m ; δ 为薄膜水厚度参数。

3 颗粒起动的临界流速模型

根据图 2, 促使沉积砂床面颗粒起动的力为水流作用力 F_x 和 F_y , 保持颗粒不动的力为重力 F_g 、粘结力 F_c 和静水压力 F_δ 。在水流作用下, 当原来静止条件下的沉积砂床层表面砾石颗粒不能满足原来的力矩平衡条件时, 认为颗粒开始起动。即在水流作用下颗粒要发生滚动, 必须满足以下力矩平衡条件:

$$F_x L_x + F_y L_y \geq F_g L_g + F_\delta L_\delta + F_c L_c \quad (7)$$

各力臂长度与井筒倾角及颗粒无因次沉没度的

关系为:

$$\begin{cases} L_g = L_\delta = r[\sqrt{1 - (1 - E')^2} \\ \sin \alpha - (1 - E') \cos \alpha] \\ L_x = r - E = r(1 - E') \\ L_y = L_c = \sqrt{r^2 - (r - E)^2} \\ = r \sqrt{1 - (1 - E')^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中, α 为井斜角, rad。

将颗粒受力方程和各力力臂方程代入力矩平衡方程式(7)中并取等式, 得到颗粒起动临界流速为:

$$u_c = a^1 \left(\frac{d}{d^*} \right)^{\frac{1}{6}} \left\{ \left[a^2 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_s + 8 \left(\frac{Y_0}{Y_0^*} \right)^{2.5} gh \left(\frac{\delta}{d_s} \right)^{1.5} \right] L_1 + a^3 \frac{\epsilon}{d_s} \left(\frac{Y_0}{Y_0^*} \right)^{2.5} L_2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

其中: $a^1 = \frac{a_w}{\sqrt{a_x(1 - E') + a_y \sqrt{1 - (1 - E')^2}}}$; $a^2 = \frac{4}{3a_w}$; $a^3 = \frac{4a_c}{a_w}$; $L_2 = \frac{L_c}{r} = \frac{\sqrt{1 - (1 - E')^2}}{r}$; $L_1 = \frac{L_g}{r} = \frac{\sqrt{1 - (1 - E')^2} \sin \alpha - (1 - E') \cos \alpha}{r}$

式(9)为颗粒起动临界流速与颗粒相对沉没度以及井斜角之间的关系式。当流体瞬时流速达到起动临界流速 u_{c} 时, 床层表面相对沉没度小于 E' 的固体颗粒全部起动。结合相对沉没度的概率分布函数方程式(1), 可建立颗粒起动百分比与临界流速之间的定量关系式, 可以计算不同起动标准下临界流速和一定流体流速下能够起动的颗粒的百分比。

通常采用摩阻流速作为颗粒起动临界条件的判断指标。临界摩阻流速与临界瞬时流速的关系为^[4]:

$$u^*_{c} = \frac{u_c}{k} \quad (10)$$

式中, $k = 8\ 743\ 9$; u^*_{c} 为临界摩阻流速, cm/s。

4 计算步骤及模型结果分析

4.1 计算步骤

在已知砂床表面颗粒相对沉没度和井斜角的情况下, 可以利用上述模型计算床面均匀颗粒起动的临界摩阻流速, 其具体计算步骤如下:

- 1) 计算最小和最大相对沉没度 E'_{min} 和 E'_{max} ;
- 2) 在 E'_{min} 和 E'_{max} 范围内取相对沉没度 E'_0 ;
- 3) 利用式(1)计算床层表面颗粒相对沉没度 E'

小于给定相对沉没度 E'_0 的概率 $F(E'_0)$, 即对于床层表面全体颗粒而言, 有 $F(E'_0)$ 的颗粒相对沉没度小于 E'_0 ;

4) 根据式(9)、(10)计算颗粒相对沉没度为 E'_0 的临界起动流速 u_c 及临界摩阻流速 u^*_{c} 。

4.2 计算结果的验证

陈奇伯等^[11-12]利用水槽试验研究了倾斜角度下的固相颗粒起动临界摩阻流速, 其试验条件为清水水面高度 15 cm, 固体颗粒密度 $2\ 650\ \text{kg/m}^3$, 使用直径 0.1~10.0 mm 的颗粒进行试验。为了验证笔者所给模型的计算结果, 采用相同试验条件, 计算了井斜角 65° 和 80° 条件下粒径 0.1~10.0 mm 颗粒的起动临界摩阻流速随粒径的变化, 与文献[11-12]的试验数据进行了对比, 结果如图 3 所示。

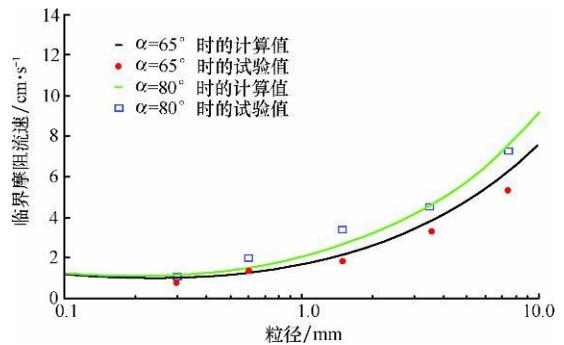


图 3 计算结果与文献[11-12]试验结果的对比

从图 3 可以看出, 笔者所给模型计算结果与试验结果吻合较好。但需要注意的是, 文献[11-12]中试验采用的粒径区间较大, 采用的粒径也比较大。因此对于粒径小于 0.5 mm 的较小颗粒(如冲砂时地层产生的细砂), 需要进行进一步的对比验证; 另外, 试验结果数据也比较少, 还需要使用更丰富的试验结果数据验证笔者的计算结果。

4.3 结果分析

采用清水水面高度 15 cm, 黏度 $1\ \text{mPa}\cdot\text{s}$, 固体颗粒密度 $2\ 650\ \text{kg/m}^3$, 颗粒直径 0.5 mm 等基础数据, 利用笔者所给模型进行砂床表面颗粒起动的临界条件分析。

图 4 为相对沉没度 E' 为 40% 时不同井斜角下临界摩阻流速与粒径的关系曲线; 图 5 为 80° 井斜角下不同起动百分比对应的起动临界摩阻流速与粒径的关系曲线。从图 4、5 可以看出: 粒径在 0.001~0.176 mm 之间时, 临界摩阻流速随着粒径的增大而减小, 此时由于颗粒较小, 粒间粘结力起主要作用; 而当粒

径在 0.176~ 10.000 mm 之间时,临界摩阻流速随着粒径的增大而加快,此时粒间粘结力相对较小,而颗粒重力、流体作用力起主要作用。

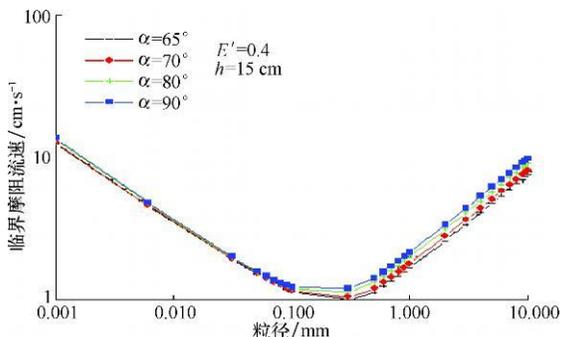


图 4 起动临界摩阻流速与粒径及井斜角的关系

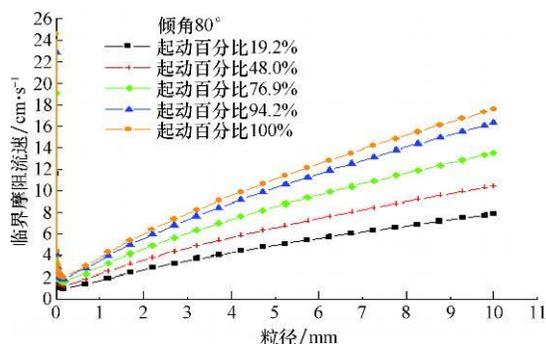


图 5 80°井斜角下不同起动百分比对应的起动临界摩阻流速与粒径关系

在实际应用中,地层砂粒径一般约为 0.001~ 0.300 mm,砾石颗粒粒径约为 0.2~ 1.2 mm,钻井岩屑粒径的分布范围更广泛,因此需要根据固相颗粒的粒径分布特征范围分析临界摩阻流速的不同变化规律。

图 6 为 60°~ 90°井斜角范围内颗粒起动百分比与临界摩阻流速之间的关系。从图 6 可以看出:临界摩阻流速随着起动百分比的增大而加快,近似成线性关系,并且井斜角越大,线性程度越明显。

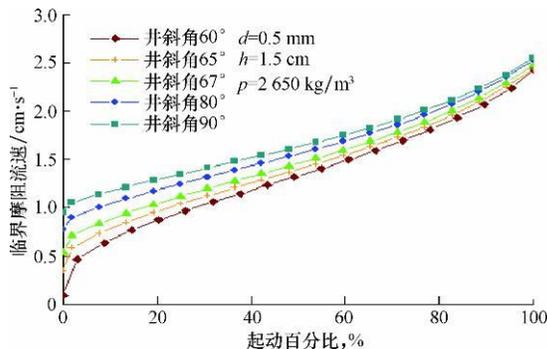


图 6 60°~ 90°井斜角下颗粒起动临界摩阻流速与起动标准的关系

井斜角的关系曲线。从图 7 可以看出,随着井斜角的增大,所需的起动临界摩阻流速也随之增大。当井斜角减小到某一临界值时仅靠重力作用和水流影响即可起动全部的颗粒,并且还可以使颗粒具有一定的流速,该流速值即为纵坐标取值。这是由于井斜角越小,充填过程越近似于垂直井的充填,当砾石颗粒进入井筒后随水流将会直接沉积于井筒底部。

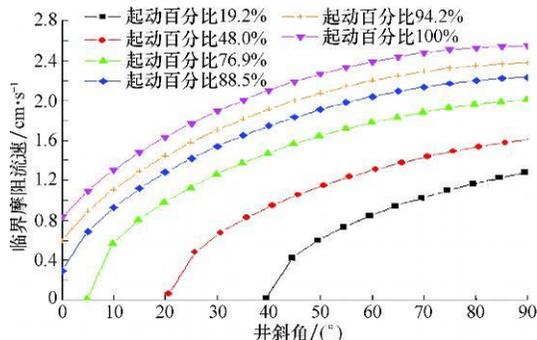


图 7 不同起动百分比下起动临界摩阻流速与井斜角的关系

对于砂床表面固体颗粒的起动问题,流体性质如密度、黏度等对颗粒的起动会有明显的影响。图 8 为管路水平(对应井斜角 90°)条件下,设定起动百分比 50%,颗粒直径 0.5 与 1.0 mm 时起动临界摩阻流速随流体密度变化的计算结果。从图 8 可看出,流体密度越大,颗粒的浮重越小,水流推力越大,越容易起动,颗粒起动所需的流速越小。

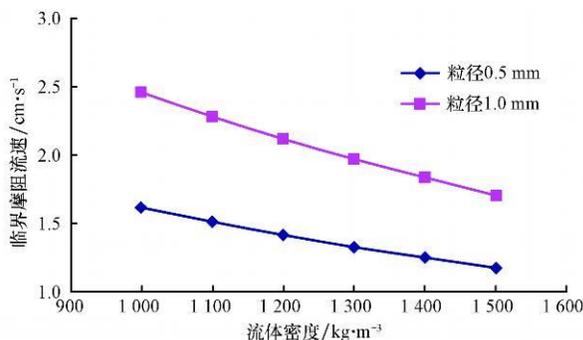


图 8 不同粒径颗粒起动临界摩阻流速随流体密度的变化关系

5 结论与建议

1) 考虑沉积床表面颗粒沉没位置的随机特征,建立了井筒倾斜条件下沉积床表面颗粒起动的临界流速模型,在临界流速与颗粒直径、颗粒起动百分比、井斜角之间建立了定量关系。分析表明,该计算模型描述的起动临界流速与各参数之间的规律是符合实际定性认识的。

2) 笔者的研究为大斜度井钻井岩屑运移、水平井及大斜度井砾石充填以及大斜度井冲砂作业的数值模拟与施工参数设计提供了参考。

3) 该模型计算结果的准确性还有待进一步的试验验证, 并进行必要的修正。

参 考 文 献

[1] 董长银. 油气井防砂技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009: 156-159.

[2] 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.

[3] 汪海阁, 刘希圣. 水平井段岩屑床厚度模式的建立[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1993, 17(3): 25-32.

[4] 赵东伟, 董长银, 张琪, 等. 考虑位置随机性的固体颗粒起临界流速研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(4): 59-62, 66.

[5] 何文社, 方铎, 雷孝章, 等. 均匀沙起动流速研究[J]. 人民长江, 2002, 33(5): 37-38.

[6] 解刚, 刘兴安. 非均匀沙起动条件探讨[J]. 东北水利水电, 2003, 21(11): 1-3.

[7] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1-9.

[8] 何文社, 杨具瑞, 方铎, 等. 泥沙颗粒暴露度与等效粒径研究[J]. 水利学报, 2002(11): 44-48.

[9] 佟庆理. 两相流动理论基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 171-175.

[10] 万兆惠, 宋天成. 水压力对细颗粒泥沙起动流速影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 1990(4): 62-69.

[11] 陈奇伯, 解明曙. 三峡坝区非粘性均匀花岗岩砂粒起动条件研究[J]. 人民长江, 1996, 27(7): 13-14.

[12] 杨具瑞, 曹叔尤, 方铎, 等. 坡面非均匀沙起动规律研究[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 102-106.

[审稿 孙宝江]

Research of Critical Condition for Grains at Bed Surface in Highly Deviated Wells

Dong Changyin¹ Deng Shan¹ Li Aiping² Zhou Shengtian³ Wu Long¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Fifth Oil Production Plant, Zhongyuan Oilfield Branch Company, Puyang, Henan, 457001, China; 3. College of Mathematics and Computational Science, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061, China)

Abstract: Solid-liquid two-phase flow in deviated pipeline exist in many oil fields, including drilling cuttings bed moving, gravel-packing and sand washing in highly deviated wells, while the essential process is activating and moving of the solid grain at bed surface. The critical velocity model for grains at bed surface in highly deviated well was developed based on the analysis of torque equilibrium considering the gravity, buoyant weight, fluid thrust force, upthrust force and cohesive force between grains along with the assumption of round particle. The calculated results were analyzed. The model considers the randomness of settlement location of grains on the bed surface and the associated randomness of grains starting. Dimensionless submergence with a uniform probability distribution is used to denote the location randomness. Combined the critical velocity equation and submergence probability distribution equation, the quantitative relationship between critical velocity and the percentage of starting grains was created. This model can be used to calculate the critical starting condition under water for grains at the surface bed in highly deviated wells and to calculate the starting percentage at given water flow velocity.

Key words: high angle deviated hole; two phase flow; sedimentary deposit; grain; critical velocity; gravel packing

“教授专家专栏”征文启事

为推动我国石油工程技术的不断发展, 促进国内石油工程界科研人员间的不断交流, 本刊自 2001 年第 3 期开始, 开辟了“教授专家专栏”栏目。该栏目主要刊登国内外石油工程界知名教授、专家的文稿, 以期能对我国石油工程技术的发展起到一定的导向作用。为此, 本刊向社会征稿, 只要具有一定的理论高度或一定的导向性, 石油钻井、完井、钻井液、采油、机械方面的稿件均可。所有稿件一经采用, 稿费从优。来稿请注明“教授专家专栏”栏目征文。

《石油钻探技术》编辑部