

气体钻水平井岩屑运移数值模拟研究

李 皋¹, 肖贵林¹, 李小林², 李 诚¹

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中国石油渤海钻探工程有限公司塔里木钻井分公司, 新疆库尔勒 841000)

摘要:针对气体钻水平井过程中的井眼净化问题,开展了水平段岩屑运移特征研究。基于气固两相流动模型,采用FLUENT软件模拟了气体钻井条件下不同粒径、不同注气量、不同钻杆转速和不同钻杆偏心距下单颗粒岩屑和岩屑颗粒群在水平环空的运移特性。模拟结果表明,单颗粒岩屑在水平环空的运移以跃移形式为主,而岩屑颗粒群的运移主要包括蠕移和跃移两种形式;粒径 5.0 mm 岩屑在注气量 50, 70 和 90 m³/min 下的首次跳跃距离分别为 0.55, 0.90 和 1.50 m;在注气量为 50 m³/min 时,粒径 1.5 mm 岩屑的首次跳跃距离是粒径 3.0 mm 岩屑的 1.5 倍;粒径 7.0 mm 岩屑在钻杆静止和转速为 60 r/min 下的第 3 次跳跃距离分别为 0.43 和 0.62 m;粒径 6.0 mm 岩屑在偏心距 0, 10 和 15 mm 条件下的第 2 次跳跃距离分别为 0.55, 0.44 和 0.28 m。研究表明,注气量越大、粒径越小、偏心距越小、钻杆转动越快,则岩屑运移的距离越远。建议采取适当提高注气量、安装水平井井眼净化工具、提高钻杆居中度等措施,以提高井眼净化效果。

关键词:气体钻井 水平井 岩屑运移 数值模拟 粒径 注气量 转速

中图分类号:TE21 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2015)04-0066-07

Numerical Simulation for Cuttings Migration during Gas Drilling of Horizontal Wells

Li Gao¹, Xiao Guilin¹, Li Xiaolin², Li Cheng¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation(Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Tarim Drilling Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: To enhance the hole-cleaning performance during gas drilling of horizontal wells, research has been conducted for characteristics of cutting migration in horizontal sections. Based on the gas-solid flow model, the migration characteristics of single-particle cuttings and multi-particle cuttings were simulated using FLUENT at different diameters, gas injection rates, rotating speeds and eccentric distances of drillpipe. The results showed that in a horizontal annulus, single-particle cuttings mainly migrated in saltation, while multi-particle cuttings migrated in creep and saltation. For the gas injection rates of 50 m³/min, 70 m³/min and 90 m³/min, the first saltation distances of 5mm diameter cuttings were 0.55 m, 0.90 m and 1.50 m respectively. For the gas injection rate of 50 m³/min, 1.5 mm diameter cuttings' first saltation distance is 1.5 times of 3.0 mm diameter cuttings. For the rotating speeds of 0 r/min and 60 r/min, the third saltation distances of 7.0 mm diameter cuttings were 0.43 m and 0.62 m respectively under the gas injection rate of 50 m³/min. For the eccentric distances of 0 mm, 10 mm and 15 mm, the second saltation distances of 6 mm diameter cuttings were 0.55 m, 0.44 m and 0.28 m respectively under the gas injection rate of 50 m³/min. Therefore, the faster gas injection rate, the smaller diameter of cuttings, the faster rotating speed and the smaller eccentric distance, the further would cuttings be removed. Taking measures such as improving gas injection rate appropriately, installing a hole cleaning device for horizontal well and moderating drilling pipe could benefit the hole cleaning efficiently.

Key words: gas drilling; horizontal well; migration of cuttings; numerical simulation; particle size; gas injection rate; rotating speed

气体钻水平井技术结合了气体钻井保护储层和水平井扩大渗流面积的优点,被视为解决低压、低孔、低渗、低丰度非常规油气资源高效开发的重要技术手段^[1-5],然而水平段岩屑运移是该技术面临的一大技术难题,井眼净化效果不好会引发高摩阻、高扭矩、卡钻和固井质量差等一系列工程问题^[6-7],严重阻碍了气体钻水平井技术的应用。

收稿日期:2014-09-22;改回日期:2015-03-31。

作者简介:李皋(1976—),男,四川武胜人,1999年毕业于西南石油学院地质专业,2002年获西南石油学院地质专业硕士学位,2005年获西南石油大学油气井工程专业博士学位,副研究员,主要从事气体钻井、欠平衡钻井和储层保护方面的研究。

联系方式:(028)83034786,easonshaw@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金重点项目“气体钻井技术基础研究”(编号:51134004)和国家科技重大专项“低渗气藏复杂地层高效钻井关键技术”(编号:2011ZX05022-005)资助。

国内外对气体钻水平井岩屑运移问题的相关研究开始于注气量模型研究。R. R. Angel^[8]对空气钻井注气量进行了大量研究,最早建立了空气钻井注气量计算模型。此后, B. Guo^[9]、王岩^[10]、袁兆广^[11]、张雅春^[12]等人对 R. R. Angel 模型进行了完善和修正,提高了气体钻水平井注气量计算模型的准确性。柳贡慧等人^[13]分析了影响气体钻水平井岩屑起动临界气体速度的因素,发现偏心环空和大井斜角段是携岩的不利区域。随着计算流体软件的发展,越来越多的学者利用数值模拟方法分析水平井岩屑运移规律。孟英峰等人^[4,14]通过 CFD 数值模拟软件分析水平环空流场,发现偏心环空和钻杆接头不利于岩屑运移。万里平等人^[15]分析了气体钻井水平段扩径处的环空流场,认为井径扩大率越大,扩径处井眼低边越容易堆积岩屑。沈忠厚等人^[16]利用 CFD 数值模拟软件,分析了超临界二氧化碳钻水平井时流体密度和黏度对携岩能力的影响。霍洪俊等人^[17]基于 DPM 模型,采用数值模拟方法,分析了流量、温度、压力、粒径、钻杆偏心等因素对超临界二氧化碳钻井水平段携岩能力的影响规律。宋先知等人^[18]采用 Realize $k-\epsilon$ 湍流模式及 SIMPLEC 算法,分析了连续油管钻水平井岩屑的运移规律。邵帅等人^[19]分析不同井斜角下岩屑的受力,得到了不同井斜角下气体钻井岩屑起动的临界流速。以上研究已经取得了一定成果,但是针对气体钻水平井时岩屑运移特征方面的研究还相对缺乏。因此,笔者采用 FLUENT 软件,对气体钻井水平段单颗粒岩屑和岩屑颗粒群的运移进行了模拟,分析了单颗粒岩屑和岩屑颗粒群在水平段的运移特征。

1 气体钻水平井岩屑运移机理

1.1 气体钻水平井岩屑运移的特殊性

由于岩屑受力的不同,水平井携岩规律与直井携岩规律存在本质的不同^[15](见图 1)。在直井段,岩屑所受重力方向与其运动方向基本处于同一轴线上,井眼径向的分速度可以忽略不计,因此,在气体返速大于沉降末速的条件下,岩屑即可被顺利携带出井口,而不能被气体携带的大粒径岩屑在重力作用下回落到井底进行二次破碎或多次破碎,达到运移条件后被携带出井口。在水平井段,由于水平井眼的特殊性,若出现气体不能携带的大颗粒岩屑,岩屑则不能回落到井底进行重复破碎,而是在重力作用下下沉至下井壁形成岩屑床。

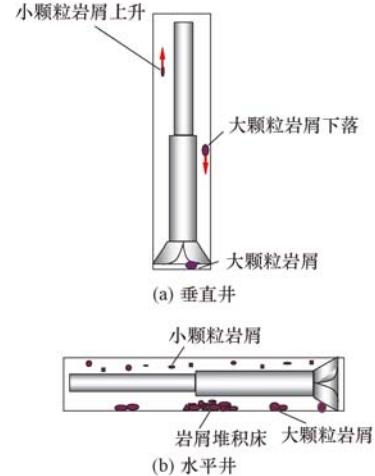


图 1 直井段与水平井段岩屑运移对比示意

Fig. 1 Migration of cuttings in vertical and horizontal sections

1.2 岩屑运移形式

单颗粒岩屑在水平段运移过程中主要受到重力、浮力、气动阻力、压强梯度、附加质量力、Basset 力、Saffman 升力和 Magnus 升力等力的作用^[20],当岩屑受到的动力大于阻力时,即开始起动运移。气体钻水平井过程中,岩屑运移形式主要有蠕移、跃移和悬移 3 种形式^[4]。蠕移是指在岩屑受到的动力作用相对较小的情况下,沿下井壁平行滑动或者滚动的运移形式。跃移是指随着岩屑受力增大,岩屑以跳跃的形式运移。悬移是指岩屑受到的升力大于重力时,以悬浮的形式在水平段环空运移。

2 基本模型

气体钻水平井时,井筒环空流动为典型的气固两相管流,根据气固混合相的连续性、动量守恒定律和能量守恒定律,可建立基本的数学模型^[21]。此外,根据气体钻水平井的特点,建立了物理模型。

2.1 数学模型

2.1.1 混合相连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_m 为混合相密度, kg/m^3 ; \mathbf{v}_m 为混合相速度, m/s 。二者的表达式为:

$$\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

式中: n 是相数; α_k 为第 k 相的体积分数, %; ρ_k 为第 k 相的密度, kg/m^3 ; v_k 为第 k 相的速度, m/s 。

2.1.2 动量守恒方程

根据牛顿第二定律, 可得混合物动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m v_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) &= -\nabla p + \rho_m g + F + \\ \nabla \cdot [\mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)] + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{dr,k} v_{dr,k} \right) & \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

$$v_{dr,k} = v_k - v_m \quad (6)$$

式中: p 为压力, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 ; F 为体积力, N/m^3 ; μ_m 为混合物黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $v_{dr,k}$ 为第 k 相的漂移速度, m/s ; μ_k 为第 k 相的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.1.3 能量守恒方程

根据能量守恒定律得混合物运动需满足的能量守恒方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k v_k (\rho_k E_k + p)] &= \\ = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + S_E & \end{aligned} \quad (7)$$

式中: E_k 为第 k 相的内能, J/kg ; λ_{eff} 为有效热传导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; S_E 为体积热源相, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

2.2 物理模型

根据现场实际气体钻水平井组合参数建立模型, 模型长 3 m, 井眼直径为 158.8 mm, 钻杆直径为 88.9 mm, 井底温度为 351 K, 岩屑密度为 2.3 g/cm³, 模拟岩屑粒径为 0.5~7.0 mm, 注气量为 50~90 m³/min 时的岩屑运移特性。采用六面体单元对所建立模型进行网格划分, 图 2 为钻杆不偏心时的网格划分。



图 2 钻杆不偏心时的水平环空网格划分

Fig. 2 Grid of horizontal annulus with zero eccentric distance

3 模拟结果及分析

3.1 单颗粒岩屑的运移特性

3.1.1 不同粒径岩屑颗粒的运移特性

在注气量为 50 m³/min 的情况下, 分别模拟研究粒径 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 和 7.0 mm 岩屑颗粒的运移, 得到不同粒径岩屑颗粒的运移轨迹 (见图 3)。由图 3 可知, 岩屑颗粒在水平环空以跃移形式为主运移, 运移轨迹呈现螺纹状。岩屑颗粒运移轨迹受粒径影响较大, 对比粒径 1.5 和 3.0 mm 岩屑颗粒的位移 (如图 4 所示) 可知, 粒径 1.5 mm 岩屑颗粒第一次的跳跃距离为 1.21 m, 约是粒径 3.0 mm 岩屑颗粒第一次跳跃距离 (0.82 m) 的 1.5 倍。这是因为岩屑颗粒粒径越大, 其重力越大, 在同一注气量下, 岩屑所受合力方向更偏向于重力方向, 导致岩屑轨迹线的螺距更短; 而岩屑粒径越小, 其重力相对较小, 岩屑轨迹线的螺距越长。因此, 在实际气体钻水平井过程中, 可在近钻头处安装具有研磨功能的井眼净化装置^[22], 再次破碎脱离井底气体难以携带的大颗粒岩屑, 形成适合气体携带的小粒径岩屑, 提高井眼净化效果。

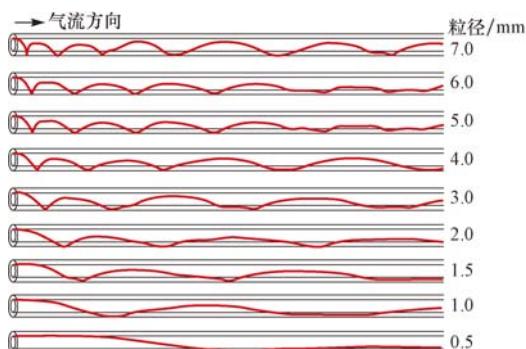


图 3 不同粒径岩屑颗粒的运移轨迹

Fig. 3 Migration trajectories of cuttings with different particle sizes

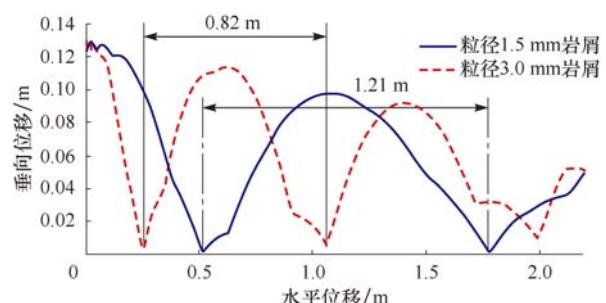


图 4 粒径 1.5 和 3.0 mm 岩屑颗粒的位移

Fig. 4 Displacement of cuttings with diameters of 1.5 mm and 3.0 mm

3.1.2 不同注气量下岩屑颗粒的运移特性

选取粒径 5.0 mm 岩屑, 模拟其在注气量为 50, 70 和 90 m^3/min 时的运移情况, 结果见图 5 和图 6。由图 5 可以看出, 对于相同粒径的岩屑颗粒, 随着注气量增大, 岩屑单次跳跃距离增长。分析图 6 可知, 5.0 mm 岩屑颗粒在注气量为 50 m^3/min 时第一次的有效运移距离为 0.55 m, 在注气量为 70 m^3/min 时第一次的有效运移距离为 0.90 m, 在注气量为 90 m^3/min 时第一次的有效运移距离为 1.50 m。可见, 提高注气量对于井眼净化有显著效果。在气体钻水平井过程中, 岩屑颗粒的粒径较难控制, 因此, 可以增大注气量来改善水平井井眼净化效果。

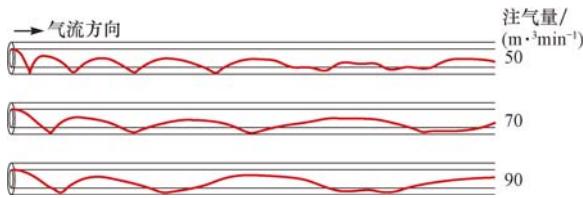


图 5 不同注气量下岩屑颗粒的运移轨迹

Fig. 5 Migration trajectories of cuttings under different gas injection volumes

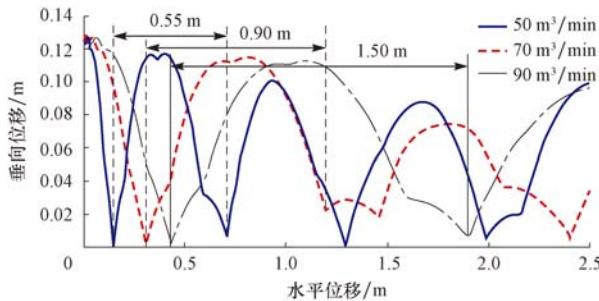


图 6 不同注气量下岩屑颗粒的位移

Fig. 6 Displacement of cuttings under different gas injection volumes

3.1.3 钻杆转动时岩屑颗粒的运移特性

选择注气量为 50 m^3/min , 模拟粒径 5.0 和 7.0 mm 岩屑颗粒在钻杆转动时(设定转速为 60 r/min)和不转动时的运移情况, 结果见图 7 和图 8。由图 7 可以看出, 与钻杆不转动相比, 钻杆旋转时, 岩屑跳跃距离较长, 岩屑的单次跳跃距离增长, 运移效率较高。从图 8 可以看出, 在钻杆不动时, 7.0 mm 岩屑第三次的跳跃距离为 0.43 m, 在钻杆转动时为 0.62 m。这是因为, 钻杆转动对环空流场具有一定的扰动作用, 增大了环空气体的切向速度, 从而改变了岩屑的受力情况, 使岩屑颗粒易于被

运移。由图 4、图 6 和图 8 可以看出, 与粒径和注气量相比, 钻杆转速对岩屑颗粒运移的影响较弱。同时, 考虑现场钻井作业时为保证钻井安全, 钻杆转速需控制在一定范围内。因此, 不能通过大幅提高钻杆转速来提高井眼净化效果。目前, 国内外已发明了多种水平井岩屑清除装置, 大多是通过装置的特殊结构实现对环空流场的扰动, 从而达到清除岩屑的目的。因此, 可在钻杆一定位置安装井眼净化工具, 提高水平井井眼净化效果。

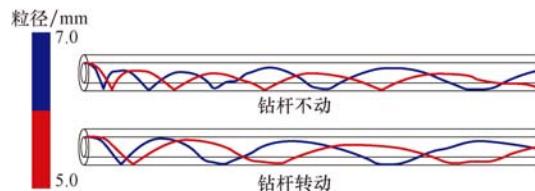


图 7 钻杆转动与不转动时岩屑颗粒的运移轨迹

Fig. 7 Migration trajectories of cuttings during the drilling pipe rotating and idling

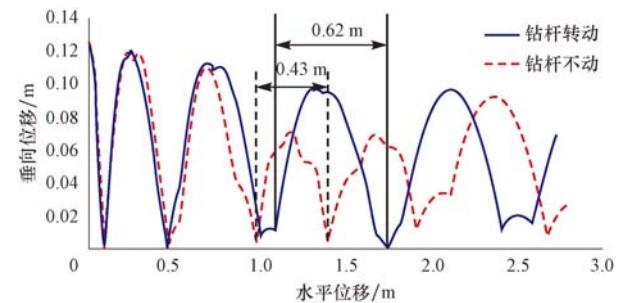


图 8 钻杆转动与不转动时粒径 7.0 mm 岩屑颗粒的位移

Fig. 8 Displacements of cuttings with diameter of 7.0 mm during the drilling pipe rotating and idling

3.1.4 偏心环室内岩屑颗粒运移特性

选择注气量为 50 m^3/min , 模拟粒径 6.0 mm 岩屑颗粒分别在偏心距为 0, 10 和 15 mm 情况下的运移情况, 结果如图 9 和图 10 所示。在气体钻水平井过程中, 由于钻杆受重力所造成的偏心环空, 会使环空内的气体流速产生差异, 致使岩屑颗粒受力情况更为复杂。由图 9 和图 10 可知, 随着偏心距增大, 岩屑颗粒起跳高度和距离都明显减小。对比不同偏心距下岩屑颗粒第二次的跳跃距离可知, 偏心距为 0, 10 和 15 mm 时岩屑的第二次跳跃距离分别为 0.55, 0.44 和 0.28 m。因此, 随着偏心距增大, 岩屑的运移愈发困难, 容易在偏心环空处沉积, 根据文献[14]的研究, 这是因为钻柱偏心造成了偏心环空的气体流速上高下低。因此, 偏心环空不利于水平井的岩屑运移, 要提高井眼净化效果, 可采用减磨接头、稳定器和变径

短节等提高钻杆居中度。

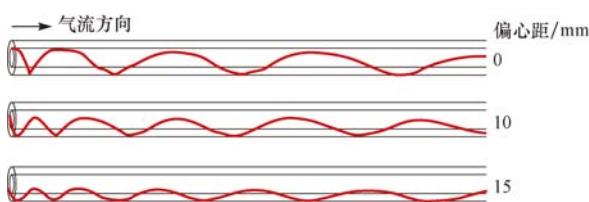


图 9 不同偏心距下岩屑颗粒运移轨迹

Fig. 9 Migration trajectories of cuttings at different eccentric distances

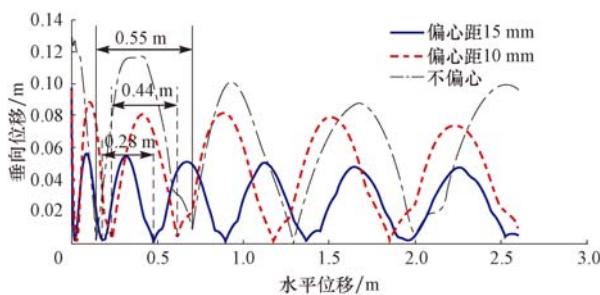


图 10 不同偏心距下岩屑颗粒的位移

Fig. 10 Displacements of cuttings at different eccentric distances

3.2 岩屑颗粒群运移特性分析

3.2.1 粒径对岩屑颗粒群运移的影响

选择注气量为 $50 \text{ m}^3/\text{min}$, 模拟包含粒径 1.0, 4.0 和 7.0 mm 岩屑的颗粒群在水平环空中的运移情况, 结果见图 11。由图 11 可以看出, 岩屑粒径的大小对颗粒群的运移与对单颗粒的运移影响基本一致。在整个颗粒群中, 岩屑粒径越小, 越靠近整个颗粒群的前段。在整个颗粒群运移的过程中, 部分岩屑以跃移形式运移, 部分岩屑则在下环空井壁以蠕移形式向前运移。这是因为岩屑颗粒群在运移时存在颗粒与颗粒、颗粒与管壁和井壁的相互碰撞, 使部分颗粒失去了再次起跳的能力, 只能在下环空壁面蠕移。

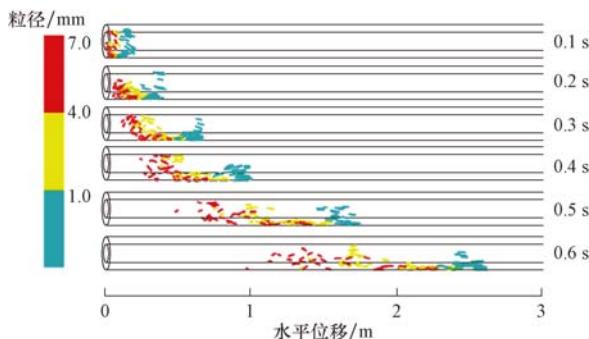


图 11 不同时刻岩屑颗粒群位移

Fig. 11 Displacement of multi-particle cuttings at different times

3.2.2 注气量对岩屑颗粒群运移的影响

模拟包含 1.0, 4.0 和 7.0 mm 3 种粒径岩屑的颗粒群在注气量为 50, 70 和 $90 \text{ m}^3/\text{min}$ 时的运移情况。图 12 为在不同注气量下岩屑颗粒群 0.4 s 时的位移。由图 12 可知, 注气量对岩屑颗粒群的运移有显著影响, 注气量越大, 整个颗粒群运移的距离越远, 而且岩屑颗粒越容易起跳。

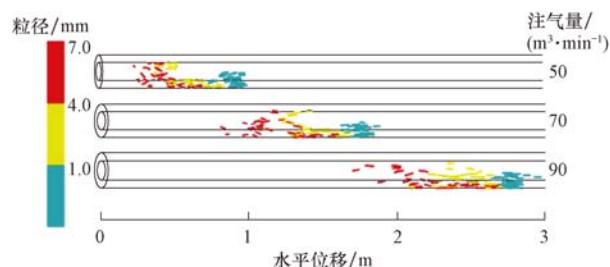


图 12 0.4 s 时不同注气量下岩屑颗粒群的位移

Fig. 12 Displacements of multi-particle cuttings at different gas injection volumes at 0.4 s

3.2.3 钻杆转动对岩屑颗粒群运移的影响

选择注气量为 $50 \text{ m}^3/\text{min}$, 模拟包含 1.0, 4.0 和 7.0 mm 等 3 种粒径岩屑的颗粒群在钻杆转动 (钻杆转速为 60 r/min) 和不转动时的运移情况。图 13 为 0.4 s 时在钻杆不动和钻杆转动的情况下岩屑颗粒群的位移。由图 13 可知, 与钻杆不转动相比, 钻杆转动时岩屑的运移距离较远, 钻杆的转动对岩屑颗粒群的整体运移有利。

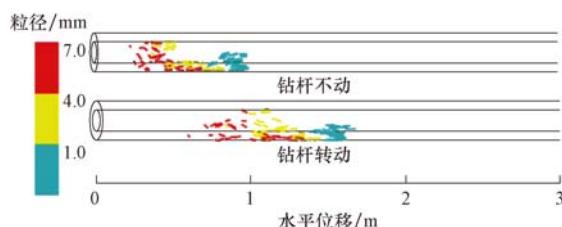


图 13 0.4 s 时钻杆转动和不转动情况下岩屑颗粒群的位移

Fig. 13 Displacement of multi-particle cuttings during the drilling pipe rotating and idling at 0.4 s

3.2.4 偏心距对岩屑颗粒群运移的影响

选择注气量为 $50 \text{ m}^3/\text{min}$, 模拟包含 1.0, 4.0 和 7.0 mm 3 种粒径岩屑的颗粒群在偏心距分别为 0, 10 和 15 mm 情况下的运移情况。图 14 为 0.5 s 时不同偏心距的情况下岩屑颗粒群的位移。由图 14 可以看出, 随着偏心距增大, 颗粒群整体运移距离缩短, 而且颗粒群整体的起跳高度降低。造成这

种现象主要的原因是,偏心环空使环空气流速度呈现上高下低分布不均的状态,当颗粒群下落到小环空中时,气流速度降低,颗粒群整体的动能减小,颗粒再次起跳的高度降低。

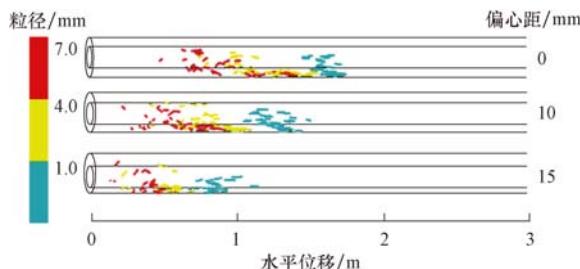


图 14 0.5 s 时不同偏心距下岩屑颗粒群运移位移

Fig. 14 Displacements of multi-particle cuttings at different eccentric distances at 0.5 s

4 结 论

1) 气体钻水平井时,单颗粒岩屑在水平段的运移形式以跃移为主,而岩屑颗粒群则主要以蠕移和跃移 2 种形式运移。

2) 近钻头处安装具有研磨功能的井眼净化工具,可以重复破碎难以运移的大颗粒岩屑,形成适合气体携带的岩屑粒径分布,提高井眼净化效果。

3) 增大注气量,是提高气体钻水平井井眼净化效果行之有效的方法。

4) 在钻杆适当位置处安装井眼净化工具,实现对水平环空流场较大的扰动,可以达到提高井眼净化效果的目的。

5) 钻柱偏心会使单颗粒岩屑和岩屑颗粒群运移距离变短,跳跃高度变低,影响井眼净化效果。因此,可在钻柱添加减磨接头、稳定器和变径短节,提高钻杆的居中度。

参 考 文 献

References

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(2):129-136.
- [2] 唐波,唐志军,耿应春,等. 国内低渗透油气田高效开发钻完井关键技术发展现状[J]. 天然气工业,2013,33(2):65-70.
Tang Bo, Tang Zhijun, Geng Yingchun, et al. Drilling and completion technologies for efficient exploitation of low-permeability oil & gas fields in China:a state-of-the-art review[J]. Natural Gas Industry,2013,33(2):65-70.
- [3] 武恒志. 低渗透油气田高效开发钻井技术研究与实践[J]. 石油钻探技术,2012,40(3):1-6.
Wu Hengzhi. Drilling technology for highly efficient development of low permeability oil & gas fields[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012,40(3):1-6.
- [4] 孟英峰,练章华,李永杰,等. 气体钻水平井的携岩研究及在白浅 111H 井的应用[J]. 天然气工业,2005,25(8):50-53.
Meng Yingfeng, Lian Zhanghua, Li Yongjie, et al. Research on the cuttings-carried ability in gas horizontal drilling and its application to Well Baiqian-111H [J]. Natural Gas Industry, 2005,25(8):50-53.
- [5] 孙海芳,谯抗逆,胡超,等. 广安 002-H8 井气体钻水平井实践[J]. 天然气工业,2008,28(4):61-63.
Sun Haifang, Qiao Kangni, Hu Chao, et al. Gas drilling practices in the horizontal Well Guang'an 002-H8[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(4):61-63.
- [6] 石建刚,陈一健,谢双喜. 气体钻井井眼净化程度判断方法探讨[J]. 石油钻采工艺,2008,30(4):5-7.
Shi Jiangang, Chen Yijian, Xie Shuangxi. Discussion on methods for determining hole cleaning degree in gas drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008,30(4):5-7.
- [7] 陈锋,狄勤丰,袁鹏斌,等. 高效岩屑床清除钻杆作用机理[J]. 石油学报,2012,33(2):298-303.
Chen Feng, Di Qinfeng, Yuan Pengbin, et al. Mechanism of an effective hydroclean drill pipe for hole cleaning[J]. Acta Petroleii Sinica, 2012,33(2):298-303.
- [8] Angel R R. Volume requirements for air or gas drilling[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1957, 210(12):325-330.
- [9] Guo B, Ghalambor A. Gas volume requirements for underbalanced drilling: deviated holes [M]. Tulsa: PennWell Books, 2002.
- [10] 王岩,韩辉,闫铁,等. 气体钻井水平井注气量模型修正[J]. 大庆石油学院学报,2009,33(3):69-71,74.
Wang Yan, Han Hui, Yan Tie, et al. Modification of gas injection model for horizontal wells during gas drilling[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009,33(3):69-71,74.
- [11] 袁兆广,周开吉,孟英峰,等. 气体钻大斜度水平井最小注气量计算方法研究[J]. 天然气工业,2007,27(4):65-68.
Yuan Zhaoguang, Zhou Kaiji, Meng Yingfeng, et al. Calculating the minimum gas volume used in high-angle horizontal wells during gas drilling[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (4):65-68.
- [12] 张雅春,刘强,向军文,等. 空气定向钻井设计计算方法[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2009,39(2):294-299.
Zhang Yachun, Liu Qiang, Xiang Junwen, et al. Design calculations for air directional drilling[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009,39(2):294-299.
- [13] 柳贡慧,宋廷远,李军. 气体钻水平井气体携岩能力分析[J]. 石油钻探技术,2009,37(5):26-29.

- Liu Gonghui, Song Tingyuan, Li Jun. Analysis of cuttings transportation during drilling gas horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(5): 26-29.
- [14] 孟英峰, 练章华, 梁红, 等. 气体钻水平井的携岩 CFD 数值模拟研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 50-52.
- Meng Yingfeng, Lian Zhanghua, Liang Hong, et al. CFD numerical simulation research on cuttings-carried capability in gas horizontal drilling[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(7): 50-52.
- [15] 万里平, 孟英峰, 魏纳, 等. 气体钻水平井井径扩大环空流动特征的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2011, 28(5): 543-546.
- Wan Liping, Meng Yingfeng, Wei Na, et al. Numerical simulation on the annulus diameter expansion in gas drilling horizontal well[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28 (5): 543-546.
- [16] 沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界 CO_2 钻井水平井段携岩能力数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 233-236.
- Shen Zhonghou, Wang Haizhu, Li Gensheng. Numerical simulation of the cutting-carrying ability of supercritical carbon dioxide drilling at horizontal section[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 233-236.
- [17] 霍洪俊, 王瑞和, 倪红坚, 等. 超临界二氧化碳在水平井钻井中的携岩规律研究[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 12-17.
- Huo Hongjun, Wang Ruihe, Ni Hongjian, et al. Cuttings carrying pattern of supercritical carbon dioxide in horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 12-17.
- [18] 宋先知, 李根生, 王梦抒, 等. 连续油管钻水平井岩屑运移规律数值模拟[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 28-32.
- Song Xianzhi, Li Gensheng, Wang Mengshu, et al. Numerical simulation on cuttings carrying regularity for horizontal wells drilled with coiled tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 28-32.
- [19] 邵帅, 孟庆双, 孙晓峰, 等. 非直井气体钻井岩屑起动的临界流速[J]. 断块油气田, 2013, 20(6): 803-805.
- Shao Shuai, Meng Qingshuang, Sun Xiaofeng, et al. Starting velocity of cutting particles in gas drilling of horizontal or highly deviated well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(6): 803-805.
- [20] 韩春雨, 龙刚, 纪海鹏. 气体钻井岩屑颗粒动力学分析[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2008, 10(6): 31-33, 39.
- Han Chunyu, Long Gang, Ji Haipeng. Dynamics analysis of cutting on gas drilling[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2008, 10 (6): 31-33, 39.
- [21] 郭建华. 气体钻井环空气固两相流动数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2006.
- Guo Jianhua. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in annulus during gas drilling[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006.
- [22] 李皋, 李诚, 孟英峰, 等. 一种水平段气体钻井用井眼净化工具: 中国, 201410029002.3[P]. 2014-05-07.
- Li Gao, Li Cheng, Meng Yingfeng, et al. A hole cleaning tool for gas drilling horizontal wells: CN, 201410029002.3[P]. 2014-05-07.

[编辑 刘文臣]

SonicPacer 声波页岩评价技术

斯伦贝谢公司研发了用于页岩储层评价的新型随钻声波测井仪 SonicPacer, 该测井仪能提供页岩储层横向应力剖面, 有助于认清储层横向破碎特性, 帮助作业者优化完井设计, 降低增产成本, 提高采收率。依据优化后的完井设计进行射孔, 可以将有贡献的射孔孔眼数从传统完井设计的 66% 提高至 80%, 甚至更高。

SonicPacer 在钻井过程中沿着储层横向以偏心声源发射定向的声信号, 并且采集记录全波列波形。通过从全波列中提取清晰的水平偏振横波、垂直偏振横波和纵波模式波, 并加以处理, 从而获得应力剖面。在后期增产措施中, 通过降低每一个阶段的差应力来优化完井, 以确保所有射孔簇被有效压裂。

SonicPacer 声波页岩评价技术具有以下特点: 1) 利用其提供的应力剖面优化完井, 即在各项应力差较小的区域布置射孔眼, 并且使最大应力差从 11.70 MPa 降低到 1.39 MPa, 在此基础上, 也可以通过调整泵排量优化压裂施工, 防止脱砂, 缩短完井时间, 降低完井成本; 2) 可以避免再次测井, 提高钻井效率; 3) 可获得井眼信息, 从而缩短建井周期。

[供稿 吴金平]