

页岩气偏心水平井气侵期间岩屑运移数值模拟

姜瑞海, 崔云峰, 张 晨, 陈 勋

(华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063200)

摘要:为揭示页岩气偏心水平井气侵期间岩屑运移规律,基于欧拉多相紊流计算模型,研究钻井液排量与黏度、气体侵入量、岩屑粒径、入口岩屑含量对气侵期间偏心度为 0.75 的环空岩屑分布的影响。结果表明,气侵期间上述因素均会对偏心环空岩屑分布造成不同程度的影响,随岩屑粒径与入口岩屑含量的增大、钻井液排量与黏度的减小,环空出口底部岩屑床厚度增加,气体侵入量安全范围内对岩屑分布影响甚微,随其增大,岩屑床厚度稍有上升。

关键词:页岩气水平井;气侵;偏心环空;岩屑运移;多相紊流

中图分类号:TE254 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)06-0283-07

随着国内外各大油田勘探开发的持续深入,常规油气日渐衰竭^[1],中深层页岩气因其分布范围广、可采储量丰富、开采寿命长等优点已逐渐成为研究的热点^[2-3]。页岩气层渗透率普遍较低、气流阻力大、开发困难^[4],水平井仍为现阶段主要钻井技术。水平段内钻杆因重力等因素影响与井眼形成偏心环空^[5]而较常规井更易形成岩屑床^[6]。同时,位于中深部地层的偏心环空受高温高压环境及钻井液密度窗口狭窄等因素影响,气侵时有发生^[7],钻井液携岩运移问题已成为气液固三相流问题。此时偏心环空岩屑运移规律涉及因素更广,过程更为复杂^[8],却更接近真实钻井环境。国内外多位学者针对水平井环空钻井液携岩运移规律进行了广泛研究。Doron 等根据质量与动量守恒建立了描述水平井钻井液携岩运移规律的三层模型^[9];Han 等通过实验研究分析了环空倾角及钻杆旋转对于环空岩屑运移效率的影响^[10];Piroozian 等对水平井环空偏心度对岩屑运移效率的影响进行了一系列研究,并提出高塑性黏度钻井液携岩效率更高^[11];刘少胡等基于流体力学和湍流运输方程,模拟研究了页岩气水平井岩屑运移机理,并对影响清水携岩能力的敏感参数进行了探究^[12];范宇等基于固液两相流理论,模拟分析了钻杆转速、排量、粒径、偏心度、井斜角对于环空井筒岩屑体积分布及运移轴向速度的影响^[13];况雨春等基于 CFD-DEM 耦合方法,对不同条件下井底流

场岩屑运移情况进行了仿真分析,并提出通过岩屑滞留量和岩屑运移比评价 PDC 钻头井底流场携岩性能的方法^[14]。遗憾的是上述研究主要针对固液两相流,均未考虑气侵对于环空岩屑运移规律的影响。何森等基于多相流及传热学原理,进行了气侵期间岩屑运移规律的模拟研究,并对相关敏感性参数进行分析^[15],然而未能建立符合页岩气水平井实际钻井环境的偏心环空模型。基于此,综合考虑页岩气、钻井液及岩屑物性参数影响,借助欧拉多相流模型,模拟研究了气侵期间偏心度为 0.75 的环空岩屑运移规律,分析钻井液排量、钻井液黏度、气体侵入量、岩屑颗粒直径、入口岩屑含量对环空出口岩屑体积分数的影响,以期页岩气偏心水平井制定井眼清洁方案、保证安全钻进提供理论参考。

1 基本方程

1.1 连续性方程

气相连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \partial_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g v_g) = 0 \quad (1)$$

液相连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \partial_l) + \nabla(\alpha_l \rho_l v_l) = 0 \quad (2)$$

固相连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \partial_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s v_s) = 0 \quad (3)$$

收稿日期:2022-01-27

基金项目:华北理工大学创新训练计划项目(X2021195)。

作者简介:姜瑞海(1999—),男,河北尚义人,华北理工大学矿业工程学院,学生,研究方向为油气开发工程;通信作者陈勋(1984—),男,湖南凤凰人,华北理工大学矿业工程学院,讲师,博士,研究方向为油气井工艺与流体力学。

1.2 动量守恒方程

气相动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\partial_g \rho_g \nu_g) + \nabla(\partial_g \rho_g \nu_g) = -\partial_g \nabla P + \nabla(\alpha_g \tau_g) + \partial_g \rho_g g + R_{sg} + R_{fg} - F_{vm} - F_{g-lift} \tag{4}$$

液相动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\partial_f \rho_f \nu_f) + \nabla(\partial_f \rho_f \nu_f) = -\partial_f \nabla P + \nabla(\alpha_f \tau_f) + \partial_f \rho_f g + R_{sf} + R_{gf} - F_{vm} - F_{f-lift} \tag{5}$$

固相动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\partial_s \rho_s \nu_s) + \nabla(\partial_s \rho_s \nu_s) = -\partial_s \nabla P + \nabla(\alpha_s \tau_s) + \partial_s \rho_s g + R_{fs} + R_{gs} + F_{vm} + F_{g-lift} + F_{f-lift} \tag{6}$$

1.3 紊流动能方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon \tag{7}$$

1.4 紊流动能耗散率方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{8}$$

1.5 岩屑运移方程

$$m_s[F_D(\nu_f - \nu_s) + g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} + F] = m_s g + F_{drag} \tag{9}$$

式(1)~式(9)中: ρ_g 为气相密度, g/cm^3 ; ρ_f 为液相密度, g/cm^3 ; ρ_s 为固相密度, g/cm^3 ; ρ 为混合相密度, g/cm^3 ; α_g 为气相体积分数; α_f 为液相体积分数; α_s 为固相体积分数; ν_g 为气相速度, m/s ; ν_f 为液相速度, m/s ; ν_s 为固相速度, m/s ; P 为三相共享压力, Pa ; τ_g 为气相切应力, Pa ; τ_f 为液相切应力, Pa ; τ_s 为固相切应力, Pa ; R_{sg} 、 R_{fg} 、 R_{sf} 、 R_{gf} 、 R_{gs} 、 R_{fs} 为三相颗粒交换时产生的作用力, N ; F_{vm} 为岩屑加速产生的虚质量力, N ; F_{g-lift} 为气体作用于岩屑的升力, N ; F_{f-lift} 为液体作用于岩屑的升力, N ; k 为单位质量紊流动能, m^2/s^2 ; ϵ 为单位质量紊流动能耗散率, m^2/s^2 ; μ_l 为层流黏性系数, $kg/(m \cdot s)$; μ_t 为紊流黏性系数, $kg/(m \cdot s)$; G_k 为由层流速度梯度产生的紊流动能, J ; G_b 为由浮力产生的紊流动能, J ; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为常量, 其中 $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$, $C_{3\epsilon} = 1.3$; m_s 为固体颗粒质量, kg ; g 为重力加速度, m/s^2 ; $F_D(\nu_f - \nu_s)$ 为岩屑单位质量的拖拽力, N ; F 为其他力, N 。

2 几何模型的建立

综合考虑实际钻井作业情况,以某深层页岩气水平井长为 10 m 的水平段为研究对象,基于 CFD 软件建立 $\phi 215.9\text{ mm}$ 井眼和 $\phi 127\text{ mm}$ 钻杆所形成

的偏心度为 0.75 的环空模型,并对其进行结构化网格划分,设置环空入口为 Velocity,出口为 Outflow,钻杆及井眼壁面均为 Wall。几何模型及网格划分如图 1 所示。

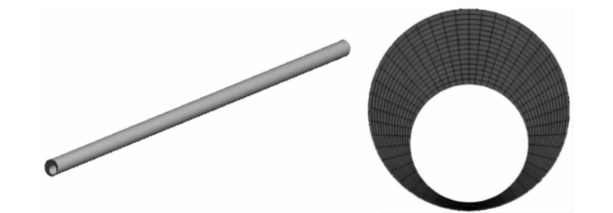


图 1 几何模型及网格划分示意图

通常情况下,深层页岩气水平井环空流体返速较高,雷诺数超过 4 000^[16],紊流模型更适于研究其岩屑运移问题。因目标层位环空发生气侵,钻井液携岩运移过程发生改变,环空内为复杂的气液固三相流场。为使得模拟流场尽可能接近真实钻井环境,将钻井液、岩屑及侵入气体均视为连续相,通过欧拉多相流方程进行稳态计算,并选择适于模拟多相紊流问题的 Realizable- $k-\epsilon$ 模型进行求解。

为使仿真模型更为合理,现对偏心环空流场岩屑运移问题做如下假设:①钻井液为不可压缩非牛顿流体;②岩屑颗粒均质,且为近球体;③水平段井眼为标准圆形;④钻井液与环空内外壁均无热量的交换,为等温流动紊流流体。

3 偏心环空三相流分布规律

气侵期间环空流场中岩屑颗粒在与气液两相互影响的过程中发生悬浮、沉积和滚动运动,受重力、浮力、拖拽力、举升力、摩擦力等共同作用^[17]。岩屑颗粒受力如图 2 所示。

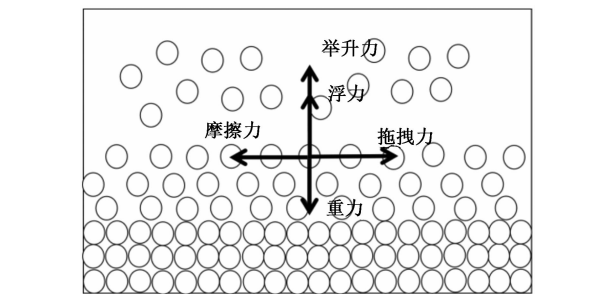


图 2 岩屑颗粒受力示意图

入口处三相均匀混合,运移过程中因密度差异而重新分布,岩屑大量聚集在环空底部形成岩屑床将影响安全钻进,需进行三相流场运移规律的模拟分析,以制定井眼清洁方案。基于 CFD 软件,设定

钻井液排量为 30 L/s,钻井液黏度为 20 mPa·s,气体入口体积分数为 0.15,岩屑颗粒直径为 3 mm,岩屑入口体积分数为 0.15,进行多相紊流求解,得到环空出口各相体积分布,如图 3 所示。

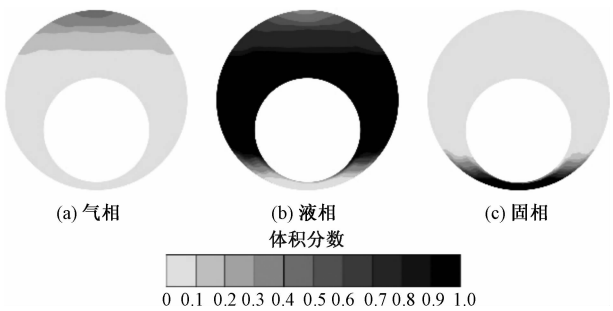


图 3 出口三相体积分布云图

由图 3 可知,气侵期间三相作用符合环空流场岩屑运移机理:在重力等因素影响下,岩屑颗粒自发向下沉积,在环空底部形成岩屑床;因密度与固液相差较大,大部分气体迅速分布于环空顶部,少量气泡与固液相作用,在下部环空形成混合物;钻井液流体主要分布在气、固两相之间,对于悬浮岩屑运移效率较高。相同条件下得到环空出口钻井液流速与动压分布如图 4 所示。

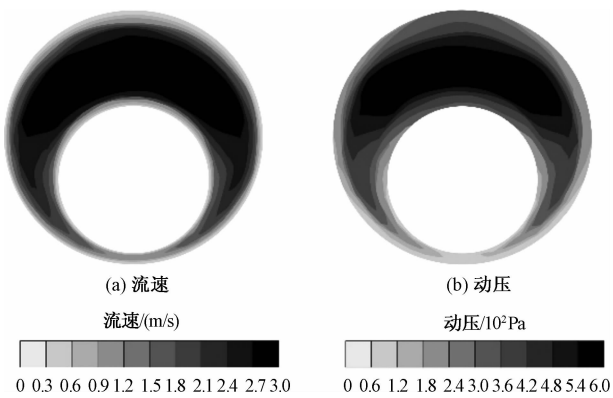


图 4 出口钻井液流速与动压分布云图

由图 4 可知,气侵期间钻井液流速与动压分布不均,上部环空流速、动压远高于下部环空,故而环空底部岩屑床运移效率将会较低,现场需据此制定井眼清洁方案。

4 岩屑运移规律的影响因素

根据上述环空流场岩屑运移机理可知,在重力等因素影响下,岩屑颗粒将自发向下沉积,在环空底部形成岩屑床。所研究水平段环空出口岩屑体积分布可代表其沉降速率,现场可据此制定井眼清洁方案。模拟实验中发现:因入口岩屑体积分数均低于 0.4,研究段运移距离有限、部分颗粒悬浮,环

空出口底部岩屑沉积面积均低于环空截面积的一半,故而仅研究下部环空(井眼中心点以下区域)岩屑体积分布即可。分别过环空出口最低点和最左侧点做环空圆截面切线,交于一点 O ,视该点为原点,横轴为距原点距离,纵轴为岩屑颗粒体积分值,可形象描述岩屑运移规律。原点及横纵轴选取如图 5 所示。

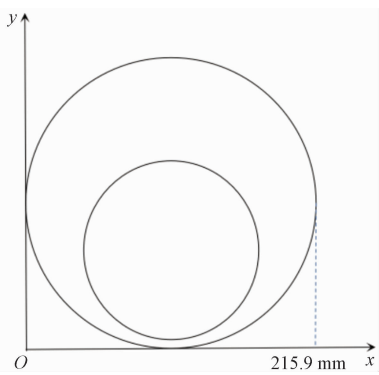


图 5 原点及横纵轴示意图

4.1 钻井液排量的影响

钻井过程中,钻井液排量是影响其在环空携岩能力的关键因素,也是地面提高井眼清洁效率的最可控因素^[18]。合理的钻井液排量可在提高钻头水功率的同时将岩屑迅速清离井底。为探究气侵期间钻井液排量对偏心环空岩屑运移规律的具体影响,以钻井液排量为唯一变量进行模拟研究,得到环空出口岩屑体积分布,如图 6 所示。

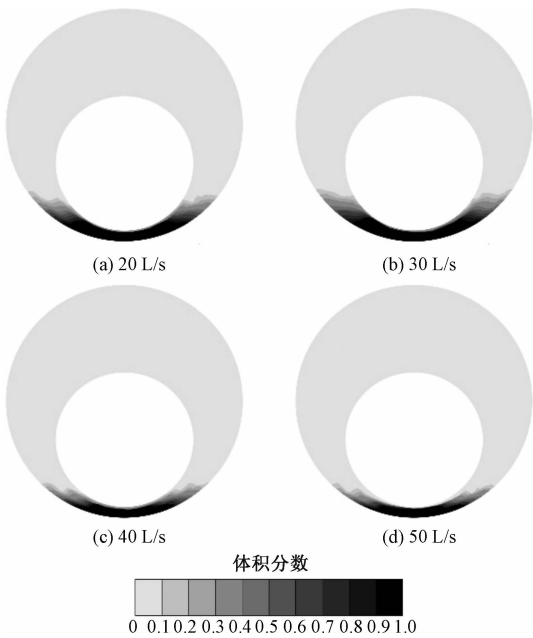


图 6 不同排量岩屑体积分布云图

由图 6 可知,随钻井液排量增大,环空出口岩屑体积分数明显减小。将下部环空岩屑体积分数值投影至坐标轴,得到不同排量岩屑体积分数变化规律曲线,如图 7 所示。

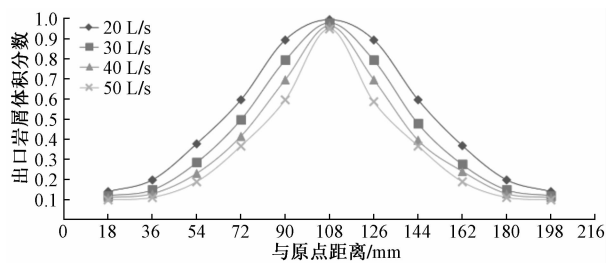


图 7 不同排量岩屑体积分数变化规律曲线

由图 7 可知,气侵期间钻井液排量对环空岩屑分布影响较大。随钻井液排量增大,环空出口岩屑体积所占比例减小,钻井液携岩效果变好。由此可见,气侵期间,在合理范围内尽可能增大钻井液排量是保证井眼清洁的有效手段。

4.2 钻井液黏度的影响

钻井液流变性能是影响其携岩效果的重要因素,也是井眼清洁的主要可控因素^[19]。现今广泛使用的水基钻井液大部分为非牛顿流体^[20],其黏度将在很大程度上决定环空岩屑的分布。气侵期间,以钻井液黏度为唯一变量,模拟研究偏心环空岩屑运移规律,得到环空出口岩屑体积分布,如图 8 所示。

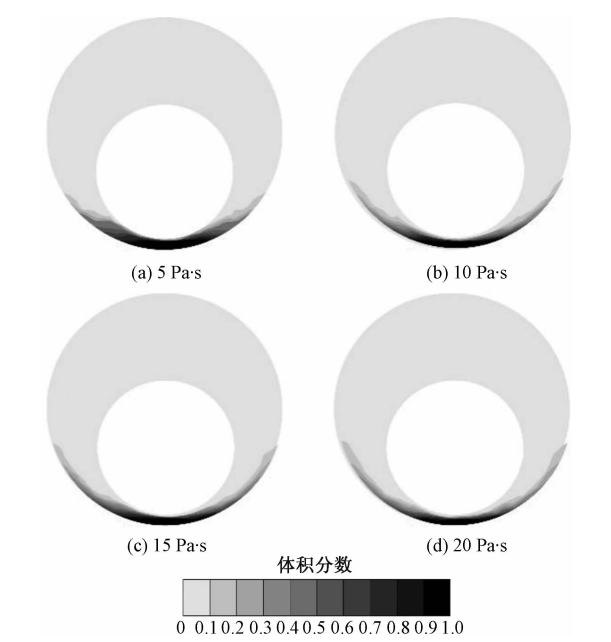


图 8 不同黏度岩屑体积分布云图

由图 8 可知,随钻井液黏度增大,环空底部岩屑床厚度减小。将下部环空岩屑体积分数值投影至坐标轴,得到不同黏度岩屑体积分数变化规律曲线,如图 9 所示。

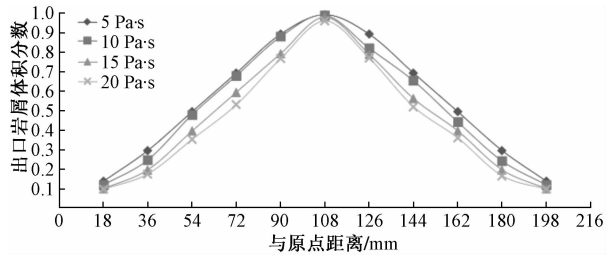


图 9 不同黏度岩屑体积分数变化规律曲线

由图 9 可知,气侵期间钻井液黏度对环空岩屑分布有较大影响。随钻井液黏度增大,下部环空岩屑床明显减小。由此可见,气侵期间较高黏度钻井液对环空携岩效果更佳。

4.3 气体侵入量的影响

气体侵入是形成复杂三相流场的原因,同时过量气体存在将造成溢流、井喷等安全事故^[21]。研究段气体侵入量始终维持在较低水平,井底流压变化很小^[22]且为深层位水平段,无发生事故可能。假设所研究环空段均位于气体侵入段之上,其中气体仅有轴向流动和井内的径向运动,无再次侵入现象。在此条件下,以气体侵入量为唯一变量,模拟研究其对偏心环空岩屑运移规律的影响,得到不同气侵量环空出口岩屑体积分布,如图 10 所示。

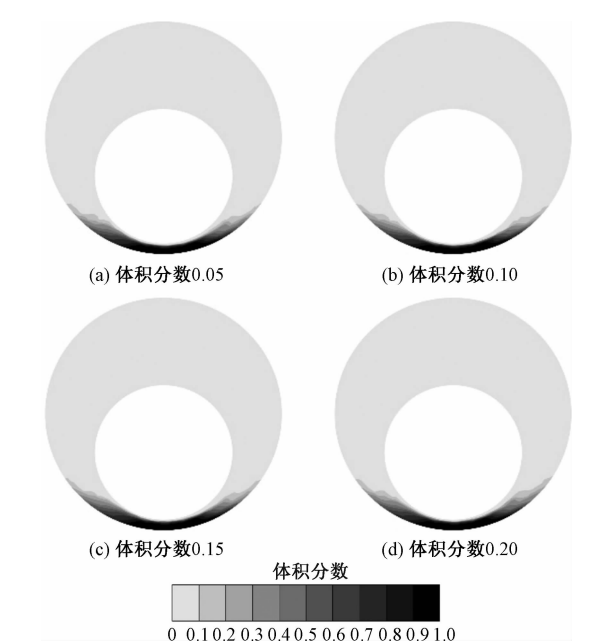


图 10 不同气侵量岩屑体积分布云图

由图 10 可知,气侵量安全范围内,气体侵入体积分数对于环空底部岩屑床的影响很小。将下部环空岩屑体积分数值投影至坐标轴,得到岩屑体积分数-气侵量变化规律曲线,如图 11 所示。

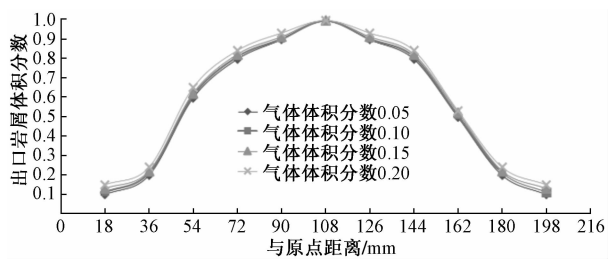


图 11 岩屑体积分数-气侵量变化规律曲线

由图 11 可知,气侵期间气体侵入体积分数对下部环空岩屑分布影响较小,随气体侵入量增大,下部环空岩屑体积分数值仅有微小上升趋势。然而,超出安全范围的气侵量是造成页岩气水平井溢流事故频发的主要原因,此时其对于环空岩屑运移规律的影响不再具有研究价值。由此可见,页岩气水平井钻井期间应主要考虑气侵对溢流事故的潜在危险性,随时监测并及时控制气侵量。

4.4 岩屑颗粒直径的影响

岩屑的质量是造成其沉积速率不同的关键因素,而粒径则是其质量的表现形式。传统水力学研究表明,环空岩屑粒径越小越易悬浮,且体积分数越小^[23]。为探究气侵期间偏心环空流场岩屑运移规律的变化,基于 CFD 软件,设定岩屑粒径为唯一变量求解计算,得到环空出口岩屑体积分布,如图 12 所示。

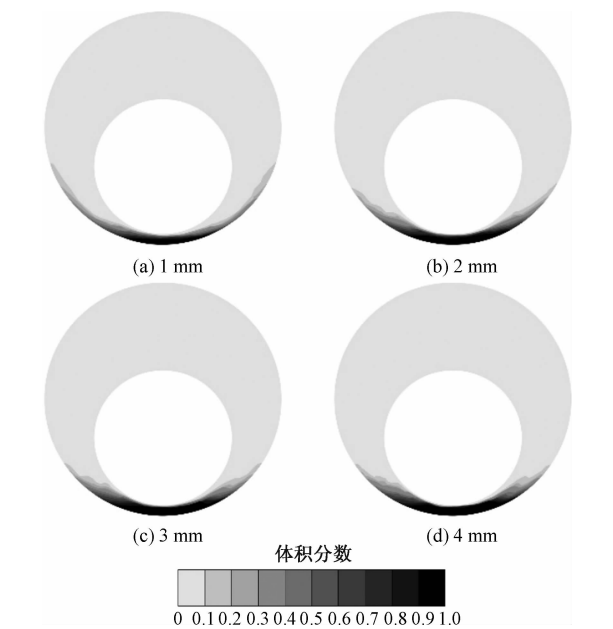


图 12 不同粒径岩屑体积分布云图

由图 12 可知,随粒径增大,环空底部岩屑床明显增厚。将下部环空岩屑体积分数值投影至坐标轴,得到岩屑体积分数-粒径变化规律曲线如图 13 所示。

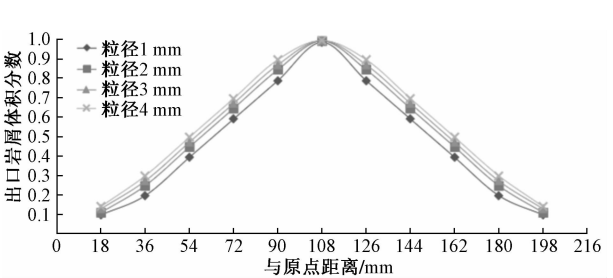


图 13 岩屑体积分数-粒径变化规律曲线

由图 13 可知,气侵期间岩屑颗粒直径对下部环空岩屑分布有一定影响,随粒径增大,下部环空两侧岩屑体积分数值增大,底部因空间狭窄,岩屑体积分数一直居高,但仍有继续升高趋势。由此可见,气侵期间需通过清洁工具控制岩屑粒径,避免岩屑床形成。

4.5 入口岩屑含量的影响

水平井岩屑含量是影响其体积分布及沉积速率的最直接因素^[24]。在所研究水平段范围内可以环空入口岩屑体积分数代表入口岩屑含量,模拟其与气、液两相共同作用时的运移过程,得到环空出口岩屑体积分布,如图 14 所示。

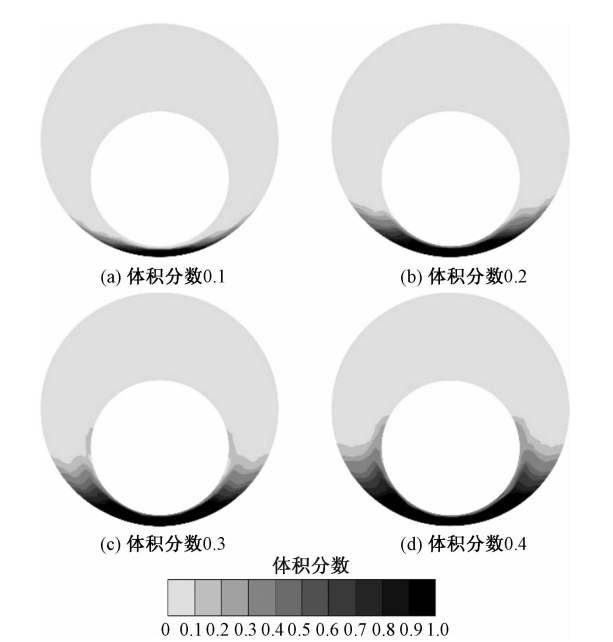


图 14 不同入口岩屑体积分布云图

由图 14 可知,随入口岩屑含量增大,环空底部岩屑床厚度增大。将下部环空岩屑体积分数值

影至坐标轴,得到岩屑体积分数入口含量-入口岩屑含量变化规律曲线,如图 15 所示。

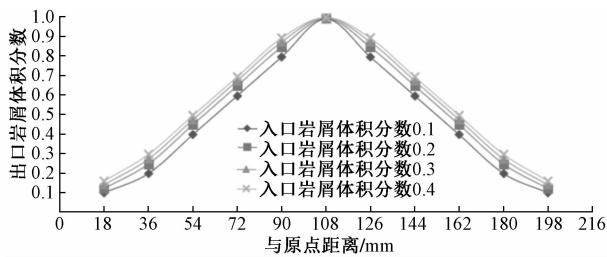


图 15 岩屑体积分数-入口岩屑含量变化规律曲线

由图 15 可知,气侵期间入口岩屑含量是影响页岩气水平井环空岩屑分布规律的关键因素。随入口岩屑含量增大,下部环空底部岩屑床增厚幅度很大。由此可见,及时将岩屑清离井底、控制岩屑含量是保持井眼清洁的关键措施。

5 结论

1)深层页岩气偏心水平井气侵期间岩屑运移问题为复杂的三相流问题,因重力分异,环空出口自上而下依次分布气、液、固三相。三相相互作用使岩屑径向分布与轴向运移规律发生改变,并受三相相关物性参数影响。

2)气侵期间,钻井液排量、钻井液黏度、气体侵入量、岩屑粒径、入口岩屑含量对偏心环空岩屑运移规律均有不同程度的影响。随入口岩屑含量和岩屑粒径的增大、钻井液排量和黏度的减小,岩屑沉积速率加快、环空出口岩屑床厚度增加;气体侵入量安全范围内对岩屑运移规律影响较小,随其增大,环空出口岩屑床厚度稍有上升。

参考文献

[1] 邓睿,谢雅西,黄兴涛. 缝洞型碳酸盐岩油藏自流注水流耦合计算模型及应用[J]. 石油化工应用, 2019, 38(1): 54-58.

[2] 庞江平,罗谋兵,熊驰原,等. 志留系页岩气录井解释技术[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(S1): 28-31.

[3] 曹园. 页岩气资源开发的经济性评价[J]. 科技和产业, 2017, 17(4): 73-75, 88.

[4] 孙彪. 页岩气储层水平井水力压裂物理模拟试验研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2014.

[5] 王再兴. 水平井波动压力计算理论建模[D]. 西安:西安石油大学, 2017.

[6] 王茜. 大位移井全井眼动态岩屑运移建模与分析研究[D]. 武汉:长江大学, 2020.

[7] 卢志红,高兴坤,曹锡玲. 气侵期间环空气液两相流模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(1): 25-28.

[8] 刘玉明,管志川,呼怀刚. 大位移井岩屑运移研究综述与展望[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(28): 88-95, 102.

[9] DORON P, BARNEA D. A three-layer model for solid-liquid flow in horizontal pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1993, 19(6): 1029-1043.

[10] HAN S M, WOO N S, HWANG Y K. Solid-liquid mixture flow through a slim hole annulus with rotating inner cylinder[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(2): 569-577.

[11] PIROOZIAN A, ISMAIL I, YAACOB Z, et al. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells [J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technologies, 2012, 2(3): 149-156.

[12] 刘少胡,谌柯宇,管锋,等. 页岩气钻井水平井段岩屑床破坏及岩屑运移机理研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7): 177-181.

[13] 范宇,方永,吴鹏程,等. 页岩气钻井岩屑运移规律仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(28): 11532-11538.

[14] 况雨春,张锐,罗金武,等. 水平井 PDC 钻头井下颗粒流数值模拟研究[J]. 石油机械, 2019, 47(7): 36-42.

[15] 何森,柳贡慧,李军,等. 气侵期间岩屑运移规律研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(16): 27-31.

[16] 许国文. 连续油管水力喷射冲蚀数值模拟研究[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(6): 12-15.

[17] 康伟. 水平井岩屑沉降及运移规律模拟研究[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2017.

[18] 周建良. 深水表层导管喷射钻进过程中钻井液排量优化研究[J]. 中国海上油气, 2012, 24(4): 50-52.

[19] 相恒富,孙宝江,李昊,等. 大位移水平井段岩屑运移实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(3): 1-6.

[20] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 2 版. 东营:中国石油大学出版社, 2012: 56-62.

[21] 王江帅,李军,柳贡慧,等. 气侵条件下新型双梯度钻井环空出口流量变化规律研究[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(4): 43-49.

[22] 李相方,庄湘琦,隋秀香,等. 气侵期间环空气液两相流动研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 73-76.

[23] 孙晓峰,纪国栋,冯松林,等. 幂律流体中岩屑颗粒沉降速度实验[J]. 断块油气田, 2016, 23(1): 120-124.

[24] 李永杰,文科,李皋,等. 气体钻井水平井钻杆偏心对环空岩屑运移规律的影响[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(13): 35-41.

Numerical Simulation of Cuttings Transport during Gas Invasion in Eccentric Horizontal Wells of Shale Gas

JIANG Ruihai, CUI Yunfeng, ZHANG Chen, CHEN Xun

(School of Mining Engineering, North China University of Technology, Tangshan Hebei 063200, China)

Abstract: In order to reveal the rule of cuttings transport during gas intrusion in shale gas eccentric horizontal wells, the effects of drilling fluid displacement, viscosity, gas intrusion, cuttings size and inlet cuttings content on cuttings distribution in the annulus with eccentricity of 0.75 during gas intrusion are studied by Eulerian multiphase turbulence calculation model. The results show that all of the above factors affect the distribution of eccentric annulus cuttings to different degrees during gas intrusion, the thickness of the cutting bed at the bottom of the annulus outlet increases with the increase of cuttings size and cuttings content, and the decrease of drilling fluid displacement and viscosity, the gas intrusion has less effect on the distribution of cuttings within the safe range, and the thickness of the cutting bed increases slightly with its increase.

Keywords: shale gas horizontal well; gas invasion; eccentric annulus; cuttings transport; multiphase turbulence