

偏心环空中钻井液滞留模型研究



朱文昭*, 林子旻

中国石化江汉石油工程公司, 湖北武汉 430000

摘要: 固井的过程时通过水泥浆替代钻井液, 最终逐渐充满整个环空间隙, 同时通过注水泥顶替得到的顶替界面可以直观的体现出顶替的效果, 顶替过程从环空间隙中心附近开始向两边扩散, 顶替界面越长, 顶替动力不足, 会导致液—液混掺及界面停止扩展的现象发生滞留与迟流, 形成钻井液滞留层, 对后期的注采过程产生较大的影响, 因此保证我们需要提升顶替效率, 防止滞留发生, 提升石油生产的工作效率。在之前的研究文章中, 大多数学者主要以平板流为研究载体, 对偏心环空中的钻井液流动, 局部滞留以及滞留层厚度进行计算研究, 在本文中以柱坐标系下运动方程为基础, 对偏心环空内钻井液的滞留进行分析与研究, 同时通过引入一个新的积分常数, 建立水泥浆或顶替液在顶替界面中的速度分布函数, 采用迭代运算的方式计算局部滞留边界, 控制误差, 更加准确的计算出滞留边界的位置, 滞留层厚度, 及不同的因素对于滞留层的厚度的影响, 为后续研究纯力学模型与流体间的混掺关系坐下铺垫。

关键词: 偏心环空; 顶替界面; 局部滞留

DOI: [10.57237/j.jest.2024.01.001](https://doi.org/10.57237/j.jest.2024.01.001)

Research on the Retention Model of Drilling Fluid in Eccentric Annulus

Zhu Wenzhao*, Lin Ziyang

Sinopec Jiangnan Petroleum Engineering Company, Wuhan 430000, China

Abstract: During the cementing process, cement slurry is used to replace drilling fluid, gradually filling the entire annular space gap. At the same time, the displacement interface obtained through cement injection can intuitively reflect the displacement effect. The displacement process starts from near the center of the annular space gap and spreads to both sides. The longer the displacement interface, the insufficient displacement power will cause the phenomenon of liquid mixing and interface stop expanding, resulting in retention and delayed flow, forming a drilling fluid retention layer. It has a significant impact on the later injection and production process, so we need to improve displacement efficiency, prevent retention, and improve the efficiency of oil production. In previous research articles, most scholars mainly used flat plate flow as the research carrier to calculate and study the drilling fluid flow, local retention, and retention layer thickness in the eccentric annulus. In this paper, based on the motion equation in the cylindrical coordinate system, the retention of drilling fluid in the eccentric annulus was analyzed and studied, and a new integral constant was introduced. Establish the velocity distribution function of cement slurry or displacement fluid at the displacement interface, use iterative operation to calculate the local retention boundary, control errors, and more accurately calculate the position of the retention boundary, the thickness of the retention layer, and the influence of different factors on the thickness of the retention layer. This lays the foundation for subsequent research on the mixing relationship between pure mechanical models and fluids.

*通信作者: 朱文昭, zzyeah34@163.com

Keywords: Eccentric Annulus; Replacement Interface; Local Retention

1 钻井液局部滞留边界模型

在固井施工中, 钻井液与水泥浆的流变模式通常以赫巴流体式来表示[5], 假设水泥浆和钻井液均属于赫巴模式, 分析在固井施工时, 偏心环空中钻井液的滞留情况。

为将问题简化, 建立纯力学模型, 现进行如下假设:

- (1) 不考虑界面处的掺混、扩散和水泥浆与钻井液接触后的化学作用等因素对顶替流动的影响。
- (2) 忽略泥饼的存在。
- (3) 水泥浆与钻井液直接接触, 无其他流体间的相互作用。

在环空中水泥浆的顶替效率无法达到 100%, 在环空中一定会出现滞留区域, 在偏心环空中更易出现钻井液的滞留, 在实际的钻井施工中, 出现整体滞留的情况不大, 因此提升顶替效率便成为整个固井工程中最重要的一部分[1-4]。

施工过程中, 通过改变不同的流体参数, 可避免钻井液整体滞留的情况, 但在环空井壁及套管附近的流体由于流动阻力过大, 容易产生局部滞留[6-10]。滞留的钻井液阻碍了水泥浆的胶结, 从而不能有效地封隔环空, 在后期生产中会形成油气通道, 增加了油气井安全生产的风险性, 同时也限制了后期增产措施的实施效果[11-12]。

当顶替流动趋于稳定, 或瞬间稳定时, 两种流动介质在边界处存在如下条件:

$$u_c|_{rb} = u_m|_{rb} \quad (1)$$

$$T_{rc}|_{rb} = T_{rm}|_{rb} \quad (2)$$

由速度相等条件可确定流动边界:

$$u = \int_1^\xi \frac{PR^2(\xi^2 + \lambda) \left\{ 1 - \frac{\tau_0}{\left[\frac{P^2 R^2 (\xi^2 + \lambda)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{n}}}{2k^{\frac{1}{n}} \xi \left[\frac{P^2 R^2 (\xi^2 + \lambda)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{n-1}{2n}}} d\xi \quad (3)$$

若设与水泥浆或顶替液有关的参数均用下角标 c

表示, 与钻井液有关的参数均用下角标 m 表示, 则水泥浆或顶替液速度场:

$$u_c = \int_1^\xi \frac{P_c R^2 (\xi^2 + \lambda_c) \left\{ 1 - \frac{\tau_{0c}}{\left[\frac{P_c^2 R^2 (\xi^2 + \lambda_c)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{n_c}}}{2k^{\frac{1}{n_c}} \xi \left[\frac{P_c^2 R^2 (\xi^2 + \lambda_c)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{n_c-1}{2n_c}}} d\xi \quad (4)$$

钻井液速度场:

$$u_m = \int_1^{\xi_b} \frac{P_m R^2 (\xi^2 + \lambda_m) \left\{ 1 - \frac{\tau_{0m}}{\left[\frac{P_m^2 R^2 (\xi^2 + \lambda_m)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{n_m}}}{2k^{\frac{1}{n_m}} \xi \left[\frac{P_m^2 R^2 (\xi^2 + \lambda_m)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{n_m-1}{2n_m}}} d\xi \quad (5)$$

设流动界面 r 向径量为 rb , $r_b = R\xi_b$, 任意周向角

下:

$$u_m = \int_1^{\xi_b} \frac{P_m (\xi^2 + \lambda_c) \left\{ 1 - \frac{\tau_{0m}}{\left[\frac{P_m^2 R^2 (\xi^2 + \lambda_m)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{n_m}}}{k^{\frac{1}{n_m}} \xi \left[\frac{P_m^2 R^2 (\xi^2 + \lambda_m)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{n_m-1}{2n_m}}} d\xi \quad (6)$$

求解出 ξ_b , 既可以确定出边界和径向位置。值得注意的是, 对于环空流场特征, 应有两个 r_b 的径量,

分别位于环空内侧和外侧，即套管处与井壁处。其中界面位置与环空内外边界的关系应该为从外向内依次求得解。同时也应注意，流体不同，除流变参数存在差异外，在压力梯度积分常数也不相同[13-15]，据此上式计算，可以获得多点的顶替界面径量分布图。

局部滞留边界的确定主要依据两相流界面剪应力相等的条件：

$$T_{rz} \big|_{rb} = T_{rz} \big|_{rm} \quad (7)$$

$$T_{rz} = \frac{1}{2} PR \frac{\xi^2 + \lambda}{\xi} \quad (8)$$

则：

$$\frac{1}{2} PR \frac{\xi_b^2 + \lambda}{\xi_b} = PR \frac{\xi_b^2 + \lambda_m}{\xi_b} \quad (9)$$

对于任一角度坐标 θ ：

$$P_c \frac{\xi_b^2 + \lambda}{\xi_b} = P_m \frac{\xi_b^2 + \lambda_m}{\xi_b} \quad (10)$$

$$\xi_b = \left[\frac{P_m \lambda_m - P_c \lambda_c}{P_c - P_m} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

若此时，钻井液边界处剪切应力：

$$T_{rz} \leq \tau_{0m} \quad (12)$$

$$\frac{P_m R}{2} \cdot \frac{\xi_b^2 + \lambda_m}{\xi_b} \leq \tau_{0m} \quad (13)$$

则此时，钻井液滞留，滞留的半径坐标区域为 $(Ke - \xi_b, \xi_b - 1)$ 。

若此时， $T_{rz} > \tau_{0m}$ ，则不存在滞留区域，也不存在滞留层。

按上式解得 ξ_b 若为两位式，有两个滞留区，若一位时，为一个滞留区且：

$$\xi_b - Ke \geq \frac{1}{2}(1 - Ke) \quad (14)$$

则滞留区在环空外侧，否则在内侧。

按剪切力相等原则，可以用水泥浆或顶替液流动计算滞留区域：

$$\frac{P_c R}{2} \cdot \frac{\xi_b^2 + \lambda_c}{\xi_b} \leq \tau_{0m} \quad (15)$$

取等号计算临界条件（计算过程中 P 取负值）：
即：

$$-\frac{P_c R}{2} \cdot \frac{\xi_b^2 + \lambda_c}{\xi_b} \leq \tau_{0m} \quad (16)$$

$$P_c R \xi_b^2 + 2\tau_{0m} \xi_b + P_c R \lambda_c = 0 \quad (17)$$

$$\xi_b = \frac{-2\tau_{0m} \pm \sqrt{4\tau_{0m}^2 - 4P_c^2 R^2 \lambda_c}}{2P_c R} \quad (18)$$

此时可以确定局部滞留边界。

2 影响偏心环空中钻井液滞留的因素及规律

2.1 钻井液局部滞留层边界的计算

以计算流核宽度的计算程序为基础载体，编制新程序，利用式(18)重新进行迭代运算，对钻井液局部滞留边界进行计算。

积分常数 λ 的计算公式：

$$\lambda = (ke^2 - 1) \frac{\int_{K_e}^1 \left[\frac{P_c^2 R^2 (\xi^2 + \lambda_c)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{n-1}{2n}} d\xi}{2 \ln K_e \left\{ 1 - \frac{\tau_{0m}}{\left[\frac{P_c^2 R^2 (\xi^2 + \lambda_c)^2}{4\xi^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}} \quad (19)$$

将式(19)计算所得的 ξ_b 与 λ 及其他已知参数代入式(18)计算是否满足屈服条件，若满足，则计算所得的 ξ_b 即为局部滞留的边界位置，若不满足，所的参数不符合计算需要，证明了偏心环空在该点处并未发生滞留，滞留边界以及滞留层也不会存在。

2.2 钻井液局部滞留层厚度的计算

当钻井液局部滞留时，径向滞留区域的边界为

$$r_b = R\xi_b$$

根据上述的模型及计算方法，对于偏心环空钻井液滞留层厚度进行计算，选取如下的基本参数： $\tau_{0m}=4.8\text{Pa}$ 、 $n=1.0$ 、 $k_c=0.03\text{Pa}\cdot\text{s}^{0.7}$ 、 $\rho_c=1.9\text{g}/\text{cm}^3$ 压力梯度： $P=1000\text{Pa}/\text{m}$ ；环空内外半径分别为： $R_1=0.07795\text{m}$ 、

$R_2=0.122375\text{m}$ 。
采用控制变量法分析计算不同的井斜角，偏心率，以及压力梯度条件下的局部滞留层的边界，滞留层厚度，及影响滞留层厚度的变化规律曲线。



图 1 模拟计算软件界面

2.2.1 井斜角对滞留层厚度的影响

井斜角为 15 时，通过模拟计算得到不同周向角下滞留边界及滞留层厚度，计算结果如表 1 至表 3 所示。

表 1 偏心度为 0.1 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.033154	0.03254	0.031051	0.02951
环空外半径 R	0.123375	0.1222984	0.118961	0.116354
滞留边界（套管处）			0.88231	0.89124
滞留边界（井壁处）	0.95679	0.956215	0.96349	0.96797
滞留层厚度 mm（套管处）	0	0	0.5	0.7
滞留层厚度 mm（井壁处）	1.732	1.669	1.477	1.428

表 2 偏心度为 0.4 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.033154	0.03254	0.03151	0.02951
环空外半径 R	0.126375	0.1256969	0.1192543	0.112354
滞留边界（套管处）			0.90132	0.91927
滞留边界（井壁处）			0.95379	0.91154
滞留层厚度 mm（套管处）	0	0	0.9	1.6
滞留层厚度 mm（井壁处）	0	0	1.7	2.8

表 3 偏心度为 0.6 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.0331554	0.032754	0.031051	0.029451
环空外半径 R	0.129413	0.1279694	0.1192543	0.112354
滞留边界（套管处）			0.92314	0.95227
滞留边界（井壁处）			0.93379	0.90154
滞留层厚度 mm（套管处）	0	0	2.0	2.9
滞留层厚度 mm（井壁处）	0	0	2.7	3.9

井斜角为 30 时，通过软件模拟计算可以得到不同偏心率在周向角下滞留边界及厚度，计算结果如表 4 至表 6 所示。

表 4 偏心度为 0.1 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.034264	0.033589	0.031861	0.030219
环空外半径 R	0.123871	0.1234568	0.1201611	0.118754
滞留边界（套管处）			0.97732	0.97581
滞留边界（井壁处）			0.95379	0.96581
滞留层厚度 mm（套管处）	0	0	0.6	0.9
滞留层厚度 mm（井壁处）	1.745	1.69	1.623	1.51

表 5 偏心度为 0.4 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.034668	0.033951	0.031273	0.0304518
环空外半径 R	0.126871	0.126119	0.121143	0.119627
滞留边界（套管处）			0.96529	0.94326
滞留边界（井壁处）			0.90214	0.91251
滞留层厚 mm（套管处）	0	0	1.6	2.7
滞留层厚 mm（井壁处）	0	0	2.0	2.9

表 6 偏心度为 0.6 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.0349231	0.0340541	0.030854	0.029341
环空外半径 R	0.127871	0.126516	0.1220337	0.115237
滞留边界（套管处）			0.94136	0.87198
滞留边界（井壁处）			0.926814	0.88221
滞留层厚 mm（套管处）	0	0	2.2	3.5
滞留层厚 mm（井壁处）	0	0	2.9	4.0

图 2 与图 5 为井斜角 15 时，套管处及井壁处钻井液滞留厚度变化。

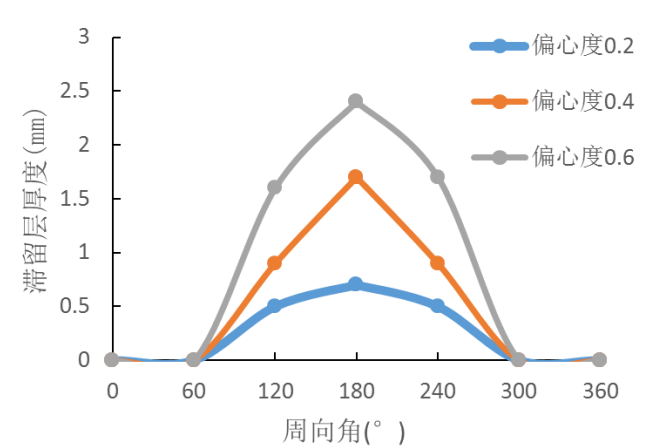


图 2 套管处钻井液滞留层厚度变化

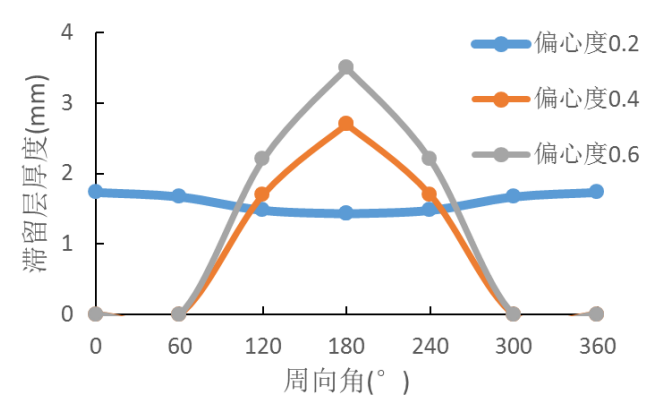


图 3 井壁处钻井液滞留层厚度变化

图 3 与图 4 为井斜角 30 时，套管处及井壁处钻井液滞留厚度变化。

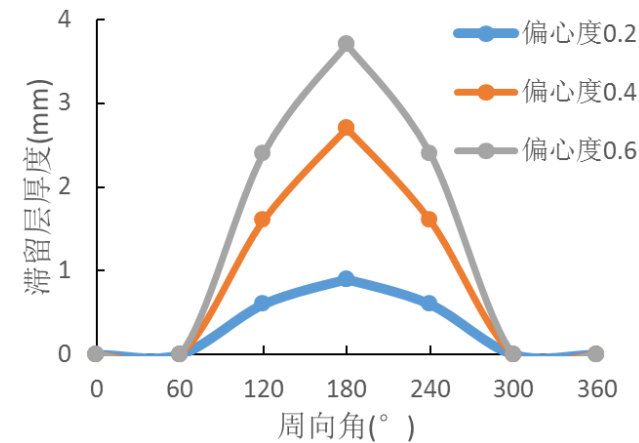


图 4 套管处钻井液滞留层厚度变化

综合分析图 2 至图 5 可以得出，井壁处滞留层厚度明显高于套管处滞留层的厚度，且随着井斜角的增加，钻井液滞留层厚度逐渐增大，即，直井段顶替效率会明显高于斜井段的顶替效率。

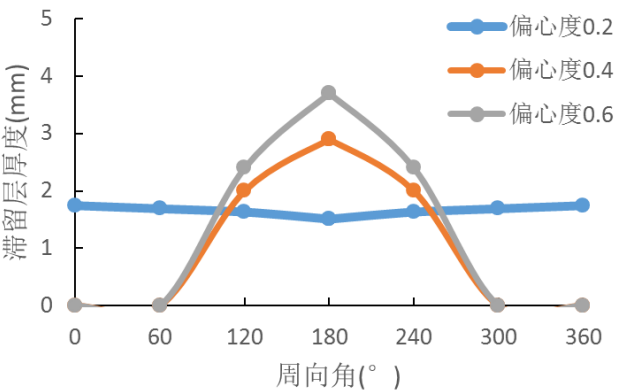


图 5 井壁处钻井液滞留层厚度变化

2.2.2 偏心度对滞留层厚度的影响

在井斜角为 0 时，选取偏心度 0.1，0.2，0.4，0.6 进行模拟计算，得到在不同偏心度下的滞留边界及滞留层厚度，计算所得结果如表 7 至表 10 所示。

表 7 偏心度为 0.1 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.0342354	0.0331068	0.0320374	0.0308733
环空外半径 R	0.123175	0.122023	0.117579	0.110152
滞留边界（套管处）			0.89147	0.91137
滞留边界（井壁处）	0.97679	0.962125	0.951343	0.967191
滞留层厚度 mm（套管处）	0	0	1.5	2.1
滞留层厚度 mm（井壁处）	1.432	1.873	2.511	3.013

表 8 偏心度为 0.2 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.0344138	0.0333157	0.0324167	0.0312653
环空外半径 R	0.123175	0.122376	0.119723	0.113247
滞留边界（套管处）			0.90326	0.93341
滞留边界（井壁处）		0.924316	0.962415	0.977368
滞留层厚度 mm（套管处）	0	0	2.09	4.21
滞留层厚度 mm（井壁处）	0	1.323	2.734	3.327

表 9 偏心度为 0.4 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.0348726	0.0336278	0.0328351	0.0316271
环空外半径 R	0.123175	0.122735	0.120324	0.119243
滞留边界（套管处）			0.96231	0.98124
滞留边界（井壁处）			0.971343	0.967191
滞留层厚度 mm（套管处）	0	0	5.63	10.02
滞留层厚度 mm（井壁处）	0	0	7.71	10.23

表 10 偏心度为 0.6 时计算机输出的各类参数

周向角	0	60	120	180
积分参数 λ	0.0350734	0.0338361	0.0331335	0.0317665
环空外半径 R	0.123175	0.122916	0.121329	0.120143
滞留边界 (套管处)			0.96231	0.98124
滞留边界 (井壁处)			0.981343	0.977191
滞留层厚度 mm (套管处)	0	0	6.21	13.36
滞留层厚度 mm (井壁处)	0	0	7.83	15.63

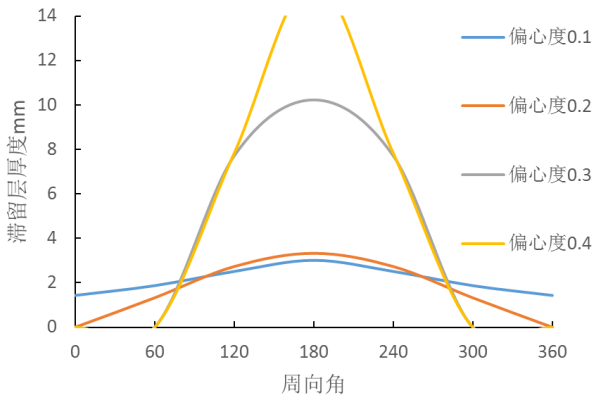


图 6 井壁处钻井液滞留层厚度变化

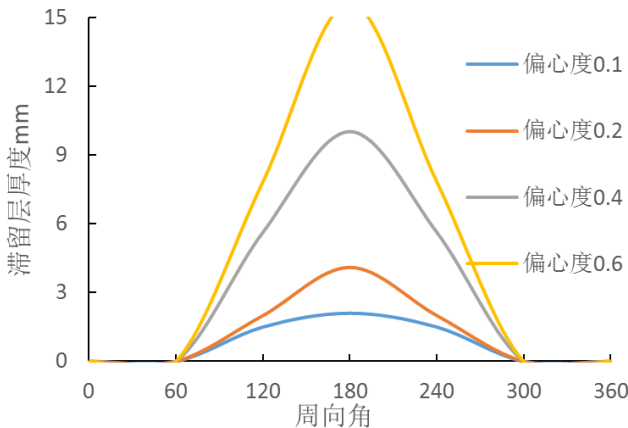


图 7 套管处钻井液滞留层厚度变化

综合分析图 6、7 可以得出，井壁处钻井液滞留层厚度要高于套管处，随着偏心度的增加，滞留区域逐渐由宽间隙处向窄间隙处转移，窄间隙处的钻井液滞留现象变得愈发严重，在偏心度达到 0.6 时，环空内全部滞留。因此，保证套管居中或处于较低偏心度对提升固井质量有着重要的作用。

3 结论

1) 利用软件编程，通过输入已有的参数利用迭代

法计算，直接的计算出环空中钻井液滞留边界，进而计算出滞留层的厚度，更加准确，直观的，对滞留边界滞留厚度，进行深入的分析。

- 2) 偏心度较低时，滞留区域主要集中在环空窄间隙处，但随着套管偏心度的增长，环空中滞留层厚度不断的增加，滞留范围也逐渐的增大。
- 3) 偏心度较低时，滞留层的最大厚度在井壁处，随着井斜角的增加，钻井液滞留层厚度逐渐增大。
- 4) 在不同的压力梯度下，钻井液滞留主要集中在窄间隙处。井壁处钻井液的滞留范围随压力梯度的增大而逐渐减小，且滞留厚度逐渐降低；而套管处钻井液的滞留范围变化较大，当压力梯度为 500Pa/m 时，套管附近都会有钻井液滞留，此时窄间隙处钻井液滞留厚度明显高于宽间隙处钻井液滞留厚度；当压力梯度高于 1500Pa/m 时，套管附近都不会有钻井液滞留。因此，在施工条件允许的情况下，提高压力梯度有利于提高顶替效率。以减小钻井液在环空内的滞留。

参考文献

- [1] 陈扬. 偏心环空水平井固井顶替实验研究 [D]. 中国石油大学 (北京), 2016.
- [2] 林子暘. 固井中钻井液滞留模型及两相流界面变化 [D]. 东北石油大学, 2019.
- [3] 步玉环, 侯献海, 郭胜来. 低温固井水泥浆体系的室内研究 [J]. 钻井液与完液, 2016, 33(01): 79-83.
- [4] 陈瑞峰. 水平井注水泥流动过程计算研究 [D]. 西南石油大学, 2017.
- [5] 郑永刚. 偏心环空注水泥顶替机理研究 [J]. 天然气工业, 1995(03): 46-50.

- [6] 郑永刚, 郝俊芳. 固井中水泥浆顶替泥浆的运动规律研究 [J]. 西部探矿工程, 1995(03): 29-32.
- [7] 李帮达, 刘永健, 张景富. 偏心环空中幂律流体层流螺旋流流动规律的研究 [J]. 应用数学和力学, 1993(07): 593-600.
- [8] 郭小阳, 刘崇建, 张明深, 张勇, 张朝晖. 提高注水泥质量的综合因素 [J]. 西南石油学院学报, 1998(03): 57-59.
- [9] 郭小阳, 张玉隆, 杨远光. 长庆油田提高固井质量与套管防腐技术研究 [J]. 西南石油学院学报, 1998(02): 55-60.
- [10] 高永海, 孙宝江, 赵欣欣, 王志远, 殷志明, 王金波. 水合物钻探井筒多相流动及井底压力变化规律 [J]. 石油学报, 2012, 33(05): 881-886.
- [11] 冯福平, 艾池, 于法浩, 崔志华, 徐海粟, 张嵇南. 基于 Hele-shaw 模型的斜井偏心环空顶替流体密度差优化 [J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(22): 125-133.
- [12] 冯福平. 偏心环空注水泥顶替界面边界及形状描述模型研究 [D]. 东北石油大学, 2014.
- [13] 王涛, 展转盈, 燕迎飞. 注水泥环空动态顶替界面长距离数值模拟 [J]. 非常规油气, 2018, 5(06): 87-93.
- [14] 李明忠, 王瑞和, 王成文, 方群. 层流顶替钻井液滞留层厚度研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2013, 28(05): 531-537.
- [15] 孙晓东. 偏心环空流动的数值模拟研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2015.