

# 水平孔携岩能力影响因素数值模拟研究

泮 伟<sup>1</sup>, 乌效鸣<sup>2</sup>

(1.湖北水利水电职业技术学院,湖北 武汉 430074; 2.中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430074)

**摘要:**梳状孔是目前煤层气开采的主要技术手段之一,水平孔作为梳状孔的主孔,研究其在不同条件下岩屑的分布情况,可作为钻进参数选择的重要依据。本文基于 FLUENT 流体力学模拟软件,分析了钻杆转速、钻井液粘度、环空返速、岩屑浓度、岩屑颗粒直径、钻孔偏心等因素对水平孔中携岩能力的影响。结果表明,随钻杆转速、环空返速、钻井液粘度递增,环空岩屑浓度峰值降低,对岩屑运移有利;而岩屑浓度、岩屑直径的增大导致岩屑浓度峰值增大,加大了携岩压力,这 2 个参变量的增大对运移岩屑是不利的。钻井液粘度、钻杆转速对岩屑的运移和分布起重要的决定作用,环空返速、岩屑浓度、岩屑直径作用次之。

**关键词:**水平孔;携岩能力;FLUENT;环空返速

**中图分类号:**P634.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)09-0001-07

## Numerical simulation study on factors affecting cuttings-carrying capacity in horizontal holes

PAN Wei<sup>1</sup>, WU Xiaoming<sup>2</sup>

(1.Hubei Water Resources Technical College, Wuhan Hubei 430074, China;

2.China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** The comb-like multi-lateral hole is one of the main technical methods for coalbed methane mining. Study of the distribution of cuttings under different conditions in the horizontal hole, which works as the mother hole of comb-like laterals, can be used as an important basis for the selection of drilling parameters. Based on FLUENT fluid dynamics simulation software, the paper analyzes the effects of drill string rpm, drilling fluid viscosity, annulus velocity, debris concentration, debris particle size and borehole eccentricity on the cuttings-carrying capacity in horizontal holes. The result can provide a scientific basis for rational selection of drilling parameters during the drilling process.

**Key words:** horizontal holes; cuttings-carrying capacity; FLUENT; annulus velocity

## 0 引言

煤层气作为三大主要气体能源之一,其开采主要靠降压使煤层气从裂隙中释放出来。我国煤层气储层具有低渗透率、低饱和度、高压、低孔隙度、强烈的非均质性和各向异性的特点<sup>[1-4]</sup>,采用梳状孔是有效解决这些难点的技术手段<sup>[5-7]</sup>。梳状孔是由水平主孔的“梳柄”及多个水平且平行共面的分支孔“梳齿”构成,先在煤层顶板或其他合适的地层层位施工水平主孔,然后在孔眼两侧合适的位置侧钻多

个水平分支孔,或者分支孔上钻进第二级分支孔<sup>[8-12]</sup>。水平孔中钻井液所受重力与其流动方向垂直,钻井液中岩屑在重力作用下,有沉向重力低边的运动趋势,极易形成岩屑床,大大改变了水平孔中钻井液的流态<sup>[13-21]</sup>,所以对水平孔中携岩能力的影响因素进行分析是十分必要的。

## 1 FLUENT 软件数值模拟模型建立

### 1.1 FLUENT 软件简介

**收稿日期:**2019-11-22; **修回日期:**2020-08-02 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.09.001

**基金项目:**国家科技重大专项“煤矿区煤层气高效抽采、集输技术与装备研制”之子项目“井下小曲率梳状钻孔钻进技术与装备”(编号:MT-KJ2009-040)

**作者简介:**泮伟,女,汉族,1985年生,讲师,地质工程专业,硕士,从事工程地质方面的研究及教学工作,湖北省武汉市珞狮南路306号,2466389983@qq.com。

**引用格式:**泮伟,乌效鸣.水平孔携岩能力影响因素数值模拟研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(9):1-7.

PAN Wei, WU Xiaoming. Numerical simulation study on factors affecting cuttings-carrying capacity in horizontal holes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(9):1-7.

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)是通过计算机模拟流体的流动过程<sup>[22-23]</sup>,并利用动量守恒方程、质量守恒方程和能量守恒方程求解,得出流体在分布连续的区域中的离散解,然后直观显示离散解的分布情况来仿真模拟实际流体流动情况。本文基于常用的CFD软件FLUENT建立水平孔数值模拟模型,采用有限体积法进行数值分析<sup>[24-25]</sup>。

建模步骤如下:

- (1)利用SolidWorks绘制计算模型,将绘制好的几何模型导入GAMBIT,划分计算网格;
- (2)将GAMBIT划分好的计算网格导入FLUENT并选择3D求解器,检查网格状况;
- (3)定义钻井液流体和岩屑的性质;
- (4)选择欧拉两相流模型,把钻井液作为第一相,煤屑作为第二相;
- (5)选择和确定模型的边界类型和不同的边界条件,主要有流速边界和压力边界;
- (6)确定模拟参数的取值,并对流场模型进行初始化;
- (7)进行求解计算;
- (8)保存结果,进行后处理等。

## 1.2 模型的建立及边界条件的定义

建立模型:钻孔直径96 mm,钻杆外径73 mm,钻孔轴线长度50 m,利用GAMBIT自动划分网格(共计36000个)。

入口边界条件:给出水平段环空入口固相、液相的初始条件,包括钻井液的密度和入口流速,岩屑颗粒的粒径、入口速度和初始体积浓度。

出口边界条件:出口与地表相连,取出口边界条件为压力边界,值大小为常态气压1个标准大气压。

孔壁边界条件:钻孔边壁设置为无相对滑移的边界条件,不存在湍流脉动。钻孔边壁为零流速到正常流速的变化距离短,且定义相邻接的粘性层中雷诺数很小。

## 2 水平孔携岩能力因素模拟分析

本文选取钻杆转速、环空返速、钻井液粘度、岩屑浓度、钻杆偏心等因素模拟分析其对水平孔携岩能力的影响<sup>[10-12]</sup>,模拟时设定岩屑入口流速1.5 m/s,钻井液密度1.03 g/cm<sup>3</sup>,煤屑密度1.5 g/cm<sup>3</sup>。

### 2.1 钻杆转速对携岩能力的影响

初始条件:流体粘度为20 mPa·s,岩屑浓度1%,颗粒直径0.5 mm,模拟钻杆逆时针回转时转速 $n$ 分别为0、100、200 r/min条件下岩屑的体积分布情况,为了描述方便,将该环空以圆心为基点、水平向右为起始0°、逆时针旋转一圈为360°,用角度表示方位,模拟结果如图1所示。

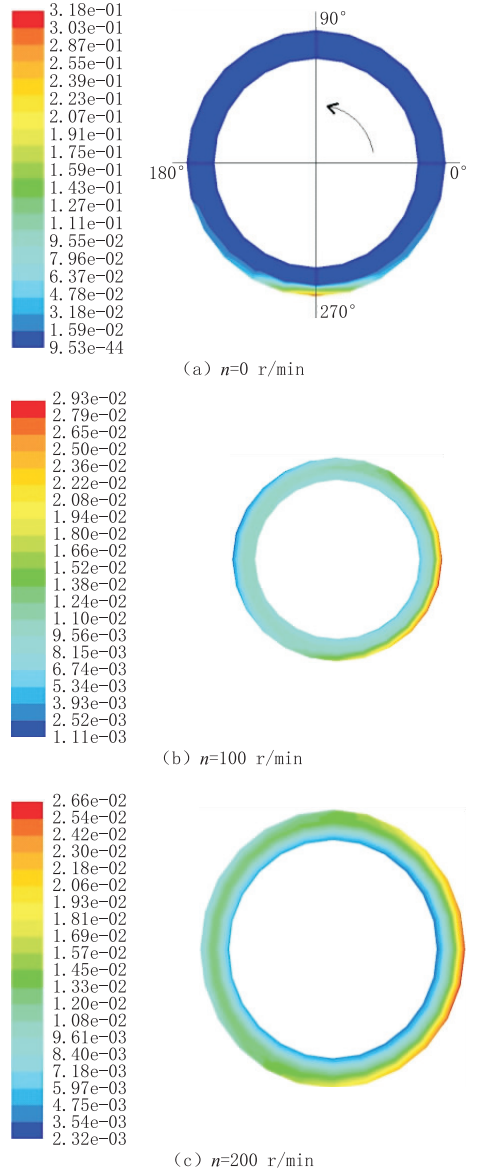


图1 不同钻杆转速的环空岩屑体积分布

Fig.1 Volume distribution of cuttings in the annulus at different drill pipe rpm

从图1分析得知,当钻杆转速不同时,岩屑浓度明显分布不同,表明钻杆转速对携岩效果有明显影响。理想情况下,水平孔中钻杆转速稳定时,钻井液携岩效果相同,每个横截面的岩屑浓度分布相同。

(1)岩屑高浓度区的位置不同:转速由0、100至

200 r/min 等阶增速过程中,高岩屑浓度区中心分别位于近 270°、340°、0°方位的地方,呈沿孔壁逐渐右移的趋势。

(2)岩屑浓度峰值不同:钻杆静止时,环空岩屑最大浓度为 31.8%;转速 100 r/min 时该值为 2.93%;转速 200 r/min 时岩屑最大浓度为 2.66%。峰值浓度逐渐变小,尤其在 0~100 r/min 的过程中减小程度最大,钻杆转速为 100~200 r/min 时岩屑浓度峰值变化不大。

(3)钻孔环空中平均岩屑浓度不同:当钻杆静止时,环空平均岩屑浓度约为 0,岩屑基本都沉到水平孔底部,随钻杆旋转环空中岩屑进入环空呈悬浮态的数量增多,100 r/min 时环空岩屑浓度约 0.87%,而 200 r/min 时浓度增至 1.25%。

(4)低岩屑集中区位置变化:钻杆静止时,整个环空都是低岩屑集中区,100 r/min 时岩屑低浓度区位于岩床区域相对的环空外壁处,200 r/min 时低浓度区主要围绕在钻杆外壁,即内环空外围区域。

钻杆旋转与否直接导致岩屑运动和分布情况的彻底变化,可见钻杆的旋转对岩屑运移的意义重大。钻杆旋转带动环空钻井液的环空流动,钻井液除了沿水平轴向流动外,还有沿环空旋转的趋势,最终的流动具有绕钻杆螺旋流动的特质。旋转也使本来存在于孔底的高浓度岩屑带平移至截面偏右的位置,部分岩屑被带动,悬浮岩屑增多,环空岩屑浓度增大,岩屑分布越均匀,岩屑的浓度峰值越小。低岩屑区集中范围由孔壁移至钻杆外围,主要由于钻速的提高,导致流体在离心力的作用下有向环空外壁运动的趋势,当流速较大时,足够大的动能使浆液带动岩屑多在环空较大直径范围处运移,钻杆外围岩屑较少,浓度降低。

该模拟证明钻杆转速为 100~200 r/min 能够带动大部分岩屑的运动,是适宜的。

## 2.2 环空返速对携岩性能的影响

初始条件:流体粘度为 20 mPa·s,颗粒浓度 1%,钻杆转速 200 r/min,颗粒直径 0.5 mm,模拟钻井液环空返速  $v$  分别为 1、1.5、2 m/s 的岩屑分布情况,结果如图 2 所示。

从图 2 分析得知,在不同环空返速情况下,岩屑仍然主要分布在右侧孔壁处,对称轴约在 0°方位,环空岩屑浓度以该对称轴呈对称分布。

(1)钻杆外围是低岩屑浓度带,这主要是由 200

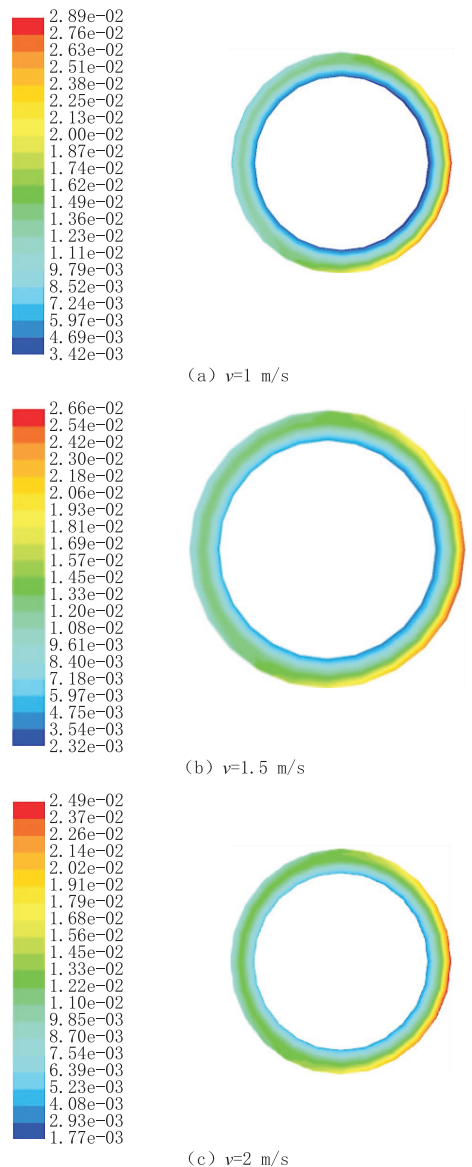


图 2 不同环空返速环空岩屑体积分布

Fig.2 Volume distribution of cuttings in the annulus at different up-hole velocity

r/min 的钻杆转速决定的。

(2)随着环空返速的增长,岩屑浓度峰值由 2.89%、2.66%降至 2.49%。低岩屑浓度极值分别为 0.34%、0.23%、0.18%。随返速增大,浓度极大、极小之间的差值逐渐变小(分别为 2.55%、2.43%、2.31%),说明环空中越来越多的岩屑被带起,环空中岩屑颗粒分布越来越均匀。

模拟证明结合适宜的钻杆转速,环空返速为 1.5 m/s 左右是适宜的。

## 2.3 钻井液粘度对携岩性能的影响

初始条件:环空返速 1.5 m/s,颗粒浓度 1%,钻

杆转速 200 r/min, 颗粒直径 0.5 mm, 模拟钻井液粘度  $\eta$  为 1、20、30 mPa·s 情况下岩屑分布情况, 结果如图 3 所示。

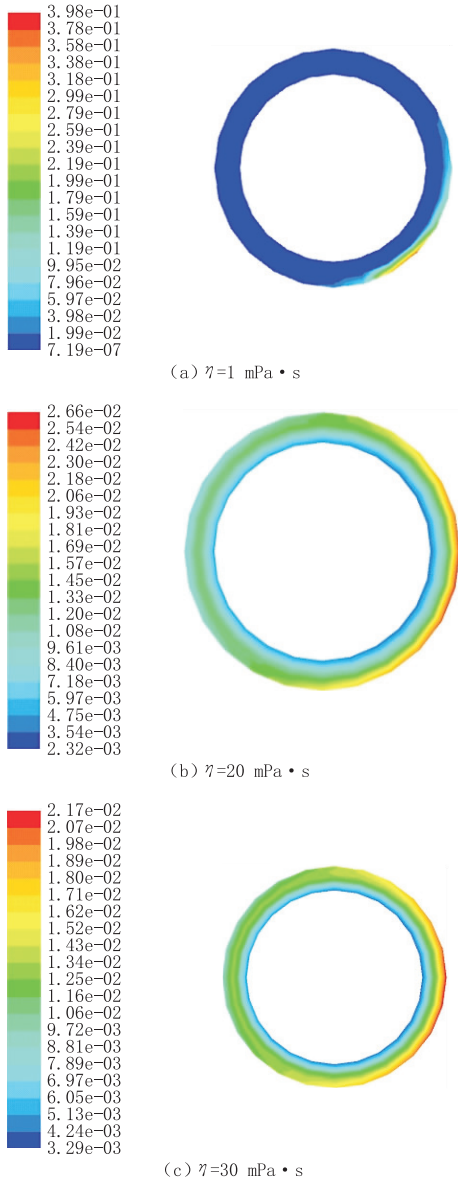


图 3 不同钻井液粘度岩屑体积分布

Fig.3 Volume distribution of cuttings in the annulus at different drilling fluid viscosity

从图 3 分析得知, 钻井液粘度变化时, 高岩屑浓度区仍然集中在环空外壁面。钻井液粘度较高时, 环空岩屑浓度相对越均匀。

(1) 岩屑集中区所处的位置不同, 粘度为 1 mPa·s 时, 岩屑集中在 315° 方位, 而当粘度增大后岩屑主要集中在 350° 方位。

(2) 随浓度升高, 岩屑峰值浓度由 39.8% 降到 2.66%、2.17%, 且环空内平均浓度由 0 逐渐升高到

1.3% 左右, 充分证明粘度升高, 钻井液的包裹、粘滞性通过举升力、拉力等形式作用于岩屑, 大大提升岩屑被悬浮、被带动的概率, 岩屑在环空中的分布趋于均匀<sup>[13-15]</sup>。

从模拟分析可知钻井液粘度是影响携岩效果非常重要的因素, 随粘度的增加, 携岩能力得到显著提高。该模型下的模拟表明, 较适宜的钻井液表观粘度为 20~30 mPa·s。

## 2.4 岩屑浓度对携岩性能的影响

初始条件: 环空返速 1.5 m/s, 钻井液粘度 20 mPa·s, 钻杆转速 200 r/min, 岩屑直径 0.5 mm, 模拟岩屑浓度  $c$  分别为 0.5%、1%、2% 的情况下岩屑分布情况, 对应钻进速度分别约为 11、23、45 m/h, 结果如图 4 所示。

从图 4 分析可知, 岩屑浓度越大, 相同条件下要将岩屑携带出孔的难度越大, 高浓度区岩屑体积浓度也越高。

(1) 岩屑浓度分别为 0.5%、1%、2% 的情况下, 岩屑浓度峰值分别为 1.31%、2.66%、5.48%, 呈逐渐增大的趋势。

(2) 虽然每区块岩屑浓度不相同, 但是整体的分布趋势相差不大, 岩屑集中区都位于 350° 附近, 且以该方位轴对称, 钻杆外围环空同是岩屑低含量区。

模拟表明, 岩屑浓度越低运移越容易, 在工程实际钻进中保持小于 1% 的岩屑浓度是很容易实现的, 携带岩屑的难度也不大。

## 2.5 岩屑颗粒直径对携岩性能的影响

初始条件: 环空返速 1.5 m/s, 钻井液粘度 20 mPa·s, 岩屑浓度 1%, 钻杆转速 200 r/min, 模拟岩屑直径  $d$  分别为 0.2、0.5、1 mm 的情况下岩屑分布情况, 结果如图 5 所示。

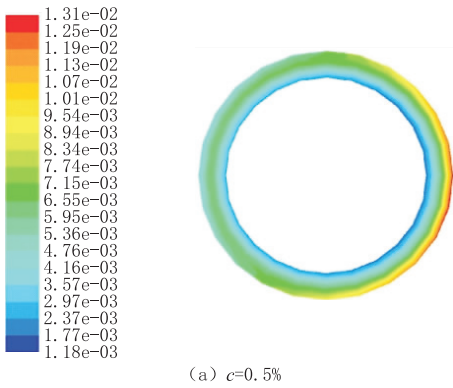
从图 5 分析可知, 在岩屑直径不同的情况下, 环空岩屑体积分布具有一定的差异性, 但一定条件下环空岩屑的分布仍然具有对称的规律性, 高浓度区仍在 350° 方位附近。

(1) 环空岩屑浓度峰值相差较大, 随着颗粒直径的增大, 携带越来越困难, 浓度由 1.23%、2.66% 增高至 6.3%。

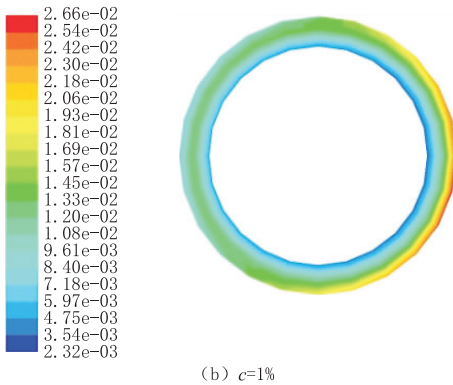
(2) 岩屑直径较小时岩屑易于悬起, 环空浓度差较小, 岩屑分布较均匀。

(3) 岩屑直径为 0.2、0.5 mm 时钻杆外围的环空区是低浓度岩屑区; 直径增为 1 mm 时, 低浓度岩

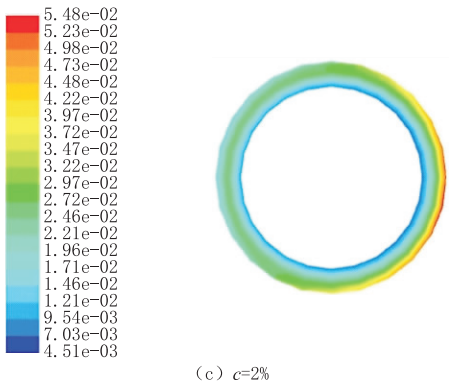




(a)  $c=0.5\%$



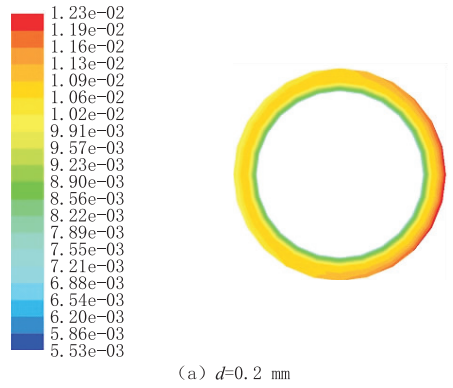
(b)  $c=1\%$



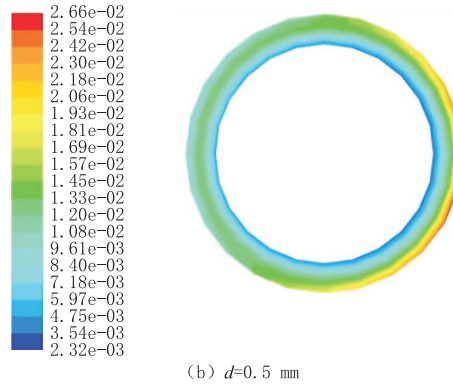
(c)  $c=2\%$

图 4 不同岩屑浓度岩屑体积分布

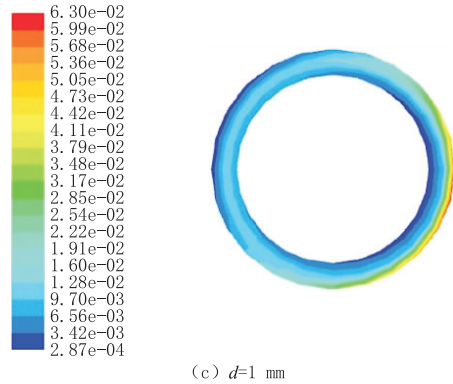
Fig.4 Volume distribution of cuttings in the annulus at different cuttings concentration



(a)  $d=0.2\text{ mm}$



(b)  $d=0.5\text{ mm}$



(c)  $d=1\text{ mm}$

图 5 不同岩屑直径环空岩屑体积分布

Fig.5 Volume distribution of cuttings in the annulus at different cuttings particle size

屑区发生变化,主要集中在  $350^\circ$ 环空内壁和  $170^\circ$ 环空外壁,这种现象跟钻杆转速较小时具有异曲同工之效,因为转速较小、岩屑粒径较大都导致携带岩屑所需的速度(或能量)不足,尤其是运动到圆周最高点附近,系统动能转化为势能,不具备较大的携岩速度,导致流动不具备冲刷孔壁的离心运动的动能,而趋于附着钻杆流动,故形成  $170^\circ$ 环空外壁的低浓度集中带。

模拟表明,破碎下来的岩屑粒径上限为  $0.5\text{ mm}$ 左右可良好悬浮。

### 2.6 钻孔偏心对携岩性能的影响

初始条件:环空返速  $1.5\text{ m/s}$ ,流体粘度  $20\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,岩屑浓度  $1\%$ ,钻杆转速  $200\text{ r/min}$ ,颗粒直径  $0.5\text{ mm}$ ,偏心距  $0.5\text{ mm}$ (偏心度  $e$  为  $0\%$ 、 $25\%$ ),结果如图 6 所示。

从图 6 分析可知,偏心情况下岩屑的体积分布跟同心情况完全不同,不具备环空岩屑浓度分布的对称性。

(1)岩屑浓度峰值对比:同心时浓度最大为  $2.66\%$ ,偏心时为  $3.03\%$ ,证明同心旋转的携渣效果优于偏心环空。

(2)偏心度下环空有 2 个岩屑高浓度集中区,分

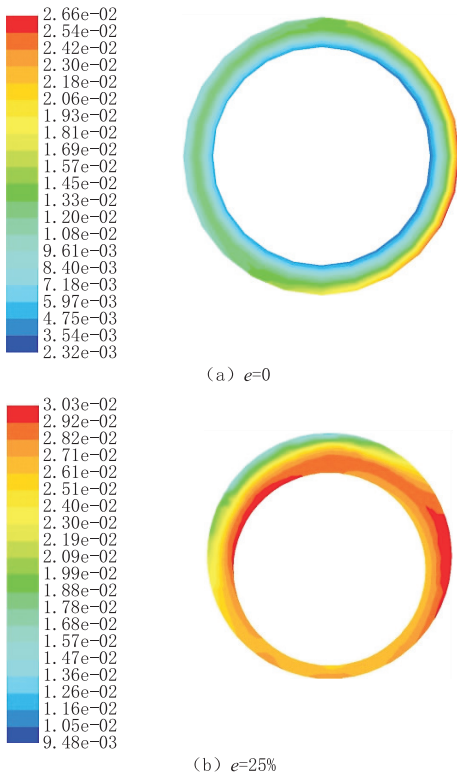


图6 不同偏心距环空岩屑体积分布

Fig.6 Volume distribution of cuttings in the annulus at different borehole eccentricity

别位于右侧偏上外孔壁处和钻杆左侧偏上附于内孔壁区域。初步推测是因为偏心导致环空下部流通有效面积减小,流速增大,对岩屑冲力变大,本来位于右下侧外井壁的高浓度岩屑集中区继续前移至右侧外孔壁上侧;对左侧钻孔上部附着的岩屑高浓度应理解为岩屑体通过环空制高点,势能的增大、动能的减小以及体系能量的损耗所致,倘若此时增大入口流速,体系具有足够的动能,钻井液通过制高点时离心力增大,有力地冲刷孔壁,可以带动岩屑到环空中分散。

(3)模拟表明同心钻进有利于岩屑的运移。

### 3 结论

通过 FLUENT 计算模拟分析钻杆转速、环空返速、岩屑浓度、岩屑直径、钻井液粘度等因素对岩屑运移的影响,结果表明发现随钻杆转速、环空返速、钻井液粘度递增,环空岩屑浓度峰值降低,对岩屑运移有利;而岩屑浓度、岩屑直径的增大导致岩屑浓度峰值增大,加大了携岩压力,这两个参变量的增大对运移岩屑是不利的。各因素之间对比,钻井液粘度、钻杆转速对岩屑的运移和分布起重要的决定

作用,环空返速、岩屑浓度、岩屑直径作用次之。所以,钻进过程中必须综合考虑、合理安排,保证适宜的钻杆转速、钻井液粘度前提下,结合其他影响参数可达到良好的携渣效果。

### 参考文献(References):

- [1] 王德伟,李元建,范云霞,等.河南省煤层气资源开发潜力及可采性研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2010.  
WANG Dewei, LI Yuanjian, FAN Yunxia, et al. Development prospect & mineability of CBM in Henan Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010.
- [2] 张怀文,程维恒.煤层气开采工艺技术[J].新疆石油科技,2010,20(4):33-45.  
ZHANG Huaiwen, CHENG Weiheng. CBM exploitation technology[J]. Xinjiang Petroleum Technology, 2010,20(4):33-45.
- [3] 黄国耀.韩城地区煤层气水平井钻井工艺技术研究[D].西安:西安科技大学,2009.  
HUANG Guoyao. The study on drilling techniques of coalbed methane horizontal well in Hancheng Area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.
- [4] 张艳玉,魏晓霞.煤层气开采技术与发展趋势[J].河南石油,2001,15(2):24-27,61.  
ZHANG Yanyu, WEI Xiaoxia. Coal-seam gas recovery and the trend[J]. Henan Petroleum, 2001,15(2):24-27,61.
- [5] 黄洪春,申瑞臣,王玺.利用多分支井井开发煤层气技术的探讨[C]//编委会.第六届石油钻井院所长会议论文集.北京:石油工业出版社,2007.  
HUANG Hongchun, SHEN Ruichen, WANG Xi. Development of coalbed methane with multi-lateral well technology [C]// Editorial Board. Proceedings of the 6th Conference of Petroleum Drilling Institute Directors. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [6] 姜文利,叶建平,乔德武.煤层气多分支水平井的最新进展及发展趋势[J].中国矿业,2010,19(1):101-103.  
JIANG Wenli, YE Jianping, QIAO Dewu. The recent process and developing tendency in CBM multi-branch horizontal well [J]. China Mining Magazine, 2010,19(1):101-103.
- [7] 刘志强,胡汉月,刘海翔,等.煤层气多分支水平井技术探讨[J].中国煤层气,2011,8(3):26-30.  
LIU Zhiqiang, HU Hanyue, LIU Haixiang, et al. Discussion on multi-branch horizontal well technology[J]. China Coalbed Methane, 2011,8(3):26-30.
- [8] 乔磊,申瑞臣,黄洪春,等.武 M1-1 煤层气多分支水平井钻井工艺初探[J].煤田地质与勘探,2007,35(1):34-36.  
QIAO Lei, SHEN Ruichen, HUANG Hongchun, et al. A preliminary study on drilling technique of Wu M1-1 CBM multi-branched horizontal well[J]. Coal Geology & Exploration, 2007,35(1):34-36.
- [9] 王剑,崔秀奇,杨国军.煤层气多分支水平井施工工艺[J].煤炭工程,2010(2):30-31.  
WANG Jian, CUI Xiuqi, YANG Guojun. Drilling technology for CBM multi-branch horizontal wells[J]. Coal Engineering,

- 2010(2):30-31.
- [10] 乔磊,申瑞臣,黄洪春,等.煤层气多分支水平井技术及现场应用[C].编委会.第六届石油钻井院所长会议论文集.北京:石油工业出版社,2007.  
QIAO Lei, SHEN Ruichen, HUANG Hongchun, et al. CBM multi-branch horizontal well technology and field application [C]//Editorial Board. Proceedings of the 6th Conference of Petroleum Drilling Institute Directors. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [11] 张娜,喻高明,于能文,等.煤层气开采技术综述[J].内蒙古石油化工,2007(5):67-68.  
ZHANG Na, YU Gaoming, YU Nengwen, et al. Overview of CBM exploitation technology[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2007(5):67-68.
- [12] 张怀文,程维恒.煤层气开采工艺技术[J].新疆石油科技, 2010,20(4):33-40,45.  
ZHANG Huaiwen, CHENG Weiheng. Coal bed methane mining technology[J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2010,20(4):33-40,45.
- [13] 汪志明.油气井流体力学与工程[M].北京:石油工业出版社, 2008.  
WANG Zhiming. Hydrodynamics and engineering of oil and gas wells[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [14] 杨献平.钻井液固液动压分离及固液两相流运动规律研究[D].成都:西南石油学院,2004.  
YANG Xianping. The studies on dynamic filter pressing of drilling fluid and moving law of two phase flow of solid-liquid [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004.
- [15] 张景富.钻井流体力学[M].北京:石油工业出版社,1994.  
ZHANG Jingfu. Drilling fluid mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [16] 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新,等.钻井液与岩土工程浆液[M].武汉:中国地质大学出版社,2006.  
WU Xiaoming, HU Yule, HE Bingxin, et al. Drilling fluid and geotechnical engineering slurry[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006.
- [17] 汪海阁,刘希圣.水平井钻井液携岩机理研究[J].钻采工艺, 1996,19(2):10-14.  
WANG Haige, LIU Xisheng. Study on cuttings-carrying mechanism of drilling fluids in horizontal wells[J]. Drilling & Production Technology, 1996,19(2):10-14.
- [18] 郑新权,刘希圣,丁岗.定向井环空内岩屑运移机理的研究[J].石油大学学报(自然科学版),1991,15(1),25-31.  
ZHENG Xinquan, LIU Xisheng, DING Gang. Transport mechanism of cuttings in annulus of directional well[J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1991,15(1),25-31.
- [19] 何金楠,李洪乾,刘新华.钻井液携岩能力评价技术的进展[J].国外钻井技术,1995,10(3):30-32.  
HE Jinnan, LI Hongqian, LIU Xinhua. Progress on evaluation technology for drilling fluid carrying capacity[J]. Foreign Drilling Technology, 1995,10(3):30-32.
- [20] 鹿传世.倾斜井眼内岩屑运移的数值计算与清岩工具设计流场计算[D].青岛:中国石油大学,2008.  
LU Chuanshi. Numerical calculation of cutting transportation in inclined borehole and flow field calculation of cuttings removing tool[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.
- [21] 宋海成,管志川,陈绍维.斜井岩屑运移临界环空流速力学模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(1):53-56.  
SONG Xuncheng, GUAN Zhichuan, CHEN Shaowei. Mechanics model of critical annular velocity for cuttings transportation in deviated well[J]. Journal of China University of Petroleum, 2009,33(1):53-56.
- [22] 夏永辉,陈岩,顾敏,等.计算流体力学及其在热处理中的应用研究[J].热处理,2010,25(1):6-11.  
XIA Yonghui, CHEN Yan, GU Min, et al. Computational fluid dynamics and its application to heat treatment[J]. Heat Treatment, 2010,25(1):6-11.
- [23] 李进良,李承曦,胡仁喜,等.精通 FLUENT6.3 流场分析[M].北京:化学工业出版社,2009.  
LI Jinliang, LI Chengxi, HU Renxi, et al. Proficient in FLUENT 6.3 flow field analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [24] 朱红钧,林元华,谢龙汉.FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2010.  
ZHU Hongyun, LIN Yuanhua, XIE Longhan. FLUENT practical course of fluid analysis and simulation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.
- [25] 江帆,黄鹏.Fluent 高级应用与实例分析[M].北京:清华大学出版社,2008.  
JIANG Fan, HUANG Peng. Advanced application and case study of Fluent[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.

(编辑 韩丽丽)