

# 水平井段超临界 CO<sub>2</sub> 携岩数值模拟

宋维强, 王瑞和, 倪红坚, 霍洪俊, 沈忠厚, 陈修平

(中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:**超临界 CO<sub>2</sub> 是一种极具潜力的钻完井介质, 研究其携岩机制是超临界 CO<sub>2</sub> 钻井技术的重要发展方向。以实测数据设置环空入口岩屑粒径分布, 考虑流场中 CO<sub>2</sub> 密度和黏度与温度、压力条件的耦合关系及钻杆转动的影响, 对温度、压力、排量、转速、岩屑直径、岩屑体积分数及偏心度对携岩效率的影响进行数值模拟分析。结果表明: 岩屑床中小颗粒的体积分数下降, 大颗粒体积分数的增幅随直径增大而减小; CO<sub>2</sub> 携岩能力随温度的降低和压力的升高而增强, 影响规律与室内试验结果相符; 增大排量、降低机械钻速可提高 CO<sub>2</sub> 携岩效率, 而钻杆转速对携岩效率影响甚微; 偏心度为 0.8 时携岩最为困难; 水平井钻进时应添加增黏剂以改善 CO<sub>2</sub> 携岩效果。

**关键词:**钻井; 超临界 CO<sub>2</sub>; 水平井; 携岩; 钻杆转速; 偏心度

**中图分类号:**TE 21      **文献标志码:**A

**引用格式:**宋维强, 王瑞和, 倪红坚, 等. 水平井段超临界 CO<sub>2</sub> 携岩数值模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(2): 63-68.

SONG Weiqiang, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Numerical simulation of cuttings transport capability of supercritical carbon dioxide in horizontal wells[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 63-68.

## Numerical simulation of cuttings transport capability of supercritical carbon dioxide in horizontal wells

SONG Weiqiang, WANG Ruihe, NI Hongjian, HUO Hongjun, SHEN Zhonghou, CHEN Xiuping

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Supercritical CO<sub>2</sub> can be one of the most promising drilling and completion fluids, so it is of fundamental and practical importance to investigate its cuttings carrying mechanism. Numerical simulation was conducted to investigate the effects of various factors on CO<sub>2</sub>'s cuttings carrying capability, including temperature, pressure, rotation speed and cuttings' size and production rate, in which the cuttings' size distribution at the annulus entrance was set based on the measurement data in the experiments. In addition, the influence of coupled relationship between the density and viscosity of CO<sub>2</sub> as a function of temperature and pressure and the rotation of drill pipe was considered in the numerical simulation. The results show that the cuttings carrying capability of CO<sub>2</sub> can be improved by reducing temperature or increasing pressure, and the simulation results are consistent with that of the experiments. It is also found that the rotation speed of drill pipe has little influence on the cutting carrying capability, and the minimum of cuttings carrying capability appeared when the annulus eccentricity equals 0.8. The cuttings carrying capability can also be improved by increasing the displacement capacity or reducing the penetration rate, while viscofier can be added to improve the cuttings carrying capability of CO<sub>2</sub> in horizontal well drilling.

**Keywords:** drilling; supercritical CO<sub>2</sub>; horizontal well; cuttings carrying capability; rotation of drill pipe; eccentricity

超临界 CO<sub>2</sub> 水平井钻井是一种开发非常规、老油田等难动用油气藏的有效技术手段<sup>[1-5]</sup>, 应用前景

收稿日期: 2014-07-03

基金项目: 国家“973”计划项目(2014CB239202); 国家自然科学基金项目(51034007); 山东省自然科学基金重点项目(ZR2011EEZ003); 教育部博士点基金项目(20120133110011); 中央高校基本科研业务费专项(14CX02166A)

作者简介: 宋维强(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事超临界二氧化碳钻完井基础理论研究。E-mail: westrong0808@s.upc.edu.cn。

十分广阔<sup>[6]</sup>。CO<sub>2</sub>携岩问题是该钻井技术中的基础问题,其携岩机制是水力参数设计的重要依据。目前,通过试验和数值模拟探索了井斜角、温度和压力对超临界CO<sub>2</sub>携岩的影响规律<sup>[7-8]</sup>;排量、机械钻速及钻杆偏心等因素对携岩效率影响显著,而相关研究尚未见报道。此外,数值模拟中多将岩屑直径设为统一值,并忽略模拟井段内流体物性参数的变化,这与实际工况存在偏差。笔者基于实测岩屑粒径分布,考虑CO<sub>2</sub>密度和黏度与流场温度压力的耦合关系建立水平井携岩模型,重点分析温度、压力、钻井参数及环空偏心度对携岩效率的影响,以期促进超临界CO<sub>2</sub>钻井技术的发展。

### 1 数值模型

由于岩屑床中岩屑体积分数较高,颗粒之间的运动干扰不可忽略,因此采用欧拉方法<sup>[9]</sup>进行建模和求解。

#### 1.1 控制方程

连续性方程为

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

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g}_m + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{y=1}^n \alpha_y \rho_y \mathbf{v}_{dr,y} \mathbf{v}_{dr,y} \right). \quad (2)$$

其中

$$\rho_m = \sum_{y=1}^n \alpha_y \rho_y, \mathbf{v}_m = \frac{\sum_{y=1}^n \alpha_y \rho_y \mathbf{v}_y}{\rho_m},$$

$$\mu_m = \sum_{y=1}^n \alpha_y \mu_y, \mathbf{v}_{dr,y} = \mathbf{v}_y - \mathbf{v}_m.$$

式中, $\rho_m$ 为混合密度,kg/m<sup>3</sup>; $\mathbf{v}_m$ 为质量平均速度,m/s; $\mu_m$ 为混合黏性系数Pa·s; $\mathbf{F}$ 为体积力,N; $N$ 为相数; $\alpha_y$ 为第 $y$ 相体积分数; $\rho_y$ 为第 $y$ 相密度,kg/m<sup>3</sup>; $\mathbf{v}_{dr,y}$ 为第 $K$ 相的漂移速度,m/s。

粒子相(p)对主相(q)的相对速度 $\mathbf{v}_{qp}$ 为

$$\mathbf{v}_{qp} = \tau_{qp} \boldsymbol{\alpha}. \quad (3)$$

其中

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{g} - (\mathbf{v}_m \cdot \nabla \mathbf{v}_m) - \frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial t}, \tau_{qp} = \frac{(\rho_m - \rho_p) d_p^2}{18 \mu_q f_d},$$

$$f_d = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687}, & Re \leq 1000; \\ 0.0183 Re, & Re \geq 1000. \end{cases}$$

式中, $\boldsymbol{\alpha}$ 为粒子加速度,m/s<sup>2</sup>; $\tau_{qp}$ 为粒子弛豫时间,s; $d_p$ 为粒子直径,m; $f_d$ 为曳力,采用Schiller and Naumann模型确定<sup>[10]</sup>, $N$ 。

由主相(q)的连续性方程可得粒子相(p)的体积分方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}). \quad (4)$$

选用广泛应用的标准 $k-\epsilon$ 模型<sup>[11]</sup>计算湍流。

#### 1.2 物理模型

物理模型如图1所示。基于超临界CO<sub>2</sub>与连续管钻井技术相结合的实际情况<sup>[1,5]</sup>,为研究方便,建立小井眼偏心环空模型,钻杆外径为60 mm,套管内径为100 mm,长度 $L$ 为9 m。偏心度 $\epsilon$ 表达式为 $\epsilon = \frac{D}{R-r}$ ,其中, $R$ 为套管半径,mm; $r$ 为连续管半径,mm; $D$ 为套管中心线与连续管中心线的距离,mm。采用结构化网格划分方法,并对出入口附近进行局部加密。

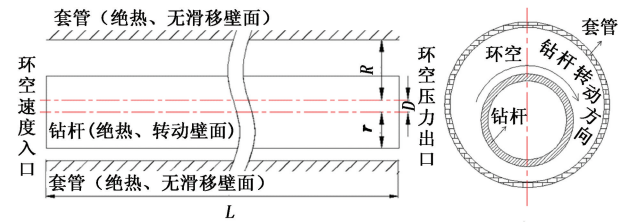


图1 流场几何模型

Fig. 1 Geometry model of flow field

#### 1.3 边界条件及参数设定

入口处岩屑的粒径分布依据室内试验数据设置。在10 MPa和27℃条件下进行CO<sub>2</sub>喷射破碎岩石(致密砂岩)试验,将收集的岩屑按其所能穿过的筛布分为5组,测得每组岩屑的质量分数,结果见表1。

表1 岩屑粒径分布试验数据

Table 1 Experimental data of partial size distribution

序号	筛布目数	孔眼直径 $d/\text{mm}$	岩屑质量 $m/\text{g}$	平均直径 $d_i/\text{mm}$	质量分数 $w/\%$
1	24	1.058	1.7	0.95	0.0316
2	30	0.847	7.1	0.74	0.1320
3	40	0.635	4.4	0.53	0.0818
4	60	0.423	14.4	0.39	0.2676
5	70	0.363	26.2	0.18	0.4870

如无特殊说明,钻杆转速取60 r/min。参照最小动能携岩准则<sup>[12]</sup>,流体和岩屑的入口速度均取1.5 m/s;入口温度取47℃,出口压力取15 MPa;考虑粒径分布时入口岩屑体积分数取1%,以平均粒径计算时,入口岩屑体积分数取3%。CO<sub>2</sub>密度和黏度对携岩效率影响显著,其在流场中随温度和压力变化并反作用于温度场和压力场<sup>[13-14]</sup>。基于建立的携岩模型,可通过Peng-Robinson模型<sup>[15-16]</sup>、Span-Wagner模型<sup>[17]</sup>及Chung模型<sup>[18]</sup>、Vesovic模型<sup>[19]</sup>分别计算CO<sub>2</sub>的密度和黏度。

## 2 流场分析

### 2.1 携岩流场

流场内不同距离截面岩屑总体积分数云图如图 2(图例为岩屑体积分数)所示。从图 2 可以看出,伴随流场的发展,岩屑逐渐沉降至环空底部,截面与入口的距离( $L$ )大于 4 m 后,截面岩屑体积分数云图变化甚微,可视为流场达到稳定状态,受钻杆转动影响,流场呈非对称形态。试验管具长度取 9 m 可反映最终的流场形态。入口边界条件中,两相的速度分布及岩屑体积分数分布的设置方法不影响稳定后的流场形态。

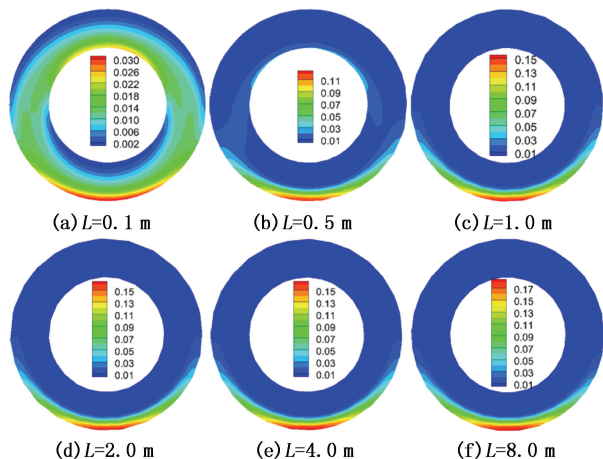


图 2 流场内不同距离截面岩屑总体积分数云图

Fig. 2 Contour of cuttings volume fraction in different distance

### 2.2 环空中岩屑粒径分布

环空岩屑总体积分数是评价携岩效果的标准之一<sup>[20-21]</sup>。本试验条件下,岩屑总质量与之等价。将充分携岩时各粒径岩屑的质量定义为理想质量。粒径分布计算结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,10 MPa、27 °C 条件下,环空中各组分岩屑实际质量皆大

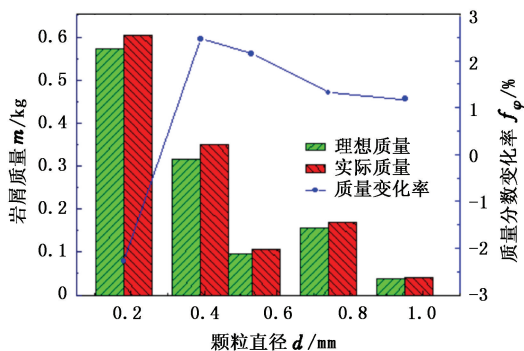


图 3 粒径分布计算结果

Fig. 3 Calculation results of particle size distribution

于理想质量;不同粒径的岩屑在环空中所占的比例发

生变化,即携岩的难易程度受岩屑粒径影响。平均直径 0.18 mm 的岩屑所占比例减少,0.39 ~ 0.95 mm 的岩屑所占比例增加,增加的幅度随平均直径的增大而减小,即该条件下 0.39 mm 岩屑最难以携带。

图 4(图例为岩屑体积分数)为出口处各粒径范围岩屑体积分数分布。图 5 为下侧环空岩屑移动速度分布。由图 4 和图 5 可进一步解释粒径分布变化

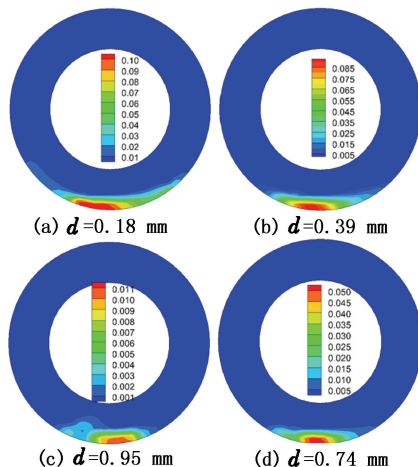


图 4 出口处各粒径范围岩屑体积分数云图

Fig. 4 Volume fraction contour of cuttings with different diameters in outlet

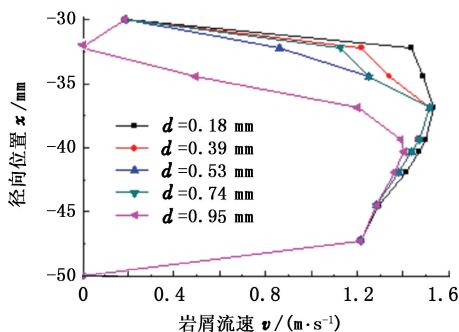


图 5 下侧环空岩屑移动速度

Fig. 5 Velocity of cuttings in bottom annulus

规律。占岩屑总质量分数最高的为 0.18 mm 岩屑,其重力与浮力差值最小,在环空中的分布最为发散(图 4);因此该组岩屑受到的颗粒间干扰最弱,与 CO<sub>2</sub> 的动量交换最为剧烈。从图 5 可以看出,环空中大部分区域 0.18 mm 岩屑的速度最大;最终 0.18 mm 岩屑的质量分数从注入时的 48.7% 降至 47.6%,降低 2.3%。随粒径增大,岩屑沉降速度增加,平均直径为 0.39 ~ 0.95 mm 的岩屑在环空中的沉积区域重合度高。虽在岩屑床上部,颗粒运移速度仍随其直径增大而逐渐降低;但在固相含量最高的岩屑床底部(图 5 中 -50 ~ -44 mm 处)颗粒运移过程中相互干扰明显增强,小颗粒堵塞到大颗粒搭构的框架中,与大颗粒追尾并向其传递动能;最终整

个环空中 0.39 ~ 0.95 mm 岩屑的平均速度随其直径增大而增大,因此这部分岩屑所占比例虽有所增加,但增加的幅度随平均直径的增大而减小。

### 3 携岩影响因素

#### 3.1 温度和压力

CO<sub>2</sub> 的黏度和密度是影响携岩效率的主要内因,其随温度和压力的变化规律参见文献[14] ~ [19]。结合水平井中实际温度和压力条件,选取的试验点涉及液态和超临界态的 CO<sub>2</sub>。将环空岩屑实际质量与理想质量之差定义为滞留质量,将滞留质量与理想质量之比定义为滞留率,并以此为携岩效果的宏观判据。

温度和压力对携岩效率的影响如图 6 所示。由图 6 可以看出,27 °C 条件下,随压力升高,各粒径岩屑滞留率呈降低趋势,主要原因是 CO<sub>2</sub> 的密度和黏度增大后,携岩能力增强;15 MPa 条件下,随温度升高,CO<sub>2</sub> 的密度和黏度降低,岩屑滞留率增大。本试验条件下,CO<sub>2</sub> 携岩时的岩屑滞留量为清水携岩时的 1.58 ~ 2.94 倍,主要原因是水的黏度远大于 CO<sub>2</sub> 的黏度,且密度也略高于 CO<sub>2</sub> 的。结合 CO<sub>2</sub> 物性参数随温压条件的变化规律可知,增大压力或降低温度可增强超临界 CO<sub>2</sub> 的携岩能力,此规律与室内试验结果<sup>[7]</sup>相符合。

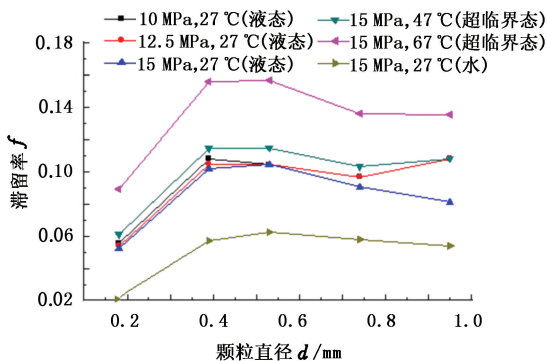


图 6 温度和压力条件对携岩效率的影响

Fig. 6 Influences of temperature and pressure on cuttings carrying efficiency

此外基于加快计算速度的考虑,据表 1 以  $d =$

$\sum_{i=1}^5 d_i v_i$  为全部岩屑的平均直径进行对比试验。计算得环空中岩屑滞留质量与考虑粒径分布时的结果相差 8.5%,因此上述简便算法可以满足工程精度要求。

#### 3.2 排量和转速

边界条件中,排量可换算为携岩返速,平均粒径取 0.3 mm,数值模拟试验结果见图 7 和 8。

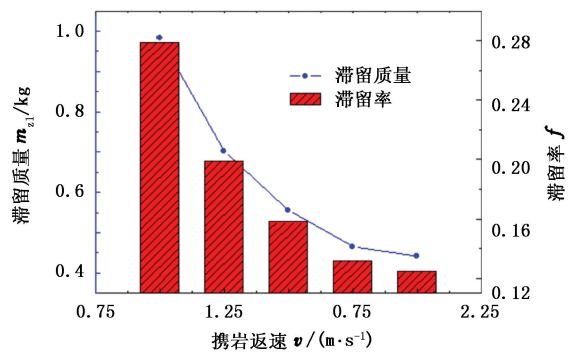


图 7 返速对携岩效率的影响

Fig. 7 Influence of annular velocity on cuttings carrying efficiency

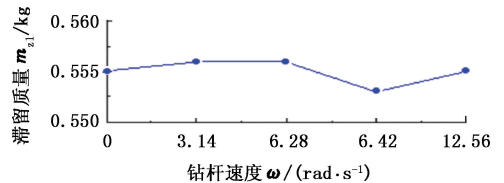


图 8 钻杆转速对携岩效率的影响

Fig. 8 Influence of ROP on cuttings carrying efficiency

从图 7 可以看出 CO<sub>2</sub> 携岩存在临界返速。当流速小于临界值时,环空岩屑滞留量随流速增大而明显减少;当流速超过临界值后,滞留量随流速增大而减少的趋势显著减缓,这与目前广泛应用的最小动能携岩准则<sup>[12]</sup>相符合。在工程实践中按临界返速设定排量是最经济有效的方案。

本试验条件下,钻杆转速对岩屑滞留量的影响甚微(图 8)。由于超临界 CO<sub>2</sub> 黏度远低于传统钻井液的黏度,一方面岩屑很快沉降于环空底部;另一方面钻杆转动产生的剪切力相对很小,不能有效波及环空底部岩屑床。查看流场稳定后固相含量云图发现,钻杆静止时岩屑床对称分布;当钻杆转动时,岩屑床呈非对称分布,但其形态基本不随转速的改变而改变。超临界 CO<sub>2</sub> 钻井实践中连续管不能连续转动,结果表明上述工况不会对携岩产生较大影响。

#### 3.3 岩屑直径和入口体积分数

岩屑平均直径和入口体积分数与机械钻速相关。通常机械钻速越快岩屑平均直径越大,岩屑入口体积分数也越高。注入岩屑体积分数对携岩效率的影响如图 9 所示。从图 9 可以看出,岩屑滞留率随入口体积分数的增大而显著增大。其原因是入口体积分数增大后,岩屑颗粒之间的碰撞更加频繁,造成更多的能量损失;与此同时,岩屑在沉降过程中与流体的动量交换相对减少。超临界 CO<sub>2</sub> 连续管钻井过程中须统筹破岩提速与井眼清洗的关系,以安全、高效、节约地实现作业目标。



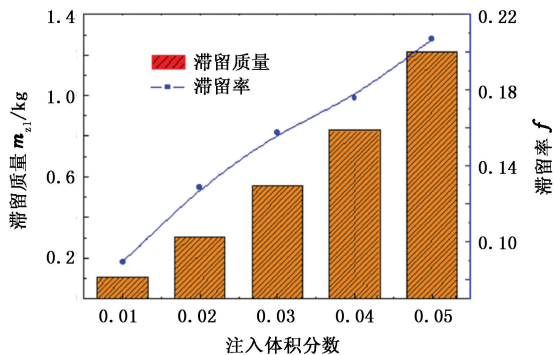


图9 注入体积分数对携岩效率的影响

Fig. 9 Influence of volume fraction of cuttings on cuttings carrying efficiency

岩屑平均直径对携岩效率的影响如图 10 所示。从图 10 可以看出,岩屑滞留量随其平均直径的增大而显著增加。Ahmed 等<sup>[22]</sup>以岩屑受到的重力  $F_G$ 、浮力  $F_F$  和升力  $F_L$  的合力  $f_1$  来判断岩屑是否向环空底部沉积,

$$f_1 = F_F + F_L - F_G = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_f g + \frac{1}{2} C_L \rho_f u_f^2 - \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g. \quad (5)$$

式中,  $\rho_f$  和  $u_f$  分别为 CO<sub>2</sub> 的密度和黏度;  $d_p$  和  $\rho_p$  分别为岩屑的直径和密度;  $C_L$  为升力系数。

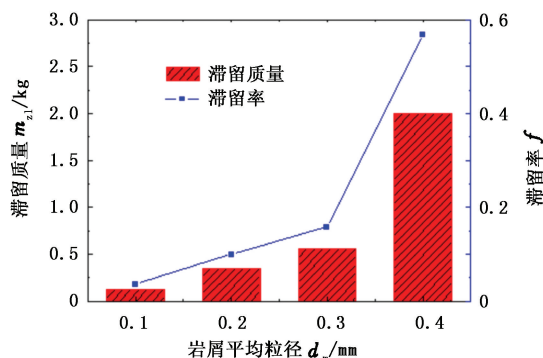


图10 岩屑平均直径对携岩效率的影响

Fig. 10 Influence of diameters of cuttings on cuttings carrying efficiency

井下 CO<sub>2</sub> 的黏度很低,由式(5)可知合力  $f_1$  随平均直径增大迅速减小,环空岩屑滞留量相应增多。当粒径增至一定值后,因垂向支撑力不足,岩屑过快沉降并堆积于环空底部,阻碍流场继续向前发展。超临界 CO<sub>2</sub> 射流产生的岩屑比空气钻井更细小<sup>[1,7]</sup>,但当地层岩石脆性较强时,可产生大粒径岩屑;结合 CO<sub>2</sub> 与水的携岩能力对比分析结果,认为适当提高超临界 CO<sub>2</sub> 黏度更有利于其携岩。

### 3.4 偏心率

井下钻杆受力复杂,环空偏心率变化范围大。图 11 为环空偏心率对携岩效率的影响,其中岩屑入

口体积分数取 1%。

从图 11 可以看出,  $\varepsilon = 0.8$  为临界值,当偏心率小于临界值时,滞留率随偏心率增大而增大的趋势逐渐增强;当偏心率大于临界值后,滞留率略有降低(偏心率为 1 时,因存在奇异点而无法划分网格,因此数模中的实际偏心率为 0.975)。

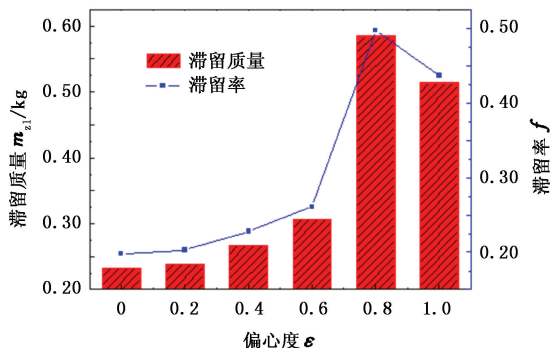


图11 偏心率对携岩效率的影响

Fig. 11 Influence of eccentricity on cuttings carrying efficiency

流体与岩屑的动量交换提供了岩屑向前运移的动能,因此流体速度分布可反映岩屑滞留的内在原因(图 12)。从图 12 可以看出,随偏心率增大,环空截面流体速度呈逐渐减小趋势,其原因是边界层的影响逐渐增强。当偏心率超过 0.8 后,底部环空边界层影响的流量减少,更多的流体从边界层影响相对较弱的钻杆两侧区域通过,最终流速略有上升。流体速度分布的趋势与岩屑滞留量的分布趋势相对应。

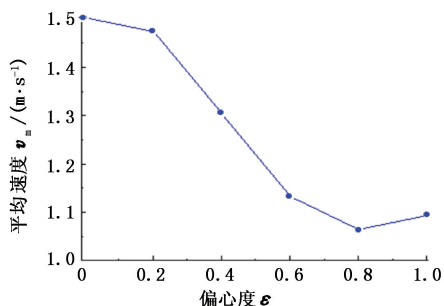


图12 偏心率对底部环空截面流体平均速度的影响

Fig. 12 Influence of eccentricity on average fluid velocity at bottom of annular cross section

## 4 结论

(1) 环空中 5 种粒径范围的岩屑实际质量皆大于理想质量;粒径分布变化规律受温度和压力的影响。

(2) 超临界 CO<sub>2</sub> 的携岩能力随温度上升减弱,随压力升高增强;适当增大排量,降低机械钻速可改善携岩效果,而钻杆转速对携岩效果影响甚微;随环

空偏心度增大,携岩效果先变差后略有改善,临界偏心度为0.8。

(3)超临界 CO<sub>2</sub> 携岩存在临界返速,钻进时须统筹携岩与提速的关系以确保井下安全;CO<sub>2</sub> 携岩时的岩屑滞留量为清水携岩时的1.58~2.94倍,适当提高超临界 CO<sub>2</sub> 黏度利于携岩。

#### 参考文献:

- [1] GUPTA A P, GUPTA A, LANGLINAIS J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation[R]. SPE 96992, 2005.
- [2] 杜玉昆,王瑞和,倪红坚,等.超临界二氧化碳射流破岩试验[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(4):93-96.  
DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Rock-breaking experiment with supercritical carbon dioxide jet[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012, 36(4):93-96.
- [3] 王瑞和,霍洪俊,杜玉昆,等.超临界 CO<sub>2</sub> 钻完井技术及风险分析[G]//中国职业安全健康协会.2010年学术年会论文集.北京:煤炭工业出版社,2010.
- [4] AL-ADWANI F, LANGLINAIS J, HUGHES R. Modeling of an underbalanced-drilling operation using supercritical carbon dioxide[J]. SPE Drilling and Completion, 2009,24(4):599-610.
- [5] KOLLE J J. Coiled-tubing drilling with supercritical carbon dioxide[R]. SPE 65534,2000.
- [6] 王瑞和,倪红坚,沈忠厚.二氧化碳在非常规油气藏开发中的应用[R].成都:钻井基础理论研究的前沿技术开发新进展学术研讨会,2010.
- [7] 李良川,王在明,邱正松,等.超临界二氧化碳钻井流体携岩特性实验[J].石油学报,2011,32(2):355-359.  
LI Liangchuan, WANG Zaiming, QIU Zhengsong, et al. An experimental study on carrying cuttings features for supercritical carbon dioxide drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 355-359.
- [8] 沈忠厚,王海柱,李根生.超临界 CO<sub>2</sub> 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.
- [9] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M].北京:清华大学出版社,2008:140-182.
- [10] SCHILLER L, NAUMANN A Z. Uber die grundlegenden berechnungen bei der schwerkraftaufbereitung[J]. Z Ver Deut Ing, 1933,77:318-320.
- [11] 朱红钧,林元华,谢龙汉. Fluent 12 流体分析及工程仿真[M].北京:清华大学出版社,2011:101-117.
- [12] 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.
- [13] 王瑞和,倪红坚.二氧化碳连续管井筒流动传热规律研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(5):65-70.  
WANG Ruihe, NI Hongjian. Wellbore heat transfer law of carbon dioxide coiled tubing drilling[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013,37(5):65-70.
- [14] 韩布兴.超临界流体科学与技术[M].北京:石化出版社,2005:1-4.
- [15] PENG D Y, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state[J]. Ind Eng Chem, 1976,15(1):59-64.
- [16] BOYLE T B, CARROLL J J. Calculation of acid gas density in the vapor, liquid, and dense-phase regions [C]//51st Canadian Chemical Engineering Conference, Halifax, Nova Scotia, Canada, October 15-17, 2001.
- [17] SPAN R, WAGNER W. A new equation of state for CO<sub>2</sub> covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressure up to 800 MPa[J]. J Phys Chem Ref Data, 1996,25(6):1509-1596.
- [18] POLING B E, PRAUSNITZ J M, JOHN PAUL O C, et al. The properties of gases and liquids[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [19] VESOVIC A, WAKEHAM W A. The transport properties of carbon dioxide[J]. J Phys Chem Ref Data, 1990,19(3):763-808.
- [20] 程荣超.泡沫钻井液水平井段流动特性研究[D].东营:中国石油大学石油工程学院,2008.  
CHENG Rongchao. Research on the flow behavior of foam drilling fluid in horizontal well section [D]. Dongying: School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2008.
- [21] 陈俊,刘希圣,丁岗.水平井段环空携岩的实验研究[J].石油大学学报:自然科学版,1992,16(4):23-26.  
CHEN Jun, LIU Xisheng, DING Gang. Experimental study on cutting-carrying law in horizontal well section [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1992,16(4):23-26.
- [22] AHMED R, KURU E, SSASEN A. Mathematical modeling of drilling foam flows[C]//CADE/CAODC Drilling Conference, Canada, 2003:20-22.