

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.03.014

## 直井段超临界二氧化碳携岩数值模拟分析

宋维强, 霍洪俊, 王瑞和, 倪红坚, 沈忠厚, 高纪超

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:** 二氧化碳携岩问题是超临界二氧化碳钻井技术应用于油气藏钻探开发的基础问题。依据井下工况, 考虑岩屑粒径分布规律的影响及二氧化碳密度和黏度等物性参数与流场温压条件的耦合关系, 数值模拟分析了粒径分布变化规律及各工况参数对携岩效率的影响规律。结果发现: 粒径分布变化规律不与颗粒直径呈正相关, 证实了选用欧拉模型以考虑颗粒间干扰来模拟携岩问题的合理性; 温压条件影响粒径分布变化规律, 携岩返速对粒径分布规律影响甚微。携岩效率随压力升高、温度降低而提高, 规律与室内实验结果相符。提高排量、降低机速有利于改善携岩效果, 实测临界携岩返速高于依据最小动能原理的计算值。随偏心度增大, 携岩效率先降低后提高, 临界偏心度为 0.8。所得结论为发展实际技术提供支撑。

**关键词:** 超临界二氧化碳; 携岩; 粒径分布; 偏心度; 数值模拟; 直井

**中图分类号:** TE357

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2015)03-0101-07

## Numerical simulation of cutting-carrying efficiency of supercritical carbon dioxide in vertical well

SONG Weiqiang, HUO Hongjun, WANG Ruihe, NI Hongjian, SHEN Zhonghou, GAO Jichao  
(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, P.R. China)

**Abstract:** Cutting-carrying mechanism of CO<sub>2</sub> is basic for rational hydraulics design, which helps to achieve safe and efficient use of drilling with supercritical carbon dioxide. In this view, change law of partical size distribution and influences of drilling parameters on cutting-carrying efficiency is simulated and analyzed, with consideration of the influences of physical parameters change of CO<sub>2</sub>. Results show that there is no positive correlation between change law of partical size distribution and partical diameter for the existence of mutual interference, which demonstrates Oulerian method used to analyze cutting-carrying mechanism feasible. Pressure and temperature influences the change law of partical size distribution, and the cutting-carrying efficiency increases as the increase of pressure and the decrease of temperature, which agrees with

**收稿日期:** 2015-01-06

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB239202); 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, 20130133110006); 中央高校基本科研业务费专项资金(14CX02166A)。

Supported by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB239202), Key Project of Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2011EEZ003), the Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China(20120133110011, 20130133110006) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(14CX02166A).

**作者简介:** 宋维强(1987-), 男, 中国石油大学(华东)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。

倪红坚(联系人), 男, 博士、教授、博导, 主要从事石油钻井工具、高效破岩方法与技术、高压水射流理论与技术方向的教学科研工作, (E-mail) nihj@upc.edu.cn。

experimental results. Larger displacement and lower ROP helps to improve cutting-carrying efficiency, and actual critical displacement is larger than theoretical value calculated with Ahemd method. The cutting-carrying efficiency decreases as eccentricity increases and then increases as the eccentricity is beyond 0.8. Outcomes offers important basis for the improvement of practical skills.

**Key words:** supercritical carbon dioxide; carrying cuttings; partical size distribution; eccentricity; numerical simulation; vertical well

超临界态 CO<sub>2</sub> 具有高密度、低黏度等优势物理化学性质,且超临界态易于在井下调控实现<sup>[1-4]</sup>,作为一种新型钻完井流体,在非常规油气藏开发领域的应用前景十分广阔<sup>[5]</sup>。超临界 CO<sub>2</sub> 连续管钻井的破岩优势已得到初步验证<sup>[1-2,6]</sup>,研究确定 CO<sub>2</sub> 携岩机理是安全高效应用该技术的重要前提<sup>[7]</sup>。超临界 CO<sub>2</sub> 连续管钻井中,根据井下安全压力窗口需求,通过调控井口回压实现环空流体在气态、液态及超临界态间转变<sup>[4]</sup>,而目前,在携岩方面只探索了温度和压力对超临界态 CO<sub>2</sub> 携岩的影响规律<sup>[8-9]</sup>,未见气态及液态 CO<sub>2</sub> 携岩规律的相关研究。井口附近(直井段)气态 CO<sub>2</sub> 的黏度和密度值最低,是制约有效携岩、安全钻进的重要环节,尤其是排量、机械钻速、偏心度等因素对携岩效果影响显著,相关研究却未见报道。此外,之前的数模中忽略了流体物性参数的变化并将岩屑直径设为统一值,这与实际工况存在偏差。为此,笔者基于实测岩屑粒径分布建立直井段 CO<sub>2</sub> 携岩模型,考虑 CO<sub>2</sub> 物性参数与流场温压条件的耦合关系,利用流体动力学软件 CFD 模拟分析了温压条件、钻井参数及偏心度对携岩效果的影响规律。研究结果有助于超临界 CO<sub>2</sub> 连续管钻井技术的发展,兼具理论和应用价值。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程

为分析环空中 CO<sub>2</sub> 携岩流动,假设:1)流场中只有 CO<sub>2</sub> 和岩屑存在,均视为连续介质;2)流场与外界无热量交换,流体和岩屑在模拟井段内温度不变。选用欧拉模型<sup>[10]</sup>求解固相含量高,颗粒间运动干扰不可忽略的携岩问题。

$$\text{连续性方程} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0, \quad (1)$$

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

式中: $\rho_m$  为混合密度,  $\rho_m = \sum_{y=1}^N \alpha_y \rho_y$ , kg/m<sup>3</sup>;  $\mathbf{v}_m$  为质量平均速度,  $\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{y=1}^N \alpha_y \rho_y \mathbf{v}_y}{\rho_m}$ , m/s;  $\mu_m$  为混合黏性系数,  $\mu_m = \sum_{y=1}^N \alpha_y \mu_y$ , Pa · s;  $\mathbf{F}$  为体积力, N;  $N$  为相数;  $\alpha_y$  第  $y$  相的体积分;  $\rho_y$  为第  $y$  相的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mathbf{v}_{dr,y}$  为第  $K$  相的漂移速度,  $\mathbf{v}_{dr,y} = \mathbf{v}_y - \mathbf{v}_m$ , m/s。

粒子相( $p$ )对主相( $q$ )的相对速度  $\mathbf{v}_{qp}$ ,

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

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{g} - (\mathbf{v}_m \cdot \nabla \mathbf{v}_m) - \frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\tau_{qp} = \frac{(\rho_m - \rho_p) d_p^2}{18 \mu_q f_d}, \quad (5)$$

$$f_d = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000, \\ 0.0183 Re & Re \geq 1000, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{v}_{qp}$ , m/s;  $\boldsymbol{\alpha}$  是粒子的加速度, m/s<sup>2</sup>;  $\tau_{qp}$  是粒子的弛豫时间, s;  $d_p$  是粒子的直径, m;  $f_d$  为曳力, N, 采用

Schiller and Naumann 模型确定<sup>[11]</sup>。

由主相( $q$ )的连续性方程,可得粒子相( $p$ )的体积分数方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p})。 \quad (7)$$

选用广泛应用的标准  $k-\epsilon$  模型<sup>[12]</sup>计算湍流。

## 1.2 物理模型

物理模型见图 1。基于超临界  $\text{CO}_2$  与连续管钻井技术相结合的实际情况<sup>[1-2]</sup>,为研究方便计,建立小井眼偏心环空模型,其中钻杆外径 60 mm,套管内径 100 mm,长度  $L$  为 9 m。无量纲偏心度表达式为  $\epsilon = \frac{D}{R-r}$ 。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建立六面体网格,并对出口和入口处进行局部加密。

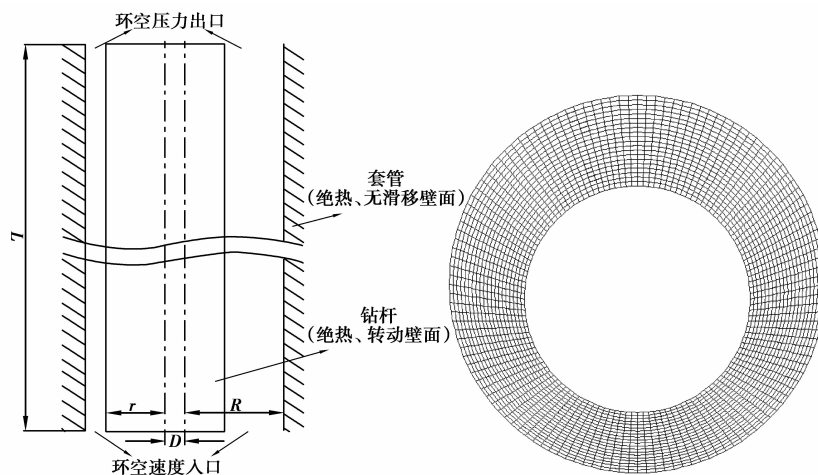


图 1 流场物理模型

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实验数据设置。在 10 MPa 和 27 °C 条件下,室内开展了  $\text{CO}_2$  喷射破碎岩石实验,将收集的岩屑按其所能穿过的筛布分为 5 组份,测得每组岩屑的质量分数统计在表 1 中。

表 1 岩屑粒径分布实验数据统计

Table 1 Experimental date of partial size distribution

序号	筛布目数	孔眼直径/mm	岩屑质量/g	平均直径 $d_i$ /mm	质量分数 $v_i$
1	24	1.058	1.7	0.95	0.031 6
2	30	0.847	7.1	0.74	0.132 0
3	40	0.635	4.4	0.53	0.081 8
4	60	0.423	14.4	0.39	0.267 6
5	70	0.363	26.2	0.18	0.487 0

参照最小动能携岩准则<sup>[13]</sup>,流体和岩屑的入口速度均取 1.25 m/s;出入口温度取 27 °C,出口压力取 5 MPa,入口岩屑总浓度取 1%。 $\text{CO}_2$  的密度和黏度是影响其携岩能力的主要内因,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>[14-15]</sup>。基于建立的携岩模型,通过 Span-Wagner 模型<sup>[16]</sup>及 Vesovic 模型<sup>[17]</sup>编写 UDF 分别计算流场中  $\text{CO}_2$  的密度和黏度。

## 2 粒径分布变化规律

图2为流场稳定后,各粒径岩屑质量分数变化情况。其中理想质量表示充分携岩时的岩屑质量。图2显示,流场稳定后,粒径分布规律发生变化。0.18 mm岩屑质量分数降低;其余直径的岩屑质量分数增大,其中0.53 mm岩屑增加的比例最大,其次是0.95 mm岩屑,0.39 mm岩屑质量分数增加最少。

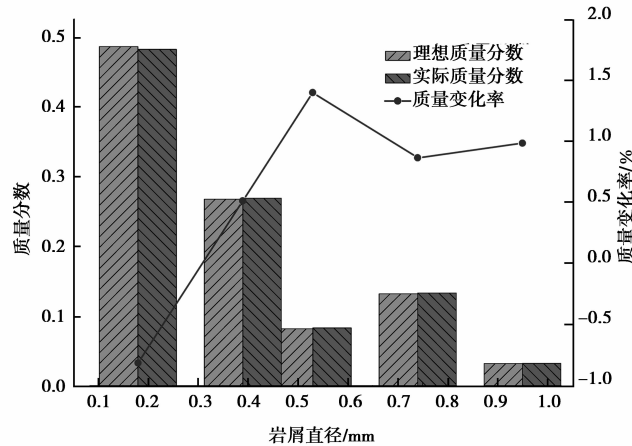


图2 粒径分布变化规律

Fig.2 Change law of partial size distribution

入口处各粒径岩屑初始速度相同条件下,岩屑的能量传递情况决定其运移规律。垂直环空中,除重力、浮力及曳力(升力)对岩屑做功外,岩屑彼此间及与管壁的碰撞也会造成能量的传递及耗散。由 Ahmed<sup>[18]</sup> 等人建立的模型可知,重力、浮力及曳力的合力与岩屑直径呈正相关,而实际中,岩屑粒径分布变化规律并不与岩屑直径呈正相关趋势,这是岩屑颗粒间运动干扰及与管壁碰撞起作用的结果,同时也证实了选用欧拉模型求解携岩问题的合理性。

## 3 携岩影响因素分析

### 3.1 温度和压力

超临界 CO<sub>2</sub> 连续管钻井中涉及气态、液态及超临界态三种相态,CO<sub>2</sub> 相态的转换及物性参数的变化主要受井下温压条件控制<sup>[4,16-17]</sup>,而 CO<sub>2</sub> 的物性参数是影响携岩能力的内在因素。将环空岩屑实际质量与充分携岩时的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,并以滞留率作为携岩效果的宏观判据。图3展示了温压条件(包含三种相态)对 CO<sub>2</sub> 携岩效率的影响规律,并与水的携岩效率进行了对比。

从图3看出,当 CO<sub>2</sub> 为气态时(井口附近),岩屑滞留率显著高于液态及超临界态 CO<sub>2</sub> 携岩时的滞留率,而液态与超临界态 CO<sub>2</sub> 的携岩能力不能简单地从相态的差异进行对比。在 27 °C 条件下,随着压力升高,各粒径岩屑滞留率皆随 CO<sub>2</sub> 黏度和密度的增大而呈降低趋势,即携岩效率提高;15 MPa 条件下,CO<sub>2</sub> 的黏度和密度随温度升高而降低,岩屑滞留率相应增高。温度和压力对 CO<sub>2</sub> 携岩效率的影响规律与实验结果<sup>[8]</sup> 相符合。此外,结合图2分析可知,温压条件影响粒径分布变化规律。

在 10 MPa, 27 °C 条件下,CO<sub>2</sub> 的密度为 752 kg/m<sup>3</sup>,黏度为 6.26 × 10<sup>-5</sup> Pa · s,其携岩时岩屑滞留量为相同条件下清水携岩时的 3.22 倍。主要原因是水的黏度远高于 CO<sub>2</sub> 的黏度,且水比 CO<sub>2</sub> 的密度也略高,因此,提黏可显著改善 CO<sub>2</sub> 携岩效果。井口附近岩屑滞留率最高可达

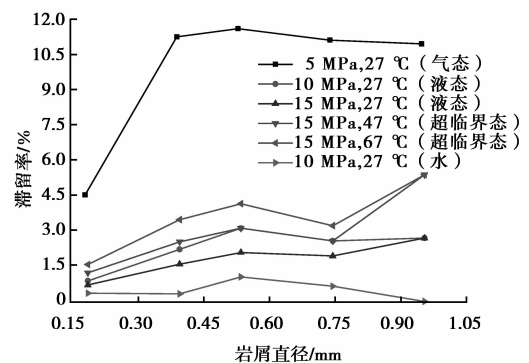


图3 温度和压力对携岩效果的影响

Fig.3 Influences of temperature and pressure on cutting-carrying efficiency

11.5%，携岩问题最为突出，以此为实验井段，考察各工况参数对携岩效率的影响规律。

### 3.2 排量和机械钻速

调控排量和机械钻速是目前普遍采用的改善井眼清洗效果的重要措施。数值模拟中，可将排量转化为入口速度(携岩返速)，机械钻速可转化为岩屑入口浓度。从图 4 看出，随携岩返速的增大，各粒径岩屑滞留率皆逐渐降低，且降低的趋势在逐渐减弱；此外，携岩返速对粒径分布变化规律影响甚微。

图 5 展示了岩屑总滞留率随携岩返速的变化规律，对其进行多项式拟合得滞留率  $y$  与携岩返速  $v$  的关系式： $y = 2.69v^2 - 14.3v + 21.28 (R^2 = 0.991)$ ，得到临界返速为 2.65 m/s。针对空气钻井的携岩问题，Angel 等<sup>[19]</sup>提出的最小动能携岩准则被广泛采用，据此准则计算得 5 MPa, 27 °C 条件下，CO<sub>2</sub> 的返速应为 1.54 m/s。CO<sub>2</sub> 携岩所需的临界返速大于最小动能准则的计算结果，这是因为数模实验条件下，CO<sub>2</sub> 的黏度低于标准大气条件下的空气黏度，因此有必要建立考虑 CO<sub>2</sub> 黏度影响的携岩准则。

从图 6 看出，随入口岩屑浓度增大，岩屑滞留质量和滞留率呈增大趋势，即机械钻速提高后，携岩效率降低。岩屑入口浓度增大后，颗粒间运动干扰增强，彼此碰撞的几率增大，造成更多的能量损失；同时，与 CO<sub>2</sub> 通过动量交换获得的能量相对减少，最终颗粒向前运移的总能量减少，导致岩屑滞留率增大。实际中，射流排量可影响机械钻速<sup>[20]</sup>，超临界 CO<sub>2</sub> 连续管钻井中需统筹破岩提速与井眼清洗的关系。

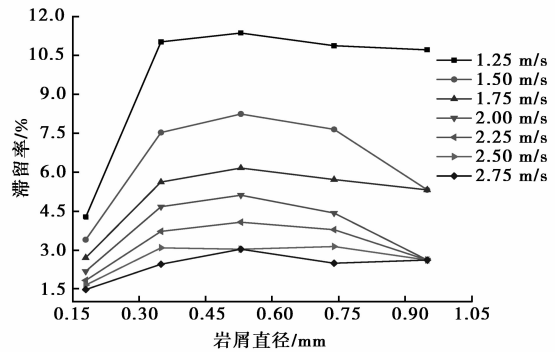


图 4 返速对携岩效率的影响

Fig.4 Influences of annular velocity on cutting-carrying efficiency

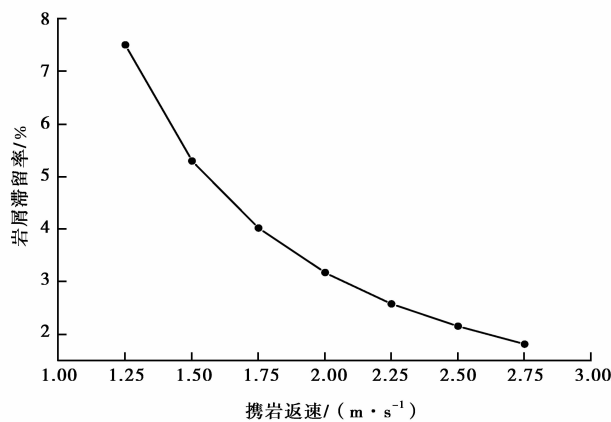


图 5 携岩返速拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of annular flow velocity

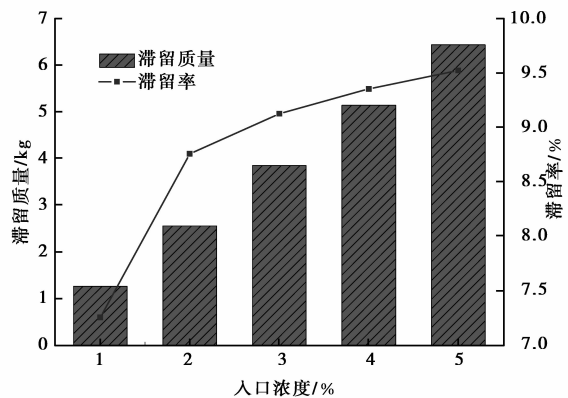


图 6 入口浓度对携岩效率的影响

Fig.6 Influences of volume fraction of cuttings on cutting-carrying efficiency

### 3.3 偏心度

直井中，钻杆屈曲可导致环空偏心。图 7 为偏心度影响携岩效率的计算结果，其中携岩返速设为 2.25 m/s。

从图 7 看出，随偏心度增大，岩屑滞留率先逐渐增大，当偏心度超过 0.8 后，滞留率随偏心度增大而减小。结合图 4 和图 5 可知，岩屑滞留率与岩屑运移速度呈负相关，图 8 为偏心度对岩屑运移速度的影响规律，随着偏心度增大，距入口 6 m 处截面岩屑平均速度逐渐减小，当偏心度超过 0.8 后，岩屑平均速度随偏心度增大而增大，滞留率变化规律与上述分析结果相符合。其原因是当偏心度增大后，较窄一侧环空受边界层的影响增强，流速降低，岩屑滞留率增大；当偏心度超过 0.8 后，虽然窄侧环空边界层的影响继续加强，但由于该侧影响的体积有限，更多的流体及岩屑从边界层影响相对较弱的宽侧环空流过，最终岩屑滞留率降低。

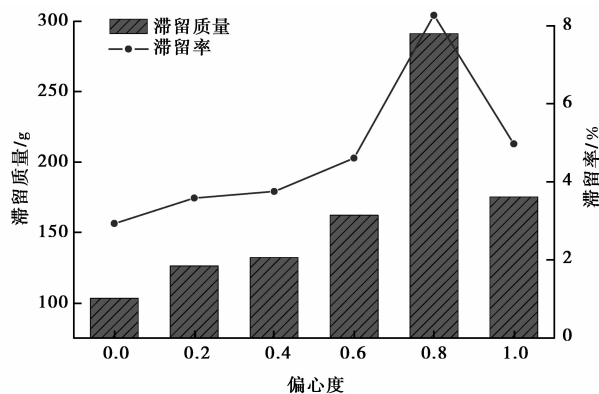


图7 偏心率对携岩效率的影响

Fig.7 Influences of eccentricity on cutting-carrying efficiency

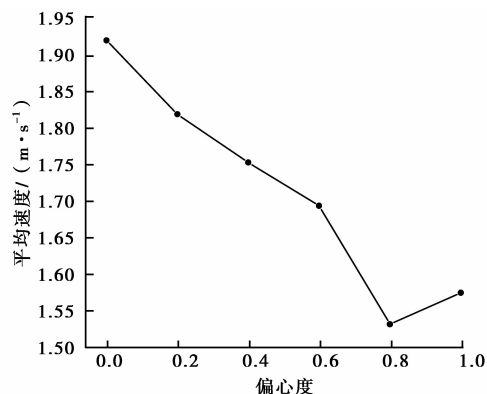


图8 偏心率对岩屑运移速度的影响

Fig.8 Influences of eccentricity on velocity of cuttings

## 4 结论

1) 环空中岩屑粒径分布规律发生变化,各粒径岩屑实际质量皆大于理想质量;岩屑滞留率不与颗粒直径呈正相关,体现了颗粒间相互干扰对运移规律的影响,证实了选用欧拉模型求解携岩问题的合理性。

2) 随着压力升高和温度降低,携岩效率提高,规律与室内实验相符;本文条件下,CO<sub>2</sub>携岩时岩屑滞留量为清水携岩时的3.22倍;随排量增大和机速降低,岩屑滞留率降低;随偏心率增大,携岩效率先减弱后增强,临界偏心度为0.8。所得结论为发展实际技术提供支撑。

3) 直井中,井口附近气态CO<sub>2</sub>的携岩能力最弱,岩屑滞留率最高可达11.5%。

4) 实测临界返速大于基于最小动能原理的计算值,尚需建立考虑黏度影响的CO<sub>2</sub>携岩临界返速计算模型。

### 参考文献:

- [1] Kollé J J. Coiled-tubing drilling with supercritical carbon dioxide[R]. SPE 65534, 2000.
- [2] Gupta A P, Gupta A, Langlinais J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [3] 孙宝江,张彦龙,杜庆杰,等.CO<sub>2</sub>在页岩中的吸附解吸性能评价[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(5):95-99. SUN Baojiang, ZHANG Yanlong, DU Qingjie, et al. Property evaluation of CO<sub>2</sub> adsorption and desorption on shale[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2013, 37(5):95-99.
- [4] 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.
- [5] 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:钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会,2010. WANG Ruihe, NI Hongjian, SHENG Zhonghou. Application of CO<sub>2</sub> to the exploitation of unconventional oil-gas reservoir [R]. Chengdu: Seminar of Fundamental Research and Frontier Technology of Drilling, 2010.
- [6] 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.
- [7] 魏纳,孟英峰,李皋,等.欠平衡钻水平井岩屑运移可视化实验[J].天然气工业,2014,34(1):80-85. WEI Na, MENG Yingfeng, LI Gao, et al. A visualization experiment of cuttings transport in underbalanced horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1):80-85.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.  
JIANG Fan, HUANG Peng. *Advanced application of case studies of Fluent*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 140-182.
- [11] Schiller L, Naumann A Z. *Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung*[J]. *Z. Ver. Deut. Ing.*, 1933, 77: 318-320.
- [12] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. *Fluent12 流体分析及工程仿真*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 101-117.  
ZHU Hongjun, LIN Yuanhua, XIE Longhan. *Fluid analysis and engineering simulation of Fluent12*[M]. Beijing: Tsinghua University, 2011: 101-117.
- [13] 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.
- [14] 韩布兴. *超临界流体科学与技术*[M]. 北京: 中国石化出版社, 2005: 1-4.  
HAN Buxing. *Supercritical fluid science and technology*[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005: 1-4.
- [15] 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.
- [16] Span R, Wagner W. A new equation of state for CO<sub>2</sub> covering the fluid region from the triple-point temperature to 1 100 K at pressure up to 800 MPa[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1996, 25(6): 1509-1596
- [17] Vesovic A, Wakeham W A. The transport properties of carbon dioxide[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1990, 19(3): 763-808.
- [18] Ahmed R, Kuru E, Ssasen A. *Mathematical Modeling of Drilling Foam Flows*[C]// CADE/CAODC Drilling Conference, Canada, 2003: 20-22.
- [19] Angel R R. Volume requirements for air or gas drilling[J]. *Petroleum Transactions*, 1957, 210: 325-330.
- [20] 刘佳亮, 司鹤. 高压水射流破碎高围压岩石损伤场的数值模拟[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(4): 40-46.  
LIU Jialiang, SI Hu. Numerical simulation on damage field of high pressure water jet breaking rock under high ambient pressure[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(4): 40-46.

(编辑 郑洁)