

# 超临界二氧化碳粒子射流破岩性能分析

杜玉昆<sup>1,2</sup>, 陈晓红<sup>2,3</sup>, 王瑞和<sup>1</sup>, 岳伟民<sup>4</sup>,  
杜强<sup>5</sup>, 白殿刚<sup>5</sup>, 郝国亮<sup>6</sup>, 周艳<sup>7</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 4. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 5. 大港油田滩海开发公司, 天津 300280; 6. 辽河油田欢喜岭采油厂, 辽宁盘锦 124114; 7. 辽河油田勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010)

**摘要:** 由于页岩和致密砂岩等非常规储层岩石的破岩门限压力大, 为充分发挥超临界二氧化碳在开发非常规资源方面的技术优势, 提出引入粒子后形成超临界二氧化碳粒子射流, 提高射流的破岩效率。在优化超临界二氧化碳射流破岩实验流程的基础上, 研制超临界二氧化碳粒子射流破岩实验装置, 分析超临界二氧化碳粒子射流的破岩性能。结果表明: 相对于纯超临界二氧化碳射流, 加入石英砂 30 s 后超临界二氧化碳粒子射流的破岩性能得到大幅度增强, 破岩体积提高了 66.67%; 超临界二氧化碳粒子射流的破岩性能随着喷嘴直径和喷距的增大先增强后减弱; 本试验条件下最优喷嘴直径为 3 mm、喷距为 6 mm、粒径为 0.3~0.5 mm; 压力和温度越高, 射流的破岩性能越强, 但增强的趋势逐渐变缓。

**关键词:** 超临界二氧化碳; 粒子; 射流; 破岩

**中图分类号:** TE 248 **文献标志码:** A

**引用格式:** 杜玉昆, 陈晓红, 王瑞和, 等. 超临界二氧化碳粒子射流破岩性能分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 85-90.

DU Yukun, CHEN Xiaohong, WANG Ruihe, et al. Analysis on rock-breaking property of supercritical carbon dioxide particles jet[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(2): 85-90.

## Analysis on rock-breaking property of supercritical carbon dioxide particles jet

DU Yukun<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaohong<sup>2,3</sup>, WANG Ruihe<sup>1</sup>, YUE Weimin<sup>4</sup>, DU Qiang<sup>5</sup>,  
BAI Diangang<sup>5</sup>, HAO Guoliang<sup>6</sup>, ZHOU Yan<sup>7</sup>

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;  
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;  
3. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;  
4. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;  
5. Seabeach Development Company, Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China;  
6. Huanxiling Oil Production Plant, Liaohe Oilfield, Panjin 124114, China;  
7. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield, Panjin 124010, China)

收稿日期: 2018-10-19

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR201807080220); 中央高校基本科研业务费专项 (18CX02072A); 国家自然科学基金项目 (51404287)

作者简介: 杜玉昆 (1983-), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 研究方向为高压水射流和超临界流体钻完井理论与技术。E-mail: duyukun@upc.edu.cn.

通信作者: 王瑞和 (1957-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为高压水射流理论与应用和非常规能源钻探与开发。E-mail: wangrh@upc.edu.cn.

**Abstract:** Because the rock-breaking threshold pressure of most unconventional reservoir rocks such as shale and tight sandstone are very high, the supercritical carbon dioxide particles jet are formed by adding the particles into jet in order to improve the rock-breaking efficiency and take full advantage of supercritical carbon dioxide. On the basis of the optimization of the supercritical carbon dioxide jet rock-breaking experimental process, a supercritical carbon dioxide particles jet rock-breaking experimental device was built, and the rock-breaking property of the supercritical carbon dioxide particles jet was analyzed. It is found that the rock-breaking property of the supercritical carbon dioxide particles jet is greatly enhanced by 66.67% after adding quartz particles in 30 s compared with the pure supercritical carbon dioxide jet. Also, the rock-breaking property of supercritical carbon dioxide particles jet first enhances and then weakens with the increase of nozzle diameter and standoff distance. It is determined that the optimal nozzle diameter is 3 mm, standoff distance is 6 mm and quartz sand with particle size is 0.3–0.5 mm, which are determined under the experimental condition. The higher the jet pressure and temperature is, the stronger the rock-breaking property of the jet will be obtained. However, the increasing trend slows down gradually.

**Keywords:** supercritical carbon dioxide; particles; jet; rock-breaking

超临界二氧化碳作为钻井液及压裂液,可解决在非常规油气藏开发方面遇到的很多难题。Kolle 和 Marvin 等<sup>[1-3]</sup>通过破岩实验发现超临界二氧化碳射流相对于高压水射流的破岩范围更大,效果也更好。路易斯安娜州立大学建立了井筒内超临界二氧化碳流体物性模型,可分析井筒内流体物性分布特点<sup>[4-5]</sup>。沈忠厚等<sup>[6]</sup>开展了超临界二氧化碳钻井可行性研究,王在明等<sup>[7]</sup>建立了超临界二氧化碳钻井液循环模拟实验装置,研究超临界二氧化碳的传热传质特性和二氧化碳水合物特性,王瑞和等<sup>[8]</sup>研制了超临界二氧化碳钻完井试验系统,分析超临界二氧化碳射流破岩、携岩、地层压裂和储层驱替效果<sup>[9-10]</sup>,孙宝江等<sup>[11]</sup>对存在超临界二氧化碳的井筒多相流动规律进行了研究<sup>[11]</sup>,李根生等<sup>[12]</sup>通过数值模拟发现密度是影响超临界二氧化碳运移岩屑的重要因素,王海柱等<sup>[13-14]</sup>进行了超临界二氧化碳钻井井筒压力温度耦合计算,黄飞等<sup>[15]</sup>利用超临界二氧化碳钻完井试验系统<sup>[8]</sup>开展了超临界二氧化碳射流冲蚀页岩

试验研究。利用粒子射流破岩或辅助破岩是提高硬地层钻井速度的一种重要途径<sup>[16-17]</sup>,采用粒子破岩钻井<sup>[18-24]</sup>发现通过在井底形成粒子射流,利用粒子和射流的冲击研磨作用,可以大幅度提高机械钻速。超临界二氧化碳射流和粒子射流均具有较强的破岩优势,中国页岩和致密砂岩等非常规储层岩石的抗破碎强度高、破岩门限压力大,笔者建立超临界二氧化碳粒子射流破岩实验装置,开展超临界二氧化碳粒子射流破岩实验研究,获得超临界二氧化碳粒子射流的破岩特性。

## 1 试验装置

对前期建立的超临界二氧化碳破岩试验装置进行升级改造,研制粒子注入和分离设备,将整体实验装置分为存储单元(储罐)、增压单元(增压泵)、加热单元(加热换热器)、粒子注入单元、试验井筒单元、分离单元(固体、液体分离器)、制冷单元(制冷换热器)和数据采集控制单元。超临界二氧化碳粒子射流破岩实验的基本流程见图1。

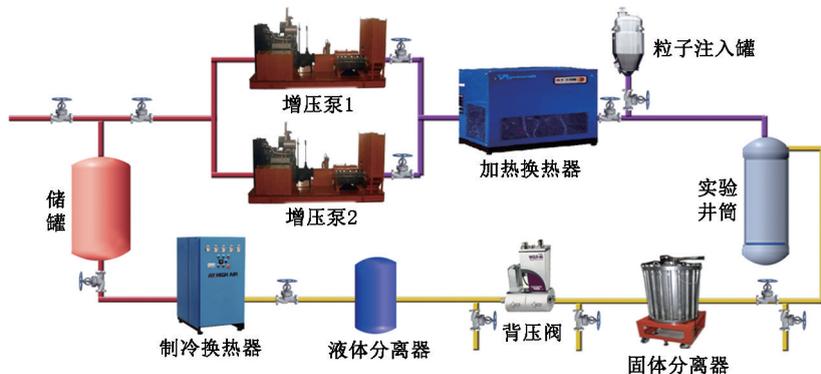


图1 超临界二氧化碳粒子射流破岩实验流程

Fig. 1 Experimental flow of rock-breaking by supercritical carbon dioxide particle jet

破岩试验井筒由外筒、模拟钻杆、射流喷嘴和岩心夹持器等组成。通过挡板控制器抽拉挡板控制射

流破岩时间,通过在井筒轴向、岩石侧壁和井底径向上布置的高灵敏度的温度、压力传感器实时采集超临界二氧化碳粒子射流在喷射以及井筒流动过程中的流体特性变化,射流喷嘴采用常规锥形喷嘴,试验井筒围压设置为 7.5 MPa。粒子注入设备由粒子注入罐和四段流动观察窗组成。通过控制螺杆旋转速度调节粒子注入量和流体中的粒子浓度,耐压 40 MPa。选择天然页岩、两种致密砂岩和人造水泥石岩样开展破岩性能分析,其抗压强度分布为 84.95、72.6、48 和 24.65 MPa,主体破岩试验采用抗压强度为 48 MPa 的致密砂岩。选用石英砂和陶瓷颗粒 2 种常用粒子,石英砂莫氏硬度 7,棱角尖锐,基于射流喷嘴结构,考虑试验安全性,选取粒子的粒径范围为:石英砂(0.3~0.5、0.5~0.7 mm)和陶瓷颗粒(0.425~0.5、0.85~1 mm)。

## 2 破岩性能

### 2.1 加入粒子后对超临界二氧化碳射流破岩性能的影响

固定调节井筒入口处的流体压力为 20 MPa,加热器温度为 100 °C,选用直径为 3 mm 的射流喷嘴,射流喷距为 6 mm,粒子采用 0.3~0.5 mm 石英砂,射流破岩时间为 2 min,岩心选用致密砂岩。结果见图 2。可以看出,破岩性能随着粒子加入到射流中

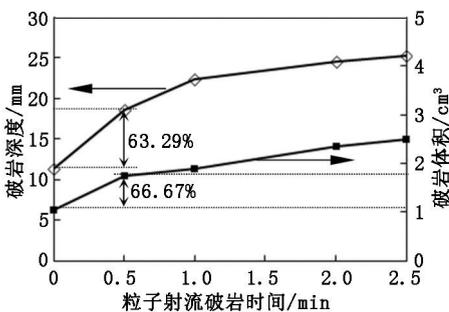


图2 不同粒子射流时间条件下的破岩性能

Fig. 2 Effect of particles jet duration on rock-breaking property

破岩时间的延长而增强,但增强的幅度逐渐减小。相对于不加入粒子的纯超临界二氧化碳射流(对应的图中粒子射流时间为 0 s),加入石英砂 30 s 后射流的破岩深度和体积分别提高了 63.29% 和 66.67%,可见粒子的加入大幅度增强了超临界二氧化碳射流的破岩能力;而随着破岩时间继续延长,由于实验喷嘴不具备自进能力,随着岩石破碎的进行,射流到岩石表面的喷距变大,导致虽然粒子射流继续喷射,但是破岩效果逐渐趋于稳定。

### 2.2 超临界二氧化碳粒子射流喷嘴直径的优选

固定调节实验井筒入口处的流体压力为 20 MPa,加热器温度为 100 °C,射流喷距为 2 倍喷嘴直径,粒子采用粒径为 0.3~0.5 mm 石英砂,粒子循环时间为 3 min,粒子射流破岩时间为 2 min,岩心选用致密砂岩,依次更换直径为 2~4 mm 的射流喷嘴。结果见图 3,可以看出,根据实验后破碎坑的深度和体积,发现射流的破岩性能随着喷嘴直径的增大先增强后减弱。当采用较小直径的喷嘴时,虽然射流喷射速度较高,但是粒子碰撞剧烈,无法形成足够冲击载荷的粒子射流喷射岩石,当采用较大直径喷嘴时,粒子在射流中充分分散,但是由于射流温度低(相同井筒入口压力下大直径喷嘴需要更大的排量,加热换热器换热后二氧化碳流体升温较低)、喷射速度较小,不利于破岩,因此只有当喷嘴直径在适当范围时,才能发挥超临界二氧化碳粒子射流的破岩优势,本文中实验条件下射流破岩效果最优的喷嘴直径为 3 mm。

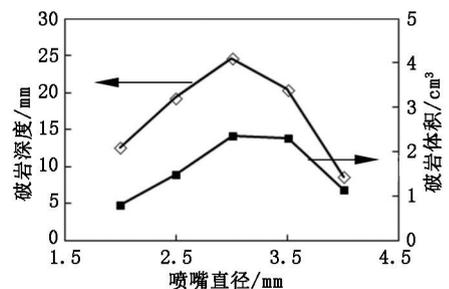


图3 不同喷嘴直径条件下的破岩性能

Fig. 3 Effect of nozzle diameter on rock-breaking property

### 2.3 超临界二氧化碳粒子射流喷距的优选

固定调节井筒入口处的流体压力为 20 MPa,加热器温度为 100 °C,粒子采用 0.3~0.5 mm 石英砂,粒子循环时间为 3 min,粒子射流破岩时间为 2 min,岩心选用致密砂岩。选用直径为 3 mm 的射流喷嘴,依次调节喷距为 1~5 倍的喷嘴直径。结果见图 4。可以看出,射流的破岩性能随着喷距的增大先增强后减弱。当射流喷距较小时,冲击后的回流对喷射流体干扰强烈,抵消了部分射流能量,而当射流喷距较大时,射流对岩石的冲击区域增大,但是距离的增大也会导致岩石处于射流喷射速度较低的区域,不利于深度破岩,因此只有当喷距在一定范围内时,才能保证粒子射流充分发展的同时冲击载荷较强。本文中实验条件下射流破岩效果最优的喷距为 2 倍喷嘴直径。

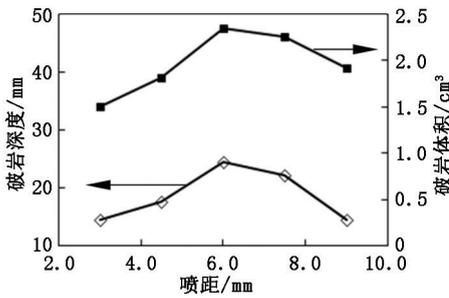


图4 不同喷距条件下的破岩性能  
Fig. 4 Effect of standoff distance on rock-breaking property

2.4 超临界二氧化碳粒子射流中粒子类型的优选

固定调节井筒入口处的流体压力为 20 MPa, 加热器温度为 100 °C, 选用直径为 3 mm 的射流喷嘴, 射流喷距为 6 mm, 粒子循环时间为 3 min, 粒子射流破岩时间为 2 min, 岩心选用致密砂岩。粒子分别采用 0.3 ~ 0.5 mm 石英砂、0.5 ~ 0.7 mm 石英砂、0.425 ~ 0.5 mm 陶粒、0.85 ~ 1 mm 陶粒, 结果见图 5。可以看出, 石英砂射流的破岩性能明显优于陶瓷颗粒射流。石英砂的硬度和密度较大, 棱角尖锐, 而陶瓷颗粒表面圆滑, 密度和硬度小, 虽然更易加速, 但是不利于对岩石的冲击切削, 本文中实验条件下加入粒径为 0.3 ~ 0.5 mm 的石英砂时粒子射流的破岩性能最强, 更适合用于作为本套实验设备的实验粒子。

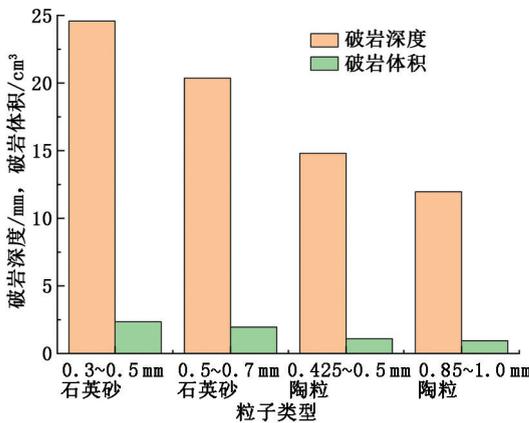


图5 不同粒子类型获得的破岩性能  
Fig. 5 Effect of particles types on rock-breaking property

2.5 射流压力对超临界二氧化碳粒子射流破岩性能的影响

固定设置加热器温度为 100 °C, 选用直径为 3 mm 的射流喷嘴, 射流喷距为 6 mm, 粒子采用 0.3 ~ 0.5 mm 石英砂, 粒子循环时间为 3 min, 粒子射流破岩时间为 2 min, 岩心选用致密砂岩。调节井筒入口处的流体压力为 8 ~ 20 MPa, 结果见图 6。可以看

出, 射流压力越大, 射流的破岩性能越强。随着射流压力的增大, 超临界二氧化碳流体的流量增大, 粒子被充分加速, 高速粒子射流对岩石的冲击力也随之增大。

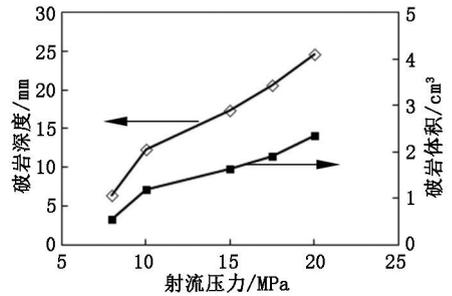


图6 不同射流压力条件下的破岩性能  
Fig. 6 Effect of jet pressure on rock-breaking property

2.6 射流温度对超临界二氧化碳粒子射流破岩性能的影响

固定调节井筒入口处的流体压力为 20 MPa, 选用直径为 3 mm 的射流喷嘴, 射流喷距为 6 mm, 粒子采用 0.3 ~ 0.5 mm 石英砂, 粒子循环时间为 3 min, 粒子射流破岩时间为 2 min, 岩心选用致密砂岩。调节加热器温度为 50 ~ 100 °C, 结果见图 7。可以看出, 射流温度越高, 射流的破岩性能越强, 但是增强的趋势逐渐变缓。随着加热器温度的升高, 流经其中的液态二氧化碳在热交换后温度随之升高, 进入实验井筒时相态已转变为超临界态, 从而兼具了气体二氧化碳的低黏度和易扩散、液体二氧化碳的高密度特点, 在射流破岩的过程中, 极易进入岩石内部的裂缝和孔隙中, 引起射流冲击造成的损伤继续扩展, 降低破岩的门限压力, 有利于射流破岩, 但是二氧化碳流体的密度和黏度同时降低, 影响粒子的携带能力和射流的冲击力, 所以当温度升高到一定程度后, 射流的破岩能力趋于稳定。

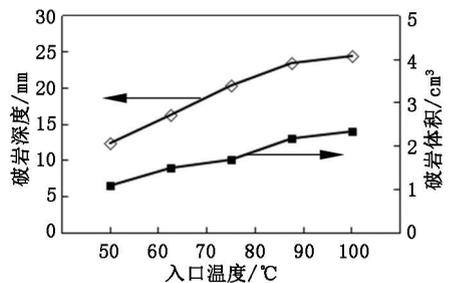


图7 不同射流温度条件下的破岩性能  
Fig. 7 Effect of jet temperature on rock-breaking property

## 2.7 超临界二氧化碳粒子射流对不同类型岩石的破岩性能对比

固定调节井筒入口处的流体压力为 20 MPa, 加热器温度为 100 °C, 选用直径为 3 mm 的射流喷嘴, 射流喷距为 6 mm, 粒子采用 0.3 ~ 0.5 mm 石英砂, 粒子循环时间为 3 min, 粒子射流破岩时间为 2 min。分别采用水泥石人造岩心、两种致密砂岩和天然页岩岩心(分别对应的是图中抗压强度为 24.65、48、72.6 和 84.95 MPa), 结果见图 8。可以看出, 随着岩石强度增大和岩石更加致密, 破碎时需要消耗的机械功越大, 破岩难度越大, 按照破岩效果由好变差排序依次为水泥石、砂岩和页岩。虽然对致密页岩的破碎深度较小, 但仍然具有较好的体积破碎效果, 而由于未达到水射流破碎页岩的门限压力, 相同条件下高压水射流无法破碎坚硬的页岩, 这也验证了超临界二氧化碳粒子射流用于开发非常规致密油气的技术优势。

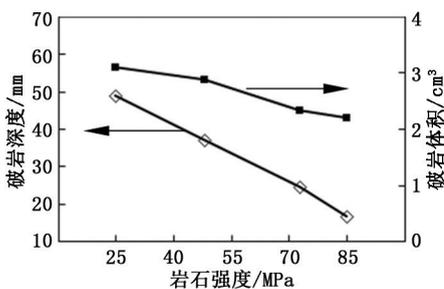


图8 相同实验条件下对页岩、砂岩和水泥石的破岩性能

Fig. 8 Effect of rock types on rock-breaking property

## 3 结论

(1) 相比于纯超临界二氧化碳射流, 加入粒子后射流的破岩性能明显增强。

(2) 超临界二氧化碳粒子射流的破岩性能随着喷嘴直径和喷距的增大先增强后减弱, 确定了本实验条件下的最优喷嘴直径和喷距, 破岩性能随着射流压力和温度的增大而增强。

(3) 超临界二氧化碳粒子射流的破岩性能随着粒子注入时间的延长而增强, 且由于石英砂的棱角尖锐、硬度更高, 其破岩性能明显优于陶瓷颗粒, 更适合用来作为粒子介质来增强超临界二氧化碳射流的破岩能力。

### 参考文献:

[1] KOLLE J J, MARVIN M H. Jet-assisted coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide [R]. SPE

65534, 2000.

- [2] FAISAL A, JULIUS P. Modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide [R]. SPE 114050, 2008.
- [3] KOLLE J J. Coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide: US6347675B1 [P]. 2002-02-19.
- [4] FAISAL A. Mechanistic modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide [D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2007.
- [5] FAISAL A, JULIUS P, RICHARD H. Modeling of an underbalanced-drilling operation using supercritical carbon dioxide [J]. SPE Drilling and Completion, 2009, 24 (4): 599-610.
- [6] 沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界 CO<sub>2</sub> 连续油管钻井可行性分析 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37 (6): 743-747. SHEN Zhonghou, WANG Haizhu, LI Gensheng. Feasibility analysis of coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (6): 743-747.
- [7] 王在明, 邱正松, 朱宽亮. 超临界二氧化碳钻井流体井筒温度传递特性 [J]. 钻井液与完井液, 2010, 27 (6): 1-3. WANG Zaiming, QIU Zhengsong, ZHU Kuanliang. Research on features of wellbore temperature transmission for supercritical CO<sub>2</sub> drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27 (6): 1-3.
- [8] 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.
- [9] DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Determination of rock-breaking performance of high-pressure supercritical carbon dioxide jet [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24 (4): 823-828.
- [10] 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.
- [11] 李昊. 超临界条件下井筒环空多相流动规律研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010. LI Hao. Study on multi-phase flow in supercritical wellbore annular [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.

- [12] LI Gensheng, WANG Haizhu, SHEN Zhonghou. Experimental study on the efficiency of cuttings carrying with supercritical CO<sub>2</sub>[R]. SPE 156321, 2012.
- [13] 王海柱, 沈忠厚, 李根生. 超临界 CO<sub>2</sub> 钻井井筒压力温度耦合计算[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 97-102.  
WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, LI Gensheng. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO<sub>2</sub> [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 97-102.
- [14] 程宇雄, 李根生, 王海柱, 等. 超临界二氧化碳喷射压裂孔内流场特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 81-86.  
CHENG Yuxiong, LI Gensheng, WANG Haizhu, et al. Flow field character in cavity during supercritical carbon dioxide jet fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 81-86.
- [15] 黄飞, 卢义玉, 汤积仁, 等. 超临界二氧化碳射流冲刷页岩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 787-794.  
HUANG Fei, LU Yiyu, TANG Jiren, et al. Research on erosion of shale impacted by supercritical carbon dioxide jet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 787-794.
- [16] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1998.
- [17] 王瑞和. 高压水射流破岩机理研究[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010.
- [18] Particle Drilling Technologies Inc. Bit technology keeps pace with operator activity[J]. World Oil, 2006(11): 80.
- [19] Particle Drilling Technologies Inc. Particle-impact drilling blasts away hard rock[J]. Oil & Gas Journal, 2007, 105(6): 43, 46-48.
- [20] GORDON A T, GREG G G. Particle drilling alters standard rock-cutting approach[J]. World Oil, 2008(6): 37-44.
- [21] 伍开松, 荣明, 况雨春, 等. 粒子冲击钻井破岩仿真模拟研究[J]. 石油机械, 2008, 36(2): 9-11, 16.  
WU Kaisong, RONG Ming, KUANG Yuchun, et al. Simulation study of rock breaking for particle impact drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(2): 9-11, 16.
- [22] 徐依吉, 靳纪军, 廖坤龙, 等. 粒子冲击钻井中粒子回收技术研究[J]. 石油机械, 2013, 41(1): 14-16, 35.  
XU Yiji, JIN Jijun, LIAO Kunlong, et al. Research on the particle recovery technology in particle impact drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(1): 14-16, 35.
- [23] 倪红坚, 杜玉昆, 王瑞和. 井底岩屑磨料脉冲射流室内实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(5): 25-28.  
NI Hongjian, DU Yukun, WANG Ruihe. Study on the lab experiment of pulsed abrasive water jet using bottom hole cuttings[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(5): 25-28.
- [24] 曲海, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射压裂孔道内部增压机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 73-76.  
QU Hai, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Boosting mechanism in hydrjet-fracturing cavity[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010, 34(5): 73-76.

(编辑 刘为清)