

二氧化碳分散岩屑机制的模拟试验研究

霍洪俊, 王瑞和, 倪红坚, 武程皓, 宋维强, 李木坤

(中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:以东营组实钻岩屑为例,采用模拟试验装置考察井下二氧化碳对岩屑分散机制,并进行岩屑 XRD 矿物成分和反应液离子成分分析。结果表明:二氧化碳对岩屑粒径影响甚微,地层水长时间浸泡会使岩屑粒径变小,地层水与二氧化碳共存时,岩屑平均粒径先急剧减小,后渐趋稳定,随着温度和压力的升高,岩屑平均粒径逐渐减小;地层水和二氧化碳共存时,东营组岩屑粒径变化的主要是由于二氧化碳促进了岩屑中的黏土矿物分散,缩短了黏土矿物的水化反应时间,同时二氧化碳与水反应生成碳酸,溶解了岩屑中的部分胶结矿物,促进了岩屑粒径的减小。

关键词:二氧化碳; 水; 岩屑; 粒径; 试验

中图分类号:TE 21 **文献标志码:**A

Experimental study on mechanism of carbon dioxide disperse cuttings

HUO Hong-jun, WANG Rui-he, NI Hong-jian, WU Cheng-hao, SONG Wei-qiang, LI Mu-kun

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

Abstract: The cuttings from Dongying Formation were chosen to study the dispersion mechanism of CO₂ on cuttings at the bottom hole using a simulated device. The XRD mineral compositions and ion types in reaction solution were analyzed as well. The results show that the influence of CO₂ on the particle size of cuttings is little. After long time soaking in the formation water, the particle size of the cuttings would be smaller. Under the circumstance of the mixture of CO₂ and formation water, the average particle size of the cuttings decreases sharply at first, and then it becomes stable gradually. With the increase of the temperature and the pressure, the average size would decrease accordingly. With the coexistence of formation water and CO₂, the change of the particle size for the cuttings in Dongying Formation is caused by the clay mineral dispersion in the cuttings, which is boosted by CO₂. Also, CO₂ reduces the hydration reaction time of the clay. At the same time, carbonic acid is formed by the reaction of CO₂ and H₂O, which resolves part clay in the cuttings and accelerates the reduction of the average particle size.

Key words: carbon dioxide; water; cuttings; particle size; experiment

二氧化碳是一种良好的钻完井介质,处于超临界态时,可显著提高破岩钻井效率,有效保护储层,提高页岩气等非常规油气资源的开发效率^[1-8]。研究二氧化碳裹挟岩屑运移的机制,可揭示二氧化碳对岩屑粒径分布的影响作用,对于确定工艺、安全高效钻井和完井具有重要价值,笔者通过模拟试验,考察二氧化碳影响岩屑粒径分布变化的规律。

1 模拟试验装置

为探索钻完井工程中,二氧化碳环境中岩屑的

分散规律,参照井下工况研制了模拟试验装置(图1),该装置主要由增压泵、中间容器、模拟井筒、温控设备及数据采集系统组成。试验时,气瓶中的二氧化碳经增压泵加压后进入中间容器,调整中间容器内二氧化碳的温度和压力至预定值后,注入模拟井筒,与井筒内预置的岩屑混合,试验完成后,模拟井筒卸压,对其中的岩屑和反应液进行分析计量。该装置的中间容器的容积为 2 L,耐压 40 MPa,可加热至 200 ℃,模拟井筒容积为 80 mL,耐压为 40 MPa,最高工作温度为 200 ℃。温控设备用于控制

收稿日期:2013-11-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51034007);国家“973”计划项目(2010CB226703,2014CB239202);山东省自然科学基金项目(ZR2011EEZ003)

作者简介:霍洪俊(1984-),男,博士研究生,研究方向为超临界二氧化碳钻井理论与技术。E-mail:hhj1200@qq.com。

中间容器及模拟井筒的温度,控制精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。压力和温度的数据由数据采集系统采集处理,采集精度分别为 $\pm 0.01\text{ MPa}$ 和 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

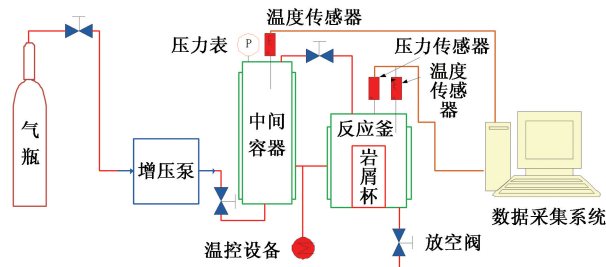


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment equipment

采用振动筛和电子天平(精度为 $\pm 0.1\text{ g}$)配合检测分析岩屑粒径分布。

2 试验材料和流程

2.1 试验材料

岩屑取自胜利油田东营组实钻的岩屑。二氧化碳气体的纯度为 99.95% (青岛天源气厂)。采用去离子水(中国石油大学自制)模拟地层水进行对比试验。

2.2 试验流程

用去离子水冲洗浸泡岩屑 1 h,去除其表面附着的杂质,150 $^{\circ}\text{C}$ 烘干后取 500 g 岩屑,测量其粒径分布,采用 X-射线衍射 (XRD) 分析其矿物成分。然后,取 50 g 已测粒径分布的岩屑置入模拟井筒,加入 55 mL 去离子水,抽真空后将中间容器中的二氧化碳(或去离子水)注入模拟井筒,开始计时。计时结束,模拟井筒卸压,取出其中的岩屑和反应液,对岩屑在 150 $^{\circ}\text{C}$ 烘干后测量其粒径分布,分析岩屑矿物成分,分析反应液的离子成分。

按照 GB/T15445. 222006/ISO95762-2. 2001 方法计算岩屑平均粒径。试验压力、温度和反应时间分别设定为 10 MPa、50 $^{\circ}\text{C}$ 和 45 min。

3 试验结果及机制分析

3.1 试验结果

图 2~4 分别为模拟井筒内只有二氧化碳、地层水以及二氧化碳与地层水混合时,岩屑粒径分布的变化规律,其中,A 为大于 0.85 mm(即小于 24 目)的岩屑组分;B 为 0.59~0.85 mm(即 24~30 目)的岩屑组分;C 为 0.42~0.59 mm(即 30~40 目)的岩屑组分;D 为 0.25~0.59 mm(即 40~60 目)的岩屑组分;E 为小于 0.25 mm(即大于 60 目)的岩屑组

分。对比图 2~4 可以看出,在二氧化碳或水单一介质环境中时,岩屑粒径分布的变化甚微;当介质环境为二氧化碳和地层水混合时,岩屑粒径分布则较单一介质有显著变化。在本文试验条件下,岩屑与二氧化碳和水混合介质接触后,A 的质量剧烈减少,其质量占比由试验前的 18.6% 减少为 6.6%,而 E 的质量则显著增大,其质量占比从试验前的 11.7% 增大至 21.2%。而处于 A-E 之间的岩屑质量占比变化不大,其中 C 的岩屑质量占比略有增加,D 的岩屑质量占比则略有减小。

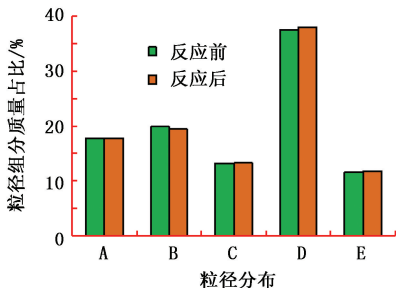


图 2 二氧化碳对岩屑粒径分布的影响

Fig. 2 Effect of CO_2 on cutting size

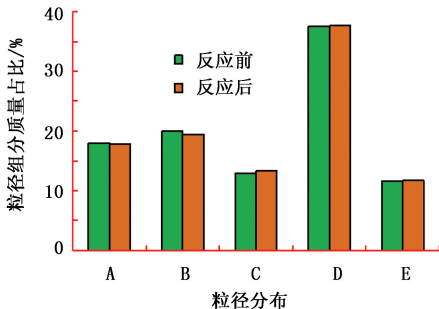


图 3 地层水对岩屑粒径分布的影响

Fig. 3 Effect of water on average cutting size

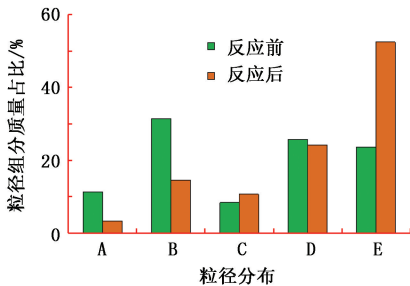


图 4 二氧化碳与地层水共存环境中岩屑粒径分布的变化

Fig. 4 Effect of CO_2 and H_2O on cutting size

图 5 为 3 种不同介质环境中,岩屑平均粒径随时间变化的试验结果。可以看出,随着时间的增加,二氧化碳对岩屑粒径影响甚微,基本可忽略,地层水对岩屑粒径有一定的影响,本文条件下,在试验初期,岩屑粒径基本不发生变化,但当试验时间超过 1 800 min

后,岩屑粒径开始逐渐变小。二氧化碳与地层水共存环境中,岩屑粒径的变化最为剧烈,在试验初期岩屑粒径即急剧减小,当试验时间达到 5 min 后,岩屑粒径的变化趋于稳定。

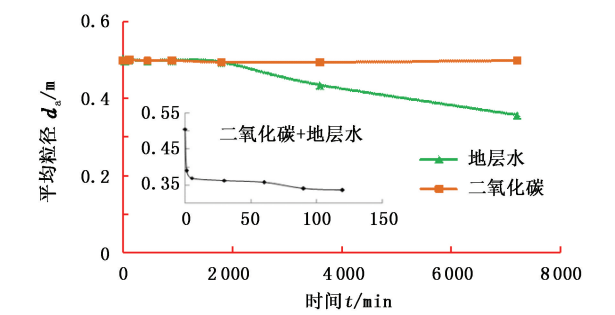


图 5 反应时间对岩屑平均粒径的影响
Fig.5 Effect of time on the average cutting size

图 6 为不同介质环境中,岩屑平均粒径随温度变化的试验结果(试验时间为 5 min)。可以看出,仅有二氧化碳或地层水存在时,温度的增高对岩屑平均粒径的影响基本可以忽略。在二氧化碳与水共存环境中,岩屑平均粒径与温度近似成线性关系,随着温度的升高,岩屑平均粒径逐渐减小。

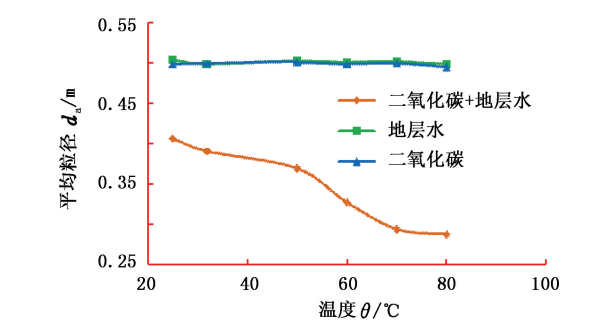


图 6 反应温度对岩屑粒径的影响
Fig.6 Effect of temperature on average cutting size

图 7 为不同介质环境中,岩屑平均粒径随压力变化的试验结果(试验时间为 5 min)。可以发现,在仅有二氧化碳或地层水的环境中,压力的变化对岩屑粒径的影响甚微,基本可忽略。在二氧化碳与水共存环境中,岩屑平均粒径随着压力的增大而逐渐减小。

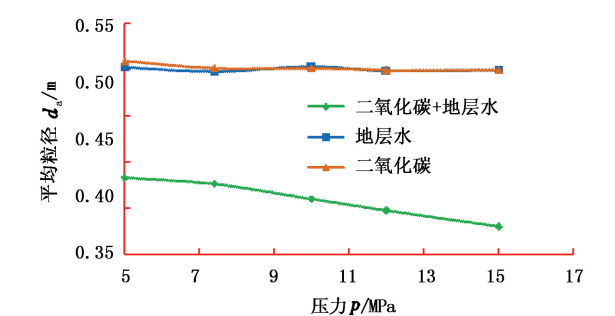


图 7 反应压力对岩屑平均粒径的影响
Fig.7 Effect of pressure on average cutting size

3.2 机制分析

(1)岩屑矿物成分。表 1 为二氧化碳和水共存环境中,岩屑粒径组分反应前后,其矿物成分 XRD 分析及质量分析结果。可以看出,东营组岩屑主要由石英、钾长石、斜长石、方解石以及黏土矿组成,其中黏土矿物含量较高。表 2 为东营组岩屑黏土矿物的 XRD 分析结果,可以看出,东营组岩屑黏土矿物以伊/蒙间层为主,蒙脱石的含量较高,高岭石、绿泥石等含量较低。反应前后各粒径岩屑矿物组分中黏土矿物含量变化较大,而其他矿物组分变化不明显。

对比表 1 和表 2 发现,岩屑粒径组分反应后质量变化的情况,与其黏土矿物含量的变化相对应,两者具有较好的一致性,这表明,岩屑中黏土矿物的分散是导致岩屑平均粒径减小的主要原因。

表 1 反应前后东营组岩屑矿物成分分析及质量分析结果

Table 1 Analysis of mineral and changes of quality about each screen

岩屑矿物组分		矿物种类和含量/%						反应前后岩屑质量变化/g
		石英	钾长石	斜长石	方解石	石膏	黏土矿物	
A	反应前	26	4	7	10	—	53	-5.3
	反应后	26	4	9	16	—	45	
B	反应前	30	5	8	9	1	47	-5.8
	反应后	33	4	8	10	1	44	
C	反应前	28	4	8	8	1	51	+0.5
	反应后	27	5	8	7	1	52	
D	反应前	28	4	8	7	—	53	-0.4
	反应后	30	5	9	8	—	48	
E	反应前	36	5	9	6	—	44	+9.2
	反应后	28	5	8	6	—	51	

(2)反应液离子成分。表 3 为反应液离子分析结果。结合岩屑的矿物组分变化分析,可以发现其

主要来源于两方面:一是黏土矿物的水化分散。由表 2 可知,东营组蒙脱石含量很高,蒙脱石的吸附阳

离子多为 Na^+ 和 Ca^{2+} ,且易水化膨胀,可使黏土矿物吸附的阳离子进入水中;另一来源为二氧化碳与水反应形成碳酸,可与岩屑中的矿物组分如斜长石、方解石等反应生成 Na^+ 和 Ca^{2+} ^[9-10],致使岩屑分散,平均粒径减小。

表 2 东营组岩屑黏土矿物 XRD 分析结果

Table 2 XRD analysis result of clay minerals

黏土矿物相对含量/%					混层比/%	
高岭石 (K)	绿泥石 (Ch)	伊利石 (I)	伊/蒙间 层(I/S)	绿/蒙间 层(Ch/S)	伊/蒙间 层比 (I/S)	绿/蒙间 层比 (Ch/S)
4	2	5	60	29	60	20

表 3 反应液离子成分分析结果

Table 3 Result of ions analysis about water sample

序号	测定项目	含量/(mg·L ⁻¹)
1	Na ⁺	488
2	K ⁺	<5
3	Mg ²⁺	25
4	Ca ²⁺	342
5	Sr ²⁺	—
6	Ba ²⁺	—
7	Cl ⁻	24

上述分析可知,黏土矿物的水化分散是导致岩屑粒径减小的主要原因,环境中二氧化碳与水共存时,二氧化碳具有显著强化黏土矿物水化分散的效用,同时二氧化碳与水反应生成的碳酸,所具有的溶解性,则进一步促进了岩屑的分散。两种效应随着时间的延长逐渐加深,而随着温度和压力的升高,则渐趋剧烈。

4 结 论

(1)二氧化碳对岩屑粒径影响甚微,地层水在长时间浸泡的时候,会使岩屑粒径变小,当地层水与二氧化碳共存时,会使岩屑粒径在短时间内发生明显变化。

(2)二氧化碳或地层水单一介质环境中,岩屑粒径随温度和压力的变化不明显,但处于地层水和二氧化碳共存环境时,岩屑粒径随着温度和压力的升高,岩屑平均粒径逐渐减小,近似成线性关系。

(3)在地层水和二氧化碳共存环境中,东营组岩屑粒径变化的主要原因是二氧化碳促进了岩屑中的黏土矿物组分分散,缩短了黏土矿物的水化反应时间,同时二氧化碳与水反应生成碳酸,溶解了岩屑中的部分胶结矿物,促进了岩屑粒径的减小。

参考文献:

[1] 王海柱,沈忠厚,李根生. 超临界二氧化碳开发页岩

气技术[J]. 石油钻探技术, 2011,39(3):30-35.
WANG Hai-zhu, SHEN Zhong-hou, LI Gen-sheng. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO₂[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(3):30-35.
[2] KOLLE J J. Coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide;US, 6347675B1[P]. 2002-02-19.
[3] FAOSAL Aladwani, JULIUS P, RICHARD Hughes. Modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide[R]. SPE 114050,2009.
[4] GUPTA A P, LANGLINAIS J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operating [R]. SPE 96992, 2005.
[5] 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 Yu-kun, WANG Rui-he, NI Hong-jian, 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.
[6] 王在明. SC-二氧化碳钻井液特性研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东)石油工程学院, 2008.
WANG Zai-ming. Feature research of supercritical carbon dioxide drilling fluid [D]. Qingdao: College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2008.
[7] DU Yu-kun, WANG Rui-he, NI Hong-jian, et al. Application prospects of supercritical carbon dioxide in unconventional oil and gas reservoirs [J]. Advanced Materials Research, 2012,524-527:1355-1358.
[8] DU Yu-kun, WANG Rui-he, NI Hong-jian, et al. Determination of rock-breaking performance of high-pressure supercritical carbon dioxide jet[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser B), 2012,24(4):823-828.
[9] 曲希玉,刘立,胡大千,等. 二氧化碳流体对含片钠铝石砂岩改造作用的试验研究 [J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007,37(4):690-696.
QU Xi-yu, LIU Li, HU Da-qian, et al. Study on the dawsonite sandstones reformation with CO₂ fluid [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007,37(4):690-696.
[10] 曲希玉,刘立,马瑞,等. 二氧化碳流体对岩屑长石砂岩改造作用的试验 [J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2008,38(6):959-964.
QU Xi-yu, LIU Li, MA Rui, et al. Experiment on debris arkosic sandstone reformation by CO₂ fluid [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008,38(6):959-964.

(编辑 刘为清)