

Method for Water Sensitive System Evaluation and Study on Water Sensitivity Mechanism

Guang Wu¹, Haijian Zhao², Bing Bai², Bo Zhang¹, Chunlin Wang¹

¹China Oilfield Services Ltd., Tianjin

²Tianjin Branch, CNOOC (China) Co. Ltd., Tianjin

Email: wuguang2@cosl.com.cn

Received: Nov. 30th, 2017; accepted: Feb. 28th, 2018; published: Aug. 15th, 2018

Abstract

Mineral crystal spacing measurement experiment could accurately analyze the water swelling of the water-sensitive mineral species and mineral layer spacing changes. Scanning electron microscope uncoated spotting observation experiment could not only observe the types of minerals, but also determine the location of various mineral distributions. The radius of the pore throat was measured before and after the water-sensitive injury, and the radius range and the clogging position of the water-sensitive moving particles were given. Three main methods of water-sensitive micro-test evaluation of the reservoir combined with the commonly used core flow and physical expansion of two kinds of macro-water sensitivity test evaluation method, could finely analyze the mechanism of water-sensitive damage, the main water-sensitive minerals, damage location and its time and degree, which overcame the shortcoming that the original method could not accurately study the reason of water sensitivity. Water Sensitive System Evaluation was used for studying the rock samples from S Oilfield. The result shows that the main reason for the mechanism of water sensitivity is that the pore throat is blocked by the migration of the particles. The secondary reason is that the swelling of the clay minerals increases due to the expansion of clay mineral.

Keywords

X-Ray Diffraction, Electron Microscopy Scanning, Core Flow Evaluation, Clay Expansion, Particle Migration, Water Sensitivity

储层水敏系统评价方法与水敏机理研究

吴广¹, 赵海建², 白冰², 张博¹, 王春林¹

¹中海油田服务股份有限公司, 天津

²中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津

作者简介: 吴广(1985-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事油气田酸化、酸压方面的工作。

Email: wuguang2@cosl.com.cn

收稿日期: 2017年11月30日; 录用日期: 2018年2月28日; 发布日期: 2018年8月15日

摘要

矿物晶层间距测量试验能准确分析水化膨胀的水敏矿物种类及矿物晶层间距变化程度; 扫描电子显微镜不镀膜定点观察试验既能观察分析矿物的种类, 又可以确定各种矿物分布的位置; 孔喉半径测量试验测量水敏伤害前后孔喉半径分布, 间接给出了水敏运移颗粒的半径范围和堵塞位置, 以上3种主要的储层水敏微观测试评价方法, 结合常用的岩心流动与物理膨胀2种宏观水敏测试评价方法, 能精细分析引起水敏伤害机理、主要水敏矿物种类、伤害位置以及引起伤害的时间与程度, 克服了单一方法无法精确研究水敏原因的不足之处。应用系统水敏评价方法研究S油田岩样, 其结果表明该岩样产生水敏的机理主要是以运移的颗粒架桥堵塞孔喉为主, 膨胀性黏土矿物水化膨胀造成孔隙半径缩小为辅。

关键词

X射线衍射, 电镜扫描, 岩心流动评价, 黏土膨胀, 颗粒运移, 水敏伤害评价

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在油气开发过程中, 储层不可避免会与外来流体接触, 由于这些外来流体与储层中的原有流体以及矿物如黏土、碳酸盐岩矿物等性质存在差异, 往往会引发复杂的物理、化学反应, 从而导致储层受到不同程度的伤害, 造成储层渗流能力的下降。储层的敏感性一般包括水敏、速敏、盐敏、酸敏和碱敏[1], 当引入的外来流体矿化度低于储层地层水矿化度时, 储层流体原有平衡状态被破坏, 为建立储层环境中新的平衡, 水分子逐渐进入储层黏土矿物的晶层间, 并发生离子交换或结合, 导致黏土矿物晶层间距增大, 矿物发生分散、运移而堵塞储层孔隙喉道(水敏), 尤其蒙脱石含量较高的储层, 存在较高的水敏性伤害风险。部分砂岩储层具有较高的水敏性, 极易造成储层伤害, 所以准确评价水敏性伤害的程度及明确水敏伤害引起的原因对强水敏储层的高效开发至关重要。

目前已经形成了从静态到动态的试验评价方法, 主要的储层水敏评价方法包括矢量防膨试验、页岩膨胀仪试验、岩心流动试验等, 但这些宏观评价方法主要基于获得水敏伤害率的研究思路, 并不能对比分析微观结构发生的变化, 因此该方法有以下不足之处: ①无法精确获得导致储层水敏伤害的矿物种类;

②无法精确获得储层水敏矿物的微观分布位置；③无法精确获得水敏伤害导致的岩矿结构变化。

针对现有水敏评价方法的不足，建立了一套从微观到宏观相结合的综合评价强水敏储层试验方法，可获得水敏矿物种类、分布位置、岩矿结构变化等资料，为分析、研究储层水敏机理提供更多真实的依据。

2. 试验研究

2.1. 试验仪器

X 射线衍射仪(X'Pert MPD PRO, 荷兰帕纳科); 扫描电子显微镜(Quanta 450, 美国 FEI 公司); 毛细管流动孔隙结构仪(CFP-1500AEX, 美国 PMI 公司); 岩心流动试验装置(LD-3, 华达石油仪器); 页岩膨胀仪(NP-3, 华达石油仪器)。

2.2. 试验方法

2.2.1. 水敏矿物晶层间距测量试验

膨胀性黏土矿物层间含有 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等可交换性阳离子[2], 由于 Na^+ 和 Ca^{2+} 与水分子的结合力很强, 可以把大量的水分子吸引到晶格中来, 导致晶层间沿 C 轴(001)晶面方向膨胀, 利用 X 射线衍射原理, 根据布拉格方程($d = \lambda/2\sin\theta$), 可定量测量水敏矿物膨胀前后晶层间距 d_{001} [3] [4]。

试验步骤: ①将岩样研磨成粉末后浸泡在地层水中; ②用 X 射线衍射仪测量地层水浸泡处理过的岩粉黏土矿物晶层间距; ③再将该岩样用蒸馏水处理后测量黏土矿物晶层间距。

2.2.2. 扫描电子显微镜不镀膜定点观察试验

扫描电镜具有图像立体感强、放大倍数范围大且连续可调、样品制备简单、耗样少、污染小等特点, 可用扫描电镜观察黏土矿物的真实自然微观形貌特征和分布位置[5] [6]。

试验步骤: ①制作一个直径为 5cm 的导电金属圆盘; ②用导电炭胶将黄豆大小岩石样品粘贴在金属圆盘上(图 1); ③用导电炭胶将金属圆盘粘贴在扫描电镜样品室固定样品台上; ④用标号笔或者刻刀在金属圆盘与样品台重合的位置坐上记号; ⑤抽真空观察样品微观结构, 同时读取并记下每个样品的 X、Y、Z 坐标, 取出样品进行酸化处理(粘贴样品的金属盘请妥善保管, 切勿移动样品或者刮擦样品表面, 否则很难找到原观测位置); ⑥将处理后的样品烘干; ⑦将处理后的样品盘对准记号粘贴在样品台上, 使得该位置与上一次位置相重合; ⑧在计算机控制软件上输入 X、Y、Z 坐标数据, 找出原来的拍照点后即可从低倍到高倍逐级连续进行定点拍照观察。

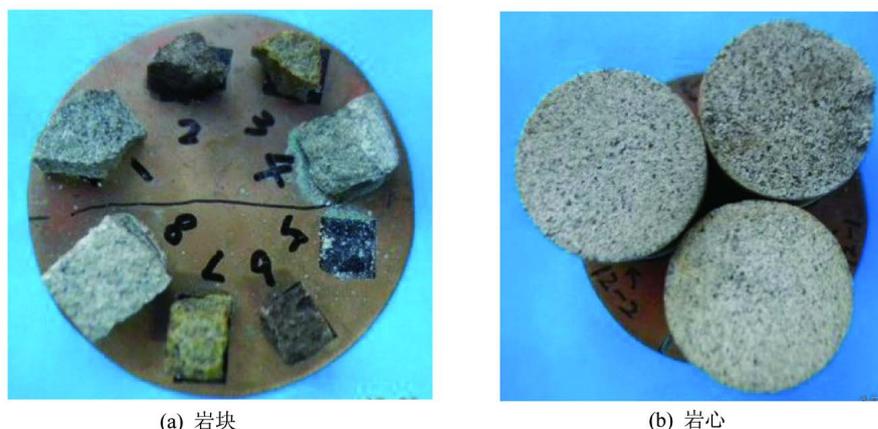


Figure 1. The process of sample location
图 1. 岩样定位处理图

2.2.3. 孔喉半径测量试验

水敏伤害主要是由 2 个原因造成的，一是黏土膨胀导致的渗流孔隙或喉道半径缩小，二是颗粒运移堵塞孔隙、喉道等渗流通道系统。因此，水敏伤害最终反映在渗流通道的改变。

测定多孔介质孔喉分布的方法很多，主要有压汞法、BET 法、孔隙瓦解法、电子显微镜显微统计法、核磁共振谱分析法、毛管流动孔隙结构仪法等，以上方法均可以分析储层岩石孔隙结构[7] [8]。

笔者利用毛管流动孔隙结构仪测量孔喉半径[9] [10]，试验步骤如下：①将岩样清洗烘干后，测出氮气驱替压差与气体流量的关系；②将岩样真空饱和和地层水后，测出氮气驱替压差和气体流量的关系；③将岩样烘干后用蒸馏水抽真空饱和，测出氮气驱替压差和气体流量的关系。

2.2.4. 岩心流动试验

岩心流动试验水敏评价法是一种最接近储层条件的宏观综合水敏评价方法。根据达西定律，在近似地层条件下注入各种与地层损害有关的流体，测定岩样的渗透率及其变化，以评价储层渗透率损害程度。

按照 SY/T 5358—2010《储层敏感性流动试验评价方法》，初始测试流体为地层水，中间测试流体为地层水(矿化度为初始测试流体的 1/2)。试验步骤如下：①制备岩样，清洗、烘干，测量气测渗透率；②制备初始、中间测试流体；③分别用初始测试流体、中间测试流体、蒸馏水测试流体测试渗透率恢复值。

2.2.5. 岩样物理膨胀试验

含有黏土矿物的岩样，在低于原始地层水矿化度的流体中会发生体积膨胀，通过仪器测量岩样的膨胀体积或者高度来表征岩样水敏程度。试验步骤如下：①清洗、粉碎、分选、烘干岩心或钻屑；②制备岩样；③分别用地层水、蒸馏水测试岩样膨胀率。

3. 结果与讨论

选取 S 油田某井不同井段的 2 个岩样进行试验，分别标号为 1[#]和 2[#]，黏土矿物总质量与岩样总质量之比为黏土矿物绝对质量分数，岩样中蒙脱石、高岭石、伊利石等与各岩样中黏土矿物总质量之比为黏土矿物相对质量分数，1[#]和 2[#]岩样中黏土矿物绝对含量分别为 14.5%和 13.6%，黏土矿物相对质量分数如表 1 所示。

Table 1. The clay mineral of the tested sample and its mass fraction

表1. 试验用岩样黏土矿物及其质量分数

样品编号	黏土矿物及其质量分数/%				
	伊利石	伊-蒙混层	高岭石	蒙脱石	绿泥石
1 [#]	7.1	0.0	62.4	10.2	20.2
2 [#]	5.9	0.0	69.4	5.5	19.3

3.1. 水敏矿物晶层间距测量

试验结果表明，1[#]和 2[#]岩样主要膨胀性黏土矿物均为蒙脱石，1[#]和 2[#]岩样在地层水中处理后蒙脱石晶层间距(d001)值分别为 1.8216 nm 和 1.8199 nm，经过蒸馏水浸泡处理后，1[#]和 2[#]两个岩样的蒙脱石晶层间距(d001)值分别为 1.8812 nm 和 1.8773 nm。由此可知，相对于用地层水处理时蒙脱石晶层间距(d001)值分别增加了 3.27%和 3.15%。样品岩样从相对较高矿化度的地层水环境转换到蒸馏水中，造成蒙脱石晶层间渗透压和晶层间静电作用与范德华力发生变化，使得蒙脱石晶层膨胀势与收缩势重新再平衡[11] [12]。

3.2. 扫描电子显微镜不镀膜定点观察

从相同倍数下的扫描电子显微镜不镀膜定点观察照片(图 2)可以看出, 2 个岩样中的蒙脱石和高岭石相互夹杂。1#岩样主要膨胀黏土矿物为片状蒙脱石, 蒙脱石水化膨胀后引起部分高岭石的黏土颗粒脱落运移, 导致孔喉半径变小、喉道堵塞。2#岩样观察点为骨架颗粒接缝处, 该样品照片显示膨胀性黏土主要为蒙脱石, 且因蒙脱石发生膨胀, 导致裂缝开度变小, 裂缝内部分区域被运移颗粒堵塞。

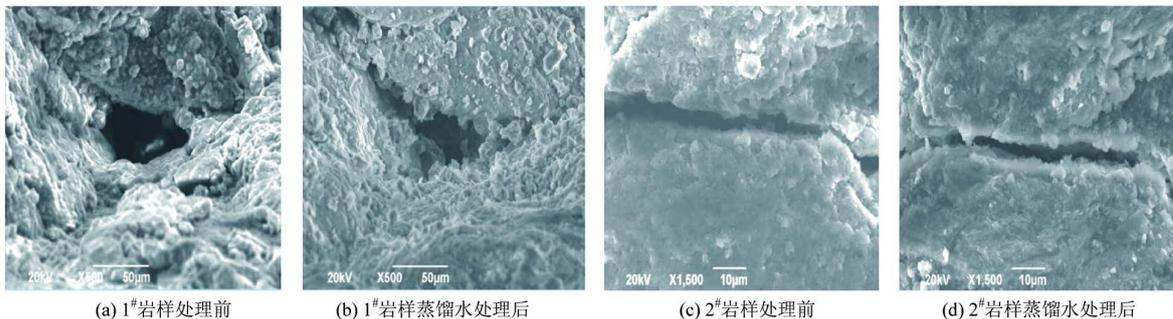


Figure 2. The photos of uncoated spotting observation by scanning electron microscope for 1# and 2# samples
图 2. 1#、2#岩样扫描电子显微镜不镀膜定点观察照片

3.3. 孔喉半径测量

图 3 是 1#与 2#岩样用蒸馏水处理前后孔喉半径分布曲线, 将曲线分为整体、峰值右侧(大孔隙)、峰值左侧(小孔隙) 3 个部分来分析。整体来看 2 个样品用蒸馏水处理后孔隙半径分布曲线右移, 说明蒸馏水处理后使岩样孔喉半径变小, 其中 1#样品向左偏移量更大, 即 1#样品孔喉半径缩小量相对较大; 对比两图中峰值右侧曲线, 1#岩样大孔喉占比减少量较 2#岩样多, 说明 1#岩样蒸馏水处理后有更多的大孔喉消失, 造成这一现象的原因主要是膨胀性黏土矿物水化膨胀造成孔喉半径缩小, 以及运移的颗粒架桥堵塞将大孔喉分割成小孔喉。比较两图中峰值左侧曲线, 2#岩样在蒸馏水处理后小孔喉占比增加。1#岩样蒸馏水处理后曲线在峰值和 1.2 μm 之间的孔喉占比是增加的, 但孔喉半径小于 1.2 μm 时, 孔隙占比却减少, 说明孔隙在蒸馏水处理后, 转变成为流体无法通过的孔隙。

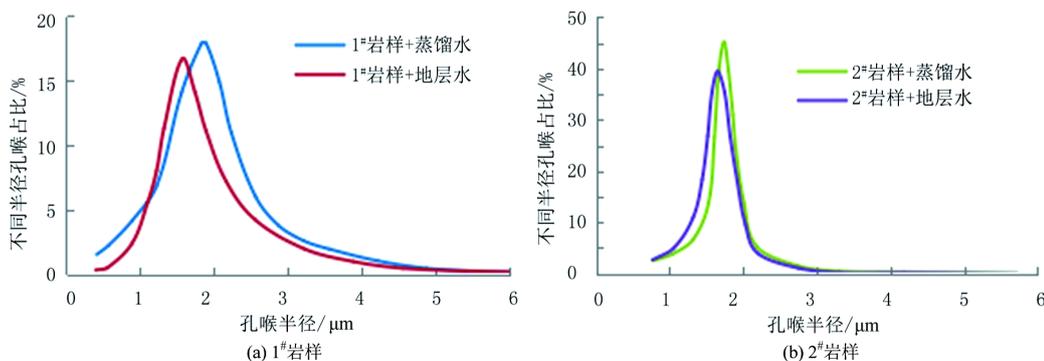


Figure 3. The radius of pore throat distribution curve of 1# and 2# core samples before and after water sensitivity
图 3. 1#和 2#岩心水敏前后孔喉半径分布曲线

3.4. 岩心流动试验结果

由岩心流动试验结果(图 4)可计算得到 1#和 2#岩样水敏指数分别为 76 与 65, 根据行业标准可知 1#

岩样为强水敏储层，2#岩样为中等偏强水敏储层。岩心流动试验结果从宏观角度比较了两岩样水敏性强弱。

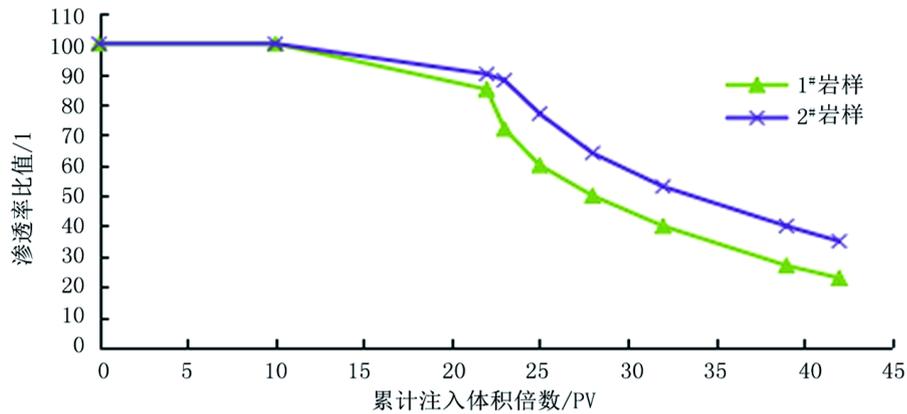


Figure 4. The evaluation on water sensitivity by flow experiment
图 4. 流动试验评价水敏

3.5. 物理膨胀试验结果

通过对 1#、2#岩粉膨胀试验结果的综合分析(图 5)，1#、2#岩粉样品在初始 30 min 内膨胀较快，分别在 300、600 min 时膨胀率达到最大值 6.45%、5.02%。岩样的膨胀率与膨胀性黏土矿物质量分数存在一定的正相关性，当膨胀性黏土矿物质量分数变化较大时，两者关系更为密切。

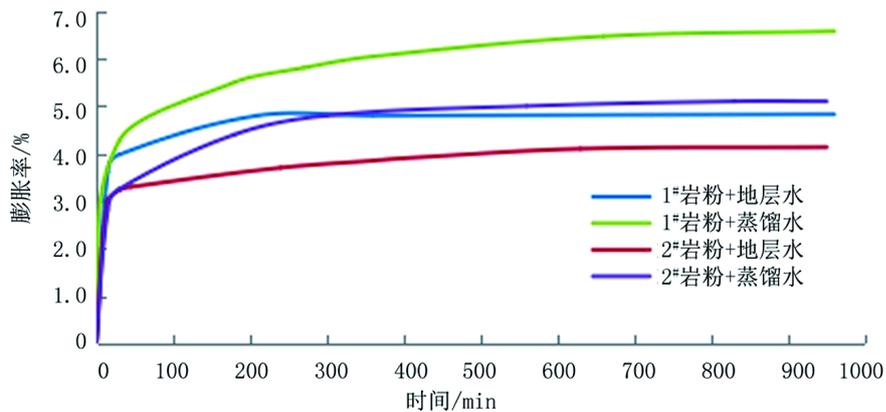


Figure 5. The curve of expansion rate of rock powder measured by shale expansive instrument
图 5. 页岩膨胀仪测岩粉膨胀率曲线

4. 结论

研究先采用物理膨胀试验和岩心流动试验对目的岩样水敏程度形成宏观认识，再结合水敏矿物晶层间距测量、扫描电子显微镜不镀膜定点观察及孔喉半径测量 3 种微观试验，观察分析了目的岩样水敏矿物种类及分布位置，精确测量了水敏矿物晶层间距变化，并测量了水敏伤害前后不同孔隙半径分布，间接给出了水敏运移颗粒的半径范围和堵塞位置，由此得到以下 S 油田某井 1#、2#岩样水敏机理与认识。

1) 岩样主要水敏黏土矿物均为膨胀型黏土矿物蒙脱石和运移型黏土矿物高岭石，两种矿物相互夹杂附着在岩石骨架上。

2) 岩样蒸馏水处理后有更多的大孔隙消失, 造成这一现象的原因主要是膨胀性黏土矿物水化膨胀造成孔隙半径缩小, 以及运移的颗粒架桥堵塞将大孔隙分割成小孔隙。

3) 岩样的水敏伤害与膨胀性黏土矿物质量分数存在一定的正相关性, 当膨胀性黏土矿物含量变化较大时, 两者关系更为密切。

4) 岩样水敏原因是以颗粒堵塞孔喉为主, 孔隙半径缩小为辅。

5) 宏观和微观相结合的水敏系统评价方法克服了原有方法无法精确研究水敏原因的不足之处, 从而能精细分析引起水敏伤害机理、主要水敏矿物种类、伤害位置以及引起伤害的时间与程度, 为水敏性油气田开发控制水敏伤害提供指导。

参考文献

- [1] 张绍槐, 罗平亚. 保护储集层技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [2] 崔桂陵. 粘土防膨剂[J]. 石油大学学报, 1989, 13(1): 102-109.
- [3] 刘恩新, 宋东勇, 崔巨师, 等. 低渗透油田油层伤害机理及保护措施研究[J]. 断块油气田. 2003, 10(6): 39-41.
- [4] 赵杏媛, 张有瑜. 粘土与粘土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [5] 徐洪明, 唐洪明, 田刚, 等. 利用 X-射线衍射仪评价防膨剂效果的试验方法[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(5): 33-35.
- [6] 姜开侠, 潘小明. 岩石样品的扫描电镜不镀膜定位观察技术及其在油层改造研究中的应用[J]. 石油试验地质, 1991, 13(4): 419-426.
- [7] 于众, 朱德升. 不镀膜岩石样品扫描电子显微镜分析技术——扫描电镜在采油试验中的应用[J]. 矿物岩石, 1984, 3(1): 101-104.
- [8] 刘志明, 殷文著, 蔡永茂. 空气渗流法测定岩心孔喉半径分布[J]. 油田化学, 1987, 4(3): 207-213.
- [9] 刘红现, 赵立强, 刘平礼, 等. 微观孔隙结构分析在砂岩酸化中的应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(2): 294-296.
- [10] Vibhor, G. and Jena, A.K. (1999) Substitution of Alcohol in Porometers for Bubble Point Determination. *Advances in Filtration and Separation Technology*, **13**, 833-844.
- [11] 谭罗荣. 蒙脱石晶体膨胀和收缩机理研究[J]. 岩土力学, 1997, 18(3): 13-18.
- [12] 谭罗荣, 孔令伟. 蒙脱石晶体胀缩规律及其与基质吸力关系研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2001, 31(2): 119-126.

[编辑] 帅群

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jogt@hanspub.org