

Development and Application of Anti-Scouring Experiment Device of Nano Adsorption Layer on Core Surface

Chunyuan Gu^{1,2*}, Guojian Li^{1,2}, Rongsheng Qin^{1,2}, Yufeng Yuan³, Weicai Shi³

¹Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai

²Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai

³Sinopec Co., Ltd., Jiangsu Oil Field Branch, Yangzhou Jiangsu

Email: *wein1989@163.com

Received: Sep. 7th, 2016; accepted: Sep. 26th, 2016; published: Sep. 29th, 2016

Copyright © 2016 by authors 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

Abstract

A device for anti-scouring experiment of the core surface is developed, and the water resistance of the nano particle adsorption layer on the core surface is successfully tested. The results show that the surface wettability of the nano adsorption layer is changed from hydrophilic to hydrophobic, and then to hydrophilic. The device has some features of continuous flow, testing 10 core samples at a time, convenient adjustable flow rate, taking out samples without stopping the pump and auto-control constant water level, which have met the experimental requirements.

Keywords

Anti-Scouring Experiment Device, Adsorption Layer, Nano Particles, Anti-Scouring Ability, Wettability

岩心表面吸附层耐冲刷实验装置的研制及应用

顾春元^{1,2*}, 李国健^{1,2}, 秦荣胜^{1,2}, 袁玉峰³, 时维才³

¹上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海

²上海大学上海市力学在能源工程中的应用重点实验室, 上海

³中石化江苏油田分公司, 江苏 扬州

Email: *wein1989@163.com

*通讯作者。

收稿日期：2016年9月7日；录用日期：2016年9月26日；发布日期：2016年9月29日

摘要

自主研发了一种岩心表面吸附层耐冲刷的实验装置，成功测试了岩心表面纳米颗粒吸附层的耐水流冲刷能力。实验结果显示了纳米吸附层表面润湿性由强亲水转变为疏水、再转向亲水的过程。同时表明，该装置具有连续不间断流动、一次性测试10块岩心片样品、流量可调、不停泵更换样品和水位恒定自控等特征，达到了实验要求。

关键词

耐冲刷实验装置，吸附层，纳米颗粒，耐冲刷能力，润湿性

1. 引言

纳米降压增注技术是针对油田注水井高压欠注问题开发的一项新技术，降压增注效果显著[1][2]，根据江苏油田40口井的应用效果统计，累计增注13.5万方。这也是目前石油开发中极少数达到规模应用水平的纳米技术，因而该技术及其作用机理受到广泛关注和研究[3][4]。疏水纳米粉体通过在岩心孔道壁面吸附形成纳米颗粒吸附层，吸附层是具有微纳米结构的超强疏水性的表面，可以显著降低表面水流的阻力，从而达到降压增注的目的[5][6]。因此，纳米颗粒吸附层在岩心表面存在的稳定性非常关键，纳米颗粒与岩心孔壁表面的吸附强度关系到纳米颗粒的减阻效果与有效时间。目前尚没有合适的测试装置和方法来测试和评价纳米颗粒与岩心的吸附能力以及有效时间，并方便观测纳米颗粒吸附层的变化状况。类似的实验均是采用循环冲刷泵，将岩心片放在管路中，进行循环冲刷，流量、冲刷面不可控。

本文介绍了自主研发的一种固体表面吸附层耐冲刷测试装置[7]，在不同的流量下冲刷岩心片表面的吸附层，分析吸附层的吸附能力与有效时间。

2. 岩心表面吸附层耐冲刷测试装置的研制

2.1. 岩心表面吸附层耐冲刷测试装置设计原理与结构

根据纳米减阻机理，水基液中纳米颗粒吸附在岩心表面，形成表面吸附层，其表面的润湿性发生变化，而且具有多层吸附特征。在注水过程中，吸附层颗粒及表面活性剂等逐渐脱落，润湿性也不断变化，因此，需要通过了解注水过程中的润湿性变化来获得吸附层的结构变化。岩心片吸附层的冲刷实验就是用来模拟这一过程，然而，在冲刷过程中无法直接获得表面润湿性的变化。同一个吸附岩心片在冲刷过程中，需要在不同时刻取出来测试接触角，然后继续冲刷，如此反复，记录不同时刻的接触角。因此，吸附层耐冲刷实验装置必须满足如下要求：

- 1) 纳米吸附层耐冲刷实验需要长时间连续测量，因此必须采用循环模式；
- 2) 满足测试不同冲刷强度下的有效吸附时间，需要流量可调；
- 3) 在测量过程中，经常取、换样品，且尽量不改变水流形态和流量，或避免造成流量起落和流态大幅波动，因此，要求尽量不停泵；
- 4) 满足长时间循环冲刷实验过程中无人值守，需要水位保持恒定。

根据以上要求，进行了如下设计：

- 1) 采用循环泵和双循环管路。设计了主流冲刷槽道和旁通流道，旁通流道大小、形状与冲刷槽相同，

形成双循环管路。在实验过程中，关闭旁通通道，开启冲刷槽道；而在取、换样品时，流道倒到旁通通道，关闭冲刷槽道，这样保持不停泵，水流循环不息，减少流量和流态大幅波动，减少不必要的流动稳定时间；

2) 水流速度可调，可以测试不同速度下纳米颗粒或其它有机分子等微粒能够在岩心表面吸附的时间；也可以测试吸附层在短时间内经受的最大水流速度，从而能够评价微粒在岩心表面的吸附强度。

3) 水箱中设计了上、下水位传感器，水位低于下水位传感器则自动进水，水位达到上水位传感器，自动关闭进水。

测试装置的具体结构如图 1 所示，包括循环驱替泵与水箱、流量计、进口压力表、进口三通阀、冲刷槽、出口三通阀、旁通流道和出口压力表。驱替泵一端通过管线依次与流量计、进口压力表连接，然后通过进口三通阀分别连接冲刷槽和旁通流道，再通过出口三通阀连接出口压力表，最后通过管线与循环驱替泵连接，形成循环流道。

冲刷槽结构见图 2，由流入稳定段 5-1、冲刷段 5-2 和流出稳定段 5-3 组成，冲刷段 5-2 有 10 个岩心片插槽，管壁两侧各 5 个。测试段前后安装有压力传感器，可以测试前后压力。

2.2. 设备特征与参数

流入稳定段为 520 mm，冲刷段为 380 mm，流出稳定段为 260 mm；冲刷槽内宽深，整个冲刷槽配有有机玻璃可视盖板，密封性能良好，耐压 0.5 MPa【最高压力】，流量范围 16 L/min。

3. 岩心表面纳米吸附层的耐冲刷测试

3.1. 测试方法

1) 将疏水纳米颗粒通过表面活性剂分散在水液中，形成纳米乳液，将 2~3 mm 厚的 10 块岩心片浸泡在纳米乳液中 36~48 h 左右，取出，测试表面接触角；

2) 将纳米颗粒吸附的 10 块岩心片装入冲刷槽中的岩心片插槽内；调节好流程，保持冲刷槽循环流道畅通，打开循环驱替泵，将流量设定为 4 L/min，打开进口三通阀，让水流通过冲刷槽，对壁面岩心片进行循环冲刷；

3) 待流量稳定后，并观测进口压力表和出口压力表；

4) 根据设定的时间间隔，按时间间隔调节进口三通阀和出口三通阀，使水流从旁通流道流出，进行不间断循环，而同时关闭了冲刷槽。取出插槽其中 1 块岩心片，然后再调节进口三通阀和出口三通阀，关闭旁通流通，使水流从冲刷槽流出循环，继续进行正常冲刷测试；

5) 测试取出的岩心片表面的润湿性，观察其疏水性的变化，记录数据；

6) 重复步骤 4) 和 5)，期间，将岩心装回，取出其它待测试的岩心片，进行测试；

7) 测试完所有的岩心片，关闭循环泵和电源，通过循环驱替泵的防空阀放掉管线中的水。

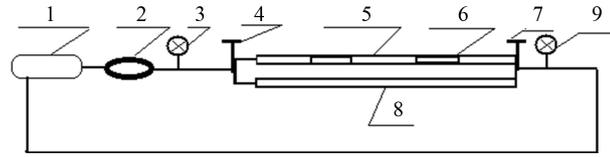
3.2. 实验测试结果

采用该装置测试了不同区域的 10 多块岩心，测试结果见表 1。图 3 是其中 5 块岩心接触角随时间的变化曲线。

实验结果表明：

1) 经纳米流体浸泡后，岩心表面吸附了纳米颗粒和帮助分散的表面活性剂，接触角有空白样的 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 变为 0° ，亲水性增强；

2) 冲刷 10 h 后，接触角由 0° 增加到 25° 以上，超过空白样的接触角，说明由强亲水向疏水方向转变，



1.循环驱替泵及水箱, 2.流量计, 3.进口压力表, 4.进口三通阀, 5.冲刷槽, 6.岩心片插槽, 7.出口三通阀, 8.旁通流道, 9.出口压力表

Figure 1. Schematic diagram of the structure of the adsorption layer on the core surface of the anti erosion test device

图 1. 岩心表面吸附层耐冲刷测试装置的结构示意图

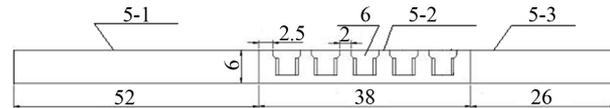


Figure 2. Schematic diagram of the structure of the scour groove

图 2. 冲刷槽的结构示意图

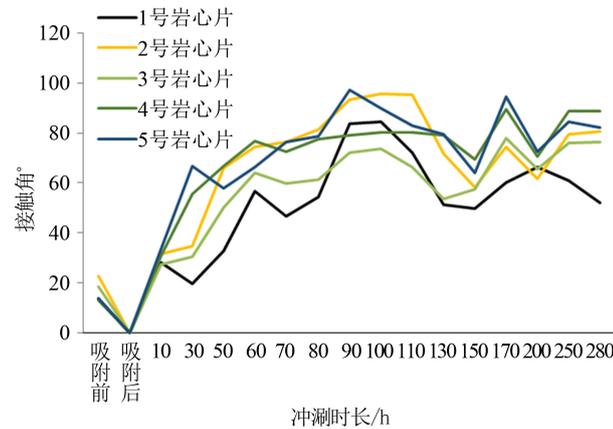


Figure 3. The wettability of the 1 - 5 core chips at different time (Liquid drop method)

图 3. 1-5 号岩心片表面润湿性随冲刷时间变化的折线图(液滴法)

Table 1. The contact angle of 10 core chips in the corresponding liquid drop method at different time
表 1. 10 块岩心片在冲刷不同时间对应液滴法接触角

样品号	1	2	3	4	5	样品号	6	7	8	9	10
吸附前	13.5	22.55	18.4	13	14.05	吸附前	10.55	12.6	14.95	13.8	11.9
吸附后	0	0	0	0	0	吸附后	0	0	0	0	0
10 h	28.1	31.5	27.3	30.9	33.7	20 h	25.1	39.5	33.7	38.3	50.4
50 h	32.9	65.8	50.3	66.8	57.9	50 h	82.7	68.9	64.5	66.2	70.7
100 h	84.5	95.6	73.5	80.3	89.8	100 h	98.5	89.4	87.7	103.9	81.4
150 h	49.7	58.1	57.4	69.6	63.9	150 h	73.9	68.5	68.25	76.3	92.5
200 h	66.2	61.8	65.6	70.5	72.6	200 h	69.1	61.5	80	62.7	97.3
280 h	52	80.6	76.5	88.8	82.1	280 h	89.9	84.8	78.8	70.8	92.9

亲水性减弱；冲涮 100 h 以上，部分岩心接触角超过 90°，说明向疏水转变；

3) 在冲涮 90~100 h 后，接触角达到最高后，疏水性最强；

4) 继续冲涮后，润湿性变化趋势显示逐步由疏水向亲水转变，但接触角上下波动，这说明冲涮过程中，岩心片表面吸附的纳米颗粒和表面活性剂在脱落；由于是多层吸附，而且各位置吸附不均匀，因此，接触角起伏变化。

水基纳米流体的减阻效果与岩心储层的性质、纳米材料的性质以及二者间的匹配性密切相关，而各因素又都非常复杂，所以岩心表面润湿性和冲刷时长之间的关系是非线性的、不易预测的。根据冲刷时间与接触角的变化关系，向前推移画趋势图，可估算吸附有效期，图 3 中显示岩心表面接触角恢复到吸附前初始接触角的时间均超过 1000 h 以上。

4. 结论

1) 研制了岩心表面纳米吸附层耐冲刷实验装置，具有流量可调、连续循环测试、一次可测试多块样品、不停泵抽取样品以及水位恒定的安全特点，满足了实验要求；

2) 利用该装置成功开展了纳米吸附层的耐冲刷实验，研究了纳米流体对岩心表面润湿性的影响，显示了注水过程中由亲水-强亲水-疏水-亲水变化的过程和特征；

3) 由于测试段采用观察窗口，密封面大，从而密封压力有限，在流量很大时，管路有时阻力大，或者测试段开始排气不好，气体闭压，有时会造成测试段泄漏，需要进一步研究改进。

基金项目

国家自然科学基金(51274136)，上海高校创新团队，上海市重点学科建设项目(S30106)，上海市力学在能源工程中的重点实验室和上海市教委重点项目(高峰学科建设项目)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Ju, B.S., Dai, S.G., Luan, Z.A., *et al.* (2002) A Study of Wettability and Permeability Change Caused by Adsorption of Nanometer Structured Polysilicon on the Surface of Porous Media. SPE 77938, *Asia Pacific Oil and Gas Conference*, Australia, 8-10 October 2002, 915.
- [2] 余庆中, 郑楠, 宋娟, 等. 水基纳米聚硅乳液体系应用研究[J]. 油田化学, 2012, 29(2): 181-185.
- [3] 狄勤丰, 顾春元, 施利毅, 等. 疏水性纳米 SiO₂ 增注剂的降压作用机理[J]. 2007, 30(4): 91-94.
- [4] 陈玉祥, 唐佳, 陈雅洁. 改性纳米 SiO₂ 助剂体系的降压增注机理研究[J]. 化学工程与装备, 2016(1): 4-5.
- [5] 顾春元, 狄勤丰, 施利毅, 等. 纳米粒子构建表面的超疏水性能实验研究[J]. 物理学报, 2008, 57(5): 3071-3076.
- [6] 王新亮, 狄勤丰, 张任良, 等. 超疏水表面滑移理论及其减阻应用研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(3): 241-249.
- [7] 狄勤丰, 顾春元, 王新亮, 程毅翀. 一种固体表面吸附层耐冲刷测试装置[P]. 中国, ZL2012103611949. 2014-10-15.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

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

期刊邮箱：iae@hanspub.org