

基于OTS-SAM技术的疏水石英砂支撑剂的制备及性能评价

苏煜彬^{1,2*}, 赵倩云^{1,2}, 姚坚^{1,2}, 蔡绪森³

- (1. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710021;
2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710021;
3. 中国石油长庆油田分公司第九采油厂, 宁夏 银川 750005)

摘要:采用十八烷基三氯硅烷(OTS)在石英砂表面形成单分子自组装膜(SAM)的技术制备了支撑剂疏水石英砂DH-1,该支撑剂具有良好的疏水能力,优于常规抑水砂PX-1和空白石英砂。同时,开展了不同支撑剂在去离子水、煤油、某油田采出原油及返排水等介质中的渗透率实验,结果表明,疏水石英砂DH-1对返排水的渗透率显著低于常规抑水砂和空白石英砂,疏水石英砂DH-1对原油的渗透率略低于空白砂。疏水石英砂DH-1在20℃/2 MPa、60℃/8 MPa条件下的NRFF值分别为2.33和2.16,抑水性能优良,受储层环境的影响小。支撑剂短期导流能力实验结果表明,在相同闭合压力的条件下,疏水石英砂DH-1在煤油介质中的导流能力最大,疏水石英砂DH-1在煤油中的导流能力优于去离子水介质的导流能力。疏水石英砂DH-1在69 MPa的破碎率仅为24.2%,单颗粒抗压强度为352 MPa。

关键词:十八烷基三氯硅烷;单分子自组装膜;支撑剂;岩心驱替实验;导流能力

中图分类号:TE329

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)06-0165-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.06.034

Preparation and performance evaluation of hydrophobic quartz sand treated by OTS-SAM technology

SU Yu-bin^{1,2*}, ZHAO Qian-yun^{1,2}, YAO Jian^{1,2}, CAI Xu-sen³

- (1. Changqing Oil and Gas Technology Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China;
2. State Engineering Laboratory of Low-permeability Oil and Gas Field Exploration and Development, Xi'an 710021, China; 3. The 9th Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Yinchuan 750005, China)

Abstract: Hydrophobic quartz sand DH-1 is prepared through octadecyl trichlorosilane (OTS) forming self-assembled monolayers (SAM) on the quartz sand surface. As a proppant, DH-1 has excellent hydrophobic ability, superior to normal water-suppressive quartz sand (PX-1) and blank quartz sand. The permeability tests are performed on different proppants in deionized water, kerosene, and crude oil and backwater media from a certain oilfield. Test results show that the permeability of DH-1 to the backwater is significantly lower than that of PX-1 and blank quartz sand. The permeability of DH-1 to the crude oil is a little lower than that of blank quartz sand. NRFF value of DH-1 are 2.33 and 2.16 at 20℃/2 MPa and 60℃/8 MPa, separately, showing an excellent water inhibition ability even under different reservoir environment. Under the same closing pressure conditions, the short-term permeability of DH-1 column is the highest in kerosene media compared with its counterparts. The short-term permeability of DH-1 column in kerosene medium is higher than that in aqueous medium. The damage percentage of DH-1 in 69 MPa is only 24.2%, and its single particle compressive strength is 352 MPa.

Key words: octadecyl trichlorosilane; self-assembled monolayers; proppant; core displacement test; flow conductivity

伴随着常规油气资源开采进入中后期,全球越来越重视对致密油、致密气、页岩气等非常规资源的勘探开发。美国于1949年开始利用水力压裂增产技术开发非常规油气资源,我国也从1955年开始使用该项技术。压裂后形成高导流裂缝是实施该增产技术的最终目标。油藏增产专家集中研究压裂材

料、压裂施工工艺及压裂设计等方面^[1-3],针对支撑剂表面的油水润湿性质研究较少。

由十八烷基三氯硅烷(OTS)形成的自组装单分子膜(OTS-SAM)近年来备受瞩目。OTS-SAM的热稳定性较好^[4-6],在350℃的条件下依然能保持稳定。OTS-SAM对清洗液、有机溶剂、热水、酸性溶液

收稿日期:2019-08-08;修回日期:2020-04-10

作者简介:苏煜彬(1990-),男,博士,研究方向为非常规油气田开发,通讯联系人,suyb_cq@petrochina.com.cn。

不敏感^[7-8],且 OTS-SAM 抑水效果优良^[9-11]、处理过程简便,越来越受到研究人员的重视。然而该技术表面的利用率较低^[12],且此类自组装单分子膜的形成对反应条件非常敏感^[13-15]。反应温度、反应时间、溶液中的水含量、反应溶剂等条件均对有机硅烷类 SAM 的形成有重要影响。因此,笔者拟提高支撑剂表面的疏水能力,抑制孔隙间的水相流动,最终达到降低产出液中含水率的目的。同时针对 OTS 在石英石表面形成 SAM 及疏水性能进行研究。

1 设计思路

1.1 材料与仪器

实验药品:十八烷基三氯硅烷(95%)、十六烷(98%),Fluka 公司生产;溶剂无水甲苯(99.9%),Tedia 公司生产;丙酮、氯仿、异丙醇、浓硫酸、30%过氧化氢均,均为分析纯,成都科龙化工试剂厂生产。

实验仪器:填砂管驱替装置,成都蓝博特科技有限公司生产;ECES-100 型裂缝导流能力测试仪,成都蓝博特科技有限公司生产;支撑剂破碎率检测仪,济南瑞普机电有限公司生产;101-2A 型电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司生产;HH-S4 型数显恒温水浴锅,江苏省金坛市友联仪器研究所生产;BSA423S 型精密电子天平,赛多利斯科学仪器有限公司生产。

1.2 实验方法

基底的准备:将石英砂置于烧杯中,缓慢注入 20 mL 浓硫酸,在 80℃ 的水浴锅中预热 10 min,缓慢加入 10 mL 过氧化氢。在 80℃ 条件下反应 20 min,再用去离子水反复冲洗 3 次,将基底保存于去离子水中 1 h 以保证表面完全水合化。烘干备用。

SAM 样品的制备:由于 OTS 暴露在空气中会迅速与空气中的水分发生水解反应生成复杂的聚合物,因此一般在制备分子膜 2 h 以内配制反应溶液。配制过程如下:分别量取 1 mL 甲苯和 4 mL 十六烷,倒入试管中混合均匀。通入氮气保护,用微量注射器吸取一定量的 OTS 将其注入试管的混合溶液中,制备成浓度为 2 mmol/L 的 OTS 溶液。将预处理的基底浸入上述混合溶液中,指定温度下反应 30 min 后取出,先在甲苯中震荡洗涤,再依次加入氯仿和异丙醇进行洗涤,以除去表面吸附的聚合物,最后用高纯氮气吹干样品,完成疏水石英砂 DH-1 的制备。

OTS-SAM 的生成机理如图 1 所示^[16-17]。溶液中的硅烷分子吸附于基底的水分子层,已吸附分子的活泼头部基团 SiCl₃ 与基底的水发生水解反应生

成硅烷基(Si(OH)₃)。硅烷基中的羟基迅速与基底二氧化硅表面的羟基进行缩合反应,形成共价键连接,从而使分子牢固地连接在基底上。分子中剩下的 2 个羟基与相邻的已水解的硅烷分子进行分子间的羟基缩合,相互连接形成平面二维网状结构。在反应的最初阶段,只有少量分子吸附于基底表面,此时 SAM 处于无序状。随着反应的进行,表面覆盖率达到饱和,逐渐形成致密的结晶态的 SAM。

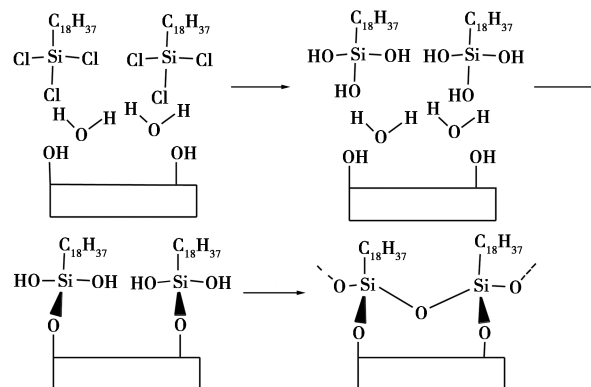


图 1 OTS-SAM 的生成机理

1.3 评价方法

1.3.1 岩心驱替实验

模拟岩芯的制作:分别将 150 g 空白石英砂(0.3~0.6 mm)、常规抑水砂 PX-1、疏水石英砂 DH-1 置于填砂管中,用有机玻璃棒压实后水平放置填砂管。

实验步骤:将上述模拟岩心放入烧杯,抽真空(真空度为 0.09 MPa)并饱和 2% 的盐水;依次在温度 20℃/围压 2 MPa、温度 60℃/围压 8 MPa 的条件下测定砂柱的渗透率。

1.3.2 短期导流能力评价

支撑剂导流能力的测试参照行业标准《压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法》(SY/T 6302—2009)^[18-20],使用 FCES-100 型压裂酸化裂缝导流能力测试分析系统,在层流条件下评价支撑剂填充层导流能力,其导流室设计参照 API 标准。导流室测试面积为 65 cm²、宽度为 3.8 cm、长度为 17.8 cm,测压孔间距为 12.7 cm。实验仪器工作原理遵循达西定律,支撑剂裂缝渗透率及导流能力计算式分别为:

$$k = (5.411 \times 10^{-4} \mu Q) / (\Delta p W_f) \quad (1)$$

$$k W_f = (5.411 \times 10^{-4} \mu Q) / \Delta p \quad (2)$$

式中: k 为支撑裂缝渗透率, μm^2 ; Q 为裂缝内流量, cm^3/s ; μ 为实验温度条件下实验流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

kW_f 为支撑剂充填层的导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。

1.3.3 砂粒破碎率的测定

支撑剂破碎率的测试参照石油天然气行业标准《压裂支撑剂性能指标及测试推荐方法》(SY/T 5108—2006)^[21-22]。将一定质量的20~40目石英砂倒入支撑剂破碎率检测仪的破碎室,用1min的恒定加载时间将额定载荷(模拟闭合压力28、69MPa)均匀加到受压破碎室上,稳载2min后卸压。将受压后的测试样品过粒径规范下限的筛子中,振荡10min,称取破碎颗粒的质量。破碎率的计算式为:

$$\eta = (m_c/m_p) \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为石英破碎率; m_c 为破碎样品的质量,g; m_p 为石英砂样品的质量,g。

2 结果与讨论

2.1 油水渗透率

岩心的油相渗透率是决定原油在地层中流动快慢的主要因素之一。岩心的油相渗透率越大,越利于原油从地层中采出。选用去离子水、煤油、某油田X-1井、X-2井的原油及其返排水在2MPa压力下进行岩心驱替实验,分别测定水相和油相在空白砂柱、抑水砂PX-1、疏水砂柱DH-1中的渗透率,结果如表1所示。

表1 模拟岩心驱替实验结果 mD

支撑剂	去离子水	煤油	反排水 (X-1井)	原油 (X-1井)	反排水 (X-2井)	原油 (X-2井)
空白砂	195	184	187	163	186	167
抑水砂PX-1	128	189	124	157	104	162
疏水砂DH-1	54	196	53	156	58	156

由表1可知,由于油井的反排水中含有一定的矿化度及油相,因此,空白砂、常规抑水砂PX-1、疏水砂DH-1的渗透率都低于去离子水。疏水砂DH-1中的水相渗透率均低于空白砂和常规抑水砂PX-1,说明疏水砂DH-1具有良好的疏水效果。疏水砂DH-1和常规抑水砂PX-1在不同原油样品中的油相渗透率略低于空白砂。

无因次的流体阻力比值($NFRR$)用于评价油和水对于同一种颗粒材料的润湿性差异^[23]。当 $NFRR > 1$ 时,材料对水相渗透能力的抑制作用大于对油相的抑制作用。 $NFRR$ 值的计算式为:

$$NFRR = RRF_w/RRF_o = (K_{w1}/K_{w2})/(K_{o1}/K_{o2}) \quad (4)$$

式中: RRF_w 、 RRF_o 分别为水相、油相的残留阻力系数; K_{w1} 、 K_{w2} 分别为处理前后的水相渗透率, 10^{-3}

μm^2 ; K_{o1} 、 K_{o2} 分别为处理前后的油相渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

分别在20℃/2MPa、60℃/8MPa的条件下进行模拟岩心驱替实验。首先用去离子水驱替填砂管得到水相的渗透率,再用煤油驱替填砂管得到油相的渗透率,按照式(4)计算 $NFRR$ 值,结果如表2所示。

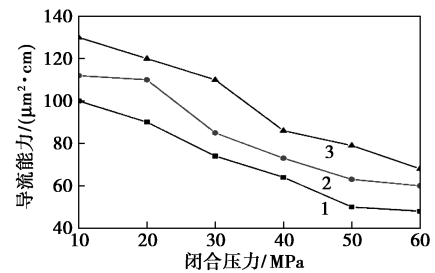
表2 疏水砂的 $NFRR$ 值

支撑剂	20℃/2MPa	60℃/8MPa
常规抑水砂PX-1	2.33	2.16
疏水砂DH-1	1.85	1.36

由表2可知,疏水砂DH-1在20℃/2MPa、60℃/8MPa条件下的抑水性能均优于常规抑水砂PX-1,表现出良好的抑水能力。说明了经OTS-SAM表面改性的疏水石英砂表面性质稳定、耐高温耐压性能好,不易受储层环境的影响。

2.2 导流能力

以煤油为流体介质,采用裂缝导流仪测试了空白石英砂、疏水砂DH-1和常规抑水砂PX-1在不同闭合压力下的短期导流能力^[24]。铺沙浓度为 10 kg/m^2 ,闭合压力以10MPa为递增量,从10MPa开始逐步加大。实验结果如图2所示。



1—石英砂;2—常规抑水砂PX-1;3—疏水砂DH-1

图2 不同支撑剂在不同闭合压力下的短期导流能力对比

由图2可以看出,随着闭合压力的增加,支撑剂在煤油介质中的导流能力均减小。对常规抑水砂PX-1和石英砂,当超过一定闭合压力后,由于支撑剂不断破碎,导流能力急剧下降,降低到一定程度后趋于平缓。在相同闭合压力的条件下,疏水砂DH-1的导流能力最大,常规抑水砂PX-1的导流能力次之,普通石英砂的导流能力最小。说明疏水砂DH-1更有利于油相介质通过。

室温情况下疏水砂DH-1在不同流体介质中的导流能力对比图如图3所示。

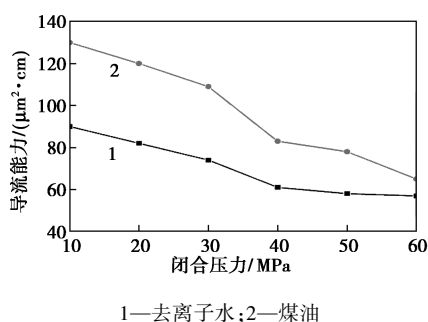


图 3 疏水砂 DH-1 在不同流体介质中的导流能力对比

从图 3 中可以看出,疏水砂 DH-1 在煤油中的导流能力优于去离子水条件下的导流能力,这与表 2 中 $NFRR$ 值相吻合。由于疏水石英砂表面的疏水长链的低表面能增大了界面张力,产生对水相的反向毛细管力。同时,分子紧密排列后的微细粗糙结构增大了固相和液相的实际接触面积。宏观表现为强大的疏水作用。据此油相和水相在经过疏水石英砂充填层时,油相流动能力强于水相流动。

2.3 破碎率

分别测试了石英砂、常规抑水砂 PX-1、疏水砂 DH-1 在 28、69 MPa 压力下的破碎率,结果如表 3 所示。

表 3 支撑剂在不同压力下的破碎率 %

压力/MPa	疏水砂 DH-1	抑水砂 PX-1	石英砂
28	10.5	13.7	26.5
69	24.2	39.4	79.4

由表 3 中可以看出,在低压力的情况下,3 种材料的破碎率均不高。在压力为 69 MPa 时,石英砂的破碎率高达 79.4%,破碎严重,流体流动困难。压力越高,3 种砂的破碎率差别越大。经过疏水处理的石英砂破碎率较低,疏水砂 DH-1 在 69 MPa 下的破碎率仅为 24.2%,低于抑水砂 PX-1。说明 OTS-SAM 对砂粒的保护和修复作用。由于 OTS-SAM 自组装膜在石英砂表面均匀铺展和分子间的链接及静电吸引增加了颗粒表面的柔韧性,减少了砂粒表面的缺陷,降低了缺陷在高压下开裂的几率。

2.4 抗压强度

支撑剂必须具有一定的强度才能为水力裂缝产生和保持所需要的导流能力。如果支撑剂强度不能克服裂缝的闭合压力,支撑剂被压碎,裂缝的导流能力降低。因此有必要测试颗粒的抗压强度。分别测试了石英砂、常规抑水砂 PX-1、疏水砂 DH-1 的单

颗粒抗压强度,结果如表 4 所示。

表 4 支撑剂单颗粒抗压强度

支撑剂类型	疏水砂 DH-1	抑水砂 PX-1	石英砂
单粒径抗压强度/MPa	352	331	283

由表 4 中可以看出,疏水砂 DH-1 颗粒的抗压强度为 352 MPa,高于抑水砂 PX-1 (331 MPa) 和石英砂 (283 MPa)。这是由于 OTS-SAM 自组装膜在石英砂表面均匀铺展和分子间的链接及静电吸引增加了颗粒表面的柔韧性^[9],修补了普通石英砂颗粒表面的缺陷。一定压力下,增加了颗粒间的接触面积^[25],从而增加了开裂所需要的应力,减少破碎几率。

3 结论

采用 OTS-SAM 技术制备了疏水石英砂 DH-1,并对其进行了疏水性能评价,表现出优于常规抑水砂的疏水能力。

(1) 模拟岩心驱替实验结果表明,疏水砂 DH-1 对返排水的渗透率显著低于常规抑水砂和空白石英砂,疏水砂 DH-1 对原油的渗透率略低于空白砂。疏水砂 DH-1 的 $NFRR$ 值高于常规抑水砂,表现出良好的抑水能力,且受储层环境的影响小。

(2) 短期导流能力评价实验结果表明,在相同闭合压力的条件下,疏水砂 DH-1 在煤油介质中的导流能力最大,疏水砂 DH-1 在煤油中的导流能力优于去离子水条件下的导流能力。疏水砂 DH-1 在 69 MPa 的破碎率低,单颗粒抗压强度高。

参考文献

- [1] 高新平,彭钧亮,彭欢,等.页岩气压裂用石英砂替代陶粒导流实验研究[J].钻采工艺,2018,41(5):35-37.
- [2] 王晓惠,张涛,刘炜,等.新疆油田九区石炭系油藏水平井分段压裂关键技术研究及应用[J].钻采工艺,2019,42(2):76-78.
- [3] 周小金,张帅,段希宇.长宁地区页岩气井出砂原因分析初探[J].钻采工艺,2018,41(4):63-65.
- [4] Kluth G J, Sung M M, Maboudian R. Thermal behavior of alkylsiloxane self-assembled monolayers on the oxidized Si(100) surface[J]. Langmuir, 1997, 13: 3775-3780.
- [5] Kulkarni S A, Miji S A, Mandale A B, et al. Thermal stability of self-assembled octadecyltrichlorosilane monolayers on planar and curved silica surfaces[J]. Thin Solid Films, 2006, 496: 420-425.
- [6] Ashurst W R, Yau C, Carraro C, et al. Alkene based monolayer films as anti-stiction coatings for polysilicon MEMS[J]. Sensors and Actuators A, 2001, 9: 239-248.

(下转第 174 页)

- dine [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, United Kingdom: IOP, 2018, 140: 1–8.
- [3] Alshehri A N Z. Employment of microbial fuel cell technology to biodegrade naphthalene and benzidine for bioelectricity generation [J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2015, 4(1): 134–149.
- [4] Gao J Z, Gai K, Yang W, *et al.* Plasma induced degradation of benzidine in aqueous solution [J]. Plasma Science and Technology, 2003, 5(5): 1983–1986.
- [5] Kisch H. Semiconductor Photocatalysis for chemoselective radical coupling reactions [J]. Accounts of Chemical Research, 2017, 50(4): 1002–1010.
- [6] Zhang L P, Jaroniec M. Toward designing semiconductor-semiconductor heterojunctions for photocatalytic applications [J]. Applied Surface Science, 2018, 430: 2–17.
- [7] Ahmadi K, Ziabari A A, Mirabbaszadeh K, *et al.* Synthesis and characterization of ZnO/TiO₂ composite core/shell nanorod arrays by sol-gel method for organic solar cell applications [J]. Bulletin of Materials Science, 2015, 38(3): 617–623.
- [8] Li W, Wang G J, Feng Y M, *et al.* Efficient photocatalytic performance enhancement in Co-doped ZnO nanowires coupled with CuS nanoparticles [J]. Applied Surface Science, 2018, 428: 154–164.
- [9] He T T, Wu D Y, Tan Y B. Fabrication of BiOI/BiVO₄ heterojunction with efficient visible-light-induced photocatalytic activity [J]. Materials Letters, 2016, 165: 227–230.
- [10] Zhou C C, Cao J, Lin H L, *et al.* Controllable synthesis and photocatalytic activity of Ag/BiOI based on the morphology effect of BiOI substrate [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 272: 213–220.
- [11] Jiang J, Zhang X, Sun P B, *et al.* ZnO/BiOI heterostructures: Photo-induced charge-transfer property and enhanced visible-light photocatalytic activity [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115(42): 20555–20564.
- [12] Jiang J J, Wang H T, Chen X D, *et al.* Enhanced photocatalytic degradation of phenol and photogenerated charges transfer property over BiOI-loaded ZnO composites [J]. Journal of Colloid Interface Science, 2017, 494: 130–138.
- [13] Jiang J J, Zhao P, Shi L Q, *et al.* Insights into the interface effect in Pt@BiOI/ZnO ternary hybrid composite for efficient photodegradation of phenol and photogenerated charge transfer properties [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 518: 102–110.
- [14] Guo K Y, Chen X H, Han J H, *et al.* Synthesis of ZnO/Cu₂S core/shell nanorods and their enhanced photoelectric performance [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2014, 72(1): 92–99.
- [15] Long Y, Wang Y, Zhang D, *et al.* Facile synthesis of BiOI in hierarchical nanostructure preparation and its photocatalytic application to organic dye removal and biocidal effect of bacteria [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 481: 47–56. ■

(上接第 168 页)

- [7] Evans S D, Ulman A. Surface potential studies of alky-thiol monolayers absorbed on gold [J]. A Chem Phys Lett, 1990, 170: 462–466.
- [8] Patel K R, Tang H, Grever W E, *et al.* Evaluation of polymer and self-assembled monolayer-coated silicone surfaces to reduce neural cell growth [J]. Biomaterials, 2006, 27: 1519–152.
- [9] 齐宁, 何利敏, 李柏杨, 等. 十八烷基三氯硅烷自组装抑水石英砂的制备与性能评价 [J]. 油田化学, 2016, 33(3): 445–440.
- [10] 曲占庆, 何利敏, 王冰, 等. 支撑剂表面疏水处理方法的研究 [J]. 石油化工高等学校学报, 2014, 27(1): 90–96.
- [11] 何利敏. 抑水型石英砂制备方法及其抑水性能研究 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.
- [12] 贾东辉. 脂肪类表面活性剂在固/液界面的吸附研究 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2011.
- [13] Davidovits J V, Pho V, Silberzan R, *et al.* Temperature influence on the formation of silanized monolayers on silica an atomic force microscopy study [J]. Surface Science, 1996, 352–354: 369–373.
- [14] Goldmann M, Davidovits J V, Silberzan P. Kinetics of self-assembled silane monolayers at various temperatures evidence of 2D Foamfoam [J]. Thin Solid Films, 1998, 327–329(none): 166–171.
- [15] Carraro C, Yauw O W, Sung M M, *et al.* Observation of three growth mechanisms in self-assembled monolayers [J]. J Phys Chem B, 1998, 102: 4441–4445.
- [16] Sieval A B, Opitz R, Maas H P A, *et al.* Monolayers of 1-alkynes on the H-terminated Si (100) surface [J]. Langmuir, 2000, 16: 10359–10368.
- [17] Tillman N, Ulman A, Schildkraut J S, *et al.* Incorporation of phenoxy groups in self-assembled monolayers of trichlorosilane derivatives, effects on film thickness, wettability, and molecular orientation [J]. J Am Chem Soc, 1988, 110: 6136–6144.
- [18] 中国石油天然气总公司. SY/T 6302—1997 压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法 [S]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1–18.
- [19] 金智荣, 郭建春, 赵金洲, 等. 复杂条件下支撑剂导流能力试验研究与分析 [J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 284–287.
- [20] 袁文义, 谢建利, 尹淑丽, 等. 段塞导致的混合支撑剂导流能力评价 [J]. 断块油气田, 2009, 16(6): 121–122.
- [21] 国家发展和改革委员会. SY/T 5108—2006 压裂支撑剂性能指标及测试推荐方法 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 1–23.
- [22] 周文高, 胡永全, 赵金洲, 等. 控制压裂缝高技术研究及影响因素分析 [J]. 断块油气田, 2006, (4): 35–38.
- [23] 郑铎, 宋金波, 许霞, 等. FS-RPM 相渗调节剂在控水防砂中的研究与应用 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34(5): 139–142.
- [24] 张毅, 周志齐. 压裂用陶粒支撑剂短期导流能力试验研究 [J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2000, (5): 39–41.
- [25] 金智荣, 刘太平, 顾克忠, 等. 透油阻水支撑剂在近水层有层压裂中的应用 [J]. 断块油气田, 2006, (19): 93–95. ■