油气储层长石矿物表面水滴接触角

邓亚骏^{1,2}, 徐蕾^{3,4}, 卢海龙^{1,2*}, 王昊^{1*}, 师永民³

1. 北京大学工学院, 北京 100871;

2. 北京大学海洋研究院, 北京 100871;

3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

4. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

* 联系人, E-mail: hlu@pku.edu.cn; hwang@coe.pku.edu.cn

2018-01-29 收稿, 2018-06-17 修回, 2018-06-29 接受, 2018-10-09 网络版发表

中国地质调查局天然气水合物勘查与试采工程项目(GZH201500306, JJHT-20)、国家重点研发计划(2017YFC0307603)和国家自然科学基金(51622601)资助

摘要 润湿性是油气储层岩石的一个重要特性,但由于组成储层孔隙的矿物成分多样且颗粒多在微米尺度,准确评价某一矿物的润湿性是一个难题.长石是砂岩储层的重要组成矿物,然而关于长石润湿性的研究却很少.本文利用原子力显微镜测量了微米级水滴在储层岩石钾长石和钠长石表面的接触角.结果表明,水-钾/钠长石接触角并不是一个定值,而是分布一定范围,这可能与晶体表面粗糙与非均质、晶面不同有关.相比于以前研究中用间接方法计算得出的水-长石接触角,本研究在实际储层长石矿物表面直接测量的接触角具有更好的代表性.就平均接触角而言,水-钾/钠长石的接触角均小于相同条件下测得的水-石英接触角,从而说明在用接触角法评价人造砂岩岩心的润湿性时,应综合考虑长石、石英对润湿性的影响.

关键词 接触角, 润湿性, 长石, 储层岩石, 原子力显微镜

润湿性是储层岩石的一个重要特性,因为它能显著影响流体(如油、水、气)在储层孔隙内的分布与传输.储层润湿性的评价方法有很多种,其中定量评价方法有Amott法^[1]、USBM法^[2]、接触角法^[3]、自动渗吸法^[4]、核磁共振弛张法^[5]等;定性评价方法有低温电子扫描(Cryo-SEM)法^[6]、Wilhelmy动力板法^[7]等.所有方法中,比较常用的是前3种定量评价方法.其中,Amott法和USBM方法都是以1块岩心样品为整体,从而评价其平均润湿性.接触角法则基于光学显微镜拍摄的液滴形貌,主要用于测定纯净流体和人造岩心系统的润湿性^[8].在接触角法中,一般利用石英晶体代替砂岩储层或利用方解石晶体来代替碳酸盐岩储层^[8].然而,尽管对于人造岩心,其孔隙也通

常由多种矿物组成,因此由单一矿物来代替整个储层显然不太合理.此外,组成孔隙的矿物颗粒多在微米尺度,上述方法都很难在孔隙尺度上评价实际矿物颗粒的润湿性.

最近, Deng等人^[9]报道了一种基于原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)的储层岩石矿物颗粒润湿性评价新方法.该研究利用AFM测量了砂岩储层岩石石英矿物表面上的微米级小水滴,并以此来计算水-石英的接触角.根据大量储层岩石的研究结果,除了石英之外,砂岩储层中还含有大量的长石矿物和一定量的其他矿物成分.因此,要想得到油气储层润湿性的准确评价,需要考虑到储层岩石的矿物多样性.而目前在利用人造砂岩岩心模拟实际砂岩

引用格式: 邓亚骏, 徐蕾, 卢海龙, 等. 油气储层长石矿物表面水滴接触角. 科学通报, 2018, 63: 3137–3145

Deng Y J, Xu L, Lu H L, et al. The contact angle of water on feldspar in a reservoir rock (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 3137–3145, doi: 10.1360/N972018-00120

储层时,一般用石英-水的接触角来讨论砂岩储层的润湿性,其有效性需要确认,如需要进一步研究长石矿物的润湿性.与石英的二氧化硅组成不同,长石的主要成分是钠、钾、钙的铝硅酸盐.根据组成的不同,长石通常又可分为钠长石(albite, Na-feldspar)、钾长石(orthoclase, K-feldspar)和钙长石(anorthite, Ca-feldspar).尽管长石类矿物在砂岩储层中占据着较大的比重,关于长石润湿性的研究却少之又少.检索到的唯一与长石有关的研究:由Karagüzel等人^[10]利用毛细渗透法(thin-layer wicking method)来评价粉体钾长石和钠长石的润湿性,得出水-钾长石、水-钠长石的接触角分别为 $45^{\circ}\pm 2^{\circ}$ 和 $43^{\circ}\pm 2^{\circ}$.然而,上述研究的长石样品并非来自实际油气储层,而是通过天然的2~3 cm的长石矿物颗粒研磨而成.此外,该研究采用的毛细渗透法是利用Washburn方程^[11]间接地计算出固-液接触角,而非直接测量.为了了解长石的润湿性,本文将基于实际储层岩石矿物,利用AFM直接测量水滴在微米级长石矿物颗粒表面上的接触角.

1 实验装置与方法

如图1所示,实验系统基于轻敲模式下的AFM. AFM是一种靠探测探针针尖和样品表面之间的作用力来对样品进行纳米尺度成像的仪器,属于扫描探针显微镜大家族的一员^[12,13].轻敲模式下的AFM已经被广泛用于液滴、气泡等软物质表面的测量^[9,14~20].本文用到了两台不同型号的AFM,分别为Dimension FastScan-BIO(Bruker)和MFP-3D-BIO(Asylum Research),其中图3、4以及表2中液滴1~4的结果由前一台获得,图5以及表2中液滴5的结果由后一台获得.此两种型号的AFM在我们以前的关于光滑表面上液滴接触角

的研究中已经被证明有着极高的准确性和稳定性^[9,16,17,21].例如,Yu等人^[21]利用AFM和光学显微镜测量同一个液滴的表观接触角,结果表明二者获得的接触角结果相吻合,且AFM具有更高的测量精度.如图1所示,测量对象被放置在一个密闭腔中,腔内温度控制在25℃.为了在特定矿物上形成微米级小水滴并避免在液滴底部产生气泡,首先,一个直径约2 mm的大水滴被轻轻地滴在储层岩石薄片表面,之后立刻将其放进密闭腔内密封.密闭腔的底部原来也放有一定量的水滴,从而避免薄片表面的大水滴全部挥发.大约12 h后,腔内会达到一个水蒸发-冷凝的动态平衡状态(利用AFM扫描,水滴大小和接触角在10 min内无变化,可判定达到平衡态),此时原来的大水滴基本已经挥发,在不同矿物颗粒表面会形成微米大小的小水滴.

实验使用的是Bruker公司的OLTESPA-R3型轻敲模式探针.探针针尖曲率半径一般小于10 nm,共振频率约70 kHz,弹性常数约2 N/m.此外,由于待测液滴在微米尺度,其形貌非常容易受到探针的影响,因此准确控制探针针尖与液滴的相互作用力非常重要.在实验中,通过对各种扫描参数(如target amplitude, integral gain, set point等)的不断优化,我们最终获得了高分辨且稳定的扫描图像.

实验中用到的储层岩石薄片来自中国鄂尔多斯盆地延长组长6油层组的1块砂岩岩心.该砂岩属于长石砂岩,长石矿物占比约50%,此外还包含石英(约25%)、黑云母(约5%)以及黏土矿物(伊利石、绿泥石等)^[22,23].砂岩岩心在制作薄片前经过了专门的洗油处理.实验前,薄片被简单地机械抛光,然后用去离子水冲洗并用高纯氮气吹干.为了测量特定矿物表面的水滴,首先需要利用AFM中集成的光学显微

图1 (网络版彩色)用于测量矿物表面水滴接触角的AFM实验系统

Figure 1 (Color online) Experimental setup of the AFM method for direct measurement of the contact angle of water droplet on a mineral surface

系统对待测矿物进行定位,然后控制AFM探针移动到所需位置进行测量。

2 实验结果

2.1 储层岩石薄片的扫描电子显微镜(SEM)图像与矿物成分分析

图2展示了本研究所用岩石薄片的SEM图像。从图中可知,薄片由多块矿物组成,且矿物尺寸多在100~300 μm 。图2中用数字1~8标注了8块矿物,并利用SEM配备的能谱(energy disperse spectroscopy, EDS)功能对矿物成分进行了确定。1~8处的能谱结果如表1所示。结合图2和表1结果可知,测试区域包含石英、钾长石、钠长石、钙长石等矿物,其中钾长石和石英表面较为光滑,钠长石表面有部分凹坑(溶孔),而钙长石则较为琐碎。本文将主要研究水滴在1号、5号钾长石及7号钠长石上的接触角。

2.2 水滴在钾长石表面上的接触角

由AFM获得的1号钾长石表面上水滴(直径约4 μm)的完整形貌如图3所示。图3(a)为液滴的三维形貌,图3(b)为液滴的俯视图。从图3(b)可以看出,液滴的三相接触线(指气、液、固三相交汇的区域)并不是一个理想的圆形,因此在接触线不同位置的接触角可能不同。为了获得接触角,沿着图3(b)中的虚线3-1和3-2来截取液滴的二维形貌,分别如图3(c)和(d)所示。图3(c)中的插图放大显示了距离长石表面100 nm以内的液膜形貌,可以看出液膜是近乎线性的,这与之前水滴在石英上观察到的现象一致^[9]。对图3(c)插

图中100 nm以内的液膜形貌进行线性拟合,可得相应的接触角为27.4°。同理,可得沿着三相接触线不同位置的接触角数值,并标于图3(b)中。各点液膜形貌线性拟合的确定系数(coefficient of determination)都大于0.98,可知拟合较好,可以依此计算接触角。从图3(b)可知,接触角沿着接触线一圈并非定值,而是在24.3°~33.1°之间变化的(平均值28.9°),这可能是受到晶体表面粗糙以及非均质^[24~26]、晶面不同^[27,28]的影响。基于AFM对矿物基底的扫描结果,可知该

图2 (网络版彩色)储层岩石薄片的SEM图像(数字表示的是能谱分析点)

Figure 2 (Color online) SEM image of the surface of a reservoir rock for this research (number point indicating the location of energy disperse spectroscopy analysis)

表1 图2中1~8号矿物的能谱分析

Table 1 EDS results of the minerals marked from point 1 to 8 in Figure 2

序号	原子百分比(%)						矿物
	O	Si	Al	Na	K	Ca	
1	68.02	20.03	6.19	0.97	4.79		钾长石
2	68.16	19.39	6.39	5.43		0.63	钠长石
3	72.52	27.48					石英
4	71.90	16.93	7.56			3.61	钙长石
5	67.70	20.58	6.62		5.10		钾长石
6	68.93	31.07					石英
7	64.43	21.96	7.00	6.61			钠长石
8	72.26	27.74					石英

图3 (网络版彩色)由AFM获得的1号钾长石表面小水滴(直径约4 μm)的典型形貌. (a) 水滴的三维形貌; (b) 水滴的俯视图, 沿着贯穿液滴的两条虚线 3-1 和 3-2, 可得到液滴的二维形貌, 并以此计算沿着三相接触线一圈的接触角标于图中; (c, d) 沿着(b)中虚线 3-1 和 3-2 得到的液滴二维形貌

Figure 3 (Color online) A typical AFM result of a water droplet (~4 μm in diameter) on the No.1 K-feldspar surface. (a) 3-D topography of the droplet; (b) top view of the droplet. Dashed lines 3-1 and 3-2, crossing the water droplet, along which the 2-D configurations are acquired for contact angle measurements. The contact angles along the triple-phase contact line are also marked. (c, d) Two 2-D droplet profiles along line 3-1 and line 3-2 in (b)

水滴所在区域的当地粗糙度 $R_q \approx 4$ nm.

图3展示了AFM测得的完整的液滴三维形貌图, 然而对于一些稍大的液滴(如液滴高度几微米), AFM会由于竖直方向扫描范围的限制而不能得到液滴的完整形貌. 但此时我们仍然可以通过扫描液滴的部分形貌来获得接触角, 如图4所示. 图4(a)为1号钾长石表面一个直径约20 μm的水滴的部分三维形貌, (b)为俯视图, (c)和(d)为沿着(b)中垂直于三相接触线的虚线4-1和4-2截取的二维形貌. 利用相同的方法, 对距离基底表面100 nm内的液膜进行线性拟合, 并计算出沿着接触线的接触角数值标于图4(b)中. 各线性拟合的确定系数同样都大于0.98. 由图4(b)可知, 液滴接触角是在30.8°~38.4°范围内变化的, 平均接触角为34.6°. 液滴所在区域当地粗糙度 $R_q \approx 15$ nm.

此外, 我们测量了在1和5号钾长石表面的另外3

个水滴. 连同图3和4中结果一起, 全部5个液滴的当地粗糙度、沿着接触线的接触角以及平均接触角列于表2中. 液滴所在位置的当地粗糙度也是基于AFM测量获得的. 综合5个水滴结果, 可得水-钾长石的平均接触角为31.5°.

2.3 水滴在钠长石表面上的接触角

除了上述水滴在1号、5号钾长石上的结果, 实验还测量了水滴在7号钠长石上的接触角. 如图5所示, (a)和(b)分别为两个水滴在7号钠长石表面的AFM结果. 与钾长石表面不同, 钠长石表面有凹坑(溶孔), 这与图2中SEM的结果相吻合. 图5(a)和(b)中两个水滴的平均接触角以及总的平均接触角分别为33.8°, 34.3°和34.0°, 当地粗糙度 R_q 分别约为20和28 nm. 结合上一节水滴-钾长石的结果, 可知水滴在钠长石和

图4 (网络版彩色)1号钾长石表面直径约20 μm 水滴的AFM结果。(a) 水滴的三维形貌;(b) 水滴的俯视图. 沿着垂直于三相接触线的两条虚线4-1和4-2, 可得到液滴的二维形貌, 并以此计算扫描区域沿着三相接触线的接触角标于图中。(c, d)沿着(b)中虚线4-1和4-2得到的液滴二维形貌

Figure 4 (Color online) A typical AFM result of a relatively large water droplet ($\sim 20 \mu\text{m}$ in diameter) on the No.1 K-feldspar surface. (a) 3-D topography of the droplet; (b) top view of the droplet. Dashed lines 4-1 and 4-2, along which the 2-D configurations are acquired for contact angle measurements. The contact angles along the triple-phase contact line are also marked. (c, d) Two 2-D droplet profiles along line 4-1 and line 4-2 in (b)

表2 水-钾长石接触角统计

Table 2 Summary for the contact angle of water droplet on the K-feldspar surface

液滴序号	矿物基底	粗糙度 $R_q(\text{nm})$	接触角($^\circ$)						平均值
			a	b	c	d	e	f	
1 ^{a)}	1号钾长石	4	24.3	29.3	33.1	27.2	27.4	31.6	28.9
2	1号钾长石	15	30.8	35.6	31.9	33.7	36.5	38.4	34.6
3	1号钾长石	3	31.9	28.2	32.7	35.6	38.3	27.8	32.4
4	1号钾长石	4	27.5	26.8	28.9	31.1	30.3	31.0	29.3
5	5号钾长石	4	29.7	32.3	33.7	37.2	38.6	34.1	34.3

a) 液滴1和2的详细接触角已分别在图3(b)和4(b)中标出, 因此此处只列出了部分接触角以及平均接触角

钾长石上的接触角大小相当。

3 分析与讨论

3.1 与文献中水-长石、水-石英接触角的比较

Karagüzel等人^[10]利用毛细渗透法得出的水-钾长石、水-钠长石的接触角分别为 $45^\circ \pm 2^\circ$, $43^\circ \pm 2^\circ$, 比本

研究中测得的接触角大了约 10° 。经过比较, 造成接触角差异的可能原因有以下3点: (1) 本研究中是利用AFM直接测量接触角, 而Karagüzel等人^[10]获得的接触角是利用Washburn方程^[11]间接计算出的; (2) 本研究是以实际储层岩石微米级长石矿物颗粒表面作为基底, 而Karagüzel等人^[10]用到的矿物并非来自实际储层, 而是通过天然的2~3 cm的长石矿物颗粒研

图5 (网络版彩色)7号钠长石表面两个小水滴的AFM俯视图,沿着接触线的接触角分别标于(a)和(b)中

Figure 5 (Color online) Two top views of the water droplets on the No.7 Na-feldspar surface. The contact angles along the triple-phase contact lines are marked in (a) and (b), respectively

磨而成; (3) 本研究中温度控制在25℃, 而Karagüzel等人^[10]控温在21℃, 尽管4℃的温差并不会对接触角产生显著影响^[29]. 综上可知, 本研究中利用AFM直接测量实际储层长石矿物表面的水滴所获得的接触角具有更好的代表性.

此外, 从本研究中AFM获得的接触角数据可知, 水滴在钾长石和钠长石上的接触角大小相当, 平均接触角分别约为31.5°和34.0°. 与Deng等人^[9]在相同实验条件下获得的水滴在6号和8号石英上的接触角(平均约40°)相比, 水-长石的接触角要小于水-石英的接触角, 表明在用接触角法评价人造砂岩岩心润湿性时, 也应综合考虑长石矿物对于润湿性的影响.

3.2 水-长石接触角多值性的分析

本研究获得的数据表明同一矿物上不同液滴、同一液滴沿着接触线的不同位置的接触角都是不同的, 这反映出水-长石体系复杂的表界面作用关系. 造成接触角多值性的原因可能有很多, 以下主要从表面粗糙与非均质、晶体不同晶面两方面进行分析.

3.2.1 表面粗糙与非均质影响

Wenzel理论^[30]和Cassie-Baxter理论^[31]表明液体在粗糙、非均质的表面上的接触角与在光滑表面是不同的. 本研究所用到的储层岩石薄片只经过简单地机械抛光, 因此是粗糙的, 且不能保证各处化学性质均一. 各测量液滴所在位置的粗糙度不同, 从而造成不同液滴的接触角不同. 对于同一个液滴, 沿着接触线一圈的微小区域的粗糙度也可能存在较大差异,

从而造成同一液滴具有多个接触角. 根据Wenzel理论, 当接触角小于90°时, 粗糙度越大的地方接触角应该越小. 然而, 本研究中部分结果却并不符合这个规律, 这表明除了表面粗糙和非均质之外, 还有其他因素影响着接触角, 例如晶体不同晶面的影响.

3.2.2 晶面的影响

Heng等人^[27]的研究表明阿司匹林晶体不同晶面的润湿性是不同的. 对于长石晶体, 虽未见研究其不同晶面润湿性的相关报道, 但由于不同晶面的原子排布不同, 可以推断其润湿性也存在差异. 晶面影响润湿性有2层含义, 分别如图6中(a)和(b)所示. 假设表面是光滑的, 同一晶体沿着不同方向切割露出的表面可能是不同晶面, 因此不同的表面原子排布可能会带来不同的润湿性. 例如本文中用到的1号和5号钾长石与液体接触的面可能是不同晶面. 如图6(b)所示, 尽管对于同一长石表面, 由于其表面是粗糙

图6 (网络版彩色)晶面影响润湿性的两层含义(a), (b)

Figure 6 (Color online) Two meanings of the fact that the wettability is affected by the crystal faces (a) and (b)

的,微小的粗糙元会带来多种不同的晶面,从而使得水-矿物的相互作用变得更加复杂。

4 结论

本研究利用AFM首次直接测量了微米级水滴在储层岩石长石矿物表面的接触角,得出以下3点结论。

(1) 水滴在钾长石和钠长石表面的平均接触角分别约为 31.5° 和 34.0° ,大小相当,且都小于相同条件下水滴在石英表面的接触角。这表明在用接触角法评价人造砂岩岩心润湿性时,最好不要简单用石

英代替,而应综合考虑长石矿物对于润湿性的影响。

(2) 与文献中报道的数据相比,本研究中的水-长石接触角数值偏小约 10° ,但本研究以实际储层中长石矿物为基底并在微米尺度直接测量的接触角更具有代表意义。

(3) 不同液滴以及同一液滴沿着接触线不同位置的接触角并非定值,而是在一定范围内波动的,这可能与表面粗糙和非均质、晶体不同晶面有关。要想全面理解水-长石接触角多值性的原因,还需要进一步深入的研究。

参考文献

- 1 Amott E. Observations relating to the wettability of porous rock. *Trans Am Inst Min Metall Eng*, 1959, 216: 156–162
- 2 Donaldson E C, Thomas R D, Lorenz P B. Wettability determination and its effect on recovery efficiency. *Soc Pet Eng J*, 1969, 9: 13–20
- 3 Treiber L E, Owens W W. A laboratory evaluation of the wettability of fifty oil-producing reservoirs. *Soc Pet Eng J*, 1972, 12: 531–540
- 4 Ma S M, Zhang X, Morrow N R, et al. Characterization of wettability from spontaneous imbibition measurements. *J Can Pet Technol*, 1999, 38: 1–8
- 5 Brown R J S, Fatt I, Brown R J S, et al. Measurement of fractional wettability of oil fields' rocks by the nuclear magnetic relaxation method. *Trans Am Inst Min Metall Eng*, 1956, 207: 262–264
- 6 Robin M, Rosenberg E, Fassi-Fihri O. Wettability studies at the pore level: A new approach by use of cryo-sem. *SPE Form Eval*, 1995, 10: 11–19
- 7 Mennella A, Morrow N. Investigation of complex wetting behavior of liquid/liquid/solid system by the dynamic Wilhelmy plate. In: *Proceedings of the 3rd International symposium on reservoir wettability and its effect on oil recovery*. Laramie: University of Wyoming, 1996. 43
- 8 Anderson W G. Wettability literature survey part 2: Wettability measurement. *J Pet Technol*, 1986, 38: 1246–1262
- 9 Deng Y J, Xu L, Lu H L, et al. Direct measurement of the contact angle of water droplet on quartz in a reservoir rock with atomic force microscopy. *Chem Eng Sci*, 2018, 177: 445–454
- 10 Karagözel C, Can M, Sönmez E, et al. Effect of electrolyte on surface free energy components of feldspar minerals using thin-layer wicking method. *J Colloid Interf Sci*, 2005, 285: 192–200
- 11 Washburn E W. The dynamics of capillary flow. *Phys Rev*, 1921, 17: 273
- 12 Binnig G, Quate C F. Atomic force microscope. *Phys Rev Lett*, 1986, 56: 930–933
- 13 García R, Perez R. Dynamic atomic force microscopy methods. *Surf Sci Rep*, 2002, 47: 197–301
- 14 Herminghaus S, Pompe T, Fery A. Scanning force microscopy investigation of liquid structures and its application to fundamental wetting research. *J Adhes Sci Technol*, 2000, 14: 1767–1782
- 15 Deng Y J, Chen L, Yu J P, et al. Nanoscopic morphology of equilibrium thin water film near the contact line. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 91: 1114–1118
- 16 Deng Y J, Chen L, Liu Q, et al. Nanoscale view of dewetting and coating on partially wetted solids. *J Phys Chem Lett*, 2016, 7: 1763–1768
- 17 Chen L, Yu J P, Wang H. Convex nanobending at a moving contact line: The missing mesoscopic link in dynamic wetting. *ACS Nano*, 2014, 8: 11493–11498
- 18 Tyrrell J W, Attard P. Images of nanobubbles on hydrophobic surfaces and their interactions. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 176104
- 19 Lohse D, Zhang X. Surface nanobubbles and nanodroplets. *Rev Modern Phys*, 2015, 87: 981
- 20 Ma J, Jing G Y, Chen S Y, et al. Contact angle of glycerol nanodroplets under van der Waals force. *J Phys Chem C*, 2009, 113: 16169–16173
- 21 Yu J P, Wang H, Liu X. Direct measurement of macro contact angles through atomic force microscopy. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 57: 299–303

- 22 Yanru G, Junbang L, Hua Y, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic oil fields in the yanchang formation, Ordos basin, China. *Pet Explor Dev*, 2012, 39: 447–456
- 23 Fu G M, Zhao J X, Zhang Z S, et al. The provenance and features of depositional system in the yanchang formation of triassic in south-east area of Ordos basin (in Chinese). *J Mineral Petrol*, 2010, 30: 99–105 [付国民, 赵俊兴, 张志升, 等. 鄂尔多斯盆地东南缘三叠系延长组物源及沉积体系特征. *矿物岩石*, 2010, 30: 99–105]
- 24 Nakae H, Inui R, Hirata Y, et al. Effects of surface roughness on wettability. *Acta Mater*, 1998, 46: 2313–2318
- 25 Yoshimitsu Z, Nakajima A, Watanabe T, et al. Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets. *Langmuir*, 2002, 18: 5818–5822
- 26 Quéré D. Wetting and roughness. *Annu Rev Mater Res*, 2008, 38: 71–99
- 27 Heng J Y, Bismarck A, Lee A F, et al. Anisotropic surface chemistry of aspirin crystals. *J Pharm Sci*, 2007, 96: 2134–2144
- 28 Heng J Y, Bismarck A, Lee A F, et al. Anisotropic surface energetics and wettability of macroscopic form I paracetamol crystals. *Langmuir*, 2006, 22: 2760–2769
- 29 Sarmadivaleh M, Al-Yaseri A Z, Iglauer S. Influence of temperature and pressure on quartz-water-CO₂ contact angle and CO₂-water interfacial tension. *J Colloid Interf Sci*, 2015, 441: 59–64
- 30 Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind Eng Chem*, 1936, 28: 988–994
- 31 Cassie A, Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Trans Faraday Soc*, 1944, 40: 546–551

Summary for “油气储层长石矿物表面水滴接触角”

The contact angle of water on feldspar in a reservoir rock

Yajun Deng^{1,2}, Lei Xu^{3,4}, Hailong Lu^{1,2*}, Hao Wang^{1*} & Yongmin Shi³

¹ College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

² Institute of Ocean Research, Peking University, Beijing 100871, China;

³ School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

⁴ China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Beijing 100083, China

* Corresponding authors, E-mail: hlu@pku.edu.cn; hwang@coe.pku.edu.cn

The wettability of a reservoir rock plays an essential role in affecting the distribution and transportation of fluids (water, oil, gas, etc.) in reservoir pores that are constructed with micro-sized mineral particles. To study the wettability of a reservoir rock, several quantitative and qualitative methods have been developed, among which the Amott method, the USBM method and the contact angle method are most frequently employed. As limited by the micro-size of minerals in reservoir rock, the methods mentioned above are all difficult to be applied to evaluating the wettability of a specific mineral in an actual reservoir rock. Recently, atomic force microscopy (AFM) has been used to measure the contact angles of water droplets on quartz in a sandstone reservoir rock. However, the wettability of feldspar, one of the major minerals of reservoir rock, has not been studied yet at the pore scale.

In this study, the contact angles of micro-sized water droplets on both K-feldspar and Na-feldspar in a reservoir rock, which was taken from a sandstone core in Ordos Basin, China, were measured with AFM under tapping mode. Before measurement, the slice was simply mechanically polished, cleaned with deionized water, and then dried in nitrogen of high purity. In order to create micro-sized water droplets on the feldspar surfaces, a large droplet of around 2 mm in diameter was first gently generated, and then the slice was immediately moved into the chamber of the AFM. Inside the chamber a certain amount of water was sprayed around the test rock slice to get the chamber to achieve the equilibrium state of evaporation and condensation of water. Generally it took about 12 h to reach the equilibrium state, when no significant changes in droplet size and contact angle were observed in ~10 min. As the result of evaporation, some micro-sized water droplets emerged on feldspar surfaces.

The AFM results obtained show that the micro-sized droplets are asymmetrical so that the contact angles, which are in the range of 24.3°–38.6° and 29.5°–39.1° for water on K-feldspar and Na-feldspar, are different at different points along the triple-phase contact lines, possibly caused by the roughness and heterogeneity of the surface and the difference in crystal face, etc. As compared with previous studies the current results indicate that the average contact angles of water on both K-feldspar and Na-feldspar are smaller than those for water on quartz (~40°), implying that quartz cannot be simply applied to represent all minerals of a reservoir rock for wettability evaluation. The current results of contact angles of water on K-feldspar and Na-feldspar are about 10° smaller than those obtained on crushed pure feldspars by indirect thin-layer wicking method in reference studies. Because the current investigations were conducted on an actual reservoir rock, these results might better describe the wettability of feldspars in reservoir.

contact angle, wettability, feldspar, reservoir rock, atomic force microscopy (AFM)

doi: 10.1360/N972018-00120