

纳米粒子构建表面的超疏水性能实验研究*

顾春元 狄勤丰[†] 施利毅 吴 非 王文昌 余祖斌

(上海大学,上海市应用数学和力学研究所,上海市力学在能源工程中应用重点实验室,上海 200072)

(2007 年 5 月 30 日收到,2007 年 11 月 20 日收到修改稿)

采用疏水纳米粉体压片法和岩心吸附法构建了具有微纳米结构的表面,测试了这些表面的接触角,拍摄了水滴在吸附纳米粒子的岩石表面的滚动过程照片,采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)检测了表面的微结构.实验结果表明:无机纳米粒子经弱疏水性材料修饰后,其表面润湿性由强亲水变为强疏水,疏水纳米粒子吸附表面的接触角均大于 120° ,滚动角约 7° ,显示出超疏水特性;SEM 照片显示,这些超疏水表面是具有不规则微纳米结构的气固复合面,符合 Cassie-Baxter 的复合表面模型.

关键词:超疏水,纳米粒子,微纳米结构表面,接触角

PACC: 6146, 6480G, 6810C

1. 引 言

润湿性是固体表面的一个重要特性,在生产和生活中有着广泛的应用.近十年来,具有特殊润湿性的界面材料及其特殊的功能引起了人们的高度关注^[1-6],促进了超润湿性及其表面材料的研究.研究主要从两个方面展开:一是揭示产生超润湿性的原理;二是构建超润湿性表面,并进行实际应用.20 世纪三、四十年代,Wenzel^[7]和 Cassie 等人^[8]相继研究了表面粗糙度对浸润性的影响,并给出了 Wenzel 公式和 Cassie-Baxter 公式.这两个公式成为目前学者探讨不同粗糙度或微结构表面的接触角模型的基础^[9],也使人们认识到固体表面的润湿性是由其化学组成和微观几何结构共同决定的^[10-12].

表面的自由能越低,其疏水性越强.由于表面能是材料的固有特征,具有最低表面能的光滑固体表面与水的接触角也只有 119° ^[13,14].因此,只有改变表面微结构,才可以得到更好的疏水或亲水效果.Jiang 等人^[4-6]对自然界中具有高度自清洁作用的荷叶表面结构的研究,使人们对具有超润湿性特征的微纳米结构有了深刻认识.Barthlott 等人^[15]通过观察植物叶表面的微观结构,认为这种自洁的特征是由表面上微米结构的乳突与表面蜡状物共同引起的.

Zhai 等人^[16,17]发现荷叶表面微米结构的乳突上还存在纳米结构,认为这种微米结构与纳米结构相结合的阶层结构是表面产生超疏水的根本原因,而且,这种表面具有较大的接触角及较小的滚动角.

超润湿性包括超亲水性、超疏水性、超双亲性和超双疏性.超亲水性是指与水的接触角为 0° ,超疏水一般是指与水的接触角大于 120° ,也有指大于 150° ^[18,19].显然,这是一种静态分类方法,不足以描述表面的超疏水性^[20].1962 年,Fumidge^[21]发现了接触角滞后现象的重要性,国内金美花等^[22]制备了高接触角和高粘滞力的阵列聚苯乙烯纳米管膜,水滴的接触角达到 $162.0 \pm 0.5^\circ$,而滚动角大于 23° ,由此可见,要得到很好的动态疏水效果,应该考虑动态滚动角(也称滑动角).因此,将超疏水表面定义为与水的接触角大于 120° (基于最疏水材料的接触角不超过 120°)、滚动角小于 10° 的表面^[23]更为科学.的确,对于水流减阻来说,具有较小的滚动角比单纯追求更大的接触角更有意义.

为证实微纳米结构对疏水性的影响,人们开始构建具有微纳米结构的各种超疏水表面.一般来说,制备方法主要有两种^[20],一种是在疏水材料表面构建粗糙微结构,另一种是在粗糙表面上修饰低表面能的物质.郑黎俊等利用不同的方法制备了具有微纳米结构的超疏水特性的表面^[10,24].由于具备了表

* 国家自然科学基金(批准号:50674065),上海市科委重点攻关项目(批准号:071605102),上海市教委重点攻关项目(批准号:08ZZ45),上海市重点学科建设项目(批准号:Y0103)和上海大学研究生创新基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: qinfengd@sina.com

面微结构的可控技术, Wei 等人^[25]进一步研究了表面颗粒形状、间距和排列方式对疏水性的影响, Fang 等人^[26]利用 LB 方法模拟研究了微管壁上接触线和界面作用, 肖剑荣等人^[27]研究了含氮氟化类金刚石薄膜表面形貌和疏水特征。

用特定的疏水性纳米颗粒处理岩心可以产生显著的减阻效果, 这一现象已经被岩心流动实验和油田增注现场措施效果所证实^[28-34]。然而, 这种纳米注剂显著的减阻机理尚在探索中, 国内文献对机理的阐述主要基于俄罗斯引进的资料, 易华、陈兴隆等人^[35, 36]也进行了探索, 提出了一些独特的观点, 然而未能就疏水纳米粒子 (hydrophobic nanoparticles, HNP) 的巨大作用做出很好的解释。在探索过程中, Eric、Cécile 等人^[37-39]取得了关于疏水纳米粒子阵列的滑移效应的最新研究成果。结合一系列的实验成果, Di 等人^[40, 41]提出了基于纳米超疏水性效应的水流速度滑移理论, Li 等人^[42]模拟计算了表面颗粒大小对滑移长度产生的影响, 曹炳阳、徐超等^[43, 44]利用分子动力学模拟研究了流体的滑移现象, 这些文献从流体动力学角度对疏水纳米的减阻效果进行了很好的解释。本文用疏水纳米粒子构建了超疏水表面, 测试了表面微观结构和接触角, 研究了吸附纳米粒子的岩石表面的特性, 为纳米效应的水流速度滑移理论提供了物理基础, 是纳米减阻机理研究的部分成果。

2. 实 验

2.1. 实验方法与仪器

采用液相法对 15—30 nm 的纳米 SiO₂、TiO₂ 粒子进行了表面修饰, 然后, 将一定量的修饰前、后的纳米粉体放入水中, 振荡搅拌后, 捞取表面粒子进行称重, 评价纳米活度。

采用支撑剂破碎率评价仪对疏水修饰剂 A 粉体、修饰后的纳米 SiO₂、TiO₂ 粒子进行自动加压和减压, 得到表面较光滑的压片; 利用疏水纳米 SiO₂ 柴油分散液处理岩心薄片, 干燥后得到表面吸附纳米粒子的岩心片。采用 OCA15 光学接触角测试仪测试接触角; 用 Quanta Inspect 型的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观测薄片的表面, 得到表面微观结构照片。

2.2. 样品制备

2.2.1. 疏水纳米粒子的修饰与制备

采用液相法对纳米粒子进行了修饰, 制备了疏水纳米粒子。具体方法是将纳米 SiO₂ 或 TiO₂ 分散在水中, 加入适量阴离子表面活性剂, 采用均质乳化分散, 使纳米粒子基本达到单分散效果, 然后调节溶液的 pH 值至弱碱性, 加入表面修饰剂溶液, 在恒温搅拌反应 2 h 后, 经过滤、干燥和粉碎得到改性的疏水纳米 SiO₂ 或 TiO₂ 产品。

2.2.2. 压片样品

为尽量减少其他成分的干扰, 粉体压片在制备过程中, 不添加任何固化剂, 这种情况下使用手动机械压片机制片就无法得到粉体压片, 因为人工加压和减压的速度很难均匀, 会造成内部应力不均, 压片容易脆裂, 很难成型。为消除应力不均的影响, 借用了支撑剂破碎率评价仪, 因为该仪器整个加压、保压和卸压过程完全由计算机控制, 应力均匀。将粉体装入压模, 振荡摇匀, 放入加压平台, 设置好实验参数, 启动装置, 匀速加压到 50 MPa, 保载 2 min, 卸压 20 s, 成功得到了直径为 25 mm 的修饰剂粉体、纳米粒子压片样品。

2.2.3. 吸附纳米粒子的岩心样品

将疏水纳米粒子放入柴油中, 以 3000—12000 r/min 的速度进行非等速搅拌 15 min, 配置成浓度为 1.5 g/L 的疏水纳米 SiO₂ 柴油分散液 (简称纳米液)。将岩心薄片放入纳米液浸泡 24 h 以上, 取出后放置在 70℃ 的烤箱中烘干, 得到吸附纳米粒子的岩心片。

2.3. 润湿性测试

2.3.1. 纳米粒子活度测试

疏水纳米粒子的活度就是指将一定质量的纳米粒子放入水中, 浮于水面而不能被水浸润的纳米粒子占总质量的百分数。活度测试显示, 修饰前的纳米 SiO₂ 和 TiO₂ 都完全沉没于水中, 而修饰后的疏水纳米粒子完全浮于表面, 修饰后的活度为 100%, 即疏水率为 100%, 表现为强疏水性。

2.3.2. 接触角测试

采用 OCA15 光学接触角测试仪, 设置水滴体积为 5 μL, 将样品平放在平台上, 通过微机控制, 将去离子水滴到测试样品表面, 测试接触角, 每个样品至少测三组数据。需要指出的是, 部分实验由于没有专

用疏水针头, $3 \mu\text{L}$ 的水滴根本不能滴下, 只能加大水滴体积到 $5 \mu\text{L}$, 造成实验测试的接触角偏小.

2.4. 电子显微镜扫描

将测试完接触角的薄片取出一小块, 对表面进行喷金处理, 然后用 Quanta Inspect 型 SEM 进行表面扫描, 得到薄片表面不同位置的微观结构.

3. 实验结果与讨论

3.1. 实验结果

3.1.1. 几种构建表面的微观结构

压片表面看上去非常平整, 但是在 SEM 下显示出不同的微观特征. 图 1 中 SEM 照片显示了修饰剂

粉体压片、亲水纳米 SiO_2 压片、疏水纳米 SiO_2 压片和吸附疏水纳米 SiO_2 颗粒的岩心片等四个表面的微观结构. 修饰剂粉体压片表面比较平整光滑, 未见孔隙和颗粒凸起, 是单一的固体表面, 见图 1(a). 图 1(b) 为亲水纳米 SiO_2 压片, 比较粗糙, 有许多微粒凸起和孔隙, 图纹没有规则. 根据图示标尺, 凸起颗粒的尺度在微米级大小, 是由许多纳米粒子在高载荷下压制而成, 因此, 纳米 SiO_2 压片表面是微纳米结构的气固复合面. 图 1(c) 为疏水纳米 SiO_2 压片表面照片, 表面特征和亲水纳米 SiO_2 压片表面无明显差异, 也是微纳米结构的气固复合面, 说明表面修饰只是改变了表面润湿性, 但没有改变纳米粒子的外观. 图 1(d) 显示岩石表面布满纳米粒子, 纳米粒子呈不规则的紧密排列.

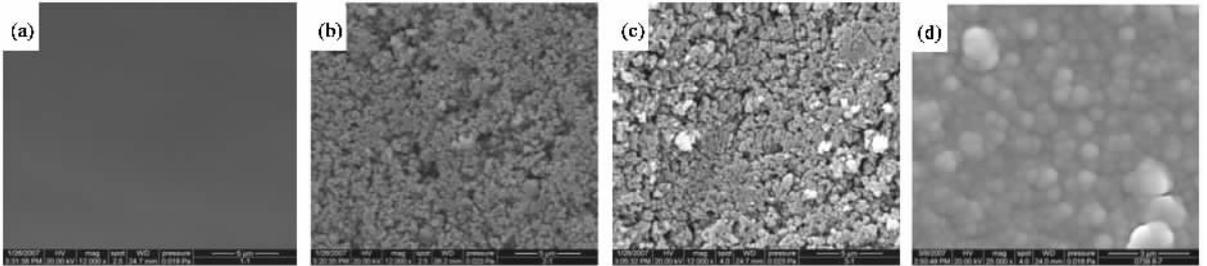


图 1 不同表面的扫描电镜照片 (a)疏水修饰剂压片 (b)亲水纳米 SiO_2 压片 (c)疏水纳米 SiO_2 压片 (d)吸附疏水纳米 SiO_2 的岩心表面

3.1.2. 水滴与表面的接触角

水滴一接触到亲水纳米 SiO_2 压片表面就迅速展开, 并有部分被吸收到孔隙中(这与多孔毛细现象有关), 接触角可视为零. 其他几种表面的接触角见

图 2. 图 2(a) 显示水滴在疏水修饰剂粉体压片表面的形态, 接触角为 97.3° ; 图 2(b) 和 2(c) 显示水滴在疏水纳米 SiO_2 和 TiO_2 压片表面的形态, 接触角分别为 146.4° 和 135.5° ; 图 2(d) 显示水滴在疏水纳米

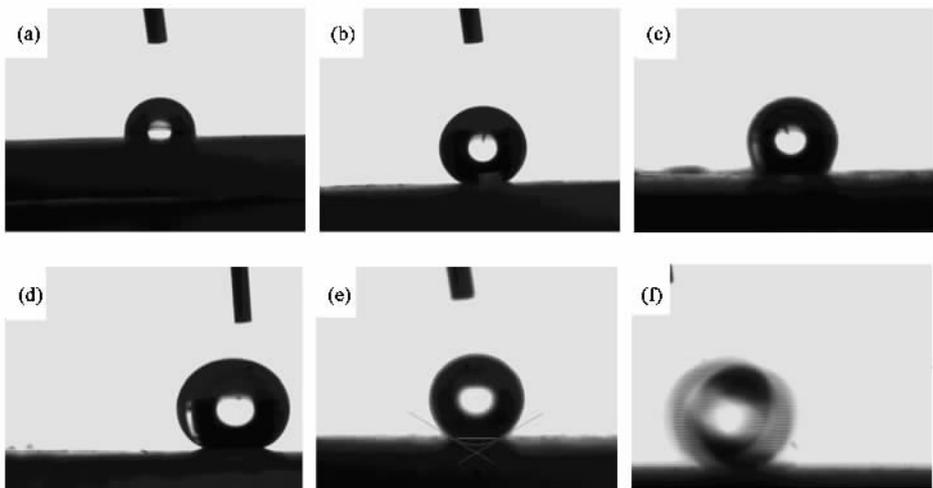


图 2 水滴在不同表面的形状 (a)疏水修饰剂粉体压片 (b)疏水纳米 SiO_2 压片 (c)疏水纳米 TiO_2 压片; (d)疏水纳米 TiO_2 展铺表面 (e)吸附疏水纳米 SiO_2 的岩心片 (f)在疏水纳米 SiO_2 吸附岩心表面的滚动形状

TiO₂ 粒子展铺表面的形态,接触角达到 167.3°;图 2 (e)显示水滴在吸附了疏水纳米 SiO₂ 的岩心片表面的形态,接触角为 148.1°;图 2(f)显示了水滴在吸附了疏水纳米 SiO₂ 的岩心表面的滚动形态,测得前进角为 153°,后退角为 146°,滚动角为 7°.

3.2. 讨论

修饰剂粉体压片表面为单一光滑固体表面,其接触角反映了修饰剂材料的润湿性,为弱疏水性.

图 1 中(b)(c)和(d)显示亲水纳米 SiO₂ 粒子压片、疏水纳米 SiO₂ 粒子压片和纳米吸附岩心表面的颗粒大小、空隙大小都不均匀,排列毫无规则,这种表面孔隙分布不均,造成了水滴在不同部位的接触角有一定差异.纳米 SiO₂ 和 TiO₂ 是坚硬的固体粒子,在加压后,颗粒间孔隙不可能完全消除,表面 SEM 照片显示具有微纳米结构特征,是一种气固复合表面.水滴在这些表面上的接触角表现为超常特征,在疏水纳米粒子表面都超过 120°,最大接近 150°,均远大于修饰剂光滑表面的接触角,表明由疏水纳米粒子构建的表面具有超疏水特征.因此,满足 Cassie-Baxter 提出的复合表面的接触角模型,即 Cassie-Baxter 方程^[8]

$$\cos\theta = f_1 \cos\theta_1 + f_2 \cos\theta_2, \quad (1)$$

其中, θ 为复合表面的表观接触角, θ_1, θ_2 分别为两种介质的本征接触角, f_1, f_2 分别为两种介质在表面的面积分数, $f_1 + f_2 = 1$.

当其中一种介质是空气时,液气的接触角 θ_2 为 180°,则(1)式简化为

$$\cos\theta = f_1(1 + \cos\theta_1) - 1. \quad (2)$$

根据(2)式,在疏水表面, θ_1 大于 90°,由于 f_1 是固体面积分数,小于 1,因此 θ 大于 θ_1 ,且 f_1 越小, θ 越大.

纳米颗粒压片和展铺的纳米颗粒表面都是气固复合表面,表观接触角的大小与水固的接触面积分数有关.纳米粒子 TiO₂ 的压片及 TiO₂ 粒子展铺平面相比,由于后者是疏松堆积,毫无疑问,其空隙要比压片大得多,固液接触面积分数就小,因此,其表观接触角(167.3°)也就比压片的(135.5°)大.

利用水与表面修饰物的接触角 θ_1 和吸附疏水纳米粒子的岩石表面的表观接触角 θ 可以估算吸附纳米粒子的岩石表面的空隙度 f_2 或固体面积分数 f_1 .

根据(2)式,可得

$$f_1 = \frac{1 + \cos\theta}{1 + \cos\theta_1}. \quad (3)$$

根据实验数据, θ 为 148.1°, θ_1 为 97.3°,由(3)式可计算得到固体面积分数 f_1 为 17.3%,则气体面积分数 f_2 为 82.7%.这说明水固接触面积较小,而图 1(d)显示纳米粒子是紧密排列的,显然这还与纳米粒子本身的结构有关.由于纳米 SiO₂ 粒子是三维多孔结构,具有强吸附能力,孔间充满空气,而且由于颗粒内孔很小(我们自行研制的直径为 40 nm 的 SiO₂ 颗粒,其内孔直径达到 17 nm),内部的气体难以去除,因此,纳米粒子本体就是永久性的气固复合表面.这种永久性的气固复合面使得疏水纳米粒子本身具有超强疏水性.这种纳米粒子吸附在岩石表面后,由于颗粒之间和颗粒内部都存在空隙,因此是一种类似荷叶的二级复合结构.这种二级复合结构不仅减少了水与固体的接触面积,还有利于减少较大粗糙度造成的滞后现象,水滴在这种表面上的滚动角很小,为 7°.可见这种二级复合结构对水流有很好的减阻效果.

吸附法是基于实际纳米增注技术的一种构建超疏水表面的方法,具有实用性,石油工程中具有显著降压效果的纳米降压增注技术就是利用吸附法达到构建疏水表面的目的^[28-33].压片法主要基于实验研究,采用自动压片法很好地克服了非均匀应力造成的破碎问题,该方法可以进一步扩展,比如可以将疏水的纳米粒子加压嵌入一般软固体表面而得到实际超疏水表面.

4. 结 论

1. 由于纳米粒子是多孔结构,其孔间气体难以被去除,因此,经疏水剂修饰后的纳米粒子本身就是气固复合表面,具有强疏水性.

2. 由压片法和吸附法构建的纳米微结构固体表面为不规则的气固复合表面,这种结构决定了表面具有超疏特性,但不同位置的接触角不同.

3. 通过疏水纳米 SiO₂ 颗粒与岩石的吸附所构建的表面具有二级微纳米复合结构,利用 Cassie-Baxter 的模型可求得该复合面的气体面积分数达到 82.7%.理论和实验结果均表明这种表面具有较大的接触角和较小的滚动角,说明有很好的水流减阻效果.

4. 吸附法和压片法是构建微纳米结构的超润湿表面的两种简便方法, 具有实用性.

- [1] Guo X L , Xie Q D , Zhao N , Liang S M , Wang D J , Xu J 2004 *Progress in Chemistry* **16** 1023 (in Chinese) [郭兴林、谢琼丹、赵宁、梁松苗、王笃金、徐 坚 2004 化学进展 **16** 1023]
- [2] Qu A L , Wen X F 2006 *Progress in Chemistry* **18** 1434 (in Chinese) [曲爱兰、文秀芳 2006 化学进展 **18** 1434]
- [3] Duan H , Bai C , Wang H Z , Zhao L , Zhao H Z 2006 *New Chemical Materials* **34** 55 (in Chinese) [段 辉、白 晨、汪厚植、赵 雷、赵慧中 2006 化工新型材料 **34** 55]
- [4] Jiang L 2005 *Basic Science* **23** 4 (in Chinese) [江 雷 2005 基础科学 **23** 4]
- [5] Feng L , Li S , Li Y , Li H , Zhang L , Zhai J , Song Y , Liu B , Jiang L , Zhu D 2002 *Adv . Mate .* **14** 1857
- [6] Sun T L , Feng L , Gao X F , Jiang L 2005 *Acc . Chem . Res .* **38** 644
- [7] Wenzel R N 1936 *Ind . Eng . Chem .* **28** 988
- [8] Cassie A , Baxter S 1944 *Trans . Faraday Soc .* **40** 546
- [9] Ren L Q , Wang S J , Zhou C H , Zhao W F 2006 *Journal of Jilin University* **36** 97 (in Chinese) [任露泉、王淑杰、周长海、赵继福 2006 吉林大学学报 **36** 97]
- [10] Zhen L J , Wu X D , Lou Z , Wu D 2004 *Science Bulletin* **49** 1691 (in Chinese) [郑黎俊、乌学东、楼 增、吴 旦 2004 科学通报 **49** 1691]
- [11] Wu J H , Mate C M 1998 *Langmuir* **14** 4929
- [12] Fukushima H , Seki S , Nishikawa T , Takiguchi H 2000 *J . Phys . Chem . B* **104** 7417
- [13] Nishino T , Meguro M , Nakamae K 1999 *Langmuir* **15** 4321
- [14] Blossey R 2003 *Nature Materials* **2** 301
- [15] Barthlott W , Neinhuis C 1997 *Planta* **202** 1
- [16] Zhai J , Li H J , Li Y S , Li S H , Jiang L 2002 *Physics* **31** 483 (in Chinese) [翟 锦、李欢军、李英顺、李书宏、江 雷 2002 物理 **31** 483]
- [17] Gao X F , Jiang L 2006 *Physics* **35** 559 (in Chinese) [高雪峰、江雷 2006 物理 **35** 559]
- [18] Wang Q J , Chen Q M 2005 *Polymer Materials Science and Engineering* **21** 6 (in Chinese) [王庆军、陈庆民 2005 高分子材料科学与工程 **21** 6]
- [19] Xu J H , Li M , Zhao Y , Lu Q H 2006 *Progress in Chemistry* **18** 1425 (in Chinese) [徐建海、李 梅、赵 燕、路庆华 2006 化学进展 **18** 1425]
- [20] Wang Q J , Chen Q M 2005 *Macromolecule Bulletin* **2** 63 (in Chinese) [王庆军、陈庆民 2005 高分子通报 **2** 63]
- [21] Furnidge C G L 1962 *J . Colloid Sci .* **17** 309
- [22] Jin M H 2004 *Doctor ' s Paper* (Jilin University) p37 (in Chinese) [金美花 2004 博士论文 (吉林大学) 第 37 页]
- [23] Guo Z G , Liu W M 2006 *Progress in Chemistry* **18** 7211 (in Chinese) [郭志光、刘维民 2006 化学进展 **18** 7211]
- [24] Sun Q , Wu G M , Zhou B , Huang Y D , Deng Z S , Ma J H , Shen J , Wang J 2002 *Function Materials* **33** 430 (in Chinese) [孙 骐、吴广明、周 斌、黄耀东、邓忠生、马建华、沈 军、王 珏 2002 功能材料 **33** 430]
- [25] Wei C , Fadeev A Y , Hsieh M C , Öner D , Youngblood J , McCarthy T J 1999 *Langmuir* **15** 3395
- [26] Fang H P , Fan L W , Wang Z W , Lin Z F , Qin Y H 2001 *Int . J . Mod . Phys . B* **15** 1287
- [27] Xiao J R , Xu H , Deng C S , Wang H Y , Li Y F 2007 *Acta Phys . Sin .* **56** 2998 (in Chinese) [肖剑荣、徐 慧、邓超生、王焕友、李燕峰 2007 物理学报 **56** 2998]
- [28] Su X T , Yan J , Lü G Z , Luan Z A 2002 *Oil Drilling & Production Technology* **24** 48 (in Chinese) [苏咸涛、闫 军、吕广忠、栾志安 2002 石油钻采工艺 **24** 48]
- [29] Ju B S , Dai S G , Luan Z A 2002 *SPE 77938 - Asia Pacific Oil and Gas Conference* p915
- [30] Zhang J C , Cao X L , Tang Z H , Ma B D , Zhang S D 2003 *Petroleum Geology and Recovery Efficiency* **10** 59 (in Chinese) [张继超、曹绪龙、汤战宏、马宝东、张书栋 2003 油气地质与采收率 **10** 59]
- [31] Chen X L , Qin J S , Li Z P 2005 *Oilfield Chemistry* **22** 328 (in Chinese) [陈兴隆、秦积舜、李治平 2005 油田化学 **22** 328]
- [32] Lu X L , Lü G Z , Luan Z A , Wu Z G , Su X T 2003 *Petroleum Exploration and Development* **30** 110 (in Chinese) [陆先亮、吕广忠、栾志安、伍增贵、苏咸涛 2003 石油勘探与开发 **30** 110]
- [33] Yang L X , Guo W J , Xun Y W , Liang G Q , Zhu J M , Ma X F 2003 *Journal of Jiangnan Petroleum Institute* **25** Suppl. A 105 (in Chinese) [杨灵信、郭文军、徐艳伟、梁国庆、朱建民、马祥凤 2003 江汉石油学院学报 **25** (增刊) 105]
- [34] Sun Z G , Wei L X , Guo H , Sun H L 2006 *Journal of Oil & Gas Technology* **28** 105 (in Chinese) [孙治国、韦良霞、郭 慧、孙洪礼 2006 石油天然气学报 **28** 105]
- [35] Yi H , Sun H H , Li F X , Li W H 2005 *Natural Sciences Journal of Harbin Normal University* **21** 66 (in Chinese) [易 华、孙洪海、李飞雪、李伟宏 2005 哈尔滨师范大学自然科学学报 **21** 66]
- [36] Chen X L , Qin J S , Li Z P 2006 *Journal of Southwest Petroleum Institute* **28** 9 (in Chinese) [陈兴隆、秦积舜、李治平 2006 西南石油学院学报 **28** 9]
- [37] Eric lauga , Brenner M P , Stone H A 2005 *Handbook of Experimental Fluid Dynamics* **15** 1
- [38] Cécile C B , Barrat J L , Lydéric B , Charlaix E 2003 *Nature* **2** 237
- [39] Tretheway D C , Meinhart C D 2002 *Physica of fluids* **14** 19
- [40] Gu C Y , Di Q F , Fang H P 2007 *Journal of Hydrodynamics* **19** 263
- [41] Di Q F , Gu C Y , Shi L Y , Fang H P 2007 *Drilling & Production Technology* **30** 91 (in Chinese) [狄勤丰、顾春元、施利毅、方海平 2007 钻采工艺 **30** 91]
- [42] Li D , Di Q F , Li J Y , Qian Y H , Fang H P 2007 *Chin . Phys . Lett .* **24** 1021

- [43] Cao B Y , Chen M , Guo Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5305 (in Chinese) [曹炳阳、陈 民、过增元 2006 物理学报 **55** 5305]
- [44] Xu C , He Y L , Wang Y 2005 *Journal of Engineering Thermophysics* **55** 912 (in Chinese) [徐 超、何雅玲、王 勇 2005 工程热物理学报 **55** 912]

Experimental investigation of superhydrophobic properties of the surface constructed by nanoparticles^{*}

Gu Chun-Yuan Di Qin-Feng[†] Shi Li-Yi Wu Fei Wang Wen-Chang Yu Zu-Bin
(Shanghai University , Shanghai 200072 , China)

(Received 30 May 2007 ; revised manuscript received 20 November 2007)

Abstract

Two kinds of micro- and nano-structural surfaces were constructed with hydrophobic nanoparticles (HNP) directly . One of the surfaces was formed by compressing the nano powder to a smooth slice , the other was made by adsorbing the nanoparticles on the surface of rock wafer . The contact angles between water drops and the surfaces were measured and the rolling process of a water drop on the nanoparticles-adsorbed rock surface was pictured . The scanning electron microscope (SEM) was used to observe the microstructure of these surfaces also . The results show that the inorganic nanoparticles modified by weak hydrophobic material could have strong hydrophobic property , even though it was strongly hydrophobic initially . The measured contact angles of water drop on the nanoparticle-adsorbed rock surface are always greater than 120° and the rolling angles are less than 7° . These data means that these surfaces are superhydrophobic apparently . The SEM pictures show that these surfaces are air-solid compound interfaces with irregular micro- and nano-structure . It is these special structures that lead to the formation of superhydrophobic surfaces , which are in agreement with the Cassie-Baxter model .

Keywords : superhydrophobic , hydrophobic nanoparticles , micro- and nano-structural surface , contact angle

PACC : 6146 , 6480G , 6810C

^{*} Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No : 50674065) , the Shanghai Committee of Science and Technology (Grant No.071605102) , the Shanghai Committee of Education (Grant No.08ZZ45) , Shanghai Leading Academic Discipline Project (No. Y0103) and Shanghai University Innovation Foundation to Graduate Student .

[†] Corresponding author . E-mail : qinfeng@sina.com