

# 改性纳米二氧化硅复合降黏剂的制备与性能评价

青玉泉, 杨明君\*, 李 垒, 江 文

(西南石油大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610000)

**摘要:**以甲基丙烯酸十八酯、丙烯酰胺、苯乙烯和改性纳米二氧化硅为反应单体, 甲苯为溶剂, 合成一种油溶性的原油降黏剂(VR)和纳米复合降黏剂(NVR), 并通过红外光谱仪、热重分析仪和扫描电镜对其结构和形貌进行表征。通过对流体黏度-温度、黏度-剪切速率以及剪切应力-剪切速率的研究, 考察了2种降黏剂在克拉玛依原油中的降黏效果。结果表明, 纳米粒子的引入使得生成的NVR表面形成一层微纳米粒子层, 加入到克拉玛依原油后, 不仅使流体对剪切速率和温度的变化更为敏感, 而且有效地提高了温度对流体流变行为转变速度的影响。

**关键词:** 纳米二氧化硅; 油溶性; 降黏剂; 原油; 流变

中图分类号: O631.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)02-0153-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.02.032

## Preparation and performance evaluation of modified nano-silica composite viscosity reducer

QING Yu-quan, YANG Ming-jun\*, LI Lei, JIANG Wen

(School of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** An oil-soluble viscosity reducer (VR) for crude oil and a nano-composite viscosity reducer (NVR) both are synthesized from octadecyl methacrylate, acrylamide, styrene and modified nano-silica, with toluene as solvent. Their structure and morphology are characterized by IR, TG and SEM. The viscosity reduction effects of two VRs in Karamay crude oil are investigated by studying the fluid viscosity-temperature, viscosity-shear rate and shear force-shear rate. The results show that the addition of nanoparticles makes a micro-nanoparticle layer form on the surface of NVR. When these two VRs are respectively added into the Karamay crude oil, they not only make the fluid more sensitive to changes in shear rate and temperature, but also improve effectively the effect of temperature on the transformation speed of fluid rheological behavior.

**Key words:** nano-silica; oil-soluble; viscosity reducer; crude oil; rheology

社会的进步使得能源消耗逐渐增加, 导致世界轻质原油储量迅速减少, 因此对品质稍差的原油的开采和利用逐渐受到重视<sup>[1]</sup>。我国具有丰富的稠油资源, 重点分布在准格尔盆地、松辽盆地、渤海盆地等<sup>[2-3]</sup>。由于稠油具有黏度高、密度高的问题, 导致开采时受到的阻力大、驱动效率低<sup>[4]</sup>。因此, 为了方便对其开采、运输和炼制, 必须降低其黏度, 改善其流动性<sup>[5-6]</sup>。常规的石油开采方法并不适用于对稠油开采, 需要采取一些特殊的工艺技术<sup>[7]</sup>。

表面微纳米结构的存在使得荷叶具有良好的超疏水性和自清洁效应<sup>[8-9]</sup>。大量的实验和模拟结果表明, 具有微结构的超疏水表面可以出现明显的滑移现象<sup>[10-12]</sup>。狄勤丰等<sup>[13-16]</sup>将疏水性纳米颗粒应用到石油方面, 发现由于纳米点阵滑移效应, 纳米颗粒会吸附在地层孔道形成纳米结构表面, 使孔壁表

面体现为强疏水性, 产生水流滑移效应, 从而较大幅度地降低流动时的阻力。Bonaccorso 等<sup>[17]</sup>研究发现, 即使在完全湿润表面, 流体也能发生边界滑移, 其滑移程度随粗糙度的增加而增加。除此之外, 纳米粒子具有的表面效应也使得其在石油开采中得到了一定的应用。Petriccione 等<sup>[18]</sup>根据纳米粒子的表面效应, 通过使用具有羟基和羧基的功能化多壁碳纳米管制备了一种降黏剂。荆国林等<sup>[19]</sup>将改性的 SiO<sub>2</sub> 与 EVA 反应制备出纳米复合降黏剂, 并对含蜡的模拟油进行降凝降黏测试, 结果可以使模拟油凝点从 33℃ 降至 0℃, 并且大幅度降低了模拟油的黏度。

纳米二氧化硅比表面积大、粒径小、环境污染小<sup>[20-21]</sup>, 其表面具有亲水疏油性, 易于团聚, 在有机介质中难于浸润和分散<sup>[22]</sup>。因此, 笔者对纳米 SiO<sub>2</sub>

收稿日期: 2019-04-01; 修回日期: 2019-12-10

基金项目: 西南石油大学引进人才项目(201331010015)

作者简介: 青玉泉(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高分子及其复合材料工程, 1909643348@qq.com; 杨明君(1976-), 男, 博士后, 教授, 研究方向为能源高分子设计及应用, 通讯联系人, myang@swpu.edu.cn。

进行有机改性,然后与单体进行反应制备成纳米 SiO<sub>2</sub> 复合材料,使其既具有疏水性微纳米粒子的效应,又能与油相有良好的相容性,将其应用到克拉玛依原油中,并对其结果进行流变分析。

## 1 实验部分

### 1.1 原料与样品

苯乙烯(AR级)、甲苯(AR级),成都市科隆化学品有限公司生产;纳米二氧化硅、甲基丙烯酸十八酯(AR级),上海阿拉丁生化科技有限公司生产; $\gamma$ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH570)、偶氮二异丁腈(AIBN)(AR级)、丙烯酰胺(AR级)、冰乙酸(AR级),成都市科龙化工试剂厂生产;克拉玛依原油。

### 1.2 降黏剂 VR 和 NVR 的合成

首先,称取 40 g 甲苯于三口烧瓶中,加入 0.30 g 纳米二氧化硅和 1 g KH570,用冰乙酸调节其 pH 为 4,在 40℃ 下超声分散 1 h,再于 60℃ 下水浴反应 2 h,得到改性二氧化硅分散液,对其减压蒸馏除甲苯,用乙醇反复洗涤、离心,经真空干燥后,得到改性二氧化硅固体粉末。

然后,在 60℃ 下,依次将 11.83 g 甲基丙烯酸十八酯、3.12 g 苯乙烯和 1.065 g 丙烯酰胺加入到预置有 40 g 甲苯的三口烧瓶中,搅拌 30 min,让丙烯酰胺充分溶解后分别以下列 2 种方法加入:(1)分 3 次加入 0.6% 引发剂偶氮二异丁腈,反应 6 h 后制得降黏剂 VR;(2)加入上述所制改性二氧化硅分散液,然后再分 3 次加入同样量引发剂,反应 6 h 后制得纳米复合降黏剂 NVR。

最后,对产物进行减压蒸馏除去溶剂甲苯,再用乙醇反复洗涤、过滤,经真空干燥得到淡黄色固体。

### 1.3 聚合物的表征

利用傅里叶变换红外(FT-IR)光谱仪(Nicolet 6700 型,Thermo Scientific)表征所合成的降黏剂的结构;利用 DSC823 TGA/SDTA85/e 热分析仪在氮气氛围下进行热重分析;利用扫描电子显微镜(SEM)(FEI)研究降黏剂的微观形态。利用哈克 MARS III 旋转流变仪(德国赛默飞世尔公司生产)对合成降黏剂的降黏效果进行测试。

### 1.4 表观黏度

称取一定量降黏剂于二甲苯中,然后按照质量比 1:10 加入到稠油中,按照《SY/T 0520—93 原油黏度测定 旋转黏度计平衡法》中所述方法,采用同轴圆筒法测定其黏度。

## 1.5 流变方程

将加入降黏剂 VR 和 NVR 的原油流体用幂律流体模型进行分析,其本构方程为:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

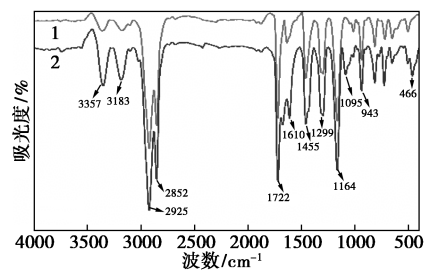
式中: $\tau$  为剪切应力,Pa; $\dot{\gamma}$  为剪切速率,1/s; $K$  为流体的稠度系数; $n$  为非牛顿流体指数。

$K$  越大,流体越黏,即流动阻力越大。当  $n < 1$  时,流体为假塑性流体;当  $n = 1$  时,流体为牛顿流体;当  $n > 1$  时,流体为胀塑性流体。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降黏剂的红外分析

降黏剂 VR 和 NVR 的红外谱图如图 1 所示。由图 1 可以看出,3 357 cm<sup>-1</sup> 和 3 183 cm<sup>-1</sup> 分别是—NH 的反对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰;2 925 cm<sup>-1</sup> 和 2 852 cm<sup>-1</sup> 为—CH 的伸缩振动峰;1 722 cm<sup>-1</sup> 是酯羰基上 C=O 的特征吸收峰;1 164 cm<sup>-1</sup> 为 C—O—C 伸缩振动峰;1 610 cm<sup>-1</sup> 和 1 455 cm<sup>-1</sup> 是苯环上 C=C 骨架振动峰;1 299 cm<sup>-1</sup> 和 943 cm<sup>-1</sup> 是—CH 键的面内弯曲振动峰和面外弯曲振动峰。这些峰值的出现表明降黏剂 VR 的合成。NVR 红外谱图中,1 095 cm<sup>-1</sup> 为 Si—O—Si 反对称伸缩振动峰,466 cm<sup>-1</sup> 是 Si—O—Si 的弯曲振动峰,这 2 个峰的出现表明了降黏剂 NVR 的合成。



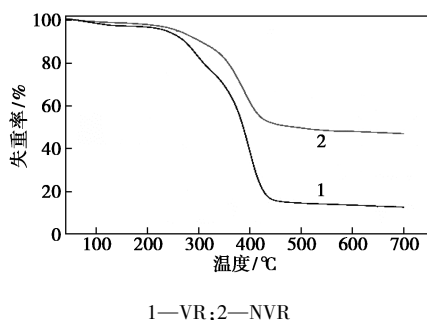
1—VR;2—NVR

图 1 降黏剂 VR 和 NVR 的红外谱图

### 2.2 VR 和 NVR 的热重分析

将降黏剂 VR 和 NVR 在氮气氛围下进行热重实验,温度从 40℃ 升温到 700℃,升温速率为 10℃/min,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,从初始温度开始,VR 就出现了质量降低现象,温度逐渐升高到 140℃ 附近时趋于稳定,而 NVR 在此过程中质量基本无损失。当温度在 230℃ 附近时,VR 和 NVR 的质量开始出现明显下降,温度为 430℃ 以上时,质量基本保持稳定。这是因为在较高温度(230~430℃)下,聚合物分子链受热断裂发生分解,在整个升温过程中,NVR 的失重率相对 VR 明显较低。因此,改性

纳米粒子的引入对产物本身的稳定性具有一定的提升效果。

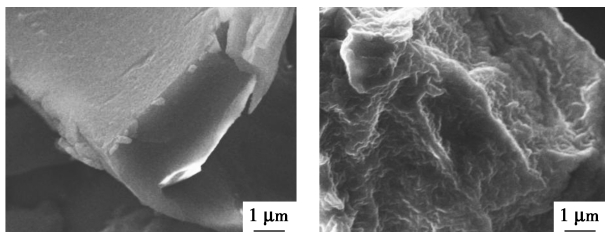


1—VR;2—NVR

图2 降黏剂 VR 和 NVR 的热重分析图

### 2.3 VR 和 NVR 的 SEM 分析

降黏剂 VR 和 NVR(放大倍数为 10 000×)的扫描电镜图如图 3 所示。从图 3 中可以看出,未加纳米粒子的聚合物 VR 表面光滑,而引入改性纳米二氧化硅制成的聚合物 NVR 的表面生成了一层微纳米粒子层,由于微纳米结构存在滑移效应,所以降黏剂能起到降低流体层相对流动时的阻力的作用,同时纳米颗粒具有高比表面积,因此更容易与石油充分接触。通过图 3(a)和图 3(b)的对比,进一步表明纳米复合降黏剂 NVR 的合成。



(a) VR

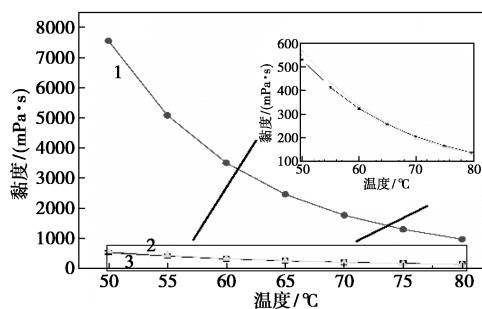
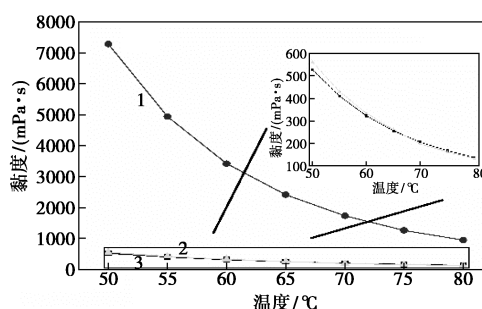
(b) NVR

图3 降黏剂的扫描电镜图

### 2.4 温度对流体黏度的影响

原油及在原油中加入 VR 或 NVR 后,在剪切速率为  $10.83 \text{ s}^{-1}$  和  $20.13 \text{ s}^{-1}$  下的黏温关系如图 4 所示。由图 4 可以看出,在同样剪切速率下,加入降黏剂之后,原油流体的黏度明显的降低;随着温度的升高,原油流体的黏度明显降低,加入降黏剂之后的原油黏度降低幅度减小。在  $67^\circ\text{C}$  以前,无论剪切速率是  $10.83 \text{ s}^{-1}$  还是  $20.43 \text{ s}^{-1}$ ,加入降黏剂 VR 的原油黏度比加入 NVR 的原油更低,当温度逐渐升高到  $67^\circ\text{C}$  以后,NVR 的降黏效果更为明显。这是因为 NVR 表面微纳米粒子层的存在容易使流体发生相对滑移,随着温度的升高,分子运动加快,原油结构被破坏程度增加,剪切作用产生的滑移现象更为明显,从而使得流体体系更容易流动。说明在较低的

剪切速率下,加入 NVR 的原油流体对温度变化更为敏感。

(a) 剪切速率  $10.83 \text{ s}^{-1}$ (b) 剪切速率  $20.43 \text{ s}^{-1}$ 

1—原油;2—原油+VR;3—原油+NVR

图4 黏度-温度的关系

### 2.5 剪切速率对流体黏度的影响

在原油中分别加入 VR 和 NVR 的黏度随剪切速率的变化曲线如图 5 所示。当温度为  $50^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$  时,加入 NVR 的流体在低剪切速率下的降黏效果比 VR 略有不足,但是随着剪切速率的增加,二者之间的差距逐渐减小。这是因为在低剪切速率下,加入 NVR 的原油中交联结构破坏较少。随着剪切速率的增大,交联结构被破坏速度大于重建速度,所以加入 NVR 的原油流体的黏度发生更大幅度的下降,导致降黏差距逐渐减小。当温度逐渐升高到  $70^\circ\text{C}$  和  $80^\circ\text{C}$  时,原油流体内大分子链已经发生降解,所以加 NVR 和加 VR 的流体体系黏度相差不

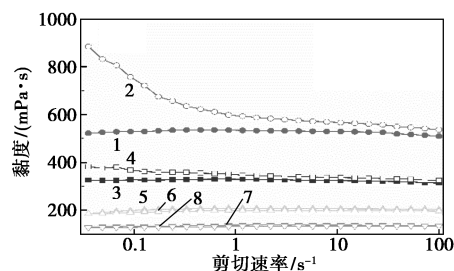
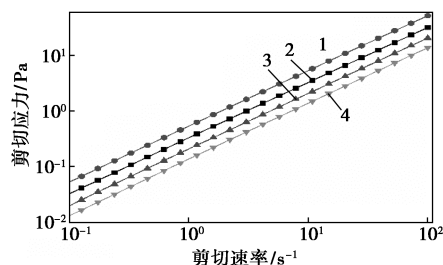
1,3,5 和 7—分别为  $50^\circ\text{C}$ 、 $60^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$  和  $80^\circ\text{C}$  下,加入 VR 原油;  
2,4,6 和 8—分别为  $50^\circ\text{C}$ 、 $60^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$  和  $80^\circ\text{C}$  下,加入 NVR 原油

图5 黏度-剪切速率的关系

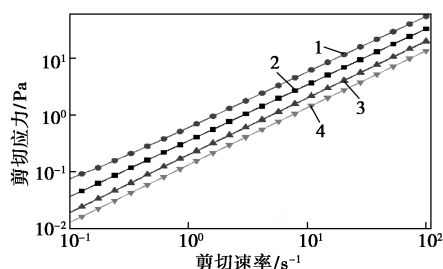
大。但在剪切速率为  $0.05 \text{ s}^{-1}$  之后,加 NVR 的黏度相对更低。因此,在实验温度范围 ( $50 \sim 80^\circ\text{C}$ ) 内,引入纳米粒子生成的降黏剂 NVR 对剪切速率的变化更为敏感。

### 2.6 流变分析

不同药剂加入到克拉玛依原油中的剪切应力随剪切速率变化的曲线如图 6 所示。由图 6 中可以看出,将降黏剂加入到原油中,其流体受到的剪切应力随着剪切速率的加大逐渐增加,加入降黏剂的不同,其改变的幅度也不一样,对其进行幂律方程拟合可以得到相应的结果,如表 1 所示。其中相关性表示数据和拟合曲线的关系,越接近 1 越好。



(a) 加 VR 原油



(b) 加 NVR 原油

1— $50^\circ\text{C}$ ; 2— $60^\circ\text{C}$ ; 3— $70^\circ\text{C}$ ; 4— $80^\circ\text{C}$

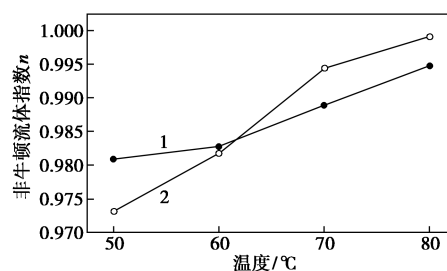
图 6 加入不同降黏剂的原油的流变曲线

在克拉玛依原油中加入降黏剂 VR 和 NVR 的流体流变方程拟合结果如表 1 所示,流变方程中非牛顿流体指数与温度的关系如图 7 所示。

表 1 流体的拟合流变方程

温度/ $^\circ\text{C}$	流变方程			
	VR+原油	相关性	NVR+原油	相关性
50	$\tau = 0.55695\dot{\gamma}^{0.98094}$	0.99999	$\tau = 0.60732\dot{\gamma}^{0.97315}$	1
60	$\tau = 0.3395\dot{\gamma}^{0.98276}$	0.99999	$\tau = 0.35304\dot{\gamma}^{0.98178}$	0.99999
70	$\tau = 0.21327\dot{\gamma}^{0.98892}$	0.99998	$\tau = 0.20107\dot{\gamma}^{0.9943}$	0.99999
80	$\tau = 0.1395\dot{\gamma}^{0.99478}$	1	$\tau = 0.13382\dot{\gamma}^{0.9991}$	1

从表 1 中可以看出,当温度从  $50^\circ\text{C}$  逐渐升高到  $80^\circ\text{C}$  时,2 种降黏剂的加入均使流体逐渐从假塑性流体向牛顿流体发生转变。在剪切作用下,流体流



1—加 VR 原油; 2—加 NVR 原油

图 7 非牛顿流体指数与温度的关系

变行为的转变是内部交联点被破坏的过程,转变速度表明原油内交联点被破坏的难易程度,其转变速度从图 7 中可以看出。由图 7 可以看出,随着温度的增加,用纳米粒子制备的降黏剂 NVR 使得流体转变速度更快,表明在同样剪切速率范围内,NVR 对原油的降黏效果受温度影响更大。这是因为温度升高,导致纳米复合降黏剂 NVR 表面的微纳米结构产生的滑移现象更为明显,所以使原油内部交联结构更容易被破坏,从而更易改变其流体行为。

### 3 结论

(1) 利用红外、热重和扫描电镜对制备的降黏剂 VR 和 NVR 进行结构和形貌表征,结果表明合成了聚合物。

(2) 通过对加入 VR 和 NVR 的克拉玛依原油的黏度-温度、黏度-剪切速率的关系进行分析,结果表明 NVR 能够增强原油在较低剪切速率下的温度敏感性和一定温度范围 ( $50 \sim 80^\circ\text{C}$ ) 内的剪切敏感性。

(3) 通过对流体剪切应力-剪切速率的分析,结果表明,在同样剪切速率下,随着温度的升高,加入纳米二氧化硅复合降黏剂 NVR 的原油能够更快地从假塑性流体转向牛顿流体。

### 参考文献

- [1] Saniere A, Hénaut I, Argillier J F. Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge [J]. Oil & Gas Science and Technology, 2004, 59(5): 455-466.
- [2] 于连东. 世界稠油资源的分布及其开采技术的现状与展望 [J]. 特种油气藏, 2001, 8(2): 98-103.
- [3] 李竟楠. 浅析我国稠油开发的技术现状及发展趋势 [J]. 石化技术, 2018, 25(1): 174, 209.
- [4] 赵焕省, 张微. 稠油降粘技术研究及前景展望 [J]. 广东化工, 2013, 40(16): 112-113.
- [5] 朱静, 李传宪, 杨飞. 稠油降粘新技术的研究进展 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2012, 27(1): 64-70.

(下转第 161 页)

- rich tumor cells[J]. *Am Chem Soc*, 2008, 130(24): 7542–7543.
- [4] Kohler N, Fryxell G, Zhang M. A bifunctional poly(ethylene glycol) silane immobilized on metallic oxide-based nanoparticles for conjugation with cell targeting agents[J]. *American Chemical Society Journal*, 2004, 126(23): 7206–7211.
- [5] Kim D, Zhang Y, Voit W, *et al.* Syn-thesis and characterization of surfactant-coated superparamagnetic monodispersed iron oxide nanoparticles[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, 225(1–2): 30–36.
- [6] Kim J, Kim H, Lee N, *et al.* Multifunctional uniform nanoparticles composed of a magnetite nanocrystal core and a mesoporous silica shell for magnetic resonance and fluorescence imaging and for drug delivery[J]. *Angew Chem*, 2008, 47(44): 8438–8441.
- [7] 刘玉海.  $\beta$ -环糊精包合技术及应用的研究进展[J]. *化学工程与装备*, 2008, (6): 94–95.
- [8] Zhou Y, Wang C, Wang F, *et al.*  $\beta$ -Cyclodextrin and its derivatives functionalized magnetic nanoparticles for targeting delivery of curcumin and cell imaging[J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2016, 34(6): 599–608.
- [9] QUASAR Collaborative Group. Adjuvant chemotherapy versus observation in patients with colorectal cancer: A randomized study[J]. *The Lancet*, 2007, 370(9604): 2020–2029.
- [10] Hegde M, Karki S S, Thomas E, *et al.* Novel levamisole derivative induces extrinsic pathway of apoptosis in cancer cells and inhibits tumor progression in mice[J]. *Plos One*, 2012, 7(9): 43632–43641.
- [11] 朱军峰, 张光华, 李楠, 等. 羧甲基- $\beta$ -环糊精的干法制备[J]. *应用化学*, 2008, 25(6): 681–684.
- [12] 周芷锦, 林仙军, 王彬, 等. HPLC 法测定盐酸左旋咪唑片的含量研究[J]. *中国兽药杂志*, 2019, 53(8): 51–55.
- [13] Abhik Bhattacharjee, Sasidhar Gumma, Mihir Kumar Purkait.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  promoted metal organic framework MIL-100(Fe) for the controlled release of doxorubicin hydrochloride[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, 259(259): 203–210.
- [14] Zhao Peiqi, Wang Hanjie, Yu Man, *et al.* Paclitaxel loaded folic acid targeted nanoparticles of mixed lipid-shell and polymer-core: In vitro and in vivo evaluation[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2012, 81(2): 248–256.
- [15] Liu Wenjuan, Yao Jun, Cai Minmin, *et al.* Synthesis of a novel nanopesticide and its potential toxic effect on soil microbial activity[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2014, 16(11): 2677.
- [16] Sun Jun, Xu Bin, Mu Yaoyao, *et al.* Functional magnetic nanoparticles for highly efficient cholesterol removal[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 83(1): 122–128.
- [17] Wang Haixia, Zhou Yehong, Guo Yujing, *et al.*  $\beta$ -Cyclodextrin/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  hybrid magnetic nano-composite modified glassy carbon electrode for tryptophan sensing[J]. *Sensors & Actuators: B Chemical*, 2012, 163(1): 171–178.
- [18] Liang C, Yang Y, Ling Y, *et al.* Improved therapeutic effect of folate-decorated PLGA-PEG nanoparticles for endometrial carcinoma[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2011, 19(13): 4057–4066.
- [19] Badruddoza A Z M, Hazel G S S, Hidajat K, *et al.* Synthesis of carboxymethyl- $\beta$ -cyclodextrin conjugated magnetic nano-adsorbent for removal of methylene blue[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2010, 367(1): 85–95.
- [20] Rosenholm J M, Meinander A, Peuhu E, *et al.* Targeting of porous hybrid silica nanoparticles to cancer cells[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(1): 197–206. ■

(上接第 156 页)

- [6] 赵永平. 稠油开发中油溶性降黏剂的研制与评价[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
- [7] 刘彦成, 王健, 李拥军, 等. 稠油开采技术的发展趋势[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2010, (4): 17–18, 23.
- [8] 王峰, 张冬敏, 丁艳芬, 等. 纳米杂化材料对高蜡原油降黏作用的研究[J]. *科学通报*, 2010, 55(26): 2643–2646.
- [9] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1–8.
- [10] Cottin B C, Barrat J L, Bocquet L, *et al.* Low-friction flows of liquid at nanopatterned interfaces[J]. *Nat Mater*, 2003, 2(4): 237–240.
- [11] Choi C, Westin K, Breuer K. Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels[J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(10): 2897–2902.
- [12] Li D, Di Q F, Li J Y, *et al.* Large slip length over a nanopatterned surface[J]. *Chin Phys Lett*, 2007, 24(4): 1021–1024.
- [13] 狄勤丰, 顾春元, 施利毅, 等. 疏水性纳米  $\text{SiO}_2$  增注剂的降压作用机理[J]. *钻采工艺*, 2007, 30(4): 91–94.
- [14] Gong W, Qinfeng D, Xinliang W, *et al.* Seepage model and experiments of drag reduction by nanoparticle adsorption[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2013, 25(6): 871–876.
- [15] 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.
- [16] 狄勤丰, 丁伟朋, 王新亮, 等. 纳米颗粒吸附法减阻技术效果的快速评价方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, (3): 108–114.
- [17] Bonaccorso E, Butt H J, Craig V S. Surface roughness and hydrodynamic boundary slip of a newtonian fluid in a completely wetting system[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(14): 144501–144501.
- [18] Petriccione A, Zarrelli M, Antonucci V, *et al.* Aggregates of chemically functionalized multiwalled carbon nanotubes as viscosity reducers[J]. *Materials*, 2014, 7(4): 3251–3261.
- [19] 荆国林, 涂梓忆. EVA/改性  $\text{SiO}_2$  纳米复合降凝剂的制备及对含蜡模拟油降凝降黏的效果研究[J]. *能源化工*, 2017, 38(6): 59–62.
- [20] 阙永生, 杨辉, 汪海风, 等. 溶胶-凝胶法制备纳米二氧化硅及原位改性[J]. *无机盐工业*, 2015, 47(9): 13–17.
- [21] 符远翔, 孙艳辉, 葛杏心. 单分散纳米二氧化硅的制备与表征[J]. *硅酸盐通报*, 2008, 27(1): 154–160.
- [22] Feng L, Li S, Li Y, *et al.* Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial[J]. *Adv Mater*, 2002, 14(24): 1857–1860. ■