

文章编号: 0253-2409(2008)01-0055-05

## 活性剂对轮古常渣 Zeta 电位的影响

李 传, 王继乾, 石 斌, 邓文安, 张龙力, 阙国和

(中国石油大学(华东)重质油国家重点实验室, 山东 东营 257061)

**摘要:** 通过 ZetaPlus 电位仪及 90Plus 粒度仪考察十二烷基磺酸钠(SDS)、椰子胺(CA)及油酸(OA)对轮古常渣(LGAR) Zeta 电位、胶粒粒度以及胶粒间电性斥力位能的影响。结果表明, 三种活性剂对沥青质具有解缔作用, 能使 LGAR 四组分分布、胶粒 Zeta 电位、电量、胶粒粒度和胶粒间电性斥力位能发生明显的变化; 随着 SDS 和 CA 浓度的增加, 胶粒 Zeta 电位、电量和胶粒间电性斥力位能先增大后减小, 胶粒粒度先减小后增大, 极值分别在活性剂质量分数为 0.7% (SDS) 和 0.5% (CA) 处; 随着 OA 浓度的增加, 胶粒 Zeta 电位、电量和胶粒间电性斥力位能持续增加, 胶粒粒度持续减小; 渣油沥青质胶粒间电性斥力的大小, 是抑制沥青质缔合的一个重要因素。

**关键词:** 常压渣油; 活性剂; Zeta 电位; 粒度; 电性斥力位能

**中图分类号:** TE624.6      **文献标识码:** A

## Effects of active additives on Zeta potential of Lungu atmospheric residue

LI Chuan, WANG Ji-qian, SHI Bin, DENG Wen-an, ZHANG Long-li, QUE Guo-he

(State Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum (East China), Dongying 257061, China)

**Abstract:** The effects of sodium dodecyl sulfonate (SDS), coconut amine (CA), and oleic acid (OA) on the Zeta potential, quantity of electric charge, granularity, and electric repulsive potential between the colloidal particles of Lungu atmospheric residue (LGAR) were studied with the help of the Plus Zeta potential analyzer and the 90Plus granularity analyzer. It showed that the three kinds of active additives could disaggregate asphaltene, and change the distribution of SARA four fractions, Zeta potential, quantity of electric charge, granularity, and electric repulsive potential between colloidal particles. The Zeta potential, quantity of electric charge and electric repulsive potential between colloidal particles first increased, and then decreased, whereas, the granularity of colloidal particles first decreased and then increased, with an increase in concentration of SDS and CA, and the extremum separately present to the mass fraction of 0.7% (SDS) and 0.5% (CA). OA can increase the Zeta potential, quantity of electric charge, and electric repulsive potential between colloidal particles, and decrease the granularity of colloidal particles. The magnitude of electric repulsive potential between colloidal particles is one of the main factors that restrain the aggregation of asphaltene.

**Key words:** atmospheric residue; active additive; Zeta potential; granularity; electric repulsive potential

从渣油体系结构上看, 渣油主要是由脂肪烃、芳香烃、胶质和沥青质构成的连续分布的动态稳定胶体分散体系<sup>[1,2]</sup>。沥青质和附着于其上的胶质作为分散相以胶粒形式悬浮于油相中, 而分散介质是由极性和芳香度依次递减的部分胶质、芳香烃和脂肪烃构成。作为分散相的沥青质是一系列大分子的非烃化合物的混合物, 分子中都含有若干个含硫、含氮和含氧的基团, 往往还络合有镍、钒等金属, 是渣油中极性最强的组分, 因此含有一定的电荷<sup>[3]</sup>, 沥青质胶粒电荷的存在影响到胶体体系中带电粒子的分布, 带相反电荷的粒子被吸引到胶粒附近, 带相同电荷的粒子则从胶粒面上被排斥。由于带电粒子的

热运动, 使电荷在胶粒界面上建立起具有一定分布规律的扩散双电层, 这种分布状态决定了渣油胶体的电性质, 并影响其他的物理化学性质<sup>[4]</sup>。

由于渣油胶体的黏稠、不透光等复杂性质, 使得直接对渣油电性质的考察具有一定困难, 因此, 研究人员通过将渣油及其亚组分分散在溶剂或水相中考察其电学性质。彭勃等<sup>[5]</sup>采用电泳法研究了伊朗轻质减压渣油和大庆减压渣油模拟乳状液的 Zeta ( $\zeta$ ) 电位。研究表明, 渣油乳状液的  $\zeta$  电位主要由摩擦、吸附和电离产生。当水相为纯水时, 乳状液的  $\zeta$  电位为负值, 其绝对值随馏分油相的质量浓度或油相中芳烃含量的增大而增加; 随水相中盐的加

收稿日期: 2007-06-23; 修回日期: 2007-09-18。

基金项目: 中国石油大学(华东)研究生创新基金(b2006-10)。

作者简介: 李传(1981-), 男, 江西九江人, 博士研究生, 主要从事重质油化学研究。Tel: 0546-8399373, E-mail: lichuan\_upc@163.com。

本文的英文电子版由 Elsevier 出版社在 ScienceDirect 上出版(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/18725813>)。

人,模拟乳状液的 $\zeta$ 电位绝对值增加,电性不变。范维玉等<sup>[6]</sup>研究了水相pH值对辽河油田杜-84稠油化学官能团四组分(酸性、碱性、两性、中性)与极性四组分(饱和分、芳香分、胶质和沥青质)的 $\zeta$ 电势的影响。结果表明,官能团各组分间 $\zeta$ 电势绝对值的差别较明显,其中酸性最高,两性最低,碱性和中性居中。酸性组分在pH = 11时 $\zeta$ 电势绝对值达到最高,其他组分的 $\zeta$ 电势在pH = 12时达到最高。极性四组分 $\zeta$ 电势绝对值差别不大,各组分 $\zeta$ 电势绝对值都随着pH值升高而升高。Parra-Barraza等<sup>[7]</sup>研究了质量分数分别为0.1%的十二烷基磺酸钠(SDS)和0.01%氯化十六烷基吡啶(CPCI)对沥青质溶液 $\zeta$ 电位的影响。结果表明,在体系pH值小于IEP(沥青质在纯水相 $\zeta$ 电位为0时的pH值)时,SDS使沥青质 $\zeta$ 电位由正变负,CPCI使沥青质 $\zeta$ 电位正值变大;当体系pH值大于IEP时,SDS使

沥青质 $\zeta$ 电位负得更大,CPCI则能使沥青质 $\zeta$ 电位反转(由负变正)。他们认为活性剂在沥青质上的吸附控制了体系电荷的大小和电性的正负。研究报道<sup>[8,9]</sup>,某些添加剂对渣油有降黏效果,影响沥青质的缔合,但影响机理尚不明了。因此,本实验研究了三种活性剂对轮古常渣(LGAR)体系电性质的影响,通过考察四组分、 $\zeta$ 电位、胶粒粒度以及胶粒间电性斥力位能的变化,分析活性剂对沥青质缔合的影响原因以及胶粒间电性斥力对沥青质缔合的作用。

## 1 实验部分

**1.1 原料及活性添加剂的选择** 分别选用十二烷基磺酸钠(Sodium Dodecyl Sulfonate, SDS, 国药集团,分析纯),油酸(Oleic acid, OA, 国药集团,分析纯)和椰子胺(Coconut Amine, CA, 工业品)为活性添加剂。LGAR性质见表1。

表1 渣油性质

Table 1 Properties of residue

Density $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (20 °C)	Viscosity $\mu/\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (80 °C)	Carbon residue w/%	Condensation point t/°C	Ash content w/%	H/C atomic ratio	w/%			
						C	H	S	N
1.007 2	7 448	18.41	40.0	0.125	1.44	85.61	10.29	2.92	0.47

**1.2 活性添加剂分散方式** 为避免空气对渣油的氧化作用,采用100 mL高压搅拌反应釜分散。分散条件:100 °C,0.1 MPa  $\text{N}_2$ 保护下,搅拌分散1 h。配制比例为1:1(质量比)的甲苯/正庚烷混合溶液为稀释剂,将分散后油样按溶剂/油样 = 500/1 (mL/g)溶解稀释,摇匀后密封避光稳定48 h。

**1.3 分散后样品分析** 采用液相色谱对样品进行四组分(饱和分、芳香分、胶质和正庚烷沥青质)分

离。采用ZetaPlus电位仪及90Plus粒度仪(Brookharen公司,美国)测定体系黏度,胶粒电泳淌度, $\zeta$ 电位及粒度。

## 2 结果与讨论

**2.1 不同浓度活性剂对LGAR四组分含量的影响** 表2显示的是质量分数为0.0%~1.0%的三种活性添加剂对LGAR四组分含量的影响。

表2 活性添加剂对LGAR四组分含量的影响

Table 2 Effects of active additives on the four fractions mass fraction of LGAR

Concentration of additive w/%	Sat. w/%			Arom. w/%			Resin w/%			$\text{C}_7$ -asp. w/%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0.0	32.4	32.4	32.4	26.2	26.2	26.2	21.1	21.1	21.1	20.3	20.3	20.3
0.1	30.0	32.7	32.5	31.2	30.3	26.2	19.5	18.7	21.1	19.3	18.3	20.2
0.2	30.8	34.2	31.2	31.0	27.6	28.0	19.7	20.7	20.6	18.5	17.5	20.2
0.5	32.3	33.5	32.0	30.6	28.9	28.4	19.8	23.0	19.7	17.3	14.6	19.9
0.7	29.8	33.9	32.0	33.1	30.5	29.1	20.8	19.8	19.9	16.3	15.8	19.0
0.8	31.9	34.8	32.8	29.8	30.8	29.5	21.4	17.8	20.0	16.9	16.6	17.7
1.0	30.8	32.7	33.5	29.9	28.2	29.4	21.6	20.9	20.0	17.7	18.2	17.1

I: SDS; II: CA; III: OA

由表2可知,三种活性添加剂的加入,对LGAR四组分含量均有较大的影响。SDS的加入,使

LGAR四组分(尤其是沥青质和芳香分)分布发生了变化。较之空白样,加入SDS后LGAR芳香分含

量增加, 沥青质含量降低, 并且沥青质含量随着 SDS 浓度的增加先减少后增大, 并在 SDS 的质量分数为 0.7% 时出现极小值。随着椰子胺加入量的增加, 沥青质和芳香分的含量变化趋势很明显, 芳香分含量增加, 沥青质含量先减小后增大, 在椰子胺质量分数为 0.5% 时出现极小值。随着油酸加入量的增加, LGAR 饱和分含量基本不变, 芳香分含量增加, 胶质含量略有减少, 沥青质含量持续降低。从 LGAR 四组分含量变化来看, 三种活性剂可能具有解缔沥青质的能力, 分离沥青质骨架中少量的芳香结构, 使之成为分散介质中游离的芳香分, 宏观表现为体系芳香分增加, 沥青质含量减少。而当 SDS 和 CA 加入量足够大时, 两者可能与脱除部分芳香结构的沥青

质缔合体充分作用, 占据原始芳香结构的位置, 并通过极性官能团部分吸附在沥青质表面, 从而使沥青质含量有所增大。

**2.2 活性剂对轮古常渣  $\zeta$  电位的影响** 在胶体体系中, 带电胶粒间的电性斥力是影响体系胶体稳定性的一个重要因素, 而胶粒间所有的电动现象都与  $\zeta$  电位直接相关, 并且在胶粒外双电层厚度一定的情况下, 通过  $\zeta$  电位能得到胶粒间电性斥力的大小<sup>[4,10]</sup>。因此, 了解胶粒间  $\zeta$  电位的变化对研究渣油胶体体系稳定性及沥青质胶粒缔合性有着重要的意义。表 3 为不同浓度 SDS、CA 和 OA 对轮古常渣样品电性质的影响。

表 3 不同浓度活性剂对轮古常渣样品电泳淌度、颗粒度、 $\zeta$  电位和分散度的影响  
Table 3 Effects of active additive concentrations on electrophoresis velocity, mean radii,

Zeta potential and polydispersity of LGAR samples

Concentration w/%	Electrophoresis velocity $\mu_E/10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$			Mean radii $R/10^{-9} \text{ m}$			Zeta potential $\zeta/10^{-3} \text{ V}$			Polydispersity $/10^{-3}$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
	0.0	2.13	2.13	2.13	71.7	71.7	71.7	7.00	7.00	7.00	5	5
0.1	2.20	2.50	2.40	70.0	62.3	65.8	7.11	8.00	7.41	5	5	5
0.2	2.72	3.16	2.90	57.3	50.7	55.7	8.02	9.99	8.21	5	5	5
0.5	3.58	4.13	3.54	48.8	41.7	47.9	11.61	12.10	9.22	5	5	5
0.7	4.96	3.69	4.84	38.5	45.1	35.7	15.01	11.01	11.20	5	5	5
0.8	3.89	3.35	5.32	43.2	48.7	34.2	13.22	10.10	12.01	5	5	5
1.0	3.27	3.05	5.88	48.1	51.7	32.9	12.00	9.62	12.90	5	5	5

I: SDS; II: CA; III: OA

表 3 中分散度为体系颗粒的分散程度, 其值为 0.005, 表示体系为颗粒的单分散体系。由表 3 可以看出, 三种活性剂的加入均能使体系电性质发生明显的变化, 并且使体系胶粒粒度减小。随着 SDS、CA 浓度的增加, 体系胶粒平均半径均先减小后增大, 分别在活性剂质量分数为 0.7% 和 0.5% 时出现极小值; 油酸的加入, 则使体系胶粒半径持续减小。这说明三种活性剂对沥青质都具有解缔作用, 使沥青质缔合度减小, 表现为胶粒粒度减小。

假设体系  $0.1 < kR < 1.0$  时, 则体系符合 Hückel 方程, 根据胶粒的电泳淌度、体系黏度与胶粒半径可以得到胶粒带电量 and 双电层厚度等电性参数<sup>[10]</sup>。

$$u_E = \frac{v_E}{E} = \frac{Q_e}{6\pi\eta R} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{Q_e}{4\pi\epsilon R} + \frac{-Q_e}{4\pi\epsilon(R+1/k)} = \frac{Q_e}{4\pi\epsilon R(1+kR)} \quad (2)$$

$$kR = \frac{Q_e}{4\pi\epsilon R\zeta} - 1 \quad (3)$$

式中  $u_E$  为电泳淌度,  $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $v_E$  为运动速率,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_e$  为粒子带电量,  $\text{C}$ ;  $\eta$  为体系黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $R$  为粒子半径,  $\text{m}$ ;  $\zeta$  为 Zeta 电位,  $\text{V}$ ;  $\epsilon$  为分散介质介电常数,  $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $k$  为德拜参数 (双电层厚度的倒数),  $\text{m}^{-1}$ 。对于该体系, 介电常数取正庚烷和甲苯介电常数的平均值 2.15。

根据 (1), (2), (3) 式计算得到体系电性质参数, 见表 4。

由表 4 可知, 体系  $0.1 < kR < 1.0$ , 说明假设成立, 渣油胶粒符合 Hückel 方程; 在活性剂存在下, 胶粒均带正电, 并且电量有所增加。随着 SDS、CA 浓度的增加, 体系胶粒电量先增大后减小, 分别在活性剂质量分数为 0.7% 和 0.5% 时出现极大值; 油酸的加入, 则使体系胶粒电量持续增加。

表4 活性剂对 LGAR 样品颗粒电性质的影响  
Table 4 Effects of active additive concentrations  
on electric characteristics of LGAR samples

Concentration w/%	kR			$Q_c/10^{-19}C$		
	I	II	III	I	II	III
0.0	0.13	0.13	0.13	1.36	1.36	1.36
0.1	0.15	0.16	0.21	1.37	1.39	1.40
0.2	0.26	0.18	0.32	1.39	1.42	1.44
0.5	0.15	0.27	0.43	1.55	1.53	1.51
0.7	0.23	0.25	0.61	1.70	1.48	1.54
0.8	0.10	0.23	0.65	1.49	1.45	1.62
1.0	0.01	0.18	0.70	1.40	1.40	1.72

I: SDS; II: CA; III: OA

相界面产生电荷的原因大致有三种:(1)接触时产生接触电位(固-固相界面);(2)界面对溶液中各种离子的不同吸附;(3)界面离子的不同溶解度<sup>[10]</sup>。在渣油-正庚烷/甲苯溶液中,分散相在溶剂中的溶解度是产生电荷的主要原因。电泳沉积实验<sup>[11]</sup>表明,作为分散相的沥青质带正电荷,而起胶溶作用的胶质和重芳组分带负电。当沥青质在体系中溶解度小于胶溶剂时,则胶粒带正电,反之则带负电。由于体系溶剂为正庚烷/甲苯的混合溶剂,正庚

烷保证了在渣油在溶解的同时体系中还存在一定的沥青质胶粒,从而使得测定电性时体系胶粒带正电。活性剂对体系电性质影响的可能机理见图1。由图1可见,沥青质缔合体中不仅含有高度缩合的稠环芳烃,而且在缔合体外围还具有链烷烃及与胶溶剂结构相似的少环芳烃。晏德福认为,在沥青质的生成过程中,由于硫、氧、氮等杂原子的存在,会阻碍苯环结构的完全芳构化,这样就会在芳环网结构的边缘出现“开口”和“空洞”<sup>[12,13]</sup>。加入具有沥青质解缔能力的活性剂,能通过这些“开口”和“空洞”与沥青质缔合体作用,使沥青质缔合度减小,原缔合体外围的带负电的部分芳香结构与缔合体分离,从而使得沥青质含量降低(见表2),胶粒粒度减小(见表3),正电荷电量增加(见表4)。当活性剂浓度达到某一特定值时,与沥青质缔合体作用最完全,解缔效果最好;而当浓度超过此值时,由于活性剂自身所带的负电和它本身骨架所占的空间结构,使其与部分游离的结构碎片作用,从而使得与其作用的沥青质含量有所增加(见表2),胶粒电量减少(见表3),粒度增大(见表4)。

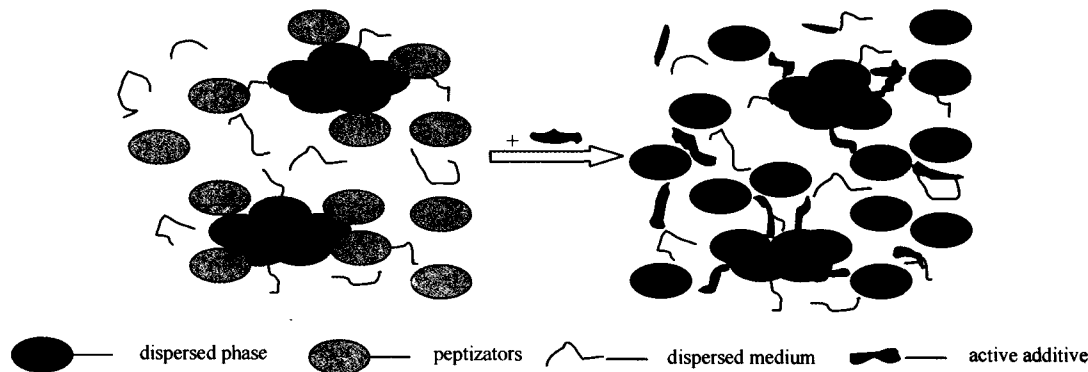


图1 活性剂作用机理

Figure 1 Functionary mechanism of active additives

2.3 活性剂对体系电性斥力的影响 体系中分散相颗粒的电荷斥力是抑制颗粒聚并的重要因素之一<sup>[14]</sup>。本研究对渣油胶粒双电层重叠时的电性斥力位能进行了考察。在低电势时,两个球形胶粒双电层重叠时的电性斥力位能为<sup>[15]</sup>:

$$U_R = \frac{1}{2} \varepsilon R \psi_0^2 \exp(-H_0 k) \quad (4)$$

式中  $U_R$  为两个胶粒间的斥力位能, J;  $H_0$  为两个相邻胶粒的距离, m;  $\psi_0$  为胶粒表面电位, V。

对有机溶剂胶体体系,  $\psi_0$  可用胶粒 Zeta 电位代替, 在单分散条件下, 不同样品均取相同的胶粒相邻距离 10 nm<sup>[16]</sup>, 将 2.2 节中的数据代入(4)式, 计算

得到渣油胶粒双电层重叠时的电性斥力位能  $U_R$ , 并与胶粒粒度大小进行了对比, 结果见图 2。

由图 2 可知, 活性剂的加入, 能使胶粒间斥力位能发生明显的变化。SDS 和 CA 的加入, 使胶粒间斥力位能先增大后减小, 胶粒粒度先减小后增大, 分别在活性剂质量分数为 0.7% 和 0.5% 处出现极值; OA 的加入, 使胶粒间斥力位能持续增大, 胶粒粒度持续减小。结果说明, 活性剂的加入, 能使胶粒间的电性斥力位能增大, 而胶粒间斥力位能的增大, 能有效地阻止胶粒间的聚并, 宏观表现为胶粒粒度变小。由此可知, 渣油沥青质胶粒间电性斥力的大小, 是抑制沥青质缔合的一个重要因素。

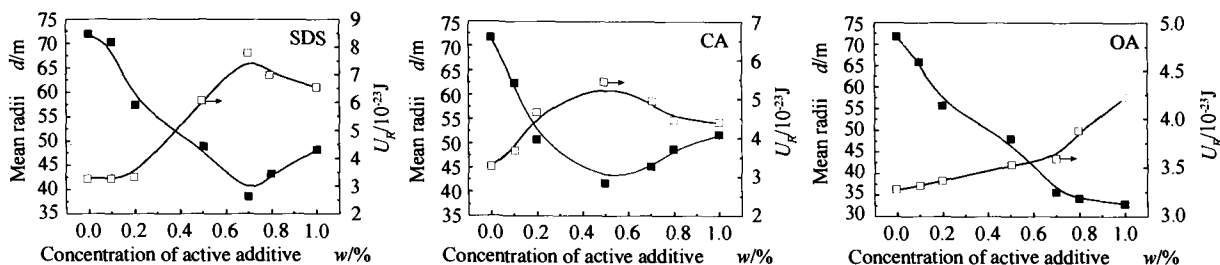


图 2 不同浓度活性剂对胶粒粒度和胶粒间斥力位能的影响

Figure 2 Effects of active additive concentrations on granularity and electric repulsive potential of colloidal particles

### 3 结 语

三种活性剂对沥青质具有解缔作用, 能使 LGAR 四组分分布、胶粒  $\zeta$  电位、电量、胶粒粒度和胶粒间电性斥力位能发生明显的变化。

随着 SDS 和 CA 浓度的增加, 胶粒  $\zeta$  电位、电量和胶粒间电性斥力位能先增大后减小, 胶粒粒度先

减小后增大, 极值分别在活性剂质量分数为 0.7% (SDS) 和 0.5% (CA) 处; 随着 OA 浓度的增加, 胶粒  $\zeta$  电位、电量和胶粒间电性斥力位能持续增加, 胶粒粒度持续减小。

渣油沥青质胶粒间电性斥力的大小, 是抑制沥青质缔合的一个重要因素。

### 参考文献:

- [1] MANSOORI G A. Modeling of asphaltene and other heavy organic depositions[J]. J Pet Sci Eng, 1997, 17(1): 101-111.
- [2] WIEHE I A, KENNEDY R J. The oil compatibility model and crude oil incompatibility[J]. Energy Fuels, 2000, 14(1): 56-59.
- [3] 梁文杰. 石油化学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1995: 66.  
(LIANG Wen-jie. Petroleum chemistry[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1995: 66.)
- [4] 陈宗琪, 戴闻光. 胶体化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 234-275.  
(CHEN Zong-qi, DAI Min-guang. Colloidal chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987: 234-275.)
- [5] 彭勃, 李明远, 赵锁奇, 吴肇亮, HOILAND H. 原油减压渣油馏分的油-水界面性质: XII 伊朗轻质减渣和大庆减渣乳状液的 Zeta 电位[J]. 石油学报(石油加工), 2006, 22(2): 103-108.  
(PENG Bo, LI Ming-yuan, ZHAO Suo-qi, WU Zhao-liang, HOILAND H. Oil-water interfacial properties of vacuum residue fractions from crude oil: XII The Zeta potential of model emulsion of vacuum residue fractions from Iranian light and Daqing crude oil[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2006, 22(2): 103-108.)
- [6] 范维玉, 官传廷, 南国枝, 陈树坤, 肖建洪, 李水平. 稠油组分油水界面 Zeta 电势及其影响因素研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 116-119.  
(FAN Wei-yu, GONG Chuan-ting, NAN Guo-zhi, CHEN Shu-kun, XIAO Jian-hong, LI Shui-ping. Zeta potential for heavy crude components and oil-water system[J]. Journal of the University of Petroleum, 2003, 27(4): 116-119.)
- [7] PARRA-BARRAZA H, HERNANDEZ-MONTIEL D, LIZARDI J, HERNÁNDEZ J, RONALDO H U, VALDEZ M A. The zeta potential and surface properties of asphaltenes obtained with different crude oil/n-heptane proportions[J]. Fuel, 2003, 82(8): 869-874.
- [8] 刘威, 齐柳, 穆文俊. 活性添加剂对石油分散体系活化状态的影响[J]. 抚顺石油学院学报, 2001, 21(3): 33-35.  
(LIU Wei, QI Liu, MU Wen-jun. Effect on the active state of petroleum disperse system of the active additive[J]. Journal of Fushun Petroleum Institute, 2001, 21(3): 33-35.)
- [9] 水恒福, 周华. 煤的缔合结构研究: I 溶液缔合动力学[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(6): 679-683.  
(SHUI Heng-Fu, ZHOU Hua. Study on the associative structure of coal: I Associative kinetics in solution[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, 32(6): 679-683.)
- [10] 郑忠. 胶体科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 270-274.  
(ZHENG Zhong. Colloidal science introduction[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989: 270-274.)
- [11] TAYLOR S E. The electrodeposition of asphaltene and implications for asphaltene structure and stability in crude and residual oils[J]. Fuel, 1998, 77(8): 821-828.
- [12] YEN T F, WEN H W, CHILINGAR G V. A study of the structure of petroleum asphaltenes and related substances by infrared spectroscopy[J]. Energy Sources, 1984, 7(3): 203-234.
- [13] YEN T F, WEN H W, CHILINGAR G V. A study of the structure of petroleum asphaltenes and related substances by nuclear magnetic resonance[J]. Energy Sources, 1984, 7(3): 275-304.
- [14] 贝歇尔, 傅鹰. 乳状液理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 114-133.  
(BECHER P, FU Ying. The theory and practice of emulsion[M]. Beijing: Science Press, 1978: 114-133.)
- [15] 周祖康, 马季铭. 胶体与表面化学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1986: 461-463.  
(ZHOU Zu-kang, MA Ji-ming. The theory of colloidal and surface chemistry[M]. Beijing: Peking University Press, 1986: 461-463.)
- [16] 张龙力, 杨国华, 阙国和. 中东常压渣油热反应样品 Zeta 电位的研究[J]. 燃料化学学报, 2005, 33(1): 125-128.  
(ZHANG Long-li, YANG Guo-hua, QUE Guo-he. Study on the Zeta potential of Middle East atmospheric residue and thermal reaction samples[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(1): 125-128.)