

# 复配表面活性剂对布敦岩沥青 与水界面性质的影响

赵 苏<sup>1</sup>, 胡 影<sup>1</sup>, 王若楠<sup>2</sup>, 郭燕君<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁科技学院基础学院, 辽宁 本溪 117004)

**摘 要** 目的 将两种表面活性剂复配,拟减少碱用量,研究表面活性剂在布敦岩沥青与水界面的吸附性能,为热碱水洗分离布敦岩沥青技术的应用提供指导. 方法 采用热碱水洗法分离天然沥青油,分析碱度、固液比、温度、吸附时间等条件对布敦岩沥青与水界面吸附性能的影响. 结果 复配表面活性剂质量分数为2%时,在pH值为8、固液比为1:40、温度为75℃、吸附时间为90 min等条件下吸附效果较好. 结论 吸附动力学表明,pH值为8时吸附速率常数 $K_a$ 比pH值为4时大,而吸附活化能 $E_a$ 却比pH值为4时小,说明pH值为8时更利于反应的进行. 吸附热力学表明,表面活性剂在布敦岩沥青与水界面的吸附过程是吸热、且自发的过程. 红外光谱显示,表面活性剂在布敦岩沥青与水界面的吸附是物理吸附.

**关键词** 表面活性剂;布敦岩沥青;界面;吸附性能

中图分类号 TU57<sup>+</sup>1

文献标志码 A

## The Effect of Compound Surfactant on Buton Rock Asphalt and Water Interface Properties

ZHAO Su<sup>1</sup>, HU Ying<sup>1</sup>, WANG Ruonan<sup>2</sup>, GUO Yanjun<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Foundation College, School of Liaoning Science and Technology, Benxi, China, 117004)

**Abstract:** In this research, two kinds of surfactants are compounded to study the adsorption properties of the compound surfactants at the BRA and water interface by debasing the dosage of alkali, then provide guidance for the application of the hot alkali water washing technology. As a result, the adsorption of surfactant on BRA and water interface is affected by the factors such as the ratio of solid and liquid, the time of adsorption, temperature and alkalinity. Under the experimental conditions, when the content of surfactant is 2%, pH is 8, solid-liquid ratio is 1:40, temperature is 75℃, adsorption time is 90 min, the better adsorption effect achieved. This experiment mainly analyze many factors which influences the separation of BRA by method of hot alkali surfactant, and use the principles of adsorption kinetics and adsorption thermodynamics, the adsorption of surfac-

tant on BRA-water interface are discussed. Adsorption kinetics shows that when the pH is 8, the adsorption rate constant is bigger than that when the pH is 4, while the adsorption activation energy is smaller than that when the pH is 4, indicating that when the pH is 8, it is more advantageous to the reaction. The adsorption thermodynamics shows that the adsorption process of surfactant on BRA and water interface is endothermic, and the adsorption process is spontaneous. Analysis by infrared spectroscopy, under the experimental conditions the adsorption of compound surfactant in BRA and water interface is physical adsorption.

**Key words:** surfactant; Buton rock asphalt; interface; adsorption property

布敦岩沥青(Buton Rock Asphalt, BRA)是一种储量丰富的天然岩沥青,产自印度尼西亚的布敦岛. BRA 的沥青含量在 24% 左右,其他成分基本上均为石灰岩矿物质,且其因粒度非常细而具有优良的吸附能力,可以在沥青与矿料结合时增强黏附效果,在当地应用广泛被称为活性剂<sup>[1-3]</sup>. 尽管布敦岩沥青资源量巨大,具有油质较好、含油率较高等特点,但是我国在非常规油气资源的开发和研究方面相对比较滞后,因此进行布敦岩沥青分离技术的相关研究具有重要意义.

罗茂<sup>[4]</sup>等研究了热碱水萃取分离油砂沥青的影响因素,当碱的质量分数为 1.6% 时取得较好的分离效果;周建伟<sup>[5]</sup>研究确定了热碱水抽提油砂沥青的优化试验条件,其中碱度为 0.25%. 由于热碱水洗通常是在碱性条件下进行,碱液对环境有污染,所以笔者

研究将两种表面活性剂复配,拟减少碱的用量,实现高提油率,进而研究碱度、温度、固液比、吸附时间等对复配表面活性剂在布敦岩沥青与水界面的吸附性能的影响,为热碱水洗提取布敦岩沥青油技术的应用提供指导.

1 试验及测试方法

1.1 主要原材料

氢氧化钠、碳酸钠、十二烷基硫酸钠(SDS)、脂肪醇聚氧乙烯醚磷酸酯(AEO-3)均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产.

布敦岩沥青:将沥青原料放入干燥箱中,温度控制在 60 ℃ 以下,3 ~ 4 h 后取出过筛(网径为 1.25 mm),即可得到细沥青. 其性能指标如表 1 所示.

表 1 布敦岩沥青基本性能指标

Table 1 The basic performance of Buton rock asphalt

性能指标	沥青含量/%	三氯乙烯溶解度/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	闪点/℃	加热损失/%	含水量/%	矿物最大粒径/mm
印尼国家标准最小值	18	18	1.7	230	—	—	—
印尼国家标准最大值	—	—	1.9	—	2	2	2
试样	26.1	26.5	1.68	297	1.02	0.6	1.18

1.2 试样制备

取适量的表面活性剂溶入温水中,调节溶液的 pH 值,按确定的固液比加入细布敦岩沥青,将混合体系加热至适宜的温度,调节搅拌速率,搅拌一定时间后,倒出上层液体进行抽滤,并清洗下层的布敦岩沥青(清洗液一并进行抽滤),布敦岩沥青不溶物置于干

燥箱中烘干备用,滤液收集备用.

1.3 界面张力的测定

采用全自动张力仪(JK99,上海中晨数字技术设备有限公司),以吊环法测滤液的界面张力.

1.4 吸附量的测定

按文献[6]中方法进行吸附量的测定.

1.5 表面活性剂的选择

表面活性剂的选择以 *HLB* 值 (Hydrophile Lipophile Balance) 作为依据. *HLB* 值与表面活性剂性能大致关系如表 2 所示.

表 2 表面活性剂的 *HLB* 值与性能的关系  
Table 2 The relationship between *HLB* value and performance of surfactant

性能	<i>HLB</i> 值
消泡作用(消泡剂)	1.0~3.0
乳化作用(W/O 型乳化剂)	3.6~6.0
润湿作用(润湿剂)	7.0~9.0
乳化作用(O/W 型乳化剂)	8.0~18.0
去污作用(洗涤剂)	13.0~15.0
增溶作用(增溶剂)	15.0~18.0

非离子表面活性剂在有机溶剂和水中的溶解性均较好,受强电解质无机盐以及酸、碱的影响不大. 其最大特点是与其他各个类型的表面活性剂具有非常好的相容性. 本项目借助这一特点,拟利用其与阴离子表面活性剂之间的协同增效作用,使非离子表面活性剂浊点上升,扩大它的使用温度范围,进行布敦岩沥青的提油试验<sup>[7-12]</sup>.

根据溶度估算法,常温下,把非离子表面活性剂 AEO-3 溶于水中,可得 *HLB* 的近似值为 6.3,适合应用在 W/O 型乳化液中进行乳化. 而导致沥青油破乳脱水困难的原因之一是因其形成了比较稳定的 W/O 型乳状液. 因此,选用 AEO-3 可促进天然沥青脱水,有利于提高沥青油的提取率. 而阴离子表面活性剂中 SDS 的 *HLB* 统一标准值为 40,属于亲水基表面活性剂,易溶于水,与非离子复配性好,具有良好的乳化性、经济性等特点.

其次,AEO-3 属于非离子表面活性剂,因其聚氧乙烯链是极性的,可通过氢键与其链中氧原子结合,使分子带有一些正电性. 在物理吸附作用下,借助其含氧基团改善存在于碱液表面液滴的亲油性,促使其溶剂化链在介质中得到完全伸展进而形成空间位

阻<sup>[13]</sup>. 故笔者选用 AEO-3 和 SDS 进行复配.

2 试验结果与讨论

2.1 表面活性剂对布敦岩沥青与水界面张力的影响

2.1.1 表面活性剂复配比例的确定

在溶液 pH 为 8、温度为 75 ℃、搅拌速率为 400 r/min、吸附时间为 120 min、固液比为 1:40 的设定条件下,将 SDS 与 AEO-3 的质量比分别按 2:1、1:1、1:2、1:4、1:6 复配后,以占布敦岩沥青质量分数 2% 的掺量加入试验体系中,从而确定复配比例,结果如图 1 所示.

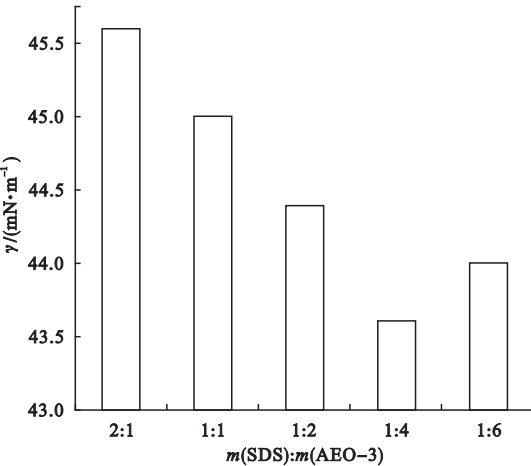


图 1 SDS 与 AEO-3 复配比例对布敦岩沥青与水界面张力的影响

Fig. 1 The influence of SDS and AEO-3 compound matching on BRA-water interface tension

由图 1 可知,界面张力随着 AEO-3 掺量的不断增加在逐渐降低. 当复配比例为 1:4 时,界面张力达到最低,为 43.6 mN/m,说明 AEO-3 在 W/O 型乳化液中具有更优异的作用效果,在改善界面张力,促进吸附过程中起主导作用. 但当复配比例为 1:6 时,界面张力又开始增加,表明 SDS 掺量太少,导致 AEO-3 与 SDS 的相互协同作用效果不明显. 所以本试验中 SDS 和 AEO-3 的复配

比例按质量比确定为1:4.

2.1.2 表面活性剂掺量的确定

在溶液 pH 为 8、温度为 75 ℃、搅拌速率为 400 r/min、吸附时间为 120 min、固液比为 1:40 的设定条件下,分别将 SDS、AEO-3 及按 1:4 比例复配的 3 种表面活性剂加入试验体系中,掺量分别为布敦岩沥青质量分数的 0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%、5%,从而确定 AEO-3/SDS 掺量(见图 2).

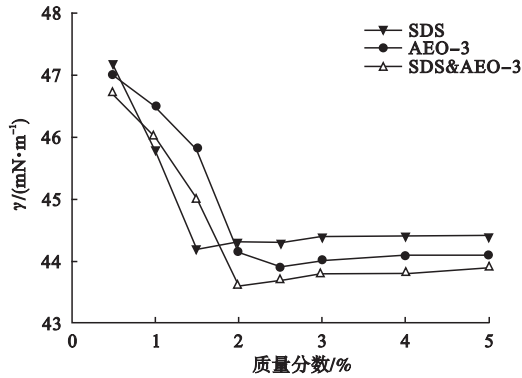


图2 表面活性剂掺量对布敦岩沥青与水界面张力的影响

Fig.2 The influence of surfactant content on BRA-water interface tension

由图 2 可知,界面张力随着表面活性剂掺量的不断增加在逐渐降低.与单一的表面活性剂相比,SDS、AEO-3 复配时作用效果更好,掺量占沥青质量分数 2% 时界面张力降到最低 43.6 mN/m,此时溶液中胶团浓度达到临界值,使沥青油更易于从沥青颗粒上脱离出来,提高洗油效率.

综上所述,将 SDS 和 AEO-3 按 1:4 的质量比进行复配,AEO-3/SDS 按 BRA 质量分数的 2% 进行沥青洗油试验,此时界面张力最低,洗油效果最佳.

2.2 表面活性剂在布敦岩沥青与水界面的吸附

2.2.1 碱度

在温度为 75 ℃、吸附时间为 120 min、固液比为 1:40、搅拌速率为 400 r/min、

AEO-3/SDS 掺量占沥青质量分数 2% 的设定条件下,研究碱度对吸附量  $\Gamma$  的影响(见图 3).

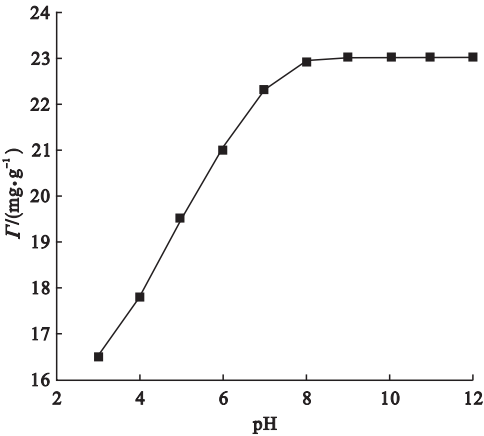
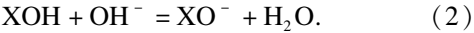
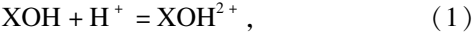


图3 碱度对吸附量的影响

Fig.3 The influence of alkalinity on adsorption quantity

由图 3 可知,pH 值为 3~7 时,吸附量随 pH 值增大而增加较快;而 pH 值为 8 时,吸附量略有升高而后几乎保持不变,这是由于 pH 值变化时可变性电荷的数量会发生改变.发生如下化学反应:



混合液在碱性条件下,布敦岩沥青表面的负电荷会因 OH<sup>-</sup> 数量较多促使布敦岩沥青颗粒边缘发生大量羟基反应而迅速增加,随即新增了很多表面活性剂的吸附位,使得吸附量增加<sup>[14-20]</sup>.考虑到碱液对环境的污染因素,确定溶液 pH 值为 8.

2.2.2 温度

在溶液 pH 为 8、吸附时间为 120 min、固液比为 1:40、搅拌速率为 400 r/min、AEO-3/SDS 掺量占沥青质量分数 2% 的设定条件下,研究温度对吸附量的影响,结果如图 4 所示.由图 4 可知,吸附过程中温度越高,其吸附量会越大,但当温度达到 75 ℃之后,吸附量几乎不再随着温度的升高而不断增加,表明在此温度条件下所对应的吸附量

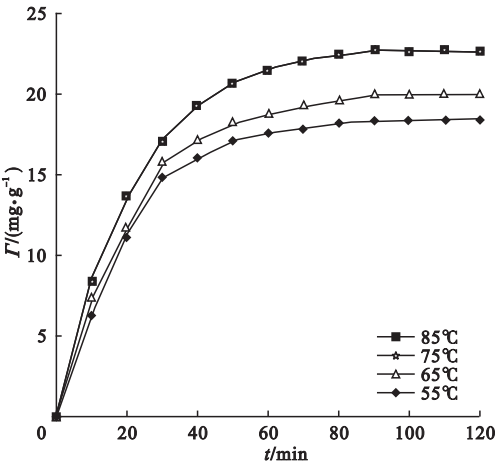


图4  温度对吸附量的影响

Fig. 4  The influence of temperature on adsorption quantity

达到饱和.当温度过高,即高于75 ℃,会发生剧烈的分子热运动反而不益于吸附,因此本试验的温度确定为75 ℃.

2.2.3  吸附时间

在溶液 pH 为 8、温度为 75 ℃、搅拌速率为400 r/min、固液比为 1:40、AEO-3/SDS 掺量占沥青质量分数 2% 的设定条件下,考察吸附时间对吸附量的影响(见图5).

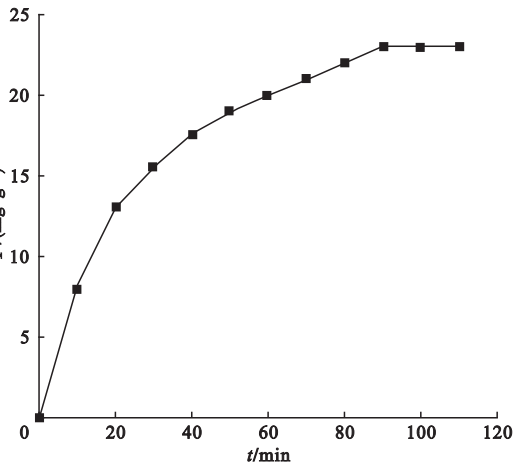


图5  吸附时间对吸附量的影响

Fig. 5  The effect of adsorption time to adsorption quantity

由图5可知,吸附量随吸附时间的增加而不断增大,90 min 后吸附量几乎不变,此

时实现了吸附平衡.但考虑到吸附过程中除了存在一般情况下的固液吸附平衡,还存在油质上表面活性剂的吸附平衡和有机类矿物质的吸附、脱附等众多情况.所以本试验的吸附时间确定为120 min.

2.2.4  固液比

在溶液 pH 为 8、温度为 75 ℃、搅拌速率为400 r/min、吸附时间为120 min、AEO-3/SDS 掺量占沥青质量分数 2% 的设定条件下,研究固液比对吸附量的影响(见图6).

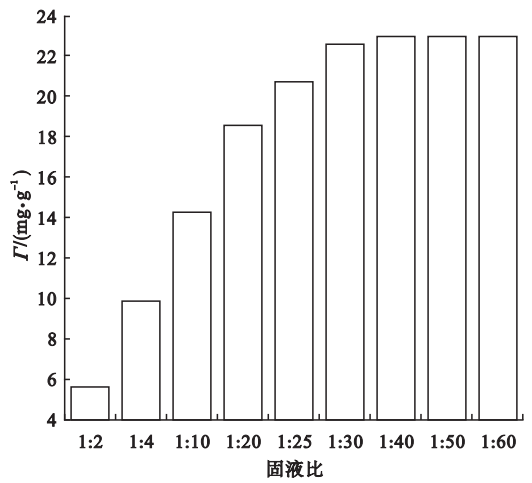


图6  固液比对吸附量的影响

Fig. 6  The effect of solid-liquid ratio to adsorption quantity

由图6可知,AEO-3/SDS 的吸附量随着固液比的减小而不断增加,但当固液比小于1:40 时,其在布敦岩沥青表面的吸附量基本上趋于稳定,此时已实现吸附平衡,所以固液比确定为1:40.

2.3  吸附动力学和热力学分析

2.3.1  吸附动力学

为了进一步说明可变性电荷的数量因 pH 值的变化而对表面活性剂吸附作用的影响,另取弱酸条件 pH 值为4 进行对比试验.(试验1 中 pH 为 8,温度为 75 ℃;试验2 中 pH 为 8,温度为 55 ℃;试验3 中 pH 均为 4,温度为 75 ℃;试验4 中 pH 为 4,温度 55 ℃),结果见表3.

表3 溶液浓度和吸附量的数据记录

Table 3 The record of solution concentration and adsorption quantity

时间/ min	试验1		试验2		试验3		试验4	
	$\Gamma/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\Gamma/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\Gamma/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\Gamma/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$
10	8.45	24.77	7.41	24.81	6.33	24.80	4.56	24.88
20	13.57	24.60	11.70	24.72	10.17	25.75	7.63	24.81
30	16.99	24.55	14.72	24.64	12.81	24.68	9.99	24.74
40	19.19	24.51	16.77	24.58	14.28	24.65	11.85	24.71
50	20.60	24.46	17.91	24.54	15.33	24.63	13.02	24.68
60	21.46	24.45	18.70	24.52	16.06	24.61	13.87	24.67
70	22.02	24.43	19.23	24.51	16.69	24.60	14.43	24.65
80	22.33	24.43	19.50	24.50	17.11	24.59	14.93	24.63
90	22.62	24.42	19.89	24.48	17.79	24.58	15.85	24.61
100	22.62	24.42	19.89	24.48	17.79	24.58	15.85	24.61

由表3可得,AEO-3/SDS在布敦岩沥青与水界面吸附90 min后实现吸附平衡.由Langmuir的吸附速率公式:

$$\ln\left(\frac{\Gamma_s}{\Gamma_s-\Gamma}\right)=-\ln(1-F)=K_a t. \tag{3}$$

式中: $\Gamma_s$ 为平衡时的吸附量; $F$ 为 $\frac{\Gamma}{\Gamma_s-\Gamma}$ 的比值; $K_a$ 为速率常数.以 $-\ln(1-F)$ 对 $t$ 作图得图7.

明此吸附过程遵循I级吸附动力学规律.计算出各个直线的斜率进而可求得速率常数 $K_a$ ,代入阿伦尼乌斯公式.

$$\ln\frac{k_2}{k_1}=-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right). \tag{4}$$

式中: $k_1$ 、 $k_2$ 为速率常数; $E_a$ 为活化能; $R$ 为摩尔气体常量; $T_1$ 、 $T_2$ 为温度.可以得到相应条件下反应的活化能 $E_a$ ,结果见表4.

表4 吸附动力学数据统计

Table 4 The data of adsorption kinetics				
试验编号	pH	$T/\text{K}$	$K_a/\text{h}^{-1}$	$E_a/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
1	8	348.15	4.290 4	4.15
2	8	328.15	3.931 3	
3	4	348.15	3.278 0	6.53
4	4	328.15	2.856 8	

由表4可知,相同温度下,pH值为8时吸附速率常数比pH值为4时大,说明碱度对吸附作用影响很大,而pH值为8时吸附活化能也小,依据阿伦尼乌斯提出的活化能理论.可知碱性条件对吸附作用的效果更好,与2.2.1节的结论一致.相同碱度不同温度条件下,温度升高反应速度加快,与2.2.2节

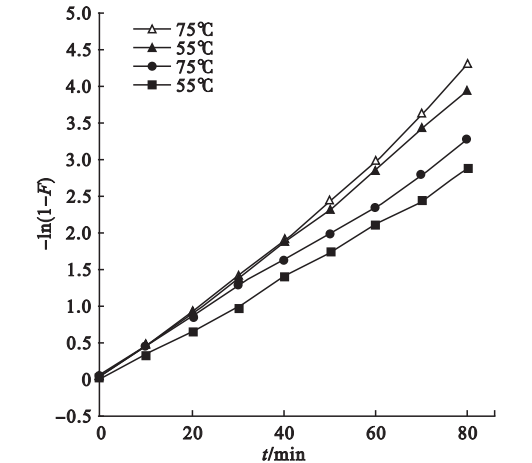


图7 Langmuir 吸附速率曲线

Fig.7 Langmuir line of adsorption rate

图7中所得吸附速率曲线都是直线,表



的结论一致.

2.3.2 吸附热力学

将表4中数据代入 Langmuir 吸附方程式.

$$\frac{C_e}{\Gamma} = \frac{1}{b\Gamma_m} + \frac{C_e}{\Gamma_m}.$$
 (5)

式中: $C_e$  为平衡时质量浓度; $\Gamma_m$  为饱和吸附量; $b$  为吸附常数.

以  $C_e$  为  $x$  轴,以  $\frac{C_e}{\Gamma}$  为  $y$  轴,选取 5 个点大致可以连接成直线(见图8和图9).

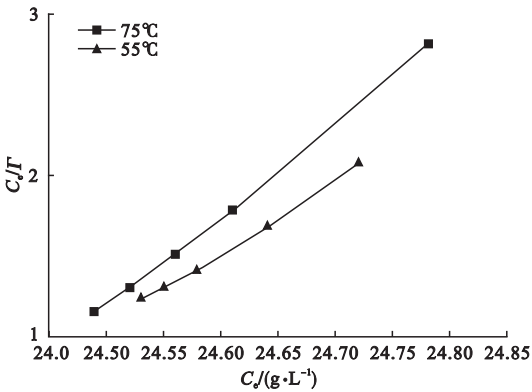


图8 pH=8 Langmuir 吸附曲线

Fig.8 pH=8 Langmuir lines of absorption

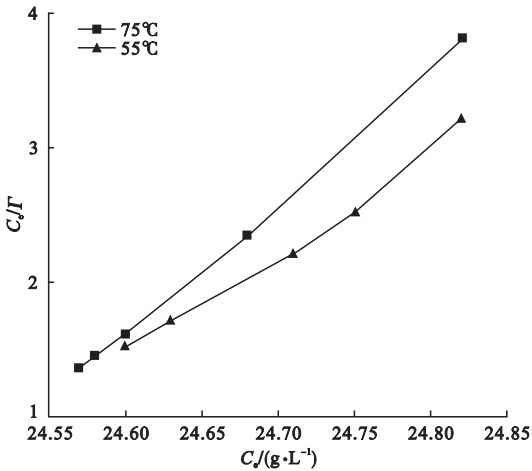


图9 pH=4 Langmuir 吸附曲线

Fig.9 pH=4 Langmuir lines of absorption

通过斜率和截距计算出  $b$  和  $\Gamma_m$ ,根据式(6)~(8)三个方程式<sup>[6]</sup>计算焓、熵、自由能的变化,结果见表5.

$$\Delta H = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{\Gamma_{m2} b_2}{\Gamma_{m1} b_1},$$
 (6)

$$\Delta G = -RT \ln b,$$
 (7)

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T}.$$
 (8)

式中: $\Delta H$  为焓变; $\Delta S$  为熵变; $\Delta G$  为自由能变.

表5 吸附热力学数据统计

Table 5 The data of adsorption thermodynamics					
试验 编号	pH	T/K	$\Delta H /$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$\Delta G /$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S /$ (J·mol <sup>-1</sup> )
1	8	348.15	6.089	-0.057 3	17.68
2	8	328.15		-0.133 1	18.96
3	4	348.15	3.041	-0.275 9	9.53
4	4	328.15		-0.497 5	10.78

由表5可知, $\Delta H$  大于0,说明表面活性剂在布敦岩沥青与水界面的吸附过程是吸热过程,反应温度的上升有利于吸附,促进吸附量增大. pH 值为8时的 $\Delta H$  大于 pH 值为4的 $\Delta H$ ,反映出影响吸附过程因素的复杂性,而 $\Delta G$  小于0、 $\Delta S$  大于0,表明吸附过程是自发的.

2.4 吸附类型

为了揭示表面活性剂在布敦岩沥青与水界面上的吸附属于物理吸附还是化学吸附对布敦岩沥青吸附,对布敦岩沥青吸附 AEO-3/SDS 油样进行测试,红外光谱见图10.

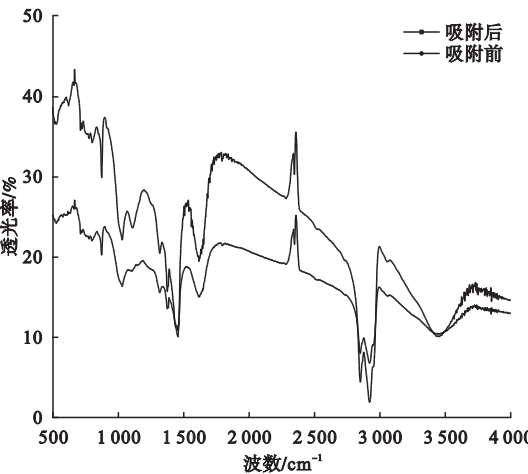


图10 布敦岩沥青吸附前后红外光谱图

Fig.10 Infrared spectra of Buton rock asphalts

由图 10 的红外光谱对比分析可知,在  $500 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$  内, AEO-3/SDS 的加入并没有改变 BRA 各峰的峰形和峰位,也没有出现新的特征峰,即表面活性剂分子在 BRA 表面吸附时没有形成新的化学键,只是各峰的强度有显著提高. 这种现象说明 AEO-3/SDS 通过相互协同增效作用,有效减小 BRA 与水两相间的界面张力来实现界面能的降低,有利于沥青油提取率的提高.

### 3 结 论

(1)通过研究表面活性剂掺量、复配比例对界面张力的影响,确定了表面活性剂复配比例为 1:4,适宜的掺量为 2%.

(2)碱度、温度、固液比、吸附时间等因素均影响表面活性剂在布敦岩沥青与水界面的吸附,在试验条件下, pH 值为 8、温度为  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、固液比为 1:40、吸附时间为 90 min 时具有较好的吸附效果.

(3)动力学分析表明, pH 值为 8 时吸附速率常数  $K_a$  比 pH 值为 4 时大,而吸附活化能  $E_a$  却比 pH 值为 4 时小, pH 值为 8 时更有利于反应的进行.

(4)热力学分析表明,本试验条件下表面活性剂在布敦岩沥青与水界面的吸附过程是一个吸热过程,且该吸附过程是自发进行的.

(5)红外谱图分析表明,本试验条件下复配表面活性剂在布敦岩沥青与水界面进行的吸附属于物理吸附.

### 参考文献

[1] 李瑞霞,郝培文,王春,等. 布敦岩沥青改性机理[J]. 公路交通科技,2011, 28(12):16-20.  
(LI Ruixia,HAO Peiwen,WANG Chun,et al. Modified mechanism of Buton rock asphalt [J]. Journal of highway and transportation research and development,2011, 28(12):16-

20.)  
[2] 周丽峰. BRA 与 SBR 复合改性沥青及其混合料技术性能研究[J]. 公路工程,2014(6):277-282.  
(ZHOU Lifeng. Study on technical characteristic of the BRA and SBS composite modified asphalt and asphalt mixture[J]. Highway engineering,2014(6):277-282.)  
[3] 邓鹏飞. 布敦岩沥青性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.  
(DENG Pengfei. Research on Buton rock asphalt(BRA)performance[D]. Beijing :Beijing Jiaotong University,2008.)  
[4] 罗茂,耿安松,廖泽文. 油砂中沥青的热碱水萃取分离及其影响因素[J]. 油气地质与采收率,2011,18(3):94-97.  
(LUO Mao, GENG Ansong, LIAO Zewen. Separation of hot water-based extraction for oil sand bitumen and its affecting parameter[J]. Petroleum geology and recovery efficiency, 2011,18(3):94-97.)  
[5] 周建伟. 油砂沥青水溶液与溶剂抽提及分离[J]. 化学工程师,2008, 22(3):14-16.  
(ZHOU Jianwei. Extraction and disassociation bitumen from oil sands via aqueous solution [J]. Chemical engineer, 2008, 22(3):14-16.)  
[6] 董志龙,丁伟,刘坤,等. 十四烷基芳基磺酸盐在大庆油砂上的吸附性能[J]. 物理化学学报,2011,27(12):2767-2772.  
(DONG Zhilong,DING Wei,LIU Kun,et al. Adsorption performance of tetradecyl aryl sulfonates on oil sand from the Daqing oilfield [J]. Acta physico-chimica sinica, 2011, 27(12):2767-2772.)  
[7] NGUYEN T B N,BAE W, DANG T Q C. Improvements of mixed-surfactants in alkaline/surfactant/polymer solutions [J]. Petroleum science & technology, 2014, 32(12):1458-1464.  
[8] TYAGI S, TYAGI V K. Interaction of anionic gemini surfactants with other surfactants [J]. Journal of dispersion science and technology, 2014, 35(9):1308-1318.  
[9] MASALOVA I, KHARATYAN E. Effect of silica particles on stability of highly concentrat-



- ed water-in-oil emulsions with non-ionic surfactant[J]. Colloid journal, 2013, 75(1): 95 – 102.
- [10] RAY D, ASWAL V K. Observation of adsorption versus depletion interaction for charged silica nanoparticles in the presence of non-ionic surfactant[J]. Journal of physics condensed matter, 2014, 26(3): 035102.
- [11] BERA A, OJHA K, MANDAL A. Synergistic effect of mixed surfactant systems on foam behavior and surface tension[J]. Journal of surfactants and detergents, 2013, 16(4): 621 – 630.
- [12] PENFOLD J, CHEN M, THOMAS R K, et al. Solution self-assembly of the sophorolipid bio-surfactant and its mixture with anionic surfactant sodium dodecyl benzene sulfonate[J]. Langmuir the ACS journal of surfaces & colloids, 2011, 27(14): 8867 – 8877.
- [13] 赵立娃. 表面活性剂/渣油/盐水乳化体系分散机制研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.  
(ZHAO Liwa. Study on the mechanism of surfactant/residue/brine emulsive system[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.)
- [14] 丁伟, 江依昊, 吴玉娜, 等. 甜菜碱型两性表面活性剂在高温高矿化度油藏条件下砂岩表面的吸附规律[J]. 化工进展, 2014, 33(9): 2450 – 2454.  
(DING Wei, JIANG Yihao, WU Yuna, et al. Adsorption of betaine amphoteric surfactants on sandstone surface under reservoir conditions of high temperature and high salinity[J]. Chemical industry and engineering progress, 2014, 33(9): 2450 – 2454.)
- [15] 郑翠英. 阳离子表面活性剂和重油复合体系在海洋沉积物上的吸附行为[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
(ZHENG Cuiying. Studies on combined sorp-
- tion behaviors of cationic surfactant and heavy oil on marine sediments[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.)
- [16] 韩化雨. 阳离子表面活性剂和 DDT 复合体系在海洋沉积物上的吸附行为[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
(HAN Huayu. Combined sorption behaviors of CTAB and DDT on marine sediment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.)
- [17] 宫晓飞. 非离子表面活性剂对 DDT 在胶州湾沉积物上吸附行为的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
(GONG Xiaofei. Effect of nonionic surfactant on the sorption behavior of DDT onto Jiaozhou bay sediment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.)
- [18] 景建宁. 阴离子表面活性剂对 DDT 在胶州湾沉积物上吸附行为的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
(JING Jianning. Effect of anionic surfactant on the sorption behavior of DDT on Jiaozhou bay sediment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.)
- [19] 曹晓燕, 景建宁, 杨佳朋, 等. 表面活性剂对 DDT 在胶州湾沉积物上吸附行为的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3327 – 3334.  
(CAO Xiaoyan, JING Jianning, YANG Jiapeng, et al. Effect of surfactant on sorption behaviors of DDT on Jiaozhou bay sediment[J]. Environmental science, 2011, 32(11): 3327 – 3334.)
- [20] 庞会玲, 杨桂朋, 高先池, 等. pH 及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 129 – 134.  
(PANG Huiling, YANG Guipeng, GAO Xianchi, et al. Impacts of pH and surfactants on adsorption behaviors of norfloxacin on marine sediments[J]. Environmental science, 2012, 33(1): 129 – 134.)