

木质素系和萘系分散剂在煤水界面的吸附性能

周明松^{1,2}, 邱学青^{1,2}, 杨东杰^{1,2}

(1. 华南理工大学化工与能源学院, 2. 广东省绿色化学产品技术重点实验室, 广州 510640)

摘要 研究了两种木质素类分散剂 SL(木质素磺酸钠)和 MSSL(改性磺化碱木质素钠盐)和一种萘系分散剂(FDN)在大同煤表面的吸附量和动力学,结果表明,SL和MSSL在煤表面的吸附量远比FDN的大,但是拟合所得的Langmuir平衡常数 K 和吸附速率常数 k_a 都比FDN的小,这表明SL和MSSL在煤表面的吸附能力比FDN略差,吸附速率较慢.采用IR和XPS研究了煤表面分散剂吸附层的结果表明,吸附了SL和MSSL的煤表面具有明显的“红移”现象,并且SL和MSSL在煤表面的吸附层厚度分别为7.22和4.61 nm,而FDN的吸附层厚度较小,为2.11 nm.分析认为,SL和MSSL在煤表面的吸附以氢键力为主,吸附量较大,吸附层较厚,在煤表面呈多点式吸附;FDN主要以 π 电子极化吸附在煤表面呈卧式吸附,吸附强度较大,吸附层较薄.

关键词 分散剂; 吸附; 红移; 吸附膜厚度; 吸附模型

中图分类号 O647; TQ423; TQ536 **文献标识码** A **文章编号** 0251-0790(2008)05-0987-06

在煤水悬浮浆体中,煤是疏水性物质,在水中具有热力学不稳定性,极易团聚,把有限的水包裹在煤粒间缝隙里,从而使浆体黏度升高,流动性变差.分散剂在煤水界面的吸附改变了煤的表面性质,降低了体系自由能,使煤粒能够均匀地分散在水中.因此分散剂在煤水界面的吸附是研究分散剂与煤之间的相互作用规律的基础,对水煤浆的应用性能具有重要影响.在水煤浆工业中,木质素系和萘系水煤浆分散剂是工业中应用较为广泛的分散剂,由于分子结构的不同,导致这两类分散剂在应用性能方面的差异较大,木质素系分散剂的应用效能普遍偏低^[1],而萘系分散剂的应用效能较高^[2,3].鉴于世界石油资源逐渐枯竭,以及木质素为可再生资源的优势,对以木质素为原料合成水煤浆分散剂的研究日益增多^[4].本文以两种不同分子结构的木质素类分散剂、一种萘系分散剂和大同煤为对象,综合研究了分散剂在大同煤表面的吸附量、吸附动力学、吸附作用力以及吸附膜厚度等性能,分析了不同分散剂分子结构特征对其吸附性能的影响,提出了3种分散剂在煤表面的吸附模型.这可以为开发新型高效能木质素类水煤浆分散剂提供理论参考.

1 实验部分

1.1 煤样与分散剂

实验选用山西大同煤作为煤样,煤质分析(广东发电用煤质量监督检验中心检测)如表1所示.

Table 1 Elemental and proximate analyses of the Datong coal

Coal	Ultimate analysis/(mass fraction, %)					Proximate analysis/(mass fraction, %)		
	C	H	O	N	S	M^*	A^*	V^*
Datong coal	71.35	3.78	9.32	0.92	0.62	3.79	10.22	27.77

* M is the internal water content on dried base; A is the ash content on dried base; V is the volatilizing matter content on dried base.

采用3种分散剂:木质素磺酸钠(SL),吉林石砚造纸厂生产,源于杨木酸性亚硫酸钠法制浆;改性磺化碱木质素钠盐(MSSL),以麦草碱木质素为原料用文献[5]方法合成;萘磺酸盐甲醛缩合物

收稿日期: 2007-09-06.

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 20676040)和广东省自然科学基金重点基金(批准号: 05103536)资助.

联系人简介: 邱学青,男,博士,教授,主要从事天然可再生资源木质素的资源化利用技术和应用基础研究.

E-mail: cexqiu@scut.edu.cn

(FDN), 湛江外加剂厂生产.

为了消除分散剂中杂质对其吸附的影响, 将三种分散剂分散并经过阴阳离子交换树脂进行纯化^[6], 除去无机盐、糖类、半纤维素和少量水溶性小分子, 得到纯化分散剂的收率(以占未纯化前分散剂的质量分数表示)如表 2 所示. 经过纯化后的三种分散剂的重均分子质量(M_w)、数均分子质量(M_n)和多分散指数(M_w/M_n)如表 2 所示. 3 种分散剂在水溶液中的分子状态透射电镜(TEM)照片如图 1 所示. 由图 1 可见, MSSL 在水溶液中为几个球形分子联结而成的不规则絮状结构, 并且带有支链结构; SL 在水溶液中为球形分子; FDN 在水溶液中为团聚线团状结构. 由于 TEM 的测试条件是在铜网上干燥后再测试, 因此 FDN 分子存在团聚现象.

Table 2 Molecular weight distribution of dispersant*

Dispersant	M_w	M_n	M_w/M_n	Purified yield(%)
MSSL	8750	1696	5.16	91.46
SL	5300	1207	4.40	73.38
FDN	5200	1262	4.12	71.84

* Molecular weights of the dispersants were determined by Gel chromatograph with waters 1515 Isocratic HPLP pump/Waters 2487 Dual λ Absorbance Detector made in us.

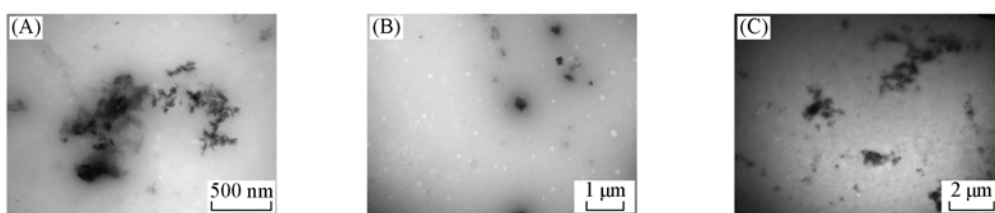


Fig. 1 TEM images of the MSSL(A), SL(B) and FDN(C) in water solution

1.2 红外光谱分析

采用 PE 公司的 AutosystemXL/I-series/Spectrum 2000 型红外光谱仪, 样品处理采用溴化钾压片法.

1.3 吸附量及吸附等温线的测量

用残余质量浓度法测量煤的表观吸附量. 准确称取一定量的煤样于锥形瓶中, 加入一定质量浓度的分散剂溶液, 用塞子封闭后于设定温度下在恒温摇床上振荡 5 h, 然后静置一定时间使其达到吸附平衡. 取出少量悬浮液用高速离心机离心分离出上层清液, 稀释分离出的上层清液使其符合紫外分光光度计的测量范围, 测定其质量浓度. 同时作空白实验以校正由于煤样浸泡过程中的溶出物对紫外吸收的干扰. 由分散剂原溶液与吸附平衡后溶液的质量浓度差根据式(1)计算出煤粉对分散剂的静态吸附量, 得吸附等温线.

$$\Gamma = [(c_0 - c_t + c_{\text{blank}}) \times V] / m \quad (1)$$

式中, Γ 为单位质量煤粉吸附分散剂的质量(mg/g); c_0 为原分散剂溶液的质量浓度(g/L); c_t 为吸附平衡后溶液的质量浓度(g/L); c_{blank} 为空白样紫外测出的质量浓度(g/L); V 为溶液总体积(mL); m 为煤样质量(g).

1.4 分散剂吸附膜厚度的测定

采用 VG Scientific Ltd., U. K. 生产的 ESCALAB MK II 型 X 射线光电子能谱仪(以 Mg 的特征 $K\alpha$ 射线为 X 射线源, 光电子能量为 1253.6 eV)测定分散剂在煤表面吸附层厚度, 通过测量吸附分散剂前后 Si_{2p} 光电子经过煤表面分散剂吸附层后强度的衰减程度, 近似计算出分散剂吸附层的厚度.

取一定质量煤粉置于 100 mL 质量浓度为 10 g/L 的分散剂溶液中, 放在恒温摇床上于 25 °C 下振荡搅拌 5 h, 使煤粉在分散剂溶液中达到吸附平衡. 然后将悬浮液用离心机进行高速离心, 将下层滤饼经真空干燥后存放在干燥器内待测.

2 结果与讨论

2.1 吸附分散剂前后大同煤表面的 IR 谱图分析

实验通过比较未吸附分散剂的大同煤与吸附了 MSSL, SL 和 FDN 的大同煤表面的 IR 谱图研究了分散剂的吸附对煤表面性质的改变, 结果如图 2 所示. 由图 2(A) 可见, 吸附分散剂前后大同煤的 IR 图基本完全相同. 但是将 3200 ~ 3400 cm^{-1} 范围内的谱图放大[图 2(B)], 吸附了分散剂的煤表面在 3400 cm^{-1} 处的吸收峰强度比未吸附分散剂煤表面在 3400 cm^{-1} 处的小; 然而在 3200 cm^{-1} 处的吸收峰

强度比未吸附分散剂煤表面的略大. 表现出一定的红移现象, 表明煤表面的—OH 等极性基团与分散剂分子中的—OH, —COOH 和—C=O 等极性基团之间存在较强的氢键作用^[7]. 木质素类分散剂 MSSL 和 SL 在 3200 cm^{-1} 处的吸收强于 FDN, 向低频移动较大. 由此可知, 氢键力是分散剂分子与煤表面结合的重要作用力, 是分散剂分子在煤表面吸附的重要推动力. 特别是对于—OH, —COOH 和—C=O 基团含量较高的木质素类分散剂 MSSL 和 SL, 这种氢键力的作用更加明显.

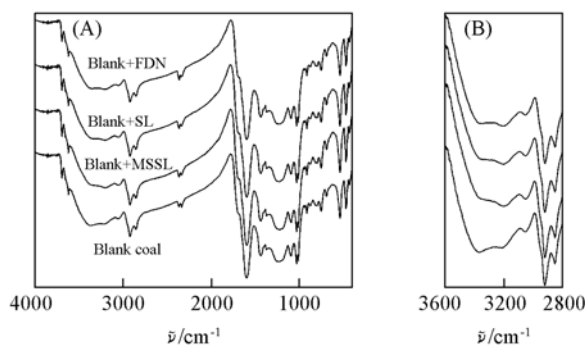


Fig. 2 Infrared spectra of Datong coal with or without adsorbed dispersants

(B) The maghification of (A) in 3600—2800 cm^{-1} .

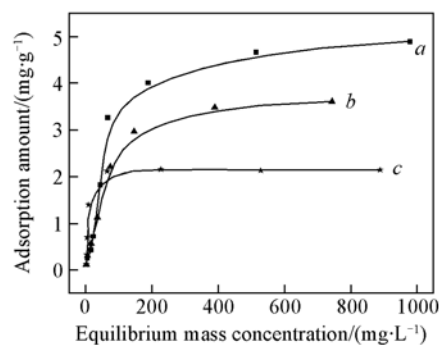


Fig. 3 Adsorption isotherms of different dispersants on Datong coal

a. MSSL; b. SL; c. FDN.

2.2 分散剂在煤水界面的吸附等温线

实验在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下测定了 MSSL, SL 和 FDN 3 种分散剂在大同煤表面的吸附量随分散剂平衡质量浓度的关系, 吸附等温线见图 3. 从图 3 可以看出, 不同分散剂的吸附量随着平衡质量浓度的增加而出现一个平台, 可以初步判断在实验质量浓度范围内分散剂在煤表面的吸附属于单分子层吸附. 采用 Langmuir 等温吸附方程对图 3 的吸附等温线进行拟合, 由拟合直线回归方程求得吸附平衡常数 K 和饱和吸附量 Γ_{∞} (表 3). Langmuir 吸附模型如下:

$$\Gamma/\Gamma_{\infty} = Kc/(1 + Kc) \quad (2)$$

式中, Γ 为吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); Γ_{∞} 为平衡时的饱和吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); c 为平衡质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); K 为 Langmuir 平衡常数.

由表 3 可见, 三种分散剂在大同煤表面吸附等温线的 Langmuir 方程拟合相关系数都大于 0.98, 拟合相关度较高. 对比三种分散剂的拟合饱和吸附量 Γ_{∞} 可以看出, MSSL 和 SL 在大同煤表面的饱和吸附量较大, 分别为 4.97 和 3.67 mg/g , FDN 的饱和吸附量较小, 为 2.22 mg/g . Langmuir 平衡常数 K 表示分散剂在煤表面的吸附能力强弱, 由表 3 结果可以看出, FDN 在大同煤表面的平衡常数 K 为 16.06×10^{-2} , 远大于 MSSL (1.81×10^{-2}) 和 SL (1.38×10^{-2}), 这表明萘系分散剂 FDN 在大同煤表面的吸附能力比木质素类分散剂 MSSL 和 SL 的强.

通过分析可以认为, FDN 分散剂分子中含有大量的萘环结构, 萘环和煤中稠合芳环之间具有很强的亲和力, 以 π 电子极化吸附形式在煤表面憎水部位形成“特性吸附”, 其以萘环平行于煤煤表面的方式被吸附^[8], 吸附牢固, 吸附层致密. SL 和 MSSL 属于木质素类分散剂, 由图 1 可见, 其主体分子为球形结构, 分子中疏水单元主要是由苯丙烷及其衍生物组成, 亲水基团主要是磺酸基和酚、醇羟基, 由于疏水基团和亲水基团呈立体间隔分布^[9], 整个分子中并没有明显的疏水、亲水基团分布集中区. 因此其分子中的亲水官能团对其在煤表面疏水区的吸附具有一定阻碍作用, 而主要以氢键作用、离子对吸附等形式在煤表面吸附, 吸附作用力较弱, 吸附层较疏松.

2.3 分散剂在煤水界面的吸附动力学研究

分散剂在煤水界面的吸附平衡速率反应了分散剂在煤表面的吸附速率快慢, 受到分散剂的分子结构特征和煤质的影响. 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下测定了 MSSL, SL 和 FDN 3 种分散剂在大同煤上的吸附量与吸附时间的关系, 结果如图 4 所示. 由图 4 可见, 3 种分散剂在大同煤表面的吸附量随着吸附时间的延长而提

Table 3 Parameters for Langmuir isotherm adsorption equation

Dispersant	K	$\Gamma_{\infty}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2
MSSL	1.81×10^{-2}	4.97	0.9978
SL	1.38×10^{-2}	3.67	0.9877
FDN	16.06×10^{-2}	2.22	0.9981

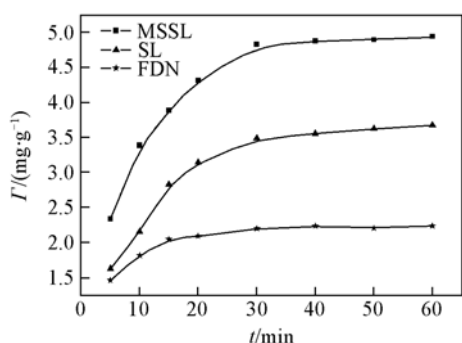


Fig. 4 Adsorption dynamics isotherms of dispersants on Datong coal surface at 25 °C

数都大于 0.90, 具有较高的相关度. 从拟合参数结果可见, FDN 在大同煤表面的吸附速率常数 k_a 为 12.99×10^{-2} , 比 MSSL (9.27×10^{-2}) 和 SL (8.73×10^{-2}) 的大, 这说明 FDN 在煤表面达到吸附平衡的时间较短, 吸附速率快.

2.4 分散剂在大同煤表面吸附膜厚度的测定

实验采用 X 光电子能谱法测定吸附 MSSL 前后大同煤表面的 XPS 元素扫描图, 如图 5 所示. 由图 5 可见, 相对于空白煤样, 吸附了 MSSL 后的煤表面的 C 峰吸收强度明显减弱, O 峰吸收强度明显增强, Si 峰吸收强度也减弱. 这是由于 MSSL 分子中的 C 含量低于煤, O 含量高于煤, 所以吸附了 MSSL 之后煤表面层的 C 元素含量降低, O 元素含量增加. MSSL 分子中不含有 Si 元素, 但吸附了 MSSL 后煤表面的 Si 峰仍然存在, 这是由于分散剂层薄, 吸附层下的煤中矿物质中的 Si 原子被激发的缘故. SL 和 FDN 在煤表面吸附前后的 XPS 元素扫描谱图也具有类似的结果.

由于分散剂分子不含 Si 元素, 而煤中矿

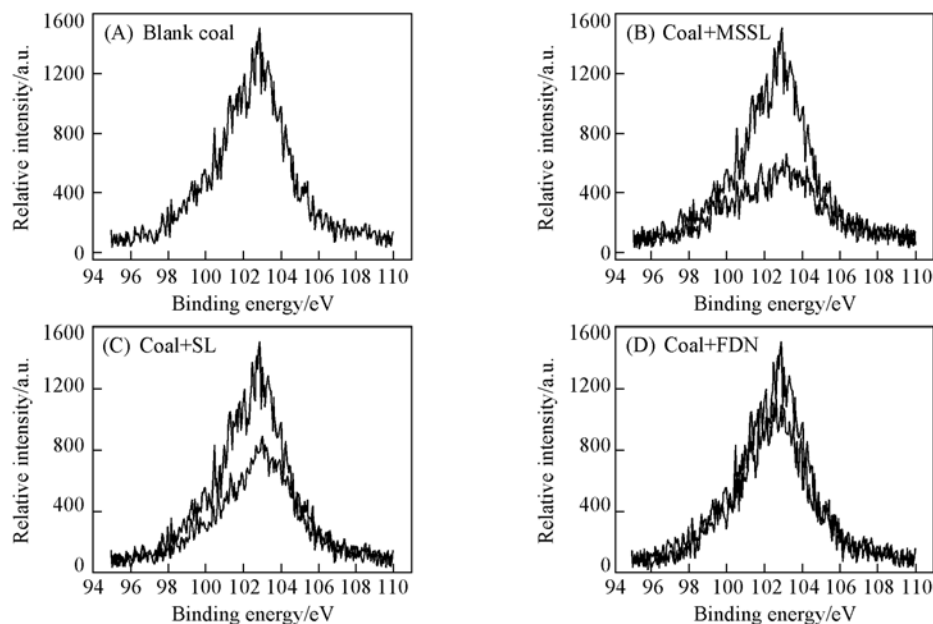


Fig. 6 Si_{2p} XPS scanning spectra of Datong coal with or without adsorbed MSSL, SL and FDN dispersants

高, 大约在 20 ~ 40 min 内基本达到吸附平衡. 根据 Langmuir 吸附速率方程^[10]:

$$\ln[\Gamma_{\infty}/(\Gamma_{\infty} - \Gamma)] = -\ln(1 - F) = k_a t \quad (3)$$

式中, Γ 为 t 时刻的吸附量 (mg/g); Γ_{∞} 为平衡时的饱和吸附量 (mg/g); F 为 Γ/Γ_{∞} ; k_a 为吸附速率常数; t 为吸附时间 (min).

以 $-\ln(1 - F)$ 对 t 作图得直线回归方程, 由直线斜率可求得吸附的速率常数值 k_a 及对应直线的相关系数, 如表 4 所示. 由表 4 可见, 3 种分散剂在大同煤表面的 Langmuir 吸附速率方程拟合相关系

Table 4 Parameters for Langmuir adsorption rate equation

Dispersant	k_a	R^2
MSSL	9.27×10^{-2}	0.9632
SL	8.73×10^{-2}	0.9920
FDN	12.99×10^{-2}	0.9144

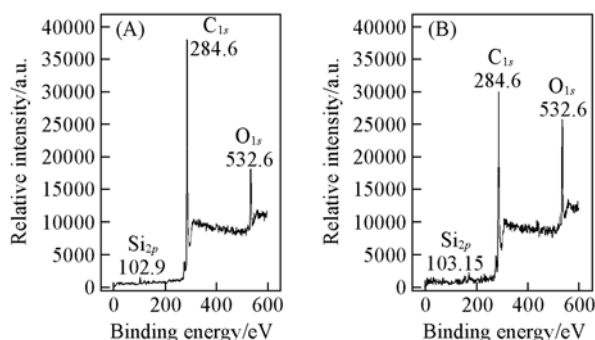


Fig. 5 XPS elemental scanning spectra of Datong coal (A) and with adsorbed MSSL (B)

物质含 Si 元素, 因此以 Si 作为特征元素, 通过测定 Si_{2p} 光电子能谱经过分散剂吸附层后强度的衰减程度, 可近似计算出分散剂吸附层的厚度^[11]. 实验分别测定了未吸附分散剂的大同煤及吸附了 MSSL, SL 和 FDN 后的大同煤表面的 Si_{2p} XPS 谱图(图 6). 由图 6 可知, 与未吸附分散剂的大同煤相比, Si_{2p} 光电子通过吸附了分散剂 MSSL, SL 和 FDN 的大同煤表面吸附层后, 强度明显降低. 通过对吸附 MSSL 前后的峰面积进行积分, 可计算出通过吸附层后的光电子能谱强度和起始光电子能谱强度的比值, 根据文献[12]的方法可计算出 MSSL, SL 和 FDN 在煤表面的吸附层厚度(表 5). 由表 5 可见, MSSL 和 SL 在大同煤表面的吸附膜厚度分别为 7.22, 4.61 nm, 大于 FDN 在煤表面的吸附层厚度 2.11 nm.

由表 2 及以上分析结果可知, MSSL 和 SL 的分子质量较大, 分子呈球形结构, 并且主要以氢键与煤表面吸附, 因此吸附层较疏松, 吸附膜较厚; FDN 分子为链状结构, 主要以 π 电子极化吸附形式在煤表面吸附, 吸附层致密, 吸附量较小, 因此吸附层厚度较小.

2.5 分散剂在煤表面的吸附模型图

前面对三种分散剂 SL, MSSL 和 FDN 在大同煤表面的吸附量和吸附动力学进行了研究, 发现木质素类分散剂 SL 和 MSSL 在煤表面的饱和和吸附量远大于萘系分散剂 FDN, 然而 SL 和 MSSL 在大同煤表面的 Langmuir 平衡常数 K 和吸附速率常数 k_a 都小于 FDN. 这表明, SL 和 MSSL 在煤表面的吸附量虽然大于 FDN, 但是在煤表面的吸附能力略低于 FDN, 吸附速率较慢.

吸附了 SL, MSSL 和 FDN 前后大同煤表面的 IR 谱图的红移现象表明氢键力是分散剂在煤表面吸附的重要作用力, 特别是对于木质素类分散剂 SL 和 MSSL, 氢键力作用更明显. 由图 1 可以看出, 木质素分子为球形结构, 并且疏水基团和亲水基团呈立体间隔分布, 整个分子中并没有明显的疏水、亲水基团分布集中区. 因此其分子中的亲水官能团对其在煤表面疏水区的吸附具有一定阻碍作用, 而主要以氢键作用、离子对吸附等形式在煤表面呈多点式吸附, 吸附层较疏松. FDN 分子为链状结构, 分子中含有大量的萘环结构, 在煤表面除了以少量的离子对吸附形式外, 主要以 π 电子极化吸附形式在煤表面呈卧式吸附, 因此吸附强度较大, 吸附牢固, 吸附层致密. 从表 5 分散剂吸附膜厚度的数据也可以看出, SL 和 MSSL 在煤表面的吸附膜厚度较大, 而 FDN 的吸附膜厚度较小, 这与分散剂在煤表面的吸附形态有关.

根据 3 种分散剂的分子结构特征以及在煤表面的吸附特征, 推测了 SL, MSSL 和 FDN 在煤表面的吸附模型(图 7). 由图 7(A)可见, SL 分子为球形结构, 分子中呈立体间隔分布的亲水基团对其憎水部位在煤表面的吸附具有空间阻碍作用, 因此在煤表面的吸附主要为氢键作用吸附和离子对作用吸附. 由图 7(B)可见, MSSL 为木质素的接枝共聚物, 分子由几个球形木质素分子连接而成, 并含有侧链结构, 分子中的亲水基团对其憎水部位在煤表面吸附的空间位阻作用较大, 因此煤表面的吸附也主要是氢键作用吸附和离子对作用吸附. 由图 7(C)可见, FDN 分子为链状结构, 亲水基团以带负电荷的磺酸基为主, FDN 分子中的憎水萘环与煤表面的 π 电子极化吸附作用力较强, 因此可以紧密地吸附在煤表面, 或者呈多点形式在煤表面吸附, 并

Table 5 Adsorbed layer thickness of dispersants on Datong coal surface

Dispersant	Adsorbed layer thickness/nm
MSSL	7.22
SL	4.61
FDN	2.11

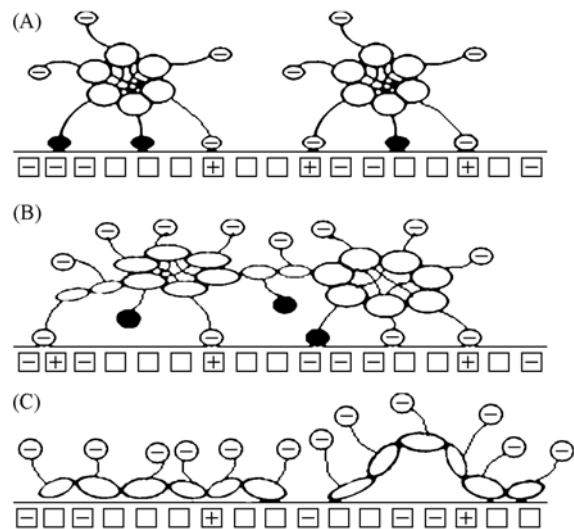


Fig. 7 Adsorption models of three dispersants on coal surface

(A) SL; (B) MSSL; (C) FDN. ⊕: Positive charged zone of coal surface; ⊖: negative charged zone of coal surface; □: non-polar zone of coal surface; ⊖: negative charge in dispersant molecule; ●: polar and uncharged group (—OH) in dispersant molecule; ⊕: non-polar network configuration in lignin molecule; ∞: hydrophobic naphthalene ring in FDN molecule.

且由于分子链的扭转作用, 其亲水的磺酸基朝向水溶液.

参 考 文 献

- [1] QIU Xue-Qing(邱学青), ZHOU Ming-Song(周明松), WANG Wei-Xing(王卫星), *et al.*. J. Fuel Chem. Technol. (燃料化学学报) [J], 2005, **33**(2): 179—183
- [2] WU Guo-Guang(吴国光), WANG Xiao-Chun(王晓春), LIU Jiong-Tian(刘炯天). J. China Univ. Min. Technol. (中国矿业大学学报) [J], 2005, **34**(6): 703—707
- [3] Dincer H., Boylu F., Sirkeci A. A., *et al.*. Int. J. Miner. Process [J], 2003, **70**(1—4): 41—51
- [4] YANG Dong-Jie(杨东杰), QIU Xue-Qing(邱学青), CHEN Huan-Qin(陈焕钦). Chemistry(化学通报) [J], 2001, (7): 416—420
- [5] QIU Xue-Qing(邱学青), ZHOU Ming-Song(周明松), YANG Dong-Jie(杨东杰), *et al.*. China Pulp. Pap. (中国造纸) [J], 2007, **26**(2): 31—34
- [6] ZHOU Ming-Song(周明松), YANG Dong-Jie(杨东杰), QIU Xue-Qing(邱学青). J. Chem. Eng. Chin. Universities(高校化学工程学报) [J], 2007, **21**(3): 386—391
- [7] LIUFU Sheng-Cong(刘付胜聪), XIAO Han-Ning(肖汉宁), LI Yu-Ping(李玉平). Chem. J. Chinese Universities(高等学校化学学报) [J], 2005, **26**(4): 742—746
- [8] Nishida K., Shibata M., Kanaya T., *et al.*. Polym. [J], 2001, **42**(4): 1501—1505
- [9] ZOU Li-Zhuang(邹立壮), ZHU Shu-Quan(朱书全), WANG Xiao-Ling(王晓玲), *et al.*. J. Fuel Chem. Technol. (燃料化学学报) [J], 2006, **34**(1): 10—14
- [10] REN Guang-Jun(任广军), ZHAI Yu-Chun(翟玉春), SONG En-Jun(宋恩军), *et al.*. J. Chem. Ind. Eng. (China) (化工学报) [J], 2004, **55**(11): 1833—1836
- [11] FU Xiao-Guo(伏晓国), LIU Ke-Zhao(刘柯钊), WANG Xiao-Lin(汪小琳), *et al.*. Acta Metallurgica Sinica(金属学报) [J], 2001, **37**(6): 575—578
- [12] WU Gang(吴刚). Structure Characterization and Application of Material(材料结构表征与应用) [M], Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 356—357

Adsorption Property of Lignin and Naphthalene Dispersants on Coal-water Interface

ZHOU Ming-Song^{1,2}, QIU Xue-Qing^{1,2*}, YANG Dong-Jie^{1,2}

(1. School of Chemical and Energy Engineering, 2. Guangdong Provincial Laboratory of Green Chemical Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract The adsorption amount and kinetics of two lignin series dispersants (SL and MSSL) and one naphthalene dispersant (FDN) on Datong coal surface were studied, the results show that the adsorbed amounts of SL and MSSL on coal surface were far more than that of FDN. However, the fitted parameters of Langmuir equilibrium constant K and adsorption rate constant k_a of SL and MSSL were less than that of FDN, which indicat that the adsorption ability of SL and MSSL on coal surface was inferior to that of FDN, and the adsorption rate of SL and MSSL on coal surface was lower than that of FDN. The adsorption layer of dispersant on coal surface was studied by using IR and XPS methods, and the results show that the coal with adsorbed SL and MSSL have evident “red shift” phenomenon. Moreover, the adsorbed layer thickness of SL and MSSL on coal surface was 7.22 and 4.61 nm respectively, however, that of FDN was thinner, only 2.11 nm. It is generalized that the hydrogen bond is the main adsorption force of SL and MSSL on coal surface, the adsorbed amount is rather large, the adsorbed layer is rather thick, and the multi-point adsorption on coal surface is the main form. The main form of FDN adsorbed on coal surface is horizontal adsorption by π -electron polarized adsorption, and the adsorbed strength is rather large, but the adsorbed layer is rather thin.

Keywords Dispersant; Adsorption; Red shift; Adsorbed layer thickness; Adsorption model

(Ed.: V, I)