# 分散剂对兰炭浆成浆性能的影响及其吸附动力学

姚雅倩1,杨志远1,2,孟茁越1,李银艳1,朱翰博1

(1.西安科技大学化学与化工学院,陕西西安 710054;2.国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室,陕西西安 710021)

摘 要:为解决我国兰炭资源浪费的问题,采用兰炭粉代替原煤制备兰炭浆,不仅可缓解石油需求压力,还为兰炭粉利用提供了一条新途径。利用神府兰炭粉及5种不同分散剂(亚甲基双萘磺酸钠NNO、木质素磺酸钠SLS、腐植酸钠SH、聚羧酸盐PCE、复配型阴离子-阴离子NNO/PCE)为原料,研究了由兰炭粉制的兰炭浆对阴离子分散剂的性能、吸附机理及吸附动力学的影响。研究了每种分散剂制备兰炭浆的流变行为,添加不同分散剂的兰炭浆都表现出假塑性流体特征;加入NNO/PCE分散剂制备的兰炭浆,剪切速率100 s<sup>-1</sup>时的表观黏度仅为359.3 mPa·s,且析水率小无硬沉淀,使用NNO为分散剂时虽流动性好,但稳定性差且析水率最大。对添加不同分散剂的兰炭粉进行红外光谱测试,发现添加分散剂可以改变兰炭粉表面的亲疏水性。吸附试验结果显示,NNO、SLS、SH、PCE、NNO/PCE分别在60、60、120、240和240 min 达到吸附平衡;吸附量排序为NNO/PCE(8.796 mg/g)>PCE (7.977 mg/g)>SH(6.845 mg/g)>SLS(3.718 mg/g)>NNO(1.029 mg/g);准二级速率方程能够较好描述分散剂在兰炭表面的吸附动力学过程。最后提出了阴离子分散剂的吸附机理模型,结果表明,阴离子分散剂在兰炭浆中的吸附作用主要归因于兰炭颗粒中静电斥力的增强。

关键词:兰炭浆;分散剂;流变性;稳定性;吸附动力学;吸附机理

中图分类号:X703;TQ536 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2022)06-0192-07

# Effect of dispersant on the slurry ability of semi-coke water slurry and its adsorption kinetics

YAO Yaqian<sup>1</sup>, YANG Zhiyuan<sup>1,2</sup>, MEMG Zhuoyue<sup>1</sup>, LI Yinyan<sup>1</sup>, ZHU Hanbo<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization of Land and Resources, Xi'an 710021, China)

**Abstract**: In order to solve the problem of the waste of semi-coke resources in China, the preparation of semi-coke water slurry with semi-coke powder instead of raw coal can not only alleviate the pressure of oil demand, but also provide a new way for the utilization of semi-coke powder. In this paper, the properties, adsorption mechanism and adsorption kinetics of anionic dispersants were studied by using Shenfu semi-coke powder and five different dispersants (methylene dinaphthalene sulfonate NNO, sodium lignosulfonate SLS, sodium humate SH, polycarboxylate PCE, complex anion-anion NNO/PCE). The rheological behavior of semi-coke water slurry prepared with each dispersant was studied. The semi-coke water slurry with different dispersants shows pseudoplastic fluid characteristics. When NNO/PCE dispersant is added, the apparent viscosity of the slurry is only 359.3 mPa  $\cdot$  s at the shear rate of 100 s<sup>-1</sup>, and the water separation rate is small without hard precipitation. When NNO is used as dispersant, the fluidity is good, but the stability is poor and the water separation rate is the largest. Through the infrared spectrum test of the semi-coke particle with different dispersants, it is found that the addition of dispersants could change the hydrophilicity and hydrophobicity of the semi-coke particle surface. The adsorption test results show that NNO, SLS, SH, PCE and NNO/PCE reach the adsorption equilibrium at 60,60,120,240 and 240 min, respectively. The in-

收稿日期:2021-06-30;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.21063004

**作者简介:**姚雅倩(1995—),女,山西运城人,硕士研究生。E-mail:2468379309@qq.com

通讯作者:杨志远(1968—),男,江西抚州人,教授,博士生导师,博士。E-mail:zhiyuanyang@126.com

引用格式:姚雅倩,杨志远,孟茁越,等.分散剂对兰炭浆成浆性能的影响及其吸附动力学[J].洁净煤技术,2022,28(6): 192-198.

YAO Yaqian, YANG Zhiyuan, MEMG Zhuoyue, et al. Effect of dispersant on the slurry ability of semi-coke water slurry and its adsorption kinetics [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6): 192-198.



基金项目:国家自然科学基金资助项目(41772166);西安市科技局科技计划资助项目(201805036YD14CG20(6));陕西省重点研发计划资助项目 (2017ZDCXL-GY-10-01-02);国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室重大专项资助项目(SMDZ-2019ZD-2)

creasing trend of adsorption capacity is NNO/PCE (8.796 mg/g) >PCE(7.977 mg/g) >SH(6.845 mg/g) >SLS(3.718 mg/g) >NNO (1.029 mg/g). The pseudo – second – order rate equation can well describe the adsorption kinetics of dispersant on the surface of semi–coke. Finally, the adsorption mechanism model of anionic dispersants was proposed. The results show that the adsorption of anionic dispersants in semi–coke water slurry is mainly due to the enhancement of electrostatic repulsion in semi–coke particles.

Key words: semi-coke water slurry; dispersant; rheology; stability; adsorption kinetics; adsorption mechanism

# 0 引 言

兰炭是由高挥发性烟煤在低压、中低温环境下 干馏得到的新型炭素材料<sup>[1]</sup>,具有固定碳高、比电 阻高、化学活性高、灰分低、铝低、硫低、磷低的"三高 四低"的特性。由于其 CO<sub>2</sub>、PM<sub>25</sub>和其他污染物的平均 排放量远低于原煤,被认为是一种清洁能源<sup>[2]</sup>。我国 兰炭资源丰富,粒径在 6 mm 以下的兰炭粉,由于粒度 过小,大多被废弃在河道中或作为廉价燃料直接销售, 不仅导致资源浪费、经济效益下降,还造成严重的环境 污染<sup>[3]</sup>。水煤浆技术作为一种重要的洁净煤技术,由 煤、水和化学添加剂配比而成<sup>[4]</sup>。为防止污染,提高经 济效益,考虑到我国兰炭产量大、价格低,采用兰炭粉 代替原煤制备兰炭浆。用兰炭浆代替油制备新型清洁 高效的煤浆,不仅可缓解石油需求压力,而且为兰炭粉 的利用提供了一条新途径<sup>[5]</sup>。

研究表明,分散剂可改变煤表面的性质并增强 颗粒的分散性,有利于制备高浓度水煤浆<sup>[6-9]</sup>。因 此,必须添加分散剂使煤颗粒均匀分散,从而获得合 格的水煤浆<sup>[10-11]</sup>。为获得理想的水煤浆,许多分散 剂(非离子型、阳离子型和阴离子型)被用来改善煤 颗粒的浆液浓度。从成本和分散效果来看,阴离子 分散剂是工业上常用添加剂<sup>[12-14]</sup>。WANG等<sup>[15]</sup>研 究了长焰煤经中低温热解后的兰炭制备水煤浆以及 添加木质素磺酸钠(SLS)对兰炭的饱和吸附能力, 发现兰炭对分散剂的吸附能力增强可以显著降低水 煤浆的表观黏度并增加其成浆浓度。ZHU等<sup>[10]</sup>合 成了一种新型嵌段聚羧酸盐分散剂(PCDs)用于制备 水煤浆,结果表明新型嵌段聚羧酸盐分散剂的吸附行 为有助于改善其分散性能。WANG等<sup>[16]</sup>利用焦化废 水代替清水制备焦化废水煤浆,研究了分散剂在煤表 面的吸附动力学,结果表明焦化废水中有机和无机组 分增加了分散剂在煤表面的吸附。TU等<sup>[17]</sup>研究了 NH<sub>4</sub>-N 在褐煤表面的静态吸附特性及其对阴离子分 散剂吸附和水煤浆性能的影响机理,结果表明萘磺酸 钠-甲醛缩合物(NSF)对水煤浆的吸附增强,水煤浆 的表观黏度增大,稳定性提高。煤表面亲水改性,颗 粒与水之间的界面张力降低,位阻效应和分散剂的静 电力是提高煤浆浓度的可能因素<sup>[17-20]</sup>。

为揭示阴离子分散剂在兰炭浆中兰炭颗粒上的 分散机理,利用 5 种不同分散剂(NNO、SLS、SH、 PCE 和 NNO/PCE)制备兰炭浆。利用紫外可见分 光光度计测量不同分散剂对兰炭颗粒的饱和吸附 量,并进行吸附动力学研究;利用红外光谱仪分析分 散剂吸附对兰炭颗粒的湿润改性;利用机理模型说 明分散剂对兰炭颗粒的作用机理。

# 1 试 验

#### 1.1 试验原料与仪器

选取陕北神府兰炭粉为试验原料。兰炭样品的 工业分析和元素分析见表 1。根据德士古气化工艺 粒度级配,通过压碎、混合、研磨和筛分过程将兰炭分 为 5 个不同粒度等级<830~380、<380<~120、<120~ 74、<74~45 和<45 µm(>20~40、>40~120、>120~ 200、>200~325、>325 目))。分散剂选用亚甲基双萘 磺酸钠 NNO、木质素磺酸钠 SLS、腐植酸钠 SH、聚羧 酸盐 PCE、复配型阴离子---阴离子 NNO/PCE。

试验仪器主要有棒磨机、电动搅拌器、水煤浆旋 转黏度计、傅立叶变换红外光谱仪、冷冻离心机、紫 外可见分光光度计。

表1 兰炭的工业分析和元素分析

Table 1	Proximate and	l ultimate	analysis o	of semi–coke
---------	---------------	------------	------------	--------------

工业分析/%				元素分析/%				
M <sub>ad</sub>	$A_{\rm ad}$	$V_{ m daf}$	$FC_{\rm ad}$	C <sub>ad</sub>	$H_{ad}$	${ m O}_{ m ad}^{\ *}$	$\mathbf{N}_{\mathrm{ad}}$	$S_{t,ad}$
7.30	8.65	13.11	73.03	68.53	1.23	12.93	1.07	0.29

注:\*表示差减法。

#### 1.2 兰炭浆的制备及性能测试

采用干法制浆,将不同粒径的兰炭粉进行粒度 级配,加入定量蒸馏水与分散剂(质量分数 0.8%), 以1 000 r/min 搅拌 20 min,确保粒度级的兰炭粉混 合均匀。

采用 NXS-4C 型水煤浆黏度仪测定兰炭浆的

表观黏度。将适量兰炭浆倒入测量筒中,设定黏度 仪的剪切速率为 100 s<sup>-1</sup>,测试温度为 20 ℃。采用 Herschel-Bulkley 模型来描述兰炭浆的流变特性。 其公式为

$$\tau = \tau_0 + K \gamma^n, \qquad (1)$$

式中,*n*为流变系数,代表兰炭浆偏离牛顿流体的程度;*K*为稠度系数,Pa・s<sup>*n*</sup>; $\tau$ 为剪切应力,Pa; $\gamma$ 为剪切速率,s<sup>-1</sup>; $\tau_0$ 为屈服应力,Pa。

兰炭浆的流动性采用目测法,分为A(线性流动)、B(稠状液体)、C(黏稠状液体)、D(不成浆)4 个级别。

静态稳定性采用析水率法。析水率法是根据上 层清水与总浆体样品的质量比进行评估。将测完黏 度的兰炭浆倒入 200 mL 烧杯中,用保鲜膜密封。测 量 7 d 后浆体的析水率。析水率 T 的计算如下:

$$T = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\%_{\,\circ} \tag{2}$$

其中,m<sub>0</sub>为烧杯质量,g;m<sub>1</sub>为倒入搅拌均匀的 兰炭浆烧杯质量,g;m<sub>2</sub>为滴管吸出水后烧杯质 量,g。通常,较低的析水率表明兰炭浆具有更好的 静态稳定性<sup>[21]</sup>。

#### 1.3 吸附性能测试

1.3.1 分散剂浓度标准曲线确定

用紫外可见分光光度计扫描获得 NNO、 SLS、SH、PCE 和 NNO/PCE 五类分散剂的吸收光谱 图,得到最大吸收波长 λ<sub>max</sub>,即 NNO、SLS、SH、PCE 和 NNO/PCE 五类分散剂溶液在 226.5、213.5、 223.0、193.0、227.0 nm 处有最大吸收峰。

1.3.2 红外光谱分析

将添加不同分散剂的兰炭粉在 30 ℃下干燥。 将干燥的样品与干燥后的溴化钾(KBr)按质量比 1:150 混合,将混合物压片。采用傅里叶变换红外 光谱仪测出其光谱图。

1.3.3 分散剂在兰炭表面的吸附试验

分散剂质量浓度为 200 mg/L,准确称量 1 g 兰 炭粉和 50 mL 分散剂溶液,于 100 mL 锥形瓶中混 合,利用玻璃棒初步搅拌,并置于恒温水浴振荡器 中,设定水浴温度为 25 ℃、振荡速率为 150 r/min, 分别振荡 1、2、5、8、10、20、30、60、120、240、300、 360 min,然后将悬浮液样品静置 30 min,将适当体 积的上层液体转移到离心管中,用高速离心机以 8 000 r/min 离心 10 min,离心 2 次,分离出上层清 液。计算各吸附量,对比不同时间的吸附量。依据 拟合所得的吸光度-浓度的标准溶液吸附关系曲线 方程,由 Lambert-Beer 定律计算得出兰炭颗粒对 5 194 类分散剂的吸附量。

$$\Gamma = \frac{V(c_0 - c_1)}{m},\tag{3}$$

式中, *Γ* 为单位质量的干基兰炭粉对分散剂的吸附 量, mg/g; c<sub>0</sub> 为原始溶液中分散剂的质量浓度, mg/L; c<sub>1</sub>为经兰炭粉吸附后溶液中分散剂的质量浓 度, mg/L; *V* 为添加剂溶液的体积, 取 0.05 L; *m* 为用 于吸附分散剂的干基兰炭粉质量, 取 1 g。

1.3.4 吸附动力学研究

基于不同吸附时间下分散剂在兰炭表面的吸附 过程,分别使用2种类型的吸附动力学模型进行分 析,即 LAGERGREN<sup>[22]</sup>提出的准一级动力学模型, HO 等<sup>[23]</sup>提出的准二级动力学模型。

1) 准一级动力学方程, 其模型公式如下:

$$\ln(q_{e} - q_{t}) = \ln q_{e} - k_{1}t, \qquad (4)$$

式中, $q_e$ 为单位质量的干基兰炭粉对分散剂的平衡 吸附量, $mg/g;q_t$ 为单位质量的干基兰炭粉 t 时刻分 散剂吸附量, $mg/g;k_1$ 为一级附速率常数, $min^{-1}$ 。

2) 准二级动力学方程, 其模型公式如下:

$$\frac{t}{q_{t}} = \frac{1}{k_{2}q_{e}^{2}} + \frac{t}{q_{e}},$$
(5)

式中, $k_2$ 为二级吸附速率常数,g/(mg・min)。

# 2 试验结果与讨论

#### 2.1 分散剂对兰炭浆流变性能的影响

兰炭粉制备的兰炭浆是由 65% 兰炭粉,0.8% (兰炭粉干基质量分数)分散剂和 34.48% 蒸馏水组 成。目测观察可知兰炭浆流动性等级为 A。

兰炭浆的储存、运输和雾化等应用特性对浆体的流变性影响较大。除了低黏度、高兰炭粉含量和良好的稳定性外,高质量兰炭浆还应显示出良好的流变模型。兰炭浆的表观黏度和剪切速率之间的关系如图1(a)所示,兰炭浆的表观黏度随剪切速率的增加而降低,表现出"剪切变稀"的假塑性流体行为。NNO和NNO/PCE分散剂对兰炭浆的剪切变稀的作用不明显。此时,分散剂与兰炭颗粒结合后,在颗粒表面形成具有一定厚度的水化膜<sup>[24]</sup>,在静态下可形成复杂的三维网络结构,使浆液保持稳定。因此,剪切过程中黏度变化不大,这可能与 NNO 和 PCE 的分子结构有关。

图 1(b) 为用 Herschel-Bulkley 模型拟合兰炭浆的流变特性。兰炭浆流体特性的拟合结果见表 2,可知对于不同类型的兰炭浆,拟合参数变化规律相似,流变指数 *n* 及 稠度指数 *K* 有一定差异。Herschel-Bulkley 模型的拟合结果表明,所有样品的



图1 分散剂对兰炭浆流变性的影响

Fig.1 Effect of dispersant on rheology of semi-coke water slurry 流变指数 n 均小于 1,进一步证实了假塑性流体行 为<sup>[16,18]</sup>。添加分散剂的兰炭浆,稠度系数 K 减小, 流动性系数 n 增大,即稠度系数 K 变大浆体变稠, 黏度变大;流动特性指数 n 变大,浆体的流动性变 好<sup>[24]</sup>。在剪切速率为 100 s<sup>-1</sup>时,不同兰炭浆的表观 黏度由低到高的顺序为 NNO(182.3 mPa · s) < NNO/PCE(359.3 mPa · s) < 空白(494.3 mPa · s) <SH(537.2 mPa · s) < PCE(541.0 mPa · s) < SLS (564 mPa · s)。

表 2 不同分散剂兰炭浆流变模型的拟合参数

Table 2Fitting parameters of rheological model ofsemi-coke water slurry with different dispersants

公劫刘	主	Herschel-Bulkley 模型					
力 取 加 种 类	(mPa·s)	屈服应力/	稠度系数/	流变	<b>D</b> <sup>2</sup>		
	(111 4 5)	Ра	$(\operatorname{Pa} \cdot \operatorname{s}^n)$	指数 n	Λ		
空白	494.3	2.897 7	2.150 3	0.661 4	0.999 3		
NNO	182.3	0.371 4	0.532 6	0.784 8	0.999 4		
SLS	564.0	4.133 9	1.792 4	0.728 2	0.999 6		
SH	537.2	4.211 5	1.176 6	0.807 3	0.999 6		
PCE	541.0	3.762 3	1.862 4	0.710 1	0.999 9		
NNO/PCE	359.3	2.987 4	0.493 8	0.928 2	0.999 9		

注:表观黏度  $\eta_{100}$  为剪切速率为 100 s<sup>-1</sup>时的表观黏度,  $R^2$  为相 关系数。

#### 2.2 分散剂对兰炭浆稳定性的影响

不同分散剂对兰炭浆静置 7 d 后析水率的影响

如图 2 所示,添加 NNO、SLS 和 SH 分散剂的兰炭浆 析水率分别提高了 1.70%、2.72% 和 1.12%;添加 PCE 和 NNO/PCE 分散剂的兰炭浆的析水率分别下 降了 2.01% 和 1.42%。析水率变化为 SLS>NNO> SH>空白>NNO/PCE>PCE。结果表明,加入 PCE 和 NNO/PCE 分散剂可以提高浆料的稳定性。兰炭颗 粒表面可能与 2 种分散剂的疏水基团结合,从而在 兰炭颗粒之间提供丰富的空间位阻。综合考虑可以 得出添加 NNO/PCE 后制备的兰炭浆品质稍好。



图 2 分散剂对兰炭浆稳定性的影响

Fig.2 Effect of dispersant on the stability of semi-coke water slurry

#### 2.3 分散剂在兰炭粉表面的吸附性能

#### 2.3.1 红外光谱分析

对添加不同分散剂的兰炭粉进行红外光谱测试,结果如图 3 所示,兰炭在 3 450 cm<sup>-1</sup>处有一个宽峰,即含有羟基;1 620、1 430 cm<sup>-1</sup>处分别为羧酸根和甲基的伸缩振动峰;1 120 cm<sup>-1</sup>处为酰胺等含氧官能团的伸缩振动峰。对比添加不同分散剂的兰炭粉红外光谱图发现,添加 NNO、SLS、SH 后的兰炭粉在1 120 cm<sup>-1</sup>处的峰强度明显加强,1 620 cm<sup>-1</sup>处的羧酸根和 3 450 cm<sup>-1</sup>处的羟基峰强度略增强(SH 效果最明显),即含氧官能团增多,意味着兰炭粉表面亲水性的增强。兰炭粉表面的含氧官能团数少,为分散剂吸附提供了更有效的吸附点,所以添加分散剂



图 3 加入不同分散剂的兰炭红外光谱

Fig.3 Infrared spectra of semi-coke with different dispersants 195

可以改变兰炭粉表面的亲疏水性。

2.3.2 分散剂在兰炭表面吸附动力学

鉴于兰炭粉具有良好的表面性质和孔结构,研 究了其对不同分散剂的吸附性能,以获得高浓度兰 炭浆。图4显示了分散剂质量浓度为200 mg/L时, 在不同吸附时间下,分散剂在兰炭上的吸附情况。 随吸附时间的增加,分散剂的吸附容量以相似的速 率逐渐增加。NNO、SLS、SH、PCE、NNO/PCE 分别 在 60、60、120、240 和 240 min 到吸附平衡。结果表 明,不同分散剂对兰炭表面的吸附平衡时间有影响。 兰炭粉的空隙结构对分散剂分子的吸附有重要作 用。兰炭粉空隙引起的空间位阻效应可能影响分散 剂分子的吸附和扩散比<sup>[25]</sup>。在 200 mg/L 时达到吸 附平衡,NNO、SLS、SH、PCE、NNO/PCE 的饱和吸附 量分别为 1.029、3.718、6.845、7.977、8.796 mg/g;吸 附量的增加趋势为: NNO/PCE > PCE > SH > SLS > NNO。



图 4 分散剂在兰炭表面的吸附过程

Fig.4 Adsorption process of dispersant on semi-coke surface

分散剂在兰炭粉表面的吸附动力学数据分别采 用准一级速率方程和准二级速率方程模型进行拟 合。分散剂在兰炭表面的吸附动力学模拟如图 5 所 示,不同分散剂在兰炭表面的吸附动力学模拟参数



图 5 分散剂在兰炭表面的吸附动力学模拟 Fig.5 Adsorption kinetics simulation of dispersants on semi-coke surface

见表3。由图5和表3可知,兰炭粉对不同分散剂 的准一级吸附动力学的吸附速率k<sub>1</sub>和准二级吸附 动力学的吸附速率k<sub>2</sub>影响不同,对吸附速率的影响 趋势与对q<sub>e</sub>的影响趋势不一致。加入分散剂后准 一级速率方程的拟合效果较差,相关系数低于0.98, 且拟合得到分散剂的平衡吸附量与实际测量值相差 较大。准二级速率方程能较好描述分散剂在兰炭颗 粒表面的吸附动力学过程,拟合平衡吸附量与测量 值相近,且相关系数均大于0.99,能较真实反应添加 剂在兰炭粉表面的动态吸附过程。

		表3 ス	不同分散剂	在兰炭表面	的吸附动力	学模拟参数		
Table 3	Adsorption I	cinetics	simulation	parameters	of different	dispersants	on semi-coke	surface

添加剂种类 (1			准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	$q_{\rm e,exp}/$ - (mg · g <sup>-1</sup> )	$k_1$ / $min^{-1}$	$q_{ m e, cal}/$ ( mg $\cdot$ g <sup>-1</sup> )	$R^2$	$\frac{k_2}{(g \cdot (mg \cdot min)^{-1})}$	$q_{ m e,cal}/$ (mg · g <sup>-1</sup> )	$R^2$	
NNO	1.029	0.020 50	1.021	0.973	2.104	1.027	1.000	
SLS	3.718	0.005 45	3.699	0.676	1.913	3.716	1.000	
SH	6.845	0.007 88	6.624	0.960	0.760	6.789	0.999	
PCE	7.977	0.023 40	7.949	0.909	0	7.968	1.000	
NNO/PCE	8.796	0.037 20	8.795	0.896	0	8.795	1.000	

注:exp为试验测定值;cal为模拟计算值。

#### 3 吸附机理

阴离子分散剂在兰炭颗粒表面的吸附机理如图 6 所示。分散剂在兰炭表面吸附的驱动力主要来源 于兰炭表面与分散剂中疏水基团之间的疏水相互作 用<sup>[7]</sup>,分散剂主链上疏水基团结合在兰炭表面,对 提高阴离子分散剂与兰炭之间的吸附力起锚定作 用;分散剂中支链的亲水基团从兰炭表面伸展到蒸 馏水中<sup>[26]</sup>,由此判断得出,吸附分散剂可改变兰炭 表面的疏水性,调节兰炭颗粒间的静电斥力。由上 述吸附试验可知,阴离子分散剂对兰炭浆浓度的提 高主要是由于兰炭颗粒间静电排斥作用的增强,而 不是疏水性或空间位阻的改变。当含负电荷基团的 阴离子分散剂吸附在兰炭表面时,排斥作用使兰炭 颗粒间产生更大的静电作用力,有效防止粒子间聚 集。PCE和NNO/PCE分散剂可提供较大的空间位 阻,从而使兰炭浆具有良好分散性,改善了兰炭浆的 分散稳定性。分散剂吸附量证明,PCE和NNO/ PCE分散剂吸附量较高,因此单位面积附分散剂更 多,以增强兰炭浆体系的分散性,显示出最佳的降黏 效果和分散稳定性。PCE和NNO/PCE分散剂很容 易进入兰炭粉表面,大大增加吸附量。





# 4 结 论

1)加入 NNO/PCE 分散剂制备的兰炭浆,剪切 速率 100 s<sup>-1</sup>时的表观黏度仅为 359.3 mPa · s,且析 水率小、无硬沉淀,使用 NNO 为分散剂时虽流动性 很好,但稳定性差且析水率最大。

2)添加分散剂可以改变兰炭粉表面的亲疏水 性。与兰炭粉原样相比,添加 SH 的兰炭粉的含氧 官能团增多,表面亲水性增强。

3)吸附试验结果显示,兰炭粉对 NNO/PCE 平 衡吸附量最大,即 8.796 mg/g;对 PCE 的平衡吸附 量次之,即 7.977 mg/g。NNO 在兰炭粉上的吸附速 率最大,但平衡吸附量最小,即 1.029 mg/g。准二级 速率方程能较好描述分散剂在兰炭粉表面的吸附动 力学过程。

#### 参考文献(References):

[1] 王维兴.使用兰炭促进节能减排降低炼铁成本[C]//2012年
 全国炼铁生产技术会议暨炼铁学术年会文集(上).无锡:[s.
 n.],2012.

- [2] LI Qing, LI Xinghua, JIANG Jingkun, et al. Semi-coke briquettes: Towards reducing emissions of primary PM<sub>2.5</sub>, particulate carbon, and carbon monoxide from household coal combustion in China [J]. Scientific Reports, 2016, 6:19306.
- [3] YANG Zhiyuan, MENG Zhuoyue, LI Zhihua, et al. Synthesis and application of itaconic acid water-coke slurry dispersant [J]. Materials Science Forum, 2017, 896:167-174.
- [4] 谢欣馨,戴爱军,杜彦学,等.水煤浆分散剂的发展动向[J].煤炭加工与综合用,2010(2):43-46.
   XIE Xinxin, DAI Aijun, DU Yanxue, et al. Development trend of coal water slurry dispersant[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization,2010(2):43-46.
- [5] 孟茁越,杨志远,鞠晓茜,等. 分散剂对水焦浆成浆性影响的量 子化学研究[J]. 燃料化学学报,2019,47(9):1025-1031. MENG Zhuoyue, YANG Zhiyuan, JU Xiaoqian, et al. Study on effect of dispersant on semi-coke water slurry property based on quantum chemistry calculation [J]. Journal of Fuel Chemistry Technology,2019,47(9):1025-1031.
- [6] XU Renfu,ZHUANG Wei,HE Qihui,et al. Effects of chemical structure on the properties of carboxylate – type copolymer dispersant for coal – water slurry [J]. Aiche Journal, 2010, 55 (9): 2461 – 2467.
- [7] JING Huang, JUN Xu, WANG Dong, et al. Effects of amphiphil-

ic copolymer dispersants on rheology and stability of coal water slurry[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52 (25):8427-8435.

- [8] MA Sude, ZHAO Pei, GUO Yan, et al. Synthesis, characterization and application of polycarboxylate additive for coal water slurry [J]. Fuel, 2013, 111:648-652.
- [9] AKTAS Zeki, TEDWOODBURNB E. Effect of addition of surface active agent on the viscosity of a high concentration slurry of a low-rank British coal in water[J]. Fuel Processing Technology, 2000,62:1-15.
- [10] ZHU Junfeng, GAO Weichun, WANG Pei, et al. Dispersion performances and adsorption behavior of novel block polycarboxylate with hybrid side chains in coal – water slurry [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 594(5):124644.
- YANG Dongjie, QIU Xueqing, ZHOU Mingsong, et al. Properties of sodium lignosulfonate as dispersant of coal water slurry [J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(9):2433-2438.
- [12] ATESOK G, DINCER H, OZER M, et al. The effects of dispersants (PSS-NSF) used in coal-water slurries on the grindability of coals of different structures [J]. Fuel, 2005, 84 (7/8): 801-808.
- [13] QIU Xueqing, ZHOU Mingsong, YANG Dongjie, et al. Evaluation of sulphonated acetone-formaldehyde (SAF) used in coal water slurries prepared from different coals [J]. Fuel, 2007, 86 (10/ 11):1439-1445.
- [14] HU Shunxuan, LIU Liming, YANG Xin, et al. Influence of different dispersants on rheological behaviors of coal water slurry prepared from a low quality coal [J]. RSC Advances, 2019, 9: 32911-32921.
- [15] WANG Jincao, WEI Liguo, WU Peng, et al. Preparation of semicokes by medium-low temperature pyrolysis of long flame coal and their adsorption performance on sodium lignin sulfonate dispersant for high concentration coal water slurry [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2020, 42(11):1-13.
- [16] WANG Ruikun, MA Qianqian, ZHAO Zhen, et al. Adsorption of surfactants on coal surfaces in the coking wastewater

environment: Kinetics and effects on the slurrying properties of coking wastewater-coal slurry [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(28): 12825-12834.

- [17] TU Yanan, FENG Ping, REN Yangguang, et al. Adsorption of ammonia nitrogen on lignite and its influence on coal water slurry preparation[J]. Fuel, 2019, 238:34-43.
- [18] LIU Pengfei, ZHU Mingming, ZHANG Zhezi, et al. Rheological behaviour and stability characteristics of biochar-water slurry fuels: Effect of biochar particle size and size distribution [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 156:27-32.
- PARK Ju-hyoung, LEE Young-joo, JIN Min-ho, et al. Enhancement of slurryability and heating value of coal water slurry (CWS) by torrefaction treatment of low rank coal (LRC) [J].
   Fuel Guildford, 2017, 203:607-617.
- [20] ZHANG Guanghua, LI Junguo, ZHU Junfeng, et al. Syntheses and evaluations of three sulfonated polycondensate dispersants for coal – water slurries [J]. Powder Technology, 2014, 254: 572–578.
- [21] ZHU Junfeng, WANG Pei, LI Yuanbo, et al. Dispersion performance and mechanism of polycarboxylates bearing side chains of moderate length in coal-water slurries [J]. Fuel, 2017, 190: 221-228.
- [22] LAGERGREN S. Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe[J]. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. Handlingar, 1898,24:1-39.
- [23] HO Y S, MCKAY G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. Process Biochemistry, 1999, 34(5):451-465.
- [24] 赵馨. HRP 引发淀粉接枝共聚物水煤浆分散剂的合成及其性能研究[D]. 西安:陕西科技大学,2017.
- [25] WANG Jincao, WEI Liguo, WU Peng, et al. Preparation of semicokes by medium-low temperature pyrolysis of long flame coal and their adsorption performance on sodium lignin sulfonate dispersant for high concentration coal water slurry [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2020, 42:1610-1622.
- [26] ZHANG Kang, JIN Li, CAO Qing. Evaluation of modified used engine oil acting as a dispersant for concentrated coal – water slurry[J]. Fuel, 2016, 175:202-209.