

# 掺加采油含聚废水对水煤浆制备及性能的影响

张昊<sup>1</sup>, 魏征<sup>1</sup>, 姜勇<sup>2</sup>, 解强<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 博天环境集团股份有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 聚合物驱油技术的发展和應用大大提高了油田原油的采出率, 同时产生大量含聚废水, 造成环境污染。用工业废水制备水煤浆是处理工业废水的有效途径之一, 但鲜见利用采油含聚废水制浆的相关研究。为了研究采油含聚废水对水煤浆制备及性能的影响, 以神木烟煤为原料、萘磺酸盐甲醛缩聚物为分散剂, 掺加含有阴离子型聚丙烯酰胺(HPAM)的采油含聚废水制备水煤浆。在研究确定分散剂用量及水煤浆浓度的基础上, 重点考察了含聚废水掺加量对制备水煤浆的流变性和稳定性的影响。结果表明, 利用含聚废水直接制备水煤浆, 成浆性能良好, 其表观黏度随分散剂用量的增加呈先减小后增大的规律, 且随成浆浓度的增大而增大, 分散剂用量为 0.8% 时最大制浆浓度可达 56.6%, 表观黏度为 1 183 mPa·s; 含聚废水的掺入影响了水煤浆的流变特性, 随着含聚废水掺入比例的增加, 水煤浆的流动性先变差后逐渐变好, 废水掺混比例为 20% 时, 水煤浆具有较低的表观黏度, 流动性良好且具有更明显的假塑性流体特征; 含聚废水的掺入对水煤浆的稳定性也有较大影响, 随着掺混比例的增大, 水煤浆的稳定性先增加后降低, 掺混较低比例 (<40%) 的废水可以改善浆体结构, 使水煤浆不易形成硬沉淀, 从而提高水煤浆的稳定性。

**关键词:** 水煤浆; 含聚废水; 掺混比例; 流变性; 稳定性

中图分类号: TQ536

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)04-0072-06

## Effects of polymer containing wastewater from oil production on preparation and properties of coal water slurry

ZHANG Hao<sup>1</sup>, WEI Zheng<sup>1</sup>, JIANG Yong<sup>2</sup>, XIE Qiang<sup>1</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. Poten Environmental Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the development and application of polymer flooding technology, the recovery rate of crude oil is greatly improved. Meanwhile, a large number of polymer containing wastewater is produced, resulting in environmental pollution. The utilization of industrial wastewater in the preparation of coal water slurry(CWS) is one of the effective ways to treat industrial wastewater. However, there are few studies on the use of polymer containing wastewater in the preparation of CWS. In order to study the effect of polymer containing wastewater on the preparation and performance of CWS, coal water slurry(CWS) was prepared by using Shenmu bituminous coal as raw material and naphthalene sulfonate formaldehyde condensate as dispersant and anionic polyacrylamide(HPAM) containing wastewater from oil production. When the amount of dispersant and the CWS concentration were experimentally determined, the influence of the dosage of polymer containing wastewater on the rheology and stability of CWS was investigated. The results show that the performance of coal water slurry(CWS) prepared from polymer containing wastewater is good. The apparent viscosity of CWS decreases first and then increases with the increase of the amount of dispersant, and increases with the increase of CWS concentration. The CWS has good performance with the maximum pulping concentration of 56.6% and the apparent viscosity of 1 183 mPa·s when the concentration of dispersant is 0.8%. The rheological properties of CWS is affected by the addition of polymer containing wastewater. With the increase of the proportion of polymer containing wastewater, the rheological properties of CWS first decreases and then becomes better. When the mixing ratio of wastewater is less than 20%, the CWS has low apparent viscosity, good fluidity and more obvious pseudoplastic fluid. The addition of polymer containing wastewater

收稿日期: 2019-04-08; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19040801

基金项目: 中国海洋石油总公司京直地区青年科技与管理创新基金资助项目(JZTW2017SC02)

作者简介: 张昊(1993—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事利用水煤浆制备技术处理废水的研究。E-mail: 13120373993@163.com。通讯作者: 解强, 教授, 博士生导师。E-mail: dr-xieq@cumb.edu.cn

引用格式: 张昊, 魏征, 姜勇, 等. 掺加采油含聚废水对水煤浆制备及性能的影响[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 72-77.

ZHANG Hao, WEI Zheng, JIANG Yong, et al. Effects of polymer containing wastewater from oil production on preparation and properties of coal water slurry[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(4): 72-77.



移动阅读

also has great influence on the stability of CWS. The stability of CWS firstly increases and then decreases as the proportion of polymer containing wastewater increases. The stability of CWS can be improved by mixing waste water with a lower proportion (< 40%), for that the addition of polymer containing wastewater improves the slurry structure and makes the CWS hard to form hard precipitation.

**Key words:** coal water slurry; polymer containing wastewater; mixing ratio; rheological properties; stability

## 0 引言

随着聚合物驱油技术的不断发展和应用,油田原油采出率大大提高,同时也产生大量成分复杂的含聚废水<sup>[1-2]</sup>。含聚废水具有聚合物浓度大、含油量多、矿化度高等特点<sup>[3]</sup>,现有的混凝法、吸附法、生物法、化学氧化法和电解法等废水处理方法<sup>[4-7]</sup>,工艺复杂、成本高且难以取得较好的处理效果。水煤浆是由一定比例的煤、水和添加剂经加工制成的一种新型清洁燃料和煤化工原料,具有燃烧效率高、污染物排放低等优点,是现阶段较适宜的代油、环保、节能技术<sup>[8-10]</sup>。水煤浆制备技术应用于废水处理<sup>[11]</sup>,尤其在有机废水处理方面已有大量研究。李效琪等<sup>[12]</sup>利用造纸黑液和煤泥制备水煤浆考察其综合性能指标,当造纸黑液添加量为7.2%时,制浆浓度为67.44%,流动性为A级,稳定性良好;王卫东等<sup>[13]</sup>利用印染退浆废水制浆,制得的水煤浆流变性优于清水制备的水煤浆;周国江等<sup>[14]</sup>利用焦化废水制备煤泥水煤浆,发现废水中的酚类物质和氨氮对水煤浆有一定的分散稳定作用;王春荣等<sup>[15]</sup>通过调整反渗透浓水添加比例考察水煤浆性能,认为随着废水添加比例增加,制浆浓度不断增大,但浆体流变性越来越差。由于含聚废水中含有大量的阴离子型聚丙烯酰胺(HPAM)及石油类烃等有机物,可以提高水煤浆热值<sup>[16-17]</sup>,此外,HPAM是由单体丙烯酰胺聚合而成的高分子化合物,具有增稠、絮凝等特性,可用作水煤浆稳定剂<sup>[18]</sup>。因此,若能利用含聚废水制备水煤浆,不仅可以解决废水处理的难题,还可节约制浆用水、增加水煤浆热值并增强水煤浆的稳定性。然而,鲜见利用含聚废水制浆的相关研究。

本文选取我国陕西神木烟煤为原料,通过添加不同比例的含聚废水制备水煤浆,探讨其对水煤浆成浆浓度、流变性及其稳定性的影响,以期为采油含聚废水无害化和资源化利用提供科学依据。

## 1 试验

### 1.1 制浆原料

#### 1.1.1 原料煤样

制浆用煤选取陕西神木烟煤,其煤质分析指标见表1。

表1 煤样的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal sample

工业分析/%				元素分析/%				
$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	$FC_{daf}$	$C_{daf}$	$H_{daf}$	$O_{daf}$	$N_{daf}$	$S_{t,d}$
7.33	7.08	38.92	61.08	82.02	6.73	9.39	1.37	0.45

用球磨机(湖北探矿机械厂,XMB-7型)将原煤粉磨至一定粒度,粗煤样粉磨30 min,细煤样粉磨3 h,利用激光粒度分析仪(珠海欧美克仪器有限公司,OMEC LS-C<I>型)测定粒度分布,结果见表2。粗煤样体积平均粒度为94.84  $\mu\text{m}$ ,细煤样体积平均粒度为25.63  $\mu\text{m}$ 。

表2 粗细煤样的粒度分布

Table 2 Particle distribution of ground coal samples

煤样	质量分数/%					$D_{[4,3]}$ / $\mu\text{m}$
	$\geq 80 \mu\text{m}$	65~ 80 $\mu\text{m}$	32~ 65 $\mu\text{m}$	3~ 32 $\mu\text{m}$	<3 $\mu\text{m}$	
粗煤样	51.96	8.90	21.47	16.86	0.81	94.84
细煤样	2.19	3.07	24.53	64.87	5.35	25.63

注: $D_{[4,3]}$ 为体积平均粒度。

采用自来水进行制浆试验,确定较为适宜的粗细煤样配比为6:4,按该比例将煤样混匀,密封保存备用。

#### 1.1.2 含聚废水水样

含聚废水取自大庆油田污水处理厂待处理废水,利用红外分光测油仪(北京晨欣慧创环保科技有限公司,LT-21A型)测定废水中油浓度,采用淀粉-碘化镉光度法<sup>[19]</sup>测定聚合物聚丙烯酰胺浓度,标准曲线如图1所示。含聚废水中油的质量浓度为29.5 mg/L,聚丙烯酰胺质量浓度为1 538.7 mg/L。

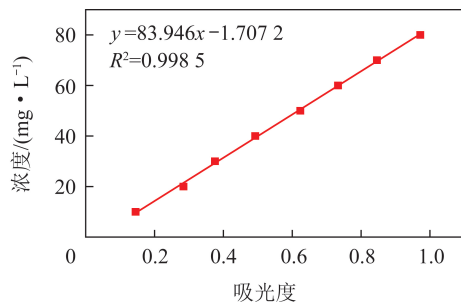


图1 淀粉-碘化镉光度法测定聚丙烯酰胺浓度的标准曲线

Fig.1 Standard curve of polyacrylamide concentration by starch-cadmium iodide method

## 1.2 水煤浆制备

试验采用干法制浆,分散剂选用萘磺酸盐甲醛缩聚物。将煤粉、水和分散剂按照计算得出的比例加入塑料杯中,用电动搅拌器(江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司, JJ-1型)于 300 r/min 低转速下初步搅拌均匀,然后提高转速至 1 200 r/min,搅拌 10 min 后制得水煤浆样品。

## 1.3 水煤浆性能测定

利用快速水分仪(德国 Sartorius 公司, MA35型)和旋转黏度计(成都仪器厂, NXS-11B型)分别测定水煤浆样品的质量浓度和黏度,并取剪切速率  $100 \text{ s}^{-1}$  时的黏度为水煤浆的表观黏度。

水煤浆流动性的评价采用目测法<sup>[20]</sup>,可分为3个等级:A级表示流动性好,浆体能够不间断连续流动;B级表示流动性较好,浆体流动时有间断;C级表示浆体无流动性;用“+”表示某一等级中流动性相对较好,用“-”表示某一等级中流动性相对较差。

水煤浆稳定性的评价采用 Turbiscan Lab 稳定性分析仪<sup>[21]</sup>。测定前将仪器预热至测定温度(25℃)并稳定 20 min。将制备好的水煤浆样品倒入专用的水煤浆稳定性测试瓶中,浆体高度控制在 42 mm 左右,倾倒过程中要避免样品瓶内壁上黏附水煤浆,装好样品后擦净瓶外壁上的指纹,注意装填过程中保持弯液面平整且不能留气泡。测量采用程序扫描,设定第 1 h 内,每隔 10 min 扫描 1 次;第 2~6 h 内,每隔 1 h 扫描 1 次;之后每隔 1 d,扫描 1 次,共扫描 7 d。样品测试完成后,将玻璃棒插入底部煤浆,观察是否出现硬沉淀。

## 2 结果与讨论

### 2.1 含聚废水制浆的分散剂用量

设定成浆浓度为 56%,分散剂用量分别取干基煤质量的 0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1.0%,利用含聚废水直接制备水煤浆,不同分散剂用量下的水煤浆表观黏度如图 2 所示。可知,当分散剂用量较少时,废水水煤浆的表观黏度随分散剂用量的增大呈下降趋势,当达到某一数值时,废水水煤浆的表观黏度会随着分散剂用量的增大而增大。这是因为分散剂分子是一种两亲分子,其吸附到煤粒表面后,会在煤粒表面定向排列,疏水基朝内,亲水基朝外,从而大大降低了煤粒表面与水之间的界面张力,提高了煤粒表面润湿性,使得水煤浆表观黏度降低。而当分散剂用量超过某一数值时,多余的分散剂会溶解到分散相中导致相浓度增大,且过量的分散剂会在煤粒表面形成多重吸附,增加了煤粒的空间位

阻效应,此外,多重吸附会包裹住一部分自由水,使得分散相中流动的自由水含量降低,最终导致水煤浆表观黏度增大。因此,确定合理的分散剂用量有利于提高水煤浆的流变性,同时也可以节约一部分药剂成本。较适宜的分散剂用量为 0.8%,此时废水水煤浆表观黏度为  $821 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

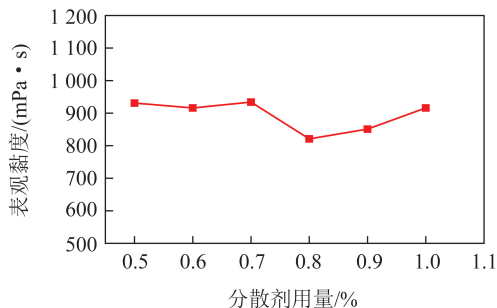


图2 废水水煤浆表观黏度与分散剂用量的关系  
Fig.2 Relationship between the apparent viscosity of CWS and the dosage of dispersant

### 2.2 含聚废水制浆的成浆浓度

设定分散剂用量为 0.8%,利用含聚废水直接制备水煤浆,其表观黏度与浓度的关系如图 3 所示。

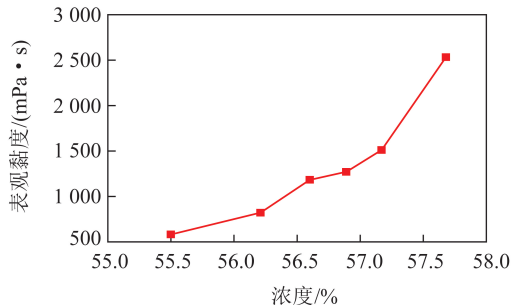


图3 废水水煤浆表观黏度与浓度的关系  
Fig.3 Relationship between the apparent viscosity and the concentration of CWS

由图 3 可知,随着浓度提高,废水水煤浆表观黏度不断增大,浓度较低时,表观黏度增大较为平缓,浓度较高时,表观黏度急剧增大。这主要是因为,在水煤浆体系中,随着浓度的增大,煤颗粒增多而颗粒之间的自由水分子减少,煤颗粒之间碰撞的几率急剧增加,在剪切力作用下,水煤浆内部摩擦力增大,外部表现为浆体的表观黏度骤增。为满足水煤浆燃烧要求,即在剪切速率  $100 \text{ s}^{-1}$  条件下,表观黏度不大于  $1 200 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,较为理想的水煤浆制浆浓度为 56.6%,此时水煤浆表观黏度为  $1 183 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

### 2.3 含聚废水掺混比例对水煤浆流变性的影响

废水中含有的较高浓度 HPAM 限制了水煤浆最大制浆浓度,为探究不同废水掺混比例对水煤浆流变性的影响,设定水煤浆质量浓度为 56%,分散

剂用量为 0.8%, 选取废水掺混比例分别为 0、20%、40%、60%、80%、100%, 进行制浆试验, 不同废水掺混比例下水煤浆的成浆性见表 3, 不同废水掺混比例下水煤浆的黏度变化曲线如图 4 所示。

表 3 不同废水掺混比例水煤浆的成浆性

Table 3 Slurryability of CWS mixed with different mixing ratio of wastewater

掺混比例/%	设计浓度/%	表观黏度/(mPa·s)	流动性
0	56	752	A
20	56	800	A <sup>-</sup>
40	56	2 009	B
60	56	2 112	B
80	56	1 509	A <sup>-</sup>
100	56	1 170	A <sup>-</sup>

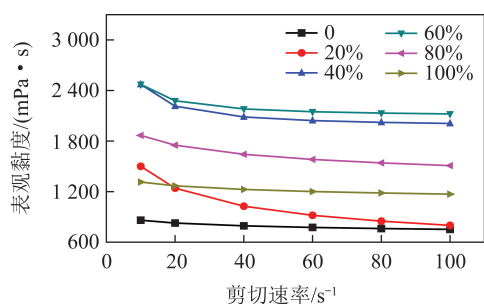


图 4 不同废水掺混比例水煤浆黏度变化曲线

Fig.4 Viscosity curve of CWS with different mixing ratio of wastewater

由表 3 可知, 掺加废水的水煤浆表观黏度总体呈先增大后减小的趋势, 且废水的掺入使得水煤浆流动性变差。当掺混比例较低或较高时, 废水水煤浆的表观黏度相对较低, 流动性相对较好, 而掺混比例在 40%~60% 时, 其表观黏度显著高于其他掺混比例, 流动性指数降至 B 级, 这可能是由于废水中的 HPAM 是一种链状高分子聚合物, 当其浓度较低时分子链呈伸展状态, 增黏能力较强, 水煤浆的表观黏度也随着 HPAM 浓度的增大而增大, 流动性逐渐变差, 而当浓度增大到一定数值时, HPAM 分子发生卷曲收缩, 增黏效果减弱, 水煤浆表观黏度随之降低, 流动性逐渐变好。

由图 4 可知, 掺加一定量的含聚废水有利于改善水煤浆的流变特性。废水水煤浆样品在低剪切速率下黏度较大, 有利于水煤浆的储存和运输; 而高剪切速率下黏度较小, 有利于水煤浆的雾化和燃烧, 因而表现出较好的“剪切变稀”的流变特性。当废水掺混比例为 20% 时, 水煤浆具有较为明显的假塑性流体特征, 且流动性较好。

综上所述, 掺加一定量含聚废水制备水煤浆有

利于改善水煤浆的流变性, 为制得表观黏度较小且流变性良好的水煤浆, 废水较为适宜的掺加比例为 20%。

## 2.4 含聚废水掺混比例对水煤浆稳定性的影响

HPAM 常被作为稳定剂用于水煤浆制备, 为探究不同废水掺混比例对水煤浆稳定性的影响, 设定水煤浆质量浓度为 56%, 选取废水掺混比例分别为 0、20%、40%、60%、80%、100%, 制得水煤浆样品, 并用 Turbiscan Lab 稳定性分析仪进行测试, 其稳定性指数随时间的变化规律如图 5 所示。

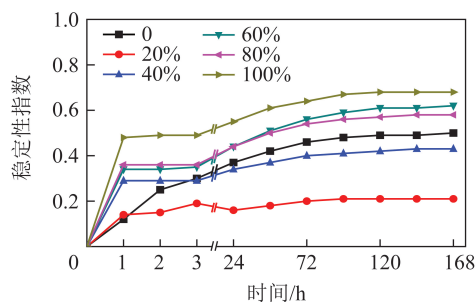


图 5 不同废水掺混比例条件下水煤浆稳定性指数随时间的变化

Fig.5 Variation of CWS stability index with time under different mixing ratio of wastewater

由图 5 可知, 对单个水煤浆样品, 水煤浆稳定性指数 TSI 随着时间的增加而逐渐增大, 而稳定性指数越大, 表明浆体稳定性越差<sup>[22]</sup>。随着时间延长, 浆体越来越不稳定, 且斜率越大, 浆体失稳速率越快, 对比图中各时间段斜率可知, 静置 1 h 内失稳速率最快, 5 d 后达到相对恒定的不稳定状态。这是由于新制备的水煤浆处于均匀混合状态, 上层粒度较大的煤粒会在重力作用下迅速发生沉降, 导致上层浆体浓度逐渐降低, 而底部煤浆浓度逐渐升高, 随着时间的延长, 煤粒下降遇到的阻力越来越大, 沉降速率逐渐减小, 直至达到平衡状态。对比不同废水掺混比例的水煤浆样品, 可以看出掺加较低比例 (< 40%) 废水的水煤浆比未掺加废水的水煤浆的 TSI 更低, 说明此时有利于提高水煤浆的稳定性, 但当掺混比例高于一定值时, 由于此时水煤浆中 HPAM 含量过高, 导致煤颗粒之间发生团聚, 从而降低了水煤浆的稳定性。观察静置 7 d 后的水煤浆, 发现未掺混废水的水煤浆形成不可恢复的硬沉淀, 而掺混废水的水煤浆只形成软沉淀, 经搅拌可快速恢复其流变特性。

综上所述, 掺混一定量含聚废水制备水煤浆有利于改善水煤浆的稳定性, 为制得稳定性良好的水煤浆, 废水掺混比例不宜超过 40%。

### 3 结 论

1) 采油含聚废水可直接用于制备水煤浆燃料,成浆性能良好,分散剂用量为0.8%时制备的水煤浆成浆浓度可达56.6%,表观黏度为1 183 mPa·s。

2) 掺加一定量含聚废水可以有效改善水煤浆的流变性,但在一定程度上降低了水煤浆的流动性,废水掺混比例为20%时,水煤浆表观黏度较低,流动性良好且具有更明显的屈服假塑性流体特征。

3) 掺加较低比例的含聚废水可以提高水煤浆的稳定性,为保证水煤浆具有较好的稳定性,废水掺混比例不宜超过40%。综合考虑水煤浆流变性和稳定性,制浆时选择20%的废水掺混比例更为合适。

### 参考文献 (References) :

- [1] 李浩,张平.石油采油工程技术中存在的问题与对策[J].化工设计通讯,2017,43(7):49,80.  
LI Hao,ZHANG Ping.Problems and countermeasures in oil production engineering [ J ]. Chemical Engineering Design Communications,2017,43(7):49,80.
- [2] 叶光辉,刘永辉.石油工业废水处理技术研究进展[J].广州化工,2015,43(5):55-57.  
YE Guanghui, LIU Yonghui. Research progress on industrial wastewater treatment [ J ]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43 ( 5 ): 55-57.
- [3] 向轶.油田废水制备浆体燃料的成浆、燃烧与气化特性研究[D].杭州:浙江大学,2017.  
XIANG Yi. Research on slurryability, combustion and gasification properties of coal-oilfield wastewater-slurry [ D ]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [4] 梁伟,赵修太,韩友祥,等.油田含聚污水处理与利用方法技术探讨[J].工业水处理,2010,30(10):1-5.  
LIANG Wei,ZHAO Xiutai,HAN Youxiang, et al. Discussion on the treatment of wastewater containing polymers in oilfields and its utilization [ J ]. Industrial Water Treatment, 2010, 30 ( 10 ): 1-5.
- [5] EBRAHIMI M, KAZEMI H, MIRBAGHERI S A, et al. An optimized biological approach for treatment of petroleum refinery wastewater[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4 ( 3 ): 3401-3408.
- [6] WENHU Z, DEJIN W, RUOYU F, et al. Studies on affecting factors and mechanism of oily wastewater by wet hydrogen peroxide oxidation[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10: S2402-S2405.
- [7] 刘咚,储昭奎,王洪福,等.含聚丙烯酰胺类油田污水的电化学氧化处理[J].环境工程学报,2017,11(1):291-296.  
LIU Dong, CHU Zhaokui, WANG Hongfu, et al. Electrochemical oxidation treatment of polyacrylamide-based oil field wastewater [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 ( 1 ): 291-296.
- [8] 段清兵,张胜局,段静.水煤浆制备与应用技术及发展展望[J].

煤炭科学技术,2017,45(1):205-213.

- DUAN Qingbing, ZHANG Shengju, DUAN Jing. Development outlook and preparation and application technology of coal water mixture [ J ]. Coal Science and Technology, 2017, 45 ( 1 ): 205-213.
- [9] 陈浩,熊君霞,何国锋.我国水煤浆技术现状及发展趋势[J].煤炭经济研究,2019,39(6):85-88.  
CHEN Hao, XIONG Junxia, HE Guofeng. Current status and development trend of coal water slurry technology in China [ J ]. Coal Economic Research, 2019, 39 ( 6 ): 85-88.
- [10] 蒋焜,王磊,涂亚楠.水煤浆技术研究进展与发展趋势[J].煤炭工程,2020,52(5):27-32.  
JIANG Yu, WANG Lei, TU Yanan. Discussion on progress and development trend of coal water slurry technology [ J ]. Coal Engineering, 2020, 52 ( 5 ): 27-32.
- [11] 杜奇迹.水煤浆技术用于处理有机废液的研究[J].能源与节能,2014(9):189-190.  
DU Qiji. Study on coal-water slurry technology for treatment of organic waste water [ J ]. Energy and Energy Conservation, 2014 ( 9 ): 189-190.
- [12] 李效其,任瑞鹏,吕永康.造纸黑液和煤泥制备水煤浆的技术研究[J].煤炭转化,2012,35(1):41-45.  
LI Xiaoqi, REN Ruipeng, LYU Yongkang. Technology study on preparing coal water mixture by using slime and paper-making black liquor [ J ]. Coal Conversion, 2012, 35 ( 1 ): 41-45.
- [13] 王卫东,徐志强,崇立芹.印染退浆废水制备水煤浆的实验研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(3):488-492.  
WANG Weidong, XU Zhiqiang, CHONG Liqin. Experimental study of coal-water slurry preparation with printing and dyeing desizing wastewater [ J ]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41 ( 3 ): 488-492.
- [14] 周国江,王彦彪.焦化废水制备的煤泥水煤浆的成浆性[J].黑龙江科技学院学报,2010,20(1):18-22.  
ZHOU Guojiang, WANG Yanbiao. Slurryability of coalslime water slurry with coking waste water [ J ]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2010, 20 ( 1 ): 18-22.
- [15] 王春荣,侯志斐,何绪文,等.反渗透浓水用于水煤浆制备及其对流变性的影响[J].煤炭科学技术,2015,43(12):175-179.  
WANG Chunrong, HOU Zhifei, HE Xuwen, et al. Reverse osmosis concentrated water applied to preparation of coal water mixture and affected to rheology [ J ]. Coal Science and Technology, 2015, 43 ( 12 ): 175-179.
- [16] 李凌波,闫松,曾向东,等.油田采出水中有机物组成分析[J].石油化工,2002,31(6):472-475.  
LI Lingbo, YAN Song, ZENG Xiangdong, et al. Analysis of organic compounds in oilfield produced water [ J ]. Petrochemical Technology, 2002, 31 ( 6 ): 472-475.
- [17] TAYLOR K C, BURKE R A. Development of a flow injection analysis method for the determination of acrylamide copolymers in brines[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998, 2 ( 21 ): 129-139.
- [18] 包木太,陈庆国,王娜,等.油田污水中聚丙烯酰胺(HPAM)的降解机理研究[J].高分子通报,2008(2):1-9.

- BAO Mutai, CHEN Qingguo, WANG Na, et al. Study on the mechanism of HPAM - degradation in the sewage of oilfield [J]. Polymer Bulletin, 2008(2):1-9.
- [19] 修景海, 李泽勤, 林琳, 等. 含聚污水中聚丙烯酰胺含量测定 [J]. 油气田环境保护, 2016, 26(1):20-24, 44, 61.  
XIU Jinghai, LI Zeqin, LIN Lin, et al. Study on the determination of the polyacrylamide in polymer-containing sewage [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2016, 26(1):20-24, 44, 61.
- [20] 何红兴, 杜丽伟, 张桂玲, 等. 半焦制备气化水煤浆试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2017, 23(6):38-41.  
HE Hongxing, DU Liwei, ZHANG Guiling, et al. Experimental study on preparation of gasification coal water mixture with char [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6):38-41.
- [21] 柴志方, 张瑞杰, 姬文心, 等. 温度对水煤浆稳定性影响的研究 [J]. 矿业科学学报, 2018, 3(4):392-397.  
CHAI Zhifang, ZHANG Ruijie, JI Wenxin, et al. Research on temperature affected to stability of coal water slurry [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(4):392-397.
- [22] 孙美洁, 郑剑平, 王浩, 等. 利用 Turbiscan Lab 稳定性分析仪研究水焦浆的稳定性 [J]. 石油学报(石油加工), 2016, 32(6):1164-1170.  
SUN Meijie, ZHENG Jianping, WANG Hao, et al. Study on the stability of petroleum coke water slurry by using Turbiscan Lab Stability Analyzer [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2016, 32(6):1164-1170.