

无机盐与表面活性剂对细粒低阶煤脱水效果的影响

颜 阳¹, 黄鲁华²

(1. 国家能源集团神东洗选中心, 陕西 榆林 719315; 2. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 针对布尔台选煤厂细粒低阶煤水分高、脱水难的问题, 采用无机盐和表面活性剂对低阶煤泥的脱水效果进行研究。结果表明, 布尔台选煤厂煤样具有粒度细、高密度级含量高、表面含氧官能团和杂质矿物丰富等特点。使用 FeCl_3 和 PAC 对煤泥进行脱水时, 过滤速度显著增加, 分别增加 0.129 和 0.113 $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, 滤饼水分有所降低; 采用表面活性剂脱水时, DTAC 和 Tween 85 的作用使得过滤速度大幅加快并且可以降低滤饼水分, 此时滤饼水分降低 0.69% 和 1.03%, 过滤速度增加 0.301 和 0.152 $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$; 在无机盐与表面活性剂混合组分中, 非离子型 Tween 85 组和阴离子型油酸钠组脱水效果明显改善, Tween 85 与 FeCl_3 、PAC 共同存在时, 滤饼水分分别降低 1.39%、1.52%, 过滤速度分别增加了 0.044 和 0.040 $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。油酸钠与 FeCl_3 、PAC 共同存在时, 滤饼水分分别降低 2.79%、2.61%, 过滤速度分别增加了 0.026 和 0.021 $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。 FeCl_3 和 PAC 的介入可使 DTAC 表面活性降低, 对 Tween 85 的表面活性影响较小, 但可使油酸钠表面活性大幅增加。3 种表面活性剂的存在对低阶煤表面的疏水性有一定改善作用, 而无机盐的加入促进了阴离子型和非离子型表面活性剂在低阶煤表面的吸附, 进而增强了对低阶煤表面疏水性的改善。

关键词: 低阶煤; 脱水; 表面活性剂; 无机盐; 滤饼水分

中图分类号: TD94

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)06-0102-07

Effect of inorganic salts and surfactants on dewatering performance of fine low-rank coal slime

YAN Yang¹, HUANG Luhua²

(1. CHN Energy Shendong Coal Preparation Centre, Yulin 719315, China; 2. National Engineering

Research Centre of Coal Preparation and Purification, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Aiming at the problems of high moisture content and the difficulty in dewatering of fine low rank coal particles in the Boertai coal preparation plant, in this paper, the dewatering performance of low rank coal slime was evaluated by using inorganic salts and surfactants. The results show that the coal samples from Boertai coal preparation plant have the characteristics of fine particle size, great high-density content, abundant surface oxygen-containing functional groups, and high gangue content. When FeCl_3 and PAC are used to dewater coal slime, the filtration rate increases significantly by 0.129 and 0.113 $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ respectively, and the moisture content of filter cake decreases to a certain extent; when using surfactant, DTAC and Tween 85 accelerate the filtration speed greatly and reduce the moisture content of filter cake, the moisture content of filter cake decreases by 0.69% and 1.03%, and the filtration rate increases by 0.301 and 0.152 $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$; in the mixture of inorganic salt and surfactant, the dehydration effect of non-ionic Tween 85 and anionic sodium oleate is significantly improved. When Tween 85 co-exists with FeCl_3 and PAC, the cake moisture decreases by 1.39% and 1.52% respectively, and the filtration rate increases by 0.044 and 0.040 $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, respectively. When sodium oleate co-exists with FeCl_3 and PAC, the moisture content of filter cake decreases by 2.79% and 2.61%, and the filtration rate increases by 0.026 and 0.021 $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, respectively. FeCl_3 and PAC can decrease the surface activity of DTAC, and have little effect on the surface activity of Tween 85, but can

收稿日期: 2020-07-09; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.20070901

基金项目: 国家能源集团科技创新项目(CSIEZB170204990)

作者简介: 颜 阳(1988—), 男, 内蒙古赤峰人, 工程师, 从事工程管理、工程招标采购等相关工作。E-mail: 34765779@qq.com

引用格式: 颜阳, 黄鲁华. 无机盐与表面活性剂对细粒低阶煤脱水效果的影响[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 102-108.

YAN Yang, HUANG Luhua. Effect of inorganic salts and surfactants on dewatering performance of fine low-rank coal slime [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 102-108.



移动阅读

increase the surface activity of sodium oleate significantly. The results show that the existence of three surfactants can improve the surface hydrophobicity of low rank coal, and the addition of inorganic salts promotes the adsorption of anionic and non-ionic surfactants on the surface of low rank coal, thus enhancing the improvement of surface hydrophobicity of low rank coal.

Key words: low rank coal; dehydration; surfactant; inorganic salt; filter cake moisture

0 引言

低阶煤是指一类变质程度较低的煤,如褐煤、长焰煤、不黏煤、弱黏煤以及部分气煤等,广泛存在于我国西北地区,是优良的气化用煤以及生产超低灰精煤、精细水煤浆的重要原料^[1-2]。近年来,随着采煤机械化程度不断提高以及低阶煤煤质日趋偏软,低阶煤开采和分选过程中产生的煤泥出量更大、粒度更细^[3-4]。低阶煤煤泥表面富含大量含氧官能团,表面微孔多,比表面积大,亲水性强,脱水困难,易导致煤泥产品水分偏高^[5-6]。此外,低阶煤与水接触时,煤颗粒表面会形成一层水化膜,在一定程度上恶化煤泥水分脱除过程^[7]。目前,细粒低阶煤煤泥脱水困难所带来的产品发热量降低、水资源浪费等问题亟待解决。

添加助滤剂是细煤泥脱水的有效手段。常见的助滤剂可分为以无机盐类为代表的无机型助滤剂和以高分子絮凝剂和表面活性剂为代表的有机型助滤剂^[8]。目前煤泥脱水助滤剂的研究多采用单一高分子絮凝剂、单一表面活性剂以及复配有机型助滤剂^[9]。研究表明,复合型有机助滤剂在降低滤饼水分和提高过滤速度上均显现出较大优势^[10-12]。

高效助滤剂的设计与开发一直是国内外煤泥脱水研究的热点与难点。众多学者研究了焦煤等变质程度高的煤泥脱水助滤剂,但针对低阶煤煤泥脱水的复合型助滤剂研究仍不足。本文针对布尔台选煤厂主选的长焰煤,使用无机型与有机型组合助滤剂进行低阶煤煤泥脱水试验研究,旨在探索该类复合型助滤剂的可行性,以期对布尔台选煤厂煤泥脱水药剂选择有一定参考价值。

1 试验

1.1 试验煤样及性质

试验所用煤样取自布尔台选煤厂末煤B系统浓缩机入料,煤种为变质程度较低的长焰煤。

1.1.1 粒度组成

将试验煤样缩分混匀后烘干,取部分煤样进行筛分试验,煤样粒度组成如图1所示。

由图1可知,<0.045 mm 粒级占全样 69.13%。过滤时,此粒级细颗粒极易游离于大颗粒之间空隙,

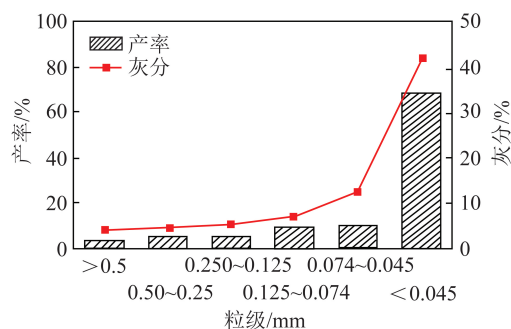


图1 煤样筛分试验结果

Fig.1 Sieving test results of coal samples

到达滤布时易堵塞滤孔,造成脱水阻力增大。此外,<0.045 mm 粒级灰分极高,原因在于夹杂的亲水性黏土矿物较多,易造成煤泥滤饼产品水分过大。

1.1.2 密度组成

对煤样进行密度组成分析,试验重液是由苯、三溴甲烷、四氯化碳按规定比例配置而成,结果如图2所示。

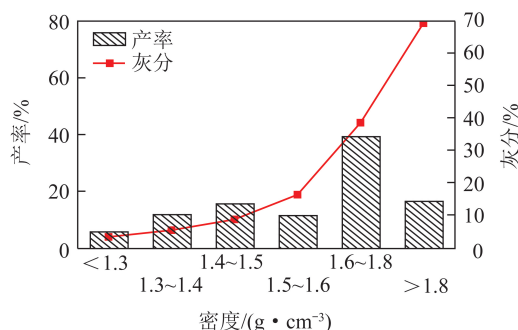


图2 煤样浮沉试验结果

Fig.2 Sink-float test results of coal sample

由图2可知,低密度级(<1.4 g/cm³)含量为18.42%,灰分为4.48%,属低灰精煤。相比其他密度级,此部分煤样疏水性较强,过滤、脱水效果更优。中间密度级1.4~1.6 g/cm³含量为27.84%,灰分为12.53%,属低、中灰煤泥;高密度级>1.6 g/cm³含量较多,产率为54.76%,灰分为46.32%,可知杂质矿物含量比较高。杂质矿物亲水性一般较强且伴随着严重的泥化现象,将会对煤泥脱水效果造成不利影响。

1.2 试验药剂

无机盐根据分子量不同分别选择 FeCl₃ 和聚合氯化铝(PAC)。

表面活性剂根据离子类型不同进行选择,分别为阳离子型十二烷基三甲基氯化铵(DTAC),阴离子型油酸钠,非离子型Tween 85。

1.3 脱水试验

脱水试验流程如图3所示。首先加去离子水搅拌2 min使煤样充分润湿,然后加入助滤剂并搅拌4 min使之充分作用,之后在恒压条件下对煤样抽滤,抽滤结束后将滤饼烘干、称重,同时收集滤液进行分析。试验条件为:室温,干燥粉60 g,矿浆浓度500 g/L, pH=6.5~7.5,搅拌转速500 r/min,过滤压力-0.08 MPa,抽滤半径 $R=4$ cm。

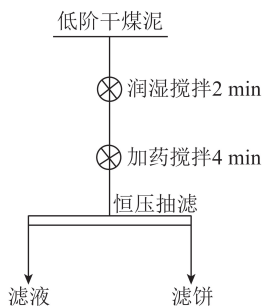


图3 脱水试验流程

Fig.3 Flowsheet of dewatering test

1.4 分析方法

1.4.1 溶液表面张力分析

利用表面张力仪K100,采用铂吊法测定各药剂不同浓度条件下的表面张力值。

1.4.2 接触角分析

采用DSA10测定仪对不同组合药剂作用下的煤样进行接触角分析。将脱水煤样进行低温烘干、压片,测量接触角,方法为量角法,测定3组取平均值。

1.4.3 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

利用Thermo Nicolet 380傅里叶变换红外光谱仪对不同组合药剂作用下的煤样所含官能团进行测试,测试完成后用Omnice软件进行相关分析处理。

1.4.4 Zeta 电位分析

将煤样与不同组合药剂作用后,采用FS-900N超声波分散仪分散5 min,静置24 h采用培清JS-power300电泳仪测定固体颗粒表面的Zeta电位。

2 结果与讨论

2.1 无机盐类助滤剂作用效果

单一 FeCl_3 存在时的脱水效果如图4所示。可知在无药剂作用的情况下,滤饼水分35.40%,过滤速度为 $0.135 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。随着 FeCl_3 浓度增加,滤饼水分先大幅度降低,药剂浓度达到

0.0020 mol/L 后基本保持稳定;过滤速度则是一直增快,前期增幅较大,后期增幅较小。 FeCl_3 浓度为 0.0025 mol/L 时,滤饼水分达到相对平稳状态且过滤速度基本保持不变,此时滤饼水分为34.63%,与对照组相比减少了0.77%;过滤速度为 $0.264 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$,比对照组增加 $0.129 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。

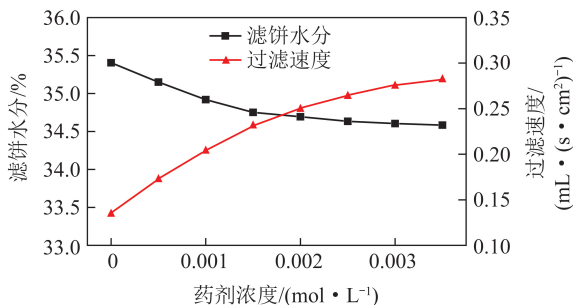


图4 FeCl_3 浓度对滤饼水分与过滤速度的影响

Fig.4 Effect of FeCl_3 concentration on water content and filtration velocity of filter cake

单一聚合氯化铝助滤剂时的脱水效果如图5所示。可知聚合氯化铝的脱水效果变化趋势与 FeCl_3 相似。聚合氯化铝浓度为 0.5 g/L 时,滤饼水分基本稳定且过滤速度几乎不变,此时滤饼水分为34.58%,过滤速度为 $0.248 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$,相对于对照组,水分减少了0.82%,过滤速度增加了 $0.113 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。这是由于 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 价态高,易与水形成的水合阳离子 $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ 、 $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$,与带负电性的煤泥颗粒发生电中和作用,使煤粒表面的水化膜厚度变薄,同时减少颗粒间斥力易于团聚,进而达到加快过滤速度、降低滤饼水分的效果。

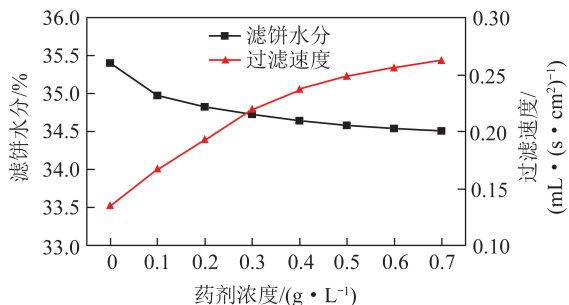


图5 PAC浓度对滤饼水分与过滤速度的影响

Fig.5 Effect of PAC concentration on water content and filtration velocity of filter cake

2.2 表面活性剂类助滤剂作用效果

选择DTAC作为助滤剂的脱水效果如图6所示。可知DTAC对滤饼水分和过滤速度的影响趋势与 FeCl_3 与聚合氯化铝类似。DTAC用量达到 800 g/t 时,脱水效果几乎呈稳定趋势,此时滤饼水分和过滤速度分别为 34.70% 和 $0.421 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。

对比空白试验滤饼水分降低 0.69%, 过滤速度增加 0.301 mL/(s · cm²)。DTAC 在水中会水解产生 [C₁₂H₂₅(CH₃)₃N]⁺, 该离子与 Fe³⁺、Al³⁺、水形成的水合阳离子的作用一致, 可以改善低阶煤泥的脱水效果。

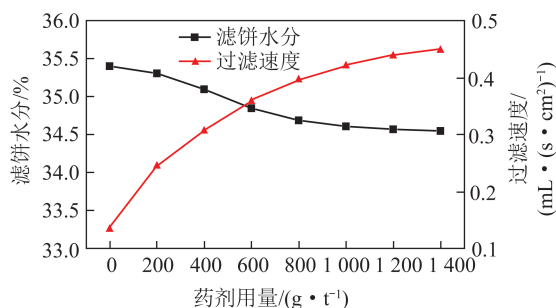


图 6 DTAC 浓度对滤饼水分与过滤速度的影响

Fig.6 Effect of DTAC concentration on water content and filtration velocity of filter cake

仅油酸钠存在时煤样的脱水效果如图 7 所示。可知与前面几种助滤剂不同, 随着油酸钠用量的增加, 滤饼水分先增加, 用量为 400 g/t 时开始下降, 800 g/t 后处于相对平稳的状态; 而过滤速度的变化趋势则先降低后又缓慢增加。油酸钠用量为 800 g/t 时, 滤饼水分为 35.16%, 过滤速度为 0.120 mL/(s · cm²), 相对于对照组分别降低了 0.24% 和 0.014 mL/(s · cm²)。主要原因为: 油酸钠在水中解离出的油酸根离子 [C₁₈H₃₃O₂]⁻, 一方面可以与煤泥颗粒生成油酸盐, 有利于改善煤泥水脱水效果。但过量吸附后的油酸根离子使煤泥表面负电性增强, 造成煤泥颗粒之间的斥力进一步增大, 使得煤泥水体系稳定性增强, 脱水效果不理想。

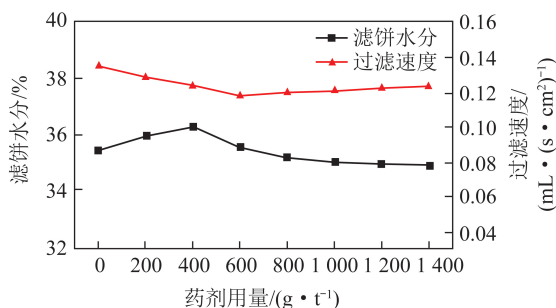


图 7 油酸钠浓度对滤饼水分与过滤速度的影响

Fig.7 Effect of sodium oleate concentration on water content and filtration velocity of filter cake

Tween 85 存在时对脱水效果的影响如图 8 所示。可知 Tween 85 的脱水效果变化趋势与 FeCl₃、聚合氯化铝以及 DTAC 相似。Tween 85 用量为 1 000 g/t 时达到基本稳定状态, 滤饼水分为 35.02%, 过滤速度为 0.301 mL/(s · cm²)。相对于对照组分, 水分降低了 1.03%, 过滤速度增加了

0.152 mL/(s · cm²)。Tween 85 的 HLB 测量值为 11.0, 由于 Tween 85 易溶于水, 又能保持自身疏水性, 在提高活性剂自身效果的同时, 也对煤泥颗粒表面疏水性提高有一定促进作用, 从而改善脱水效果。

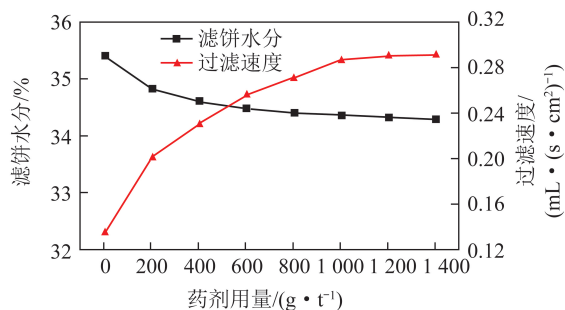


图 8 Tween 85 浓度对滤饼水分与过滤速度的影响

Fig.8 Effect of Tween 85 concentration on water content and filtration velocity of filter cake

2.3 组合药剂作用效果

无机盐类助滤剂 FeCl₃ 和 PAC 用量分别为 0.002 5 mol/l 和 0.5 g/L。表面活性剂类助滤剂油酸钠、DTAC 和 Tween 85 用量固定为 800 g/t。将 2 类药剂组合进行煤泥脱水试验, 结果如图 9 所示。

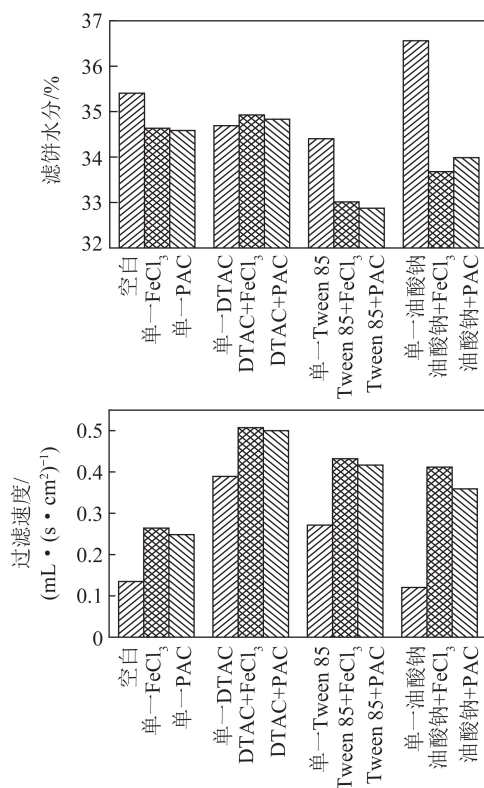


图 9 不同组合药剂作用时煤泥脱水效果

Fig.9 Dewatering performance of filter cake with the presence of different combinations of inorganic salts and surfactants

由图 9 可知, 与单一组分相比, DTAC 分别与 FeCl₃ 和 PAC 共同存在时, 滤饼水分分别增加 0.31%、0.23%, 过滤速度分别增加了 0.048 和

0.047 mL/(s · cm²)。Tween 85 分别与 FeCl₃ 和 PAC 共同存在时,滤饼水分分别降低 1.39%、1.52%,过滤速度分别增加 0.044 和 0.040 mL/(s · cm²)。油酸钠分别与 FeCl₃ 和 PAC 共同存在时,滤饼水分分别降低 2.79%、2.61%,过滤速度分别增加 0.026 和 0.021 mL/(s · cm²)。在多元组分中,Tween 85 组和油酸钠组脱水效果优于单一组分高,而 DTAC 组的滤饼水分有所增加。

2.4 脱水机理

2.4.1 溶液表面张力

药剂表面活性变化意味着药剂能否有效作用于煤泥颗粒表面,降低煤泥悬浮液的稳定性与分散性,增大煤泥颗粒表面疏水性,达到助滤脱水的目的。不同组合药剂作用时的煤泥脱水效果不同,原因在于无机盐离子的加入对表面活性剂的活性产生一定影响。无机盐对表面活性剂溶液表面张力的影响如图 10 所示。由图 10(a)可知,DTAC 溶液中,溶液的表面张力和临界胶束浓度在无机盐作用下有所增

加,FeCl₃比 PAC 增加幅度高。加入 FeCl₃和 PAC 可能会导致 DTAC 表面活性降低。原因在于 FeCl₃、PAC、DTAC 三者会水解产生阳离子,致使 DTAC 极性基团间的静电斥力增大,胶束形成难度增大,导致 DTAC 表面活性有所降低。由图 10(b)可知,Tween 85 溶液加入无机盐时,无论溶液的表面张力还是临界胶束浓度变化幅度均较小。因为 FeCl₃和 PAC 对 Tween 85 表面活性的影响不大。这可能是由于非离子表面活性剂分子不带电,盐离子的存在不影响自身在水溶液中形成胶束,从而导致 Tween 85 的表面活性保持不变。由图 10(c)可知,油酸钠溶液中加入无机盐时,溶液表面张力和临界胶束浓度显著下降,FeCl₃比 PAC 作用效果明显。分析可知,油酸钠的表面活性随着 FeCl₃和 PAC 的加入显著增强。原因可能是无机盐解离出的阳离子会与阴离子型表面活性剂所带负电荷发生电中和作用,降低了基团之间相互静电斥力,这对胶束的形成有促进作用,综合这些因素使得油酸钠的表面活性明显增强。

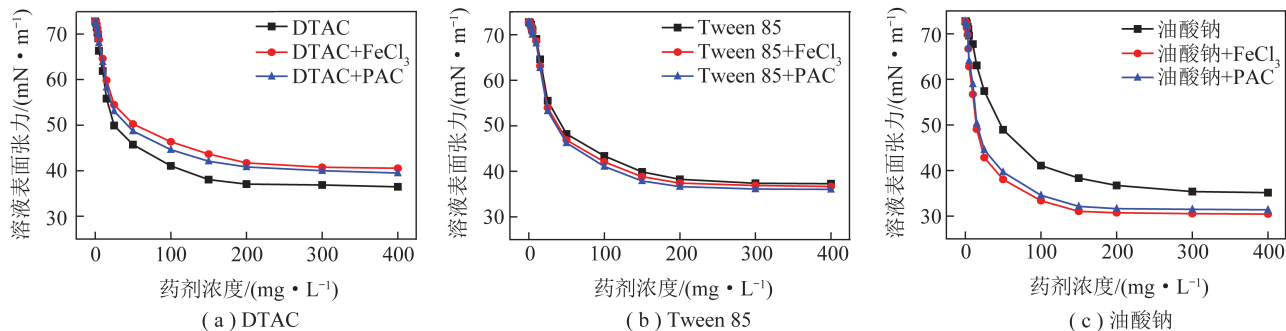


图 10 不同无机盐对各表面活性剂溶液表面张力的影响

Fig.10 Variations in surface tension of surfactant solutions with the presence of different inorganic salts

2.4.2 接触角

不同药剂作用下煤泥脱水效果可用其亲疏水性直接表示。煤泥的接触角越大,说明其疏水性越强,对应煤泥水脱水越容易进行。经过不同药剂作用后煤样的接触角如图 11 所示。可知煤样在无药剂和只有 FeCl₃、PAC 存在下的接触角分别为 33.7°、37.1° 和 38.3°,说明无机盐可小幅增大煤样接触角。DTAC、Tween 85 和油酸钠单独作用时,相应的接触角分别为 46.7°、50.6°、和 47.1°,说明表面活性剂对煤泥的接触角影响较明显,其中 Tween 85 效果最好。在多元组分中,只有 DTAC 组的煤样接触角较单独 DTAC 存在时有所降低,其他 2 组均显著增加,其中油酸钠组的增幅最大。因此无机盐对阴离子型、非离子型表面活性剂在低阶煤表面的吸附有促进作用,可进一步改善煤样疏水性。

2.4.3 FTIR

因 FeCl₃和 PAC 作用效果基本一致,本文仅探

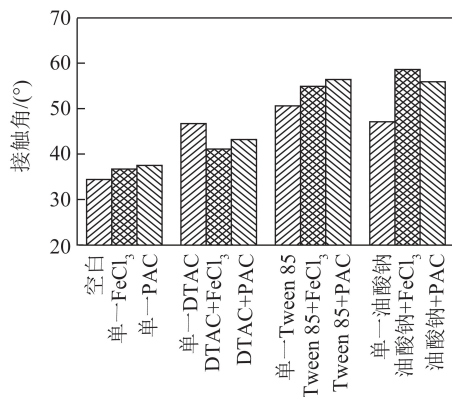


图 11 不同药剂作用下煤样接触角测试结果

Fig.11 Measured contact angle of coal samples under different reagent conditions

索了 FeCl₃与不同类型表面活性剂在煤样表面的吸附效果。煤样在 FeCl₃与表面活性剂共同作用情况下的红外光谱图如图 12 所示。

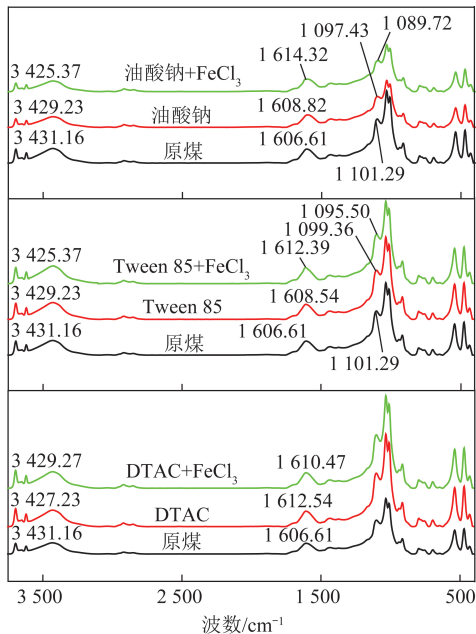


图 12 FeCl₃与表面活性剂协同处理后煤样红外光谱

Fig.12 FTIR spectrogram of coal sample after treatment by surfactants and FeCl₃

由图 12 可知,3431.16 cm⁻¹附近是由—OH 键引起的振动,1 606.61 cm⁻¹附近的特征峰是—C=O 引起的,1 033.78、1 101.29 cm⁻¹附近出现的特征峰可能是 Si—O—Si、Si—O—Al 的伸缩振动引起的,这些含氧官能团的存在表明试验煤样表面具有较强的亲水性,会对煤泥水过滤脱水产生不利影响。DTAC+FeCl₃混合组分在 1 101.29 和 1 606.61 cm⁻¹特征峰处的偏移量较其他混合组分减小,这说明 FeCl₃对 DTAC 与亲水基团的键合作用有一定抑制作用。与单一组分相比,Tween 85+FeCl₃作用下的煤样在特征峰 1 101.29、1 606.61 和 3 431.16 cm⁻¹处偏移量变化明显,表明 FeCl₃+Tween 85 共同作用下,煤样亲水区域覆盖更加充分。油酸钠对煤样改变的结果与 Tween 85 相似,但其在 1 606.61 和 3 431.16 cm⁻¹处偏移量要大,表明 FeCl₃改善阴离子型助滤效果比非离子型更为显著。

2.4.4 Zeta 电位

煤粒表面电位大小对煤泥水的稳态程度有较大影响。FeCl₃与不同类型表面活性剂协同作用下的煤样 Zeta 电位见表 1。

表 1 不同组合助滤剂存在下的煤泥 Zeta 电位

Table 1 Changes of Zeta in coal samples with different filter aids

样品	空白	DTAC+ FeCl ₃	Tween85+ FeCl ₃	油酸钠+ FeCl ₃
Zeta 电位/mV	-24.02	-1.35	-3.85	-6.37

由表 1 可知,不同组合药剂作用下,煤样表面的 Zeta 电位存在较大差异。其中,阳离子表面活性剂 DTAC 与 FeCl₃可使煤样 Zeta 电位发生正向移动,电负性降低。由于 Fe³⁺价态高,DTAC 阳离子价态低,大量 Fe³⁺可能会优先与煤颗粒作用,不利于 DTAC 的电离与在煤颗粒表面吸附,导致两者无法存在较好的协同作用。非离子表面活性剂 Tween 85+FeCl₃使 Zeta 电位向正方向发生移动,一方面,FeCl₃在水中可以电离出带正电的离子,在煤颗粒表面发生吸附时会中和一部分负电荷;另一方面,因为 Tween 85 本身不发生电离,但分子结构中含有较多的羟基,羟基能与煤颗粒表面带负电的含氧官能团发生氢键吸附,进而使煤粒表面的负电性有所降低,有利于两者协同作用取得较好的脱水效果。阴离子表面活性剂油酸钠+FeCl₃同样使 Zeta 电位向正方向移动。电负性降低,有利于极性油酸离子能够有效在其煤表面铺展,从而有较好的脱水效果。

3 结 论

1) 试验煤样的粒度细,高密度级含量高,在煤粒表面含有丰富的含氧官能团和矿物杂质基团(Si—O—Si、Si—O—Al 等),不利于煤泥脱水。

2) 选择单一组分 FeCl₃和 PAC 进行煤泥脱水时,过滤速度分别增加 0.129 和 0.113 mL/(s·cm²);滤饼水分有所降低,分别降低了 0.77% 和 0.82%。只选择表面活性剂作为助滤剂时,DTAC 和 Tween 85 可提高过滤速度 0.262 和 0.152 mL/(s·cm²),而油酸钠增幅较小;DTAC 和 Tween 85 降低滤饼水分效果显著,而油酸钠作用效果较弱。

3) 在混合组分中,非离子型 Tween 85 组滤饼水分分别降低 1.39%、1.52%,过滤速度增加了 0.044 和 0.040 mL/(s·cm²),阴离子型油酸钠组滤饼水分分别降低 2.88%、2.57%,过滤速度增加了 0.026 和 0.021 mL/(s·cm²),而阳离子型 DTAC 组的滤饼水分有所增加。在煤泥水中加入 FeCl₃和 PAC,对 Tween 85 的表面活性影响较小,DTAC 表面活性有所降低,但可使油酸钠表面活性大幅增加。

参考文献(References):

[1] 高淑玲,刘炯天. 低阶煤表面改性制备超净煤初探[J]. 煤炭技术,2004,23(9):68-70.
GAO Shuling, LIU Jiongtian, Preliminary study on preparation of ultra-clean coal by surface modification of low rank coal[J]. Coal Technology 2004,23(9):68-70.
[2] 陈建军,钟世刚. 低阶煤浮选工艺研究[J]. 洁净煤技术,2018,24(S2):78-81.

- CHEN Jianjun, ZHONG Shigang, Study on flotation technology of low rank coal[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(S2): 78-81.
- [3] 侯诗宇, 马力强, 白云鹏, 等. 细粒煤泥对粗粒煤泥浮选的抑制机理研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(8): 110-113.
- HOU Shiyu, MA Liqiang, BAI Yunpeng, et al. Inhibition mechanism of fine coal fractions on coarse coal flotation[J]. Coal Engineering, 2016, 48(8): 110-113.
- [4] 汪红生, 徐初阳, 樊忠跃, 等. 祁东矿选煤厂煤泥水处理系统优化改造[J]. 洁净煤技术, 2015, (4): 32-34.
- WANG Hongsheng, XU Chuyang, FAN Zhongyue, et al. Optimization of coal slime water processing system in Qidong coal preparation plant[J]. Clean Coal Technology, 2015(4): 32-34.
- [5] 周剑林, 王永刚, 黄鑫, 等. 低阶煤中含氧官能团分布的研究[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(2): 134-138.
- ZHOU Jianlin, WANG Yonggang, HUANG Xin, et al. Determination of O-containing functional groups distribution in low-rank coals by chemical titration[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(2): 134-138.
- [6] QU J, TAO X, HE H, et al. Synergistic effect of surfactants and a collector on the flotation of a low-rank coal[J]. Coal Preparation, 2015, 35(1): 14-24.
- [7] 彭陈亮, 闵凡飞, 赵晴, 等. 微细矿物颗粒表面水化膜研究现状及进展综述[J]. 矿物学报, 2012, 32(4): 515-522.
- PENG Chenliang, YAN Fanfei, ZHAO Qing, et al. Research status and progress of hydration film on the surface of fine mineral particles[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2012, 32(4): 515-522.
- [8] 胡鹏飞. 高灰细粒煤泥压滤中助滤剂的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- HU Pengfei. Study on filter aid in high-ash fine coal slime pressurized filtration technology[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015.
- [9] VENKATADRI R, KLINZING G, CHIANG S. Filter cake washing with chemical reagents[J]. Filtration and Separation, 1985, 22(3): 172-177.
- [10] 任真, 郭建国, 李玉霞, 等. 细粒煤脱水的实验研究[J]. 选煤技术, 2009(3): 7-10.
- REN Zhen, GUO Jianguo, LI Yuxia, et al. Experimental study on dewatering of fine coal[J]. Coal Preparation Technology, 2009(3): 7-10.
- [11] 李丽, 费德君, 武建勋, 等. 新型助滤剂的合成和对细粒煤助滤的应用研究[J]. 化学工程, 2009, 37(5): 75-78.
- LI Li, FEI Dejun, WU Jianxun, et al. Synthesis and application of a new-type copolymer for filter aids on fine clean coal[J]. Chemical Engineering, 2009, 37(5): 75-78.
- [12] 孙冬, 李志红, 谢克昌. 微乳液聚合合法合成复合型煤泥脱水助滤剂[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 645-648.
- SUN Dong, LI Zhihong, XIE Kechang. Synthesizing of compound filter aids for slimes dewatering through microemulsion polymerization[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 645-648.