

文章编号: 1001-3571 (2024) 03-0040-06

高效捕收剂强化内蒙古低阶煤浮选的试验研究

庞增瑞^{1,2}

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160; 2. 北矿化学科技(沧州)有限公司, 河北 沧州 061108)

摘要: 为促进内蒙古地区低阶煤资源的高效利用, 基于煤样的工业分析、元素分析、粒度及密度组成分析, 采用 X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱测试等对煤样的表面性质进行了表征, 并采用浮选试验、接触角测试、吸附测试对比研究了高效捕收剂的浮选效果及作用机理。结果表明: 煤样中矿物以高岭石为主, 且煤样表面存在多种亲水性含氧官能团, 如—OH, C=O, C—O 等, 同时煤粒表面还存在大量裂隙和孔隙, 这些均导致了煤样的可浮性较差; 使用高效浮选捕收剂 BK610, 当药剂用量为 1 kg/t 时, 浮选精煤产率为 65.35%、灰分为 13.58%, 相比使用常规捕收剂柴油(药剂用量为 3 kg/t 时, 浮选精煤产率为 60.82%、灰分为 13.37%), 不仅药剂用量大幅下降(约 66%), 而且浮选效果也有所提高; 当 BK610 用量为 1 kg/t、柴油用量为 3 kg/t 时, 前者作用后煤样的接触角更大(较柴油提高约 9°), 且药剂吸附率更高(较柴油提高约 4.75 个百分点), 因此高效捕收剂可更有效地提升煤样的浮选效果。研究结果可对低阶煤高效捕收剂的开发以及提高内蒙古地区低阶煤资源的利用效率起到一定的促进作用。

关键词: 低阶煤浮选; 高效捕收剂; 表面性质; 浮选试验; 接触角; 药剂用量; 吸附率

中图分类号: TD943⁺.1

文献标志码: A

Experimental study on intensified flotation of low-rank coal produced in Inner Mongolia region using highly effective collector

PANG Zengrui^{1,2}

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China; 2. BGRIMM Chemical Technology (CangZhou) Co. Ltd., Cangzhou 061108, China)

Abstract: In order to promote high-efficiency utilization of the low-rank coal resource in Inner Mongolia Autonomous region, based on proximate, ultimate, size and densimetric analysis, a study is conducted on surface properties of the coal by X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy examination, as well as on the effectiveness and mechanism of the high-efficiency collector through comparative flotation, contact angle and adsorption testing. As evidenced by study results, the minerals in the coal are predominately kaolinite, and on surface of the coal are different hydrophilic oxygen-containing functional groups, such as —OH, C=O, C—O, etc., plus a large amounts of fissures and pores — all unfavorable factors causing the poor flotability of the coal; with the use of the BK610 collector at a dosage of 1 kg/t, the yield and ash of flotation concentrate are 65.35% and 13.58%, respectively, a result much better than the case using the conventional collector diesel (at a dosage of 3 kg/t, the yield and ash of concentrate are 60.82% and 13.37%, respectively); compared with the use of diesel, the use of BK610 can lead to an improved flotation efficiency with drastically reduced consumption by 66%; when BK610 and diesel are used at a respective dosage of 1 kg/t and 3 kg/t, the use of the former can give rise to larger contact angle of coal and agent adsorption rate, which are 9° and 4.75 percentage points higher than

收稿日期: 2024-03-06 责任编辑: 邓明瑞 DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2024.03.007

作者简介: 庞增瑞(1996—), 男, 天津人, 助理工程师, 从事选煤浮选药剂开发工作。E-mail: pangzengrui@bgrimm.com, Tel: 18526723979.

引用格式: 庞增瑞. 高效捕收剂强化内蒙古低阶煤浮选的试验研究[J]. 选煤技术, 2024, 52(3): 40–45.

PANG Zengrui. Experimental study on intensified flotation of low-rank coal produced in Inner Mongolia region using highly effective collector[J]. Coal Preparation Technology, 2024, 52(3): 40–45.

the case of using the latter, well demonstrating the efficiency of BK610 in improvement of flotation performance. The study made in the paper contributes to the development of collectors for high-efficiency flotation of low-rank coal and enhancement of the rate of utilization of such coal products in Inner Mongolia district.

Keywords: flotation of low-rank coal; high-efficiency collector; surface property; flotation test; contact angle; dosage of collector; adsorption rate

我国煤种齐全, 其中低阶煤的储量最为丰富, 约占探明煤炭资源储量的57%^[1]左右。近年来, 低阶煤的消费占比不断上升, “双碳”目标下其可持续发展的清洁高效利用将变得尤为重要^[2-3]。

选煤是洁净煤技术的源头, 常用方法主要为重选和浮选。其中, 浮选主要用于细粒分选, 是目前细粒分选中最常用、最高效的分选方法。但对于低阶煤而言, 其表面含有大量含氧官能团, 且侧链多、孔隙度高, 天然可浮性往往较差^[4-5]; 而常规捕收剂由于难以有效吸附在低阶煤表面的亲水位点上, 或由于煤表面的多孔结构往往用量较大^[6-7], 致使低阶煤浮选效果差、经济性差。因此, 探索低阶煤高效浮选捕收剂成为了煤炭行业的关注热点。

关于低阶煤的高效浮选捕收剂, 广大学者大都着眼于利用非离子型或离子型表面活性剂与常规捕收剂的药剂复配研究。ZHANG等^[8]认为氢键是捕收剂吸附在亲水固体上的主要驱动力, 正十二烷基 β -D-麦芽糖苷($C_{12}G_2$)中乙氧基的醚键与煤表面—OH可形成氢键, 从而促进 $C_{12}G_2$ 的吸附。JIA等^[9]采用新型捕收剂浮选匹兹堡6号煤和8号煤, 发现非离子型表面活性剂(四氢呋喃酯)比十二烷基的浮选效果更好, 能够在保证精煤灰分和产率的情况下有效降低药剂用量。郭梦熊等^[10]发现阳离子型表面活性剂在煤表面吸附后, 煤表面正电位增加,

说明阳离子型表面活性剂同煤表面的负电位位点间存在静电吸附。LIU等^[11]研究发现十二烷基可在煤的疏水表面吸附, 而正戊酸可与煤表面的含氧基团吸附, 两种吸附协同作用降低了十二烷基在煤表面的迁移率, 增加了低阶煤表面的亲脂性和疏水性。

结合目前研究可以发现, 复配捕收剂有利于提高低阶煤的浮选效果并降低浮选的药剂用量^[12-14]。而对于内蒙古地区的低阶煤, 同样面临着常规捕收剂在煤粒表面难以有效吸附, 常规捕收剂用量大、浮选效果差等问题。因此, 研究以内蒙古哈尔乌素选煤厂的压滤煤泥为对象, 对其基本性质进行分析, 并对不同捕收剂作用下的浮选效果进行对比, 旨在选出更高效的低阶煤浮选药剂, 促进该地区低阶煤资源的高效利用。

1 试样及试验方法

1.1 试样及其基本性质

哈尔乌素选煤厂目前无浮选环节, 因此试验采用该选煤厂的压滤煤泥进行, 样品按MT/T 1034—2006《生产煤样采取方法》规定分时段采得, 具备代表性。

1.1.1 工业分析与元素分析

煤样按GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》进行工业分析, 同时采用Elementar Vario MACRO Cube型元素分析仪进行元素分析, 结果见表1。

表1 煤样工业分析和元素分析结果

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal

%

| 工业分析 | | | | 元素分析 | | | | |
|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| M_{ad} | A_{ad} | V_{ad} | FC_{ad} | C_{ad} | H_{ad} | N_{ad} | O_{ad} | $S_{t,d}$ |
| 3.43 | 21.02 | 26.31 | 49.23 | 59.78 | 3.06 | 1.08 | 13.89 | 0.38 |

由表1可知: 煤样灰分为21.02%, 属中灰煤; 挥发分含量为26.31%, 结合测得的黏结指数(3.41), 判断煤种为不黏煤; 煤样空气干燥基氧元素含量13.89%, 说明其含氧官能团较多, 可初步推断出该煤样的天然可浮性较差。

1.1.2 粒度组成

按GB/T 477—2008《煤炭筛分试验方法》规定对煤样进行全粒级湿法筛分, 试验结果见表2。

由表2可知: >0.25 mm粒级和<0.045 mm粒级的含量分别为22.53%和34.79%, 两粒级含量合计为57.32%, 而易浮选的中间粒级(0.25~0.045 mm)占比较小, 不利于浮选——较多的细粒煤泥可能导致消耗大量的浮选药剂, 其会降低浮选的选择性, 而粗粒级则不易被浮出; 随着粒度的降低, 各粒级的灰分逐渐增加, 其中<0.045 mm粒级的灰分较整体灰分高出9.20个百分点, 表明该煤样中含有较

多的高灰细泥，易发生细泥罩盖，致使浮选药剂不易有效吸附在煤粒表面，从而恶化浮选效果。整体来看，煤样的粒度组成不利于浮选。

1.1.3 密度组成

按 GB/T 478—2008《煤炭浮沉试验方法》规定进行浮沉试验，结果见表 3。

表 2 煤样筛分试验结果

Table 2 Screen analysis of coal

%

| 粒度/mm | 产率 | 灰分 | 筛上累计 | | 筛下累计 | |
|---------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | | 产率 | 灰分 | 产率 | 灰分 |
| > 0.25 | 22.53 | 11.98 | 22.53 | 11.98 | 100.00 | 20.90 |
| 0.25 ~ 0.125 | 21.61 | 15.78 | 44.14 | 13.84 | 77.47 | 23.49 |
| 0.125 ~ 0.074 | 12.34 | 17.23 | 56.48 | 14.58 | 55.86 | 26.48 |
| 0.074 ~ 0.045 | 8.73 | 25.12 | 65.21 | 15.99 | 43.52 | 29.10 |
| < 0.045 | 34.79 | 30.10 | 100.00 | 20.90 | 34.79 | 30.10 |
| 合计 | 100.00 | 20.90 | | | | |

表 3 煤样浮沉试验结果

Table 3 Float-and-sink analysis of coal

%

| 密度级/(g·cm ⁻³) | 产率 | 灰分 | 浮物累计 | | 沉物累计 | |
|---------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | | 产率 | 灰分 | 产率 | 灰分 |
| < 1.3 | 30.22 | 3.90 | 30.22 | 3.90 | 100.00 | 20.81 |
| 1.3 ~ 1.4 | 23.96 | 8.16 | 54.18 | 5.78 | 69.78 | 28.13 |
| 1.4 ~ 1.5 | 15.29 | 14.24 | 69.47 | 7.65 | 45.82 | 38.57 |
| 1.5 ~ 1.6 | 9.03 | 24.12 | 78.50 | 9.54 | 30.53 | 50.75 |
| 1.6 ~ 1.8 | 6.69 | 34.68 | 85.19 | 11.51 | 21.50 | 61.94 |
| > 1.8 | 14.81 | 74.25 | 100.00 | 20.81 | 14.81 | 74.25 |
| 合计 | 100.00 | 20.81 | | | | |

由表 3 可知：该煤样 < 1.4 g/cm³ 密度级的产率为 54.18%，灰分为 5.78%，说明该煤样低密度级含量较多，且内灰较低；1.4 ~ 1.6 g/cm³ 密度级的产率为 24.32%，灰分为 17.91%，说明煤样中连生体较多，对浮选过程不利。

1.2 试验方法

研究首先通过 X 射线衍射、X 射线荧光光谱分析等现代分析测试手段进一步明确煤样的浮选相关性质，揭示煤样天然可浮性差的根源；而后通过浮选试验直接探寻高效捕收剂对煤样浮选的强化效果；最后利用接触角及吸附测试对高效捕收剂强化浮选的机理进行表征。过程中采用的试验方法简要介绍如下。

1.2.1 浮选试验

试验按 GB/T 4757—2013《煤粉（泥）实验室单元浮选试验方法》规定进行，固定试验条件为：浮选槽容积为 1 L，矿浆温度为 20 ℃，矿浆浓度为 100 g/L，浮选机转速为 1 800 r/min，浮选时间为 3 min。捕收剂为高效捕收剂 BK610 和常规捕收剂柴油，起泡剂为仲辛醇，油比为 5 : 1。采用浮选精煤产率和灰分作为浮选效果的评价指标。

1.2.2 接触角测试

将 5 g 煤样置于磁力搅拌器中，加水配置矿浆浓度为 100 g/L；按照浮选药剂用量添加捕收剂，搅拌 3 min 后过滤，而后在 40 ℃ 下低温烘干；而后将煤样粒度研磨至 0.074 mm 以下并进行压片，由 JY-82B Kruss DSA 型测角仪测试接触角。药剂作用前的煤样，在上述过程中去掉添加药剂的环节。

1.2.3 吸附测试

利用紫外分光光度计对煤样表面药剂的吸附进行测试。测试前，需先确定所测样品对应的特征波长，然后在特定波长下进行。测试采用标准曲线法。测试过程：取 5 g 煤样和 50 mL 水加入磁力搅拌器，而后按照浮选试验中的药剂用量向矿浆中添加捕收剂并搅拌 3 min；之后对矿浆进行离心，取离心的上清液进行吸光度的检测，进而计算吸附率（ η ，单位为 %），计算公式为： $\eta = \Gamma/\Gamma_0 = (C_0 - C) \cdot V / (C_0 \cdot V)$ ，式中： Γ 为捕收剂在单位质量煤样表面的吸附量，mg； Γ_0 为矿浆中添加的捕收剂量，mg； C_0 为与煤样作用前捕收剂的溶液初始浓度，mg/L； C 为与煤样作用后捕收剂溶液的浓度，mg/L； V 为矿浆体积，L。

2 结果与分析

2.1 煤样表面性质分析

2.1.1 X 射线衍射测试

采用广角测试模式, 范围为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 扫描速率为 $2 (^{\circ})/\text{min}$, 测试得到的煤样 X 射线衍射图谱如图 1 所示。

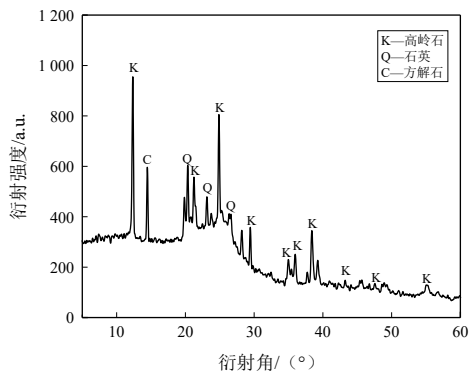


图 1 煤样 X 射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction analysis of coal

由图 1 可知: 煤样中矿物以高岭石为主, 伴有较多石英及少量方解石; 高岭石为黏土矿物, 遇水易泥化, 且易罩盖在煤粒表面, 从而使煤粒可浮性降低, 并降低浮选过程选择性、恶化浮选效果、增加浮选药剂用量。

2.1.2 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 测试

检测时红外光谱仪以优于 0.4 cm^{-1} 的分辨率和优于 0.01 cm^{-1} 波数的精度对样品进行扫描。煤样的 FTIR 测试结果如图 2 所示。

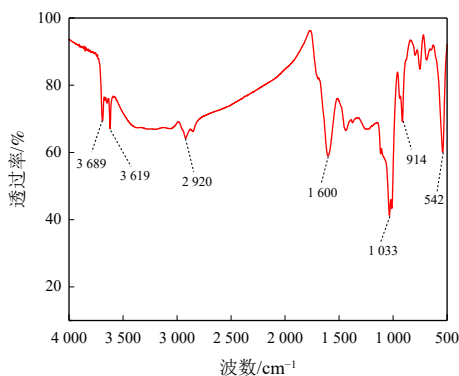


图 2 煤样 FTIR 图谱

Fig. 2 FTIR pattern of coal

图 2 中: 波数在 $3800 \sim 3600 \text{ cm}^{-1}$ 之间的吸收峰对应官能团为游离的 $-\text{OH}$; 波数为 2950 cm^{-1} 的吸收峰对应官能团为 $-\text{CH}_3$ 或羟基-氨基; 波数在 $2920 \sim 2860 \text{ cm}^{-1}$ 之间的吸收峰, 对应的官能团为环烷烃上甲基; 波数 1600 cm^{-1} 处的吸收峰对应

官能团为具有 $-\text{O}-$ 取代的芳烃或与氢键缔合的 $\text{C}=\text{O}$; 波数在 $1050 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 之间的吸收峰由芳香醚键伸缩振动引起; 波数在 $1000 \sim 750 \text{ cm}^{-1}$ 之间的吸收峰由 $\text{S}-\text{O}$ 键伸缩振动引起; 波数 542 cm^{-1} 处的吸收峰对应的官能团为芳烃双硫醚 $-\text{S}-\text{S}-$ [15]。结合上述分析, 可以发现煤样表面存在多种亲水性含氧官能团 ($-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}$ 等), 这类亲水性基团在浮选过程中会与水分子在煤样表面形成致密的水化膜, 从而阻碍浮选药剂在煤粒表面的吸附, 影响浮选效果。

2.1.3 X 射线能谱分析

为研究煤样表面各元素的化合态, 采用 X 射线能谱分析方法对煤样进行测试, 绘制出的煤样 X 射线宽扫能谱如图 3 所示。根据图 3 中峰面积计算出煤样表面化学元素的相对含量, 结果见表 4。

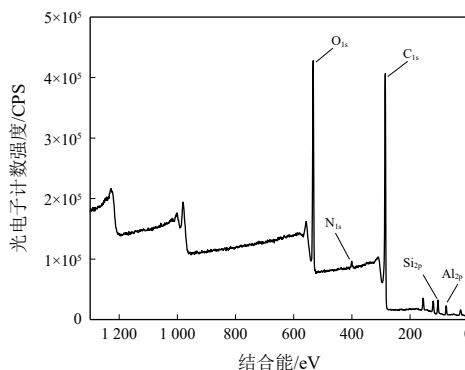


图 3 煤样 X 射线宽扫能谱图

Fig. 3 X-ray wide scanned energy spectrum of coal sample

表 4 煤样表面化学元素相对含量

Table 4 Relative contents of chemical elements on coal surface

| 元素 | C_{1s} | O_{1s} | N_{1s} | Si_{2p} | Al_{2p} |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 含量 | 55.12 | 23.93 | 1.66 | 3.7 | 3.82 |

由图 3 可以看出, 图谱中存在 C_{1s} , O_{1s} , N_{1s} , Si_{2p} , Al_{2p} 等吸收峰, 且 C_{1s} 和 O_{1s} 吸收峰较强, 其余元素的吸收峰较弱, 说明该煤样表面以 C、O 元素为主。表 4 中也显示煤样表面 C 元素和 O 元素的含量更高, 二者相对含量分别为 55.12% 和 23.93%; 其中, O 元素含量较高意味着煤样表面含有较多的含氧官能团, 会降低煤样表面的疏水性, 不利于浮选。

为进一步分析煤样表面的官能团, 借助 XPS peak 软件对 C_{1s} 吸收峰进行分峰拟合, 结果如图 4 所示。由图 4 中的峰面积可以计算出各类含 C 基团的相对含量, 具体见表 5。

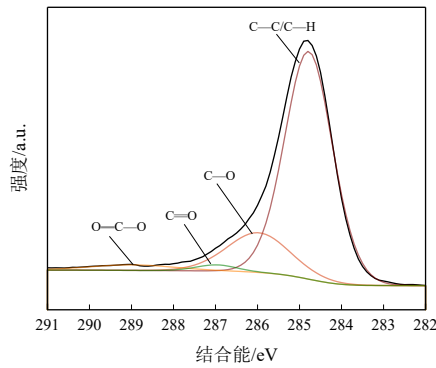


图 4 煤样的 X 射线能谱 C_{1s} 分峰拟合图

Fig. 4 C_{1s} split-peak fitting of X-ray energy spectra of coal sample

表 5 煤样表面官能团相对含量

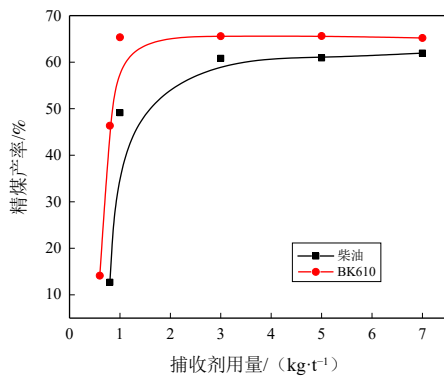
Table 5 Relative contents of functional groups on coal surface

| 官能团种类 | C—C/C—H | C—O | C=O | O=C—O |
|-------|---------|-------|------|-------|
| 含量 | 77.90 | 16.37 | 3.82 | 1.92 |

由图 4 和表 5 可知，煤样表面官能团以 C—C/C—H 和 C—O 为主，其中 C—C/C—H 官能团的相对含量为 77.90%，C—O 相对含量为 16.37%，除此之外还存在较多强极性的 C=O 和 O=C—O，不利于浮选。

2.1.4 扫描电镜形貌分析

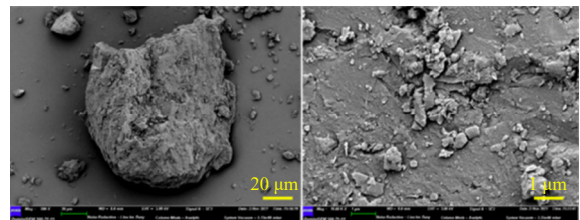
为了研究该低阶煤表面微观形貌，对煤样采



(a) 精煤产率-捕收剂用量

用扫描电镜测试，结果如图 5 所示。

由图 5 中可知：煤粒表面比较粗糙，存在大量裂隙和孔隙，使得捕收剂易吸附于这些裂隙中，从而增加药剂用量；此外，煤样表面附着有很多较亮的细小颗粒，这些细小颗粒为煤样表面附着的细粒黏土矿物，这使得煤样的疏水性变差，并可降低气泡与捕收剂在煤粒表面黏附的效率，从而恶化浮选效果。



(a) 放大 500 倍

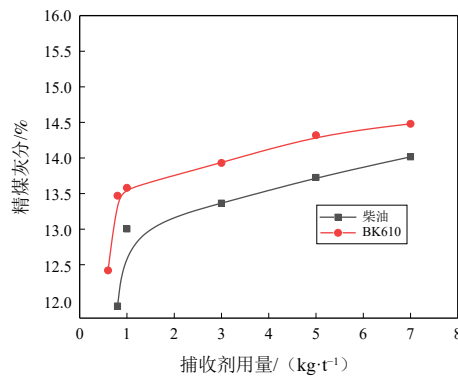
(b) 放大 5 000 倍

图 5 煤样表面微观形貌

Fig. 5 Macroscopic pattern of coal surface

2.2 高效捕收剂强化浮选试验

试验目的是对比常规捕收剂柴油和高效捕收剂 BK610 对低阶煤的浮选效果。BK610 捕收剂为浅黄色透明液体，闭口闪点高于 80 ℃，凝点为 -14 ℃。芳烃含量低于 0.5%，无刺激性气味，安全环保。试验变量为捕收剂用量，试验结果如图 6 所示。



(b) 精煤灰分-捕收剂用量

图 6 不同药剂的浮选效果对比

Fig. 6 Comparison of effectiveness of different collectors

该选煤厂要求精煤灰分为 13.5%，由图 6 可知：柴油为捕收剂，用量达 3 kg/t 时才可以达到较佳的浮选效果，此时精煤产率为 60.82%、灰分为 13.37%；而使用 BK610 作为捕收剂，用量仅为 1 kg/t 时就可超过柴油的效果，此时精煤产率为 65.35%、灰分为 13.58%，相较柴油此时精煤产率提高了 4.53 个百分点，可燃体回收率提高了 5.87 个百分点。由此可以看出 BK610 作为捕收剂对低阶煤浮选指标有了显著提升，药剂用量也有了明显降低（降幅约 66%）。

2.3 接触角测试

采用不同浮选药剂对煤样进行处理，捕收剂用量与浮选试验的最佳条件保持一致，即柴油用量为 3 kg/t、BK610 用量为 1 kg/t，测定药剂作用前后煤样的接触角，结果如图 7 所示。

由图 7 可知：未与捕收剂作用的煤样接触角为 49.81°，疏水性较弱；经柴油处理后煤样的接触角为 60.32°，疏水性增强；经 BK610 处理后煤样的接触角为 69.42°，接触角进一步增加。由此可以看

出, 柴油及BK610与煤样作用后均可提高煤样表面的疏水性, 而BK610提高的幅度更大。

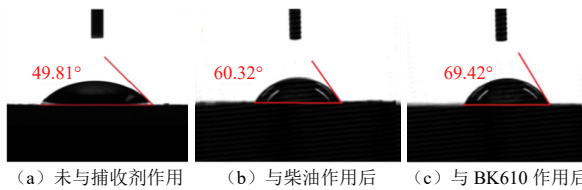


图7 药剂作用前后煤样的接触角

Fig. 7 Comparison of changes of coal contact angle before and after the collectors take effect

2.4 吸附测试

不同药剂用量下, 药剂在煤粒表面吸附的情况也不尽相同, 煤粒表面疏水性也会有不同程度地改变, 从而影响浮选效果。采用紫外分光光度计测定捕收剂在煤样表面的吸附情况, 工作波长采用267 nm。此条件下, 吸附测试结果见表6。

表6 不同药剂用量下煤样表面的药剂吸附率

Table 6 Rates of adsorption of collectors onto coal surface at different dosages of collectors

| 药剂种类 | 药剂用量/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$) | 吸附率/% |
|-------|--|-------|
| BK610 | 0.6 | 43.06 |
| | 0.8 | 51.88 |
| | 1.0 | 64.89 |
| | 3.0 | 65.11 |
| | 5.0 | 65.24 |
| 柴油 | 0.8 | 41.52 |
| | 1.0 | 53.69 |
| | 3.0 | 60.14 |
| | 5.0 | 60.48 |

由表6可知: 较之柴油, BK610在煤样表面的吸附率明显更高(尤其在低药量时), 前者用量为3 kg/t、后者用量为1 kg/t时, BK610的吸附率较前者提高了4.57个百分点, 这也与浮选试验结果相符。综上所述, BK610在该低阶煤浮选上的应用有较大的潜力, 可提升资源的综合利用率。

3 结论

(1) 煤样粒度组成呈“哑铃式”结构; 且连生体较多, 解离不充分; 煤样表面存在较多亲水性含水官能团, 细粒黏土矿物附着在其表面; 以上原因导致了该煤样可浮选性较差。

(2) BK610用量(1 kg/t)仅为柴油用量(3 kg/t)的33%时即可达到指标要求, 且精煤产率提高了4.53个百分点, 可燃体回收率提高了5.87个百分点, 效果明显更优。

(3) BK610与该低阶煤表面发生作用后, 显

著提高了煤表面的疏水性, 增强了煤的可浮性, 从而提升了浮选效果; 吸附测试进一步证实了BK610在该低阶煤表面的优异表现, 其可以在煤粒表面更有效地吸附, 形成稳定的吸附层, 使煤样疏水性增强, 从而实现浮选指标的提升。

参考文献:

- [1] 王慧, 杨天敏. 我国煤炭清洁高效利用现状及发展建议[J]. 能源, 2023(3): 64-69.
- [2] 庄贵阳. 我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J]. 人民论坛, 2021(18): 50-53.
- [3] 王孝炯, 赵彦飞, 张潮. 面向“碳达峰、碳中和”的2035年中国生态环境技术预见研究——基于德尔菲调查[J]. 科学学与科学技术管理, 2022, 43(12): 36-45.
- [4] 解维伟, 别丽娟, 徐晓航, 等. 红星河煤泥浮选表面活性剂促进机理研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(10): 75-80.
- [5] 代业滨. 复配捕收剂对龙王沟长焰煤的浮选强化试验研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(9): 160-164.
- [6] WEN B, XIA W, SOKOLOVIC J M. Recent advances in effective collectors for enhancing the flotation of low rank/oxidized coals[J]. *Powder Technology*, 2017, 319: 1-11.
- [7] 屈进州, 罗畅, 李朋玉, 等. 低阶煤浮选捕收剂及其作用机理研究进展[J]. 金属矿山, 2023(8): 28-35.
- [8] ZHANG L, SOMASUNDARAN P, MIELCZARSKI J, et al. Adsorption Mechanism of n-dodecyl- β -D-maltoside on Alumina[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, 256(1): 16-22.
- [9] JIA R, HARRIS G H, FUERSTENAU D W. An improved class of universal collectors for the flotation of oxidized and/or low-rank coal[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, 58(1-4): 99-118.
- [10] 郭梦熊, 霍卫东, 安征, 等. 不同挥发分煤的浮选理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 1999(1): 50-52.
- [11] LIU Z, XIA Y, LAI Q, et al. Adsorption behavior of mixed dodecane/n-valeric acid collectors on low-rank coal surface: Experimental and molecular dynamics simulation study[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 583: 123840.
- [12] 任聪, 樊民强, 李志红, 等. 复配药剂浮选低阶煤泥的效能研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S1): 242-247.
- [13] 郭凯, 张国富, 张国华, 等. 复配煤基费托合成油与传统烃类油浮选低阶煤泥的对比研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(6): 95-99.
- [14] 刘凯歌, 李钰炳, 李志红. Span80协同煤油强化内蒙古低阶煤浮选的试验研究[J]. 山西焦煤科技, 2023, 47(9): 4-8.
- [15] NAEENI S K, PAKZAD L. Droplet size distribution and mixing hydrodynamics in a liquid-liquid stirred tank by CFD modeling[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 120: 103100.