

煤油/油酸甲酯复配捕收剂浮选南梁煤矿煤泥的试验研究

陈嘉亮, 朱文耀, 常梦洁, 李会录, 刘俊

西安科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710054

中图分类号: TD923.13; TD94 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)02-0020-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.02.003

摘要 陕西省南梁煤矿现有浮选生产药剂成本较高, 占选厂总成本的 84.5%; 另外试验发现 GF、FO 等复配捕收剂能一定程度上提高浮选效率, 但其药剂用量仍然较高。为了进一步提高浮选效率、降低药剂用量、节约成本、提高经济效益, 系统研究了复配捕收剂对煤泥浮选效果。以仲辛醇为起泡剂, 煤油分别与正辛胺、正癸酸、十二烷、油酸甲酯复配作为捕收剂, 对粒度大于 0.038 5 mm 的煤泥进行浮选试验。结果表明, 油酸甲酯与煤油质量比为 1 : 6 时, 浮选结果最佳, 精煤产率由煤油的 43.14% 提高到复配捕收剂的 61.70%, 对应的灰分由 9.50% 变为 9.61%, 可燃体回收率由 42.98% 提高到 61.48%。煤油/油酸甲酯复配捕收剂优异的浮选效果可归因于油酸甲酯含氧酯基与煤分子上的含氧官能团作用时较高的润湿热和吸附能、较低的前线轨道能隙, 更易吸附在煤表面, 提高煤的疏水性。X 射线衍射、红外光谱和扫描电镜测试结果表明, 与煤泥相比, 浮选后的精煤中灰分明显减少, 只有少量细泥颗粒附着于煤颗粒表面, 说明油酸甲酯复配与煤油是一种理想的煤泥浮选捕收剂。

关键词 煤泥; 浮选; 复配捕收剂; 煤油

0 引言

近年来, 随着煤炭开采浮选量的不断提高, 煤泥量急剧增加, 同时由于井下机械化综采技术的提高、原煤性质变化、矸石泥化现象明显增加等因素, 造成煤泥产量大幅增加。以本文分选的南梁煤矿煤泥为例, 该煤矿煤泥产量在 11% 左右, 由于洗选煤泥外在水分高、粒度细、灰分较高, 导致其发热量较低。部分低灰煤泥直接掺配到电煤中出售, 高灰煤泥直接废弃或出售给发电厂。直接废弃会导致土地侵占、土壤污染等环境问题。南梁矿区入洗煤种主要为长焰煤, 可浮性差、浮选速度慢, 但并非不可选煤泥。其中细煤泥水分在 30% 左右、灰分在 40% 左右, 该部分低质量的副产品处理比较困难^[1]。泡沫浮选是选煤厂一种通用的选矿工艺, 可用于分选小于 0.5 mm 的细粒煤^[2]。煤和黏土是煤泥的主要成分, 煤和黏土分别具有疏水和亲水的表面, 浮选过程中, 疏水的细煤颗粒会选择性地吸附到气泡表面得以与高灰颗粒中分离开来^[3-4]。浮选效果主要与煤泥性质、浮选药剂、浮选工艺、浮选设备、操作过程等因素有关^[5-6]。针对特定的选煤厂, 浮选药剂是提高煤泥浮选效率和降低成本的关键^[7]。

煤油和轻柴油是煤泥浮选常用的捕收剂, 单独使用时存在浮选药剂消耗量大、精煤灰分高等缺点, 将煤油与其他表面活性剂复配是降低药剂用量、改善浮选效果的重要举措^[8]。王力强等人将油酸与煤油以 15 : 85 的质量比复配用于浮选某炼焦煤选煤厂煤泥, 可得到产率 55.97%、灰分 11.79% 的合格精煤, 其尾煤灰分接近 50%^[8]。王晖等人对正十二酸和柴油复配捕收剂浮选朔州某选煤厂煤泥的研究表明, 当捕收剂中正十二酸质量分数由零增加到 25% 时, 浮选精煤产率从 22.80% 提高到 61.66%, 可燃体回收率和浮选完善度也大幅增加^[9]。王东岳等人以神华神东集团内蒙古鄂尔多斯选煤厂煤泥为研究对象, 研究了胺类和羧酸类复配药剂中碳链长度对低阶煤浮选的影响, 结果表明, 随着碳链的增长, 胺类复配药剂的捕收性变差, 而羧酸类复配药剂的浮选效果先变好后变差, 其中正癸酸复配药剂的捕收性和选择性最好, 在药剂用量 2 kg/t 时, 正癸酸复配药剂精煤回收率为 56% 左右^[10]。任聪等人研究了煤油与酯类或非离子表面活性剂复配药剂对葫芦素不黏煤浮选效果的影响, 与单纯煤油相比, 复配药剂在矿浆中具有更小的分散粒径和更大的润湿热, 更易吸附到煤表面进行浮选, 复配药剂浮

收稿日期: 2022-07-02

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金(2021JM-386, 2022JM-072)

作者简介: 陈嘉亮(1996—), 男, 甘肃甘谷人, 硕士生, 煤泥浮选及综合利用, E-mail: 1402428596@qq.com。

通信作者: 刘俊, 男, 副教授, E-mail: jun_liu@xust.edu.cn。

选的精煤产率均优于煤油,其最高的精煤产率可以达到73.5%^[11]。

陕西省榆林市南梁煤矿选煤厂现有配套煤泥浮选生产线,根据测算吨煤泥创造的经济效益可达64元,项目每年可获得经济效益约2304万元^[12],目前浮选生产成本中,药剂成本占总成本的84.5%,因此,采用更加高效的药剂或降低药剂用量对节约成本、提高经济效益具有重要的意义。此外,有研究表明,对于南梁选煤厂煤泥,采用柴油捕收剂时药剂消耗量大,经济性差,研究者通过试验发现机油(GF)、新型浮选药剂(FO)等复配捕收剂能一定程度上提高浮选效率,但其药剂用量仍然较高。基于上述问题,为了进一步提高浮选效率、降低药剂用量、节约成本,本研究以南梁煤矿煤泥为研究对象,以仲辛醇为起泡剂,将煤油分别与正辛胺、正癸酸、十二烷、油酸甲酯复配为捕收剂,寻找最佳药剂配比,并对浮选前煤泥和浮选后精煤的形貌、组成和表面润湿性能进行表征,深入探讨不同复配药剂及比例对浮选效果的影响机理,为今后的低成本浮选提供试验依据。

1 试验样品与方法

1.1 试验样品

试验煤泥样品来自陕西省榆林市南梁煤矿选煤厂,按照中华人民共和国国家标准《煤的工业分析方法》对煤泥进行分析,结果见表1。按照中华人民共和国国家标准《煤炭筛分试验方法》对煤泥进行筛分,结果见表2。

表1 煤泥工业分析 /%

M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}
4.8	56.06	12.44	26.70

注: M_{ad} 、 A_{ad} 、 V_{ad} 、 FC_{ad} 分别代表空气干燥煤样的水分含量、干燥煤样灰分含量、干燥煤样的挥发分含量、煤样固定碳含量。

表2 煤泥筛分试验结果

Table 2 Results of small screening test of slime

粒级/mm	质量/g	产率/%	灰分/%	筛上累积/%	
				产率	灰分
+0.500	9.96	4.98	50.27	4.98	50.27
0.500~0.25	24.48	12.24	44.87	17.22	43.40
0.25~0.125	20.07	10.04	32.50	27.26	42.36
0.125~0.075	14.09	7.05	29.10	34.30	40.90
0.075~0.045	12.36	6.18	37.76	40.48	37.82
-0.045	119.04	59.52	66.19	100.00	56.06
合计	200	100.00	56.06		

由表1可知,选煤厂煤泥的空气干燥基水分分为4.8%,灰分为56.06%,挥发分含量为12.44%,固定碳含量为26.70%。由表2可知,煤泥中粒径大于0.5 mm的粒级占比较少,属于正常混杂,主要的粒级集中在0.045 mm以下,占59.52%,灰分是66.19%,说明煤泥泥化现象严重^[13],试验过程中采用孔径为0.0385 mm的标准筛对煤泥进行脱泥处理。

1.2 试验药剂与设备

本试验使用的起泡剂为仲辛醇,捕收剂有煤油(工业纯)、正辛胺、正癸酸、十二烷、油酸甲酯,均为分析纯,购于国药集团。浮选设备为XFD-1.0L单槽浮选机(吉林省探矿机械厂),使用KSL-1100X马弗炉(合肥科晶)测定灰分,样品表征使用了D6000 XRD分析仪(日本岛津)、Bruker ALPHA红外光谱仪(布鲁克公司)和S-4800扫描电镜(日本日立)。

1.3 试验方法

1.3.1 浮选效果评定

(1)可燃体回收率:可燃体回收率是指浮选后精煤中可燃体占浮选前煤泥中可燃体的质量分数,它是评定浮选效果的重要指标,按照中华人民共和国煤炭行业标准《煤炭可浮性评定方法》(MT 259—91)具体计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{\gamma_j(100 - A_j)}{(100 - A_y)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_j 、 A_y 分别是浮选后精煤与煤泥的灰分,%; γ_j 是浮选精煤产率,%。

(2)浮选完善指标:在确定最佳药剂制度和浮选工艺等条件时,可使用浮选完善指标评价某一给定的煤样,计算公式如下^[8]:

$$\eta_{wf} = \frac{100\gamma_j}{100 - A_y} \times \frac{A_y - A_j}{A_y} \times 100\% \quad (2)$$

式中: γ_j 是浮选精煤产率,%; A_y 、 A_j 分别是入料煤泥灰分和浮选精煤灰分,%。

1.3.2 浮选试验

以仲辛醇为起泡剂,煤油(kerosene)分别与正辛胺(n-octylamine)、正癸酸(n-decanoic acid)、十二烷(dodecane)、油酸甲酯(methyl oleate)复配为捕收剂。严格参照《煤粉(泥)实验室单元浮选试验方法》(GB/T 4757—2001)进行浮选试验。具体浮选参数如下:捕收剂用量1000 g/t,起泡剂浓度200 g/t,矿浆浓度1000 g/L,单位充气0.25 m³/(m²·min),叶轮转速1800 r/min,刮板速度14 r/min。浮选试验时,取适量自来水以及相应质量的煤泥样(粒径>0.0385 mm)加入浮选槽配制矿浆,搅拌2 min后加入复配捕收剂,继续搅拌1 min后加入起泡剂,10 s后启动充气装置并

打开刮板刮泡 3 min。试验结束后将精煤和尾煤抽滤，烘干称重，检测灰分，计算可燃体回收率(ϵ)和浮选完善指标(η_{wf})。

2 结果与分析

2.1 捕收剂复配质量比对浮选结果的影响

对于每一种复配捕收剂均使用了 0 : 1、1 : 6、1 : 1、6 : 1 和 1 : 0 五种质量比进行浮选试验，计算了浮选产率、浮选精煤灰分、可燃体回收率和浮选完善指标评价不同复配捕收剂的浮选结果。图 1 是正辛胺和煤油复配捕收剂的浮选结果，可以看出，以单纯煤油为捕收剂浮选的精煤产率和灰分分别为 43.14% 和 9.5%。与纯煤油相比，以添加正辛胺的复配捕收剂进行浮选时，精煤产率降低，灰分升高，这是因为正辛胺是短链阳离子胺，胺基上的 N 原子质子化后与煤泥中的高岭石等无机矿物作用力较强，矿浆中的矿物杂质黏附在气泡表面进入精煤层，从而导致精煤灰分升高^[4]。因此，正辛胺与煤油复配不适用于南梁煤矿煤泥浮选。

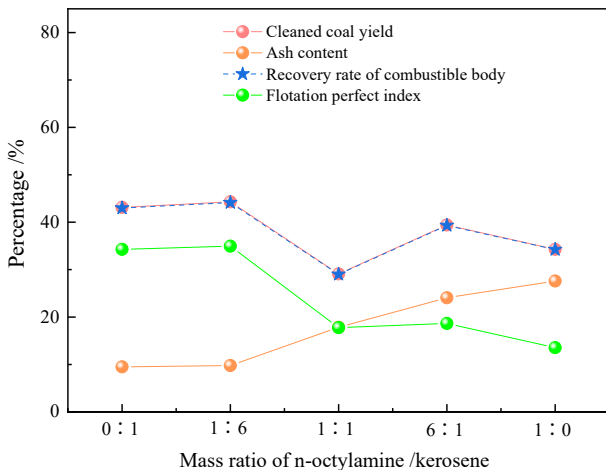


图 1 不同正辛胺和煤油复配质量比的浮选结果
Fig. 1 Flotation test results by different ratios of n-octylamine to kerosene

图 2 是正癸酸和煤油复配捕收剂的浮选结果，以正癸酸和煤油作为复配捕收剂时，精煤产率先增大后减小，正癸酸与煤油质量比为 1 : 1 时产率最高为 59.33%，对应的灰分为 14.14%。与纯煤油捕收剂相比，精煤产率提高的同时，灰分也随之增加。随着正癸酸体积占比的继续增大，浮选效率迅速降低，这是因为正癸酸的熔点较低，不溶于水，当正癸酸与煤油的质量比为 1 : 6，即正癸酸质量占比远大于煤油时，矿浆中的正癸酸会有小部分凝固浮于矿浆表面，从而导致用于捕收作用的有效正癸酸减少，浮选效率和精煤产率出现急剧下降。

由图 3 可知，以十二烷和煤油复配作为捕收剂时，十二烷的加入不会明显影响精煤的产率，这是由于煤

油由碳原子数为 $C_{11} \sim C_{17}$ 的高沸点饱和烃类组成，而十二烷与煤油化学性质相近，所以本质上不会显著改变捕收剂的性质和浮选效果。

由图 4 可知，以油酸甲酯和煤油的复配作为捕收

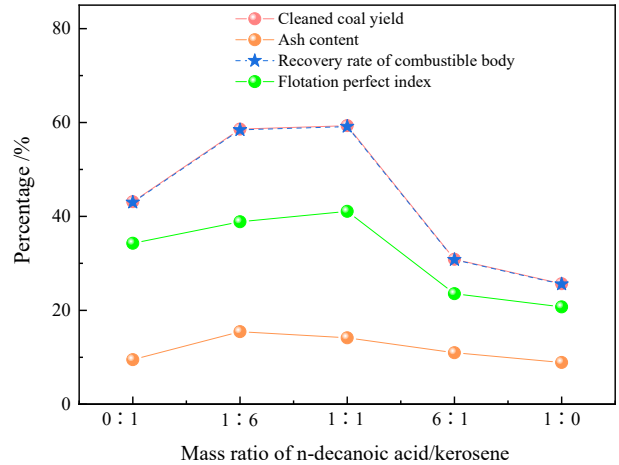


图 2 不同正癸酸和煤油复配质量比的浮选结果
Fig. 2 Flotation test results by different ratios of n-decanoc acid to kerosene

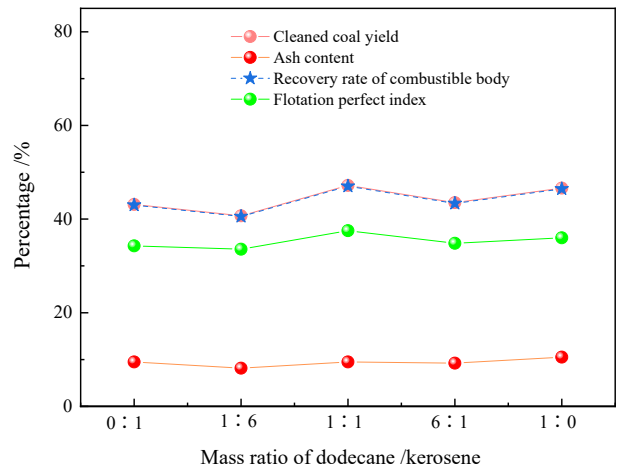


图 3 不同十二烷和煤油复配质量比的浮选结果
Fig. 3 Flotation test results by different ratios of dodecane to kerosene

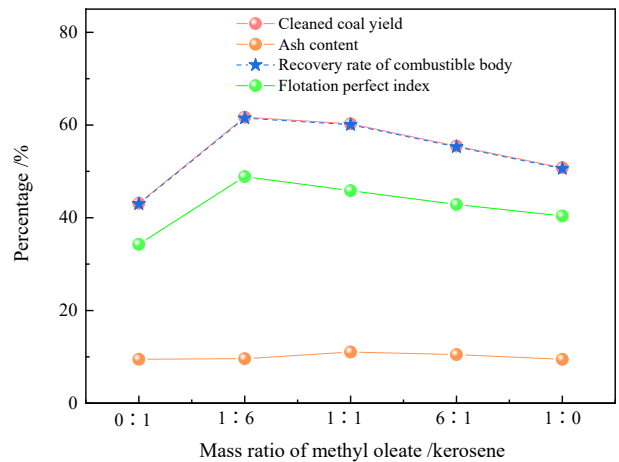


图 4 不同油酸甲酯和煤油复配质量比的浮选结果
Fig. 4 Flotation test results by different ratios of methyl oleate to kerosene

剂时,不同配比复配药剂的浮选效果均好于纯煤油捕收剂的浮选效果。随着油酸甲酯质量占比的增加,精煤产率先增大后减小,在复配质量比为 1 : 6 时,产率最高为 61.7%。油酸甲酯用量的继续增加会使精煤产率略微下降,用单一油酸甲酯浮选的精煤产率为 43.14%,仍优于纯煤油的浮选产率。精煤灰分随着捕收剂复配比例的变化并无明显变化,约为 8.5%,整体灰分的含量较低。

综合图 1~图 4 的浮选结果,在不同药剂与煤油组成的复配捕收剂中,油酸甲酯与煤油的复配质量比为 1 : 6 时,具有最优的浮选效果。不同复配捕收剂的可燃体回收率和浮选完善指标变化趋势与精煤产率和灰分变化一致。油酸甲酯复配捕收剂效果更优主要是因为含氧量高的煤需要特定数量的油酸甲酯掩蔽其表面的含氧官能团,从而使煤表面变得疏水,提高煤泥浮选效果。油酸甲酯与煤作用时,油酸甲酯中酯基氧与煤表面的含氧基团(-OH、C=O 等)形成氢键^[15],且具有较高的润湿性和吸附能、较低的前线轨道能隙,更易吸附在煤表面,使煤表面更加疏水,从而提高煤泥浮选效果^[16]。

为了进一步分析和深入探讨浮选过程,我们对浮选前的煤泥和以油酸甲酯与煤油(质量比 1 : 6)为复配捕收剂浮选后精煤样品的组成、结构及表面浸润性能进行了表征。图 5a、b 是煤泥样品的 SEM 照片,可以看到煤泥整体粒径较小,煤分为尺寸较大的不规则颗粒,在煤颗粒表面黏附有大量层状结构物质,其符合煤泥中无机矿物层状结构特征(如高岭土^[17]),大量层状无机泥分的存在,是煤泥高灰分的原因。与煤泥样品相比,经浮选后的精煤样品仅能观察到不规则的煤颗粒,其表面无明显的层状无机泥分,表明浮选过程中大部分泥分已被脱去(图 5c、d)。

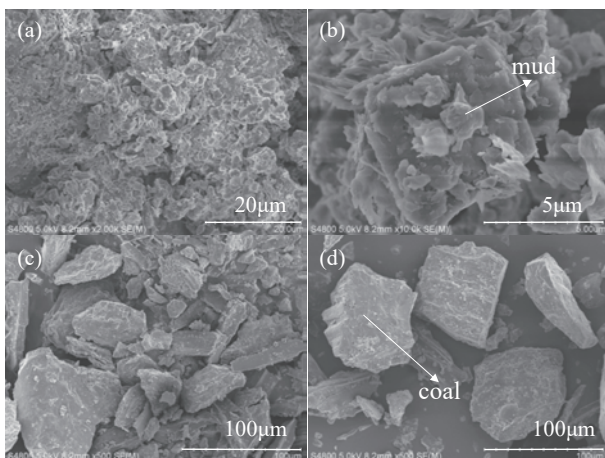


图 5 不同倍数的煤泥(a、b)和精煤(c、d)样品的 SEM 照片
Fig. 5 SEM images of coal slime (a, b) and clean coal (c, d)

我们通过浮选后精煤颗粒的元素能谱(EDS)分析和元素面扫描,进一步研究了精煤样品的组成。由

图 6 可以看出,精煤样品中,C 元素含量最高达 70%,除此之外,还存在一定量的 Si、Al、K 等无机元素,这是其中无机泥分引起的,与浮选后精煤仍有约 10% 的灰分结果一致。图 7b-7g 分别是煤颗粒(图 7a)表面 Si、O、K、C、P、S 元素的面扫描结果,可以明显看出,精煤颗粒表面仍附着有一部分无机颗粒,其尺寸较小,与煤颗粒作用力较强,在浮选过程中不易除去。除 C 和无机元素,在煤中也均匀分布有 P、S 有机元素。SEM 和 EDS 结果表明,煤泥浮选过程中,煤表面附着的尺寸较大的层状泥分和游离的泥颗粒较易去除,而表面的小颗粒仍黏附在煤表面,是精煤灰分的主要来源。

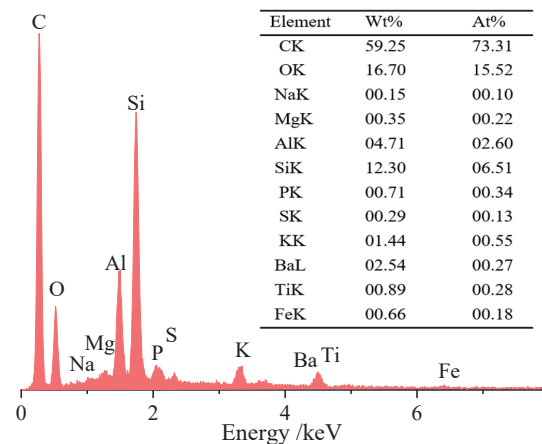


图 6 精煤样品的能谱分析
Fig. 6 EDS results of clean coal

采用 X 射线衍射进一步分析了煤泥和精煤样品中无机泥分的物相结构。由图 8a 可知,煤泥样品中的矿物主要为高岭石(K)和石英(Q),还含有一定量的丽蛇纹石(L)和地开石(D)等^[18]。石英是煤中最常见的伴生矿物之一,其分布广泛,亲水性强,导致未解离煤的浮选难度增加^[19]。黏土类矿物高岭石,在水中容易发生泥化形成细泥而覆盖在煤分表面,同时泥化后的高灰部分也容易夹带细泥,导致精煤灰分上升,增加浮选药剂用量。在浮选后精煤的 XRD 图谱(图 8b)中,高岭石的衍射峰明显减弱,表明大部分高岭石在浮选过程中去除。此外,其他无机物的衍射峰基本消失,表明油酸甲酯-煤油复配捕收剂具有较好的浮选效果,煤泥中的灰分得到了有效去除。

图 9 是煤泥和精煤样品的红外光谱。图 9a 的煤泥样品中,3 694 cm^{-1} 和 3 621 cm^{-1} 为 O-H 的伸缩振动峰,2 916 cm^{-1} 处的吸收峰归属于饱和烃基的 C-H 的伸缩振动峰,1 597 cm^{-1} 为芳烃的 C=C 振动吸收峰,表明煤分子由芳香族、脂肪族以及环族的基本结构单元组成^[20]。3 437 cm^{-1} 处的吸收峰源于煤泥中部分结晶水的 O-H 振动峰^[21]。图中 1 200 cm^{-1} 以下主要包含 4 个吸收峰,其中 1 027 cm^{-1} 和 782 cm^{-1} 两个峰可以归属

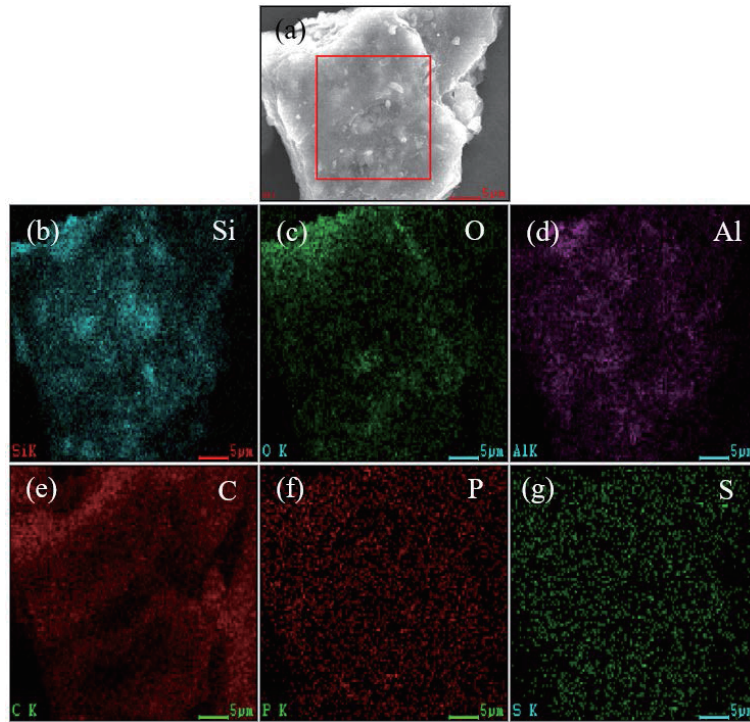


图 7 精煤样品 (a) 的元素面扫描结果: Si(b), O(c), Al(d), C(e), P(f), S(g)
 Fig. 7 Element mapping of clean coal(a): Si (b), O (c), Al (d), C (e), P (f), S (g)

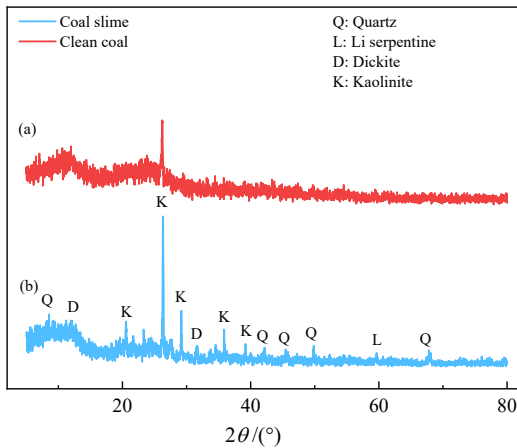


图 8 煤泥(a)与精煤(b)的 XRD 衍射图谱
 Fig. 8 XRD patterns of coal slime (a) and clean coal (b)

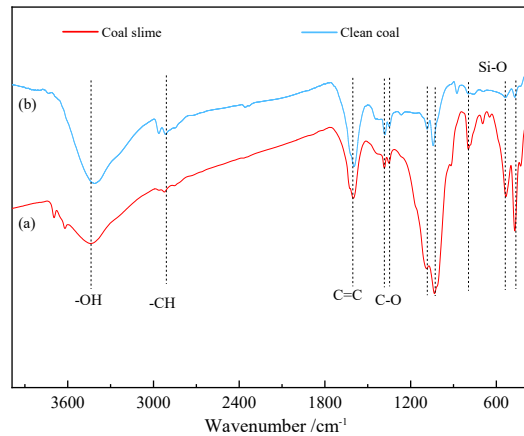


图 9 煤泥(a)与精煤(b)的红外光谱图
 Fig. 9 XRD patterns of coal slime (a) and clean coal (b)

于有机物中苯环上 C-H 和取代芳烃 C-H 的弯曲振动峰, 以及煤泥中灰分的吸收, 如石英和高岭土中的 Si-O 等, 表明未浮选的煤泥中含有较多高岭土类杂质, 也证实了煤样易泥化、灰分高的特性。浮选后的精煤样品中, 保留了 1 200 cm⁻¹ 以上煤分子中有机基团的吸收峰, 而波数小于 1 200 cm⁻¹ 的大部分吸收峰消失, 仅在 1 027 cm⁻¹ 处观察到微弱的吸收峰, 一方面表明图 9a 中小于 1 200 cm⁻¹ 的吸收峰主要来源于煤泥灰分, 另一方面说明, 浮选过程有效降低了煤泥的灰分。FTIR 光谱进一步证实了浮选过程中大部分的煤泥中所含的矿物泥分杂质被有效去除。

经浮选后的精煤样品主要由有机高分子组成, 同时浮选过程中部分疏水的捕收剂分子吸附在煤颗粒

表面, 因此精煤样品应具有疏水的表面。图 10a 中, 水滴滴到煤泥样品表面, 会快速渗入, 这是由于煤泥中大量亲水的泥分所致。此外, 我们通过水接触角比较了以煤油以及煤油与油酸甲酯复配捕收剂浮选后精煤样品的疏水性。以煤油(图 10b)及煤油与油酸甲酯(图 10c)复配捕收剂浮选后精煤样品的水接触角分别为 116.5°和 134.0°, 复配捕收剂中, 煤油吸附在煤表面的疏水位点, 油酸甲酯易吸附在含氧基团, 使煤表面变得更加疏水, 从而提高浮选效果。一方面, 较强的疏水性可能是由于其中泥分含量相对较低, 另一方面, 较强的疏水性是其实现其高效浮选、获得高精煤产率的原因。

3 结论

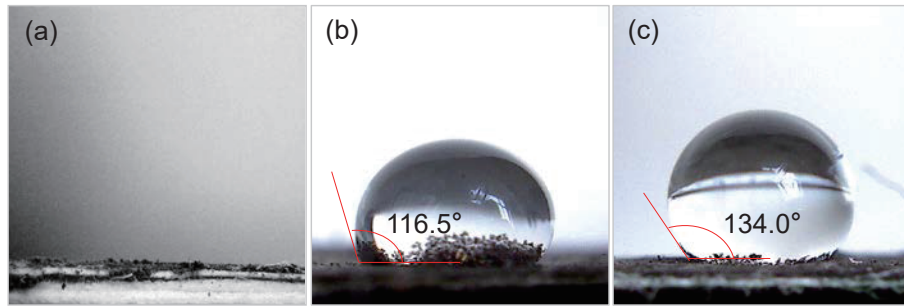


图 10 煤泥(a), 煤油(b)与复配捕收剂(b)浮选精煤的接触角

Fig. 10 Contact angle of coal slime (a) and clean coal floated with kerosene (b) and compound agent (c)

对南梁煤矿煤泥工业分析表明, 其灰分为 56.06%; 筛分试验表明, 粒度小于 0.045 mm 的煤泥占比 59.52%, 其灰分为 66.19%。通过湿法筛分, 对粒度大于 0.038 5 mm 的煤泥进行浮选研究。以仲辛醇为起泡剂, 研究了煤油的复配捕收剂对浮选产率和灰分的影响。结果表明, 与纯煤油相比, 油酸甲酯煤油质量比为 1 : 6 时, 浮选效果最好, 精煤产率由 43.14% 提高到 61.70%, 对应的灰分由 9.50% 变为 9.61%。XRD 和 SEM 分析表明, 煤样中含有的矿物质主要为高岭石和石英, 浮选后精煤中的无机矿物明显减少, 仅有少量细泥粒附着于煤颗粒表面。煤样经复配药剂作用之后, 接触角由 116.5° 增加至 134.0°, 疏水性能改善, 更有利于精煤颗粒附着在气泡表面, 从而提高了精煤的产率。

参考文献:

- [1] CHEN Y, HU S, LI J, et al. Improvement on combustible matter recovery in coal slime flotation with the addition of sodium silicate[J]. *Colloids Surf. A*, 2020, 603(2): 125–220.
- [2] XIE W, CAO G, REN X, et al. Effect of flotation promoter on the rate of coal slime flotation[J]. *J. Min. Sci.*, 2014, 50(1): 601–607.
- [3] KOPPARTHI P, BALAMURUGAN S, MUKHERJEE A K. Effect of ultrasonic pre-treatment time on coal flotation[J]. *Int. J. Coal Prep. Util.*, 2017, 40(4): 807–823.
- [4] ZHU J, ZHU H, WANG H, et al. Effects of diesel and 2-octanol on water-carrying properties and ultrafine coal flotation[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2018, 41(6): 98–107.
- [5] FU Y, LI H, MEI H, et al. Organic contaminant removal with no adsorbent recycling based on microstructure modification in coal slime filtration[J]. *Fuel*, 2021, 288(5): 119–630.
- [6] 马爱鹏. 复配捕收剂对高灰细粒煤泥浮选效果的影响研究[J]. *煤*, 2021(1): 95–97.
MA A P. Study on the effect of complex collectors on the flotation of high ash fine coal slime[J]. *Coal*, 2021(1): 95–97.
- [7] 高文宇. 煤炭浮选药剂的筛选、优化及工业应用试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Gao W Y. The Study of the screening, optimization and industrial application of coal flotation agent [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [8] 王力强. 油酸与煤油复配捕收剂对难浮煤泥浮选提质的探究[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2018(11): 41–43.
WANG L Q. Study on the concentrate quality improvement of difficult-to float slime flotation using the compounding collector of oleic acid and kerosene[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2018(11): 41–43.
- [9] 王晖, 李志红, 樊民强. 正十二酸对朔州低阶煤泥浮选的促进作用研究[J]. *山西煤焦科技*, 2020(7): 4–7.
WANG H, LI Z H, FAN M Q. Study on promotion of dodecanoic acid on flotation of low-grade coal slime in shuozhou[J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 2020(7): 4–7.
- [10] 王东岳. 极性复配捕收剂对低阶煤浮选的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
WANG D Y. Compound polar collector in low rank coal flotation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [11] 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): 242–247.
REN C, FAN M Q, LI Z H, et al. Efficiency of compound reagents flotation of low-rank coal slime[J]. *Coal Science and Technology*, 2020(48): 242–247.
- [12] 刘文欣, 沈阳, 马志国. 南梁选煤厂利用微泡浮选柱回收低阶煤泥的生产实践[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2021(8): 1–9.
LIU W X, SHEN Y, MA Z G. Production practice of recycling low rank slime with micro bubble flotation column in Nanliang Coal Preparation Plant[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2021(8): 1–9.
- [13] CAI Y, DU M, WANG S, et al. Flotation characteristics of oxidized coal slimes within low-rank metamorphic[J]. *Powder Technol.*, 2018, 340(5): 34–38.
- [14] XU M, XING Y, LI M, et al. Oxidized coal flotation enhanced by adding n-octylamine[J]. *Energy Sources Part A*, 2018, 40(2): 2394–2399.
- [15] 成浩, 杨亚平, 蔡晋强. 细粒级难选煤用FO合成浮选药剂的研究[J]. *煤炭加工与综合利用*, 1998(2): 27–31.
CHENG H, YANG Y P, CAI J Q. Study on FO synthesis flotation agents for fine grade refractory coal[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 1998(2): 27–31.
- [16] 任聪. 基于油酸甲酯的煤泥浮选复配捕收剂研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2019.
REN C. Research on coal slime flotation compound collector based on methyl oleate [D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [17] 李昀霞, 贾国兴, 邢海明, 等. 超细化和煅烧处理高岭土的遮盖力研究[J]. *建材技术与应用*, 2021(10): 1–3.
LI Y X, JIA G X, XING H M, et al. Study on covering power of ultra refined and calcined kaolin[J]. *Research & Application of Building Materials*, 2021(10): 1–3.
- [18] NI C, BU X, XIA W, et al. Effect of slimes on the flotation recovery and kinetics of coal particles[J]. *Fuel*, 2018, 220(3): 159–166.
- [19] RONG G, XU M, WANG D, et al. Effect of heating oxidation on the

- surface/interface properties and floatability of anthracite coal[J]. Processes, 2019, 7(6): 345–354.
- [20] HE J, LIU C, YAO Y. Flotation intensification of the coal slime using a new compound collector and the interaction mechanism between the reagent and coal surface[J]. Powder Technol., 2018, 325(9): 333–339.
- [21] 杨策. 应用近红外光谱技术分析煤质成分[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- YANG C. Analysis of coal properties by near infrared spectroscopy [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

Experimental Study on the Slime Flotation of Nanliang Coal Mine with Kerosene/methyl Oleate Compound Collectors

CHEN Jialiang, ZHU Wenyao, CHANG Mengjie, LI Huilu, LIU Jun

College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

Abstract: The cost of flotation production reagent is high for Nanliang coal mine of Shaanxi province, accounting for 84.5% of the plant cost. In addition, previous experiments indicated that the compound collectors such as GF and FO could improve the floatation efficiency, but the dosage of flotation reagents was high. In order to improve the flotation efficiency, decrease the dosage of reagents, save costs and create more economic values, the effect of compound collectors on coal slime flotation was studied systematically in this work. By using sec-octanol as foaming agent, kerosene mixed with n-octylamine, n-decanoic acid, dodecane and methyl oleate respectively as collectors, the flotation experiments were conducted for the coal slime with particle size larger than 0.0385 mm. The flotation results showed that the compound collectors of methyl oleate and kerosene (mass ratio of 1 : 6) exhibited the best flotation effect. The cleaned coal yield increased from 43.14% by kerosene to 61.70% by compound collectors, and the corresponding ash content changed from 9.50% to 9.61%. Meanwhile, the recovery rate of combustible substance increased from 42.98% to 61.48%. The excellent flotation effect of methyl oleate compound collectors was attributed to the higher wetting heat and adsorption energy between the oxyester group of methyl oleate and the oxygen-containing function groups of coal molecules, and the lower frontier orbital energy gap, which was helpful for the absorption on the coal surface and improvement of the hydrophobicity of coal. The results of X-ray diffraction, infrared spectrum and scanning electron microscopy showed that the ash content in the cleaned coal after flotation significantly decreased with only tiny fine mud particles attached on the surface of coal particles, indicating that the combination of methyl oleate and kerosene is an ideal compound collectors for slime flotation.

Keywords: coal slime; flotation; compound collector; kerosene

引用格式: 陈嘉亮, 朱文耀, 常梦洁, 李会录, 刘俊. 煤油/油酸甲酯复配捕收剂浮选南梁煤矿煤泥的试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 20–26.

CHEN Jialiang, ZHU Wenyao, CHANG Mengjie, LI Huilu, LIU Jun. Experimental study on the slime flotation of Nanliang coal mine with kerosene/methyl oleate compound collectors[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 20–26.