

二元混合捕收剂作用于低阶煤泥浮选的研究

甘成¹, 庾必阳^{1,2}, 王建丽³, 唐云^{1,2}, 聂光华^{1,2}, 邓政斌^{1,2}

(1. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 喀斯特地区矿产资源有效利用工程国家与地方联合实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 湖南工业大学材料与先进制造学院, 湖南 株洲 412000)

摘要: 为提高柴油对低阶煤泥浮选的捕收性能, 本研究将柴油和油酸复配制备的二元混合捕收剂作为低阶煤泥浮选的捕收剂。并通过接触角测试和 Zeta 电位测试探究了柴油和油酸的协同作用对改善低阶煤泥浮选效果的机理。研究表明, 当柴油和油酸的质量比为 3:2 (3C2Y), 捕收剂用量为 1 kg/t 时, 精煤产率和可燃体回收率最高, 分别为 65.66% 和 88.91%。经过 3 段浮选后, 精煤灰分降低到了 24.44%。柴油和油酸的协同作用使得煤颗粒表面的接触角提高了 25°, 煤颗粒表面的 Zeta 电位值降低了 63.73 mV。因此, 二元混合捕收剂能够使煤颗粒具有良好的疏水性和分散性, 并且能够明显的改善低阶煤泥的浮选效果。柴油和油酸复配制得的二元混合捕收剂可作为高效开发利用低阶煤泥的新型捕收剂。

关键词: 柴油; 油酸; 低阶煤泥浮选; 协同作用

doi:10.12476/kczhly.202210060631

中图分类号: TD94 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 03-0164-07

引用格式: 甘成, 庾必阳, 王建丽, 等. 二元混合捕收剂作用于低阶煤泥浮选的研究[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(3): 164-170.

GAN Cheng, TUO Biyang, WANG Jianli, et al. Study on flotation of low-rank coal slime with binary mixed collector[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(3): 164-170.

煤炭在我国国民经济中一直占据着重要地位^[1], 并且在未来很长一段时期内都不会改变以煤炭为主体的能源消费结构。随着我国煤炭开采机械化程度的不断提高, 原煤中的煤泥含量逐年增加^[1-2], 粒度细、灰分高的特点使得这些煤泥不利于分选和直接利用^[3]。在我国, 部分煤企一般是在商品煤中掺配细煤泥进行销售, 或者将高灰细煤泥掺入煤矸石堆弃^[4]。然而, 在商品煤中掺配煤泥是以牺牲产品质量来利用低品质煤泥, 而堆弃煤泥更是一种浪费资源和污染环境的利用方式。因此, 对煤泥进行开发利用成为当今煤炭行业急需解决的主要问题之一。

煤泥浮选是对低阶煤泥回收利用的一种经济

高效的方法^[5-6]。在煤泥浮选过程中, 常用煤油、柴油等非极性烃类油作为捕收剂^[7]。然而, 低阶煤泥表面具有丰富的含氧官能团、发达的孔隙和较差的疏水性^[8-10]。因此, 分散性较差的烃类油难以在煤颗粒表面吸附和铺展, 使得煤泥浮选效率低、药剂消耗量大和成本高, 进而严重影响了低阶煤泥的开发利用^[11-12]。针对如何强化烃类油捕收剂的捕收性能, 国内外许多学者将表面活性剂与烃类油复配, 研发了一系列的复配捕收剂, 从而有效地提高了低阶煤泥的浮选效率^[13-14]。由于表面活性剂不仅能够促进烃类油捕收剂在煤颗粒表面的吸附与铺展, 从而提高煤颗粒的疏水性^[15]; 而且表面活性剂还有助于矿浆形成丰富、稳定的泡

收稿日期: 2022-10-06

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2021] 一般 482)

作者简介: 甘成 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为矿物材料和水处理。

通信作者: 庾必阳 (1979-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为难选矿石分选、矿物材料、固废处理与烧结球团。

沫^[16]。所以将表面活性剂与烃类油捕收剂进行复配是一种提高烃类油捕收剂捕收性能的有效途径。

Chen 等^[17]研究了柴油和双十二烷基二甲基氯化铵 (DDAB) 结合使用对低阶煤浮选的影响。结果表明, 加入 DDAB 能够增强柴油在煤颗粒表面的吸附, 使煤颗粒表面具有强疏水性, 进而使混合后的 DDAB/柴油具有优良的浮选性能。王东岳^[18]以属于表面活性剂的不同饱和羧酸类捕收剂与煤油复配制得的药剂为捕收剂, 对低阶煤进行浮选实验。结果表明, 随着饱和羧酸的碳链的增长, 复配药剂的浮选效果先变好后变差, 且均优于煤油的浮选效果。由于油酸在浮选工艺中具有较强的捕收能力, 而且油酸属表面活性物质使其具有较强的起泡能力^[19]。因此, 本研究将柴油与油酸按不同比例复配制得的药剂为捕收剂对低阶煤泥进行浮选实验, 并借助接触角测试和 Zeta 电位测试探究柴油和油酸对低阶煤泥浮选的协同作用, 从而达到改善浮选效果的目标, 对低阶煤泥的开发利用具有重要意义。

1 实 验

1.1 实验材料

实验材料是采自于中国贵州省盘州的低阶煤泥, 煤泥经过自然晾晒、破碎、筛分 (粒度小于 0.5 mm) 以及装袋后得到实验材料。煤泥的工业分析和元素分析结果见表 1, 粒度分析结果见表 2, XRD 分析结果见图 1。

表 1 煤泥的工业分析和有机元素分析
Table 1 Industrial analysis and organic element analysis of coal slime

工业分析/%				元素分析/%				
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C	H	O	N	S
1.66	56.91	15.84	25.59	32.27	2.59	9.21	0.92	0.23

表 2 原煤泥筛析结果
Table 2 Sieve analysis results of coal slime

粒级/mm	产率/%	灰分/%
+0.5	1.70	52.43
-0.5+0.25	2.19	52.59
-0.25+0.125	10.21	52.95
-0.125+0.074	12.81	53.25
-0.074+0.045	35.45	56.93
-0.045	37.64	59.78
总计	100.00	56.91

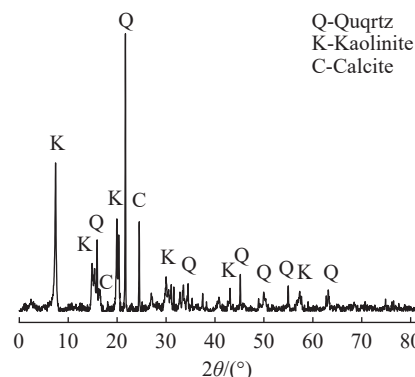


图 1 原煤泥 XRD
Fig.1 XRD spectrum of coal slime

由表 1 可知, 煤泥的水分为 1.66%, 灰分为 56.91%, 挥发分为 15.84%, 固定碳含量为 25.59%。由表 2 可知, 煤泥各粒级的产率和灰分含量都随着粒度的逐渐减小而逐渐增加。并且, 煤泥中粒级 -0.045 mm 和 -0.074+0.045 mm 的产率分别为 37.64% 和 35.45%, 对应的灰分分别为 59.78% 和 56.93%。由此可以得出该煤泥属于高灰细粒难选煤泥。

由图 1 可知, 该煤泥的主要矿物成分为石英、高岭石和方解石等, 其中高岭石属黏土矿物在煤泥浮选过程中会罩盖在煤粒表面, 使煤粒的疏水性能减弱, 可浮性下降^[20-21]。此外, 黏土矿物的罩盖还会使捕收剂难以作用于煤粒表面, 导致煤泥的可燃体回收率降低、药剂消耗量的增加, 且容易混入浮选精煤中, 使精煤灰分增大。

1.2 药剂制备

本研究使用的捕收剂是柴油、油酸以及将柴油和油酸按比例复配 (柴油:油酸=1:4、2:3、3:2、4:1) 制得的二元混合捕收剂, 并将二元混合捕收剂分别命名为 1C4Y、2C3Y、3C2Y、4C1Y; 起泡剂选用松醇油。

1.3 浮选实验

浮选采用单元浮选实验和多段浮选实验, 浮选流程见图 2。浮选机采用 RK/FD 型 1.5 L 槽浮选机。矿浆浓度为 80 g/L, 捕收剂用量分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 kg/t, 起泡剂 (松醇油) 用量为 280 g/t。搅拌器搅拌转速为 2 000 r/min, 搅拌 120 s 后先后加入捕收剂和气泡剂, 作用时间分别为 120 s 和 30 s。充气量为 2.5 L/min, 在 120 s 浮选时间内收集浮选精煤。精煤和尾煤经过压滤、70 °C 烘干后, 测得产率和灰分。并由公式 (1) 计算得出可

燃体回收率。

$$\varepsilon(\%) = \frac{M_c(100 - A_c)}{M_F(100 - A_F)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ε 为可燃体回收率, %; M_c 和 M_F 分别为精煤和煤泥质量, g; A_c 和 A_F 分别为精煤和煤泥的灰分, %。

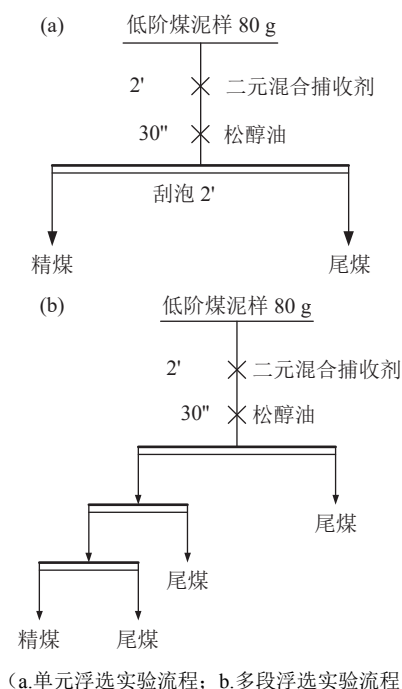


图2 低阶煤泥的浮选流程
Fig.2 Flotation flow chart of low rank slime

1.4 接触角测试

接触角测试使用的是 Dataphysics OCA20 接触角测量仪。以纯煤作为测试对象, 将 5 g 样品与 50 mL 水混合, 分别配制 3 组, 磁力搅拌 10 min。三组样品分别加入 1 kg/t 的柴油、油酸和 3C2Y, 搅拌 10 min 后过滤, 并 70 °C 烘干。烘干后的样品研磨并过 0.15 mm 筛, 在 25 MPa 压力下压成厚度约 4 mm 的煤块。每组样品制备 3 块并放入干燥器中恒湿 48 h。测试方法选择座滴法, 液体为去离子水, 通过角度测量法获得接触角测量结果。每组样品测试 3 次, 取平均值。

1.5 Zeta 电位测试

将精煤样品磨细至 -5 μm , 取 0.04 g 加入到 40 mL 去离子水中, 超声处理 10 min, 配制 3 组并分别加入 1 kg/t 的柴油、油酸和 3C2Y, 用 0.1 mol/L 盐酸和 0.1 mol/L NaOH 溶液将 pH 值调至 3、5、7、9、11。使用 Zeta 电位分析仪 (Malvern Zetasizer Nano ZS90) 对每组样品进行 Zeta 电位分

析, 每个 pH 值下测量 3 次, 取平均值。

2 结果与讨论

2.1 单元浮选实验结果

为了研究二元混合捕收剂对低阶煤泥的浮选效果, 进行了单元浮选实验。在室温条件下, 捕收剂种类及其用量对低阶煤泥浮选的结果见图 3。从图 3(a) 和图 3(c) 中可以看出, 以柴油为捕收

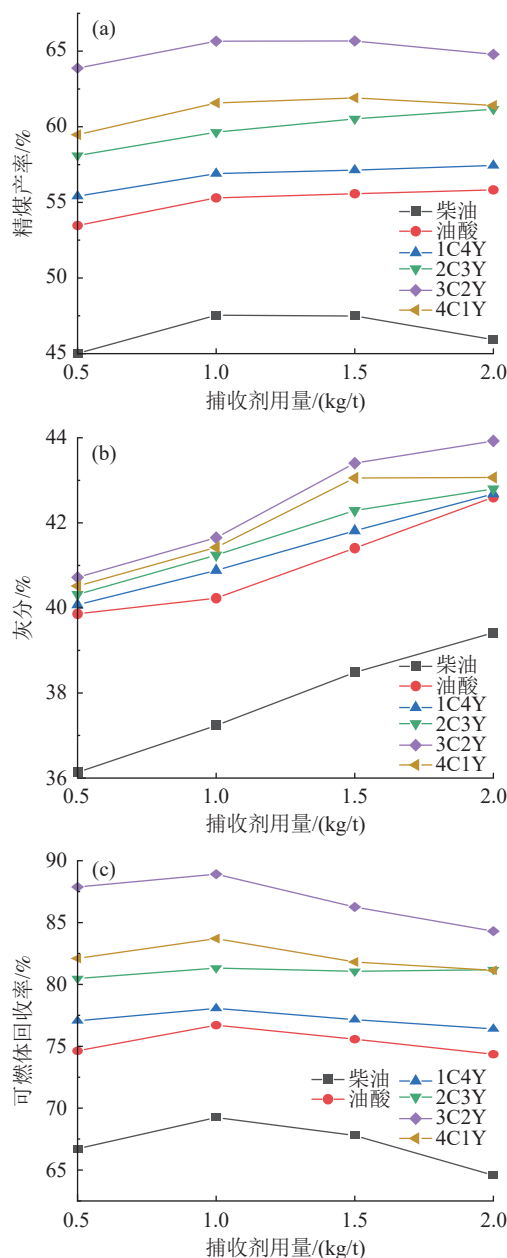


图3 不同捕收剂及其用量浮选低阶煤泥的结果 (a. 精煤产率; b. 灰分; c. 可燃体回收率)

Fig.3 Results of flotation of low-grade slime with different collectors and dosage (a. clean coal yield; b. ash content; c. combustible recovery)

剂,捕收剂用量为1 kg/t时,精煤产率和可燃体回收率分别达到了47.54%和69.24%。以同等用量的油酸为捕收剂时,精煤产率和可燃体回收率分别达到了55.30%和76.71%。与柴油相比,油酸作为捕收剂时的精煤产率和可燃体回收率分别提高了7.76%和7.47%,这表明油酸的捕收性能比柴油好。图3(b)显示了不同捕收剂及其用量对精煤灰分的影响。由图3可知,随着捕收剂用量的增加,精煤灰分也逐渐增加。此外,柴油为捕收剂时的精煤灰分较低,这表明柴油作为捕收剂时的选择性较好。与柴油相比,油酸作为捕收剂时的精煤灰分有所增加,这表明油酸作为捕收剂时的选择性比柴油差。这是由于油酸不仅改变煤颗粒表面的疏水性,同时也和部分黏土矿物作用,导致疏水性增加^[22]。因此,在作为低阶煤泥浮选时,油酸的捕收性能高于柴油,而选择性比柴油差,总的浮选效果优于柴油。

由于油酸的捕收性好,而柴油的选择性好,因此将柴油和油酸复配使用,研究其对低阶煤泥的浮选效果。从图3(a)和图3(c)中可以看出,与单一捕收剂相比,不同配比的二元混合捕收剂均能够明显提高精煤产率和可燃体回收率。这表明柴油和油酸在浮选低阶煤泥时具有协同作用,将柴油和油酸混合使用能够大大提高药剂的浮选性能。此外,当捕收剂用量超过1 kg/t时,精煤产率趋于平稳,可燃体回收率也开始逐渐趋于平稳甚至开始下降。其中,当捕收剂为3C2Y,捕收剂用量为1 kg/t时,精煤产率和可燃体回收率分别达到了65.66%和88.91%。与柴油和油酸作为捕收剂时的较佳浮选效果相比,精煤产率分别提高了18.12%和9.83%,可燃体回收率分别提高了19.67%和12.20%。此时药剂的捕收性能和选择性达到了最优的平衡状态。

2.2 多段浮选实验结果

通过单元浮选实验可知,二元混合捕收剂3C2Y具有优良的浮选效果。然而,当捕收剂3C2Y的用量为1 kg/t时,精煤灰分达到了41.65%,属于高灰煤。因此,为了进一步降低精煤灰分,采用多段浮选对低阶煤泥的进行浮选实验,多段浮选结果见图4。由图4可知,多段浮选对于降低精煤灰分具有明显的促进作用。其中,三段浮选后的精煤灰分从41.65%降低到了24.44%,达到了中

灰煤的标准。与原煤泥相比,三段浮选后的精煤灰分降低了32.47%。当分选次数大于三次以后,精煤灰分的降低趋势趋于平稳,四段浮选的精煤灰分与三段浮选相比仅降低了0.10%。因此,多段浮选次数应以3段浮选为宜。

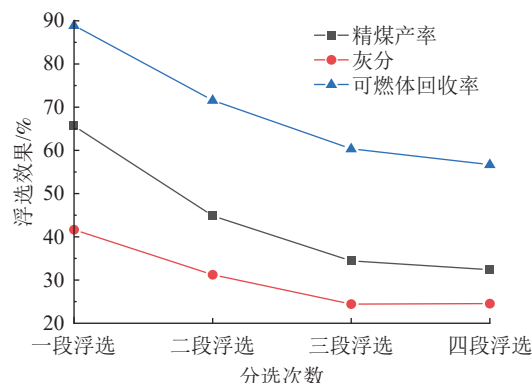
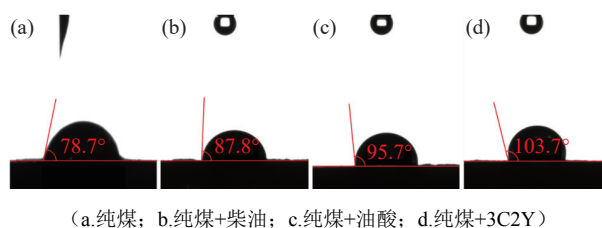


图4 低阶煤泥的多段浮选结果

Fig.4 Multi stage flotation results of low rank slime

2.3 接触角测试

接触角决定了煤颗粒表面的亲疏水性,接触角越大煤颗粒越疏水。因此,对不同捕收剂处理后的纯煤接触角进行了接触角测试,以研究二元混合捕收剂对煤颗粒疏水性的影响,测试结果见图5。由图5a可知,纯煤的接触角为78.7°。经柴油、油酸和3C2Y处理后的纯煤的接触角(图5b、图5c、图5d)分别增大了9.1°、17.0°和25.0°。煤颗粒接触角的增大证明煤颗粒疏水性的提高,煤颗粒与亲水性的脉石矿物更容易分离,浮选效果得到改善,与3.1单元浮选实验结果一致。在矿浆中,柴油在煤颗粒表面展开,形成疏水的油膜,从而提高煤颗粒的疏水性^[23]。油酸的碳链长、极性,与煤样表面含氧官能团作用强烈,使煤样更疏水^[24]。然而,柴油和油酸都不溶于水,在矿浆中以油滴的形式存在。因此,单独以柴油和油酸作为捕收剂时,煤颗粒的接触角并不会有很大的变化。由于柴油和油酸能够互溶,而且两者复



(a.纯煤; b.纯煤+柴油; c.纯煤+油酸; d.纯煤+3C2Y)

图5 不同药剂处理后的纯煤接触角测试结果

Fig.5 Contact angle test results of pure coal treated with different agents

配后能够增加药剂的分散性,从而降低药剂在矿浆中的粒径^[25]。因此,3C2Y 捕收剂增大煤颗粒接触角的效果较好,煤泥的可浮性和浮选效果也较好,这也与 3.1 单元浮选实验结果一致。

2.4 Zeta 电位分析

Zeta 电位反映了煤颗粒表面所附带电荷量的情况。在煤的浮选中,煤颗粒在溶液中表面电荷的正负性和数量关系着浮选的效果。因此,对不同种类捕收剂处理后的纯煤进行了 Zeta 电位测试,以研究二元混合捕收剂对煤颗粒表面电荷的影响。由于本文所用煤泥中含有大量石英、高岭土等黏土矿物,在进行 Zeta 电位测试时,黏土矿物的包覆会导致测量结果出现偏差,所以选用纯煤来测定溶液中煤颗粒的 Zeta 电位^[26]。

不同种类捕收剂处理后的纯煤的 Zeta 电位测试结果见图 6。由图可知,纯煤在溶液中呈负电性,随着 pH 值增大,Zeta 电位降低,负电荷数量增加。经柴油处理后的纯煤的 Zeta 电位略高于纯煤,这是由于柴油会在煤颗粒表面形成疏水的油膜,煤颗粒表面水化作用降低,导致煤颗粒表面带电荷量的减少。以油酸为捕收剂时,在强酸性溶液中,油酸处理前后的纯煤的 Zeta 电位相差不大。随着溶液 pH 值的增加,处理前后的 Zeta 电位差距逐渐增加,并且在强碱性溶液中差距达到较大。这是由于在强酸性溶液中,油酸主要以分子状态存在,在中性及碱性溶液中主要以阴离子状态存在,这使得 Zeta 电位随着 pH 值的增加而逐渐变小^[23]。以 3C2Y 为捕收剂时,在强酸性溶液中,3C2Y 处理前后的纯煤的 Zeta 电位相差不大,

随着溶液 pH 值的增加,Zeta 电位差距先变大再逐渐减小。其中,溶液 pH 值为 7 时,3C2Y 处理前后的纯煤的 Zeta 电位差距达到较大,纯煤的 Zeta 电位相差了 63.73 mV。当溶液 $\text{pH} \geq 7$ 时,3C2Y 处理后的纯煤的 Zeta 电位趋于平稳。这是因为柴油和油酸复配后形成的药剂具有良好的分散性^[25],因此在 $\text{pH} \geq 7$ 以后的 Zeta 电位趋于平稳。

在矿浆中,由于高岭石在中性条件下带负电。因此,煤颗粒的负电性的增加使煤颗粒之间以及煤颗粒与高岭石之间的静电斥力增加,煤颗粒的分散效果变好,有利于浮选^[27]。

3 结 论

(1) 单元浮选实验结果表明,柴油具有较好的选择性,油酸具有较好的捕收性,复配后的柴油和油酸之间具有协同作用,使得二元混合捕收剂兼具良好的选择性和捕收性。其中,柴油和油酸的质量比为 3:2 (3C2Y) 时,低阶煤泥的精煤产率和可燃体回收率最高。与柴油和油酸单独作捕收剂相比,精煤产率分别提高了 18.12% 和 9.83%,可燃体回收率分别提高了 19.67% 和 12.20%。此时药剂的捕收性能和选择性能达到了最优的平衡状态。

(2) 多段浮选实验结果表明,多段浮选对于降低精煤灰分具有明显的促进作用,随着分选次数的增加,精煤灰分先降低再趋于平稳。其中,三段浮选后的精煤灰分 41.65% 降低到了 24.44%,达到了中灰煤的标准。分选次数大于三次以后,精煤灰分趋于平稳。

(3) 接触角测试结果表明,与纯煤的接触角相比,柴油、油酸和 3C2Y 作用后的煤颗粒的接触角分别增大了 9.1° 、 17.0° 和 25.0° 。可浮性由大到小为 3C2Y+纯煤 > 油酸+纯煤 > 柴油+纯煤 > 纯煤。

(4) Zeta 电位测试结果表明,纯煤在溶液中呈负电性;柴油作用后的纯煤的 Zeta 电位略高于纯煤;随着 pH 值的增加,油酸作用前后的纯煤的 Zeta 电位差距逐渐增加;随着溶液 pH 值的增加,3C2Y 处理前后的纯煤的 Zeta 电位差距先变大再逐渐趋于平稳,其中,中性条件下的 Zeta 电位差距较大。负电性的增加使煤颗粒之间以及煤颗粒与高岭石之间的静电斥力增加,分散性增大,

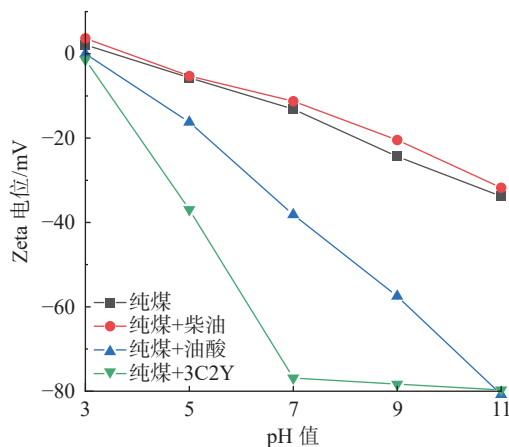


图 6 不同药剂处理后的纯煤的 Zeta 电位测试结果
Fig.6 Zeta potential test results of pure coal treated with different reagents

有利于浮选。

参考文献:

[1] 程志红. “双碳目标”下表面改性与新型药剂在低阶煤浮选中的应用[J]. [矿产综合利用](#), 2022(2):15-21.

CHENG Z H. Application of surface modification and new reagents in low-rank coal flotation under "Double Carbon Target"[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2022(2):15-21.

[2] 刘旭, 韩华, 申世钰, 等. 动力煤煤泥高剪切调浆浮选提质研究[J]. [矿产综合利用](#), 2022(3):158-162.

LIU X, HAN H, SHEN S Y, et al. Upgrading of steam coal slime using high intensity conditioning flotation[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2022(3):158-162.

[3] He J, Zhu L, Liu C, et al. Optimization of the oil agglomeration for high-ash content coal slime based on design and analysis of response surface methodology (rsm)[J]. *Fuel*, 2019, 254.

[4] Wang L, Peng Y, Runge K. Entrainment in froth flotation: the degree of entrainment and its contributing factors[J]. *Powder Technology*, 2016, 288.

[5] 程万里, 邓政斌, 刘志红, 等. 煤泥浮选中矿物颗粒间相互作用力的研究进展[J]. [矿产综合利用](#), 2020(3):48-55.

CHENG W L, DENG Z B, LIU Z H, et al. Research progress in interaction force between mineral particles in coal slurry flotation[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2020(3):48-55.

[6] 卢天荣, 邓政斌, 刘志红, 等. 高灰难选煤泥分级浮选降灰实验研究[J]. [矿产综合利用](#), 2022(2):142-149.

LU T S, DENG Z B, LIU Z H, et al. Experimental study on ash reduction of high ash and refractory slime by fractional flotation[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2022(2):142-149.

[7] 郭丽敏, 王怀法. 非离子表面活性剂对高灰细粒难浮煤泥浮选促进作用研究[J]. [矿产综合利用](#), 2018(4):96-100.

GUO L M, WANG H F. Promotion effect of nonionic surfactants on high ash fine coal flotation[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2018(4):96-100.

[8] 武乐鹏, 宋强, 张少飞, 等. 生物质柴油对朔州低阶煤的浮选研究[J]. [矿产综合利用](#), 2021(2):85-90.

WU L P, SONG Q, ZHANG S F, et al. Study on flotation of Shuozhou low-rank coal with bio-diesel[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2021(2):85-90.

[9] 桂夏辉, 邢耀文, 王波, 等. 煤泥浮选过程强化之一——国内外研究现状篇[J]. *选煤技术*, 2017(1):93-107.

GUI X H, XING Y W, WANG B, et al. Fine coal flotation process intensification: part 1-A general overview of the state-of-the-art of the related research work conducted both within and abroad[J]. *Coal Preparation Technology*, 2017(1):93-107.

[10] CAI Y C, DU M L, WANG S L, et al. Flotation characteristics of oxidized coal slimes within low-rank metamorphic[J]. *Powder Technology*, 2018, 340.

[11] Shobhana D. Enhancement in hydrophobicity of low rank coal by surfactants — a critical overview[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 94(1).

[12] 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.

[13] 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.

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(S1):242-247.

[14] 王市委, 陶秀祥, 陈松降, 等. 低阶煤的油泡浮选研究进展[J]. [矿产综合利用](#), 2020(4):48-58.

WANG S W, TAO X X, CHEN S J, et al. Development of oily bubble flotation research for low-rank coal[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2020(4):48-58.

[15] 郝晓栋. 复配捕收剂诱导的油泡形成机制及对低阶煤浮选的影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.

HAO X D. Formation mechanism of oil bubble induced by compound collector and its effect on flotation of low rank coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[16] Kasongo T, ZHOU Z, XU Z, et al. Effect of clays and calcium ions on bitumen extraction from athabasca oil sands using flotation[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2000, 78(4).

[17] CHEN S, YANG Z, CHEN L, et al. Wetting thermodynamics of low rank coal and attachment in flotation[J]. *Fuel*, 2017, 207.

[18] 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.

[19] 赵通林. 浮选[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018: 206.

ZHAO T L. Select flotation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 206.

[20] 梁龙, 李强, 胡鹏飞, 等. 细泥罩盖对煤炭可浮性的影响规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9):2793-2803.

LIANG L, LI Q, HU P F, et al. Influence law of slime coating on coal floatability[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9):2793-2803.

[21] 王成勇, 陈鹏, 潘东, 等. 疏水引力在煤泥浮选过程中的作用机理及应用[J]. 矿产综合利用, 2020(3):105-110.

WANG C Y, CHEN P, PAN D, et al. Mechanism and application of hydrophobic attraction in coal flotation process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):105-110.

[22] 郭姚. 新型分散剂强化含泥菱锌矿浮选行为的研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2022.

GUO Y. Study on enhancing flotation behavior of argillaceous smithsonite with novle dispersant[D]. Ganzhou:Jiangxi University of Science and Technology, 2022.

[23] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 635.

XIE G Y. Mineral separation[M]. XuZhou: China University of

Mining and Technology Press, 2001: 635.

[24] 王晖. 基于难浮煤泥表面性质的浮选药剂优化研究[D]. 太原:太原理工大学, 2021.

WANG H. Optimization of flotation reagents based on surface properties of hard-to-float fine coal[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

[25] 王力强. 油酸与煤油复配作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.

[26] YU Y, MA L, XU H, et al. Dlvo theoretical analyses between montmorillonite and fine coal under different ph and divalent cations[J]. Powder Technology, 2018, 330.

[27] 陈俊. 煤浮选脱硫降灰工艺的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2021.

CHEN J. The desulfurization and ash reduction of coal by flotation process[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2021.

Study on Flotation of Low-rank Coal Slime with Binary Mixed Collector

GAN Cheng¹, TUO Biyang^{1,2}, WANG Jianli³, TANG Yun^{1,2}, NIE Guanghua^{1,2}, DENG Zhengbin^{1,2}

(1.College of Mining, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2.National & Local Joint

Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3.College of Materials and Advanced Manufacturing, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412000, China)

Abstract: In order to improve the collection performance of diesel on low-rank slime flotation, the binary mixed collector prepared by compounding diesel and oleic acid was used as the collector for low-rank slime flotation in this study. The mechanism of the synergistic effect of diesel oil and oleic acid on improving the flotation of low-rank coal slime was explored by the contact angle test and Zeta potential test. The results show that when the mass ratio of diesel and oleic acid is 3:2(3C2Y) and the amount of collector is 1 kg/t, the clean coal yield and combustible recovery rate are the highest, which are 65.66% and 88.91% respectively. After 3-stage flotation, the ash content of clean coal was reduced to 24.44%. The synergistic effect of diesel oil and oleic acid increases the contact angle of the coal particle surface by 25° and reduces the Zeta potential value of the coal particle surface by 63.73 mV. Therefore, the binary mixed collector can make the coal particles have good hydrophobicity and dispersibility, and can obviously improve the flotation effect of low-rank coal slime. The binary mixed collector prepared from diesel and oleic acid can be used as a new type of collector for the efficient development and utilization of low-rank coal slime.

Keywords: diesel; oleic acid; low rank slime flotation; synergy