



移动扫码阅读

代世琦, 张 锐, 刘秦杉, 等. 生物柴油捕收剂强化粉煤灰浮选脱炭试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 336-343.
DAI Shiqi, ZHANG Rui, LIU Qinshan, *et al.* Experimental study on biodiesel collector enhanced coal fly ash flotation decarbonization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 336-343.

生物柴油捕收剂强化粉煤灰浮选脱炭试验研究

代世琦^{1,2}, 张 锐^{1,2}, 刘秦杉^{1,2}, 刘金成^{1,2}, 包西程^{1,2}, 邢耀文^{1,2}, 桂夏辉¹

(1. 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; 2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:粉煤灰颗粒表面氧化程度高, 疏水性差, 易形成稳定的水化膜。常规烃类油捕收剂难以有效地吸附在粉煤灰颗粒表面从而提高粉煤灰表面疏水性, 造成粉煤灰浮选药剂耗量大, 脱炭困难, 严重制约粉煤灰回收利用。为解决传统捕收剂在粉煤灰浮选脱炭中选择性差, 分选效率低及环境污染严重的问题, 采用生物柴油作捕收剂进行粉煤灰浮选脱炭试验。通过包覆角、饱和吸附量、颗粒团聚行为、红外光谱、气相色谱-质谱联用等测试方法进一步分析了生物柴油捕收剂强化粉煤灰浮选脱炭机理。试验结果表明, 相比于常规烃类油捕收剂, 生物柴油捕收剂具有较优的选择性, 均可改善浮选效果, 其中 1600 型和 1030 型捕收剂质量复配比为 3 : 1, 用量为 200 g/t 时, 浮选效果最佳, 单一 1600 型和 1030 型捕收剂效果相当。不同捕收剂处理后, 包覆角大小为柴油 < 1600 型捕收剂 < 1030 型捕收剂 < 复配药剂, 对去离子水的吸附量大小为柴油 > 1030 型捕收剂 > 1600 型捕收剂 > 复配药剂, 0.045 ~ 0.010 mm 颗粒团聚尺寸为复配 > 柴油 > 原样。机理分析表明, 生物柴油捕收剂中的酯、羧酸和醇类化合物的极性端基团与粉煤灰表面含氧官能团之间形成氢键从而吸附在粉煤灰表面, 使其疏水端暴露在矿浆中, 提高粉煤灰表面疏水性, 使其细颗粒更易团聚, 从而提高了粉煤灰的可浮性以及降低了泡沫产品的灰分。研究成果为开发适用于粉煤灰绿色、高效浮选脱炭捕收剂提供策略和指导。

关键词:粉煤灰; 浮选; 生物柴油; 疏水性; 绿色捕收剂

中图分类号: TD923; TD984

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)S2-0336-08

Experimental study on biodiesel collector enhanced coal fly ash flotation decarbonization

DAI Shiqi^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2}, LIU Qinshan^{1,2}, LIU Jincheng^{1,2}, BAO Xicheng^{1,2}, XING Yaowen^{1,2}, GUI Xiahui¹

(1. Chinese National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The high degree of oxidation and poor hydrophobicity of fly ash particles result in the formation of stable hydration films that impede the effective adsorption of conventional hydrocarbon-based collectors onto the particle surfaces. Conventional hydrocarbon oil collector can slightly improve the surface hydrophobicity of coal fly ash due to its low adsorption on the surface of coal fly ash particles, resulting in large consumption of flotation agent and difficulty in decarbonization of coal fly ash, thus seriously restricts the recovery and utilization of coal fly ash. In order to solve the problems of poor selectivity, low separation efficiency and serious environmental pollution of traditional collectors in the flotation decarbonization of coal fly ash, biodiesel was selected as the collector for the flotation decarbonization test of coal fly ash. The mechanism of enhanced decarbonization of coal fly ash by biodiesel collector was further analyzed by means of coating angle, saturated adsorption capacity, particle agglomeration behavior, infrared spectrum, gas chromatography-mass spectrometry and other test methods. The test results show that compared with conventional hydrocarbon oil collectors, biodiesel has better selectivity and can improve the flotation effect. When the blend ratio of 1600 and 1030 is 3 : 1 and the dosage is 200 g/t, the flotation effect is the best, and the effect of single 1600 and 1030 collectors is comparable. After treatment with different collectors, the coating angle is

收稿日期: 2023-02-22 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0190

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52174265)

作者简介: 代世琦(1999—), 男, 山西太原人, 博士。E-mail: 1092936777@qq.com

diesel<1600<1030<composite agent, and the adsorption capacity of deionized water is diesel>1030>1600>composite agent. The particle aggregation size of 0.045 ~ 0.010 mm is composite agent>diesel>original sample. Mechanism analysis shows that the polar end groups of esters, carboxylic acids and alcohols in the biodiesel collector form hydrogen bonds with the oxygen-containing functional groups on the surface of coal fly ash to adsorb on the surface of coal fly ash, exposing the hydrophobic end of coal fly ash to slurry, improving the surface hydrophobicity of coal fly ash, making its fine particles easier to agglomerate, thus improving the floatability of coal fly ash and reducing the ash content of foam products. It provides strategies and guidance for the development of green and efficient flotation and decarbonization collectors suitable for coal fly ash.

Key words: coal fly ash; flotation; biodiesel; hydrophobic; green collector

0 引 言

粉煤灰是燃煤过程中的烟气到达烟囱之前由静电除尘器捕获下来的飞灰,是我国大宗固体废弃物之一,年产量超过 5 亿 t,每年约有 1 亿 t 因无法合理利用而废弃堆积^[1]。粉煤灰长期堆积不仅占用大量土地,而且对周围水资源、土壤、大气和生态环境等产生一系列负面影响。因此,粉煤灰资源化利用不仅可以消除对环境的不利影响,还可以创造一定的经济价值。目前,我国粉煤灰资源化利用途径主要集中在建材领域,其中粉煤灰的含炭量是制约其建材利用的瓶颈,因此如何实现粉煤灰高效炭灰分离是其资源化利用的关键^[2]。

浮选是粉煤灰脱炭最经济有效的方法之一^[3-4],但由于粉煤灰中未燃炭表面氧化程度高^[5-6],疏水性差,易形成稳定的水化膜,导致常规烃类油捕收剂难以有效吸附到未燃炭表面,提高粉煤灰表面疏水性,造成粉煤灰浮选药耗量大,脱炭困难^[7-9]。因此,开发适用于粉煤灰浮选脱炭的高效捕收剂是粉煤灰资源化利用研究中亟待解决的技术难题。

近年来,国内外学者们对粉煤灰颗粒表面性质及浮选脱炭高效药剂开发进行了大量研究。研究发现,未燃炭表面含有大量含氧官能团,表面性质与低阶煤相似。因此有学者提出借鉴低阶煤浮选中极性药剂与非极性药剂的协同吸附机理,可在粉煤灰浮选脱炭体系中添加杂极性捕收剂能够改善未燃炭表面疏水性,从而改善浮选效果^[10-12]。进一步地,由于杂极性捕收剂具有低成本、效率高等优点被学者们广泛研究。DRZYMALA 等^[13]探索了 4-十二烷基苯酚(DDP)和十六烷(HXD)作为捕收剂对美国华盛顿港粉煤灰脱炭的浮选效果,该药剂经过一次浮选可使烧失量由 25% 下降到 6%。YANG 等^[14]针对陕西某火力电厂粉煤灰浮选脱炭研究,采用废弃炸油作捕收剂改善其浮选效果,发现废弃炸油含有丰富的 C=O 基团,可以促进捕收剂在未燃炭表面吸附,增强未燃炭表面的疏水性,改善浮选效果。

LI 等^[15]对比柴油和杂极性捕收剂 H511 对湖南某发电厂粉煤灰的浮选效果,发现 H511 是一种含有脂肪醇和脂环的化合物,其可以有效地黏附在未燃炭表面,降低未燃炭表面电位,缩短气泡与未燃炭颗粒之间的诱导时间,增加黏附概率;同时还发现 H511 捕收剂具有良好的起泡性能,有利于精矿二次富集,得到更好的浮选指标。ZHOU 等^[16]对比了十二烷基硫酸钠(SDS)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、吐温 80 和 TX-100 对内蒙古准噶尔粉煤灰的浮选效果,发现产品的烧失量与表面活性剂的类型有很强的相关性。上述研究表明,杂极性捕收剂在炭回收率、尾灰烧失量等指标上更具优势,但是其药耗量大、成本高以及存在环境污染等问题难以满足工业生产要求。

基于此,笔者选用 2 种生物柴油捕收剂(1600 型和 1030 型)和传统捕收剂柴油,对粉煤灰进行浮选脱炭试验研究。通过对比各捕收剂对粉煤灰的浮选脱炭效果,并结合红外光谱、气相色谱-质谱联用、包覆角测试以及吸附量测试等揭示了该捕收剂强化粉煤灰浮选机理,为开发适用于粉煤灰绿色、高效浮选脱炭捕收剂提供策略和指导。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验样品取自四川省江油市某粉煤灰堤坝,样品烧失量为 12.51%,高于用于水泥和混凝土中的粉煤灰(GB/T 1596—2017)中 10% 烧失量的最低使用标准,样品的粒度组成见表 1。采用 X 射线光电子能谱仪(Thermo Scientific K-Alpha, 美国)分析样品表面 C 元素结合形式的相对含量,结果如图 1 和表 2 所示。

样品的主导粒度为 0.25 ~ 0.125 mm 和 -0.045 mm,随着粒度的变化,烧失量变化不大,说明未燃炭颗粒均匀存在于各个粒度。粉煤灰的最佳浮选粒度为 -0.074 mm^[17],而样品中 -0.074 mm 粒度占比仅为 52.27%;加之样品表面存在大量含氧官能团,疏水

性差,因此药剂的选择性对粉煤灰浮选脱炭尤为重要。

表1 粉煤灰粒度组成分析

Table 1 Size composition analysis of coal fly ash

粒度/mm	产率/%	烧失量/%
+0.5	1.06	14.75
0.5~0.25	6.67	18.34
0.25~0.125	22.70	14.58
0.125~0.074	17.31	10.83
0.074~0.045	14.59	12.52
-0.045	37.68	10.94
合计	100.00	12.51

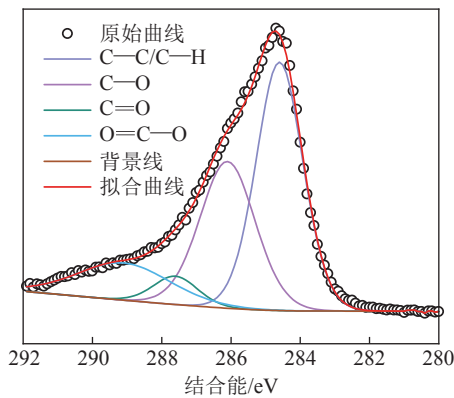


图1 粉煤灰表面C1s分峰拟合

Fig.1 The C1s fitting spectra of coal fly ash surface

表2 粉煤灰表面C1s拟合结果

Table 2 The C1s fitting results of coal fly ash surface

基团	C-C/C-H	C-O	C=O	O=C-O
含量/%	47.47	33.23	5.13	14.17

1.2 浮选药剂

浮选试验所用起泡剂为仲辛醇,捕收剂为柴油、生物柴油1600型和1030型以及1600型与1030型复配捕收剂。其中,生物柴油由废弃油脂提炼。

1.3 浮选试验

采用XFD-1.0L型实验室单槽浮选机进行单元浮选试验。浮选试验条件:矿浆质量浓度80 g/L,浮选机搅拌转速为1800 r/min,刮板转速为15 r/min,充气量为 $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,调浆时间为2 min,加入捕收剂搅拌1 min,加入仲辛醇搅拌30 s,刮泡时间为3 min。试验结束后,将浮选精煤与尾煤分别过滤,烘干,称重,烧灰,计算炭脱除率和烧失量。试验中,起泡剂用量为200 g/t,捕收剂用量为200、300、400、500和600 g/t。随后还对1600型和1030型等2种

生物柴油进行质量复配比为1:1、2:1、1:2、3:1和1:3的浮选试验。

1.4 包覆角测试

包覆角是颗粒黏附气泡后圆弧对应的圆心角,被用来评价颗粒的可浮性。测试对象为0.25~0.125 mm的粉煤灰颗粒。具体步骤为:将2 g粉煤灰颗粒与用量为200 g/t的捕收剂(柴油、1600型、1030型和复配捕收剂)在叶轮转速为1800 r/min的条件下搅拌2 min,然后将样品移入有机玻璃槽中,加入200 mL去离子水,利用磁力搅拌器以1000 r/min调浆2 min,待矿浆澄清后,通过注射器产生气泡。之后利用磁力搅拌器以250 r/min分别搅拌矿浆10、20、40、80、160 s,矿浆澄清后利用工业相机记录颗粒-气泡黏附情况,计算包覆角^[18-19]。

1.5 饱和吸附量测试

采用K100表面张力仪(KRUSS,德国)进行饱和吸附量测量试验。测量前,将80 g粉煤灰加入到浮选槽(XFD-1.0L)中,在叶轮转速为1800 r/min的条件下调浆2 min,随后加入用量为200 g/t的捕收剂(柴油、1600型、1030型和复配捕收剂)搅拌1 min,然后将过滤后的样品在40℃下低温干燥48 h。每次测量时,将2 g样品加入到Washburn管中,管底部放置圆形滤纸,将管缓慢降至去离子水液面以下2 mm处,得到各样品的饱和吸附量。测量时的工作温度固定在 $(24 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.6 颗粒团聚行为测试

采用多重光散射仪(Formulation,法国)对捕收剂-粉煤灰颗粒体系进行颗粒团聚行为分析。试验采用光源是波长为880 nm的近红外脉冲光源,2个同步光学传感器分别接受透射光和背散射光。在扫描过程中,近红外光遇到颗粒团聚体时,会发生散射现象,根据散射光的强度和角度计算颗粒的大小。测试对象为0.045~0.010 mm的粉煤灰颗粒。具体步骤为:将80 g/L的粉煤灰矿浆与200 g/t的捕收剂(柴油和复配捕收剂)在叶轮转速为1800 r/min的条件下搅拌2 min,然后将样品移入样品池中,近红外脉冲光源在0~40 mm的样品池高度范围内,由下至上进行扫描,共扫描60 min。

1.7 红外光谱测定

采用傅里叶变换红外光谱仪(Thermo Scientific,美国)测定粉煤灰样品和捕收剂(柴油、1600型、1030型和复配捕收剂)的红外光谱。试验采用KBr压片法,测量范围为 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$,分辨率为 4 cm^{-1} 。其中,粉煤灰样品的红外光谱测定是将粉煤灰与KBr质量比为1:100混合后研磨压片;捕收剂剂的

红外光谱测定是用注射器滴1滴捕收剂于预先压制成型的KBr片上。

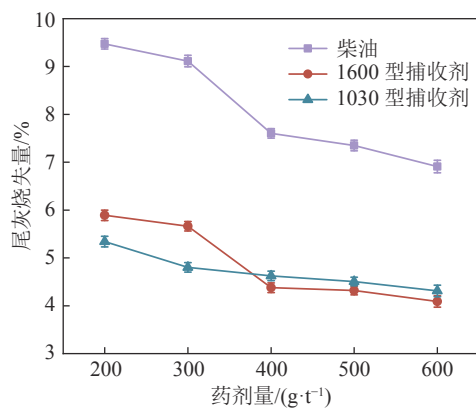
1.8 气相色谱-质谱联用仪测试

采用气相色谱-质谱联用仪(岛津 GCMS-QP2020 NX, 日本)生物柴油捕收剂的主要化学组成。升温程序为从初始色谱柱温度 50 °C 升温到 350 °C, 溶剂延迟时间为 4 min, 共计 35 min, 载气是氦气。化合物鉴定通过对照 NIST17 数据库, 用峰面积归一化法计算被检化合物的相对质量分数。

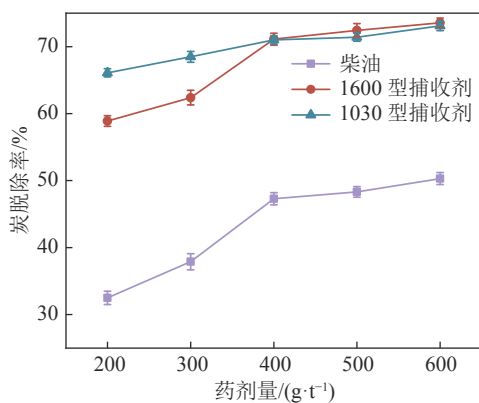
2 试验结果与讨论

2.1 浮选试验结果

图2为不同捕收剂及其用量下对江油粉煤灰的浮选脱炭试验结果。图2a为不同捕收剂条件下浮选尾灰烧失量的变化趋势。由图2a可知, 随着捕收剂用量从 200 g/t 增加至 600 g/t, 柴油捕收剂的浮选尾灰烧失量从 9.47% 降低至 6.91%; 1600 型捕收剂的浮选尾灰烧失量从 5.89% 降低至 4.09%; 1030 型捕收剂的浮选尾灰烧失量从 5.34% 降低至 4.31%。在相同药剂用量下, 生物柴油捕收剂尾灰烧失量均



(a) 对尾灰烧失量的影响



(b) 对炭脱除率的影响

图2 捕收剂种类和用量对粉煤灰浮选指标的影响

Fig.2 Influence of collector type and dosage on flotation index of coal fly ash

低于柴油, 并且在某些药剂用量下尾灰烧失量 < 5%, 达到 I 级粉煤灰标准。

图2b为不同捕收剂条件下炭脱除率的变化趋势。随着捕收剂用量从 200 g/t 增加至 600 g/t, 柴油捕收剂的炭脱除率从 32.50% 增加至 50.31%; 1600 捕收剂的炭脱除率从 58.89% 增加至 73.55%; 1030 捕收剂的炭脱除率从 66.10% 增加至 73.09%。通过图2可以看出, 在相同药剂用量下, 生物柴油捕收剂尾灰烧失量、炭脱除率指标均优于柴油, 表明生物柴油捕收剂有利于促进粉煤灰中未燃炭的浮选回收。

由图2可知 1600 型和 1030 型捕收剂在 400 g/t 的用量下均获得良好的浮选指标, 为了进一步探索 2 种捕收剂作用下的浮选效果, 将 2 种捕收剂进行复配探索其对浮选指标的影响。图3为在 400 g/t 的用量下 1600 和 1030 复配捕收剂不同复配比的浮选试验结果。

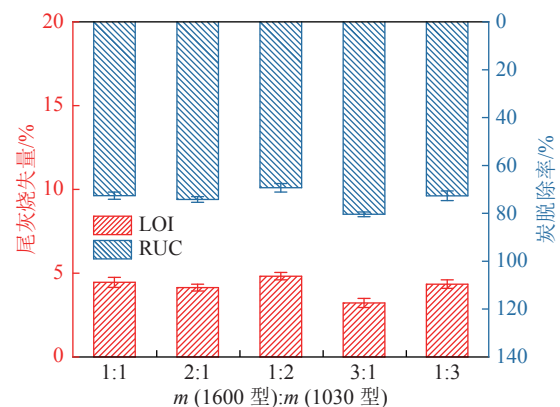


图3 不同复配比捕收剂对粉煤灰浮选指标的影响

Fig.3 Influence of collector with different compounding ratio on flotation index of coal fly ash

由图3可知, 随着 1600 型捕收剂占比增加, 可以得到更低的尾灰烧失量和更高的炭脱除率, 在质量复配比为 3 : 1 时, 尾灰烧失量为 3.31%, 炭脱除率为 80.11%, 达到了最佳浮选指标。图4为复配比为 3 : 1 时捕收剂不同用量下对江油粉煤灰的浮选试验结果。随着捕收剂用量从 100 g/t 增加至 500 g/t, 尾灰烧失量先降低后增加, 从 5.59% 降低至 3.19%, 而后增加至 3.52%; 炭脱除率先增加后降低, 从 63.41% 增加至 80.71%, 而后降低至 78.61%。在 200 g/t 用量下, 尾灰产率达到了 81.96%, 尾灰烧失量达到 4.93% < 5%, 达到 I 级粉煤灰标准。

综上所述, 生物柴油 1600 型和 1030 型复配捕收剂在粉煤灰的浮选过程中具有良好的选择性。在质量复配比为 3 : 1, 用量为 200 g/t 时, 浮选指标与药剂用量达到了最佳的平衡, 最具推广应用价值。

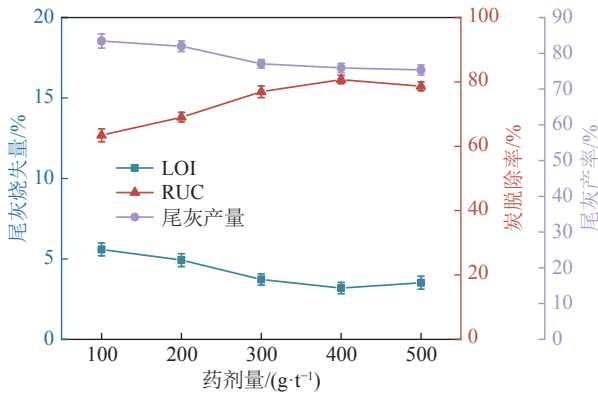


图4 复配捕收剂用量对粉煤灰浮选指标的影响

Fig.4 Influence of compound collector dosage on flotation index of coal fly ash

2.2 包覆角测试结果

包覆角的大小反映颗粒与气泡的作用强度,决定回收率的高低。图5为不同捕收剂处理后包覆角测试结果,包覆角随搅拌时间的增加而增大;不同捕收剂处理后,包覆角大小为柴油<1600型<1030型<复配药剂。说明生物柴油捕收剂的加入改善了粉煤灰中未燃炭颗粒表面疏水性,从而加强其与气泡间的附着,使之更容易黏附在气泡表面上浮成为浮选泡沫产品。

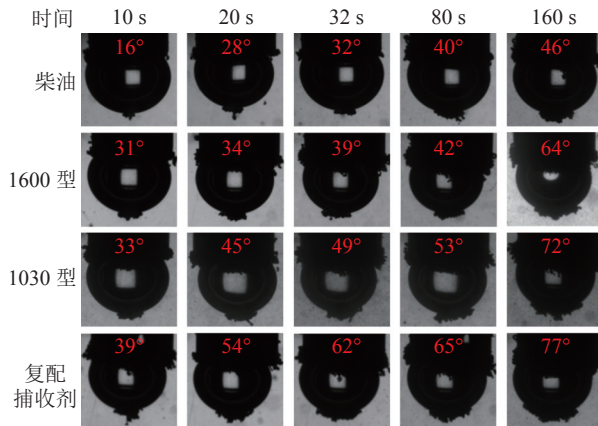


图5 不同捕收剂处理后包覆角测试结果

Fig.5 Test results of wrap angle after treatment with different collectors

2.3 饱和吸附量测试结果

对去离子水的饱和吸附量测试可以反映不同捕收剂处理后的粉煤灰对去离子水的吸附性能,表征粉煤灰表面疏水性的差异。图6为不同捕收剂处理后饱和吸附量测试结果。结果显示药剂的加入可以明显增强粉煤灰中未燃炭表面疏水性且增强效果为复配药剂>1600型捕收剂>1030型捕收剂>柴油。这表明,生物柴油捕收剂的加入可以降低对去离子水的吸附量,改善粉煤灰表面疏水性,结合包覆角测试

结果,可以证明增加粉煤灰浮选回收率的原因是强化了未燃炭与气泡的黏附。

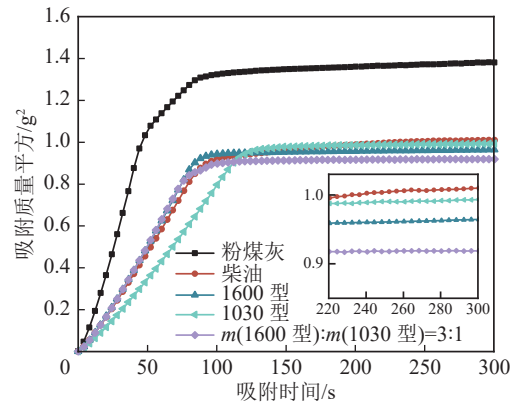
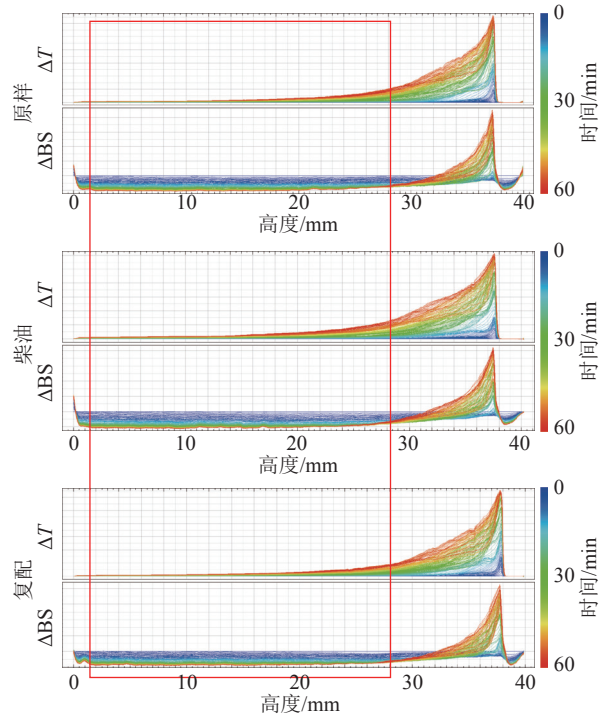


图6 不同捕收剂处理后饱和吸附量测试结果

Fig.6 Test results of saturated adsorption capacity after treatment with different collectors

2.4 颗粒团聚行为测试结果

颗粒团聚行为测试结果如图7所示,3种样品在样品池中部均发生了背散射光强度下降的情况,由于试验样品粒度大于600nm,说明均发生了颗粒团聚现象。分析结果如图8所示,随着时间的增加,颗粒团聚尺寸均为复配药剂>柴油>原样。这表明复配药剂的加入可以有效改善0.045~0.010mm的较细粉煤灰颗粒表面的疏水性,使其形成较大的团聚体,



注: ΔT 为透射光强度变化量; ΔBS 为背散射光强度变化量。

图7 颗粒团聚行为测试结果

Fig.7 Test results of particle agglomeration behavior

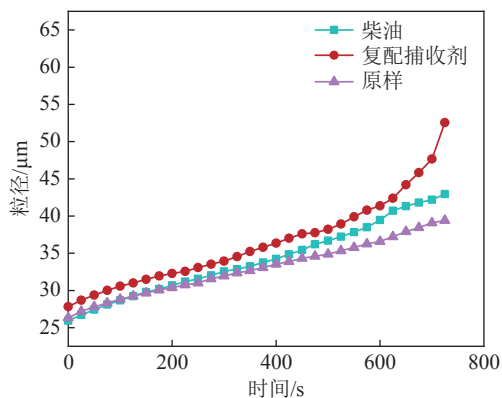


图 8 颗粒团聚分析

Fig.8 Particle agglomeration analysis

提高其与气泡的碰撞概率,降低水流夹带的影响,从而达到提产降灰的效果。

2.5 红外光谱分析结果

红外光谱测试结果如图 9 所示,其中 3467 cm^{-1} 为—OH 伸缩振动吸收峰^[20], $2846\sim 2964\text{ cm}^{-1}$ 为烷烃 C—H 伸缩振动吸收峰, 1742 cm^{-1} 为羧酸、酯、酮等的 C=O 伸缩振动峰, $1377\sim 1460\text{ cm}^{-1}$ 为 CH_3/CH_2 的吸收带^[21-22], 1071 cm^{-1} 为醚键 C—O 伸缩振动吸收峰, $726\sim 888\text{ cm}^{-1}$ 为苯环上=CH 的面外弯曲振动吸收峰^[8], 460 cm^{-1} 和 560 cm^{-1} 处为高岭土吸收峰^[23]。测试结果表明粉煤灰表面含有大量极性含氧官能团和芳香环结构,生物柴油较柴油不仅含有芳香环等非极性结构,而且还含有极性含氧官能团。

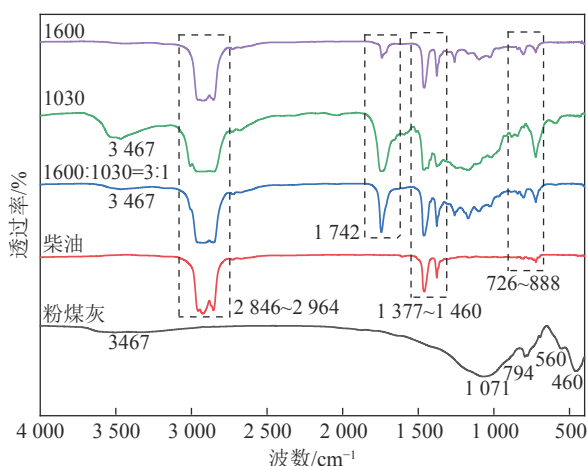


图 9 粉煤灰与不同捕收剂的红外光谱

Fig.9 FTIR spectrum of coal fly ash and different collectors

结合红外光谱的分析结果可知,粉煤灰表面的芳香环结构(非极性位点)可与捕收剂的芳香环等非极性结构结合,而生物柴油捕收剂的极性含氧官能团还可与粉煤灰表面的含氧官能团(极性位点)通过氢键结合,促进了生物柴油捕收剂在粉煤灰表面的罩盖以及极性位点的改性,增加了粉煤灰表面的疏

水性,提高了粉煤灰的可浮性。

2.6 气相色谱-质谱联用测试结果

气相色谱-质谱联用技术是分析油类药剂的有效方法之一^[24]。通过表 3 和表 4 可以看出,生物柴油捕收剂除了含有正十六烷、正十七烷和正二十一烷等长链烃类化合物,还含有大量的酯、羧酸和醇类化合物。其中,酯、羧酸和醇类化合物具有一端极性、另一端非极性的结构特点。

表 3 1600 型捕收剂的气相色谱-质谱分析结果

Table 3 GC/MS analysis of 1600 collector

保留时间/min	物质	质量分数/%
15.101	正十六烷	4.57
17.313	正十七烷	30.17
17.376	植烷	2.69
20.245	正二十一烷	37.97
21.136	正二十二烷	3.26
23.613	碳酸二乙基己酯	6.04
25.107	14-羟基十八酸	3.64
26.023	20-羟基二十烷酸	2.89
28.215	油酸十四烷醇酯	8.77

表 4 1030 型捕收剂的气相色谱-质谱分析结果

Table 4 GC/MS analysis of 1030 collector

保留时间/min	物质	质量分数/%
20.386	反-9-十八碳烯酸甲酯	40.88
20.533	硬酯酸甲酯C18	3.83
22.057	顺-13-二十烯酸甲酯	6.93
22.279	花生酸甲酯	8.83
23.671	芥酸甲酯	2.86
23.872	山嵛酸甲酯	6.60
25.176	cis-15-十四酸甲酯	2.42
25.348	木蜡酸甲酯	5.25
26.467	正三十六烷	2.04
30.268	β-谷甾醇	2.11

注：仅统计分析质量分数大于2%的物质。

结合红外光谱和气相色谱-质谱联用结果,得到生物柴油强化粉煤灰的浮选机理如下:生物柴油捕收剂中的长链烷烃化合物可与粉煤灰表面的疏水位点发生作用,生物柴油捕收剂中的酯、羧酸和醇类化合物的极性端可与粉煤灰表面的亲水位点通过氢键发生作用,对亲水位点进行罩盖,使其疏水端暴露在矿浆中,故对粉煤灰表面亲水位点进行改性,提高了粉煤灰表面疏水性。相比,柴油捕收剂仅能与粉煤

灰表面的疏水位点进行作用,故而难以提高粉煤灰表面疏水性和得到更好的浮选指标。

3 结 论

1)使用生物柴油捕收剂浮选粉煤灰可以得到良好的浮选指标。对比柴油捕收剂,炭脱除率提高约25%,且精矿灰分更低;同时,使用生物柴油捕收剂可以得到尾灰烧失量<5%的I级粉煤灰。

2)将2种生物柴油捕收剂1600和1030复配进行粉煤灰脱炭浮选试验,可以在更低的药剂消耗量下得到更加优质的浮选指标。其中,炭脱除率高于单一生物柴油捕收剂,精矿灰分低于单一生物柴油捕收剂,也可以得到尾灰烧失量<5%的I级粉煤灰。在质量复配比为3:1,用量为200 g/t时,浮选指标与药剂用量达到了最佳的平衡,最具推广应用价值。

3)生物柴油捕收剂中的酯、羧酸和醇类化合物的极性端可与粉煤灰表面的亲水位点通过氢键发生作用,对亲水位点进行罩盖,使其疏水端暴露在矿浆中,对粉煤灰表面亲水位点进行改性,增加了粉煤灰表面疏水位点数量,使其细颗粒更易团聚,提高其与气泡的碰撞概率,降低水流夹带的影响,从而提高了粉煤灰的可浮性以及降低了泡沫产品的灰分。

参考文献(References):

[1] 张旭,杜涛.粉煤灰的高效利用及粉煤灰基 Al-MCM-41 的制备 [A]. 第十一届全国能源与热工学术年会论文集 [C]. 中国安徽马鞍山, 2021: 200-214.
ZHANG Xu, DU Tao. Efficient utilization of coal fly ash and CFA-based Al-MCM-41 preparation [A]. Proceedings of the 11th National Energy and Thermal Engineering Academic Annual Meeting [C]. Ma'anshan, Anhui, China, 2021: 200-214.

[2] 李 琴,杨岳斌,刘 君,等.我国粉煤灰利用现状及展望 [J]. 能源研究与管理, 2022(1): 29-34.
LI Qin, YANG Yuebin, LIU Jun, *et al.* Present status and Prospect of fly ash utilization in China [J]. Energy Research and Management, 2022(1): 29-34.

[3] 李国胜. 浮选泡沫的稳定性调控及粉煤灰脱炭研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
LI Guosheng. Regulation of flotation froth stability and removal of unburned-carbon from coal fly ash [D]. Xuzhou: China University of mining and technology, 2013.

[4] 朱广利,王浩宇,李海龙,等.粉煤灰脱炭研究进展及展望 [J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1): 110-114.
ZHU Guangli, WANG Haoyu, LI Hailong, *et al.* Methods of fly ash decarbonization [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 110-114.

[5] UÇURUM M, TORAMAN Ö Y, DEPCI T, *et al.* A Study on characterization and use of flotation to separate unburned carbon in

bottom ash from cayirhan power plant [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2011, 33(6): 562-574.

[6] YANG L, LI D, ZHU Z, *et al.* Effect of the intensification of pre-conditioning on the separation of unburned carbon from coal fly ash [J]. Fuel, 2019, 242: 174-183.

[7] 廖寅飞,任厚瑞,安茂燕,等.新型纳米粒子捕收剂强化低阶煤浮选机理 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2767-2775.
LIAO Yinfei, REN Hourui, AN Maoyan, *et al.* Mechansim of enhancing low rank coal flotation using nanoparticles as a novel collector [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2767-2775.

[8] 夏文成,胡志伟,李懿江,等.煤焦油基捕收剂强化长焰煤的浮选及机理 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 176-182.
XIA Wencheng, HU Zhiwei, LI Yijiang, *et al.* Coal tar-based collector enhancing the flotation of long flame coal and its mechanism [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(1): 176-182.

[9] 王 磊,李孟乐,常国慧,等.非离子型复配捕收剂强化长焰煤浮选试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 323-333.
WANG Lei, LI Mengle, CHANG Guohui, *et al.* Study on mechanism of non-ionic compound collector for enhancing flotation of long flame coal [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 323-333.

[10] XING Y, GUO F, XU M, *et al.* Separation of unburned carbon from coal fly ash: A review [J]. Powder Technology, 2019, 353: 372-384.

[11] EISELE T C, KAWATRA S K. Use of froth flotation to remove unburned carbon from fly ash [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2002, 23(1): 1-10.

[12] HARRIS T, WHELOCK T D. Process conditions for the separation of carbon from fly ash by froth flotation [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2008, 28(3): 133-152.

[13] DRZYMALA J, GORKE J T, WHELOCK T D. A flotation collector for the separation of unburned carbon from fly ash [J]. Coal Preparation, 2005, 25(2): 67-80.

[14] YANG L, LI D, ZHANG L, *et al.* On the utilization of waste fried oil as flotation collector to remove carbon from coal fly ash [J]. Waste Management, 2020, 113: 62-69.

[15] LI Y, HU Z, XIA W, *et al.* Application of compound reagent H511 in the flotation removal of unburned carbon from fly ash [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 595: 124699.

[16] ZHOU F, YAN C, WANG H, *et al.* The result of surfactants on froth flotation of unburned carbon from coal fly ash [J]. Fuel, 2017, 190: 182-188.

[17] 胡振文,郭远新,林祥玲,等.高炭粉煤灰浮选脱炭试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 907-913.
HU Zhenwen, GUO Yuanxin, LIN Xiangling, *et al.* Experimental research on decarbonization of high-carbon fly ash by flotation [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 907-913.

[18] XING Y, XU M, GUO F, *et al.* Role of different types of clay in

- the floatability of coal; Induction time and bubble-particle attachment kinetics analysis[J]. *Powder Technology*, 2019, 344: 814–818.
- [19] XIA Y, YANG Z, ZHANG R, *et al.* Performance of used lubricating oil as flotation collector for the recovery of clean low-rank coal[J]. *Fuel*, 2019, 239: 717–725.
- [20] LIU W, LIU W, WEI D, *et al.* Synthesis of N, N-Bis(2-hydroxypropyl) laurylamine and its flotation on quartz[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 309: 63–69.
- [21] YAO Q, LI Y, TANG X, *et al.* Separation of petroleum ether extracted residue of low temperature coal tar by chromatography column and structural feature of fractions by TG-FTIR and PY-GC/MS[J]. *Fuel*, 2019, 245: 122–130.
- [22] MIAO Z, XING Y, GUI X, *et al.* Anthracite coal flotation using dodecane and Nonyl Benzene[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2018, 38(8): 393–401.
- [23] 周长春, 阎波, 刘炯天. 芳烃捕收剂的结构对浮选性能的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41(1): 82–85.
- ZHOU Changchun, YAN Bo, LIU Jiongtian. Effects of the structures of aromatic collectors on flotation performance[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2012, 41(1): 82–85.
- [24] 王福丽, 王颖. 实验室气质联用(GC/MS)常见问题及处理方法[J]. *中国检验检疫*, 2021, 29(4): 87–88.
- WANG Fuli, WANG Ying. Common Problems and solutions of laboratory GC/MS[J]. *China Inspection Body and Laboratory*, 2021, 29(4): 87–88.