

# 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

郭凯<sup>1</sup>, 张国富<sup>1</sup>, 张国华<sup>1</sup>, 郭舟<sup>2</sup>, 李维超<sup>2</sup>, 刘文刚<sup>2</sup>

1. 山西潞安煤基清洁能源有限责任公司, 山西 长治 046200;
2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD94 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)06-0095-05  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.06.011

**摘要** 为进一步拓展煤基费托合成油的利用途径, 发展低能耗、低污染、低排放、低成本绿色利用技术, 并赋能煤化工碳达峰和碳中和, 以煤基费托合成油为基础, 通过复配制得新型捕收剂, 并考察了其与传统烃类油在低阶煤泥浮选中的应用效果。结果表明, 复配煤基费托合成油可作为煤泥浮选捕收剂使用, 且在用量相同的条件下, 可获得比传统烃类油捕收剂更好的浮选指标。在捕收剂用量为 50 g/t 时, 采用煤油为捕收剂, 获得的精煤灰分为 9.01%、精煤产率为 86.48%, 而采用煤基费托合成油 JZC-1、LHC-1 与 JCZC 以质量比 1:1:1 进行三元复配作捕收剂, 精煤灰分为 8.96%、精煤产率为 86.80%。与传统烃类油相比, 复配煤基费托合成油中存在更长的碳链, 且存在一定的异构烷烃, 通过优化捕收剂中烷烃碳链长短和支链数量, 提高了其选择性和捕收能力, 因此在相同的用量条件下, 可获得灰分更低、产率更高的精煤产品。

**关键词** 费托合成油; 复配; 捕收剂; 低阶煤; 浮选

## 前言

费托合成是以合成气(一氧化碳和氢气的混合气体)为原料在催化剂和适当条件下合成液态的烃或碳氢化合物的工艺过程, 该工艺作为煤炭高值化利用的重要手段, 可分为高温和低温合成工艺<sup>[1]</sup>。低温费托反应产物以蜡和脂肪族烷烃为主, 产品相对单一<sup>[2]</sup>, 而高温费托反应产物中含有大量烯烃, 可通过分离抽提和深加工制备高附加值产品, 因此具有更广阔的工业应用前景。研究高温费托合成油的高值化利用, 发展低能耗、低污染、低排放、低成本绿色利用技术, 是煤化工可持续发展并赋能碳达峰、碳中和的重要途径<sup>[3-4]</sup>。

近年来, 伴随着我国经济的快速发展, 能源消耗日趋增加, 对煤炭的需求也大幅增加<sup>[5]</sup>。随着煤炭消耗量的增加, 导致我国优质煤储量逐年下降。大部分煤炭资源需要经浮选提质后才能进行利用<sup>[6-7]</sup>。在煤炭浮选过程中, 普遍使用传统非极性烃类油作为捕收剂, 如煤油、柴油, 而这些捕收剂在煤表面上的吸附程

度往往较低<sup>[8]</sup>。除烟煤以外其他变质程度较低的煤, 大多存在较多的含氧官能团(COOH、-OH 等)和较多的孔隙, 促进了煤自然亲水界面的形成, 从而限制了传统捕收剂在煤表面的吸附, 因此传统烃类油捕收剂并不能起到很好的浮选效果, 且药剂消耗量大<sup>[9-10]</sup>。为降低捕收剂用量, 提高传统烃类油捕收剂的浮选性能, 国内外众多学者通过将烃类油捕收剂进行复配以强化煤泥的浮选<sup>[11-12]</sup>。荀海鑫等<sup>[13]</sup>、康文泽等<sup>[14]</sup>自主研发的 AO 型捕收剂是将表面活性剂、芳香烃、直链烷烃、环烷烃进行混合制备而成, 其在难浮煤泥的浮选过程中, 效果优于柴油、煤油等非极性烃类油。

煤基费托合成油多为烷烃类有机化合物, 具备作为煤基捕收剂使用的基本要求。为进一步拓展煤基费托合成油的利用途径, 本文考察了其在低阶煤泥浮选中的应用情况。本文在对煤基费托合成油浮选性能进行系统分析的基础上, 考察了其复配使用对低阶煤泥浮选性能的影响, 并确定了最佳的复配条件, 为拓展煤基费托合成油的利用途径、开发高效的贫煤浮选捕收剂奠定基础。

收稿日期: 2023-11-28

作者简介: 郭凯(1984—), 男, 山西长治人, 工程师, 主要从事煤基费托合成油检测及化工检验分析工作, Email: gksmail@163.com。

通信作者: 刘文刚(1981—), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士生导师, 主要从事选矿药剂研发及矿物加工过程中的环境保护相关研究, E-mail: liuwengang@mail.neu.edu.cn。

# 1 实验

## 1.1 实验原料

实验所用煤泥样品取自山西潞安集团某选矿厂, 对其进行工业分析, 结果见表 1 所示。

表 1 煤样的工业分析 /%

水分	灰分	挥发分	固定碳
0.92	17.30	10.74	71.04

由表 1 分析结果可知, 该样品的水分含量较低, 仅 0.92%, 灰分含量较高为 17.30%, 固定碳含量也较高, 为 71.04%。该煤样属于烟煤。

实验所用煤基费托合成油取自山西潞安煤基清洁能源有限责任公司, 前期通过条件实验筛选出了 4 种浮选效果相对较好的费托合成油, 分别标号为 LHC-1、JCQC、JZC-1 和 JCZC。四种合成油中正构烷烃和异构烷烃含量如表 2 所示。浮选用起泡剂为山西潞安集团某选矿厂现用浮选起泡剂。

表 2 煤基费托合成油品的正构烷烃和异构烷烃含量分析 /%

种类	LHC-1	JCQC	JZC-1	JCZC
正构烷烃	14.93	14.73	93.73	4.08
异构烷烃	85.07	85.27	6.27	95.92

## 1.2 实验方法

浮选实验在 XFD-V 型 0.5 L 单槽浮选机中进行, 矿浆质量浓度固定为 80 g/L、主轴转速 1 800 r/min、充气量 180 L/h。浮选过程为: 煤泥样品加水调浆 1 min 后依次加入捕收剂、起泡剂, 每加入一种药剂后搅拌 2 min; 浮选 3 min 后将获得的泡沫产品烘干、计量, 计算回收率。煤泥浮选实验固定起泡剂用量为 100 g/t, 浮选实验流程如图 1 所示。

# 2 实验结果与讨论

## 2.1 常规烃类油捕收剂对煤泥浮选的影响

以煤油和 0#柴油为捕收剂时, 捕收剂用量对煤泥浮选效果的影响如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 当采用煤油为捕收剂时, 随着煤油用量的增加, 精煤产率和精煤灰分均呈现先增加后趋于稳定的趋势。煤油用量为 50 g/t 时, 精煤产率为 86.48%, 灰分最低为 9.01%。当采用 0#柴油为捕收剂, 随着药剂用量增加, 精煤产率和精煤灰分均先增加后降低。0#柴油在用

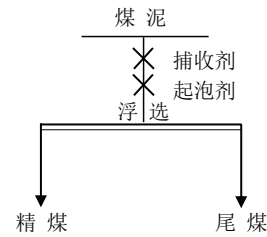


图 1 浮选实验流程 Fig. 1 Flotation chart of coal slime

量为 50 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 9.37%, 此时精煤产率为 87.24%; 而当 0#柴油用量为 100 g/t 时, 精煤的产率最高为 90.03%, 而此时精煤的灰分也最高, 为 9.97%。

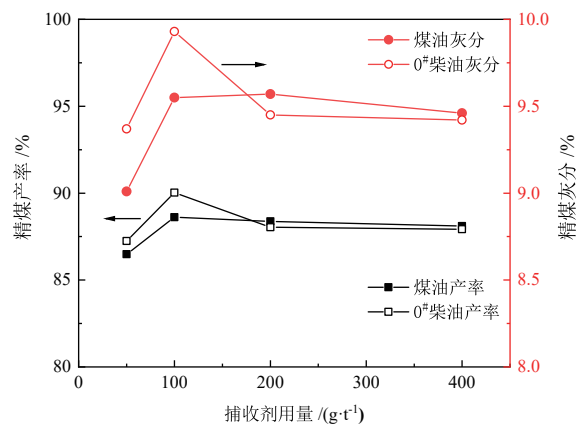


图 2 煤油和 0#柴油用量对煤泥浮选效果的影响 Fig. 2 Effect of kerosene and 0# diesel dosages on coal slime flotation

## 2.2 煤基费托合成油对煤泥浮选的影响

4 种煤基费托合成油 (LHC-1、JCQC、JZC-1 和 JCZC) 对该煤泥的浮选效果如图 3 所示。从图中可以看出, 以 4 种煤基费托合成油为捕收剂进行浮选, 获得的精煤灰分均在 9% 以上, 精煤产率变化不大, 最大

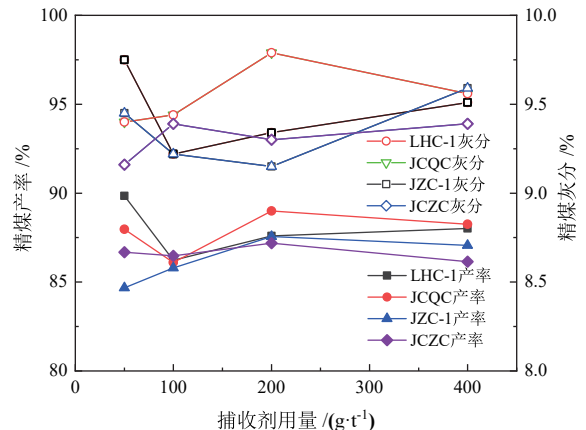


图 3 LHC-1、JCQC、JZC-1 和 JCZC 用量对煤泥浮选效果的影响 Fig. 3 Effect of LHC-1, JCQC, JZC-1 and JCZC dosages on coal slime flotation

差值在 5% 以内。以 LHC-1 为捕收剂且用量为 50 g/t 时, 获得的精煤产率最高为 89.85%, 此时精煤灰分为 9.75%; 以 JZC-1 为捕收剂, 用量为 200 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 9.15%, 此时精煤产率为 87.56%。综合分析可知, 几种煤基费托合成油作为捕收剂使用时, JZC-1 体现了较好的浮选选择性, 而 LHC-1 捕收能力最强。

相比于煤油和 0<sup>#</sup>柴油而言, 在相同用量的条件下, JCZC 作为捕收剂能够获得相近的浮选指标。采用 LHC-1 作为捕收剂时, 在较低用量的条件下, 能够获得较高的精煤产率, 但此时的精煤灰分较高。由此可见, 煤基费托合成油能够作为煤泥浮选捕收剂使用。

## 2.3 煤基费托合成油复配对煤泥浮选的影响

### 2.3.1 二元复配煤基费托合成油对浮选效果的影响

通过前述研究可知, 所取的煤基费托合成油具有作为煤泥浮选捕收剂使用的潜力, 且 JZC-1 作为捕收剂时, 所得精煤灰分最低, 说明其选择性最好; 但精煤产率偏低。鉴于此, 为进一步提升浮选效果, 研究中考察了其分别与其他三种煤基费托合成油 LHC-1、JCQC 和 JCZC 按质量比 1:1 复配后的浮选效果, 结果如图 4 所示。

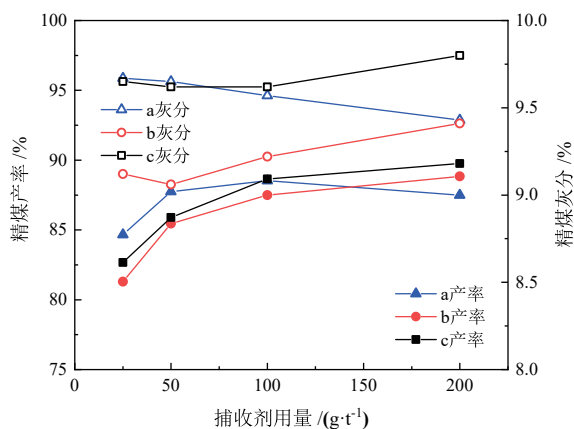


图 4 JZC-1 与 LHC-1、JCQC 和 JCZC 复配对煤泥浮选效果的影响(a: JZC-1/JCQC; b: JZC-1/LHC-1; c: JZC-1/JCZC)

Fig. 4 Effect of combination of JZC-1 with LHC-1, JCQC and JCZC on slime flotation (a: JZC-1/JCQC; b: JZC-1/LHC-1; c: JZC-1/JCZC)

从图 4 可以看出, 当复配捕收剂 a 用量为 200 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 9.43%, 精煤的产率为 87.50%。JZC-1 与 JCQC 复配使用后, 获得的精煤产率与单独使用 JZC-1 相差不大, 但精煤灰分仍然偏高。当复配捕收剂为 b、在用量为 50 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 9.06%, 此时精煤产率为 85.46%。而在捕收剂用量为 200 g/t 时, 精煤的产率最高, 仅为 88.83%, 此时精煤灰分为 9.41%。这说明 JZC-1 与 LHC-1 复配以

后, 精煤灰分有所降低, 但精煤产率与 JZC-1 单独使用时无明显变化。当复配捕收剂为 c、在用量为 200 g/t 时, 精煤的产率最高为 89.76%, 此时精煤的灰分也最高为 9.80%。在复配捕收剂 c 用量为 50 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 9.62%, 此时精煤产率为 85.90%。综合分析可知, JZC-1 与 LHC-1 以质量比 1:1 进行复配后, 浮选后获得的精煤指标相对最优。

### 2.3.2 三元复配煤基费托合成油对浮选效果的影响

通过分析煤基费托合成油二元复配后对煤泥的浮选效果可以看出, JZC-1 与 LHC-1 以质量比 1:1 进行复配后, 在较小的捕收剂用量条件下即可获得较低的精煤灰分, 但精煤产率偏低。而 JZC-1 与 JCQC 或 JCZC 复配后, 精煤产率有所提升, 但精煤灰分偏高。鉴于此, 论文考察了 JZC-1 和 LHC-1 与其他两种费托合成油 JCQC 和 JCZC 分别按质量比 1:1:1 进行三元复配后对煤泥的浮选效果, 结果如图 5 所示。

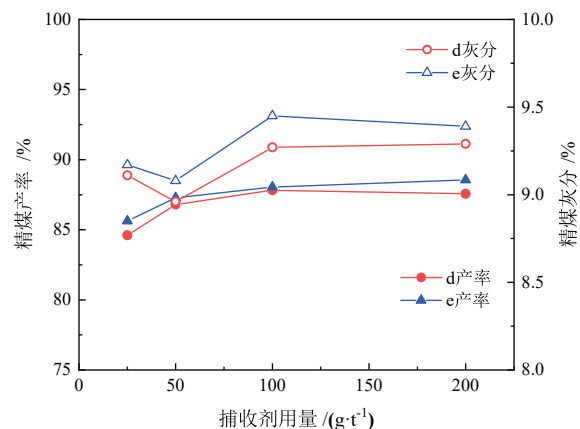


图 5 JZC-1 和 LHC-1 与 JCQC 和 JCZC 复配对煤泥浮选效果的影响(d: JZC-1/LHC-1/JCZC; e: JZC-1/LHC-1/JCQC)

Fig. 5 Effect of combination of JZC-1 and LHC-1 with JCQC and JCZC on slime flotation (d: JZC-1/LHC-1/JCZC; e: JZC-1/LHC-1/JCQC)

从图 5 可以看出, 当复配捕收剂为 d、在用量为 50 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 8.96%, 此时精煤的产率为 86.80%。对比煤基费托合成油单独使用和二元复配时的浮选结果可知, JZC-1、LHC-1 和 JCZC 复配使用, 可在取得较低精煤灰分的同时, 获得较高的精煤产率, 提升了煤泥浮选效果。从图中也可以看出, 当复配捕收剂为 e、在用量为 50 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 9.08%, 此时精煤的产率为 87.28%。由浮选结果可知, JZC-1、LHC-1 和 JCQC 复配使用, 也可进一步提升煤泥的浮选效果, 且取得与 JZC-1、LHC-1 与 JCQC 以质量比 1:1:1 复配后相近的浮选效果。

通过对比分析煤基费托合成油品二元和三元复配体系可知, JZC-1、LHC-1 与 JCZC 或 JCQC 以质量比 1:1:1 进行三元复配时, 可取得最佳的煤泥浮选



指标,且优于传统烃类油捕收剂煤油和 0<sup>#</sup>柴油。

## 2.4 三元复配药剂与传统烃类药剂的捕收机理对比

从表 2 可以看出, JZC-1 中的正构烷烃含量最高为 93.73%, 说明支链较少, 因此分子间的相互作用较强, 烷烃分子聚集且倾向于垂直于低阶煤表面吸附<sup>[15-16]</sup>, 导致 JZC-1 整体上对低阶煤表面亲疏水位点的覆盖效果差, 因此 JZC-1 的捕收能力相对较弱, 但选择性较好。四种煤基费托合成油 LHC-1、JCQC、JZC-1 和 JCZC 不同碳链长度烷烃的含量分析结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 相比于煤油(C<sub>9~16</sub>)和柴油(C<sub>12~15</sub>)的碳链长度, 煤基费托合成油品的碳链更长。因此, 与传统烃类油捕收剂煤油和柴油相比, 煤基费托合成油因为存在更长的碳链, 导致在浮选过程中会有更多的 C-C/C-H 官能团暴露出来, 从而使低阶煤的疏水性位点更容易被捕收。同时煤基费托合成油中存在一定的异构烷烃, 进一步强化了捕收剂的捕收能力。因此, 在低阶煤泥浮选中, 相比于传统烃类油捕收剂, 通过复配煤泥费托合成油, 优化捕收剂中烷烃碳链长短和支链多少, 能够获得灰分更低、产率更高的精煤产品。

表 3 煤基费托合成油品不同碳链长度含量 /%

Table 3 Carbon chain length content of coal-based Fischer-Tropsch synthetic oil products

碳链长度	LHC-1	JCQC	JZC-1	JCZC
C <sub>8-16</sub>	94.42	99.89	94.48	46.26
C <sub>17-25</sub>	5.58	0.11	5.52	53.74

## 3 结论

(1) 以煤油为捕收剂、在用量为 50 g/t 时, 精煤产率为 86.48%, 灰分最低为 9.01%。以 LHC-1 为捕收剂、在用量为 50 g/t 时, 获得的精煤产率最高为 89.85%, 精煤灰分为 9.75%; 以 JZC-1 为捕收剂、用量为 200 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 9.15%, 精煤产率为 87.56%。

(2) 以 JZC-1 与 LHC-1 以质量比 1:1 进行二元复配为捕收剂, 当用量为 50 g/t 时, 精煤的产率最低为 85.46%, 精煤灰分最低为 9.06%。

(3) 以 JZC-1、LHC-1 与 JCZC 以质量比 1:1:1 进行三元复配, 当捕收剂用量为 50 g/t 时, 获得的精煤灰分最低为 8.96%, 精煤产率为 86.80%。

(4) 煤基费托合成油复配可强化其对低阶煤泥的浮选性能, 与传统烃类油捕收剂相比, 在相同用量条件下, 获得的精煤灰分更低、产率更高; 同时其成本更低廉, 成分中不含苯及其同系物, 更加环保。

## 参考文献:

[1] 王晓亮. 费托合成技术的发展前景[J]. 山西化工, 2018, 38(3):

49-51.

WANG X L. Development prospect of Fischer-Tropsch synthesis technology[J]. Shanxi Chemical Industry, 2018, 38(3): 49-51.

- [2] 闫秀婷. 费托合成技术介绍[J]. 当代化工, 2013, 42(6): 821-822.  
YAN X T. Introduction of Fischer-Tropsch synthesis technology[J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(6): 821-822.
- [3] CHEN C B, HOU B, LIU Y, et al. Carbon species on the surface of carbon-coated catalysts and their effects on Fischer-Tropsch synthesis products[J]. Fuel, 2024, 341: 127381.
- [4] CHEN Z P, MENG Y L, LU J, et al. The Effect of hydrophobically modified iron catalysts with hexadecyltrimethoxysilane on Fischer-Tropsch synthesis[J]. Chemistry Select, 2023, 8: e202202903.
- [5] 任雷平, 胡小刚, 胡玉玺. 混合药剂系统在煤浮选中的研究进展[J]. 中国煤炭, 2023, 49(6): 98-104.  
REN L P, HU X G, HU Y X. Research progress of mixed reagent system in coal flotation[J]. China Coal, 2023, 49(6): 98-104.
- [6] 夏阳超, 蓬鹏程, 邢耀文, 等. 基于分子对接技术的难浮煤浮选捕收剂虚拟筛选研究[J]. 煤炭学报, 2022(1): 1-19.  
XIA Y C, QU P C, XING Y W, et al. Study on virtual screening of collector for flotation of difficult floating coal based on molecular docking technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022(1): 1-19.
- [7] 曹亦俊, 闫小康, 王利军, 等. 微细粒浮选的微湍流强化[J]. 矿产保护与利用, 2017(2): 113-118.  
CAO Y J, YAN X K, WANG L J, et al. Microturbulence enhancement of fine flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(2): 113-118.
- [8] 王晖, 李志红, 樊民强, 等. 羧酸对低阶煤泥浮选的促进作用研究[J]. 矿产综合利用, 2023(2): 45-51.  
WANG H, LI Z H, FAN M Q, et al. Study on promoting effect of carboxylic acid on flotation of low-rank slime[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2023(2): 45-51.
- [9] CHENG G, ZHANG M N, LU Y, et al. New insights for improving low-rank coal flotation performance via emulsified waste fried oil collector[J]. Fuel, 2024, 357: 129925.
- [10] ZHANG M N, CHENG G, LU YANG, et al. Preparation of long-flame coal flotation collector from waste cooking oil[J]. Minerals Engineering, 2023, 202: 108296.
- [11] 赵俊吉, 王钰赛, 刘晓康, 等. 新型复配捕收剂强化低阶煤泥浮选机理研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(5): 33-39.  
ZHAO J J, WANG Y S, LIU X K, et al. Study on mechanism of strengthening low-rank slime flotation with new compound collector[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(5): 33-39.
- [12] 陈嘉亮, 朱文耀, 常梦洁, 等. 煤油/油酸甲酯复配捕收剂浮选南梁煤矿煤泥的实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 20-26.  
CHEN J L, ZHU W Y, CHANG M J, et al. 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.
- [13] 荀海鑫, 康文泽, 刘松阳. AO捕收剂对稀缺难浮煤泥的捕收效果研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(8): 118-124.  
XUN H X, KANG W Z, LIU S Y. Study on collecting effect of AO collector on scarce and difficult-to-float coal slime[J]. Coal science and technology, 2012, 40(8): 118-124.
- [14] 康文泽, 刘松阳, 张亚革. AO捕收剂浮选稀缺难浮煤实验[J]. 黑龙江科技学院学报, 2011, 21(2): 85-88.  
KANG W Z, LIU S Y, ZHANG Y G. Experiment on flotation of scarce and difficult-to-float coal with AO collector[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2011, 21(2): 85-88.
- [15] 夏阳超. 褐煤表面吸水机理及润湿性调控的分子模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.

XIA Y C. Molecular simulation of water absorption mechanism and wettability regulation on lignite surface[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.

[16] 解维伟, 王亚宁, 张子洞, 等. 同碳数烷烃捕收剂的结构对浮选性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2023. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/>

51.1251.td.20231011.1101.002.html.

XIE W W, WANG Y N, ZHANG Z D, et al. Influence of the structure of same carbon number alkane traps on flotation performance[J]. Comprehensive Utilization of Minerals Resources, 2023. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.td.20231011.1101.002.html>.

## Comparative Study on Flotation of Low Rank Coal Slime by Compound Coal-based Fischer-tropsch Synthetic Oil and Traditional Hydrocarbon Oil

GUO Kai<sup>1</sup>, ZHANG Guofu<sup>1</sup>, ZHANG Guohua<sup>1</sup>, GUO Zhou<sup>2</sup>, LI Weichao<sup>2</sup>, LIU Wengang<sup>2</sup>

1. Shanxi Lu'an Coal-based Clean Energy Co., Ltd, Chang Zhi 046200, Shanxi, China;

2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

**Abstract:** In order to further expand the utilization of coal-based fischer-tropsch synthetic oil, develop green utilization technology with low energy consumption, low pollution, low emission and low cost, and empower carbon peaking and carbon neutralization in coal chemical industry, a new collector was prepared based on coal-based fischer-tropsch synthetic oil, and its application effect with traditional hydrocarbon oil in low-order slime flotation was investigated. The results showed that the blended coal-based fischer-tropsch synthetic oil could be used as collector for coal slime flotation, and under the condition of the same dosage, it could obtain better flotation index than traditional hydrocarbon oil collector. When the collector dosage was 50 g/t and kerosene was used as collector, the clean coal ash fraction was 9.01%, and the clean coal yield was 86.48%. When the coal-based fischer-tropsch synthetic oil JZC-1, LHC-1 and JCZC were mixed in a mass ratio of 1 : 1 : 1, the better flotation clean coal index could be obtained, at this time, the clean coal ash fraction was 8.96%, and the clean coal yield was 86.80%. Compared with traditional hydrocarbon oil, compound coal-based fischer-tropsch synthetic oil had longer carbon chain and some isoparaffins. By optimizing the length of alkane carbon chain and the number of branched chains in collector, its selectivity and collectivity were improved, so clean coal products with lower ash content and higher yield could be obtained under the same dosage.

**Keywords:** fischer-tropsch synthetic oil; compound; collector; low rank coal; flotation

引用格式: 郭凯, 张国富, 张国华, 郭舟, 李维超, 刘文刚. 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.

GUO Kai, ZHANG Guofu, ZHANG Guohua, GUO Zhou, LI Weichao, LIU Wengang. Comparative study on flotation of low rank coal slime by compound coal-based fischer-tropsch synthetic oil and traditional hydrocarbon oil[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6): 95-99.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)