



## 长焰煤的载体浮选试验研究

耿鹏岳

引用本文:

耿鹏岳. 长焰煤的载体浮选试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 224–230.

GENG Pengyue. Study on carrier flotation of long flame coal[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 224–230.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0822>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 长焰煤低温氧化主要官能团迁移规律研究

Study on transfer law of main functional groups in low temperature oxidation of long flame coal

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c350d7be-1e74-4584-8779-c8447acd3049>

##### 颗粒形状对长焰煤颗粒气泡脱附行为的影响

Effect of particle shape on detachment behavior between long flame coal particles and bubble

煤炭科学技术. 2020, 48(11): 217–222 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/742abe32-6e46-4b27-9a38-0ebd7798ae71>

##### 硫对长焰煤自燃过程影响的试验研究

Experimental study on effect of sulfur on spontaneous combustion process of long-flame coal

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4df8c8b8-d226-4af6-af00-430796c47b36>

##### 水浸长焰煤自燃预测预报指标气体试验研究

Experimental study on spontaneous combustion prediction index gas of water immersed long flame coal

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/71bbcd31-d7df-40cd-b34e-23a909a636d8>

##### 油酸甲酯对长焰煤的捕收性能及量子化学计算

Capture performance and quantum chemistry calculation of methyl oleate on long flame coal surface

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0714ca40-7c7f-4fe9-bd50-0a54b17db30c>

##### 低温等离子体改性技术对煤泥浮选效果的影响

Effect of low temperature plasma modification technology on coal slime flotation

煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d814fbde-aa6b-4871-ad4e-50c8822c0be3>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

耿鹏岳. 长焰煤的载体浮选试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 224–230.

GENG Pengyue. Study on carrier flotation of long flame coal[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 224–230.

## 长焰煤的载体浮选试验研究

耿 鹏 岳

(中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘 要:** 为了改善长焰煤浮选效果, 提高低阶煤利用率, 探究载体浮选对长焰煤浮选效果的提升机理。以陕西榆家梁选煤厂的长焰煤作为浮选入料, 内蒙古上海庙选煤厂的 $-1.3\text{ g/cm}^3$ 无烟煤作为载体, 进行了载体浮选试验研究。对长焰煤进行粒度分析和 XRD 分析, 结果表明: 其细粒级含量多且灰分较高, 脉石矿物主要为石英和高岭土。细粒度煤泥及黏土矿物的存在, 易产生细泥罩盖和机械夹带现象, 导致浮选效果较差。首先探究了加入载体的粒级及比例对长焰煤浮选效果的影响。结果发现, 随着载体粒径的逐渐减小, 其精煤产率逐渐降低,  $0.5\sim 0.25\text{ mm}$  无烟煤作为载体时, 与常规浮选相比, 其精煤产率增加了 3.89%, 精煤灰分降低了 0.17%。当载体添加质量比为 10 : 1 时, 精煤产率可达到 71.93%, 精煤灰分为 11.48%。通过筛分可将  $0.5\sim 0.25\text{ mm}$  进行筛分回收, 浮选精煤中的载体回收率达到可 98.48%, 载体得到有效回收。其次探究了长焰煤煤泥粒级对载体浮选的影响, 结果发现,  $0.5\sim 0.25\text{ mm}$  的载体可以有效提高 $-0.045\text{ mm}$  长焰煤的浮选效果, 与单独浮选 $-0.045\text{ mm}$  煤泥相比, 精煤产率提高了 9.31%。综上可知, 载体浮选主要提高细煤泥的浮选效果。最后通过 SEM、絮体图像分析及 EDLVO 理论计算可知,  $-0.045\text{ mm}$  长焰煤通过疏水作用力粘附在载体表面, 并形成了大量的絮体, 从而提高了长焰煤的浮选效果。

**关键词:** 长焰煤; 载体浮选; 细粒煤泥; EDLVO 理论

**中图分类号:** TD94

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2023)04-0224-07

### Study on carrier flotation of long flame coal

GENG Pengyue

(Wuhan Design and Research Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** In order to improve the flotation effect of long flame coal and the utilization rate of low rank coal, the mechanism of long flame coal by carrier flotation was revealed. In this study, carrier flotation tests were conducted using long flame coal obtained from Shaanxi Yujialiang Coal Preparation Plant as flotation feed and  $-1.3\text{ g/cm}^3$  anthracite from Shanghai Miao Coal Preparation Plant in Inner Mongolia as the carrier. The XRD and particle size analysis of long-flame coal revealed high fine content and ash content, with gangue minerals mainly composed of quartz and kaolin. The existence of fine coal slime and clay minerals led to the production of fine slime cap and mechanical entraining, resulting in a poor flotation effect. The effect of carrier size and proportion on the flotation effect of long flame coal was investigated. The results indicated that the cleaned coal yield decreased with the decreasing carrier particle size, and that the cleaned coal yield increased by 3.89% while the cleaned coal ash content decreased by 0.17% when  $0.5\sim 0.25\text{ mm}$  anthracite was used as the carrier. Furthermore, the carrier recovery rate of flotation cleaned coal reached 98.48%, with the carrier effectively recovered when the carrier proportion was 10 : 1. Additionally, the influence of long flame coal slime size on carrier flotation was explored. The results revealed that  $0.5\sim 0.25\text{ mm}$  carrier could effectively improve the flotation effect of  $-0.045\text{ mm}$  long flame coal, with the cleaned coal yield increasing by 9.31% compared to the single flotation of  $-0.045\text{ mm}$  slime. In conclusion, carrier flotation mainly improves the flotation effect of fine slime. SEM, floc image analysis, and EDLVO theoretical calculation demonstrated that the  $-0.045\text{ mm}$  long-flame coal adhered to the carrier surface through the hydrophobic force and formed a large number of flocs, thus improving the flotation effect of long-flame coal.

收稿日期: 2022-08-01

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0822

基金项目: 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司自主研发资助项目(ZZYF202219)

作者简介: 耿鹏岳(1996—), 男, 山西运城人, 硕士。E-mail: gpy15738512027@126.com

**Key words:** long flame coal; carrier flotation; fine coal slime; EDLVO theory

## 0 引言

褐煤、长焰煤、弱黏煤等低阶煤占我国煤炭资源总量的 50% 以上<sup>[1-2]</sup>。随着焦煤、无烟煤等高阶煤资源的消耗,低阶煤在我国煤炭资源中具有十分重要的位置。但低阶煤热量较低,灰分较高且易碎,产生的煤泥量较大<sup>[3-5]</sup>。低阶煤煤泥会对环境产生污染且造成资源浪费。因此在工业使用前需对低阶煤进行提质与清洁利用,以减少资源的浪费和环境污染<sup>[6]</sup>。

浮选是利用煤与矸石表面疏水性的差异对精煤进行回收,是回收细粒煤和超细粒的有效方法<sup>[7-8]</sup>。但低阶煤表面存在较多的羧基、羟基等含氧官能团,且其孔隙较发达,阻碍了低阶煤表面与药剂的吸附,药剂用量较大,浮选效果差<sup>[9-11]</sup>。目前提高低阶煤的浮选性能主要分为 2 个方面:①开发新的浮选药剂,如复配捕收剂,加入表面活性剂等<sup>[12-14]</sup>;②对颗粒表面进行处理<sup>[15-17]</sup>,如超声、微波、孔隙压缩等,提高低阶煤表面的疏水性,从而改善了低阶煤的浮选效果。针对低阶煤可浮性、浮选效果差的缺点,找出有效、切行的浮选方法对低阶煤资源的有效利用具有重大意义。

载体浮选是利用可浮性较好的矿粒作为载体,选择性的黏附细颗粒将其浮选出来的一种方法<sup>[18-19]</sup>。载体浮选分为自载体浮选和外加载体浮选<sup>[20]</sup>。自载体浮选为采用和自身性质相同的矿物作为载体<sup>[21]</sup>,张秀梅等<sup>[22]</sup>以浮选精煤作为自载体并经过 4 次循环,使得浮选精煤产率提高了 7.11%,灰分降低了 1.14%。ZHANG 等<sup>[23]</sup>以粗粒聚苯乙烯作为载体对超细镍铁矿进行浮选,在中性 pH 条件下,油酸钠捕收剂用量为  $8 \times 10^{-4}$  mol/L,聚苯乙烯载体用量为 70 kg/t,在转速 2 000 r/min 下,浮选回收率可以达到 95.69%。朱阳戈等<sup>[24]</sup>利用自载体浮选工艺对攀枝花难处理微细粒钛铁矿实际矿物进行浮选,与细粒级矿物单独浮选相比,粒级 0 ~ 20  $\mu\text{m}$  的矿物回收率提高了 9.4%。

载体浮选应用于低阶煤浮选中尚处于探索阶段,近年来有学者也对此展开了相关研究。董世武等<sup>[25]</sup>采用炼焦厂的重选精煤作为载体,浮选低阶煤,结果表明:当载体粒级为 0.5 ~ 0.25 mm 时,浮选效果更好,精煤产率提高了近 14.00%,且载体回收率为 98.92%,但未对载体提升低阶煤浮选效果的机理进行探究。

本次研究采用上海庙选煤厂的  $<1.30 \text{ g/cm}^3$  无烟煤作为载体、陕西榆家梁选煤厂长焰煤作为浮选入

料进行了载体浮选试验,并通过扫描电子显微镜 (SEM) 以及电子显微镜等现代分析技术,揭示了载体浮选对低阶煤浮选效果的提升机理。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

以陕西榆家梁的 -0.2 mm 长焰煤为试验对象,灰分为 26.94%,其粒度分析见表 1。从表 1 中可以看出长焰煤的细粒级含量较多为 49.65%,灰分也较高 37.57%,这部分高灰细泥在浮选过程中容易造成细泥罩盖,使得浮选效果恶化。

表 1 长焰煤粒度分析结果

Table 1 Results of long flame coal size distribution

粒度分布/mm	产率/%	灰分/%	筛上累计产率/%	筛上累计灰分/%
0.2~0.125	10.58	11.28	10.58	11.28
0.125~0.074	25.10	14.52	35.68	13.56
0.074~0.045	14.67	22.99	50.35	16.31
-0.045	49.65	37.57	100.00	26.87
合计	100.00			

载体颗粒为内蒙古上海庙的无烟煤,通过浮沉试验分选出密度级为  $-1.30 \text{ g/cm}^3$  的产品,并通过小筛分试验分为不同粒度级 (0.5 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.125 mm、0.125 ~ 0.074 mm、-0.074 mm) 的载体,其灰分分别为 3.59%、3.52%、4.41% 和 6.27%。对上海庙无烟煤和榆家梁长焰煤进行 XRD 分析,结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,长焰煤中主要存在的脉石矿物为石英和高岭土,无烟煤中主要存在的脉石矿物为高岭土,其中高岭土易造成细泥罩盖和机械夹带,使得浮选效果恶化,利用常规的浮选方法可能会使得浮选效果较差,所以需要对浮选过程强化。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 浮选方法

采用 0.5 L 的 XFD 机械搅拌式浮选机进行浮选试验。将不同浓度的矿浆放置在浮选槽中进行搅拌,搅拌时间为 3 min,搅拌转速为 1 800 r/min,搅拌后加入捕收剂(煤油),搅拌 1 min 后加入起泡剂(仲辛醇),30 s 后打开充气阀门,进行刮泡,刮泡时间为 3 min。对精煤和尾煤进行过滤,干燥和称重。浮选参数及药剂制度分别为:充气量  $0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ,起泡剂用量 100 g/t,捕收剂的用量 2 000 ~ 6 000 g/t,矿浆质量浓度 30 ~ 60 g/L。

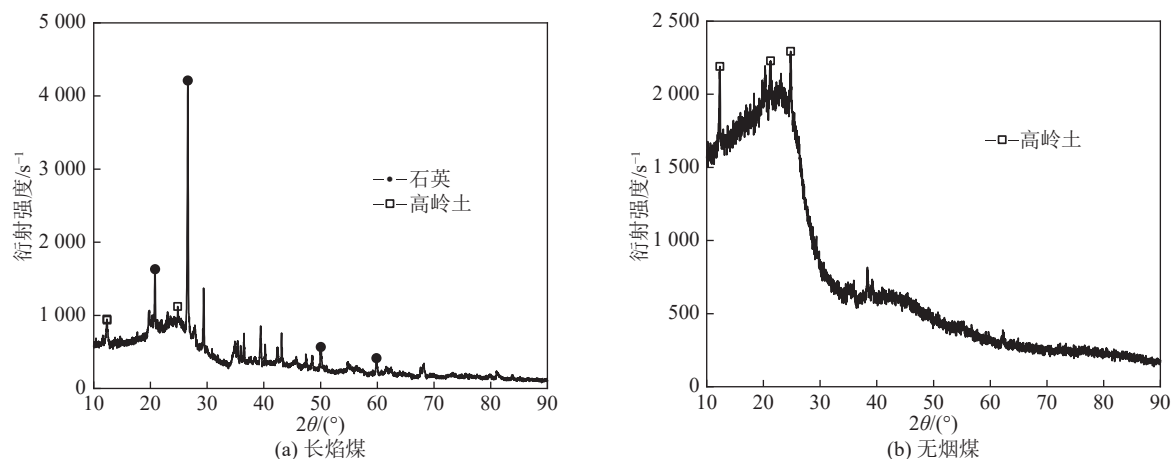


图1 长焰煤及无烟煤 XRD 图谱

Fig.1 The result of XRD: of long flame coal and anthracite.

在载体浮选试验中,载体粒级选用 0.5 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.125 mm、0.125 ~ 0.074 mm 和 -0.074 mm 的上海庙低灰精煤,载体比例为 10 : 1、10 : 2、10 : 3 和 10 : 4。试验过程中,先加入载体后加入矿浆进行搅拌 3 min,后续试验步骤同上。

在 0.5 ~ 0.25 mm 载体浮选试验中,对精煤和尾煤进行筛分,回收载体计算其回收率。

### 1.2.2 扫描电镜(SEM)分析

在转速为 1 800 r/min、捕收剂用量为 5 000 g/t 和载体比例为 10 : 1 的条件下,分别配制浓度为 40 g/L 的长焰煤及长焰煤+载体矿浆,将两者分别搅拌 3 min 后,取出 1 mL 进行烘干处理,对处理后的样品进行扫描电镜分析。采用日本电子 JSM-7800(Prime)型原位超高分辨场发射扫描电子显微镜对处理后的絮凝体进行测定,分析细粒煤泥与载体之间的粘附关系。测试参数为:加速电压 15.00 kV,工作距离 10.00 mm,压力  $5.0 \times 10^{-4}$  Pa。

### 1.2.3 絮凝体图像分析

矿浆进行调浆 3 min 后,取出 1 mL 矿浆用去离子水将其稀释 100 倍后放入培养皿中,采用带有长镜头的佳能 600 D 单反相机进行絮凝体图像拍摄。观察加入载体前后细粒级长焰煤絮凝体的变化规律,探究载体浮选的机理。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 常规浮选试验结果分析

#### 2.1.1 捕收剂用量对常规浮选结果的影响

在矿浆浓度为 40 g/L 的条件下,捕收剂用量选用 2 000、3 000、4 000、5 000、6 000 g/t 对长焰煤进行常规浮选试验,探究在满足灰分要求(12%)下,长焰煤浮选中的最佳药剂用量,浮选结果如图 2

所示。

由图 2 可知,随着捕收剂用量的增加,精煤产率不断增加,精煤灰分呈现出先减少后增加的趋势。当捕收剂用量为 5 000 g/t 时,精煤产率为 68.04%,精煤灰分为 11.65%,当捕收剂用量为 6 000 g/t 时,精煤产率为 73.71%,精煤灰分达到 12.15%,此时灰分超过 12%,所以将捕收剂用量定为 5 000 g/t。

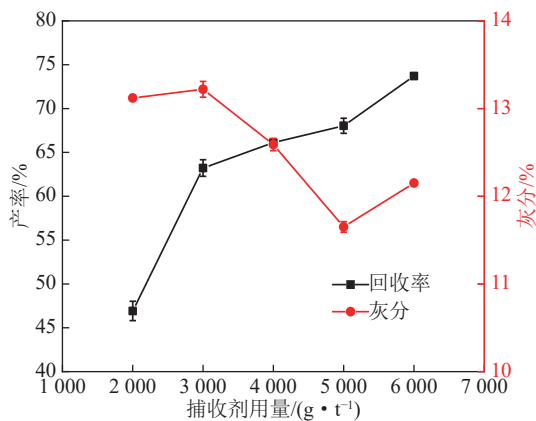


图2 药剂用量对长焰煤浮选的影响

Fig.2 Effect of collector dosages on long flame coal flotation

#### 2.1.2 矿浆浓度对常规浮选结果的影响

在药剂用量为 5 000 g/t 的条件下,矿浆浓度选用 30、40、50、60 g/L 对其进行常规浮选试验,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,随着矿浆浓度的增加,精煤产率和灰分明显增加。当矿浆质量浓度为 40 g/L 时,精煤产率为 68.04%,精煤灰分为 11.65%,当矿浆质量浓度为 50 g/L 时,灰分达到 12.30%,超过精煤灰分 12.00% 以下的指标,因此将矿浆浓度定为 40 g/L。



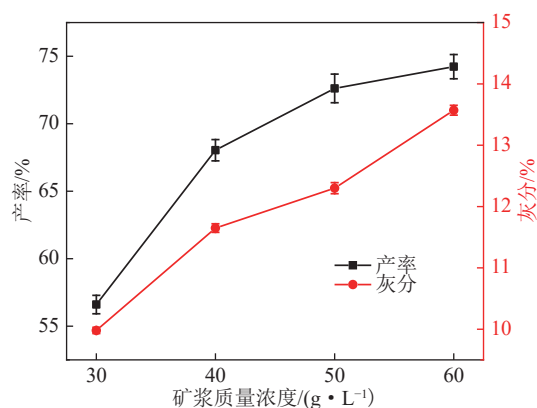


图3 矿浆浓度对长焰煤浮选的影响

Fig.3 Effect of pulp concentration on long flame coal flotation

## 2.2 载体浮选试验结果分析

### 2.2.1 载体粒级对载体浮选结果的影响

在常规浮选条件下,采用上海庙-1.3 g/cm<sup>3</sup>的无烟煤作为载体,载体粒级分别为 0.5 ~ 0.25、0.25 ~ 0.125、0.125 ~ 0.074、-0.074 mm,载体比例为 10 : 1,对其进行载体浮选试验,其结果如图 4 所示。

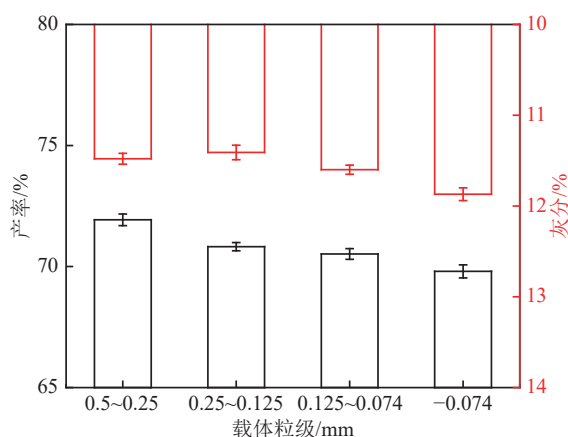


图4 载体粒级对长焰煤浮选的影响

Fig.4 Effect of carrier size on long flame coal flotation

从图 4 可知,随着载体粒级范围的逐渐减少,其精煤产率逐渐减少,当载体粒级范围为 0.5 ~ 0.25 mm 时,其精煤产率为 71.93%,精煤灰分为 11.48%。与常规浮选对比,未加入载体时,其精煤产率为 68.04%,精煤灰分为 11.65%,加入载体后,精煤产率增加了 3.89%,精煤灰分降低了 0.17%,说明载体浮选可以有效提高浮选效果。

### 2.2.2 载体比例对载体浮选结果的影响

选用 0.5 ~ 0.25 mm 粒级的载体,对载体比例进行探究,载体比例分别选为 10 : 1、10 : 2、10 : 3 和 10 : 4,在上述最佳条件下进行载体浮选试验,试验结果如图 5 所示。

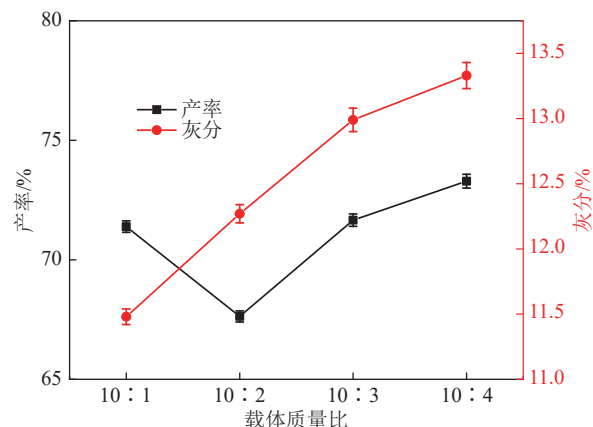


图5 载体质量比对长焰煤浮选的影响

Fig.5 Effect of ratio of coal and carrier on long flame coal flotation

由图 5 可知,当载体比例为 10 : 1 时,精煤产率为 71.93%,精煤灰分为 11.48%,当载体比例为 10 : 2、10 : 3 和 10 : 4 时,精煤灰分均超过 12%,因此载体比例为 10 : 1 时,长焰煤载体浮选效果更好。

### 2.2.3 载体回收率试验结果与分析

长焰煤的粒级范围为 -0.2 mm,因此只对 0.5 ~ 0.25 mm 粒级的载体进行筛分回收,计算其回收率。在载体浮选试验中,产率是去除掉载体的量的产率,载体的量为载体回收率试验中回收的载体的量,载体回收率的结果见表 2。

表 2 0.5~0.25 mm 粒级载体回收率结果

Table 2 0.5~0.25 mm particle size carrier recovery result

载体存在位置	质量/g	回收率/%
精煤	3.89	98.48
尾煤	0.06	1.52
总计	3.95	100.00

精煤中的载体回收率为 98.48%,尾煤中载体的回收率仅为 1.52%,尾煤中含有较少的载体,精煤中载体可以得到有效回收。

### 2.2.4 煤泥粒级对载体浮选试验结果的影响

为了研究载体对于各粒级长焰煤浮选的作用效果,将原煤样品分别筛选为 0.2 ~ 0.125 mm、0.125 ~ 0.074 mm、0.074 ~ 0.045 mm 和 -0.045 mm,在载体粒径为 0.5 ~ 0.25 mm、载体比例为 10 : 1 的条件下进行了载体浮选试验,并与常规浮选试验进行对比,其结果如图 6 所示。

由图 6 可知,加入载体后,各粒级长焰煤的浮选效果均有所提升,但 -0.045 mm 长焰煤浮选效果的提升效果最为明显,在精煤灰分基本不变的情况下,其

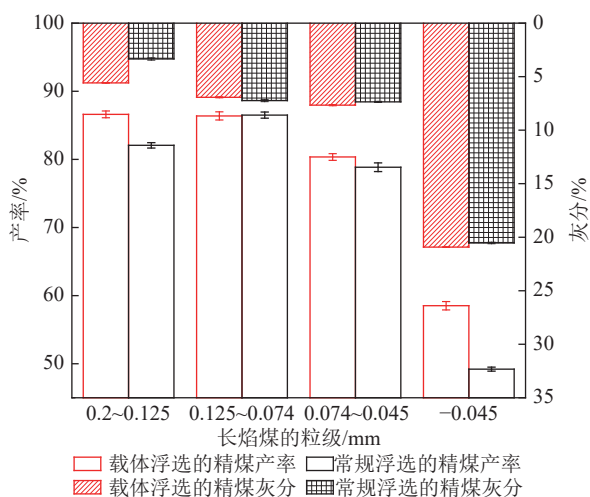


图 6 载体浮选与常规浮选对不同粒级原煤的影响

Fig.6 Effect of carrier flotation and conventional flotation on different size of raw coal

精煤产率从 49.20% 提高至 58.51%。-0.045 mm 的细颗粒粘附在粗颗粒上,粗颗粒易浮,黏附在粗颗粒上的细颗粒随着粗颗粒一起被泡沫带上来。

### 2.3 载体浮选机理分析

#### 2.3.1 扫描电镜结果分析

由 3.2.4 结果可知,载体颗粒主要对 -0.045 mm 细泥的浮选效果提高较多,所以采用 -0.045 mm 粒级的长焰煤进行探究其机理。对处理后的样品进行扫描电镜分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,未加入载体前, -0.045 mm 粒级未形成较大尺寸的絮体,而加入 0.5 ~ 0.25 mm 载体后, -0.045 mm 粒级的煤泥粘附在粗颗粒载体上,使得 -0.045 mm 可浮性较差的煤泥粘附在可浮性较好的粗粒载体上,且 -0.045 mm 粒级煤泥的絮体尺寸增大,可浮性较好的载体背负着可浮性较差的细泥,且 -0.045 mm 絮体的尺寸增大,从而提高了长焰煤的浮选效果。

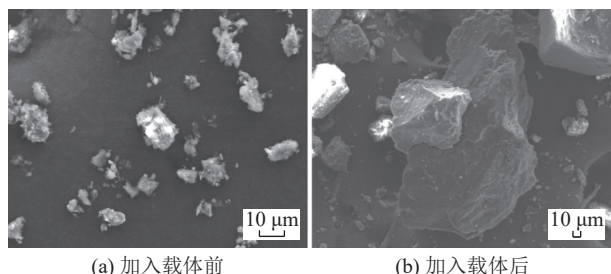


图 7 扫描电镜结果

Fig.7 The results of SEM

#### 2.3.2 絮凝体图像分析

在转速为 1800 r/min、捕收剂用量为 5000 g/t 和载体比例为 10 : 1 的条件下,分别配制浓度为 40 g/L 的长焰煤(-0.045 mm)及长焰煤+载体(-0.045

mm+(0.2 ~ 0.125) mm)矿浆,将两者调浆 3 min 后,分别取出 1 mL,加入去离子水稀释 100 倍后,观察絮体,其结果如图 8 所示。从图 8 及图 7 中可以看出,在未加入载体时, -0.045 mm 粒级未出现明显的絮体,可以观察到,仍存在着分散的颗粒。加入载体后,可以明显的看出,分散的颗粒数量减少,絮体数量较多且尺寸较大。由此可以看出,长焰煤浮选效果的提高是由于细粒级长焰煤通过粘附在粗粒级载体上形成了大量的絮体,且絮团的尺寸增大,在浮选中能够更好的被浮出。

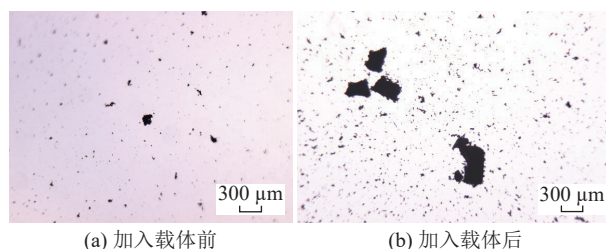


图 8 絮体结果

Fig.8 The flocs on carrier flotation

#### 2.3.3 载体浮选的 EDLVO 计算

EDLVO 理论常用来解释细颗粒间的凝聚和分散行为,同时也能应用于解释细颗粒浮选系统中的一些理论问题<sup>[26]</sup>。因此,本次研究将通过 EDLVO 理论解释载体颗粒与细粒长焰煤间的凝聚和分散行为。

1) 范德华氏作用能  $V_w$ 。在载体浮选系统中,长焰煤的尺寸  $R_1=0.045$  mm,载体的尺寸  $R_2=0.4$  mm,范德华作用能的数值采用以下公式计算<sup>[27]</sup>。

$$V_w = -\frac{1}{6} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{A_{132}}{H} \quad (1)$$

式中:不同颗粒间相互作用的有效 Hamaker 常数  $A_{132} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})^2$ ; 25 °C 时,煤在真空中的 Hamaker 常数  $A_{11} = 6.07 \times 10^{-20}$  J、水在真空中的 Hamaker 常数  $A_{33} = 4.84 \times 10^{-20}$  J。

2) 静电作用  $V_E$ 。通过测量 zeta 电位,载体浮选长焰煤与载体颗粒间的静电力采用以下式计算<sup>[28]</sup>。

$$V_E = \frac{4\pi\epsilon_a R_1 R_2 \varphi_0^2}{R_1 + R_2} \ln[1 + \exp(-\kappa H)] \quad (2)$$

式中:  $H$  为颗粒间界面力相互作用距离;溶液的介电常数  $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,其中真空中的介电常数  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  C<sup>2</sup>/(J·m);溶液的相对介电常数  $\epsilon_r = 78.5$ ; " $\kappa$ " 为 Blotzmann 常数,其倒数为 Debye 长度  $\kappa^{-1} = 0.304/\sqrt{C}$ ,  $C$  为离子浓度, mol/L;  $\varphi_0$  为表面电位,以溶液的 zeta 电位代替。

3)疏水相互作用力  $V_H$ 。疏水相互作用力采用以下公式计算<sup>[29-30]</sup>。

$$V_H = 2\pi \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} h_0 V_{HA}^0 \exp\left(-\frac{H}{h_0}\right) \quad (3)$$

式中,在疏水系统中,衰减长度  $h_0=10$  nm;界面相互作用能常数  $V_{HA}^0 = -0.118 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^2$ 。添加载体前后煤粒间的作用势能曲线如图9所示。由图9中的DLVO势能曲线可见,当加入载体后,斥能“能垒”峰值降低,煤粒间吸引能增大,加速并强化了细粒煤向粗粒煤的黏附以及其他煤粒间的黏附,而在不考虑疏水力的情况下,长焰煤与载体颗粒之间始终存在相互排斥的能量,随着距离逐渐减小,相互作用逐渐上升到称为“能垒”的峰值,长焰煤与载体颗粒之间难以粘附。从EDLVO势能曲线来看,疏水相互作用力将排斥能转化为吸引能,长焰煤附着在载体煤颗粒上,疏水力在长焰煤载体浮选中起着重要作用。

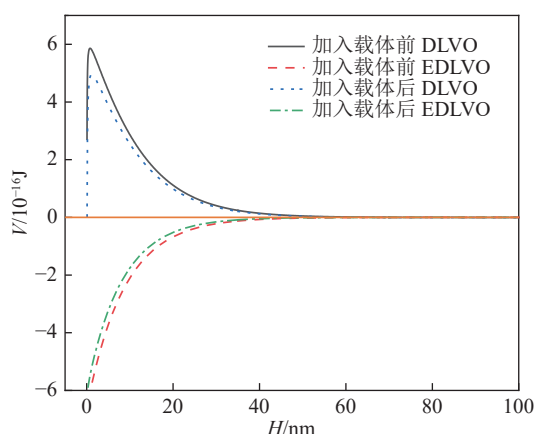


图9 载体颗粒与低阶煤相互作用势能曲线

Fig.9 The results of interaction energy curve between carrier particles and low rank coal

### 3 结 论

1)载体浮选可以显著提高长焰煤浮选效果,与常规浮选相比,精煤产率提高了26.02%,灰分降低了1.24%。精煤中的载体回收率为98.48%,尾煤中载体的回收率仅为1.52%,载体可以得到有效回收。

2)0.5~0.25 mm载体对-0.045 mm长焰煤浮选效果的提升作用最为明显,在精煤灰分基本不变的情况下,其精煤产率从49.20%提高至58.51%。

3)通过SEM、絮体图像分析及EDLVO理论计算可知,疏水相互作用力将排斥能转化为吸引能,从而使得-0.045 mm长焰煤粘附在载体表面形成了大量的絮体,进而提高了长焰煤的浮选效果。

### 参考文献(References):

- [1] OSMAN H, JANGAM S V, LEASE J D, *et al.* Drying of Low-Rank Coal(LRC)—A Review of Recent Patents and Innovations[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(15): 1763–1783.
- [2] XU M, GUO F, ZHANG Y, *et al.* Effect of hydrothermal pretreatment on surface physicochemical properties of lignite and its flotation response[J]. *Powder Technology*, 2021, 386: 81–89.
- [3] XIA Y C, ZHANG R, XING Y W, *et al.* Improving the adsorption of oily collector on the surface of low-rank coal during flotation using a cationic surfactant: An experimental and molecular dynamics simulation study[J]. *Fuel*, 2019, 235: 687–695.
- [4] TAN J, CHENG H, WEI L, *et al.* Using low-rank coal slime as an eco-friendly replacement for carbon black filler in styrene butadiene rubber[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 949–960.
- [5] 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研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2767–2775.  
LIAO Yinfei, REN Hourui, AN Maoyan, *et al.* Mechanism of enhancing low rank coal flotation using nanoparticles as a novel collector[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2767–2775.
- [6] XING Y W, GUI X H, CAO Y J, *et al.* Clean low-rank-coal purification technique combining cyclonic-static microbubble flotation column with collector emulsification[J]. *Journal Of Cleaner Production*, 2017, 153(1): 657–672.
- [7] ZHEN K, ZHANG H, LI C, *et al.* Effect of oxidized diesel oil on the flotation response of the low-rank coal by plasma oxidation method[J]. *Fuel*, 2019, 245: 13–20.
- [8] LI W, WANG H, LI X, *et al.* Effect of mixed cationic/anionic surfactants on the low-rank coal wettability by an experimental and molecular dynamics simulation[J]. *Fuel*, 2021, 289: 119886.
- [9] LIAO Y F, CAO Y J, LIU C Q, *et al.* A study of kinetics on oily-bubble flotation for a low-rank coal[J]. *International Journal Of Coal Preparation And Utilization*, 2016, 36(3): 151–162.
- [10] 牛晨凯, 夏文成. 低温热解对低阶煤表面疏水性的影响机制及半焦可浮性分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43: 1423–1431.  
NIU Chenkai, XIA Wencheng. Effect of low-temperature pyrolysis on the surface hydrophobicity of low rank coal and the analysis of floatability of semi-coke[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43: 1423–1431.
- [11] TIAN Q, ZHANG Y, LI G, *et al.* Application of carboxylic acid in low-rank coal flotation[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2019, 39(1): 44–53.
- [12] 谢炙轩, 张雷, 郭建英, 等. 阳-阴离子表面活性剂协同非极性油对低阶煤浮选的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 267–275.  
XIE Zhixuan, ZHANG Lei, GUO Jianying, *et al.* Effect of cationic-anionic surfactant synergistic non-polar oil on low-rank coal flotation[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 267–275.
- [13] 张春泉, 张海军, 徐明, 等. 非离子型表面活性剂强化低阶煤煤泥浮选行为试验研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52: 147–151.  
ZHANG Chunquan, ZHANG Haijun, XU Ming, *et al.* Flotation performance of low rank coal slime enhanced by non-ionic sur-

- factant[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52: 147–151.
- [14] 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.
- [15] ZHEN K, LI K, ZHANG C, *et al.* The flotation intensifying of low-rank coal based on the ultrasonic field [J]. *ENERGY Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, 42(14): 1–10.
- [16] WANG D P, XU M, HE J F, *et al.* Effects of low-temperature air plasma pretreatment on the surface properties of low-rank coal [J]. *Powder Technology*, 2018, 340: 227–233.
- [17] 郑长龙, 茹毅. 超声预处理对低阶煤浮选的影响[J]. *煤炭工程*, 2017, 49: 125–127.  
ZHENG Changlong, RU Yi. Effect of ultrasonic pretreatment on low rank coal flotation[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49: 125–127.
- [18] 肖骏, 陈代雄. 聚苯乙烯载体浮选微细粒白钨矿研究[J]. *中国钨业*, 2015, 30: 14–20.  
XIAO Jun, CHEN Daixiong. Flotation of Micro-fine Scheelite by Applying Polystyrene as Carrier[J]. *China Tungsten Industry*, 2015, 30: 14–20.
- [19] BILAL M, ITO M, KOIKE K, *et al.* Effects of coarse chalcopyrite on flotation behavior of fine chalcopyrite[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 163: 106776.
- [20] 王纪镇, 印万忠, 孙忠梅. 碳酸钠对白钨矿自载体浮选的影响及机理[J]. *工程科学学报*, 2019, 41: 174–180.  
WANG Jizhen, YIN Wanzhong, SUN Zhongmei. Effect and mechanisms of sodium carbonate on the auto-carrier flotation of scheelite[J]. *Journal of Engineering Science*, 2019, 41: 174–180.
- [21] ATESOK G, BOYLU F, CELIK M S. Carrier flotation for desulfurization and deashing of difficult-to-float coals[J]. *Minerals Engineering*, 2001, 14(6): 661–670.
- [22] 张秀梅, 郭德, 王露, 等. 煤泥自载体浮选[J]. *煤炭学报*, 2018, 43: 1127–1133.  
ZHANG Xiumei, GUO De, WANG Lu, *et al.* Autogenous-carrier flotation of coal slime [J] *Journal of China Coal Society*, 2018, 43: 1127–1133.
- [23] ZHANG X F, HU Y H, SUN W, *et al.* The Effect of Polystyrene on the Carrier Flotation of Fine Smithsonite[J]. *Minerals*, 2017, 7(4): 10.
- [24] 朱阳戈, 张国范, 冯其明, 等. 微细粒钛铁矿的自载体浮选[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19: 554–560.  
ZHU Yangge, ZHANG Guofan, FENG Qiming, *et al.* Autogenous-carrier flotation of fine ilmenite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19: 554–560.
- [25] 董世武, 黄根. 低阶煤载体浮选试验研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51: 136–140.  
DONG Shiwu, HUANG Gen. Study on carrier flotation of low-rank coal [J]. *Coal Engineering*, 2019, 51: 136–140.
- [26] WARREN L J. Shear-flocculation of ultrafine scheelite in sodium oleate solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1975, 50(2): 307–318.
- [27] LU Y P, ZHANG M Q, FENG Q M, *et al.* Effect of sodium hexametaphosphate on separation of serpentine from pyrite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(1): 208–213.
- [28] XIE Q, SAEEDI A, POORYOUSEFY E, *et al.* Extended DLVO-based estimates of surface force in low salinity water flooding [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 221: 658–665.
- [29] XU Z, YOON R H. A study of hydrophobic coagulation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1990, 134(2): 427–434.
- [30] PASHLEY R M, ISRAELACHVILI J N. Molecular layering of water in thin films between mica surfaces and its relation to hydration forces[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 1984, 101(2): 511–523.