废油脂-水双相体系中煤颗粒的沉降与分选规律的研究*

王朋东[1,2,3],张继龙[1,2,3],王向廷[1,2,3]

(1.太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024;
2.山西省"1331工程"煤泥高效分选工程研究中心, 山西 太原 030024;
3.纽普瑞(山西)科技有限公司, 山西 晋中市 030600)

摘要:为探讨餐饮废油脂应用于难浮煤泥分选的可行性,以-0.5 mm的煤颗粒为研究对象,采用不同介质对煤样进行润湿处理,在废油脂-水双相体系中进行沉降试验,观察并记录了煤颗粒在油、水以及油-水混合界面中的沉降行为,借助图像处理软件确定煤颗粒在到达油-水混合界面时的沉降速度。通过煤颗粒的最终沉降结果以及受力分析,明确煤颗粒在废油脂和水中沉降与分选的条件。系统研究了灰分、粒径、不同介质润湿等因素对煤颗粒在油-水界面沉降与分选的影响。试验结果表明,煤颗粒在油-水界面的沉降和分选结果与煤颗粒粒径的平方、密度呈正相关,与油-水界面的动态平衡力呈负相关;水润湿处理的煤颗粒表现出不同的沉降状态,而油润湿处理和未润湿(干燥)处理的煤颗粒悬浮于油-水混合界面上。水润湿处理能够使煤颗粒表面附着水,降低煤颗粒与油-水界面之间的动态平衡力,实现颗粒沉降和有效分选。此外,通过更换废油脂,进一步验证了煤颗粒在废油脂-水体系中沉降与分选的条件。研究结果为废油脂在煤泥高效分离中的应用提供了新思路和理论支持。

关键词:煤粒分选;废油脂;两相流体;受力分析;颗粒沉降

中图分类号:TD94;TD923 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)08-0263-09

Study on Settling and Separation Laws of Coal Particles in Waste Oil-Water Two-Phase System

WANG Pengdong[1,2,3], *ZHANG Jilong*[1,2,3], *WANG Xiangting*[1,2,3]

(1.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2.Engineering Research Center for Slime High Efficiency Separation by Shanxi "1331 Project", Taiyuan, Shanxi 030024, China;
3.New Process (Shanxi) Technology Co., Ltd., Jinzhong, Shanxi 030600, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of the application of cooking waste oil in the separation of difficult floated coal slime, -0.5 mm coal particles were used as the research object, and the coal samples were wetted with different media. The settling test was carried out in the waste oil-water two-phase system, and the settling behavior of coal particles in oil, water and oil-water mixed interface was observed and recorded. The settling velocity of coal particles when reaching the oil-water mixed interface was determined by image processing software. Through the final settling results and force analysis of coal particles, the conditions for the settling and separation of coal particles in waste oil and water were clarified. The effects of ash content, particle size and wetting of different media on the settling and separation of coal particles at the oil-water interface were systematically studied. The test results show that the settling and separation results of coal particles at the oil-water interface are positively correlated with the square of coal particle size and density, and negatively correlated with the dynamic equilibrium force at the oil-water interface. The coal particles treated by water wetting show different settling states, while the coal particles treated by oil wetting and unwetting (drying) are suspended on the oil-water mixed interface. Water wetting treatment can make the surface of coal particles adhere to water, reduce the dynamic equilibrium force between coal particles and oil-water interface, and realize particle settling and effective separation. In addition, the conditions of settling separation of coal particles in waste oil-water system were further verified by replacing waste oil. The research results provide new ideas and theoretical support for the application of waste oil in the efficient separation of coal slime.

Key words: Coal particle separation, Waste oil, Two-phase fluid, Force analysis, Particle settling

---

* **收稿日期**:2024-09-24
基金项目:山西省专利转化专项项目(202202053)
作者简介:王朋东(1997—),男,山西朔州人,硕士研究生,主要从事矿物浮选研究工作。E-mail:wangpengdong1064@link.tyut.edu.cn
通信作者:张继龙(1978—),男,山西大同人,博士,副教授,主要从事煤炭分质分级利用和废油脂资源化。E-mail:zhangjilong@tyut.edu.cn

0 引言

我国在“十四五”期间根据资源禀赋条件,坚持以绿色发展为导向,积极推进化石能源的清洁高效利用。选煤是煤炭资源清洁高效利用的重要手段[1]。目前,通常采用重力分选、泡沫浮选等选煤技术来提高精煤的品位。但重力分选法在处理细粒级煤泥时效果较差,泡沫浮选在处理难浮煤时效果不佳[2]。因此,国内外学者提出利用疏水-亲水分选技术处理细粒级难浮煤泥,以提高精煤品位。GUPTA[3]利用疏水-亲水分选技术对4种不同类型的煤进行了分选与脱水,获得了灰分均小于5%、水分均低于10%的精煤,且回收率高达97%。JONES III Alan W[4]用疏水-亲水分选工艺处理超细煤时得到了的灰分和水分均小于10%精煤产品。这些研究为进一步探究煤粒在油水双相体系中沉降和分选提供了方法支撑。

在煤泥分选中,国内外学者提出利用废油脂来处理细粒级难浮煤泥[5-9]。王军超等[10]、杨建利等[11]和荣令坤等[12]利用餐饮废油制备浮选捕收剂,研究结果表明,在相同药剂用量下,废油脂与0#柴油的浮选效果基本相当,甚至更好;朱子祺等[13]通过对废油脂进行改性,制备出新型捕收剂G16,用于胶磷矿的粗选试验,结果显示,在捕收剂G16的用量为540 g/t时,精矿回收率可达92.51%,粗精矿品位可达13.95%。废油脂作为捕收剂在泡沫浮选中的应用已趋于成熟,但在难浮煤分选中的应用研究较少。因此,本文提出从废油脂的疏水性入手,结合疏水-亲水分选技术,将废油脂应用于难浮煤泥分选,通过构建固相-液相(水)-油三相体系,形成固-水、固-油、油-水三相界面,根据灰分不同的煤粒其疏水程度不同,在力的作用下进入到不同的界面或相中,从而达到分离的作用,而油层中的微粒经过沉降而脱除,所得的废油脂仍可在分选过程中回收再利用[14-15]。

本文基于两相流体理论,利用废油脂的疏水性,以-0.5 mm的煤粒为研究对象,通过不同润湿处理后,观察其在废油脂-水双相体系中的运动状态,确定煤粒在该体系中的沉降和分选规律。分析煤粒在废油脂和水介质中的运动与沉降结果,并探究煤粒大小、煤粒灰分与不同介质润湿处理对沉降结果的影响。通过研究不同灰分煤粒在油-水双相液体中的沉降和分选规律,为废油脂用于煤泥分选提供了客观依据。

1 研究对象与方法

1.1 试验的煤样和流体

试验样品为取自沁能洗煤厂的9种不同灰分的煤样和经破碎、筛分处理的矸石。分别采用0.045 mm、0.074 mm、0.125 mm、0.25 mm、0.5 mm的泰勒筛依次对样品进行筛分,制备得到45个煤样,各煤样的灰分见表1,各煤样的密度见表2。

表1 不同粒级煤样的灰分

Table 1 Ash content of coal samples in different particle size ranges %

粒级/mm	煤样1	煤样2	煤样3	煤样4	煤样5	煤样6	煤样7	煤样8	煤样9
-0.5~+0.25	10.08	20.00	30.08	39.95	50.10	59.93	69.99	80.09	90.00
-0.25~+0.125	10.03	20.09	29.97	40.05	50.03	60.09	69.95	80.06	89.98
-0.125~+0.074	9.96	20.02	30.07	40.10	49.92	60.08	70.09	79.95	90.01
-0.074~+0.045	9.98	20.01	30.01	39.98	49.98	59.95	69.97	80.04	89.97
-0.045	10.01	19.96	29.96	39.97	50.08	59.99	70.07	80.07	89.92
全煤样	10.02	20.04	30.02	40.02	50.02	60.01	70.00	80.03	88.99

注:所有试验均采用9种煤样5个粒级煤样的灰分,通过全试验确保研究的严谨和准确性,避免因样本数量不足引起的偶然误差。

表2 各煤样的密度

Table 2 Density of each coal sample g/cm^3

粒级/mm	煤样1	煤样2	煤样3	煤样4	煤样5	煤样6	煤样7	煤样8	煤样9
-0.5~+0.25	1.260 3	1.368 1	1.485 3	1.675 5	1.867 8	2.026 9	2.212 3	2.376 2	2.564 3
-0.25~+0.125	1.274 8	1.374 2	1.494 2	1.695 3	1.885 2	2.042 3	2.226 8	2.396 5	2.583 9
-0.125~+0.074	1.293 2	1.383 0	1.508 6	1.723 2	1.902 3	2.063 2	2.243 6	2.413 5	2.607 3
-0.074~+0.045	1.322 3	1.394 2	1.522 3	1.745 6	1.923 2	2.083 4	2.265 4	2.436 8	2.626 0
-0.045	1.348 7	1.422 3	1.546 5	1.766 5	1.942 6	2.104 7	2.286 5	2.458 9	2.643 5
全煤样	1.282 6	1.379 7	1.503 2	1.703 2	1.892 6	2.050 8	2.231 3	2.401 7	2.595 0

试验过程中用到的流体种类及其性质见表3。

表3　试验过程中用到的流体种类及其性质

Table 3　Types and properties of fluids used in the experimental process

流体种类	密度(21 ℃)ρ_w/(g·cm^{-3})	运动黏度(21 ℃)μ/(mm^2·s^{-1})
去离子水	1.000 0	1.005
废油脂1	0.918 4	36.710
废油脂2	0.923 9	44.690

1.2　试验方法

1.2.1　煤样水润湿吸附试验

(1) 取定量滤纸加水后，利用循环水式真空泵抽滤至压强为零。记录试验前后滤纸的质量，通过5次独立试验并取试验结果平均值，得到单位质量滤纸的水吸附量。

(2) 取50.00 g干燥煤样平铺于装有定量滤纸的布氏漏斗上，加水至完全浸没煤样，静置10 min。

(3) 用循环水式真空泵抽滤，至真空泵负压强接近零为止，记录试验前后煤样与滤纸的总质量。

(4) 计算试验前后总质量的增加量，减去滤纸的水吸附量，即可得到50.00 g煤样的总水吸附量，然后计算出单位质量煤样的水吸附量。

1.2.2　煤样油润湿吸附试验

(1) 取定量滤纸加入废油脂，用旋片式真空泵抽滤，直至10 min内不再有油滴落下为止，记录试验前后滤纸的质量，计算质量增加量与原滤纸质量的比值，得到滤纸的单位油吸附量，5次试验后取各次试验结果的平均值。

(2) 取50.00 g干燥煤样平铺在已放置定量滤纸的布氏漏斗内，加入废油脂至完全浸没煤样，静置10 min。

(3) 用旋片式真空泵抽滤，直至10 min内不再有油滴落下为止，记录试验前后煤样与滤纸的总质量。

(4) 计算试验前后质量的增加量，减去滤纸的油吸附量，即可得到50.00 g煤样的总油吸附量，然后计算出单位质量煤样的油吸附量。

1.2.3　试验预处理

(1) 对煤粒进行3种不同的润湿处理。

极性水润湿：将煤颗粒放入陶瓷器皿中，加入去离子水浸没煤样，并静置5 min。

非极性油润湿：将煤颗粒放入陶瓷器皿中，然后加入废油脂浸没煤样，并静置5 min。

空气干燥：将煤颗粒放入陶瓷器皿中，然后在室温下静置5 min。

(2) 取3支外径为20 mm、长度为200 mm的玻璃试管，第一支试管注满去离子水并静置，第二支试管注满废油脂并静置，第三支试管按照1∶1的比例注入去离子水和废油脂并静置。

1.2.4　试验过程

将煤粒放置于上述试管的液面上方5 mm处，然后释放，同时用SHL-200WS守护者视觉USB工业相机观察并录制煤粒在各个流体中的沉降过程，为减小试验误差，每组试验重复3次。用图像处理软件对采集到的图像进行处理，以确定颗粒的沉降末速度。

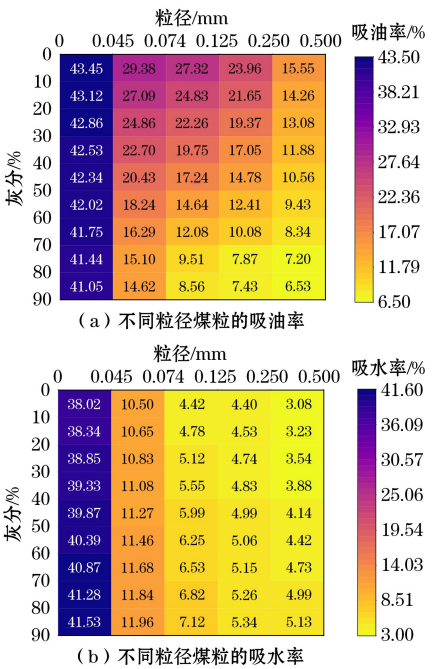
1.3　液相表面张力/界面张力的测定

使用KRUSS表面张力仪和Sigma700/701全自动表面张力仪对废油脂、去离子水以及废油脂-去离子水混合界面的表面张力和界面张力进行测定。测量温度为20 ℃，测量灵敏度为0.001 mN/m，每项试验均重复5次并取平均值作为最终结果。

2　结果与分析

2.1　煤粒润湿吸附结果

如图1(a)所示，煤粒经油润湿后对油的吸附率在同粒径下随着灰分的增高而减小。当灰分增大时，煤粒的孔隙率减小，充分润湿后对油的吸附量随之减小。在相同灰分下，粒径越小，其比表面积越大，孔隙结构越复杂，充分润湿后对油的吸附量越大。由图1(b)可知，在相同粒径下，随着灰分的增加，煤粒的矿物质含量增多，充分润湿后对水的吸附量增加；同样，在相同灰分下，粒径越小，其比表面积越大，孔隙结构越复杂，充分润湿后对水的吸附量越大。



(a) 不同粒径煤粒的吸油率

(b) 不同粒径煤粒的吸水率

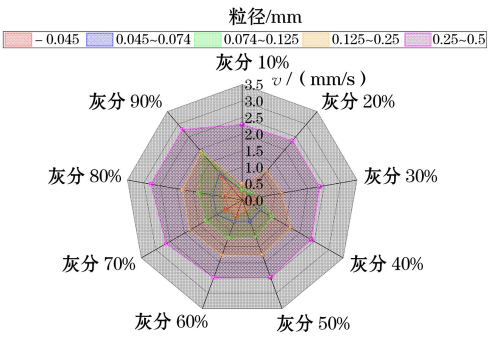
图1　不同粒径煤粒的吸油率与吸水率

Fig.1　Oil absorption rate and water absorption rate of coal particles with different particle sizes

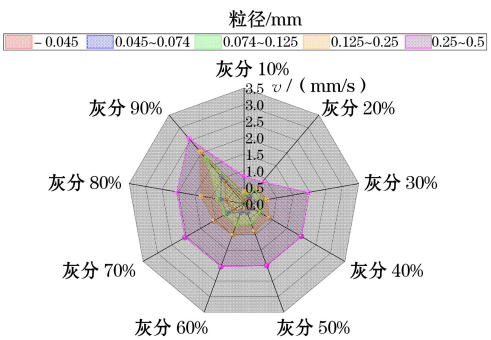
2.2 煤粒在液相中沉降结果

2.2.1 煤粒在废油脂中的沉降末速度

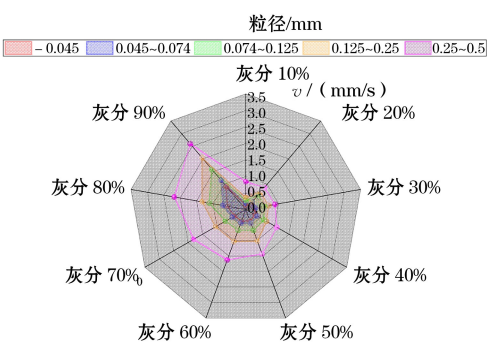
煤粒经过不同润湿处理后,在油介质中的沉降末速度如图 2 所示。试验结果表明,煤粒在油中沉降的末速度受灰分和粒径两个因素的影响。灰分含量相同的煤样,随着粒径的增大,其在油中的沉降末速度逐渐增加。而相同粒级的煤样,随着灰分含量的升高,其在油中的沉降末速度也逐渐增大。此外,在灰分和粒级相同的试验条件下,煤样在油中的沉降末速度表现为:$v_{干燥样} > v_{水润湿样} > v_{油润湿样}$。



(a) 干燥煤粒在油中的沉降末速度



(b) 水润湿煤粒在油中的沉降末速度



(c) 油润湿煤粒在油中的沉降末速度

图 2 不同粒径煤粒经不同润湿处理后在油中的沉降末速度

Fig.2 Terminal settling velocity of coal particles with different particle sizes after different wetting treatments in oil

2.2.2 煤粒在水中的沉降结果

煤粒经过不同润湿处理后,在水介质中的沉降结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,煤粒在水中沉降受到灰分、粒径和润湿程度 3 个因素的影响。在干燥条件下,当粒径>0.045 mm、灰分>70%,粒径>0.074 mm、灰分>60%,粒径>0.25 mm、灰分>50%时,煤粒能够沉降在水中;在油润湿条件下,当粒径>0.045 mm、灰分>80%,粒径>0.125 mm、灰分>70%,粒径>0.25 mm、灰分>50%时,煤粒能够沉降在水中;在水润湿条件下,当粒径<0.045 mm、灰分<30%时,煤粒会浮在水面上,而在其他条件下煤粒均会沉降在水中。

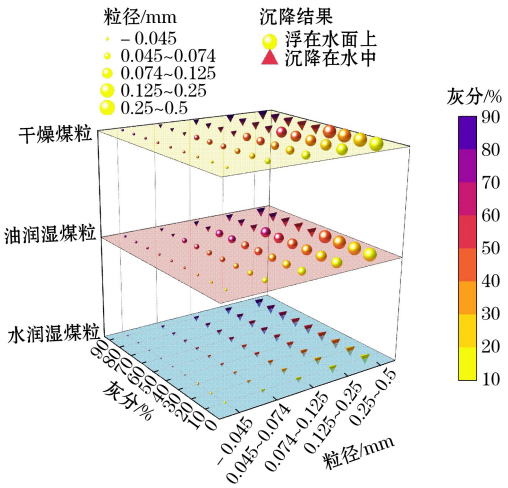


图 3 经不同润湿处理的煤粒在水界面的沉降结果

Fig.3 Settling results of coal particles subjected to different wetting treatments at the water interface

2.2.3 煤粒在油-水界面的沉降结果

煤样经过不同润湿处理后,在油水混合界面的沉降结果如图 4 所示。

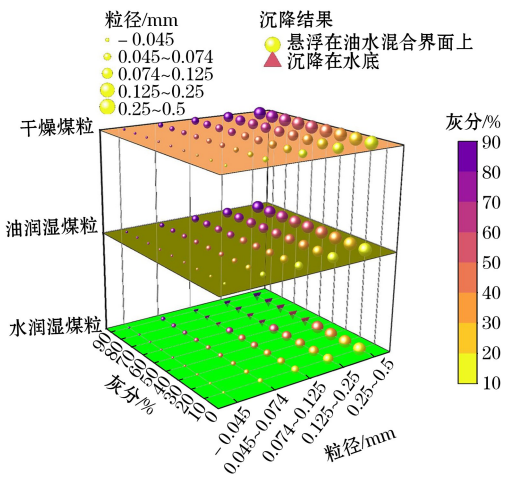


图 4 经不同润湿处理的煤粒在油水界面的沉降结果

Fig.4 Settling results of coal particles subjected to different wetting treatments at the oil-water interface

试验结果表明：在干燥和油润湿条件下，所有煤粒均悬浮在油水混合界面。在水润湿状态下，当粒径＜0.074 mm时，所有煤颗粒均悬浮在油水混合界面；而在粒径＞0.25 mm、灰分＞50%，粒径＞0.125 mm、灰分＞60%，粒径＞0.074 mm、灰分＞70%的情况下，煤粒能够突破油水混合界面并沉降在水中。

2.3　界面张力和表面张力的测定结果

基于张雯杰等[16]提出的理论模型，颗粒在沉降过程中对油水混合界面的扰动效应，会导致界面波的形成和变化。在油水两相分层流动中，分析了界面波受到的力的动态特性及其平衡状态，发现这些力与颗粒的行为密切相关。据此提出，在油水混合界面处，颗粒会受到一种类似于表面张力作用的动态平衡力。

水的表面张力给颗粒的力为：

$$F_w=\pi d\gamma_w \tag{1}$$

式中：F_w力的方向朝向水内部；d 为颗粒的直径；γ_w为水的表面张力。

油的表面张力给颗粒的力为：

$$F_o=\pi d\gamma_o \tag{2}$$

式中：F_o力的方向朝向油内部；γ_o为油的表面张力。

油水界面张力给颗粒的力为：

$$F_{w\text{-}o}=\pi d\gamma_{w\text{-}o} \tag{3}$$

式中：$F_{w\text{-}o}$力的方向朝向界面外部，即颗粒在进入油水混合界面时，力的方向与运动方向相反，颗粒在离开油水混合界面时，力的方向也与运动方向相反；$\gamma_{w\text{-}o}$为油水界面张力。

颗粒从进入油水混合界面到离开油水混合界面，颗粒受到界面的合力 F_{net}为：

$$F_{net}=\pi d\gamma_o+\pi d\gamma_w-2\pi d\gamma_{w-o} \tag{4}$$

油水动态平衡力为：

$$\gamma_{wo}=\frac{F_{net}}{\pi d} \tag{5}$$

即可得：

$$\gamma_{wo}=\gamma_w+\gamma_o-2\gamma_{w-o} \tag{6}$$

表面张力和界面张力的测定结果见表4。计算得到：γ_{wo}=82.150 mN/m。

表4　表面张力和界面张力测定结果

Table 4　Measurement results of surface tension and interfacial tension　mN/m

水的表面张力 γ_w	废油脂1的表面张力 γ_o	油水混合界面的界面张力 $\gamma_{w\text{-}o}$	油水混合界面的表面张力 γ_{wo}
72.150	33.45	11.725	82.150

3　煤粒沉降与分选机理分析

3.1　沉降过程中的受力分析

3.1.1　第一类作用力(与固-流相对运动无关的力)

(1) 惯性力 F_1。

$$F_1=-\frac{1}{6}\pi d^3\rho_s\frac{du_s}{dt} \tag{7}$$

式中：ρ_s 为煤粒密度，g/cm³；u_s 为煤粒的沉降速度，m/s；t 为沉降时间，s。

(2) 重力 G。

$$G=\frac{1}{6}\pi d^3\rho_s g \tag{8}$$

式中，g 为重力加速度，m/s²。

(3) 压力梯度力 F_2。

$$F_2=\frac{1}{6}\pi d^3\rho_l\frac{dp}{dx} \tag{9}$$

式中：ρ_l 为流体的密度，g/cm³；静止流体中只有重力方向存在压力梯度，此时：

$$\frac{dp}{dx}=\rho_l g \tag{10}$$

此时，压力梯度力＝浮力。

3.1.2　第二类作用力(与固-流相对运动相关的力)

沿相对运动方向的力有曳力、附加质量力和Basset力。垂直于相对运动方向的力有升力、Magnus力、Saffman力。

(1) 曳力 F_3[17]。

$$F_3=\frac{1}{8}\pi d^2\rho_l C_d(u_l-u_s)|u_l-u_s| \tag{11}$$

式中：C_d 为曳力系数；u_l 为流体的运动速度，m/s。

$$C_d=\frac{24}{R_e} \tag{12}$$

式中，R_e 为雷诺数。

$$R_e=\frac{\rho_l d v_\infty}{\mu} \tag{13}$$

式中：μ 为流体的动力黏度，Pa·s；v_∞ 为理论上颗粒的最大沉降速度，m/s。

$$\mu=\nu\rho_l$$

式中，ν 为流体的运动黏度，m²/s。

(2) 附加质量力 F_4。

$$F_4=-\frac{1}{12}\pi d^3\rho_l\left(\frac{du_s}{dt}-\frac{du_l}{dt}\right) \tag{14}$$

(3) Basset力 F_5[18]。

$$F_5=\frac{3}{2}d^2\rho_l\sqrt{\mu\pi}\int_{t_0}^{t}\frac{\xi(t')}{\sqrt{t-t'}}dt' \tag{15}$$

式中：$\xi(t')$为以前加速度历史的函数；t_0 为开始沉

降的时间。

(4) 升力 F_6。

$$F_6=\frac{1}{8}\pi d^2\rho_1 c_L(u_1-u_s) \tag{16}$$

式中,c_L为升力系数,球型颗粒的 c_L为零,非球型颗粒的 c_L不为零。

(5) Magnus 力 F_7[19-20]。

$$F_7=\frac{1}{8}\pi d^3\omega\rho_1(u_1-u_s) \tag{17}$$

式中,ω 为颗粒转动角速度。

(6) Saffman 力 F_8[21]。

$$F_8=1.62d^2\sqrt{\mu\rho_1}(u_1-u_s)\sqrt{\frac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}y}} \tag{18}$$

因在壁面处速度梯度较大,通常需考虑此力。

3.1.3 各种力的作用效果分析

当煤粒在流体中自由沉降时,颗粒会在一个极短的时间内达到匀速运动状态,则惯性力 F_1、附加质量力 F_4 和 Basset 力 F_5 均为零。煤粒自由沉降时,不同力的相对重要性需要量化比较。

$$\frac{F_7}{G}=\frac{3\omega\rho_1(u_1-u_s)}{4\rho_w g} \tag{19}$$

$$\frac{F_8}{G}=\frac{9.72(u_1-u_s)\sqrt{\mu\rho_1}}{\pi d\rho_w g}\sqrt{\frac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}y}} \tag{20}$$

由此可知,直径 $d<0.5$ mm 的煤粒在流体中自由沉降时,Magnus 力 $F_7\ll G$,Saffman 力 $F_8\ll G$。

因此,煤粒自由沉降时,只需要考虑重力 G、压力梯度力 F_2 以及曳力 F_3。

3.2 煤粒的沉降与分选

3.2.1 煤粒沉降规律研究

煤粒在油水中沉降过程中的受力如图 5 所示,煤粒自由沉降时,其运动状态遵循 Stokes 定律,处于油介质中的煤颗粒在极短的时间内达到受力平衡,此时:

$$G=F_2+F_3 \tag{21}$$

根据上述 G、F_2 和 F_3 的计算公式(8)、式(9)、式(11)及式(12)、式(13),由式(21)计算得到煤颗在油介质中的沉降末速度[22]:

$$u_s=\frac{d^2g(\rho_s-\rho_l)}{18\mu_o} \tag{22}$$

式中,μ_o为油的动力黏度,Pa·s。

根据试验数据进而可计算出观察到的煤粒的 Stokes 直径:

$$d_s=\left(\frac{18\mu_o u_s}{g(\rho_s-\rho_l)}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{23}$$

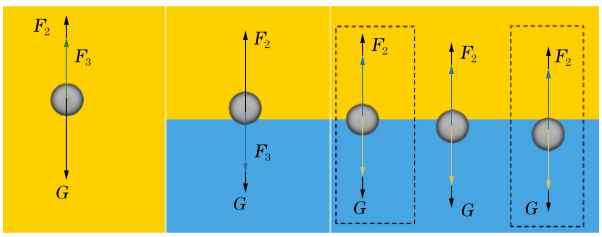


图 5 煤颗粒在沉降过程中的受力分析

Fig.5 Force analysis of coal particles during settling process

3.2.2 煤粒分选特性研究

在煤粒到达油水混合界面时,水界面给煤颗粒的力会使煤颗粒的运动状态发生改变。煤粒接触到水界面时的受力为:

$$F_{net1}=G-F_2-F_3-F_{wo} \tag{24}$$

式中:F_{net1}为颗粒所受力的合力;F_{wo}为油水混合界面对颗粒的作用力的合力。

当煤颗粒停留在油水混合界面时,此时:

$$\begin{cases}F_{net1}=0\\F_3=0\\F_{wo}=G-F_2\end{cases} \tag{25}$$

当煤粒刚好完全进入水中时,此时:

$$\begin{cases}F_{net1}>0\\G+F_w>F_2+F_3\end{cases} \tag{26}$$

式中,F_w为水界面对煤粒的力。

当煤粒在水中达到受力平衡时,此时:

$$\begin{cases}F_{net1}=0\\G=F_2+F_3\end{cases} \tag{27}$$

如图 6 所示,φ 为煤粒与油界面间夹角,则此时:

$$F_2=(2-\cos^3\varphi+3\cos\varphi)\frac{\pi d^3}{24}\rho_o g+(2+\cos^3\varphi-3\cos\varphi)\frac{\pi d^3}{24}\rho_w g \tag{28}$$

式中:ρ_o为油的密度,g/cm³;ρ_w为水的密度,g/cm³。

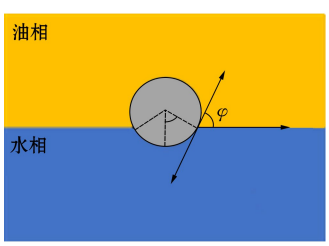


图 6 煤颗粒在油水界面示意

Fig.6 Schematic of coal particles at the oil-water interface

当 $\varphi=0$ 时，$F_2=\dfrac{\pi d^3}{6}\rho_o g$；

当 $\varphi=\dfrac{\pi}{2}$ 时，$F_2=\dfrac{\pi d^3}{12}\rho_o g+\dfrac{\pi d^3}{12}\rho_w g$；

当 $\varphi=\pi$ 时，$F_2=\dfrac{\pi d^3}{6}\rho_w g$。

当颗粒停留在油水混合界面时，混合界面给颗粒的力为：

$$F_{wo}=G-F_2=\frac{\begin{pmatrix}4\rho_s-\\(2-\cos^3\varphi+3\cos\varphi)\rho_o-\\(2+\cos^3\varphi-3\cos\varphi)\rho_w\end{pmatrix}d^3\pi g}{24} \tag{29}$$

颗粒给油水混合界面的最小力 F_{womin} 为：

$$F_{womin}=\frac{(\rho_s-\rho_w)d^3\pi g}{6}=\frac{3\mu_o v_s(\rho_s-\rho_w)\pi d}{\rho_s-\rho_o} \tag{30}$$

式中，v_s 为颗粒的实测沉降速度，m/s。

理论上煤粒突破油水混合界面时所需要的力 F'_{wo} 为：

$$F'_{wo}=2\pi d\gamma_{wo} \tag{31}$$

定义系数 C：

$$C=\frac{F_{womin}}{F'_{wo}}=\frac{(\rho_s-\rho_w)d^2 g}{12\gamma_{wo}}=\frac{3\mu_o v_s(\rho_s-\rho_w)}{2\gamma_{wo}(\rho_s-\rho_o)} \tag{32}$$

当 $C\leqslant 1$ 时，煤粒浮在油水混合界面上；

当 $C>1$ 时，煤粒可以突破油水混合界面最终沉降在水中。

4　结果讨论与验证

4.1　煤粒在废油脂 1 -水体系中沉降结果分析

查得太原当地的重力加速度 $g=9.797\ \mathrm{m/s^2}$，根据试验所得颗粒在油中的沉降末速度，由上述理论公式计算得到沉降颗粒在到达油水混合界面时的系数 C，结果如图 7 所示。计算结果与试验结果略有差异，其原因应是煤颗粒在油中运动过程中碰撞聚集造成的。煤粒在静止的油-水两相液体中自由沉降，没有外力时，由于碰撞聚集导致颗粒粒径 d 变大，颗粒给油水混合界面的力变大，导致颗粒可以突破油水混合界面到达水相中，从而导致理论计算结果产生误差。

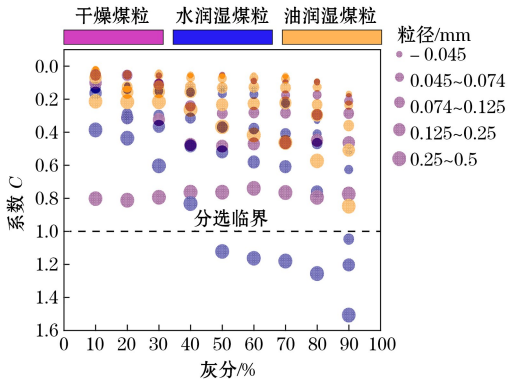


图 7　经过不同润湿处理的煤粒在油水界面时的系数 C

Fig.7　Coefficient C of coal particles interface subjected to different wetting treatments at the oil-water

4.2　煤粒在废油脂 2 -水体系中沉降结果分析

为确定试验方案对废油脂的普适性，通过更换废油脂来进行验证。更换废油脂 2 后，煤粒在油水混合界面上的沉降结果如图 8 所示。结果表明：干燥条件下，所有煤粒均在油中沉降，最终悬浮在油水混合界面上；油润湿条件下，只有在粒径＞0.25 mm，灰分＞90%时，煤粒会突破油水混合界面最终沉降在水中，其他条件下均悬浮在油水混合界面上；水润湿条件下，在粒径＞0.25 mm，灰分＞30%，或粒径＞0.074 mm，灰分＞90%时，煤粒会沉降在水中，其他条件均悬浮在油水混合界面上。

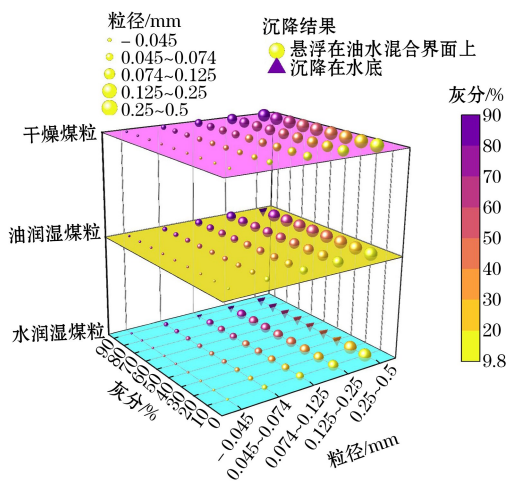


图 8　煤粒在油水界面的浮沉结果

Fig.8　Settling results of coal particles at the oil-water interface

更换液相后的各液相的参数见表 5，更换液相后下煤粒在油水混合界面时的系数 C 见图 9。

表 5 废油脂 2 -水体系的表面张力和界面张力测定结果

Table 5 Measurement of results surface tension and interfacial tension in waste oil 2-water system mN/m

水的表面张力 γ_w	废油脂 2 的表面张力 γ_o	油水混合界面的界面张力 γ_{w-o}	油水混合界面的表面张力 γ_{wo}
72.150	31.815	6.850	90.265

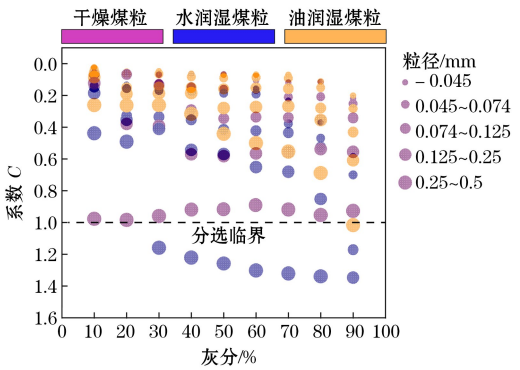


图 9 废油脂 2 -水体系中经不同润湿处理的煤粒在油水界面时的系数 C

Fig.9 Coefficient C of coal particles subjected to different wetting treatments at the oil-water interface in waste oil 2-water system

4.3 分选结果讨论

分选结果与煤粒的密度、粒径和油水两液相新形成的混合界面的表面张力有关。在两液相不改变的条件下,可以通过改变煤粒的大小来实现分选。在液相不变时,系数 C 与煤粒灰分、粒径的关系如图 10 所示。$C=1$ 为煤粒能够沉降与分选的临界,$C>1$ 时,煤粒可以沉降在水中;$C<1$ 时,煤粒悬浮在油水混合界面上,随后可借助相分离来实现煤粒的分选。

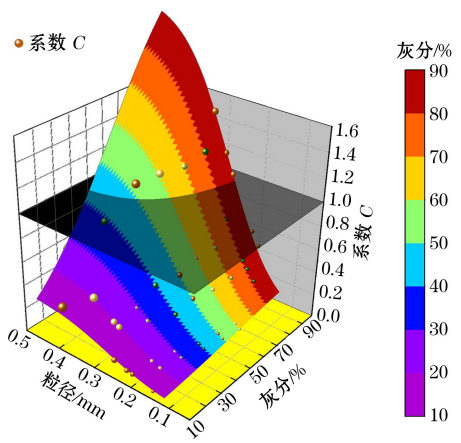


图 10 不改变液相时煤粒系数 C 与煤粒灰分、粒径的关系

Fig.10 Relationship between the coefficient C and coal ash content, particle size without changing the liquid phase

不改变液相条件有如下的系数 C 关系式:

$$C=C_0+0.28a\left(1+\mathrm{erf}\left(\frac{x-b}{\sqrt{2}c}\right)\right)\left(1+\mathrm{erf}\left(\frac{y-e}{\sqrt{2}f}\right)\right)\quad(R^2=0.992\ 1)\tag{30}$$

式中:x 为煤粒的直径;y 为煤粒的灰分;参数 $C_0=0.041\ 58$,$a=2.687\ 35$,$b=56.164\ 24$,$c=38.422\ 34$,$e=0.26548$,$f=0.103\ 02$。

5 结论

(1) 干燥煤粒和油润湿煤粒在废油脂-水双相体系中可自由沉降,所有颗粒均浮在油水界面上;水润湿煤粒在灰分>50%,粒径>0.25 mm 时,或灰分>90%,粒径>0.074 mm 时,能够突破油水混合界面实现沉降。

(2) 得出了判断煤粒能否在两液相间沉降与分选的系数 $C=\dfrac{(\rho_s-\rho_w)d^2g}{12\gamma_{wo}}$;当 $C>1$ 时,煤粒可以突破油水混合界面最终在水中沉降,$C\leqslant 1$ 时,煤粒会浮在油水混合界面上。

(3) 煤粒在废油脂-水双相体系中沉降与分选的结果与煤粒的灰分和粒径的平方呈正相关,与两液相形成的混合界面的表面张力呈负相关,水润湿处理后的煤粒可以降低到达油水混合界面的表面张力,进而实现分选。

参考文献(References):

[1] 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 Xiahui, XING Yaowen, WANG Bo, 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.

[2] 薛中华,董连平,杨崇义,等.疏水-亲水分选研究进展[J].矿产综合利用,2024,45(5):102-110.
XUE Zhonghua, DONG Lianping, YANG Chongyi, et al. Progress in hydrophobic-hydrophilic separation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5):102-110.

[3] GUPTA Nikhil. Development of a novel fine coal cleaning and dewatering technology [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2014.

[4] JONES III Alan W. Advancement of the hydrophobic-hydrophilic separation process [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2019.

[5] 肖建军,邱祖民,饶荣,等.地沟油制备新型浮选捕收剂的研究进展[J].现代化工,2015,35(4):57-59+61.
XIAO Jianjun, QIU Zumin, RAO Rong, et al. Research progress in preparation of new type flotation collectors from waste cooking oil[J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(4):57-59+61.

[6] LIN Yungsung, LIN Haiping. Study on the spray characteristics of methyl esters from waste cooking oil at elevated temperature [J]. Renewable Energy, 2010, 35(9): 1900-1907.

[7] ZHANG Huiming, OZTURK U. Aytun, WANG Qunwei, et al. Biodiesel produced by waste cooking oil: review of recycling modes in China, the US and Japan[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 677-685.

[8] CHEN Meizhu, LENG Binbin, WU Shaopeng, et al. Physical chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 286-298.

[9] 李孟婷，周博涵，王艳芬，等.地沟油酯化法基于浮选的再生技术研究[J].应用化工，2020，49(9)：2219-2222.
LI Mengting, ZHOU Bohan, WANG Yanfen, et al. Research on the regeneration technology based on flotation of gutter oil with hydrolysis method[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(9): 2219-2222.

[10] 王军超，王水利，韩加展，等.餐饮废油制生物柴油及其在选煤中的应用[J].煤炭技术，2016，35(9)：313-315.
WANG Junchao, WANG Shuili, HAN Jiazhan, et al. Biodiesel production from waste cooking oil and application in coal preparation[J]. Coal Technology, 2016, 35(9): 313-315.

[11] 杨建利，杜美利，黄婕，等.地沟油制备煤泥浮选捕收剂的研究[J].中国煤炭，2013，39(6)：67-69.
YANG Jianli, DU Meili, HUANG Jie, et al. Study on the application of waste oil to prepare coal flotation collectors [J]. China Coal, 2013, 39(6): 67-69.

[12] 荣令坤，原野，贾风军，等.地沟油在煤炭浮选中的应用研究[J].煤炭技术，2018，37(4)：307-309.
RONG Lingkun, YUAN Ye, JIA Fengjun, et al. Study on application of waste oil in coal flotation [J]. Coal Technology, 2018, 37(4): 307-309.

[13] 朱子祺，张佳彬，周瑞通，等.新型脂肪酸捕收剂用于某低品位胶磷矿浮选的试验研究[J].化工矿物与加工，2020，49(4)：22-24.
ZHU Ziqi, ZHANG Jiabin, ZHOU Ruitong, et al. Experimental study on application of new fatty acid collectors in flotation of a low grade collophanite ore[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(4): 22-24.

[14] 张香亭，刘晨宏，郭东风.双液浮选脱除煤系高岭土中的铁[J].煤炭学报，2000(增刊1)：186-192.
ZHANG Xiangting, LIU Chenhong, GUO Dongfeng. Removal of iron from kaolin occurring in coal bearing formation through dual liquid flotation[J]. Journal of China Coal Society, 2000(Suppl.1): 186-192.

[15] 薛中华.煤气化细渣疏水-亲水双液炭/灰分离研究[D].太原：太原理工大学，2022.
XUE Zhonghua. Research on extraction of carbon from coal gasification fine slag using hydrophobic-hydrophilic separation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.

[16] 张雯杰，尚作萍，张宏兵，等.油水两相分层流界面波变形及破坏力学特性研究[J].力学与实践，2022，44(1)：59-66.
ZHANG Wenjie, SHANG Zuoping, ZHANG Hongbing, et al. Study of mechanical properties of deformation and breakage of interfacial waves in oil/water two-phase stratified flow[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(1): 59-66.

[17] 林雪松，陈殿强，何峰，等.固液两相流中颗粒浓度分布统一公式的研究[J].水资源与水工程学报，2013，24(4)：82-84.
LIN Xuesong, CHEN Dianqiang, HE Feng, et al. Study on unified formula of particle concentration distribution in two-phase flow of liquid-solid[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(4): 82-84.

[18] 由长福，祁海鹰，徐旭常.Basset力研究进展与应用分析[J].应用力学学报，2002(2)：31-33+139-140.
YOU Changfu, QI Haiying, XU Xuchang. Progresses and applications of Basset force[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002(2): 31-33+139-140.

[19] 赵万勇，李易松，王振，等.旋流泵中颗粒运动方程的探讨[J].兰州理工大学学报，2007(6)：47-49.
ZHAO Wanyong, LI Yisong, WANG Zhen, et al. Inquiry into equation of particles motion in vortex-pump[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007(6): 47-49.

[20] 张仪，李兵，白玉龙，等.液固流态化动态过程中相间作用力的数值模拟及实验验证[J].化工学报，2020，71(11)：5129-5139.
ZHANG Yi, LI Bing, BAI Yulong, et al. Numerical simulation and experimental validation of inter-phase forces in dynamic process of liquid-solid fluidization[J]. CIESC Journal, 2020, 71(11): 5129-5139.

[21] 郭烈锦.两相与多相流动力学[M].西安：西安交通大学出版社，2002.
GUO Liejin. Two phases and multiphase flow dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.

[22] 侯永莉，郝喆.尾矿颗粒沉降和分选规律研究[J].力学与实践，2021，43(4)：581-587.
HOU Yongli, HAO Zhe. Settlement and separation of tailings particles[J]. Mechanics in Engineering, 2021, 43(4): 581-587.