

DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.01.002

马先军,朱申红,王庆峰,等.煤炭高梯度磁选-浮选脱硫降灰试验[J].洁净煤技术,2014,20(1):5-10.

# 煤炭高梯度磁选-浮选脱硫降灰试验

马先军,朱申红,王庆峰,王云雁

(青岛理工大学环境与市政工程学院,山东青岛 266520)

**摘要:**通过分析煤样性质,说明原煤中无机硫主要以硫化铁硫为主,有机硫较高,仅依靠物理方法很难达到理想脱除效果。通过煤粉高梯度磁选试验研究了磁介质、磁通密度、脉冲对煤炭磁选效果的影响。结果表明:聚磁介质选用不加铜套细网介质,当磁通密度为1.295 T,脉冲为25次/min时,煤粉湿法高梯度磁选脱硫效果最好,此时硫分为1.59%,精煤产率为85.44%,脱硫率为31.87%,脱灰率为38.17%,黄铁矿硫脱除率为45.02%。通过正交试验确定了最佳高梯度磁选条件为:煤粉粒度0.075 mm,磁通密度1.295 T,脉冲25次/min,可得到硫分1.35%,灰分10.37%的磁选精煤产品。最后对磁选精煤进行再浮选试验,得到最佳浮选条件为:石灰500 g/t,捕收剂1360 g/t,起泡剂90 g/t,可获得产率76.29%,硫分1.28%,灰分8.14%的精煤,产品脱硫率为57.73%,脱灰率为58.52%,黄铁矿硫脱除率为84.56%。采用磁选-浮选综合流程,煤粉基本达到理想的脱硫降灰效果,可作为煤种脱硫降灰技术方案的参考。

**关键词:**煤粉;高梯度磁选;浮选;脱硫率;脱灰率;黄铁矿硫

中图分类号:TD94

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2014)01-0005-06

## Experimental study on high-gradient magnetic separation and flotation for coal desulfurization and desliming

MA Xianjun, ZHU Shenhong, WANG Qingfeng, WANG Yunyan

(School of Environmental and Municipal Engineering Qingdao Technological University Qingdao 266520, China)

**Abstract:** The analysis of coal sample properties show that the iron sulfide is the main component. So it is difficult to achieve ideal removal effects just depending on physical removal methods. Investigate the influence of magnetic medium, magnetic flux density and pulse on the effects of magnetic separation through coal fines high-gradient magnetic separation experiments. The results show that taking the fine network without copper bush as assembled magnetic medium, when the magnetic flux density is 1.295 T, pulse is 25 times per minute, the desulfurization effects is the best. Under this condition, the sulfur content, clean coal yield, desulfurization rate, desliming rate, desulfurization rate of pyrite is 1.59 percent, 85.44 percent, 31.87 percent, 38.17 percent, 45.02 percent respectively. Determine the best high-gradient magnetic separation condition through orthogonal test. When the coal fines size is 0.075 mm, the magnetic flux density is 1.295 T, the pulse is 25 times per minute, obtain clean coal with 1.35 percent sulfur content, 10.37 percent ash content. At last, conduct the secondary flotation experiment, get the best flotation condition. When the dosage of lime, collector and frother is 500 g/t, 1360 g/t, 90 g/t, obtain clean coal with 1.28 percent sulfur content, 8.14 percent ash content and 76.29 yield, and desulfurization rate, desliming rate, desulfurization rate of pyrite is 57.73 percent, 58.52 percent and 84.56 percent. The research show that the high-gradient magnetic separation and flotation can decrease effectively sulfur and ash content in coal.

**Key words:** coal fines; high-gradient magnetic separation; flotation; desulfurization rate; desliming rate; pyrite sulfur

收稿日期:2013-10-11 责任编辑:白娅娜

作者简介:马先军(1986—)男,湖北黄石人,助理工程师,主要从事有色金属方面的研究工作。

## 0 引言

中国煤炭储量相对石油和天然气比较丰富,决定了中国能源结构以燃煤为主的现状<sup>[1]</sup>。煤炭资源中约30%属中、高硫煤,硫分在2%以上<sup>[2]</sup>。这些中、高硫煤直接燃烧产生的SO<sub>2</sub>是引发酸雨的主要污染物。中国排放的SO<sub>2</sub>约90%来自煤的直接燃烧,控制燃煤SO<sub>2</sub>排放是中国当前大气污染控制领域最紧迫的任务<sup>[3-5]</sup>。高梯度磁选脱硫技术是一种物理选煤新技术,属燃前脱硫范畴<sup>[2]</sup>。

中国对煤炭磁选脱硫技术的研究较晚<sup>[6]</sup>,1987—1988年,徐州环保所首次采用周期式HGMS进行实验室干法煤粉高梯度磁选脱硫研究<sup>[7]</sup>。1977年以后,日本、瑞典、英国等国研究者分别采用不同高梯度磁选设备进行类似试验,结果表明:采用HGMS干法分选微米级煤,无机硫脱除率在80%以上,灰分可降低50%~60%,发热量回收率超过90%<sup>[8-10]</sup>。湿法分选效果相比干法分选要好。磁场强度为0.65~0.75 T时,0.074~0.147 mm煤粉脱硫率最高可达70%<sup>[7]</sup>。高梯度磁选技术问世之初,有专家预测1995年以后磁法脱硫必定商品化,到2000年磁法将是燃煤脱硫的主要工艺之一<sup>[11]</sup>。然而,到目前为止,虽然磁法脱硫的实验室研究开展得较广泛,但并未真正实现工业化应用<sup>[12]</sup>。高梯

表2 煤样粒度组成

粒级/mm	质量/g	产率/%	S/%	S分布率/%	A/%	A分布率/%
2.000~1.000	208.65	20.92	2.08	20.73	16.07	22.16
1.000~0.500	245.64	24.63	2.22	26.05	13.64	22.14
0.500~0.300	158.21	15.86	1.91	14.43	13.14	13.74
0.300~0.150	180.71	18.12	2.09	18.04	14.12	16.86
0.150~0.074	125.41	12.58	2.04	12.22	17.53	14.54
-0.074	78.62	7.89	2.27	8.53	20.31	10.56
合计	997.24	100.00	2.10	100.00	15.17	100.00

由表2可知,煤样中硫分在各粒级中变化不大。随着粒级的减小,煤样灰分逐渐升高,而灰分、硫分分布率总体呈下降趋势。煤样中2.000~0.500 mm产率为45.55%,几乎占到煤样的50%,该粒级对-2.000 mm煤样的硫分、灰分及其分布率影响最大。

## 2 试验条件

### 2.1 试验仪器及设备

主要试验设备见表3。

度磁选在脱硫的同时,还起到降灰作用<sup>[11,13]</sup>,综合采用磁选-浮选流程,可使煤粉基本达到理想的脱硫降灰效果。

## 1 煤样性质

### 1.1 煤质分析

试验煤样采自山东淄博某煤矿。煤样经破碎筛分后,粒度达到0.5 mm以下。称取6份煤样分别进行煤质检测,最后取平均值。煤质分析见表1。

表1 6份煤样煤质分析 %

样品编号	水分 $M_{ad}$	灰分 $A_d$	全硫 $S_{t,d}$	硫酸盐硫 $S_{s,d}$	硫化铁硫 $S_{p,d}$	有机硫 $S_{o,d}$
A1	0.63	14.93	2.07	0	1.22	0.85
A2	0.58	14.58	2.21	0	1.43	0.78
A3	0.72	15.55	2.05	0.01	1.20	0.84
A4	0.82	14.89	2.14	0.06	1.07	1.01
A5	0.70	14.12	2.13	0.02	1.08	1.03
A6	1.02	15.74	2.06	0.09	0.99	0.98
平均	0.75	14.97	2.11	0.03	1.17	0.91

由表1可知,原煤中无机硫平均为1.17%,占全硫的55.45%,无机硫主要以硫化铁硫为主。由于试验煤种有机硫较高,平均为0.91%,仅依靠物理方法很难达到理想脱除效果。

### 1.2 粒度组成

煤样粒度组成见表2。

## 2.2 试验方法

1) 将煤样破碎至0.5 mm以下,称取煤样100 g。首先进行煤粉高梯度磁选试验,设定给样时间、退磁时间均为2 min,漂洗时间为1 min,研究磁介质、磁通密度和脉冲对煤粉磁选效果的影响<sup>[14-15]</sup>。

2) 通过正交试验研究煤粉粒度、磁通密度和脉冲对磁选效果的影响,并得到最佳组合条件。

3) 对磁选粗精煤进行浮选试验,称取磁选粗精煤100 g,搅拌时间为3 min,充气时间为30 s,刮泡时间为8 min,添加药剂顺序依次为:抑制剂、捕收

剂、起泡剂。研究抑制剂和捕收剂用量对粗精煤浮选效果的影响,并得到最优浮选参数组合。

表3 主要试验设备

设备	规格型号	生产厂家
辊式破碎筛分机	XPS - Φ250 × 125	武汉探矿机械厂
锥形球磨机	XMQ - Φ240 × 90	武汉探矿机械厂
周期式脉动高梯度磁选机	SLon - 100	赣州立环磁电设备高技术有限责任公司
单槽式浮选机	XFD 型	长春探矿机械厂
电热鼓风机	DF205	北京二龙路第一金属厂
三头研磨机	XPM - Φ120 × 3	武汉探矿机械厂
电子天平	FA1004	上海良平仪器仪表有限公司
电子天平	YP20002	上海光正医疗仪器有限公司
多用真空过滤机	XTLZΦ260/Φ200	南昌102厂
标准检验筛	GB/T 6003.1—1997	浙江省上虞市沪江仪器纱筛厂
微机多元分析仪	GQ - 3EF	南京固琦分析仪器制造有限公司

4) 在最优磁选和浮选条件下,进行磁选-浮选全流程试验,得到煤粉磁选-浮选脱硫脱灰全流程。

### 3 湿法高梯度磁选试验

#### 3.1 煤粉高梯度磁选探索试验

##### 3.1.1 磁介质

研究了不同聚磁介质对精煤产率、脱硫率、脱灰率及黄铁矿硫脱除率的影响,具体如图1所示。

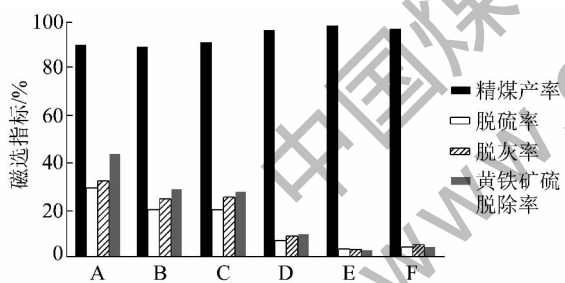
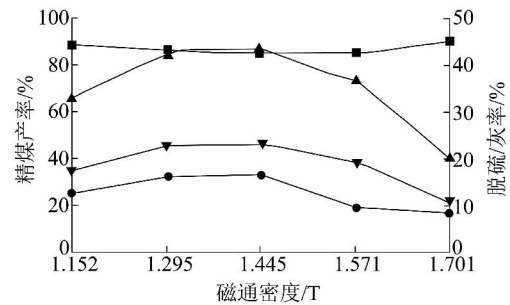


图1 不同聚磁介质对磁选指标的影响

A—不加铜套细网; B—不加铜套中网; C—不加铜套粗网;  
D—加铜套细网; E—加铜套中网; F—加铜套粗网



a) 25次/min

由图1可知,就精煤产率而言,加铜套的效果比不加铜套的效果好;就脱硫率、脱灰率及黄铁矿硫脱除率而言,不加铜套效果明显比加铜套效果好,且细网介质效果比粗、中网效果明显。综合考虑后,选择不加铜套细网作为磁选介质。

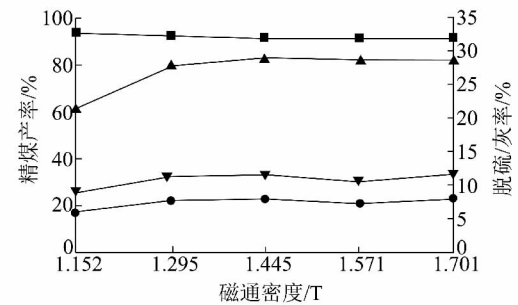
##### 3.1.2 磁通密度

在其他条件不变的情况下,分别选取脉冲25, 50次/min,在不同磁通密度条件下进行磁选。研究磁通密度对精煤产率、脱硫率、脱灰率及黄铁矿硫脱除率的影响,如图2所示。

由图2可知,在不同脉冲条件下,随着磁通密度的增大,精煤产率变化并不明显,而脱硫率、脱灰率及黄铁矿硫脱除率均呈现先增大后减小的趋势。脉冲25次/min,磁通密度1.295 T时,脱硫率、脱灰率和黄铁矿硫脱除率均达到最大值。

##### 3.1.3 脉冲

在磁通密度为1.295 T的条件下进行脉冲试验,考察脉冲对精煤产率、脱硫率、脱灰率及黄铁矿硫脱除率的影响,具体如图3所示。



b) 50次/min

图2 磁通密度对磁选指标的影响

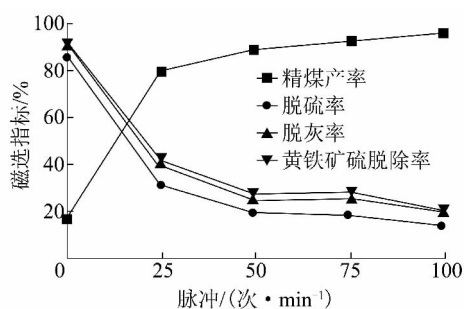


图3 脉冲对磁选指标的影响

由图3可知,在磁通密度不变的情况下,随着脉冲的增大,精煤产率逐渐增加,而脱硫率、脱灰率及黄铁矿硫脱除率有逐渐减小的趋势。且脉冲为25次/min时磁选效果最好。

综上所述,聚磁介质选用不加铜套细网介质,当磁通密度为1.295 T,脉冲为25次/min时,煤粉湿法高梯度磁选脱硫效果最好,此时硫分为1.59%,精煤产率为85.44%,脱硫率为31.87%,脱灰率为38.17%,黄铁矿硫脱除率为45.02%。

## 3.2 正交试验

### 3.2.1 试验设计

影响煤粉湿法高梯度磁选脱硫效果的因素主要有煤粉粒度、磁通密度和脉冲次数。为确定各因素的相互作用及各因素对脱硫效果的影响,设计三

因素四水平正交试验。正交试验因素水平表见表4。

表4 因素水平表

水平	因素		
	A 煤粉粒度/mm	B 磁通密度/T	C 脉冲/(次·min <sup>-1</sup> )
1	0.380	1.295	25
2	0.180	1.445	50
3	0.120	1.571	75
4	0.075	1.701	100

### 3.2.2 试验结果

正交试验结果见表5,极差分析见表6。正交试验中极差 $R_x$ 反映了各因素对磁选效果的影响程度。 $R_x$ 越大,说明该因素对磁选影响越大。由表6可知,从脱硫率效果来看,脉冲>煤粉粒度>磁通密度,最佳参数组合为A4B1C1;从脱灰率效果来看,脉冲>磁通密度>煤粉粒度,最佳参数组合为A2B3C1;从黄铁矿硫脱除率来看,脉冲>煤粉粒度>磁通密度,最佳参数组合为A4B2C1。由于磁选的主要作用是脱硫,因此选用脱硫率作为最终评选指标,即煤粉粒度为0.075 mm,磁通密度为1.295 T,脉冲次数为25次/min时,煤粉磁选效果最好。

表5 正交试验结果

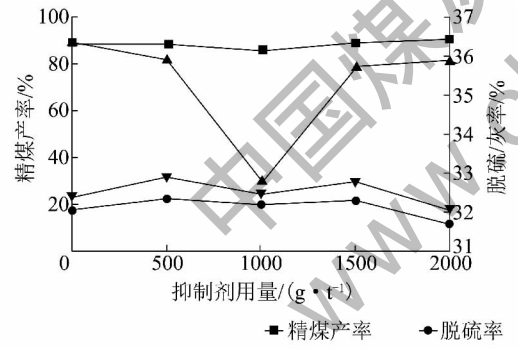
编号	A 煤粉粒度/mm	B 磁通密度/T	C 脉冲/(次·min <sup>-1</sup> )	脱硫率/%	脱灰率/%	黄铁矿硫脱除率/%
1	0.380	1.295	25	37.31	41.80	50.39
2	0.380	1.445	50	27.21	31.23	40.12
3	0.380	1.571	75	26.08	31.09	37.29
4	0.380	1.701	100	19.35	23.51	28.38
5	0.180	1.295	75	26.53	26.94	40.97
6	0.180	1.445	100	20.99	17.84	32.49
7	0.180	1.571	25	46.13	46.49	66.32
8	0.180	1.701	50	37.09	40.07	55.09
9	0.120	1.295	50	33.89	32.73	52.21
10	0.120	1.445	75	21.99	19.47	34.13
11	0.120	1.571	100	19.79	23.22	29.77
12	0.120	1.701	25	31.49	40.24	45.13
13	0.075	1.295	100	26.84	19.29	43.55
14	0.075	1.445	25	51.86	43.36	77.69
15	0.075	1.571	50	23.21	32.67	33.43
16	0.075	1.701	75	17.97	25.37	26.84

表6 极差分析

$K_{xi}$	A 煤粉粒度/mm	B 磁通密度/T	C 脉冲/(次·min <sup>-1</sup> )
$K_{硫1}$	110.05	124.57	225.71
$K_{硫2}$	67.12	122.05	121.40
$K_{硫3}$	107.16	115.21	92.57
$K_{硫4}$	119.88	105.90	86.97
$R_{硫}$	52.76	18.67	138.74
$K_{灰1}$	127.63	120.76	171.89
$K_{灰2}$	131.34	101.90	136.70
$K_{灰3}$	115.66	133.67	102.87
$K_{灰4}$	120.69	129.19	83.86
$R_{灰}$	15.88	31.77	88.03
$K_{黄铁脱1}$	143.72	171.03	225.71
$K_{黄铁脱2}$	178.48	173.13	170.08
$K_{黄铁脱3}$	150.97	153.09	121.99
$K_{黄铁脱4}$	180.01	145.93	125.40
$R_{黄铁脱}$	36.29	27.20	103.72

4 磁选精煤再浮选试验

在煤粉粒度 0.075 mm 磁场密度 1.295 T 脉冲 25 次/min 的条件下,得到硫分 1.35% 灰分 10.37%



的磁选精煤产品。根据试验要求,所得精煤产品硫分、灰分仍偏高。因此,针对磁选精煤产品进行了浮选脱硫脱灰试验。

选取磁选精煤 100 g 在单槽式浮选机中进行浮选试验。起泡剂选用 2 号油,用量为 90 g/t,抑制剂选用石灰,捕收剂选用煤油。抑制剂和捕收剂对浮选效果的影响如图 4 所示。由图 4a) 可知,随着抑制剂用量的增加,精煤产率变化不大,抑制剂用量为 500 g/t 时,精煤硫分最小,脱硫率和脱灰率最大。由图 4b) 可知,随着捕收剂用量的增加,脱硫率和脱灰率均减小,捕收剂用量为 1360 g/t 时有最小值。因此,确定最佳浮选条件为:石灰 500 g/t,捕收剂 1360 g/t,起泡剂 90 g/t。此时可获得产率 76.29%,硫分 1.28%,灰分 8.14% 的精煤,产品脱硫率为 57.73%,脱灰率为 58.52%,黄铁矿硫脱除率达到 84.56%。

5 煤粉磁选-浮选脱硫脱灰全流程

根据正交条件试验确定的工艺参数,即煤粉粒度 0.075 mm 磁通密度 1.295 T 脉冲 25 次/min,进行磁选-浮选全流程试验,数质量流程如图 5 所示。

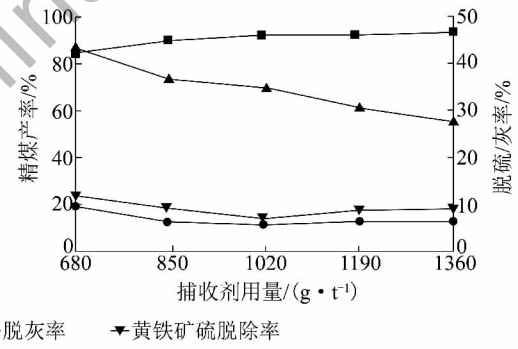


图4 抑制剂和捕收剂对浮选效果的影响

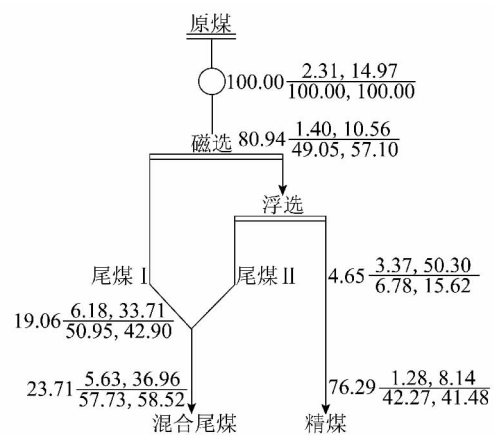


图5 煤粉磁选-浮选试验数质量流程

6 结 论

1) 试验煤样有机硫含量高,仅靠物理方法很难达到理想脱除效果。采用高梯度磁选-浮选联合方法可脱除煤中大部分无机硫和灰分。通过试验确定最佳高梯度磁选条件为:煤粉粒度 0.075 mm,磁通密度 1.295 T,脉冲 25 次/min;最佳浮选条件为:石灰 500 g/t,捕收剂 1360 g/t,起泡剂 90 g/t。

2) 采用高梯度磁选-浮选联合流程处理煤样时,可获得产率 76.29%,硫分 1.28%,灰分 8.14% 的精煤,产品脱硫率为 57.73%,脱灰率为 58.52%,黄铁矿硫脱除率达到 84.56%。

## 参考文献:

- [1] 朱申红,朱复海.煤粉湿法高梯度磁选脱硫、脱灰的试验研究[J].青岛理工大学学报,2006,27(3):14-18.
- [2] 王东路,李勇.高梯度磁选脱硫试验研究[J].山东电力技术,2004(3):7-11.
- [3] 铁占续,焦红光,崔敬媛,等.微粉煤磁性及其对干法高梯度磁选影响的试验研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2009,28(2):230-233.
- [4] 徐世辉,李延锋,陈文刊,等.过热蒸汽下煤系黄铁矿磁性强化研究[J].洁净煤技术,2010,16(6):45-48.
- [5] 凌向阳,王羽玲,刘鹏,等.高硫煤粉永磁干法强磁选试验研究[J].洁净煤技术,2010,16(1):32-34,20.
- [6] 唐跃刚,任德贻,郑建中,等.煤中黄铁矿的磁性及其机理研究[J].科学通报,1995,40(16):1483-1486.
- [7] 吴士彬,张恒建,张思靖.干法煤粉磁选脱硫的试验研究[J].环境科学,1989,11(6):25-28.
- [8] Kelland D R, Lai-Fook M, Maxwell E, et al. HGMS coal desulfurization with microwave magnetization enhancement [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(6): 2434-2436.
- [9] Hise E C, Holman A S, Friedlaender F J. Development of high-gradient and open-gradient magnet separation of dry fine coal [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1981, 17(6): 3314-3316.
- [10] Fine H, Lowry M, Power L, et al. A proposed process for the desulfurization of finely divided coal by flash roasting and magnetic separation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1976, 12(5): 523-527.
- [11] 张义顺,史长亮,马娇,等.煤粉磁选净化技术[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [12] 焦红光,丁连征,陈清如.细粒煤高梯度磁选脱硫技术的发展与思考[J].中国矿业,2007,16(6):79-81.
- [13] 杨刚.基于浮选原理制备低灰煤的研究进展[J].洁净煤技术,2012,18(1):19-22.
- [14] 邢宝林,谌伦建,焦红光,等.煤粉磁选脱硫技术的研究现状及展望[J].洁净煤技术,2009,15(1):17-20.
- [15] 王灿,李沙.热处理对磁选脱除煤中有机硫影响的试验研究[J].黑龙江科技信息,2011(33):17.

(上接第4页)

## 4 结 论

在精煤灰分相近的条件下,生物柴油对煤泥的捕收性要低于柴油和煤油。当生物柴油与煤油、柴油分别以不同比例复合使用时,复合药剂对煤泥的捕收性得到改善。柴油、煤油与生物柴油分别以质量比1:9复合时,煤泥浮选效果较好,柴油、煤油用量大幅下降,精煤产率分别比生物柴油提高10.52%和9.06%,浮选完善度分别提高5.32%和4.33%,同时精煤灰分升高了0.16%和0.22%,说明与柴油、煤油相比,复合药剂对煤泥的选择性还有待提高。

## 参考文献:

- [1] 姚志龙,闵恩泽.废弃食用油脂的危害与资源化利用[J].天然气工业,2010,30(5):123-128.
- [2] 丁立亲.浮选的理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,1987.
- [3] 李亚萍,沈丽娟,陈建中,等.煤炭浮选药剂评述[J].选煤技术,2006(5):83-88.
- [4] 崔广文,王洁,王京发,等.地沟油制备煤泥捕收剂及其应用效果研究[J].选煤技术,2012(6):1-3.
- [5] 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):67-69,82.

- [6] 陈文,王存文,张圣利.碱催化酯交换法制备生物柴油的研究[J].化学与生物工程,2007,24(1):38-40.
- [7] 安文杰,许德平,王海京.生物柴油化学制备方法[J].粮食与油脂,2005(7):3-6.
- [8] 鞠庆华,曾昌凤,郭卫军,等.酯交换法制备生物柴油的研究进展[J].化工进展,2004,23(10):1053-1057.
- [9] 高荫榆,谢何融,陈文伟,等.废弃油脂制备生物柴油的新工艺研究[J].可再生能源,2007,25(3):47-49.
- [10] Abdurrahman S, Aylin B K, Yalcin T, et al. Comparison of the biodiesel quality produced from refined sunflower (Helianthus annuus L) oil and waste cooking oil [J]. Energy, Exploration & Exploitation, 2010, 28(6): 499-512.
- [11] 刘晓娟,殷卫峰.国内外生物质能开发利用的研究进展[J].洁净煤技术,2008,14(4):7-9.
- [12] GB/T 477—2008 煤炭筛分试验方法[S].
- [13] MT/T 259—1991 煤炭可浮性评定方法[S].
- [14] GB/T 4757—2001 煤粉(泥)实验室单元浮选试验方法[S].
- [15] 解国辉.煤泥浮选中用约合理性的探讨[J].洁净煤技术,2006,12(1):25-27.
- [16] 邓铭,杨珺,李国洲,等.浮选药剂联合使用及其在煤泥浮选中的应用研究[J].洁净煤技术,2007,13(6):22-24.