

# 小锥角水力旋流器在煤泥预先抛尾中的应用

任瑞晨 张乾伟 白 阳 张孝松 宋大文

(辽宁工程技术大学 矿物加工利用与设计研究院 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 分析了临江选煤厂煤泥性质,说明煤泥中大量细粒、高灰非煤矿物进入浮选系统,是高灰煤泥难以浮选的主要原因。为降低煤泥灰分,减小浮选处理量,通过理论计算和试验应用研究了小锥角水力旋流器在煤泥预先抛尾工艺中应用的可行性。结果表明:  $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器在給料质量分数 15%、給料压力 0.25 MPa 的条件下,可实现  $-0.038$  mm 煤泥的初步分级分选;煤泥经  $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$  mm 小锥角水力旋流器底流串联预处理后,可实现连续降灰。与原煤泥直接浮选相比,煤泥经  $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器预先抛尾后,其合格精煤泥产率、可燃体回收率和浮选完善指标分别提高 6.03%、7.28% 和 9.99%;入浮煤泥可浮性等级也由难浮提至中等可浮。因此  $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器用于选煤厂预先抛尾具有可行性。

**关键词:** 小锥角水力旋流器;预先抛尾;煤泥;浮选;精煤泥;降灰

**中图分类号:** TD94 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2014)02-0005-05

## Application of small taper angle hydraulic cyclone in coal slime pre-concentration discarding tailings

REN Ruichen ZHANG Qianwei, BAI Yang ZHANG Xiaosong, SONG Dawen

(Mineral Processing and Utilization Design Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 12300, China)

**Abstract:** The slime properties of Linjiang coal preparation plant show that large fine size fraction and high-ash mineral in flotation system are mine obstacle for high-ash slime flotation. Research the pre-concentration discarding tailings feasibility of small taper angle hydraulic cyclone in coal slime pretreatment process in theoretical calculation and experimental practice. Theoretical results show that, when the mass fraction of feed coal is 15 percent, the pressure is 0.25 MPa, the  $\phi 150$  mm small taper angle hydraulic cyclone can achieve the removal of  $-0.038$  mm high-ash slime. Before flotation, removing high-ash non-coal minerals using small taper angle hydraulic cyclone, the ash content of flotation coal slime can be reduced obviously when the coal slime is separated by  $\phi 150$  mm,  $\phi 75$  mm,  $\phi 50$  mm small taper angle hydraulic cyclone, whose underflow is in series. Through the separation of  $\phi 150$  mm small taper angle hydraulic cyclone, the underflow enter into the flotation system, comparing with the raw coal slime direct flotation, the fine coal slime production, combustible recovery and flotation perfect index respectively increase by 6.03 percent, 7.28 percent and 9.99 percent. So the application of  $\phi 150$  mm small taper angle hydraulic cyclone in coal preparation plant is feasible.

**Key words:** small taper angle hydraulic cyclone; pre-concentration discarding tailing; slime; flotation; clean fine coal; ash removal

## 0 引 言

目前小锥角水力旋流器主要应用于非金属矿物(如高岭土<sup>[1]</sup>的提纯)的分级分选,其显著特点为可实现超细分级,分级粒度窄,在一定范围内分级粒度

可调。根据预先抛尾在矿物分选中的应用和小锥角水力旋流器的超细分级分选作用<sup>[2-3]</sup>。笔者以临江选煤厂易泥化细粒煤泥为试验对象,从理论计算和试验应用两方面研究小锥角水力旋流器的分级分选作用,验证小锥角水力旋流器应用于预先抛尾工艺

收稿日期:2013-12-31;责任编辑:白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.02.002

基金项目:辽宁省教育厅重点实验室基金资助项目(Ls2010072)

作者简介:任瑞晨(1958—),男,辽宁阜新,人,博士生导师,主要从事选煤、选矿、矿产资源综合利用等方面的研究。E-mail: ruichenren@263.net

引用格式:任瑞晨,张乾伟,白阳,等.小锥角水力旋流器在煤泥预先抛尾中的应用[J].洁净煤技术,2014,20(2):5-9.

REN Ruichen, ZHANG Qianwei, BAI Yang, et al. Application of small taper angle hydraulic cyclone in coal slime pre-concentration discarding tailings[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(2): 5-9.

的可行性。

## 1 煤泥性质

### 1.1 粒度组成

试验煤样为临江选煤厂浮选入料煤泥。煤泥取样后于 105 ℃ 烘干,冷却至室温缩分后经实验室用系列标准筛湿法筛分,将所得各粒级产物在 105 ℃ 烘干,冷却至室温后称重,得入料煤泥粒度组成,具体见表 1。

表 1 煤泥粒度组成

粒级/mm	产率/%	灰分/%	累计产率/%	平均灰分/%
+0.150	10.97	10.93	10.97	10.93
0.150~0.074	25.05	18.57	36.02	16.24
0.074~0.038	18.22	29.03	54.24	20.54
-0.038	45.76	55.66	100.00	36.61
合计	100.00	36.61		

由表 1 可知,随着粒级的减小,产率和灰分逐渐增加。+0.038 mm 灰分为 20.54%,产率 54.24%。实际生产中浮选精煤灰分为 12%~16%,+0.038 mm 精煤灰分显著偏高。试验煤泥中高灰矿物主要集中在细粒级 -0.038 mm,其灰分高达 55.66%,产率将近 50%。因此大量细粒、高灰非煤(或与煤伴生)矿物进入浮选系统,是高灰煤泥难以浮选的主要原因<sup>[4]</sup>。

### 1.2 XRD 分析

由于煤为隐晶质矿物,组成不稳定,XRD 分析难以分辨其衍射峰,只可分析非煤矿物。X 射线衍射测试条件为: XRD 分析仪型号 D8,电压 40 kV,电流 40 mA;靶型为铜靶,起始角 5°,终止角 85°,积分时间 0.02 s;样品为粒状。煤泥 XRD 分析见表 2。

表 2 煤泥 XRD 分析 %

石英	高岭石	白云母	方解石	白云石
18.00	44.40	30.50	2.10	5.00

高灰非煤矿物进入浮选精煤,严重影响精煤灰分。由表 2 可知,原煤泥中高灰非煤矿物主要包括高岭石、白云母、石英、白云石、方解石等,其中高岭石含量相对最高,达到 44.40%,其次为白云母,为 30.50%。高岭石具有较强亲水性,在强烈机械搅拌作用下易分散,极易附着在矿化气泡上,是影响精煤灰分的主要因素。

若将煤泥在浮选前进行分级分选,即对入浮煤泥进行预先抛尾,脱除煤泥中部分细粒、高灰非煤(或与煤伴生)矿物,可实现对煤泥的逐步降灰,减小浮选处理量,优化浮选环境,提高浮选指标,降低浮选药耗和生产成本。

## 2 小锥角水力旋流器用于煤泥分选的研究

### 2.1 小锥角水力旋流器的直径选取

小锥角水力旋流器对超细煤泥分选具有较大优势。根据煤泥物理性质,利用小锥角水力旋流器或其组合对煤泥进入浮选前的预先抛尾,可脱除细粒煤泥,实现分级分选。

庞学诗<sup>[5-6]</sup>曾提出组合螺旋线涡运动中的最大切线速度轨迹学理论,得到广泛认可。其认为组合螺旋线涡或其简化的组合涡是水力旋流器分离时特有的流体运动形式,其中最大切线速度轨迹面为其自然分离面,并提出了根据分级粒度计算水力旋流器基本直径的半经验公式,直径计算基本公式为:

$$D_j = 2.1 \times 10^{-5} \frac{d_m^2 (\delta - \rho_m) \Delta P_m^{0.5}}{\rho_m \times \mu_m} \quad (1)$$

$$\rho_m = \frac{\delta}{C_{iw} + \delta(1 - C_{iw})} \quad (2)$$

$$C_{iv}^2 = \frac{C_{iw}^2}{\delta + C_{iw}^2(1 - \delta)} \quad (3)$$

$$\mu_m = \mu [1 + 2.5C_{iw} + 10.05C_{iv}^2 + 0.00273e^{16.6C_{iv}}] \quad (4)$$

式中, $D_j$ 为水力旋流器基本直径,cm; $d_m$ 为分级粒度, $\mu\text{m}$ ; $\Delta P_m$ 为旋流器给料压力,MPa; $\rho_m$ 为煤浆密度, $\text{t}/\text{m}^3$ ; $C_{iw}$ 和 $C_{iv}$ 分别为煤浆质量分数和体积分数,用小数表示; $\mu_m$ 为煤浆黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $\delta$ 为矿物(石)密度, $\text{t}/\text{m}^3$ ; $\mu$ 为水在 24 ℃ 的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

对煤泥而言,结合该公式,将各参数取值为 $\delta = 1.5 \text{ t}/\text{m}^3$ , $\mu = 0.9142 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , $C_{iw} = 0.15$ (对于细粒煤泥采用低浓度入料以利于分级分选)。计算得: $C_{iv} = 0.123$ ; $\rho_m = 1.053 \text{ t}/\text{m}^3$ ; $\Delta P_m = 0.25 \text{ MPa}$ ; $\mu_m = 1.35 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ; $d_m = 38 \mu\text{m}$ 。综合可得 $D_j = 15.94 \text{ cm}$ 。

结合小锥角水力旋流器的型号规格,确定最佳直径为 150 mm。对临江选煤厂而言,在给料质量浓度 123 g/L,给料压力 0.25 MPa 的条件下,采用 $\phi 150 \text{ mm}$ 小锥角水力旋流器可脱除细粒级(-0.038 mm)和高灰非煤矿物(即溢流),实现煤泥分级

分选。

## 2.2 煤泥分级分选试验

试验采用某研究院自制小锥角水力旋流器组,规格有 $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$ 、 $\phi 25$ 、 $\phi 10$  mm五种,锥角均不大于 $7^\circ$ 。小锥角水力旋流器组主要结构参数见表3。

表3 小锥角水力旋流器组主要结构参数

旋流器 型号	给料压 力/MPa	底流口 直径/mm	分离粒 度/ $\mu\text{m}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	单处理量/ 度/mm	给料粒 度/mm
$\phi 150$ mm	0.25~0.50	14	38~74	12.5~15.0	$\leq 1.2$
$\phi 75$ mm	0.25~0.50	10	25~50	5.0~8.0	$\leq 0.8$
$\phi 50$ mm	0.15~0.30	6	10~30	2.5~4.0	$\leq 0.5$

考虑不同规格小锥角水力旋流器在生产中应用效果,试验重点考察 $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$  mm三种规格小锥角水力旋流器底流串联分级分选的降灰效果,根据试验效果指导选煤厂生产实践中小锥角水力旋流器型号规格的选择。

试验用干煤泥30 kg,给料质量浓度123 g/L,煤泥水经1 mm细筛隔粗。在理论计算基础上,根据文献[7-8]确定试验条件。调节变频器为40~45 Hz,使螺杆泵正常给料,将煤泥水回流循环至原浆桶,使煤泥水搅拌混匀。调节小锥角水力旋流器入料阀门开度,使其工作压力为0.25 MPa,将混匀后的煤泥水通过 $\phi 150$  mm小锥角水力旋流器,分别取样,完全接取底流、溢流;将 $\phi 150$  mm小锥角水力旋流器底流补水稀释至123 g/L后,再次在0.25 MPa压力下通过 $\phi 75$  mm小锥角水力旋流器,分别取样,完全接取底流、溢流;同样将 $\phi 75$  mm小锥角水力旋流器底流按原浓度在0.25 MPa压力下通过 $\phi 50$  mm小锥角水力旋流器,分别取样,完全接取底流、溢流,即实现三者串联。将通过 $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$  mm三种规格小锥角水力旋流器所得底流、溢流,分别在 $105^\circ\text{C}$ 烘干、制样,在实验室条件下测得各产品产率和灰分,具体见表4。

表4 小锥角水力旋流器底流、溢流产品性质

旋流器 型号	底流/%		溢流/%		溢流底流 灰分差/%
	产率	灰分	产率	灰分	
$\phi 150$ mm	69.07	30.83	31.93	47.91	17.08
$\phi 75$ mm	58.15	28.54	41.85	46.60	18.06
$\phi 50$ mm	81.70	25.61	18.30	41.61	16.00

注:底流、溢流产率均按占本级计

由表4可以看出,入浮煤泥经 $\phi 150$  mm小锥角水力旋流器分级分选后,其溢流、底流灰分相差17.08%。可见经小锥角水力旋流器的分级分选,底流和溢流产品灰分差较大,部分高灰非煤矿物在小锥角水力旋流器分选分级中通过溢流排出。

将 $\phi 150$  mm小锥角水力旋流器底流通过 $\phi 75$  mm小锥角水力旋流器进一步分级分选,其溢流、底流灰分相差18.06%。与单独通过 $\phi 150$  mm小锥角水力旋流器溢流、底流灰分差相比,略有增加,即在 $\phi 150$  mm底流中,仍有少量细粒高灰非煤矿物。

将 $\phi 75$  mm小锥角水力旋流器底流进一步通过 $\phi 50$  mm小锥角水力旋流器分级分选,其溢流、底流灰分相差16.00%,溢流灰分有下降趋势。与通过 $\phi 150$ 、 $\phi 75$  mm小锥角水力旋流器相比,溢流、底流灰分差减小,即通过 $\phi 150$  mm和 $\phi 75$  mm小锥角水力旋流器后,煤泥分级分选已比较充分。

综上所述,①采用同一规格小锥角水力旋流器分级分选,溢流灰分均高于底流灰分,即溢流为高灰矿物,这与入浮煤泥粒度组成中细粒级灰分偏高一致。② $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$  mm小锥角水力旋流器通过底流串联可实现底流连续降灰的效果。③同一规格小锥角水力旋流器的溢流、底流灰分差具有先增大后减小的趋势。经过连续分级分选后, $\phi 50$  mm小锥角水力旋流器的分级分选作用减弱,难分选出高灰非煤矿物,基于其口径小,处理量有限,故在选煤厂大规模生产中难以推广;而 $\phi 150$  mm小锥角水力旋流器或 $\phi 150$  mm与 $\phi 75$  mm小锥角水力旋流器串联使用可在选煤厂生产中应用。④经过 $\phi 150$  mm与 $\phi 75$  mm小锥角水力旋流器分级分选,其溢流量增加,但该部分灰分与中煤灰分相近,可经高效浓缩、压滤后作为中煤产品销售;也可经浮选柱或絮凝浮选分级回收极细粒低灰精煤<sup>[9-15]</sup>。

## 2.3 小锥角水力旋流器底流产品浮选试验

将 $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$  mm小锥角水力旋流器串联底流产品用XFD-1L浮选机进行浮选试验。浮选机主轴转速1850 r/min,煤浆质量分数20%,充气量 $0.2 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ,煤浆温度 $20^\circ\text{C}$ 。捕收剂用量900 g/t,捕收剂与起泡剂质量比9:1,刮板转速20 r/min,刮泡时间2 min,粗选与扫选时间间隔为1 min。小锥角水力旋流器底流浮选试验流程如图1所示。

在上述工艺流程及操作条件下,经一次粗选、一次扫选,可分别得 $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$  mm小锥角水力旋

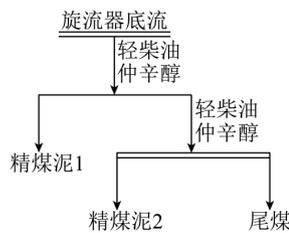


图1 小锥角水力旋流器底流浮选试验流程图  
 器串联底流浮选精煤泥1、精煤泥2、浮选尾煤。  
 小锥角水力旋流器底流浮选指标见表5。

表5 小锥角水力旋流器底流浮选指标

产品	φ150 mm		φ75 mm		φ50 mm	
	产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%
浮选入料	100.00	30.83	100.00	28.57	100.00	25.60
浮选精煤1	40.61	10.07	44.81	9.97	41.67	10.01
浮选精煤2	26.93	11.10	27.63	11.34	30.85	11.09
浮选尾煤	32.46	73.17	27.56	76.10	27.48	65.52
精煤合计	67.54	10.48	72.44	10.49	72.52	10.47

煤泥经实验室浮选后 φ150 mm 小锥角水力旋流器底流浮选可得合格精煤泥,占本级产率 67.54%,占全级产率 46.64%;再次经 φ75 mm 小锥角水力旋流器底流浮选可得合格精煤泥,占本级产率 72.44%,占全级产率 33.78%;通过 φ50 mm 小锥角水力旋流器底流浮选可得合格精煤泥,占本级产率 72.52%,占全级产率 24.50%。三者串联后,在合格精煤泥灰分内,底流煤泥中浮选精煤泥占本级产率逐渐增加,但占原煤泥全级产率逐渐减小。由此可见在多次小锥角水力旋流器预先抛尾中,有极细粒精煤流失现象;旋流器直径越小,其底流口直径越小,越易发生堵塞。因此使用 φ150 mm 小锥角水力旋流器最佳。

将原煤泥在同样流程和试验条件下直接进行浮选试验,浮选产品指标见表6。

表6 原煤泥直接浮选产品指标

产品	产率/%	灰分/%
浮选入料	100.00	36.11
浮选精煤1	21.62	15.68
浮选精煤2	19.00	17.45
浮选尾煤	59.38	49.52
精煤合计	40.62	16.51

由表6可知,原煤泥直接浮选的精煤灰分为 16.51%,高于预先抛尾后的浮选精煤灰分 10.48%。

由表5可知 φ150、φ75、φ50 mm 小锥角水力旋流器底流经一次粗选、一次扫选可得灰分低于 10.48% 的浮选精煤产率分别为 67.54%、72.44%、72.52%,三者浮选精煤均满足选煤厂售出精煤灰分要求;对应浮选尾煤灰分均高于 65%。通过小锥角水力旋流器预先抛尾工艺已脱除大部分高灰非煤矿物,使进入浮选系统的煤泥总灰分显著降低。通过小锥角水力旋流器底流串联工艺,可实现浮选煤泥的连续降灰。

通常将可燃体回收率和浮选完善指标作为选煤厂浮选工艺效果的评价指标。因此,将 φ150 mm 小锥角水力旋流器预先抛尾底流产品进入浮选与原煤泥直接进入浮选进行对比,具体见表7。

表7 预先抛尾与煤泥直接浮选指标对比

项目	φ150 mm		原煤泥	
	产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%
浮选入料	69.07	30.83	100	36.11
浮选精煤	46.65	10.48	40.62	16.50
浮选尾煤	22.42	73.17	59.38	49.52
可燃体回收率/%	60.37		53.09	
浮选完善指标/%	44.52		34.53	

注:φ150 mm 底流作为浮选入料以占原煤泥全级计

由表7可知,通过 φ150 mm 小锥角水力旋流器预先抛尾后,合格精煤泥产率(占全级)、可燃体回收率和浮选完善指标分别提高 6.03%、7.28% 和 9.99%。经 φ150 mm 小锥角水力旋流器预先抛尾后,入浮煤泥可浮性等级由难浮提至中等可浮。

### 3 工业应用

通化矿业(集团)有限责任公司临江选煤厂原为年处理量 90 万 t 的主焦煤选煤厂,后因井下煤炭赋存条件的改变,煤炭含矸率明显增加,且泥化现象突出,浮选处理量大幅增加,精煤产品指标不稳定,浮选

精煤灰分在 16% ~ 25% 频繁波动,产品也由主焦煤变为动力煤。

经技术检查和工艺试验,在浮选系统前增加  $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器预先抛尾工艺,即煤泥进入浮选煤浆预处理器前经  $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器预先抛尾,按其煤泥水量的 1.2 倍,安装  $\phi 150$  mm 型聚氨酯小锥角水力旋流器 4 组  $\times$  12 支。初步调试后,浮选入料灰分可控,浮选精煤泥产品灰分控制在 10% ~ 12%,减少了高灰非煤矿物进入浮选系统,降低了浮选系统处理量,浮选捕收剂用量也由 1.72 kg/t 降至 1.26 kg/t,起泡剂用量由 1.15 kg/t 降至 0.94 kg/t,降低了浮选成本。

#### 4 结 论

1) 对于临江选煤厂煤泥  $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器在给料质量分数 15%、给料压力 0.25 MPa 的条件下,可实现 0.038 mm 煤泥的初步分级分选。

2) 煤泥经  $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$  mm 小锥角水力旋流器底流串联预处理后,可实现连续降灰,但精煤泥占全级产率有所下降。与原煤泥直接浮选相比,煤泥经  $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器预先抛尾后,其合格精煤泥产率(占全级)、可燃体回收率和浮选完善指标分别提高 6.03%、7.28% 和 9.99%。入浮煤泥经小锥角水力旋流器预先抛尾工艺,可减少高灰非煤矿物进入浮选系统,有利于稳定浮选系统和产品指标,节约浮选药剂,降低浮选成本。

3)  $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器在通化矿业(集团)有限责任公司临江选煤厂的生产实践表明: $\phi 150$  mm 小锥角水力旋流器应用于选煤厂预先抛尾具有

可行性。

参考文献:

- [1] 宋振东,徐洪林.小直径水力旋流器与高岭土的超细分级[J].矿产保护与利用,1994(6):35-37.
- [2] 袁纳,陈强,李航.小口径水力旋流器在高岭土选矿中的应用[J].中国非金属矿工业导刊,2006(6):37-39.
- [3] 谢登峰.水力分级旋流器在我国选煤厂的应用范围及研究方向[J].煤炭加工与综合利用,2009(6):24-26.
- [4] 郭建新.煤伴生矿物的泥化对选煤厂设计的影响[J].洁净煤技术,2012,18(5):24-27.
- [5] 庞学诗.根据分级粒度计算水力旋流器直径的半经验算法[J].现代矿业,2010(7):46-47,117.
- [6] 庞学诗.水力旋流器技术与应用[M].北京:中国石化出版社,2011.
- [7] 任兰柱,周建军,崔凤禄,等.小直径水力旋流器的研制[J].洁净煤技术,2006,12(2):106-108,88.
- [8] 张乾伟,任瑞晨,李彩霞.从选钼尾矿中回收金云母试验研究[J].非金属矿,2013,36(2):72-74.
- [9] 王福元,吴正严.粉煤灰利用手册[M].2版.北京:中国电力出版社,2004.
- [10] 刘继霞,常胜,王伟,等.浮选尾煤中高附加值粗颗粒的回收研究[J].煤炭加工与综合利用,2008(1):4-6.
- [11] 付晓恒,单晓云,蒋和金,等.煤泥深度浮选技术的研究[J].煤炭学报,2006,31(1):90-93.
- [12] 刘均章,沙杰,宋景玲.基于旋流微泡浮选柱的高灰细泥浮选优化试验[J].洁净煤技术,2013,19(3):22-25.
- [13] 崔广文,王京发,杨硕,等.细粒难浮煤泥浮选试验研究[J].洁净煤技术,2013,19(6):1-4.
- [14] 桂夏辉.煤泥分选过程强化及两段式分选研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.
- [15] 刘莉君,刘炯天,袁闯,等.钱家营难选煤泥的分选技术研究[J].中国矿业,2010,19(8):72-75.

(上接第4页)

参考文献:

- [1] 庄金生.我国选煤技术现状与发展趋势[J].现代营销:学苑版,2012(8):261.
- [2] 杨丽.中国煤炭科技发展现状及展望[J].洁净煤技术,2012,18(3):1-3,32.
- [3] 刘炯天.关于我国煤炭能源低碳发展的思考[J].中国矿业大学学报:社会科学版,2011(1):5-12.
- [4] 彭陈辉.无烟煤配煤炼焦试验研究[J].煤化工,2005(6):47-50,53.
- [5] 陈文敏.洁净煤技术基础[M].北京:煤炭工业出版社,1997:12-20.
- [6] 姚昭章.炼焦学[M].3版.北京:冶金工业出版社,2005:67-69.
- [7] 卢凤莉,杨国要,王林缝,等.原煤混配洗选与炼焦的工业实践[J].河南冶金,2006,14(3):25-26.

- [8] 张振勇,李文华,徐振刚,等.煤的配合加工与利用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2002:99-100.
- [9] 赵龙,贾倩.选煤厂配煤入选的实践[J].洁净煤技术,2009,15(5):25-26,41.
- [10] 刘建知.利用Excel求解线性规划问题[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2005,31(5):562-564.
- [11] 陈晓玲.配煤线性规划模型的研究[J].煤炭加工与综合利用,2003(2):34-38.
- [12] GB/T 212—2008 煤的工业分析方法[S].
- [13] GB/T 478—2008 煤炭浮沉试验方法[S].
- [14] 徐四海,刘建军.持续改进配煤技术有效控制配煤成本[J].广东化工,2009,36(7):314-315,323.
- [15] 薛改凤,项茹,陈鹏,等.炼焦煤质量指标评价体系的研究[J].武汉科技大学学报,2009,32(1):36-40.
- [16] 张千宗.线性规划[M].武汉:武汉大学出版社,2004.
- [17] 邹进,吴杰,朱彤.煤中全水分的测定[J].洁净煤技术,2013,19(5):120-122.