

煤炭洁净燃烧

生物质与油页岩混合热解特性研究

田红,廖正祝

(广东石油化工学院 机电工程学院,广东 茂名 525000)

摘要:为了充分利用油页岩和生物质,以生物质和油页岩按照不同质量比的混合试样作为研究对象,采用TG-DSC联用技术进行了热重实验,分析了热解过程特性曲线并计算热解特性参数,采用差减微分法计算了热解动力学参数。结果表明:混合试样DTG曲线分别在低温段及高温段出现2个峰,前者主要是生物质的纤维素及半纤维素挥发分的热解析出,后者主要为油页岩热解析出挥发分;随混合试样中油页岩含量逐渐增多,热解后期逐渐出现因油页岩无机盐热分解吸热过多而出现DSC曲线吸热峰;混合试样低温段挥发分析出量及挥发分综合释放特性指数均大于高温段的值;生物质含量最高的混合试样(生物质与油页岩的质量比为4:1)的挥发分初始析出温度最低,其挥发分最大释放速度的峰值及挥发分综合释放特性指数均最大;生物质含量较多的混合试样低温段活化能大于高温段活化能的值,油页岩含量较多的混合试样低温段活化能低于高温段的值。

关键词:生物质;油页岩;热解;动力学;热重实验

中图分类号:TK6 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2015)03-0093-05

Pyrolysis characteristics of biomass and oil shale mixture

TIAN Hong, LIAO Zhengzhu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

Abstract: In order to make full use of oil shale and biomass, the thermogravimetry experiment of biomass and oil shale mixture was performed using the TG-DSC (Thermogravimetric-Differential Scanning Calorimetry) thermal analysis technology. The pyrolysis process characteristics curves was investigated, the pyrolysis characteristics parameters were figured out and the pyrolysis kinetic parameters were calculated using subtractive differential method. The results showed that the DTG curves of mixed sample appeared two peaks at low temperature section and high temperature section respectively, and the former was biomass cellulose and hemicellulose thermal desorption of volatiles and the latter was oil shale thermal desorption of volatile. With the oil shale content gradually increased in the mixture, it gradually appeared the upward DSC curve endothermic peak in the pyrolysis late, because of the absorption excessive calorie of thermal decomposition of oil shale mineral. The value of devolatilisation of volatile and comprehensive release characteristics index of volatile of mixed sample in the low-temperature phase were all greater than the value at high-temperature phase. Initial precipitation temperature of high volatile content of biomass mixed sample in which the mass ratio of biomass and oil shale was 4 to 1 had the lowest temperature, and its maximum of release rate peak values of volatile and the comprehensive release characteristics index of volatile of mixed sample were all the maximum. With the more biomass content of mixed sample, the activation energy value of mixed samples in the low-temperature phase was greater than the value at the high-temperature phase. With the more oil shale content of mixed sample, the activation energy values of mixed samples at the low-temperature phase was lower than value at the high-temperature phase. The research results provided a theoretical reference for the mixture of oil shale and biomass to pyrolysis gas or liquid fuel.

Key words: biomass; oil shale; pyrolysis; kinetics; thermogravimetry experiment

收稿日期:2015-01-05;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.03.024

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(S2012010010448);广东省科技计划资助项目(2011B030900011);广东石油化工学院博士启动资助项目(512119)

作者简介:田红(1969—),男,四川自贡人,副教授,博士,主要从事燃料的燃烧及生物质资源化利用的研究。E-mail:honger8008@126.com

引用格式:田红,廖正祝.生物质与油页岩混合热解特性研究[J].洁净煤技术,2015,21(3):93-97,50.

TIAN Hong, LIAO Zhengzhu. Pyrolysis characteristics of biomass and oil shale mixture[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 93-97, 50.

0 引言

生物质是世界未来能源的重要组成部分,我国具有十分丰富的生物质资源^[1]。惠世恩等^[2]对玉米秸秆进行了热解实验研究指出,随着升温速率增加,样品的失重曲线向高温侧移动。刘耀鑫等^[3]对玉米秸秆热解制取生物油实验的研究指出,玉米秸秆热解液体产率随温度的升高先增加后减小。刘耀鑫等^[4]研究指出,少量加入 CaCl_2 对稻壳热解焦炭产物的生成有促进作用。李建新等^[5]研究指出大物料热重的反应时间短,且各个阶段反应相互叠加,DTG 曲线出现多个峰值。生物质的能源化利用,可以缓解因大量燃烧化石能源而带来的硫化物、氮氧化物等所造成的环境污染^[6-8]。生物质热裂解生成的生物油液体燃料存在水分及氧含量高的特性,导致其稳定性差且热值低,使其在现有燃烧设备上难以大规模直接利用^[9-10]。世界油页岩折算成页岩油的量远超过了石油资源量^[11]。油页岩作为一种非常规的替代能源,具有广阔的应用前景^[12]。油页岩目前的主要应用是燃烧发电、供热以及干馏炼制页岩油^[13-14],但是,由于油页岩燃烧发电和干馏炼油的剩余残渣中残留有害物质,将对环境产生破坏^[15],存在干馏残渣难以处理等问题,但如果能够

将油页岩与生物质混合热解制取气体或液体燃料,这或许可同时充分发挥 2 种物质的利用价值,并减少对环境的危害。至今鲜有文献对油页岩与生物质混合样品进行热解特性的研究,笔者以农业生物质与油页岩的混合试样作为研究对象,并采用 TG-DSC 联用技术进行热重实验,分析其热解特性曲线,计算热解特性参数,并采用差减微分法计算热解动力学参数,研究结果可为生物质与油页岩混合热解的能源化利用提供理论参考。

1 实验

1.1 实验样品

实验所用农业生物质为玉米秆、稻草及龙眼枝按质量比为 1 : 1 : 1 的混合生物质,3 种生物质均采自粤西地区,油页岩采自广东茂名。各试样通过磨煤机研磨后经过筛分离,得到粒度小于 0.074 mm 的试样,然后放在恒温干燥箱中,在 378 K 下干燥 2 h,取出放入干燥器皿中冷却之后装入密封袋备用。样品的工业分析和元素分析见表 1。S1、S7 分别为生物质和油页岩试样,S2、S3、S4、S5 及 S6 分别表示生物质与油页岩的质量比分别是 4 : 1、3 : 2、2 : 2、2 : 3、1 : 4 的混合样品。

表 1 样品的工业分析及元素分析

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	M_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	A_{ad}	$w(\text{C}_{\text{ad}})$	$w(\text{H}_{\text{ad}})$	$w(\text{O}_{\text{ad}})$	$w(\text{N}_{\text{ad}})$	$w(\text{S}_{\text{ad}})$	
生物质	7.81	72.05	12.36	7.78	42.58	5.34	35.42	0.83	0.24	15.82
油页岩	2.51	23.76	4.49	69.24	14.64	2.37	10.15	0.49	0.6	4.84

1.2 实验设备及实验方法

实验采用 NETZSCH 公司 STA409PC 的热分析仪,该仪器可以进行 TG、DTG 以及 DSC 同步热分析。实验气氛采用氮气,气体流量为 80 mL/min,升温速率为 20 K/min,从室温开始升温,终止温度为 1173 K,实验样品质量约为 10 mg。

2 实验结果与分析

2.1 热解特性曲线分析

图 1 为生物质 S1 及油页岩 S7 的热解特性曲线,图 2 分别为试样 S2、S3、S4、S5 及 S6 热解特性曲线。

由图 1a 可知,试样 S1 的 DTG 特性曲线只出

现一个峰(峰值温度为 329 °C,热解速度最大值为 14.02%/min),主要是因混合生物质中的半纤维素及纤维素的热解共同合并为一个光滑的 DTG 峰,其主要产物为挥发分气体;此后的 TG 和 DTG 曲线的变化较为平缓,主要是剩余木质素的缓慢热解生成焦炭的过程;DSC 曲线表明在 540 ~ 800 °C 出现一个略为向上的吸热峰,表明该生物质剩余木质素的热解是吸热的。从图 1b 可知,油页岩 S7 的热解 DTG 峰值出现在 465 °C 处,此处表明是油页岩挥发分大量析出且热解速度达到最大值,其 DSC 曲线在 560 ~ 800 °C 出现一个明显向上的吸热峰,主要是因为油页岩无机盐高温吸热分解的缘故。

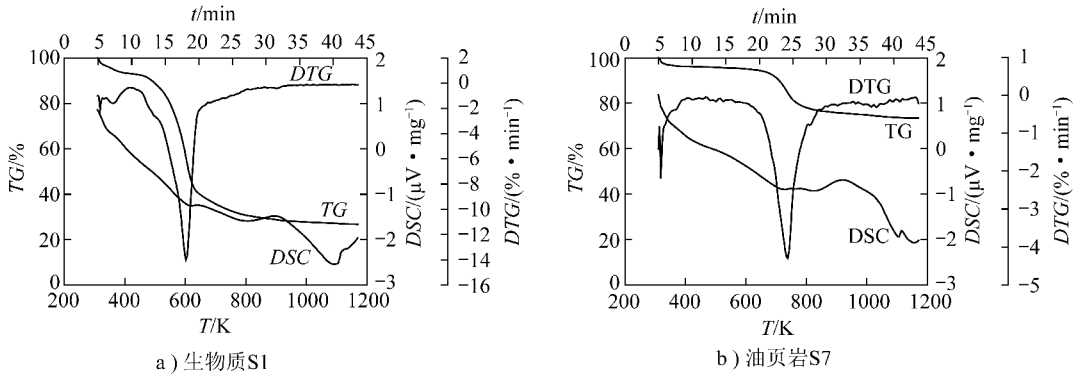


图1 生物质 S1 和油页岩 S7 热解特性曲线

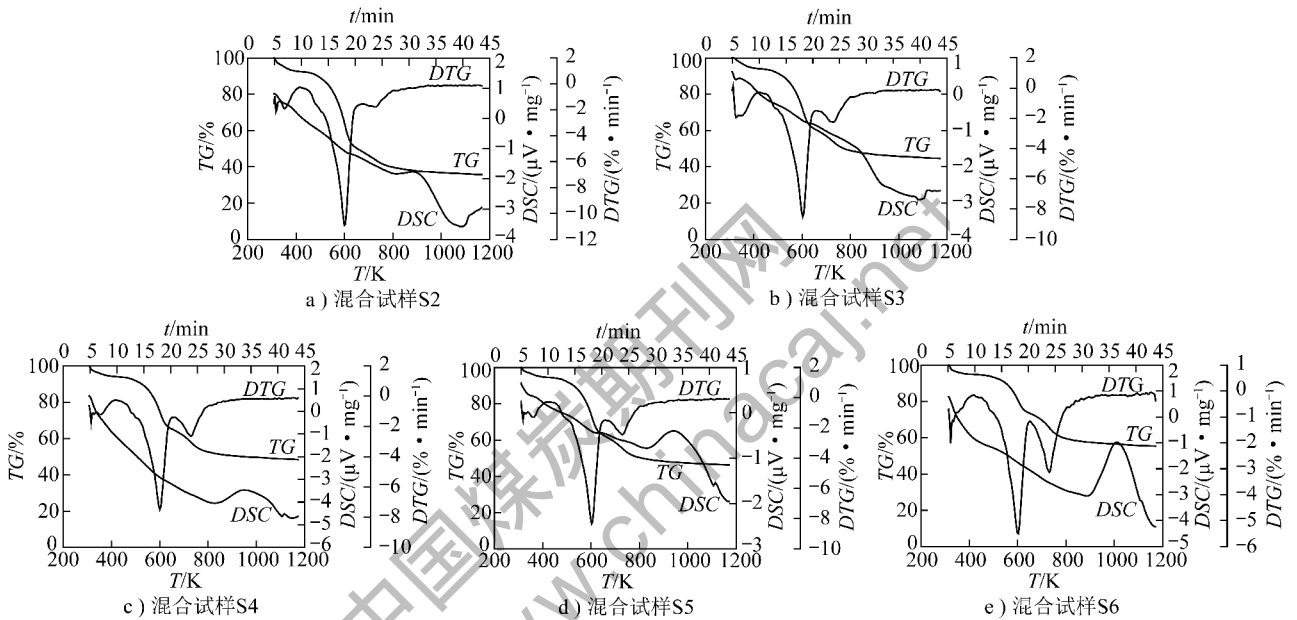


图2 混合试样热解特性曲线

由于生物质半纤维素及纤维素的热解挥发分的析出温度低于油页岩挥发分的热解析出温度,因此,混合试样图2的特性曲线均出现2个DTG峰值,第1峰值温度约为330℃,从S2至S6的质量变化分别约为44%、34%、32%、32%及23%,质量的损失主要为混合试样中生物质半纤维素及纤维素的热解挥发分的析出所致。第2峰值温度约为457℃,S2至S6的质量变化分别约为7%、13%、8%、12%及25%,主要为油页岩挥发分热解析出缘故,少部分是剩余木质素的热解生成焦炭的影响。可见,随着混合试样中生物质含量逐渐减少,油页岩含量逐渐增多,第1峰值逐渐减弱且其质量变化量逐渐降低,而第2峰逐渐明显且其质量变化量逐渐增加。热解后期,混合试样随着油页岩含量的增多,油页岩无机盐在高温段的高温热分解吸收热量相对较多,故出现明显向上的DSC吸热峰。

2.2 热解特性参数分析

热解特性参数的分析主要是研究试样热解时挥发分析出难易程度及析出量的多少,本文采用文献[16-17]提出的挥发分综合释放特性指数 D 来分析试样挥发分析出的难易程度,计算式见公式(1)。对于试样有多个热解阶段的,则分别求各阶段挥发分的综合释放特性指数 D_i , β_i 为第 i 阶段热解的失重量占其总失重量的百分比,并通过式(2)来计算试样总的挥发分综合释放特性指数 D 。

$$D = \frac{(dw/dt)_{\max} (dw/dt)_{\text{mean}}}{T_s T_{\max} \Delta T_{1/2}} \quad (1)$$

$$D = \sum_i \beta_i D_i \quad (2)$$

式中, $(dw/dt)_{\max}$ 为挥发分最大释放速度的峰值, $\%/min$,其对应峰值温度为 T_{\max} , $^{\circ}C$; $(dw/dt)_{\text{mean}}$ 为挥发分的平均释放速度, $\%/min$; T_s 为挥发分的初始释放温度, $^{\circ}C$; $\Delta T_{1/2}$ 为挥发分的

热解释放速度达到最大速度峰值的一半时所对应的温度区间,即 $(dw/dt)/(dw/dt)_{\max} = 1/2$ 时的

半峰宽度, $^{\circ}\text{C}$ 。

各试样热解特性参数见表2。

表2 试样热解特性参数

试样	$T_s/^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{1/2}/^{\circ}\text{C}$	$(dw/dt)_{\max}/$ $(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$(dw/dt)_{\text{mean}}/$ $(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$D_i/$ $(10^{-5}\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-3} \cdot \text{min}^{-2})$	$\beta_i/\%$	$D/$ $(10^{-5}\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-3} \cdot \text{min}^{-2})$
S1	207	329	52	14.02	5.48			2.17
S2	199	331	43	10.95	4.33	1.67	60.46	1.02
	409	457	28	1.79	1.55	0.05	11.88	
S3	215	330	42	8.52	4.60	1.32	55.47	0.74
	387	457	35	2.27	1.57	0.06	20.44	
S4	244	327	40	7.48	3.69	0.86	50.25	0.45
	390	457	34	2.63	1.76	0.08	22.74	
S5	219	330	42	8.34	4.44	1.22	52.86	0.66
	386	456	30	2.45	1.71	0.08	21.83	
S6	279	328	41	5.53	3.21	0.47	46.45	0.24
	378	458	40	3.14	1.75	0.08	32.13	
S7	443	465	38.5	4.31	1.45			0.0788

由表2可知,生物质挥发分最大释放速度的峰值及挥发分综合释放特性指数均大于油页岩的相应值,且生物质的挥发分初始析出温度小于油页岩的值,故生物质较油页岩易于热解析出挥发分。

混合试样分低温段和高温段2个主要的热解阶段,在低温段主要为生物质纤维素与半纤维素的热解析出挥发分过程,高温段是油页岩热解析出挥发分;低温段半峰温度宽度 $\Delta T_{1/2}$ 大于高温段的值,说明低温段混合试样中挥发分热解析出的范围较宽,挥发分释放不集中;低温段挥发分热解失重量所占比例 β_i 高于高温段的值,说明低温段挥发分析出量大于高温段的值;低温段挥发分综合释放特性指数 D 大于高温段的值,表明低温段混合试样中挥发分较高温段混合试样挥发分易于析出。生物质含量最高的混合试样 S2 最容易热解,其挥发分初始析出温度最低,挥发分最大释放速度的峰值最大,且挥发分综合释放特性指数最大,热解反应更容易进行。混合试样的挥发分综合释放特性指数的大小顺序是 $D(S2) > D(S3) > D(S5) > D(S4) > D(S6)$ 。

3 热解动力学分析

3.1 热解动力学计算

各混合热解试样均出现2个DTG峰,表明整个

混合试样热解失重反应分为2个不同温度区域的阶段,因此,需要针对DTG峰位于不同温度区段,分段进行动力学参数计算,且其计算结果是混合试样在不同的温度区间热解特性的综合体现。

试样热解反应动力学参数的计算采用差减微分法的Freeman-Carroll^[18-19]来计算,该方法可用一条热重曲线来求解动力学参数,适于直接测定因质量发生的变化及其变化率的热分解反应。试样采用升温速率为20 K/min的非等温的热重实验,可采用微分法来计算动力学的参数,计算公式如下

$$d\alpha/d\tau = Ae^{-E/RT}(1-\alpha)^n \quad (3)$$

式中, α 为试样的热分解变化率(失重率),%; A 为频率因子, min^{-1} ; E 为活化能, kJ/mol ; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为热力学温度, K 。

对方程(3)两边取对数,对 $d\alpha/d\tau, 1-\alpha, T$ 进行微分,并以差减形式 Δ 表示可得下式:

$$\frac{\Delta \lg(d\alpha/d\tau)}{\Delta \lg(1-\alpha)} = -\frac{E}{2.303R} \cdot \frac{\Delta(1/T)}{\Delta \lg(1-\alpha)} + n \quad (4)$$

对等式(4)左边的 $(\Delta \lg(d\alpha/d\tau))/(\Delta \lg(1-\alpha))$ 与右边的 $(\Delta(1/T))/(\Delta \lg(1-\alpha))$ 作图为一一直线,其斜率为 $-E/(2.303R)$,其截距为反应级数 n ,将得到的活化能 E 和反应级数 n 带入方程(3)可得频率因子 A 。样品的热解动力学参数参见表3, r 是线性相关系数。

表3 试样热解动力学参数

试样	T/K	$E/(kJ \cdot mol^{-1})$	n	A/min^{-1}	r
S1	473 ~ 673	57.4050	1.0709	2.4803×10^4	0.9896
S2	473 ~ 680	53.7211	0.5018	6.1120×10^3	0.9767
	680 ~ 823	26.9533	0.9905	3.4573	0.9809
S3	473 ~ 660	63.2162	1.5844	5.0957×10^5	0.9779
	660 ~ 823	44.1782	0.5329	4.5056×10	0.9400
S4	473 ~ 663	54.1060	1.1356	5.3180×10^3	0.9619
	663 ~ 823	69.9272	0.4010	1.4330×10^3	0.9745
S5	473 ~ 659	52.4823	0.7896	3.7520×10^3	0.9873
	659 ~ 873	53.0338	1.5872	3.9169×10^2	0.9991
S6	473 ~ 651	55.5401	0.7661	4.4502×10^3	0.9942
	651 ~ 833	58.1288	1.6690	8.9793×10^2	0.9843
S7	573 ~ 873	110.8887	1.3287	3.8281×10^6	0.9993

3.2 热解动力学结果分析

从表3可知,采用最小二乘法对实验数据进行直线拟合得到的线性相关系数 r 值均相对较高,故其线性回归是合理的,因此,所采用模型的计算结果是可靠的。样品S2和S3在低温段的活化能值高于高温段的活化能值,这主要因为混合样品中的生物质半纤维素及纤维素在低温段热解析出挥发分,且S2及S3中的生物质含量相对较高,热解析出挥发分所需热量较多,故其热解所需活化能较高,而高温段主要为少量油页岩的热解析出挥发分所需热量较少,故其活化能较低。油页岩量较多的混合试样S4、S5及S6在高温段活化能大于低温段活化能,这主要是因为高温段大量的油页岩热解析出挥发分所需热量较多的缘故。

4 结 论

1)混合试样DTG曲线分别出现低温段和高温段的2个峰,第1峰主要是试样中生物质半纤维素及纤维素的热解析出挥发分的过程,第2峰主要是油页岩热解析出挥发分的缘故;随混合试样中油页岩含量逐渐增多,油页岩无机盐在高温段热分解吸热量相对较多,故热解后期DSC曲线逐渐出现明显的吸热峰。

2)混合试样在低温段热解析出挥发分的范围较宽,挥发分释放不集中,低温段挥发分析出量大于高温段的值,且低温段挥发分综合释放特性指数 D 大于高温段的值;生物质含量最高的试样S2的挥发分初始析出温度最低,其挥发分最大释放速度的峰

值最大,且其挥发分综合释放特性指数也最大。混合试样的挥发分综合释放特性指数的大小顺序是 $D(S2) > D(S3) > D(S5) > D(S4) > D(S6)$ 。

3)生物质含量较多的混合试样S2及S3,其低温段活化能大于高温段活化能值;油页岩含量相对较多的试样S4、S5及S6,其高温段活化能值大于低温段活化能的值。

参考文献:

- [1] 袁振宏,吴创之,马隆龙,等. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:1-32.
- [2] 惠世恩,梁 凌,范庆伟,等. 玉米秸秆热解特性的实验研究及动力学分析[J]. 热力发电,2014,43(4):69-75.
- [3] 刘耀鑫,陈 炜,蔡文娟. 玉米秸秆热解制取生物油试验研究[J]. 热力发电,2011,40(9):9-13.
- [4] 刘耀鑫,陈 炜,蔡文娟. 稻壳催化热解特性及动力学研究[J]. 热力发电,2011,40(4):53-56.
- [5] 李建新,张剑波,郑 皎,等. 秸秆快速热解动力学特性研究[J]. 热力发电,2012,41(2):27-31.
- [6] 朱 波,王贤华,杨海平,等. 农业秸秆烘焙热分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(20):121-126.
- [7] 邓 剑,罗永浩,王贵军,等. 稻秆的烘焙预处理及其固体产物的气化反应性能[J]. 燃料化学学报,2011,39(1):26-32.
- [8] 李诗媛,吕清刚,王东宇,等. 生物质直燃循环流化床发电锅炉设计准则和运行分析[J]. 可再生能源,2012,30(12):96-100.
- [9] Pootakham T, Kumar A. A comparison of pipeline versus truck transport of bio-oil [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(1): 414-421.
- [10] Chiramonti D, Oasmaa A, Solantausta Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6): 1056-1086.

(下转第50页)

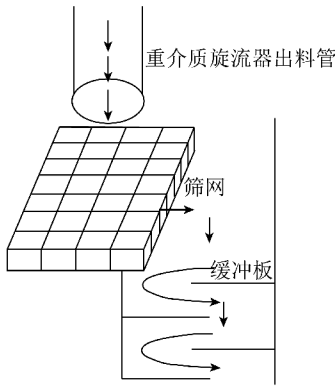


图1 重介质旋流器方箱改造示意

制度。对入厂的磁铁矿粉进行化验,要求厂家提供磁铁矿粉严格执行以下质量标准:磁性物含量 $\geq 95\%$,真密度 $\geq 4.5 \text{ g/cm}^3$,分选块煤 $< 0.074 \text{ mm}$ 含量 $\geq 80\%$,分选末煤 $< 0.044 \text{ mm}$ 含量 $\geq 90\%$,磁铁矿粉水分 $\leq 6\%$ ^[15]。对于入厂磁铁矿粉的质量检验情况,及时反馈给厂家,从根本上保证入厂的磁铁矿粉质量,保证悬浮液稳定性,从而保证分选效果。

3 效益分析

改造后,长平选煤厂末煤系统介质流通环节得以优化,生产运行更平稳,介质堵、漏事故可能性降低,末煤系统运转效率大幅提高,分选产品指标明显改善,介耗降至 1.5 kg/t 。按全年生产末精煤 135 万 t ,入选末原煤 182 万 t 计算,改造前介耗为 3640 t/a ,改造后节约介质 910 t/a ,介质价格按照 990 元/t 计算,全年可节约介质 90.09 万元 。

4 结 语

介耗是重介质选煤厂重要的材料消耗,也是评价选煤厂工艺与管理先进与否的重要指标。长平选煤厂以介质流通各环节为基础,从介质的技术耗损和管理耗损2方面对介耗高的原因进行分析,通过改造末煤系统脱介筛、重介质旋流器方箱和介质添加系统,加强磁铁矿粉管理等措施,使长平选煤厂末煤介耗由 2.0 kg/t 降至 1.5 kg/t ,增加了经济效益,同时也为采用重介质旋流器分选末煤的选煤厂改造提供参考。

参考文献:

[1] 张信龙,庞鼎峰,侯晋兵,等.长平矿选煤厂的设计特点[J].洁净煤技术,2013,19(1):16-20.
[2] 金家树.重介选煤厂降低介耗评析[J].华东科技:学术版,2014(2):396.

[3] 尹刚,范秋香.重介选煤降低介耗技术[J].山东工业科技,2013(5):124,151.
[4] 史振国.荣华一矿选煤厂降低介耗的措施[J].中国科技博览,2014(7):383.
[5] 宁建军.重介选煤厂降低介耗的措施[J].洁净煤技术,2013,19(3):30-33.
[6] 黄玉祥.重介质旋流器选煤降低介耗的途径[J].煤炭技术,2010,29(8):110-111.
[7] 刘俊平.降低重介质选煤过程中介质消耗的探讨与实践[J].煤,2008(10):89-91.
[8] 陶东.不连沟选煤厂降低介耗的措施[J].洁净煤技术,2012,18(2):20-22.
[9] 鲁和德,瞿涛,李炳才,等.梁北选煤厂降低介耗途径研究[J].洁净煤技术,2012,18(1):13-15,22.
[10] 牛宏远.降低介质消耗的技术途径[J].煤炭技术,2006,25(4):89-91.
[11] 冉银华.降低重介质选煤介耗的探讨[J].煤炭加工与综合利用,2007(2):16-18.
[12] 任景龙.完善重介系统降低介质消耗[J].洁净煤技术,2010,16(4):15-16,22.
[13] 李彪.重介选煤厂降低介耗的探讨[J].现代矿业,2009(3):109-111.
[14] 解晓霞,逯振海.降低选煤厂介耗的有效途径[J].应用能源技术,2006(2):9-10.
[15] 王春华.重介选煤降低介耗问题的探讨[J].选煤技术,2004(2):43-44.

(上接第97页)

[11] 李术元,马跃,钱家麟.世界油页岩研究开发利用现状;并记2011年国内外三次油页岩会议[J].中外能源,2012,17(2):8-17.
[12] 叶吉文,杨洋,徐明珠.油页岩资源利用与发展前景[J].中国资源综合利用,2010,28(6):21-23.
[13] Shabbar Syed, Rana Qudaih, Ilham Talab, et al. Kinetics of pyrolysis and combustion of oil shale sample from thermogravimetric data[J]. Fuel, 2011, 90(4):1631-1637.
[14] Marco Aurélio Bazelatto Zanoni, Henrique Massard, Márcio Ferreira Martins. Formulating and optimizing a combustion pathways for oil shale and its semi-coke[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(10):3224-3234.
[15] 张立栋,刘洪鹏,贾春霞,等.我国油页岩综合利用相关研究进展[J].化工进展,2012,31(11):2359-2363.
[16] 陈晓平,顾利锋,韩晓强,等.污泥及其与煤混合物的热解特性和灰熔融特性[J].东南大学学报:自然科学版,2008,38(6):1038-1043.
[17] 刘翔,陈梅倩,余冬,等.草本类生物质与烟煤混烧特性及其影响因素分析[J].农业工程学报,2012,28(21):200-207.
[18] 沈兴.差热、热重分析与非等温固相反应动力学[M].北京:冶金工业出版社,1995:100-131.
[19] 李余增.热分析[M].北京:清华大学出版社,1987:74-100.