

# 半焦与城市污泥混合物的燃烧性能研究\*

马淞江<sup>1</sup> 张仲欢<sup>1#</sup> 王 劲<sup>2</sup> 戴财胜<sup>1</sup> 徐 欢<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学化学化工学院,湖南 湘潭 411201;2.株洲市城市污水处理管理处,湖南 株洲 412000)

**摘要** 采用热重分析法研究了半焦与城市污泥混合物的燃烧性能,揭示了半焦添加量对城市污泥燃烧性能的影响规律,为基于半焦的污泥调质与机械脱水污泥的高效能源化利用提供理论支持与依据。结果表明:城市污泥的着火温度低,容易燃烧,但其灰分高,燃烧速率慢,燃烧性能差;云南褐煤热解半焦的着火温度比城市污泥高,着火相对困难,但其燃烧速率快,燃烧性能好;随半焦配比的增大,半焦与城市污泥混合物的燃烧性能变好,说明半焦能改善城市污泥的燃烧性能,当半焦配比大于40%(质量分数)时,半焦与城市污泥混合物的微商热重曲线呈单峰,有较好的燃烧性能。

**关键词** 半焦 城市污泥 燃烧性能

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2016.05.005

**Study on combustion performance of semi-coke and municipal sludge mixture** MA Songjiang<sup>1</sup>, ZHANG Zhonghuan<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>2</sup>, DAI Caisheng<sup>1</sup>, XU Huan<sup>1</sup>. (1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201; 2. Zhuzhou Municipal Sewage Treatment Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412000)

**Abstract:** In order to reveal the effect of semi-coke addition on the combustion characteristics of municipal sludge, the combustion performance of semi-coke and municipal sludge mixture had been investigated by thermogravimetric analysis, which provided theoretical support and possibility for the efficient utilization of municipal sludge conditioned by semi-coke. The results showed that municipal sludge had lower ignition temperature, and were easy to burn. However, the burning velocity and combustion performance of municipal sludge was poor because of its high ash content. The ignition temperature of semi-coke which derived from pyrolysis of Yunnan lignite was higher than that of municipal sludge, but its combustion velocity was high and the comprehensive combustion performance of semi-coke was better. The combustion performance of semi-coke and municipal sludge mixture became better with the increase of the ratio of semi-coke, which suggested that the combustion performance of municipal sludge could be improved by semi-coke. When the mass ratio of semi-coke greater than 40%, the combustion fingerprint curve of the mixture displayed a single peak, which indicated that it had better combustion performance.

**Keywords:** semi-coke; municipal sludge; combustion performance

近年来,许多国内外学者对城市污泥资源化利用进行了较多的研究。在国外,污泥资源化利用的方法有污泥发酵产沼气发电、污泥焚烧发电、污泥制氢等<sup>[1-4]</sup>。在国内,一些学者在污泥制作建材、能源利用、制备吸附材料、土地利用、制备微生物絮凝剂等方面取得了可喜成果<sup>[5-7]</sup>,但绝大多数污泥资源化利用的研究成果还停留在实验室阶段,不能产业化应用,其具有共性的关键问题在于污泥经机械脱水后的水分(80%左右)依然很高,不能满足污泥资源化对其水分的要求,阻碍了污泥资源化利用的产业化实施。因此,如何有效提高污泥脱水性能,使污泥水分满足资源化利用要求,成为当前急需解决的关

键科学问题。

半焦是低阶煤在温和热解条件下产生的固体产物<sup>[8]</sup>,具有发达的孔隙结构和强的吸附性能,有极强的疏水性能,而且热值高,有良好的反应性能。本课题组在污泥脱水与资源化利用研究中发现,以半焦作调理剂对污泥进行调质与机械脱水,不仅能大大降低污泥比阻,显著改善污泥的脱水性能,使浓缩污泥的含水率由98%左右降到90%以下,污泥机械脱水泥饼含水率由80%左右降低到50%以下,污泥热值由8.372 MJ/kg提高到18.837 MJ/kg,为污泥作为能源利用的产业化创造了条件<sup>[9-10]</sup>,但半焦与城市污泥混合物的燃烧性能尚需要探索。本研究用热

第一作者:马淞江,男,1962年生,本科,教授,研究方向为水处理及固体废弃物资源化。# 通讯作者。

\* 国家自然科学基金资助项目(No.51478182);国际科技合作与交流专项(No.2013DFG60060)。

表 1 半焦和城市污泥的工业分析及元素分析<sup>1)</sup>  
Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of semi-coke and municipal sludge

样品	工业分析/%				$Q_{\text{net,ad}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	元素分析/%				
	$M_{\text{ad}}$	$V_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$\text{FC}_{\text{ad}}$		$C_{\text{ad}}$	$H_{\text{ad}}$	$O_{\text{ad}}$	$N_{\text{ad}}$	$S_{\text{t,ad}}$
半焦	7.28	8.55	16.39	67.78	24.88	69.94	1.57	2.42	2.02	0.38
城市污泥	6.54	28.92	60.26	4.28	7.96	22.64	2.12	5.23	2.70	0.52

注: <sup>1)</sup>  $M_{\text{ad}}$  为空气干燥基水分,  $V_{\text{ad}}$  为空气干燥基挥发分,  $A_{\text{ad}}$  为空气干燥基灰分,  $\text{FC}_{\text{ad}}$  为空气干燥基固定碳, 均以质量分数计;  $Q_{\text{net,ad}}$  为空气干燥基低位发热量;  $C_{\text{ad}}$ 、 $H_{\text{ad}}$ 、 $O_{\text{ad}}$ 、 $N_{\text{ad}}$  为空气干燥基下的 C、H、O、N 元素的质量分数,  $S_{\text{t,ad}}$  为空气干燥基全硫的质量分数。

重分析法研究了云南褐煤热解半焦与城市污泥混合物的燃烧性能, 为基于半焦的污泥调质与机械脱水污泥的能源化利用提供理论支持与依据。

## 1 实验

### 1.1 实验样品

半焦: 云南褐煤在 700 °C 下热解 1.5 h 得到的固态产物; 城市污泥: 湘潭市某污水处理厂的剩余污泥, 其含水率为 98.8%, 其粒径为 1~144  $\mu\text{m}$ , 平均粒径为 29.20  $\mu\text{m}$ , 将其在 104 °C 下干燥 48 h 得到干污泥, 供实验用。半焦和城市污泥的工业分析及元素分析见表 1。

### 1.2 半焦/城市污泥燃烧性能的实验方法

采用德国耐弛公司生产的 STA449F3 型热分析仪对半焦/城市污泥进行燃烧性能测试, 选用高温炉。测试环境: 保护气体为  $\text{N}_2$ , 流量为 20 mL/min; 吹扫气为纯氧, 流量为 60 mL/min; K 型 TG-DSC 支架, 氧化铝坩埚。样品质量为  $(9.0 \pm 0.1)$  mg, 粒径  $< 0.075$  mm, 测试温度为室温 (25 °C) 至 800 °C, 升温速率为 10 °C/min。

### 1.3 半焦/城市污泥燃烧性能表征方法

根据燃料燃烧反应的热重 (TG) 曲线, 可得到反映燃料燃烧性能的特征点, 包括着火点、燃点点和最大失重速率点。各特征点对应的温度、失重速率被称为热重特征值。特征值可以反映燃料的燃烧性能, 也可以作为原始数据用来计算评价燃烧特性的各种参数。本研究选取具有代表性的着火温度 ( $t_s$ , °C)、峰值温度 ( $t_m$ , °C)、燃点温度 ( $t_c$ , °C)、峰宽 ( $H_w$ , °C)、燃烧时间 ( $T$ , min)、最大燃烧速率  $((dw/dt)_{\text{max}}$ , mg/min)、平均燃烧速率  $((dw/dt)_{\text{mean}}$ , mg/min) 等特征值, 并计算综合燃烧特性指数 ( $S$ ,  $\text{mg}^2/(\text{min}^2 \cdot \text{C}^3)$ ) 以及活化能 ( $E$ , kJ/mol) 来表征半焦/城市污泥的燃烧性能。

$t_s$  选常用的热重-微商热重法 (TG-DTG 法)<sup>[11-12]</sup> 定义。 $t_s$  越高, 说明样品着火越困难, 燃烧性能越差。

$t_m$  为微商热重 (DTG) 曲线上最大燃烧速率所对应的温度。 $t_m$  越大, 说明燃烧反应最剧烈的时候所对应的温度越高, 反应越不容易进行, 燃烧性能越差。

$t_c$  为样品燃烧 98% 可燃质时的温度<sup>[13]</sup>。

$S$  反映燃料的综合燃烧特性。 $S$  越大, 表示燃料的综合燃烧性能越好<sup>[14]</sup>。一般来说, 由褐煤到无烟煤, 随着煤阶的提高, 煤的着火与燃点逐渐变难,  $S$  逐渐减小。该指数表达式为:

$$S = \frac{(dw/dt)_{\text{max}} \times (dw/dt)_{\text{mean}}}{t_s^2 \times t_c} \quad (1)$$

$E$  的计算方法有单个扫描速率法和多重扫描速率法两种。单个扫描速率法多采用 Coats-Redfern 法<sup>[15]</sup> 进行燃烧动力学分析, 按 DTG 曲线的峰型分段计算。本研究采用 Coats-Redfern 法计算  $E$ , 假设各试样各段燃烧反应均为一级反应, 分段计算各试样的  $E$ , 该值越小, 说明反应越容易进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 半焦与城市污泥燃烧性能的对比如分析

在相同的燃烧工况条件下, 燃料的 DTG 曲线相同, 则其燃烧性能相似<sup>[16]</sup>。半焦和城市污泥燃烧的 TG-DTG 曲线分别见图 1、图 2。

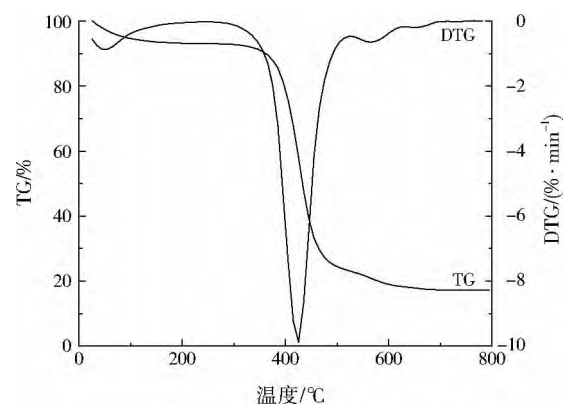


图 1 半焦燃烧的 TG-DTG 曲线

Fig.1 TG-DTG curves of municipal semi-coke

分析 DTG 曲线的形态, 半焦与城市污泥燃烧的 DTG 曲线在室温至 200 °C 为样品的失水过程, 随后是样品的燃烧过程。不考虑失水的情况下, 半

焦与城市污泥的 DTG 曲线都呈单峰,但曲线的特征值( $t_m$ 、 $H_w$ 等)存在显著差异,因而半焦与城市污泥的燃烧性能有显著差异。与半焦相比,城市污泥 DTG 曲线的  $H_w$ 、 $t_c$  高,因而,城市污泥的燃烧性能比半焦的燃烧性能差。

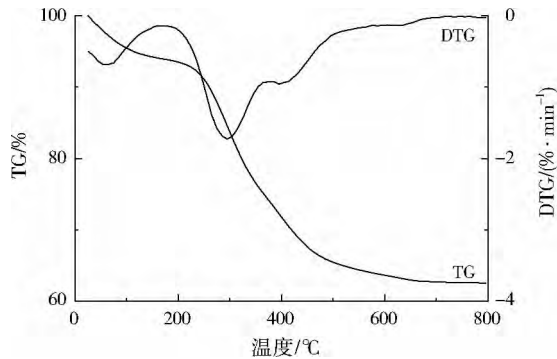


图 2 城市污泥燃烧的 TG-DTG 曲线  
Fig.2 TG-DTG curves of municipal sludge

半焦和城市污泥的燃烧特征值如表 2 所示。由表 2 可知,半焦的  $t_s$  和  $t_m$  分别为 394、422 °C,与相同煤质参数的煤炭相比,半焦均要低很多<sup>[17]</sup>,且燃烧速率快,说明半焦的燃烧性能很好。这主要是由于半焦的孔隙发达,与空气接触面积大,一旦开始反应,燃烧速率快、反应时间短<sup>[18]</sup>。城市污泥的  $t_s$ 、 $t_m$ 、 $t_c$  分别为 240、295、658 °C。城市污泥  $t_s$  低,  $t_m$  较低,但  $t_c$  高,燃烧速率慢,总体燃烧性能差,这是由于城市污泥燃烧主要是挥发分的析出燃烧,其挥发分含量高而固定碳含量低,挥发分的析出燃烧主要集中在低温区;此外,由于城市污泥的灰分(60.26%)很高,燃烧过程中,物质的裹灰现象严重,且灰分中的无机矿物大都在高温下分解,使得城市污泥燃烧速率慢、 $H_w$  很宽、燃烧性能差。

对比表 2 中半焦与城市污泥的燃烧特征值,除  $t_s$ 、 $t_m$  外,城市污泥的其他各项燃烧特征值都比半焦差,特别是城市污泥的  $S$  ( $3.17 \times 10^{-10}$

$\text{mg}^2/(\text{min}^2 \cdot \text{C}^3)$ )比半焦的  $S$  ( $33.62 \times 10^{-10} \text{mg}^2/(\text{min}^2 \cdot \text{C}^3)$ )低得多,因而,城市污泥的燃烧性能比半焦的燃烧性能差。

### 2.2 半焦与城市污泥混合物的燃烧性能

将半焦与城市污泥分别按 4 : 1(质量比,下同)、3 : 2、2 : 3、1 : 4 混合,得到 A、B、C、D 共 4 个半焦与城市污泥的混合物,各混合物的 TG-DTG 曲线见图 3。

分析 DTG 曲线的形态,不考虑样品在室温至 200 °C 的失水过程,混合物 A、B 的 DTG 曲线都呈单峰,混合物 C 的 DTG 曲线整体上呈单峰,而混合物 D 的 DTG 曲线呈双峰。根据预测混合煤燃烧性能的数学模型,在相同的燃烧工况条件下,当混合煤的质量基本相同时,如果混合煤的 DTG 曲线呈单峰,则其燃烧性能好;如果混合煤的 DTG 曲线呈双峰或多峰,则其燃烧性能差。可见,混合物 A 和混合物 B 的燃烧性能好,混合物 C 的燃烧性能较差,混合物 D 的燃烧性最差。说明半焦与城市污泥混合,随半焦配比的增大,其燃烧性能变好,半焦能改善城市污泥的燃烧性能。当半焦的配比大于 40% 时,半焦与城市污泥混合物的 DTG 曲线呈单峰,有较好的燃烧性能。

半焦与城市污泥混合物的燃烧特征值见表 3。由表 3 可知,混合物 A、B、C、D 的  $t_s$  分别为 393、365、277、250 °C,表明半焦与城市污泥混合物的  $t_s$  随半焦配比的增大而升高,半焦的配入不利于城市污泥着火;混合物 A、B、C、D 的  $t_m$  依次为 427、433、436、441 °C,表明半焦与城市污泥混合物达到最大燃烧速率的温度随着半焦配比的增大而降低,半焦的配入有利于城市污泥燃烧  $t_m$  的改善;混合物 D、C、B、A 的  $t_c$  由 633 °C 逐渐降低至 605 °C,  $(dw/dt)_{\text{mean}}$  由 0.10 mg/min 逐渐提高至 0.25 mg/min,  $S$  由  $7.58 \times 10^{-10} \text{mg}^2/(\text{min}^2 \cdot \text{C}^3)$  逐渐提

表 2 半焦和城市污泥的燃烧特征值

Table 2 Combustion characteristics of semi-coke and municipal sludge

样品	$t_s$ /°C	$t_m$ /°C	$t_c$ /°C	$H_w$ /°C	$T$ /min	$(dw/dt)_{\text{max}}$ /( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$(dw/dt)_{\text{mean}}$ /( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$S$ /( $10^{-10} \text{mg}^2 \cdot \text{min}^{-2} \cdot \text{C}^{-3}$ )
半焦	394	422	594	200	20.3	1.0	0.31	33.62
城市污泥	240	295	658	418	41.8	0.2	0.06	3.17

表 3 半焦与城市污泥混合物的燃烧特性参数

Table 3 Combustion characteristics of semi-coke and municipal sludge mixture

混合物	$t_s$ /°C	$t_m$ /°C	$t_c$ /°C	$H_w$ /°C	$T$ /min	$(dw/dt)_{\text{max}}$ /( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$(dw/dt)_{\text{mean}}$ /( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$S$ /( $10^{-10} \text{mg}^2 \cdot \text{min}^{-2} \cdot \text{C}^{-3}$ )
A	393	427	605	212	21.1	0.8	0.25	21.41
B	365	433	618	253	25.4	0.7	0.19	16.15
C	277	436	623	346	34.7	0.5	0.13	13.60
D	250	441	633	383	38.4	0.3	0.10	7.58

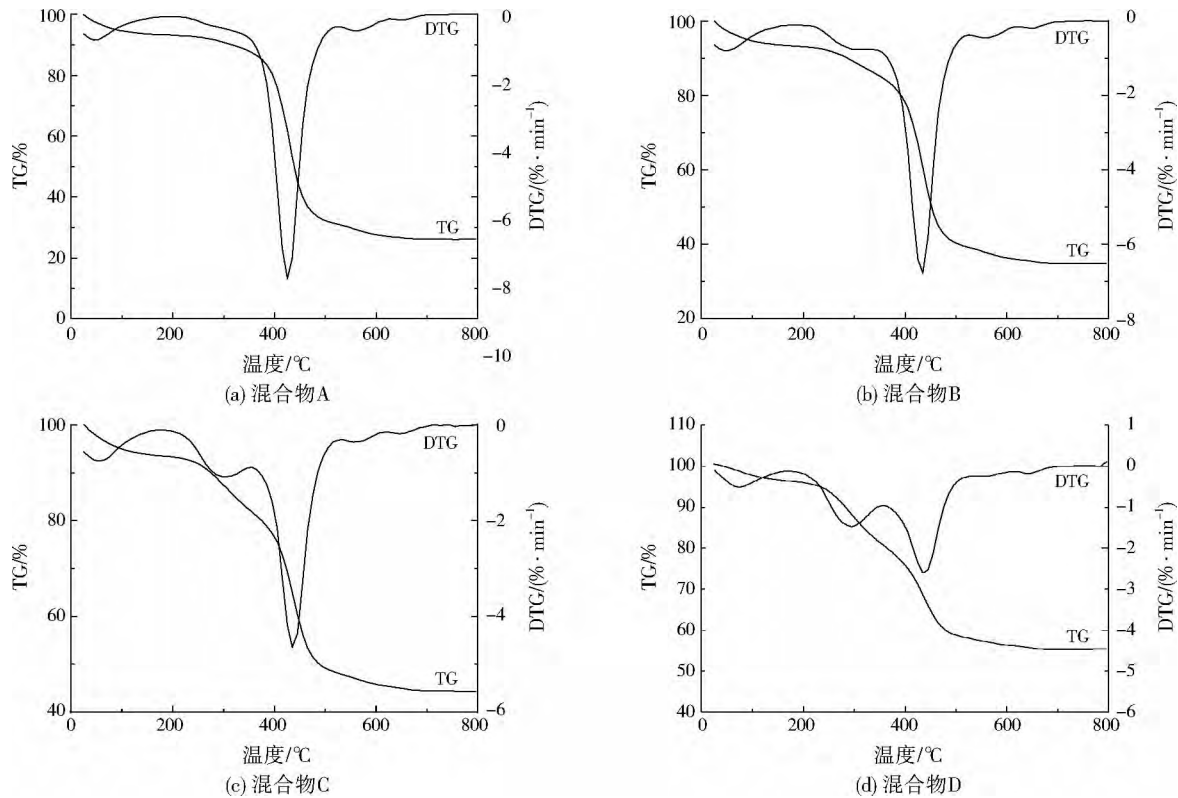


图3 各混合物的TG-DTG曲线  
Fig.3 TG-DTG curves of mixture samples

表4 半焦、城市污泥及其混合物的燃烧动力学参数  
Table 4 Combustion kinetic parameters of semi-coke, municipal sludge and the mixtures

样品	温度 /°C	线性拟合方程	指前因子(A) /min <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	E / (kJ·mol <sup>-1</sup> )	活化能平均值(E <sub>mean</sub> ) / (kJ·mol <sup>-1</sup> )
半焦	340~500	Y=-9 882.66X+0.68	195 061.10	0.964 5	82.16	
混合物 A	350~502	Y=-9 048.41X-0.46	57 122.29	0.964 0	75.23	
混合物 B	350~518	Y=-6 858.05X-3.51	2 050.42	0.948 3	57.02	
混合物 C	365~515	Y=-5 846.22X-4.81	476.39	0.959 4	48.61	
混合物 D	240~365	Y=-3 117.40X-8.48	6.47	0.982 0	25.92	30.64
	365~520	Y=-4 252.94X-6.93	41.58	0.967 2	35.35	
城市污泥	240~655	Y=-1 718.00X-10.28	40.00	0.911 4	14.28	

高至  $21.41 \times 10^{-10} \text{ mg}^2 / (\text{min}^2 \cdot \text{°C}^3)$ , 说明半焦与城市污泥混合物随半焦配比的增加, 燃烧时间缩短, 燃烧速度加快, 燃烧性能变好。

综上所述, 半焦与城市污泥混合物的燃烧性能随半焦配比的增加而变好。其原因是半焦燃烧速率快, 热值高, 能显著提高半焦与城市污泥混合物燃烧的环境温度, 从而提高城市污泥的燃烧速度。此外, 由于城市污泥中含有 Na、Ca 等碱金属元素, 对半焦有助燃作用<sup>[19-20]</sup>。

### 2.3 半焦与城市污泥混合物的燃烧动力学参数

通过半焦与城市污泥混合物的 DTG 曲线可以看出, 混合物 A、B、C 与半焦的 DTG 曲线相似为单峰, 城市污泥的 DTG 曲线也呈单峰, 其燃烧

反应视为一级反应, 计算 E; 混合物 D 的 DTG 曲线呈双峰, 根据峰划分出两个温度段, 视每个温度段分别为一级反应, 计算 E, 取两个峰的 E 平均值为混合物 D 的 E。

由表 4 可知, 半焦的 E (82.16 kJ/mol) 远大于城市污泥的 E (14.28 kJ/mol), 表明城市污泥比半焦更容易着火燃烧。半焦与城市污泥混合物的 E 随着半焦配比的增大而逐渐增大, 反应难度增加, 说明半焦的配入不利于城市污泥着火。

### 3 结 论

(1) 城市污泥的着火温度低, 容易起火燃烧, 但其灰分高, 热值低, 燃烧速率慢, 燃烧性能差。

(2) 云南褐煤热解半焦的着火温度比城市污泥高,但比相同煤质参数的煤炭着火温度低,燃烧速率快,燃烧性能好。

(3) 半焦与城市污泥混合,随半焦配比的增大,其燃烧性能变好,半焦能改善城市污泥的燃烧性能。当半焦的配比大于40%时,半焦与城市污泥混合物的DTG曲线呈单峰,有较好的燃烧性能。

(4) 半焦的 $E$ 大于城市污泥的 $E$ ,表明城市污泥比半焦更容易着火燃烧。半焦与城市污泥混合物的 $E$ 随着半焦配比的增大而增大,反应难度增加,说明半焦的配入不利于城市污泥着火。

参考文献:

[1] WZOREK M.Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge[J].Fuel Processing Technology,2012,104:80-89.

[2] SATYANARAYAN S.Biogas production enhancement by soya sludge amendment in cattle dung digesters[J].Biomass and Bioenergy,2010,34(9):1278-1282.

[3] TYAGI V K,LO S L.Sludge:a waste or renewable source for energy and resources recovery[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,25(5):708-728.

[4] CLIMENT M,FERRER I,BAEZA M D,et al Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions[J].Chemical Engineering Journal,2007,133(1/2/3):335-342.

[5] 张杞蓉,普晓晶.中国城市污水厂污泥处置现状研究[J].环境科学与管理,2015,40(4):86-89.

[6] 姚立明,宫禹,赵孟石,等.我国城市污泥处理技术现状[J].黑龙江科学,2015,6(3):10-11.

[7] 周云,刘英,张志强,等.微生物絮凝剂制备的研究新进展[J].环境污染与防治,2014,36(4):80-85.

[8] 孙会青,曲思建,王利斌.半焦的生产加工利用现状[J].洁净煤技术,2008,14(6):62-65.

[9] 戴财胜,刘良良,马淞江,等.褐煤热解半焦在污泥调质与深度浓缩脱水中的应用[J].煤炭学报,2014,39(7):1361-1365.

[10] 戴财胜,刘良良,马淞江.基于污泥煤浆的污泥调质与浓缩脱水实验研究[J].煤炭转化,2014,37(3):86-89.

[11] 顾利锋,陈晓平,赵长遂,等.城市污泥和煤混燃特性的热重分析法研究[J].热能动力工程,2003,18(6):561-563.

[12] 喻秋梅,庞亚军.煤燃烧试验中着火点确定方法的探讨[J].华北电力技术,2001(7):9-10.

[13] 聂红其,孙绍增,李争起,等.褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究[J].燃烧科学与技术,2001,7(1):72-76.

[14] 鲜晓红,杜云贵,张光辉.TG-DTG/DTA 研究混煤的燃烧特性[J].煤炭转化,2011,34(3):67-70.

[15] 孙云娟,蒋剑春,王燕杰,等.Coats-Redfern 积分法研究生物

质与煤单独热解和共热解动力学特性[J].林产化学与工业,2014,34(5):8-14.

[16] 戴财胜,单忠健.预测混合煤燃烧性能的数学模型[J].燃料化学学报,2004,32(6):641-646.

[17] 马淞江,刘晓芳,戴谨泽,等.温和热解条件下内蒙褐煤热解半焦的燃烧性能[J].煤炭学报,2015,40(5):1153-1159.

[18] 胡勤海,熊云龙,毛柯辉,等.城市污泥掺混水煤浆燃烧特性的热重分析[J].环境污染与防治,2008,30(1):60-63.

[19] 魏砾宏,齐弟,李润东.碱金属对煤燃烧特性的影响及动力学分析[J].煤炭学报,2010,35(10):1706-1711.

[20] 费华,罗凯,石金明,等.O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下碱金属对煤燃烧特性的影响[J].江西理工大学学报,2014,35(5):1-5.

编辑:贺锋萍 (收稿日期:2015-09-28)

(上接第21页)

[5] 石颖,马军,蔡伟民,等.湖泊、水库水的强化混凝除藻的试验研究[J].环境科学学报,2001,21(2):251-253.

[6] 张明真,傅海燕,柴天,等.连续式自清洁蓝藻收集设备的中试研究[J].环境工程学报,2011,5(9):2018-2022.

[7] PANG Cuichao,FAN Xinjian,ZHOU Jie,et al.Optimal dosing time of acid algacide for restraining algal growth[J].Water Science and Engineering,2013,6(4):402-408.

[8] GUAN Chengwei,GUO Xiaoyun,CAI Guanqing,et al.Novel algicidal evidence of a bacterium *Bacillus* sp. LP-10 killing *Phaeocystis globosa*, a harmful algal bloom causing species[J].Biological Control,2014,76:79-86.

[9] YANG Xiaoru,LI Xinyi,ZHOU Yanyan,et al.Novel insights into the algicidal bacterium DH77-1 killing the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense*[J].Science of the Total Environment,2014,482/483:116-124.

[10] 邓晓辉,许晶禹,吴应湘,等.动态微气泡浮选除油技术研究[J].工业水处理,2011,31(4):89-90.

[11] AL SHAMRANI A A,JAMES A,XIAO H.Destabilisation of oil-water emulsions and separation by dissolved air flotation[J].Water Research,2002,36(6):1503-1512.

[12] AL SHAMRANI A A,JAMES A,XIAO H.Separation of oil from water by dissolved air flotation[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2002,209(1):15-26.

[13] ENGLERT A H,RODRIGUES R T,RUBIO J.Dissolved air flotation (DAF) of fine quartz particles using an amine as collector[J].International Journal of Mineral Processing,2009,90(1/2/3/4):27-34.

[14] TEIXEIRA M R,SOUSA V,ROSA M J.Investigating dissolved air flotation performance with cyanobacterial cells and filaments[J].Water Research,2010,44(11):3337-3344.

编辑:丁怀 (收稿日期:2015-10-15)