

# 城市污水污泥热解特性及动力学规律研究

胡艳军, 宁方勇, 钟英杰

(浙江工业大学 能源与动力工程研究所, 浙江 杭州 310024)

**摘 要:** 采用差热-热重分析法对不同反应条件下的污泥热解特性及动力学规律展开研究。结果表明: 污泥的非等温热解过程包含 4 个失重阶段; 提高升温速率和降低氮气吹扫速率可促进污泥热解转化效率增加、挥发份最大失重率增大、表观活化能  $E$  值和频率因子  $A$  值增大; 加入不同类型催化剂也提高了污泥热解转化效率, 使热解过程向低温区移动; 加入 KCl 催化剂使污泥热解 DTG 曲线向低温移动最多, 加入  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  使污泥最大失重率达到 11.8%, 是未添加催化剂时的 2.7 倍; 添加催化剂也降低了表观活化能  $E$  值、提高了频率因子  $A$  值, 且  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的加入使挥发份在主要析出阶段的表观活化能  $E$  值降低了约 30%。

**关 键 词:** 污水污泥; 热重分析; 动力学; 升温速率; 催化剂

中图分类号: X705 文献标识码: A

## 引 言

污泥作为一种特殊的高聚物, 其热解过程既有热化学反应, 也包含各种物理现象的相互转换, 是许多相互竞争或平行的理化反应的综合体<sup>[1-4]</sup>。关于污泥特性及其热解规律等已有大量研究, 但开展不同反应条件下的污泥热解特性及反应动力学规律的研究, 对于揭示污泥热解过程各物理化学变化特征、阐明影响污泥热解过程的因素与热解过程及动力学规律之间的关系仍具有重要意义。

本研究采用差热-热重分析法对杭州四堡污水处理厂污泥的热解特性及反应动力学规律展开研究, 主要探讨升温速率(20、30 和 40 °C/min)、氮气吹扫速率(50 和 80 mL/min) 和添加不同类型催化剂(KCl、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  及污泥热解残渣) 对污泥热解特性参数的影响, 采用非等温化学反应动力学方程计算并比较了不同反应条件下污泥的反应动力学特性参数。

## 1 实验部分

### 1.1 样品及预处理

2010 年 11 月在杭州市四堡污水处理厂污泥排放总管进行取样, 样品是未经消化处理的二次脱水污泥。该厂主要处理杭州城区部分生活污水。

在进行污泥热重分析实验前, 采用 DHG-9070A 型恒温电热鼓风干燥箱, 在 105 °C 下对脱水污泥进行干化处理 12 h; 利用 HP001 型研磨机磨细干污泥样品, 使其能全部通过 60 目标准筛, 将处理好的样品置于采样袋和干燥皿中备用。污泥的工业分析和元素分析方法参照《煤炭工业分析方法》<sup>[5]</sup>。

### 1.2 热重实验

污泥热重分析的测试装置是法国 Setaram 公司 TG92 型常压差热-热重分析仪, 用  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  做参照物, 由程序设定升温速率、终温及保温时间。热重分析过程采用水冷方式调节热天平工作温度, 使其在较低温度下工作, 热天平自动记录逐时实验数据信号, 可获得热重 TG 数据、微商热重 DTG 数据、差热 DTA 数据。每个实验结束后, 做空白实验以校核误差。

具体测试方法: 每次热重实验称取 8~10 mg 干污泥样品放入加盖的氧化铝坩埚内, 将坩埚置于热重分析仪的分析小室内; 向热分析仪中通高纯度氮气(99.95%) 作为反应过程的载气。

为了分析不同反应条件对污泥热解效果的影响, 实验所选取的升温速率分别为 20、30、40 °C/min, 其对应的测试数据组命名为: S1-1、S1-2、S1-3; 氮气吹扫速率分别为 50 和 80 mL/min, 其对应的测试数据组命名为: S2-1 和 S2-2; 参考以往对生物质及污泥催化热解常用的催化剂, 本实验选取了 KCl、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  及污泥热解固体残渣作为目标催化剂, 投入量为干污泥总质量的 5%, 其对应的

收稿日期: 2011-04-12; 修订日期: 2011-05-09

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y5100258); 浙江省科技厅公益型科研基金资助项目(2010C33058)

作者简介: 胡艳军(1979-), 女, 辽宁沈阳人, 浙江工业大学副教授, 博士。

测试数据组命名为: S3-1、S3-2、S3-3、S3-4。

## 2 污泥热解特性分析

### 2.1 污泥基本特性

剩余污泥样品脱水处理后的工业分析和元素分析结果如表1所示。可以看出,经脱水处理后的污泥水分含量仍很高;干基挥发份含量也较高,而固定碳含量较低。从这方面看,污泥的热解动力学特性会与煤、天然燃油有很大不同。

表1 污泥基本特性分析(%)

Tab.1 Analysis of the basic characteristics of sewage sludge

工业分析 (干燥基)	W*	A <sub>d</sub>	V <sub>d</sub>	FC <sub>d</sub>	Q <sub>g,d</sub> /MJ·kg <sup>-1</sup>
	82.9	48.5	44.3	22.1	11.45
元素分析 (干燥基)	C	H	O	S	N
	35.7	5.34	12.81	1.75	3.44

\* 干燥前污泥的含水量

### 2.2 热解实验

实验条件: 样品初始质量为 9.118 mg, 以 50 mL/min 速率通入氮气以保持无氧热解气氛, 升温速率为 20 °C/min, 从室温加热至 900 °C, 未添加任何催化剂。污泥热解过程温度随时间变化规律如图1所示, 热重特性解析曲线如图2所示。可以看出, 杭州四堡污水污泥的整个热解过程按失重规律分成4个阶段:

(1) 水分析出阶段(室温~160 °C), 反应时间为 8 ± 0.5 min。在 83 °C、4.1 min 时水分析出速率最快, 在 130~160 °C 区间内失重不明显。将室温~160 °C 确定为四堡污泥的第一个热解失重阶段, 质量损失约为样品初始重量的 3.7%。该阶段的失重是由污泥中内在水分和少量残留外在水分蒸发引起。

(2) 挥发份析出阶段(160~400 °C), 反应时间为 16 ± 1.5 min。在 277 °C、13.4 min 时挥发份析出速率最大, 为 5.6 %/min。该阶段质量损失约为样品初始质量的 37.8%。由于污泥中含有丰富的有机质成份, 该阶段主要是有机物中的含碳化合物的 C-C 键断裂, 产生不凝性气态物, 如 CO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>, 此外还有微量的 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, 导致污泥样品的质量损失; 该过程中也会有微量内在残存的水分蒸发。该阶段也是 4 个热反应阶段失重最大阶段, 在该阶段产生气体较多, 也说明了污泥挥发份的析出反应易在低温区进行, 从节能角度看, 这对开发低

温热解技术有利。

(3) 挥发份的二次(延迟)析出阶段(410~490 °C), 反应时间为 4 ± 1.3 min。此过程中在 454 °C 出现一个相对较弱失重峰, 失重率为 2.94 %/min, 质量损失约为样品初始质量的 2.15%, 这是高沸点大分子有机物挥发造成。

(4) 残留有机物和矿物质分解、焦炭燃尽阶段(490~700 °C), 反应时间为 8.5 ± 1.5 min, 此过程中也出现一个相对较弱失重峰, 质量损失约为样品初始质量的 15.4%。同时, 从 DTA 曲线也可以看出, 在室温至 490 °C 的污泥失重补偿能量达到了一个明显波峰, 而在 490 °C 以后又完成了另外一个能量补偿的峰值, 因此可确定该过程为污泥热解的最后失重阶段。由图2的 TG 和 DTG 数据曲线也可以看到, 在 700 °C 以后, 随着升温和热解时间延长, 样品质量不再发生变化, 热解反应基本停止。

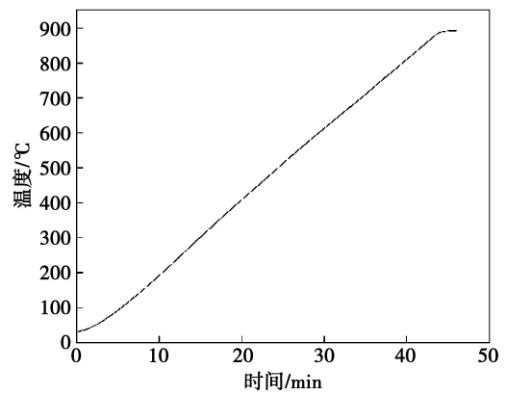


图1 污泥热解过程温度随时间变化规律

Fig.1 Law governing the change of the temperature with time during the pyrolysis process of sludge

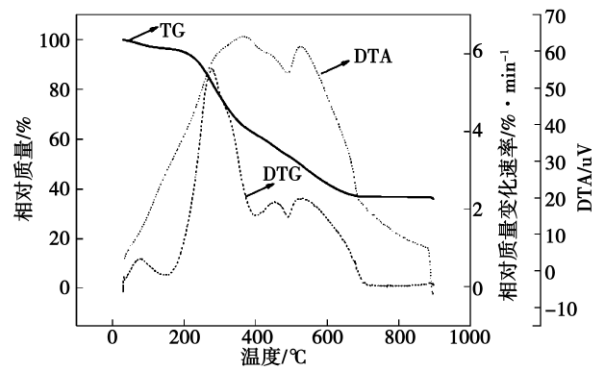


图2 常规反应条件下污泥热重特性曲线

Fig.2 Thermogravimetric analytic curves of sewage sludge under the conventional reaction conditions

### 2.3 升温速率和氮气吹扫速率对污泥热解过程的影响

升温速率是影响污泥热解反应过程的重要因素。提高升温速率,污泥样品中有机成份达到热解反应所需温度的响应时间缩短,有利于热解反应进行。氮气吹扫速率为 50 mL/min、终温 900 °C、升温速率分别为 20、30 和 40 °C/min、未添加催化剂时污泥热解的 TG 和 DTG 曲线如图 3 所示。随着升温速率提高,污泥最大失重率增加,挥发份的析出温度区间加宽,这将促进内部有机物热解反应的进行。同时,由于升温速率的增加使得污泥样品与差热-热重分析仪的反应器小室温差增大、样品内部颗粒和外部颗粒的温差也变大,内部温度较低的颗粒热解产生的气体不能及时扩散,导致样品热解过程发生变化,挥发份的释放波峰滞后,污泥转化率降低。这与文献[6]关于天然生物质和木质素等衍生物热解特性的研究结果吻合,与文献[7]升温速率对污泥热重过程峰值影响相似。

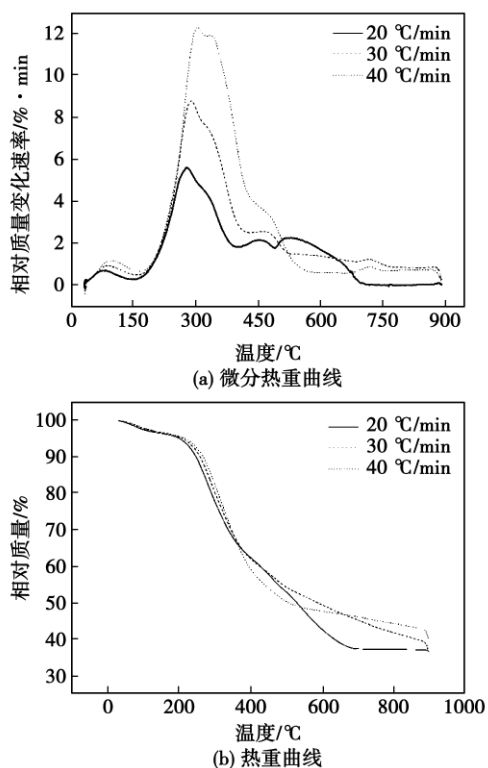


图 3 不同升温速率下的污泥热重 TG 和 DTG 曲线

Fig. 3 Thermogravimetric analytic curves of sewage sludge at various temperature rise rates

由于污泥自身挥发份含量较高、含碳量较低,热解温度在 3 条 TG 数据线的交汇点(360~380 °C)进入高温区,尽管不同反应条件下的样品热解达到了

同一温度,但低温升率下污泥热解时间延长,这也促使污泥总失重量减少、转化率降低。

图 4 为不同氮气吹扫速率时污泥热重解析曲线。热重测试条件:升温速率为 20 °C/min,终温为 900 °C,氮气升温速率分别为 50 和 80 mL/min。可以看出,提高氮气的吹扫速率,污泥样品转化率降低,热解过程发生明显变化;提高氮气吹扫速率只出现了一个明显的挥发份析出过程,且析出温度略有降低,但挥发份析出的温度区域变宽;相比氮气吹扫速率较低的热解过程而言,提高氮气吹扫速率导致第二个挥发份析出区和焦炭燃烧区变得不明显。

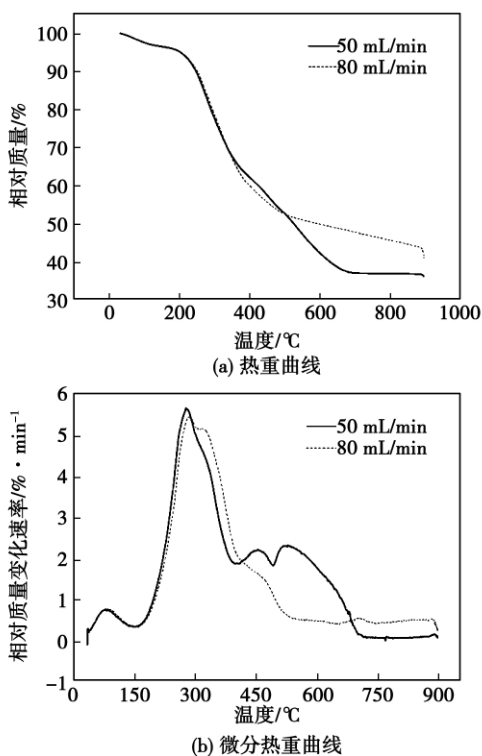


图 4 不同氮气吹扫速率下污泥热重解析曲线

Fig. 4 Thermogravimetric analytic curves of sewage sludge at various nitrogen purge rates

污泥热重特性通常采用热解过程的 TG 和 DTG 特征数据进行分析,主要包括挥发份初始析出温度  $T_s$ 、污泥热解最大失重率  $\alpha_{max}$  (%/min)、最大失重率  $\alpha_{max}$  对应的温度  $T_{max}$ 、以及失重率占最大失重率  $\alpha_{max}$  的 1/2 时对应的温度半峰宽度  $\Delta T_{1/2}$ <sup>[10]</sup>。 $T_s$  是污泥热解转化率达 5% 与达 50% 的两点连线与温度坐标的交点对应的温度,挥发份析出温度  $T_s$  越小,挥发份越易析出。最大失重率  $\alpha_{max}$  越大表明污泥挥发份释放的越激烈,最大失重率对应的温度  $T_{max}$  越小,半峰宽  $\Delta T_{1/2}$  越窄,挥发份的释放峰出现越早、越集

中,对污泥的燃尽越有利。综上,将不同升温速率时的污泥热解特性采用挥发份析出综合特征参数  $D$  进行评价:

$$D = \frac{\alpha_{\max}}{T_{\max} \times T_s \times \Delta T_{1/2}}$$

$D$  值越大,表明污泥挥发份热化学转化效果越好,热解反应越易进行。表 2 列出了 3 种升温速率时的污泥热解过程特性参数及综合特征参数  $D$ 。可以看出,升温速率对污泥挥发份析出温度和最大失重率都有显著影响。在相同时间内升温速率越高,挥发份析出量越大;相反,较低的升温速率,延缓了污泥的热解时间,缓慢加热有助于最终污泥的碳化反应。同时,在氮气吹扫速率为 50 mL/min、终温为 900 °C 时,升温速率越高,污泥热解综合特征参数  $D$  值越大,如在 40 °C/min 时的热解特性参数  $D$  值是 20 °C/min 时的 2 倍左右,说明在此条件下挥发份的析出效果越好。然而,提高氮气吹扫速率(从 50 ~ 80 mL/min)稍降低了热解特征参数  $D$  值(从  $5.8 \times 10^{-9}$  到  $5.4 \times 10^{-9}$ )。这也说明氮气吹扫速率在一定范围内对污泥热解效果影响不明显。

表 2 不同升温速率下污泥的热解特征参数  
Tab. 2 Pyrolytic characteristic parameters of sewage sludge at various temperature rise rates

特征参数	S1-1 (S2-1)	S1-2	S1-3	S2-2
转化率/%	64.0	63.6	61.1	59.1
最大失重率/%·min <sup>-1</sup>	5.6	8.7	12.2	5.4
对应温度/K	553	565	583	558
挥发份析出温度/K	433	443	453	425
半峰宽/K	402	405	417	420
综合特征参数 $D$ ( $\times 10^{-9}$ )	5.8	8.5	11	5.4

### 2.4 催化剂对污泥热解过程影响

图 5 为添加 4 种催化剂及无催化剂作用下的污泥热解 DTG 曲线,实验条件:升温速率 20 °C/min、终温为 750 °C、氮气吹扫速度为 50 mL/min。可以看出,加入催化剂后污泥热解过程不同程度地向低温区移动,且 KCl 的加入使得热解过程向低温移动最多,其次为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。而 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的加入导致污泥失重率最高,在 300 °C 到达最高失重率 11.8%,其值约是未添加催化剂的污泥热解失重率最大值(4.4%)的 2.7 倍。

表 3 出示了添加 4 种催化剂后污泥热解特性参数。添加催化剂后,污泥出现最大失重率时的温度

明显降低,说明催化剂可以促使污泥热解反应提前,反应的半峰宽度也增加,可使得污泥中有机成份能够最大程度的发生分解反应。与未添加任何催化剂的污泥综合热解特征参数 ( $D = 4 \times 10^{-9}$ ) 相比,加入催化剂 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、KCl、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 及污泥热解残渣后,污泥热解过程的  $D$  值分别提高至  $4.9 \times 10^{-9}$ 、 $4.8 \times 10^{-9}$ 、 $9.1 \times 10^{-9}$  以及  $7.5 \times 10^{-9}$ ,这说明加入催化剂后,污泥中有机成份热化学转化效果获得不同程度的改善,尤其加入热解残渣也显著改善了污泥热解效果,这对污泥热解残渣处理提供了一条新的途径。同时,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 钠盐的加入也显著提高了污泥转化率,且  $D$  值也增长了 2 倍以上,相比于其它种类的盐,如钾盐,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的成本较低,是比较低廉的催化剂用材。虽然相比较 2.3 节所述在 40 °C/min 升温速率下的污泥热解综合特征参数 ( $D = 12$ ),在 20 °C/min 升温速率下加入 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 并未使得污泥的热解特性参数  $D$  超过 12,但是污泥转化率却显著提高。因而,建议在这两种反应条件下,进行污泥热解副产物特性分析,从而优选出较好的热解反应条件。

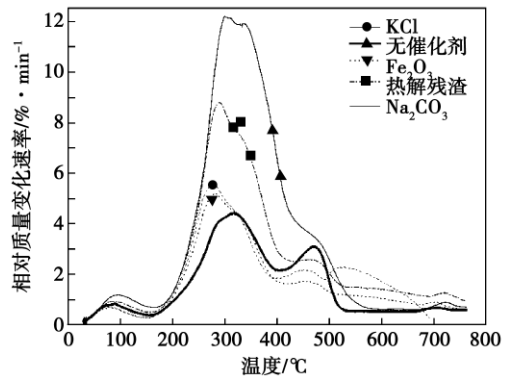


图 5 不同催化剂作用下污泥微分热重曲线  
Fig. 5 DTG curves of sewage sludge under the action of various catalysts

表 3 不同催化剂作用下污泥的热解特性参数

Tab. 3 Pyrolytic characteristic parameters of sewage sludge under the action of various catalysts

热解特征参数	未加	S3-1 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	S3-2 (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	S3-3 (KCl)	S3-4 (残渣)
转化率/%	57.5	63.5	67.8	64.3	62.6
最大失重率/%·min <sup>-1</sup>	4.4	5.1	11.8	5.5	8.7
对应温度/°C	598	566	577	558	563
挥发份析出温度/°C	454	440	467	463	451
半峰宽/°C	401	411	480	443	451
热重特征参数 $D$ ( $\times 10^{-9}$ )	4	4.9	9.1	4.8	7.5

注:催化剂的投入量为干污泥总质量的 5%。

### 3 热解反应动力学参数

采用非等温化学反应的动力学方程计算反应动力学特性参数<sup>[8]</sup>:

$$\frac{dx}{dt} = kf(\alpha) \quad (1)$$

式中:  $t$ —热解反应时间, min;  $\alpha$ —污泥转化率,  $\alpha = (G_0 - G) / (G_0 - G_1)$ ,  $G_0$ 、 $G$ 、 $G_1$  分别为样品的初始质量、热解结束时样品余重以及任一时刻  $t$  对应的样品质量;  $f(\alpha)$ —动力学反应机理决定的函数, 表示污泥反应速率与  $\alpha$  之间所遵循的某种函数关系;  $k$ —Arrhenius 化学反应速率常数, 与温度  $T$  的关系为:

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

式中:  $E$ —表观活化能, kJ/mol;  $R$ —理想气体常数, J/(mol·k);  $A$ —反应频率因子,  $s^{-1}$ 。对  $n$  级热反应过程, 可假设  $f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$ , 则热解反应动力学方程为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1 - \alpha)^n \quad (3)$$

将升温速率  $\beta = \frac{dT}{dt}$  代入式(3) 则:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1 - \alpha)^n \quad (4)$$

经分离变量积分和数学变换, 式(4) 转换为:

$$\ln\left[-\frac{\ln(1 - \alpha)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{E}{RT} \quad (5)$$

( $n = 1$ )

$$\ln\left[-\frac{1 - \ln(1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1 - n)}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

( $n \neq 1$ )

令  $a = \ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right]$ , 对于大多数  $E$  值, 在热解反应发生的温度范围内  $a$  通常为常数。

本研究亦把杭州污泥的热解反应级数取为 2, 由获得的不同反应条件下污泥热解 TG 数据, 定义  $Y = \ln\left[-\frac{1 - \ln(1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1 - n)}\right]$ 、 $X = 1/T$ , 分别计算出相应的  $X$  和  $Y$  值, 并拟合出直线方程, 由其斜率和截距确定出污泥样品热解反应动力学特性参数。由于水分蒸发阶段和热解最后焦炭燃尽阶段的热解速率都很小, 因此仅对热解过程的挥发份析出阶段进行描述。表 4 为不同热解条件时污泥的反应动力学特性参数。污泥挥发份析出的主要阶段内污泥表观活化能  $E$  值在 31.66 ~ 65.61 kJ/mol 之间, 表明该污

泥的热解反应较容易发生。表观活化能  $E$  随着升温速率的提高而提高, 说明升温速率增大在一定范围内会影响污泥热解反应的效率, 这与提高升温速率会增大失重率、半峰宽一致。同时, 可提高升温速率同样也导致了频率因子  $A$  值增加,  $A$  值在碰撞反应动力学上表征的是激活分子的碰撞频率, 该值增加反映了升温速率提高了高温火花的石油烃成份加速分解的频率, 从而提高了不同阶段的污泥失重率。在污泥原始样品中加入 4 种催化剂后活化能  $E$  和频率因子  $A$  也有不同程度的变化,  $Na_2CO_3$  的加入显著降低了挥发份析出阶段的表观活化能  $E$  值, 频率因子  $A$  值也明显提高。

表 4 不同反应条件下污泥热解反应动力学特性参数  
Tab. 4 Pyrolytic reaction kinetic characteristic parameters of sewage sludge under various reaction conditions

样品	失重率最大温度区间	反应级数 $n$	相关系数 $R$	活化能 $E$ / kJ·mol <sup>-1</sup>	频率因子 $A$ / s <sup>-1</sup>
S1-1	160-405	2	0.970	47.37	$1.32 \times 10^8$
S1-2	170-429	2	0.985	50.33	$1.74 \times 10^{13}$
S1-3	183-459	2	0.993	65.61	$5.05 \times 10^{10}$
S2-2	168-475	2	0.988	46.41	$1.67 \times 10^8$
S3-1	151-399	2	0.992	42.44	$1.12 \times 10^{11}$
S3-2	168-410	2	0.989	31.60	$1.97 \times 10^{13}$
S3-3	175-425	2	0.992	39.15	$1.40 \times 10^{11}$
S3-4	190-450	2	0.981	42.27	$1.09 \times 10^{12}$

### 4 结 论

(1) 污泥热解过程可分为水分析出、挥发份析出、挥发份延迟析出和残留有机物及矿物质分解、焦炭燃尽 4 个阶段。在相同反应时间内, 升温速率越高, 挥发份的最大失重率越大, 低升温速率有利于污泥的碳化反应, 降低了污泥转化率。提高氮气的吹扫速率也降低了污泥转化率和污泥热解效率。

(2) 催化剂的加入提高了污泥热解效率, 使热解过程向低温区移动。KCl 使污泥热解 DTG 曲线向低温移动最多,  $Na_2CO_3$  使污泥最大失重率达到最高, 300 °C 失重率达到最高, 为 11.8%, 是未添加催化剂时失重率的 2.7 倍。

(3) 提高升温速率, 增大了表观活化能  $E$  值和频率因子  $A$  值; 添加催化剂降低了  $E$  值, 提高了频率因子  $A$  值; 实验条件下,  $Na_2CO_3$  的加入使挥发份主要析出阶段的表观活化能  $E$  值降低了约 30%。

参考文献:

[1] 马宏瑞, 吴家强, 许光文, 等. 油田采油污泥的热解动力学及其热解效果研究 [J]. 环境工程学报, 2009, 3(5): 932-936.  
 MA Hong-ru, WU Jia-qiang, XU Guang-wen, et al. Pyrolytic dynamic study of the sludge in an oil production factory in an oil field and its pyrolytic effectiveness [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(5): 932-936.

[2] Chu C P, Lee D J, Chang C Y. Thermal pyrolysis characteristics of polymer flocculated waste activated sludge [J]. Water Research, 2001, 35(1): 49-57.

[3] Shie J L, Chang C Y, Lee D J. Use of inexpensive additives in pyrolysis of oil sludge [J]. Energy Fuels, 2002, 16(1): 102-108.

[4] WANG Zhi-qi, GUO Qing-jie, LIU Xin-min, et al. Low temperature pyrolysis characteristics of oil sludge under various heating conditions [J]. Energy & Fuels, 2007, 21(2): 957-962.

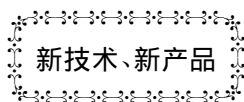
[5] GB T212-2008, 煤炭工业分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[6] 程世庆, 尚琳琳, 张海清. 生物质的热解过程及其动力学规律 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(4): 501-505.  
 CHENG Shi-qing, SHANG Lin-lin, ZHANG Hai-qing. Pyrolytic process of biomass and its dynamic laws [J]. Journal of coal, 2006, 31(4): 501-505.

[7] 魏立安, 涂丽丽, 高 标. 城市污水处理厂污泥热解机理 [J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2007, 21(4): 66-69.  
 WEI Li-an, TU Li-li, GAO Biao. Mechanism governing the pyrolysis of sludge in a municipal sewage water treatment factory [J]. Journal of Nancang Astronautics and Aeronautics (Natural science edition), 2007, 21(4): 66-69.

[8] Mohd R O, Park Y H, Ngo T A, et al. Thermogravimetric characteristics and pyrolysis kinetics of Giheung Respia sewage sludge [J]. Korean J Chem Eng, 2010, 27(1): 163-167.

(丛 敏 编辑)



### 汽轮机低压缸通流部分的改进

据《Теплоэнергетика》2010年9月刊报道,俄罗斯《Энергоатом(原子能动力)》集团公司、МЭИ(莫斯科动力学院)和《Турьбоатом(原子能汽轮机)》无限股份公司的专家对核电站汽轮机低压缸通流部分的设计和结构进行了深入研究。

在库尔斯克核电站4号机组、斯摩陵斯克核电站3号机组和列宁格勒核电站4号机组中运行的K-500-6.4-3000型汽轮机组是由1个高压缸和4个双流低压缸组成,末级动叶长度为850 mm。

提高汽轮机组КИУМ(装机功率利用率)的最有效措施是增加末级蒸汽滚出的环形面积,这能降低余速损失,达到增加功率并提高效率的目的。

提供了上述三个核电站由ОАО《Турьбоатом》制造的K-500-6.4-3000型汽轮机低压缸通流部分改进的结果,末级蒸汽出口环形面积从6.3 m<sup>2</sup>增加到8.19 m<sup>2</sup>(末级动叶长度从850 mm增加到1 030 mm),余速损失降低44.5%,汽轮机功率增加16 MW,相应地使发电机组效率提高3.2%。

(吉桂明 摘译)

**of a Plane Cascade in a High-load Helium Compressor** [刊, 汉] LONG Yan-li ( College of Power and Energy Source Engineering ,Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) ,XU Li-min ,YU Jing-lei ( CSIC Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150036) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 2) . - 246 ~ 252

Based on a speed triangle design conception for elementary stages with a large deflection angle ,a numerical calculation was performed of a total of 324 flow fields of a plane cascade by using a CFD software ,including three air inlet mach numbers ,six air inlet angles ,three pressure diffusion factors ,three cascade solidities and two blade profile maximal thickness ratios. To enhance the performance of the new type cascade ,an artificial neural network was employed to constitute an approximate function based on the database sample space and the genetic algorithm was used to look for new designs and predict their aerodynamic performances. Furthermore ,the mid-arc line and thickness distribution were optimized and the total pressure loss coefficient has decreased by 14.48% after the optimization.

**Key words:** helium compressor ,large deflection angle ,elementary stage speed triangle ,optimization ,total pressure loss

**城市污水污泥热解特性及动力学规律研究 = Study of the Pyrolytic Characteristics of and the Dynamic Law Governing Municipal Sewage Water and Sludge** [刊, 汉] HU Yan-jun ,NING Fang-yong ,ZHONG Ying-jie ( Energy Source and Power Engineering Research Institute ,Zhejiang Institute of Technology ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310024) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 2) . - 253 ~ 258

The temperature difference-thermogravimetric method was employed to study the pyrolytic characteristics and dynamic law of sludge under different reaction conditions. It has been found that the nonisothermal pyrolytic process of sludge involves 4 stages of weight loss. To enhance the temperature rise rate and lower the nitrogen purge rate can improve the sludge pyrolysis conversion efficiency and increase the volatile weight loss rate apparent activation energy  $E$  value and frequency factor  $A$  value. To add in catalysts in different kinds can also improve the sludge pyrolysis conversion efficiency ,making the pyrolytic process move towards the low temperature zone. To add in KCl catalyst can make the sludge pyrolytic DTG curve shift towards the low temperature zone to an maximal extent. To add in  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  can make the sludge attain its maximal weight loss rate of 11.8% ,2.7 times as much as that when no catalyst is added. To add in catalysts can lower the apparent activation energy  $E$  value and enhance the frequency factor  $A$  value and the addition of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  makes the apparent activation energy  $E$  value of the volatile content lower by about 30% in the main separation stage. **Key words:** sewage water and sludge ,thermogravimetric analysis ,dynamics ,temperature rise rate ,catalyst