

桨叶式干燥机污泥干化性能及热重试验研究

曹 通, 李鸿远, 谢 军, 吴 振

(苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘 要: 依托广东省某热电厂资源,建立了中试规模的污泥干化试验平台,研究了工业污泥在桨叶式干燥机不同参数下的干化特性,并针对干燥机出口污泥典型含水率进行了污泥与煤的热重试验。结果表明,污泥在桨叶式干燥机内的干化过程以恒速干化阶段、第一降速干化阶段、第二降速干化阶段为主,且出口污泥含水率为65%~43%时以恒速干化阶段为主,含水率<40%时以降速干化阶段为主;出口污泥含水率及干化速率随进料机频率(桨叶轴频率)的增大而增大,污泥在干燥机内的干化时间主要由桨叶轴控制;含水率对污泥的综合燃烧特性具有较大影响,掺烧少量污泥可以改善煤粉的着火并促进燃烧,但当掺烧含水率较大的污泥时,综合燃烧特性急剧变差,这一点应引起重视。

关键词: 桨叶式干燥机; 污泥干化; 热重试验; 含水率; 干化速率; 燃烧特性

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)07-0106-07

Sludge Drying Performance and Thermogravimetric Analysis of Paddle Dryer

CAO Tong, LI Hong-yuan, XIE Jun, WU Zhen

(Suzhou Nuclear Power Research Institute Co. Ltd., Suzhou 215004, China)

Abstract: A pilot-scale sludge drying platform was established in a thermal power plant in Guangdong Province to study the industrial sludge drying characteristics under different parameters of paddle dryer, in addition to a thermogravimetric analysis on the typical moisture content of sludge at dryer outlet with coal. The results showed that there were three stages in the sludge drying process, which included a constant rate drying stage, a first deceleration drying stage, and a second deceleration drying stage. When the moisture content of the sludge was between 65% and 43%, the sludge drying process was mainly in constant rate drying stage. The process was in deceleration stage when the moisture content was below 40%. The moisture content and the drying rate of the sludge increased as the feeder frequency (blade axis frequency) increased. The drying time of the sludge was mainly controlled by the blade axis. The moisture content demonstrated a significant impact on the combustion characteristics of the sludge. Mixing a small amount of sludge could improve the ignition of pulverized coal and promoted the combustion; however, it was important to note that large moisture content could acutely exacerbate the combustion characteristics.

Key words: paddle dryer; sludge drying; thermogravimetric test; moisture content; drying rate; combustion characteristics

目前,国家高度重视污泥的治理工作,2015 年 4 月国务院印发的“水十条”正式提出:污水处理设施产生的污泥应进行稳定化、无害化和资源化处置。但据不完全统计,目前我国污泥真正实现安全处置的比例不超过 20%,污泥无害化处置任重道远。

当前污泥的处理方法主要有卫生填埋、热化学处理和农用堆肥等几种方法,其中热处理包括干化、焚烧和热解。污泥热干化法可以显著降低污泥含水率及体积,为污泥的资源化利用及其他处置方式提供了前提条件。目前污泥热干化工艺众多,应用较多的为流化床干化、带式干化、桨叶式干化、卧式转盘式干化、立式圆盘式干化和喷雾干化等。其中空心桨叶式污泥干燥机是桨叶式干化常用设备,属于间接干化设备,具有设备结构紧凑、热效率高、污染物少、产品质量高等特点,且其技术成熟,在污泥干化中备受重视。马学文进行了污泥低温与高温干燥试验,发现这两种条件下污泥干燥过程存在区别^[1];易浩勇研究了小型桨叶干燥机中污泥的干燥效果,并计算了干燥机的传热系数^[2];马侠等对桨叶式干燥机进行了污泥干燥研究,分析了沿机身方向污泥的干燥效果^[3~5];王丹进行了污泥与煤混燃的热重试验研究,分析了污泥与煤的混燃特性^[6],但以上研究仍然不够全面。

笔者在前人研究的基础上,依托广东省某热电厂资源,建立了中试规模的污泥干化试验平台,此平台采用污泥半干化处理工艺,干化设备采用空心桨叶式干燥机,热源选取汽轮机中的蒸汽乏汽,研究了工业污泥在干燥机不同参数下的干化特性,并针对干燥机出口污泥典型含水率进行了污泥与煤的热重试验,以期为污泥在燃煤电厂中的无害化与资源化处置提供一定的数据支持。

1 试验材料与方法

1.1 污泥样品

干化试验所用污泥取自广东省某工业园区污水处理厂产生的含水率约为 65% 的污泥。此工业园区以印染、漂洗产业为主,产生的工业废水送至污水处理厂,产生的污泥经过浓缩、机械脱水(板框压滤脱水)、深度脱水等过程后,最终含水率达到 65% 左右。

热重试验选取干燥机出口污泥,经适当恒温干燥、碾磨、筛分制成粒径 $<200\ \mu\text{m}$ 的试样,含水率分

别为 0、20%、40%;同时选取该电厂煤粉制成粒径 $<200\ \mu\text{m}$ 的煤粉试样。二者的工业分析及元素分析结果(均以干基计)如下:煤粉的灰分、挥发分、固定碳含量分别为 16.210%、32.590%、51.200%,C、H、O、N、S 含量分别为 64.852%、3.724%、13.380%、1.045%、0.789%,发热量为 25.740 MJ/kg;污泥的灰分、挥发分、固定碳含量分别为 53.044%、46.735%、0.221%,C、H、O、N、S 含量分别为 21.880%、2.570%、18.450%、1.998%、2.058%,发热量为 7.061 MJ/kg。

1.2 试验设备

污泥干化试验平台及内部热轴桨叶分布情况见图 1,桨叶式污泥干燥机示意图 2。



图 1 污泥干化试验平台及内部热轴桨叶

Fig. 1 Sludge drying experiment platform and internal heat axis blades

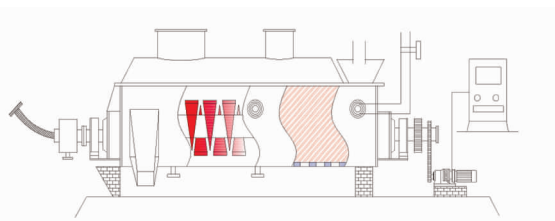


图 2 桨叶式干燥机示意

Fig. 2 Sketch map of paddle dryer

干化试验平台采用闭式干燥系统,干燥介质(热源)为蒸汽,干燥方式为中空内双轴桨叶式,采用绞龙给料机和连续式卸料方式,采用旋风除尘器及水膜除尘器除尘,出料方式为侧部自卸出料,设计产量为 200 kg/h。桨叶式干燥机的选型为 THG-2,其主要技术参数如下:干燥室长为 3 500 mm,干燥机外形尺寸为 6 500 mm \times 2 000 mm \times 1 800 mm (长 \times 宽 \times 高),操作温度为 250 $^{\circ}\text{C}$ 、出风温度为 80 \sim 90 $^{\circ}\text{C}$,传动功率 N 为 7.5 kW,装机功率为 12.5 kW,耗电量为 15 kW \cdot h/h,系统噪声满足相应国家标准要求,电源为 380 V、50 Hz 三相五线制交流电,

占地 25 m²。

试验平台干化工艺流程:由启动锅炉辅助蒸汽管道引出高温水蒸气进入桨叶式干燥机,含水率为65%左右的污泥由绞龙式进料机送入污泥干燥机,其中蒸汽与污泥不直接接触,干化污泥由干燥机上的污泥出口排至污泥收集装置,同时干燥过程中产生的废气经由旋风分离器和水膜除尘器处理后送至锅炉引风机,与空气一起送入锅炉参与燃烧,燃烧产生的尾气由热电厂的烟气处理系统处理后(脱硫、脱硝、除尘等)经烟囱排往大气;放完热的水蒸气因未受到污染,直接排往雨水井。

热重试验采用 NETZSCH STA 409PC 综合热分析仪,见图3。



1.热天平 2.质谱仪 3.水浴锅 4.电源控制器 5.电脑

图3 综合热分析仪

Fig.3 Integrated thermal analyzer (NETZSCH STA 409PC)

1.3 试验方案

污泥干化平台采用批式处理污泥,恒温干化试验,即一次试验处理一组污泥(约240 kg),同批次内连续给料,蒸汽流量恒定,温度恒定(约为150℃);试验在定压0.6 MPa下进行,通过改变进料机频率、桨叶轴频率、蒸汽流量3个参数控制出口污泥质量。试验参数选取如下:(进料机频率/桨叶轴频率)5 Hz/5 Hz、5 Hz/25 Hz、5 Hz/45 Hz、25 Hz/5 Hz、25 Hz/25 Hz、25 Hz/45 Hz、45 Hz/5 Hz、45 Hz/25 Hz、45 Hz/45 Hz,分别以W1、W2、W3、W4、W5、W6、W7、W8、W9表示9组参数下的出口污泥,测其含水率。HW0、HW20、HW40、HM0分别表示含水率为0%、20%、40%的污泥试样及煤粉试样。

热重试验采用40 μL的氧化铝坩埚,试样质量为(10±0.5) mg;氧气流量为30 mL/min,氮气流量为70 mL/min;升温速率为40℃/min,升温至1000℃并恒温5 min。综合分析我国热电厂协同处置污泥实例,将污泥的掺烧比例定为20%。

2 结果及分析

2.1 频率对含水率的影响

进料机频率(桨叶轴频率)恒定时污泥含水率的变化见图4。

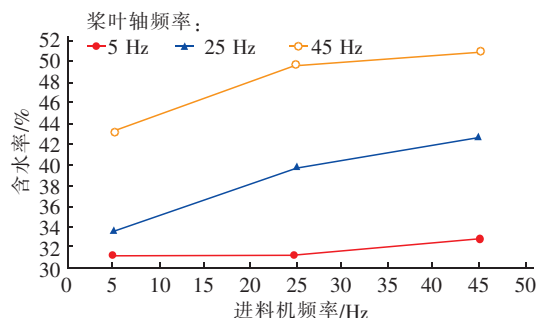


图4 频率恒定时污泥含水率的变化

Fig.4 Change of sludge moisture content with constant frequency

从图4可以看出,当进料机频率(桨叶轴频率)恒定时,出口污泥含水率随桨叶轴频率(进料机频率)的增大而增大,说明出口污泥含水率受进料机频率和桨叶轴频率的共同影响,其原因是桨叶片在污泥干化过程中发挥搅拌、传热和推动三大功能,而桨叶轴频率与叶片对污泥的推动作用成正比,同时污泥的进料速度与干燥机内的污泥体积成正比,而体积越大,叶片对污泥的推动作用越明显,因此进料机和桨叶轴共同影响污泥的干化时间。但从图4可以明显看出,桨叶轴频率变化20 Hz时,对应的含水率变化均值约为10%,而进料机频率变化20 Hz时,对应的含水率变化均值约为3%,尤其是桨叶轴频率为5 Hz时,进料机频率变化几乎不会引起出口污泥含水率的变化,说明桨叶轴频率对出口污泥含水率的影响更大,污泥在干燥机内的干化时间主要由桨叶轴控制,而据现场测定的污泥干化时间(W1、W2、W3、W4、W5、W6、W7、W8、W9对应的干化时间分别为116.53、73.00、46.00、100.27、58.26、34.62、74.00、47.07、32.00 min)也与此结论相同。造成此结果的原因是,污泥在干燥机内的运动主要依靠桨叶轴的转动,而进料机的速度大小改变的仅是污泥在干燥机内的体积及堆积程度,对污泥的运动并不发挥主要作用,尤其是当桨叶轴频率处于极值时,进料机频率的影响更被严重削弱。

2.2 频率对干化速率的影响

进料机频率(桨叶轴频率)恒定时污泥干化速率的变化见图5。可以看出,当桨叶轴频率(进料机

频率)恒定时,干化速率随进料机频率(桨叶轴频率)的增大而增大,但增大幅度越来越小,最后甚至出现了基本不变的趋势,说明当蒸汽流量及温度恒定时,适当增大桨叶轴和进料机频率有利于增大污泥的干化速率,可是频率的增加将导致污泥干化时间减少。因此在实际生产中,应首先确保出口污泥含水率符合要求,其次可适当增加桨叶轴或进料机频率,以增大干化速率,减少热量浪费,其中应首选增大进料机频率,因为二者对干化速率的影响差别不大,但桨叶轴频率变化将对干化时间产生较大影响,可能导致出口污泥含水率不符合要求。

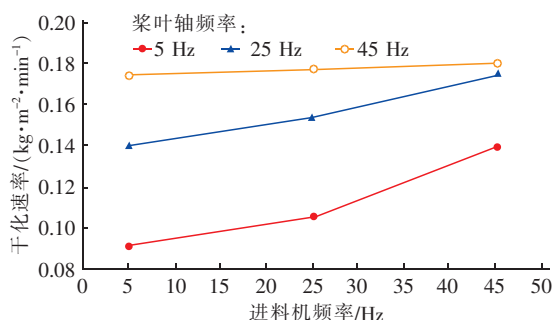


图 5 频率恒定时污泥干化速率的变化

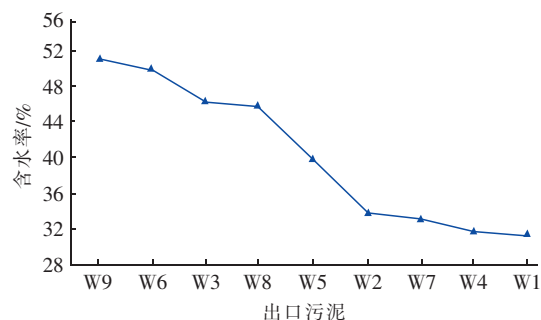
Fig. 5 Change of drying rate with constant frequency

2.3 干化时间对含水率和干化速率的影响

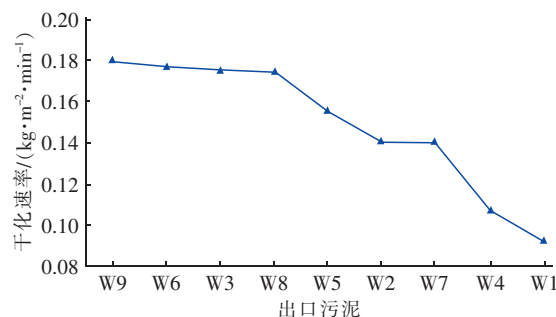
污泥干化过程可以分为 4 个阶段,预热阶段、恒速干化阶段、第一降速干化阶段、第二降速干化阶段^[7],由于干化时间对污泥的干化过程及出口污泥质量影响较大,因此按照干化时间由小到大的顺序将 9 组样品排序,即 $W9 < W6 < W3 \approx W8 < W5 < W2 \approx W7 < W4 < W1$ 。按干化时间排序的出口污泥含水率及干化速率分布情况见图 6。

由图 6 可以看出,随干化时间的增加,污泥含水率及干化速率总体上都呈现逐渐减小的趋势。含水率变化曲线可以分成 3 部分:第一部分为 $W9$ 、 $W6$ 、 $W3$,第二部分为 $W8$ 、 $W5$ 、 $W2$,第三部分为 $W2$ 、 $W7$ 、 $W4$ 、 $W1$,其中第二部分含水率下降比较明显,第一、三部分含水率降低较小,基本保持不变,并且第一、二部分之间存在明显的转折点 $W3$ 、 $W8$;干化速率变化曲线也可以分为 3 个部分:第一部分为 $W9$ 、 $W6$ 、 $W3$ 、 $W8$,第二部分为 $W8$ 、 $W5$ 、 $W2$,第三部分为 $W7$ 、 $W4$ 、 $W1$,其中第一部分干化速率基本不变,第二、三部分干化速率呈下降趋势,并且第二、三部分之间存在转折点 $W2$ 、 $W7$ 。可以看出,二者的三部分划分范围基本吻合。再结合各参数下污泥的干化时间可

知,虽然第一部分处于恒速干化阶段,干化速率较大,但是由于干化时间较短,污泥来不及过多干燥就被排出干燥机,因此导致出口污泥含水率变化较小;而第二部分含水率变化较大,是因为干化速率虽然处于下降阶段,但是较恒速干化阶段下降幅度有限,而干化时间却比恒速干化阶段大大增加,污泥有充分的时间在干燥机内干化;第三部分虽然干化时间更充分,但由于干化速率较小,且下降较快,最终导致含水率几乎没有发生变化。至于图中出现的转折点是因转折点处干化速率基本没有变化,但桨叶轴及进料机频率变化较大,干化时间出现了大幅改变,致使曲线出现了转折点。



a. 按干化时间排序的污泥含水率变化曲线



b. 按干化时间排序的干化速率变化曲线

图 6 按干化时间排序的含水率与干化速率变化曲线

Fig. 6 Change curve of moisture content and drying rate sorting by drying time

结合图 6(b) 及上述污泥干化过程的 4 个阶段,可以认为:第一部分($W9$ 、 $W6$ 、 $W3$ 、 $W8$)以恒速干化阶段为主,甚至没有达到第一降速干化阶段;第二部分($W8$ 、 $W5$ 、 $W2$)以第一降速干化阶段为主;第三部分($W7$ 、 $W4$ 、 $W1$)以第二降速干化阶段为主;试验中污泥干化过程均没有预热阶段。再对比图 6(a) 中的含水率,发现出口污泥含水率在 65% ~ 43% 时,污泥干化过程以恒速干化阶段为主,含水率 < 40% 时则以降速干化阶段为主。

2.4 热重试验曲线

根据热天平试验数据绘制了不同含水率污泥的失重曲线(TG)和失重速率曲线(DTG),见图7。从图7(a)可以看出,污泥燃烧失重分为3个阶段:第一个失重阶段温度为室温~200℃,失重主要由污泥中水分蒸发引起;第二个失重阶段温度为200~700℃,由于挥发分析出燃烧及有机物分解导致污泥质量急剧减小,是污泥燃烧过程中最主要的失重阶段;第三个失重阶段温度为750℃左右,失重主要由一些沸点较高的大分子有机物析出和焦炭燃尽引起。此外,污泥含水率越大,最终质量损失越多,这是因为相同质量的试样含水率越高,其他成分含量相应越少,而试样中水分最先蒸发且不会留下产物,因此导致质量损失增大。

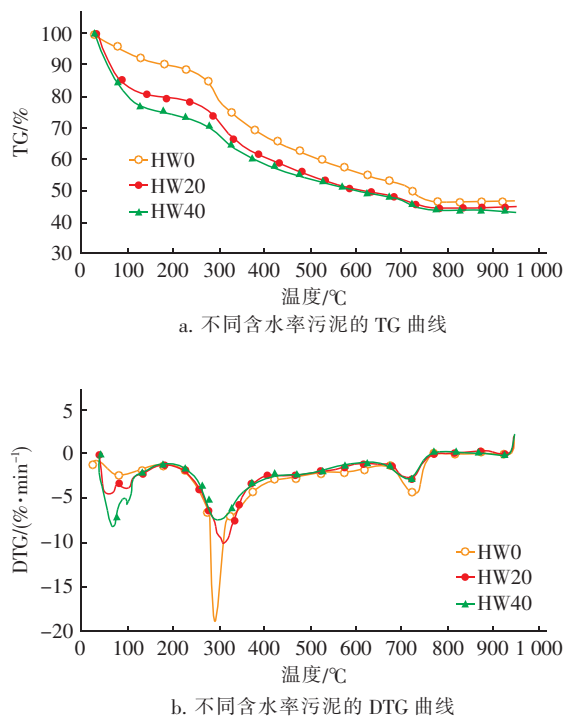


图7 不同含水率污泥的TG和DTG曲线

Fig. 7 TG and DTG curves of different moisture content sludge

图7(b)中3个试样均存在3个失重峰,结合图7(a)污泥失重阶段可以推断第一个失重峰为水分的蒸发阶段、第二个为挥发分的析出燃烧阶段、第三个为焦炭等的燃烧阶段,而第一个失重峰随含水率的增大而增大,即水分蒸发对质量减少的作用也越明显,也进一步表明了此失重峰由水分蒸发引起。

污泥掺烧的TG和DTG曲线见图8。由图8(a)

可以看出,由于掺烧比例为20%,污泥含水率变化引起的失重变化并不明显,甚至干化污泥和含水率为20%的污泥失重曲线出现了重合现象;但是相对于煤粉单独燃烧则失重效果差异比较明显,因为20%的污泥掺烧比例已足够改变煤粉的某些燃烧特性,这也与实际热电厂协同处置污泥时掺烧比例普遍较低相对应。从图8(b)可以看出,污泥掺烧失重速率曲线也存在三个失重峰,相比污泥单独燃烧时,失重峰不明显,说明试样燃烧速率主要取决于煤粉燃烧,燃烧物质主要以固定碳为主。

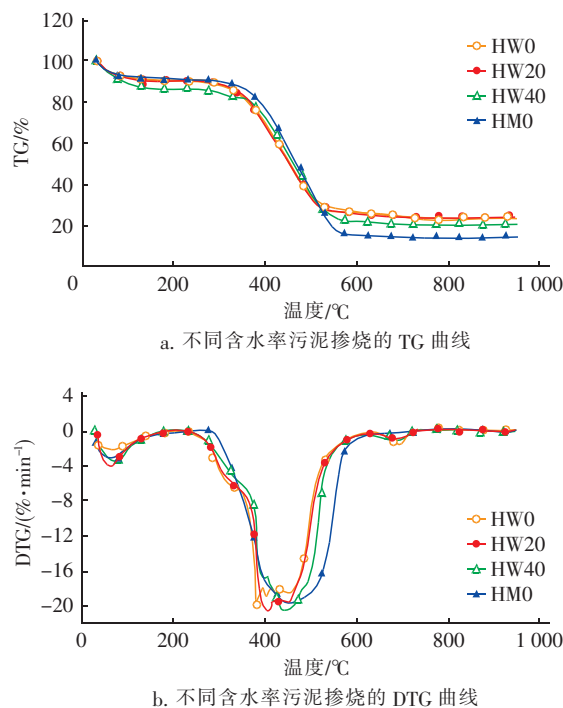


图8 不同含水率污泥掺烧的TG和DTG曲线

Fig. 8 TG and DTG curves of blending different moisture content sludge

2.5 含水率对着火特性的影响

选取着火温度 T_i 、最大燃烧速率对应温度(峰值温度) T_p 、燃尽温度 T_b 作为特征参数反映着火特性。其中 T_i 和 T_b 采用TG-DTG切线法来确定^[8],即过DTG曲线峰值作垂线与TG曲线相交,过交点作TG曲线的切线,该切线与失重开始平行线的交点所对应的温度定义为着火温度 T_i ,与失重结束平行线的交点所对应的温度即为燃尽温度 T_b , T_p 直接由图7(b)和图8(b)的DTG曲线读取。当污泥含水率较高时,试样的TG曲线处于“急剧下降、平缓下降、急剧下降”的趋势,见图7(a),其中第一个急

剧下降段是水分的蒸发导致的,第二个急剧下降段由挥发分等易燃物质的燃烧失重引起,因此应用 TG-DTG 切线法求着火温度时,TG 曲线上第二急剧下降段起点的平行线与 TG 切线的交点才是着火温度。

不同含水率污泥着火特性参数对比曲线见图 9,不同含水率污泥掺烧着火特性参数对比曲线见图 10。

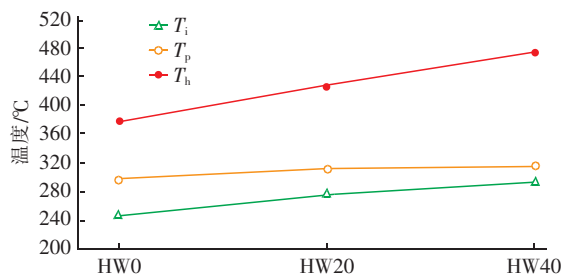


图 9 不同含水率污泥着火特性参数对比曲线

Fig. 9 Comparison curves of ignition characteristics of different moisture content sludge

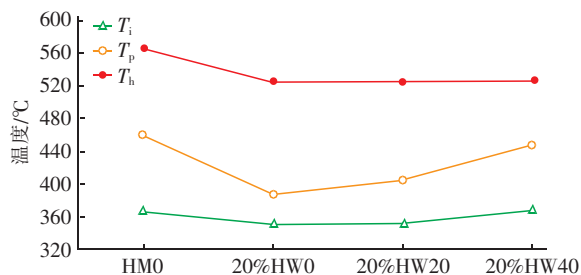


图 10 不同含水率污泥掺烧着火特性对比曲线

Fig. 10 Comparison curves of ignition characteristics of blending different moisture content sludge

由图 9 可以看出,随着含水率的增加,污泥着火温度、极值温度、燃尽温度都发生了不同程度的增大,说明水分阻止了污泥的着火和燃尽,导致了三者的上升。由图 10 可以看出,随着含水率的增加,掺烧 20% 污泥后着火温度、极值温度、燃尽温度逐渐增大,且着火温度和极值温度上升比较明显,而燃尽温度几乎没有变化,因为水分的增加必然会阻止试样的着火和燃烧,这就使着火和极值温度变大,但随着反应的进行,水分逐渐蒸发消失,导致后期固定碳的燃尽阶段几乎不受水分的影响,因此燃尽温度不变。同时从图 10 还可以看出,掺烧含水率不同的污泥后,试样着火温度、极值温度、燃尽温度都比煤粉单独燃烧低,说明掺烧少量含水率较低的污泥有助于煤粉的着火特性,但是随着污泥含水率的增大,着

火温度和极值温度差距减小,燃尽温度基本不变,尤其是含水率达到 40% 时,着火温度和极值温度几乎与煤粉单独燃烧时一样。燃尽温度不变主要是由于少量水分影响不到后期固定碳的燃烧,如果含水率持续上升,那么燃尽温度必然会上升。由污泥的工业分析得出,污泥含有大量的挥发分,当污泥含水率较小时,挥发分对掺烧发挥主要作用,导致较低的着火温度、极值温度、燃尽温度,但随着水分的增加,挥发分发挥的作用越来越小,水分发挥主要作用,此时着火温度、极值温度将大于煤粉单独燃烧时的温度。

2.6 含水率对综合燃烧特性的影响

综合燃烧特性指数 S 全面反映了试样的着火和燃尽性能, S 越大说明燃料的综合燃烧性能越好,因此采用 S 来研究试样的综合燃烧性能^[9]。

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

式中, $(dw/dt)_{\max}$ 为最大燃烧速率, %/min; $(dw/dt)_{\text{mean}}$ 为平均燃烧速率, %/min。

计算得到 HM0、HW0、HW20、HW40、20% HW0、20% HW20、20% HW40 的 S 值分别为 1.085×10^6 、 2.135×10^6 、 0.717×10^6 、 0.456×10^6 、 1.171×10^6 、 1.129×10^6 、 1.075×10^6 $\%^2/(\text{min}^2 \cdot \text{C}^3)$ 。通过比较不同含水率的污泥与煤粉的综合燃烧特性指数,发现干污泥的综合燃烧特性指数大于煤粉,且几乎是煤粉的两倍,但是随着含水率的增加,污泥的综合燃烧特性指数急剧下降,甚至含水率为 20% 时就已低于煤粉的综合燃烧特性指数,说明含水率对污泥的综合燃烧特性指数具有较大影响。

比较掺烧污泥后试样的综合燃烧特性指数,发现掺烧干污泥和含水率为 20% 的污泥都比煤粉单独燃烧时综合燃烧特性指数大,说明掺烧污泥确实可以改善煤粉的着火,并促进燃烧。但是当污泥含水率达到 40% 时,掺烧污泥时的综合燃烧特性指数已经低于煤粉单独燃烧时,不过差值较小,仅为 0.01×10^6 $\%^2/(\text{min}^2 \cdot \text{C}^3)$,对比含水率为 40% 的污泥与煤粉都单独燃烧时的差值,发现差值大大减小,因为污泥含量较低(20%)且污泥中含有大量的挥发分,抵消了含水率对煤粉综合燃烧特性指数的不利影响,但随着污泥含水率及掺烧量的增加,混合试样的燃烧特性指数势必会急剧减小。

3 结论

① 干化试验平台出口污泥含水率及干化速率

随进料机频率(桨叶轴频率)的增大而增大,其中桨叶轴频率对出口污泥含水率起主要作用,污泥在干燥机内的干化时间主要由桨叶轴控制。

② 污泥在桨叶式干燥机内的干化过程分为恒速干化阶段、第一降速干化阶段、第二降速干化阶段,没有预热阶段。

③ 出口污泥含水率为65%~43%时,干燥机内的污泥干燥过程以恒速干化阶段为主,含水率<40%时则以降速干化阶段为主。

④ 污泥与煤粉掺烧时存在三个失重峰,其中第一个失重峰为水分的蒸发阶段、第二个为挥发分的析出燃烧阶段、第三个为焦炭等的燃烧阶段。

⑤ 掺烧少量含水率较低的污泥可以改善煤粉的着火特性,但是污泥的含水率越大,改善效果则越差。

⑥ 含水率对污泥的综合燃烧特性指数具有较大影响,掺烧少量污泥可以改善煤粉的着火并促进燃烧,但当掺烧含水率较大的污泥时,综合燃烧特性急剧变差,这一点应引起重视。

参考文献:

- [1] 马学文. 城市污泥干燥特性及工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Ma Xuewen. Research on Drying Characteristics and Technology of Sewage Sludge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 (in Chinese).
- [2] 易浩勇. 污泥干燥特性及干燥过程研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
Yi Haoyong. Investigation on the Drying Characteristics and Drying Process of Sludge [D]. Nanjing: Southeast University, 2006 (in Chinese).
- [3] 马侠, 蒋旭光, 马增益, 等. 桨叶式干燥机污泥干燥试验研究[J]. 能源工程, 2006, (3): 57-60.
Ma Xia, Jiang Xuguang, Ma Zengyi, et al. Experimental study on drying sewage sludge with paddle dryer [J]. Energy Engineering, 2006, (3): 57-60 (in Chinese).
- [4] 申维真, 张宏伟, 张羽. 城市污泥桨叶式干化优化实验研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4575-4580.
Shen Weizhen, Zhang Hongwei, Zhang Yu. Experiments on optimization of sewage sludge drying by paddle dryer [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(11): 4575-4580 (in Chinese).
- [5] 徐小宁, 邓文义, 李晓东. 污泥在桨叶式干燥机内干化特性研究[J]. 能源工程, 2007, (3): 53-55.
Xu Xiaoning, Deng Wenyi, Li Xiaodong. Drying characteristics of sewage sludge in paddle dryer [J]. Energy Engineering, 2007, (3): 53-55 (in Chinese).
- [6] 王丹. 煤与污泥的混燃特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Wang Dan. Study on the Co-combustion Characteristics of Coal and Sewage Sludge [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011 (in Chinese).
- [7] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Pan Yongkang, Wang Xizhong, Liu Xiangdong. Modern Drying Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007 (in Chinese).
- [8] 周英彪, 范杜平, 段权鹏, 等. 基于热天平着火温度的新方法[J]. 电站系统工程, 2007, 23(3): 29-31.
Zhou Yingbiao, Fan Duping, Duan Quanpeng, et al. A new method for temperature of the kindling point based on thermal balance [J]. Power System Engineering, 2007, 23(3): 29-31 (in Chinese).
- [9] Scheffknecht G, Al-Makhadmeh L, Schnell U, et al. Oxy-fuel coal combustion—A review of the current state-of-the-art [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(1): 16-35.



作者简介:曹通(1989-), 男, 河北保定人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为燃煤电厂污泥的无害化与资源化处置。

E-mail: caotong2014@163.com

收稿日期: 2017-10-12