

不同氧气浓度和粒径下工业污泥燃烧特性的实验研究

闫云飞, 张 磊, 张 力, 唐 强

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030)

摘 要: 在不同氧气浓度和样品粒径条件下, 采用热重分析法对 3 种不同行业的工业污泥进行了实验研究。结果表明, 工业污泥着火和燃烧特性好、着火温度低, 但燃烧不剧烈, 综合燃烧性能不高。适当增加氧气浓度, 燃烧非基元反应增多, 着火和燃尽性能改善。粒径大小对气体的扩散和热传导有较大影响, 随着粒径减小, 反应区间变窄, 失重量增加, 燃烧失重速率峰值增大。

关 键 词: 工业污泥; 热重分析; 燃烧特性; 氧浓度; 粒径
中图分类号: X703; TQ038.1 文献标识码: A

引 言

工业污泥中含有大量的病原菌、寄生虫等致病物质以及二噁英、放射性核素等难以降解的有毒物质, 若处置不当, 不仅会占用大量土地, 而且会对地下水、生态环境等造成二次污染。如何使污泥减量化、无害化和资源化已成为国内研究的热点。何艳峰等人对污水污泥的燃烧及动力学特性进行了研究^[1], 采用分阶段模型描述燃烧特性, 所得出的实验值与计算值一致。谭雷等人在空气气氛下应用热重质谱联用仪得出了污泥燃烧各阶段的动力学参数^[2]。丘纪华等人对污泥的焚烧产物进行了电镜扫描和能量发散光谱分析^[3]。冉景煜等人通过实验分析得出混合工业污泥的燃烧及动力学特性^[4-5], 并分析了含金属氧化物对工业污泥燃烧特性的影响, 发现含不同金属元素化合物对于污泥燃烧的催化机制和作用有差异性。万嘉瑜等人研究了城市污泥在不同氧气浓度下的动力学特性^[6], 发现氧气浓度对污泥燃烧的影响主要发生在氧浓度 $\leq 50\%$ 且温度高于 380°C 的范围。但是对工业污泥的燃烧影响因素研究较少。

为了有效的处理工业污泥, 利用热重法分析了 3 种工业污泥的燃烧特性, 研究了氧气浓度和粒径大小对工业污泥燃烧特性的影响。对此展开的研究

对优化污泥焚烧技术十分必要, 以期工业污泥无害化、资源化提供理论和实验依据。

1 实验

1.1 试验装置

实验采用 ZRY-1P 型综合热分析仪。主要技术参数: 室温 $-1\ 000^\circ\text{C}$; 测重系统最大负载: 2 g; 最大分度值: 10 μg ; 升温速率: $0.1 \sim 30^\circ\text{C}/\text{min}$;

1.2 试验样品及成份分析

实验采用重庆 3 种不同行业的工业污泥, 样品编号: 1. 废水处理厂污泥; 2. 造纸污泥; 3. 制药污泥。污泥样品提前在干燥箱内 105°C 下干燥 24 h。经过研磨、筛分出粒径 40 目、80 目和 200 目 3 种粒度级别的样品。实验条件: 压力 0.1 MPa, 升温速率 $15^\circ\text{C}/\text{min}$, 由室温加热到 950°C 。污泥样品的工业分析如表 1 所示, 可以看出, 工业污泥具有高挥发分、高灰分、低固定碳及低热值等特点。

表 1 污泥的工业分析(%)和热值分析(kJ/kg)

Tab. 1 Industrial and heating value analysis of the sludge

序号	M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}	$Q_{net, ad}$
1	3.71	33.02	61.16	2.11	5007.98
2	4.62	39.26	52.54	3.58	8649.38
3	7.12	45.69	40.97	6.22	10659.43

表 2 实验工况

Tab. 2 Operating conditions under the test

工况	样品序号	氧气浓度/%	粒径大小/目
1	1、2、3	20	80
2	2	10、20、40	80
3	3	20	40、80、200

收稿日期: 2012-01-13; 修订日期: 2012-03-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费基金资助项目(CDJZR10140011); 重庆市自然科学基金重点基金资助项目(2009BA6067)。

作者简介: 闫云飞(1978-)男, 河南平顶山人, 重庆大学副教授。

低,但挥发分燃烧不剧烈,频率因子也较小;高温段为固定碳燃烧阶段,因固定碳不易燃烧,此时挥发分燃烧殆尽,放出热量减少,所需活化能较大,固定碳燃烧剧烈,频率因子较高。随着挥发分的增加,频率因子增大,活化能略有增加。固定碳含量越高,燃烧所需活化能越高,频率因子越大。

3.2 氧浓度对工业污泥燃烧动力学特性的影响

燃烧初期是水分析出阶段,由于试样里水分很少,所消耗活化能较小,这一阶段氧气浓度对工业污泥的影响较小。随着温度升高,氧浓度的增加对工业污泥的活化能和频率因子均有影响,如表7所示。随着氧气浓度的增加,反应向低温端偏移,反应区间变窄,各阶段对应的活化能和频率因子呈上升趋势。表明随着氧气浓度的增加,活化能和频率因子均增大。随着氧浓度的增加,着火提前,反应向低温端进

行,参加反应的非均相基元反应增多,同时对于单个分子,氧浓度的增加不能降低它的活化能,反而导致反应所需要的活化能增大。随着氧浓度的增加,总体反应剧烈程度加大,频率因子增大。

3.3 粒径对工业污泥燃烧动力学特性的影响

污泥燃烧的活化能和频率因子也会随着污泥粒径大小发生变化,如表8所示。随着粒径的减小,挥发分析出燃烧阶段和固定碳燃烧阶段反应温度提前,温度区间变窄。随着粒径的减小,各阶段燃烧所需要的活化能减小,频率因子增大。粒径对气体的扩散和热传导有较大影响,粒径越大,反应比表面积减小,燃烧越不易进行,对燃烧产物逸出的阻力也越大,且影响内部热量传递,所以粒径越大,所需活化能越大,粒径越大,反应剧烈程度减弱,频率因子越小。

表6 实验工业污泥的动力学参数

Tab. 6 Kinetic parameters of the industrial sludge under the test

编号	温度区间/°C	拟合方程	相关系数	$E/kJ \cdot mol^{-1}$	A/min^{-1}
1	150 ~ 375	$Y = -9.1403 - 1755X$	0.9886	14.589	0.125
	581 ~ 737	$Y = -7.1644 - 3430X$	0.9549	28.517	1.453
2	167 ~ 383	$Y = -7.6507 - 1987X$	0.9382	16.52	0.527
	383 ~ 540	$Y = -6.6071 - 6577X$	0.9724	54.68	2.861
3	177 ~ 391	$Y = -6.9114 - 2389X$	0.9879	19.86	1.115
	391 ~ 521	$Y = -5.8279 - 9577X$	0.9968	79.63	8.317

表7 氧气浓度对实验工业污泥动力学参数的影响

Tab. 7 Influence of the oxygen concentration on the dynamic parameters of the industry sludge

浓度/%	温度区间/°C	拟合方程	相关系数	$E/kJ \cdot mol^{-1}$	A/min^{-1}
10	186 ~ 392	$Y = -8.1846 - 1715X$	0.9852	14.26	0.457
	392 ~ 579	$Y = -7.1351 - 6149X$	0.9925	55.12	1.625
20	175 ~ 391	$Y = -7.5532 - 1982X$	0.9837	16.48	0.591
	391 ~ 547	$Y = -6.5943 - 6778X$	0.9919	56.35	2.968
40	160 ~ 337	$Y = -6.3416 - 2159X$	0.9985	17.95	1.841
	375 ~ 512	$Y = -6.3217 - 7231X$	0.9849	60.12	4.053

4 结 论

(1) 工业污泥具有高挥发分和低固定碳等特点,其综合燃烧特性不是很好。工业污泥中并非挥发分含量越高,其综合燃烧性能就越好,综合燃烧特性还与挥发分成分和含碳量有关。另外,工业污泥着火温度不仅仅与挥发分的含量有关,还与污泥的

水分、灰分等其它成份含量有关。

(2) 随着氧气浓度增大,热重曲线向低温端偏移,最大反应速率增大,着火性能得到改善,燃尽性能力和综合燃烧特性提高。随着氧气浓度的增大,燃烧各阶段所需活化能和频率因子呈上升趋势。

(3) 随着粒径的减小,工业污泥各燃烧特征温度减小,反应区间变窄,失重量增加,燃烧失重速率峰值增大。粒径越小,燃烧越有利于进行,越有利于

着火。随着粒径的减小,燃烧各阶段所需活化能减小,频率因子增大。

表8 粒径大小对实验工业污泥动力学参数的影响

Tab.8 Influence of the particle diameter on the dynamic parameters of the industry sludge

粒径/目	温度区间/℃	拟合方程	相关系数	$E / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	A / min^{-1}
40	189 ~ 438	$Y = -8.290 - 3045X$	0.9838	25.32	0.311
	438 ~ 541	$Y = -6.3891 - 10198X$	0.9959	84.79	5.036
80	176 ~ 401	$Y = -6.8950 - 2381X$	0.9841	19.80	1.142
	401 ~ 517	$Y = -5.7208 - 9683X$	0.9856	80.51	9.347
200	150 ~ 350	$Y = -6.2288 - 1896X$	0.9947	15.76	2.037
	350 ~ 497	$Y = -5.4617 - 8764X$	0.9828	72.86	11.063

参考文献:

- [1] 何艳峰,卓建坤,李水清,等. 污水污泥的燃烧特性及动力学研究[J]. 热能动力工程 2011 26(5): 609 - 614.
HE Yan-feng, ZUO Jian-kun, LI Shui-qing, et al. Combustion characteristics and dynamic study of sewage water and sludge [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. 2011, 26(5): 609 - 614.
- [2] 谭雷,李辉,夏菁,等. 污泥燃烧动力学特性的研究[J]. 武汉科技大学学报 2010 33(2): 210 - 213.
TAN Lei, LI Hui, XIA Wei, et al. Research of the combustion dynamic characteristics of sludge [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology 2010 33(2): 210 - 213.
- [3] 丘纪华,程纪东. 污泥的焚烧特性和化学动力学分析[J]. 华中科技大学学报 2005 33(58): 25 - 26.
QIU Ji-hua, CHENG Ji-dong. Incineration characteristics of sludge and its chemical dynamic analysis [J]. Journal of Central China University of Science and Technology 2005 33(58): 25 - 26.
- [4] 王裕明,胡建红,冉景煜,等. 混合工业污泥燃烧及动力学特性实验研究[J]. 中国电机工程学报 2007 22(17): 44 - 50.
WANG Yu-ming, HU Jian-hong, RAN Jing-yu, et al. Experimental study of the combustion and dynamic characteristics of blended industrial sludge [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2007 22(17): 44 - 50.

- [5] 冉景煜,王裕明,闫云飞,等. 含金属元素化合物和压力对工业污泥燃烧特性的影响[J]. 环境科学学报 2008 28(1): 108 - 113.
RAN Jing-yu, WANG Yu-ming, YAN Yun-fei, et al. Effect of the metal element-contained compounds and pressure on the combustion characteristics of industrial sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2008 28(1): 108 - 113.
- [6] 万嘉瑜,金余其,池涌. 不同氧浓度下城市污泥燃烧特性及动力学分析[J]. 中国电机工程学报 2010 30(5): 35 - 40.
WAN Jia-yu, JIN Yu-qi, CHI Yong. Study of combustion characteristics and kinetic analysis of municipal sludge at various oxygen concentrations [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2010 30(5): 35 - 40.
- [7] Shen Bo-xiong, Liu De-chang, Lu Ji-dong. Study on ignition and combustion of petroleum coke [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals 2000 3(10): 60 - 64.
- [8] 杨琳,冉景煜. 几种典型工业污泥及混合物热解特性影响因素[J]. 重庆大学学报 2010 33(10): 42 - 49.
YANG Lin, RAN Jing-yu. Factors influencing the pyrolytic characteristics of several kinds of typical industrial sludge and their mixtures [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(10): 42 - 49.

(陈滨 编辑)

敬告读者

《热能动力工程》2012年第5期536~539页图中英文及参考文献中的英文未经本刊英文编审校,为论文作者原稿刊登。特此说明。

——本刊编辑部

lege of Electronic Information ,Jiangsu University of Science and Technology ,Zhenjiang ,China ,Post Code: 212003) ZHU Xin-jian (Fuel Cell Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(6) . - 721 ~ 725

The operation temperature of a proton exchange membrane fuel cell has an important influence on its power generation performance and service life. However ,due to the nonlinear and time-variation characteristics of the PEMFC ,it is relatively difficult for the traditional control tactics to achieve excellent temperature control performance. The authors recommended that a regressive fuzzy neural network controller (RFNNC) with a fuzzy reasoning μ -line learning and dynamic mapping ability should be used to effectively control the operation temperature of PEMFCs in an allowable range. Based on the energy conservation law ,a dynamic model for PEMFCs was established. The error reverse transfer technology was employed to perform a self-adaptive adjustment of the parameters of the controller in question. The simulation test results show that the RFNNC only needs 35 seconds to attain a stable state with a relatively small fluctuation. A comparison of the control effectiveness of a RFNNC ,PI control and fuzzy control indicates that the RFNNC recommended for use has a relatively good temperature tracking performance. **Key words:** proton exchange membrane fuel cell(PEMFC) ,thermal model ,regressive fuzzy neural network (RFNN) ,temperature control

不同氧气浓度和粒径下工业污泥燃烧特性的实验研究 = **Experimental Study of the Combustion Characteristics of Industrial Sludge at Various Oxygen Concentrations and Particle Diameters** [刊 汉]/YAN Yun-fei , ZHANG Lei ,ZHANG Li ,TANG Qiang (Education Ministry Key Laboratory on Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems ,College of Power Engineering ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400030) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(6) . - 726 ~ 731

Under the condition of various oxygen concentrations and particle diameters of the sample ,the thermogravimetric analytic method was used to conduct an experimental study of industrial sludge in three different industrial sectors. It has been found that the industrial sludge has good ignition and combustion characteristics and a low ignition temperature but its combustion is not intense and has low comprehensive combustion performance. To properly increase the oxygen concentration will increase the non-elementary reactions in the combustion and improve the ignition and burn-out performance of the combustion. The particle size has a big influence on the diffusion of gases and heat transfer. With a decrease of the particle diameter ,the reaction interval will be narrowed and with an increase of the weight loss ,the combustion weight loss rate peak value will also increase. **Key words:** industrial sludge ,thermogravimetric analysis ,combustion characteristics ,oxygen concentration ,particle diameter