

# 造纸污泥与污水污泥的表观干燥动力学研究

楼 波, 钱 炜, 武德智

(华南理工大学 电力学院 广东省绿色能源技术重点实验室 广东 广州 510640)

**摘 要:** 对污泥处理采用表观干燥动力学研究是具有重要的应用指导意义。通过对相同比表面积  $3.24 \text{ cm}^2/\text{g}$  的造纸污泥与污水污泥在 4 种不同的温度(30、70、102、130℃) 条件下进行实验对比, 并进行动力学方程拟合。结果表明: 干燥速率常数  $k$  是污泥干燥动力学研究中一个重要参数, 造纸污泥的干燥速率常数比污水污泥的大; 造纸污泥与污水污泥的活化能分别为 26.847 和 27.423 kJ/mol, 污水污泥的活化能比造纸污泥活化能稍大, 这与污水污泥粘性较大有关。

**关 键 词:** 造纸污泥; 污水污泥; 干燥动力学; 活化能; 干燥速率

中图分类号: TU992.3 文献标识码: A

## 引 言

污泥在现有燃煤锅炉或者垃圾炉中焚烧处理是目前较有前景的方式之一。

文献 [1] 对污水污泥和造纸污泥干燥特性做了对比试验研究, 认为相同温度下的造纸污泥百分失水速率均比污水污泥的百分失水速率约大  $0.01\% / \text{s}$ 。刘凯等人通过造纸污泥薄层干燥实验, 考察了温度对造纸污泥干燥特性的影响, 引入薄层干燥模型对污泥干燥动力过程进行模拟, 结果表明泥层越薄和干燥温度越高, 污泥的干燥速率越快<sup>[2]</sup>。李爱民等人利用热重差热分析仪对污水污泥干燥过程中的质量、失重率, 含水率和热量随温度和加热时间的变化特性进行研究, 结果显示不同样品在同一升温速率下, 失重率、含水率和热量等曲线变化趋势基本相同, 但升温速率对干燥过程有明显影响<sup>[3]</sup>。

本研究主要针对造纸污泥与污水污泥的表观干燥动力学进行实验研究, 引用定温热分析动力学方法来分析污泥<sup>[4]</sup>, 研究污泥干燥失重曲线及污泥偏差活化能等干燥动力特性。

## 1 实验装置及方法

实验所用造纸污泥来源于广州某造纸厂污水处理中段污泥, 污泥呈深灰色、柔软、有恶臭味; 污水污泥取自广州某污水处理厂, 污泥呈褐色块状。实验装置和污泥干燥实验系统如图 1 所示。实验操作流程为: 用电子天平称量污泥样品, 每种污泥在 30、70、102 和 130 ℃ 4 种温度中各提取 4 g, 比表面积为  $3.24 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 然后设定干燥箱干燥温度, 打开计算机设定数据采集程序的初始参数, 待干燥箱温度达到设定值之后放入样品, 并启动数据采集程序采集污泥失重数据。

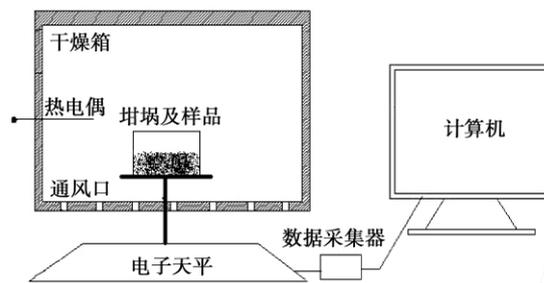


图 1 污泥干燥实验装置

Fig. 1 Sludge drying test device

## 2 干燥动力学分析及实验结果

为研究污泥表观干燥动力学, 引用定温热分析动力学方法来分析污泥的干燥失重曲线<sup>[4]</sup>。干燥率的物理意义为污泥在任意时刻已失水分的质量与总失水质量的比值, 即:

$$a = (W_1 - W_i) / (W_1 - W_2) \quad (1)$$

式中:  $W_1$ —干燥污泥的初始质量, kg;  $W_i$ —干燥至  $i$

收稿日期: 2011-08-01; 修订日期: 2011-10-24

基金项目: 广州市应用基础研究专项基金资助项目(7421154389972)

作者简介: 楼 波(1965-) 男, 浙江义乌人, 华南理工大学副教授, 博士。

时刻的污泥质量, kg;  $W_2$ —污泥干燥结束时的质量, kg。

引入化学反应动力学理论, 把干燥过程的水视为由扩散控制的反应产物则由质量作用定律和 Arrhenius 方程得:

$$da/dt = A \exp(-E/RT) f(a) \quad (2)$$

定义  $g(a) = \int_0^a \frac{da}{f(a)}$  根据定温热分析动力学

理论, 方程可转化为:

$$g(a) = \int_0^a A \exp(-E/RT) dt = kt \quad (3)$$

式中:  $A$ —频率因子;  $E$ —表观活化能, kJ/mol;  $R$ —摩尔气体常数, J/(mol · K);  $k$ —速率常数;  $t$ —时间, min;  $T$ —干燥箱内的环境空气温度, K。

采用微分法对式 (2) 两边取对数, 得:

$$\ln [(da/dt) / f(a)] = \ln A - E / (RT) \quad (4)$$

Sestak 给出了  $f(a)$  的一般形式<sup>[5]</sup>:

$$f(a) = a^m (1-a)^n [-\ln(1-a)]^p \quad (5)$$

其中, 指数  $m$ 、 $n$  和  $p$  根据反应系统不同其反应机理组合不同。通过比较计算选择合适的表达式  $f(a)$  使  $f(a)$  与干燥时间  $t$  的线性相关性最好, 并令:

$$x = 1/T \quad y = \ln [(da/dt) / f(a)]$$

则有:

$$y = cx + b \quad (6)$$

式中:  $c = -E/R$   $b = \ln A$ 。其中活化能  $E = -cR$ 。

在某一温度下, 对污泥恒温干燥得到干燥失重曲线图 2 ~ 图 5 实验值, 根据常用的固体反应的  $g(a)$  积分曲线方程来拟合干燥率  $a$  与时间  $t$  的关系。采用一级反应模型将导致确定的反应动力学参数存在较大的误差, 因而采用最概然机理函数的推断<sup>[6]</sup>, 选取使  $g(a) \sim t$  直线线性最佳的  $g(a)$  式作为合适的机理函数, 斜率  $k$  代表干燥速率常数。引入线性决定系数  $R^2$  来评价自变量  $x$  和因变量  $y$  的线性相关度。

对比不同温度的污泥失重曲线发现, 对于  $g(a)$  小于 0.8 时实验曲线趋于线性分布, 而大于 0.8 后的曲线段偏离线性分布。通常情况, 干燥率为 80% 的污泥已经足以满足污泥焚烧的要求, 所以图 2 至图 5 的拟合曲线主要针对  $g(a)$  小于 0.8 拟合的。

通过对不同的机理函数计算表明<sup>[5]</sup>, 方程  $g(a) = 1 - (1-a)^{1/2}$  所拟合的线性相关性最好, 因此, 选择  $g(a) = 1 - (1-a)^{1/2}$  为污泥恒温干燥的拟合函数。

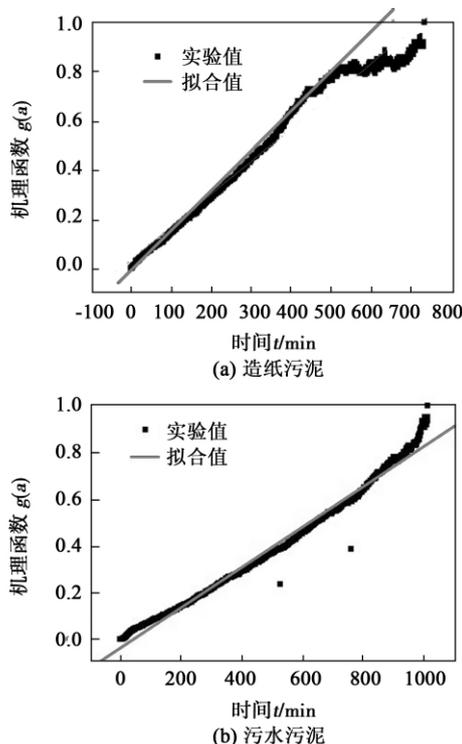


图 2 污泥 30°C 时  $g(a) \sim t$  实验、拟合曲线  
Fig. 2 Sludge  $g(a) \sim t$  test and fitting curves at 30°C

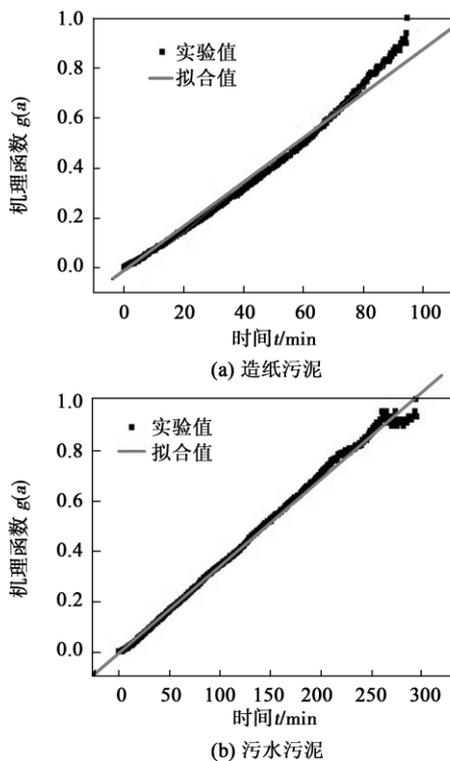


图 3 污泥 70°C 时  $g(a) \sim t$  实验、拟合曲线  
Fig. 3 Sludge  $g(a) \sim t$  test and fitting curves at 70°C

污泥在 4 个不同温度下所得拟合曲线如图 2 ~ 图 5 所示。同时得到不同温度下污泥干燥速率常数和决定系数  $R^2$  及拟合函数如表 1 和表 2 所示。 $\ln k$  与  $1/T$  的实验拟合曲线如图 6 所示。

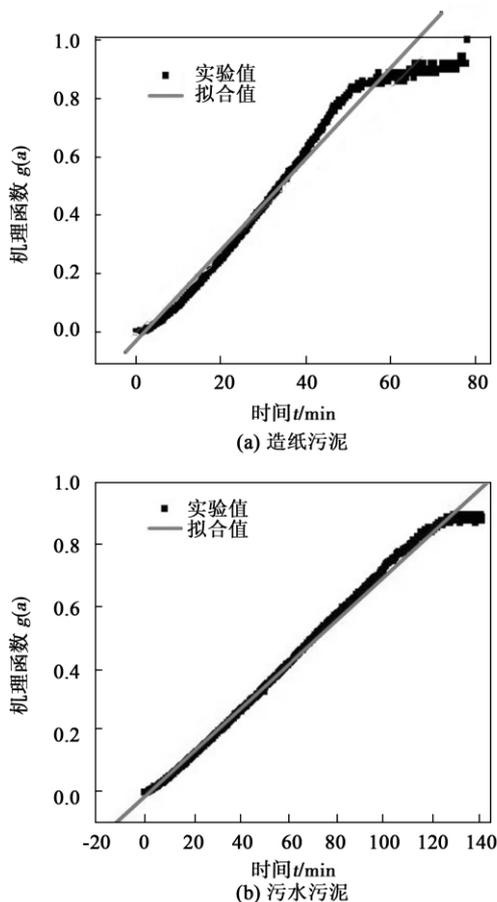


图 4 污泥 102℃ 时  $g(a) \sim t$  实验、拟合曲线  
Fig. 4 Sludge  $g(a) \sim t$  test and fitting curves at 102℃

由表 1 和表 2 可知,对于  $\ln k \sim 1/T$  图可知  $k$  随着温度的升高而变大,干燥温度  $T$  越高,干燥速率常数  $k$  值越大,说明干燥温度的提高有利于污泥干燥速度加快。同时比较表 1 和表 2 可看出,相同温度下造纸污泥  $k$  值远大于污水污泥,说明造纸污泥干燥速率比污水污泥大。从表 1 和表 2 中的拟合函数结合式 (6) 可得到造纸污泥与污水污泥的活化能分别为 26.847 和 27.423 kJ/mol,两者相差 0.576 kJ/mol,占造纸污泥活化能的 2.15%。即污水污泥的活化能比造纸污泥活化能稍大,这与两种污泥的特性有关。与造纸污泥相比,污水污泥在干燥过程中极易结块,表面坚硬,里面是稀泥,说明其表面粘性较大,这导致水分向外表面扩散的困难,不利于液体的扩散率和质量交换,所以污水污泥的活化能

较高,这与文献 [5] 相符。由 30、70 和 102℃ 的造纸污泥进行  $\ln k \sim 1/T$  直线拟合,得到该拟合直线的决定系数为 0.97694,拟合函数  $\ln k = 3.69 - 3201.97 \times 1/T$  活化能为 26.62 kJ/mol,误差最大的 130℃ 时利用该函数计算得到  $k$  值为 0.01423,而实际值由表 1 得到为 0.01357,相对误差为 4.64%。同样计算两者的活化能相对误差 0.85%。同理得出污水污泥  $k$  值相对误差 5.2%,活化能相对误差 1.12%。

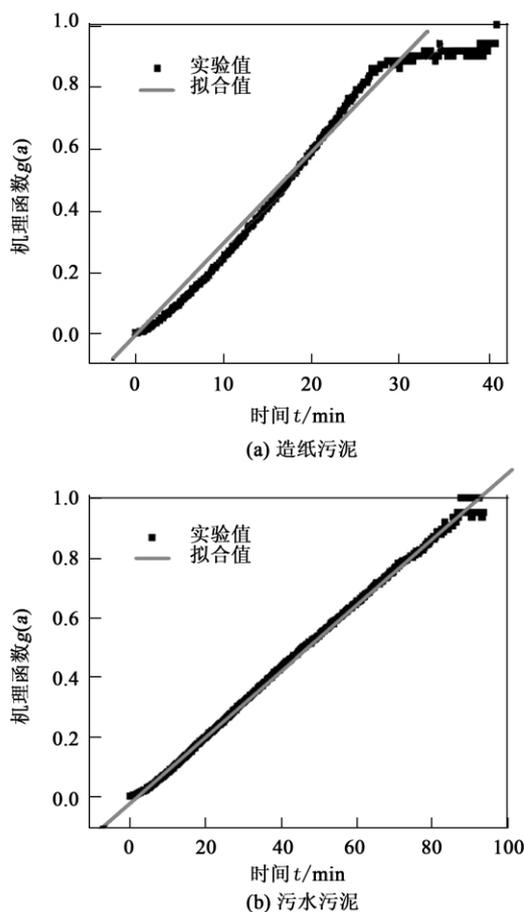


图 5 污泥 130℃ 时  $g(a) \sim t$  实验、拟合曲线  
Fig. 5 Sludge  $g(a) \sim t$  test and fitting curves at 130℃

表 1 造纸污泥动力学参数及拟合函数  
Tab. 1  $k$  value of the papermaking sludge

温度 /℃	$k$	$R^2$	拟合函数 $g(a)$
30	0.001746	0.98487	$0.071 + 0.001746t$
70	0.007635	0.99522	$0.001 + 0.007635t$
102	0.01391	0.97816	$-0.082 + 0.01452t$
130	0.03281	0.97804	$-0.043 + 0.03281t$
$\ln k \sim 1/T$			$\ln k = 3.71 - 3229.17 \times 1/T$

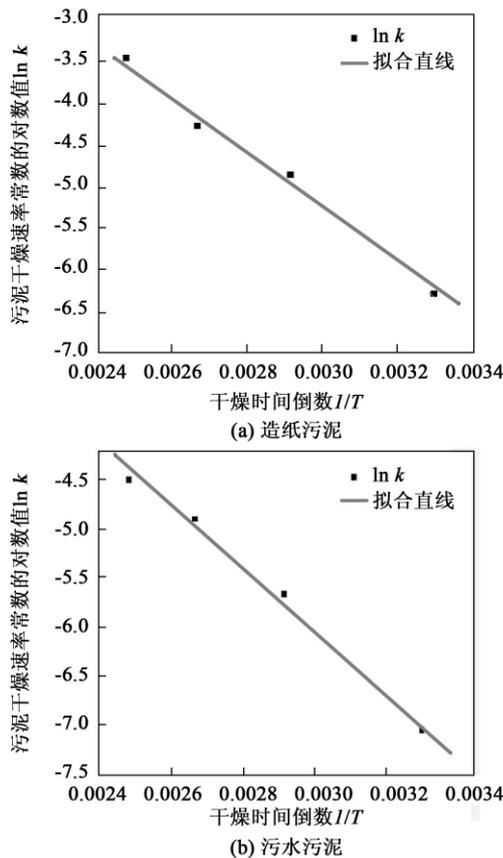


图 6 污泥  $\ln k - 1/T$  实验、拟合曲线  
Fig. 6 Sludge  $\ln k - 1/T$  test and fitting curves

表 2 污水污泥动力学参数及拟合函数

Tab. 2 Fitting function of the papermaking sludge

温度/°C	$k$	$R^2$	拟合函数 $g(a)$
30	0.0008654	0.99352	$0.0363 + 0.000854t$
70	0.00345	0.99773	$0.00284 + 0.00345t$
102	0.00809	0.99689	$0.01338 + 0.00809t$
130	0.01101	0.99921	$0.01698 + 0.01101t$

$\ln k \sim 1/T$   $\ln k = 3.325 - 3298.43 \times 1/T$

### 3 结 论

(1) 根据实验数据拟合认为  $g(a) = 1 - (1 - a)^{1/2} = kt$  线性相关性最好。温度  $T$  越高,干燥速率常数  $k$  值越大,即干燥速率也越快。

(2) 相同温度下造纸污泥  $k$  值远大于污水污泥说明造纸污泥干燥速率比污水污泥大。

(3) 拟合得到造纸污泥与污水污泥的活化能分别为 26.847 和 27.423 kJ/mol,即污水污泥的活化能比造纸污泥活化能稍大,这与其表面粘性较大,这导致水分向外表面扩散的困难有关。

### 参考文献:

[1] 武德智,楼波,钟世清. 污水污泥和造纸污泥干燥特性的对比研究[J]. 生态科学 2010, 29(2): 156-160.  
WU De-Zhi, LOU Bo, ZHONG Shi-Qing. Contrast study of the drying characteristics of the sewage water and papermaking sludge [J]. Ecological Science 2010, 29(2): 156-160.

[2] 刘凯,马晓茜,肖汉敏. 造纸污泥薄层干燥实验及动力学模型分析[J]. 燃料化学学报 2011, 39(2): 149-154.  
LIU Kai, MA Xiao-Qian, XIAO Han-min. Analysis of the drying test and dynamic models for thin papermaking sludge layers [J]. Journal of Fuel Chemistry 2011, 39(2): 149-154.

[3] 李爱民,曲艳丽,陈满堂,等. 污水污泥干燥特性的实验研究[J]. 燃烧科学与技术 2003, 9(5): 404-408.  
LI Ai-min, QU Yan-li, CHEN Man-tang. Experimental study of the drying characteristics of sewage water sludge [J]. Journal of Combustion Science and Technology 2003, 9(5): 404-408.

[4] HU Rongzu, SHI Qizhen. Kinetics of thermal analysis [M]. Beijing: Science Press 2001.

[5] 解国珍,贾力,王瑞祥,等. 物料温度和几何尺寸对动态干燥偏差活化能的影响[J]. 干燥技术与设备, 2006, 4(1): 28-31.  
XIE Guo-zheng, JIA Li, WANG Rui-xiang et al. Influence of material temperature and geological dimensions on its dynamic drying deviation-caused activation energy [J]. Drying Technology & Equipment 2006, 4(1): 28-31.

(辉 编辑)

### • 书 讯 •

## 燃烧理论与燃烧设备

本书在 1990 年《燃烧理论与燃烧设备》第一版的基础上,更新和强化了近年来燃烧理论研究的发展和燃烧技术的进步,涵盖了燃烧理论、燃烧技术、燃烧设备和燃烧污染物生成、数值模拟以及煤气化等内容。

全书共 12 章。前 3 章分别介绍了燃烧概论、反应化学动力学和流动等燃烧基础知识;第 4、5 章系统分析了气体燃烧理论和气体燃烧设备;第 6、7 章为液体燃料的燃烧理论和燃烧设备;第 8 章以煤为例,概括介绍了固体燃料燃烧过程与燃烧理论;第 9~11 章分别介绍了常用的固定床、流化床、气流床燃烧设备;第 12 章结合燃烧理论与燃烧设备,简单介绍了煤的气化理论和大规模煤气化技术。

本书以基本概念为主,深入浅出地总结了燃烧理论基础、研究进展和近年来应用上的新成就,具有显著的新颖性;注重理论分析与实际技术密切结合,剖析了燃烧设备的理论基础和创新思路,具有高度的实用性。

徐旭常,吕俊复,张 海编著

科学出版社出版

2012 年 6 月出版

and reaction atmosphere etc. on the HCl release. Furthermore, the influence of the  $\text{CaCO}_3$  adding amount and temperature on the HCl removal efficiency was investigated and by using a GASMET DX4000 model infrared gas analyzer, the concentration of the HCl released was real-time measured. It has been found that with an increase of the proportion of the sludge mixed and diluted, the volume of the HCl released will increase while the conversion rate of Cl to HCl will decrease. To increase the temperature will promote the HCl release, however, after  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , the conversion rate of Cl to HCl will change little. The proportion of oxygen in the carrier gas will make a part of HCl converted into  $\text{Cl}_2$ , resulting in a drop of the conversion rate of Cl to HCl in the sample. A high temperature rise speed will lead to a large peak value of HCl release. To increase the  $\text{Ca}/(\text{S} + 0.5\text{Cl})$  molar ratio will increase the HCl removal rate. When the  $\text{Ca}/(\text{S} + 0.5\text{Cl})$  molar ratio is 2,  $700\text{ }^\circ\text{C}$  will be regarded as the optimum temperature for HCl removal. **Key words:** sewage sludge, bituminous coal, HCl emissions, HCl removal

造纸污泥与污水污泥的表观干燥动力学研究 = **Study of the Apparent Drying Kinetics of Papermaking and Sewage Water Sludge** [刊, 汉] LOU Bo, QIAN Wei, WU De-zhi (Guangdong Provincial Key Laboratory on Green Energy Source Technologies, College of Electric Power, South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 494 ~ 497

To study the apparent drying kinetics of sludge is of major significance for guiding sludge treatment. For this purpose, a contrast test of paper-making sludge and sewage water sludge with a same specific surface area of  $3.24\text{ cm}^2/\text{g}$  at four temperatures ( $30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $70\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $102\text{ }^\circ\text{C}$  and  $130\text{ }^\circ\text{C}$ ) was performed and a fitting of the kinetic equation was conducted. It has been found that the drying rate constant  $k$  is an important parameter for studying the drying kinetics of sludge and the drying rate constant of the paper-making sludge is bigger than that of sewage water sludge. The activated energies of the paper-making and sewage water sludge are  $26.84\text{ kJ/mol}$  and  $27.423\text{ kJ/mol}$  respectively, indicating that the activated energy of the sewage water sludge is slightly bigger than that of the paper-making sludge. This depends on the fact that the viscosity of the sewage water sludge is comparatively big. **Key words:** paper-making sludge, sewage water sludge, drying kinetics, activated energy, drying rate

柴油机燃用不同比例菜籽油生物柴油和乙醇柴油的对比试验研究 = **Contrast Experimental Study of a Diesel Engine Burning Rapeseed Oil-based Bio-diesel and Ethanol-diesel in Various Proportions** [刊, 汉] LI Hui-fen, HUANG Jin-cheng, HUANG Hao-zhong (College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning, China, Post Code: 530004), CHEN Guo-dong (Xingjian College of Science and Liberal Arts, Guangxi Univer-