

夏凤毅, 赵由才, 唐平. 2011. 制革污泥焚烧特性及焚烧过程中重金属挥发控制研究[J]. 环境科学学报, 31(6): 1270-1276

Xia F Y, Zhao Y C, Tang P. 2011. Incineration mechanisms of tannery sludge and control of heavy metal vaporization during the incineration process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(6): 1270-1276

制革污泥焚烧特性及焚烧过程中重金属挥发控制研究

夏凤毅^{1,*}, 赵由才², 唐平³

1. 中国计量学院, 杭州 310018

2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092

3. 杭州电子科技大学材料与环科院, 杭州 310018

收稿日期: 2010-08-07

修回日期: 2010-09-09

录用日期: 2010-09-13

摘要: 以制革污泥为研究对象进行焚烧处理, 并对其燃烧特性进行分析. 结果发现, 制革污泥燃烧过程中并未出现明显的固定碳燃烧区. 同时, 将制革污泥与煤粉混合后焚烧, 结果显示, 制革污泥的比例及挥发分的析出对混合燃料的着火燃烧有显著影响, 在低温段 (180 ~ 450℃), 制革污泥比例的增大可提高混合试样的活化性能, 且燃烧程度加剧. 通过添加 CaO、橡胶粉等添加剂, 可抑制制革污泥焚烧过程中重金属的挥发, 当 CaO 添加量为 3% 时, 对 Zn、Pb、Cu 和 Cr 等重金属的抑制效果最佳, 其挥发率分别降低了 5.23%、0.90%、5.59% 和 4.43%; 橡胶粉的添加对于金属元素的挥发有一定的影响, 但影响程度非常有限.

关键词: 制革污泥; 煤粉; 焚烧; 重金属; 挥发控制; 热重分析

文章编号: 0253-2468(2011)06-1270-07

中图分类号: X703

文献标识码: A

Incineration mechanisms of tannery sludge and control of heavy metal vaporization during the incineration process

XIA Fengyi^{1,*}, ZHAO Youcai², TANG Ping³

1. China Jiliang University, Hangzhou 310018

2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse Research, Tongji University, Shanghai 200092

3. College of Material and Environmental Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018

Received 7 August 2010;

received in revised form 9 September 2010;

accepted 13 September 2010

Abstract: Incineration of tannery sludge was studied and an obvious combustion zone of fixed carbon was not present during the incineration process. The results of combined incineration of tannery sludge and coal showed that both the sludge content and the release of volatile matter had a significant effect on the firing and combustion of the mixed fuel. At low temperature (180 ~ 450℃), increasing the sludge content can improve the activation of the mixed fuel. Additives like CaO and rubber powder can inhibit heavy metal vaporization from tannery sludge during incineration. The optimum addition of CaO was 3%, where volatilization loss of the heavy metals Zn, Pb, Cu and Cr, decreased 5.23%, 0.90%, 5.59% and 4.43%, respectively.

Keywords: tannery sludge; coal; incineration; heavy metal; vaporization control; thermogravimetric analysis

1 引言 (Introduction)

制革污泥主要产生于原材料生产和制革工艺过程, 主要包括浸水污泥 (主要成分是血污、泥沙、废毛、氯化物、防腐剂等)、浸灰/脱毛污泥 (主要成分是石灰、硫化物、烂毛糊、蛋白质等)、含铬污泥 (主要来自于铬鞣转鼓的沉淀物) 及用物理、化学、

物理化学法、生物法处理制革废水后产生的污泥 (林炜等, 2005). 其中, 制革废水处理过程中, 每 1000 t 废水可产生含水率为 80% 的制革污泥量约 5t (姚丹等, 2005), 若不及时安全处置, 将会对环境造成严重污染. 根据 2008 年国家环境保护部及国家发展和改革委员会颁布的《危险废物新名录》, 来源于皮毛铬鞣和制品加工业的制革污泥属于含铬危险

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50908070); 浙江省科技厅重点项目 (No. 2007G21154); 温州市科技局重大项目 (No. 2007G0018)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50908070), the Significant Science and Technology Project of Zhejiang Province (No. 2007G21154) and the Significant Science Project of Wenzhou City (No. 2007G0018)

作者简介: 夏凤毅 (1962—), 男, 教授 (博士), E-mail: xfy6888@163.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: XIA Fengyi (1962—), male, professor (Ph. D.), E-mail: xfy6888@163.com; * Corresponding author

废物(编号为 HW21),亟需安全处理处置。

制革污泥具有有机质含量高、热值高等特点,焚烧是目前公认的处理制革污泥最有效的方法之一。然而,由于制革污泥成分复杂,难以单独稳定燃烧,常需加入辅助燃料以提高其燃烧的稳定性。此外,在制革污泥焚烧过程中,重金属的挥发又易造成二次污染,因而,在实际运行中重金属的释放也成为必需解决的关键问题。因此,本文以温州某制革园区的制革污泥为研究对象,考察污泥与煤的混烧特性,并研究污泥焚烧过程中重金属的挥发控

制,以期对制革污泥焚烧的污染控制提供理论依据和技术支持。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 试验材料

试验所需制革污泥取自温州市某制革有限公司,经风干、磨细、过 100 目筛后待用。该制革污泥基本性状如表 1 所示,污泥中 Cd、Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn 等有毒有害重金属含量分别为 0.003、20.49、0.07、0.50、0.28 和 0.38 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

表 1 供试制革污泥基本性状

Table 1 Characteristics of the tested tannery sludge

工业分析				低位发热值 $/(kJ\cdot kg^{-1})$	元素分析			
水分	灰分	挥发分	固定碳		C	H	N	S
73.25%	13.11%	13.61%	0.03%	5346.2	16.59%	2.90%	2.34%	0.62%

注:以上分析均以干燥基计。

试验所用煤选用越南无烟煤,研磨过 100 目筛,待用。该无烟煤中主要元素 C、H 和 N 的含量分别为 50.86%、3.01% 和 0.76%,煤粉的低位发热值为 33213.9 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

分别选取碱土氧化物 CaO 和含硫橡胶作为添加剂,考察 800 $^{\circ}\text{C}$ 下对重金属挥发行为的影响。

2.2 试验方法

制革污泥焚烧试验采用管式炉(图 1)。该小型管式反应炉加热管采用单螺纹硅碳管,被加热石英

管直径与管长分别为 40 mm 和 600 mm。整个小型管式炉包括供气部分、管式炉部分及排气吸收部分。供气部分以 120 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速率吹入空气,保持氧化气氛,同时带出焚烧产生的烟气。管式炉部分由电加热供热,电子温控仪根据热电偶来调节和控制工况所需的温度条件。吸收系统由串联的多孔玻璃板吸收瓶、抽气泵和流量计组成,连接管路均采用硅胶管。

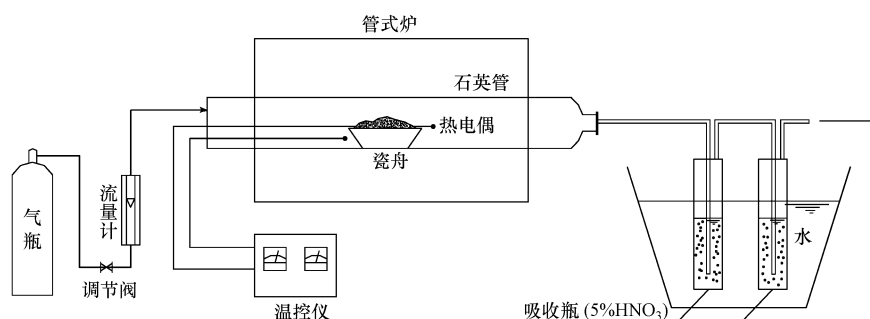


图 1 焚烧实验装置

Fig.1 Laboratory tube furnace

热重分析采用 Q600SDT 综合热分析仪(美国 TA 仪器公司),试验条件:以空气为载气,气体流量设为 100 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;升温速率为 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,终温为 900 $^{\circ}\text{C}$ 。

总铬测定:取样 0.5000 g 于 30 mL 聚四氯乙烯坩埚内,滴加 3~5 滴去离子水浸润,随后加入 10 mL HF 和 5 mL $\text{HClO}_4\text{:HNO}_3$ 混合酸液(体积比 1:1,

优级纯),放置过夜。然后,将上述放置样品的聚四氯乙烯坩埚置于砂浴,进行低温(100 $^{\circ}\text{C}$ 以下)消解,1 h 后升高砂浴温度(控制在 250 $^{\circ}\text{C}$ 以下),继续消解至 HClO_4 大量冒烟,再续加 5 mL HF 和 5 mL 的 $\text{HClO}_4\text{:HNO}_3$ 混合酸液,继续消解,直至 HClO_4 大量冒烟至干,再加 5 mL HNO_3 消解至约 2 mL,如剩余液不清亮透明则需补加 HF 直至消解完全。当残渣

完全溶解后,把试样转移至 100 mL 容量瓶中,并用水稀释定容,用等离子发射光谱仪(ICPS-7200)进行重金属铬的测定。

3 结果(Results)

3.1 污泥-煤混合燃烧曲线分析

对污泥-煤混合体系的热特性进行分析之前,首先对其单独燃烧特性进行研究,结果如图 2 所示.煤粉的热特性分析结果(图 2a)显示,煤样在加热的初始阶段,热重分析(Thermogravimetry, TG)曲线比较平缓,并未出现失重现象,相反还出现轻微的增重现象,这主要是煤粉外表面及孔隙内表面吸附气体发生物理和化学吸附所致(姜秀民等, 2002),增重的最大值可达煤样质量的 1.19%,由差示扫描量热法(Differential scanning calorimetry, DSC)曲线可知在这一吸附过程伴随有较小能量的释放.当煤粉被加热到一定温度,即在 415 ~ 650℃ 温度范围内,固定

碳燃烧造成煤样迅速失重,同时,微商热重法(Differential thermogravimetry, DTG)和 DSC 曲线显示出失重率与放热量迅速增大,分别达到各自的峰值,表明煤样开始着火燃烧.煤样的燃尽阶段失重可忽略不计,在整个燃烧过程中没有观察到挥发分燃烧阶段。

从制革污泥失重曲线(图 2b)可看出,该污泥有 3 个比较明显的失重阶段,分别为 80 ~ 180℃、180 ~ 570℃ 和 570 ~ 760℃ 3 个温度段.其中,80 ~ 180℃ 温度段为水分析出阶段,由于预先自然风干处理,试样中水分已经很少,所以该阶段失重率仅为 3.3%. 180 ~ 570℃ 和 570 ~ 760℃ 两个温度段可认为是挥发分的燃烧阶段,在 180 ~ 570℃ 温度段,失重率约占总失重率的 42.3%;在 570 ~ 760℃ 温度段,失重率则可高达 51.7%. 由于制革污泥中固定碳含量低,因而 TG/DTG/DSC 曲线中没有明显表现出固定碳燃烧区。

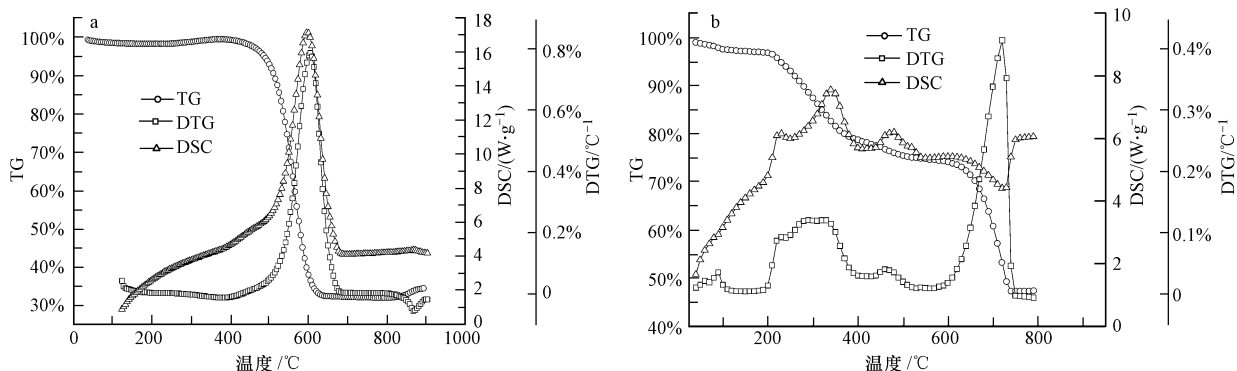


图 2 煤粉(a)和制革污泥(b)的 TG/DTG/DSC 曲线

Fig. 2 TG/DTG/DSC curves of coal (a) and tannery sludge (b)

污泥-煤体系的 TG、DTG 和 DSC 曲线如图 3 所示.图 3a 为不同混合比例的污泥-煤体系的混烧失重曲线比较,根据热重曲线显示的特征,在热分析处理过程中只选取了试样从迅速失重起始点到 TG 曲线转为平直线的转折点之间的部分,在此区间内试样燃烧掉绝大部分可燃物,因此,去掉最初与最终的 TG 曲线平直段对正确处理与分析试验结果影响不大(张云都等, 2005).以图中 TG 曲线的分界点为界,就第 1 温度段(180 ~ 550℃)和第 2 温度段(550 ~ 760℃)两个温度范围进行讨论。

混合试样在第 1 温度段和第 2 温度段均存在较明显的失重区域.在第 1 温度段,煤的失重率为 23.67%,制革污泥为 27.2%,而含 20%、50%、80% 和 90% 制革污泥的混合试样的失重率则分别为

20.85%、20.3%、22.49% 和 25.44%. 在第 2 温度段,煤的失重率为 42.49%,制革污泥为 22.36%,含 20%、50%、80% 和 90% 制革污泥的混合试样失重率则分别为 42.97%、40.08%、30.12% 和 26.67%。

结合图 3a 及失重结果可知,混合样品的 TG 曲线位于煤与制革污泥 TG 曲线的中间,且随着污泥混合比例的增大逐渐向制革污泥的燃烧失重曲线靠拢.在第 1 温度段内,当制革污泥含量为 20% 时,混合试样的燃烧曲线仍与煤相似;随制革污泥混合比例的增大,失重率也逐渐增大,这主要是由混合燃料中制革污泥挥发分的大量析出和燃烧所致;当混合 90% 的制革污泥时,其失重曲线几乎和制革污泥的失重曲线重合.在第 2 温度段,随着制革污泥混合比例的增大,混合试样中固定碳含量减小,其失

重率也随之降低. 从上述结果可以发现, 制革污泥所占的比例及挥发分的析出对于混合燃料的着火燃烧有较大的影响.

从不同比例的污泥-煤混烧体系的 DTG 曲线图(图 3b)可知, 混合试样具有 3 个比较明显的峰. 煤的最大燃烧主峰对应的温度为 570 °C 左右, 在该温度点固定碳燃烧速率达到最大, 且从 DSC 曲线图(图 3c)可看出, 在该处有一显著的放热峰, 随着污泥混合比例的增大, DTG 和 DSC 峰逐渐衰落, 且峰

值点温度亦呈减小趋势. 总体上, 混合试样的燃烧 DTG 曲线的变化趋势仍与煤相似, 表明混合试样在该温度段的燃烧过程中, 煤的燃烧表现得更为明显. 此外, 从图 3b 还可看出, 污泥混合比例的增大使混合燃料中挥发分增加, 因此, 在 600 ~ 760 °C 范围内, 挥发分的 DTG 燃烧峰逐渐加强. 混合试样在 300 °C 左右有 1 个次峰, 与制革污泥 DTG 峰对应的温度基本相同, 说明混合燃料在燃烧时, 试样中的煤和污泥基本保持了各自的燃烧特性.

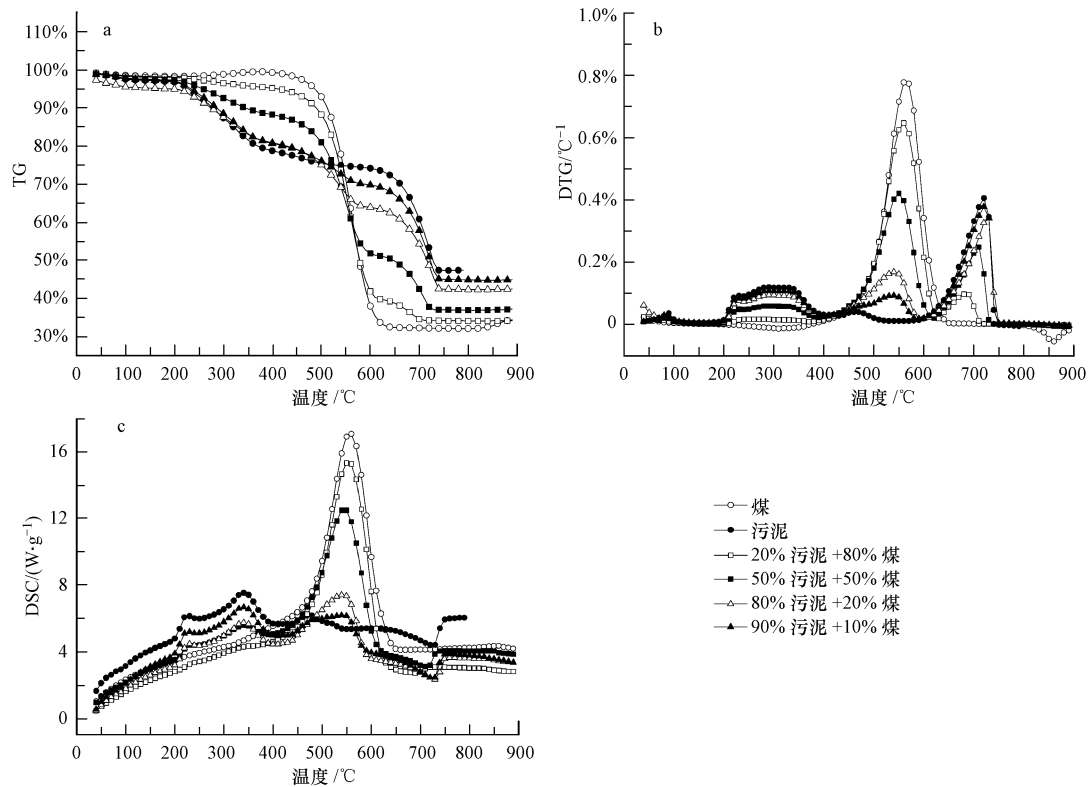


图 3 污泥-煤体系 TG (a)、DTG (b) 和 DSC (c) 曲线

Fig. 3 TG (a), DTG (b) and DSC (c) curves for coal, sludge and their blends

3.2 污泥-煤混和燃烧动力学分析

3.2.1 燃烧动力学模型的建立 假设在无限小的时间间隔内, 非等温过程可以看成是等温过程, 反应速率则可用等温过程的通式表示:

$$\frac{d\alpha}{dT} = A e^{-\frac{E}{RT}} f(\alpha) \quad (1)$$

式中, α 为变化率; $\frac{d\alpha}{dT}$ 为分解速率; $f(\alpha)$ 为反应机制函数; R 为摩尔气体常数, 取值为 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度 (K); E 为活化能 ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$); A 为频率因子 (min^{-1}).

设 $\beta = \frac{dT}{dt}$ 为升温速率 ($\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$), 且为常数,

则式(1)可转化为:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} f(\alpha) \quad (2)$$

式(2)移项后两边积分, 可表示为:

$$F(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} P(X) \quad (3)$$

$$P(X) = \left[\left(-\frac{e^X}{X} + \int_{-\infty}^X \frac{e^x}{X} dx \right) - \left(-\frac{E^{X_0}}{X_0} + \int_{-\infty}^{X_0} -\frac{e^x}{X} dx \right) \right] \quad (4)$$

式中, $X = -E/(RT)$; $X_0 = -E/(RT_0)$. 式(4)两边取对数并移项后, 可表示为:

$$\ln F(\alpha) - \ln P(X) = \ln \frac{AE}{\beta R} \quad (5)$$

根据式(5),可近似认为 $P(X)$ 是 $1/T$ 的线性函数,假设 $X = -E/RT$ 的绝对值足够大时,选取

$$\ln P(X) = -2.315 - 0.4567 \frac{E}{RT} \quad (6)$$

则 $\ln P(X)$ 也必为 $1/T$ 的线性函数,将式(6)代入式(5)可得:

$$\ln F(\alpha) = \ln \frac{AE}{\beta R} - 2.315 - 0.4567 \frac{E}{RT} \quad (7)$$

利用试验曲线上一系列的 $\alpha - T$ 数据,可分别作 $\ln F(\alpha) - T^{-1}$ 的关系图,获得函数 $F(X)$ 线性图,并由式(7)计算出活化能 E 和频率因子 A 的值.

3.2.2 污泥-煤体系的燃烧动力学 根据制革污泥、煤及不同比例混合试样的 TG、DTG 和 DSC 曲线及燃烧动力学模型,可获得 $\ln[-\ln(1-\alpha)]$ 与 $1/T$ 的关系图(鉴于图量较大,文中未列),结果显示,不同温度段的燃烧均可用一级反应方程 $F(\alpha) = -\ln(1-\alpha)$ 来描述.混合试样的主要燃烧过程划分为低温段(180 ~ 450 °C)和高温段(450 ~ 700 °C),且两个温度段均有良好的线性关系.按回归分析法可分别计算其动力学参数,具体如表 2 所示.

由表 2 可知,在高温段内,煤的活化能为 285.54 kJ·mol⁻¹,当混合试样中制革污泥比例为 20% 时,活化能减小为 211.99 kJ·mol⁻¹,说明在煤中添加少量的污泥就可使其活化性能有较为明显的降低;当制革污泥比例增大至 50% 时,其活化能

急剧下降,可降至 123.47 kJ·mol⁻¹,且随着制革污泥比例的增大,混合试样的活化能逐渐减小,这是由于制革污泥中的挥发分能够在较低的温度下迅速析出,可使得试样的着火性能得到较大的改善.频率因子也随制革污泥比例的增大而呈下降趋势.上述结果表明,在高温段内,煤燃烧程度比制革污泥更为剧烈,当煤和污泥混合后,其燃烧的剧烈程度有所下降,同时综合燃烧性能也有一定程度的降低.

在低温段内,当制革污泥比例为 20% 时,频率因子仅为 0.6652 min⁻¹,可推测在该温度段内煤的燃烧并不剧烈.这主要由于挥发分从煤中裂解析出时,先是一些连接不太紧密的键断裂,一些小分子气体被释放出来,而剩余物是一些比较牢固的、稳定的长链化合物,这些化合物在更高一些的温度下才能被破坏而分解析出(张云都等, 2005).只有温度及持续时间等条件得到满足,固定碳的着火燃烧才能引起煤剧烈的化学反应,而从制革污泥的 TG 曲线分析可知,该温度段为其挥发分燃烧阶段,因此,可将该温度段视为污泥挥发分的燃烧阶段和煤挥发分的释放阶段.综上所述,在低温段内随着制革污泥比例的增大,混合试样的活化能随之增大,而燃烧剧烈程度也呈增强趋势.

表 2 不同温度段试样动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of samples at different temperature ranges

试样	低温段动力学参数				高温段动力学参数			
	拟合方程	R ²	活化能 E/ (kJ·mol ⁻¹)	频率因子 /min ⁻¹	拟合方程	R ²	活化能 E/ (kJ·mol ⁻¹)	频率因子 /min ⁻¹
煤	$Y = 3206.6X - 9.6666$	0.9630			$Y = -15685X + 18.467$	0.9811	285.54	8.74×106
20% 污泥 + 80% 煤	$Y = -1473.6X - 0.2889$	0.9833	26.83	0.6652	$Y = -11645X + 13.856$	0.9700	211.99	1.17×105
50% 污泥 + 50% 煤	$Y = -2300.8X + 1.9308$	0.9796	41.88	3.9216	$Y = -6782.8X + 8.021$	0.9601	123.47	587.3739
80% 污泥 + 20% 煤	$Y = -2270.2X + 2.4831$	0.9776	41.33	6.9047	$Y = -3272X + 3.7153$	0.9718	59.57	16.4259
90% 污泥 + 10% 煤	$Y = -3018.8X + 3.6846$	0.9702	54.96	17.2654	$Y = -2401.4X + 2.5569$	0.9623	43.71	7.0273
制革污泥	$Y = -3128.6X + 4.0305$	0.9664	56.95	23.5442	$Y = -732.1X + 0.4688$	0.9468	13.33	2.8565

注: Y 表示 $\ln F(\alpha)$, X 表示 $T^{-1}(\text{K}^{-1})$.

3.3 制革污泥焚烧过程中添加剂对重金属挥发行为的影响

3.3.1 氧化钙对重金属挥发的影响 由于制革污泥中含大量的 Zn、Pb、Cu 和 Cr 等重金属,在其焚烧

过程中重金属挥发行为容易产生二次污染问题.为降低制革污泥焚烧过程中重金属的挥发量,本研究考察了添加剂对重金属挥发行为的影响.

在 800 °C 条件下,添加剂 CaO 对重金属挥发影

响的结果如图 4 所示. 由图 4 可知, 尽管重金属挥发率随 CaO 添加量的变化有所波动, 但总体而言, CaO 仍可在一定程度上抑制制革污泥焚烧过程中重金属的挥发. 当 CaO 添加量为 1% 时, CaO 对 Zn 和 Cr 挥发的影响较为明显, 而对 Pb 和 Cu 挥发的影响不明显; 而当 CaO 添加量增至 3% 时, Zn、Pb、Cu 和 Cr 等的挥发率均出现不同程度的降低, 挥发率分别降低了 5.23%、0.90%、5.59% 和 4.43%. 导致该现象出现的原因主要有: ①CaO 可作为吸附剂, 利用其在高温下的活性, 在吸附剂表面或小孔表面发生物理吸附或化学吸附, 可在挥发金属蒸汽形成颗粒前捕获金属蒸汽, 从而减少焚烧烟气中富集金属小颗粒的形成(韩军等, 2000); ②高温下吸附剂或焚烧中间产物可与烟气中重金属元素或附在其上的重金属元素或其接触的颗粒上的重金属元素发生化学反应, 形成稳定的化合物, 从而达到捕获重金属的目的, 例如, Zn 与制革污泥中的 SiO_2 和 Al_2O_3 发生反应, 生成高熔点的硅酸锌 (Zn_2SiO_4) 和锌尖晶石 (ZnAl_2O_4), 从而抑制其挥发(Jakob *et al.*, 1995).

此外, 制革污泥焚烧过程中重金属的挥发率随 CaO 添加量的增大呈现先降后升的趋势, 当 CaO 添加量为 3% 时, Zn、Pb、Cu 和 Cr 等重金属的挥发率降至最低, 这表明当 CaO 添加量为 3% 时, 对 Zn、Pb、Cu 和 Cr 等重金属挥发的抑制效果最佳. 这主要是因为重金属的抑制效果与 Ca/SiO_2 有关, 而 Ca/SiO_2 在某一临界值附近时, 重金属的固化率会达到最大(李润东, 2002).

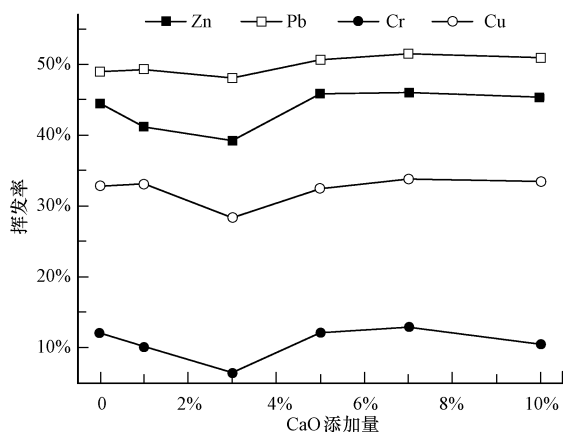


图 4 CaO 对重金属 Zn、Pb、Cr 和 Cu 挥发的影响

Fig. 4 Effects of CaO on vaporization of the heavy metals Zn, Pb, Cr and Cu

3.3.2 硫对重金属挥发的影响 本研究采用含硫橡胶粉末为含硫添加剂, 考察了制革污泥焚烧过程

中硫对重金属挥发的影响(图 5). 从图 5 可以看出, 随着橡胶粉末添加量的增加, 重金属挥发率出现不同程度的下降. 当橡胶粉末含量为 10% 时, Zn 和 Cu 的挥发受到明显的抑制, 挥发率分别降低了 9.49% 和 15.00%; 但对 Pb 挥发率的影响不大, 仅降低了 2.01%, 说明硫含量对 Pb 的挥发基本上没有影响. 结果还表明, 硫对 Cr 挥发率的影响也较微弱, 含硫橡胶粉末添加量的变化对 Cr 挥发率的影响不明显, 基本在 9.8% ~ 12.1% 之间波动. 这主要是因为制革污泥中存在 CaO、MgO、 Na_2O 和 K_2O 等金属氧化物, 此类氧化物通常与硫的结合能力很强, 因而减小了硫对重金属迁变特性的影响, 因此, 制革污泥焚烧过程中硫含量的变化对于金属元素的挥发有一定的影响, 但影响程度非常有限.

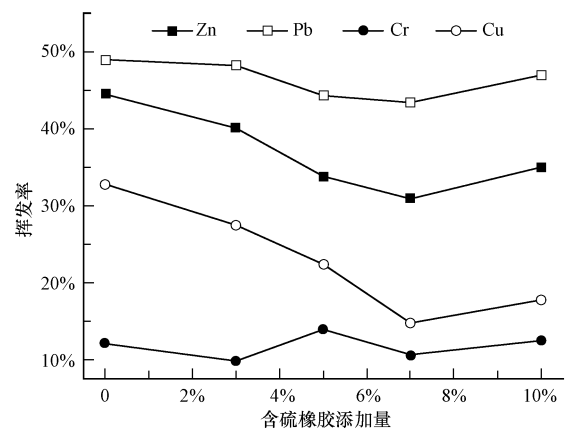


图 5 含硫橡胶对重金属 Zn、Pb、Cr、Cu 挥发的影响 (800 °C)

Fig. 5 Effects of rubber on vaporization of the heavy metals Zn, Pb, Cr, Cu

4 结论 (Conclusions)

1) 415 ~ 650 °C 内固定碳燃烧可造成煤样迅速失重, 由于制革污泥中固定碳含量很少, 因而未出现明显的固定碳燃烧区. 混合样品的 TG 曲线位于煤与制革污泥 TG 曲线的中间, 制革污泥的比例和挥发分的析出对混合燃料的着火燃烧有较大的影响.

2) 污泥-煤燃烧体系中, 高温区域 (450 ~ 700 °C) 制革污泥的加入可改善混合试样的着火性能, 但燃烧剧烈程度有所下降; 低温段 (180 ~ 450 °C) 主要为污泥挥发分的燃烧阶段和煤挥发分的释放阶段, 制革污泥比例的增大可提高混合试样的活化性能, 并增强燃烧剧烈程度.

3) CaO 可在一定程度上抑制重金属的挥发, 当

其添加量为 3% 时抑制效果最佳, Zn、Pb、Cu 和 Cr 的挥发率分别降低了 5.23%、0.90%、5.59% 和 4.43%。当橡胶粉末添加量为 10% 时, Zn 和 Cu 的挥发率分别降低了 9.49% 和 15.00%, 而 Pb 的挥发率仅降低了 2.01%。

责任作者简介: 夏凤毅(1962—), 博士, 教授, 中国计量学院环境工程研究所所长, 学科带头人, 同济大学环境工程专业联合博士生导师。主要研究方向为水和废水处理、固体废物处理与资源化、清洁生产、区域综合整治等节能与减排。E-mail: xfy6888@163.com。

参考文献(References):

- 韩军, 程俊峰, 曾汉才. 2000. 燃煤中重金属控制技术[J]. 洁净煤燃烧与发电技术, 3: 5-10
- Han J, Cheng J F, Zeng H C. 2000. Heavy metal control in the coal[J]. Clean Coal Combustion and Electric Technology, 3: 5-10 (in Chinese)
- Jakob A, Stucki S, Kuhn P. 1995. Evaporation of heavy metals during the heat treatment of municipal solid waste incinerator fly ash [J]. Environmental Science and Technology, 29(9): 2429-2436
- 姜秀民, 杨海平, 刘辉, 等. 2002. 粉煤颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J]. 中国电机工程学报, 22(12): 142-145
- Jiang X M, Yang H P, Liu H, *et al.* 2002. Analysis of the effect of coal powder granularity on combustion characteristics by thermogravimetry [J]. Proceedings of the CSEE, 22(12): 142-145 (in Chinese)
- 李润东. 2002. 垃圾焚烧飞灰熔融处理研究[D]. 杭州: 浙江大学. 10-11
- Li R D. 2002. Research on the melting treatment of municipal solid waste incineration fly ash [D]. Hangzhou: Zhejiang University. 10-11 (in Chinese)
- 林炜, 穆畅道, 唐建华. 2005. 制革污泥处理与资源化利用[J]. 皮革科学与工程, 15(4): 57-61
- Lin W, Mu C D, Tang J H. 2005. Review on treatment and reuse of leather sludge [J]. Leather Science and Engineering, 15(4): 57-61 (in Chinese)
- 姚丹, 王华庆, 陈学群. 2007. 制革污泥的制砖试验研究[J]. 西部皮革, 29(2): 35-38
- Yao D, Wang H Q, Chen X Q. 2007. Research on use of tanning sludge for brick making[J]. West Leather, 29(2): 35-38 (in Chinese)
- 张云都, 喻剑辉, 郭建全, 等. 2005. 煤与城市污泥混燃的热重法研究[J]. 煤炭转化, 28(2): 67-71
- Zhang Y D, Yu J H, Guo J Q, *et al.* 2005. Utilizing thermogravimetric to research the burning of city mud and coal powder [J]. Coal Conversion, 28(2): 67-71 (in Chinese)