

DOI: 10.11949/0438-1157.20190307

西藏生活垃圾掺烧市政污泥的焚烧特性研究

旦增^{1,2}, 王旭彤¹, 颜蓓蓓¹, 陈冠益², 周鹏², 周文武², 穷达卓玛²(¹ 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; ² 西藏大学理学院, 西藏 拉萨 850012)

摘要: 西藏自然环境条件特殊, 生态环境脆弱。随城市化和旅游业快速发展, 生活垃圾/污泥产量急增。目前, 生活垃圾/污泥仍以填埋为主, 焚烧处于试运行, 总体上缺乏先进的处置技术。本研究分析了西藏垃圾/污泥的特点; 利用层燃焚烧炉分析了西藏和天津垃圾/污泥在焚烧过程中的差异, 探讨了西藏垃圾和污泥在不同混合比下的焚烧特性。初步确定了西藏污泥与垃圾混合焚烧的最佳掺混比为 4 : 1, CO 排放降低达 23.06%, HCl 降低达 45.51%, 颗粒物浓度降低约 30.73%。考虑到西藏生态环境的不可逆性及其作为国家生态安全屏障的战略性, 本研究为其固废混合焚烧处理过程的污染物控制提供了指导, 为混合焚烧处理的工程化应用提供参考。

关键词: 西藏自治区; 生活垃圾; 污泥; 焚烧; 生物质; 废物处理; 污染

中图分类号: X 705

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 0438-1157 (2019) 08-3151-09



Study on incineration characteristics of Tibetan municipal solid wastes mixed with sewage sludge

DAN Zeng^{1,2}, WANG Xutong¹, YAN Beibei¹, CHEN Guanyi², ZHOU Peng², ZHOU Wenwu²,
QIONG Dazhuoma²

(¹ School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ² School of Science, Tibet University, Lhasa 850012, Tibet Autonomous Region, China)

Abstract: Tibet Autonomous Region has special geographical conditions and a fragile ecological environment. The yield of Tibetan municipal solid waste (MSW) and sewage sludge (SS) has been increasing rapidly due to the development of urbanization and tourism. At present, the main treatment method of MSW/SS is landfill, while incineration is still at trial operation stage, and generally lack of advanced disposal technology. In this study, the characteristics of MSW and SS in the Tibet were investigated. The differences during the incineration process between wastes from Tibet and Tianjin were analyzed in a grate furnace. Also, the incineration characteristics of Tibetan MSW and SS under different mixing ratios was studied. The optimum blending ratio was preliminarily determined to be 4 : 1 which reduced the emissions of CO by 23.06%, HCl by 45.51%, and PM by 30.73%. Considering the irreversibility of the ecological environment in Tibet and its strategic role as a national ecological safety barrier, this study provides guidance for pollutant control in the waste incineration process and reference for

收稿日期: 2019-04-01 修回日期: 2019-05-19

通信作者: 陈冠益(1970—), 男, 博士, 教授, chen@tju.edu.cn

第一作者: 旦增(1981—), 男, 博士研究生, 副教授, yongzhong2008@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676138, 51878557, 51668056)

引用本文: 旦增, 王旭彤, 颜蓓蓓, 陈冠益, 周鹏, 周文武, 穷达卓玛. 西藏生活垃圾掺烧市政污泥的焚烧特性研究[J]. 化工学报, 2019, 70(8): 3151–3159

Citation: DAN Zeng, WANG Xutong, YAN Beibei, CHEN Guanyi, ZHOU Peng, ZHOU Wenwu, QIONG Dazhuoma. Study on incineration characteristics of Tibetan municipal solid wastes mixed with sewage sludge[J]. CIESC Journal, 2019, 70(8): 3151–3159

the engineering application of MSW and SS co-incineration in Tibet.

Key words: Tibet Autonomous Region; municipal solid waste; sewage sludge; combustion; biomass; waste treatment; pollution

引 言

自2006年青藏铁路开通以来,西藏自治区(简称西藏)经济快速发展,生活垃圾产量呈快速增长。2018年,拉萨市夏季垃圾产量 $900\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,冬季 $700\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。专家预测,到2020年西藏城市生活垃圾产量将达到 $4942\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。2017年西藏市政污水排放量达 $28.2\times 10^4\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,据预测2020年市政污泥量将达到 $92\times 10^4\text{ t}$ (含水率97%)。受地域和科技发展水平的限制,西藏缺乏先进合适的固体废弃物处置技术及管理制度^[3]。西藏农村中塑料丢弃或直接焚烧等现象屡见不鲜^[4],农村固体废物处理方法仍以简单填埋和露天焚烧为主^[5],60.8%的生活垃圾通过简易焚烧进行处理^[6]。拉萨市某污水厂产生的污泥长期堆积在厂内,严重影响了厂区正常运行,带来了环境 and 安全风险。污泥组成复杂,易腐败产生恶臭,污染土壤、水体且可能传播病菌,对环境与健康的影响大^[7]。因此西藏垃圾/污泥的无害化、减量化、资源化处理成为备受关注的课题。

目前,拉萨市垃圾填埋场容量趋于饱和,且其技术标准不高,若将垃圾或干化污泥运至填埋场填埋将带来很大的风险^[8]。露天焚烧的弊端显著,据美国环保署测算,露天焚烧每公斤垃圾产生的二噁英为焚烧厂的2万倍以上,其他污染物排放可达数十万至数百万倍^[9]。西藏的生态系统特殊,污染物直接排放至三江源头,其后果不堪设想^[10]。

西藏人员稀少,除拉萨市外的地区,垃圾/污泥产量小且较为分散,难以大规模集中处理。因此,本研究考虑将污泥与垃圾在小规模焚烧炉进行混合焚烧。考虑到西藏的垃圾/污泥成分较其他地区的垃圾差异明显,两者混合焚烧特性方面的研究缺乏,其焚烧特性、混合配比等研究亟待深入。考虑到西藏自身环境的修复能力弱^[11],同时要维系我国的生态屏障安全,具有战略性地位,因此研究西藏垃圾与污泥焚烧特性意义重大。

本研究将天津市与拉萨市两种原料分别进行焚烧对比,判断物料差异对焚烧过程的影响;并将西藏污泥按照不同比例掺混至西藏垃圾中进行焚烧,考察混合物的焚烧特性,并初步确定优化的混

合配比。本研究为西藏污泥、垃圾的处置提出了新思路,对其污染物控制提供技术指导,为后续工程应用提供了重要参考。

1 实验材料和方法

1.1 原料

本研究中的污泥分别采自天津市和拉萨市某污水处理厂,均为未经过任何发酵处理的新鲜污泥,两者含水率均为80%。收集后将鲜污泥放至阳光下,进行干燥,待后续实验。

本研究中的垃圾均为模型化合物,根据天津市与拉萨市的垃圾可燃组分配制而成。可燃物由餐厨、纸类、橡胶、塑料、纺织物、木竹构成,各组分比例详见表1。选取方便面配料包作为餐厨、快递纸箱与卫生纸(混合比例1:1)作为纸类、废旧自行车轮胎作为橡胶、白色塑料袋作为塑料、一次性筷子作为木竹。快递纸箱、纸类、废旧自行车轮胎与塑料袋均破碎至 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 左右。

表1 垃圾组分

Table 1 Content of municipal solid wastes/%

城市	餐厨	纸类	橡胶/塑料	纺织物	木竹
西藏 ^[12]	30.85	35.81	22.38	6.79	4.17
天津 ^[13]	80.20	8.73	8.13	1.29	1.65

混合焚烧实验中将污泥按质量百分比0、20%、40%、50%、60%、80%、100%加入至垃圾中,分别标记为MSW、20SS80MSW、40SS60MSW、50SS50MSW、60SS40MSW、80SS20MSW、SS。

1.2 测试方法

所有原料在测试和实验前,均在 105°C 烘箱中烘烤24 h,以脱除水分。再将原料粉碎,过 0.25 mm 筛。将混合物混合均匀,再参考GB/T 31391—2015^[14]与GB/T28731—2012^[15]进行元素分析与工业分析,测试结果见表2。本研究中重金属含量的测试方法为:对预处理后的原污泥进行消解,采用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 法,再利用ICP装置进行测试,八种重金属含量见表3。

1.3 焚烧实验

西藏是青藏高原地区的主体,平均海拔大于

表2 元素分析、工业分析(空气干燥基)

Table 2 Ultimate and proximate analysis (air dried basis)

物料	元素分析/%					工业分析/%				低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)
	碳	氢	氧 ^①	氮	硫	水分	挥发分	灰分	固定碳 ^②	
西藏污泥	36.50	5.65	50.55	6.46	0.84	3.85	61.04	28.32	6.79	10.30
天津污泥 ^[16]	28.47	4.81	60.96	4.84	0.92	4.93	53.90	35.22	5.95	5.24
西藏垃圾	39.61	5.34	54.17	0.73	0.15	4.76	77.42	10.76	7.06	11.25
天津垃圾	41.61	6.06	50.77	1.45	0.11	6.49	74.38	7.26	11.87	13.21

① 氧含量由差减法获得;②固定碳含量由差减法获得。

表3 污泥重金属含量分析

Table 3 Heavy metal content of sewage sludge/(mg·kg⁻¹)

项目	As	Cr	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
西藏	38.09	53.23	<2.5	91.02	<2.5	9.67	26.07	294.84
天津	38.12	952.54	<2.5	455.57	<2.5	328.53	22.22	909.54
A级国家标准 ^①	30	500	5	500	3	100	300	1200
B级国家标准 ^②	75	1000	15	1500	15	200	1000	3000

① 允许使用的农用地类型为耕地、园地、牧草地;②允许使用的农用地类型为园地、牧草地、不种植食用农作物的耕地^[17]。

4000 m,大气压仅为 60 kPa 左右。根据西藏垃圾特性及分布特征,层燃焚烧炉将是处理西藏垃圾和污泥的优选技术,因此本研究的焚烧实验在小规模层燃焚烧炉内进行,见图 1。该实验炉参考中小规模焚烧炉制造,处理量为 5 kg·h⁻¹。按比例称量原料,混合均匀备用,烟气分析仪等仪器就位。检查设备气密性,开启 Testo 350 烟气分析仪、Testo 3008 烟尘采样器和离子色谱仪,完成自检。启动鼓风机,通入助燃剂,点火,待炉内温度升到 850℃后,关闭助燃装置,倒入原料。原料开始焚烧,烟气分析装置在线监测污染物排放数据,烟尘采样器连续收集烟气排放数据。待燃料燃尽后,关闭仪器,使炉温降

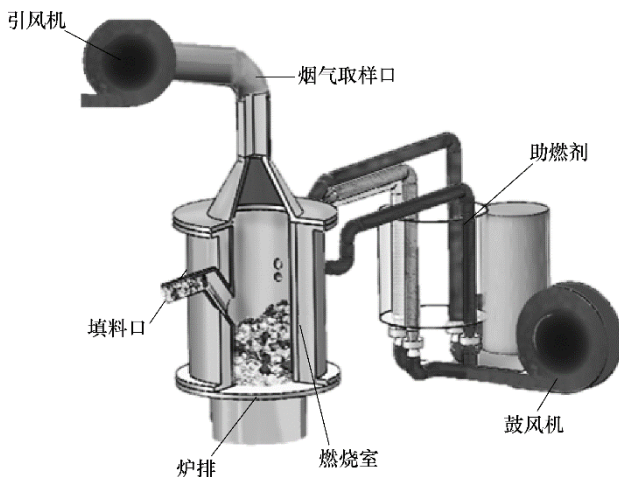


图1 焚烧实验装置示意图

Fig.1 Diagram of incineration apparatus

到室温。焚烧炉中未设有净化装置,故烟气分析仪中所测结果为污染物产生值。本研究实验着重于研究焚烧过程,考虑到烟气净化技术相对成熟,且与平原地区差异较小,故本实验未采用烟气净化装置。

2 实验结果与讨论

2.1 原料特性分析

将西藏污泥与天津污泥对比,西藏污泥中碳、氢元素含量较高,有机质含量较高;氮元素含量达到 6.46%,而一般煤炭的氮元素含量均在 2% 以下^[18],这可能使污泥焚烧等利用过程中氮氧化物的排放浓度超标 57%。西藏污泥中挥发分含量最高,达到 60% 以上,这说明污泥中含有较多的有机质;其次是灰分,约占 28%,由于灰分较高的存在,焚烧后也会遗留更多残渣。

西藏污泥的重金属含量从高到低依次为 Zn>Cu>Cr>As>Pb>Ni>Cd>Hg, Zn 元素含量最高达 294.84 mg·kg⁻¹,Cd 和 Hg 元素处于较低水平,均低于 2.5 mg·kg⁻¹。西藏污泥除 As 元素外,其余重金属含量均远低于天津污泥,Cr 元素甚至为天津市的 1/17,较为清洁,这使西藏污泥焚烧处理更具优势^[19]。

2.2 原料对焚烧特性分析影响

2.2.1 西藏、天津垃圾对烟气中污染物的影响 图 2~图 5 分别展示了西藏垃圾和天津垃圾在焚烧过程中的 CO、SO₂、HCl、NO_x 排放规律。较多 CO 的产生意味着有部分有机物质未燃烧充分,由图 2 可知垃圾在焚烧反应中期时出现一个高峰,天津垃圾和西藏垃圾均在反应 350 s 左右同时达到最高峰,分别为 2283 mg·m⁻³ 和 1169 mg·m⁻³。故在此阶段空气量很不充分,垃圾周围颗粒的 O₂ 浓度不能满足物料燃烧所需的氧气量。但整个过程中天津垃圾的 CO 排放总量较西藏垃圾始终处于一个较高水平,且集中在 200~500 s 过程中。但观察到天津垃圾在 600 s

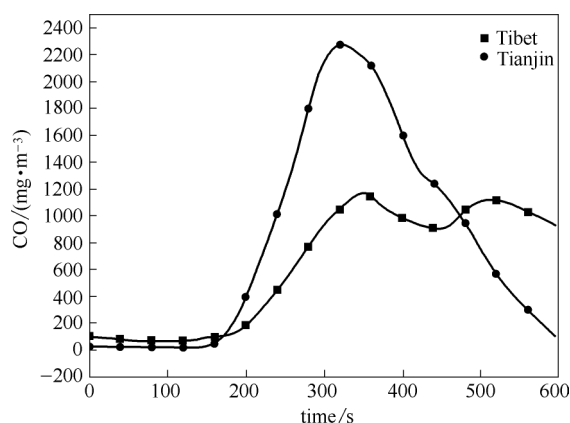


图2 两种垃圾焚烧过程中CO的排放规律

Fig.2 CO emissions of MSW during incineration

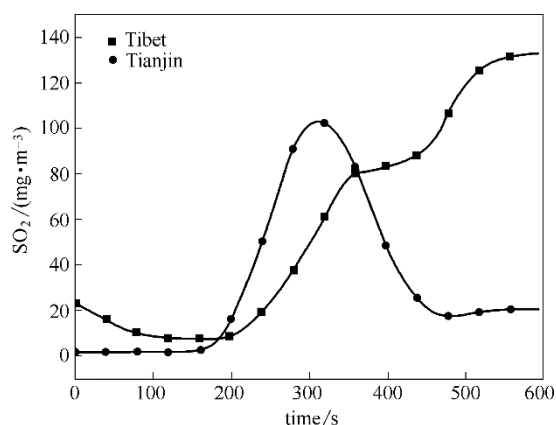


图3 两种垃圾焚烧过程中SO₂的排放规律

Fig.3 SO₂ emissions of MSW during incineration

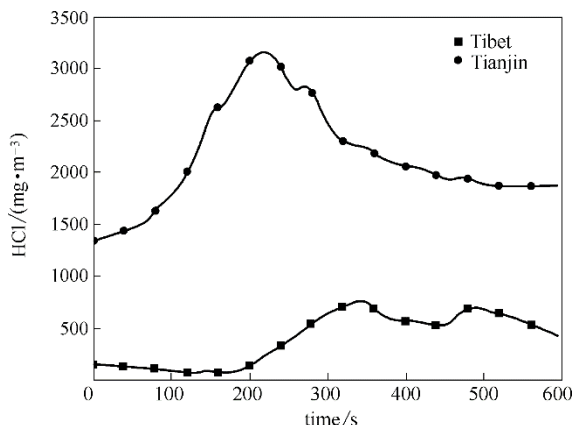


图4 两种垃圾焚烧过程中HCl的排放规律

Fig.4 HCl emissions of MSW during incineration

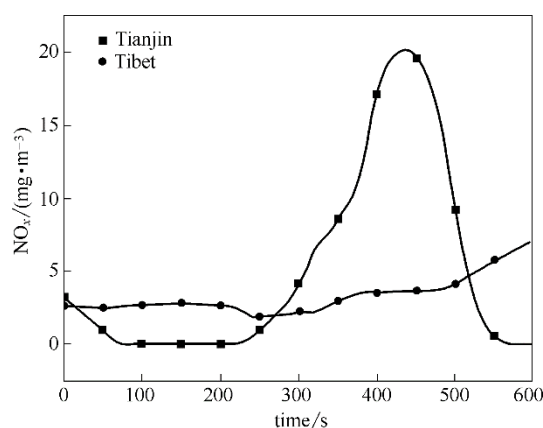
时已趋于0,而西藏垃圾的排量仍处于整个过程的较高水平,说明西藏垃圾在燃烧过程中需增加一次风量以促进后续更为持久的焚烧燃尽。

SO_x主要由SO₂构成,对大气污染危害较大^[20],本研究主要检测SO₂。由图3可知,西藏垃圾的SO₂排放量随反应进程不断增加,最终达到133 mg·m⁻³。

这是由于在密相区氧浓度升高,氧化性气氛增强,使得部分还原性成分降低导致了SO₂浓度的升高^[21-22]。而天津垃圾的SO₂排放量则为先升高后降低,在315 s时达103 mg·m⁻³。对于西藏垃圾焚烧时,需特别注意烟气的脱硝装置。

由图4可以看出,整个过程中天津垃圾的HCl排放量远高于西藏垃圾,这与天津市垃圾中餐厨垃圾量较高、盐分含量较高有关。氯含量是影响PCDD/Fs生成的重要因素^[23-24],西藏垃圾中氯含量较低,在焚烧中更具优势。西藏污泥在350 s时达到最高值766 mg·m⁻³,稍加净化即可达标排放。

图5为西藏垃圾和天津垃圾焚烧过程中NO_x排放量,可以看出西藏垃圾焚烧过程中NO_x排量很低,较为清洁。天津垃圾在200~550 s期间出现了NO_x排放量高峰期,但仍未超标。这可能与焚烧过程中空气当量比较低、氧气浓度不足有关。

图5 两种垃圾焚烧过程中NO_x的排放规律Fig.5 NO_x emissions of MSW during incineration

2.2.2 西藏、天津污泥对烟气中污染物的影响 图6~图9分别展示了西藏污泥和天津污泥在焚烧过程中的CO、SO₂、HCl、NO_x的排放规律。由图6可知,西藏污泥在焚烧过程中CO的排放量一直较为稳定,仅在反应初期,床层物料的燃烧进程加快快速析出挥发分时^[25],CO排放量有一个明显增加的过程。而天津污泥在反应前部分(100~300 s),有一个明显的增加和下降过程,说明天津污泥在该部分反应剧烈,焦炭反应不充分,部分转为CO排放。由此说明,在相同一次风量下,西藏污泥燃烧得更加充分。

图7展示了西藏污泥与天津污泥的SO₂的排放规律。可见西藏污泥与天津污泥都低于国家标准^[26](100 mg·m⁻³),且西藏污泥总排放量远低于天津污

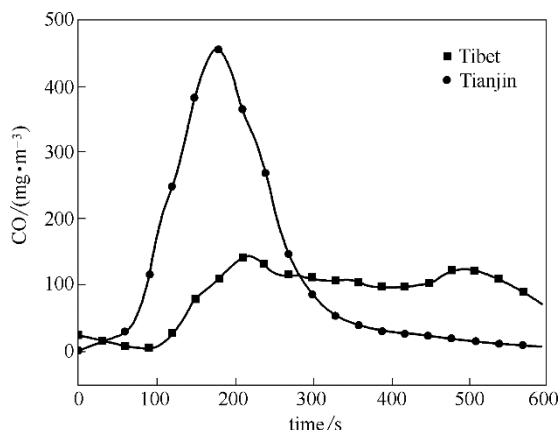


图6 两种污泥焚烧过程中CO的排放规律

Fig.6 CO emissions of SS during incineration

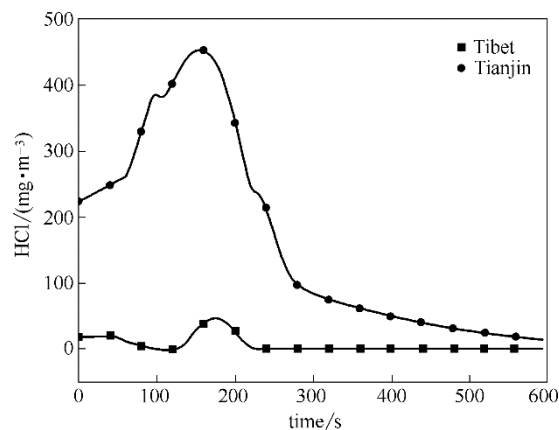


图8 两种污泥焚烧过程中HCl的排放规律

Fig.8 HCl emissions of SS during incineration

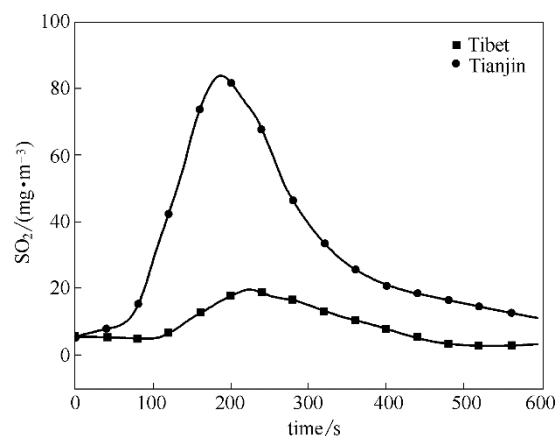


图7 两种污泥焚烧过程中SO₂的排放规律

Fig.7 SO₂ emissions of SS during incineration

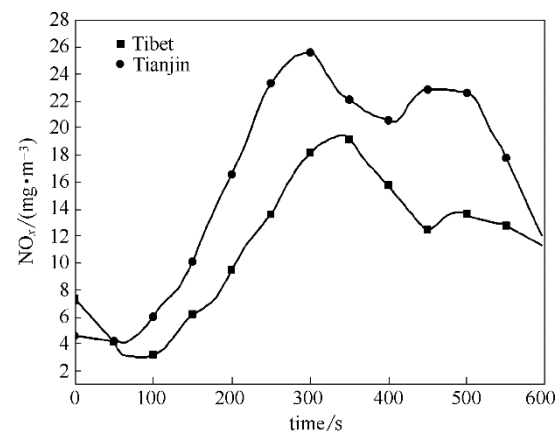


图9 两种污泥焚烧过程中NOₓ的排放规律

Fig.9 NOₓ emissions of SS during incineration

泥。由元素分析可知,两者的硫含量较低,焚烧过程中较易控制。

由图8可知,西藏污泥的HCl排放量极低,最高不超过 $46 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,低于国标中规定的 $60 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,且全程波动较小。故将西藏污泥与垃圾混合焚烧,可大幅降低混合物的HCl排放量,更具有优势。而天津污泥则在反应前半部分排除较多HCl,且全程皆超过国标量。

由图9可知,西藏污泥和天津污泥焚烧过程中NO_x排放量存在两个高峰,分别集中在100~400 s和450~600 s。两种污泥的NO_x排放总量相当,天津污泥的排放量相对较高,但均未超过国家标准。故西藏焚烧炉的烟气脱硝工艺可以参考天津已有工艺设计。

2.2.3 原料对颗粒物的影响 表4列出了西藏污泥、天津污泥、西藏垃圾和天津垃圾在焚烧过程中产生的颗粒物排放总量。可知,西藏污泥较天津污泥更为清洁,但超过了国家标准值,仍需添加布袋

表4 不同原料的颗粒物排放量

Table 4 Particle matter of different feedstock incineration

样品	颗粒物浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
天津污泥	1800
西藏污泥	312.15
天津垃圾	2696.17
西藏垃圾	3992.08

除尘等净化装置。西藏垃圾较天津垃圾产生了更多的颗粒物,高达 $3992.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,远超国家标准限值。故本研究考虑将西藏污泥和西藏垃圾进行混合焚烧,可在一定程度上降低颗粒物的排放量。

2.3 混合比例对焚烧特性分析影响

2.3.1 混合比例对烟气中污染物的影响 西藏垃圾与西藏污泥以不同比例混合焚烧,其污染物排放规律如图10~图14所示。由图10知,在污泥与垃圾混合比例为1:1和4:1时,CO的排放量在焚烧过程中均低于垃圾单独焚烧时的排放量,在污泥与垃圾混合比例为1:4时,仅小部分阶段(430~520 s)高

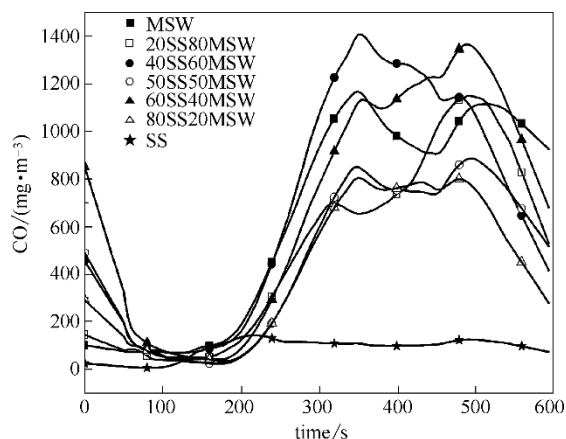


图10 不同配比下焚烧过程中CO的排放规律

Fig.10 CO emissions of various ratio

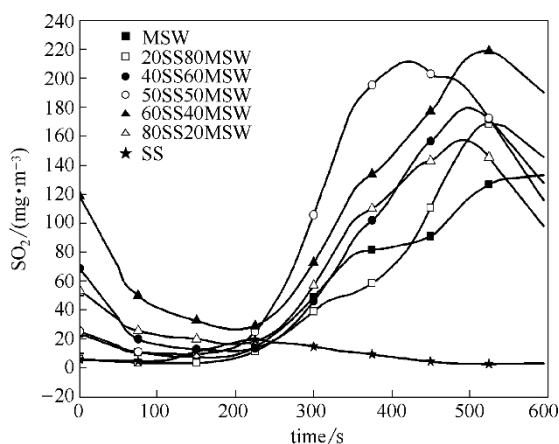


图11 不同配比下焚烧过程中SO₂的排放规律

Fig.11 SO₂ emissions of various ratio

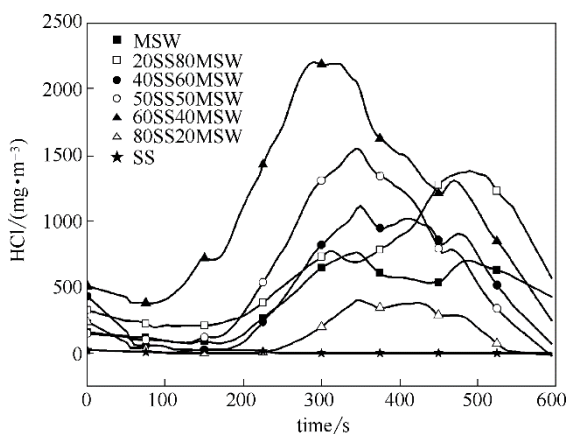


图12 不同配比下焚烧过程中HCl的排放规律

Fig.12 HCl emissions of various ratio

于垃圾单独焚烧时的排放量,但混合后的CO排放量均高于污泥单独焚烧时的污染物排放量。污泥与垃圾混合比例为4:1时,CO排放量均低于剩余混合比例情况,通过此种混合方法,较垃圾单独焚烧CO排放量降低了23.06%。

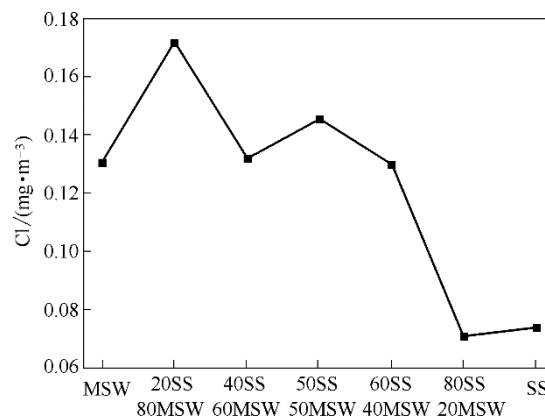


图13 不同配比下焚烧过程中总氯的排放规律

Fig.13 Cl emissions of various ratio

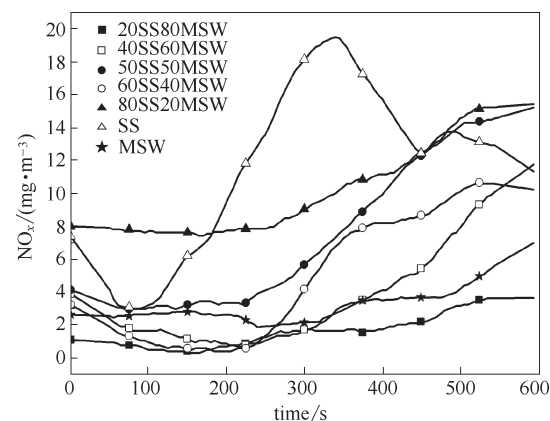


图14 不同配比下焚烧过程中NOₓ的排放规律

Fig.14 NOₓ emissions of various ratio

由图11知,在污泥与垃圾混合后,SO₂的排放量均较单组分燃烧时有所增加。尤其集中在300 s之后,这可能是由于混合后,热值增高,燃烧温度有所升高,促进了SO₂的生成。但污泥与垃圾混合比例为1:4时,SO₂的排放量在焚烧过程中存在一段时间低于垃圾单组分燃烧的排放量,总排放量与垃圾相当。

由图12和图13可知,在污泥与垃圾的混合比例为4:1时,HCl的排放量在焚烧过程中均低于垃圾单独焚烧时的排放量,在污泥与垃圾混合比例为2:3和3:2时,仅略高于(250~500 s)垃圾单独焚烧时的排放量,剩余混合比例的HCl排放量均高于单组分焚烧时的污染物排放量。污泥与垃圾混合比例为4:1时,较垃圾单独焚烧HCl排放量降低了45.51%。这是由于西藏污泥原料中的氯含量(1432.94 mg·kg⁻¹)远低于西藏垃圾原料中的含量(7097.94 mg·kg⁻¹),印证了两种原料混合焚烧的有利作用。注意到混合比例为4:1时,总氯排放量较污泥单独焚烧时更低,这说明,污泥中含有的Al、K、

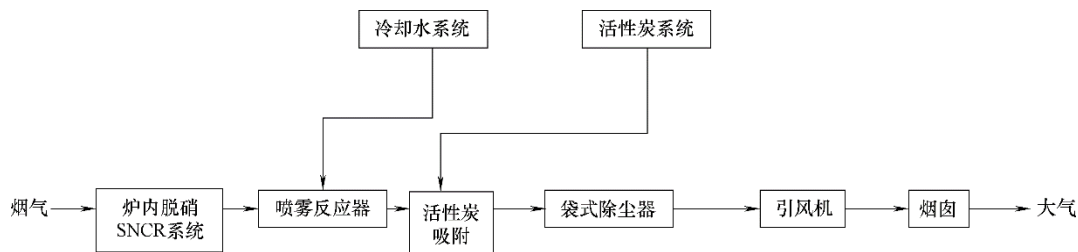


图 15 烟气净化系统

Fig.15 Flue gas cleaning system

Mg、Na、Mn 等碱性元素的存在对混合物进行了中和^[27],使得污泥与垃圾的混合焚烧出现了协同作用。但在该比例下仍存在超标现象,需要外加净化系统吸收 HCl。

由图 14 可得西藏污泥和垃圾及两者混合物在焚烧过程中 NO_x 排放量。在所有原料中,西藏污泥 NO_x 排放量最高,这与 2.1 节中污泥中氮元素含量达到 6.46% 描述一致。西藏垃圾 NO_x 排放量较低,故两者混合物的 NO_x 排放量随污泥所占比例升高而升高。

2.3.2 混合比例对颗粒物的影响 由表 5 可知,在污泥与垃圾混合比例为 1:4 与 3:2 时,颗粒物的排放量远低于垃圾单独焚烧过程,其余混合比例也都较垃圾单独焚烧时有所降低,但均远高于污泥的排放量。污泥与垃圾混合比例为 3:2 时,颗粒物浓度排放量较垃圾单独焚烧时降低了 46.76%。

表 5 不同混合比例下颗粒物排放量
Table 5 Particle matter of various ratio

样品	颗粒物浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
MSW	3992.08
SS	312.15
20SS80MSW	2196.58
40SS60MSW	3172.57
50SS50MSW	2447.22
60SS40MSW	2125.58
80SS20MSW	2765.38

由以上论述知,污泥与垃圾混合比例为 4:1 时,CO 排放较垃圾单独焚烧时降低了 23.06%,HCl 降低了 45.51%,颗粒物排放量降低了 30.73%。可初步确定污泥与垃圾的优化混合比例为 4:1,较垃圾单独焚烧更为清洁环保,但实际中需根据污泥与垃圾的产量进行适当调整。

2.4 烟气净化系统选取

生活垃圾焚烧烟气组成复杂,主要包括酸性气体、碳氧化物、重金属、粉尘、二噁英及呋喃等^[28]。根

据实验结果,如果烟气直接排放多有超标现象,考虑到西藏的特殊环境,故在后续设置净化系统尤为重要。

根据混合物焚烧的烟气组分,设置了如图 15 所示的烟气净化系统,包括脱硝系统、颗粒除尘器、活性炭吸附、袋式除尘等装置。脱硝系统可以脱除 NO_x 等酸性化合物,喷雾反应器中主要使用碱性药物去除 HCl、 SO_2 等酸性气体^[29],活性炭可吸附重金属、二噁英等污染物,去除效率可达 95% 以上^[30],保证达标排放至大气。考虑到焚烧烟气的净化技术相对成熟,与平原地区更为相近,且由于实验装置的自身问题,故未开展采用烟气净化系统的研究。后续拟在西藏进行更为详细的针对性研究。

3 结 论

本研究分析了西藏垃圾/污泥的特点,利用层燃焚烧炉分析了西藏和天津垃圾/污泥在焚烧过程中的差异,得出西藏污泥、西藏垃圾的焚烧污染排放情况优于天津污泥与垃圾情况。探讨了西藏垃圾和污泥在不同混合比下的焚烧特性,初步确定了西藏污泥与垃圾混合焚烧的最佳掺混比为 4:1,CO 排放降低达 23.06%,HCl 降低达 45.51%,颗粒物浓度降低约 30.73%。但实际中需根据污泥与垃圾的产量进行适当调整。本研究结果为西藏污泥、垃圾的处置提出了新思路,对其污染物控制提供了指导,为后续工程应用提供了技术参考。

参考文献

- [1] Han Z Y, Zeng D, Li Q B, et al. Public willingness to pay and participate in domestic waste management in rural areas of China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 140: 166-174
- [2] 张英民, 尚晓博, 李开明, 等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 389-396.
Zhang Y M, Shang X B, Li K M, et al. Technologies status and management strategies of municipal solid waste disposal in China [J]. Ecology and Environment, 2011, 20(2): 389-396.

- [3] 韩智勇, 费勇强, 刘丹, 等. 中国农村生活垃圾的产生量与物理特性分析及处理建议[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(15): 1-14.
Han Z Y, Fei Y Q, Liu D, et al. Yield and physical characteristics analysis of domestic waste in rural areas of China and its disposal proposal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(15): 1-14.
- [4] Jiang J, Lou Z, Ng S, et al. The current municipal solid waste management situation in Tibet[J]. Waste Management, 2009, **29**(3): 1119-1186.
- [5] 平措, 吴坚扎西, 卞利强, 等. 略谈西藏偏远农牧区生活垃圾污染问题[J]. 西藏科技, 2015, (6): 48-49.
Ping C, Wu J Z X, Bian L Q, et al. The pollution of household garbage in remote agricultural and pastoral areas of Tibet[J]. Tibet Science and Technology, 2015, (6): 48-49.
- [6] 韩智勇, 旦增, 孔垂雪. 青藏高原农村固体废物处理现状与分析——以川藏5个村为例[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(3): 451-457.
Han Z Y, Dan Z, Kong C X. Current status of solid waste disposal in rural areas of the Tibetan Plateau: a case study of five villages in the Sichuan-Tibet Region[J]. Journal of Agro-environment Science, 2014, **33**(3): 451-457.
- [7] 伍远辉, 潘仕江, 巫受群, 等. 城市污水处理厂污泥无害化处理研究[J]. 广州化工, 2015, **43**(11): 13-15.
Wu Y H, Pan S J, Wu S Q, et al. Research on harmless treatment of sludge in municipal sewage treatment plant[J]. Guangzhou Chemical Industry and Technology, 2015, **43**(11): 13-15.
- [8] 李苹. 西藏地区典型本地源PBDEs组分和环境行为[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
Li P. Composition and environmental behavior of PBDEs from typically local sources in the Tibetan Plateau: a case study of Lhasa Landfill[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [9] 彭政. 垃圾焚烧飞灰二噁英的控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
Peng Z. Mechanism and experimental study on PCDD/Fs control for fly ash during wastes incineration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [10] 崔有为, 丁洁然, 陈叶菲, 等. 盐度入侵城市污水处理厂对淡水活性污泥的毒性抑制[J]. 化工学报, 2012, **63**(5): 1566-1573.
Cui Y W, Ding J R, Chen Y F, et al. Assessment on effect of salt toxicity on activity of activated sludge in wastewater treatment plant[J]. CIESC Journal, 2012, **63**(5): 1566-1573.
- [11] 祁昌炜, 王佳音, 朱进守, 等. 西藏主要农业生态环境问题现状研究和对策[J]. 四川建材, 2017, **43**(10): 80+82.
Qi C W, Wang J Y, Zhu J S, et al. Current situation and countermeasures of main agricultural eco-environment problems in Tibet[J]. Sichuan Building Materials, 2017, **43**(10): 80+82.
- [12] 旦增, 韩智勇. 青藏高原地区旱季城市生活垃圾特性研究[J]. 中国沼气, 2012, **30**(6): 33-36.
Dan Z, Han Z Y. Analysis on the characteristics of MSW during dry season in Tibetan Plateau[J]. China Biogas, 2012, **30**(6): 33-36.
- [13] Zhou H, Meng A, Long Y, et al. An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: physical, chemical composition and heating value[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, **36**: 107-122.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤的元素分析: GB/T 31391—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Ultimate analysis of coal: GB/T 31391—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 固体生物质燃料工业分析方法: GB/T 28731—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Proximate analysis of solid biofuels: GB/T 28731—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [16] Chen G, Yang R, Cheng Z, et al. Nitric oxide formation during corn straw/sewage sludge co-pyrolysis/gasification[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **197**: 97-105.
- [17] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 农用污泥污染物控制标准: GB 4284—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Control standards of pollutants in sludge for agricultural use: GB 4284—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [18] 姚毅, 李博, 王飞, 等. 深圳市污水处理厂污泥焚烧处理可行性研究[J]. 环境卫生工程, 2011, **19**(5): 31-34.
Yao Y, Li B, Wang F, et al. Feasibility of incineration treatment of sludge from Shenzhen sewage treatment plants[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2011, **19**(5): 31-34.
- [19] 张望, 蒋文举, 刘琛, 等. 微波法制备软锰矿-污泥基活性炭的工艺条件及吸附性能研究[J]. 四川化工, 2009, **12**(1): 41-45.
Zhang W, Jiang W J, Liu C, et al. Study on Preparation of pyrolusite-sludge-based activated carbon by microwave radiation and its adsorption capability[J]. Sichuan Chemical Industry, 2009, **12**(1): 41-45.
- [20] 李诗媛, 别如山. 城市生活垃圾焚烧过程中二次污染物的生成与控制[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, (3): 63-67.
Li S Y, Bie R S. Formation and control method of secondary pollutants from incineration of municipal solid waste[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, (3): 63-67.
- [21] 朱葛, 赵长遂, 陈晓平, 等. 石化污泥与煤流化床混烧污染物排放特性[J]. 化工学报, 2008, **59**(10): 2627-2633.
Zhu G, Zhao C S, Chen X P, et al. Characteristics of pollutant emissions from co-combustion of petrochemical sludge with coal in fluidized bed[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, **59**(10): 2627-2633.
- [22] 向柏祥, 杨海瑞, 吕俊复. 燃煤锅炉烟气中SO₃生成的化学动力学模型和实验研究[J]. 化工学报, 2017, **68**(7): 2896-2909.
Xiang B X, Yang H R, Lyu J F. Kinetic modelling and experimental studies on SO₃ generation in flue gas for coal-fired boiler[J]. CIESC Journal, 2017, **68**(7): 2896-2909.
- [23] 杨忠灿. 垃圾焚烧过程中氯源对HCl和二噁英排放特性影响的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
Yang Z C. Study on effects of chlorine sources on emission of HCl and PCDD/Fs during municipal solid wastes incineration[D].

- Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [24] 李润东, 聂永丰, 李爱民, 等. 垃圾焚烧飞灰熔融过程二噁英分解特性[J]. 化工学报, 2004, **55**(4): 668–672.
- Li R D, Nie Y F, Li A M, et al. Decomposition characteristics of PCDD/Fs during melting process of municipal solid waste incinerator fly ash[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2004, **55**(4): 668–672.
- [25] 梁立刚. 城市生活垃圾层状燃烧过程试验研究及数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- Liang L G. Experiment study and numerical simulation on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [26] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 生活垃圾焚烧污染控制标准: GB 18485—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for pollution control on the municipal solid waste incineration: GB 18485—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [27] 雷鸣. 小型农村生活垃圾热处理炉二噁英及重金属的排放特性及控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- Lei M. Emission characteristics and control of PCDD/Fs and heavy metals from small-scale thermal treatment furnace for disposing rural domestic solid waste[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [28] 荆慧. 生活垃圾焚烧厂烟气净化处理技术分析[J]. 化学工程与装备, 2019, (2): 285–287.
- Jing H. Analysis on flue gas purification treatment technology of domestic waste incineration plant[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2019, (2): 285–287.
- [29] 李诗媛, 别如山, 吕响荣. 流化床中钙基吸收剂与HCl的反应机理[J]. 化工学报, 2005, **56**(2): 318–323.
- Li S Y, Bie R S, Lyu X R. Reaction kinetics of Ca-based sorbents with HCl in fluidized bed[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2005, **56**(2): 318–323.
- [30] 李晓东, 杨忠灿, 严建华, 等. 含氯废弃物燃烧过程中HCl排放特性[J]. 化工学报, 2003, **54**(10): 1486–1489.
- Li X D, Yang Z C, Yan J H, et al. HCl emission during chloride wastes combustion process[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2003, **54**(10): 1486–1489.