

固体回收燃料焚烧技术的研究现状及发展方向*

蒋旭光¹ 吴磊¹ 李晓东¹ 严建华¹ 邓小兵²

(1.浙江大学能源清洁利用国家重点实验室,浙江 杭州 310027;2.杭州立佳环境服务有限公司,浙江 杭州 311100)

摘要 固体回收燃料(SRF)是由城市生活垃圾(MSW)经机械生物处理(MBT)而得,具有高热值、低氯和含汞的特点,是继垃圾衍生燃料(RDF)之后的一种新型燃料。目前SRF焚烧技术在国内外已有一定的基础研究,但仍需要向大规模、高参数(高蒸汽温度和压力)、稳定运行方向发展。从垃圾焚烧现状入手,简述了国外SRF焚烧和共处置技术的研究现状,同时回顾了国内对MSW和RDF焚烧技术的相关研究,分析了SRF焚烧和共处置时污染物排放的规律,以及SRF对共处置锅炉运行工况的影响。最后指出了实现SRF焚烧技术的大规模、高参数工业应用必须研究的3个方面,包括:SRF的分类方法和燃烧模型,烟气净化系统的改进,SRF焚烧对锅炉腐蚀、结渣和积灰生长的影响。

关键词 固体回收燃料 焚烧 共处置 回收 废物处理

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.10.020

State and developing direction on solid recovered fuel incineration technology JIANG Xuguang¹, WU Lei¹, LI Xiaodong¹, YAN Jianhua¹, DENG Xiaobing². (1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027; 2. Hangzhou Lijia Environmental Services Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 311100)

Abstract: Solid recovered fuel (SRF) was made from municipal solid waste (MSW) by mechanical-biological treatment (MBT), with the characteristics of high calorific value, low chlorine and mercury-containing. It was a new type of fuel following the refuse derived fuel (RDF). Although there were some basic researches at home and abroad, SRF incineration technology still needed the deep research on large scale, high parameters (high steam temperature and pressure) and stable operation. Based on the state of MSW incineration, the present research of SRF incineration and co-disposal abroad was described. At the same time, domestic researches on MSW and RDF incineration technology were reviewed. Emission of fine particles and pollutants was analyzed, as well as the impact on the boiler operation. At last, three fields were put forward to realize the application of SRF incineration in large-scale and supernal parameters, including SRF classification method and combustion model, improvement of flue gas purification system and influence of SRF incineration on boiler corrosion, slagging and ash growth.

Keywords: solid recovered fuel; incineration; co-disposal; recovery; waste treatment

随着经济飞速发展,城市化进程不断加快,城市生活垃圾(MSW)产量也不断增加,环境问题日益显现。2015年,我国MSW清运量为19 141.9万t,无害化处理厂890座,其中卫生填埋场640座,焚烧厂220座,其他处理设施30座;生活垃圾无害化处理率达到94.1%,卫生填埋11 483.1万t,焚烧处理量6 175.5万t^[1]。据欧盟统计局(Eurostat)公布的数据显示,2015年欧盟城市垃圾产量24 225.8万t,总处理量23 539.6万t,其中填埋6 199.8万t,焚烧6 437.9万t。而美国2014年MSW总产生量为25 850万t,人均MSW产生量为1.98 kg/d;8 940万t被回收利用和堆肥,其中回收利用量为6 640万t,

此外焚烧处理量为3 310万t^[2]。

截至2016年年底,我国投入运行的生活垃圾焚烧发电厂有250座,总处理能力为23.8万t/d,总装机容量约为4 906 MW。其中采用炉排炉焚烧的有168座,合计处理能力达到16.5万t/d,装机容量达到3 066 MW;其余主要采用流化床焚烧,总计有82座,合计处理能力为7.3万t/d,装机容量达到1 840 MW^[3]。

我国的《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)全面提高了污染物的排放控制要求,国内一些老旧的流化床垃圾焚烧厂由于超标排放等问题面临淘汰和改造的压力。特别是对于焚烧原生

第一作者:蒋旭光,男,1965年生,博士,教授,主要从事废弃物资源化与资源化利用方面的研究。

* 国家自然科学基金创新研究群体项目(No.51621005);国家自然科学基金资助项目(No.51676172);国家重点基础研究发展“973计划”项目(No.2011CB201500);国家高技术研究发展“863计划”项目(No.2012AA063505);环保公益性行业科研专项(No.201209023-4)。

垃圾或仅做粗破碎的流化床焚烧炉,存在给料不够均匀,锅炉燃烧工况稳定性差,积灰严重导致连续运行时间短,污染物排放不稳定甚至超标等一系列难题,所以研究由MSW制备而成的固体回收燃料(SRF)及其相关焚烧技术,对改善流化床垃圾焚烧厂的燃烧稳定性,缓解我国现有垃圾焚烧厂存在的压力,具有非常重要的意义。

1 SRF的标准与生产

鉴于流化床垃圾焚烧技术对垃圾预处理要求较高,如需要破碎、除铁等工艺,同时需要降低垃圾水分以提高热值,以欧盟为代表的国外研究人员,提出了通过建设机械生物处理(MBT)厂,将MSW制成SRF的新技术,同时开展了SRF焚烧和共处置技术的研究。

SRF的主要成分是生物组分(质量分数40%~80%),总体上包含以下5类:木材、纸类;纺织品和纤维;橡胶和塑料;其他材料(废墨、废吸附剂、废活性炭);非危险混合废物中的高热值部分^[4]。

1.1 SRF的分类标准

根据欧盟“Solid recovered fuels - guidelines on occupational health aspects”(CEN/TR 15441-2006)的规定,SRF是一种高度不均匀的混合物,由非危险废物的高热值部分制备而成。它是继垃圾衍生燃料(RDF)之后的一种新型燃料,能为设备的运行、燃烧稳定性和污染物的低排放提供保障,并可能成为提高部分城市废物和特殊废物中的能源利用率的关键。国际上SRF的分类和规格要求遵循了欧盟的特定质量标准“Solid recovered fuels - specifications and classes”(EN 15359-2011),该标准由欧洲标准化委员会通过。它建立了一个基于3个参数极限值的分类系统:用低位发热量(NCV)作为经济参数,氯含量作为技术参数,汞含量作为环境参数。制定这一标准的目的是通过促进对SRF的接受和使用,实现其在燃料市场上的商用价值。分类系统

标准如表1所示。

1.2 SRF的生产途径

MBT通过生物和机械的过程来稳定有机物,是生产SRF的最常用方式。此外,这种处理方式能回收可循环材料。MBT得到的混合废物可以制成SRF,其具有较高的挥发分以及氯和钙含量,同时相比于RDF,不需要压制成颗粒,减少了制作成本,从而更好地实现混合废物的利用。

在欧盟,由MSW制成的SRF量大约为每年1200万t。SRF作为廉价的可替代能源给能源产业部门带来持续增长的利润,很多国家建设了新的MBT厂,由MSW制成的SRF量年复一年地增长^[5]。从2005至2011年,欧洲的MBT厂数量增长了60%,达到330座以上,总处理量大约为3300万t^[6]。

MBT有多个处理阶段,每个阶段都会产生不同种类的废料。产物的特性一方面由MBT厂的设计决定,另一方面由物料组成以及当地的固体废弃物管理办法决定。EDO ALCÓN等^[7,19]和RAMOS等^[8,21]已通过实验验证了在MBT的处理过程中获得的废料是符合EN 15359-2011要求的SRF。

2 国外对SRF焚烧技术的研究

国外现有的SRF焚烧技术研究主要集中在欧盟,自20世纪90年代以来,德国从混合的城市废物和特定产业的商业废料中获得的SRF已在电厂中实现了煤和SRF共处置。从2004年开始共处置SRF的量显著增加,到2005年,共处置SRF量已经增加到30万t,而到2009年已达到74万t。THIEL等^[9]指出2010年德国大约有80万tSRF被利用,其中68%用于褐煤燃烧电厂,22%用于烟煤燃烧电厂,这说明德国的SRF焚烧技术主要应用于燃煤电厂煤和SRF的共处置。

2.1 SRF的燃烧特性

由于废物来源、生产工艺等的区别,SRF的化学组分会在一定程度上有所区别。通过比较不同实验

表1 SRF分类系统
Table 1 SRF classification system

级别	分类参数			
	NCV 平均值 ¹⁾ /(MJ·kg ⁻¹)	氯平均值(质量分数) ²⁾ /%	汞中位数 ¹⁾ /(mg·MJ ⁻¹)	汞第80百分位数 ¹⁾ /(mg·MJ ⁻¹)
1	≥25	≤0.2	≤0.02	≤0.04
2	≥20	≤0.6	≤0.03	≤0.06
3	≥15	≤1.0	≤0.08	≤0.16
4	≥10	≤1.5	≤0.15	≤0.30
5	≥3	≤3	≤0.50	≤1.00

注:1)收到基;2)干燥基。

研究中所使用的 SRF 元素分析和工业分析结果,可以发现和煤相比,其挥发分、氯和钙含量更高,而灰分、氮、硫、硅、铝、钾和铁等含量相对较低,如表 2 所示。通过热重(TG)分析、在实验室沉降炉内模拟工业锅炉燃烧 SRF 的工况等途径,探究燃烧 SRF 时各物质的析出时间,为研究 NO_x 、 SO_2 、 HCl 等污染物的排放特性、细颗粒物形成和排放的影响、重金属的迁移规律等提供一定的理论基础。

表 2 SRF 与煤的特性比较¹⁾
Table 2 Comparison of properties of SRF and coal

特性	煤	SRF
低位发热量/($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	26.53	20.86
水分(质量分数)/%	5.25	5.20
挥发分(质量分数)/%	34.11	72.05
灰分(质量分数)/%	10.42	5.69
碳(质量分数)/%	71.00	58.00
氢(质量分数)/%	4.90	6.60
氮(质量分数)/%	1.50	1.00
硫(质量分数)/%	0.70	0.42
氯(质量分数)/%	0.03	0.28
钙(质量分数)/%	0.18	0.67
硅(质量分数)/%	3.06	1.08
铝(质量分数)/%	1.21	0.21
钾(质量分数)/%	0.21	0.09
铁(质量分数)/%	0.60	0.28

注:¹⁾数据来自文献[10]。

在 TG 分析方面,WAGLAND 等^[11]对合成的 SRF(58%(质量分数,下同)纸类,22%塑料制品,15%纺织品和 5%木材)进行 TG 分析得出:相比于 RDF,SRF 是一种具有相对较高热值、低氯和汞含量以及更低的金属排放,并相对廉价的燃料,SRF 与 RDF 特性数据如表 3 所示。DUNNU 等^[12]通过 TG 分析,得到 SRF 挥发分在 220 °C 左右开始析出,在 490 °C 左右结束,和煤相比,有着更低的析出温度、更高的挥发分含量、更窄的温度区间。MEDIC PEJIC 等^[13]对取自西班牙不同季节不同地区的 10 种 SRF 样品分别使用了 4 种测试方法(TG、差示扫描量热(DSC)、尘雾的最小着火能量(MIE)、最小着火温度(MIT))来研究其特性,结果表明 10 种样品的燃烧过程都开始于 230~240 °C,但组分上的差异也会影响其氧化作用。EDO ALCÓN 等^[7]26]对取自西班牙 3 个不同 MBT 厂的 6 种废弃物进行了热力学研究,结果表明:第 1 阶段是可生物降解部分(有机组分、纸或硬纸板)在 290 °C 燃烧,330 °C 分解;第 2 阶段是塑料在 435~440 °C 的挥发;第 3 阶段是惰性物质碳酸盐类在 700 °C 燃烧,725 °C 分解。这使得利用已有的水泥窑、电站锅炉、工业锅炉共处置 SRF 来替

代现有的垃圾专用焚烧炉具有了可行性。

表 3 SRF 与 RDF 样品特性比较¹⁾
Table 3 Comparison of properties of SRF and RDF

特性	SRF	RDF
低位发热量/($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	11.8	13.2
水分(质量分数)/%	3.0	30.4
挥发分(质量分数)/%	79.6	46.1
灰分(质量分数)/%	11.1	16.2
碳(质量分数)/%	40.5	28.1
氢(质量分数)/%	5.3	3.4
氮(质量分数)/%	0.03	0.98
硫(质量分数)/%	0.07	0.32
氯(质量分数)/%	0.02	0.25
汞(质量分数)/%	0.07	0.19

注:¹⁾数据来自文献[11]。

在实验室研究方面,HILBER 等^[14]研究了沉降炉共处置 SRF 时氯和汞的迁移规律,结果表明,SRF 中氯的高含量会导致烟气中气态氯含量增加,气态氯占总氯的 50%~70%(质量分数)。SRF 中氯的含量对离子态汞 HgCl_2 浓度没有直接影响,而通过飞灰过滤系统后基本没有汞存在,因此实验中使用的 SRF 并不会增加总汞排放量。WU 等^{[10]、[15]}对在沉降炉中共处置 SRF 时的污染物排放、重金属迁移特性和添加剂的影响等进行了研究,结果表明,随着 SRF 所占比例的增加,燃料的燃尽程度、 NO 和 SO_2 排放都有减少,灰沉积率和飞灰的沉积倾向下降。煤和 SRF 共处置会增加飞灰颗粒中微量元素含量,而 SRF 的高氯含量会增加排放烟尘的毒性。

2.2 SRF 商用锅炉的研究

受限于设备的尺寸、结构上的差异,实验室研究虽然采用接近实际工业情况的燃烧温度、过量空气系数等参数,但是仍不能完全说明 SRF 焚烧对实际锅炉运行情况的影响。因此还需要通过开展 SRF 焚烧的工业研究,对污染物和颗粒物的形成与排放、重金属迁移特性、腐蚀性等进一步分析,为更好地实现 SRF 商用化提供理论依据。

RAMOS 等^[8]206]在 1 MW 鼓泡床试验台上进行了木质生物质(OTP)和 SRF 共处置实验,结果表明,两种燃料具有良好的协同效应,燃烧条件明显改善,同时 CO 浓度显著降低,而 NO_x 和 HCl 的排放量随着 SRF 的加入而增加,且二噁英浓度增加。

ÅMAND 等^[16]在 12 MW 循环流化床锅炉上进行了 3 类燃料(氯含量低的生物质、含聚氯乙烯(PVC)的高氯生物质、SRF)的对比实验,结果表明氯含量增加会导致二噁英的排放量增加。GEHR-

MANN等^[17]基于固定床反应器(料床容积0.01 m³)上获得的试验数据,进行了0.5 MW中试炉排炉实验,探究共处置SRF对炉排炉系统的生物质燃烧效率的影响,实验结果表明,20%~40%(质量分数)的SRF添加量能够达到更均匀的燃烧工况,并且可使能效提升2个到3个百分点。

HILBER等^[18]在2台600 MW锅炉内进行了SRF和煤共处置工业实验,实验结果表明,SRF添加比例为2%(质量分数,下同)、4%对电站锅炉的运行工况基本无影响。SRF燃烧充分后,CO的排放有轻微增加,而SO₂排放无明显变化。BAJAMUNDI等^[19-21]在以SRF、树皮、污泥为燃料的140 MW鼓泡床上进行了实验,通过产生机制、Factsage模拟和图谱分析等方式,分析了铜浓度与二噁英生成量之间的关系,得出两种添加方法(添加硫颗粒和添加泥煤)中添加硫颗粒来控制二噁英生成更为有效。

VAINIO等^[22]在107 MW鼓泡床上进行了SRF、树皮、污泥共处置实验,当SRF作为混合燃料的一部分时,尾部烟道可检测到大量的SO₂和HCl,但其中大多数的氯和一部分硫被布袋除尘器捕获,所以这些气体的最终排放量很低。SARABÈR^[23]在1 MW的测试炉上进行了SRF和烟煤共处置研究,实验结果表明即使共处置比例很高(SRF质量分数达到33%),产生的飞灰也能够满足欧盟《Fly ash for concrete - Part 1: definition, specifications and conformity criteria》(NEN EN 450-1)的要求。

WU等^[24]在400 MW电站锅炉内进行了SRF和煤的共处置实验,结果表明,与纯燃煤相比,SRF的加入会增加亚微米颗粒的形成和排放,特别是直径小于0.2 μm的超细颗粒。细颗粒中的Ca、P、K含量总体上比燃煤产生的略高,而S含量相对较低。

运行情况表明,共处置SRF可能带来一系列的问题,如点火技术和腐蚀问题,部分研究情况如表4所示。

欧盟共处置SRF研究以流化床为主,13处研究中有10台共处置炉采用流化床炉型,这些流化床的热功率最小为0.4 MW,最大为140 MW,仅有两处(1台400 MW和2台600 MW)采用煤粉炉来共处置SRF,而共处置的炉排炉仅有1台0.5 MW的中试炉,上述应用对我国共处置SRF技术的研究和应用可起到一定指导性作用。表5对共处置SRF的影响情况进行了总结,包括燃尽程度、颗粒物与污染物排放以及腐蚀特性等。可以看出,SRF以与煤共处置燃烧为主,同时也可以与生物质共燃烧。

整体而言,焚烧SRF成功与否的关键在于焚烧情况以及腐蚀问题。SRF给料均匀是燃烧稳定的前提,部分焚烧原生垃圾的垃圾焚烧炉,CO等污染物排放超标的一个重要原因就是给料不均匀。由于我国垃圾分类情况差、水分高、组分复杂,针对由MSW制备的SRF,需要有切合我国实际情况的标准。过高的水分会导致垃圾热值不够,从而导致燃烧温度达不到850℃,对锅炉的运行、污染物的排放等起到负面影响,通过筛选SRF粒径,可以解决如

表4 燃烧SRF时的运行情况研究
Table 4 Study on the operation of combustion SRF

装置	主要研究内容	文献
12.25 MW的流化床	燃烧SRF,通过对其3 a运行情况的分析,获得性能和环保数据,同时对停炉事故原因进行了研究	[25]
80 MW鼓泡床	燃烧SRF时溴的迁移特性研究。溴具有与氯相似的特性,会引起结渣、积灰和腐蚀	[26]
12 MW循环流化床	SRF和污水污泥共处置,研究结果表明纯烧SRF时,304L不锈钢表面形成一层含大量腐蚀性碱金属氯化物的氧化膜	[27]
107 MW鼓泡床	燃烧SRF、树皮和污泥混合物的实验,结果表明,尾部烟道和烟囱中H ₂ SO ₄ 质量浓度在1.34 mg/m ³ 以下,酸露点腐蚀风险很小;而在腐蚀沉积物中发现大量的CaCl ₂ ,形成湿腐蚀沉积,限制排烟温度的降低	[28]

表5 SRF共处置对锅炉运行的影响
Table 5 Effect of SRF co-operation on boiler

共处置影响	影响结果
燃尽程度	与煤共处置,随SRF添加比例的提高而下降;与OTP共处置时能明显改善燃烧条件,降低CO浓度
颗粒物	排放量增加
HCl	随着SRF比例提高而增加,会造成设备的腐蚀,但可以在脱硫装置(FGD)中被脱除
汞	灰中以HgCl ₂ 的形式存在,烟气中浓度基本不受影响
NO _x 、SO ₂	与煤共处置时,排放量下降或基本不变;与OTP共处置时,随着SRF的加入,NO _x 排放量增加
腐蚀性	SRF比例的提高会使腐蚀性增加,与氯和溴化阻燃剂(BFRs)含量有关
二噁英	随着SRF比例提高而增加,与氯和铜含量有关

今垃圾焚烧炉存在的部分给料问题,包括成块入炉、连续性和均匀性差等,同时可以降低污染物的排放。受热面腐蚀和积灰问题往往决定了锅炉的连续运行时间,同时也是影响循环流化床垃圾焚烧炉向高参数(高蒸汽温度和压力)和长运行小时数发展的关键因素,所以研究焚烧 SRF 时受热面的腐蚀结渣机理,寻求减少受热面腐蚀、积灰结渣的方法也是 SRF 焚烧技术要研究的方向。

2.3 SRF 在焚烧炉内燃烧过程的数值模拟

SRF 的数值模拟研究常与实际情况进行对比分析,从而为 SRF 焚烧设备的设计和实际运行提供基础。

AGRANIOTIS 等^[29]以 600 MW 的褐煤锅炉作为研究对象,通过数值模拟方法探究燃料尺寸和添加位置对 SRF 和褐煤共处置的影响。DUNNU 等^[30]对燃煤电厂煤粉炉共处置 SRF 建立了一个弹性粒子模型,研究表明 SRF 的阻力系数介于 0.6~2.0,均值为 1.5。MIKULČIĆ 等^[31]对水泥分解炉共处置 SRF 的方式进行了研究,通过数值模拟得到不同 SRF 比例下的温度、速率和组分浓度,为最大的煤粉替代率提供了依据。

数值模拟采用的炉型以电厂煤粉炉为主,也有部分采用水泥分解炉。模拟结果表明 SRF 的粒径小于 0.5 mm 时能够燃尽,且应避免在上层燃烧器投入,水泥分解炉最大的煤粉替代率可达 50%(质量分数)。

3 国内已有的相关研究

《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施规划建设规划》^[32]指出,截至 2015 年底,全国设市城市和县城生活垃圾无害化处理能力达到 75.8 万 t/d,生活垃圾无害化处理率 90.2%;到 2020 年,直辖市、省会城市和计划单列市生活垃圾全部实现无害化处理,设市城市生活垃圾无害化处理率达到 100%以上,县城生活垃圾无害化处理率达到 80%以上。国内对 SRF 的

研究才刚刚起步,但是对 MSW 和 RDF 的特性已进行了很多研究,结合国内已有的 MSW 和 RDF 研究结果,能够为我国的 SRF 研究提供方向。

从针对 MSW 和 RDF 的机理研究^[33-37]可以看出,木竹和纸类之间的热解交互影响较小,而纸类和聚乙烯(PE)的交互影响则较大。升温速率显著影响半纤维素和纤维素的分解;氧浓度主要影响纤维素和木质素的燃烧,氧浓度增加,会降低着火点以及峰值温度,使燃烧过程更容易进行;水分使燃烧变困难,但灰分的残留会降低。MSW 和 RDF 的主要燃烧阶段分为生物质燃烧、聚合物燃烧和碳酸盐类燃烧。在上述研究基础上,我国需针对 SRF 的燃烧机理做进一步的研究。

在 SRF 焚烧的数值模拟研究方面,国内也还没有开展,下一步需要参照已有研究^[38-40],利用 Fluent、Aspen 等软件,进行 SRF 煤粉炉共处置和流化床焚烧的模拟研究,建立全流程仿真模型,分析炉内流场、温度场、组分分布场,通过调整二次风配风口的布置形式及二次风风速等参数,获得共处置 SRF 焚烧炉的最优化运行参数,以及不同工况对污染物排放特性的影响情况。

在污染物排放特性研究方面,国内学者对 CO、SO₂、NO_x、HCl 排放和重金属的迁移等都进行了一定的研究。表 6 对国内相关研究进行了总结,可以看出,国内学者的研究基本上以流化床为主,物料为 MSW、RDF 和模拟的 MSW,还没有开展 MSW 制备的 SRF 污染物排放特性的研究。

如今我国对于垃圾焚烧的各项指标要求愈加严格,所以 SRF 焚烧的污染物排放情况也成为下一步研究的重点,需要结合欧盟共处置 SRF 以及国内已有的垃圾焚烧排放特性研究的成果,建立一套适用于 SRF 焚烧的烟气净化系统,来控制 CO、NO_x、SO₂、HCl、HF、重金属以及二噁英等污染物的排放。

表 6 国内相关研究装置以及研究内容情况
Table 6 Relevant research equipments and research contents in China

序号	研究机构	装置	研究内容	文献
1	沈阳航空航天大学	燃烧室高 1 500 mm、内径 60 mm 的小型流化床	RDF 焚烧污染物排放特性	[41]
2	安徽工业大学	15 kW 实验室规模内循环流化床	RDF 焚烧污染物排放特性	[42]
3	华中科技大学	小型流化床,内径 60 mm,外径 72 mm,长度 800 mm	MSW 热处理过程中的重金属迁移与分布	[43]
4	浙江大学	0.5 MW 循环流化床系统	煤和 RDF 的混烧实验	[44]
5	浙江大学	管式炉	模拟一、二燃室焚烧自制 MSW	[45]
6	北京大学	RDF 燃烧器(内径 100 mm,高度 200 mm 玻璃空心圆柱体)	北京市 MSW 筛上物制备 RDF 的工艺条件以及添加 CaO 的影响	[46]
7	浙江大学	小型流化床,内径 60 mm,壁厚 10 mm,高度 1 100 mm	模拟生活垃圾热解、气化、焚烧等热处置过程中重金属 Cd、Pb、Zn、Cu 的迁移转化	[47]

4 总结与展望

目前,SRF的研究主要是在欧盟开展,学者们对SRF的燃烧机理、共处置时的影响因素做了一定的探索,其中多以流化床共处置为主,以大型电站锅炉共处置为辅。而我国由于垃圾分类情况差、水分高、组分复杂,焚烧时会引起设备运行工况不稳定,受热面腐蚀和积灰情况严重,给料不均匀导致污染物排放达标困难等一系列问题,因此引入SRF概念,通过对MSW的多层次处理,制备更有利于稳定焚烧的SRF是很有必要的。《关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知》明确优先选取热电联产煤电机组,布局燃煤耦合垃圾及污泥发电技改项目,这也为燃煤电厂共处置SRF吹响了号角。

为了使SRF共处置设备连续运行时间加长,污染物排放降低,整体效率提高,SRF焚烧和共处置技术今后的发展还需要对以下3方面进行更系统地研究:

(1) SRF的分类和燃烧特性数据模型。下一步需要针对我国的实际情况,参考欧盟EN 15359-2011,在已有的以NCV、氯、汞含量分类的基础上,提出符合我国国情的SRF分类标准,制定热值测定方法。进一步分析SRF各组分之间的相互作用和影响,为后续对全国不同地域不同季节制备的SRF的焚烧研究提供理论依据,最后通过燃烧特性参数建立适用于我国的SRF燃烧特性数据模型。

(2) SRF焚烧烟气净化系统的进一步改进。针对SRF的特性,探究焚烧和共处置SRF过程中,燃料组分、炉膛温度变化对于CO、NO_x、SO₂、HCl、HF、重金属以及二噁英排放的影响,建立适合SRF焚烧或共处置的烟气净化系统。

(3) SRF焚烧对锅炉运行的影响。焚烧时的SRF组分对锅炉效率和积灰生长及腐蚀结渣特性的影响需要分类进行研究。重点分析锅炉各个受热面的积灰结渣生长规律,特别是氯含量对受热面腐蚀和结渣的影响,寻找减少受热面腐蚀和积灰结渣的最优方法。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
- [2] 刘抒悦.美国城市生活垃圾处理现状及对我国的启示[J].环境与可持续发展,2017,42(3):84-86.
- [3] 中国环境保护产业协会城市生活垃圾处理专业委员会.城市生

活垃圾处理行业2017年发展综述[J].中国环保产业,2017(4):9-15.

- [4] 蒋旭光,张绍睿,严建华.室燃炉共处置危险废物研究现状及其发展思考[J].化工进展,2016,35(7):2195-2204.
- [5] GALLARDO A,CARLOS M,BOVEA M D,et al.Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards[J].Journal of Cleaner Production,2014,83:118-125.
- [6] CIMPAN C,MAUL A,JANSEN M,et al.Central sorting and recovery of MSW recyclable materials:a review of technological state-of-the-art,cases,practice and implications for materials recycling[J].Journal of Environmental Management,2015,156:181-199.
- [7] EDO ALCÓN N,GALLARDO A.COLOMER M F J.Characterization of SRF from MBT plants: influence of the input waste and of the processing technologies[J].Fuel Processing Technology,2016,153.
- [8] RAMOS C R,ARENALES R J,BORJABAD G E,et al.Classification and characterisation of SRF produced from different flows of processed MSW in the Navarra region and its co-combustion performance with olive tree pruning residues[J].Waste Management,2016,47.
- [9] THIEL S,THOME KOZMIENSKY K J.Co-combustion of solid recovered fuels in coal-fired power plants[J].Waste Management & Research,2012,30(4):392-403.
- [10] WU H,GLARBORG P,FRANDSEN F J,et al.Co-combustion of pulverized coal and solid recovered fuel in an entrained flow reactor - general combustion and ash behaviour[J].Fuel,2011,90(5):1980-1991.
- [11] WAGLAND S T,KILGALLON P,COVENEY R,et al.Comparison of coal/solid recovered fuel (SRF) with coal/refuse derived fuel (RDF) in a fluidised bed reactor[J].Waste Management,2011,31(6):1176-1183.
- [12] DUNNU G,MAIER J,GERHARDT A.Thermal utilization of solid recovered fuels in pulverized coal power plants and industrial furnaces as part of an integrated waste management concept[C]//YANFUL E K.Appropriate technologies for environmental protection in the developing world. Ghana: ERTEP,2007.
- [13] MEDIC PEJIC L,FERNANDEZ ANEZ N,RUBIO ARRIETA L,et al.Thermal behaviour of organic solid recovered fuels (SRF) [J].International Journal of Hydrogen Energy,2016,41(37):16556-16565.
- [14] HILBER T,THORWARTH H,STACK LARA V,et al.Fate of mercury and chlorine during SRF co-combustion[J].Fuel,2007,86(12/13):1935-1946.
- [15] WU H,GLARBORG P,FRANDSEN F J,et al.Trace elements in co-combustion of solid recovered fuel and coal[J].Fuel Processing Technology,2013,105:212-221.
- [16] ÅMAND L,KASSMAN H.Decreased PCDD/F formation when co-firing a waste fuel and biomass in a CFB boiler by

- addition of sulphates or municipal sewage sludge[J]. Waste Management, 2013, 33(8): 1729-1739.
- [17] GEHRMANN H, KOLB T, SEIFERT H, et al. Synergies between biomass and solid recovered fuel in energy conversion processes[J]. Environmental Engineering Science, 2010, 27(7): 557-567.
- [18] HILBER T, MAIER J, SCHEFFKNECHT G, et al. Advantages and possibilities of solid recovered fuel cocombustion in the European energy sector[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(10): 1178-1189.
- [19] BAJAMUNDI C J E, VAINIKKA P, HEDMAN M, et al. Towards controlling PCDD/F production in a multi-fuel fired BFB boiler using two sulfur addition strategies. Part I: experimental campaign and results[J]. Fuel, 2014, 134: 677-687.
- [20] BAJAMUNDI C J E, VAINIKKA P, HEDMAN M, et al. Towards controlling PCDD/F production in a multi-fuel fired BFB boiler using two sulfur addition strategies. Part II: thermodynamic analysis[J]. Fuel, 2014, 134: 688-697.
- [21] BAJAMUNDI C J E, VAINIKKA P, HYYTIÄINEN I, et al. Towards controlling PCDD/F production in a multi-fuel fired BFB boiler using two sulfur addition strategies. Part III: Cu speciation in the fly ash[J]. Fuel, 2014, 132: 178-186.
- [22] VAINIO E, YRJAS P, ZEVENHOVEN M, et al. The fate of chlorine, sulfur, and potassium during co-combustion of bark, sludge, and solid recovered fuel in an industrial scale BFB boiler[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 105: 59-68.
- [23] SARABÈR A. Co-combustion and its impact on fly ash quality: pilot-scale experiments[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 104: 105-114.
- [24] WU H, PEDERSEN A J, GLARBORG P, et al. Formation of fine particles in co-combustion of coal and solid recovered fuel in a pulverized coal-fired power station[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2845-2852.
- [25] DE G S, CHIARELLI A, TAGLIENTE L, et al. Energy, environmental and operation aspects of a SRF-fired fluidized bed waste-to-energy plant[J]. Waste Management, 2017, 73: 271-286.
- [26] VAINIKKA P, ENESTAM S, SILVENNOINEN J, et al. Bromine as an ash forming element in a fluidised bed boiler combusting solid recovered fuel[J]. Fuel, 2011, 90(3): 1101-1112.
- [27] KARLSSON S, ÅMAND L, LISKE J. Reducing high-temperature corrosion on high-alloyed stainless steel superheaters by co-combustion of municipal sewage sludge in a fluidised bed boiler[J]. Fuel, 2015, 139: 482-493.
- [28] VAINIO E, KINNUNEN H, LAURÉN T, et al. Low-temperature corrosion in co-combustion of biomass and solid recovered fuels[J]. Fuel, 2016, 184: 957-965.
- [29] AGRANIOTIS M, NIKOLOPOULOS N, NIKOLOPOULOS A, et al. Numerical investigation of solid recovered fuels' co-firing with brown coal in large scale boilers-evaluation of different co-combustion modes[J]. Fuel, 2010, 89(12): 3693-3709.
- [30] DUNNU G, MAIER J, SCHNELL U, et al. Drag coefficient of solid recovered fuels (SRF)[J]. Fuel, 2010, 89(12): 4053-4057.
- [31] MIKULČIĆ H, VON B E, VUJANOVIĆ M, et al. Numerical evaluation of different pulverized coal and solid recovered fuel co-firing modes inside a large-scale cement calciner[J]. Applied Energy, 2016, 184: 1292-1305.
- [32] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. “十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划[EB/OL]. [2017-10-10]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201701/W020170122611891359020.pdf>.
- [33] 邢智伟. 城市生活垃圾的燃烧特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [34] 姜凡, 潘忠刚, 江淑琴, 等. 城市固体废弃物的燃烧特性实验研究[J]. 热能动力工程, 2001, 16(1): 16-18.
- [35] ZHENG J, JIN Y, CHI Y, et al. Pyrolysis characteristics of organic components of municipal solid waste at high heating rates[J]. Waste Management, 2009, 29(3): 1089-1094.
- [36] 朱明, 祝慰, 王发洲, 等. 城市生活垃圾制备的 RDF 的热工性能研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(12): 1928-1932.
- [37] 张立静. 垃圾衍生燃料热解机理模型和气化特性模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [38] 刘瑞媚. 大型炉排炉垃圾焚烧过程的 CFD 模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [39] 李树森. 城市固体生活垃圾 O₂/CO₂ 燃烧发电厂流程仿真模拟与优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [40] 李延吉, 邹科威, 姜璐, 等. 垃圾衍生燃料焚烧污染物排放实验与模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(7): 1254-1259.
- [41] 李延吉, 姜璐, 邹科威, 等. 垃圾衍生燃料流化床焚烧污染物排放特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2350-2358.
- [42] 刘典福, 李鹏, 孙大玮, 等. 垃圾衍生燃料在流化床中焚烧污染物排放特性[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 338-342.
- [43] 于洁. 城市生活垃圾(MSW)热处理过程中重金属的迁移与分布[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [44] 柏继松, 余春江, 李廉明, 等. 煤和垃圾衍生燃料循环流化床燃烧的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 36-41.
- [45] 冯丽. 煤和模拟城市生活垃圾混烧时 HCl 的实时释放特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [46] 马涵宇, 李芸邑, 刘阳生. 城市生活垃圾筛上物制备 RDF 及其燃烧特性研究[J]. 环境工程, 2012, 30(4): 96-100.
- [47] 董隽, 池涌, 汤元君, 等. 生活垃圾流化床热处置中重金属迁移分布研究[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(1): 120-128.

编辑: 胡翠娟 (收稿日期: 2018-01-09)

