

固体回收燃料的焚烧过程研究

张邦超 陈娅丽 哈申吐力古尔

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 城市固体废物来源广泛,物理组成和形态复杂,在焚烧处理时垃圾热值和燃烧热效率是热量回收的关键因素。本文选取典型工业固体废物作为原料,介绍固体回收燃料的制备工艺和产品质量,通过对比固体回收燃料与一般混合型固废的焚烧指标,以及不同主蒸汽参数条件下固体回收燃料的焚烧指标,分析固体回收燃料的焚烧和余热利用热效率,并进行热量平衡计算和有限元模拟,研究焚烧过程能量流分布和热量回收效果。

[关键词] 城市固体废物;工业垃圾;固体回收燃料;余热利用;焚烧热效率

[中图分类号] X705 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)06-0095-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.06.015

0 前言

从20世纪70年代起,随着世界范围内城市建设规模的日益扩大和人口的快速增长,原有的垃圾填埋等简易处理方式已难以满足各种固体废物的处置要求。在短短的几十年间,全世界已建成几千座自动化程度较高的垃圾焚烧厂,垃圾焚烧已经成为许多国家生活垃圾和其他固体废物的主要处置方式。

目前,我国固体废物污染防治的形势不容乐观。2019年全国大宗固体废物综合利用率只有55%,虽然2021年大宗固体废物综合利用率上升到57.8%,但距离“十三五”国家生态环境保护规划目标仍然存在较大差距。根据“2023固体废物污染防治与资源化利用峰会”生态环境部数据,我国每年产生工业固体废物30亿t、畜禽养殖废弃物近40亿t,主要农作物秸秆约10亿t,建筑垃圾约20亿t,生活垃圾约2亿t。全国每年新产生固体废物合计100多亿t,历史堆存总量高达600亿~700亿t。如何在进行固体废物无害化、减量化处理

的同时,实现废弃资源的综合利用,逐步成为新的产业和项目研究课题。

固体回收燃料(SRF)是利用非危险废弃物来源的固体废物制备而成,且符合ISO标准化分类和规范的固体燃料^[1]。根据中国工业合作协会发布的团体标准《固体替代燃料定义与分类》(T/CIC 046—2021),用于制备固体回收燃料的原料可为生活垃圾、一般固体废物、农林废弃物、建筑垃圾以及其他类可燃性废弃物。与化石燃料相比,固体回收燃料可以减少温室气体排放,促进能源的可持续利用,同时解决了固体废弃物处理的问题。因此,制备和推广使用SRF燃料产品成为世界范围内固体废物处理的最新研究方向。目前欧洲已广泛使用城市生活垃圾、工商业废物、建筑装修垃圾等物料制备固体回收燃料。

近年来由于居民区垃圾分类的推行,生活垃圾中含水量大的餐厨垃圾成分逐渐减少,轻质可燃组分(纸类、织物、塑料等)增多,我国的城市生活垃圾热值稳定提高,为大范围推进固体回收燃料制备和应用提供了良好机遇。我国虽然尚缺乏统一的固体回收燃料产品国家标准和原料要求,但已有不少固体废物制备燃料项目在运行。目前,以生活垃圾、陈腐垃圾、建筑垃圾、市政垃圾等为原料制备的燃料热值较低,产品性能不稳定。工商业废物、农林废弃物、装修垃圾等废弃物由于来源集中,不燃成分少,用于制备高热值燃料产品较为容易。本文选取典型工业固体废物作为原料,介绍固体回收燃料的制备流程,重点分析固体

[收稿日期] 2024-07-15

[作者简介] 张邦超(1974—),男,安徽六安人,本科,高级工程师,主要研究方向为固废处理。

[引用格式] 张邦超,陈娅丽,哈申吐力古尔. 固体回收燃料的焚烧过程研究[J]. 绿色矿冶,2024,40(6):95-100.

ZHANG Bangchao, CHEN Yali, Hashentuliguer. Study on incineration process of solid recovered fuel[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(6): 95-100.

回收燃料的焚烧和余热利用整体热效率,并进行热量平衡计算和燃烧状态有限元模拟,研究焚烧过程能量分布和热量回收效果。

1 固体回收燃料制备

1.1 典型工业废物成分

工业固体废物种类繁多,成分复杂^[2]。某城市市域范围内的工业废物包括:①家具生产过程中产生的边角料、木屑、木板、树枝等木质类物料;②纺织企业产生的毛纺、织物边角料;③造纸厂产生的纸渣、废纸板;④一般加工企业产生的橡胶、塑料、包装;⑤制造企业产生的废轮胎、包装、碎片等。

在固体废物处置终端进行取样分析,结果见表1。

表1 固体废物原料成分和热值

组成	占比/%	备注
塑料	32	以PVC、PE为主
纸张、包装	30	
织物、布料、纤维	12	
橡胶、皮革	10	
金属	7	以铁、铝、铜为主
砂石、土	5	粒径 ≤ 2 mm
其他	4	
低位热值	6 698 kJ/kg	

由表1可看出,该工业废物与其他混合类固体废物相比,具有废弃物种类少、可燃成分多和热值高

等特点,是制取优质燃料的原料,但是其来源广泛,收集过程复杂,含有少量砂石、渣土、金属等成分,需根据固体回收燃料产品的具体性能进行分析。

1.2 固体回收燃料制备工艺及产品质量

固体回收燃料产品分级标准和指标以低位热值、氯含量和汞含量来划分,其中最低的5级产品要求低位热值达到3 MJ/kg,最高的1级产品要求热值达到25 MJ/kg^[2]。利用工业废物制备的固体回收燃料具有热值高和成分稳定的特点,大规模品质稳定的燃料产品考虑送至焚烧发电厂以回收能量和售电,小规模SRF产品可作为辅助燃料,送至燃煤电厂、生活垃圾焚烧厂或水泥厂协同处理。

利用工业废物制备固体回收燃料的核心工艺为“两段破碎-磁选-筛分”,主要装备包括:粗破碎机、细破碎机、盘筛、磁选机除铁、链板输送机、皮带输送机、包装成型机以及通风、除尘和消防系统等。制取固体回收燃料的工艺流程如图1所示。

图1的工艺摒弃了传统的原料处理中需要的热解、干燥、风选等耗能工序,通过城市收集体系、人工分拣和磁选等前处理,剔除工业废物中的不燃成分。粗破碎采用双轴破碎机,通过剪切、挤压作用减小物料尺寸,控制破碎后粒径范围为200~350 mm。细破碎采用单轴破碎机,通过筛网控制出料颗粒,根据不同原料调整破碎和筛分的物料粒径,控制在30~100 mm。生产过程可靠性高,出料质量稳定,同时占地面积小,降低了固体回收燃料产品的制备成本。

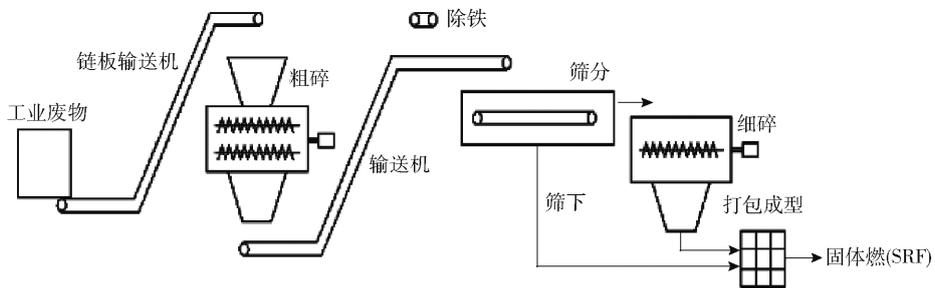


图1 固体回收燃料(SRF)制备工艺流程

基于表1和图1中原料和制取工艺得到高品质SRF燃料产品,其净热值(NCV)为10~15 MJ/kg,达到国际标准化组织ISO 21640—2021标准中3级和4级SRF燃料标准。打包成型后的产品经检测,氯含量、金属含量(汞含量)等指标均达标。其产品尺寸为1.7 m×1.0 m×1.0 m,产品比重为600~650 kg/m³,满足当地燃料运输和应用等技术需求。

2 固体回收燃料焚烧过程研究

目前固体回收燃料主要用作水泥窑用固体替代燃料、火力发电用固体替代燃料以及单独作为燃料用于焚烧发电等。由于该城市范围内工业废物来源稳定,制取的燃料成分稳定和品质良好,可直接采用炉排炉型焚烧炉和余热锅炉进行热能利用和发电。

固体回收燃料进入炉排炉内燃烧的基本原理与生活垃圾类似,在给料机构和炉排焚烧炉的共同机械作用下燃烧释放热量。控制燃烧温度、助燃空气量等参数,燃料焚烧包括预热、低温裂解、点火燃烧、富氧气化、高温燃烧和燃烬等过程^[3]。

固体回收燃料在倾斜往复炉排上焚烧时,燃烧热量不仅来自上方的辐射和烟气的对流,还来自物料层内部。燃料在由液压驱动的机械往复顺推炉排上进入燃烧区,经过强烈地翻动,透气性加强,有助于充分燃烧。热风通过二次风喷嘴卷吸回至点火区、干燥区和焚烧区,有效穿透烟气流并与其高效混合。该方式可以使炉内温度场和流场保持均匀,提高燃烧效率。二次风喷嘴布置在烟道喉部,促进烟气形成湍流。各通道内的温度和速度分布均匀,最大限度地提高传热效果和烟气停留时间。炉内的混合物料发生充分且可控的燃烧,烟气中的CO和TOC(总碳)浓度都较低。各段炉排的通风间隙面积很小,炉排漏渣率及炉内散热量比较低,最大程度防止炉体散热损失。

为防止高低温腐蚀,固废处理所用余热锅炉常见主蒸汽参数为中温中压(4.0~4.1 MPa,400℃),中温次高压(5.29~6.40 MPa,450℃),次高温超高压(13.0~14.0 MPa,480℃)。主蒸汽压力随温度升高而升高,但温度的升高会导致锅炉受热面腐蚀加剧^[4]。为了提高热效率,对固体回收燃料焚烧核心装置进行优化(表2)。

表2 固体回收燃料焚烧和余热回收提效关键措施

序号	项目	主要装置	工艺措施
1	给风量	炉排助燃系统	控制助燃风系数和烟气含氧量
2	水冷系统	高温区高温炉排	高温炉排采用局部水冷,减少冷却量
3	设备安装	余热锅炉	采用立式锅炉,烟气阻力小,增加辐射面积
4	出口烟气	省煤器	降低烟气出口温度,减少烟气带走热量
5	受热面	余热锅炉	采用水冷膜式壁结构,增加受热面
6	主蒸汽	主蒸汽参数	提高蒸汽压力和温度
7	自控控制	自动燃烧控制(ACC)配合集散控制系统(DCS)	调节炉内燃料与风量配比、自动燃烧控制 ^[5]

3 燃料焚烧工艺计算

热效率是衡量固体回收燃料焚烧效果和余热

锅炉节能性能的一个重要指标,通过热量输出值与燃料热值的比值表征能量利用的程度。余热锅炉作为固废焚烧发电厂中的关键主机之一,其性能直接影响锅炉产汽量和蒸汽品质,也直接影响整个机组的热效率。余热锅炉的热量源于烟气废热,其热效率与废热的温度、烟气流量等密切相关。焚烧和余热利用装置的运行不稳定,也会造成部分热量损失。为有效提升焚烧炉和余热锅炉的整体热效率,可优化焚烧炉结构、增加余热锅炉的烟道长度和热交换时间,合理调整余热锅炉的设计参数。在方案比选时,将SRF燃料与城市混合型固体废物进行焚烧工艺对比,以分析高品质SRF燃料与常规城市固废在焚烧和余热回收时内在热效率的区别。

3.1 SRF产品与一般混合型固体废物成分对比

设定入炉燃料标准规模为250 t/d。固体回收燃料入炉产品指标见表3。

表3 固体回收燃料入炉产品指标

成分	指标
水分/%	34.2(平均值)
灰分/%	24
含氯量/%	0.89
含氮量/%	0.45
含氧量/%	3.22
含硫量/%	0.27
含氢量/%	4.92
含碳量/%	32.1
低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	14 743(计算值)

常规混合型城市固体废物入炉成分见表4。

表4 城市混合型固体废物成分

成分	指标
水分/%	47.3(平均值)
灰分/%	13.7
含氯量/%	0.13
含氮量/%	0.54
含氧量/%	9.38
含硫量/%	0.08
含氢量/%	3.54
含碳量/%	25.32
低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	10 033(计算值)

比较表3和表4可得,相比未经过预处理的混合型城市废物,固体回收燃料水分较低,含碳量提高,物料低位热值得到较大提高,更具可燃性。

3.2 固体回收燃料焚烧工艺计算和分析

选取余热锅炉次高温超高压(480℃,14.0 MPa)

的主蒸汽参数,确保焚烧温度、烟气停留时间和炉渣热灼减率满足工艺要求。以表3和表4代表性入炉燃料成分,根据《中小型热电联产工程设计手册》进行工艺计算,得到固体回收燃料和混合型城市固废焚烧指标对比(表5)。

表5 固体回收燃料和混合型城市废物焚烧指标对比

项目	固体回收燃料	混合型城市废物
入炉量/(t·d ⁻¹)	250	250
排烟温度/℃	190~210	210
蒸汽量/(t·h ⁻¹)	55.4	38.0
总空气量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	111 800	79 000
总烟气量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	124 200	95 500
渣量/(kg·h ⁻¹)	2 200	1 250
灰量/(kg·h ⁻¹)	390	220

由表5可看出,在相同余热锅炉主蒸汽参数下,固体回收燃料由于热值高,需要的助燃空气和产生的总烟气量都较大,其他工艺参数和混合型城市固体废物相差不大。

3.3 不同主蒸汽参数下的燃烧效果对比

为分析固体回收燃料在不同工况下的燃烧效果,设置余热锅炉不同主蒸汽参数,模拟计算中温中压、中温次高压和次高温超高压三种主蒸汽参数下的燃烧效果。炉排和余热锅炉的联合工艺计算,采用《中小型热电联产工程设计手册》的正平衡法(利用锅炉有效利用热量与燃料所放出的热量之比计算热效率),分析输出物料参数和控制指标。输入条件包括原料成分、低位热值、水分、主蒸汽压力和温度等,输出数据主要包括烟气量、烟气成分、蒸汽量、助燃风量、灰渣量、飞灰量等。不同主蒸汽参数下,固体回收燃料焚烧和余热利用效果对比见表6。

表6 固体回收燃料在不同余热锅炉参数下焚烧对比

项目	中温中压	中温次 高压	次高温 超高压
余热锅炉参数	400℃, 4.1 MPa	430℃, 5.4 MPa	480℃, 14.0 MPa
输入热量/kW	42 460	42 460	42 460
燃料比热容/(kJ·(kg·℃) ⁻¹)	1.014	1.014	1.014
蒸汽焓/(kJ·kg ⁻¹)	3 212	3 261	3 265
锅炉热效率/%	84	85	87
给水温度/℃	130	130	140
理论蒸汽量/(t·h ⁻¹)	54.7	54.3	55.4

由表6可看出,采取高参数,锅炉主蒸汽带走的单位焓值较高,可提高锅炉热效率,从而有助于提高整体节能效果。

4 燃料热平衡计算和有限元模拟分析

为了验证上述工艺计算,定量研究焚烧系统物料流和能量流分布,对炉内燃烧和烟气的热平衡进行计算和模拟分析,同时分析燃料焚烧效果和烟气在热交换过程中状态。

固体回收燃料焚烧工艺核算和模拟分析的对象包括:①焚烧炉结构尺寸和预热段、燃烧段、燃烬段设计;②烟气流速、温度分布和二次助燃设计;③确保温度不低于850℃,烟气停留时间不低于2s;④分析燃烧效果和烟气成分(O₂、CO₂、CO、H₂O、烟尘量等);⑤结合余热锅炉设备工艺参数和性能保证,分析焚烧和热量回收的整体热效率。

通过大型CFD(ANSYS Fluent)软件,采用标准模型对余热锅炉运行工况进行数值模拟,分析炉膛内部流场、温度场的分布以及烟道内的换热趋势,为锅炉的日常运行、节能方向提供参考依据。按照余热锅炉的实际结构,利用软件建立简化后模型和所要研究的计算区域及尺寸,研究炉膛内部流动与温度分布状况,并与试验结果或生产数据进行对比^[6]。

4.1 燃料热平衡计算

按以上分析确定炉排和锅炉结构及炉内通道。锅炉机组按反平衡计算其效率,即除去锅炉机组的各项损失所得到的效率。反平衡计算有利于了解机组热损失的构成和原因,有助于采取措施提高机组的热效率^[7]。锅炉最大连续蒸发量MCR工况下模拟热平衡计算结果见表7。

由表7可看出,超高压余热锅炉热效率可由国内主流中压参数锅炉厂家的81%~83%提高至87%。热量输出中损失主要在于烟气带走热量和锅炉本体散热等,其他焚烧炉和锅炉热损失已降至极限范围的13%。

4.2 锅炉MCR工况有限元模拟分析

根据设计的炉排炉和余热锅炉外形进行三维有限元划分,仿真模拟焚烧效果和烟气在炉内的流动状态和分布。燃料焚烧后烟气以湍流为主要形态,部分炉内区域形成涡流。烟气的运动状态随着流速、温度、黏度等参数的变化在炉内呈现不同变化。

表7 余热锅炉热效率计算

项目	热量类型	热量占比/%	备注
热输入	固体回收燃料	92.8	
	一次风	5.0	
	二次风	2.1	
	其他	0.1	冷却风、漏风等带入
	炉渣带走	0.35	进入除渣系统
热输出	未燃烬	0.36	
	辐射散热	7.3	
	烟气带走	10.9	进入烟气净化系统
	定排、连排带走	0.4	
	锅炉蒸汽带走	87.0	锅炉热效率
焚烧炉和锅炉热损失		13	

因而对烟气温度、流速和烟气成分等参数进行模拟成为燃烧效率研究的关键。在锅炉最大连续蒸发量(MCR)工况下,模拟烟气温度、流速等参数的变化,结果如图2所示。

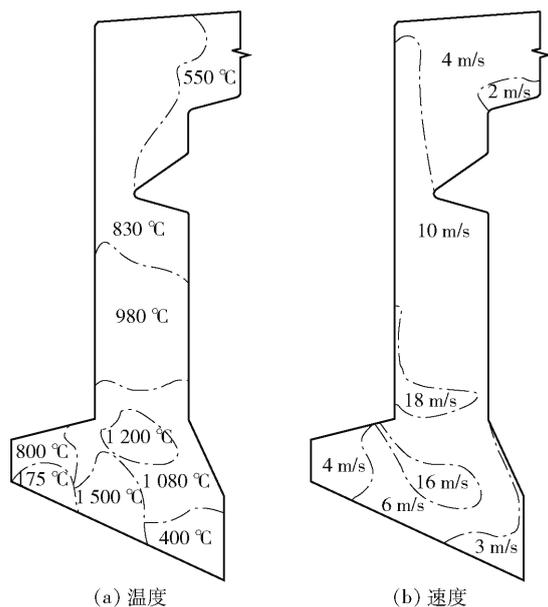


图2 固体回收燃料炉内焚烧烟气温度和流速模拟结果

由图2可看出,固体回收燃料得到充分预热和燃烧。固体回收燃料的高热值有效保证了焚烧温度,核心燃烧区域烟气温度均超过980 °C,炉内温度场和烟气流速控制得到优化。当炉排上燃料稳定燃烧时,炉内烟气形成能合理的温度区分布。炉膛上

部冷却的烟气部分回流至炉排预热区和燃烧区,有效增加了烟气的湍流程度。以上模拟和工艺计算验证了SRF燃料在炉内达到良好的焚烧效果和烟气流动状态。

5 结束语

大型SRF燃料项目提高焚烧和余热利用效率的关键首先在于原料收集的甄别和分选,从而确保燃料产品的低杂质含量和高热值,同时要优化焚烧炉和余热锅炉工艺参数和设备结构。采用超高压蒸汽参数的锅炉机组,可最大程度增大焚烧和余热利用过程的整体热效率。

固体回收燃料产品应用尚处于研究阶段,其原料城市固废的成分和热值差异性大,目前固体回收燃料在国内的处理工艺路线和产品标准也在发展中。焚烧和余热利用热效率分析是选取焚烧装置和余热锅炉的基础研究,也是拓展固体回收燃料开发应用装备和市场应用的关键。固体回收燃料制备和替代化石燃料应用,不仅有利于解决各类固体废弃物处理的问题,同时也响应国家“双碳政策”,为固废产业的节能减排做出贡献。

[参考文献]

- [1] 刘海威,王欢.我国县级地区生活垃圾低碳环保处理的最佳技术路径——制备固体回收燃料[J].绿色矿冶,2023,39(1):90-94,100.
- [2] 张邦超,刘杰.基于固体回收燃料技术的城市固废特性分析[J].绿色矿冶,2023,39(5):73-77.
- [3] 白良成.生活垃圾焚烧处理工程技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [4] 樊节斌.余热锅炉的腐蚀机理与防范措施[J].石油和化工设备,2006(05):43-44.
- [5] 孙晓军,肖正,王志强.生活垃圾焚烧厂自动燃烧控制系统的原理与应用[J].环境卫生工程,2009,17(4):20-23.
- [6] 张子坤.垃圾焚烧发电厂余热锅炉数值模拟[J].化学工程与装备,2017(3):217-218.
- [7] 王海红.电站锅炉热效率影响因素探讨[J].中国设备工程,2023(9):207-209.

Study on Incineration Process of Solid Recovered Fuel

ZHANG Bangchao, CHEN Yali, Hashentuliguer
(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Urban solid waste has a wide range of sources and complex physical composition and morphology. The calorific value and combustion thermal efficiency of waste are the key factors of heat recovery during incineration. In this paper, typical industrial solid waste was selected as raw material, and the preparation process and product quality of solid recovered fuel were introduced. By comparing the incineration indexes of solid recovered fuel and general mixed solid waste, and comparing the incineration indexes of solid recovered fuel under the different main steam parameters, the incineration and waste heat utilization thermal efficiency of solid recovered fuel were analyzed, and the heat balance calculation and finite element simulation were carried out to study the energy flow distribution and heat recovery effect of incineration process.

Key words: municipal solid waste (MSW); industrial waste; SRF (Solid Recovered Fuel); heating recovering; burning heat efficiency

(上接第 88 页)

Study on Preparation of High Strength Ceramsite From Coal Gangue

CHEN Kuiyuan, CHEN Xuegang, LI Mingchuan, DAI Wenbin, XU Xiaofeng, GOU Haipeng, FAN Yaxin
(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: At present, there is a huge amount of coal gangue, which can be made into ceramsite instead of sand aggregate to achieve mass consumption. Using coal gangue as the main raw material, the experimental study on the preparation of ceramsite with desulfurized gypsum, limestone and dolomite were carried out. The results showed that when the raw ball made of 90% coal gangue and 10% desulphurized gypsum was calcined at 1 150 °C for 60 min, the packing density of the prepared ceramsite was 729.80 kg/m³, the water absorption rate was 2.49%, and the barrel compression strength was 8.15 MPa; When the raw ball made of 90% coal gangue combined with 10% limestone was calcined at 1 150 °C for 60 min, the packing density of the prepared ceramsite was 686.00 kg/m³, the water absorption rate was 1.43%, and the barrel compression strength was 8.30 MPa; When the raw ball made of 90% coal gangue and 10% dolomite was calcined at 1 150 °C for 60 min, the packing density of the prepared ceramsite was 721.44 kg/m³, the water absorption rate was 5.40%, and the barrel compression strength was 9.39 MPa. The properties of these three kinds of ceramsite can meet the requirements of national standards for high strength ceramsite.

Key words: coal gangue; high strength ceramsite; packing density; water absorption; barrel compression strength; bulk consumption