生态环境

生活垃圾制备固体回收燃料影响因素研究

陈宋璇[1], 高 严[1], 王 旭[1], 王 星[2], 刘 凯[1], 左子贤[1], 翟小鹏[2]
(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 固安恩菲环保能源有限公司, 河北 固安 065501)

[摘 要] 生活垃圾产量在全球范围内逐年增长,其合理处置不仅能够避免环境污染风险,同时有助于实现资源循环利用。本文以生活垃圾为实验对象,采用压制法制备固体回收燃料(SRF),并分析了含水率、成型压力和垃圾组分对固体回收燃料延展率和抗震性的影响。实验结果表明,15% 含水率和 10 MPa 压力适于将生活垃圾压制 SRF;提高纸制品含量和降低塑料含量有利于改善 SRF 延展率和抗震性;在保证良好延展率的基础上,适当降低果皮含量或者提高果壳、纺织品比例可以增强 SRF 抗震性。制备得到的 SRF 热值满足 ISO TC300 相关标准要求,能够作为燃料产品进行交易。

[关键词] 生活垃圾; 固体回收燃料; 影响因素; 延展率; 抗震性
[中图分类号] X705 [文献标志码] A [文章编号] 2097 - 2423(2025)02 - 0101 - 05
DOI:10.19610/j.cnki.cn10 - 1873/tf.2025.02.015

0 引言

我国人口基数较大,同时城镇化快速发展,导致我国生活垃圾总量逐年增长。目前生活垃圾的处理技术主要包括焚烧发电、卫生填埋和堆肥等。其中,焚烧发电由于能够快速实现生活垃圾减量减重,并且产生能源效益,近年来已经成为我国生活垃圾的重要处理方式[1]。

随着我国垃圾分类体系的建立和发展,焚烧处理可能在技术需求、设备选型和处理成本方面面临挑战,而在垃圾分类发展的驱动下,资源回收与高效处置将会成为垃圾处理的趋势。利用生活垃圾制备固体回收燃料(SRF)既有望解决垃圾焚烧面临的挑战,又能推动生活垃圾资源化。SRF 是以非危废作为原料制备而成的一种燃料,具有稳定的热值、形态和良好的环保性[2]。生活垃圾制备 SRF 能够提高燃烧效率,降低环保风险,提升运输便利性,并提高经济价值[3],为生活垃圾焚烧产业提供了新的机遇。

目前,我国 SRF 制备技术尚处于起步阶段。同时由于我国生活垃圾组分与欧洲等发达国家存在差异,直接采用国外技术存在不可预见风险,因此有必要探索适于我国生活垃圾特性的 SRF 制备技术。延展率和抗震性是评价 SRF 堆放储存、长距离运输的重要指标[4],本文采用压制法将生活垃圾制成 SRF,并分析了垃圾组分、含水率和成型压力对这两个指标的影响,以期为国内利用生活垃圾制备 SRF 提供参考依据。

1 实验方法

1)生活垃圾采样:随机选取 3 个小区,按照《生活垃圾采样和分析方法》(GJ/T 313—2009)[5]中的要求进行采样,每个小区的垃圾样品均来自 3 个或 3 个以上收运点,采集后进行样品混合,以混合样作为该小区生活垃圾样品。

2)SRF 延展率计算见式(1)。

$$k = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\% \tag{1}$$

[收稿日期] 2024 - 09 - 24

[作者简介] 陈宋璇(1987—),男,硕士,江西抚州人,正高级工程师,主要从事固废处理及大气污染物防治方面的研究工作。

[引用格式] 陈宋璇,高严, 王旭,等. 生活垃圾制备固体回收燃料影响因素研究[J]. 绿色矿冶,2025,41(2):101 - 105,111.

CHEN Songxuan, GAO Yan, WANG Xu, et al. Study on the factors affecting the properties of solid recovered fuels from municipal solid waste[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025,41(2):101 - 105,111.

式中，k 为延展率；L_t 为第 t 天的 SRF 长度；L_0 为 SRF 制备完成后立即检测得到的 SRF 长度。

3）SRF 抗震性试验：将制备好的 SRF 从固定高度（1 m）跌落至水泥材质地面 50 次。跌落过程中统计碎片数量和重量，以碎片数量和失重率衡量 SRF 抗震性。其中重量小于或等于 SRF 总重 5% 的碎片视作跌落损耗，不统计在内。

4）垃圾组分复配实验：垃圾组分对 SRF 的影响分析通过复配实验进行。复配方案利用软件 Minitab 进行极限顶点设计完成。

5）热力学分析：参照《固体生物质燃料发热量测定方法》（GB/T 30727—2014）[6] 进行热值测定。

6）SRF 制备：SRF 的制备过程简要概括为垃圾收集、预分选、初步破碎、筛分、干燥、细破碎和压制成型，最终产品为圆柱状 SRF。

2 结果与讨论

2.1 生活垃圾样品分析

调研区域为北方某县，该县包含 9 个乡镇，面积 703.08 km^2，总人口 55.3 万人。据统计，2020 年当地全县域生活垃圾日产量为 976.14 t，年产量为 35.63 万 t，预计 2030 年全县域生活垃圾日产量为 1 716.66 t，年产量为 62.66 万 t，年均增幅约为 2.7%。现阶段全县域生活垃圾清运量为 878.53 t/d，根据当地规划，2030 年可达 1 459.16 t/d，未来一段时期，在当地大力推行垃圾减量化的情况下，全县的生活垃圾产量仍然会保持一定程度的增长，对于生活垃圾处理能力的需求将会保持增长趋势。

表 1 ~ 表 3 展示了当地随机抽取 3 个小区的生活垃圾组成情况。由表 1 ~ 表 3 可知，当地生活垃圾主要组成包括果皮、纸制品（纸巾、纸张）、果壳和塑料。由于当地垃圾分类体系正在建设但尚不完善，因此在生活垃圾中存在玻璃、金属制品和沙石。

由表 3 统计可知，3 个小区的生活垃圾的高有机质含量的组分（果皮、纸张、纸巾、果壳、纺织品）干基比例为 30% ~ 85%，经过初步分选后此生活垃圾适于制备 SRF。

表 1 生活垃圾组分（湿基） %

样品	果皮	纸张	纸巾	果壳	纺织品	塑料	玻璃	金属	沙石
小区 1	45.04	14.01	25.63	3.48	7.46	1.66	2.71	—	—
小区 2	46.43	10.83	23.09	4.54	7.64	1.05	6.23	0.18	—
小区 3	45.95	3.92	25.96	0.72	—	1.70	15.92	—	5.83

表 2 生活垃圾各组分含水率 %

样品	果皮	纸张	纸巾	果壳	纺织品	塑料	玻璃	金属	沙石
小区 1	95.10	79.40	80.90	70.40	63.1	1.62	1.10	—	—
小区 2	90.10	73.40	82.90	74.40	73.4	1.12	0.30	1.00	
小区 3	96.80	67.40	72.90	63.30	—	1.32	0.30	—	65.30

表 3 生活垃圾组分（干基） %

样品	果皮	纸张	纸巾	果壳	纺织品	塑料	玻璃	金属	沙石
小区 1	12.20	15.95	27.06	5.70	15.23	9.03	14.48	—	—
小区 2	20.84	13.06	17.90	5.27	9.22	4.70	28.18	0.83	—
小区 3	4.96	4.31	23.75	0.89	—	5.67	53.59	—	6.83

注：表 1 ~ 3 统计内容不含餐厨垃圾。

2.2 SRF 制备影响因素研究

本文考察了 SRF 制备中垃圾含水率、成型压力和垃圾组分对 SRF 延展率和抗震性的影响。

2.2.1 含水率的影响

设置原料整体含水率依次为 0%、5%、10%、20%、30%，成型压力设置为 5 MPa，稳压时间设置为 2 min。观察 SRF 在不同含水率情况下的 7 日延展率和抗震性变化，结果如图 1 ~ 图 2 所示。

由图 1 可知，随着原材料含水率从 0% 增加至 30%，制备得到的 SRF 延展率呈现出先降低后升高的趋势。当含水率为 20% 时，延展率最低，为 12.67%；当含水率为 10% 时，延展率略高，为 13.79%。由此可知，含水率过高或者过低均不利于 SRF 制备。当原料含水率过低时，垃圾颗粒之间粘合力不足，导致其容易变形膨胀。此外，原料干燥会加重模具的磨损，降低压制器具使用寿命；当含水率

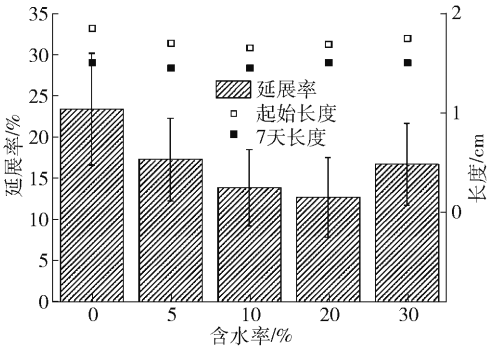

图 1　原料含水率对 SRF 延展率的影响

过高时,大量水分导致 SRF 粘性偏高,难以稳定成型[7]。同时,采用高含水率(20%、30%)垃圾制成的 SRF 可能会滋生霉菌,不利于长期存储;且过量水分在压制过程中渗出,会腐蚀模具并导致其生锈。

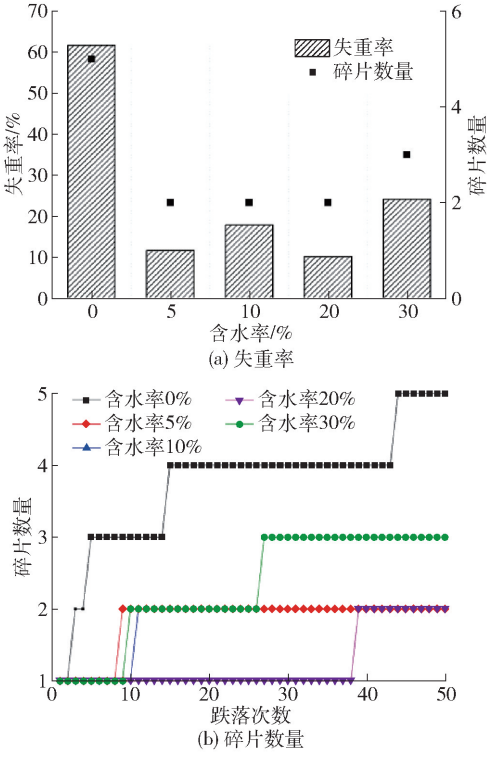

图 2　原料含水率对 SRF 抗震性的影响

由图 2 可知,SRF 抗震性同样随着含水率的升高先降低后增加。绝干原料制得的 SRF 由于粘合力不足而结构松散,在跌落试验中容易断裂散开;而含水率 30% 的垃圾由于成型困难,所以失重率也较高。

由图 2(a)可知,在含水率为 5%、10% 和 20% 的情况下,SRF 失重率较为接近,碎片数量一样。但是由图 2(b)可知,当含水率为 5% 和 10% 时,SRF 分别在第 8 和第 10 次形成 2 枚碎片,而当含水率为 20% 时,SRF 在第 39 次跌落形成 2 枚碎片,可知含水率为 20% 具有更加良好的抗震性。

含水率实验表明,20% 含水率的情况下生活垃圾制备得到 SRF 结构相对更加稳定,但是存在滋生霉菌的风险,在实际生产中不利于存储运输。10% 含水率制得的 SRF 性能仅次于 20%,同时根据延展率和抗震性变化趋势,以 15% 含水率进行后续实验。

2.2.2　成型压力的影响

设置原料整体含水率 15%,成型压力依次设置为 5 MPa、10 MPa、15 MPa 和 20 MPa,稳压时间设置为 2 min。观察 SRF 在不同成型压力情况下的 7 日延展率和抗震性变化,结果如图 3 和图 4 所示。

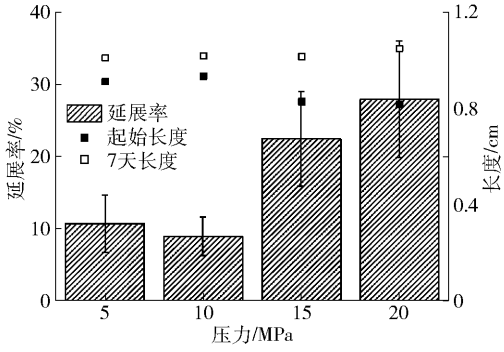

图 3　成型压力对 SRF 延展率的影响

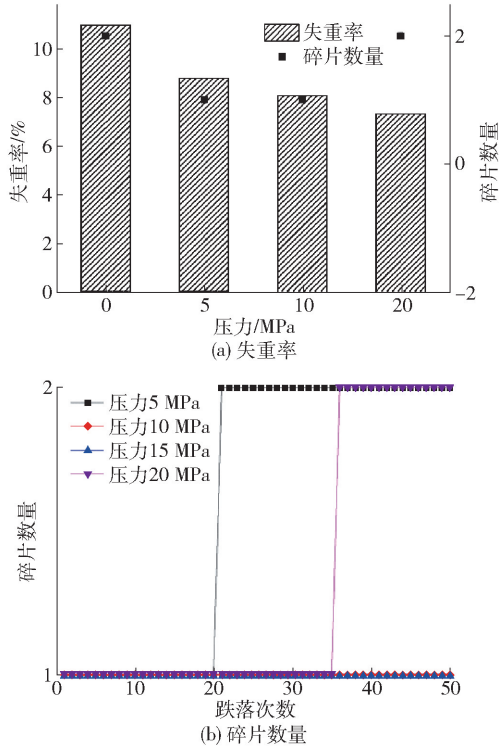

图 4　成型压力对 SRF 抗震性的影响

由图 3 可知,随着压力由 5 MPa 增加至 10 MPa,SRF 的 7 日延展率轻微下降;继续提高压力至 15 MPa 和 20 MPa,延展率均出现了明显的增加。但是在 4 种不同压力下,SRF 的起始长度差别较大,7 日长度则接近。延展率的明显变化主要是由于较高压力下制得的 SRF 具有更短的起始长度,但是脱模后压力消失,垃圾颗粒之间的粘结力不足以维持原有长度。延展率实验结果表明 10 MPa 压力更有利于制备 SRF,该实验结果与相关研究报道一致[8]。

如图 4 所示,随着成型压力的增加,SRF 在跌落试验后失重率逐渐降低,但是压力 20 MPa 时形成更多碎片。同时,虽然其相对于 10 MPa(失重率 8.7%),15 MPa 的压力失重率更低(8.06%),但是优势并不明显。更高的压力意味着制备过程中需要更多的能耗,因此综合考虑 SRF 抗震性和能耗,选择 10 MPa 作为制备 SRF 的压力。

2.2.3 垃圾组分的影响

设置原料整体含水率 15%,成型压力 10 MPa,稳压时间设置为 2 min。观察生活垃圾各组分对于 SRF 的影响。组分设置方案见表 4。

表 4 垃圾组分配比设计方案(干基质量比例)

标准序	运行序	点类型	区组	果皮	纸制品	果壳	塑料	纺织品	延展率/%	碎片数量/个
1	1	1	1	0.1	0.6	0.05	0.05	0.2	8.823 5	3
2	2	1	1	0.2	0.6	0.05	0.05	0.1	17.647 1	4
3	3	1	1	0.1	0.6	0.15	0.05	0.1	14.285 7	3
4	4	1	1	0.1	0.6	0.05	0.15	0.1	16.402 1	5
5	5	1	1	0.2	0.5	0.05	0.05	0.2	15.000 0	5
6	6	1	1	0.1	0.5	0.15	0.05	0.2	19.047 6	4
7	7	1	1	0.2	0.4	0.15	0.05	0.2	25.000 0	3
8	8	1	1	0.15	0.6	0.15	0.05	0.05	23.529 4	6
9	9	1	1	0.2	0.6	0.1	0.05	0.05	15.789 5	4
10	10	1	1	0.2	0.55	0.15	0.05	0.05	11.111 1	5
11	11	1	1	0.1	0.5	0.05	0.15	0.2	35.000 0	4
13	13	1	1	0.2	0.4	0.05	0.15	0.2	28.571 4	7
14	14	1	1	0.1	0.4	0.15	0.15	0.2	30.434 8	5
15	15	1	1	0.15	0.6	0.05	0.15	0.05	10.526 3	4
16	16	1	1	0.2	0.55	0.05	0.15	0.05	26.315 8	*
17	17	1	1	0.2	0.6	0.05	0.1	0.05	25.714 3	5
18	18	1	1	0.1	0.6	0.1	0.15	0.05	31.578 9	4
19	19	1	1	0.1	0.55	0.15	0.15	0.05	24.000 0	*
20	20	1	1	0.1	0.6	0.15	0.1	0.05	23.529 4	5
21	21	1	1	0.2	0.45	0.15	0.15	0.05	20.512 8	4

注:* 表示燃料棒在自然放置情况下散裂,无法进行跌落试验。

图 5 和图 6 分别展示了各个组分对于 SRF 延展率和抗震性(碎片数量)的影响趋势。极限顶点设计的参考比例为果皮:纸制品:果壳:塑料:纺织品 = 15.24%:52.86%:10.24%:10.24%:11.43%。

由图 5 可知,随着垃圾中果皮和纺织品的比例相对于各自参考比例提高或降低,延展率均呈现增长趋势,表明参考比例接近最优;随着垃圾中果壳比例相对于参考比例增加或降低,延展率均降低,表明应在参考比例基础上提高或者降低其含量;SRF 延展率随着纸制品含量的增加而降低,随着塑料含量的增加而增加,表明提高纸制品含量或者降低塑料含量有利于降低 SRF 延展率。

如图 6 所示,果皮和塑料比例的提升会导致碎片数量增加,纸制品和果壳比例的提升则会减少碎片数量。此外,纺织品比例相在参考值临近区间增加可减少碎片数量,当比例过高时则可能导致碎片数量增加。由此推断,提高纸制品、果壳、纺织品的比例,降低果皮、塑料比例有利于提高 SRF 抗震性。

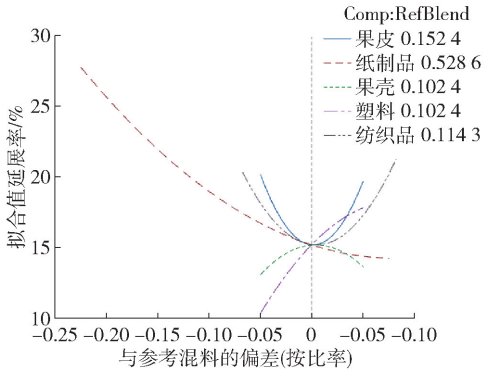

图 5　垃圾组分对 SRF 延展率的影响

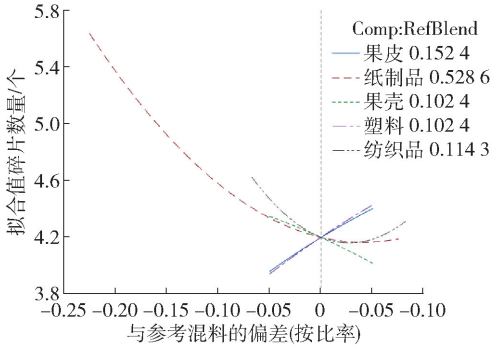

图 6　垃圾组分对 SRF 碎片数量的影响

结合垃圾组分对 SRF 延展率和碎片数量的影响趋势，果皮和纺织品比例可均设为参考比例(15.24% 和 11.43%)，纸制品比例越高越好，果壳比例宜大于参考比例，塑料比例越低越好。实际制备中还应考虑生活垃圾各个组分的实际比例，以期生活垃圾中各类组分能够同步得到充分处理。

实验以果皮、纸制品、果壳、塑料和纺织品比例为 3∶12∶3∶0∶2制备 SRF 并进行热值测定，测得其高位发热量为 10.76 MJ/kg，低位发热量为 9.79 MJ/kg。该 SRF 可以作为 ISO21640∶2021 中规定的第五类燃料进行交易。

3　结论

垃圾含水率和成型压力对 SRF 的延展率和抗震性产生明显影响：含水率过低导致垃圾颗粒间粘合力不足从而增加延展率并降低抗震性，含水率过高导致 SRF 粘性偏高且容易滋生霉菌，实验条件下适宜含水率为 15%；成型压力过低，垃圾颗粒之间挤压不充分导致 SRF 失重率较高，抗震性下降，成型压力过高，SRF 脱模后垃圾颗粒膨胀导致延展率增加，实验条件下适宜成型压力为 10 MPa。

垃圾中各类组分的含量对 SRF 产品的稳定性存在不同影响：提高纸制品含量和降低塑料含量有利于改善 SRF 延展率和抗震性；在保证良好延展率的基础上，适当降低果皮含量或者提高果壳、纺织品比例可以增强 SRF 抗震性。

生活垃圾压制制备的 SRF 能够达到 ISO 标准的要求，具备作为产品进行交易和作为燃料进行使用的可行性。

[参考文献]

[1]　住房城乡建设部. 2022 年中国城市建设状况公报[R/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html，2023.

[2]　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.

[3]　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.

[4]　赵学. 生活垃圾协同污泥制备衍生燃料(RDF－5)及其热力特性研究[D]. 重庆大学，2017.

[5]　中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾采样和分析方法：CJ/T 313—2009[S]. 北京：中国标准出版社，2009.

[6]　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. 固体生物质燃料发热量测定方法：GB/T 30727—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2014.

[7]　秦成，田文栋，肖云汉. 中国垃圾可燃组分 RDF 化的探索[J]. 环境科学学报，2004. 024(1)：121－125.

[8]　SAKKAMPANG C，WONGWUTTANASATIAN T. Study of ratio of energy consumption and gained energy during briquetting process for glycerin-biomass briquette fuel [J]. Fuel，2014，115：186－189.

(下转第 111 页)

data collection, personnel interviews, and on-site inspections, the pollution production links and pollution pathways were analyzed and judged, concluding that the site required a second phase of soil pollution condition survey. The second phase of the survey set up 11 soil monitoring points, 4 groundwater monitoring points, and 7 sewage monitoring points. The test results showed that all indicators in the soil did not exceed the standards; the exceeding factors in the groundwater are total hardness, manganese, dissolved total solids, and sulfide, which were not characteristic indicators of the site's pollutants; there were some indicators exceeding the standards in the water and sludge in the pools, but the soil and groundwater monitoring data showed that there is no leakage of water and sludge. According to relevant specifications, this site did not need further investigation, the soil pollution condition survey work was concluded.

Key words: sewage treatment; pollution identification; groundwater pollution; soil contamination

(上接第 105 页)

Study on the Factors Affecting the Properties of Solid Recovered Fuels from Municipal Solid Waste

CHEN Songxuan[1], GAO Yan[1], WANG Xu[1], WANG Xing[2], LIU Kai[1], ZUO Zixian[1], ZHAI Xiaopeng[2]

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;
2. Gu'an ENFI Enviromental Energy Co., Ltd., Gu'an 065501, China)

Abstract: The generation of municipal solid waste (MSW) is increasing annually worldwide. Reasonable disposal of MSW can not only avoid environmental pollution risks, but also contribute to resources recycling. In this paper, MSW was compressed to solid recovered fuels (SRF), and the influence of moisture content and composition of MSW and molding pressure on the expansion rate and impact resistance of SRF were analyzed. The results show that increasing the proportion of paper or reducing the proportion of plastics can reduce expansion rate and increase impact resistance of SRF; and reducing the proportion of fruit peels, or increasing the proportion of nutshells and textiles appropriately can enhance impact resistance of SRF, while ensuring good expansion rate. The calorific value of SRF prepared in this experiment meets the requirements of relevant standards of ISO TC300 and can be traded as a fuel product.

Key words: municipal solid waste, solid recovered fuels, influencing factors, expansion rate, impact resistance