

城市生活垃圾典型组分单一及混合热解特性研究

张莹¹, 俞春磊¹, 包尤思², 钟懿¹, 丁小双¹, 朱童童¹, 于洁^{1*}

(1. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江仁欣环科院有限责任公司, 浙江 宁波 315012)

摘要: 热解技术是一种前景较好的城市生活垃圾资源化处理技术. 本研究对 6 种城市生活垃圾(木屑、纸张、米饭、菜叶、棉线和聚酯线)进行单一和混合组分热解, 探究温度对热解过程和产物炭性质的影响以及各组分之间的相互作用. 结果表明: (1)单一和混合组分热解的固体产率随温度升高逐渐降低, 气液产率则相反; (2)单一组分热解固体产物的灰分含量随温度升高先升后降, 在 500~600 ℃时取得最大值, 挥发分随温度升高不断降低, 固定碳不断升高; (3)共热解时, 不同组分之间相互影响, 一种组分的热解受所加组分的影响, 表现出促进或抑制热解效果.

关键词: 城市生活垃圾; 单一组分; 混合组分; 热解

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 04-0065-08

随着我国经济的飞速发展, 人民生活水平不断提高, 城市生活垃圾产量逐年增加, 不仅加大了垃圾处理处置的压力, 还带来了严重的环境污染问题. 城市生活垃圾主要包括废纸、废塑料、废织物、废金属、废旧电器及部分厨余等^[1]. 这些垃圾会对大气、地下水、土壤等造成一定的污染, 影响居民的日常生活和健康. 据统计^[2], 2020 年我国生活垃圾清运量达 2.4 亿 t, 无害化处理量为 2.4 亿 t, 其中焚烧占比最大(62.3 %), 其次为卫生填埋(33.1 %), 无害化处理率达 100 %.

目前, 我国处理城市生活垃圾主要采用填埋、堆肥、焚烧等方法^[3], 其中填埋法虽然成本低, 但需要占用大量土地, 且会对土壤和地下水等造成潜在污染, 已被多地禁止新增. 堆肥法不仅占地大, 产物有机肥的品质也不高. 焚烧虽能有效实现减量化, 但处理成本高、能耗大, 且存在大量有害气体和飞灰需要处理等问题.

热解技术是生活垃圾资源化的有效方法之一. 该技术在高温、缺氧或无氧条件下可将有机固体废物转化为可回收利用的固体、气体和液体燃料^[1,4], 在减量的同时, 能量回收率可达 80 %^[5]. 热解技术

可以分为低温、中温和高温热解, 分别以产出固相、油相和气相产物为主, 其中低温热解因其热解温度低、固体炭产率高等优势成为一项具有较好应用前景的资源化技术^[6]. 与其他生活垃圾处理技术相比, 热解技术的优势主要有: 对物料没有严格的要求、可有效减少二噁英的生成^[7-8]、能将大多数重金属等有害成分固定在固体产物中^[9]、降低环境污染风险等. 近年来, 国内外热解技术不断趋于成熟^[10], 已逐步应用于污泥、餐厨垃圾、废旧轮胎等有机固体废弃物的处理^[11-14].

城市生活垃圾组分多且复杂, 不同组分在共热解过程中必然会相互影响^[15-17], 从而影响生活垃圾的热解反应历程和产物产率、性质等^[18-21], 因此有必要对生活垃圾中有代表性组分的热解行为和相互作用规律进行系统研究. 然而, 目前关于垃圾热解的研究大多针对单一组分^[22-25]. 基于此, 本研究选取 6 种生活垃圾中的典型组分进行单一和混合热解实验, 研究温度对各组分热解特性及产物炭性质的影响, 探讨各组分的相互作用规律, 以为城市生活垃圾的减量化、资源化和无害化利用提供参考.

收稿日期: 2021-11-27.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(202111646001); 宁波大学大学生科技创新计划项目(2021SRIP1412).

第一作者: 张莹(1997-), 女, 浙江衢州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 市政污泥处理与资源化. E-mail: 1144150859@qq.com

*通信作者: 于洁(1987-), 女, 河南三门峡人, 博士/副教授, 主要研究方向: 固体废物处理与资源化. E-mail: yujie@nbu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取木屑、纸张、厨余(米饭、包心菜叶(以下简称菜叶))、织物(棉线和聚酯线)4大类6种典型的城市生活垃圾.对实验材料进行热解实验,结果发现:6种组分的挥发分含量高($\geq 68.91\%$),固定碳含量次之($5.90\% \sim 25.18\%$),灰分含量最低($\leq 5.91\%$)(表1),适合进行热解处理^[26].

表1 实验材料热解结果 %

组分	灰分	挥发分	固定碳
木屑	0.08	83.36	16.56
纸张	0.06	93.53	6.41
米饭	0.49	75.73	23.78
菜叶	5.91	68.91	25.18
棉线	0.72	87.64	11.64
聚酯线	2.57	91.53	5.90

1.2 实验方法

1.2.1 原料制备

将6种城市生活垃圾原料置于101-A型电热鼓风干燥箱(北京市永光明医疗仪器有限公司)中,在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下干燥至恒重;然后将干燥后的木屑、米饭和菜叶破碎,过100目筛;纸张剪碎成 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 碎片;棉线、聚酯线剪至长度为 2 mm ,于干燥器中密封保存.

1.2.2 热解实验

热解在OTF-1200X型管式热解炉(合肥科晶材料技术有限公司)中进行.首先取一定量的样品均匀摊平在瓷舟里,然后置于热解炉中;热解炉密封后先通入流量为 $2\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的氮气,待炉中空气排出后开始热解反应.热解温度 $300 \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,停留时间 80 min ^[6,10-11].反应结束后取出瓷舟,冷却至室温进行后续分析,固体产物装入封口袋中于干燥器内保存.实验重复2~3次,采用平行实验的均值作为最终结果.

1.2.3 产物分析

将产物分为2类:固体产物(热解炭)和气液产物(热解气+热解油).固体产率为热解后样品的质量与样品初始质量的比值;气液产率用差减法计算得到.

工业分析根据文献[27]方法,包括灰分、挥发

分和固定碳含量.将样品在 $(815 \pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的马弗炉中灼烧 1 h ,将残留物质量占样品质量的比值作为灰分含量;样品在 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热解炉中加热 7 min ,减少的质量占样品质量的比值为挥发分含量;固定碳含量用差减法计算得出.

2 结果与讨论

2.1 单一组分热解产物产率

温度是影响热解过程的关键参数,不同生活垃圾组分热解产物产率随温度的变化趋势如图1所示.

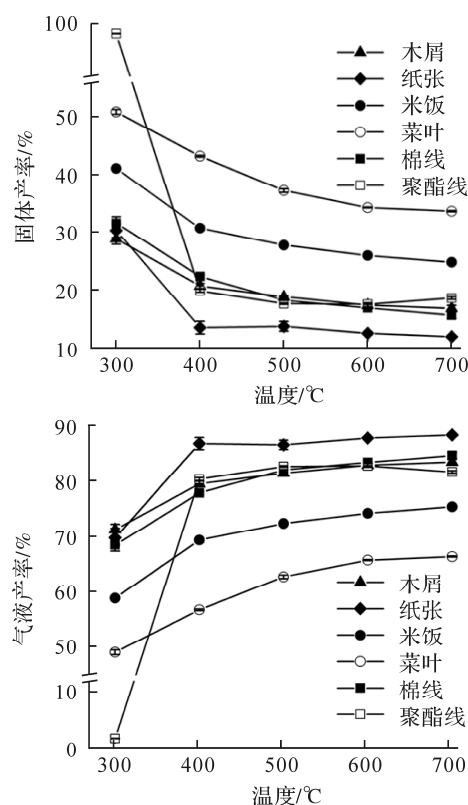


图1 热解温度对6种城市生活垃圾组分热解产物产率的影响

从图1可以看到:随着温度的升高,各单一组分的固体产率呈现降低趋势,气液产率则呈现上升趋势.当温度从 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,聚酯线和纸张的固体产率显著降低,温度继续升高其变化幅度较小;而木屑、米饭、菜叶和棉线4种组分的固体产率则随温度升高缓慢下降.这主要是由于热解温度为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,聚酯线熔化为块状,未发生热解反应,此时的固体产率为 98.4% .当温度升至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,聚酯线发生热分解(固体产率迅速降至

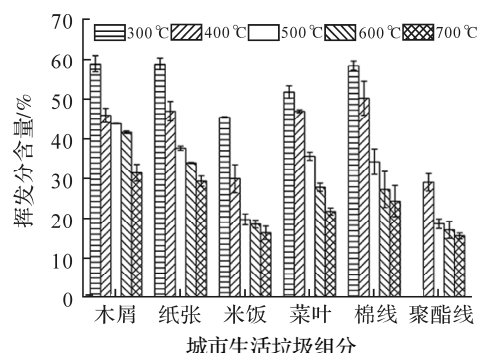
19.7%),这与文献[28-29]的结果一致.纸张的挥发分含量最高,在较低温度下即可发生较充分的分解、挥发等反应.对比6种组分的热解产物产率发现:菜叶的固体产率最高(33.5%~50.9%),其次为米饭(24.6%~41.0%).除300℃外,纸张的固体产率均最低(11.7%~30.1%,300℃时木屑的固体产率最低,为28.7%),其他组分的固体产率居中.各组分的气液产率变化趋势与固体产率的趋势正好相反.从固体产率考虑,300~400℃是城市生活垃圾热解的适宜温度,而聚酯线在400℃时才发生热解反应,因此400℃是各组分热解的较佳温度.

由于热解反应是吸热过程,随着温度升高,在大分子物质裂解的同时,许多中间产物也会发生裂解,有机物发生脱水、脱甲基、缩合和脱氢等反应,导致固体产率不断降低,气液产率不断升高.此外,原料的组成成分对热解特性影响很大,固定碳含量高、挥发分含量低的物质热解产物产率在温度高于400℃时,随温度变化的幅度较大,而固定碳含量低、挥发分含量高的物质热解产物产率在高温段受温度变化的影响较小;固定碳含量高、挥发分含量低的物质固体产率一般较高,气液产率相对较低.

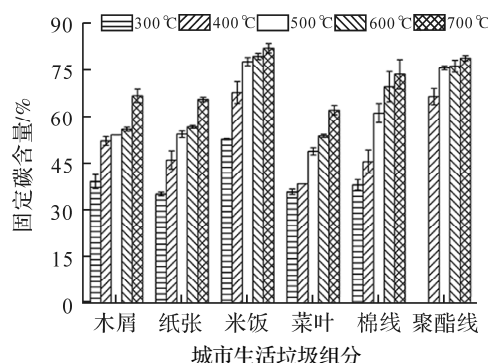
2.2 单一组分热解产物工业分析

不同生活垃圾组分热解固体产物的组成受热解温度的影响显著(图2).从图2可以看到:6种典型组分热解后固体产物中挥发分的含量随温度升高而降低,固定碳含量随温度升高而增加,这与其他生物质在热解过程中组分变化趋势一致^[30].而灰分含量随着温度的升高呈现先升后降的趋势,在500~600℃时取得最大值.6种典型组分中,木屑、纸张、菜叶、米饭和棉线都属于生物质类,主要成分有纤维素、半纤维素、木质素、淀粉和蛋白质;聚酯线是一种聚合物,由含碳氢化合物的大分子化合物组成^[11].在热解过程中,由于各组分中半纤维素、纤维素、木质素、淀粉等的分解,导致挥发分不断析出^[31],灰分含量不断增加^[32].随着反应的进行,部分有机化合物进一步发生缩合,使固定碳含量增加^[31].对比6种组分,菜叶热解固体产物的灰分含量在300~700℃时均最高,固定碳含量在400~700℃时最低;聚酯线的挥发分含量在400~700℃时最低,米饭的固定碳含量在300~

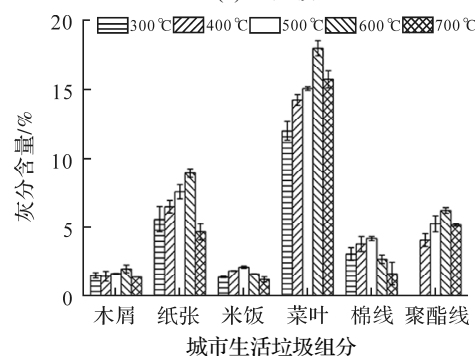
700℃时均最高,挥发分含量在300℃时最低,在400~700℃时仅高于聚酯线.



(a) 挥发分



(b) 固定碳



(c) 灰分

300℃时聚酯线未发生热解,故无固体产物工业分析数据.

图2 6种城市生活垃圾组分在不同温度热解后固体产物的工业分析结果

2.3 混合组分热解产物产率

城市生活垃圾组分复杂,不同组分共热解时会表现出不同的热解行为^[33],为了更好地探究混合组分的热解特性,按质量比1:1将单一组分两两混合进行热解^[33-35].将木屑与其他5种组分两两混合共热解,产物产率如图3所示.从图3可看到:300℃时,其他5种组分对木屑的热解均起到抑制作用,导致固体产率提高,气液产率降低;其中聚

酯线的抑制效果最显著,共热解固体产率高达63.8%,其次分别为菜叶(47.8%)、纸张(47.2%)、米饭(36.8%)和棉线(35.0%)。这是由于低温下聚酯线仅发生熔化,在木屑表面形成涂层,从而抑制了木屑的热解反应^[36]。同时,其他组分在低温下热解产生的挥发性物质等会抑制木屑中纤维素、木质素等热解。当温度升至500℃和700℃时,聚酯线和纸张能促进木屑的热解,使更多的固体产物转化为气体和液体;其中纸张的气液产率最高(82.8%~84.8%),其次为聚酯线(81.4%~83.4%),而菜叶、米饭和棉线在500℃和700℃时会抑制木屑的热解,导致固体产率分别提升至29.1%~31.8%、21.7%~23.8%和21.1%~21.7%。对比5种组分,菜叶、米饭和棉线对木屑的热解均起到抑制作用,纸张和聚酯线在低温时起到抑制作用,当温度升高后,这2种组分能促进木屑的热解。

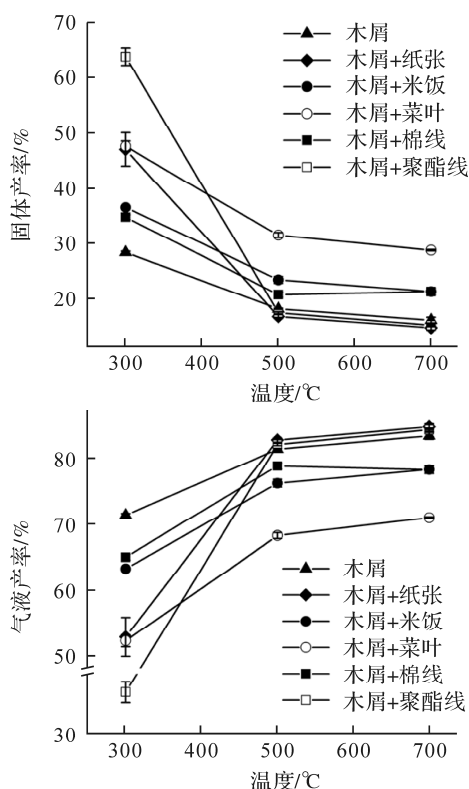


图3 不同温度下木屑与其他5种城市生活垃圾组分等质量混合后的热解产率

将纸张与其他5种组分两两混合共热解,产物产率如图4所示。在300~700℃时,其他5种组分对纸张的热解均起到抑制作用,阻碍了固体产物进一步转化为气体和液体。同样,300℃时聚酯线

的抑制效果最为显著,共热解后的固体产率最高(61.0%),其次分别为木屑(47.2%)、菜叶(42.7%)、米饭(33.9%)和棉线(31.7%)。当温度升至500~700℃时,菜叶的抑制作用最显著,共热解的固体产率为25.7%~28.1%,其次分别为聚酯线(25.7%~28.1%)、米饭(19.7%~24.4%)、棉线(19.2%~21.3%)和木屑(15.2%~17.2%)。这与文献[24-25]的研究结果一致。由于纸张的挥发分含量最高,在较低温度下热解反应基本完全,而其他组分所需的热解温度高于纸张,导致其他组分与纸张的热解反应不同步,进而对纸张的热解无促进作用。此外,聚酯线低温熔化时在生物质表面形成涂层,将生物质降解生成的挥发性物质留在热解固体产物中,随着温度的提高,这些挥发性物质只能与剩余固体进行反应,从而降低了气液产率,提高了固体产率,导致纸张的热解被抑制^[36]。

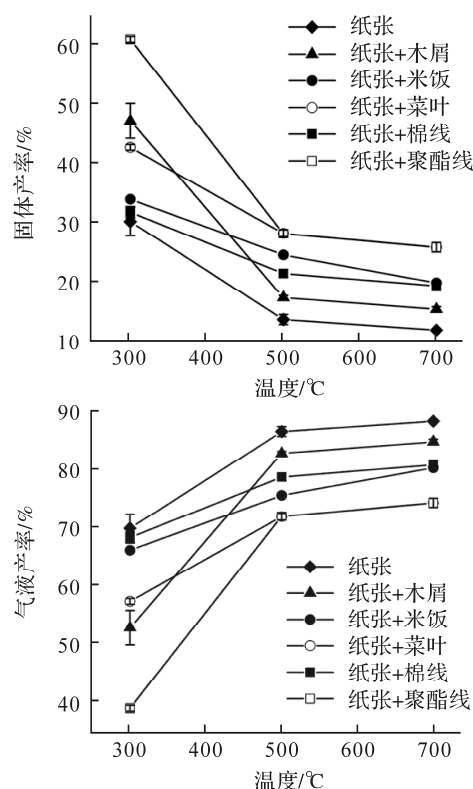


图4 不同温度下纸张与其他5种城市生活垃圾组分等质量混合后的热解产率

米饭与其他5种组分两两混合共热解结果如图5所示。300℃时,聚酯线和菜叶阻碍了米饭中固体物质转化为气体和液体,使固体产率高达66.2%和44.6%,纸张对米饭的热解促进效果最好

(气液产率为 66.1%), 其次为棉线(气液产率为 65.6%)和木屑(气液产率为 63.2%). 随着温度的升高, 菜叶仍表现出抑制热解效果, 而其他 4 种组分均起到促进效果, 其中聚酯线的促进效果最好, 固体产率仅为 20.7%(500 °C)和 18.5%(700 °C). 500 °C 时与棉线共热解的效果(气液产率为 78.3%)优于木屑(气液产率为 76.2%), 其次为纸张(气液产率为 75.6%); 当温度升至 700 °C 时, 纸张的促进效果(气液产率为 66.1%)则优于棉线(气液产率为 65.6%), 其次为木屑(气液产率为 63.2%). 对比各种组分, 菜叶对米饭的热解均起到抑制作用, 木屑、纸张和棉线均能促进米饭的热解, 而聚酯线在低温时抑制米饭热解, 在高温下表现出促进效果, 这与文献[15]的研究结果一致. 聚合物与生物质的共热解往往有利于气液产率的提升.

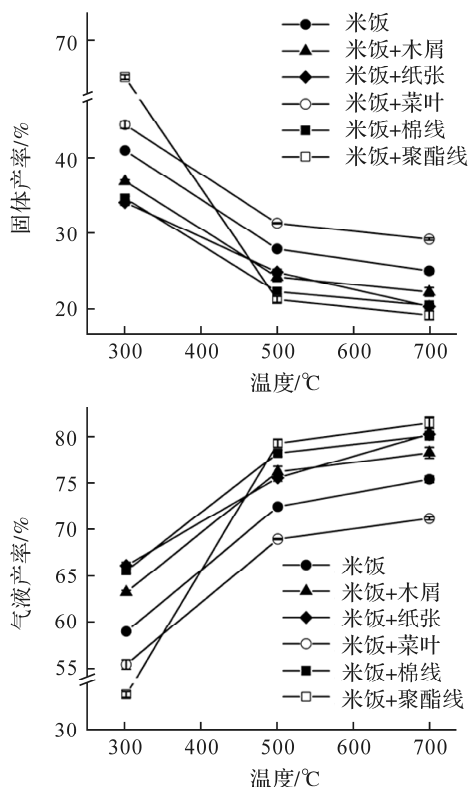


图5 不同温度下米饭与其他5种城市生活垃圾组分等质量混合后的热解产率

与米饭和其他组分共热解特性不同, 菜叶与其他 5 种组分两两混合共热解时(图 6), 只有聚酯线在 300 °C 时抑制菜叶的热解效果, 此时的固体产率为 72.6%, 远高于菜叶单独热解时的固体产率 (50.9%), 其他 4 种组分对菜叶的热解均起到促进

作用, 共热解气液产率从高到低分别为棉线 (59.2%)、纸张(57.3%)、米饭(55.4%)和木屑 (52.2%). 在 500 °C 和 700 °C 时, 5 种组分加入后气液产率提高至 62.8%~74.3%, 其中纸张的促进效果最好, 其次为聚酯线、棉线、米饭和木屑.

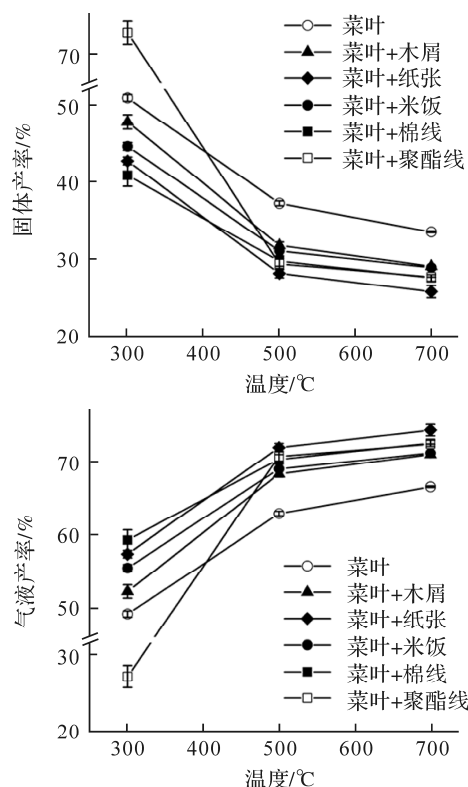


图6 不同温度下菜叶与其他5种城市生活垃圾组分等质量混合后的热解产率

将棉线与其他 5 种组分两两混合共热解, 产率如图 7 所示. 与纸张和其他组分共热解相同, 其他 5 种组分在 300~700 °C 时均抑制了棉线中固体产物转化为气体和液体. 同样, 在 300 °C 时聚酯线的抑制效果最显著, 共热解的固体产率为 51.2%, 其次为菜叶(40.8%)、木屑(35.0%)、米饭(34.4%)和纸张(31.7%). 在 500 °C 时, 与菜叶混合热解后固体产率最高(29.7%), 其次分别为米饭、纸张、木屑和聚酯线, 与这 4 种组分共热解的固体产率在 20.2%~21.7% 之间. 当温度升至 700 °C 时, 菜叶的抑制效果仍最显著, 其次为木屑、米饭、纸张和聚酯线, 固体产率分别为 27.5%、21.7%、19.9%、19.2% 和 19.0%.

将聚酯线与其他 5 种组分两两混合共热解, 结果如图 8 所示. 300 °C 时, 其他 5 种组分均能提高气

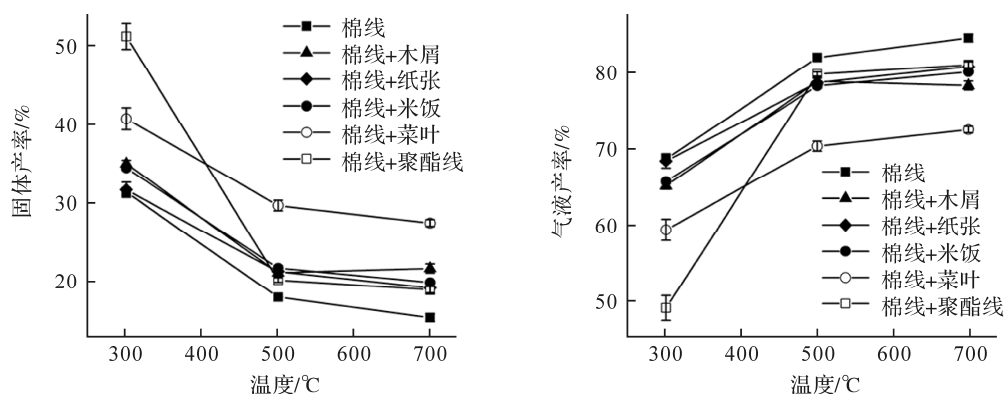


图7 不同温度下棉线与其他5种城市生活垃圾组分等质量混合后的热解产率

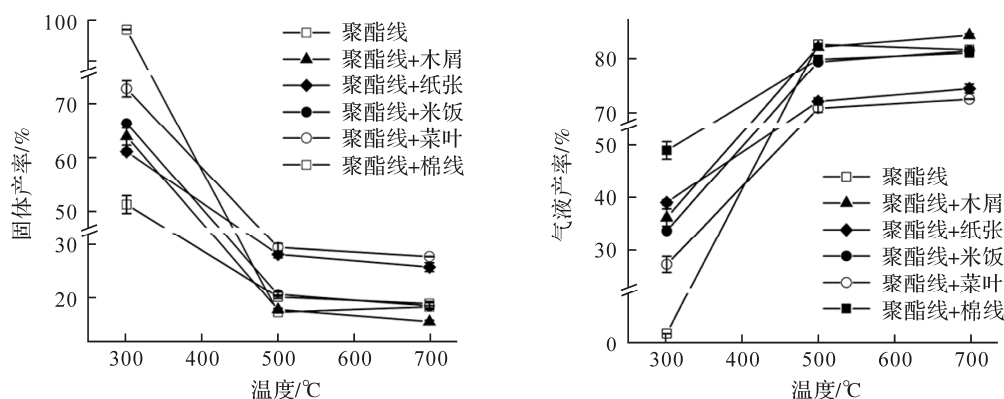


图8 不同温度下聚酯线与其他5种城市生活垃圾组分等质量混合后的热解产率

液产率,促进聚酯线的热解,共热解的固体产率(51.2%~72.6%)远低于聚酯线单独热解时的固体产率(98.4%),其中棉线的促进效果最显著,下面依次为纸张、木屑、米饭和菜叶,其共热解气液产率在27.4%~48.8%之间.当温度升至500℃时,各组分对聚酯线的热解均起到抑制作用,此时菜叶的抑制效果最强(固体产率为29.3%),下面依次为纸张(28.1%)、米饭(20.7%)、棉线(20.2%)和木屑(17.9%).而在700℃时,木屑热解过程中释放了某些物质能促进聚酯线的热解(固体产率仅为15.7%),其他4种组分均表现出抑制的效果,其中与菜叶共热解的固体产率(27.6%)高于纸张(25.7%)、棉线(19.0%)和米饭(18.5%).

与单一组分热解类似,6种组分两两等质量混合共热解后固体产率随温度升高而降低,气液产率随温度升高而升高,且在300~500℃时变化幅度较大,500~700℃时变化幅度较小.其中聚酯线在300℃时与其他组分混合热解的反应仍不完全,因此在热解处理含聚酯类城市生活垃圾时,温度不宜低于300℃.不同组分共热解时的作用效果各不

相同,只有木屑与聚酯线在700℃下共热解时起到相互促进的效果.在300℃时,其他组分的加入均会对木屑的热解起到抑制作用,只有在500~700℃时,聚酯线和纸张能促进其热解.在纸张和棉线中加入其他5种组分,均对其热解起抑制作用.在300℃时,木屑、棉线和纸张均能促进米饭的热解,在500~700℃时,除菜叶外,其他4种组分的加入也能促进米饭的热解.菜叶除300℃时聚酯线抑制其热解外,其他组分的加入均能促进其热解反应.其他组分与聚酯线在300℃下共热解均起到促进作用,在500~700℃时,只有木屑在700℃时加入能促进热解,其他条件下加入不同组分后都会抑制聚酯线的热解.

3 结论

6种典型的城市生活垃圾组分(木屑、纸张、米饭、菜叶、棉线、聚酯线)单独或混合热解时受温度的影响较大,固体产率随温度的升高逐渐降低,气液产率则逐渐升高.6种组分单独热解时固体产物的灰分含量先升后降,在500~600℃时取得最大

值,挥发分含量随温度的升高逐渐降低,固定碳含量则不断升高。通常,固定碳含量高、挥发分含量低的组分热解后固体产率低、气液产率高;固定碳含量低、挥发分含量高的组分热解后固体产率高、气液产率低。当各组分两两等质量混合共热解时,不同组分之间相互影响,加入的组分会促进或抑制另一组分的热解。

参考文献:

- [1] Abdulyekeen K A, Umar A A, Patah M F A, et al. Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150:111436.
- [2] 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, 2020.
- [3] 王旻烜, 张佳, 何皓, 等. 城市生活垃圾处理方法概述[J]. 环境与发展, 2020, 32(2):51-52.
- [4] Raj A, Yadav A, Arya S, et al. Preparation, characterization and agri applications of biochar produced by pyrolysis of sewage sludge at different temperatures[J]. Science of the Total Environment, 2021, 795:148722.
- [5] Gollakota A R K, Reddy M, Subramanyam M D, et al. A review on the upgradation techniques of pyrolysis oil[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1543-1568.
- [6] Sipra A T, Gao N B, Sarwar H. Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 175:131-147.
- [7] Han Z X, Li J, Gu T B, et al. Effects of torrefaction on the formation and distribution of dioxins during wood and PVC pyrolysis: An experimental and mechanistic study[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2021, 157: 105240.
- [8] 徐鹏, 王启民. 生活垃圾低温热解实验研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2020, 16(2):39-44.
- [9] Xu C B, Tan X, Zhao J W, et al. Optimization of biochar production based on environmental risk and remediation performance: Take kitchen waste for example[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416:125785.
- [10] Hasan M M, Rasul M G, Khan M M K, et al. Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 145:111073.
- [11] Chen D Z, Yin L J, Wang H, et al. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review[J]. Waste Management, 2014, 34(12):2466-2486.
- [12] Hu L, Wei X Y, Guo X H, et al. Investigation on the kinetic behavior, thermodynamic and volatile products analysis of chili straw waste pyrolysis[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5):105859.
- [13] Luo H X, Cheng F W, Yu B, et al. Full-scale municipal sludge pyrolysis in China: Design fundamentals, environmental and economic assessments, and future perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2021, 795:148832.
- [14] Senneca O, Chirone R, Cortese L, et al. Pyrolysis and combustion of a solid refinery waste[J]. Fuel, 2020, 267:117258.
- [15] Uzoejinwa B B, He X H, Wang S, et al. Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 163:468-492.
- [16] Yuan H R, Yang Q, Wang Y Z, et al. Impact of torrefaction on the fuel properties and combustion characteristics of compost of food waste and sawdust[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(3):3469-3476.
- [17] Qiao Y Y, Xu F F, Xu S L, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of typical municipal solid waste components and their mixture: Analytical TG-FTIR study[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(10):10801-10812.
- [18] 刘旭, 张楷文, 张磊, 等. 城市生活垃圾各组分焚烧与热解行为研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2021, 41(5): 9-16.
- [19] 刘雨豪, 李爱军, 陈郭石. 垃圾低温热解的特性模拟及过程优化[J]. 应用能源技术, 2019(5):1-6.
- [20] 邢文龙, 张蒙蒙, 朱赫男, 等. 城市生活垃圾与园林废物的热解实验[J]. 环境工程, 2019, 37(3):152-157; 197.
- [21] 张蒙蒙, 宋强, 宋丽华, 等. 城市生活垃圾与松木屑共热解实验研究[J]. 环境工程, 2018, 36(4):137-141.
- [22] Siddiqui M Z, Han T U, Park Y K, et al. Catalytic pyrolysis of *Tetra pak* over acidic catalysts[J]. Catalysts, 2020, 10(6):602.
- [23] Zhang Z, Wang Q J, Li L W, et al. Pyrolysis characteristics, kinetics and evolved volatiles determination of rice-husk-based distiller's grains[J]. Biomass and Bioenergy, 2020, 135:105525.
- [24] Wu C H, Chang C Y, Tseng C H. Pyrolysis products of uncoated printing and writing paper of MSW[J]. Fuel,

- 2002, 81(6):719-725.
- [25] Wu C H, Chang C Y, Tseng C H, et al. Pyrolysis product distribution of waste newspaper in MSW[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003, 67(1):41-53.
- [26] Cai J M, He Y F, Yu X, et al. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76:309-322.
- [27] GB/T 212-2008. 煤的工业分析方法[S].
- [28] 陈曦, 于钦学, 任文娥, 等. 聚酯的热分析与热分解动力学的研究[J]. *绝缘材料*, 2009, 42(3):52-55; 63.
- [29] 杨宁宁. 贺斯格乌拉褐煤与聚乙烯、聚酯热解及共热解研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [30] Martín-Lara M A, Ronda A, Zamora M C, et al. Torrefaction of olive tree pruning: Effect of operating conditions on solid product properties[J]. *Fuel*, 2017, 202:109-117.
- [31] Zhang S P, Hu B, Zhang L, et al. Effects of torrefaction on yield and quality of pyrolysis char and its application on preparation of activated carbon[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, 119:217-223.
- [32] da Silva C M S, Vital B R, de Cássia O Carneiro A, et al. Structural and compositional changes in eucalyptus wood chips subjected to dry torrefaction[J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 109:598-602.
- [33] Chhabra V, Bhattacharya S, Shastri Y. Pyrolysis of mixed municipal solid waste: Characterisation, interaction effect and kinetic modelling using the thermogravimetric approach[J]. *Waste Management*, 2019, 90:152-167.
- [34] Miandad R, Barakat M A, Aburizaiza A S, et al. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119:239-252.
- [35] Siva M, Onenc S, Uçar S, et al. Influence of oily wastes on the pyrolysis of scrap tire[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 75:474-481.
- [36] Rago Y P, Collard F X, Görgens J F, et al. Torrefaction of biomass and plastic from municipal solid waste streams and their blends: Evaluation of interactive effects[J]. *Fuel*, 2020, 277:118089.

Pyrolysis characteristics of single and mixed typical components of municipal solid waste

ZHANG Ying¹, YU Chunlei¹, BAO Yousi², ZHONG Yi¹, DING Xiaoshuang¹, ZHU Tongtong¹, YU Jie^{1*}

(1.School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Renxin Central Academy of Science CO., Ltd., Ningbo 315012, China)

Abstract: Pyrolysis is a promising technique for the treatment and reuse of municipal solid waste. In this study, six typical components of municipal solid waste (wood chips, paper, rice, vegetable leaves, cotton thread and polyester thread) are pyrolyzed individually and collectively in an effort to explore the pyrolysis process and product carbon properties as well as the interaction among the components with increasing temperature. Results show that (1) The solid yield of single and mixed components decreases with increasing temperature, while the gas and liquid yield increases accordingly. (2) The ash content of solid product of single components increases at first, and then decreases, reaching maximum value at 500–600 °C. The fixed carbon content increases with elevating temperature while the volatile matter content decreases gradually. (3) The interactions among individual components have been found, which arise as the interactions can either foster or inhibit pyrolysis reactions. Those findings can provide theoretical and technical support for utilization of municipal solid wastes.

Key words: municipal solid wastes; single component; mixed components; pyrolysis

(责任编辑 史小丽)