

烘焙在城市生活垃圾预处理的应用前景*

杨秋^{1,2,3,4}, 王亚琢^{1,2,3}, 林镇荣^{1,2,3}, 袁浩然^{1,2,3,4}, 顾菁^{1,2,3†},
呼和涛力^{1,2,3}, 孙富安⁴, 何明阳⁴

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 常州大学, 江苏 常州 213164)

摘要: 城市生活垃圾含水率高、成分复杂、尺寸不均、处理成本高, 在焚烧过程中易生成二噁英等污染物, 造成二次污染, 这些问题制约了其转化利用。本文简述传统垃圾预处理方式的局限性, 详细介绍了烘焙预处理在生物质处理中的研究进展。经烘焙后, 生物质的理化性质得到明显改善。我国城市生活垃圾可燃组分中含有大量的生物质废料, 将烘焙应用到城市生活垃圾预处理技术中, 可改善城市生活垃圾的理化特性, 提高其热转化效率, 减少二次污染, 为城市生活垃圾高效清洁化利用提供了一条新途径。

关键词: 烘焙; 城市生活垃圾; 预处理

中图分类号: TK09; X705

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.03.009

Application Prospect of Torrefaction in Municipal Solid Waste Pretreatment

YANG Qiu^{1,2,3,4}, WANG Ya-zhuo^{1,2,3}, LIN Zhen-rong^{1,2,3}, YUAN Hao-ran^{1,2,3,4}, GU Jing^{1,2,3},
HUHETAOLI^{1,2,3}, SUN Fu-an⁴, HE Ming-yang⁴

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Municipal solid waste (MSW) in China features high moisture content, complex composition, nonuniform dimensions, high processing cost, and easy to generate dioxins or other pollutants in the process of combustion, resulting secondary pollution, these problems restrict its utilization. The limitations of traditional pretreatment methods were briefly summarized, and the research progress on torrefaction pretreatment of biomass was introduced. The physical and chemical performances of the biomass were significantly improved after torrefaction. As there exist large amount of biomass wastes in the MSW combustible components in China, the application of torrefaction in MSW pretreatment can improve the physical-chemical properties and the thermal conversion efficiency of MSW, and reduces secondary pollution. This treatment technology provides a new way for the efficient and clean utilization of MSW.

Key words: torrefaction; municipal solid waste; pretreatment

0 前言

中国改革开放三十多年, 经济的高速发展也造成了大量的城市生活垃圾堆积^[1], 导致环境问题日趋严重。据国家统计局统计, 城市生活垃圾清运量从2010年的1.58亿t增长到了2015年的1.91亿t^[2],

且每年都在快速增长, 给现有的城市垃圾处理技术提出了非常严峻的挑战。

城市生活垃圾具有种类多样, 形状、结构和性质各不相同的特性, 资源化利用时热效率低, 易造成二次污染。预处理技术不仅能有效地减少生活垃圾中的水分, 还能将玻璃、金属、石块等不可燃物

* 收稿日期: 2017-02-20 修订日期: 2017-04-06

基金项目: 国家青年科学基金项目(51406207, 51606200); 中国科学院青年创新促进会(2014320); “广东特支计划”科技青年拔尖人才(2014TQ01Z379); 广东省科技计划项目(2015A030401059, 2014A080802009)

† 通信作者: 顾菁, E-mail: gujing@ms.giec.ac.cn

去除,提高垃圾可燃组分的含量,使城市生活垃圾能转变成更清洁、更易利用的燃料,因此生活垃圾预处理技术成为垃圾处理工艺中不可或缺的重要环节。目前,我国城市生活垃圾预处理技术主要有压实、分选和破碎三大类。压实,主要是通过减少生活垃圾中的水分和颗粒之间的空隙,使体积变小,增加运输量,提高日处理量。分选^[3],又细分为筛分、重力分选、风力分选和磁力分选^[4],其中重力分选操作简单、成本低,易将垃圾中的轻质和重质组分分离,最为常用。破碎预处理^[5],可以增加垃圾颗粒的比表面积并提高其粒径均匀度,从而使得垃圾比重增大、体积减小,便于压缩、贮存与高密度填埋。以上三种传统预处理方法均是从原态垃圾的物理性质上进行改性,但不能有效地改变其化学性质,在后期热转化过程中热效率低,会生成二噁英等有毒有害物质。我国城市生活垃圾可燃组分中含有大量的生物质废料,可借鉴生物质预处理中的烘焙技术,将其运用到城市生活垃圾可燃组分的预处理中,进一步完善城市生活垃圾预处理技术,提高资源化利用效率,减少热转化时的二次污染。

1 烘焙预处理的研究进展

烘焙^[7]又称作烘烤、低温热解、慢速轻度热解或高温烘干,是一种在常压惰性氛围下(氮气或氩气),升温速率小于30 °C/min,烘焙温度200~300 °C,停留时间2 h以内的慢速热解过程。1930年法国人在对木质生物质处理中首次提出了烘焙预处理技术,起初对烘焙的研究相对较少,直至近几十年才逐渐受到人们的关注。BERGMAN等^[8]将烘焙整体过程分为加热、干燥、烘焙和冷却四个阶段。加热阶段:生物质温度升高,水分开始蒸发。干燥阶段:前期的温度在100 °C恒温下,主要是自由水蒸发;在中后期,生物质被加热至200 °C,物理结合水脱离。烘焙阶段:温度大于200 °C,此阶段大部分生物质重量减轻,半纤维素大量水解和碳化,但纤维素和木质素基本保持稳定。降温阶段:烘焙产物温度降至200 °C以下直到室温,产物的物理和化学特性趋于稳定。

CHEN等^[9]在研究烘焙对木屑的物理和化学特性影响中发现:升温阶段,木屑中的水分大量蒸发;烘焙阶段,木屑挥发分的挥发使样品重量迅速减少。烘焙不仅改善了木屑的易磨性,还增大了比表面积

和孔隙率。同时烘焙后的木屑中H和O含量降低,O/C和H/C摩尔比减小,木屑的能量密度提高。

1.1 烘焙对生物质固体产物性质的影响

1.1.1 烘焙对固体产物物理特性的影响

生物质的纤维结构坚韧,很难被研磨或破碎成小颗粒。烘焙可破坏粒子间的连接纤维,改变生物质的微观孔隙结构,增强生物质的易磨性^[10]。ARIAS等^[11]在对烘焙后木质生物质的研究发现,烘焙后的生物质中小粒径粒子数量增加,生物质粒子间连接的自然纤维被破坏并分解,因而烘焙后生物质的易磨性增强。CHEN等^[12]对竹子、柳树、椰壳和木头进行烘焙研究发现,当温度达到260 °C时半纤维素剧烈降解,纤维素和木质素只有少量发生降解,烘焙预处理对半纤维结构影响较大,对纤维素和木质素影响甚微。PHANPHANICH等^[13]对烘焙后松树片和伐木残料的研磨试验结果表明,经300 °C烘焙后,两种生物质的研磨耗能均减少。PARK等^[14]研究发现,烘焙后的粒子研磨耗能较烘焙前减少了80%~90%,烘焙增大了粒子的比表面积,改善了粒子的球面,使粒子更趋近于球形。

MANI等^[15]研究了不同烘焙温度对木屑微观粒子结构的影响,烘焙分解了木屑的纤维化合物,使粒子的易磨性增强,小粒径粒子的数量增加;随着烘焙温度升高,粒子的易磨性增强,小尺寸粒子的均匀度也随之提高。ARIAS等^[11]的研究也得到了类似结论。ROUSSET^[16]研究了不同烘焙温度和烘焙时间对生物质性质的影响,结果表明,当烘焙温度在230 °C时,物质发生较小的失重,而260 °C后由于半纤维素的剧烈分解和木质素的少量分解,使生物质失重率明显增大;对比烘焙时间和烘焙温度对物质的影响,烘焙温度的影响明显大于烘焙时间。当烘焙温度小于250 °C时,生物质挥发分和灰分含量变化较小,而当烘焙温度高于250 °C时,生物质挥发分含量明显减少,随着烘焙温度的升高,烘焙固体产物收率明显减少。生物质经烘焙后其中的自由水和结合水被脱除,生物质间的连接纤维被破坏,大分子物质分解成小分子物质,其易磨性增强,更容易被研磨成均匀的小颗粒,且研磨耗能也明显降低。

将烘焙技术引入到垃圾预处理中以期去除垃圾中的水分,破坏垃圾的微观结构,增加小尺寸粒子数量,降低其体积和质量产率,增大粒子比表面积、

改善易磨性, 增强疏水性, 使得垃圾在热转化过程中效率更高。

1.1.2 烘焙对固体产物化学特性的影响

受烘焙温度、停留时间和原料性质的影响, 生物质中的 C、H、O 和 Cl 元素的含量会发生很大的变化, 进而影响产物的化学组成和能量密度。烘焙过程中, 由于生物质中的自由水和结合水的脱除, O 和 H 含量明显减少, 且随着烘焙温度升高两者含量越少。H 和 O 含量的明显减少使得 C 的相对含量增多, 且随着烘焙温度升高而增加。挥发分的大量脱除使生物质的质量产率降低, 固定碳和灰分含量增多。HAMILTON 等^[17]在 150~350 °C 烘焙温度下, 分析树叶和树木的 CH₃Cl 释放。当温度达到 300 °C 时, CH₃Cl 的释放量最大。烘焙过程中对 Cl 的量化研究发现, Cl 以 HCl 和 CH₃Cl 等形式释放^[18-19]。BJÖRKMAN 等^[20]研究了几种生物质原料烘焙过程中 Cl 的释放时发现, 由于低温下生物质有机结构的特殊性, 400 °C 时 20%~50% 的 Cl 已经释放。秸秆在 400 °C 时 Cl 的释放率达到 60%, 而当烘焙温度升高到 400~700 °C 时, Cl 的释放率仅有微小的提升^[21]。从 PRINS^[22]绘制的范克雷维伦图可看出不同燃料的元素组成 (C、H、O 的比例) 有所不同, 煤中的 H 和 O 含量比生物质高。烘焙前生物质中的 O/C 比在 0.5~0.8 间, H/C 比在 1.2~1.4 间, 烘焙后的固体产物中 O/C 和 H/C 比减小, 接近于煤的原子比, 固体产物的性质与煤的性质相似; 木材经烘焙处理后, 固体产物的元素组成也发生变化, 性质改变; 当烘焙停留时间在 30 min 时, 固体产物具有明显的煤特性。随着烘焙温度的升高与停留时间的延长, 烘焙后固体产物的性质与煤相似。PRINS 等^[23]研究了经不同烘焙温度和烘焙时间预处理的松木、柳树和秸秆的性质发现: 产物的 H/C 与 O/C 比均出现明显降低, 低位热值升高, 烘焙温度越高, H/C 与 O/C 比降低越明显。PENTANANUNT^[24]在木材烘焙前后燃烧特性的研究中发现烘焙后的木材产生的烟气更少, 对大气的污染更低; 烘焙温度从 230 °C 升高到 300 °C 时, O/C 比下降, 燃烧效率更高。PRINS^[25]研究了不同烘焙温度和烘焙时间对柳树、松树和草的特性影响, 烘焙不仅降低了 H/C 和 O/C 的比, 还提高了生物质热值, 同时相对灰分含量增大。朱波等^[26]利用热重红外联用仪研究烘焙预处理稻秆和棉秆 (两者经粉碎、筛分后选择小于 100 目样品, 再在 55 °C 下烘干 16 h 处理) 的特性, 结果表

明经烘焙后产物的 C 含量增大, O 含量与含 O 官能团数量均减小, 能量密度提高, 燃料品质提升, 生物质的燃烧性能增强。BRIDGEMAN 等^[27]对芦苇、秸秆和柳树进行烘焙预处理, 实验发现烘焙预处理能够改善其燃烧特性, 挥发分的燃烧温度区间缩短, 焦炭燃烧区间加长, 燃烧产生更高的热量。木质生物质烘焙存在一个典型的物质与能量平衡关系^[8]: 烘焙后固体产物的质量是原生物质质量的 70%, 包含了原物质 90% 的能量; 挥发部分占 30% 仅带有 10% 的生物质能量, 烘焙产物的能量密度为原本的 1.3 倍。

烘焙条件的不同, 对生物质的能量和热值产生的影响也各不相同。赵辉^[10]对四种新鲜物质进行烘焙预处理, 结果表明产物的热值随烘焙温度的升高而增大。生物质的固体产率和能量产率随烘焙温度的升高和反应时间的延长而降低。PRINS 等^[28]发现 250 °C 下固体烘焙产物包含 95% 的能量 (基于其低位热值), 而在 300 °C 下产物包含 79% 的能量; 烘焙后的木材能量密度分别是未烘焙的 1.1 倍和 1.19 倍; 烘焙过程中产生的液相和气相产物可作为烘焙的能量来源, 以提高其能量效率。PARK 等^[29]对北美松树进行烘焙预处理, 发现当烘焙温度控制在 275 °C、烘焙时间为 30 min 时, 生物质的燃料特性和经济效益最高。MUNDIKE 等^[30]研究了烘焙时升温速率对高位热值的影响, 烘焙的最佳升温速率在 10~20 °C/min 间, 高位热值提高了 0.8 MJ/kg, 产物碳的产率提高了 10%。

烘焙预处理降低了生物质的 H、O 含量, 增加了 C 含量所占比率, 提高了产物的热值和能量密度, 生物质能量品质提升, 更接近煤的性质。烘焙时, 由于脱 H₂O 和脱 CO₂ 反应, 生物质烘焙产物中 H、O 和 C 的组分含量改变, 且随着烘焙温度升高, 烘焙产物中 C 含量增加, H 和 O 所占比例减少, 挥发分的脱除使 O/C 和 H/C 摩尔比例减少, 这也说明烘焙预处理通过减少生物质中的 H、O 含量来提高生物质的能量密度; 烘焙温度在 300 °C 时, 生物质产物的高位热值显著提高, 因而生物质的能量品质提升, 但当温度高于 300 °C 后, 因热解反应发生, 其高位热值逐渐降低造成了能量和资源的浪费, 同时也对垃圾能量品质的提升产生消极的影响, 所以烘焙温度不宜过高。烘焙作为垃圾预处理技术时, 可提升城市生活垃圾可燃组分的热值和能量品质。

1.1.3 烘焙预处理对固体产物热转化特性的影响

生物质热解是指在无氧或缺氧条件下,对生物质进行加热处理,使之热解为气、液、固三态产物的过程。生物质经过烘焙预处理后,能量密度和热值显著提高, H/C 和 O/C 的摩尔比明显减小,热解特性得到改善。随着烘焙温度升高,烘焙产物的热解特性发生显著变化:热解活化能降低、指前因子减小,热解产物生物炭含量增加,热解油产率降低,热解的非冷凝气和生物油品质提高。ZHANG 等^[31]研究米糠烘焙时发现,随着烘焙温度的升高,挥发分含量减少,灰分和固定碳含量增加,热解时热解碳的产量增加,热解效率提高。CHEN 等^[32]研究烘焙对秸秆热解产物产率与品质的影响时发现,烘焙预处理对热解油和生物炭的产率影响较大。热解油主要来自纤维素和半纤维素的热解,生物炭来源于木质素的热解。烘焙温度升高时,热解油产量减少、生物炭产量增加。烘焙后的生物质热解油中酸含量减少,酚含量增加,品质提高;热解油中的含水率随烘焙温度升高而减小,烘焙温度在 280 时热解油的含水率减少为原样的一半;烘焙温度的升高使得热解油的热值明显提高,在 220、250 和 280 三个烘焙温度下,热解油热值分别比原样提高了 8.7%、32.6%和 50.9%;烘焙后热解生物炭产物的表面积增加,烘焙温度越高,比表面积越大。烘焙后,产物热解的不凝气中 CO 和 CO₂ 含量减少, CH₄ 和 H₂ 主要来自木质素中甲氧基分解和苯脱氢形成多环芳烃,其体积分数随烘焙温度升高而增加,热值变大。

生物质气化指在 800~900 的高温下,使生物质和气化剂发生不完全氧化反应,生成可燃气体 (H₂, CH₄, CO 等),是一种有效的热化学转化途径。由于生物质存在水分含量高、能量密度低、不易储存等缺点,限制了其更为高效的利用,而采用烘焙预处理技术可有效改善其自身品质。烘焙后,合成气中 H₂ 含量增加了 7%, CO 含量增加了 20%^[33],固体产物气化合成气品质得到明显的提高。赵辉等^[10]对烘焙后的生物质进行气化实验,发现烘焙后的生物质合成气成分得到明显改善,并且降低了研磨生物质的耗电量,提高了气化系统的总体效率。当烘焙温度达到 290 时,生物质的气化效率最高,总体效率达到了 71.5%。PRINS 等^[28]利用 Aspen Plus 软件模拟木屑烘焙前后的气化效率,木屑在烘焙和气化时的总耗能高于未烘焙的木屑气化耗能,烘焙木屑的气化

工艺效率低于未烘焙木屑。为减少烘焙和气化耗能,在实际气化工艺中,可充分利用烘焙的气体产物为烘焙提供能量,以提高气化的工艺效率;PRINS 等分别研究循环流化床气化技术、烘焙-流化床气化技术和烘焙-气流床气化技术对木材气化的影响;烘焙与气化技术的结合相当于一个二段式热解气化技术,其耗能低于直接热解气化耗能。PRINS 等的研究表明

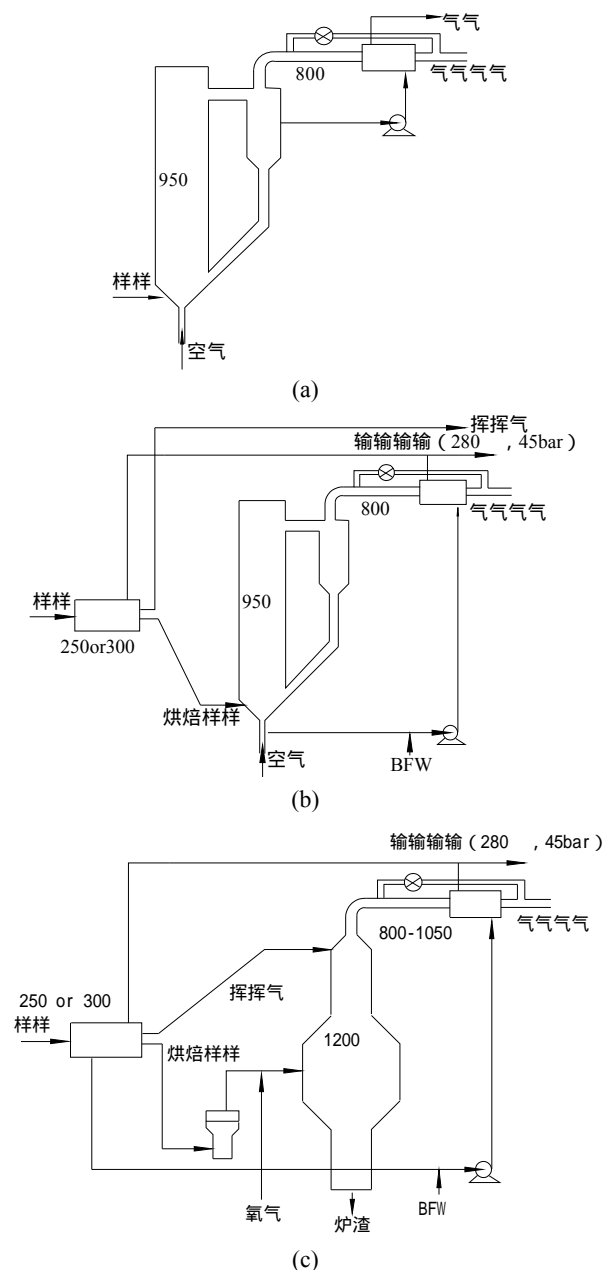


图 1 气化工艺方案 (a) 循环流化床气化技术, (b) 烘焙-流化床气化技术, (c) 烘焙-气流床气化技术^[28]

Fig. 1 Gasification process schemes (a) CFB gasification of wood, (b) wood torrefaction and CFB gasification of torrefied wood, (c) wood torrefaction integrated with EF gasification of torrefied wood^[28]

烘焙与气化结合技术避免了有机物质的损失,因为所有的产物都被集中到了气化系统中,促进合成气的生成,提高了生物质气化效率。

生物质燃烧主要经历脱水、挥发分析出燃烧和固定碳燃烧 3 个阶段。生物质自身的高含水率降低了其热值,纤维结构的高塑性和高机械强度使其难破碎,流动性差,且无法高效燃烧,点火困难,烟气流太大,后续受热面腐蚀和燃烧稳定性差的问题极大地限制了生物质燃烧。朱波等^[34]研究了烘焙对秸秆燃烧特性的影响,经烘焙处理后,秸秆的表面结构在热作用下被破坏,整体聚合度降低,表面更加松散,因此秸秆的燃烧特性明显改善,燃烧温度明显降低,且随烘焙温度升高,秸秆最大失重峰对应温度降低。生物质经烘焙后,产物的易磨性增强,均匀的尺寸使其能更充分地燃烧,放出更高的热量。同时,颗粒粒径分布集中,疏水性增强让其能够适应更多的炉型。BRIDGEMEN 等^[27]研究发现,烘焙后生物质的挥发分和焦炭燃烧过程比原样放热量大,着火点更低,由于烘焙后的颗粒能够快速进入固定碳燃烧阶段。烘焙后,生物质的水分和含氧量明显降低,挥发分含量也随烘焙温度升高而减少,能量密度和固定碳含量也得到大幅度提升,生物质着火点提前,燃尽温度提高,放热量明显增大。

1.2 烘焙对气、液产物特性的影响

生物质烘焙时生成一种淡黄色、有刺激性气味的液体,同时得到一种含有少量乙酸、甲醇、甲酸和乳酸的液体。液体产物中的主要成分为水分,这是由烘焙时生物质中自由水分子的蒸发与有机大分子的脱水反应所致。同时半纤维素发生脱羧基反应,糖苷醚、C—C 键和环内 C—O 键断裂,生成酸、醛、醚和醇类物质。当烘焙温度升高时,液体产物的颜色由淡黄变成暗黄或暗灰,液体产物的量也随之增加。PRINS 等^[28]对柳树进行烘焙实验,发现液体产物中乙酸的含量与烘焙温度有关,随着烘焙温度的升高,乙酸的含量也随之增加,且当烘焙温度升高至 290 时,乙酸的含量达到峰值 13%;烘焙的气体产物为冷凝气和非冷凝气,以非冷凝气为主,占总气体的 80%,但其中的可燃气体 CO、H₂、CH₄

等含量相对较少;随着烘焙温度的升高,气体产物中非冷凝气的燃烧热值随之升高。

2 烘焙在垃圾预处理中的应用及前景展望

城市生活垃圾问题影响了城市可持续发展,垃圾复杂的组分使其在燃烧和气化时易造成热效率低,二次污染严重的问题,而传统的处理方法占地多、对大气和地下水造成污染。城市生活垃圾的能源化发展潜力很大,可代替部分化石燃料,促进城市的能源供应,为解决未来的能源问题提供新思路。烘焙预处理在生物质的处理中表现出明显的效果,改善了生物质的物理和化学特性,提高了生物质的热转化特性。鉴于烘焙技术在生物质处理中的显著作用,应将烘焙预处理引入到城市生活垃圾的预处理中。POUDEL 等^[35]研究了烘焙过程中烘焙温度和烘焙停留时间对厨余特性变化的影响,烘焙厨余产物的固体产率和能量产率随烘焙温度升高而降低;烘焙温度对厨余特性的影响比停留时间大;对于元素分析,随着烘焙温度的升高,固体产物中的 C 含量增加,H 和 O 所占比例减少,O/C 和 H/C 比减小,因此厨余的燃料特性增强;含氧化合物的释放温度比 C_xH_x 气体的释放温度低。YUAN 等^[36]以含有 26%PE、10% 废纸、8%衣物、14%植物、34%厨余和 8%PVC 的城市生活垃圾为研究对象,分别在 250、300、350、400 和 450 五个温度点下进行烘焙预处理。从表 1 和表 2^[38]可以看出烘焙预处理减少了 H 和 O 的含量,增加了 C 含量,改善了城市生活垃圾的燃烧特性。随烘焙温度的升高,O 和 H 的含量减少,固定碳含量增加,可燃组分的热值升高。烘焙后生活垃圾的体积和质量明显减小,且烘焙后的生活垃圾比未烘焙的生活垃圾容易破碎,易磨性的增强使其可适应更多的炉型,可提高城市生活垃圾的日处理量。实验还发现,烘焙降低了城市生活垃圾中的 Cl 含量,表 2 中,经不同温度烘焙后,混合垃圾中 Cl 含量随烘焙温度的升高而减少,直接从源头上遏制了二噁英前驱物的生成,减小对环境的污染。

表 1 城市生活垃圾的质量、体积、质量产率和高位热值^[38]

Table 1 Mass, volume, mass yield, and high-heating value (HHV) of MSW

温度 /	质量 / g	体积 / mL	质量产率 / %	高位热值 / kJ·kg ⁻¹
未烘焙 MSW	5.00	25	100.0	23537.4
250	4.34	22	86.8	27720.3
300	3.68	20	73.6	29571.1
350	3.51	18	70.2	30749.3
400	2.92	12	58.4	31162.7
450	1.49	11	29.8	23081.0

表 2 烘焙前后生活垃圾的元素分析^[38]

Table 2 Ultimate analyses of MSW

温度 /	C/%	H/%	O/%	N/%	S/%	Cl/%
未烘焙 MSW	56.95	8.61	19.72	1.00	0.20	5.92
250	61.83	8.43	17.77	1.30	0.23	2.64
300	65.47	8.38	13.54	1.35	0.25	2.51
350	65.59	8.30	11.79	1.36	0.3	2.46
400	66.57	7.97	8.59	1.35	0.29	2.53
450	51.50	3.18	14.14	2.13	0.26	3.39

城市生活垃圾烘焙预处理技术具有诸多优点：降低垃圾的含水率、质量和体积，便于运输；改善易磨性，减少垃圾预处理过程中的研磨耗能，使其可适应更多的炉型；增强燃烧特性，提升热解气化效率和产气热值，合成气中焦油的含量减少，可燃气含量增加；烘焙需要外界提供能量，因而烘焙温度不宜过高，否则不仅增加耗能，而且造成城市生活垃圾能量的损失。烘焙过程中大量挥发分挥发会带走部分能量，当生物质的烘焙温度大于 300 时，挥发的挥发分含有约 20% 的能量，烘焙过程所需能量较大。烘焙工艺的热效率较低，可以利用其他工艺不易回收的热量，以提高效率，因此在推广应用宜与其他工艺结合应用，利用余热来烘焙垃圾，提高热利用效率和经济性。烘焙后固体产物的 Cl 元素含量降低，避免了在热处理过程中生成二噁英而造成二次污染。因此，我们进一步完善了城市生活垃圾预处理体系，如图 2 所示，该系统集成了压实、分选、破碎和烘焙，从源头分类，有望把各类生活垃圾处理成有价值的资源，使城市生活垃圾减容率与减重率超过 90%。该预处理体系预期能提高城市生活垃圾的处理效率，降低处理成本，回收其中资源性物质，实现

变废为宝，促进能源供应的多元化发展，降低城市生活垃圾对环境的污染。

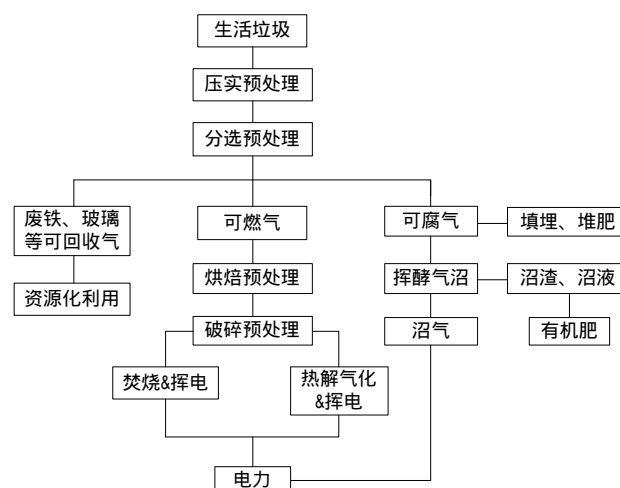


图 2 城市生活垃圾预处理系统

Fig. 2 Municipal solid waste pretreatment system

3 结束语

本文主要讨论了城市生活垃圾可燃组分的烘焙预处理。烘焙预处理技术目前主要应用于生物质，在城市生活垃圾中的应用研究相对较少，本文通过阐述烘焙对生物质特性的影响，分析并展望了烘焙在城市生活垃圾处理中的应用前景。

参考文献：

- [1] MAHMOOD K, BATOOL S A, CHAUDHRY M N. Studying bio-thermal effects at and around MSW dumps using satellite remote sensing and GIS[J]. Waste Management, 2016, 55: 118-128. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.04.020.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴(2012)[J]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [3] WILSON D C, RODIC L, SCHEINBERG A, et al. Comparative analysis of solid waste management in 20 cities[J]. Waste management & research, 2012, 30(3): 237-254. DOI: 10.1177/0734242X12437569.
- [4] KRULJAC S. Public-private partnerships in solid waste management: sustainable development strategies for Brazil[J]. Bulletin of Latin American research, 2012, 31(2): 222-236. DOI: 10.1111/j.1470-9856.2011.00659.x.
- [5] 伊晓路, 孙立, 郭东彦, 等. 生物质秸秆预处理技术[J]. 可再生能源, 2005(2): 31-33. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2005.02.010.
- [6] ZHOU H, MENG A H, LONG Y Q, 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. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.024.
- [7] 江洋, 张会岩, 邵珊珊, 等. 烘焙预处理对生物质热解的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(3): 229-235. DOI: 10.11715/rskxjs.R201503038.
- [8] BERGMAN P C A, BOERSMA A R, ZWART R W R, et al. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations "BIOCOAL"[R]. Report No. ECN-C-05-013. Petten, Netherlands: Energy Centre of Netherlands, 2005.
- [9] CHEN Q, ZHOU J S, LIU B J, et al. Influence of torrefaction pretreatment on biomass gasification technology[J]. Chinese science bulletin, 2011, 56(14): 1449-1456. DOI: 10.1007/s11434-010-4292-z.
- [10] 赵辉, 周劲松, 曹小伟, 等. 生物质烘焙预处理对气流床气化的影响[J]. 太阳能学报, 2008, 29(12): 1578-1586.
- [11] ARIAS B, PEVIDA C, FERMOSE J, et al. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass[J]. Fuel processing technology, 2008, 89(2): 169-175. DOI: 10.1016/j.fuproc.2007.09.002.
- [12] CHEN W H, KUO P C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry[J]. Energy, 2010, 35(6): 2580-2586. DOI: 10.1016/j.energy.2010.02.054.
- [13] PHANPHANICH M, MANI S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass[J]. Bioresource technology, 2011, 102(2): 1246-1253. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.028.
- [14] PARK W C, ATREYA A, BAUM H R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis[J]. Combustion and flame, 2010, 157(3): 481-494. DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.10.006.
- [15] MANI S, DAS K C, KASTNER J. Development of biomass torrefaction technology to produce biocoal for electricity production[R]. FY2009 Final Project Report-Phase I, TIP-Forest Resources & Products Research Project, Atlanta, GA, 2009.
- [16] ROUSSET P, DAVRIEUX F, MACEDO L, et al. Characterisation of the torrefaction of beech wood using NIRS: combined effects of temperature and duration[J]. Biomass and bioenergy, 2011, 35(3): 1219-1226. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.12.012.
- [17] HAMILTON J T G, MCROBERTS W C, KEPPLER F, et al. Chloride methylation by plant pectin: an efficient environmentally significant process[J]. Science, 2003, 301(5630): 206-209. DOI: 10.1126/science.1085036.
- [18] RAHIM M U, GAO X P, WU H W. Determination of chlorine in solid fuels using an improved Eschka method[J]. Fuel, 2014, 129: 314-317. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.03.070.
- [19] RAHIM M U, GAO X P, WU H W. A method for the quantification of chlorine in low-rank solid fuels[J]. Energy & fuels, 2013, 27(11): 6992-6999. DOI: 10.1021/ef401080x.
- [20] BJÖRKMANN E, STRÖMBERG B. Release of chlorine from biomass at pyrolysis and gasification conditions[J]. Energy & fuels, 1997, 11(5): 1026-1032. DOI: 10.1021/ef970031o.
- [21] JENSEN P A, FRANSEN F J, DAM-JOHANSEN K, et al. Experimental investigation of the transformation and release to gas phase of potassium and chlorine during straw pyrolysis[J]. Energy & fuels, 2000, 14(6): 1280-1285. DOI: 10.1021/ef000104v.
- [22] PRINS M J. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2005.
- [23] PRINS M J, PTASINSKI K J, JANSSEN F J J G. Torrefaction of wood: part 2. Analysis of products[J]. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2006, 77(1): 35-40. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.01.001.
- [24] PENTANANUNT R, RAHMAN A N M M, BHATTACHARYA S C. Upgrading of biomass by means of torrefaction[J]. Energy, 1990, 15(12): 1175-1179. DOI: 10.1016/0360-5442(90)90109-F.
- [25] PRINS M J, PTASINSKI K J, JANSSEN F J J G. Torrefaction of wood: part 1. Weight loss kinetics[J]. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2006, 77(1): 28-34. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.01.002.
- [26] 朱波, 王贤华, 陈应泉, 等. 农业秸秆烘焙特性实验[J]. 化工进展, 2010, 29(S): 120-125.
- [27] BRIDGEMAN T G, JONES J M, SHIELD I, et al. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties[J]. Fuel, 2008, 87(6): 844-856. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.05.041.
- [28] PRINS M J, PTASINSKI K J, JANSSEN F J J G. More efficient biomass gasification via torrefaction[J]. Energy, 2006, 31(15): 3458-3470. DOI: 10.1016/j.energy.2006.03.008.
- [29] PARK S W, JANG C H, BAEK K R, et al. Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: evaluation of fuel characteristics of the products[J]. Energy, 2012, 45(1): 676-685. DOI: 10.1016/j.energy.2012.07.024.
- [30] MUNDIKE J, COLLARD F X, GÖRGENS J F. Torrefaction of invasive alien plants: influence of heating rate and other conversion parameters on mass yield and higher heating value[J]. Bioresource technology, 2016, 209: 90-99. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.02.082.
- [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. DOI: 10.1016/j.jaap.2016.03.002.
- [32] CHEN D Y, ZHENG Z C, FU K X, et al. Torrefaction of biomass stalk and its effect on the yield and quality of pyrolysis products[J]. Fuel, 2015, 159: 27-32. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.06.078.
- [33] COUHERT C, SALVADOR S, COMMANDRÉ J M. Impact of torrefaction on syngas production from wood[J]. Fuel, 2009, 88(11): 2286-2290. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.05.003.
- [34] 朱波, 陈汉平, 杨海平, 等. 烘焙对农业秸秆燃烧特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(23): 115-120.
- [35] POUDEL J, OHM T I, OH S C. A study on torrefaction of food waste[J]. Fuel, 2015, 140: 275-281. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.09.120.
- [36] YUAN H R, WANG Y Z, KOBAYASHI N, et al. Study of fuel properties of torrefied municipal solid waste[J]. Energy & fuels, 2015, 29(8): 4976-4980. DOI: 10.1021/ef502277u.

作者简介：

杨 秋 (1993-), 男, 硕士研究生, 从事可燃固废热转化研究。

顾 菁 (1982-), 女, 博士, 副研究员, 从事可燃固废研究。