

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022033109

张洁涵, 康国俊, 宋杨, 等. 焚烧技术在城乡生活垃圾处理中的应用现状与进展[J]. 环境化学, 2023, 42(9): 2978-2992.

ZHANG Jiehan, KANG Guojun, SONG Yang, et al. Application status and progress of incineration technology for treatment of municipal and rural solid waste[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (9): 2978-2992.

焚烧技术在城乡生活垃圾处理中的应用现状与进展*

张洁涵¹ 康国俊³ 宋杨⁴ 李长明² 杨娟^{1**}

(1. 南京赤博环保科技有限公司, 南京, 210044; 2. 北京工商大学生态环境学院, 北京, 100048; 3. 中国矿业大学, 徐州, 221000; 4. 山东建筑大学, 济南, 250101)

摘要 我国城乡经济高速发展, 伴随的是生活垃圾产量的激增, 严重危害生活环境. 因此, 生活垃圾的有效处理已成为我国城乡建设持续发展的重要问题. 焚烧技术由于具有缩小体积、消毒杀菌、能量回收等优点, 在生活垃圾的处理领域取得了诸多进展, 目前已逐步取代垃圾填埋方式, 占据我国生活垃圾处理的主要市场. 本文从我国城乡生活垃圾的产生和处理方式入手, 系统地综述了我国各地区生活垃圾排放特征和焚烧技术的应用现状, 对比了城乡生活垃圾焚烧炉型的差异和焚烧发电技术的应用进展. 同时, 针对焚烧技术存在的问题, 提出有效的解决办法, 并对焚烧技术的未来发展趋势进行展望.

关键词 城乡生活垃圾, 焚烧技术, 垃圾处理现状, 焚烧发电.

Application status and progress of incineration technology for treatment of municipal and rural solid waste

ZHANG Jiehan¹ KANG Guojun³ SONG Yang⁴ LI Changming² YANG Juan^{1**}

(1. Nanjing Chibo Environmental Technology Co., LTD., Nanjing, 210044, China; 2. School of Ecology and Environment, Beijing Technology and Business University, Beijing, 100048, China; 3. China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221000, China; 4. Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101, China)

Abstract The rapid economic development of municipal and rural areas in China is accompanied by a surge in solid waste production, which seriously endangers the living environment. Therefore, the effective disposal of solid waste has become an important aspect for the sustainable development of municipal and rural areas in China. Incineration technology has made great progress in the field of solid waste treatment due to its advantages of volume reduction, disinfection and energy recovery, etc. It has gradually replaced the landfill technology, and occupied the main market of solid waste treatment in China. This paper systematically reviews the characteristics of solid waste emission, and analysis the current application of incineration technology in various regions of China from the generation and treatment of municipal and rural solid waste. In addition, the differences of incinerator between municipal and rural domestic waste are compared, and the progress of incineration power generation is also summarized. At the same time, the effective solutions are proposed aimed at the existing problems of incineration technology, and the future development trend of incineration technology is proposed.

2022年3月31日收稿(Received: March 31, 2022).

* 政府间国际科技创新合作“重点专项(2022YFE0105800)资助.

Supported by the International Science and Technology Cooperation Program of China (2022YFE0105800).

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: 18701658608@163.com

Keywords municipal and rural solid waste, incineration technology, current status of waste disposal, incineration power generation.

近年来,我国城乡建设不断加快,与经济发展和生活水平提高伴随而来的是生活垃圾产量激增,截至2020年,我国城乡生活垃圾年产量超过两亿吨,同比增长11%以上^[1],生活垃圾的处理迫在眉睫。2021年作为“十四五”计划的开局之年,根据2021年国家发改委颁布的《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》^[2],对城镇生活垃圾的处理提出了更加严格的要求,同时明确了生活垃圾的各类处理方式的发展路线,城乡生活垃圾的处理成为促进我国城乡更好更快发展的关键。

我国生活垃圾常用的处理方式主要有填埋、焚烧和堆肥,由于生活垃圾种类日益复杂、地区差异性较大,城乡生活垃圾处理方式需要因地制宜。填埋是国内目前主要的垃圾处理方式,但由于该方法需要占用大量土地,在经济发达、人口众多的地区使用和推广受限,生活垃圾的主要处理技术逐步向其他方式转移。焚烧技术适用于绝大多数生活垃圾,尤其是对于木竹类、纺织类等易燃物处理效率更高,且无害化程度可达90%以上^[3-4],是一种有前景的生活垃圾处理方式。此外,国家政策也逐渐向焚烧技术转移,尤其是以填埋为主的西北地区^[5],因此,我国未来将形成以焚烧技术为主,其他处理方式协同多元化发展的产业结构。此外,生活垃圾焚烧有利于热能回收与发电,是一种有效的资源化手段,根据数据统计,平均每吨垃圾焚烧后发电量250—350 kW·h,有效实现CO₂的减排^[6-8],是我国“碳中和”愿景下的一种有前景的生活垃圾处理方法。

我国城乡规划与发展有较大差异,城市生活垃圾的产生量较大、对焚烧设备处理量的需求较高,但由于乡镇居民人口相对分散、区域间生活垃圾的清运和收集比较困难,焚烧技术可以满足乡镇垃圾高效处理的需求,但目前市面上稳定运行的焚烧装置的处理量相对较大,适用于乡镇生活垃圾焚烧处理的炉型仍在中试阶段^[6],总结综述相关研究结果对未来装置放大和工业化应用具有重要意义。此外,焚烧技术在生活垃圾处理上的应用仍然受限,存在垃圾分类不完善带来的入炉垃圾热值较低、燃烧不完全、垃圾入炉前堆放产生的渗滤液等环境污染问题。目前关于城乡生活垃圾的具体统计数据相对较少,针对垃圾焚烧技术地区差异性的总结和在十四五规划下焚烧技术发展趋势的报道较少,在国家针对城乡生活垃圾的处理日益关注的现状下,城乡生活垃圾的焚烧技术值得继续深入探讨。

本文系统地综述了我国城乡生活垃圾的产生和几种处理方式的比较,同时对我国不同区域城乡的生活垃圾焚烧现状和焚烧发电技术进行总结,分析生活垃圾焚烧技术存在的问题,并对生活垃圾焚烧技术的发展趋势进行展望,为城乡生活垃圾的焚烧处理提供一定的支撑。

1 中国城乡生活垃圾产生与处理现状(Current situation of domestic garbage generation and disposal in municipal and rural areas of China)

1.1 城乡生活垃圾的产量与分类

城乡生活垃圾是指日常生活中或为日常生活提供服务的活动中产生的固体废弃物,截至2020年,我国城市数量679个,县、乡等合计2198个,生活垃圾产生量2.4亿吨^[9],2013—2020年我国生活垃圾年产生量如图1(a)所示^[9],生活垃圾年产量逐渐递增,增幅在4%—10%之间,随着经济发展和城乡建设加快,未来生活垃圾产量将继续增加,采用高效无害的处理方式是我国未来建设发展的重点,此外,生活垃圾的性质与种类也制约着处理方式的选择。结合图1(b),我国地域辽阔,南北气候差异大、东西经济发展不平衡,生活垃圾种类受经济水平、居民生活习惯和燃料结构的影响,全国各地区的垃圾种类有较大差异,主要可分为10类^[10],包括金属类、玻璃类、砖瓦类、灰土类、木竹类、纺织类、橡塑类、纸类、厨余类和其他。

厨余垃圾是生活垃圾的主要成分,除东北地区外,厨余垃圾的排放量占总排放量的40%以上,由于其含水量高、热值低,是生活垃圾处理的重点和难点。厨余垃圾中可生物降解组分较多,厌氧消化时碳排放量较低^[11-12],有利于“碳中和”的发展,但对比填埋和好氧堆肥,运行成本较高。张玉冬等^[13]通过好氧堆肥实验研究了通风方式对厨余垃圾腐熟程度的影响,发现较小通风量、连续通风的方式有利于堆肥腐熟,但能量利用率低。而李欢等^[14]综合比较了混合焚烧、厌氧消化、好氧堆肥和饲料化4种厨余

垃圾的处理方式,混合焚烧是全周期费用最低且能源回收率最高的处理方法,但对入炉垃圾的种类要求较高,因此垃圾分类是制约厨余垃圾焚烧的主要因素.截至2020年底,我国实行垃圾分类的46个重点城市均可以做到厨余垃圾和其余生活垃圾和工业垃圾的分类回收,为厨余垃圾的焚烧处理提供了可能.同时,蹇瑞欢等^[15]通过山东莱芜市的实例说明生活垃圾与厨余垃圾的共燃可以提高处理效率,是一种有效的处理方法.

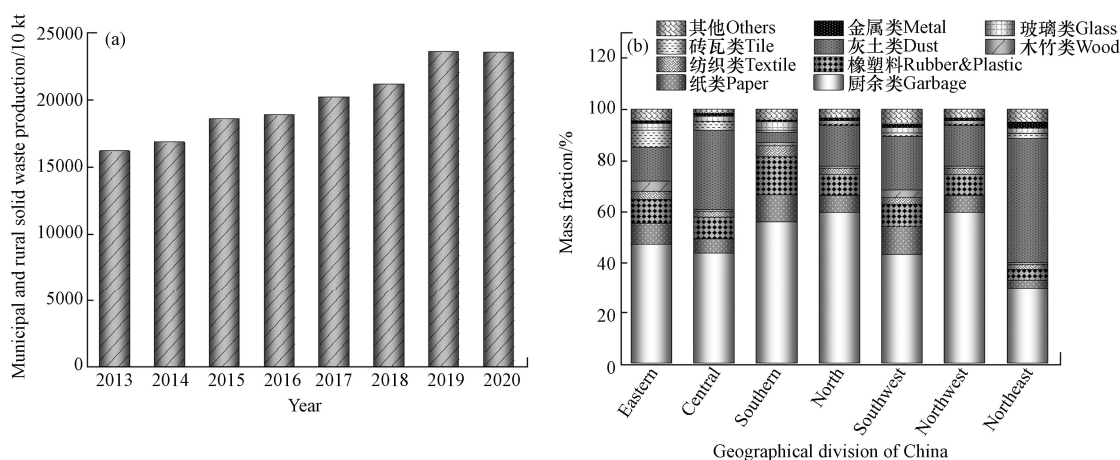


图1 (a)2013—2020年全国城乡生活垃圾年产量和(b)全国各地区生活垃圾的分类
(数据来源于2013—2020年全国生态环境统计公报)

Fig.1 (a) Annual production of municipal and rural solid waste in China from 2013 to 2020 and (b) Classification of solid waste in geographical division of China
(Data from National Ecological And Environmental Statistics Bulletin from 2013 to 2019)

玻璃、金属类生活垃圾可直接回收再利用,木竹、纺织、纸类、橡塑类生活垃圾可以采用填埋和焚烧的方式处理,但由于填埋法需占用土地,在人口众多、垃圾产量较大的发达地区的使用受限^[16],而焚烧技术具有无害化、减量化、资源化的优势^[17-18].灰土类和砖瓦类属于无机物,北方冬季通常采用煤炭供暖,灰土类物质的排放量较大.综上所述,我国各地区城乡生活垃圾种类有明显的差异性,根据组成的不同处理方式也有差异,实际处理过程要根据生活垃圾的特点进行.

1.2 城乡生活垃圾的处理现状

结合我国目前的国情,城乡生活垃圾的处理方法主要有3种:填埋、焚烧和堆肥^[19-21].2013—2020年全国生活垃圾处理厂的数量如图2(a)所示,填埋厂的数量轻微增长,2016年后趋于稳定;焚烧厂的数量由2013年的166座迅速增长到2020年的652座;包括堆肥厂在内的其他垃圾处理厂从2016年以后开始有明显增长,说明垃圾填埋技术进入瓶颈期,以焚烧为主的其他垃圾处理方式快速发展.2006年我国3种垃圾处理技术的处理量占比分别为填埋80%,焚烧16%和堆肥4%^[22],截至2020年,3种技术处理量占比变为填埋45%,焚烧51%,其他处理方式总计4%^[9],进一步说明我国垃圾处理行业经过十余年的发展,焚烧技术逐步成型,在我国生活垃圾处理中占比增长明显.

此外,不同处理方式的无害化处理量随年份的变化如图2(b)所示,2013—2017年填埋技术无害化处理量明显高于焚烧,但填埋存在的占地面积大、使用年限短、污染地下水和土壤及有机质浪费等问题导致其无害化处理量增长平缓.2018年以前,我国的生活垃圾分类标准不完善,生活垃圾与工业废弃物等的混掺导致燃烧效率低,焚烧技术的应用和普及困难^[23],近年来由于垃圾填埋场容量不足、土地供应紧张等问题不断出现,国家大力支持生活垃圾焚烧技术的发展,且由于对烟气排放和燃烧过程污染物控制的日益严格,焚烧技术无害化处理量年年攀升,成为我国生活垃圾无害化处理的主要方式.

根据各省市第二次全国污染源普查公报^[24],截至2017年12月31日,不同省市3种生活垃圾处理方式的处理量如图3所示.生活垃圾的处理方式具有明显的地区差异,在经济发达的地区,比如北京、江苏、浙江等地,焚烧技术的处理量高于填埋法,处理方式逐渐向焚烧处理转型,正在形成多元化发展的格局.然而西北地区焚烧技术不发达,其他处理技术的应用也较为受限,生活垃圾的处理仍然依赖于

填埋. 王月等^[25]以兰州市为例, 3种生活垃圾处理方式对环境的影响潜值为卫生填埋>焚烧>堆肥, 出于环境友好策略, 西北地区的生活垃圾处理方式也将向焚烧、堆肥等方式转移.

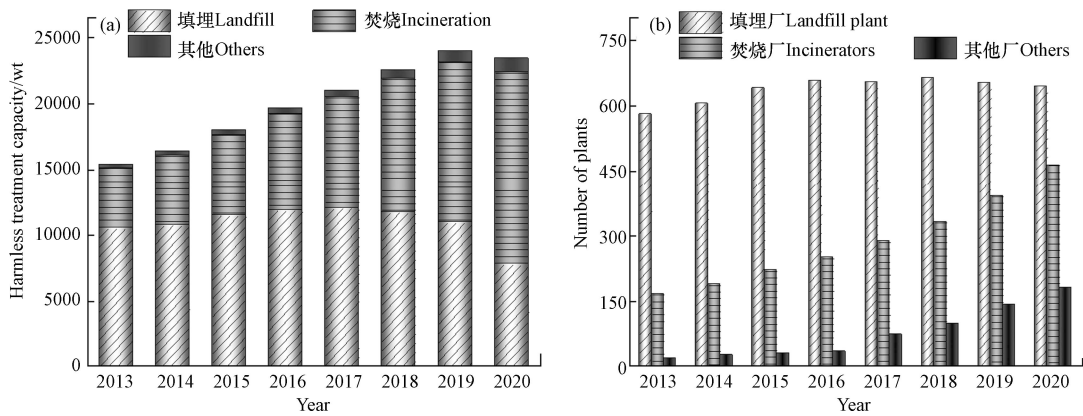


图2 (a) 2013—2020年全国不同生活垃圾处理方式的处理厂数量和(b)无害化处理量
(数据来源于2013—2020年中国统计年鉴)

Fig.2 (a) Number of solid waste treatment plants and (b) harmless treatment volume of different solid waste treatment methods in China from 2013 to 2020 (Data from China Statistical Yearbook 2013—2020)

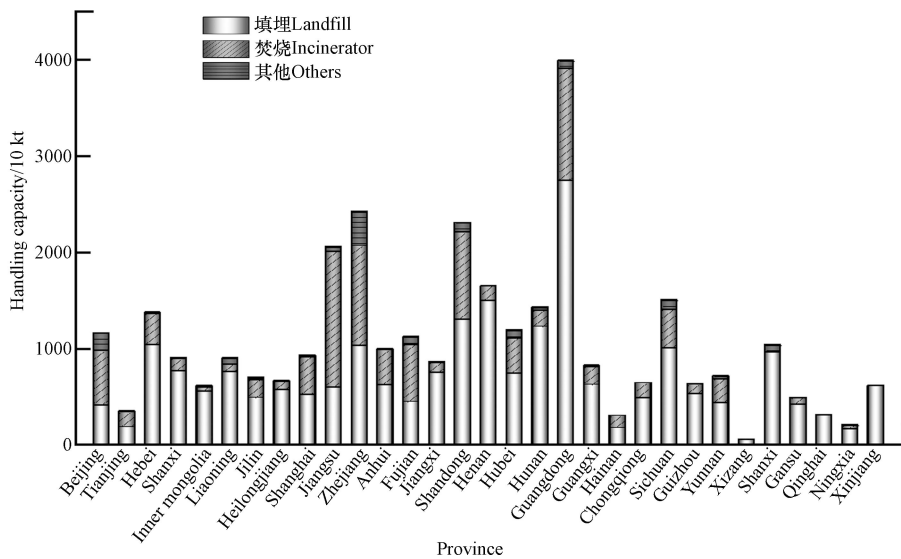


图3 2019年不同生活垃圾的处理量在各省市的分布(数据来源于第二次全国污染源普查公报)

Fig.3 Distribution of different solid waste treatment amounts in various provinces in 2019 (Data from the Bulletin of the Second National Survey of Pollution Sources)

此外, 结合 LCA(生命周期评价方法)与 IPCC 2006(政府间气候变化专门委员会制定的 2006 国家温室气体排放清单指南)方法计算不同生活垃圾处理方式的碳排放量, 填埋的碳排放量是焚烧的 6 倍以上^[26], 同时配合二氧化碳捕集和封存(CCS, carbon capture and storage)技术, 未来有望实现垃圾焚烧的“负碳”排放^[27], 因此焚烧是更加符合我国“碳中和”愿景的垃圾处理技术. 虽然目前填埋仍是我国西北、东北等经济不太发达的省市的主要生活垃圾处理方式, 但出于环境友好和清洁能源发展考虑, 这些省市也将充分发展生活垃圾的焚烧技术. 因此生活垃圾的焚烧技术是一种适合大部分垃圾类型、适应大部分省市的具有前景的无害化处理技术.

2 垃圾焚烧技术在我国的应用现状 (Application status of waste incineration technology in China)

焚烧技术在我国生活垃圾处理的应用可以追溯到 20 世纪 80 年代, 受经济、技术、垃圾性质等因素的影响, 焚烧技术在我国发展的起步较晚, 但发展非常迅速^[28], 从国家经济和社会发展规划来看, “八五”期间我国将城市生活垃圾焚烧处理技术列为国家科技攻关项目; “十一五”期间鼓励以焚烧

为主的垃圾处理方式;“十二五”期间要求全国城乡生活垃圾焚烧处理设施能力达到无害化处理总能力的 35% 以上;“十三五”规划要求设市城市生活垃圾焚烧处理能力占无害化处理总能力的 50% 以上,其中东部地区达到 60%;根据最新印发的“十四五”内容,到 2025 年底,预计全国城乡生活垃圾焚烧处理能力达到每日 80 万吨左右,城市生活垃圾焚烧处理能力占比 65% 左右^[20].因此我国垃圾焚烧技术发展的 20 年间已逐渐趋于完善,无害化能力日益提高,未来还将向更高要求发展.

2.1 城市生活垃圾焚烧处理现状

目前生活垃圾焚烧处理主要包括炉排炉技术,循环流化床技术和回转窑技术 3 种^[29],城市生活垃圾由于产量大,城市垃圾收运较集中,因此常用这 3 种处理方式,主要技术特点如表 1 所示^[30-32].

表 1 常规生活垃圾焚烧处理技术比较

Table 1 Comparison of conventional domestic waste incineration treatment technologies

垃圾焚烧技术 Waste incineration technology	炉排炉技术 Grate furnace technology	循环流化床技术 Circulating fluidized bed technology	回转窑技术 Rotary kiln technology
工艺简介	垃圾位于炉排上方,炉排通过运动带动垃圾位移,形成预热段,燃烧段和燃尽段	一般以石英砂作为流化床料,气体带动床层床料和垃圾,速度增大时物料变为流化状态	垃圾在回转窑内完成水分蒸发、挥发分析出、着火及燃烧的过程,灰渣由二燃室底部排出,烟气进入二燃室再燃
优点	燃烧稳定,飞灰量较少(约为垃圾量的 3%—5%),炉渣热灼减率低,技术相对成熟,运行时间长	燃烧效率在 95%—99%,炉温可控制在 850—950 °C,点火启动成本较低,对不均质垃圾适应性好,可以实现渗滤液伴烧,有利于环境安全	适应性广,操作可靠,燃烧完全,运行平稳,设备费用低
缺点	点火启动耗费较大	飞灰量较大(约为垃圾量的 10%—15%),CO 排放超标,需要控制物料的粒径,处理量较小	对于热值较低、含水量较高的生活垃圾焚烧效率低
单台处理能力	800—1200 t·d ⁻¹	600 t·d ⁻¹	800 t·d ⁻¹
运行时间	>8000 h	6000 h	6000 h

根据表 1 可知,3 种垃圾焚烧方式单台处理量均在 600 t·d⁻¹ 以上,适合城市垃圾的有效处理.根据垃圾焚烧厂技术应用情况统计,危险废弃物和工业废弃物的处理一般采用回转窑,而采用回转窑处置生活垃圾时,由于炉内温度较低,焚烧产生的飞灰在低温区易形成氯化物^[33],为避免这种现象,要保证炉内有较高的燃烧温度,能耗较大,因此该炉型在生活垃圾焚烧方面的应用较少^[34].机械炉排炉和循环流化床占据我国生活垃圾焚烧的主要市场,虽然循环流化床焚烧生活垃圾对于不均质的生活垃圾的适应性好,燃烧效率高,但是其存在对入炉垃圾粒径和含水率要求较严格、CO 排放量不能稳定达标、飞灰重金属含量高等问题^[35],为解决这些问题需要从锅炉运行方式和运行周期上进行调整,投入的经济成本较高^[36],不适合大范围推广.此外,针对我国城市垃圾排放量较大的现状,机械炉排炉的合计处理能力可达到 572000 t·d⁻¹,相较于循环流化床的 66000 t·d⁻¹,炉排炉焚烧技术更具有处理量的优势^[31].从我国各省市两种炉型的实际分布情况也可以看出(图 4),全国共计焚烧炉 1329 台,山东、江苏和广东三个省份的焚烧炉总量最多且处理量最大,主要使用的炉型是炉排炉,循环流化床主要应用地区包括东北、华北、华东等地,但其数量也相对较少.炉排炉燃烧过程简单、经济,存在的问题可以通过改变炉排片的性能加以改进^[37-38],是各省市生活垃圾焚烧市场的主流炉型,也是我国生活垃圾焚烧的主要发展趋势.

2.2 乡镇生活垃圾焚烧处理现状

我国乡镇数量较多,生活垃圾的产生较分散,出于垃圾清运的成本考虑,乡镇垃圾的集中处理比较困难^[39-41],此外,在党的十九大报告中关于“农村要加强固体废弃物和垃圾处置”的政策指导下,实现乡镇垃圾的高效处置迫在眉睫^[42].根据图 5 可知,2013—2020 年间乡镇生活垃圾产生量变化不大,基本保持在年产量 6750 万 t 左右,但无害化处理能力不断增大,到 2020 年无害化处理率达到 98% 以上,这也得益于焚烧技术的飞速发展.但是,城市生活垃圾焚烧炉的处理量一般在 600 t·d⁻¹ 以上,应用在日均产量较低的乡镇垃圾上无法保证经济环保和充分高效的燃烧,因此开发适用于乡镇生活垃圾的小型焚烧炉成为研究重点^[43].此外,乡镇生活垃圾的产量较小,平均产量约为 124 t·d⁻¹、且热值较低、成分相对简单,炉排炉结构简单、造价低廉、技术成熟等优势适合小量垃圾的焚烧,但炉内燃烧条件的控制和监管以及炉排炉在乡镇生活垃圾实际燃烧的适应性仍是乡镇生活垃圾焚烧技术开发的核心与重点.

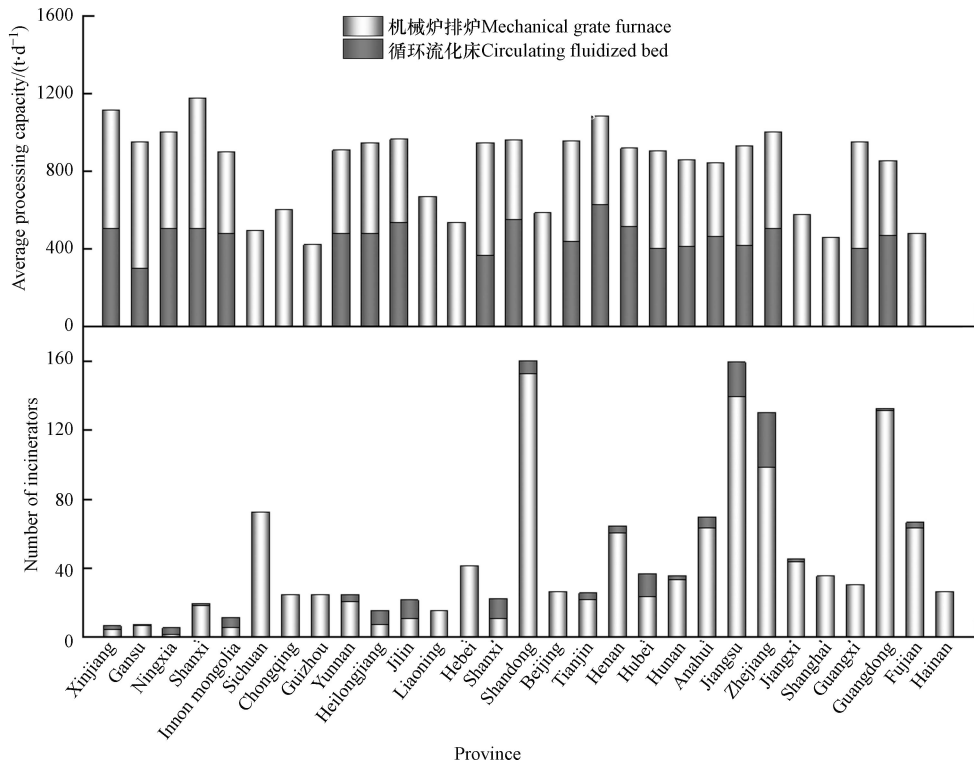


图 4 2020 年全国各省份焚烧炉数量及处理能力
(数据来源于生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据公开平台)

Fig.4 Number and treatment capacity of incinerators in various provinces of China in 2020
(Data from automatic monitoring data public platform of MSW Incineration Power plant)

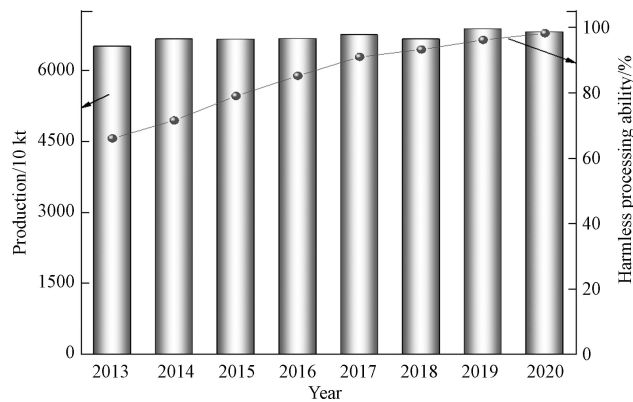


图 5 2013—2020 年全国乡镇生活垃圾产生量和无害化处理率
(数据来源于 2013—2019 年中国统计年鉴)

Fig.5 Production and harmless processing ability of rural solid waste of China from 2013 to 2020
(Data from China Statistical Yearbook 2013-2019)

针对乡镇生活垃圾的焚烧技术,国内学者展开了广泛讨论,核心是开发适合乡镇生活垃圾燃烧的中小型焚烧装置,饶国燃等^[44]通过计算确定炉膛高度和炉底尺寸,为 8 t·d⁻¹ 的垃圾焚烧炉的设计提供基础数据,证实了小焚烧量的炉排炉型技术的开发具有可行性.但小量级焚烧炉仍存在焚烧效率低的问题,刘毓彬等^[45]综合了炉排炉和移动床两种炉型技术,对炉膛结构进行改造,设计 12 t·d⁻¹ 的 L 型炉拱层燃炉,可以实现小量级乡镇生活垃圾的稳定燃烧.此外,50 t·d⁻¹ 的小型旋转炉排炉通过分段燃烧方式,处理能力达到 70% 以上,能量转化率在 75% 左右,也是乡镇生活垃圾中小型焚烧炉的发展方向^[46].因此,在确定机械炉排炉可用于小量级乡镇生活垃圾焚烧处理的基础上,通过改进炉膛设计和炉排结构,开发稳定燃烧、处理量 50—100 t·d⁻¹ 左右的小型焚烧炉,是我国乡镇生活垃圾处理的重点,也符合十四五计划中对小型焚烧设施试点开发的具体要求.

2.3 生活垃圾焚烧发电技术

生活垃圾焚烧发电技术是符合循环利用和清洁生产的方式,既保证了垃圾的减量化和无害化,又有利于能源再利用,具有广阔的应用前景^[47-48]。根据中国产业发展促进会生物质能产业分会的报告^[49],截至2020年,生活垃圾焚烧发电量占生物质发电总量的50%以上,且占比逐年提高^[50],有利于焚烧过程的能源利用,未来10—15年是生活垃圾焚烧发电技术发展的大好时机^[51,52]。我国7个地理分区的垃圾焚烧发电量占比情况如图6所示,其中华东、华南、西南地区的生活垃圾焚烧发电量居国内前三位,这与这些地区的焚烧炉数量和经济发达程度有密切关系,根据国家政策和规划,我国将大力发展偏远、经济不发达地区的垃圾焚烧发电技术,生活垃圾焚烧发电技术将在西北、东北等地区有很好的应用前景^[53]。根据《2021年生物质发电项目建设工作方案》^[54],2021年中央将配置垃圾焚烧发电项目2亿元,项目基建费用有地区差异,东北部和西部地区中央支持资金60%,中部地区40%,东部地区20%,进一步说明未来垃圾焚烧发电重心将向东北部和西部转移,达到国内平衡分布、均衡发展的新态势^[55]。

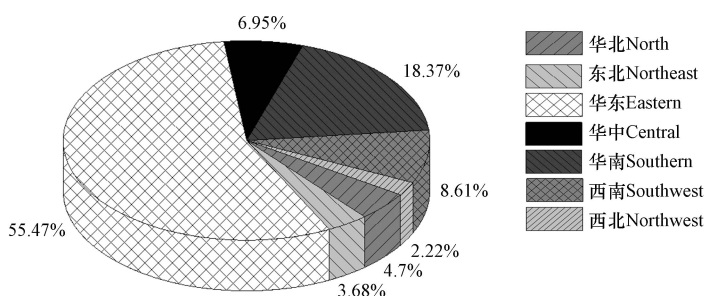


图6 2020年全国各地区生活垃圾焚烧发电量占比

(数据来源于中国产业发展促进会生物质能产业分会报告)

Fig.6 Proportion of domestic waste incineration power generation by region in 2020

(Data from biomass Energy Industry Branch report of China Industrial Development Promotion Association)

此外,3种焚烧炉在用于垃圾焚烧发电时具有各自的特点。循环流化床垃圾焚烧炉发电时,投资成本较低,但对入炉垃圾的要求较高,投入体积和粒径不能过大,否则易导致燃烧不充分和二次污染的问题。回转窑由于占地面积大、热效率较低,在生活垃圾焚烧发电应用较为受限^[56]。生活垃圾炉排炉焚烧发电时,对垃圾含水率要求不高,投资成本适中,且国产化程度高,是适应性广,持续发展的垃圾焚烧发电技术^[57]。近年来由于我国垃圾分类措施的完善,炉排炉的生活垃圾焚烧技术更有利于提高焚烧发电效率和无害化处理率。综上所述,炉排炉是适合我国城乡垃圾高效处理且有利于能源转化的有效处理方式。

3 生活垃圾焚烧存在的问题及解决方案(Problems and solutions of domestic waste incineration)

我国生活垃圾焚烧处理技术发展迅速,无害化处理率日益提高,焚烧已经发展成为一种应用广泛、前景广阔的生活垃圾处理方法之一,从单纯的垃圾处理发展为集焚烧、发电、供热于一体的系统性处置技术,但是目前的焚烧技术仍存在诸多问题,主要包括:(1)生活垃圾成分复杂,含水率较高,发热量较低,普通燃烧方式效率较低、二次污染严重。(2)焚烧处理无法“即产即烧”,焚烧前堆放时易造成渗滤液问题,污染土壤与地下水。

3.1 生活垃圾充分燃烧解决方案

生活垃圾的含水率较高、热值较低且成分复杂,传统的机械炉排炉焚烧技术的生活垃圾平均处理效率在75%以上,但随着城乡经济建设的加快,需要提高生活垃圾焚烧炉的处理效率,实现生活垃圾的高效充分燃烧以满足目前发展的需要^[58-59]。山东光大自主研发的顺推式机械炉排炉增加了固定炉排、滑动炉排和翻动炉排三种设计,加强搅动的同时有利于通风,更适应我国生活垃圾热值低、水分高的特点,可以实现垃圾的充分燃烧^[60]。河南驻马店市一垃圾焚烧厂采用立式旋转热解气化炉联合二燃室的设计工艺,通过旋转式均匀布料和炉排挤压排渣,有利于垃圾的充分燃烧^[61]。重庆市某垃圾焚烧发电项目采用往复式逆推机械炉排炉配套余热锅炉,延长烟气停留时间和热量循环,生活垃圾燃烧效率

增加 40% 以上. 因此, 结合炉型改进和燃烧供风设计, 可以有效提高燃烧效率, 解决入炉垃圾燃烧不充分的问题^[59].

3.2 生活垃圾入炉前堆料渗滤液入炉燃烧

生活垃圾焚烧厂渗滤液主要由垃圾自身水分和发酵水分组成, 产生的渗滤液一般占垃圾焚烧量的 25%—35% (重量比), 部分地区超过 35% 以上^[62]. 按照垃圾焚烧厂产生的渗滤液占垃圾焚烧量的 30%, 对近年全国城市无害化处理生活垃圾渗滤液产生量进行测算, 结果如图 7(a) 所示; 渗滤液处理能力按垃圾焚烧无害化处理能力的 30% 进行测算, 结果如图 7(b) 所示^[63]. 垃圾焚烧的渗滤液产生量和处理能力逐年递增, 随着垃圾焚烧处理量的增大明显增加, 渗滤液产生量同比增长均在 15% 以上, 处理能力同比增长 16%—22%, 渗滤液处理是垃圾焚烧存在的一个重要问题^[64-65].

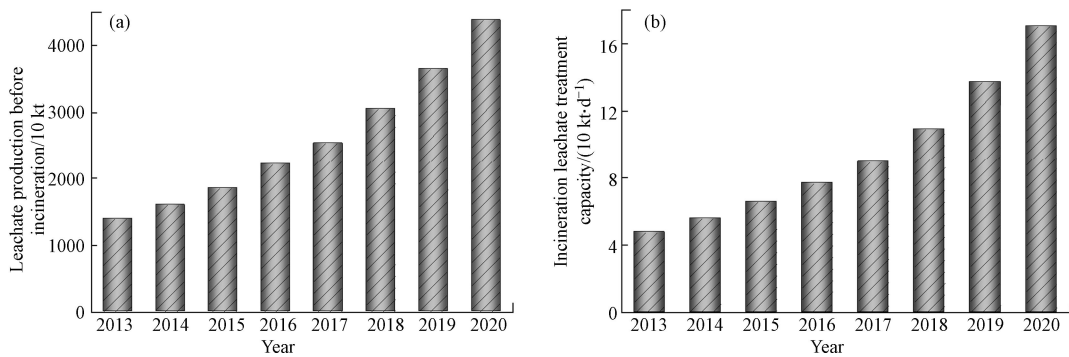


图 7 (a) 2013—2020 年全国生活垃圾焚烧渗滤液产生量与 (b) 处理能力测算

(数据来源于 2013—2020 年中国统计年鉴)

Fig.7 (a) Production of leachate from domestic solid waste incineration in China during 2013—2020 and (b) calculation of treatment capacity

(Data from China Statistical Yearbook 2013—2020)

除了生物处理、物化处理和土壤处理等常用的渗滤液处置技术外, 由于垃圾渗滤液是成分复杂的有机物混合物, 与生活垃圾的共同入炉燃烧是一个可行方案, 在余热回收的基础上可以降低渗滤液的处置成本^[66-67]. 卜银坤^[68]通过渗滤液燃烧过程中烟气焓值的计算认为渗滤液入炉焚烧的技术在理论上可行, 水分是制约渗滤液焚烧效率的主要因素, 若渗滤液以雾化回喷的形式入炉, 焚烧效率将极大提高. 李进等^[69]将渗滤液回收净化后入炉燃烧, 燃烧过程中渗滤液不会影响锅炉功率、效率、排烟温度等参数, 此外, 晁榕珠^[70]利用垃圾渗滤液代替部分氨水进行 SNCR 脱硝实验, 最佳脱硝效率可达 54%, 且脱硝温度范围更广、热量消耗更低, 也是垃圾渗滤液与生活垃圾共同入炉协同处理更有前景的方式.

4 生活垃圾焚烧技术发展趋势 (Development trend of domestic waste incineration technology)

(1) 生活垃圾有效分类基础上的高效焚烧技术

生活垃圾与工业废物、危险废物混烧是造成二次污染和燃烧效率低的重要原因, 生活垃圾分类措施的完善有利于降低二噁英和重金属的排放, 同时提高原料热值、促进燃烧进程^[71-72]. 根据《“十四五”城乡生活垃圾分类和处理设施发展规划》, 未来五年将是我国生活垃圾焚烧技术的黄金发展期, 这着重依赖于垃圾分类的能力, 垃圾分类不但有助于解决焚烧厂垃圾堆料产生渗滤液的问题, 而且更有利于焚烧效率的提高和资源的回收利用^[73-76]. 任中山等^[77]认为, 随着生活垃圾分类措施的完善和推广, 对垃圾焚烧发电产业将会有显著影响, 比如调整现有垃圾焚烧发电工艺以达到高热值原料燃烧的目的, 每吨垃圾提升发电量 160—420 kW·h, 同时大幅度增加经济效益. 针对垃圾分类措施对各地区焚烧行业的影响, 以北京市为例, 垃圾分类后进入焚烧炉的垃圾含水率降低, 热值增加, 但焚烧量减少 20% 左右, 需要协调部分城乡固废共同处置, 该技术不但能保证现有经济效益, 而且有利于综合处理^[78-79], 因此垃圾分类愿景下的焚烧行业将迎来蓬勃发展^[80].

(2) 生活垃圾与其他物料掺烧协同处置技术路线

生活垃圾与煤、生物质、污泥甚至厨余垃圾的掺烧, 可以降低灰渣中重金属毒性以及控制污染气

体排放,是未来生活垃圾协同其他废物处置的一个重要方向^[81-83]。朱浩等^[84]在炉排炉内将生活垃圾与污泥协同处置,综合处理多种废物的基础上不会影响挥发分的析出,同时可以减弱污泥燃烧对炉膛高温区的影响^[85]。臧仁德^[86]通过模拟和实验发现生活垃圾与煤的混烧有利于减少 SO₂ 和 HCl 等酸性气体的排放,对 SO₂ 的去除效果优于 HCl。陆胜勇等^[87]发现,生活垃圾与煤混烧时可以破坏垃圾中的二噁英,有效降低二噁英的排放量。Xing 等^[88]将棉花秸秆与生活垃圾共燃,发现二者共燃有明显的协同作用,可以改善点火与燃尽特性,促进二者的燃烧进程。综上所述,生活垃圾与煤或其他固废的混烧是未来高效化和低害化处理的一个方向^[52]。

(3) 焚烧与热解气化结合技术路线

近年来,生活垃圾焚烧处理技术呈现新的发展态势,焚烧炉与水泥窑、热解气化炉等热转化技术耦合的生活垃圾的处置方式逐渐开始应用^[89-91],该方式符合循环经济的发展要求,在废气、废水减量化的基础上,一定程度上有利于产物的循环利用。目前,在我国西南地区开展了许多生活垃圾热解气化示范工程^[92-93],采用气化+二燃室工艺,生成 CH₄、CO 和 H₂ 等气体燃料、热解油和生物炭,该方法不但可以固定有害金属,还可以生成高值化产品,未来有望成为焚烧技术的补充工艺。

郝彦龙等^[94]介绍了生活垃圾“预处理+热解气化+烧制制砖”一体化工艺路线,可以有效解决 100—500 t·d⁻¹ 的生活垃圾处理问题,产物为可燃气和标砖,此外,燃烧后废渣经除铁和除铝后可作为水泥生料使用。殷仁豪^[95]设计了城市生活垃圾上吸式气化—灰渣熔融—产气均相转化—清洁燃烧的一体化工艺,在充分燃烧的基础上协同控制二噁英和 NO_x 的排放。张思成^[96]则将垃圾焚烧流化床和固定床热解反应器耦合起来,不但可以解决热解反应能量供应问题,而且可以实现热电与化工产品的多联产。此外,中国科学院过程工程研究所自行设计的解耦燃烧炉通过热解与燃烧过程的耦合技术^[97-98],在提高燃烧效率的基础上,利用半焦层对 NO_x 的还原作用降低 NO_x 的排放,与传统立式炉排炉相比,NO_x 减排率在 40% 以上。目前已有的实验数据表明,解耦燃烧在使用煤、稻壳、制革废料作为燃料时均有较好的 NO_x 减排效果^[99],其对生活垃圾低 NO_x 焚烧技术的开发也有一定的前景和参考价值。

5 结语(Conclusion)

本文通过对城乡生活垃圾的特点和处理现状的综述,系统的介绍了我国城市及乡镇的生活垃圾焚烧技术现状与存在的问题,并结合现有研究成果提出可能的解决办法与建议。我国生活垃圾焚烧技术地区差异明显,东部的焚烧技术发展较快、应用较广,西部地区将填埋作为主要的生活垃圾处理方式,通过对比分析多种处理方式现状,认为我国未来将形成以垃圾焚烧技术为主,多元化处理方式为辅的生活垃圾处理趋势。我国城市生活垃圾焚烧技术以炉排炉为主,由于乡镇生活垃圾产生相对分散、产生量较小,焚烧炉型要在炉排炉的基础上对炉排结构进行工艺改造,搭建适合小量级处理量的生活垃圾焚烧炉,此外,生活垃圾焚烧发电可以在一定程度上解决我国能源短缺的问题。但是,我国生活垃圾焚烧技术仍不成熟,存在焚烧效率低、入炉前渗滤液污染等问题,通过改进炉型设计、渗滤液共同入炉燃烧等方案可以有效解决这一问题。未来在十四五规划指导下,我国的垃圾分类措施将进一步加强,与污泥、煤、生物质的协同处置技术快速发展,以热解、气化等热转化技术与燃烧的耦合逐渐应用成为未来生活垃圾处理的主要趋势。

参考文献 (References)

- [1] 2013—2020年全国生态环境统计公报[DB]. 中华人民共和国生态环境部, 2013—2020.
National ecological and environmental statistics bulletin 2013—2020 [DB]. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2013—2020.
- [2] “十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划[R]. 国家发展改革委, 2021.
“The 14th five-year plan” for the development of urban domestic waste separation and treatment facilities [R]. National Development and Reform Commission, 2021.
- [3] 严密,熊祖鸿,李晓东,等. 中美城市生活垃圾焚烧处置现状和发展趋势 [J]. 环境工程, 2014, 32(3): 87-91.
YAN M, XIONG Z H, LI X D, et al. Development trend and present status of municipal solid waste incineration in China and the us [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(3): 87-91 (in Chinese).

- [4] 丁晨曦, 严爱军. 城市生活垃圾热值的特征变量选择方法及预测建模 [J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(8): 874-885.
DING C X, YAN A J. Characteristic variable selection method and predictive modeling for municipal solid waste heat value [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(8): 874-885(in Chinese).
- [5] 关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见 [EB/OL]. 2018.
Opinions on comprehensively strengthening ecological environmental protection and resolutely fighting the battle of pollution prevention and control [EB/OL]. 2018.
- [6] 赵勇. 乡镇生活垃圾收运系统设计剖析 [J]. 中国市政工程, 2019(4): 43-46,115.
ZHAO Y. Design & analysis of township domestic waste collection & transportation system [J]. China Municipal Engineering, 2019(4): 43-46,115(in Chinese).
- [7] 张霞, 黄乐. 城市生活垃圾焚烧处理的环境保护措施 [J]. 环境影响评价, 2021, 43(3): 51-54.
ZHANG X, HUANG L. Measures of environmental protection of domestic solid waste incineration [J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(3): 51-54(in Chinese).
- [8] 李玉焯, 王文波. 生活垃圾焚烧发电项目的节能与碳减排分析 [J]. 有色冶金节能, 2014, 30(3): 37-41.
LI Y Z, WANG W B. An analysis of energy saving and carbon emission reduction in project of power generation from MSW incineration [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2014, 30(3): 37-41(in Chinese).
- [9] 2013-2020年中国统计年鉴 [M]. 国家统计局, 2013-2019.
China Statistical Yearbook 2013-2020 [M]. National Bureau of Statistics, 2013-2020.
- [10] 李丹, 陈冠益, 马文超, 等. 中国村镇生活垃圾特性及处理现状 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4187-4197.
LI D, CHEN G Y, MA W C, et al. Characteristics and treatment status of rural solid waste in China [J]. China Environmental Science, 2018, 38(11): 4187-4197(in Chinese).
- [11] 陈家军, 王浩, 张娜, 等. 厨余垃圾填埋产气过程实验模拟研究 [J]. 中国沼气, 2008, 26(3): 22-25.
CHEN J J, WANG H, ZHANG N, et al. Study on the generation process of landfill gas from kitchen waste by laboratory simulation [J]. China Biogas, 2008, 26(3): 22-25(in Chinese).
- [12] EDWARDS J, OTHMAN M, CROSSIN E, et al. Life cycle assessment to compare the environmental impact of seven contemporary food waste management systems [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 156-173.
- [13] 张玉冬, 张红玉, 顾军, 等. 通风方式对厨余垃圾堆肥腐熟度的影响 [J]. 环境工程, 2015, 33(S1): 619-622.
ZHANG Y D, ZHANG H Y, GU J, et al. Effects of aeration modes on the maturity during kitchen waste composting [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(Sup 1): 619-622(in Chinese).
- [14] 李欢, 周颖君, 刘建国, 等. 我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略 [J]. *环境工程学报*, 2021, 15(7): 2398-2408.
LI H, ZHOU Y J, LIU J G, et al. Comprehensive comparison and optimal strategies of food waste treatment modes [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(7): 2398-2408(in Chinese).
- [15] 蹇瑞欢, 吴剑, 宋薇. 生活垃圾焚烧与餐厨垃圾处理协同处置的分析研究 [J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(2): 26-28.
JIAN R H, WU J, SONG W. Analysis of cooperative disposal of municipal solid waste incineration and food waste treatment [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2018, 26(2): 26-28(in Chinese).
- [16] 袁文祥, 陈善平, 邵俊, 等. 我国垃圾填埋场现状、问题及发展对策 [J]. *环境卫生工程*, 2016, 24(5): 8-11.
YUAN W X, CHEN S P, TAI J, et al. Present situation, problems and development countermeasures of landfill in China [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2016, 24(5): 8-11(in Chinese).
- [17] 刘全美, 常加富, 张兆玲, 等. 生活垃圾热解气化燃烧试验研究 [J]. 化工管理, 2021(16): 96-98.
LIU Q M, CHANG J F, ZHANG Z L, et al. Experimental study on pyrolysis gasification and combustion of domestic wastes [J]. Chemical Enterprise Management, 2021(16): 96-98(in Chinese).
- [18] 袁寅强, 杨旭. 我国生活垃圾焚烧发电技术现状及展望 [J]. *节能技术*, 2021, 39(3): 285-288.
YUAN Y Q, YANG X. Review and outlook of waste incineration power generation technology [J]. *Energy Conservation Technology*, 2021, 39(3): 285-288(in Chinese).
- [19] 马盛伟, 朱磊, 李彬, 等. 城市生活垃圾生产现状及处置方式的研究进展 [J]. *四川建材*, 2020, 46(7): 24-25.
MA S W, ZHU L, LI B, et al. Research progress on the current status of urban domestic waste production and disposal methods [J]. *Sichuan Building Materials*, 2020, 46(7): 24-25(in Chinese).
- [20] 邓义寰, 刘抒悦, 吴坤, 等. 中国生活垃圾主要处理方式和年运行费用分析及“十四五”政策研究 [J]. *环境科学与管理*, 2021, 46(4): 9-13.
DENG Y H, LIU S Y, WU K, et al. Analysis on disposal methods and annual costs of domestic waste in China and policy suggestions for the 14th five-year plan [J]. *Environmental Science and Management*, 2021, 46(4): 9-13(in Chinese).
- [21] 田阳, 项娟, 路磊, 等. 生活垃圾堆肥处理研究 [J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(11): 56-60.
TIAN Y, XIANG J, LU Y, et al. Research on domestic waste composting treatment [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2020, 38(11): 56-60(in Chinese).

- [22] 温俊明, 吴俊锋. 中国城市生活垃圾特性及焚烧处理现状 [J]. 上海电气技术, 2009, 2(1): 43-48.
WEN J M, WU J F. The characteristics of the MSW in China and its incineration treatment status [J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2009, 2(1): 43-48(in Chinese).
- [23] ZENG C, NIU D J, LI H F, et al. Public perceptions and economic values of source-separated collection of rural solid waste: A pilot study in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 107: 166-173.
- [24] 第二次全国污染源普查公报 [EB/OL]. 2020.
The second national pollution source census bulletin [EB/OL]. 2020.
- [25] 王月, 王劭博, 杨悦, 等. 西北生态脆弱区城市生活垃圾处理厂适用性评价 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(12): 5933-5942.
WANG Y, WANG M B, YANG Y, et al. The optimization of municipal solid waste treatment technology in the ecological fragile areas of northwest China [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(12): 5933-5942(in Chinese).
- [26] 赵磊, 陈德珍, 刘光宇, 等. 垃圾热化学转化利用过程中碳排放的两种计算方法 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(8): 1634-1641.
ZHAO L, CHEN D Z, LIU G Y, et al. Two calculation methods for greenhouse gas emissions from municipal solid waste thermochemical conversion and utilization processes [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8): 1634-1641(in Chinese).
- [27] 徐海云. 垃圾焚烧未来有可能实现“负碳” [J]. *环境经济*, 2021(12): 42-45.
XU H Y. The future of waste incineration has the potential to achieve negative carbon [J]. *Environmental Economy*, 2021(12): 42-45(in Chinese).
- [28] LU J W, ZHANG S K, HAI J, et al. Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: A comparison with developed regions [J]. *Waste Management*, 2017, 69: 170-186.
- [29] 邵旭萍. 城市生活垃圾处理、处置和利用技术分析 [J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(9): 99-101.
TAI X P. Technical analysis of municipal solid waste treatment, disposal and utilization [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(9): 99-101(in Chinese).
- [30] 符鑫杰, 李涛, 班允鹏, 等. 垃圾焚烧技术发展综述 [J]. *中国环保产业*, 2018(8): 56-59.
FU X J, LI T, BAN Y P, et al. Overview on technical development of refuse incineration [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2018(8): 56-59(in Chinese).
- [31] 武建业. 城市生活垃圾焚烧处理技术综述 [J]. *甘肃科技*, 2020, 36(5): 22-26.
WU J Y. Overview of municipal domestic waste incineration treatment technology [J]. *Gansu Science and Technology*, 2020, 36(5): 22-26(in Chinese).
- [32] 方朝军, 任超峰, 王武忠, 等. 浅析大容量生活垃圾循环流化床焚烧炉的技术特点与调试运行 [J]. *工业锅炉*, 2019(3): 37-40.
FANG C J, REN C F, WANG W Z, et al. Technical characteristics and commissioning operation of large capacity circulating fluidized bed incinerator for domestic waste [J]. *Industrial Boilers*, 2019(3): 37-40(in Chinese).
- [33] LIU G R, ZHAN J Y, ZHENG M H, et al. Field pilot study on emissions, formations and distributions of PCDD/Fs from cement kiln co-processing fly ash from municipal solid waste incinerations [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299: 471-478.
- [34] 江旭昌. 我国水泥窑炉协同处置城市生活垃圾的十种技术模式简介(三) [J]. *中国水泥*, 2021(5): 75-81.
JIANG X C. Introduction of ten technical modes of co-disposal of MSW in cement kilns in China (III) [J]. *China Cement*, 2021(5): 75-81(in Chinese).
- [35] 尤海辉. 循环流化床垃圾焚烧炉燃烧优化试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
YOU H H. CFB MSW incinerator combustion optimization & experimental research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021(in Chinese).
- [36] 马家瑜, 卢志强, 周利强, 等. 生活垃圾循环流化床焚烧炉高温分离灰的危害性分析 [C]. 环境科学学会环境工程分会, 天津: 2021.
MA J Y, LU Z Q, ZHOU L Q, et al. Hazardous analysis of high-temperature separation ash from solid waste circulating fluidized bed incinerator [C]. Environmental Engineering Branch of the Society of Environmental Science, Tianjin: 2021.
- [37] 张钦华. 一种垃圾焚烧炉炉排片的设计与应用 [J]. *工业锅炉*, 2021(5): 17-23.
ZHANG Q H. Design and application of MSW incinerator grate bar [J]. *Industrial Boilers*, 2021(5): 17-23(in Chinese).
- [38] 田艺. 一种垃圾焚烧炉排炉排运行装置 [J]. *科学技术创新*, 2021(23): 153-154.
TIAN Y. A kind of garbage incineration grate furnace grate operating device [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2021(23): 153-154(in Chinese).
- [39] 王维, 熊锦. 我国农村生活垃圾治理研究综述及展望 [J]. *生态经济*, 2020, 36(11): 195-201.
WANG W, XIONG J. Current research and prospect on rural household trash management in China [J]. *Ecological Economy*, 2020, 36(11): 195-201(in Chinese).
- [40] 操建华. 乡村振兴视角下农村生活垃圾处理 [J]. *重庆社会科学*, 2019(6): 44-54.
CAO J H. Research on rural domestic waste disposal under the perspective of rural revitalization [J]. *Chongqing Social Sciences*,

- 2019(6): 44-54(in Chinese).
- [41] 刘细良, 陈敏. 农村生活垃圾治理问题与进路: 一个文献综述 [J]. 天津商业大学学报, 2020, 40(3): 39-47.
LIU X L, CHEN M. Problems and approaches of rural household waste governance: A literature review [J]. Journal of Tianjin University of Commerce, 2020, 40(3): 39-47(in Chinese).
- [42] 习近平. 决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利: 在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告 [N]. 人民日报, 2017-10-28(1).
XI J P. Winning to build a moderately prosperous society in all aspects to seize the great victory of socialism with Chinese characteristics in the new era - Report at the 19th national congress of the communist party of china [N]. People's Daily, 2017.
- [43] 黄开兴, 王金霞, 白军飞, 等. 农村生活固体垃圾排放及其治理对策分析 [J]. 中国软科学, 2012(9): 72-79.
HUANG K X, WANG J X, BAI J F, et al. Production of rural domestic solid waste and policy countermeasures [J]. China Soft Science, 2012(9): 72-79(in Chinese).
- [44] 饶国燃, 苏晔琳, 罗绵辉. 一种小型低污染垃圾焚烧炉方案研究 [J]. 价值工程, 2018, 37(28): 186-188.
RAO G R, SU Y L, LUO M H. Study on a small and low pollution waste incinerator [J]. Value Engineering, 2018, 37(28): 186-188(in Chinese).
- [45] 刘毓彬, 刘志章, 朱睿. 小型农村固体废弃物焚烧炉炉拱结构的研究 [J]. 节能, 2020, 39(1): 68-70.
LIU Y B, LIU Z Z, ZHU R. Research on the arch structure of small rural solid waste incinerator [J]. Energy Conservation, 2020, 39(1): 68-70(in Chinese).
- [46] 房建忠, 岳湖生, 赵燕妮. 小型旋转炉排生活垃圾焚烧炉 [Z]. 桑德环境资源股份有限公司, 2013.
FANG J J, YUE H S, ZHAO Y N. Small-scale rotary grate domestic waste incinerator [Z]. Sound environmental resource CO. LTD, 2013.
- [47] 范妮. 国内生活垃圾焚烧发电项目研究进展 [J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2021, 43(6): 690-697.
FAN N. Research progress on power generation project of domestic waste incineration in China [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2021, 43(6): 690-697(in Chinese).
- [48] 王海敏. 城市生活垃圾焚烧发电技术及烟气处理 [J]. 能源与节能, 2021(4): 94-95,214.
WANG H M. Municipal domestic waste incineration power generation technology and flue gas treatment [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(4): 94-95,214(in Chinese).
- [49] 2020年中国生物质发电产业发展报告 [R]. 中国产业发展促进会生物质能产业分会, 2020.
China biomass power industry development report 2020 [R]. China Association for Promotion of Industrial Development Biomass Energy Industry Branch, 2020.
- [50] 李俊峰. 我国生物质能发展现状与展望 [J]. 中国电力企业管理, 2021(1): 70-73.
LI J F. Biomass energy development status and outlook in China [J]. China Power Enterprise Management, 2021(1): 70-73(in Chinese).
- [51] 郭东岳, 刘光伟. 在“双碳”背景下垃圾焚烧发电企业面临的机遇与风险 [J]. 能源与节能, 2021(10): 84-85.
GUO D Y, LIU G W. Opportunities and risks faced by enterprises generating electricity through waste incineration in context of “peak carbon dioxide emissions & carbon neutrality” [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(10): 84-85(in Chinese).
- [52] 谭丰, 蔡凌飞. 生活垃圾及生物质焚烧发电一体化项目概论 [J]. 工程建设与设计, 2021(21): 27-28,32.
TAN F, CAI L F. Introduction to integrated project of municipal solid waste incineration and biomass power plant [J]. Construction & Design for Engineering, 2021(21): 27-28,32(in Chinese).
- [53] 房德职, 李克勋. 国内外生活垃圾焚烧发电技术进展 [J]. 发电技术, 2019, 40(4): 367-376.
FANG D Z, LI K X. An overview of power generation from municipal solid waste incineration plants at home and abroad [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(4): 367-376(in Chinese).
- [54] 姚金楠. 生物质发电中央补贴将有序退出 [N]. 中国能源报, 2021-08-23(2).
YAO J N. Central subsidies for biomass power generation will be withdrawn in an orderly manner [N]. 2021-08-23.
- [55] 王波, 单明. 垃圾焚烧发电产业即将进入成熟期冲刺阶段 [J]. 环境经济, 2021(1): 45-49.
WANG B, SHAN M. Waste-to-energy industry is about to enter the maturity sprint stage [J]. Environmental Economy, 2021(1): 45-49(in Chinese).
- [56] JIANG X G, LI Y H, YAN J H. Hazardous waste incineration in a rotary kiln: A review [J]. Waste Disposal & Sustainable Energy, 2019, 1(1): 3-37.
- [57] 许登月, 孙涛. 生活垃圾焚烧发电项目施工期环境保护管理模式研究: 以平顶山生活垃圾焚烧热电联产项目为例 [J]. 环境科学与管理, 2021, 46(6): 5-9.
XU D Y, SUN T. Research on the management mode of environmental protection for the projects of domestic waste incineration for power generation during their construction: taking the project of domestic waste incineration for cogeneration in Pingdingshan as an

- example [J]. *Environmental Science and Management*, 2021, 46(6): 5-9(in Chinese).
- [58] 牛继宗. 生活垃圾再生固体燃料燃烧效率与排放特性 [J]. *齐鲁工业大学学报*, 2020, 34(5): 25-30.
NIU J Z. Combustion efficiency and emission performance of solid fuel from household waste [J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2020, 34(5): 25-30(in Chinese).
- [59] 蓝小波, 秦为军, 孙广飞, 等. 蒸汽—空气预热器在垃圾焚烧炉的应用及设计分析 [J]. *工业锅炉*, 2021(4): 27-29.
LAN X B, QIN W J, SUN G F, et al. Application and design of steam-air-preheater in MSW incinerator [J]. *Industrial Boilers*, 2021(4): 27-29(in Chinese).
- [60] 朱传强, 茹晋波, 扈明东, 等. 垃圾焚烧电厂高分子非催化还原(PNCR)脱硝技术应用分析 [J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(6): 1600-1607.
ZHU C Q, RU J B, HU M D, et al. Application analysis of polymer non-catalytic reduction of NO_x in waste incineration [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(6): 1600-1607(in Chinese).
- [61] 张益阳. 热解气化炉技术在国内垃圾焚烧发电工程中的应用 [J]. *中国金属通报*, 2019(10): 262-263.
ZHANG Y Y. Application of pyrolysis gasifier technology in domestic waste incineration power generation project [J]. *China Metal Bulletin*, 2019(10): 262-263(in Chinese).
- [62] 翟树达. 垃圾焚烧厂渗滤液处理技术分析 [J]. *南宁师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(1): 78-82.
ZHAI S D. Review of leachate treatment technology in waste incineration plant [J]. *Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 38(1): 78-82(in Chinese).
- [63] 冯华一. 生活垃圾填埋场渗滤液的处理及利用方法研究 [J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(6): 43-45.
FENG H Y. Research on treatment and utilization methods of leachate in domestic waste landfill [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(6): 43-45(in Chinese).
- [64] 王锦雪, 邵立明, 吕凡, 等. 生活垃圾收运及处理处置过程中产生恶臭的监测和分析方法 [J]. *化工进展*, 2021, 40(2): 1058-1068.
WANG J X, SHAO L M, LYU F, et al. Monitoring and analysis methods for malodor generated during the collection, transportation, treatment and disposal of domestic waste [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(2): 1058-1068(in Chinese).
- [65] 苏猛业, 汪杰斌. 生活垃圾焚烧厂渗滤液处理设计要点分析 [J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(30): 68-71.
SU M Y, WANG J B. Analysis on main points of leachate treatment design of MSW incineration plant [J]. *Technology Innovation and Application*, 2021, 11(30): 68-71(in Chinese).
- [66] 程治良, 全学军, 陈波, 等. 生活垃圾焚烧发电厂渗滤液蒸发浓缩处理 [J]. *环境工程学报*, 2012, 6(10): 3645-3650.
CHENG Z L, QUAN X J, CHEN B, et al. Treatment of leachate from municipal solid waste incinerator plants by evaporation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(10): 3645-3650(in Chinese).
- [67] 李海青, 刘欣艳, 孙宇, 等. 生活垃圾焚烧厂渗滤液处理过程有机物特性分析 [J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(7): 154-159.
LI H Q, LIU X Y, SUN Y, et al. Characteristic analysis of organic matter through treatment processes of leachate in a MSW incineration plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(7): 154-159(in Chinese).
- [68] 卜银坤. 生活垃圾焚烧发电厂渗滤液全部入炉焚烧技术 [J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(3): 302-310.
BU Y K. Research on incineration technology of returning all leachate to incinerator in MSW incineration power plant [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(3): 302-310(in Chinese).
- [69] 李进, 刘宗宽, 贺延龄. 城市生活垃圾焚烧厂渗滤液产甲烷潜力 [J]. *环境工程学报*, 2019, 13(2): 457-464.
LI J, LIU Z K, HE Y L. Methane production potential of the leachate from municipal solid waste incineration plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(2): 457-464(in Chinese).
- [70] 晁榕珠. 有机废水作为水泥窑脱硝剂的实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
CHAO R Z. Experimental study on organic wastewater as denitration agent for cement kiln[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019(in Chinese).
- [71] SHI D Z, WU W X, LU S Y, et al. Effect of MSW source-classified collection on the emission of PCDDs/Fs and heavy metals from incineration in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(1/2): 685-694.
- [72] 郭施宏, 陆健. 城市环境治理共治机制构建: 以垃圾分类为例 [J]. *中国特色社会主义研究*, 2020, 11(S1): 132-141.
GUO S H, LU J. Setting up mechanism for co-participating urban environmental governance—taking waste sorting for example [J]. *Studies on Socialism With Chinese Characteristics*, 2020, 11(Sup 1): 132-141(in Chinese).
- [73] 艾扬, 罗院生, 贾召坤, 等. 浅谈垃圾分类对生活垃圾焚烧发电厂的影响 [J]. *能源与环境*, 2021(5): 110-112.
(AI/YI) Y, LUO Y S, JIA Z K, et al. Discussion on the influence of garbage classification on domestic garbage incineration power plant [J]. *Energy and Environment*, 2021(5): 110-112(in Chinese).
- [74] 常纪文, 吴雄, 孙天一. 推行我国农村垃圾分类和集中处理的法制思考 [J]. *环境保护*, 2019, 47(12): 11-17.
CHANG J W, WU X, SUN T Y. Thoughts on legal systems of promoting waste classification and centralized processing in Chinese rural area [J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(12): 11-17(in Chinese).

- [75] 代涛. 城镇生活垃圾分类对垃圾焚烧发电影响的应对措施 [J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(13): 124-125.
DAI T. Measures to deal with the impact of municipal solid waste classification on waste incineration power generation [J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2021, 2(13): 124-125 (in Chinese).
- [76] 任中山, 陈瑛, 王永明, 等. 生活垃圾分类对垃圾焚烧发电产业发展影响的分析 [J]. 环境工程, 2021, 39(6): 150-153, 206.
REN Z S, CHEN Y, WANG Y M, et al. Analysis of influence of domestic waste classification on development of waste incineration power generation industry in China [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(6): 150-153, 206 (in Chinese).
- [77] 祝华军, 田志宏, 杨学军. 生活垃圾分类能引导源头农产品消费减量吗?: 来自上海市的证据 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(11): 264-274.
ZHU H J, TIAN Z H, YANG X J. Does the domestic waste sorting promote the source reduction in agricultural products consumption?: An empirical analysis based on 718 questionnaires in Shanghai [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(11): 264-274 (in Chinese).
- [78] 温冬, 郑凤才, 王明飞. 垃圾分类政策实施后对北京市现有焚烧设施的影响及对策 [J]. 环境卫生工程, 2020, 28(5): 88-92.
WEN D, ZHENG F C, WANG M F. Impact and measures on the existing incineration facilities in Beijing after the waste classification policy implementation [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020, 28(5): 88-92 (in Chinese).
- [79] 徐振威, 吴晓晖. 生活垃圾分类对垃圾主要参数的影响分析 [J]. 环境卫生工程, 2021, 29(1): 26-31.
XU Z W, WU X H. Analysis of the influence on the main parameters of waste of MSW classification [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(1): 26-31 (in Chinese).
- [80] 林成森, 陈丽君, 吴洁珍. 生活垃圾分类对固体废弃物和温室气体协同减排的影响研究: 以浙江省为例 [J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 90-94.
LIN C M, CHEN L J, WU J Z. Research on the impact of domestic waste classification on synergistic emission reduction of solid waste and greenhouse gases: A case study of Zhejiang Province [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2021, 46(1): 90-94 (in Chinese).
- [81] 张爱军, 吴靖宇, 戴小东. 餐厨垃圾与生活垃圾焚烧协同处理探讨 [J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 115-119.
ZHANG A J, WU J Y, DAI X D. Study on collaborative treatment of kitchen waste in domestic waste incineration plants [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2021, 46(1): 115-119 (in Chinese).
- [82] 刘涛. 污泥掺烧比例对生活垃圾协同处置的经济影响分析 [J]. 给水排水, 2021, 57(6): 61-67.
LIU T. Studies on the economic effects of sludge ratio on co-processing of sewage sludge and municipal solid waste [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 57(6): 61-67 (in Chinese).
- [83] 张琳, 周国顺, 郭镇宁, 等. 利用生活垃圾焚烧电厂余热协同处置市政污泥 [J]. 节能, 2021, 40(6): 47-51.
ZHANG L, ZHOU G S, GUO Z N, et al. Collaborative disposal of sewage sludge using waste heat from municipal solid waste incineration [J]. *Energy Conservation*, 2021, 40(6): 47-51 (in Chinese).
- [84] 朱浩, 喻武. 生活垃圾协同焚烧污泥层燃燃烧特性研究 [J]. 环境卫生工程, 2021, 29(2): 46-49.
ZHU H, YU W. Study on stratified combustion characteristics of sludge in the cooperative incineration of domestic waste [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(2): 46-49 (in Chinese).
- [85] 刘钰坤. 市政污泥与生活垃圾协同焚烧处理技术分析 [J]. 低碳世界, 2021, 11(10): 12-13.
LIU Y K. Analysis of cooperative incineration technology of municipal sludge and domestic waste [J]. *Low Carbon World*, 2021, 11(10): 12-13 (in Chinese).
- [86] 臧仁德, 张力. 垃圾与煤混烧烟气脱酸的模拟及实验 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1385-1390.
ZANG R D, ZHANG L. Numerical simulation and experimental on deacidification of flue gas by co-combustion of MSW with coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(8): 1385-1390 (in Chinese).
- [87] 陆胜勇, 吴海龙, 陈彤, 等. 垃圾和煤混烧流化床焚烧炉的二恶英排放质量平衡 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(12): 2188-2195.
LU S Y, WU H L, CHEN T, et al. Dioxin mass balance in fluidized bed incinerator co-firing municipal solid waste and coal [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(12): 2188-2195 (in Chinese).
- [88] XING X J, LI Y L, XING Y Q, et al. Co-combustion characteristics and kinetic analyses of biomass briquette and municipal solid waste in N₂/O₂ and CO₂/O₂ atmospheres [J]. *BioResources*, 2017, 12(1): 1317-1334.
- [89] 马红娜, 李彦娥, 王晓娟, 等. 水泥窑协同处置生活垃圾循环经济实践研究 [J]. 环境科学与管理, 2020, 45(8): 164-167.
MA H N, LI Y E, WANG X J, et al. Circular economy practice of co-processing domestic waste by cement kiln [J]. *Environmental Science and Management*, 2020, 45(8): 164-167 (in Chinese).
- [90] CAPELLI L, SIRONI S. Combination of field inspection and dispersion modelling to estimate odour emissions from an Italian landfill [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 191: 273-290.
- [91] 刘旭, 张楷文, 张磊, 等. 城市生活垃圾各组份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.
LIU X, ZHANG K W, ZHANG L, et al. Insights on the pyrolysis and waste incineration behaviors of municipal solid waste [J]. *Journal*

- of Liaoning Petrochemical University, 2021, 41(5): 9-16(in Chinese).
- [92] 袁国安. 生活垃圾热解气化技术应用现状与展望 [J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44(4): 66-69.
YUAN G A. Present status and prospect of municipal solid waste pyrolysis and gasification technology [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(4): 66-69(in Chinese).
- [93] 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.
WANG M X, ZHANG J, HE H, et al. Overview of municipal solid waste disposal methods [J]. *Environment and Development*, 2020, 32(2): 51-52(in Chinese).
- [94] 郝彦龙, 侯成林, 付丽霞, 等. 生活垃圾无害化处理工程设计实例 [J]. *环境工程*, 2020, 38(2): 135-139.
HAO Y L, HOU C L, FU L X, et al. Engineering design of a municipal solid waste disposal project [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(2): 135-139(in Chinese).
- [95] 殷仁豪. 生活垃圾气化产气燃烧过程中二噁英和NO_x协同控制的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
YIN R H. Experimental study on the cooperative control of dioxins and NO_x during MSW gasification gas combustion process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017(in Chinese).
- [96] 张思成. 垃圾热解耦合燃煤混烧的实验研究与数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
ZHANG S C. Experimental study and numerical simulation on waste pyrolysis combined with coal combustion[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020(in Chinese).
- [97] HE J D, SONG W L, GAO S Q, et al. Experimental study of the reduction mechanisms of NO emission in decoupling combustion of coal [J]. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87(9): 803-810.
- [98] DONG L, GAO S Q, XU G W. NO reduction over biomass char in the combustion process [J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(1): 446-450.
- [99] 尚校, 高士秋, 汪印, 等. 不同煤燃烧方式降低NO_x排放比较及解耦燃烧应用 [J]. *燃料化学学报*, 2012, 40(6): 672-679.
SHANG X, GAO S Q, WANG Y, et al. Comparison of NO_x reduction among different coal combustion methods and the application of decoupling combustion [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2012, 40(6): 672-679(in Chinese).