

基于分类趋势下的我国生活垃圾处理技术展望^{*}

金宜英¹ 邴君妍¹ 罗恩华² 李洋洋¹ 刘丹丹¹ 舒郅斐¹

(1.清华大学 环境学院 北京 100084; 2.中国国际工程咨询公司 资源与环境业务部 北京 100048)

摘要: 梳理我国垃圾分类相关政策,分析生活垃圾处理及分类现状,总结目前存在的问题,并提出适宜我国国情的生活垃圾处理模式和技术发展趋势:城市应建设静脉产业基地,区域布局可再生回收体系,重视有害垃圾的收集处理,发展高效的餐厨垃圾处理技术,提升厨余垃圾设施处理能力;农村应推行多样化有机废弃物处理方式,建立因地制宜的可回收物收集模式,区域统筹其他垃圾的处理,部门协同管理有害垃圾的回收处理。

关键词: 生活垃圾; 分类; 处理模式; 趋势

DOI: 10.13205/j.hjgc.201909027

PROSPECTS OF GARBAGE TREATMENT TECHNOLOGIES IN CHINA BASED ON THE CLASSIFICATION TENDENCY

JIN Yi-ying¹, BING Jun-yan¹, LUO En-hua², LI Yang-yang¹, LIU Dan-dan¹, SHU Zhi-fei¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Resource & Environment Industry Department, China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: In this paper, waste classification relevant policies in China were arranged, current situation of garbage treatment and classification were analyzed, and the existing problems were summarized. The garbage treatment mode and development tendency of garbage disposal technologies were suggested that: in urban area venous industry base should be constructed, waste recycling system be regionally distributed, the collection and disposal of hazardous waste be appreciated, efficient technics for food waste disposal be developed, and facility abilities for kitchen waste treatment be increased. In rural area, it was suggested that diverse disposal methods for organic waste should be implemented, the recycling system be built in regard to local conditions, the disposal of other waste be regionally planed, and collaboration between departments concerning hazardous waste management be established.

Keywords: garbage; classification; treatment mode; tendency

0 引言

依据《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》,生活垃圾是指在日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废物。随着城市的迅速发展,我国生活垃圾产量正逐年增加。生活垃圾分类收集与处理是垃圾合理处置和资源回收的重要基础,是实现减量化、资源化和无害化的必经之路,对保护人体健康、提升环境卫生具有重大意义。本文将结合生活垃圾的特点,以垃圾分类政策为背景,对生活垃圾处理模式进行全面梳理。

^{*} 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(17JZD026);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202005)。

收稿日期: 2018-09-28

1 垃圾分类政策概况

早在 2006 年,我国的政策法规中就出现了垃圾分类的相关内容,近年来,随着生活垃圾问题日益突出,相关政策法规不断出台,以加强对生活垃圾的管理,推进生态文明建设。

2016 年 12 月 21 日,在中央财经领导小组第十四次会议上,习近平总书记提出“要加快建立分类投放、分类收集、分类运输、分类处理的垃圾处理系统,形成以法治为基础、政府推动、全民参与、城乡统筹、因地制宜的垃圾分类制度,努力提高垃圾分类制度覆盖范围”,在这一指导思想下,垃圾分类工作在全国的城市和农村如火如荼地进行。分别对近年来我国有关城市和农村垃圾分类的主要政策进行梳理,如表 1 和表 2 所示。

表 1 城市垃圾分类相关政策法规

| Table 1 Policies and regulations on the classification of municipal solid waste(MSW) | | | |
|---|----------------|-------------------------------------|---|
| 发布时间 | 主体单位 | 政策文件 | 重要内容 |
| 2012-04-29 | 国务院办公厅 | 《关于印发“十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施规划建设规划的通知》 | 全面推进生活垃圾分类试点城市建设,各省(区、市)要建成 1 个以上生活垃圾分类示范城市 |
| 2013-01-23 | 国务院办公厅 | 《循环经济发展战略及近期行动计划》 | 完善生活垃圾分类回收、密闭运输、集中处理体系;鼓励居民分开盛放和投放厨余垃圾 |
| 2014-03-14 | 住建部等 | 《关于开展生活垃圾分类示范城市(区)工作的通知》 | 按照生态文明建设的理念和要求,明确开展生活垃圾分类示范城市(区)工作 |
| 2014-03-18 | 中共中央办公厅、国务院办公厅 | 《关于厉行节约反对食品浪费的意见》 | 督促餐饮服务单位建立餐厨废弃物处置管理制度,分类放置餐厨废弃物 |
| 2015-09 | 国务院办公厅 | 《生态文明体制改革总体方案》 | 完善资源循环利用制度;加快建立垃圾强制分类制度 |
| 2016-12 | 住建部、环保部 | 《全国城市生态保护与建设规划(2015—2020 年)》 | 加快生活垃圾处理设施建设,完善收运系统;健全再生资源回收利用网络;推广废旧商品回收利用、焚烧发电、生物处理等资源化利用方式 |
| 2017-03 | 住建部、发改委 | 《生活垃圾分类制度实施方案的通知》 | 明确 46 个示范城市(区)先行实施生活垃圾分类强制分类工作,确定有害垃圾、易腐垃圾和可回收垃圾作为分类类别 |
| 2017-12-20 | 住建部 | 《关于加快推进部分重点城市生活垃圾分类工作的通知》 | 46 个重点城市在 2018 年 3 月前出台生活垃圾分类管理实施方案或行动计划;以“干湿分开”为重点对厨余垃圾分类投放 |

表 2 农村垃圾分类相关政策法规

| Table 2 Policies and regulations on the classification of rural solid waste | | | |
|---|--------|--------------------------------------|---|
| 发布时间 | 主体单位 | 政策文件 | 重要内容 |
| 2006-10-11 | 环保部 | 《国家农村小康环保行动计划》 | 明确了开展农村生活垃圾收运处理系统示范建设 |
| 2010-02-08 | 环保部 | 《农村生活污染防治技术政策》 | 明确地方政府是农村生活污染处理处置设施规划和建设的责任主体,乡镇政府和村民委员会负责农村生活污染防治工作的具体组织实施 |
| 2013-11-11 | 环保部 | 《农村生活垃圾分类、收运和处理项目建设与投资指南》 | 为农村生活垃圾分类、收集、转运及处理工程的规划、立项、选址、设计、施工、验收及建成后运行与管理提供技术支持 |
| 2015-11-28 | 住建部 | 《全面推进农村垃圾治理的指导意见》 | 推行垃圾源头减量,建立“村收集、镇转运、县处理”的模式 |
| 2016-03 | 国务院办公厅 | 《“十三五”规划纲要》 | 开展生态文明示范村镇建设和农村人居环境综合整治行动 |
| 2017-02-06 | 国务院办公厅 | 《关于深入推进农业供给侧结构性改革加快培育农业农村发展新动能的若干意见》 | 推进农村生活垃圾治理专项行动,促进垃圾分类和资源化利用 |
| 2017-06-06 | 住建部 | 《关于开展第一批农村生活垃圾分类和资源化利用示范工作的通知》 | 公布第一批 100 个农村生活垃圾分类和资源化利用示范县(市、区) |
| 2018-02-05 | 国务院办公厅 | 《农村人居环境整治三年行动方案》 | 政府在农村要强化政策支持,中央财政要加大投入力度,用于农村人居环境整治 |

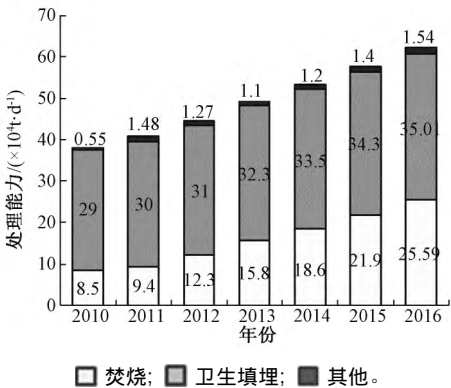
此外,地方层面上,自 2010 年至今,有 33 个省市、自治区制定了垃圾分类相关政策,其中有 20 余个明确制定了实施方案;地方政策法规共 81 项,其中 62 项为 2016—2017 年制定出台的。

2 生活垃圾分类及处理现状

2.1 生活垃圾处理现状

随着人口的增加和经济水平的提高,我国生活垃圾产量逐年增加,相应地,生活垃圾处理能力也不断增加。2016 年,我国生活垃圾处理设施共计 940 座,处理能力 62.14 万 t/d;城市生活垃圾清运量达到 2.04 亿 t,无害化处理率为 96.62%,县城生活垃圾无害化处理率为 85.22%。对我国生活垃圾处理能力进行总结,如图 1 所示。

由图 1 可知:我国生活垃圾主要处理方式



注:数据来源于 2010—2016 年城乡建设统计年鉴。

图 1 2010—2016 中国生活垃圾处理能力

Fig.1 Capacities of municipal solid waste MSW treatment facilities in China in 2010—2016

埋与焚烧,其中填埋仍占主要地位。填埋处理具有方法简单、技术门槛低的特点,是我国长期以来广泛采用的处理方式,但填埋场占地大、使用年限短,不但可能影响地下水和土壤环境,还会造成大量有机质的浪费,与可持续发展、绿色发展的理念相悖。与填埋不同,焚烧处理占地小、能极大程度地实现减量化,并产生电能,近年来发展迅猛。此外,其他处理方式(如堆肥等)处理能力也大幅提升。就发展趋势来看,多元化方式或将逐步取代填埋成为主导的处理模式。

尽管能力逐年提升,我国生活垃圾处理目前仍存

在较大缺口,以 2016 年计,每天仍有 1.89 万 t 城市生活垃圾未得到无害化处理,提升处理能力仍是目前生活垃圾管理工作的重中之重。

2.2 生活垃圾分类工作现状

2016 年,《生活垃圾分类制度实施方案》要求在省会城市、直辖市、5 个计划单列市以及第 1 批生活垃圾分类示范城市等 46 个城市先行实施生活垃圾强制分类工作;同年 6 月,住建部公布第一批 100 个农村生活垃圾分类和资源化利用示范县(市、区)。根据调研和文献可知典型示范城市生活垃圾组分,如表 3 所示。

表 3 我国典型城市生活垃圾组成成分^[1-6]

| Table 3 MSW compositions of typical cities in China | | | | | | | | | | | % |
|---|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 城市 | 年份 | 厨余 | 灰土 | 木竹 | 砖瓦 | 金属 | 纸 | 塑料 | 玻璃 | 织物 | 其他 |
| 北京 | 2012 | 53.96 | 2.15 | 3.08 | 0.57 | 0.26 | 17.64 | 18.67 | 2.07 | 1.55 | 0.05 |
| 上海 | 2016 | 60.40 | 0.02 | 1.95 | 0.41 | 1.08 | 11.88 | 17.56 | 3.57 | 2.85 | 0.28 |
| 杭州 | 2010 | 58.15 | 2.00 | 2.61 | — | 0.96 | 13.27 | 18.81 | 2.73 | 1.47 | 0.00 |
| 深圳 | 2010 | 44.10 | — | 1.41 | 1.85 | 0.47 | 15.34 | 21.72 | 2.53 | 7.40 | 5.16 |
| 青岛 | 2009 | 64.68 | 6.30 | 0.30 | 0.31 | 0.88 | 9.48 | 8.38 | 2.17 | 3.03 | 4.46 |
| 重庆 | 2011 | 72.97 | 1.48 | 1.91 | 0.92 | 0.36 | 9.34 | 8.40 | 1.46 | 3.16 | 0.00 |
| 洛阳 | 2012 | 87.40 | — | 1.00 | — | — | 2.80 | 2.10 | — | 0.50 | 6.20 |
| 大同 | 2011 | 88.74 | 3.90 | 0.10 | 0.56 | 0.10 | 4.00 | 2.00 | 0.20 | 0.10 | 0.30 |
| 拉萨 | 2014 | 89.88 | — | 1.31 | — | 0.08 | — | 0.59 | — | 0.12 | 3.02 |

注:—已归入其他类别。

各示范城市普遍采用“大类粗分,干湿分离”的原则,主要措施为建设规范化垃圾资源回收体系。对垃圾分类示范城市的调研发现,南京、石家庄、兰州等示范城市已采用积分兑换等措施,大幅提高了垃圾分类的参与度;部分示范城市已根据垃圾收集情况建设了分类处理设施;此外,如青岛、苏州等摸索建立了联席会议、垃圾分类实施方案等相关制度和法规。

2.3 存在的问题

1) 管理职能部门缺乏协调合作。目前生活垃圾的清运、处理由市政部门负责,环保部门参与的积极性不足。除北京市可回收物管理并入城管委、上海市生活源可回收物纳入环卫体系外,其余城市的可回收物、有害垃圾的贮存、处理职能没有进行明确划分。

2) 分类处理设施能力不足。我国大部分城市面临处理能力跟不上垃圾增长速度的问题;此外,源头分类后没有相应的处理设施,导致末端再次混合,造成人力浪费,并增加经济成本。

3) 宣传教育相对滞后。直至 2018 年 1 月,教育部等六部门才发布《关于在学校推进生活垃圾分类管理工作的通知》,正式将垃圾分类纳入大中小学的教育体系,垃圾分类的普及工作任重道远。

3 我国生活垃圾成分特点及变化

我国的生活垃圾中,厨余垃圾和可回收物占绝大部分。根据实地调研,生活垃圾具有如下特点:厨余垃圾以生菜叶、果皮为主,包括少量剩饭类;家庭源可回收物品质较差,回收价值不高。基于上述特点,垃圾中转站和处理厂不宜实施分类,筛分出的可回收物品质低,而且会增加相应的经济成本。1985—2003 年,我国生活垃圾中厨余垃圾含量从 57.9%降低至 52.6%;可回收垃圾由 4.0%增加到 16.3%,最高达到 21.5%(2000 年)^[7-8]。以上海市为例,统计其 25 年来生活垃圾成分变化,并分析人均 GDP 与厨余垃圾、可回收物含量的关系,如图 2 和图 3 所示。根据结果进行合理预测:在经济快速发展、居民生活水平提高的条件下,厨余垃圾含量将会下降,而可回收物含量则会上升。因此,现阶段垃圾分类的重点是厨余垃圾分类收集与处理;未来可回收物的再生利用将成为分类工作的重点。

4 生活垃圾处理模式

4.1 城市生活垃圾

4.1.1 处理路线

由于末端分类可回收物利用价值不高,减量效果

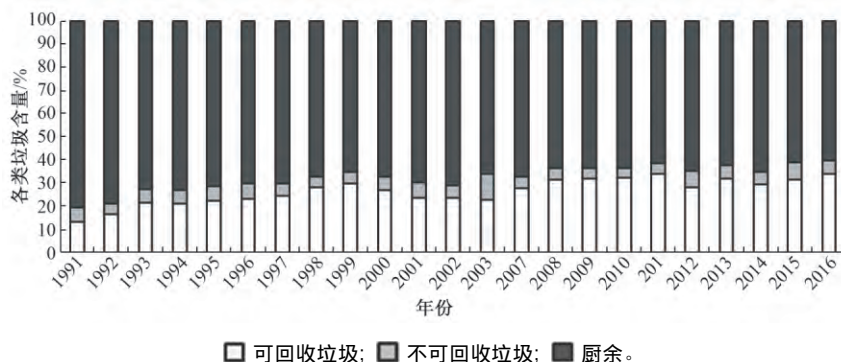
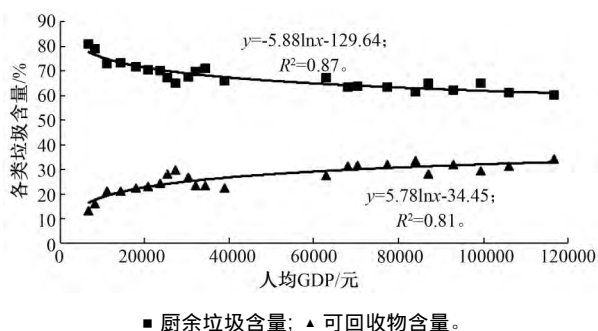
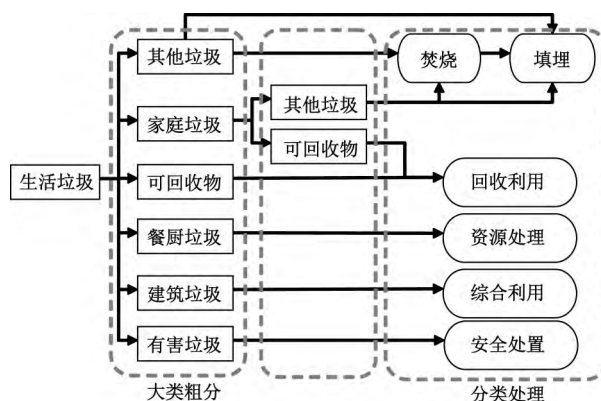
图2 上海市生活垃圾成分变化^[2,9-13]Fig.2 Compositions of MSW in Shanghai^[2,9-13]图3 厨余垃圾、可回收物含量与人均GDP的关系^[2,9-14]Fig.3 Relations between kitchen waste contents, recyclables contents and average GDP^[2,9-14]

图4 城市生活垃圾处理路线

Fig.4 A reasonable MSW treatment route

差 投入成本大,以及厨余垃圾分出后需要另外建设厨余垃圾处理设施,以合理性和经济性而言,不适宜进行末端分类。实行分类的原则应是:源头分类、大类粗分,一种合理的处理路线如图4所示。在我国大城市及沿海经济发达的城市,生活垃圾可回收比例和垃圾热值较高、土地资源紧张,因此在确保可回收物、厨余垃圾分类回收的前提下,采用以焚烧为主的处理方式,既能满足减量化的要求,又可产生清洁能源;在其余中小城市,生活垃圾热值较低,经济基础相对较差,更适宜采用填埋为主、结合堆肥等资源化技术的处理路线^[15-16]。

4.1.2 技术发展趋势

1) 布局建设以园区集中模式的城市静脉产业基地。构建集中布局的产业联动模式,实现部分基础设施共建共享,相关处理设施协同联动,合理利用水电管线,加强产业间合作互惠,降低处理成本,提高土地利用效率,破解“垃圾围城”,变“邻避”效应为“邻利”效应。

2) 规范可回收物的收集渠道前提下,区域性布局资源再生设施。针对再生资源的集中度、交易规

模,进行合理布局,建设具有区域辐射性的再生设施,实现再生资源回收、加工、利用、再制造的集约化和产业化,避免重复建设和资源浪费。

3) 重视有害垃圾的收集贮存和处理设施的建设。家庭日常生活产生的有害垃圾,在未分类收集的情况下,全过程不按危险废物管理,在分类收集的情况下,除收集过程外,其余环节需按危险废物进行管理;有害垃圾应与现有危废收运、处理体系衔接,由环保部门统筹,其他部门配合管理。

4) 发展餐厨废弃物高效经济的处理技术。餐厨垃圾C/N低、酸败快,部分区域餐厨产量小,因此适宜与城市污泥、果蔬垃圾进行协同厌氧处理;与生活垃圾处理设施、污水处理设施等集中布局,形成行业共建模式,提高土地利用效率;采用蝇蛆、黑水虻等生物梯级循环模式,避免同源性污染;集合高效预处理、湿热处理、厌氧产沼、好氧制有机肥、生物转化等多项技术,实现杂质的高效分离,提高出油率及沼气纯度。如大连市采用餐厨垃圾与市政污泥、旱厕粪便进行协同厌氧处理,稳定周期提高8~10d,产气率提高

20%;苏州洁净公司采用综合集成技术,餐厨垃圾处理经过除杂、粉碎、湿热处理、三相分离,固形物用以蛆蝇养殖制饲料蛋白,液相厌氧发酵制沼气,油脂深加工制生物柴油,年利润总额可达678.5万元。

5) 提高厨余垃圾处理设施的处理能力。厨余垃圾以生的果蔬为主,含水率高,VS值低,可采用堆肥、快速堆肥的方式,或与粪便、餐厨垃圾等进行协同高效厌氧处理。随着生活垃圾处理设施能力的加强,厨余垃圾将能够与生活垃圾进行共同处理。

4.2 农村生活垃圾

4.2.1 处理路线

农村生活垃圾全量收集难度较大,运输成本高,收运过程易产生二次污染。根据有机垃圾易腐的特点,考虑运输和处理的经济性,农村有机垃圾适宜进行就地处理。随着城乡统筹发展的深化,未来可将农村与城市垃圾进行区域利用,合理的处理路线应如图5所示。

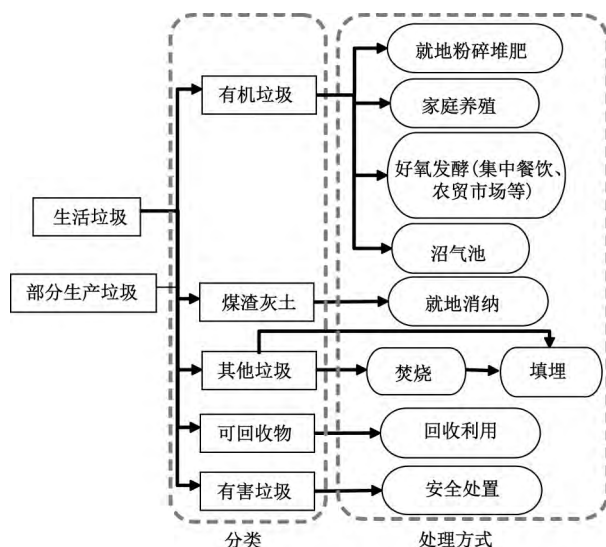


图5 农村生活垃圾处理路线

Fig.5 A reasonable rural solid waste treatment route

4.2.2 技术发展趋势

1) 推行多样化的有机废弃物处理方式。农村有机垃圾可采用就地粉碎沤肥、生物堆肥处理、家庭养殖、厌氧产沼气等方式进行处理。同时,易腐垃圾应因地制宜考虑与畜禽粪便及农业生产废弃物的协同处理。

2) 建立因地制宜的可回收物收集模式。一方面,收编流动回收人员,扶持乡镇集体企业回收,实施低价值回收工作补贴;另一方面,充分发挥供销社体系的作用,推广因地制宜的回收模式,调动农村基层

再生资源回收利用的积极性。如德阳市罗江县,利用供销社体系在下辖村镇推行可回收垃圾分类政策,采用垃圾换农具、换生活用品的方式,提高村民回收积极性。

3) 采用区域统筹方式解决其他垃圾的终端处置。农村生活垃圾产生源分散,因此考虑到运输成本和经济性,不宜建设小型处理设施;而其他垃圾不存在易腐等问题,适宜与城市生活其他垃圾进行集中处置、统筹管理。

4) 协同各部门解决有害垃圾的回收和处理问题。环保部门、市政环卫部门、村委、街道等部门应积极协作,明确职责,确保有害垃圾的收运、储存、处理工作落实到位,避免权责不清,责任推诿。

5 建议

垃圾分类应遵守如下原则:政府推动,全民参与;因地制宜,循序渐进;完善机制,创新发展;协同推进,有效衔接。在该原则下,加强垃圾分类宣传教育,积极推动源头减量,加快分类处理设施的建设,城乡统筹管理,因地制宜地采用高效经济的处理模式,才能达到垃圾减量化与无害化的目的,才能实现生态文明建设水平的全面提升。

参考文献

- [1] 李春芸.北京市城区生活垃圾理化特性调查研究[D].北京:北京工业大学,2015.
- [2] 程炬,董晓丹.上海市生活垃圾理化特性浅析[J].环境卫生工程,2017,25(4):36-40.
- [3] Chi Y,Dong J,Tang Y J,et al.Life cycle assessment of municipal solid waste source-separated collection and integrated waste management systems in Hangzhou,China[J].Journal of Material Cycles & Waste Management,2015,17(4):695-706.
- [4] 黄昌付.深圳市生活垃圾理化组分的统计学研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [5] 姜震,张文霞,齐文静.青岛市生活垃圾物理特性分析及变化趋势研究[J].环境卫生工程,2011,19(3):36-37.
- [6] 张鹏,彭莉,张向和.重庆市城市生活垃圾成分及物理特性分析研究[J].环境科学与管理,2014,39(2):14-17.
- [7] 杜吴鹏,高庆先,张恩琛,等.中国城市生活垃圾排放现状及成分分析[J].环境科学研究,2006,19(5):85-90.
- [8] Zhang D Q,Tan S K,Gersberg R M. Municipal solid waste management in China: status, problems and challenges[J].Journal of Environmental Management,2010,91(8):1623-1633.
- [9] 苑小芳.上海市区生活垃圾产量、成分特征统计分析及相应处置对策[J].上海统计,1999(11):14-17.
- [10] 张益,杨承休.上海市区生活垃圾产生量及成分分析[J].环境卫生工程,2000(3):104-106.

(下转第130页)

3) 改变实验工况参数测试 $Mn_{0.01}W_{0.03}$ -菱铁矿脱硝效率发现: 氨氮比 <1.0 的范围内, 氨氮比越大脱硝效率越高, 氨氮比达到 1.0 后脱硝效率基本保持不变, 在 210~390 °C 保持 90% 以上。氧浓度由 0 提高到 3% 时, 脱硝效率明显提升, 当氧浓度超过 3% 后脱硝效率基本保持不变。空速由 30000 h^{-1} 增加至 40000 h^{-1} 时脱硝效率降低, 降低至 20000 h^{-1} 时, 低温段脱硝效率明显提高, 高温段脱硝效率略有降低。

参考文献

- [1] Koebel M, Elsener M, Kleemann M. Urea-SCR: a promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines [J]. *Catalysis Today*, 2000, 59(3/4): 335-345.
- [2] Muckenhuber H, Grothe H. A DRIFTS study of the heterogeneous reaction of NO_2 with carbonaceous materials at elevated temperature [J]. *Carbon*, 2007, 45: 321-329.
- [3] Lapuerta M, Hernandez J J, Gimenez F. Evaluation of exhaust gas recirculation as a technique for reducing diesel engine NO_x emissions [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering*, 2000, 214(1): 85-93.
- [4] Forzatti P. Present status and perspectives in de- NO_x SCR catalysis [J]. *Applied Catalysis A General*, 2001, 222(1/2): 221-236.
- [5] Praveena V, Martin M L J. A review on various after treatment techniques to reduce NO_x emissions in a CI engine [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2017: S1743967117300260.
- [6] 佟德辉. 降低车用柴油机 NO_x 排放的 SCR 技术控制策略研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [7] Gérard D, Valade D, Ariel Guzmán-V, et al. Selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia on Fe-ZSM-5 catalysts prepared by different methods [J]. *Applied Catalysis B Environmental*, 2005, 55(2): 149-155.
- [8] 廖彦彦. 柴油发动机尾气后处理技术(SCR)的应用 [J]. *中国新技术新产品*, 2017(7): 36-37.
- [9] Baidya T, Bernhard A, Elsener M, et al. Hydrothermally stable $WO_3/ZrO_2-Ce_{0.6}Zr_{0.4}O_2$ catalyst for the selective catalytic reduction of NO with NH_3 [J]. *Topics in Catalysis*, 2013, 56(1/2/3/4/5/6/7/8): 23-28.
- [10] Li J H, Chang H Z, Ma L, et al. Low-temperature selective catalytic reduction of NO_x with NH_3 over metal oxide and zeolite catalysts: a review [J]. *Catalysis Today*, 2011, 175(1): 147-156.
- [11] 杨斌, 周朝兵, 陈康. 满足国 V 及以上排放标准的柴油机 SCR 技术 [J]. *价值工程*, 2017, 36(7): 98-100.
- [12] 孟令军, 刘悦锋, 赵文辅, 等. 轻型柴油机 SCR 反应特性研究 [J]. *内燃机与动力装置*, 2017, 34(3): 6-9.
- [13] 刘福东, 单文坡, 石晓燕, 等. 用于 NH_3 选择性催化还原 NO_x 的钒基催化剂 [J]. *化学进展*, 2012, 1(4): 445-455.
- [14] Pavan M, Jagtap, Neelam, et al. Magnesia doped Ag/Al_2O_3 : sulfur tolerant catalyst for low temperature HC-SCR of NO_x [J]. *Applied Catalysis B Environmental*, 2014, 144(1): 408-415.
- [15] Yao G, Wang F, Wang X, et al. Magnetic field effects on selective catalytic reduction of NO by NH_3 over Fe_2O_3 in a magnetically fluidized bed [J]. *Energy*, 2010, 35(10): 2295-2300.
- [16] Gui K, Liang H, Wang F, et al. Improving the efficiency of low-temperature SCR of NO by NH_3 on iron ore catalyst with a magnetically fluidized bed [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2015, 38(9): 1537-1542.
- [17] 查贤斌, 梁辉, 归柯庭, 等. 铁矿石低温催化脱硝性能研究 [J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(4): 811-815.
- [18] 卢慧霞, 归柯庭. 铁矿石 SCR 低温脱硝催化剂的改性研究 [J]. *动力工程学报*, 2017, 37(9): 726-731.
- [19] 张信莉, 王栋, 陈莲芳, 等. Mn 掺杂对磁性 $\gamma-Fe_2O_3$ 低温 SCR 脱硝活性的影响 [J]. *工程热物理学报*, 2014(5): 995-998.
- [20] 董文杰, 周德智, 林赫, 等. 用于 NH_3 -SCR 的锰基催化剂的改性研究 [J]. *车用发动机*, 2013(3): 40-44.
- [21] Inomata M, Miyamoto A, Ui T, et al. Activities of vanadium pentoxide/titanium dioxide and vanadium pentoxide/aluminum oxide catalysts for the reaction of nitric oxide and ammonia in the presence of oxygen [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 1982, 21(3): 424-428.
- [22] 江博琼. Mn/TiO₂ 系列低温 SCR 脱硝催化剂制备及其反应机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [23] 赵文雅, 李永红, 刘小娇, 等. Fe 改性 Cu-SSZ-43 的方法对催化剂 NH_3 -SCR 脱硝性能的影响 [J]. *化工进展*, 2016, 35(12): 3885-3893.

第一作者: 许夏(1994-), 女, 硕士, 主要研究方向为 SCR 脱硝催化剂。632536204@qq.com

通信作者: 归柯庭(1957-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大气污染控制。101000477@seu.edu

(上接第 153 页)

- [11] 沈佳璐. 上海城市生活垃圾处置对策研究及其评价 [D]. 上海: 东华大学, 2006.
- [12] 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.
- [13] Zhou H, Meng A H, Long Y Q, et al. ChemInform abstract: an overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: physical, chemical composition and heating value [J]. *Chem Inform*, 2014, 36(30): 107-122.
- [14] 上海市统计局. 上海统计年鉴-2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [15] 肖玲. 中国城市生活垃圾管理模式探讨 [J]. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(3): 65-69.
- [16] 彭绪亚. 可持续的城市生活垃圾管理模式及其建设 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(5): 148-150.

第一作者: 金宜英(1974-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为固体废物污染控制与资源化。jinyi@tsinghua.edu.cn

通信作者: 邢君妍(1994-), 女, 硕士, 主要研究方向为有机废弃物的资源化处理和处置。bingji16@mails.tsinghua.edu.cn