

中国生活垃圾气化处理技术的应用

赵联森¹, 龚 燊²

(1. 北京首都创业集团有限公司, 北京 100027; 2. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120)

摘要: 随着中国经济快速发展, 社会物质水平和居民生活质量显著提高, 生活垃圾总产量逐渐增加。生活垃圾气化技术能够实现生活垃圾减量化、资源化、无害化处理, 受到一定的关注, 但在国内鲜有实际应用的项目。文章介绍了生活垃圾气化技术的发展历程和技术原理与工艺配置, 分析对比国内外的生活垃圾气化技术案例, 指出通过垃圾分类、垃圾预处理及掺混生活垃圾的方法, 提高垃圾热值, 以利于生活垃圾气化设备的稳定运行。此外, 提高生活垃圾气化设备处理规模, 抑制污染物生成将是未来研究的重点。

关键词: 生活垃圾; 气化; 案例; 应用

中图分类号: X799.3

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2018.05.020

Application of Solid Waste Gasification Technology in China

Zhao Lianmiao¹, Gong Shen²

(1. Beijing Capital Group Company Limited, Beijing 100027, China;

2. China Urban Construction Design & Research Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: A gradually increasing of domestic wastes was displayed, caused by a significant improvement of the social material level and citizens' living quality, with the economy boosting in China. Gasification technologies which could achieve reduction, recovery and harmlessness maintained a certain degree of concern but less application in China. In this paper, the development history, technical theories and process configurations of the gasification disposal technologies of household wastes were introduced, and the application prospect in China through case study contrast of the international projects and domestic projects was analyzed. It was pointed out that by waste separation, pretreatment and mixing with other fuels, heat value could increase, contributing to the operation stability. In addition, amplifying household waste gasification system scale and controlling formation of by-product pollutants would be concerned in future studies.

Keywords: Domestic Waste; Gasification; Case Study; Application

CLC number: X799.3

随着中国经济发展和城市化水平提高, 居民的生活方式发生巨大的变化, 城市生活垃圾产量逐年上升。2012~2015年, 城市生活垃圾总处理量从1.97亿t上升至2.48亿t^[1-2]。同时, 国家政策对固废处置要求日趋严格, 垃圾减量化处理方式的热度持续升高。“十二五”期间, 国内建设了大量的生活垃圾减量化处理设施。进入“十三五”后, 生活垃圾处理行业将持续快速发展。

生活垃圾焚烧技术已经成为中国生活垃圾减量化处置的主流方法, 但其同样面临所谓的“邻避

效应”, 选址困难是其面临的主要难点之一。在积极寻求生活垃圾焚烧项目选址问题解决方法的同时, 新的生活垃圾处理技术, 如厌氧发酵、堆肥、垃圾气化等技术也逐渐被纳入选择范围。其中垃圾气化装备于2014年入选了国家鼓励开发的重大环保装备技术目录。

文章从热解气化原理出发, 简要介绍了不同生活垃圾气化设备及其优缺点, 阐述了国内外生活垃圾气化实验研究进展以及气化技术在国内外应用情况, 并通过比较理论研究和案例项目, 明

收稿日期: 2018-05-27

作者简介: 赵联森(1987-), 男, 硕士、工程师。研究方向: 固废及污泥的处理和资源化。E-mail: lianmiaozh@163.com

通信作者: 龚 燊(1988-), 女, 硕士、工程师。研究方向: 生活垃圾处理及烟气净化。E-mail: gongshen_c@163.com

确了气化温度、过量空气系数与城市生活垃圾质量比对气化过程的影响。同时,通过对比生活垃圾气化项目与生活垃圾焚烧项目的建设投资、运行成本、对原料的要求及污染物排放情况,分析生活垃圾气化项目在国内的可行性和局限性。

1 生活垃圾气化技术的发展

燃料气化技术始于19世纪。20世纪50年代,气化技术被认为是一种很有前途的处理非传统燃料的技术^[3],70年代时曾被广泛应用于固废处理领域,在全球范围内建设了20余座垃圾气化厂,但现已全部停产^[4]。气化技术最早在农业废物、污泥和废木料的处理方面得以应用,90年代起逐步被应用于生活垃圾、商业垃圾处理^[3-5]。

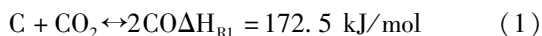
2 生活垃圾气化技术介绍

2.1 气化技术原理

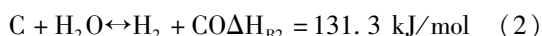
气化技术是在高温(通常550~1 000℃)和氧气不足的条件下转化有机物^[6]并产生混合气体的工艺。气化产物气(Syngas)主要由二氧化碳(CO₂)、一氧化碳(CO)、氢气(H₂)和甲烷(CH₄)等气体组成。常见的气化介质主要包括空气、富氧空气、水蒸气、二氧化碳和氮气等。

原料转化的主要方程见公式(1)、(2)和(3)^[7]:

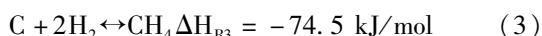
鲍多尔德反应:



水煤气反应:



甲烷化反应:



其中,鲍多尔德(Boudouard)反应和水煤气反应均需要在较高的温度下进行,其正方向反应吸热量大,在高于700℃时发生。Ahmed et al^[8]指出,采用CO₂作为气化介质在低于1 000℃的反应条件下,鲍多尔德反应方程为控制步骤。水煤气变换反应(公式(4))和甲烷重整反应(公式(5))是在过程中调整气化气H₂/CO比的重要环节。Chibane et al^[9]研究了在500~600℃温度区

间内,随蒸汽甲烷比(S/C)和温度的提高,H₂/CO比随之升高。Couto et al^[10]通过CFD模型对使用不同气化介质的系统进行研究,发现使用CO₂为气化介质时,提高CO₂浓度可提高垃圾中碳的转化率;使用蒸汽为气化介质的系统在700~850℃的温度区间中,提高气化反应温度可有效提高气化气中氢气含量^[11]。

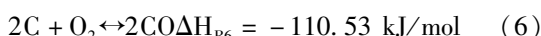
水煤气变换反应:



甲烷重整反应:



不完全燃烧反应:



原料转化反应除不完全燃烧反应(6)以外,主要由吸热反应完成,因此需要为反应提供一定热量,否则反应温度将降低最终导致反应停止^[3]。常见的气化系统热源来自内部适量的燃烧或外部热源。当反应温度低于理想温度区间,液化副产品量将增加,直观的反映即为焦油产量增加,气化气减少。气化过程产生的焦油含有大量PAHs和酚类等有毒物质,给运行人员带来安全风险,并且会阻塞管道和除尘器,降低产气率。

通过提高气化反应温度可以控制焦油的产生,Narvaez et al^[12]发现750℃以上的反应温度可有效降低焦油的产生量,Arena et al^[13]指出延长气化反应时间也有助于减少焦油的产生。另外,提高气化反应空气供给量以利用氧气破坏焦油的烃类物质^[14]或增加水蒸气以促进重整反应都可降低焦油转化率^[15]。

2.2 生活垃圾气化技术

在最近的20多年间,出现了多种商业化的生活垃圾气化技术。目前,全球范围内有超过100台在运行的垃圾气化设备,大多数规模不超过160 t/d。日本是最先大规模应用生活垃圾气化技术的国家。由于日本政策要求生活垃圾在生产源辖区范围内处理,安装的气化设备平均处理规模仅为7万 t/a,比欧洲在运行的设施总体偏小^[16]。生活垃圾气化技术主要有以下类型。

2.2.1 固定床气化技术 固定床气化炉可分为

上吸式和下吸式。在上吸式气化炉中,生活垃圾通常由炉体上部进料,空气由炉体底部进入,依次通过堆体的反应区、还原区、热解区和干燥区。随着热解气化的进行,燃料中的有机质气化,剩余部分形成焦炭,在炉体底部与空气中的氧气进行反应并产生热量,供上方物料干燥与气化,燃尽的灰渣从底部排出。下吸式气化炉同样为上部进料,空气则从气化炉顶部或中部进入,炉体中燃料和气化介质及气化气的运动方向一致。气化气在离开炉体前通过灼热的焦炭层,使得气体质量明显好于上吸式气化炉^[17]。新日铁公司转化冶金炉技术应用于垃圾气化,采用富氧空气为气化介质;生活垃圾需预先混入约5%的焦炭,为反应提供额外的还原剂,并添加约5%生石灰,调节熔融物质的粘度,使之可从底部流出气化炉。瑞士赛默斯莱德公司(Thermoselect S. A.)开发的炉型采用纯氧作为气化介质,在日本已有多项在运行项目,并为德国卡尔斯鲁厄市(Karlsruhe)的垃圾气化厂提供设备,部分项目气化气提纯后作为产品出售。

2.2.2 沸腾床气化技术 沸腾床气化炉技术,气化介质由炉体底部的布气盘以超临界的气流速度鼓入,使炉内混合石英砂的垃圾形成流动状态^[18]。在这种状态下,气固间形成高效的传质传热。这种炉型内部没有活动部件,运营维护相对简单。进料位置通常略高于床层,气化反应区覆盖床层和沸腾层。沸腾床气化炉运行温度通常不高于900℃,避免烧结和灰渣熔融堵塞气孔,导致设备故障。日立造船和神钢环境设计的沸腾床气化炉后接熔融炉,利用气化气燃烧融化飞灰制成玻璃体炉渣。

2.2.3 循环流化床气化技术 流化床气化炉气化介质的流速高于沸腾炉,达到粒子终端速度以上,使炉物料随气流离开炉床形成快速流化状态,气化炉出口须接一套分离设备(如旋风分离器),将分离出的固体送回气化炉,以保证平稳运行。这种状态下,炉膛内混合石英砂的垃圾与气化介质形成较均匀的混合状态,为传递过程与气化反应提供理想的条件。该炉型进料口通常设置在炉体侧面,运行温度控制在900℃以下,避免烧结和

灰渣熔融堵塞气孔,导致设备故障。芬兰美卓动力公司(Metso Power)在芬兰拉赫蒂市(Lahti)建设了一座热电联产垃圾气化厂,配置2条生产线,处理SRF和RDF(处理经分选的家庭垃圾、工业垃圾、废木料等),发电装机容量50 MW,供热能力90 MW,已于2012年投入运行^[19-20]。

2.2.4 回转窑气化技术 回转窑技术应用比较广泛,是一种经历大量实践验证的稳定可靠的技术。回转窑气化炉通过炉体的转动,将物料送入高温反应区并将反应后的物料排出炉体,在此过程中物料随炉体转动而翻滚混合,与气化介质接触。回转窑炉体通常为钢制炉筒衬耐火材料。回转窑气化炉可用于处理市政垃圾、污泥以及危废等多种废料。Kern et al^[18]在奥地利的一座3MW外热源回转窑热解炉对小麦秸秆热解气化进行了研究,发现在450~600℃的运行温度下,系统效率可达到67%。日本三井造船公司(Mitsui Engineering & Shipbuilding)的回转窑技术,控制物料在450℃,氧气不充足的环境下停留约1 h,气化气降温至150℃分离可回收的组分后送入锅炉焚烧发电^[21]。

2.2.5 机械炉排气化技术 机械炉排炉广泛应用于垃圾焚烧系统,随着近些年的研究进展,此类技术在垃圾气化领域也得以应用。挪威恩纳哥思公司(Energos)利用机械炉排炉技术开发的气化系统由气化炉和焚烧室两个主要单元组成,中间产品气化气直接进入焚烧室,通过锅炉回收热量,该设计提高了气化系统对燃料的兼容性^[17]。加拿大普拉斯科能源公司(Plasco Energy Group)的等离子气化熔融系统采用机械炉排气化炉,处理未经过分选的原生市政垃圾。气化气经催化裂解和净化处理后,供通用电气颜巴赫(Jenbacher)燃气机发电。

2.2.6 等离子气化技术 等离子垃圾气化技术,利用等离子体的高温和催化活性处理各类固体废物及工艺副产物。等离子根据温度分为高温等离子体和低温等离子体,高温等离子体所有物质均处于4 000~20 000 K的高温;低温等离子体电子温度高于离子温度,又高于中性气体温度。等离

子气化技术是利用外热源提供气化反应高温的环境^[18],大部分技术使等离子火炬直接接触垃圾,利用高温使物料快速气化,炉渣则在高温环境下融化形成玻璃体物质。另一部分采用等离子间接气化垃圾,使气化过程不完全依赖于等离子体的热量,以提高能量回收效率。

3 气化技术研究的国内外现状

目前市面上存在多种垃圾气化技术,相关的研究所针对的均不是大宗生活垃圾^[6,21-23]。

Caton et al^[24]针对美国海军军官学校的厨余垃圾气化处理方案开展研究,该案例中厨余垃圾的月产量约为43.7 t,平均含水率为71.3%,平均热值为21.7 MJ/kg(dry)。经计算分析,通过热解气化,每月可减少约6 400 m³天然气用量。Lopes et al^[25]则研究了生活垃圾气化发电技术的前处理措施对发电效率的影响,结果表明未分类的原生垃圾(有机质含量约为40%~60%)与筛分后的垃圾(有机质含量约为10%)相比,热值从8 373 kJ/kg上升至17 500 kJ/kg,意味着在热效率为93.1%条件下,每吨垃圾可多获得约8 496.7 MJ能量。

掺混生活垃圾气化技术在欧洲等地区已得到较广泛的研究和应用,通过控制掺混的比例可有效的控制气化炉中燃料的湿度和热值^[26],可运用于大型煤气化炉或生物质气化炉,然而项目的商业模式需要进一步研究。

而国内目前在垃圾气化方面的研究,着重于不同气化炉技术对不同组分垃圾的适应性及相关控制参数的优化。目前我国生活垃圾的主要成分是食品、塑料和纸类^[27]。左禹等通过小型固定床聚乙烯热解实验发现,聚乙烯热解反应速率随温度升高而迅速增大。在510~800℃温度范围内,产气率、碳转化率和热效率均随着温度升高而增大,但气化气的热值与温度并不是正相关关系,而是在600~700℃之间出现最大值后逐步下降^[28]。而对于混合塑料,不同物质对气化产物、气化反应温度和气化速率均有影响^[29]。肖刚等通过自行设计的流化床热解气化试验装置对处理

废纸的反应条件和产物特性进行分析,发现废纸最佳热解温度为600~700℃,此时,热解产物中热解气占55%~65%,热解油占25%~30%,焦炭占15%~20%^[30]。对于不同垃圾成分的热解特性的研究,有助于进一步研究生活垃圾的热解特性。

综合上述几个试验可以看出,对气化效果产生重要影响的除了温度之外,过量空气系数也是一个不可忽略的因素。如肖刚等指出对于废纸热解,在700℃、过量空气系数为0.2时,气化气热值最高;在700℃、过量空气系数为0.6时,气化效率最高;气化气产率与反应温度无关,与过量空气系数线性相关^[30]。

3.1 气化技术在生活垃圾处理中的应用

3.1.1 国外案例 ①芬兰案例。芬兰的伊纳里萨米(Kymijärvi)二期垃圾气化厂是一个十分典型的工程案例,是目前世界范围最大的垃圾气化系统^[21],也是芬兰境内唯一的垃圾气化厂。该项目年处理能力25万t,于2012年开始运行,进炉物料全部为经处理后的RDF。项目采用2台芬兰本土的美卓(Metso)公司提供80 MW(垃圾)循环流化床气化炉,气化气降温至400℃通过陶瓷滤料净化处理后,送入1台锅炉焚烧,蒸汽参数540℃,121 bar,尾气通过中温催化脱硝、小苏打干法脱酸、粉末活性炭吸附及布袋除尘器组合工艺的烟气净化系统后经烟囱排入大气。项目安装西门子SST 800 Tandem汽机和60 MVA发电机,项目供热主管道口径为DN800。项目设计参数中,垃圾热值为18~24 MJ/kg,垃圾含灰量为5%~15%,锅炉蒸发量为183.6 t/h,发电效率31%。年运行总时间可达约80%。项目总投资1.60亿欧元^[31]。

进场垃圾需通过以下处理生产气化炉进料:进场工业能源垃圾(energy waste)经过破碎,通过机械筛选设备分离去除不可燃组分;生活垃圾则需要通过一系列的分选工艺,去除生物可降解组分、矿物组分、金属、不可燃物质。经处理后的入炉RDF低位热值(LHV)为19~23 MJ/kg。

②日本案例。日本是生活垃圾气化技术应用最广泛的国家之一,截至2013年,全国共有122

座垃圾气化厂在运行。新日钢铁的气化系统市场占有率最高,新九州垃圾气化厂即采用该公司提供的工艺系统。该项目配置 3 条 240 t/d 气化处理线,年处理能力 21.6 万 t。该项目采用固定床上吸式气化炉,气化原料为混合焦炭和石灰石的生活垃圾。气化介质为含氧量 36% 的富氧空气。进入气化炉的物料通过 200 ~ 300 ℃ 的干燥段、300 ~ 1 000 ℃ 气化段和超过 1 000 ℃ 的燃烧段,最终掺入垃圾的焦炭和未燃尽碳落入炉底,与鼓入的富氧空气进行放热反应,形成 1 800 ℃ 的熔融区,使灰渣熔融并彻底破坏未反应的有机物。石灰石在炉体的上部区域具有一定的脱除酸性气体功能,未反应的石灰石可以降低炉底部熔融区物料的粘度。气化气经旋风分离器脱除部分颗粒物后送入焚烧炉焚烧,锅炉蒸汽参数为 400 ℃, 3.92 MPa。气化厂配置 23.5 MW 凝气式汽轮机, 全厂热电转化效率 23%。烟气净化系统采用干法脱酸、布袋除尘器和催化脱硝系统^[21]。根据计算,项目的入炉物料热值为 12.26 MJ/kg。

3.1.2 国内案例 生活垃圾气化处理技术在中国已活跃多年。2000 年以后,随着垃圾处理行业的发展,部分经济发达地区的城市引进了生活垃圾气化处理工艺。但目前,我国仅有少量规模较小的生活垃圾气化炉还在运行,部分项目回收热量仅用于供热,部分生活垃圾气化厂已被生活垃圾焚烧厂替代。

加拿大某公司曾为国内的几个项目提供生活

垃圾气化处理设备,采用气化炉接二燃室的工艺,通过锅炉产生蒸汽发电。烟气净化系统则采用干法配布袋除尘器的工艺。2005 年投入运行的广东某生活垃圾气化项目,共配置四条 200 t/d 的生产线,总投资 2.9 亿人民币。2014 年,为确保平稳运行,四条线均技改为生活垃圾焚烧系统。

浙江某公司拥有自主研发的专利技术,采用立式上吸式气化炉,通过驱动炉排使物料在炉内翻转,优化炉内布料。气化介质采用富氧空气,气化气直接进入二燃室进行焚烧处理。该技术案例较少,浙江某生活垃圾气化厂,处理规模 25 t/d, 总投资 2 397 万人民币,用于处理部分岛上的生活垃圾。

3.2 小结

生活垃圾气化技术的国外诸多应用案例中,进料绝大多数为分选后的生活垃圾,另有部分为 RDF、SRF、混掺煤、生物质或废塑料等高热值物料。垃圾气化项目常见工艺流程为气化炉接二燃室,直接焚烧气化气,通过锅炉回收热量,末端安装有烟气净化系统;也有少量项目在气化炉后接气化气净化系统,将其处理至符合后端工艺系统要求后,再回收能量。根据部分在运行项目公示的烟气排放数值,污染物排放能够满足当地的排放标准。污染物达标排放是气化技术得以推广的重要前提,国外生活垃圾气化系统项目尾气排放参数,见表 1^[21,24]。

表 1 国外生活垃圾气化系统项目尾气排放参数

项目	颗粒物 /mg·Nm ⁻³	SO ₂ /mg·Nm ⁻³	HCl /mg·Nm ⁻³	NO _x /mg·Nm ⁻³	CO /mg·Nm ⁻³	二噁英及呋喃类 /ngTeq·Nm ⁻³
丰桥 (Toyohashi)	1.1	<3.2	<1.8	33	2.8	0.008 1
福山 (Fukuyama)	1.1	3.1	—	84.3	4.1	0.000 059
北九州 (Kitakyushu)	11.1	95.2	54.3	109.1	41.6	0.1
渥太华 (Ottawa)	0.77	31.2	0.45	61.3	0.34	0.001

注:排放指标数据为 11% 含氧量的标态干烟气情况下的数值。

我国生活垃圾气化工程案例较少,在运行的气化设施单台炉处理规模大多不超过 100 t/d。不同于国外项目,我国生活垃圾气化工程的入炉

物料以原生生活垃圾为主。气化气多直接焚烧并通过锅炉回收热量。

4 讨论

气化过程是吸热过程,需要提供不间断的热量以维持反应。若采用外源热量可维持系统的稳定运行,但运行费用增加。通过部分燃烧释放的热量,为反应供能,则可减少运行中可变成本费用,降低项目经营的经济压力。但该方案也同样存在着不足之处:首先,要求垃圾组分和热值十分稳定,这样系统方能稳定运行,产生品质稳定的气化气;其次,气化系统的复杂性提高,连续运行过程中对燃烧空气参数、停留时间、反应温度、湿度等参数的控制矩阵更为复杂,系统的设计、运行水平优劣将成为系统能否稳定运行的关键因素;第三,我国原生生活垃圾低位热值(LHV)的平均值约为 $5\,337\text{ kJ/kg}^{[30]}$,波动范围在 $5\,000\sim7\,000\text{ kJ/kg}$ 之间,经济发达地区可能更高,而部分农村地区垃圾热值低于 $3\,000\text{ kJ/kg}$,与国外入炉垃圾热值差距明显。为了提高物料热值,为生活垃圾气化系统配备垃圾分选或预处理系统是十分有必要的,但同时也会增加处置设施占用的土地面积和总投资。

荷兰某生活垃圾焚烧处理二期项目的吨投资约为14万欧元,伊纳里萨米二期垃圾气化厂(不含预处理设施)的吨投资为196万人民币,国外气化处理项目的建设投资远高于垃圾焚烧处理项目。而同时我国生活垃圾气处理的吨投资约为35~50万人民币,与生活垃圾焚烧项目相近。综合考虑垃圾预处理系统和气化系统的折旧、外部热源消耗、副产物处理及其他运行成本,生活垃圾气处理的总运行成本不低于卫生填埋或垃圾焚烧处理。我国的垃圾处理费率、设备加工水平和运行管理水平均和发达国家应用生活垃圾气化技术的项目存在一定的差距,即使部分外国气化发电系统能源转化效率(27%~32%)高于垃圾焚烧发电项目(20%~26%),但生活垃圾气化项目在国内的推广仍有一定阻力。

5 结论与展望

我国生活垃圾处理遵循“减量化、资源化和无

害化”原则,生活垃圾填埋技术和焚烧处理技术得到广泛应用。生活垃圾气化技术因能量转化效率高和尾气量低的特点,在国际市场具备一定的竞争力,但在国内的发展明显落后于日本和欧洲。纠其主要原因在于在国内的工程实际应用中,生活垃圾气化仍存在一些技术和经济性方面的问题,如:建设垃圾预处理设施的投资、预处理筛出物的处置、大规模垃圾气化系统的可靠性及运行维护的技术难度。

我国入炉垃圾的热值明显低于国外同类项目,对项目的运行的稳定性和污染物的达标排放存在影响。在提高入炉物料热值方面,一方面建议对原生垃圾进行筛分和预处理设施,另一方面建议加强垃圾源头的分类,特别是干湿垃圾的分类,对于提高原生垃圾的热值是十分有利的。另外掺混垃圾处理也是一种可行的提高入炉物料热值的方法。提高入炉垃圾热值,同时也有利于污染物排放的控制。

如何在保证系统稳定运行的前提下,扩大生活垃圾气化的单炉处理规模,是未来生活垃圾气化技术研究的重点之一。中国的城市规模不断变大,生活垃圾处理设施的规模越来越大,生活垃圾气化技术在处理规模方面的局限性,限制了其进一步推广应用。

另外气化技术中等离子气化熔融技术的发展,逐渐展示出新的市场竞争力。国内外的生活垃圾处理和危险废物及工业废物处理领域逐渐对等离子气化熔融技术的关注程度逐渐提高,对于高温、高催化活性的等离子体的应用的研究将会有助于垃圾气化处理行业的发展。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年环境统计年报[EB/OL]. [2018-02-10]. http://www.zhb.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/hjtjnb/201702/P020170223595802837498.pdf.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 2012 年环境统计年报[EB/OL]. [2018-02-09]. http://www.zhb.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/hjtjnb/201605/U020160604811411624315.pdf.
- [3] Klinghoffer N B, Castaldi M J. Waste to energy conversion technology [M]. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.
- [4] Foth Infrastructure & Environment, LLC. Alternative technologies for

- municipal solid waste[R]. Lake Elmo, MN: Foth Infrastructure & Environment, LLC, 2013.
- [5] Lombardi L, Carnevale E, Corti A. Analysis of energy recovery potential using innovative technologies of waste gasification[J]. Waste Management, 2012, 32: 640 – 652.
- [6] Campoy M, Gómez – Barea A, Ollero P, et al. Gasification of wastes in a pilot fluidized bed gasifier[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 121: 63 – 69.
- [7] Higman C, Burgt M. Gasification 2nd Edition[M]. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2008.
- [8] Ahmed I I, Gupta A K. Kinetics of woodchips char gasification with steam and carbon dioxide[J]. Applied Energy, 2011, 88: 1613 – 1619.
- [9] Chibane L, Djellouli B. Methane steam reforming reaction behavior in a packed bed membrane reactor[J]. International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2011, 2: 147 – 156.
- [10] Couto N, Silva V, Rouboa A. Municipal solid waste gasification in semi – industrial conditions using air – CO₂ mixtures[J]. Energy, 2016, 104: 42 – 52.
- [11] Couto N, Silva B V, Rouboa A. Assessment on steam gasification of municipal solid waste against biomass substrates[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 92 – 103.
- [12] Narvaez I, Orio A, Aznar M P, et al. Biomass gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed. Effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1996, 35: 2110 – 2120.
- [13] Arena U, Zaccariello L, Mastellone L M. Tar removal during the fluidized bed gasification of plastic waste[J]. Waste Management, 2009, 29: 783 – 791.
- [14] Kinoshita C M, Wang Y, Zhou J. Tar formation under different biomass gasification conditions[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1994, 29: 169 – 181.
- [15] Devi L, Ptasinski K J, Janssen F J J G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification process[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 24: 125 – 140.
- [16] Suzuki A, Nagayama S. High efficiency WtE power plant using high-temperature gasifying and direct melting furnace[R]. In: Proceedings Sardinia 2011, 13th Int. Waste Management and Landfill Symposium, CISA Publisher, Cagliari, Italy, 2011.
- [17] Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review [J]. Waste Management, 2012, 32 (4): 625 – 639.
- [18] Kern S, Halwachs M, Kampichler G, et al. Rotary kiln pyrolysis of straw and fermentation residues in a 3 MW pilot plant – Influence of pyrolysis temperature on pyrolysis product performance[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012, 97: 1 – 10.
- [19] Sanlisoy A, Carpinlioglu M O. A review on plasma gasification for solid waste disposal[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 1361 – 1365.
- [20] Savelainen J, Isaksson J. Kymijärvi 2 Plant – High efficiency use of SRF in power production through gasification[R]. Power – Gen Europe, 2013.
- [21] WSP. Review of state – of – the – art waste – to – energy technologies [R]. London: WSP, 2013.
- [22] Couto N, Silva V, Rouboa A. Thermodynamic evaluation of portuguese municipal solid waste gasification[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 622 – 635.
- [23] Thakare S, Nandi S. Study on potential of gasification technology for municipal solid waste (MSW) in Pune City[J]. Energy Procedia, 2016, 90: 509 – 517.
- [24] Caton P A, Carr M A, Kim S S, et al. Energy recovery from waste food by combustion or gasification with the potential for regenerative dehydration: A case study[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 1157 – 1169.
- [25] Lopes E J, Okamura L A, Maruyama S A, et al. Evaluation of energy gain from the segregation of organic materials from municipalsolid waste in gasification processes[J]. Renewable Energy, 2018, 116: 623 – 629.
- [26] Ramos A, Monteiro E, Silva V, et al. Co – gasification and recent developments on waste – to – energy conversion: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2018, 81: 380 – 398.
- [27] 周翠红, 路迈西, 吴文伟. 北京市城市生活垃圾组分预测[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(5): 37 – 40.
- [28] 左禹, 丁艳军, 朱琳, 等. 小型固定床试验台条件下的聚乙烯热解[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(11): 1544 – 1548.
- [29] 袁浩然, 鲁涛, 熊祖鸿, 等. 城市生活垃圾热解气化技术研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(2): 421 – 427.
- [30] 肖刚, 池涌, 倪明江, 等. 纸类废弃物流化床热解气化研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 161 – 164.
- [31] RICARDO – AEA. Case Study for Zero Waste South Australia; Case Study 1[R]. RICARDO – AEA, 2013.