

废弃物资源化协同处理低碳技术路径探讨

刘建文¹ 杨英¹ 符攀超¹ 王慧明¹ 陈楠²

(1. 湖南工业大学 建筑与城乡规划学院 湖南 株洲 412007; 2. 株洲市蓝宇节能环保实业有限公司 湖南 株洲 412008)

摘要: 废弃物的能源资源循环化利用是低碳生态城市建设的核心和关键。通过能源资源环境协同一体化循环经济模式的可行性分析,提出以能源环境协同一体化循环经济模式理念,建设城市反应器、净化器、消纳器系统集成的低碳市政设施,重点阐述了有机废弃物厌氧协同消化系统集成、层-悬浮复合燃烧水煤浆锅炉协同处理、水泥回转窑协同废弃物资源化处理等关键低碳技术。这些技术利用协同-集成技术理念,实现废弃物资源化、无害化,具有项目投资省、应用前景广、系统节能环保等特点,将有力推进我国低碳生态城市建设,促进可持续发展。

关键词: 低碳生态城市; 能源资源; 协同; 一体化; 循环经济

中图分类号: X7 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2014)05-0014-06

Low-carbon pattern of municipal waste resourceful treatment

LIU Jianwen¹, YANG Ying¹, FU Panchao¹, WANG Huiming¹, CHEN Nan²

(1. College of Architecture and Urban Planning Hunan University of Technology Zhuzhou 412007, China;

2. Lanyu Energy Environmental Protection Co., Ltd. Zhuzhou 412008, China)

Abstract: Municipal waste resourceful treatment is the core of low-carbon eco-city construction. Through feasibility analysis of the circular economy pattern about the collaborative integration of energy-resources-environment, propose the collaborative integration of energy resources and environmental model concept of circular economy to construct low-carbon municipal facilities of urban reactors, purification, consumptive system integration. Focus on the collaborative of organic waste anaerobic and digestive system integration, the co-processing of layer-suspension of composite burning coal boiler, the collaborative of cement kiln and wastes recycling, and other key low-carbon technologies. These techniques using the concept of coordination-integration technology, recycled the waste resource harmlessly. The project with low cost, energy saving, environmental protection characteristics, had broad application prospects. These technologies will promote China's low-carbon eco-city construction and sustainable development.

Key words: low-carbon eco-city; energy resources; collaborative; integration; circular economy

0 引言

资源循环利用是实现城市健康发展的有效途径,是低碳生态城市建设的本质特征。废弃物资源化利用是中国城市可资利用的低碳城市政策和技术关键行业之一^[1]。叶立梅^[2]表示,中国之前的城市发展,大多注重消费环节,对于消费之后的资源回收利用问题没有太多重视,但现在的城市发展,循环利用以及生态环保的理念已被广泛认可。尤其是对于

城市废弃物处理低碳化是西方城市关注的重点之一,但在中国尚未引起足够重视。尽管《循环经济发展战略及近期行动计划》围绕加快经济发展方式转变,努力形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式、生活方式做出了战略部署和工作安排,但对城市废弃物资源化利用的循环经济基本模式并没有提供科学、可行的模式。因此,开展城市废弃物资源化协同处理处置,构建低碳生态城市能源资源环境协同一体化循环经济模式,对指导低碳

收稿日期: 2014-04-30; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.05.004

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(12JJ9035); 湖南工业大学社会科学研究资助项目(2011HSX30)

作者简介: 刘建文(1964—),男,湖南衡山人,教授,博士,主要从事低碳技术、产业经济、环境工程的研究。E-mail: 1194669770@qq.com

引用格式: 刘建文,杨英,符攀超,等.废弃物资源化协同处理低碳技术路径探讨[J].洁净煤技术,2014,20(5):14-19.

LIU Jianwen, YANG Ying, FU Panchao, et al. Low-carbon pattern of municipal waste resourceful treatment[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 14-19.

生态城市建设和国家循环经济城市示范的规划和建设,具有重要的理论意义与实践意义。

1 能源资源环境协同一体化循环经济模式的可行性

城市生活污水、城市生活垃圾在传统意识里是城市环境污染物,随着经济的快速发展、城市化的不断提升和人民生活水平的提高,这种所谓的“环境污染物”产生量越来越大,造成对城市生态环境的严重威胁。按环境工程理念对城市生活污水、城市生活垃圾进行末端治理,与当前低碳生态城市建设的要求很不相称。

2009年10月18—22日于葡萄牙波尔图举行的第45届世界规划大会——葡萄牙“低碳城市”会议,发表了低碳城市七大关键要素声明,其中第五点关键要素明确了要将土地利用、交通、能源和废弃物规划整合到空间规划中,充分考虑生物多样性和物种保护,并高效进行水资源管理,统筹社会、经济和环境三方面的可持续发展。城市废弃物(包括液态的工业有机废液、城市生活废水和城市生活垃圾,尤其是环境难以降解的塑料包装废弃物)的资源化、能源化在国外低碳生态城市建设中,非常受重视,并且实现了能源、资源与环境发展的协调一致;中国学者在规划研究层面也非常关注这个问题,但具体的低碳生态城市实践中,并未得到应有的重视。

尽管循环经济的发展及其循环经济发展模式的构建已逐渐从企业层面、行业层面,走向园区层面和区域层面,乃至国家和全球层面(如核废料的处理处置)。但与人民生活密切相关的生活垃圾、生活污水等这些面广、量大、高产的废弃资源在中国并没有受到应有的关注和切实的处理。而这些废弃物均可通过技术变废为宝,如工业有机废液、城市生活废水采用高效厌氧消化可以获得沼气和再生水;污泥与城市生活垃圾以及其他有机固体废弃物,采用混合浆化后再厌氧消化,可以获得清洁的沼气能源;厌氧消化后的固体物质可以进一步高温堆肥反应,获得生物有机肥;再生水源进一步经过好氧生物处理,降解COD(化学需氧量),达到绿色、景观用水的中水回用要求,实现水资源循环利用。因此,现代技术创新完全能够实现有机污水、固体废弃物的资源化、能源化循环利用。

从废弃物资源化的优选方案角度考虑,最优方案是依托城市反应器(厌氧生物反应器、高温好氧堆肥、膜生物反应器等)实现有机废弃物(含废液、废固)的资源化、能源化,其次是依托城市净化器(生物质水煤浆炉、层-悬浮协同燃烧废弃物、水泥回转窑协同处理可燃危险废弃物及工业锅炉炉窑高温燃烧协同处理有机废弃物)实现废弃物的能源化、无害化,最后是不能燃烧的无机物进入城市消纳器(固体无机废弃物建材领域的大宗用途如制砖、水泥及混凝土和卫生填埋)(图1)。

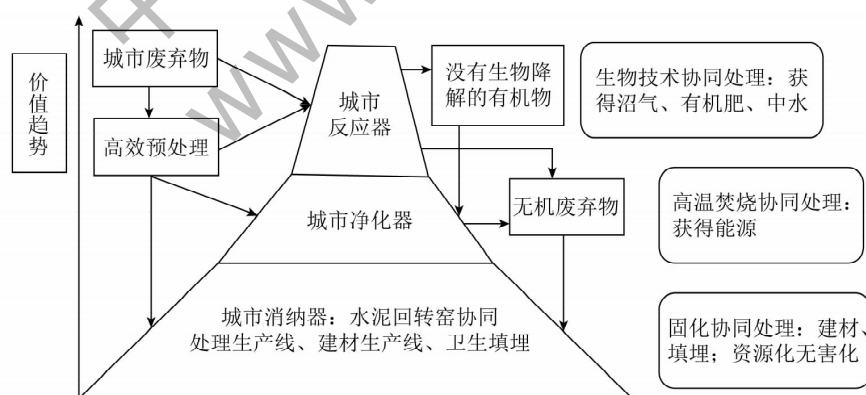


图1 低碳市政设施的金字塔技术方案示意

从低碳生态城市建设的循环高效资源能源利用体系考虑,以能源资源环境协同一体化循环经济模式理念,建设以城市反应器、净化器、消纳器为支撑的低碳市政设施,对推进低碳生态城市建设,促进可持续发展,具有非常重要的理论价值和实践意义。

2 能源资源环境协同一体化循环经济模式的构建

城市废弃物协同处理处置是针对城市有机废弃物(废水、固体废物),以循环经济为理念,用现代技术创新工艺系统构建的低碳市政设施,包括城市反

反应器、净化器和消纳器(图2),实现废弃物的资源化、能源化、无害化。城市反应器定义为,以厌氧消化协同处理技术,集成高温好氧堆肥技术、好氧生物水处理技术和现代膜生物反应器技术构建的系统生物反应器,实现有机废液、有机固体废弃物的资源化。城市净化器定义为,以高温焚烧协同处理技术,包括层-悬浮水煤浆锅炉协同处理技术、水泥回

窑协同处理技术及其工业锅炉、炉窑协同处理技术,及其预处理系统构建的系统净化器,实现高浓度难降解有机废液、生物质固体废弃物和有机固体危险废弃物的能源化无害化。城市消纳器定义为,以水泥回转窑协同处理生产线、建材生产线和卫生填埋场及其辅助工艺系统构建的大宗固体废弃物处理处置系统,以实现大宗无机废弃物的资源化无害化。

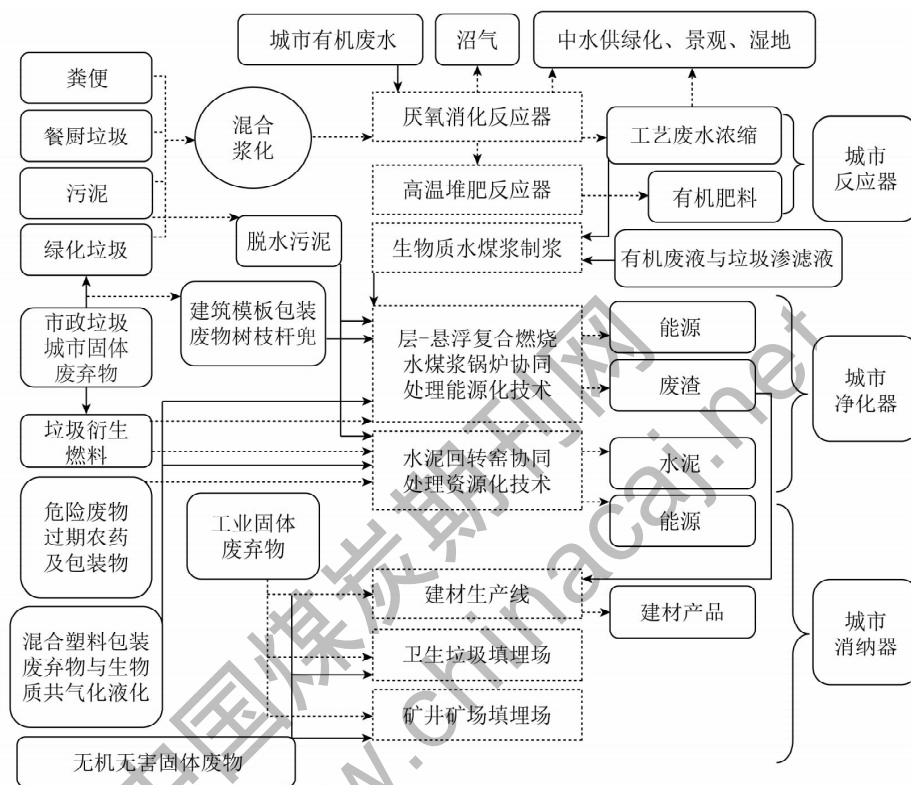


图2 能源资源环境协同一体化循环经济模式

城市反应器、净化器、消纳器的系统集成原理是城市反应器产生的微生物降解的有机物供净化器继续能源化处理,城市反应器产生的无机废弃物与城市净化器产生的灰渣等固体废弃物供城市消纳器,实现最终的大宗固体废弃物建材、水泥应用消纳处理或卫生填埋场无害化处置。最终构建城市反应器、净化器、消纳器的集成系统,实现能源资源环境协同一体化循环经济模式(图2)。

3 能源资源环境协同一体化循环经济模式构建的关键低碳技术

能源资源环境协同一体化循环经济模式构建的低碳生态城市、低碳市政设施,包括城市反应器、城市净化器和城市消纳器,创新的核心理念在于循环经济模式和协同处理技术,关键技术包括有机废弃物厌氧消化系统集成技术,层-悬浮复合燃烧水煤

浆锅炉协同处理技术,水泥回转窑协同处理技术和建材生产线、卫生填埋场。其中,大宗固体废弃物的建材化利用(制砖、水泥及其混凝土)技术成熟,卫生填埋场消纳无机固体废弃物安全、可靠,本文不作重点介绍。

3.1 有机废弃物厌氧协同消化系统集成技术

目前,厌氧消化技术在世界各地广泛应用,每吨垃圾处理费用与传统的好氧堆肥相当,但其综合效益更优。主要体现在:第一,生物气用来发电或供热以及优质卫生肥料具有良好经济效益;第二,最大限度地循环利用垃圾中的可用成分,大大减少了温室气体(CO_2 和 CH_4)、臭气、液体的排放等,避免二次污染,具有良好环境效益。城市生活垃圾中的纸类、塑料、织物、金属等被分拣回收利用后,主要剩余的动物有机废弃物(含水量高达80%左右极易腐烂)除其木质素外都可以厌氧消化降解。而中国城市垃

圾领域尚无采用厌氧消化技术的大型处理厂,因此,其将是一项具有良好前景的有机垃圾处理技术。

有机废弃物分级分相厌氧消化集中协同处理技术,是北京中持绿色能源环境技术有限公司为实现有机废弃物的综合处理处置,满足无害化、减量化、稳定化、资源化的要求,开发的针对有机废弃物的协同厌氧消化系统,从而可以有效实现有机废弃物的综合解决和资源利用(图3)。

所谓分级分相,即在不同温度级,呈现不同生物相,第一段为高温(55℃)水解酸化阶段;第二段为中温(35℃)产甲烷菌阶段。温度分级是分级分相厌氧消化组合技术的关键技术之一,采用高温水解可使进入厌氧消化池的有机质固体含量由传统厌氧消化中的3%~4%提高至8%~12%,意味着在同样厌氧消化池容情况下,总有机负荷量可增加1倍。分级分相厌氧消化与传统的厌氧消化相比,具有节约投资成本,增加运行管理的灵活性;CH₄产量可以增加30%;针对不同有机废弃物进行预处理(如餐厨垃圾在进入消化池前需进行分拣、隔油、破碎;污泥需要进行破壁,增加细胞内有机物溶出率,以增加后期沼气产量;粪便也需要进行分拣、挤压)等诸多优点。

有机废弃物综合解决及生物质能开发利用服务的技術特点是:①污泥、餐厨垃圾、粪便、绿化垃圾、过期变质食品的有机废弃物协同厌氧消化;②根据不同的物料特性设置针对性的预处理设施;③不同物料的协同反应,提高厌氧消化系统有机物降解率和产气率;④回收净化利用生物质能;⑤消化剩余物进行土地利用;⑥消化液则可作为液体肥料进行综合利用。

3.2 层-悬浮复合燃烧水煤浆锅炉协同处理技术

层-悬浮复合燃烧水煤浆锅炉协同处理技术^[3-5]是株洲蓝宇热能科技研制有限公司自主开发的水煤浆系统产业链技术,依托公司核心自主创新知识产权的层-悬浮燃烧水煤浆锅炉,集成膜分离、功率超声处理与高效机械离心分离等绿色低碳技术,实现污泥、有机废液的能源、资源化利用。集成技术工艺可分为5个模块:有机废液的高效预处理模块、污泥的高效预处理模块、生物质水煤浆制浆模块、生物质水煤浆燃烧模块和净化水生化处理模块。

该技术的有机物协同处理及其资源化、能源化,主要体现在制浆与燃烧2个环节。制浆过程中,用

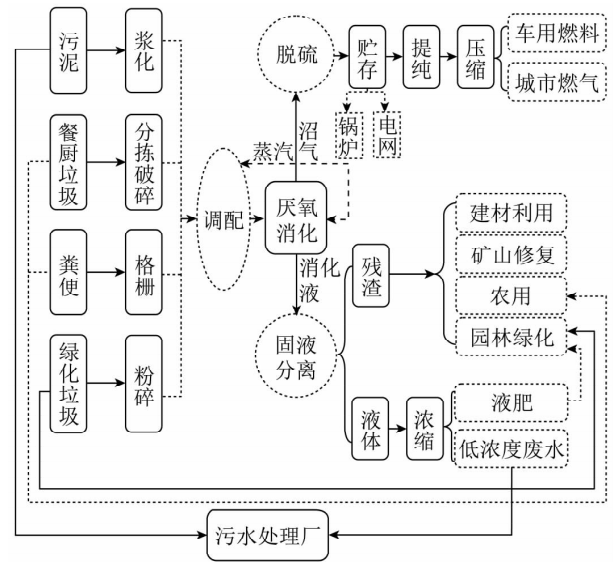


图3 有机废弃物分级分相厌氧消化集中协同处理技术工艺流程

有机废液、污泥取代清水制浆,既节约清洁水源,又能实现有机废液资源化、能源化;燃烧过程中,依托燃烧装备特有的燃烧室结构,能实现气、液、固3种形态物质的高效燃烧,可以在水煤浆燃烧过程中,协同燃烧及处理污泥、建筑废弃模板及其他生物质固体,实现可燃废弃物的高效资源化、能源化。

层-悬浮燃烧的技术原理是:锅炉采用层-悬浮设计,子炉膛为副燃烧室,母炉膛为主燃烧室,子炉膛兼具点火和负荷调节作用,炉膛采用特殊的配风设计,不需要安装鼓风机;主燃烧室底部有活动炉排,炉底配风,降低了炉底温度,不易结焦。炉膛不设挡火墙,有效避免水煤浆直接喷射上去引起的结焦问题。配有在线吹灰装置,可实现在线吹灰、除渣,无需停炉,不影响生产,保证锅炉长时间连续、稳定、可靠地运行。采用悬浮层状复合燃烧,水煤浆通过浆枪喷入炉膛,大部分雾化较细的浆粒悬浮在空中燃烧,小部分雾化较粗未燃尽的浆粒团散落在炉膛底部的炉排上以层燃方式进行二次燃烧,并通过炉排底部给风,使其充分燃烬。

层-悬浮燃烧技术具有如下特点:①免油点火,运行经济;②负荷调节范围大;③锅炉热效率高,燃料适应范围广;④连续稳定运行时间长;⑤锅炉运行的环保效果好。

层-悬浮复合燃烧水煤浆锅炉能协同处理液态、固态有机废弃物,创新点在于复合燃烧的炉膛结构,以及副炉膛的稳定燃烧,解决了传统垃圾焚烧炉温度场不均匀及燃料燃尽不充分问题。

3.3 水泥回转窑协同废弃物资源化处理技术

水泥窑协同处置废弃物在一些发达国家已经得到广泛地开展,达到了较高的水平,取得了良好的社会效益、环境效益和经济效益。国内外的理论和实践已经证明利用水泥窑协同处置废弃物是无害化、减量化和资源化处置危险废物和城市生活垃圾的重要技术途径,也是低成本化大规模处置(消纳)上述废弃物的重要措施。近年来中国水泥行业蓬勃发展,具备广泛处置危险废物和城市生活垃圾的物质条件。借鉴发达国家的先进经验,将废物处置与水泥工业的可持续发展结合起来,利用水泥窑协同处置废弃物,是较为适合中国国情的做法^[6]。

中国从20世纪90年代开始广泛开展利用水泥窑处置危险废物和城市生活垃圾的研究工作,如中美合作项目《水泥窑炉持久性有机污染物排放的检测及控制》、中挪合作项目《水泥窑炉协同处置废弃物技术指南》、中瑞合作项目《水泥窑炉处置过期农药》、北京市项目《北京市水泥厂水泥窑炉焚烧危险废物》、广东省项目《广州珠江水泥厂废弃皮革替代燃料》、其他地方政府项目《生活垃圾由水泥回转窑协同处理系统的研究》、《利用水泥回转窑处置城市污水处理厂污泥试验性研究及应用》、《城市垃圾焚烧飞灰无害化技术的研究》等。相关的国际合作项目注重学习国外的前沿科学技术,包括二噁英的控制和检测技术、废物协同处置的技术程序及管理体系。地方项目则是对具体种类的废弃物进行尝试性资源化综合利用,这些废弃物包括生活垃圾、污泥、焚烧飞灰等。

水泥窑协同处置工业废物(Industrial Waste Co-composition in Cement Kiln)系指通过高温焚烧及水泥熟料矿物化高温烧结过程实现工业废物毒害特性分解、降解、消除、惰性化、稳定化等目的的废物处置(处置:对废弃物的最终消纳。处理:对废弃物进行稳定化、减量化和无害化处理的过程)技术手段,彻底消除废弃物。根据水泥窑燃烧工况、焚烧温度以及中国每年生产5亿t水泥等技术参数,采用水泥回转窑协同处理处置废弃物具有以下优势^[7-10]:
①水泥工业可消纳的废物种类多,适用范围广;
②按照性能与特点,不同的废物可以分别用作水泥工业的混合材、替代原料或替代燃料,使物尽其用;
③水泥消费量和生产规模很大,水泥窑单机产能高,因此水泥工业对各种废物的消纳量巨大,发展潜力可观;
④水泥窑对各种可燃废物有很强的适应能力,略作

调整就不会影响水泥熟料的正常性能和质量,也不会影响窑的正常运行;
⑤水泥窑内温度高(1600℃),热容量和热惯性大,废料在高温区的停留时间长(5~15s),有害成分均能被彻底分解,确保环境安全;
⑥废物在水泥窑内燃烧后的残渣,其中若含硫、氯或某些重金属等有害物质,也都全部固熔在水泥熟料的晶格中不能再逸出或析出,没有二次污染;
⑦可燃废物在水泥窑内燃烧所产生的热能全部用于窑系统内的气固相或固熔相的热交换过程,热能传递交换效率高,是垃圾焚烧炉发电的6倍以上;
⑧水泥窑对可燃废物热值的适应范围大,尤其是对兼作替代原料和替代燃料的废物,如污水处理厂污泥和矸石等,其热值都能充分利用,水泥窑协同处理工业废物是当之无愧的“城市净化器”和“城市消纳器”^[11]。

工信部在“十二五”期间将着力推广水泥窑协同处置废弃物,《“十二五”规划纲要》将“支持水泥窑协同处置城市生活垃圾、污泥生产线和建筑废弃物综合利用示范线的建设”作为建材工业发展重点之一。“十二五”期间,着力通过试点示范,引导城市周边有条件的水泥企业有序转为城市“净化器”、“消纳器”,将水泥工业打造成兼顾水泥生产和废弃物无害化最终处置的功能产业。

4 结论与建议

1) 低碳生态城市建设中,高效循环的能源资源利用体系建设至关重要。城市废弃物资源化利用处理设施必须具备城市反应器、净化器、消纳器功能,3种设施功能互补,协同集成,构成当代城市废弃物处理完整的低碳市政生态基础设施;城市废弃物综合处理处置战略规划时,要充分利用已建成的水泥生产线、以层-悬浮复合燃烧水煤浆锅炉建成的分布式能源站或集中供热中心,协同建成城市反应器、净化器和消纳器,以实现区域废弃物协同处理处置。

2) 城市反应器包括可降解有机物的厌氧消化与好氧发酵(堆肥)等技术装备,尤其是厌氧消化技术,可实现有机废弃物的资源化能源化,应上升到国家低碳发展战略考虑;好氧发酵(堆肥)用以处理厌氧消化后的物料,实现有机物的最终自然回归。

3) 层-悬浮复合燃烧水煤浆炉协同处理有机废弃物,适用于大中型企业及工业园区分布式能源站建设,资源化能源化利用高浓度有机废液、污泥、

建筑废模板及可燃包装废弃物,是局部废弃物净化器,为可再生能源利用,多能互补分布式能源站提供了技术支撑。

4) 水泥回转窑协同处理处置城市废弃物或危险废弃物,兼具城市净化器与消纳器功能,适用于区域生活或市政垃圾、市政污泥、危险废物、塑料包装废弃物、废弃农药及其包装废弃物,是城市低碳、生态建设的技术支撑,应大力推广应用。

5) 能源资源环境协同一体化循环经济模式构建的城市反应器、净化器与消纳器系统集成协同处理处置系统,技术成熟、投资较小、环境安全可靠、已具有成功的工程运行经验,能实现废弃物的资源化与能源化,但须加强创新投资、管理与运作方式,进行产业链整合,协同管理,着力推进协同处理处置集成技术的规模化应用,促进低碳生态城市建设与可持续发展。

参考文献:

- [1] 蔡博峰,曹东. 中国低碳城市发展与规划[J]. 环境经济, 2010(12): 33-38.
- [2] 叶立梅. “智慧城市”之后“循环经济”城市正在崛起[EB/

(上接第13页)

经工业化。其中燃烧后烟气中 CO₂ 的捕集技术主要是以 MEA 为基础的胺法,其主要研究方向是提高效率,降低运行成本;另外需要考虑增加 CO₂ 捕集后对电厂效率降低的容忍程度。燃烧前的 CO₂ 捕集技术主要是应用于 IGCC 电厂,一般需要对煤气中 CO 进行部分变换,其变换程度也需要考虑电厂效率和运行成本,变换后脱碳可采用工业过程的成熟技术。富氧燃烧则是在中试成功的基础上,进行更大规模的工业示范。国内外大型煤制油化工项目主要采用低温甲醇洗脱除变换气中的 CO₂,如果设置 CO₂ 产品塔,则可以获得体积分数 98% 以上的 CO₂ 尾气,因此其捕集成本要低于从烟气中捕集 CO₂。天然气脱碳主要采用 MDEA 技术,同样需要考虑效率和运行成本问题。其他如低温法、PSA、膜分离等技术在各种 CO₂ 捕集方面也均有应用。化学链燃烧、离子液法及固体胺法等仍需要继续研发。

参考文献:

- [1] 白冰,李小春,刘延锋,等. 中国 CO₂ 集中排放源调查及其分布特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2919-2923.
- [2] Edward S. Rubin. IPCC special report on carbon dioxide capture

and storage [R]. Washington, DC: U. S. Climate Science Program Workshop 2005.

- [3] 刘建文,袁瑞佳,陈楠. 生物质水煤浆制浆燃烧集成系统技术经济分析[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(1): 88-92, 15.
- [4] 刘建文,袁瑞佳,陈楠. 生物质水煤浆技术 CDM 机制发展与碳减排评价[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(2): 112-116.
- [5] 刘建文,袁瑞佳,陈楠. 低碳生态城市建设中能源资源环境协同一体化循环经济模式探讨[C]//中国城市经济学会年会论文集. 北京: 中国城市经济学会, 2013.
- [6] 汪澜,徐迅,刘姚君,等. 我国利用水泥窑协同处置危险废物和城市生活垃圾现状[C]//中国水泥协会环保和资源综合利用专业委员会成立大会会议文集. 南京 [s. n.] 2011.
- [7] 高长明. 再论水泥回转窑的协同焚烧可燃废弃物的优越性与环境安全性[J]. 四川水泥, 2014(2): 35-38.
- [8] 水泥窑协同处置废弃物专题报道[EB/OL]. [2013-11-28]. <http://www.ccement.com/zhuanli/company/sjk/20131128/>.
- [9] 水泥窑协同处置废弃物——“十二五”最大的环保产业[EB/OL]. (2011-04-15) [2014-04-30]. <http://zt.snsqw.com/2011/snezqwl/>.
- [10] 高长明. 我国水泥窑协同处置可燃废弃物还缺哪些火候?[EB/OL]. [2013-01-18] [2014-04-30]. <http://gongyi.sina.com.cn>.
- [11] 郭凡,祁保全. 政府好帮手 城市净化器[J]. 中国建材, 2012(9): 86-89.
- [3] Galobal CCS Institute. 全球碳捕集与封存现状[R]. 巴黎: 国际能源署, 2014.
- [4] 国家高技术研究发展计划(863计划)先进能源技术领域专家组. 中国先进能源技术发展概论[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010: 330-364.
- [5] 刘连波,黄斌,郝时旺,等. 燃煤电站 3000~5000t/a CO₂ 捕集示范装置工艺及关键设备[J]. 电力设备, 2008, 9(5): 21-24.
- [6] 任相坤,张东杰,张军. 中国应对气候变化的政策和发展 CCUS 技术的努力[J]. 基石: 中文版, 2013, 1(4): 46-51.
- [7] Kuuskraa V, DiPietro P. 二氧化碳驱油: CCS 的主要驱动技术[J]. 基石: 中文版, 2013, 1(4): 40-45.
- [8] 郑力刚,谈晔华. 基于富氧燃烧的二氧化碳捕集技术[J]. 基石: 中文版, 2013, 1(4): 52-56.
- [9] 朱世勇. 环境与工业气体净化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [10] 郑晓鹏. 海上天然气田伴生 CO₂ 的海上捕集及回注技术[J]. 中国造船, 2007, 48(S1): 297-302.
- [11] 叶懋权,陈全福. 二氧化碳分离技术—石油伴生气处理工艺[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1990.
- [12] 孙浩,徐正斌. 松南气田天然气脱碳工艺技术研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 325-327.
- [13] 吴秀章. 中国二氧化碳捕集与地质封存首次规模化探索[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 161-169.