

燃煤电站耦合生活垃圾发电技术研究

王一坤¹, 贾兆鹏¹, 魏星², 邓磊³, 丹慧杰¹, 柳宏刚⁴, 蔡文博²

(1. 华能长江环保科技有限公司, 北京 100031;

2. 西安西热锅炉环保工程有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

4. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 燃煤电站耦合生活垃圾发电能够在低成本处理生活垃圾的同时实现碳减排, 是燃煤电站重要的发展方向之一。本文详细介绍了我国生活垃圾的特性及处理现状, 生活垃圾耦合发电模式, 并分析了耦合发电对燃煤机组制粉及燃烧系统、运行安全性、煤耗、环保特性和碳排放的影响。结果表明: 若生活垃圾重金属及 Cl 含量低、耦合比例小 (低于 10%), 建议选择直接耦合发电; 若生活垃圾重金属及 Cl 含量高、耦合比例大, 建议选择间接耦合发电; 并联耦合发电虽然不存在政策风险, 但经济性最差; 指出生活垃圾耦合发电目前存在缺乏相应的标准规范以及政策支持力度不够等问题。

[关键词] 燃煤锅炉; 生活垃圾; 耦合发电; 痕量元素; 二噁英; 二氧化碳减排
[中图分类号] TK6; X705 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfid.202103032

[引用本文格式] 王一坤, 贾兆鹏, 魏星, 等. 燃煤电站耦合生活垃圾发电技术研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 83-92.
WANG Yikun, JIA Zhaopeng, WEI Xing, et al. Study on power generation technology of coal-fired power station coupled with domestic waste[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 83-92.

Study on power generation technology of coal-fired power station coupled with domestic waste

WANG Yikun¹, JIA Zhaopeng¹, WEI Xing², DENG Lei³, DAN Huijie¹,
LIU Honggang⁴, CAI Wenbo²

(1. Huaneng Yangtze Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100031, China;

2. Xi'an TPRI Boiler & Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Coal-fired power plants coupled with domestic waste can achieve carbon emission reduction while processing domestic waste at low cost, which is an important development direction of coal-fired power plants in the future. This paper introduces in detail the characteristics and treatment status of domestic waste in China, as well as the coupled power generation model of domestic waste. Moreover, it analyzes the influence of coupled power generation on pulverizing and combustion system, operation safety, coal consumption, environmental protection characteristics and carbon emissions of coal-fired units. The results show that, the direct coupling power generation is recommended when the contents of heavy metals and Cl are low and the coupling ratio is small (less than 10%). Indirect coupling power generation is recommended when the contents of heavy metals and Cl are high and the coupling ratio is large. Although the parallel coupled power generation does not have policy risks, its economy is the worst. It points out that the domestic waste coupled power generation currently has problems such as lack of corresponding standards and regulations and insufficient policy support.

Key words: coal-fired boiler; domestic waste; coupled power generation; trace element; dioxins; CO₂ emission reduction

收稿日期: 2021-03-09

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ18-H09)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ18-H09)

第一作者简介: 王一坤(1982), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为生物质耦合发电、污泥及城市废弃物利用、锅炉机组运行优化, apolloking@163.com。

习近平总书记在2020年9月22日的联合国大会上承诺我国将在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和,这对我国的能源转型和CO₂减排提出了更高、更快的要求。根据相关统计^[1],2019年我国火电机组CO₂排放约838 g/(kW·h),与我国《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中的大型发电集团单位供电CO₂排放目标550 g/(kW·h)相距甚远。截至2020年12月底,我国投产发电的机组加上在建或规划筹建机组的装机容量总和(全口径)煤电装机容量10.8亿kW,占全口径总装机容量(22亿kW)的49.1%^[2-3]。虽然煤电装机容量低于50%标志我国电力能源结构已发生了根本改变,但电力行业的碳减排目标依旧任重道远。

生活垃圾作为人类活动过程中产生的废弃生物质资源,在碳减排方面有得天独厚的优势。借助现有燃煤电厂的发电设备和超低排放环保设施进行生活垃圾耦合发电,能够在发挥清洁高效煤电污染物集中治理平台优势的同时降低CO₂排放量,也是低成本实现生活垃圾规模化、减量化、无害化和资源化处置的有效途径。

我国在《能源发展“十三五”规划》《关于燃煤耦合生物质发电技改试点项目建设的通知》等一系列的政策文件中,明确支持进行生活垃圾耦合发电,但受限于政策及技术因素,尚未见到大型燃煤电站锅炉耦合生活垃圾发电的成功案例。本文对燃煤电站耦合生活垃圾发电进行了系统性的可行性分析,就耦合发电模式及面临的技术、政策及经济问题进行了研究,提出了应对措施。

1 我国生活垃圾处理现状及特性

1.1 生活垃圾特性

生活垃圾的组成与社会发展水平相关,社会越发达,生活垃圾越表现出低水分、低杂质和高热值的特点。表1为我国与欧美发达国家的垃圾组成对比。从表1中可以看出,我国生活垃圾中餐厨垃圾比例高达50%以上,与发达国家以纸类为主明显不同^[4-6]。因为经济发展和饮食结构的原因,总体上我国生活垃圾热值呈现出东高西低、南高北低的趋势。长三角和珠三角地区的入厂生活垃圾热值大于5000 kJ/kg,经发酵后可提高至7500 kJ/kg以上^[3]。

吨垃圾上网电量随着生活垃圾热值的提高和单炉容量的增大而增加。统计结果表明^[7],2018年我国垃圾发电厂的平均吨垃圾上网电量为283 kW·h,与

欧美发达国家相比,仍处于较低水平。

我国生活垃圾收到基的工业及元素分析见表2^[8]。从表2中可以看出,生活垃圾中Cl和含水量明显偏高,燃烧后的烟气产物会危及受热面安全。

表1 中国与发达国家垃圾组成情况 单位:w/%
Tab.1 The composition of wastes in China and developed countries

国家	餐厨垃圾	塑料	纸类	玻璃	金属	其他
中国	59	11	8	3	1	18
美国	25	12	34	5	8	16
日本	26	9	46	7	4	8
法国	32	9	20	10	3	26
加拿大	24	3	47	6	13	7
德国	14	22	34	12	5	13
意大利	29	5	28	13	2	23
新加坡	14	12	28	4	5	37
荷兰	21	4	25	10	5	35
瑞士	20	3	45	5	5	22
瑞典	25	9	45	7	7	7
澳大利亚	47	4	23	7	5	14

表2 我国生活垃圾工业及元素分析 单位:w/%
Tab.2 The proximate and ultimate analysis results of domestic wastes in China

项目	范围	项目	范围
C _{ar}	10~22	S _{ar}	0~0.6
H _{ar}	1~3	Cl _{ar}	0.1~1.0
O _{ar}	8~15	A _{ar}	10~25
N _{ar}	0.5~1.5	M _{ar}	40~60

1.2 生活垃圾处理现状

随着社会发展和生活水平的提高,我国产生的生活垃圾量呈指数级递增趋势。图1为我国2010—2019年的生活垃圾清运量。

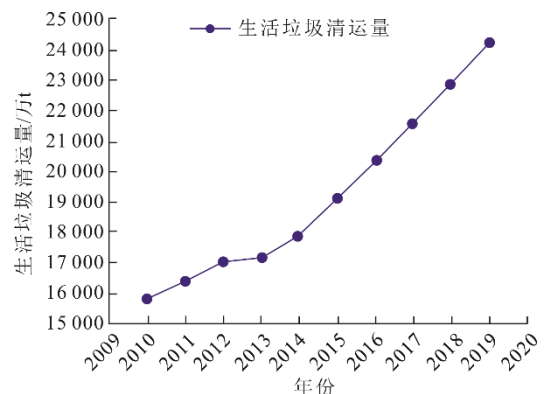


图1 生活垃圾清运量(整理自中国2011—2020统计年鉴)
Fig.1 The quantity of clean transportation of domestic wastes (data from China Statistical Yearbook 2011—2020)

从图 1 中可以看出, 10 年间我国的生活垃圾清运量从 15 804.8 万 t 增加至 24 206.2 万 t, 增长了 53.2%。同时垃圾无害化处置率从 77.9% 增至 99.2%, 基本实现了生活垃圾无害化处置。

图 2 为我国 2010—2019 年不同生活垃圾处置方式所占比例。从图 2 中可以看出, 虽然 10 年间我国生活垃圾焚烧所占比例已经从 14.7% 增至 50.3%, 但卫生填埋所占的比例仍有 45.2%^[9]。

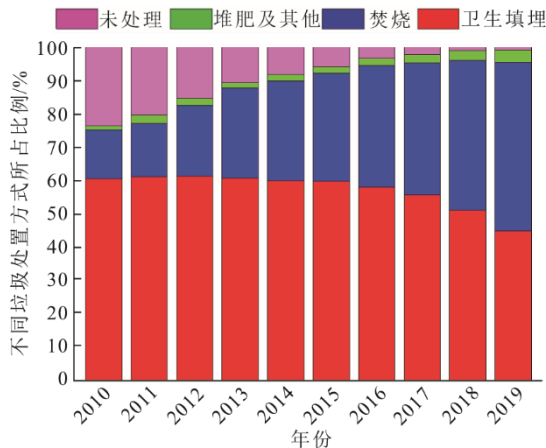


图 2 不同垃圾处理方式所占比例
(整理自中国 2011—2020 统计年鉴)

Fig.2 Proportions of different garbage disposal methods
(data from China Statistical Yearbook 2011—2020)

随着我国城镇化发展速度的加快, 卫生填埋用地逐渐稀缺, 焚烧发电逐渐成为我国生活垃圾处理的主要途径。目前, 我国生活垃圾发电的主要炉型有炉排炉、流化床炉、热解炉及回转焚烧炉。其中, 炉排炉因其燃料预处理简单、可靠性高、单台处理能力大、无需辅助燃料、厂用电率和飞灰产量低等优点成为主流技术路线, 市场份额在 80% 以上。国内外代表性的厂家有德国马丁、法国阿尔斯通、日立造船、比利时西格斯、重庆三峰卡万塔、深圳能源环保和无锡华光锅炉等。而流化床炉因为运行小时数低、厂用电率高、燃料需预处理和飞灰处置成本高等缺点, 逐渐被边缘化。此外, 由于水泥窑炉的高温、碱性气氛等优势, 近年来在协同处理生活垃圾上也得到了大量应用, 年处理能力已经超过 578 万 t^[10-11]。

2 生活垃圾耦合发电模式

生活垃圾与煤混燃并非新鲜事物, 早期的流化床焚烧炉为了保证燃烧的稳定性的需要添加一定比例的燃煤, 就可以看做最简单的耦合发电。受制于政策及技术因素, 我国尚未见到生活垃圾与大型煤粉电站机组耦合发电的工业案例。根据耦合形式,

生活垃圾与大型燃煤电站机组耦合发电可以分为直接耦合发电、间接耦合发电和并联耦合发电。

2.1 直接耦合发电

直接耦合是成本最低的耦合发电方式, 是指生活垃圾与燃煤共同在锅炉中燃烧, 即将生活垃圾经过预处理至可以与煤粉混燃的状态后送入锅炉。直接耦合发电的流程如图 3 所示。根据生活垃圾进入锅炉的方式又可以分为同磨煤机同燃烧器、异磨煤机同燃烧器和异磨煤机异燃烧器^[12]3 种, 这 3 种方式的改造成本和复杂程度依次增加, 生活垃圾掺烧比例也依次增大。

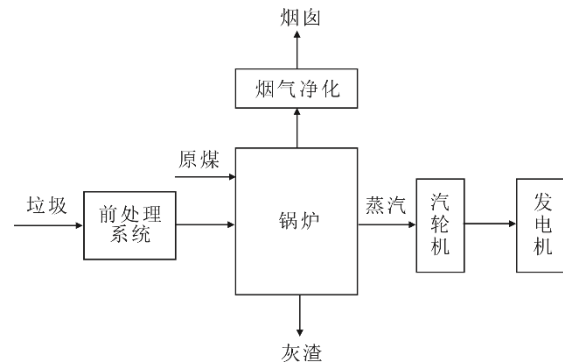


图 3 直接耦合发电流程

Fig.3 Schematic diagram of direct coupled power generation

2.2 间接耦合发电

间接耦合发电是指将生活垃圾进行气化或燃烧后, 所产生的气态产物经过处理进入燃煤锅炉。根据生活垃圾的产物又可分为气化后燃气进入锅炉燃烧和燃烧后烟气进入锅炉余热利用 2 种。生活垃圾气化后产物燃气进入锅炉燃烧方式技术较为成熟, 已经有了类似的工程案例, 如烟台龙源在国电乐东电厂建设的 30 t/d 生活垃圾气化耦合发电系统。生活垃圾燃烧后的烟气进入锅炉余热利用方式则较为少见。间接耦合发电可以降低生活垃圾中有害组分对耦合机组的影响, 同时提高燃料的适应性和实现生活垃圾灰渣与燃煤灰渣的彻底分离, 但投资成本较高。间接耦合发电的流程如图 4 所示。

2.3 并联耦合发电

并联耦合发电是指生活垃圾与燃煤的燃料制备、燃烧及环保系统完全独立, 将生活垃圾锅炉产生的蒸汽并入耦合机组的热力系统中发电。并联耦合发电的流程如图 5 所示。

并联耦合发电可以在实现生活垃圾灰渣与燃煤灰渣彻底分离的基础上, 大幅度提高生活垃圾的

耦合比例,但由于生活垃圾锅炉的蒸汽参数较低,因此耦合后的发电效率低于间接耦合发电(300 MW 机组发电效率低 2%左右) [13]。并联耦合发电因为需要建设一套完整的独立系统,投资成本在 3 种耦合方式中最高。

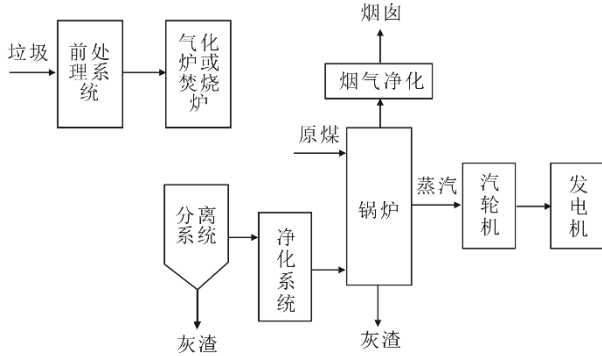


图 4 间接耦合发电流程

Fig.4 Schematic diagram of indirect coupled power generation

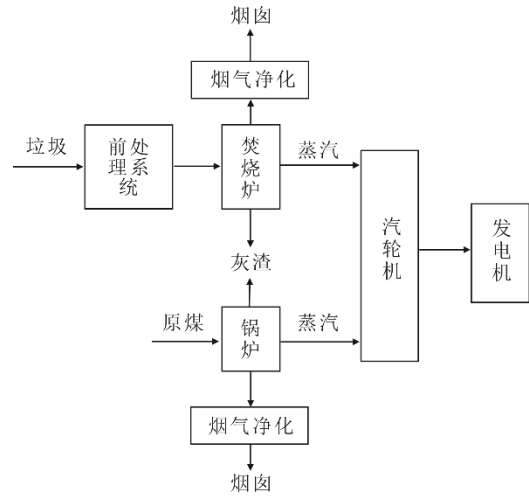


图 5 并联耦合发电流程

Fig.5 Schematic diagram of parallel coupled power generation

2.4 不同耦合方式比较

不同生活垃圾耦合发电方式的对比见表 3。

表 3 不同生活垃圾耦合发电方式比较

Tab.3 Comparison of various coupling ways of domestic waste and coal

项目	直接耦合发电	间接耦合发电	并联耦合发电
技术特点	生活垃圾预处理后直接在炉内燃烧	生活垃圾气化后在炉内燃烧	生活垃圾燃烧产生蒸汽并入原有机组热力系统
灵活性	高	高	中等
改造范围	新增垃圾前处理系统, 新增或改造制粉及燃烧系统	新增垃圾前处理系统, 新增气化和燃烧系统	新建垃圾锅炉及附属系统, 改造原有热力系统
系统复杂程度	简单	一般	复杂
改造成本	最低	高	最高
耦合比例	低	高	最高
耦合紧密程度	紧密	紧密	紧密
电量检测及监管难度	困难	简单	简单
发电效率	高	高	中等
对耦合机组的影响	大	小	最小

从表 3 中可以看出:直接耦合发电的改造成本最低,但耦合比例最低,同时存在原有燃煤机组灰渣成为危废的风险;间接耦合发电的改造成本略高,可以实现生活垃圾灰渣与燃煤灰渣的彻底分离,同时也便于监管和计量;并联耦合发电的系统最复杂,改造成本最高,但耦合比例最大,在现有的标准和政策下均不存在技术风险。

3 生活垃圾耦合发电技术问题

3.1 耦合发电对燃煤机组制粉及燃烧系统的影响

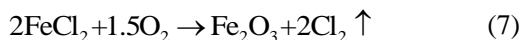
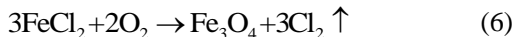
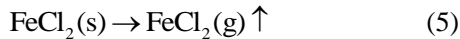
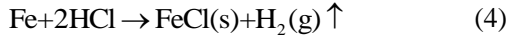
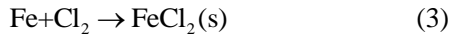
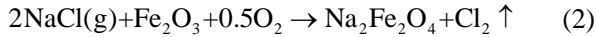
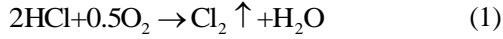
对于间接耦合和并联耦合方式而言,由于生活垃圾采用独立的处理系统,因此对耦合机组的制粉及燃烧系统的影响甚微。对于直接耦合发电而言,需要解决生活垃圾成分特性带来的一系列问题。虽然

固形物、玻璃和金属可以通过研磨的方式破碎,但餐厨垃圾、塑料、纸类、橡胶和纺织物采用以研磨为主的中速磨煤机或钢球磨煤机很难达到适当的粒径,还会导致制粉系统的出力大幅度下降,需要采用撕碎、剪切等方式破碎至适当的粒径方可入炉燃烧。

3.2 耦合发电对燃煤机组运行安全性的影响

生活垃圾中的 S 元素含量较低,因此直接掺烧少量生活垃圾不会导致受热面发生高温硫腐蚀。由于我国垃圾分类工作开展时间较短,生活垃圾中的无机氯(NaCl,主要来自厨余垃圾)和有机氯(PVC,主要来自塑料和橡胶)的含量较高,焚烧时会有 94%以上的有机氯和 4%以上的无机氯转化为气态 HCl^[4]。HCl 气体与氧气可以生成 Cl₂,氯化物和氧化物也会反应生成 Cl₂,Cl₂在金属表面会生成容易

再次分解为金属氧化物和 Cl_2 的金属氯化物。整个过程中氯元素不会消耗, 因此高温氯腐蚀一旦发生, 受热面的腐蚀速率远高于常规高温腐蚀, 整个过程发生的主要反应如下:



福建永安电厂 300 MW 循环流化床机组掺烧 10%~15% 的垃圾衍生燃料 (refuse derived fuel, RDF) 后, 混合燃料平均 Cl 质量分数仅 0.15% 左右, 但仍发生了严重的引风机叶片腐蚀问题^[15]。因此, 对于生活垃圾耦合发电, 燃料中的 Cl 质量分数是一个很重要的指标。

根据已有的工程经验, 添加富硫剂、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、富硅酸盐物质和采用镍铬合金涂层等措施, 可以有效降低氯腐蚀的速率^[16-17]。因此对于间接耦合和并联耦合方式而言, 增加一定的脱氯措施对耦合机组的安全性影响较小。

3.3 耦合发电对燃煤机组煤耗的影响

由于生活垃圾热值较低, 耦合发电后虽然机组燃煤消耗量降低, 但折算后的供电煤耗会有所增加。以典型 300 MW 烟煤机组直接掺烧生活垃圾为例, 原煤和生活垃圾的计算参数见表 4。计算结果表明: 当生活垃圾掺烧量 (质量比, 下同) 为 5% 时, 供电煤耗约增加 0.50 g/(kW·h); 当生活垃圾掺烧量为 10% 时, 供电煤耗约增加 1.02 g/(kW·h)。

表 4 原煤及生活垃圾参数
Tab.4 Parameters of the raw coal and biomass

项目	原煤	生活垃圾
$w_{\text{ar}}(\text{C})/\%$	50.250	17.775
$w_{\text{ar}}(\text{H})/\%$	3.080	2.425
$w_{\text{ar}}(\text{O})/\%$	4.250	15.025
$w_{\text{ar}}(\text{N})/\%$	0.93	0.65
$w_{\text{t,ar}}(\text{S})/\%$	0.93	0
$w_{\text{ar}}(\text{Cl})/\%$	0.005	0.625
$w_{\text{ar}}(\text{A})/\%$	34.56	5.35
$w_{\text{ar}}(\text{M})/\%$	6.00	58.15
$Q_{\text{net,ar}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	19 230	5 139

3.4 耦合发电对燃煤机组碳排放的影响

由于生活垃圾填埋时会产生填埋气, 填埋气中

CH_4 的 100 年全球变暖潜能值 (global warming potential, GWP) 是 CO_2 的 28 倍^[18], 因此生活垃圾焚烧发电能够避免卫生填埋产生的 CH_4 , 达到减排 CO_2 的目的。本文作者根据联合国政府间气候变化专门委员会 (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的推荐方法, 计算不同生活垃圾处置方式的 CO_2 排放量^[19], 生活垃圾卫生填埋产生的 CH_4 和 CO_2 排放量计算公式如下:

$$E_{\text{land,CH}_4} = M \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \times F \times (16/12) \quad (8)$$

$$E_{\text{land,CO}_2} = M \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times (1 - \text{MCF} \times F) \times (44/12) \quad (9)$$

$$E_{\text{land}} = E_{\text{land,CH}_4} \times 28 + E_{\text{land,CO}_2} \quad (10)$$

式中: $E_{\text{land,CH}_4}$ 为生活垃圾填埋产生的 CH_4 质量, t; $E_{\text{land,CO}_2}$ 为生活垃圾填埋产生的 CO_2 质量, t; E_{land} 为生活垃圾填埋产生的 CO_2 总质量, t; M 为生活垃圾填埋量, t; DOC 为生活垃圾可降解有机碳质量分数, %; DOC_f 为生活垃圾实际分解有机碳质量比例, %; MCF 为甲烷氧化因子, %; F 为填埋气中 CH_4 比例, %。

生活垃圾焚烧发电产生的 CO_2 排放量计算公式如下^[19-20]:

$$E_{\text{P,CO}_2} = M \times \text{CF} \times \text{OF} \times (44/12) \quad (11)$$

$$E_{\text{P,E}} = M \times E_{\text{coal}} \times A_{\text{waste}} \quad (12)$$

$$E_{\text{P}} = E_{\text{P,CO}_2} - E_{\text{P,R}} \quad (13)$$

式中: E_{P} 为生活垃圾发电产生的 CO_2 总质量, t; $E_{\text{P,CO}_2}$ 为生活垃圾焚烧产生的 CO_2 质量, t; $E_{\text{P,R}}$ 为生活垃圾发电减排的 CO_2 质量, t; CF 为生活垃圾可燃碳质量分数, %; OF 为氧化因子, %; E_{coal} 为依托机组单位电量 CO_2 排放量, kg/(kW·h); A_{waste} 为单位质量垃圾上网电量, (kW·h)/kg。

生活垃圾耦合发电与采用填埋方式相比的 CO_2 减排量按照下式计算:

$$E_{\text{R,couple}} = E_{\text{land}} - E_{\text{P}} \quad (14)$$

式中: $E_{\text{R,couple}}$ 为生活垃圾耦合发电减排的 CO_2 , t。

以直接耦合发电为例, 典型 300 MW 机组不同掺烧比例的 CO_2 减排量见表 5。从表 5 中可以看出: 采用耦合发电后, 每吨垃圾上网电量约 565 kW·h, 较现有炉排炉上网电量增加了 155 kW·h; 掺烧比例 5% 时可减排 CO_2 约 5.41 万 t; 掺烧比例 10% 时可减排 CO_2 约 11.23 万 t。

3.5 耦合发电对燃煤机组环保特性的影响

3.5.1 对燃煤机组常规污染物的影响

生活垃圾的氮元素含量虽然较高 (表 2), 但大

多数为挥发分氮,因此对耦合发电后的 NO_x 排放影响较小;生活垃圾中的硫分含量与低硫煤相当,耦合比例较低时也不会导致烟气 SO_x 排放超标;生活垃圾中的灰分含量虽然略高,但由于我国的燃煤机组大多完成了超低排放,掺入比例较低时不会影响烟尘的排放指标。

表5 不同掺烧比例生活垃圾直接耦合发电 CO_2 减排量
Tab.5 The CO_2 emission reduction of coal-fired power station coupled with domestic waste using different blending ratios

项目	耦合比例 5%	耦合比例 10%
M/t	38 333	79 583
$A_{\text{waste}}/((\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{kg}^{-1})$	0.565 ^①	0.565 ^①
$E_{\text{coal}}/(\text{kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	0.979 ^②	0.979 ^②
DOC/%	15 ^③	15 ^③
DOC _r /%	50 ^③	50 ^③
MCF/%	100 ^③	100 ^③
F/%	50 ^③	50 ^③
$E_{\text{land,CH}_4}/t$	1 916.7	3 979.2
$E_{\text{land,CO}_2}/t$	5 270.8	10 942.7
E_{land}/t	58 937.5	122 359.4
CF/%	18.73	18.73
OF/%	99	99
$E_{\text{p,CO}_2}/t$	26 062.8	54 108.6
$E_{\text{p,R}}/t$	21 229.4	44 074.1
E_{p}/t	4 833.4	10 034.5
$E_{\text{R,couple}}/t$	54 104.1	112 324.9

注:①数据根据耦合机组供电煤耗折算;②数据来自参考文献[21];③数据来自参考文献[19-20]。

3.5.2 对燃煤机组持久性有机污染物排放的影响

生活垃圾燃烧后还会产生持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs), POPs是指包括二噁英类(polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs)及 polychlorinated dibenzofurans, PCDFs)、多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)、多氯萘(polychlorinated naphthalene, PCNs)和多种溴代芳烃化合物等在内的污染物[22],其中以二噁英最为著名,但PCBs和PCNs等污染物也不容忽视[3,23-24]。

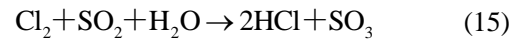
二噁英是PCDDs和PCDFs的总称,其中PCDDs有75种异构体,PCDFs有135种异构体[25]。二噁英的生成机理主要有:1)高温气相合成;2)从头合成;3)直接释放;4)前驱物异相催化,其中从头合成量占总生成量的50%以上。由于二噁英的生成主要受氯源(无机氯、PVC)、金属氧化物(如 CuCl_2 、 FeCl_3)、气氛及温度(250~550 $^\circ\text{C}$) [26]等因素的影响,因此可以采用:1)燃烧前控制,通

过垃圾分类减少氯源;2)燃烧中控制,采用“3T+E”(temperature, time, turbulence, ex-cessoxygen)措施和喷入抑制剂(尿素、氰胺、乙二醇、S、 O_3 等);3)燃烧后控制(活性炭吸附、催化剂催化[27-29]、滤袋催化[30]、光催化和电子束照射[31]等)。

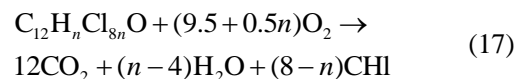
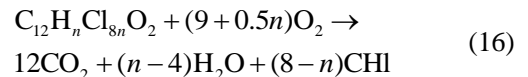
目前,燃煤电厂烟气中的二噁英排放质量浓度约为0.365~60 pg I-TEQ/ m^3 [32]。对于燃煤电站机组而言,控制二噁英排放有以下优势:

1)全负荷下烟气在1200 $^\circ\text{C}$ 以上的停留时间一般在2~3s,有利于炉内二噁英的彻底分解;

2)煤中硫燃烧生成的 SO_2 会发生如下反应消耗氯源,抑制二噁英前驱物的生成:



3)脱硝系统的钒基催化剂会发生以下反应,对二噁英的脱除率可以达到94%以上[33-34],这与喷入活性炭并采用静电除尘器的脱除率(95.4%) [35-37]相当:



因此,将掺入生活垃圾的氯含量控制在燃煤水平内,耦合机组排放烟气的二噁英质量浓度能够满足现有的相关排放标准。

3.5.3 对燃煤机组痕量元素排放的影响

煤中的痕量元素主要是指质量分数低于100 mg/kg的元素,典型的痕量元素有Hg、As、Pb、Cd、Cr、Cl等。痕量元素根据挥发性可以分为易挥发元素、半挥发元素和难挥发元素。痕量元素的迁徙主要受S、Cl、碱金属和无机物的含量以及温度的影响[38-45],典型的痕量元素迁徙途径如图6所示[46]。

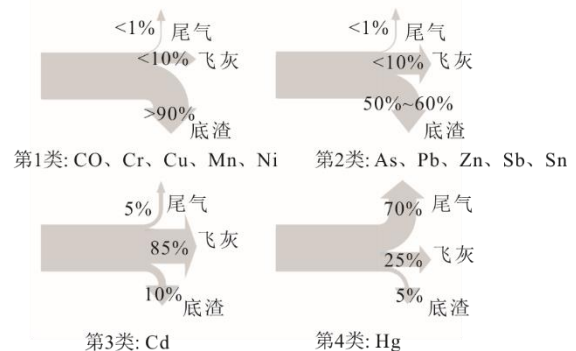


图6 生活垃圾中痕量金属迁徙规律
Fig.6 The migration rules of trace metals in domestic waste

原煤掺混不同比例生活垃圾后的典型痕量元素见表6[47]。从表6的计算结果来看,原煤掺混10%

以下的生活垃圾后，除 Cl 以外典型痕量元素的中位值仍处于原煤痕量元素的常见范围内。因此，少量直接掺烧生活垃圾并不会导致入炉燃料中的痕量元素

超标。对于间接耦合和并联耦合发电而言，则可以通过增加相应的处理设备，大幅度降低入炉的痕量元素含量，以降低对后继受热面及灰渣利用的影响。

表 6 煤和城市生活垃圾中痕量元素质量分数
Tab.6 Mass fractions of trace elements in the coal and domestic wastes

单位: mg/kg

项目	原煤		生活垃圾		掺混 5% 生活垃圾		掺混 10% 生活垃圾	
	范围	中位值	范围	中位值	范围	中位值	范围	中位值
Zn	6-36	15	167-223	185	14-45	24	22-55	32
Cu	3-23	10	76-169	123	7-30	16	10-38	21
Pb	2-26	12	83-127	100	6-31	16	10-36	21
Cd	0.5-2.1	1	1.1-1.8	1.5	0.5-2.1	1.0	0.6-2.1	1.1
Cr	2-56	16	98-149	115	7-61	21	12-65	26
Hg	0.02-1.00	0.2	0.3-1.0	0.5	0.03-1.00	0.22	0.05-1.00	0.23
Ni	2-30	10	21-33	26	3-30	11	4-30	12
As	2-20	7	6-10	8	2-20	7	2-19	7
Cl	50-500	220	1 000-10 000	5 769	98-975	497	145-1 450	775

3.5.4 对燃煤机组灰渣利用的影响

生活垃圾焚烧的炉渣是一种由玻璃相、硅酸盐、碳酸盐、氧化物和氯化物等组成的非均质混合物，主要成分为玻璃、陶瓷、砖石碎片、石头、黑色及有色金属。目前，生活垃圾的炉渣用途主要有水泥混凝土和沥青路面的替代骨料、填埋场的覆盖材料以及建筑填料等^[48]。由于生活垃圾焚烧后大部分重金属都富集在飞灰中，因此对耦合发电的炉渣利用影响甚微。

生活垃圾焚烧后的飞灰含有大量易浸出的重金属（Zn、Pb、Cu、Cd 和 Cr 等），属于《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》（GB 5085.3—2007）中规定的危险废弃物。特别是飞灰中的 Cl 质量分数可达 4.6%~12.7%^[49]，为飞灰处置和资源化利用带来了很大困难。目前，生活垃圾飞灰的主要处理方法如图 7 所示。

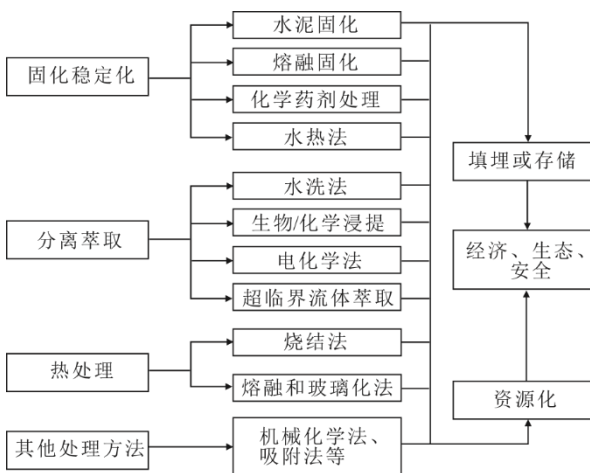


图 7 生活垃圾飞灰处置方式

Fig.7 The disposal method of fly ash of domestic wastes

生活垃圾飞灰在酸性环境下更易浸出^[50]，但原煤的粉煤灰中含有大量的 CaO、MgO 等碱性氧化物，因此混燃后飞灰中的重金属更不易浸出，当直接掺入比例较低时，不会导致耦合机组飞灰中的重金属含量超标；而间接耦合和并联耦合的灰渣与原有机组完全分离，因此不会影响原有机组的灰渣利用。

4 生活垃圾耦合发电政策及经济问题

4.1 政策问题

虽然我国已经出台了一系列鼓励进行生活垃圾耦合发电的相关政策，但对于污染物的控制手段和排放还缺乏相关的标准。欧盟早在 2010 年就出台了针对大型火电厂掺烧废弃物的污染物控制标准 DIRECTIVE 2010/75/EU^[51]，指出除烟尘、SO₂、NO_x、CO、HCl 和 HF 需要按照废弃物及原煤的烟气量进行加权计算外，汞及其化合物、Cd+Ti、Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V 和二噁英类均为固定排放限值。同时在《大型燃烧装置污染控制最佳可行技术参考文件》^[52]中明确，可依托电厂现有设备进行烟气净化，并需按照废弃物的重金属含量增加相应的处理手段。

目前，我国已有的燃煤电厂在进行废弃物掺烧时，大都参考《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011）及超低排放限值、《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB 18485—2014）、《危险废物焚烧污染控制标准》（GB 18484—2020）以及部分地方标准，但都存在基准氧量不统一、排放限值差异较大等问题。建议应尽快研究制定符合我国国情的燃

煤电站耦合废弃物发电技术指南和规范,同时制定燃煤电站耦合生活垃圾发电污染物控制标准,对掺烧比例、监测指标、排放限值、检测频次等要求进行细化^[53]。

4.2 经济问题

目前,生活垃圾电站的收入来源主要分为垃圾处置费和发电收入。其中,垃圾处置费一般为30~120元/t,不足以覆盖处理成本。发电收入分为两部分,一部分为按照全国统一垃圾发电标杆含税电价0.65元/(kW·h)计算的280kW·h;另一部分为按照当地同类燃煤发电机组上网电价执行的超发部分。

对于生活垃圾耦合发电,难点在于上网电量的计量。建议按照下式进行计算:

$$P_{gd} = \int (Q_{d,w} + Q_{s,w}) \times \frac{123}{B_{gd}} \times 10^6 \times dt \quad (18)$$

式中: P_{gd} 为垃圾上网电量,kW·h; $Q_{d,w}$ 为垃圾入炉低位热量,GJ/s; $Q_{s,w}$ 为垃圾入炉显热,GJ/s; B_{gd} 为依托机组上年平均供电煤耗,g/(kW·h)。

由于大型燃煤机组的发电效率较高,相同垃圾入炉热量的发电量大于目前常规垃圾发电机组,能否按照每吨280kW·h的折算电量享受垃圾发电标杆电价,是目前尚未解决的问题。

5 结 论

1) 燃煤电站耦合生活垃圾发电能够发挥现有煤电机组的环保优势和显著降低机组的CO₂排放量,同时增加单位质量垃圾的发电量,是低成本实现生活垃圾处置的有效途径。针对我国生活垃圾的高水分、低热值、高氯含量等特点,提出耦合发电的技术路线为:重金属及Cl质量分数低、耦合比例小时(低于10%),建议选择直接耦合发电方式;重金属及Cl质量分数高、耦合比例大时,建议选择间接耦合发电;并联耦合发电虽然在现有的政策下不存在任何风险,但系统最复杂且经济性最差。

2) 采用间接耦合和并联耦合发电对依托机组的运行安全性、污染物排放和能耗指标以及灰渣利用等方面的影响较小。当耦合比例较低时,采用直接耦合发电方式也能满足相关的控制标准。

3) 由于我国生活垃圾的特性变化较大,耦合时应特别注意垃圾中的重金属及Cl质量分数,建议将耦合后机组的入炉Cl质量分数控制在0.10%以内。

4) 建议尽快制定符合我国国情的燃煤电站耦合废弃物发电技术指南、规范和污染物控制标准。

[参 考 文 献]

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2020[R/OL]. (2020-06-12)[2021-02-23]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-284175>.
China Electricity Council. Development report of China's electric power industry 2020[R/OL]. (2020-06-12)[2021-02-23]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-284175>.
- [2] 中国电力企业联合会. 2020—2021 年度全国电力供需形势分析预测报告[R/OL]. (2021-02-02)[2021-02-23]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-293198>.
China Electricity Council. Analysis and forecast report of national power supply and demand situation in 2020—2021[R/OL]. (2021-02-02)[2021-02-23]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-293198>.
- [3] 刘国卿, 刘德全, 周志华. 垃圾焚烧炉飞灰和烟气中多氯化萘的分布特征[J]. 深圳大学学报(理工版), 2015(4): 398-403.
LIU Guoqing, LIU Dequan, ZHOU Zhihua. Polychlorinated naphthalene distribution in fly-ash and flue gas from waste incinerator[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2015(4): 398-403.
- [4] ZHOU M H, SHEN S L, XU Y S, et al. New policy and implementation of municipal solid waste classification in Shanghai, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(17): 3099.
- [5] KHANDELWAL H, DHAR H, THALLA A K, et al. Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: a worldwide critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 630-654.
- [6] 胡斌航. 三段式固体废弃物协同气化的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 2.
HU Binhang. Research on co-gasification of municipal solid waste in a three-stage gasifier[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 2.
- [7] 黄文辉. 生活垃圾焚烧发电厂发电量提升因素分析[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(8): 217-218.
HUANG Wenhui. Analysis of power generation increasing factors in domestic waste incineration power plant[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019, 45(8): 217-218.
- [8] 白良成. 生活垃圾焚烧处理工程技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 107.
BAI Liangcheng. Engineering technology of municipal solid waste incineration[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 107.
- [9] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 120.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020: 120.
- [10] 徐化, 马玉锋, 潘淑萍, 等. 水泥窑协同处置垃圾衍生燃料对烟气污染物排放及熟料品质的影响[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(11): 1273-1277.
XU Hua, MA Yufeng, PAN Shuping, et al. The influence of cement kiln co-processing of refuse derived fuel on flue gas pollutant discharge and clinker quality[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(11): 1273-1277.
- [11] 马玉锋. 水泥窑协同处置矿化垃圾等固废时二恶(噁)英排放特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 3.
MA Yufeng. Study on the PCDD/Fs emission characteristics of cementkilnco-processing solid wastes such as aged refuse[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 3.
- [12] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电[J]. 分布式能源, 2017(5): 47-54.

- MAO Jianxiong. Co-firing biomass with coal for power generation[J]. *Distributed Energy*, 2017(5): 47-54.
- [13] 张涛, 牛晓琴. 城市生活垃圾处理技术方案[C]//环境工程 2019 年全国学术年会. 2019: 761.
ZHANG Tao, NIU Xiaoqin. The treatment technologies of municipal solid waste[C]//*Environmental Engineering 2019 National Academic Annual Conference*. 2019: 761.
- [14] 王辉辉. 可燃固体废物热转化过程氯的迁移与平衡研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016: 21.
WANG Huihui. Chloride migration and balance study of combustible solid waste heat in thermal conversion process[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016: 21.
- [15] 邱国华, 徐鹏志. 掺烧固废燃料的循环流化床锅炉引风机叶片腐蚀原因分析[J]. *发电技术*, 2020, 41(6): 681-688.
QIU Guohua, XU Pengzhi. Analysis on corrosion causes of induced draft fan blade in circulating fluidized bed boiler with mixed burning solid waste fuel[J]. *Power Generation Technology*, 2020, 41(6): 681-688.
- [16] 张楠. 垃圾焚烧炉换热器高温腐蚀实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 45.
ZHANG Nan. Experimental study on high temperature corrosion of heat exchangers in waste to energy plant[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016: 45.
- [17] 郭浩男, 董瑞程, 丁志斌, 等. 贝壳脱除垃圾焚烧烟气中氯化氢的实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(36): 136-140.
GUO Haonan, DONG Ruicheng, DING Zhibin, et al. Experimental study on removal of hydrogen chloride from waste incineration flue gas by shell[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(36): 136-140.
- [18] IPCC. Climate change 2014: synthesis report[R]. Geneva, Switzerland, 2014: 17.
- [19] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Geneva, Switzerland, 2006: 20.
- [20] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Geneva, Switzerland, 2019: 32.
- [21] 生态环境部. 2019—2020 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)[R/OL]. (2020-12-30)[2021-02-23]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202012/t20201230_815546.html.
The Ministry of Ecology and Environment. Implementation plan for total quota setting and allocation of carbon emission trading in China from 2019 to 2020 (power generation industry)[R/OL]. (2020-12-30) [2021-02-23]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202012/t20201230_815546.html.
- [22] JEONG-EUN O H, GULLETT B, RYAN S, et al. Mechanistic relationships among PCDDs/Fs, PCNs, PAHs, CIPhs, and CIBzs in municipal waste incineration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(13): 4705-4710.
- [23] LI X D, REN Y, JI S S, et al. Emission characteristics of hazardous components in municipal solid waste incinerator residual ash[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2015, 16(4): 316-325.
- [24] 王天娇. 生活垃圾焚烧过程中二噁英及其关联物氯苯的特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 4.
WANG Tianjiao. Characteristics of PCDD/Fs related to chlorobenzenes in municipal solid waste incineration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 4.
- [25] HOYOS A, COBO M, ARISTIZÁBAL B, et al. Total suspended particulate (TSP), polychlorinated dibenzo dioxin (PCDD) and polychlorinated dibenzofuran (PCDF) emissions from medical waste incinerators in Antioquia, Colombia[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(Suppl.1): S137-S142.
- [26] MCKAY G. Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002, 86(3): 343-368.
- [27] FINOCCHIO E, BUSCA G, NOTARO M. A review of catalytic processes for the destruction of PCDD and PCDF from waste gases[J]. *Applied Catalysis B Environmental*, 2006, 62(1/2): 12-20.
- [28] 俞明锋, 李晓东, 李文维, 等. 新型钒基催化剂催化降解气相二噁英[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(11): 2052-2057.
YU Mingfeng, LI Xiaodong, LI Wenwei, et al. Catalytic destruction of PCDD/Fs over new vanadium based oxide catalysts[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2016, 50(11): 2052-2057.
- [29] KRISHNAMOORTHY S, RIVAS J A, AMIRIDIS M D. Catalytic oxidation of 1, 2-dichlorobenzene over supported transition metal oxides[J]. *Journal of Catalysis*, 2000, 193(2): 264-272.
- [30] 陈涛, 纵宇浩, 黄力, 等. 生活垃圾焚烧多污染物净化处理技术[J]. *山东化工*, 2016, 45(19): 144-145.
CHEN Tao, ZONG Yuhao, HUANG Li, et al. Purification treatment technology of pollutants in domestic garbage incineration[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2016, 45(19): 144-145.
- [31] 陈正达, 施小东, 狄耀军, 等. 脉冲放电分解垃圾焚烧烟气二噁英的中试研究[J]. *中国环保产业*, 2019(3): 33-38.
CHEN Zhengda, SHI Xiaodong, DI Yaojun, et al. Primary production test study on decomposition of dioxins from refuse incineration flue gas by pulse discharge[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2019(3): 33-38.
- [32] 官贞珍, 潘卫国, 郭瑞堂, 等. 国内外燃煤电厂二噁英(噁)排放及控制[J]. *燃烧科学与技术*, 2020, 26(5): 423-429.
GUAN Zhenzhen, PAN Weiguo, GUO Ruitang, et al. PCDD/Fs emissions and control in coal-fired power plants at home and abroad[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2020, 26(5): 423-429.
- [33] GOEMANS M, CLARYSSE P, JOANNÈS J, et al. Catalytic NO_x reduction with simultaneous dioxin and furan oxidation[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(4): 489-497.
- [34] 史昕龙. 医疗废物回转窑二噁英生成及控制对策[J]. *建筑科技*, 2018, 2(2): 72-74.
SHI Xinlong. Dioxin generate and control method in medical waste rotary kiln[J]. *Building Technology*, 2018, 2(2): 72-74.
- [35] 王昊昊, 徐泰山, 马彦宏, 等. 计及多类型电源协调的有功控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 167-175.
WANG Haohao, XU Taishan, MA Yanhong, et al. A novel active power control strategy considering multi-resource coordination[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 167-175.
- [36] KIM S C, JEON S H, JUNG I R, et al. Removal efficiencies of PCDDs/PCDFs by air pollution control devices in municipal solid waste incinerators[J]. *Chemosphere*, 2001, 43(4/5/6/7): 773-776.
- [37] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 139-146.

- ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 139-146.
- [38] 董隽, 池涌, 汤元君, 等. 生活垃圾流化床热处置中重金属迁移分布研究[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(1): 120-128.
- DONG Juan, CHI Yong, TANG Yuanjun, et al. Fate of heavy metals during fluidized-bed thermal treatment of municipal solid waste[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(1): 120-128.
- [39] 乐健, 周谦, 王曹, 等. 无功补偿设备和分布式电源协同的配电网优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 38-47.
- LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on distributed optimal control strategy for a distribution network based on the cooperation of DGs and Var compensators[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 38-47.
- [40] 王昕晔. 垃圾焚烧过程中铅和镉的挥发特性及其排放控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 3-11.
- WANG Xinye. Volatilization characteristics and emissions control of lead and cadmium during waste incineration[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 3-11.
- [41] 李秋燕, 王利利, 张艺涵, 等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 179-186.
- LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 179-186.
- [42] 胡济民. 垃圾焚烧过程中重金属铅和铜迁移分布特性的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2018: 79.
- HU Jimin. Study on the migration and distribution of Pb and Cu during the process of municipal solid waste incineration[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018: 79.
- [43] 王野, 李娜, 田书磊, 等. 垃圾焚烧飞灰热处理过程中Zn的挥发机理研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 706-712.
- WANG Ye, LI Na, Tian Shulei, et al. Volatilization mechanism of Zn on municipal solid waste incineration fly ash during thermal treatment[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 706-712.
- [44] 胡福年, 徐伟成, 陈军. 计及电动汽车充电负荷的风电-光伏-光热联合系统协调调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 10-20.
- HU Funian, XU Weicheng, CHEN Jun. Coordinated scheduling of wind power photovoltaic solar thermal combined system considering electric vehicle charging load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 10-20.
- [45] 徐浩然, 张瑞娜, 胡济民, 等. 硫和硫化物对垃圾焚烧过程中Pb迁移分布的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(1): 169-176.
- XU Haoran, ZHANG Ruina, HU Jimin, et al. Influence of sulfur and sulfide on migration and distribution of lead in waste incineration process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(1): 169-176.
- [46] 赵曦, 喻本德, 张军波. 城市生活垃圾焚烧重金属迁移、分布和形态转化研究[J]. 环境科学导刊, 2015(3): 49-55.
- ZHAO Xi, YU Bende, ZHANG Junbo. The transfer, distribution, and morphological transformation of heavy metals from the incineration process of municipal solid waste[J]. Environmental Science Survey, 2015(3): 49-55.
- [47] 周虹光, 严响林. 燃煤电厂煤粉锅炉掺烧处置生活垃圾可行性分析[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2020: 45-50.
- ZHOU Hongguang, YAN Xianglin. Feasibility analysis of mixed combustion of domestic waste in pulverized coal boiler of coal fired power plant[R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2020: 45-50.
- [48] 孙瑜, 李立寒. 垃圾焚烧炉渣粉替代矿粉对沥青混合料性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017(12): 1818-1823.
- SUN Yu, LI Lihan. Effect of municipal solid waste incineration bottom ash powder on properties of asphalt mixture[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017(12): 1818-1823.
- [49] 武博然, 王冬扬, 柴晓利. 生活垃圾焚烧飞灰生物脱氯机制研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2470-2476.
- WU Boran, WANG Dongyang, CHAI Xiaoli. Dechlorination mechanism of municipal solid wastes incineration fly ash by biological process[J]. China Environmental Science, 2015, 35(8): 2470-2476.
- [50] 田志鹏, 田海燕, 张冰如. 城市生活垃圾焚烧飞灰物化性质及重金属污染特性[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(9): 80-85.
- TIAN Zhipeng, TIAN Haiyan, ZHANG Bingru. The physiochemical properties and heavy metal pollution fly ash from municipal solid waste incineration[J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(9): 80-85.
- [51] Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast) Text with EEA relevance[Z]. Official Journal of the European Union, L334, 2010: 67-76.
- [52] LECOMTE T, FUENTE J, NEUWAHL F, et al. Best available techniques (BAT) reference document for large combustion plants[R]. Seville: The Joint Research Centre, 2017: 683-690.
- [53] 张晴, 莫华, 徐海红, 等. 燃煤电厂掺烧废弃物现状及环境管理建议[J]. 环境工程, 2020, 38(6): 202-207.
- ZHANG Qing, MO Hua, XU Haihong, et al. Present situation of co-combustion of waste and coal in power plants and suggestion on environmental management[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(6): 202-207.

(责任编辑 杨嘉蕾)