

不同城市生活垃圾焚烧技术的综合评价*

毛永宁 汪小慈[#] 赵黛青 杨捷

(中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要 通过工程的经济性分析、工艺过程的能流分析以及工程的环境影响分析,综合分析了流化床、炉排炉、气化熔融和等离子体气化等不同城市生活垃圾焚烧技术。结果表明:(1)在零补贴的情况下,流化床焚烧技术的工程效益最佳,但从项目投产年算起,其投资回收期也需9年;炉排炉、气化熔融与等离子体气化焚烧技术要达到流化床焚烧技术零补贴情况下的经济效益,分别需补贴约70、140、500元/t。(2)各城市生活垃圾焚烧技术下水体富营养化和全球变暖影响最显著,而人体毒性影响最小。气化熔融焚烧技术和等离子体气化焚烧技术的环境影响比其他两种焚烧技术小一个数量级。(3)考虑污染物排放的环境效益,在现行中国排放标准下,流化床、炉排炉与气化熔融焚烧技术的工程效益都将得到较大提升。随着排放标准的更加严格,流化床焚烧技术的年收益率下降最显著;气化熔融焚烧技术的工程效益相较最优。

关键词 城市生活垃圾 焚烧技术 环境成本 能流

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.02.006

Comprehensive evaluation of different municipal solid waste (MSW) incineration technologies MAO Yongning, WANG Xiaohan, ZHAO Daiqing, YANG Jie. (Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640)

Abstract: Considering different municipal solid waste (MSW) incineration technologies, economic, energy flow and environmental impact analysis for fluidized bed technology, grate furnace, gasification-melting technology and plasma gasification technology was carried out. The results showed that, in the absence of treatment subsidies, the project benefits of fluidized bed incineration technology was best, but the payback period was also required to 9 years. To achieve the economic benefits of fluidized bed technology, the subsidies for grate furnace, gasification-melting technology and plasma gasification technology were 70, 140, 500 yuan/t, respectively. For each MSW incineration technology, the eutrophication and global warming impacts were most significantly, while the human toxic effect was relatively minimal, the environmental impact of gasification-melting technology and plasma gasification technology were far less than that of grate furnace and fluidized bed technology. If considering the pollutant emission reduction benefits, the benefits of fluidized bed incineration technology, grate furnace and gasification-melting technology project would be greatly improved in the current China emission standards, with the emission standards become stricter, the benefits of fluidized bed technology would decrease sharply, and the benefits of gasification and melting technology was best.

Keywords: municipal solid waste; incineration technology; environmental cost; energy flow

随着城市化进程的加速,城市生活垃圾产量也逐年增加。采用简单填埋或堆放的处理方法,在城市用地日益紧张的当下,已显得捉襟见肘,据统计,全国逾2/3的城市已被垃圾包围,并且这个包围圈开始逐渐向农村扩张^[1]。因此,减量化显著的城市生活垃圾焚烧处理技术近年在国内得到了快速发展,2010年,按清运量计算,全国垃圾焚烧处理比例达13.6%^[2]。国内开展垃圾焚烧发电始于1985年深圳南山垃圾发电厂,受制于经济、技术条件,已建成运行的垃圾焚烧发电项目以引进的炉排炉焚烧技

术和国产的流化床焚烧技术为主^[3]。采用这两种焚烧技术的垃圾焚烧厂为达到烟气排放标准,必须采用规模庞大的尾气处理设备,而且净化处理过程产生的残渣需要再次作为危险废弃物进行处置。垃圾焚烧处理是政府主导的公益性项目,但由于部分地区财力有限,多采用公私合营的方式,一方面要无害化焚烧处理城市生活垃圾,另一方面又要兼顾焚烧工场的运营效益。在一些补贴较低且监管不严的地区,采用炉排炉和流化床焚烧技术已曝出排放不达标、高危灰渣处置不当等问题^[4-5]。从20世纪70—

第一作者:毛永宁,男,1986年生,硕士,研究实习员,主要从事能源开发的技术经济性评价。[#]通讯作者。

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(No.2011CB201501);NSFC-JST 重大国际合作项目(No.51161140330)。

80 年代开始,发达国家纷纷致力于城市生活垃圾气化熔融焚烧技术的开发,该技术结合热解气化和熔融固化技术为一体,可实现彻底的无害化、显著的减容性、广泛的物料适应性和高效的能源与物资回收。此外,西屋公司研发的等离子体气化处理城市生活垃圾的焚烧技术也引人瞩目。目前,这些先进技术因基础投资较大、经济可行性有待提高而尚未在我国启用。但随着城市生活垃圾焚烧处理排放标准的逐渐苛严,这些先进技术的采用也将逐步提上日程。此外,采用这些技术也可带来长期的环境效益。本研究将对不同城市生活垃圾焚烧技术选择下的经济、能流与环境影响进行综合分析,为今后国内城市生活垃圾焚烧技术选择提供参考依据。

1 评价体系的建立

1.1 评价体系

图 1 为城市生活垃圾焚烧技术选择综合评价体系。通过工程的经济性分析、工艺过程的能流分析以及工程的环境影响分析,可得知不同情景下的工程效益;耦合这 3 个分析结果,即可对不同城市生活垃圾焚烧技术进行综合评价。

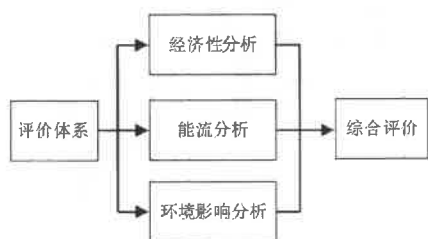


图 1 综合评价体系

Fig.1 Comprehensive evaluation system

1.2 工程基本参数

参考城市生活垃圾焚烧处理工程案例,设定入炉城市生活垃圾热值为 6 000 kJ/kg,城市生活垃圾焚烧厂处理能力为 20 t/h,年运行时间为 8 000 h,城市生活垃圾焚烧厂使用期限为 30 年。炉排炉焚烧技术和流化床焚烧技术发电效率为 24%,气化熔融和等离子体气化焚烧技术发电效率为 30%。按国家发展和改革委员会规定,焚烧 1 t 城市生活垃圾

所发电量中,有 280 kW·h 的上网电量按 0.65 元/(kW·h)计算,其余按当地同类燃煤机组上网电价计算,本研究取 0.52 元/(kW·h)(南方火电上网电价)。

1.3 污染物排放清单

城市生活垃圾焚烧处理过程中设备的运行主要依靠电能,因而其运行期间的污染物排放可不予考虑,所以研究中只关注尾气排放中污染物的环境影响。通过文献调研可以得知,各城市生活垃圾焚烧技术下的主要污染物如表 1^[6-8]所示。据此可知,不同城市生活垃圾焚烧技术选择下的环境影响类型主要有全球变暖、酸化、水体富营养化和人体毒性等 4 种。

1.4 烟气量计算

要评价不同城市生活垃圾焚烧技术下污染物排放的环境成本,所产烟气量的确定至关重要。在城市生活垃圾焚烧处理过程中,烟气量与焚烧工艺所需空气量直接相关。根据某城市生活垃圾焚烧厂(该厂采用炉排炉)的生产数据,在处理量约为 500 t/d 时,对不同城市生活垃圾热值所对应烟气量进行了拟合,结果见式(1),且该拟合公式可用于垃圾热值 $\geq 4\,000$ kJ/kg 时。考虑到各炉型的焚烧特点:炉排炉所需过量空气系数为 1.7~2.0,流化床焚烧炉、等离子体气化焚烧炉烟气量分别为炉排炉的 1.3 倍、1/5,气化熔融炉所需空气过量系数为 1.2~1.4^[9]。据此可得出各炉型下的烟气量,进而求得所排污染物总量。

$$y = -0.003\,283\,345\,1x^2 + 47.819\,678\,605x - 67\,096 \quad (1)$$

式中: x 为垃圾热值, kJ/kg; y 为烟气量, m^3 。

2 综合评价

2.1 经济性分析

城市生活垃圾焚烧处理工程的总投入由基础投资和运行成本组成。城市生活垃圾焚烧处理工程的总收益由发电收益、处理补贴组成,其中发电收益将由能流分析部分得出。通过调研国内相关城市生活

表 1 污染物排放清单
Table 1 Detailed list of pollutants discharge

指标	$\text{SO}_2/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\text{NO}_x/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\text{HCl}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	二噁英/ $(\text{ng TEQ} \cdot \text{m}^{-3})$
炉排炉	37.48	133.74	24.2	0.044
流化床焚烧炉	68.4	229	4.13	0.042
气化熔融炉	15.6	22.3	8.9	0.002
等离子体气化焚烧炉	2	104.5	18.5	0.005 7

表2 城市生活垃圾焚烧处理工程的基础投资及运行成本
Table 2 Infrastructure investment and running cost of MSW incineration engineering

城市生活垃圾焚烧处理工程	采用技术	日处理量单位投资 (万元·t ⁻¹)	处理城市生活垃圾 成本/(元·t ⁻¹)
深圳市政环卫综合处理厂	日本三菱重工马丁炉排炉	30~40	120
温州临江垃圾发电厂	伟明 HMW 二段往复式炉排炉	26	119
无锡华光锅炉股份有限公司	流化床	30	50~70
山东菏泽垃圾发电厂	浙江大学异重循环流化床	27	
泰兴垃圾气化焚烧厂	卡万塔气化焚烧炉	49	
浙江丽水市垃圾焚烧发电厂	热解气化焚烧炉	49	
上海固体废弃物处置中心	美国西屋环境公司等离子体气化	107	

表3 布袋除尘器用电设备基本情况
Table 3 Electrical equipment of bag filter

电机名称	星形卸灰阀	气密风机	热风循环辅助加热器	电动葫芦	灰斗电伴热装置
单机功耗/kW	1.1	2.2	12.5	2.0	10.0
数量/台	4	1	1	1	4

垃圾焚烧处理工程,得到城市生活垃圾焚烧处理工程的基础投资及运行成本,具体见表2^[10-14]。可设采用流化床、炉排炉、气化熔融与等离子体气化焚烧技术的日处理量单位投资分别为30万、35万、50万、108万元/t;流化床、炉排炉与等离子体气化焚烧城市生活垃圾的处理费用分别为60、120、250元/t。有文献显示,气化熔融焚烧技术的处理成本一般为机械炉排的1.5倍以上^[15],本研究取其成本为180元/t。

2.2 能流分析

开展不同城市生活垃圾焚烧技术下的能流分析,一方面可以了解各工艺过程间的能源流动状况及能耗水平;另一方面,可获得系统的净输出能量,进而计算出发电收益。研究中将垃圾焚烧处理过程分为垃圾输送及预处理、垃圾焚烧、发电、烟气处理、灰渣处理5个模块,然后对各模块的能耗情况展开具体分析。

2.2.1 垃圾输送及预处理模块

垃圾通过清运车辆进行收集,一辆4 t柴油汽车百吨公里耗柴油约3 kg,则对于20 t/h焚烧炉,垃圾输送折合单位时间功耗相当于35.46 kW/h。垃圾进入垃圾储存坑后,通过桥式垃圾抓斗起重机运至垃圾料斗,然后再由链板式垃圾输送机送至焚烧炉。参考相关资料,桥式垃圾抓斗起重机运行功率为130 kW^[16];垃圾输送系统布置两套链板式垃圾输送机,单台功率为5 kW^[17]。而对于流化床焚烧系统,需对入炉垃圾进行破碎处理,对于20~60 t/h的垃圾处理量,垃圾破碎机功率为110~250 kW^[18]。

2.2.2 垃圾焚烧模块

目前,国内城市生活垃圾焚烧炉多为机械炉排

炉和流化床焚烧炉,其需要鼓入大量助燃风,某厂采用炉排炉焚烧技术,在垃圾热值为6 000 kJ/kg时,过量空气系数为1.73,通过风机选型,得出电机功率为162 kW^[19];其他焚烧技术可据烟气流分别求得设备能耗。

2.2.3 发电模块

发电系统能耗主要由给水泵和冷却塔能耗组成,某厂单台350 t/d焚烧垃圾炉配备水泵功率为160 kW^[20];发电系统设1用1备两台机械通风冷却塔,参考南京500 t/d生活垃圾焚烧发电厂相关配置,单台冷却塔冷却水量3 700 t/h,配用风机单台功率为140 kW^[21]。

2.2.4 烟气处理模块

垃圾烟气净化系统一般采用半干法工艺,再辅以活性炭喷射吸附及袋式除尘器组成^[22]。半干法工艺能耗主要来自旋转雾化器及大块破碎机。参考相关资料,旋转雾化器的石灰浆喷射量在1~5 m³/h时,其单位时间功耗为74 kW/h^[23];大块破碎机破碎能力在800 kg/h时其单位时间功耗为22 kW/h^[24]。而活性炭喷射装置能耗主要由风机产生,若采用罗茨风机额定进气流量为168 m³/h,电机额定功率为5.5 kW^[25]。对于布袋除尘器运行过程能耗,装置所含各电机功耗如表3所示。

此外,烟气的处理过程一般通过电气化的自动控制完成,控制过程能耗一般由控制电机、低压断路器等设备能耗以及灰输送系统、照明和检修系统能耗组成。单套系统装置总耗电量平均为100 kW·h。而作为全厂的关键设备之一的引风机,以上海江桥生活垃圾焚烧厂为例,该工程采用单台处理能力为500 t/d的炉排炉,配置引风机额定出力为

117 000 m³/h,单台额定功率为 239 kW^[26]。

2.2.5 灰渣处理模块

灰渣处理系统能耗由金属回收装置和灰渣无害化处理装置能耗组成。参考相关资料,金属回收系统功耗为 11 kW,废渣无害化处理装置功耗为 87.2 kW^[27]。而采用气化熔融和等离子体气化焚烧技术的灰渣无需再处理。

2.3 环境影响分析

城市生活垃圾焚烧处理工程主要是以处理垃圾、降低环境污染为目的,是城市管理者必须面对的问题,其不能因追求商业利润最大化而进行取舍或造成二次环境污染。本研究采用中国科学院生态环境研究中心的 AGP 模型开展环境影响分析^[28],并结合污染物价格进行环境成本内在化研究。AGP 模型是在适应我国环境政策基础上建立起来的生命周期评估(LCA)模型,该模型基于工业产品环境设计(丹麦技术大学开发,简称 EDIP)的方法,将环境影响(如全球变暖、臭氧层破坏、酸化等)、资源消耗(如化石燃料、矿产等)和职业健康(如致癌物质、噪音及损害听力的物质等)全部包括在一个模型中。并从全球性、区域性及局部地区 3 个空间尺度上加以区分考虑具体的环境影响类型。结合中国 LCA 标准化基准和权重因子的收集与计算,进而将污染物的不同环境影响类型标准化、加权计算,进而将污染物成本内在化。

2.3.1 影响潜值计算

环境影响潜值指所排放污染物中同类环境影响的总和,可由式(2)计算得出。其中,全球变暖为全球性影响类型,采用全球数据;其他环境影响类型为区域或局地影响,采用中国的环境影响类型数据。此外,污染物的排放可能涉及多种环境影响类型,参考文献可以得知,污染物环境影响当量因子如表 4^[29]所示。

$$EP(i) = \sum (Q(i)_n \times EF(i)_n) \quad (2)$$

式中: $EP(i)$ 为产品生命周期中第 i 种环境影响潜值; $Q(i)_n$ 为第 n 种污染物的排放量, t/t; $EF(i)_n$

为第 n 种污染物的第 i 种环境影响当量因子。

表 4 污染物环境影响当量因子
Table 4 Equivalent factor of pollutants affect

污染物	全球变暖	酸化	水体富营养化	人体毒性
CO ₂	1			
NO _x	320	0.7	1.35	0.78
SO ₂		1		1.2
HCl		0.88		
二噁英				854 000

2.3.2 数据标准化

数据标准化是将各种类型的环境影响潜值无量纲化,进而体现城市生活垃圾焚烧处理工程相对于整个社会活动所造成总的环境影响。本研究选用 1990 年全球变暖环境潜在总影响及中国区域内的酸化、水体富营养化、人体毒性的环境总影响作为标准化基准,如表 5 所示。按照 AGP 模型提出的方法,其计算如式(3)所示。

$$NEP(i) = EP(i) / ER(i) \quad (3)$$

式中: $NEP(i)$ 为第 i 种环境影响潜值标准化值; $ER(i)$ 为第 i 种环境影响潜值的标准化基准数值。

2.3.3 加权评估

为了比较不同环境影响类型的相对严重性,需对各环境影响类型的环境损害程度赋予相应权重。AGP 模型采用“目标距离”思想,即某种环境影响的严重性用该环境影响全社会当前水平与全社会给定的目标水平之间的比值来赋予权重,相关权重因子见表 6。于是,可由式(4)得到加权后的第 i 种环境影响加权潜值。将加权后的各种环境影响潜值按分类相加,最终可得到工程总的环境影响潜值,该潜值越大,对环境的负面影响越大,反之环境影响越小。

$$WP(i) = WF(i) \times NEP(i) \quad (4)$$

式中: $WP(i)$ 为第 i 种环境影响加权潜值; $WF(i)$ 为第 i 种环境影响类型的权重因子。

2.3.4 环境成本内部化

本研究中设定所有污染物的排放量为 1 t,然后对污染物进行标准化和加权处理,从而得出单位质量污染物对应的环境影响潜值,计算公式如式(5)、式(6)所示,通过计算可求得不同污染物的总环境影

表 5 污染物标准化基准
Table 5 Standardized benchmark of pollutants

影响类型	全球变暖	酸化	水体富营养化	人体毒性
标准化基准/(kg·a ⁻¹)	3.77×10 ¹³	2.86×10 ¹¹	7.10×10 ¹⁰	5.76×10 ¹¹

表 6 不同环境影响类型的权重因子
Table 6 Different types of environmental impact weighting factor

影响类型	全球变暖	酸化	水体富营养化	人体毒性
权重因子	0.83	0.73	0.73	2.36

表 7 不同污染物的总环境影响加权潜值
 Table 7 Weighted potential value of environmental impact on different pollutants

污染物类型	CO ₂	SO ₂	NO _x	二噁英
总环境影响加权潜值	2.20×10 ⁻¹⁴	7.47×10 ⁻¹²	2.59×10 ⁻¹¹	3.50×10 ⁻⁶

响加权潜值,结果见表 7。

$$WP(i)_n = EF(i)_n \times WP(i) / ER(i) \tag{5}$$

$$WP_n = \sum WP(i)_n \tag{6}$$

式中:WP(i)_n 为单位质量第 n 种污染物的第 i 种环境影响加权潜值;WP_n 为单位质量第 n 种污染物的总环境影响加权潜值。

研究过程中,模型计算的关键在于找到一个从环境影响角度计算得出的基准污染物排放的环境成本。由于大多数污染物的环境影响类型都不只一种,而污染物排放的环境成本评估通常只能从一种环境影响类型入手,同时不同环境影响类型的污染物价格评估的理论基础有较大差异,因此需要找到一个环境影响类型较为单一的污染物作为标准污染物。一般来说,CO₂的环境影响仅限于全球变暖,因此评价中以 CO₂排放的环境成本为切入点,其环境成本见 FANKHAUSER^[30]的研究成果,2011—2020 年 CO₂排放的环境成本为 25.3 美元(取 1994 年汇率)。于是,在已知一种污染物排放的环境成本的前提下,可以通过式(7)计算其他污染物排放的环境成本。据此可得出,SO₂、NO_x 和二噁英排放的环境成本分别为 73 976.65、256 600.90、3.47×10¹⁰ 元/t。

$$S_{aim} = \frac{S_{CO_2}}{WP_{CO_2}} WP_{aim} \tag{7}$$

式中:S_{aim}为目标污染物排放的环境成本,元/t;S_{CO₂}为 CO₂排放的环境成本,元/t;WP_{CO₂}为 CO₂的总环境影响加权潜值;WP_{aim}为目标污染物的总环境影响加权潜值。

得出污染物排放的环境成本后,可由式(8)以及相应的单位换算后计算出不同排放标准下污染物的减排效益,进而求得垃圾焚烧处理工程总的减排效益。

$$S_{re} = (E_s - E_a) \times y \times S_{aim} \tag{8}$$

式中:S_{re}为污染物减排效益,元;E_s为实际排放值(单位根据实际污染物确定);E_a为城市生活垃圾焚烧排放标准限值(单位根据实际污染物确定),中国、美国和欧盟污染物排放准下,SO₂限值分别为 80、60、50 mg/m³,NO_x限值分别为 250、215、200 mg/m³,二噁英限值分别为 0.1、0.2、0.1 ng TEQ/m³。

3 敏感性分析

3.1 处理补贴对年收益率的影响

图 2 为城市生活垃圾处理补贴对焚烧处理工程年收益率的影响。由图 2 可知,在零补贴的情况下,流化床、炉排炉、气化熔融与等离子体气化焚烧技术的年收益率分别为 11.49%、4.91%、1.93%与-3.88%,流化床焚烧技术的工程效益最佳。从项目投产年算起,即便工程效益最好的流化床焚烧技术投资回收期也需 9 年,气化熔融和等离子体气化焚烧技术在运行年限中皆不能收回投资。随着城市生活垃圾焚烧处理补贴的提高,各焚烧技术下的年收益率也逐渐提高,等离子体气化焚烧技术的工程效益因处理费用较高而显著劣于其他焚烧技术。要达到流化床焚烧技术零补贴情况下的经济效益,炉排炉、气化熔融与等离子体气化焚烧技术分别需补贴约 70、140、500 元/t,因此各地区应根据自身经济状况选择合适的城市生活垃圾焚烧技术。

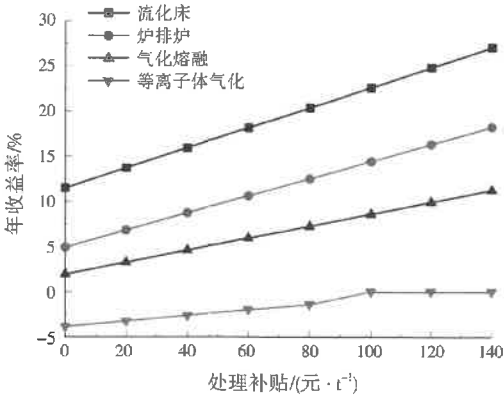


图 2 城市生活垃圾处理补贴对年收益率的影响
 Fig.2 Annual return influence by MSW disposal subsidies

3.2 不同焚烧技术选择下的环境影响

图 3 为不同焚烧技术选择下的环境影响潜值。由图 3 可以看出,各焚烧技术下区域的水体富营养化和全球变暖影响最显著,而人体毒性影响最小。这表明,NO_x的环境影响最显著,而二噁英因排放限值已很严格,所以其环境影响最小。因此,在今后城市生活垃圾焚烧处理排放标准的制定中,应该重点考虑 NO_x的排放限值。各焚烧技术的环境影响潜值大小顺序为:流化床焚烧技术>炉排炉焚烧技术>气化熔融焚烧技术>等离子体气化焚烧技术;气化熔融和等离子体气化焚烧技术的环境影响比其

他焚烧技术小一个数量级。据此,可以预见,随着排放政策的日益严格,流化床和炉排炉焚烧技术要么采取更先进的烟气处理设备,要么将逐步被其他先进的焚烧技术淘汰。

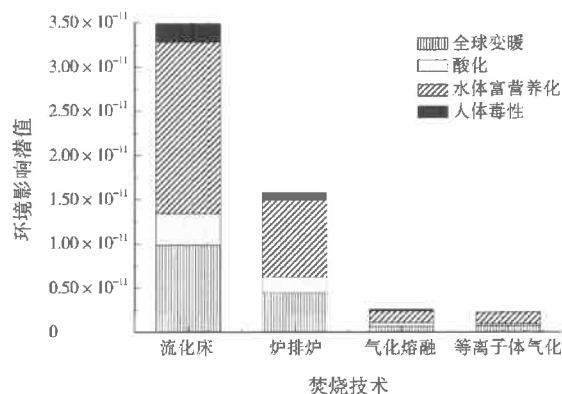


图3 不同焚烧技术选择下的环境影响潜值

Fig.3 Potential value of environmental impact at different incineration technology choice

3.3 环境成本对年收益率的影响

图4为城市生活垃圾焚烧工程在不同排放标准下的年收益率,其中初值为污染物直接排放;零排放为不排放任何污染物。由图4可以看出,考虑污染物排放的环境效益,在现行中国排放标准下,流化床、炉排炉与气化熔融焚烧技术的工程效益都将得到较大提升。随着排放标准的更加严格,各城市生活垃圾焚烧处理工程的年收益率都出现了下降,其中流化床焚烧技术随排放标准的严格下降最显著;气化熔融焚烧技术的工程效益相对较优。在各种焚烧技术中,等离子体气化焚烧技术的年收益率受环境效益的影响较小,这是因为其所排污染物显著低于其他焚烧技术,由此产生的环境效益相对变化幅度较小的缘故。综合而言,随着今后排放标准的日趋严格,气化熔融焚烧技术最有可能走向商业化应用前沿。

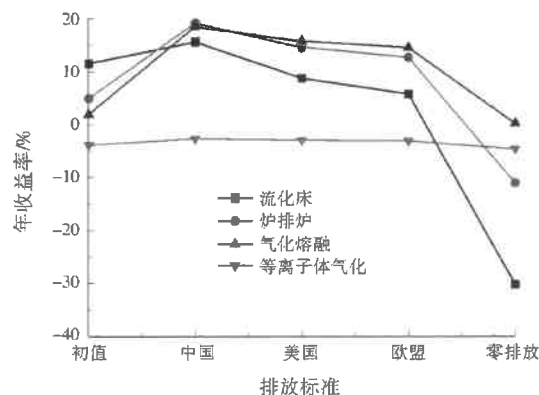


图4 城市生活垃圾焚烧工程在不同排放标准下的年收益率
Fig.4 Annual return of MSW incineration engineering under different emission standards

4 结论

(1) 在零补贴的情况下,流化床焚烧技术的工程效益最佳,但从项目投产年算起,其投资回收期也需9年;炉排炉、气化熔融与等离子体气化焚烧技术要达到流化床焚烧技术零补贴情况下的经济效益,分别需补贴约70、140、500元/t。各地区应根据自身经济状况选择合适的城市生活垃圾处理技术。

(2) 各城市生活垃圾焚烧技术下水域富营养化和全球变暖影响最显著,而人体毒性影响最小。这表明, NO_x 的环境影响最显著;二噁英的环境影响最小。气化熔融焚烧技术和等离子体气化焚烧技术的环境影响比其他两种焚烧技术小一个数量级。

(3) 考虑污染物排放的环境效益,在现行中国排放标准下,流化床、炉排炉与气化熔融焚烧技术的工程效益都将得到较大提升。随着排放标准的更加严格,流化床焚烧技术的年收益率下降最显著;气化熔融焚烧技术的工程效益相较最优。

参考文献:

- [1] 张涛,赵增增.城市生活垃圾焚烧炉渣在混凝土中的应用研究[J].环境污染与防治,2014,36(4):65-69.
- [2] 宾晓蓓,李倩.国内外城市生活垃圾处理现状与处理技术[J].北方环境,2011,23(10):42-44.
- [3] 李崇,任国玉,高庆先,等.固体废物焚烧处置及其清洁发展机制[J].环境科学研究,2011,24(7):819-827.
- [4] 张记市,谢刚,王华.垃圾焚烧烟气净化处理技术[J].环境技术,2002,20(6):26-30.
- [5] 赵笛.央视曝垃圾焚烧飞灰含致癌物——深圳能源上黑榜[EB/OL]. (2013-12-19). <http://www.cfi.net.cn/p20131219000135.html>.
- [6] 杨捷,汪小慧,赵黛青,等.城市生活垃圾气化发电的技术经济性评价[J].可再生能源,2013,31(7):120-123.
- [7] 徐哲明,叶小郭,姚德飞,等.生活垃圾焚烧炉污染物排放分析[J].环境科技,2011,24(21):30-31.
- [8] 黄耕.等离子气化技术在固体废物处理中的应用[J].技术与工程应用,2010(6):43-45.
- [9] 朱颖.环境友善的垃圾处理技术——气化熔融技术[J].中国资源综合利用,2005(8):9-13.
- [10] 戴张波.温州临江垃圾发电厂二期工程投产[EB/OL].(2011-07-30).http://www.wzxzfj.gov.cn/art/2011/7/30/art_515_73893.html.
- [11] 沈辉忠,王政.循环流化床垃圾焚烧技术特点及优势之探讨[J].江苏锅炉,2010(2):7-11.
- [12] 赵燕凌.菏泽电厂一叶可知秋——福布斯富豪赌垃圾发电[EB/OL].(2005-06-06).<http://media.163.com/05/0606/09/11J75E7600141ELM.html>.

(下转第41页)