

垃圾填埋场填埋气回收处理与利用

王进安, 杜巍, 刘学建, 卢丽超, 胡玉

北京市阿苏卫垃圾卫生填埋场, 北京 102211

摘要: 简单介绍了阿苏卫垃圾卫生填埋场的建设和运行情况, 并对填埋场的垃圾成分和垃圾量进行了分析, 得到该填埋场填埋气的实测组分. 依据经典 EPA 产气模型对填埋场潜在填埋气产量进行了预测. 结果表明, 在 2005—2039 年的运行期间, 预计该填埋场填埋气的平均产量约为 $33.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. 比较研究了填埋场填埋气的回收利用技术, 指出并网发电是该填埋场填埋气的最佳利用方式. 通过对填埋场填埋气发电项目进行的技术经济分析表明, 该工程总投资为 3394×10^4 元, 项目年直接经济效益达 230×10^4 元.

关键词: 填埋气; 回收利用; 发电

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1001-6929(2006)06-0086-04

Recovery and Utilization of Landfill Gas from Landfill Site

WANG Jin-an, DU Wei, LIU Xue-jian, LU Li-chao, HU Yu

Asuwei Waste Sanitary Landfill Site, Beijing 102211, China

Abstract: The construction and operation of Asuwei Waste Sanitary Landfill were briefed, the refuse components and refuse quantities analyzed, and the component of the landfill gas measured. Based on an EPA gas produce projection model, the gas output from Asuwei landfill will be about $33.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ from 2005 to 2039. Different landfill gas recovery technologies were also compared and it is found that power generation by landfill gas is the best recovery utility contrary to other technologies. The technical and economical feasibility analysis shows that the total investment of landfill gas power generation project is 33.94 million yuan, and the annual direct economic benefit is 2.30 million yuan.

Key words: landfill gas; recovery; power generation

垃圾填埋气(LFG)一直被视为有害气体: 5%~15%的甲烷与空气混和即易引起爆炸; 其中的挥发性有机物及 CO_2 溶入地下水, 可造成地下水硬度升高; 甲烷温室效应潜在值是 CO_2 的 21 倍^[1-2]; 填埋气逸出会导致填埋场及其附近植物根部因缺氧而死亡; 某些填埋场释放的气体能致癌以及因填埋场的卫生问题而导致其他疾病等. 据测算, 在填埋场运行期内每 t 垃圾约可产生 39~390 m^3 的填埋气^[3-5].

填埋气的处理主要采取自然排放和集中收集处理 2 种方式, 处理方式受当地的经济条件限制. 经济欠发达地区或日处理量小于 100 t 的填埋场大多采取自然排放形式, 利用石笼或填埋气导气管将填埋

气引出, 避免出现安全事故, 有些小型填埋场甚至没有填埋气导排设施; 正规大中型填埋场在运行初期由于填埋深度不够也是采取自然排放的形式.

随着能源短缺问题日益严重, 人们对填埋气的认识发生了变化, 因为其主要成分——甲烷的热值约为 18.81~22.99 MJ/m^3 , 可以作为再生能源加以利用. 近几年填埋气已逐渐从自然排放、分散焚烧转向作为能源收集利用.

集中收集处理方式主要包括直接燃烧和变为能源利用: 填埋气集中收集后经净化作为工业燃料或民用; 将 $\varphi(\text{CH}_4)$ 提高到 80% 以上作为清洁燃料, 如全球环境基金项目(GEF)支持的鞍山羊耳谷项目; 用作渗滤液蒸发的燃料, 如北京安定填埋场填埋气项目; 用于发电, 在杭州、南京、西安、广州均有应用实例^[6]; 其他利用方式包括制造燃料电池、甲醛及轻柴油等, 但均未进入商业化生产阶段.

1 填埋气产生过程及产气量预测

1.1 垃圾填埋量及垃圾组分

阿苏卫垃圾卫生填埋场(以下简称阿苏卫填埋场)隶属于北京市四清环卫工程集团有限责任公司,主要承担北京市东城、西城区和昌平区 7 个乡镇的垃圾处理任务。填埋库区占地 43 hm²,设计库容 1.2×10⁷ m³,设计处理能力 2 000 t/d,设计寿命 17 a。阿苏卫填埋场属于山前平原,浅层滞水丰富,一期工程下挖 4.8 m,主要采用水平膨润土板和垂直射水造墙相结合的防渗办法^[7],二期工程主要采用 HDPE 膜进行水平防渗。垃圾填埋主要采取“路堤结合”工艺^[8],旱季利用垃圾修建分区堤坝作为道路和工作平台,保证了雨季行车和垃圾卸车;采取粘土与 HDPE 膜相结合的覆盖方式,极大地减少了垃圾的曝露和蚊蝇滋生。一期工程于 1994 年 12 月投入使用,已经完成首层平台填埋,并进行了局部封场,垃圾填埋深度 15 m;二期工程于 2004 年 3 月投入使用;截至 2005 年底,累计填埋垃圾 800×10⁴ t。

表 1 为阿苏卫填埋场垃圾的主要成分。据统计,阿苏卫填埋场在运行初期,垃圾填埋量上升较快,1997 年垃圾填埋量即达 88.6×10⁴ t,1998 年略有下降,此后呈稳定的上升趋势,至 2005 年共填埋垃圾 76.4×10⁴ t(见图 1)。

表 1 阿苏卫填埋场垃圾的主要成分

Table 1 Component of refuse in Asuwei landfill

成分	食物	纸类	草木	塑料	织物	玻璃	灰土	金属	其他
w/ %	27.4	12.4	3.8	8.0	4.3	3.9	13.0	1.2	26.0

注:钻头取样,取样量为 9.4~20.2 kg/次,取样点的垃圾填埋深度为 13~14 m。

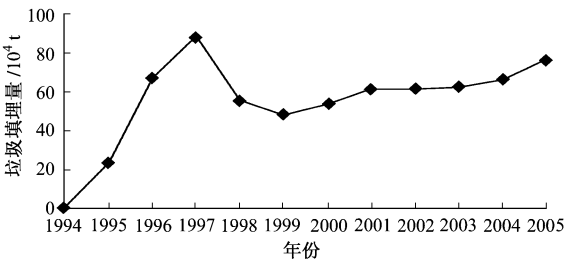


图 1 1994—2005 年阿苏卫填埋场的垃圾填埋量

Fig. 1 Landfill refuse quantity in Asuwei landfill from 1994 to 2005

1.2 填埋气主要成分及产量预测

1.2.1 填埋气主要成分

垃圾填埋气是由于生活垃圾中大量有机物被微

生物降解而产生。填埋气成分较为复杂,可分为 3 类:CH₄ 和 CO₂ 为主要成分,其中 φ(CH₄) 为 50%~70%,φ(CO₂) 为 30%~50%;H₂S、NH₃ 和 H₂ 等为常见成分,其体积分数之和不足 5%;而烷烃、环烷烃、芳烃、卤代化合物等挥发性有机物(VOC)为微量成分,其体积分数之和低于 1%^[9-10]。

通过对阿苏卫填埋场进行现场钻孔,定期对收集到的填埋气进行分析,分析仪器采用便携式四组分气体红外线分析仪^[11]。分析结果表明,该填埋场填埋气主要为 CH₄ 和 CO₂,其中平均 φ(CH₄) 为 52.4%~60.4%(见表 2)。

表 2 填埋气中各组分的含量变化

Table 2 Concentration variation of landfill gas components

监测时间/d	φ(CH ₄) / %	φ(O ₂) / %	φ(CO ₂) / %	填埋气抽取量/(m ³ ·h ⁻¹)
15	52.4~60.4	0.2~1.8	31.9~38.4	218~476

1.2.2 填埋气产量预测

影响填埋气产量的因素主要包括有机质的种类及含量、填埋场内部的温度和湿度、填埋场每 d 的覆土情况及最终覆土情况等。一般在填埋场封闭后的 5~8 a 填埋气产量会达到最高峰;之后随着填埋时间的延长,填埋气产量将随之减少。填埋气产量可以采用经典的数学统计模型和动力学模型来计算^[12]。以下用一级降解 Scholl Canyon 模型来模拟填埋气产量^[13-14]:

$$Q_{\text{IFG}} = 2L_0R(e^{-kt} - e^{-ct})$$

式中, Q_{IFG} 为垃圾填埋气总产量,m³/a; L_0 为单位垃圾产甲烷总量,m³/kg; R 为填埋场垃圾填埋量平均值,kg/a; k 为甲烷产率系数,1/a; t 为填埋场运行时间,a; c 为填埋场关闭时间,a。

根据美国环境保护局(EPA)的相关研究,对于阿苏卫填埋场填埋气产量进行模拟计算时,取 L_0 为 0.100 m³/kg, k 为 0.04 1/a^[15]。计算结果表明,阿苏卫填埋场填埋气产量将在 2011 年达到最大值 6.023×10³ m³/h,此后填埋气产量将逐年下降(见图 2)。在 2005—2039 年的运行期间其填埋气平均产量将达到 33.7×10⁶ m³/a。

2 填埋气回收处理

阿苏卫填埋场填埋气经历了从自然排放到集中收集处理的 2 个阶段。自 1994 年 12 月投入运行以来,其填埋气主要是利用导气管自然排放;2001 年 6

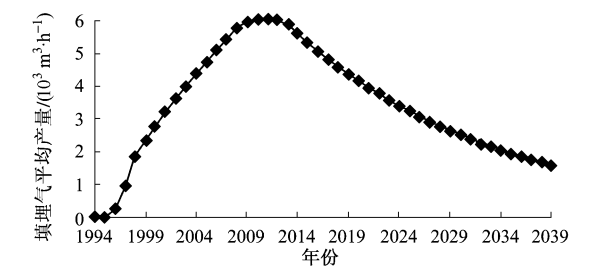


图 2 阿苏卫填埋场潜在填埋气平均产量
随填埋时间的变化

Fig.2 Variations of average landfill gas latency
output in Asuwei landfill

月,北京市四清环卫工程集团有限责任公司投资 800×10^4 元,建设了用于净化空气和保障安全的火炬安全系统.该系统主要由填埋气收集和自动控制点燃系统构成,采用计算机自动控制系统,当填埋气中的 CH_4 含量达到一定值时,自动点火;当 CH_4 含量较低时则自动熄火.表3为2003—2005年采用火炬安全系统后阿苏卫填埋场填埋气的燃烧量.

表 3 阿苏卫填埋场填埋气的燃烧量

Table 3 Quantity of Asuwei landfill gas combustion			
年份	2003	2004	2005
燃烧量/ m^3	514 067	1 471 835	892 163

以火炬燃烧方式处理填埋气,其设备简单,初始投资不大,操作简便,运行维护成本较低.但该处理方式集气效率较低,燃烧效率也会受到气候的影响,处理效果不稳定.此外,该处理方式是将填埋气作为“废气”看待,其目的是为了净化垃圾填埋场附近的大气、防止填埋气爆炸和自燃事故的发生,而未能开发出填埋气的资源价值.

填埋气作为能源加以利用的各种技术都已较为成熟,包括发电、热电联产、用作锅炉或居民燃料等.其中使用最多、技术最为成熟的是填埋气回收发电技术^[16].由于在阿苏卫填埋场周围2 km内,没有较大的工业热力和民用燃气用户,因此投资热力和燃气产品的销售效益难以保证;同时,由于填埋场产气过程的随机性,导致燃气供应的稳定性和可靠性具有一定风险,而区域供热的季节性又难以保证非采暖季节填埋气的回收利用,因此填埋气最好的利用方式是并网发电.

3 填埋气并网发电

3.1 工艺技术路线

阿苏卫填埋场填埋气发电系统包括填埋气井、浓缩分离槽、抽气站、过滤处理以及发电机组等,发电系统流程见图3.该系统的初步设计值:填埋气平均产量为 $1.08\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$;一期发电机组为 $2\times 1\,250\text{ kW}$ 内燃发电机,二、三期各增加 $2\times 1\,250\text{ kW}$ 内燃发电机;一期电力输出为 $16.644\text{ GW}\cdot\text{h}$,二期为 $33.288\text{ GW}\cdot\text{h}$,三期为 $49.932\text{ GW}\cdot\text{h}$.

根据测算,阿苏卫填埋场填埋气的回收率约为70%,通过打垂直气井,可回收气体 $10.8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,填埋气中 $\varphi(\text{CH}_4)$ 为52.4%~60.4%.

3.2 系统参数的设置

3.2.1 填埋气收集系统

填埋气垂直收集井为100~120个;井距40~50 m;抽气泵气量为 $43\,200\text{ m}^3/\text{d}$;应急火炬 $1\,200\text{ m}^3/\text{d}$.



图 3 阿苏卫填埋场填埋气发电系统流程
Fig.3 Flow chart of power generator system
using Asuwei landfill gas

3.2.2 内燃发电机

机械输出1 400 kW;Stanford 400 V发电机>1 500 kVA;发电机效率约为98%; NO_x 排放量约为 $212\text{ mg}/\text{m}^3$,CO排放量约为 $354\,212\text{ mg}/\text{m}^3$;能量输入3 783 kW.

3.3 主要技术经济指标

阿苏卫填埋气发电厂占地 $1\,800\text{ m}^2$,设计寿命为25 a,回收气体 $10.8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,24 h连续运行,年满负荷发电开机率80%,自用电比率5%,输出电力2 500 kW.工程设计总投资 $3\,394\times 10^4$ 元,工程初始投资见表4,项目年直接经济效益达 230×10^4 元.

3.4 运行费用及经济效益

3.4.1 运行费用

工程运行费用包括人力、动力、设备维修检测等,具体见表5.

3.4.2 经济效益

项目实施后,填埋气回收发电可实现直接上网,平均电价为0.52元/(kW·h);年直接经济效益(税前) 230×10^4 元.

表 4 填埋气发电设施建设经费预算

Table 4 Budget of construction landfill gas for power generator

系统设施建设	设备	投资费用 ^{1)/10⁴} 元
填埋气发电设施	引擎、发电机组、电力输出模块、冷凝分离器、过滤设备、安装及维修工具、分析仪器及辅助设备、设备运输、关税以及杂项费用	2 784
发电设施场地安装	整地、覆石、围篱、机组基座、电气管道及结线、连接填埋气管、机组安装、排水设施、避雷系统、接地系统、场地园艺、安装工具及机具设备租赁、设计顾问、机组试车	100
填埋场建设	场地整平及再覆土、填埋气井的材料及施工、填埋气收集站材料及施工、填埋气收集管材料及施工、砂石、机具及车辆租赁费用、设计、顾问等	260
电力上网	配线材料及施工、并联测试、其他接口设备	250
合计		3 394

1) 以初期投资 2 部发电机组(2 500 kW) 为估算基准, 实际机组数量需视填埋气实际产量而定。

表 5 阿苏卫垃圾填埋气发电项目运行费用

Table 5 Operating costs of Asuwei landfill gas power generation project

项目	运行费用 ^{1)/10⁴} 元
动力、水费	65
维护及维修费	202
工资、奖金	90
管理费及其他	12
固定资产折旧(以 18 a 计)	181
合计	550

1) 以 2 部发电机组(2 500 kW) 为估算基准, 不包括设备折旧等。

4 结语

依据模型预测, 在 2005—2039 年的运行期间阿苏卫填埋场填埋气平均产量可达 $33.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, 并网发电是其最佳利用方式。阿苏卫填埋场填埋气回收发电项目一旦实施, 项目年直接经济效益可达 230×10^4 元。

参考文献:

[1] Gardner N. Gas emissions from landfills and their contributions to global warming[J]. Applied Energy 1993, 44: 165—174

[2] 张仁健, 王明星, 李晶. 中国甲烷排放现状[J]. 气候与环境研究, 1996, 4(2): 194—202

Zhang Renjian, Wang Mingxing, Li Jing. The present status of the emission methane in China [J]. Climatic and Environmental Research, 1996, 4(2): 194—202.

[3] 时景丽, 王仲颖, 胡润青. 我国垃圾填埋场填埋气体的排放和回收利用[J]. 研究与探讨, 2002, (8): 26—28.

Shi Jingli, Wang Zhongying, Hu Runqing. The emission and utilization of landfill gas in M. S. W landfill site in China[J]. Research and Approach, 2002, (8): 26—28.

[4] Williams P T. Waste treatment and disposal [M]. London: John Wiley & Sons, 1998. 233—236

[5] Amoor C.A. Methane migration around sanitary landfills[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(2): 131—144.

[6] 阮建国. 深圳下坪垃圾卫生填埋场沼气收集与利用方式研究[J]. 建筑热能通风空调, 2003, (1): 43—44.

Ruan Jianguo. Research on methane gathered and explitation of Shenzhen Xiaping stuffing garbage spot [J]. Building Energy & Environment, 2003, (1): 43—44.

[7] 王进安, 刘学建, 夏立江, 等. 射水造墙技术在平原型垃圾填埋场防渗补救中的应用[J]. 环境科学研究, 2003, 16(4): 47—49.

Wang Jin' an, Liu Xuejian, Xia Lijiang, et al. The case study of remediying anti-permeable system using the water jet grouting curtain process in a landfill site [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(4): 47—49.

[8] 王进安, 黄仁华, 杜巍, 等. 北方大型填埋场“路堤结合”垃圾填埋工艺探讨[J]. 环境卫生工程, 2004, 12(2): 95—97.

Wang Jin' an, Huang Renhua, Du Wei, et al. Road-embankment integrating landfill process for northem large scale landfill site[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2004, 12(2): 95—97.

[9] Nyns E J, Gendebien A. Landfill gas: from environment to energy [J]. Water Sci Technol, 1993, 27(3): 253—259.

[10] Gardner N, Manley B J W, Pearson J M, et al. Gas emissions from landfills and their contributions to global warming [J]. Applied Energy, 1993, 44(22): 165—174

[11] 唐青云, 王琪, 董路. 便携式红外线分析系统在垃圾填埋场的应用[J]. 分析仪器, 2002, (3): 40—42.

Tang Qingyun, Wang Qi, Dong Lu. The use of portable infrared gas analyzer in landfill site[J]. Analyzer, 2002, (3): 40—42

[12] Houghton J T, Meira Filho L G, Lim B, et al. Guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. London: IPCC, 1995.

[13] Christensen T H, Cossu R, Stegmann R, et al. Landfill of waste: biogas[M]. London: E& FN Spon, 1996.

[14] Emcon. Methane generation and recovery from landfills [M]. San Jose, CA: Ann Arbor Science Publishers, 1980. 44—58

[15] USEPA. U. S. landfill control technologie [A]. Anon. U. S. landfill gas system engineering design [C]. Washington DC: USEPA, 1994.

[16] 聂永丰. 三废处理工程技术手册——固体废物卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 672—674.

Nie Yongfeng. Handbook of treatment of air pollution, wastewater and solid wastes: volume of solid wastes [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 672—674.