

生活垃圾焚烧发电厂沼气利用及碳减排分析

宋玄进, 倪兵, 刘瑶, 郝玉刚, 杨旭
(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 基于生活垃圾焚烧发电厂渗沥液厌氧发酵沼气高效利用目标, 通过对比沼气入炉掺烧及独立发电路径, 论证沼气发电在资源化利用率、运行稳定性及碳减排方面的综合优势。以某 1 200 t/d 垃圾焚烧发电厂案例, 探讨沼气产气量、预处理工艺及发电系统设计, 并分析沼气发电的节能效果和碳减排效益。研究表明, 沼气发电技术可实现年均温室气体减排量达 3.978 万 tCO₂e, 在无政府补贴情景下, 项目年发电收益可达 243 万元。沼气发电不仅能将垃圾中的有机物质转化为电能, 还能有效避免甲烷等温室气体的排放, 具有显著的经济效益和社会效益。

[关键词] 渗沥液; 沼气发电; 生活垃圾; 脱硫工艺; 碳减排

[中图分类号] X799.3 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2025)05-0093-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.05.014

0 引言

我国目前城镇生活垃圾处理以焚烧为主, 填埋为辅。根据住房和城乡建设部《2023 年中国城市建设统计年鉴》, 我国城镇生活垃圾清运量达 2.540 8 亿 t, 同比 2022 年清运量的 2.444 5 亿 t, 增长率为 4%; 2023 年生活垃圾无害化处理量为 2.540 2 亿 t, 其中焚烧处理量为 2.095 4 亿 t, 卫生填埋量为 0.189 3 亿 t, 其他方式处理量为 0.255 5 亿 t, 焚烧处理占比超 80%^[1]。生活垃圾处理中的沼气按来源一般可分为两部分: 一是生活垃圾焚烧处理厂渗沥液处理站厌氧发酵产生的沼气, 其产生量受垃圾渗沥液中有有机物浓度影响; 另一部分是卫生填埋场垃圾厌氧发酵产生的填埋气, 其产生量与垃圾填埋时间、填埋所在地的气候条件有关。

沼气的主要成分包括 CH₄ (一般占比 50% ~ 80%)、CO₂ (占比 20% ~ 40%) 及少量的 H₂S、CO、H₂、N₂、NH₃ 等^[2], 具有较高的热值。沼气是一种清洁能源, 经过净化处理去除 H₂S 等杂质后, 可以替代传统化石能源用于发电、供热等系统, 在一定程度上缓解能源危机^[3]。

生活垃圾处理中的沼气利用主要途径是将生活垃圾在厌氧环境下分解产生的沼气收集后送入垃圾焚烧炉燃烧或进行沼气发电。随着生活垃圾分类的深入开展, 垃圾热值逐年提高, 垃圾焚烧处理中的焚烧炉热负荷达到设计值。在此情形下, 生活垃圾渗沥液处理站厌氧单元产生的沼气不宜接入焚烧系统燃烧, 而如果选择直接通过火炬燃烧会造成能源浪费, 所以直接燃烧处理只建议作为临时应急措施使用, 持续产生的沼气采用需要更加合理高效的利用方式^[4]。

沼气发电技术因具有能源转换效率高、碳减排效益显著等优势, 逐渐成为研究热点。然而, 实际工程中仍面临沼气产量波动性大、H₂S 腐蚀性强、发电系统适配性不足等技术瓶颈。本文通过某 1 200 t/d 生活垃圾焚烧工程中沼气发电项目的应用实践, 对沼气产生量、沼气发电工艺流程、预处理方法及沼气发电机组功率确定进行分析阐述, 以为生活垃圾焚烧发电厂沼气高值化工程应用提供参考, 并定量评估其碳减排与经济效益, 以验证沼气独立发电模式的可行性与优越性。

[收稿日期] 2025-04-01

[作者简介] 宋玄进(1986—), 男, 江西余干人, 硕士, 高级工程师, 主要从事固体废物处理及大气污染防治研究和咨询设计工作。

[引用格式] 宋玄进, 倪兵, 刘瑶, 等. 生活垃圾焚烧发电厂沼气利用及碳减排分析[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(5): 93-99.

SONG Xuanjin, NI Bing, LIU Yao, et al. Analysis of biogas utilization and carbon emission reduction in domestic waste incineration power plant[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(5): 93-99.

1 沼气利用方案对比

目前国内运行的垃圾焚烧项目中,渗沥液处理站厌氧单元产生的沼气利用方案各不相同。有的项目将沼气通过管道收集送入垃圾池内,最终和垃圾池的臭气一并送入焚烧炉后燃烧释放热量。垃圾池内的垃圾在堆存发酵过程中会产生沼气,垃圾池旁的渗沥液收集池和沟道间也可能积累了沼气,当渗沥液处理站厌氧产生的沼气进入密闭的有限空间垃圾池中,沼气浓度增大。由于沼气的主要成分为 CH_4 ,是一种易燃易爆的气体,当 CH_4 在空气中的体积分数达到5%~15%时^[5],会存在爆炸风险。因此,该方案存在较大的安全隐患,目前基本不被采用。垃圾焚烧发电厂中沼气一般有以下两种利用方案。

1.1 沼气入炉掺烧

沼气入炉掺烧,即将沼气作为焚烧炉额外的燃料送入焚烧系统,有两种掺烧方式:一是沼气通过布置于焚烧炉炉墙的沼气喷枪直接回喷入炉燃烧;二是沼气通过焚烧炉炉墙设置的沼气燃烧器引燃后进入焚烧炉燃烧。

沼气通过喷枪进入炉排燃烧段上部燃烧释放热量的方式虽然系统简单,但是当垃圾燃烧不稳定时,沼气回喷入炉后有可能存在燃烧不及时现象。采用沼气燃烧器将沼气入炉掺烧时,沼气燃烧器的安装位置通常位于辅助燃烧器附近。在垃圾热值较低时,沼气可作为补充辅助燃料,提高炉膛温度。沼气入炉燃烧,产生的热量将提高余热锅炉的产汽量,相应增加汽轮机发电机组的发电量。但随着城镇生活垃圾分类工作的推进,生活垃圾入炉热值逐年提高。在很多项目实际运行过程中,焚烧炉正常燃烧时并不需要助燃,焚烧炉热负荷就可以达到设计工况。沼气入炉掺烧产生的额外热量在一定程度上会造成炉内温度过高,从而带来受热面结焦等问题。

1.2 沼气发电

当沼气产量稳定并可形成一定规模时,可利用沼气进行发电。收集好的沼气一般先经增压、脱硫、冷干、过滤等预处理后,进入内燃机燃烧发电。沼气发电机组的效率较高,产生的电量可为垃圾处理厂提供一部分自用电,降低厂用电率,经济效益可观^[3]。

两种沼气利用方案对比见表1。根据不同方案的特点和经济效益,一般工程项目主要选择沼气发电方式。

表1 沼气利用方案对比

利用方案	特点	经济效益
喷枪直接回喷入炉	系统简单,需配套设置不锈钢或合金钢材质的沼气回喷枪。存在燃烧不稳定和不及时情况	每立方沼气可产生电量约1 kW·h
沼气入炉掺烧	系统相对复杂,需配套沼气燃烧器及控制系统,费用较高。现阶段垃圾热值较高,焚烧炉达产运行时,沼气燃烧器存在经常不投用现象	每立方沼气可产生电量约1 kW·h
沼气发电	系统复杂,配套设备较多,投资相对较高,但沼气资源化利用率高,运行稳定可靠	每立方沼气可产生电量约2.2~2.7 kW·h

2 沼气发电工艺

本文以我国南方地区某生活垃圾焚烧发电厂沼气发电项目为例进行分析。该项目生活垃圾焚烧处理总规模为1200 t/d,分两期建设,一期规模800 t/d,二期规模400 t/d。该项目沼气主要来源于工程配套的渗沥液处理站,其设计规模为600 m³/d,分两期工程建成,设计规模均为300 m³/d。渗沥液处理系统运行规模为450~500 m³/d。

沼气经预处理净化达标后进入沼气发电机组发电,其工艺流程如图1所示。

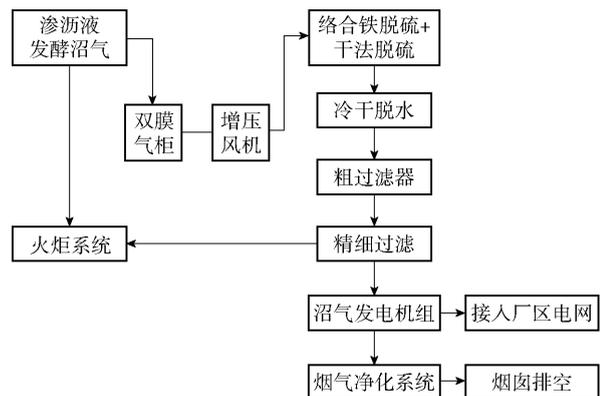


图1 沼气发电工艺流程

沼气发电产生的电力可进入厂区电力系统,该项目沼气发电机采用10 kV电压等级,通过1回10 kV电缆线路并入垃圾焚烧发电厂的10 kV母线段。沼气发电机组产生的尾气通过净化系统处理达标后排放。

该项目设置了火炬系统作为应急使用,当沼气

发电系统不能完全利用沼气时,沼气火炬接收双膜气柜物位信号自动点燃,防止沼气直接排放。火炬系统由火炬筒体系统、自动控制系统和进气管道等组成。火炬系统流程简图如图2所示。该项目利用原渗沥液处理厌氧单元已配备的火炬系统,新增相应的控制系统,可满足沼气发电系统的应急状态使用。

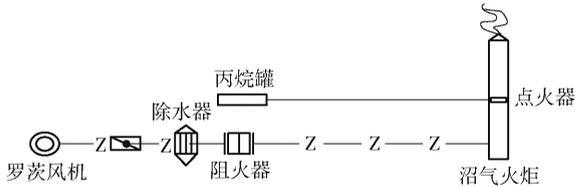


图2 火炬系统流程示意图

为了充分利用沼气发电机组排气余热,通常可配套采用余热锅炉进行余热回收,沼气发电机组排烟温度为450~550℃,经余热锅炉换热后排烟温度约为150℃,余热锅炉产生的蒸汽可用于企业内部。该机组排气理论可回收余热约73 kW,烟气余热锅炉每小时可产生0.25 t 0.6 MPa饱和蒸汽,可回收余热有限。综合考虑经济性,不设置烟气余热回收系统。

2.1 沼气产气量及预处理

2.1.1 沼气产气量分析

生活垃圾产生的渗沥液在厌氧处理过程中会产生大量的沼气。其产量计算公式^[6]如式(1)所示。

$$Q_a = \frac{Q(S_0 - S_e)\eta}{1\ 000} \quad (1)$$

式中: Q_a 为沼气产量, Nm^3/d ; Q 为渗沥液流量, m^3/d ; η 为沼气产率, Nm^3/kgCOD ,一般取值(0.35~0.6) Nm^3/kgCOD ; S_0 为厌氧反应器进水有机物浓度(mgCOD/L); S_e 为厌氧反应器出水有机物浓度(mgCOD/L)。

根据式(1)计算沼气理论产量,并与项目现场实测数据进行对比分析、修正,结果如图3所示。由图3可知,沼气产率修正系数为0.43。根据表2中渗沥液系统日处理量、水质分析数据,结合式(1),测算渗沥液厌氧系统沼气平均产量,并汇总分析最大值、最小值和80%概率值,其结果如图4所示。

其中,将当月沼气产量由低到高排列,第24天的沼气产量(30天的80%为24天)即为80%概率值。这个参数的意义为,在设计沼气发电规模下,当月24天的沼气可以充分利用,剩余6~7天的

表2 2024年度渗沥液水质化验数据

	mg/L					
月份	1	2	3	4	5	6
调节池 COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	24 335	27 788	38 915	39 477	37 530	34 250
厌氧平均出水 COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	3 483	2 664	6 371	5 072	3 271	3 945
渗沥液日平均处理量/($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	177	263	355	406	445	474
月份	7	8	9	10	11	12
调节池 COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	41 539	43 255	44 254	38 358	33 059	22 114
厌氧平均出水 COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	3 578	4 274	3 543	3 354	5 243	6 217
渗沥液日平均处理量/($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	419	399	247	255	363	372

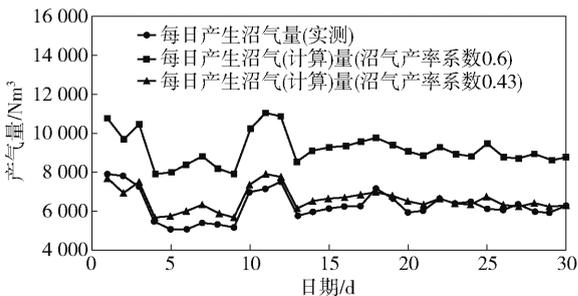


图3 现场实测2024年4月份沼气产量及修正

超过发电处理能力的沼气进入配套气柜存储或以火炬燃烧方式解决。

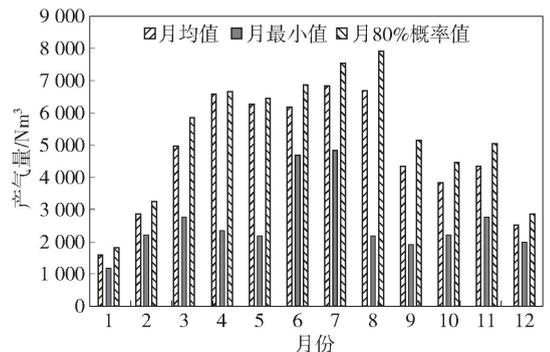


图4 2024年沼气产量汇总

根据图3可知,沼气产量具有一定的波动性,考虑到沼气发电机组处理能力可以在30%~100%之间波动,该日沼气产生量按额定7000 m³/d进行设计。

沼气发电机组年工作时间为8000 h计,考虑到1月份沼气产生量最低,因此将大修时间放在1月份。7月、8月的沼气单日产量80%概率值高于7000 m³/d,超过发电处理能力的沼气进入配套气柜存储或通过火炬燃烧方式解决。

为保证机组连续稳定运行,设置1个有效容积为800 m³的双膜气柜。相对于传统的钢构气柜,双膜气柜造价低,安装迅速,无需防腐维护。双膜气柜配置一套超压保护装置,以防意外情况下产生超压,进而保护内膜和外膜(根据《大中型沼气工程技术规范》(GB/T 51063—2014), $Q > 5000 \text{ m}^3/\text{d}$ 为规模较大的工程,储气容积占日用气量的10%)。双膜气柜设置物位检测装置,沼气产量过多时,多余的沼气采用火炬燃烧方式处置。

2.1.2 沼气预处理

生活垃圾焚烧工程中,渗沥液处理过程产生的沼气含有H₂S、H₂O以及颗粒物等少量杂质,沼气利用前需进行预处理^[3]。沼气汇集后先进入气柜储存系统,以稳定后续系统进气量,而后经增压风机进行调压后进入沼气预处理系统。预处理系统对沼气依次进行湿法脱硫、干法脱硫、冷干脱水、粗过滤及精细过滤处理,沼气去除H₂S、水分和杂质后再进入沼气发电机组。

2.1.2.1 脱硫处理

沼气杂质中的H₂S具有强的毒性,燃烧生成SO₂遇水易形成硫酸,腐蚀周围的设备,污染环境。因此,沼气利用前需进行脱硫处理。

沼气脱硫方式主要分为生物脱硫、干式脱硫及湿法脱硫。

生物脱硫是一种设立独立的脱硫单元,利用特定脱硫微生物将沼气中的H₂S转化为单质硫或硫酸盐的脱硫方式,常用的生物脱硫法有酸法生物脱硫和碱法生物脱硫。

干式脱硫主要有氧化铁干式脱硫法、活性炭法和膜分离法。其中,氧化铁脱硫的主要机理是催化与吸附作用,当含有H₂S的气体经过氧化铁床层时,在常压下发生放热反应,并在氧化铁表面上被催化氧化成硫离子,其生成物被氧化铁吸附,以达到其脱硫目的。活性炭法主要是利用活性炭的催化和吸

附作用脱除沼气中的H₂S气体,在脱硫过程中,活性炭催化H₂S与其中储存的氧气反应,生成的S被吸附于活性炭表面。当活性炭吸附饱和时,脱硫效率明显下降,必须进行再生。膜分离法脱硫基本原理是在压力的推动下,依靠混合气中各组分透过膜的传递速率差异来实现分离各组分,从而实现脱硫。

湿法脱硫技术是一种利用特定的溶剂与气体逆流接触脱除H₂S,而溶剂则通过再生后重新进行吸收利用的脱硫方式。湿式脱硫方法常用有碱性溶液吸收法、改良ADA法和络合铁法。其中,碱性液体吸收法是将沼气从塔底进入与吸收液(如氢氧化钠、氨水等碱性液体)进行逆流接触反应,净化后的沼气从塔顶排出,再利用氧气对吸收液进行再生的脱硫方式。由于受到流速、流量等因素的影响,H₂S并不能全部溶解于碱液中,而且溶解过程中易生成硫氢化钠,硫氢化钠与氧气反应生成的有害物质硫代硫酸盐以及硫酸盐在吸收液中富集,影响了吸收液的吸收能力,降低了脱硫效率。改良ADA法使用蒽醌二磺酸钠(ADA)为催化剂,以碳酸钠溶液为吸收剂,并加入适量由酒石酸钾钠和偏钒酸钠构成的脱硫液进行脱硫。改良的ADA脱硫剂具有脱硫效率高、化学稳定性好、操作温度范围宽等优点,但由于其对设备具有腐蚀性,能耗高,脱硫设备庞大,改良ADA法在实际应用中存在一定的局限性和不足。络合铁法脱硫技术是一种以络合铁为催化剂的湿式氧化脱除H₂S的方法,其特点是直接将H₂S转变成元素S,是一种工艺简单、工作硫容高且环保无毒的新型脱硫技术,克服了传统脱硫工艺硫容量低、工艺复杂、副盐生成率高、环境污染严重等弊端,硫磺回收装置尾气可使硫磺回收率达到99.5%。主要脱硫工艺对比见表3。

该项目沼气参数值见表4。由于沼气额定流量为7000 Nm³/d,并考虑1.2倍的安全系数,且沼气中H₂S的含量不高于18200 mg/Nm³,沼气流量相对较低,H₂S含量相对较高,同时考虑沼气发电机组的进气要求(需精脱硫),沼气脱硫工艺选用湿法络合铁+氧化铁干法的脱硫技术。

沼气原始H₂S含量不高于18200 mg/Nm³,经过湿法络合铁脱硫后H₂S含量降至75.9 mg/Nm³以下,再经氧化铁干法精脱硫后H₂S含量降至35 mg/Nm³以下,同时水分等杂质得到有效处理,并实现每天回收单质硫(直接产物为含硫量70%、含水量30%的

表3 沼气主要脱硫工艺对比

序号	对比项	生物法		湿式络合铁法	干法
		酸法	碱法		
1	简便性	简单,但需清塔操作	简单	简单,硫膏需脱水	简单,需更换脱硫剂
2	设备投资	一般	稍高	一般	低
3	运行成本(水电、脱硫剂等)	低	一般	较高	较高
4	技术成熟度	成熟	成熟	成熟	成熟
5	硫产物	pH 1~2,含硫酸根废水	pH 8~9,含固率5%左右的含硫污泥废水	无二次污染副产物,硫可回收	废脱硫剂,需处置
6	负荷适应性	差,尤其不耐高硫浓度	一般	强,适合各种规模的气体脱硫	一般
7	适用条件	低 H ₂ S 浓度且允许混入 NO _x ,粗脱硫	负荷波动短时间不剧烈,粗脱硫	中、小气量且 H ₂ S 浓度高,粗脱硫	低 H ₂ S 浓度,精脱硫

表4 原料沼气参数值

参数	数值
沼气流量/(Nm ³ ·d ⁻¹)	额定处理量为7000,最大处理能力可达到8400
硫化氢含量/(mg·Nm ⁻³)	≤18200
水	饱和
压力/kPa	1~2
温度/℃	30

硫膏),在节约投资的前提下达到节约占地面积、沼气 H₂S 指标合格的目的,设计操作负荷为 30%~120%。脱硫系统不产生任何废气、固废、废液,分离出来的硫膏可直接出售;硫磺浆过滤产生的滤液最终打回系统继续使用,以降低药剂消耗。

2.1.2.2 H₂O 以及颗粒物脱除

H₂O 和颗粒物的脱除采用撬装式冷干过滤系统对沼气进行冷却干燥、脱水、过滤、除杂,处理后可满足沼气发电机组进气要求。

2.1.2.3 预处理后指标

经预处理后沼气指标要求满足《中大功率沼气发电机组》(GB/T 29488—2013),如表5所示。

表5 预处理后进沼气发电机组沼气指标

参数	数值
环境温度/℃	≤38
杂质颗粒粒径/μm	≤5
灰尘含量/(mg·Nm ⁻³)	≤30
水分含量/%	≤70
机组前压力/kPa	10~15
压力变化率/(kPa·min ⁻¹)	≤1
甲烷浓度/%	≥45
甲烷变化率/(%·min ⁻¹)	≤2
硫化氢/(mg·Nm ⁻³)	≤35

2.2 沼气发电装机功率的确定

沼气发电机组装机功率的确定一般有两种计算方法,一是按照《沼气电站技术规范》(NY/T 1704—2009)中推荐的沼气低位热值进行计算;二是按照每标准立方米 CH₄可发电量经验数据进行估算。

1)方法一:按照沼气产量及其低热值进行计算,方法^[7]如式(2)所示。

$$P = k(q_v \times H_u / g_h) \quad (2)$$

式中: P 为装机功率; k 为装机余量与发电机效率的综合比例系数,根据电站需求, $k = 1.08 \sim 1.20$; q_v 为每小时最大沼气产量换算为标准状况下的体积, m³/h; H_u 为沼气的低位热值, kJ/Nm³; g_h 为发电机组热耗率, kJ/(kW·h)。该项目沼气检测低位发热量均值为 28.2 MJ/m³,考虑国产沼气发电机组综合热耗率 10.3~11.25 MJ/(kW·h)。

2)方法二:按照每标准立方米 CH₄可发电量经验数据估算,计算方法如式(3)所示。

$$P = q_v QC \quad (3)$$

式中: P 为装机功率; q_v 为沼气产量, Nm³/h; Q 为每标准立方米 CH₄的发电量,考虑国产沼气发电机组综合热耗率 10.3~11.25 MJ/(kW·h),即每标准立方米 CH₄可发电 3.19~3.485 (kW·h/Nm³); C 为 CH₄浓度,%,沼气中 CH₄浓度按 79.91% 计算。

通过以上两种计算方法交叉验证确定功率,按该项目沼气产量 7000 Nm³/d,根据式(2)计算该项目所产沼气发电总功率为 789~862 kW,根据式(3)计算该项目所产沼气发电总功率为 743~812 kW,最终确定沼气发电机组的设计总功率为 800 kW,可适配沼气产量波动。

2.3 烟气净化系统

该项目沼气发电机组采用玉柴船电力公司型

号为 YC12VTDG-800B5LC 机组,出口烟气成分参数值见表 6。

表 6 沼气发电机组出口烟气成分参数值(100%负荷)

烟气特性		烟气中成分					出口烟气中 NO _x 含量/
烟气流/	烟气温度/	水/	CO ₂ /	O ₂ /	N ₂ /	SO ₂ /	mg/Nm ³
Nm ³ ·h ⁻¹	°C	%	%	%	%	%	
4 380	475	10	15	5	70	0.05	1 650

为控制沼气发电烟气中 NO_x 的排放,一般采用选择性催化还原法 SCR 脱硝系统对烟气进行处理。该项目沼气发电烟气设置 SCR 装置进行脱氮处理,处理后尾气通过 15 m 高排气筒排放,指标满足《锅炉大气污染物排放标准》(GB13271—2014)中限值(颗粒物限值 20 mg/m³、SO₂ 限值 50 mg/m³、NO_x 限值 200 mg/m³)。

SCR 脱硝系统还原剂通常采用尿素或氨水。尿素原料便于运输和储存,安全可靠;氨水作为还原剂,其温度窗范围相对较宽,但氨是一种易燃易爆、腐蚀性强的危险化学品,储存要求高且需要采用双层防漏设计。另外考虑项目所在地还原剂的供应情况,选用尿素作为 SCR 脱硝系统还原剂。将一定量的尿素水溶液以雾状形态喷入沼气发电机的排气管中,尿素液滴在高温下发生水解和热解反应,生成所需要的还原剂氨气(NH₃),氨气在催化剂的作用下,有选择性地 将烟气中的氮氧化物(NO_x)还原为氮气(N₂)和水(H₂O),从而降低烟气中的 NO_x 浓度,经净化后的 NO_x 满足环保要求。

2.4 沼气发电收益估算

本项目沼气发电机组功率为 800 kW,年运行小时数按和生活垃圾焚烧处置年运行小时数保持一致计算,取 8 000 h,则年发电量为 640 万 kW·h;发电单价按全国煤电平均标杆上网电价为 0.38 元/kW·h 计算,年发电收益为 243 万元。

3 节能及碳减排分析

该项目利用沼气为燃料,燃烧生成可植物光合作用吸收的 CO₂,减少环境污染,符合《中华人民共和国节约能源法》“鼓励开发利用新能源和可再生能源”的要求。项目最大沼气产生量为 7 790 Nm³/d,平均沼气产生量为 6 862 Nm³/d,采用 1 台 0.8 MW 沼气发电机组,年发电量为 640 万 kW·h,年节约标准煤(折合)1 963 t/a。

该项目年消耗 CH₄ 的量见式(4):

$$Q_d = Q_r Ch \quad (4)$$

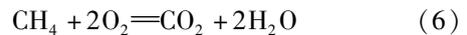
式中:Q_r为沼气消耗量,Nm³/h(按 7 000 m³/d 折算为 291.7 Nm³/h);C 为沼气中含 CH₄ 浓度,按 79.91% 计,h 为年额定负荷运行时间,按 8 000 h 计。根据式(4),年消耗 CH₄ 量 Q_d 为 186.6 万 Nm³/a。

1) 根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告,在 100 年尺度下 CH₄ 的全球增温潜势是 CO₂ 的 29.8 倍,CH₄ 温室效应是 CO₂ 的 29.8 倍,即减排 1 t 的 CH₄ 相当于减排 29.8 t 的 CO₂,CH₄ 可减排 CO₂ 当量值 M¹_{CO₂} 见公式(5)。

$$M_{CO_2}^1 = Q_d \rho \times 29.8 \quad (5)$$

式中,ρ 为 CH₄ 的比重,取 0.717 kg/m³,则年 CO₂ 减排量 M¹_{CO₂} 为 3.987 万 t。

2) 沼气发电机组 CH₄ 燃烧转化成 CO₂ 的化学方程式见式(6)。



根据化学反应方程式,1 mol 的 CH₄ 完全燃烧生成 1 mol 的 CO₂,CH₄ 的摩尔质量为 16 g/mol,CO₂ 的摩尔质量为 44 g/mol。CH₄ 燃烧产生的 CO₂ 量 M²_{CO₂} 见式(7)。

$$M_{CO_2}^2 = Q_d \rho \times \frac{44}{16} \quad (7)$$

式中,44/16 为 1 t CH₄ 燃烧被氧化成 CO₂ 的量,则沼气发电燃烧年产生 CO₂ 量 M²_{CO₂} 为 0.368 万 t。

垃圾焚烧发电厂的沼气产自渗沥液处理的厌氧阶段,渗沥液来源于生活垃圾堆酵过程,属于有机废弃物,沼气燃烧发电产生的 CO₂ 排入大气中,进入生物碳循环(植物生长过程中从大气中吸收 CO₂ 进行光合作用),不新增碳排放,不计入碳排放总量^[8]。

因此,渗沥液厌氧阶段产生的沼气可按生物源处理,沼气发电 CH₄ 燃烧不新增碳排放,垃圾焚烧发电厂沼气发电碳减排量仅考虑 CH₄ 的直接碳减排效益,即通过沼气发电每年减排 CO₂ 量为 3.987 万 t,显著降低了温室效应和减少环境污染,对大气环境

和自然生态环境起到了保护作用。

4 结论

生活垃圾处理过程中产生的沼气兼具能源属性与环境风险的双重特征,本文对比分析沼气入炉掺烧及独立发电两种技术路径,揭示了沼气发电在资源化效率、运行稳定性及全生命周期环境影响方面的综合优势,并通过某1 200 t/d生活垃圾焚烧发电厂的沼气发电实例,探讨了沼气的产生、预处理及发电工艺,分析沼气发电的节能效果和碳减排效益。研究表明,沼气发电不仅能将垃圾中的有机物质转化为电能,还能有效避免甲烷等温室气体的排放,符合国家节能减排的政策导向。

1) 沼气发电通过湿法络合铁+干法氧化铁多级脱硫工艺,可将 H_2S 浓度从 $18\ 200\ mg/Nm^3$ 降至 $35\ mg/Nm^3$ 以下,有效解决设备腐蚀与二次污染问题;通过SCR脱硝系统,确保沼气发电机组烟气中 NO_x 排放值满足环保要求。

2) 基于生活垃圾渗沥液COD降解产沼气流估算值与实测数据分析,确定发电机组装机功率为800 kW,实现年发电640万 $kW\cdot h$,折合标煤节约1 963 t,年 CO_2 减排量达3.987万t。

3) 经济效益分析表明,在无政府补贴情景下,

项目年发电收益可达243万元(按全国煤电平均标杆上网电价为0.38元/ $kW\cdot h$ 计算),具备市场化推广潜力。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2023年中国城市建设统计年鉴[R/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>.
- [2] 张俊超,何显荣,林青,等. 城市生活垃圾填埋场沼气发电技术研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(1): 295-296.
- [3] 熊建平,李志华,俞晓阳. 生活垃圾焚烧发电厂能源综合利用的分析及应用[J]. 能源与节能, 2023(9): 32-34, 97.
- [4] 林玉礼. 城市生活垃圾填埋场沼气发电技术的探讨[J]. 环境与发展, 2018, 30(5): 103, 105.
- [5] 白良成,徐文龙. 生活垃圾焚烧锅炉工程基础[M]. 中国建筑工业出版社, 2021: 61-62.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾渗沥液处理技术标准:CJJ/T 150—2023[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2023.
- [7] 中华人民共和国农业部. 沼气电站技术规范:NY/T 1704—2009[S]. 北京:中国农业出版社, 2009.
- [8] 刘海威. 垃圾焚烧发电厂碳排放核算指南[M]. 北京:中国环境出版集团, 2023.

Analysis of Biogas Utilization and Carbon Emission Reduction in Domestic Waste Incineration Power Plant

SONG Xuanjin, NI Bing, LIU Yao, HAO Yugang, YANG Xu
(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the goal of efficient utilization of biogas from anaerobic fermentation of leachate in domestic waste incineration power plant, the comprehensive advantages of biogas power generation in resource utilization, operation stability and carbon emission reduction were demonstrated by comparing the co-combustion of biogas into furnace and independent power generation path. Through the case of a 1 200 t/d waste incineration power plant, the biogas production, pretreatment process and power generation system design were discussed, and the energy saving effect and carbon emission reduction benefit of biogas power generation were analyzed. The results show that biogas power generation technology can achieve an average annual greenhouse gas emission reduction of 39 780 t CO_2e . In the absence of government subsidies, the annual power generation income of the project can reach 2.43 million yuan. Biogas power generation can not only convert organic matter in waste into electrical energy, but also effectively avoid the emission of greenhouse gases such as methane, and has significant economic benefits and social benefit.

Key words: leachate; biogas power generation; domestic waste; desulfurization process; carbon emission reduction