

# 城市生活垃圾焚烧发电厂沼气利用工艺研究

文 / 徐亚峰 广东顺控环境投资有限公司

**摘要：**随着我国城市化进程加快，城市生活垃圾产生量持续增长，焚烧发电成为主流处理方式，但渗滤液厌氧发酵产生的沼气存在资源化利用不足与安全环保风险等问题，成为我国实现“碳达峰、碳中和”目标的重要任务目标。本文围绕城市生活垃圾焚烧发电厂沼气利用工艺展开研究，阐述了系统工艺设计、设备选型、安全控制设计，并通过经济效益、环境效益、社会效益三个方面阐明沼气入锅炉掺烧的工艺改造在沼气资源化方面的必要性，希望可以为沼气资源化利用提供一些思路。

**关键词：**生活垃圾；焚烧；发电；沼气；工艺

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.123

## 引言

随着我国城市化率不断向上突破，城市生活垃圾年产生量也在递增。在生活垃圾无害化之后，资源化成为城市生活垃圾技术升级的主流方向。生活垃圾渗滤液厌氧发酵产生的沼气是一种可利用的清洁能源，入炉焚烧发电既能补充本地能源供给，又能减少碳排放。进行相应的技术改造，是城市生活垃圾处理厂减排、增效的可行选择。

### 一、城市生活垃圾处理与焚烧发电中沼气特性分析

#### (一) 原有沼气系统及问题分析

原有沼气采用对空燃烧直排工艺，两支火炬的出力分别是：600m<sup>3</sup>/h，500m<sup>3</sup>/h，目前沼气日产量高峰期约21000m<sup>3</sup>，需要两个火炬同时燃烧才能满足需求。这样一来，火炬失去备用，不利于设备的长期安全稳定运行。沼气对空燃烧，大量的热量散失，与国家提倡的节能减排政策严重不符；且产生的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等废气直接外排，对环境造成污染。如何将沼气燃烧热量利用起来，以及如何将沼气燃烧产生的废气处理好，是企业目前急需解决的问题。

#### (二) 沼气的参数

某能源企业渗滤液站每天产出大量沼气。高峰期产气量为21000m<sup>3</sup>左右，受季节、垃圾成分及渗滤液厌氧发酵温度影响，产气量日波动幅度约±15%。沼气组分方面，经气相色谱法检测，甲烷体积分数为58%-65%，二氧化碳体积分数为32%-38%，同时含有少量硫化氢、氮气（1.5%-3.0%）及微量挥发性有机物VOCs，主要为苯系物，浓度≤5mg/m<sup>3</sup>。

沼气低位热值约为20MJ/m<sup>3</sup>，高位热值约21.8MJ/m<sup>3</sup>，热值稳定性受甲烷浓度影响，当甲烷浓度每波动1%，低位热值相应变化约0.3MJ/m<sup>3</sup>。沼气压力方面，厌氧反应器出口压力稳定在5-8kPa，温度与厌氧发酵系统温度一致，维持在35-38℃，相对湿度≥95%接近饱和。含有的饱和水蒸气在输送过程中易冷凝成水，可能与硫化氢结合形成酸性水溶液，对管道及设备造成腐蚀。

### 二、沼气锅炉掺烧系统工艺设计

#### (一) 总体工艺流程设计

企业新设计的沼气锅炉掺烧系统的改造关键在于：对沼气的热量再利用、产生废气的处理。最初有两种方

案可以对比选择，方案一是：将渗滤液厌氧处理过程中产生的沼气经增压系统增压通过沼气燃烧器送入焚烧炉燃烧，整套系统的热量增加，实现了对资源的回收利用。沼气喷入焚烧炉内燃烧，增加了锅炉的蒸发量，相应地也增加了汽轮发电机组的发电量。发电厂热效率按21.5%计算，沼气低位热值约为20MJ/m<sup>3</sup>，每小时发电量为448kWh。沼气上网发电量每小时约为530kWh，年上网发电量为4.28x10<sup>6</sup>kWh。垃圾焚烧发电厂上网电价一般为0.65元，每年可以增加收入约279万元，则30a特许经营期共约8397万元。方案二是：新建一整套沼气发电机系统，流程为“沼气池出口→脱水系统→脱硫、硅系统→增压稳压系统→机组→脱硝→负载”。根据国内外机组经验，沼气发电机组热效率按33%计算，则每小时发电量为680kWh。沼气上网发电量每小时约为580kWh，按照90%负荷计算。每年可以增加收入310万元，30年特许经营期共计为9090万元。

对比两个方案：方案一沼气经沼气燃烧器回炉燃烧可回收沼气热量，增加了整厂的收益，且运行稳定、可靠，建设成本低，系统工艺简单，风险等级低，占地少，维护成本低，大修周期长；方案二沼气热利用效率稍高，但设备、建设费用较高，且该方案沼气须经过预处理，系统复杂，故障率较高。此外，还需单独设置烟气治理，并派专人维护，人力及维护成本较高。两相对比，采用通过沼气燃烧器回喷入炉焚烧的利用方案最佳。具体工艺流程图如下图1所示：

#### (二) 关键子系统设计与设备选型

方案一中的关键子系统是沼气燃烧器，针对沼气的特点和设备技术参数而定向设计的非标专用燃烧装置，针对渗滤液系统产生的沼气流量不平稳，波动幅度大的特点，该燃烧器具有调节比大的特点（达到10:1），能够很好适应沼气流量波动频繁这一特殊工况，实现掺烧系统的稳定运行。

沼气燃烧器主要由燃烧器本体、配风器、稳焰装置、燃气喷口等组成，并配套火焰检测器、自动点火装置等。燃烧器的喷口采用310S材质，耐热温度高达1200℃，其他部分均为SS304不锈钢，可有效保证燃烧器的使用寿命。沼气燃烧器上设置观火视镜，可通过肉眼观察燃烧器的工作状态。设备选型参数如下表1所示：

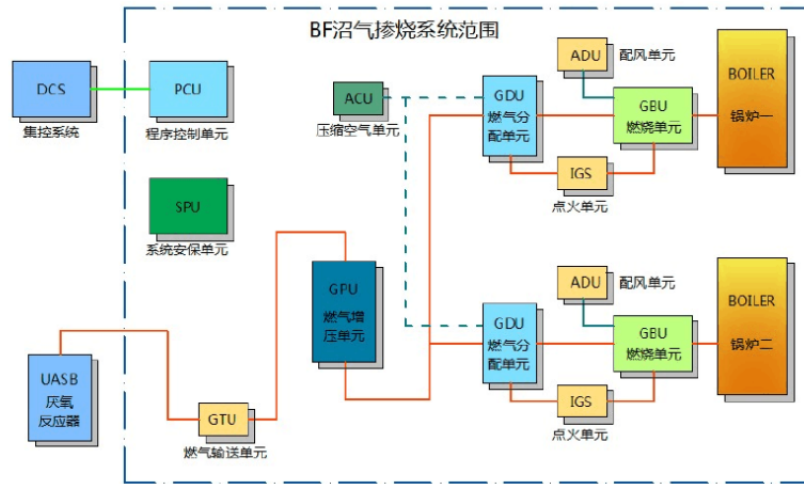


图 1 沼气掺烧工艺流程图

表 1 沼气燃烧器技术参数表

项目	技术参数及要求	
型号规格	HRQ-ZEF	
制造规范	投标方企业标准	
适应燃料	沼气	
点火燃料	沼气	
燃料技术参数	低位发热值 Kcal/Nm <sup>3</sup>	4000 ~ 5000
	供气压力, KPa	20-30
	供气温度, °C	常温
功率范围	0.2-2.0 MW	
额定功率	2.0MW	
燃烧最大耗气量 (单台)	550 Nm <sup>3</sup> /H	
额定燃料消耗量	500 Nm <sup>3</sup> /H	
调节比例	1:10	
温度偏差	±10°C	
点火方式	高能点火	
火焰长度	0.8 ~ 2.6 米	
助燃风机功率 (kW)	11	
配置燃烧器数量, 台 / 炉	2	
预测 NOX 排放	按行业标准	
预测 CO 排放	按行业标准	
燃烧形式	水平布置在焚烧炉侧墙	
燃烧器 重量 (kg)	290	
燃烧器颜色	灰色	
燃烧器开孔尺寸	Φ350	

沼气燃烧器外形图如下图 2 所示：

### (三) 安全与控制系统设计

#### 1. 程控逻辑设计

程控逻辑设计贯穿系统启动、运行、停机全周期，通过精细化程序指令实现自动化控制与风险预判。

①自动点火程序。点火前触发多维度自检流程，对锅炉炉膛温度、沼气管路压力 / 泄漏状态、燃烧器阀门开关位置、助燃风压力等关键参数进行逐一校验，仅当所有参数满足预设阈值时，才允许进入点火程序。点火过程中实时监测火焰信号、燃气流量等数据，若出现阀门卡涩未开、火检未捕捉到火焰、燃气流量骤降等异常，系统立即触发紧急停机指令，自动关闭沼气进气阀、切断助燃风，并恢复至点火前初始状态。待故障排查完毕后，方可重新启动点火程序，避免“无火送气”引发的爆燃风险。

②防呆操作保护。针对人工操作可能出现的误指令、参数设置偏差等问题，程序内置逻辑判断机制。当操作工输入的指令与系统运行逻辑冲突，或设置值偏离正常工作值太大，程序会拒动并保持当前值不变，并通过集控系统弹出报警提示，明确告知违规操作类

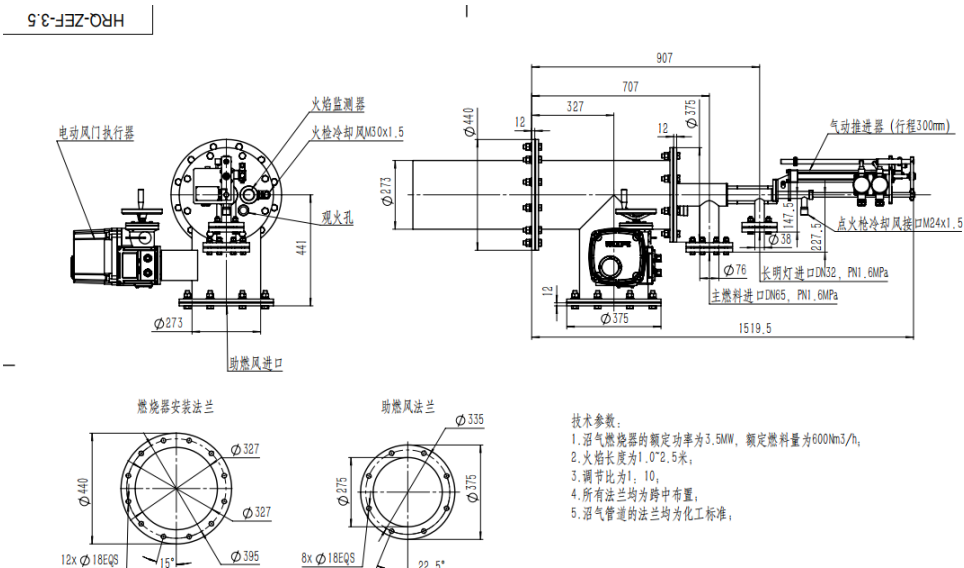


图 2 沼气燃烧器外形图

- 技术参数：
1. 沼气燃烧器的额定功率为3.5MW，额定燃料量为600Nm<sup>3</sup>/h，
  2. 火焰长度为1.0\*2.5米，
  3. 调节比为1、10，
  4. 所有法兰均为跨中布置，
  5. 沼气管道的法兰均为化工标准，

型及修正方向,从而有效杜绝操作工违反操作规程操作或误操作。

## 2. 检测元件

系统中配置了高灵敏度、抗干扰的检测元件,对沼气燃烧状态、泄漏情况及系统运行参数进行24h不间断监测,为安全控制提供数据支撑。

①紫外火焰检测器。沼气直燃系统采用的紫外火检,敏感光谱范围185-240nm,峰值204nm,利用了燃气(或轻油)燃烧特有的产生较强紫外线的特点,来区分是否有火信号。检测器每隔1秒输出一次火焰信号,若连续3秒未检测到火焰,立即向程控系统发送“熄火报警”,触发紧急断气保护,避免无火燃烧导致的燃气泄漏。

②沼气泄漏报警器。在沼气燃烧器附近、增压风机进出口、沼气管路阀门接口等泄漏高发区域,均匀布置固定式沼气泄漏报警器,检测精度达0-100%LEL(爆炸下限),分辨率0.1%LEL。一旦侦测到空气中甲烷浓度达到5%LEL(一级报警阈值)时,报警器立即声光报警。若浓度升至10%LEL(二级报警阈值)且30秒内未得到处理,系统自动切断沼气管路所有阀门,开启放散阀排空管道内残留沼气,并启动现场排风装置,降低局部甲烷浓度至安全范围。

③硬接线连锁保护。直燃系统关键的连锁保护都是通过硬接线接入PLC柜。柜内电气控制回路经过特殊设计,即使PLC模块死机或故障失效,也能通过急停按钮关闭沼气安全关断阀,进而保证沼气燃烧系统安全。

④检漏及双关断保护。在沼气投入前,沼气安全关断阀门会2h/次自动进行检漏试验,通过试验可以检测出阀门是否内漏,从而避免阀门在有泄漏的情况下投入直燃系统。每条沼气管路串联设置两台安全关断阀,即使其中一台阀门发生泄漏或卡涩故障,也能确保切断入炉沼气,提高沼气系统安全性。若检测到压力下降速率 $>0.5\text{kPa}/\text{min}$ ,立即锁定阀门并报警,防止单阀泄漏引发的燃气外溢,双重关断设计使泄漏防护冗余度大幅提升。

⑤放散保护。当系统检修或投用前需要充入惰性气体(如氮气),对管道内的燃气或空气进行置换排空,有效排除安全隐患。当系统前端发生故障出现压力急剧上升时,系统自动开启放散阀,以缓解管道压力。放散管末端设有雨帽,防止雨水进入管道,放散管末端高出厂房顶部2.5m。

⑥防回火保护。在燃烧器前端,放散管路末端设有燃气专用阻火器,阻火器芯件采用304不锈钢波纹板,能够起防回火,防爆燃的作用。

⑦防雷、防静电。严格按照《建筑物防雷设计规范》(GB 50057-2010)及《爆炸危险环境电力装置设计规范》(GB 50058-2014)的要求,在沼气管路、增压风机、燃烧器等设备外壳焊接防雷接地极,接地电阻 $\leq 4\Omega$ ;管道法兰、阀门等连接处采用截面积 $\geq 6\text{mm}^2$ 的铜制跨接线连接,消除金属部件间的电位差,防止静电积聚产生火花,从硬件层面杜绝雷电、静电引发的点火源风险。

## 三、技改项目效益分析与评价

### (一)经济效益分析

沼气喷入焚烧炉内燃烧,增加了锅炉的蒸发量,相

应地也增加了汽轮发电机组的发电量。发电厂热效率按21.5%计算,沼气低位热值约为 $20\text{MJ}/\text{m}^3$ ,每小时发电量为448kWh。沼气上网发电量每小时约为530kWh,年上网发电 $4.24\times 10^6\text{kWh}$ 。垃圾焚烧发电厂上网电价一般为0.65元,每年可以增加收入约279万元,则30a特许经营期共讨约8397万元。

### (二)环境效益分析

#### 1. 大气污染物排放得到有效控制

传统沼气对空燃烧过程中,因燃烧不充分及无尾气处理装置,会产生CO、NO<sub>x</sub>、硫化物及颗粒物等污染物。根据同类项目监测数据,未处理的沼气火炬燃烧排放中,CO浓度可达 $100\text{-}300\text{mg}/\text{m}^3$ ,NO<sub>x</sub>浓度 $50\text{-}150\text{mg}/\text{m}^3$ ,硫化物的浓度随沼气中硫化氢含量波动,最高可达 $80\text{mg}/\text{m}^3$ ,且无组织排放的VOCs易造成局部大气污染。

采用沼气锅炉掺烧系统后,沼气与锅炉主燃料协同燃烧,炉膛温度稳定在 $850\text{-}1000^\circ\text{C}$ ,燃烧效率提升至99%以上,CO生成量大幅降低;同时,沼气燃烧产生的废气与锅炉烟气一同进入现有脱硫脱硝及除尘系统进行集中处理。经测算,处理后烟气中NO<sub>x</sub>浓度稳定控制在 $80\text{-}95\text{mg}/\text{m}^3$ ,满足 $\leq 100\text{mg}/\text{m}^3$ 的治理目标;硫化物的浓度 $\leq 35\text{mg}/\text{m}^3$ ,符合《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)中特别排放限值要求;颗粒物浓度 $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ ,VOCs因高温燃烧分解及后续处理,排放浓度降至 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,较传统工艺污染物排放总量减少90%以上,有效改善了区域大气环境质量。

#### 2. 降低环境安全风险

沼气锅炉掺烧系统通过多重安全保护设计,将沼气输送、燃烧过程置于密闭可控的系统中,有效避免了沼气泄漏及爆燃风险。而且沼气锅炉掺烧改善了传统工艺中火炬燃烧产生的高温辐射及噪音对周边环境及人员造成的影响。掺烧系统将沼气燃烧整合至锅炉内部,通过厂房隔音及设备降噪设计,厂界噪音降至55dB以下,使得沼气资源化系统整体符合《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)中2类功能区要求,降低了沼气资源化过程对周边生态环境及居民生活的负面影响。

### 结语

综上,城市生活垃圾所产生的沼气入锅炉掺烧比传统火炬对空直烧有明显优势,不仅可以提升垃圾无害化企业的经济效益,还具备不可忽视的环境效益和社会效益。沼气入锅炉掺烧的技改项目的应用有重要意义,适合在沼气产量大、热量利用率不高的地区使用,提高沼气资源化利用率。

### 参考文献

- [1] 张佳薇,胥东,袁玲莉,等.垃圾焚烧厂渗滤液沼气高值化利用中标准完善的思考[J].能源研究与利用,2025,(03):45-48.
- [2] 宋俊成.双碳背景下城市生活垃圾处理过程——甲烷控制与处理技术综述[J].佛山陶瓷,2024,34(06):54-56.
- [3] 余端民,胡洪瑞,王乾维.垃圾焚烧发电厂沼气入炉掺烧的成本收益优化研究[J].中国资源综合利用,2023,41(11):159-161.