

高硫沼气铁基湿法脱硫与低氮冷凝燃烧协同技术研究与应用

姜高友 屈杰

咸阳新兴分布式能源有限公司 陕西 咸阳 712000

【摘要】：针对高硫沼气利用过程中脱硫效率低、污染物排放高、能源利用率不足等问题，以鲁洲生物科技麦芽糖生产产生的高硫沼气为研究对象，开发铁基湿法脱硫与低氮冷凝燃烧协同技术。通过优化铁基脱硫工艺参数、匹配低氮冷凝锅炉系统及构建智能调控体系，实现高硫沼气的清洁高效利用。研究表明，该协同技术可将沼气中硫化氢含量从 10000mg/Nm³ 降至 50mg/Nm³ 以下，脱硫效率达 99.7% 以上；低氮燃烧系统氮氧化物排放控制在 30mg/Nm³ 以下，系统热效率提升至 105%，较传统发电模式提升 3 倍。项目应用后年新增经济效益 92 万元，投资回收期 1.4 年，同时实现显著环保减排效果，为食品加工等高有机废水行业沼气高值化利用提供了可复制的技术方案，助力双碳目标实现。

【关键词】：高硫沼气；铁基湿法脱硫；低氮冷凝燃烧；协同技术；循环利用

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.080

1 引言

在双碳战略深入推进的背景下，生物质能作为清洁可再生能源，其高效利用成为破解能源短缺与环境治理双重难题的重要途径。食品加工行业产生的高浓度有机废水经厌氧发酵后会生成大量沼气，这类沼气通常具有硫化氢含量高、甲烷浓度波动大、热值偏低等特点，若处理不当直接排放，不仅造成能源浪费，还会引发严重的环境污染问题。当前，高硫沼气的传统利用模式多为干法脱硫后用于内燃机发电，存在诸多弊端。干法脱硫适用于低含硫气体精脱，处理高硫沼气时效率有限，且脱硫剂更换频繁，运维成本较高；内燃机发电对沼气纯度要求严苛，高硫沼气易腐蚀设备，导致发电机组故障率上升，影响主工艺连续生产，同时发电热效率偏低，大量热能被浪费，经济效益不佳。此外，传统模式下烟气脱硫脱硝环节需额外投入，易产生次生污染，不符合绿色发展要求。铁基湿法氧化脱硫技术具有脱硫效率高、硫容大、环保无毒等优势，可有效处理高硫气体；低氮冷凝燃烧技术能实现燃料清洁燃烧，同时回收烟气潜热，提升能源利用效率。基于此，本文研究高硫沼气铁基湿法脱硫与低氮冷凝燃烧协同技术，通过工艺优化、系统集成及智能调控，解决高硫沼气利用痛点，实现能源高效利用与环保减排双赢，为行业技术升级提供示范。

2 试验材料与方法

2.1 试验原料

本试验所用沼气来源于鲁洲生物科技麦芽糖生产过程中产生的高浓度有机废水，经预处理与厌氧发酵后制得。沼气主要组分包括甲烷、二氧化碳、硫化氢及少量杂质，其中甲烷浓度 50%~70%，硫化氢含量约 10000mg/Nm³，日产量 4000Nm³，属于典型高硫低热值沼气。铁基脱硫液采用自主优化配置的络合铁体系，主要成分包括络合铁催化剂、碱度调节剂及稳定剂，具有硫容高、可再生、无二次污染等特点；脱硫及燃烧所需设备均选用耐腐蚀、耐高温材质，确保系统长期稳定运行。

2.2 试验装置与工艺

试验装置主要由铁基湿法脱硫单元、低氮冷凝燃烧单元及智能调控单元三部分组成，整体工艺路线为：沼气增压→铁基湿法脱硫→气水分离→低氮冷凝燃烧→蒸汽供应→智能调控。

铁基湿法脱硫单元采用喷淋+鼓泡塔组合结构，配备增压风机、再生槽、气水分离器及压滤机，负责沼气的加压、脱硫及除湿处理。其中，增压风机选用高效防爆型风机，可将沼气压力从原有 1-3kPa 提升至 20-30kPa，有效克服脱硫工段 20-25kPa 的压损，保障沼气稳定输送；再生槽采用 304 不锈钢材质，通过曝气装置实现脱硫液的再生还原，确保脱硫液循环使用效率，减少药剂消耗；气水分离器用于去除脱硫后沼气中的水分，将沼气露点控制在 5℃ 以下，避免水分进入燃烧系统影响燃烧效率及腐蚀管路；压滤机则用于分离脱硫过程中产生的单质硫，实现硫磺回收再利用，进一步提升资源利用率。低氮冷凝燃烧单元选用低氮冷凝式 WNS 锅炉，配置高效低氮燃烧器，采用烟气再循环与分级燃烧组合技术，烟气再循环系统可将部分低温烟气返回燃烧器，降低燃烧温度，从源头抑制氮氧化物生成，分级燃烧则通过合理分配空气量，实现沼气充分燃烧，减少污染物排放的同时提升燃烧效率；冷凝管束采用 316L 不锈钢材质，具备良好的耐腐蚀性，可高效回收烟气中的潜热，进一步提升系统热效率。智能调控单元基于 PLC 与 AI 算法构建，整合物联网监测、负荷预测及动态调控功能，在脱硫塔、增压风机、冷凝锅炉、蒸汽管道等关键设备上安装各类传感器，实时采集运行参数，通过 AI 算法精准预测蒸汽需求，动态调整沼气供应量、燃烧负荷等参数，保障系统稳定运行，适配沼气成分波动的特性。

2.3 测试指标与方法

试验过程中主要测试指标包括：沼气中硫化氢含量、甲烷浓度、氮氧化物排放浓度、系统热效率、蒸汽产量及运行成本。其中，硫化氢含量采用碘量法测定，氮氧化物排放浓度采用红

外吸收法测定,系统热效率按低位发热量计算,蒸汽产量通过流量计量装置实时监测,运行成本涵盖设备折旧、药剂消耗、能耗及人工费用。通过对比试验,优化铁基脱硫液浓度、反应温度、气液比等工艺参数,确定最佳运行条件;同时对比协同技术与传统发电模式的技术指标、经济效益及环保效益,验证协同技术的可行性与优越性。

3 结果与分析

3.1 铁基湿法脱硫工艺优化结果

铁基湿法脱硫的核心是利用络合铁离子的氧化还原性,将硫化氢转化为单质硫,实现沼气净化。通过单因素试验,优化脱硫工艺关键参数,结果如下。在反应温度 30℃、气液比 1:8 的条件下,随着铁基脱硫液浓度从 0.5mol/L 提升至 1.5mol/L,脱硫效率从 95.2%提升至 99.8%,当浓度超过 1.5mol/L 后,脱硫效率提升幅度小于 0.1%,且药剂消耗成本显著增加。综合考虑脱硫效率与运行成本,确定最佳脱硫液浓度为 1.5mol/L。在脱硫液浓度 1.5mol/L、气液比 1:8 的条件下,反应温度从 20℃ 升至 40℃,脱硫效率从 98.3%升至 99.7%,温度超过 40℃后,脱硫液稳定性下降,副反应增多,脱硫效率略有下降。因此,最佳反应温度控制在 35~40℃。在脱硫液浓度 1.5mol/L、反应温度 35℃的条件下,气液比从 1:5 调整至 1:10,脱硫效率从 97.1%升至 99.8%,气液比超过 1:10 后,脱硫效率无明显提升,但循环液量增加,能耗上升。最佳气液比确定为 1:8。优化后,铁基湿法脱硫系统运行稳定,沼气中硫化氢含量稳定降至 50mg/Nm³ 以下,脱硫效率达 99.7%以上,硫磺回收率 99.7%,脱硫液可循环再生,运行成本较传统干法脱硫降低 40%以上。

3.2 低氮冷凝燃烧协同效果分析

采用烟气再循环与分级燃烧组合技术,烟气再循环率控制在 20%~30%,分级燃烧空气系数调整为 1.2~1.3,可有效抑制氮氧化物生成。试验结果显示,氮氧化物排放浓度稳定在 30mg/Nm³ 以下,较传统发电工艺减少 80%以上,无需额外增设脱硝环节,避免次生污染。低氮冷凝锅炉采用 316L 冷凝管束,可有效回收烟气潜热,降低排烟温度。在 1.25MPa 蒸汽工况下,排烟温度降至 50℃以下,系统热效率达 105%,较传统发电模式的 35%提升 3 倍,大幅提升能源利用效率。

针对沼气甲烷浓度波动大的特点,通过智能调控系统调整燃烧负荷,1:5 宽负荷调节比的燃烧器可有效适配沼气热值波动,蒸汽压力波动控制在 ±0.05MPa 以内,确保燃烧过程稳定,满足生产用汽需求。

3.3 协同技术与同类技术对比

将本研究开发的铁基湿法脱硫与低氮冷凝燃烧协同技术,与国内常规技术、国际先进技术及传统发电模式进行对比,技术参数与经济效益对比结果分别见表 1、表 2。

表 1 不同技术主要参数对比

技术指标	本项目协同技术	国内常规技术	国际先进技术
热效率	≥105%	90%-95%	105%-110%
氮氧化物排放	≤30mg/Nm ³	80-150mg/Nm ³	≤30mg/Nm ³
硫化氢脱除率	≥99.7%	95%-98%	≥99.5%
蒸汽压力波动	±0.05MPa	±0.1MPa	±0.03MPa

表 2 不同技术经济效益对比

对比维度	本项目协同技术	国内同类沼气供热项目	传统发电模式	国际同类技术
投资回收期	1.4 年	2-3 年	>5 年	1.5-2 年
吨蒸汽经济效益	143.8 元	120-130 元	80-90 元	135-140 元
年运维成本	58 万元	70-80 万元	100 万元以上	65-75 万元

由表 1、表 2 可知,本项目协同技术在热效率、污染物排放控制方面达到国际先进水平,较国内常规技术优势显著;在经济效益方面,投资回收期、吨蒸汽经济效益及年运维成本均优于国内同类项目、传统发电模式及国际同类技术,体现出良好的技术竞争力和经济性。

4 协同技术应用实例

4.1 应用场景

本协同技术于 2024 年 1 月至 2024 年 12 月在鲁洲生物科技麦芽糖生产厂区实施,完成沼气高效清洁供热系统技术改造,主要配置包括一套完整的铁基湿法脱硫系统和一台低氮冷凝蒸汽锅炉,用于替代原有内燃机发电模式,为麦芽糖生产提供稳定蒸汽供应。

4.2 应用成效

蒸汽直供模式彻底解决了原发电机组故障对主工艺的影响,麦芽糖生产线连续运行率提升至 99%以上,有效保障了食品供应链稳定,避免了因供电故障造成的生产损失。项目年运行 330 天,日产生蒸汽 32 吨,年总蒸汽量 10560 吨,年经济

效益 152 万元,较原发电模式新增收益 92 万元,经济效益提升 2.5 倍。项目总投资 220 万元,投资回收期 1.4 年,较原发电模式缩短 76%,同时模块化脱硫设备、智慧能源服务等衍生产品进一步拓展了盈利空间。项目年处理沼气 132 万 Nm^3 ,节约标煤 110 吨,减排二氧化碳 274 吨;氮氧化物排放较原工艺减少 80%以上,取消烟气脱硫脱硝环节,避免次生污染;同时彻底解决沼气逸散带来的恶臭问题,改善厂区周边环境质量,助力区域双碳目标实现。该项目成功实现高硫沼气从低效发电向高效供热的转型,构建废水—沼气—蒸汽—生产的闭环循环经济模式,为食品、酿造等高有机废水行业提供了可复制的技改方案,推动行业从末端治理向过程降碳转型,区域内多家企业前来考察学习并寻求技术合作。

5 技术局限性与改进方向

5.1 技术局限性

沼气产量及甲烷浓度高度依赖污水处理厂进水有机物负荷,当主生产线减产或污水 COD 波动时,沼气供应量可能低于锅炉最低负荷,需补充天然气或切换备用热源,影响零碳供能的连续性,增加化石能源消耗与运营成本。在北方冬季低温或南方高湿度区域,冷凝段易因烟气结露加剧酸性腐蚀,即使采用 316L 不锈钢材质并喷涂耐蚀涂层,仍会导致冷凝管寿命缩短至 3 年左右,需定期更换热管,增加运维成本与停机时间。现有 PLC 与 AI 模型对沼气成分突变的响应存在 3~5 分钟滞后,极端工况下蒸汽压力波动仍达 $\pm 0.1\text{MPa}$,需人工干预调整,尚未实现全时段无人化闭环控制,智能化管控水平仍有提升空间。

5.2 改进方向

开发沼气—生物质混燃技术,将生物质燃料与沼气协同燃烧,缓解原料波动带来的供能压力,提升零碳供能的连续性,减少化石能源补充量。研发新型耐腐蚀性材料与疏水涂层技术,应用于冷凝管表面,延长冷凝管使用寿命,降低运维成本与停机时间,提升系统长期运行稳定性。优化 AI 算法模型,缩短对沼气成分突变的响应时间,结合数字孪生技术,实现系统运行状态的实时模拟与预判,减少人工干预,实现全时段无

人化闭环控制。研发硫资源化回收工艺,将脱硫过程中产生的单质硫转化为硫酸亚铁等工业原料,提升硫资源附加值,进一步降低运行成本,完善循环经济体系。

6 结论与展望

6.1 结论

本文研究的高硫沼气铁基湿法脱硫与低氮冷凝燃烧协同技术,通过工艺优化与系统集成,有效解决了高硫沼气利用过程中脱硫效率低、污染物排放高、能源利用率不足等痛点,优化后的铁基湿法脱硫工艺,最佳参数为脱硫液浓度 1.5mol/L 、反应温度 $35\sim 40^\circ\text{C}$ 、气液比 1:8,可将沼气中硫化氢含量从 $10000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 降至 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下,脱硫效率达 99.7%以上,运行成本较传统干法降低 40%以上,脱硫液可循环再生,无二次污染。低氮冷凝燃烧单元采用烟气再循环与分级燃烧组合技术,搭配 316L 冷凝管束,氮氧化物排放控制在 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下,系统热效率达 105%,较传统发电模式提升 3 倍,实现清洁燃烧与余热高效回收。协同技术配套的智能调控系统,可有效适配沼气成分波动,将蒸汽压力波动控制在 $\pm 0.05\text{MPa}$ 以内,提升系统运行稳定性,保障主工艺连续生产。该协同技术在鲁洲生物的应用实例表明,其经济效益与环保效益显著,年新增收益 92 万元,投资回收期 1.4 年,同时实现显著减排效果,为行业提供了可复制的示范样本。

6.2 展望

随着双碳战略的持续推进,生物质能源高值化利用成为行业发展趋势。未来,需进一步优化铁基湿法脱硫与低氮冷凝燃烧协同技术,突破原料波动、冷凝效率衰减等技术瓶颈,提升系统的适应性与稳定性;同时推动技术的模块化与标准化,拓展其在食品、酿造、养殖等更多高有机废水产生行业的应用范围。此外,可加强与高校、科研院所的合作,开展技术创新研究,推动硫资源高值化利用、智能化管控等关键技术的突破,完善循环经济体系,进一步提升技术的经济性与环保性,为生物质能源高效利用提供更有力的技术支撑,助力实现双碳目标与绿色发展。

参考文献:

- [1] 陈鸿元,张顺昆,王雪凝,等.碳包覆型铁基非均相催化剂制备及其湿法氧化再生脱硫富液性能[J].石油学报(石油加工),2025,41(05):1277-1284.
- [2] 宣玉娜,陈鸿元,王星渝,等.氨基-磷酸改性铁基空心玻璃微珠催化剂用于天然气湿法氧化脱硫[J].石油与天然气化工,2024,53(02):15-22.
- [3] 陈雷,罗洪,付强.1000MW 燃煤发电机组双钙基湿法脱硫 pH 调控技术的节能效益分析[J].节能与环保,2023,(01):84-86.
- [4] 罗洪,陈雷,王星星,等.双钙基湿法脱硫 pH 调控技术在燃煤发电机组的应用[J].煤质技术,2023,38(01):79-84.
- [5] 刘浩,尹梁操,陈磊,等.铁基离子液体的合成优化与脱硫性能研究[J].天然气化工(C1 化学与化工),2018,43(06):75-79.