

生活垃圾焚烧发电技术工程应用

邱惠华

建德浦发热电能源有限公司 浙江 杭州 311612

摘要: 生活垃圾焚烧发电技术实现垃圾无害化、减量化与资源化处理。本文介绍其工艺原理与流程,涵盖垃圾焚烧基本原理、主流炉型特点及总体工艺流程。阐述热能回收与发电系统工程应用,包括余热锅炉、汽轮发电机组及全厂热力系统优化。探讨烟气净化、环保控制,以及渗滤液处理、灰渣资源化利用技术。该技术有效解决垃圾处理难题,实现能源回收与环保目标,对推动城市可持续发展具有重要意义。

关键词: 生活垃圾; 焚烧发电; 机械炉排炉; 余热利用

引言: 随着城市化进程加快,生活垃圾产量与日俱增,传统处理方式面临诸多挑战。生活垃圾焚烧发电技术作为一种高效、环保的处理手段,不仅能大幅减少垃圾体积和重量,还能将垃圾中的热能转化为电能,实现资源循环利用。本文聚焦生活垃圾焚烧发电技术的工程应用,深入剖析其工艺原理、热能回收与发电、烟气净化及灰渣处理等关键环节,为该技术的进一步推广和完善提供参考。

1 生活垃圾焚烧发电工艺原理与流程

1.1 垃圾焚烧的基本原理

生活垃圾焚烧的核心原理是利用高温氧化反应,将垃圾中的可燃成分转化为热能,同时实现垃圾的无害化、减量化处理。垃圾中含有的塑料、纸张、厨余等可燃有机物,在焚烧炉内850℃以上的高温环境中,与空气中的氧气发生剧烈氧化反应,分解为二氧化碳、水蒸汽等无害气体,同时释放大量热量。焚烧过程需严格控制炉内温度和烟气停留时间,通常要求烟气在850℃以上停留不少于2秒,以此彻底分解二噁英等有毒有害物质,避免二次污染^[1]。另外,垃圾焚烧还需满足自持燃烧条件,当垃圾低位热值 $\geq 5000\text{kJ/kg}$ 时可实现自主燃烧,热值不足时需添加柴油、天然气等辅助燃料。整个过程中,垃圾体积可缩减70%~90%,重量可减少80%~85%,既解决垃圾填埋带来的土地占用问题,又能实现热能回收,为后续发电提供基础。

1.2 主流焚烧炉型及技术特点

目前生活垃圾焚烧发电领域主流炉型主要有三类,各有适配场景和技术优势。炉排式焚烧炉是应用最广泛的类型,市场占有率超过60%,核心部件为机械炉排,通过炉排的往复运动翻动垃圾,使其依次经历干燥、燃烧、燃尽三个阶段,炉内温度维持在850~1100℃,适配高水分、低热值的城市混合垃圾,技术成熟、运行稳定,能

满足严格环保标准,但设备投资和维护成本较高。流化床焚烧炉通过高速气流使炉内惰性颗粒呈流化状态,垃圾在其中快速均匀燃烧,燃烧温度稳定在800~950℃,热效率高、污染物生成量低,适合预处理后的垃圾或垃圾衍生燃料(RDF),但对垃圾预处理依赖度高,床料磨损严重。回转窑焚烧炉以旋转圆筒为核心,炉内温度900~1300℃,垃圾翻动均匀、燃烧彻底,对成分复杂的垃圾适应性强,常用于危险废物与生活垃圾协同处理,但能耗高、占地面积大,在普通城市垃圾处理中应用较少。

1.3 焚烧发电总体工艺流程

生活垃圾焚烧发电总体流程可分为垃圾预处理、焚烧、热能回收、发电及环保处理五个核心环节,形成完整的能源转化与污染控制链条。首先,垃圾经专用运输车运至焚烧厂,称重后卸入封闭式垃圾贮坑,堆存5~7天进行发酵脱水,提升垃圾热值,贮坑负压设计可防止臭气外溢,同时抽取坑内臭气作为助燃风。发酵后的垃圾通过抓斗起重机送入焚烧炉,在炉内完成高温焚烧,释放热能。高温烟气进入余热锅炉,通过热交换将水加热为高温高压蒸汽,烟气降温后进入后续净化系统。蒸汽推动汽轮机高速旋转,带动发电机切割磁感线产生电能,电能经变压器升压后,除10%~15%供厂内自用外,其余并入国家电网。整个流程同步配套烟气净化、渗滤液处理、灰渣处置等环保系统,确保各污染物达标排放,实现垃圾“减量化、无害化、资源化”的处理目标。

2 热能回收与发电系统工程应用

2.1 余热锅炉关键技术

余热锅炉是垃圾焚烧发电中热能回收的核心设备,其关键技术主要集中在受热面设计、腐蚀防控和参数优化三个方面。受热面设计需适配垃圾焚烧烟气的特性,采用膜式壁结构,合理布置炉膛、过热器、省煤器等受热面,扩大传热面积、提升传热效率,同时预留足够的换

热空间,应对烟气中粉尘的积灰问题。腐蚀防控是余热锅炉长期稳定运行的关键,由于烟气中含有HCl、SO₂等酸性气体,易对受热面造成腐蚀,因此需采用耐腐蚀材料(如316L不锈钢),并在受热面表面喷涂防腐涂层,同时优化烟气温度控制,避免低温结露引发腐蚀。另外,通过采用超高压炉内再热技术,合理设定蒸汽参数,可显著提升热能回收效率,部分项目可将吨垃圾发电量提升至550kWh以上,进一步挖掘能源利用潜力,降低发电成本^[2]。

2.2 汽轮发电机组选型与配置

汽轮发电机组的选型与配置是垃圾焚烧厂热能利用的关键环节,需紧密结合处理规模、蒸汽参数及运行需求,确保与余热锅炉形成高效协同。在选型方面,需根据项目性质差异化选择:纯发电项目应优先选用纯凝汽式机组,以最大化发电效率;热电联产项目则可采用背压式或抽凝式机组,兼顾供热与发电需求。机组配置数量原则上不宜超过2套,避免过度分散运维成本,同时年运行小时数需与焚烧炉设计寿命匹配,确保全生命周期协同。配置环节需以余热锅炉产汽量为核心依据,通常每吨过热蒸汽可支撑纯凝机组发电160-200kWh,需预留10%-15%的功率裕量应对季节性波动。锅炉最大连续出力(BMCR)应设定为汽轮机保证进气量的1.03-1.05倍,通过容量差缓冲负荷突变。为保障系统冗余度,需配置汽轮机旁路系统:单机组时按100%额定进汽量设计,双机组则按较大机组120%额定进汽量配置,确保机组检修期间焚烧线可维持满负荷运行。冷却方式选择需开展水资源论证,干旱地区优先采用空冷技术,较水冷方案可节水80%以上。配套除氧器工作压力应根据余热锅炉出口给水温度精确校核,通过热力系统简化设计降低投资成本,最终形成安全、经济、环保的能源转换体系。

2.3 全厂热力系统优化

全厂热力系统优化的核心目标是提升能源利用效率,降低能耗,实现经济与环保效益双赢,主要从燃烧控制、蒸汽循环优化和辅机能效提升三个方面开展。燃烧控制优化通过在线监测垃圾热值、水分等指标,动态调整进料速度和配风比例,优化炉内温度场分布,促进垃圾充分燃烧,减少热能损失。蒸汽循环优化引入回热循环与再热循环技术,利用汽轮机抽汽加热锅炉给水,减少锅炉加热负荷,将高压缸排汽重新加热后送入中低压缸做功,提升循环热效率,同时优化蒸汽输送管道设计,减少压力和热量损失。辅机设备能效提升方面,对泵、风机等设备采用变频调速技术,使其输出功率与负荷需求精准匹配,避免低负荷运行时的能源浪费;定期对换热器进行清洗维护,采用强化传热技术,提升换热效率,

全面提升全厂热力系统的运行稳定性和经济性。

3 烟气净化与环保控制工程应用

3.1 烟气污染物特性及排放标准

垃圾焚烧烟气成分复杂、波动量大、腐蚀性强,主要污染物包括颗粒物、酸性气体(HCl、SO₂、HF)、氮氧化物(NO_x)、重金属(Hg、Cd、Pb等)及二噁英类化合物。其中,颗粒物浓度通常为10-30g/Nm³,含大量飞灰和重金属氧化物;HCl浓度100-800mg/Nm³,腐蚀性强且是二噁英合成的氯源;NO_x浓度200-800mg/Nm³,主要分为热力型、燃料型和快速型;二噁英类毒性极强,2,3,7,8-四氯代二噁英毒性为氰化钾的1000倍,易在生物体内蓄积^[3]。目前我国执行《生活垃圾焚烧污染控制标准》,明确二噁英排放限值为0.1ng-TEQ/m³,浙江、江苏等省份出台的超低排放政策更为严格,将颗粒物、SO₂、NO_x的1小时均值分别收紧至10、30、80mg/m³,要求每月达标运行时段占比≥95%。

3.2 烟气净化主流工艺

垃圾焚烧烟气净化主流采用“脱酸+脱硝+活性炭吸附+布袋除尘”的组合工艺,实现多污染物协同去除。脱酸环节优先采用半干法喷雾系统,向烟气中喷入石灰浆,中和HCl、SO₂等酸性气体,去除效率超过95%,部分项目可搭配湿法脱酸作为补充,提升脱酸效果。脱硝环节主要采用选择性非催化还原法(SNCR),在炉膛内喷入尿素溶液,将NO_x还原为氮气和水,脱除率超过60%,高端项目增设选择性催化还原法(SCR),脱硝率可达90%以上。活性炭吸附环节通过喷入粉末活性炭,利用其巨大比表面积吸附二噁英、重金属等污染物,防止其逃逸。布袋除尘是末端净化环节,通过数千条特制滤袋截留99.9%以上的粉尘及附着其上的重金属、二噁英,确保烟气中颗粒物浓度达标,各环节协同作用,实现烟气全面达标排放。

3.3 烟气净化系统集成设计

烟气净化系统集成设计需遵循“协同高效、抗冲击、易维护”的原则,结合焚烧炉工况和排放标准,实现各净化单元的合理布局与协同运行。首先,需根据烟气量、污染物浓度波动特点,设计系统时预留10%-15%的余量,提升系统抗冲击能力,应对垃圾成分变化带来的污染物波动。其次,优化各单元衔接顺序,合理设置烟气降温装置,确保脱酸、脱硝、吸附等环节的温度适配,避免温度过高或过低影响净化效果,同时减少设备腐蚀和结露风险。系统材质选用需兼顾耐腐蚀性和经济性,烟道、设备外壳采用耐酸不锈钢或防腐涂层,滤袋选用耐高温、耐腐蚀的PTFE材质。另外,集成在线监测系统,对烟气中

各污染物浓度进行实时监测,数据同步上传至生态环境部门,同时设计便捷的检修通道和药剂添加系统,降低运维成本,确保系统长期稳定运行。

4 渗滤液处理与灰渣资源化利用

4.1 垃圾渗滤液处理技术

垃圾渗滤液是垃圾堆存过程中经雨水淋溶、有机物分解形成的高浓度有机废水,COD可达 $10^4\sim 10^5\text{mg/L}$,氨氮 $10^3\sim 10^4\text{mg/L}$,水质复杂、毒性强,需采用“预处理+主处理+深度处理”的组合工艺。预处理环节包括格栅、调节池、厌氧酸化池等,去除大块悬浮物、均衡水质水量,将大分子难降解有机物分解为小分子,提升可生化性。主处理以生物处理为主,高浓度渗滤液采用“厌氧(IC/UASB反应器)+好氧(MBR膜生物反应器)”组合,厌氧环节去除70%~90%的COD,好氧环节深度去除有机物和氨氮,MBR膜实现固液分离,出水SS接近0。深度处理采用纳滤(NF)+反渗透(RO)工艺,去除残留的难降解有机物和盐分,处理后出水可回用于厂区绿化或循环冷却水补水,实现零排放,反渗透浓缩液回喷至焚烧炉彻底分解,避免二次污染。

4.2 炉渣资源化利用

垃圾焚烧炉渣是焚烧后产生的固体残渣,约占垃圾处理量的20%~25%,经高温焚烧后已实现无害化,具有较高的资源化利用价值,目前主要应用于建筑领域。炉渣资源化利用前需经过预处理,先通过磁选技术回收其中的废铁等金属,每吨垃圾可回收约15公斤废铁,实现金属资源循环。预处理后的炉渣经破碎、筛分,去除杂质后,可作为路基填料,用于公路、铁路路基铺设,其强度和稳定性满足工程要求,且能减少天然砂石的开采。此外,炉渣还可用于生产环保砖、透水砖等建筑材料,通过添加水泥、外加剂等,经成型、养护后制成符合国家标准的建材,不仅解决了炉渣填埋带来的土地占用问题,还能替代传统建材,降低资源消耗,实现“变废为宝”,资源化利用率可达95%以上。

4.3 飞灰处置技术

飞灰是烟气净化过程中收集的细小粉尘,约占垃圾处理量的2%~3%,因富集重金属、二噁英等污染物,被列为危险废物,需采用安全可控的处置技术。目前主流处置技术为“稳定化固化+安全填埋”,首先在飞灰中加入螯合剂、水泥等固化剂,通过搅拌混合使飞灰中的重金属形成稳定的化合物,降低其浸出毒性,同时固定二噁英等污染物,确保其不会泄漏^[4]。固化后的飞灰经检测,浸出毒性符合危险废物填埋标准后,运送至专用危险废物填埋场,采用分区填埋、防渗处理等措施,防止对土壤和地下水造成污染。部分高端项目探索飞灰熔融玻璃化技术,将飞灰在 1200°C 以上高温下熔融,冷却后形成玻璃态物质,彻底固化污染物,可作为建筑骨料循环利用,但该技术设备投资高、能耗大,目前仍处于试点阶段,尚未大规模推广应用。

结束语

生活垃圾焚烧发电技术在工程应用中已取得显著成效,在垃圾处理、能源回收和环境保护方面发挥着关键作用。通过不断优化焚烧工艺、热能回收系统、烟气净化技术以及灰渣资源化利用方式,该技术正朝着更高效、更环保的方向发展。未来,随着技术的持续创新和完善,生活垃圾焚烧发电有望在解决城市垃圾难题、推动能源可持续发展等方面发挥更大作用,为构建绿色、低碳社会贡献力量。

参考文献

- [1]c甘露.城市生活垃圾焚烧发电技术[J].中国航班,2024(18):51-53.
- [2]刘凡,文博,孟淳,等.生活垃圾焚烧发电厂臭气治理技术及其应用进展[J].生物化工,2025,11(4):253-256.
- [3]许成钦,武先威,喻滔.生活垃圾焚烧发电厂垃圾池处理技术及优化[J].中国高新科技,2024(1):105-107.
- [4]刘海洋.生活垃圾焚烧发电厂炉内脱硝技术的应用[J].中国新技术新产品,2025(15):109-111.