

垃圾焚烧发电污水处理后污泥的资源化利用途径探究

张轩雨

河南零碳技术研究院有限公司, 河南郑州, 450000;

摘要: 垃圾焚烧发电过程产生的污水处理污泥含有多种重金属、有机污染物和丰富养分, 具备较高的资源化利用价值。污泥资源化的主要技术途径包含建材制造、土壤改良剂生产、热能回收以及有价金属提取, 这些方法既能有效减少废弃物量又能实现资源化利用。资源化过程里重金属的迁移转化和有机污染物的环境释放等潜在风险, 需要通过科学评估和严格控制来确保产品的环境安全性。目前污泥资源化利用在经济效益和环保性方面仍面临一定技术挑战, 亟需政策支持和技术创新来推动其产业化进程。

关键词: 垃圾焚烧发电; 污水处理污泥; 资源化利用; 环境风险; 技术途径

DOI: 10.64216/3080-1508.25.09.057

引言

垃圾焚烧发电作为城市固体废物处理重要方式在全球广泛采用, 伴随而来污水处理污泥数量也在持续上升。传统污泥处理方法如填埋和焚烧面临土地资源紧缺、二次污染等诸多挑战, 所以亟需探索更为可持续的污泥处置方案。污泥里含有丰富金属元素、有机物和营养成分, 这为其资源化利用提供了良好物质基础, 通过合理技术手段能把污泥转化为具有价值的产品。污泥资源化不仅有助于缓解环境压力而且还能带来经济收益, 这符合循环经济的发展理念, 深入研究污泥特性、技术路线及风险控制, 对推动污泥资源化产业进步具有重要意义。

1 垃圾焚烧发电污水处理污泥的特性与成分分析

1.1 污泥的基本物理化学特性

垃圾焚烧发电产生的污水处理污泥有着独特物理和化学特性, 其含水率通常保持在75%-85%之间, pH值处于弱碱性范围有一定波动。污泥颗粒的粒径分布情况较为不均匀, 细小颗粒在其中占据主导地位, 这给后续的资源化利用创造了良好条件, 该污泥的有机质含量处于较低水平, 主要是由硅酸盐、碳酸盐及氧化物等无机物构成。污泥密度处于1.02-1.15g/cm³之间, 具备良好的压缩性能, 污泥的热值一般在800-1200kcal/kg范围内, 显示出一定的能源回收利用潜力, 为热能利用技术的应用奠定了基础^[1]。

1.2 重金属元素含量与分布特征

污泥里面含有多种不同的重金属元素, 主要包含铜、锌、铅、镍、铬、汞和镉等。铜和锌在污泥当中的含量普遍比较高, 通常能达到其他重金属含量的数倍之多, 具备一定程度的经济回收价值, 重金属在污泥当中的存

在形态呈现出多样化, 涵盖可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态以及残渣态等多种形式^[2]。不同形态的重金属生物可利用性存在较大差异, 其中残渣态重金属稳定性是最高的, 其环境风险相对较低, 重金属在污泥当中的空间分布并不均匀, 细颗粒里面重金属的富集度明显高于粗颗粒。

1.3 有机污染物成分分析

污泥里面的有机污染物种类特别多, 主要包含多环芳烃、多氯联苯等持久性有机污染物, 多环芳烃的浓度波动范围较大, 其中低环芳烃的含量相对比较高。二噁英类化合物的毒性当量浓度通常在0.1-5.0ng TEQ/g之间, 对环境安全存在一定潜在风险, 有机氯农药的残留检测频率相对比较低, 而且其浓度也比较小。挥发性有机化合物主要有苯系物和卤代烷烃等, 大部分在污水处理过程中已被有效去除, 有机污染物主要以吸附态的形式存在, 与污泥颗粒紧密地结合在一起^[3]。

1.4 营养元素含量评估

污泥里面富含植物生长所需要的多种营养元素, 其中氮、磷、钾这些元素的含量能满足土壤改良基本需求。总氮含量通常处于15-35g/kg范围内, 主要是以有机氮的形式存在且矿化速度较慢, 总磷含量相对比较高, 磷主要是以磷酸盐的形式存在且具备较好生物可利用性^[4]。钾的含量处于相对较低的水平, 主要是以无机盐的形态存在, 钙、镁等中量元素的含量十分丰富, 有助于改善土壤的理化特性, 微量元素的种类较为齐全, 铁、锰的含量相对比较高, 而硼、钼的含量则相对较少, 有助于提升土壤肥力, 并为生产优质土壤改良剂提供坚实物质基础。

2 污泥资源化利用的主要技术途径

2.1 建材资源化利用

污泥固化稳定化技术属于建材资源化利用的关键工艺,它通过添加水泥、石灰、粉煤灰等胶结剂,把污泥里的有害物质进行固化封闭,随着胶结材料掺量不断增加,固化体的抗压强度也会相应提高,最佳配比情况下抗压强度能达到10-25MPa,可满足建筑材料的性能要求^[5]。烧制制砖技术利用污泥中的有机质当作燃料,在高温条件下制造轻质砖,既实现了有机质的能源利用,又制得了具有良好保温性能的建材,免烧砖制备工艺借助机械压制成型,避免了高温烧制过程中产生的能耗,产品强度能够超过15MPa。陶粒制备技术把污泥与黏土按一定比例混合,经过造粒、预热和焙烧等系列步骤,制成容重低于800kg/m³的轻质陶粒,是优质的轻骨料材料。

2.2 土壤改良剂制备

堆肥化技术是制备土壤改良剂的核心方法,它依靠微生物把污泥里有机物转化成稳定腐殖质类物质,好氧堆肥过程需严格调控通风量含水率和碳氮比等关键因素,要让堆体温度保持在50-65℃之间,确保有害微生物灭活。厌氧发酵是在密闭环境下进行,产生的沼气可作为能源进行回收利用,发酵后的残渣经处理能用作土壤改良剂。蚯蚓堆肥技术利用蚯蚓的生物转化能力将污泥转变为高质量生物有机肥,产品养分丰富且重金属生物有效性较低,微生物接种技术通过加入特定功能菌株,促进有机物的分解转化,能缩短堆肥时间并提升产品质量,钝化剂添加技术通过投加磷酸盐、硫化物等化学物质,降低重金属的生物有效性。

2.3 热能回收利用

污泥干燥技术作为热能回收前置步骤,借助机械脱水、热风干燥和太阳能干燥等方法,把污泥含水率降低到10%以下,进而提高其热值。直接燃烧技术使用干燥后的污泥当作辅助燃料,在专用焚烧炉里和其他燃料一起燃烧,所产生热能用于蒸汽发电或供热,热解气化技术在缺氧环境下对污泥进行加热,生成可燃气体、焦油和固体残炭,可燃气体热值范围为4-8MJ/m³具有较高能源利用价值。将污泥和煤炭、生物质等燃料混合起来燃烧,能够优化燃烧性能并且减少污染物排放,余热回收系统通过热交换设备回收烟气中的显热,以此提升能源利用效率,烟气净化采用布袋除尘、脱硫脱硝及活性炭吸附等技术,确保排放达到环保标准要求。

2.4 有价金属回收

湿法冶金作为一种常用的金属回收工艺,会利用酸浸、碱浸等化学反应把污泥里的金属元素溶解提取出来,硫酸浸出工艺对铜、锌等金属有着较好的选择性,其浸出效率能够超过85%,浸出液经过净化和电解等步骤后可制得金属产品。盐酸浸出技术能够同时提取多种金属,不过设备容易受到腐蚀,生物浸出技术依靠硫杆菌、铁杆菌等微生物的代谢活动,可在较温和条件下实现金属的溶解,该工艺环保且成本较低。离子交换技术通过功能性树脂有选择性地吸附特定金属离子,以此实现金属的分离和富集,溶剂萃取技术使用有机萃取剂从浸出液中选择性提取目标金属,具备高纯度和回收率的优势,电化学沉积技术通过电解析出金属,其产品纯度可达99%以上,是制备高品质金属的重要方法。

3 资源化利用的环境风险评估与控制

3.1 重金属迁移风险评估

重金属在污泥资源化利用进程中迁移和转化的行为会直接影响环境安全,有必要构建科学合理的环境风险评估体系。利用浸出毒性试验可作为评价重金属环境迁移风险的重要手段,该试验通过模拟酸雨和地下水等环境条件来测定重金属浸出浓度,连续提取试验能够揭示重金属的化学形态分布状况,进而评估其生物有效性以及在环境中的迁移潜力。生物可利用性试验采用体外消化法模拟人体胃肠环境,以此评估重金属对人体健康的潜在风险,地下水污染风险评估则通过建立数学模型,预测重金属向地下水的扩散和迁移规律。

3.2 有机污染物环境行为分析

持久性有机污染物在环境里很难分解且容易积累,对其环境行为开展研究对风险管理有重要价值,挥发性试验用于评估有机污染物在大气当中的迁移能力。光解试验主要探讨有机污染物在紫外光照射情况下的降解机制,其中半衰期是衡量其环境稳定性的重要指标,生物降解试验通过微生物的作用,评估有机污染物的生物转化能力,在好氧和厌氧条件下降解速率存在明显差异。土壤吸附试验用于确定有机污染物和土壤颗粒之间的结合强度,生物富集试验用来衡量有机污染物在生物体内的累积程度,环境归趋模型预测其在不同环境介质中的分布趋势。

3.3 资源化产品安全性评价

资源化产品的安全性评估是保障其环保应用的重要基础,需要构建完善评价指标体系。重金属含量检测作为安全评估核心内容,要求产品中重金属总量及浸出

量符合相关标准规定。放射性检测用于排除产品存在放射性污染的可能性,内照射和外照射指数为关键评估指标。有机污染物检测涵盖多环芳烃、二噁英等化合物,其浓度需控制在安全限度以内。微生物指标检测包括病原微生物和寄生虫卵等,以保证产品的卫生安全。植物毒性试验通过发芽指数和根系生长抑制率等参数评估产品对植物生长的影响,体现其生物安全性。长期稳定性试验模拟产品在实际使用环境下的变化规律。

3.4 风险防控技术措施

构建多层次风险防控体系保障污泥资源化安全很核心,需实现从源头控制到末端监管全流程管理。预处理技术借助化学稳定化和热处理等手段,降低污染物活性有效减少环境风险,过程控制技术涵盖密闭操作、负压收集和在线监测等措施,防止污染物扩散到周围环境当中,末端治理技术采用活性炭吸附、生物滤池和化学洗涤等工艺,处理资源化过程产生废气和废水,环境监测体系构建起涵盖大气、水体和土壤的立体监测网络,能及时发现环境污染方面的问题。同时制定污染事故应急预案,完善产品质量标准、环境排放标准和操作技术规范,形成完善应急响应和标准规范体系。

4 应用前景与发展建议

4.1 技术应用前景分析

政策支持与市场需求双重推动之下,污泥资源化利用技术呈现广阔发展空间,随着绿色建筑理念在市场中不断普及,建材资源化技术进入快速成长阶段,轻质保温且环保的污泥建材产品需求持续增加。土壤改良剂技术因土壤修复市场扩大而受益,重金属污染土壤治理需求为污泥基土壤改良剂带来巨大发展潜力。热能回收技术在实现碳中和目标过程中具备重要战略价值,伴随着资源日益稀缺和回收技术不断进步,金属回收技术的经济效益将会显著提升,协同发展将会促进产业化和规模化的步伐加快。

4.2 产业化发展建议

要推动污泥资源化利用实现产业化发展,需要政府、企业和科研机构密切配合,在政策支持这一方面,应完善相关法律法规,健全标准规范,制定税收优惠和财政补贴等激励措施。技术创新体系建设要加强产学研协同,搭建创新平台,促进关键技术的突破和成果转化。商业模式创新需要探索PPP模式和第三方服务等多元合作形

式,构建可持续盈利的运营模式,产业园区建设可通过集中布局、统一管理和资源共享,实现规模经济效益,质量认证体系应建立独立的第三方检测和认证机构,制定产品质量标准,提高消费者的信赖度。

4.3 未来研究方向

未来污泥资源化利用技术发展要重点突破关键技术,保障环境安全,提升经济效益。在污染物精准控制方面,需深入研究重金属及有机污染物形态转变机制,开发高效去除与稳定化技术。高值化利用技术研发要拓宽资源化利用渠道,提高产品附加值,实现从单纯废物处理到资源综合利用根本转变。智能化技术应用应融合人工智能、物联网和大数据等新兴技术,提升系统自动化水平和运行效率。区域化技术模式研究要结合各地污泥特性、经济条件及环境承载能力,制定针对性差异化解决策略。

5 结语

垃圾焚烧发电过程产生的污水处理污泥资源化利用,是达成废弃物减量与资源再利用的重要途径,具备广阔发展潜力。通过对污泥特性开展系统分析,为挑选合适的资源化技术提供了科学依据,建材制备、土壤改良、热能回收与金属提取等技术路线具有各自优势及相应的适用条件。环境风险评估与控制属于确保资源利用安全的关键环节,亟需建立完善评价体系与防范措施,目前技术的成熟度和经济可行性仍有待提高,政策法规体系也需要进一步健全。未来应当注重技术创新与集成优化,推动标准化和规模化发展,为污泥资源化利用产业健康发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]刘露.污泥干化掺烧技术在垃圾焚烧电厂的应用与优化[J].资源节约与环保,2025,(08):29-32.
- [2]张辰,段妮娜,赵水轩,等.双碳目标下城市多源污泥处理处置技术选择与发展趋势[J].环境工程,2025,43(07):1-9.
- [3]马丽.上海市污水处理厂污泥处置利用现状及未来发展方向分析[J].四川环境,2025,44(01):84-87.
- [4]张宁.污泥协同处理处置国内外现状及发展趋势分析[J].城市道桥与防洪,2023,(10):23-27+56+13.
- [5]赵馨怡,曾凡,张晓娟,等.焚烧飞灰、市政污泥、农林固废的综合利用研究进展[J].中国资源综合利用,2023,41(06):127-133.