

垃圾焚烧烟气治理的新型工艺研究

杜金辉

山东省环境保护科学研究设计院有限公司

摘要：随着垃圾焚烧行业大气污染治理市场需求持续释放，垃圾焚烧行业大气污染治理的竞争企业将逐渐增多，各种治理技术同步快速发展。本文介绍了国内外的主流焚烧烟气治理工艺，分析其优缺点。同时介绍了一种以复合滤筒为核心的新型烟气治理工艺技术，分析该工艺在垃圾焚烧烟气中进行多污染物的协同脱除及二噁英的催化降解的可行性，不仅能满足国家超净排放的要求，且能降低企业生产成本。对多污染物协同脱除技术提供一种新思路，为进一步的研究工作提供了参考。

关键词：垃圾焚烧；复合滤筒；烟气治理；二噁英
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.06.110

引言

由于生活水平的提高，生活垃圾量呈现快速增长的态势，许多城市面临垃圾围城的挑战，为了尽可能实现垃圾处理处置的减量化、无害化，垃圾焚烧技术已成为主流应用的技术。为了有效推进垃圾焚烧工作的开展，2016年10月22日，国家住建部、国家发改委、国土资源部和环保部联合发布了关于进一步加强城市生活垃圾焚烧处理工作的意见。2022年11月14日，国家发展改革委、住建部、生态环境部等部门发布了生活垃圾处置相关指导意见，以更好地建设县级地区垃圾焚烧设施，相关文件和政策对于进一步开展垃圾焚烧技术的推广和设施建设起到了重要作用。到2021年底，我国已建成垃圾焚烧厂达到582座。但是，垃圾焚烧过程中同时会发生多种化学反应，由于垃圾成分复杂、多样和不均匀，导致生成各种不同数量和浓度的污染物。同时，不同季节的垃圾成分、各个成分占比的变化以及焚烧炉燃烧工艺控制条件影响等，都可能会引起不同时段烟气排放的变化。

一、垃圾焚烧概述

（一）垃圾焚烧的原理

垃圾焚烧是根据垃圾的性质和可燃物种类选择不同的燃烧方式，其中以蒸发燃烧、分解燃烧和表面燃烧为主。蒸发燃烧是将垃圾焚烧使其受热熔化蒸发变成蒸汽，扩散在空气中；分解燃烧是将垃圾焚烧使其受热分解，去除垃圾中的挥发性物质只剩下固体碳和部分惰性物，挥发性物质混合在空气中，固体碳会与空气中的氧气接触而燃烧；表面燃烧主要应用于一些受热后不会熔化、分解、蒸发的木炭等固体，采用表面燃烧的方式，使固体碳与空气接触而燃烧。城市生活垃圾的焚烧需要用到这3种燃烧过程。生活垃圾焚烧的阶段分为干燥、热分解和燃烧，这3个阶段只是时间先后的区别，实际生活垃圾焚烧过程中会由于多种因素导致燃烧不完全，不能达到理想的效果，还会造成空气污染等问题。

（二）垃圾焚烧工艺的主要影响因素

第一，垃圾焚烧时需要垃圾在焚烧炉内的停留时间合理，能够保证垃圾与空气充分接触，从而实现垃圾完全燃烧，实现垃圾与空气的充分接触。

第二，如果燃烧过程中温度过低，可能会导致垃圾燃烧不完全，所以，要严格控制燃烧温度在垃圾燃点之上，理论上讲要使燃烧温度大于650℃。此外，在低温燃烧时，垃圾可能会产生致癌、致畸形病变的物质，这种致癌物质在900℃以上时会基本消失，所以通常要控制垃圾燃烧温度在850℃以上。

第三，过剩空气量可以保证燃烧室内的氧气浓度较高，但是如果空气量过多，也会导致燃烧温度降低、热损失增大，同时还会增加废气量，所以在燃烧时要结合实际情况，根据垃圾性质确定过剩空气量。

（三）垃圾焚烧的优缺点

垃圾焚烧有独特的优点，也有其局限性。首先垃圾焚烧是对垃圾进行高温热化处理，能够有效减少城市生活垃圾，对城市生活垃圾进行无害化处理，还可以使生活垃圾再次利用。焚烧处理可以控制二次污染，并且焚烧处理场地发电厂具有较大的选址余地，经济效益比较高。与此同时，还能延长城市生活垃圾处理设施的使用期限，节约不可再生能源，垃圾焚烧目前有广阔的应用前景。垃圾焚烧的缺点是，生活垃圾焚烧也有一定的局限性，并不是都适合采用焚烧技术处理垃圾，垃圾焚烧技术会产生二次污染，并且工艺流程复杂、成本较高，设备的运作费用和投资费用都比较大。

二、生活垃圾焚烧烟气的特性

（一）烟气中污染物种类

烟气中的污染物包括：（1）颗粒污染物：焚烧炉燃烧垃圾过程中部分燃烧不充分的物质会以颗粒形式进入烟气中。（2）重金属成分：生活垃圾中可能会包括含有重金属的灯管、涂料容器、废弃电池等不同的废弃物，由于含有重金属物质的性质不同，在焚烧处理时，一部分重金属以飞灰的形式被排出，也有一些重金属物质存在于炉渣之中。（3）酸性气体：当生活垃圾中含有塑料等带有硫、氟、氯等物质时，这些废弃物燃烧过程会伴随硫化物、氟化物、氯化物等酸性气态物质的产生，这些酸性物的释放会影响周围空气质量。（4）二噁英类物质：指的是垃圾焚烧过程中产生的多氯二苯并二噁英（PCDDs）和多氯二苯并呋喃（PCDFs）的简称，这类物质是由结构性质类似的众多物质构成的化合物，属于持久性存在于环境中的超痕量有机污染物，可能会在人体内存在较长时间并产生富集，造成危害严重的健康问题，需要进行严格控制。

（二）烟气中污染物浓度

如前所述，生活垃圾焚烧过程中会产生硫化物、氟化物、氯化物等酸性气态物质，而且颗粒物、氮氧化物、重金属、二噁英等污染物也会伴随产生，其中硫化

物、氯化物、氮氧化物、颗粒物、二噁英的产生量大约分别在 $100\sim 600\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $1000\sim 2000\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $200\sim 600\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $2000\sim 6000\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $2\sim 3\text{ngTEQ}/\text{m}^3$ 之间。

三、现有垃圾焚烧烟气治理相关技术

考虑到垃圾焚烧烟气超低排放的发展趋势，国内部分垃圾焚烧厂参考国外主流工艺在布袋除尘后增设湿法脱酸与SCR脱硝设施。根据SCR系统布置位置，分为SCR前置与SCR后置工艺。

SCR前置工艺（图1）：SNCR+半干法脱酸+活性炭喷射吸附+袋式除尘器+SGH（蒸汽/烟气加热器）+低温SCR+GGH+湿法脱酸。

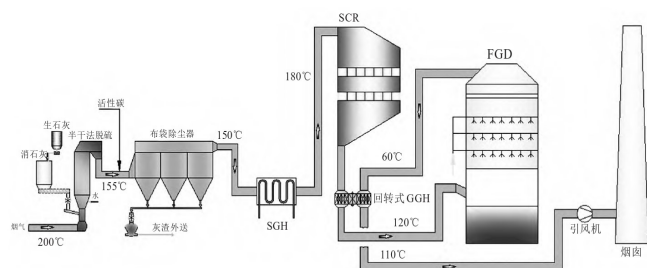


图1 垃圾焚烧处理 SCR 前置烟气净化工艺路线

SCR后置（图2）：SNCR+半干法脱酸+活性炭喷射吸附+袋式除尘器+GGH+湿法脱酸+GGH+SGH（蒸汽/烟气加热器）+低温SCR。

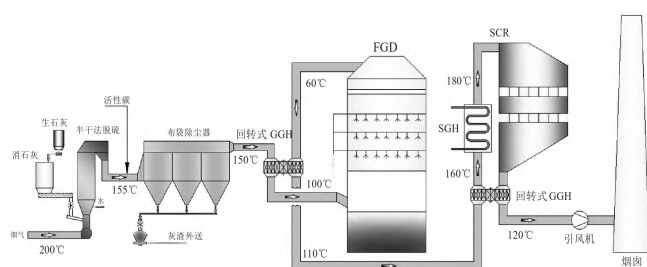


图2 垃圾焚烧处理 SCR 后置烟气净化工艺路线

目前，垃圾焚烧行业对SCR后置工艺运行可靠性的认可度更高，在排放要求升级的背景下，以“半干法+袋式除尘”为核心，串联“湿法+低温SCR”的全流程工艺目前是垃圾焚烧行业烟气治理的首选，其中为达到控制二噁英的排放，现有主流方法是在布袋前增加活性炭进行吸附。

由于垃圾焚烧大气污染控制目标多，特别是湿法工艺存在流程复杂、配套设备多、投资运维费用高、废水含高浓度无机氯盐及重金属、烟气热能损耗大等问题。

四、复合滤筒烟气治理技术

复合滤筒主要由无机黏结剂及硅酸铝纤维等材料制作而成，高透气性的滤筒内植入有纳米级高活性催化剂，具有孔隙率高、抗热震特性好、耐高温、强度高、过滤性能优异等优点，通过对滤筒涂覆催化剂以及复合滤筒自身的适应温度高。在工作时烟气经过复合滤筒，粉尘、重金属等固态污染物被滤筒表层过滤拦截，随后烟气缓慢穿过滤筒壁，NOx与滤筒内部的催化剂得到充分接触并与脱硝剂迅速、高效反应，生成氮气和水的复

合滤筒凭借这些技术优势，可适用于玻璃窑、生物质、石灰窑等行业的烟气治理，并且也在这些行业中获得实际应用（图3）。

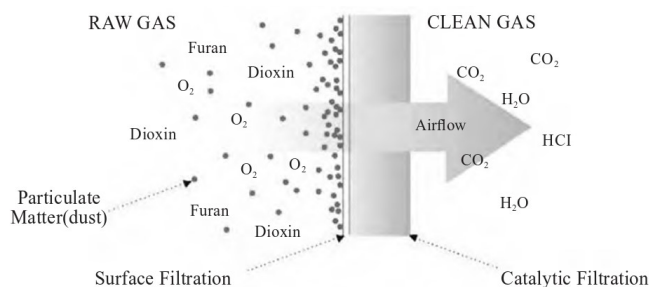


图3 滤筒对烟气治理的原理图

同时有相关资料表明在 $140\sim 200^\circ\text{C}$ 催化条件下可达到90%以上二噁英的脱除效率，同时降解效率随着反应温度升高而快速提升，在 200°C 降解效率达到最高（图4）。

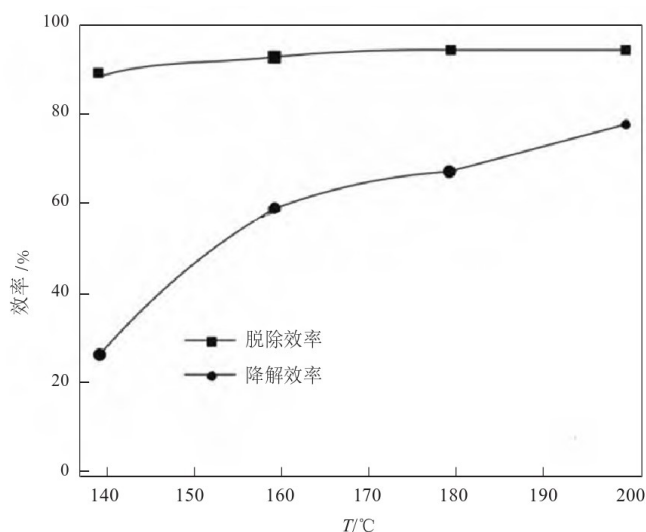


图4 在不同温度某催化降解二噁英的脱除效率

凭借复合滤筒可涂覆催化剂的优点，可对催化剂配方进行调整达到在催化剂作用下对烟气中的二噁英氧基破坏，发生结构转变，裂解为 CO_2 、 H_2O 和 HCl ，通过该设备完成对烟气多污染的协同脱除，大大降低企业的投资成本及场地不足问题。

根据现有垃圾焚烧烟气特性及结合该技术在其他行业的相关应用经验，提供出一种以复合滤筒为核心的多污染物协同脱除技术，其工艺路线主要为：

干法脱硫+复合滤筒尘硝设备+余热锅炉，当气体由垃圾焚烧炉进入脱硫塔时，与加入的脱硫、酸剂雾进行混合反应，对烟气中的 SO_2 、 HCl 进行脱除，随后烟气与喷入烟道中的氨水一起在气流均布装置作用下进入复合滤筒设备。凭借滤筒良好的筛滤、拦截作用完成除尘步骤。在滤筒内部涂覆的催化剂作用下可与烟气中的氮氧化物、二噁英进行反应脱除，达到对垃圾焚烧烟气治理的要求（图5）。

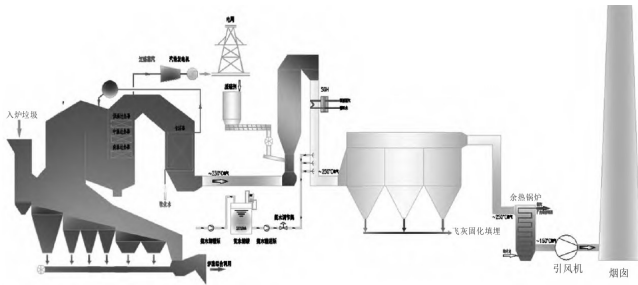


图5 复合滤筒为核心的多污染物协同脱除技术工艺路线图

五、工艺路线对比分析

相对于垃圾焚烧烟气治理常规工艺（SCR后置工艺），复合滤筒技术的工艺路线较短，可完成除尘、脱硝及二噁英的多污染物脱除，在烟气达标排放的同时有效减小系统占地，降低系统压损，节省工艺设备投资，减少系统的维护工作量。现有工艺路线为了达到越发严格的环保要求，通常采用串联增加新工艺的方式，为了满足新增工艺的要求，还需对烟气进行降温/升温处

理，大大增加能源浪费，无法满足现有企业的要求以及国家的绿色环保理念。

目前现有主流的活性炭+布袋吸附二噁英技术，仅是将二噁英从气相转为固相，通过布袋的过滤技术将其暂存在飞灰中，并未实现完全降解。同时活性炭为二噁英的低温催化合成提供了碳源，如烟道壁的残炭发生二噁英解析，将会增加二噁英的排放总量，造成运行成本增加。有别于此，复合滤筒可以将附着于颗粒物的二噁英与其他重金属一起过滤去除。同时，在适合温度区间（180~260℃），

烟气中的气态二噁英在复合滤筒催化剂的作用下发生氧化分解反应，通过催化剂促使二噁英内的氧基破坏，发生结构转变，裂解为H₂O、HCl和CO₂。以一台300t/d焚烧炉全年8000h满负荷运行并实现烟气达标排放为例，对比SCR后置全流程工艺和复合滤筒的多污染物协同脱除技术相关数据，可得出滤筒的多污染物协同脱除技术在各方面均有较为明显的优势（表1）。

表1 300t/d 焚烧炉烟气多污染物协同脱除技术比较表

脱除技术	全流程工艺	复合滤筒多污染物协同脱除技术
工艺路线	SNCR+ 半干法脱酸 + 活性炭喷射吸附 + 袋式除尘器 + GGH+ 湿法脱酸 + GGH+SGH (蒸汽/ 烟气加热器) + 低温 SCR	干法脱硫 + 复合滤筒尘硝设备 + 余热锅炉
系统压损 /Pa	≤ 9000	≤ 4500 (↓ 50%)
运行费用 (元 / 吨垃圾)	82	74 (↓ 9.7%)
固定资产投资费用 (万元)	2420	1660 (↓ 31%)

结语

综上所述，虽然以“半干法+袋式除尘”为核心，串联“湿法+低温SCR”的全流程工艺可以满足垃圾焚烧行业的烟气治理要求。但烟气净化工艺系统存在庞大复杂，占地面积大，建设成本和运行成本极高等问题。本文通过分析一种以复合滤筒为核心的技术实现烟气多污染物的联合脱除，在满足烟气超净排放深度发展指标的前提下，简化工艺系统，减少占地面积，降低投资和运维成本，为垃圾焚烧行业大气治理提供了一种新的思路。

目前复合滤筒技术在垃圾焚烧烟气治理中的应用较少，技术的可行性存在一定的不确定性。如何实现复合滤筒技术对多污染物进行协同脱除的高效脱除、采用干法脱硫工艺路线满足高效脱硫要求是后续研究的重点方向。同时，随着环保趋势越来越严格，二噁英检测技术的普及，还需关注适用于垃圾焚烧工况二噁英脱除的复合滤筒与催化剂载体技术。只有对相关工艺进行更深层次的研究，才能推动垃圾焚烧烟气多污染物治理技术的发展与应用。

参考文献

[1] 洪博文, 薛红琳, 车卫彤, 等. 生活垃圾焚烧烟气污染物分析及净化技术[J]. 能源与节能, 2020 (8): 76-78.
 [2] 陈怀俊, 牛芳, 王乃继. 垃圾焚烧处置中二噁英

和重金属污染控制技术进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (6): 59-75.

[3] 王育波. 某垃圾焚烧发电厂烟气净化系统优化分析[J]. 节能与环保, 2022 (3): 3.
 [4] 袁伯若, 程虎. 垃圾焚烧烟气超低排放全流程工艺选择[J]. 有色冶金节能, 2021 (05): 1-4+12.
 [5] 宋睿烜. 关于生活垃圾焚烧烟气净化处理技术的探讨[J]. 四川水泥, 2021 (4): 2.
 [6] 张焕亨. 垃圾焚烧电厂超低排放烟气处理技术应用研究[J]. 锅炉技术, 2021, 52 (3): 5.
 [7] 张明华, 郝广民, 靳睿杰, 等. 重点区域生活垃圾焚烧行业实施大气污染物超低排放的可行性技术路线研究[J]. 中国环境监测, 2020, 36 (6): 51-56.
 [8] 张蒙雨. 生活垃圾焚烧行业烟气处理新工艺研究[J]. 资源节约与环保, 2021, 000 (004): 80-82.
 [9] 丁圣轩, 焦显峰, 易丹, 等. 特大型垃圾焚烧发电厂烟气超低排放关键技术研究与应用[J]. 安装, 2022 (S01): 13-15.
 [10] 龙吉生, 刘露, 袁旗斌, 等. 垃圾焚烧烟气再循环技术的应用研究——以某垃圾焚烧厂为例[J]. 四川环境, 2022, 41 (5): 63-70.
 [11] 阙正斌, 李德波, 肖显斌, 等. 中国垃圾焚烧烟气多污染物协同脱除技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 2.