

炉排型垃圾焚烧炉烟气净化工艺优化

介绍了垃圾焚烧过程中烟气污染物的构成成分及来源，论述了国内垃圾焚烧发电厂污染物减排净化技术的应用及研究现状。通过对比分析不同烟气净化工艺的特点，选择合适的烟气净化处理系统、设备，实现垃圾焚烧烟气污染物的排放要求，为垃圾焚烧发电项目的烟气净化工艺系统设计提供参考。

经对比国内烟气净化工艺的现状，优化选择出适合北京某垃圾焚烧发电厂的烟气净化工艺，以及烟气净化系统中脱硫、脱硝、袋式除尘等系统的技术参数。

目前，城市生活垃圾无害化、减容化、可资源化利用的焚烧处理技术主要有：国产循环流化床焚烧技术、引进的机械炉排型焚烧技术、气化熔融焚烧技术、等离子体气化处理技术。但因气化熔融和等离子体气化基础投资较大，工艺及装置的优化、经济可行性等有待提高，因而尚未在我国启用。

根据毛永宁等对不同城市生活垃圾焚烧技术的综合评价分析，我国目前采用的主流技术仍为炉排型焚烧技术与流化床焚烧技术，但流化床焚烧技术对环境污染的潜值大于炉排型焚烧技术，特别是焚烧规模在2000t/d以上的垃圾焚烧厂的建设趋势，显示出采用炉排型焚烧技术的处理规模迅速增加，采用循环流化床技术的焚烧规模明显趋缓，炉排型焚烧炉仍是主要趋势。

垃圾由于来源广泛、成分复杂、性质多样，燃烧过程中会产生多种对环境和人体有危害的污染物，污染物浓度的减排技术日益受到重视。本文对烟气中污染物的组成及其净化处理技术进行了综述，优化选取了烟气净化技术，并分析了北京某垃圾焚烧发电厂炉排型焚烧烟气处理技术的先进性。

1 烟气中污染物的构成成分

生活垃圾在焚烧过程中产生的烟气成分极其复杂，主要污染物有烟尘（颗粒物）、酸性气体（HCl、SO_x、NO_x、HF等）、重金属（Hg、Pb、Cd等）、有机毒性污染物质（PCDDs/Fs）等。烟尘是垃圾焚烧过程中产生的微小无机颗粒物，因具有较强的吸附性，吸附致癌性的有机化合物、含重金属元素的化合物等，是多种有害物质的载体。

酸性气体主要来源于垃圾中某些特定成分的燃烧，HCl来源于垃圾中含氯塑料、厨余、纸张、布等物质的燃烧，其浓度为0.4~1.5g/Nm³，垃圾中含氮化合物的分解转换和空气中氮气的高温氧化生成NO_x，垃圾中的含硫化合物氧化燃烧生成SO_x。

重金属类污染物主要来源于生活垃圾中的废旧电池、电子产品、油漆等，在焚烧炉内经过蒸发、表面反应、凝结成核，分布在底灰、飞灰、炉渣中，垃圾成分中有机氯化物含量高时，铬为烟气中重金属元素主要成分；无机氯化物含量高时，铅为烟气中重金属元素主要成分。

焚烧炉内二英的生成主要发生在燃烧过程中和尾部烟道再合成，若缺氧燃烧时，生成的二英前驱物与垃圾中氯化物、O₂、氧离子发生复杂的反应，生成二英；尾部烟道中二英前驱物及未燃尽的环烃物质在烟气中重金属（Cu、Ni、Fe等）离子的催化作用下，与烟气中氯化物、O₂反应生成二英，温度在300℃左右时，更易于二英的生成。

2014年颁布的《生活垃圾焚烧污染控制标准》规定了颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、氯化氢等常规污染物的排放要求，二英类排放限值与欧盟标准一致，均为0.1ngTEQ/m³，对垃圾焚烧发电厂污染物的排放要求更加严格，更接近欧盟2000/76/EC排放标准，部分国内运行年久的垃圾焚烧发电厂需进行净化工艺技术改造、新厂优化选择净化工艺以减少污染物的排放浓度，达到新的污染物排放标准。

2 国内烟气净化系统的研究现状

2.1 脱硫系统

国内对垃圾焚烧发电厂烟气脱硫系统已有深入的研究，已建成的垃圾焚烧发电厂大多采用机械旋转喷雾半干法工艺、循环流化法和干法净化工艺。

高翔等分析了半干法循环悬浮式脱硫工艺，半干法烟气脱硫工艺既具有湿法脱硫反应速度快、脱硫效率高的优点，又有干法无污水废酸排出、脱硫后产物易处理的优点。

董珂等均推荐采用半干式反应塔脱硫装置，但陈善平等研究发现采用“喷嘴或旋转喷雾器半干法+活性炭喷射+袋式除尘器”烟气净化工艺可达到欧盟1992标准，是目前垃圾焚烧烟气净化的主流选择，但不能满足更严格的排放标准（如欧盟2000标准）。

光大环保能源吴凯等研究得到“SNCR脱硝+（半干法+干法）脱酸+活性炭+袋式除尘器”的组合工艺，净化后的烟气各项指标达到欧盟2000标准。

潘海东等对上海环境不同项目垃圾发电烟气排放进行对比分析，不久应该会逐步采用“SNCR+半干法（固定喷头喷NaOH或固定喷头喷石灰浆或旋转喷雾）+干法（石灰干粉和活性炭）+袋式除尘器”的烟气处理工艺满足国内日益趋严环保要求的提高。

天津泰达环保闫志海等比较了几种不同半干法脱酸塔形式，表明喷雾干燥吸收塔比增湿灰吸收法、循环灰吸收法脱酸效率高。曾纪进等分析对比了旋转喷雾半干法、石灰石—石膏湿法及烟气循环流化床（CFB）三种脱硫工艺，表明旋转喷雾干法脱硫是最有效的烟气净化技术。

2.2 活性炭喷入系统

活性炭喷射通常与袋式除尘器配套使用，半干式脱硫塔后喷入活性炭，活性炭通过重量计量，采用给料螺旋投料，进入文丘里系统，烟气与活性炭强烈混合，活性炭吸附烟气中的重金属、PCDD/Fs等污染物质，进入袋式除尘器，继续吸附与捕集分离，吸附污染物的活性炭从烟气中分离出来。活性炭喷射系统及袋式除尘系统配套使用，可以剥离烟气中99%的PCDD/Fs，并且吸附牢固，是目前大型垃圾焚烧工艺中应用最多的技术。

2.3 除尘器系统

闫志海等对静电除尘和袋式除尘的烟气净化进行综合分析对比得到采用袋式除尘器比静电除尘器有利，现在已基本不再采用静电除尘器作为垃圾焚烧发电厂的粉尘处理装置，国标GB18485-2001中也规定生活垃圾焚烧炉除尘装置必须采用袋式除尘器。

张文斌等对垃圾焚烧发电厂袋式除尘器滤袋材质选择的分析，表明针对垃圾焚烧的复杂和恶劣的工况条件，垃圾焚烧炉配套用的袋式除尘器滤料采用PTFE针刺毡滤料是比较合理的。

2.4 烟气脱硝系统

目前，国内关于垃圾焚烧炉烟气脱硝工艺的研究报道甚少，蔡洁聪等、胡利华等研究了温度、氨氮比（NSR）、还原剂喷射速度和液滴粒径对炉排焚烧炉内脱硝效果的影响，研究表明最佳脱硝温度在960 ~ 1000，最佳氨氮比为1 ~ 1.5。

贺毅等、邹金生等分析得到垃圾焚烧系统发电厂SNCR系统的各运行参数全部能达到设计要求，NOx排放浓度可长期稳定在150mg/Nm³以下；范海燕等表明国内炉排炉焚烧系统必须更加合理地采用SNCR脱硝技术，必要时仍需采用SCR脱硝技术以达到更严格的环保标准。

刘广涛等提出垃圾焚烧发电低温SCR脱硝技术，可避免SNCR脱硝技术可能存在的脱硝效率低、锅炉结垢、水冷壁腐蚀等弊端，并且无需加热、节约能源。

徐青等对垃圾焚烧发电厂烟气脱硝技术模糊综合评价为，在达到现有环保标准的情况下，可以采用更经济的SNCR脱硝技术，采用SNCR/SCR联合脱硝工艺，可满足更高的环保标准。

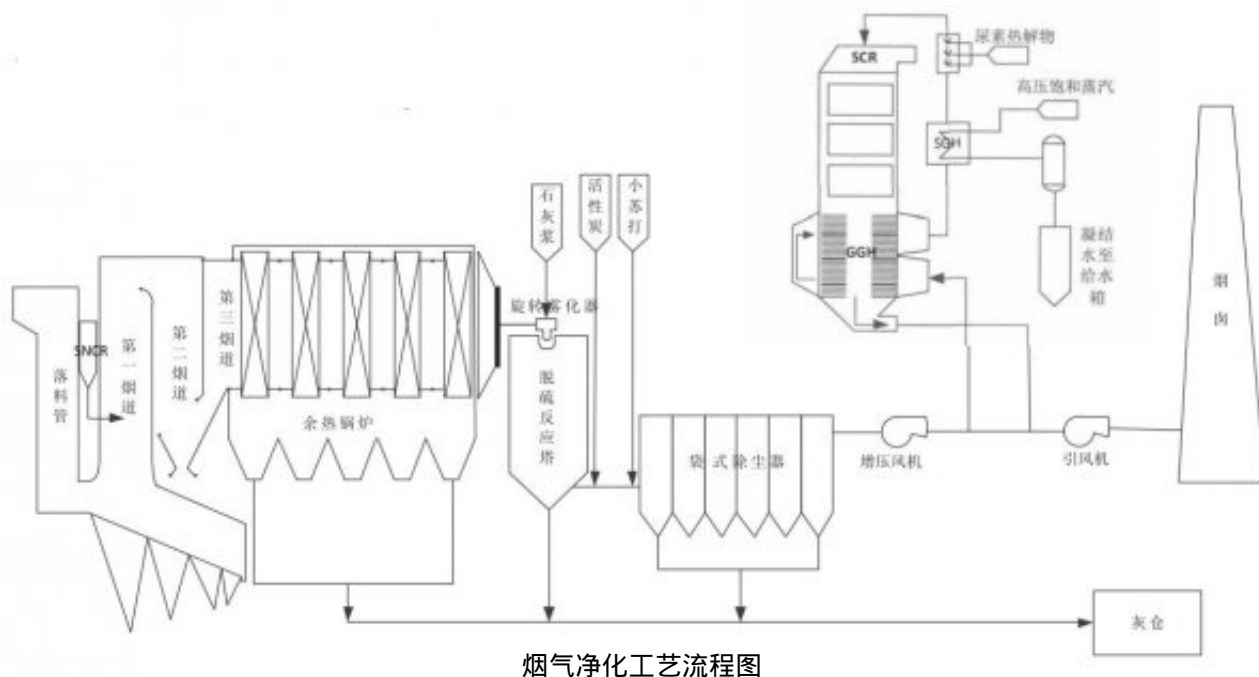
康淑娟等综合了垃圾焚烧烟气脱硝技术工艺现状，指出反应温度较低、脱除效率高、工艺设备紧凑、运行可靠及无二次污染的选择性催化还原SCR脱硝工艺是将来垃圾焚烧脱硝的首选工艺，并且催化剂仍是脱硝领域的发展方向。

3 烟气净化新型高效组合工艺

随着国内垃圾焚烧发电行业的发展，垃圾焚烧炉日处理垃圾量不断增加。垃圾焚烧炉烟气污染物控制系统需要不断优化，达到污染物排放控制标准，甚至更严格的标准，烟气净化系统的发展就显得尤为重要，以脱除烟气中酸性气体（SO_x、NO_x、HCl等）、重金属（Pb、Hg、Cd等）、二英等有毒有害气体。

国内烟气净化组合工艺系统有多重方案，主要采用脱酸系统与除尘系统的不同组合工艺以减少烟气中污染物的排放。

北京某电厂焚烧炉排采用比利时Seghers多级炉排，烟气净化组合工艺为：（炉内SNCR-去除NO_x）+（旋转喷雾反应塔-净化酸性气体）+（干法NaHCO₃喷射-净化酸性气体）+（活性炭喷射-吸附重金属、二英）+（袋式除尘器-除尘）+烟气再加热+（SCR-进一步去除NO_x）+防白烟气系统+〔烟气在线监测装置（CEMS）〕。烟气净化工艺流程如下图所示。



在保证炉内燃烧工况良好的情况下，符合炉内燃烧的3T燃烧控制条件。

焚烧炉燃烧的热烟气经过炉内SCR脱硝后，进入余热锅炉换热，余热锅炉出口的排烟温度为190（清洁状态）至210（脏污状态），再进入半干法机械旋转雾化反应塔，NaHCO₃作为脱酸剂喷入烟道，活性炭喷射吸附，再经过袋式除尘器除尘系统、选择性催化还原SCR脱硝等烟气净化处理系统。

焚烧炉出口的烟气经过脱酸处理带有大量固体颗粒的烟气与喷入的活性炭高速混合，进入袋式除尘器，二英及重金属被吸附在袋式除尘器外侧，烟气再经过SCR脱硝系统进一步净化，洁净的烟气通过引风机排入烟囱。

3.1半干式反应塔和旋转雾化器

烟气净化中的脱酸系统采用GEA/NIRO的高速旋转雾化器，雾化平均粒径可达45 μm。烟气进入反应塔与雾化后的石灰浆颗粒混合，通过旋转雾化器的高速旋转保证雾化颗粒的细度和冷却水的雾化细度。由于雾化程度高，旋转喷雾器将约15%的Ca(OH)₂浆液喷入反应器中，形成粒径极小的液滴，石灰浆与烟气中的酸性成分充分反应。

由于水分的蒸发从而降低烟气的温度并提高其湿度，同时不会弄湿塔壁及造成结垢，使酸性气体与石灰浆反应成为盐类，掉落至底部的灰斗，半干式反应塔内未反应完全的石灰，可随烟气进入除尘器，部分未反应物将附着于滤袋上并通过滤袋的酸性气体再次反应，使脱酸效率进一步提高，同时提高了石灰浆的利用率。

NaHCO₃喷粉干法工艺系统，有在反应塔入口烟道和布袋除尘器前的烟道两种喷入方式，可使得烟气净化系统有半干法运行、干法替代运行（在半干法旋转雾化设备故障时），半干法与干法联合运行等多种运行模式。在合理运行成本条件下，可以充分保证系统的脱酸效果，确保排放值达标。半干式旋转喷雾反应塔的技术参数见表1。

表1 旋转喷雾半干法脱硫技术参数

项目	参数
旋转雾化器型号	GEA Niro-F100
烟气进口流量 (Nm ³ /h)	123, 218
烟气进口额定温度 (°C)	190
最高烟气温度 (°C)	140
外形尺寸 (直径/圆柱体高度) (m)	11/10
额定石灰浆耗量 (浓度15%) (kg/h)	3172
石灰纯度 (%)	>90
烟气在洗涤塔中流速 (m/s)	0.5~0.7
停留时间 (s)	22~28
烟气额定压力降 (Pa)	900
额定工况, 半干法反应塔飞灰量 (kg/h)	85
反应塔脱除HCl效率 (%)	99
反应塔脱除SO ₂ 效率 (%)	90
雾化器电机转速 (rpm)	12, 000
装机功率 (电机) (kW)	74
雾化器尺寸 (mm)	h:1000, d:300

雾化石灰液滴既要冷却烟气降温, 又要与烟气中的硫氧化物发生中和反应, 在烟气经过反应塔时必须保证烟气反应塔中停留时间至少20s, 以保证石灰液雾滴与烟气中的酸性气体更好地接触, 达到更高效地脱除烟气中的酸性气体。

3.2袋式除尘器系统

烟气经过旋转高速雾化器脱硫塔及活性炭喷入系统进入除尘器, 除尘器内的分配板使烟气中较重的颗粒立即掉落进接收漏斗里, 并且使烟气均匀分配后进入布袋。烟气由布袋的外侧进入, 烟气与灰尘和固体颗粒物分离出来, 出口处为清洁的烟气。

布袋外侧不断累积过滤层, 包括脱硫反应塔中被烟气携带出的石灰、NaHCO₃和活性炭, 烟气中的酸性污染物在半干反应塔后, 仍能被中和, 烟气中的重金属和二英被捕集在布袋的外侧, 减少了污染物的排放。

除尘器外侧的过滤层不断增厚, 根据袋式除尘器压差增大的程度, 定期采用干燥的压缩空气脉冲由内向外吹灰, 布

袋外侧的残余灰尘掉落入排料斗。烟气中的酸性成分在布袋滤层上发生中和反应，对更换脱硫塔内旋转高速雾化器尤其重要，可减少酸性气体排放。

布袋的选型也应满足由于雾化器的关闭，烟气未被冷却而造成的短时间高温（260℃）。袋式除尘器的参数见表2。

表2 袋式除尘器工艺特性参数

项目	数值
额定流量（Nm ³ /h）	128,368
设计流量（Nm ³ /h）	145,000
额定温度（℃）	145
最高烟气温度（℃）	连续215，峰值260
出口粉尘浓度设计值（mg/Nm ³ ）（干11%O ₂ ）	5
出口粉尘浓度保证值（mg/Nm ³ ）（干11%O ₂ ）	10
过滤风速（额定工况）（m/min）	0.8
过滤风速（设计工况）（m/min）	0.9
每个过滤器仓室数量	8
滤袋类型/材料	PTFE-PTFE
布袋直径×长度（m）	0.150×6
每个仓室的布袋数量（个）	256
每条线总过滤面积（m ² ）	4340
每个布袋过滤面积（m ² ）	2.83
布袋吹灰方式	压缩空气脉冲式
压缩空气压力（MPa）	0.6
设计压降（Pa）	<1500
机械设计压力（Pa）	-8500/+3500
灰斗的加热方式	电伴热
保温厚度（mm）	120

袋式除尘器的滤袋采用表面具有过滤功能、透气性好、耐腐蚀和耐高温的PTFE材料，PTFE材料经覆膜处理，除尘

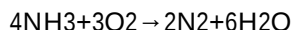
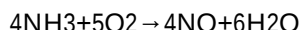
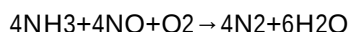
效率可达99.9%以上，在240℃的连续运行温度、瞬间260℃的温度条件下，能耐全部pH值范围内的酸碱侵蚀；袋式除尘器充分考虑了垃圾焚烧发电厂烟气排放标准的严格要求，并且采用了伴热、旁路、保温等保护措施。

3.3 SNCR+SCR脱硝系统

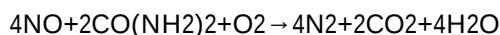
通过优化燃烧和烟气净化工艺，北京某垃圾焚烧发电厂焚烧炉内采用SNCR系统以减少氮氧化物的产生，同时在尾部烟道袋式除尘器后布置了SCR脱硝系统，以进一步降低NO_x排放量。

3.3.1 SNCR脱硝系统

选择性催化还原法（SNCR）是在烟气温度850℃～1100℃，向炉内直接加入氨液或尿素脱硝剂，将氮氧化物还原成为氮气与水气的方法。焚烧炉喷入氨液的反应原理为：



在850℃～1100℃高温下，喷入尿素与氧化氮进行如下反应：



采用SNCR法对NO_x的去除效率在50%以上，若为了提高氮氧化物的去除效率而增加药剂的喷入量，氨的漏失率也会相应增加，剩余的氨和氯化氢及三氧化硫化合生成氯化铵及硫酸氢氨而沉淀在锅炉尾部受热面，会导致余热锅炉尾部受热面结垢和堵塞，同时会使烟气形成白烟。

3.3.2 SCR脱硝系统

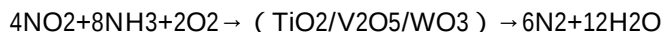
在袋式除尘器下游设置SCR系统以进一步去除烟气中的NO_x，同时还可以部分氧化二英（PCDD/Fs）。SCR系统包括GGH（烟气-烟气换热器）、GSH（烟气-蒸气换热器）、尿素制氨设备（分解室）、氨喷射装置和SCR反应塔。

SCR装置的主要功能是为NO_x与氨中和创造最佳的反应条件，包括充足的停留时间、烟气通过时与催化剂的接触面积。

催化反应与温度有关，最佳反应温度设为230℃。袋式除尘器后的增压风机出口烟气温度约为140℃，因此采用两个串接的换热器。

第一阶段：SCR反应塔出来的热烟气通过GGH（烟气-烟气换热器）与烟气进行热交换，烟气升温。第二阶段，烟气通过GSH（烟气-蒸气换热器）利用汽包内的高压蒸气进一步加热到反应温度。

NO_x与氨在奥地利CERAM产的TiO₂/V₂O₅/WO₃或等同催化剂上反应，在适当的温度条件下，发生如下反应：



SCR工艺要求氨投加量精确度高及与主烟气混合的均匀度高，以保证有效去除NO_x，并使氨逃逸降到最低。烟气中NO_x与氨的反应发生在装有蜂窝式催化剂的反应塔里，反应塔体为单仓，装有两层活性催化剂层。SCR脱硝系统净化工艺技术参数见表3。

表3 SCR脱硝系统工艺技术参数

项目	数值
额定运行烟气量 (Nm ³ /h)	112, 963
设计烟气风量 (Nm ³ /h)	125, 000
SCR系统总阻力 (Pa)	2900
GGH入口温度 (来自增压风机, °C)	141
GGH出口温度 (来自增压风机, °C)	175
GGH入口温度 (来自SCR反应器, °C)	230
GGH出口温度 (来自SCR反应器, °C)	195
GGH换热面积 (m ²)	1850
GGH换热面材质	Q345
GSH入口烟气温度 (°C)	175
GSH出口烟气温度 (°C)	230
GSH入口蒸汽温度 (°C)	261
GSH入口蒸汽压力 (MPa)	4. 7

目前,我国垃圾焚烧发电厂烟气脱硝系统的研究和应用尚处于起步阶段,国内新建及改造的垃圾焚烧发电厂大都是布置SNCR脱硝系统,SCR比SNCR法具有更高的烟气脱硝效率,脱硝效率可达80%以上,但从长远看,在经济条件许可的条件下,SNCR+SCR技术会成为主流。

烟气经过换热器离开烟囱的温度相对较高(额定点温度201℃),在环境温度为5℃,60%RH(湿度)条件下,不会有白烟产生(不透光率<10%)及白烟的扩散,即使有可能旁通SCR装置,烟气仍可以通过GSH换热器升温,可在一定条件下控制白烟,减少二次污染的产生;白烟产生与气象条件的变化密切相关,每条焚烧线需预留一套防白烟装置,并根据气象条件变化确定是否开启。

4结语

垃圾焚烧发电厂在建造时,应考虑本地区的经济发展具体情况,结合国家颁布的垃圾焚烧发电烟气排放标准进行设计建造。

对国内垃圾焚烧发电厂目前所采用的烟气净化工艺进行总结,垃圾焚烧发电主要通过控制炉内焚烧条件外,还采用炉内SNCR脱硝系统,尾部烟道净化采用旋转喷雾干燥半干法烟气脱硫系统、活性炭喷射系统、袋式除尘器来控制污染物排放,以达到排放标准。

本文介绍了北京某垃圾焚烧发电厂主要采用“炉内SNCR+半干法(Ca(OH)₂)+干法(NaHCO₃)+活性炭喷射+袋式除尘+烟气再加热+SCR”的烟气净化工艺以及技术参数、脱除效率估算等。

今后需要深入研究适合我国生活垃圾成分的燃烧烟气净化技术工艺,以满足更严格的烟气排放标准。同时,烟气净

化工艺仍还需要结合当地的具体情况，从经济和技术方面科学合理地选择。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/147687.html>