

生活垃圾焚烧烟气常用净化控制技术

生活垃圾焚烧烟气中的污染物包含以下四类：

- (1) 煤烟、颗粒物及飘尘；
- (2) 酸性气体：HCl、HF、SO₂、NO_x；
- (3) 有毒重金属：Pb、Cd、Hg、As、Cr等；
- (4) 二噁英类等卤代化合物：PCDDs (二噁英)、PCDFs (呋喃)。

(1) 粉尘（颗粒物）控制技术

焚烧尾气中粉尘的主要成分为惰性无机物，如灰分、无机盐类、可凝结的气体污染物质及有害的重金属氧化物，其含量在450~225500

mg/m³之间，视运转条件、废物种类及焚烧炉型式而异。一般来说，固体废物中灰分含量高时，所产生的粉尘量多。

粉尘颗粒大小的分布亦广，直径有的大至100 μm以上，也有小至1 μm以下。除尘设备的种类主要有：重力沉降室、旋风（离心）除尘器、喷淋塔、文式洗涤器、静电除尘器及布袋除尘器等。重力沉降室、旋风除尘器和喷淋塔等无法有效去除直径为5~10 μm的粉尘，只能视为除尘的前处理设备。

静电集尘器、文式洗涤器及布袋除尘器等三类为垃圾焚烧尾气净化系统中最主要的除尘设备。文式洗涤器多用于危险废物焚烧处理。由于ESP具有促进二噁英生成的环境，目前国外在生活垃圾焚烧尾气净化系统中普遍采用布袋除尘器，美国、欧盟和加拿大环保局均推荐采用布袋除尘器收集粉尘。

(2) NO_x污染控制技术

NO_x是NO和NO₂的统称，依据氮氧化物生成机理，可分为热力型、燃料型和快速型NO_x三类，其中快速型NO_x生成量很少，可以忽略不计。

热力型NO_x：是指当炉膛温度在1500℃以上时，空气中的氮气在高温下被氧化生成NO_x。随着温度T的升高，其反应速率按指数规律。当T<1500℃时，NO的生成量很少，而当T>1500℃时，T每增加100℃，反应速率增大6-7倍。

燃料型NO_x：指的是燃料中的有机氮化物在燃烧过程中生成的NO_x，其生成量主要取决于空气燃料的混合比。由于燃料中氮的热分解温度低于煤粉燃烧温度，在600 - 800℃时就会生成燃料型，它在煤粉燃烧NO_x产物中占60 - 80%。

快速型NO_x：指燃烧时空气中的氮和燃料中的碳氢离子团(CH)等反应而生成NO_x。在这3种途径中，快速型NO_x所占的比例不到5%。

在温度低于1300℃时，几乎没有热力型NO_x。对常规燃煤锅炉而言，NO_x主要通过燃料型生成途径而产生。

在生活垃圾焚烧过程中，NO_x主要有三个来源：

- 1) 垃圾自身具有的有机和无机含氮化合物在焚烧过程中与O₂发生反应生成NO_x；
- 2) 助燃空气中的N₂在高温条件下被氧化生成NO_x；
- 3) 助燃燃料（如煤、天然气、油品等）燃烧生成NO_x。

通过加强控制手段抑制NO_x的形成或者将已经生成的NO_x还原成为N₂分子，是减少焚烧炉尾气NO_x排放最为有效的手段。目前应用非常广泛的控制技术主要包括三类：焚烧控制、选择性非催化还原技术（SNCR）、选择性催化还原技术（SCR）。

焚烧控制

通过控制焚烧过程的工艺参数降低NO_x的烟气排放浓度。主要有：

- 1) 降低焚烧区域的温度。在1400℃以上，空气中的N₂即与O₂反应生成NO_x。通过控制焚烧区域的最高温度低于1400℃，并且减少“局部过度燃烧”的情况发生，即可控制这部分NO_x的生成。由于垃圾中某些高热值燃料（如塑料、皮革等）集中在某一区域燃烧造成该区域的局部温度可能超过1400℃，从而增加NO_x的生成量，一般将垃圾坑中的垃圾混合均匀就可避免此类情形发生。
- 2) 降低O₂浓度。通过调节助燃空气分布方式，降低高温区O₂浓度，从而有效减少N₂和O₂的高温反应。这是一种非常经济有效的方式。热解气化焚烧炉即是采用此机理。
- 3) 创造反应条件使NO_x还原为N₂。

以上三类控制技术，在垃圾焚烧系统中具体实现时有以下几种形式：

- a) 低空气比。降低焚烧炉的空气过剩系数，使得O₂的量足以用于固废焚烧需要但不足以生成大量的NO_x和CO。已有研究成果表明：在过剩空气比为1.2时，热解气化焚烧炉烟气中NO_x含量只有过剩空气比为2.0时的NO_x含量的1/4~1/5。
- b) 调整助燃空气布气孔位置。将部分助燃空气由炉排下供风转移到炉排上面供风，使得离开主反应区后未被焚毁的污染物与由炉排上方供应的空气混合后继续反应。
- c) 分阶段燃烧。通过设置燃料和助燃空气的入口，实现垃圾分阶段焚烧的目的，其作用与2)相同，逐步焚毁离开前面反应区时未被焚毁的污染物。
- d) 烟气循环。将烟气循环回到高温焚烧区域，稀释空气中的O₂浓度，降低焚烧温度。
- e) 气体再燃烧。在焚烧系统的后燃烧区引入燃料气体燃烧，生成各种类型的CH自由基，使得在主燃烧区生成的NO_x在后燃烧区被还原为N₂分子。

很多情况下，燃料或者空气的分阶段供应可以通过“低氮燃烧器”系统实现。日本Mitsubishi提供的MACT技术包是目前最先进的焚烧控制系统之一，它包括一个污染最小化燃烧器和一个气体再燃装置。

选择性非催化反应（SNCR）

在焚烧炉内注射化学物质，如氨和尿素，在焚烧温度为1800℃至2000℃（750℃~900℃）的区域，NO_x与氨或尿素反应被还原为N₂。尿素分解成为NH₃后参与反应，没有反应完全的NH₃与烟气中的HCl反应生成NH₄Cl，烟气中残留的NH₃一般小于10ppm。

选择性催化反应（SCR）

这是一种后燃烧控制技术。在催化剂作用下，通过注射氨或尿素（NH₃/NO=1:1，摩尔比），使NO_x被催化还原为N₂。催化剂一般为TiO₂-V₂O₅，当温度低于300℃时，催化剂活性不够，而当温度高于450℃时NH₃就会被分解；因此催化反应的温度一般控制300~400℃之间。

几种NO_x控制技术比较

就NO_x的去除效果而言，SCR对NO_x的去除率达到了90%以上，在300~400℃条件下TiO₂-V₂O₅的脱硝率甚至可以达到100%；先进的焚烧控制技术可以达到60~70%的去除率；而SNCR对NO_x的去除率也可达到50%左右。

就成本-

效率分析，SCR和先进的焚烧控制系统（如日本Mitsubishi提供的MACT技术包）基本相当，明显比SNCR技术昂贵。

就副产物和其他污染物而言，SNCR和SCR均产生NH₃污染问题。SCR释放的NH₃（大约10 ppm）要低于SNCR系统

。而且，SCR系统要求对排放出来的烟气（150 左右）进行再次升温（300~400 ），消耗更多的能量，增加CO₂的排放量；最终，当SCR系统的催化剂失活以后就成为了需要进行特殊处理的危险废物。

综合考虑各项脱硝技术的成本和效率，目前在焚烧烟气净化系统中SNCR的应用作为广泛，美国环保局、欧盟均推荐采用SNCR作为固体废物焚烧烟气脱硝工艺。

（3）酸性气体控制技术

用于控制焚烧厂尾气中酸性气体的技术有湿法、半干法及干法等三种脱酸方法。以下分别说明。

湿式洗气法

焚烧尾气处理系统中最常用的湿式洗气塔是对流操作的填料吸收塔，经静电除尘器或布袋除尘器去除颗粒物的尾气降到饱和温度，再与向下流动的碱性溶液不断地在填料空隙及表面接触、反应，使尾气中的污染气体被有效吸收。填料对吸收效率影响很大，要尽量选用耐久性与防腐性好、比表面积大、对空气流动阻力小以及单位体积质量轻和价格便宜的填料。

由于一般的湿式洗气塔采用填料吸收塔的方式设计，故其对粒状物质的去除能力几乎可被忽略。湿式洗气塔的最大优点为酸性气体的去除效率高，对HCl去除率为98%，SO_x去除率为90%以上，并附带有去除高挥发性重金属物质（如汞）的潜力；其缺点为造价较高，用电量及用水量亦较高，此外为避免尾气排放后产生白烟现象需另加装废气再热器，废水亦需加以妥善处理。

干式洗气法

干式洗气法是用压缩空气法将碱性固体粉末（石灰或碳酸氢钠）直接喷入烟管或烟管上某段反应器内，使碱性消石灰粉与酸性废气充分接触和反应，从而去除酸性气体。为了提高反应速率，实际碱性固体的用量约为反应需求量的3~4倍，固体停留时间至少需1s以上。

干式洗气塔结合布袋除尘器组成的干式洗气工艺是尾气净化系统中较为常见的组合工艺，设备简单，维修容易，造价便宜，消石灰输送管线不易阻塞，但由于固体与气体的接触时间有限且传质效果不佳，常须超量加药，药剂的消耗量大，同其他两种方法相比，干法的整体去除效率也较低，产生的反应物及未反应物量亦较多，最终需要妥善处置。

半干式洗气法

半干式洗气塔实际上是一个喷雾干燥系统，利用高效雾化器将消石灰浆液从塔底向上或从塔顶向下喷入喷雾干燥塔中。尾气与喷入的石灰浆成同向流或逆向流的方式充分接触，并产生酸碱中和反应。

由于雾化效果佳（液滴的直径可低至30 μm左右），气、液接触面大，不仅可以有效降低气体的温度，中和酸性气体，并且石灰浆中的水分可在喷雾干燥塔内完全蒸发，不产生废水。这种系统最主要的设备为雾化器，目前使用的雾化器为旋转雾化器及双流体喷嘴。

半干式洗气法的典型流程包含一个冷却气体及中和酸性气体的喷雾干燥塔及除尘用的布袋除尘器室。气体的停留时间为10~15s。单独使用石灰浆时对酸性气体去除效率约在90%左右，但利用反应药剂（石灰乳）在布袋除尘器滤布表面进行的二次反应，可提高整个系统对酸性气体的去除效率（HCl：98%；SO₂：90%以上）。

本法最大的特性是结合了干式法与湿式法的优点，构造简单，投资低，压差小，能源消耗少，液体使用量远较湿系统低；较干式法的去除效率高，也免除了湿式法产生经过多废水的问题；操作温度高于气体饱和温度，尾气不产生雾状水蒸汽团。但是喷嘴易堵塞，塔内壁容易为固体化学物质附着及堆积，设计和操作中要很好控制加水量。

目前，喷雾干燥塔结合布袋除尘器的脱酸除尘组合工艺是国内外最为广泛采用的工艺技术，美国环保局和欧盟均推荐采用此脱酸除尘工艺。

（4）重金属控制技术

焚烧厂排放尾气中重金属浓度的高低，与废物组成、性质、重金属存在形式、焚烧炉的操作及空气污染控制方式等

有密切关系。烟气中重金属主要以气态或吸附态形式存在。

气化温度较高的重金属及其化合物在烟气处理系统降温过程中凝结成粒状物质，然后被除尘设备收集去除；气化温度较低的重金属元素无法充分凝结，但飞灰表面的催化作用可能使其转化成气化温度较高、较易凝结的金属氧化物或氯化物，从而被除尘设备收集去除；仍以气态存在的重金属物质，将被吸附于飞灰上或被喷入的活性炭粉末吸附而被除尘设备一并收集去除。

活性炭粉末不仅可以吸附烟气中呈气态的重金属元素及其化合物，而且可以吸附一部分布袋除尘器无法捕集的超细粉尘以及吸附在这些粉尘上的重金属而被除尘设备一并收集去除。但是，挥发性较高的铅、镉和汞等少数重金属则不易被完全去除。

工厂已有的运行结果表明：布袋除尘器与半干式洗气塔并用时，除了汞之外，对其它重金属的去除效果均非常好，且进入除尘器的尾气温度愈低，去除效果愈好。

但为了维持布袋除尘器的正常操作，废气温度不得降至露点以下，以免引起酸雾凝结，造成滤袋腐蚀，或因水汽凝结而使整个滤袋阻塞。

汞由于其饱和蒸气压较高，不易凝结，只能靠布袋上的飞灰层对气态汞的吸附作用而去除一部分，其净化效果与尾气中飞灰含量及布袋中飞灰层厚度有直接关系。

为了进一步降低汞的排放浓度，在半干法工艺中于布袋除尘器前喷入活性炭粉末或于尾气处理流程末端使用活性炭滤床加强对汞的吸附作用，或在布袋除尘器前喷入能与汞反应的化学药剂，如喷入Na₂S粉末，使其与汞作用生成HgS颗粒而被除尘系统去除，可达到50%~70%的去除效果。

由于活性炭吸附结合布袋除尘器除尘的组合技术可以起到很好的重金属去除作用，1995年美国环保局把它作为重金属控制的首选技术列入新建焚烧炉烟气排放标准之中。

（5）二噁英类控制技术

控制焚烧厂烟气中二噁英类的排放，可从控制来源、减少炉内形成、避免炉外低温区再合成以及提高尾气净化效率四个方面着手。

1) 控制来源。避免含二噁英类物质（如多氯联苯）以及含有机氯（PVC）高的废物（如医疗废物、农用地膜）进入焚烧炉。

2) 减少炉内合成。通常采用的是“3T+E”工艺，即焚烧温度850℃；停留时间2.0秒；保持充分的气固湍动程度；以及过量的空气量，使烟气中O₂的浓度处于6~11%。

3) 减少炉外低温再合成。炉外低温再合成现象多发生在锅炉内（尤其在节热器的部位）以及粒状污染物控制设备之前。

已有研究指出，二噁英炉外低温再合成的最佳温度区间为200℃~400℃，主要生成机制为铜或铁的化合物在飞灰的表面催化了二噁英类的前驱体物质（如苯、氯苯、酚类、烃类等）而合成二噁英类。

在工程上采取各种措施减少二噁英的炉外再次合成，如减少烟气在200℃~400℃之间的停留时间，改善焚烧工艺减少生成二噁英的前驱体物质，减少飞灰在设备内表面的沉积从而减少二噁英生成所需要的催化剂载体，等等。

4) 提高尾气净化效率。二噁英主要以颗粒状态存在于烟气中或者吸附在飞灰颗粒上，因此为了降低烟气中二噁英的排放量，就必须严格控制粉尘的排放量。

布袋除尘器对1μm以上粉尘的去除效率达到99%以上，但是对超细粉尘的去除效果不是十分理想，但活性炭粉末的强吸附能力可以弥补这项缺陷，通过喷射活性炭粉末加强对超细粉尘及其吸附的二噁英的捕集效率。

生活垃圾焚烧烟气系统由除尘、除酸、除二噁英和重金属等各独立单元优化组合而成。组合的原则和目的，是使整个烟气处理系统能有效的、最大化地处理去除存在于烟气中的各种污染物，并在经济可行。

目前世界上垃圾焚烧采用的烟气净化工艺有总计408种不同的组合体系，但在发达国家常用的是下列五种典型工艺：

- 1) “半干法除酸+活性炭喷射吸附二噁英+布袋除尘”工艺；
- 2) “SNCR脱硝+半干法除酸+活性炭喷射吸附二噁英+布袋除尘”工艺；
- 3) “半干法除酸+活性炭粉末喷射吸附二噁英+布袋除尘+SCR脱硝”工艺；
- 4) “半干法除酸+活性炭粉末喷射吸附二噁英+布袋除尘+湿法除酸+SCR脱硝”工艺；
- 5) “半干法除酸+活性炭粉末喷射吸附二噁英+布袋除尘+湿法除酸+活性炭床除二噁英”工艺。

上述各种烟气处理工艺分别适于不同的烟气污染物排放标准的要求，第一种组合工艺目前在世界上应用较广（2001年占75%），适应我国烟气污染物排放标准的要求，且烟尘和二噁英可分别达到欧盟1992和欧盟2000标准的要求。欧洲对SO₂、NO₂等酸性气体排放要求较高，所以近年来增加了湿法除酸和选择性催化脱硝装置。

研究和实践均表明，“3T+E”工艺+活性炭喷射+布袋除尘器是去除烟气中二噁英类物质的有效途径，“3T+E”焚烧工艺+SNCR脱硝+半干法脱酸+布袋除尘器除尘+活性炭喷射”的组合技术为目前最优化的烟气污染控制技术，可以同时满足脱氮、脱酸、除尘、去除重金属和二噁英的要求，实现烟气净化的目的。该组合工艺与美国环保局1995年推荐的组合工艺是完全一致的。

我国大型生活垃圾焚烧烟气净化系统基本上采用“半干法脱酸+活性炭喷射吸附二噁英+布袋除尘器除尘”的烟气组合处理工艺，其特点是仅可以达到较高的净化效率，而且具有投资和运行费用低、流程简单、不产生废水等优点。在国内应用的半干法烟气脱酸工艺主要有以下三种技术：

- 喷雾干燥法烟气净化技术；
- 循环悬浮法烟气净化技术；
- 多组分有毒废气治理技术（MHGT）。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/148961.html>