

垃圾焚烧技术*

Zuojin Zhu^a

(zuojin@ustc.edu.cn)

^a Faculty of Engineering Science, University of Science and Technology of China,
Hefei, 230026, China

2015 年 9 月 24 日

*Edited by Dr. Zuojin Zhu at <http://www.ustc.edu.cn/>.

目 录

1 垃圾焚烧原理	3
1.1 垃圾来源和分类	3
1.2 垃圾特点和性质	3
1.3 垃圾焚烧原理	4
1.4 烟气、飞灰和炉渣	6
1.5 焚烧垃圾工艺流程	10
1.6 垃圾焚烧工艺的主要系统	12
2 垃圾焚烧设备	14
2.1 焚烧炉的类型和原理	14
2.1.1 固定炉排焚烧炉	14
2.1.2 机械炉排焚烧炉	15
2.1.3 流化床焚烧炉	18
2.1.4 回转窑焚烧炉	18
2.2 机械炉排焚烧炉燃烧设备	21
2.2.1 机械炉排	21
2.2.2 附属设备	24
2.2.3 烟气净化工艺技术	24
3 索 引	30

本章主要含垃圾焚烧原理、垃圾焚烧设备两个小节，大部分内容摘自文献第九章 [1]，差别仅仅体现在描述方式。

§1 垃圾焚烧原理

§1.1 垃圾来源和分类

在生产、生活中，会产生污染环境的固、液和气三态废弃物，其中的固态废弃物，称为垃圾。垃圾可能是有机的，也可能是无机的，可简单地分为危险的和非危险的两类。但是，按照垃圾的来源，则可分成三类：城市生活垃圾；工业固体垃圾；危险垃圾。**城市生活垃圾**是城市居民日常生活中产生的固体废物，主要包括废纸、费塑料、废织物；废木制品、废金属制品、废食物；废砖瓦、废玻璃、废陶瓷等。这些废物的特点是成分复杂，有机物含量高。垃圾的主要影响因素，包括生活水平，习惯和气候等。

工业固体垃圾是生产过程中排出的废渣、粉尘、固体废弃物，如冶金工业固体废物，金属冶炼产生的废渣；能源动力工业废物，燃煤电站的粉煤灰，炉渣，采煤洗煤产生的煤矸石；石油化学工业废物，石油工业的油泥、焦油页岩渣，硫铁矿渣，酸渣碱渣，盐泥等；矿业固体废物，采矿废石，尾矿；轻工业固体废物，包括食品、造纸、印刷、纺织印染、皮革、塑料等加工中的污泥、动物残物、废酸、废碱等；其它工业固体废物，包括机械加工中的金属碎霄、电镀污泥和气体废渣等。

危险垃圾是各种化学生物的危险品、易燃易爆物、放射性固体废物，及其它对人体和动物的生命有危险的垃圾。危险垃圾，主要来源于医院、生物制品厂、科研单位等。

§1.2 垃圾特点和性质

垃圾的特点，是产量增长速度快，成分变化较快，和经济价值偏低。因商品的生产量和消费量，与时俱进，导致城市垃圾产量，迅速提高。比如，中国大陆城市垃圾的产量总体，据统计，1990年约6900万吨，1995年约1亿吨，平均增长率大约为62 万吨。垃圾成分本身就复杂，不同地区经济发展水平不同，居民日用燃料种类的变化，也造成垃圾成分的变化。燃煤锅炉变成燃气锅炉，家用燃煤炉变成燃气灶，使炉灰减少。商品包装材料的改变，增加了垃圾中废纸、废塑料、废玻璃和废金属的成分。

城市垃圾的总体情况是，无机成分多($\approx 2.5 : 1$)，不可燃烧的成分远大于可燃烧的成分($\approx 20 : 1$)，构成垃圾经济价值偏低的主要原因。当然，垃圾的经济价值，与地区的经济发展水平有关。通常，经济发达的地区，垃圾中有机成分多一些。

垃圾有物理、化学、生物和感观方面的性质，其中**化学性质**，对垃圾的回收处理很重要。垃圾的化学性质有含水量、挥发分、灰分、元素组成和热值等。含水量，是指用烘箱在 110°C 排出的单位质量垃圾中的水分。若垃圾的含水量大，就不容易点燃。城市生活垃圾的含水量，约为45%，其偏差也大，有时可达到30%。

挥发分，是指在温度约为 600°C 的情况下，完全燃烧烘干的垃圾的损失量，是垃圾的可燃成分指标。**灰分**，是指除去水分、挥发分的垃圾残留部分，是垃圾中不可燃烧的物质，主要是垃圾的无机成分。**元素组成**，是垃圾中的元素，如C、H、O、S、N等的含量。它是垃圾的特性参数，对垃圾回收处理也很重要。通过元素组成，可估算垃圾的热值，也可估算垃圾堆肥的生化需氧量。

热值，是指完全燃烧单位质量垃圾释放的热量，它是衡量垃圾作为燃料的指标。要维持垃圾焚烧，要求燃烧释热足以把垃圾加热到燃点，足以提供燃烧所需的活化能，否则就需要有辅助燃料。垃圾有高位热值和低位热值。**高位热值**，是指完全燃烧单位质量垃圾，冷却燃烧产物，使其中的水蒸气变为 0°C 时，所释放的热量；**低位热值**，则对应于把产物中的水蒸气变成 20°C 时，完全燃烧单位质量垃圾的释热。经验表明，若垃圾的低位热值高于**自然临界值** 3350kJ/kg (800cal/kg)，垃圾自燃烧容易，就可不必加**辅助燃料**。

表 1 城市垃圾热值及元素分析典型值

成分	惰性残留物(燃烧后)			质量分数				
	范围(%)	典型值(%)	Q_{net} (kJ/kg)	碳	氢	氧	氮	硫
食品垃圾	2~8	5	4650	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4
废纸	4~8	6	16750	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2
废纸板	3~3	5	16300	44	5.9	44.6	0.3	0.2
废塑料	6~20	10	32570	60.0	7.2	22.8	—	—
破布	2~4	2.5	7450	55.0	6.6	31.2	4.6	0.16
废橡胶	8~20	10	3260	78.0	10.0	—	2.0	—
废皮革	8~20	10	7450	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4
园林废物	2~6	4.5	6510	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3
废木料	0.6~2	1.5	18610	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1
碎玻璃	96~99	98	140					
罐头盒	90~99	98	700					
非铁金属	90~99	96						
铁金属	94~99	98	700					
炉灰、灰土、砖	60~80	70	6980	26.3	3.0	2.0	0.4	0.2
城市垃圾			10470					

垃圾的热值，通常用氧弹量热计测量。热值估算，基于元素分析的方法是

$$Q_{gr} = 81C + 300H - 26(O - S) \quad (1)$$

$$Q_{net} = Q_{gr} - 6(W + 9H) \quad (2)$$

其中 Q_{gr} 、 Q_{net} 分别是高位热值和低位热值，C, H, O, S是垃圾中碳、氢、氧、硫的质量分数，W是新鲜垃圾的含水率。城市垃圾中各种成分的热值，列于表 1中。

§1.3 垃圾焚烧原理

焚烧，是一种垃圾热处理方法，在回收垃圾热值的同时，也把垃圾变为惰性残渣。垃圾热值可用于供热、供汽，甚至发电。垃圾残渣只占垃圾原量的5%~20%，有毒有害物质经燃烧被破坏。因此，垃圾焚烧，是一种改善生态环境的热能工程，相关技术值得注意和开展研究。

垃圾焚烧，顾名思义，是指垃圾的燃烧。燃烧过程比较复杂，涉及热分解，熔融，热质传递，化学反应和流体流动。依垃圾种类的不同，焚烧可分为蒸发燃烧、分解燃烧和表面燃烧。若像蜡烛燃烧那样，垃圾先受热融化为液体，再蒸发为可燃蒸汽在空气中发生的混合扩散燃烧，就称为蒸发燃烧。若像木材燃烧那样，垃圾着火前受热分解，逸出可燃挥发分，在空气中发生混合扩散燃烧，留下固定碳和惰性物质，表面的固定碳与空气接触发生表面燃烧，这种过程就称为分解燃烧。而像木炭之类的固体燃料那样，受热不融化、不蒸发、不分解，在固体表面与空气发生的反应，则称为表面燃烧。

垃圾中有机成分多，相应的焚烧是蒸发、分解和表面燃烧的综合过程。垃圾，特别是城市垃圾，含水量明显高于其它燃料。为更清楚地理解垃圾焚烧，把焚烧过程分为干燥、热分解、燃烧三个阶段，虽然三个阶段界线模糊，但出现的时间段，的确有所不同。**干燥垃圾**，即烘烤垃圾，利用热能排除垃圾中的水分。因垃圾的含水率较高，送入焚烧炉前，有些可达30%以上，因此干燥垃圾要消耗较多的热能。若垃圾含水量大，则相应的干燥时间就长。垃圾含水率过高，则会降低炉温，影响着火，需补助燃料助燃，以提高炉温，改善垃圾着火条件。**热分解**，是指在高温下垃圾中有机可燃物的分解或聚合反应过程。反应产物有各种烃类、固定碳、不完全燃烧物等。一般情况下，垃圾的可燃物，元

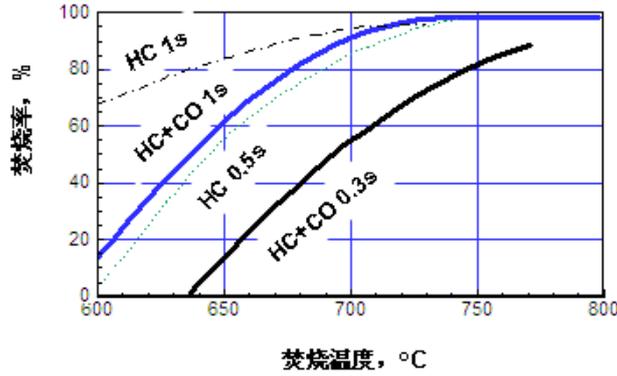


图 1 燃烧温度、燃烧率和停留时间的关系

素组成中有C、H、O、Cl、S、N等。热分解反应，可能是吸热的，也可能是放热的。热分解速率 k ，可用阿累尼乌斯公式表示

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

其中 A 是频率因子，而 E_a 是可燃物活化能，单位 J/mol； R 是气体常数，单位 J/(mol·K)； T 是热力学温度，单位 K。速率公式表明，在热分解温度相同的情况下，活化能小的可燃物，分解速率大。热、质传递的速率，对热分解影响明显，而热量传递速率的影响较大。

燃烧，是指在空气中垃圾中有机物的氧化反应。垃圾焚烧，过程很复杂。经过干燥、热分解，产生不同的气、固可燃物，与空气混合，当着火条件满足时，就可形成火焰发生燃烧。垃圾的着火点温度，取决于垃圾有机物的组分。垃圾焚烧，是气相燃烧和非均相燃烧的混合，比气、液燃料燃烧更复杂。垃圾燃烧，有完全的，也有不完全的。若最终产物是 CO_2 和 H_2O ，则是完全燃烧；若产物是 CO 或其它可燃有机物，则是不完全燃烧。固态可燃物着火点温度，大约是 600°C 。若氧气供应充分，则可提高垃圾焚烧的完全度。若垃圾本身的热值相当低，则需辅助燃料维持燃烧。

通常，垃圾焚烧是不完全的，尽管焚烧炉的设计和操作的目標，是实现垃圾的完全燃烧。垃圾焚烧，对焚烧炉有基本工艺条件，涉及垃圾性质和操作过程。操作过程的条件参数有焚烧温度、停留时间、混合强度和过量空气系数，简称控制参数。在垃圾性质中，热值是影响焚烧的主要因素。当热值大于临界值时，垃圾就具备自行焚烧的条件，无需辅助燃料来维持燃烧。热值大，焚烧就容易，效果就好。在多数情况下，热值偏小，需要用辅助燃料，来维持垃圾炉内的燃烧。辅助燃料的补加量，要根据焚烧炉的热平衡进行估算。垃圾的形状和物理性质，对垃圾预处理、炉内燃烧设备、炉型选择很重要。垃圾尺寸小，单位体积的比表面积大，与氧气接触面积就大，焚烧完全度就高。因此，送焚烧炉之前，对垃圾进行粉碎预处理，可改善焚烧效果。

焚烧温度，是指垃圾有害组分的高温氧化、分解直至破坏所需要达到的温度，是垃圾焚烧所能达到的最高温度，远高于垃圾的着火点温度，是焚烧炉设计和选材的重要依据。通常，提高焚烧温度，有利于垃圾有害组分的分解破坏，也有利于抑制产生黑烟。焚烧炉内近火焰区域，温度最高可达 $800\sim 1000^\circ\text{C}$ 。垃圾热值高，相应的焚烧温度就高。对于大多数有机物，焚烧温度范围是 $800\sim 1100^\circ\text{C}$ ，一般的范围约为 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 。但是，焚烧温度过高，燃料消耗量就大，垃圾中金属挥发量和 NO_x 的生成量就大，产生二次污染。因此，较高的焚烧温度，是不适宜的。焚烧温度与垃圾在炉内的停留时间，关系密切。当焚烧温度高时，垃圾停留时间就短；否则就长。碳氢化合物 (HC) 和 CO 燃烧时，焚烧温度、燃烧率(燃烧完全度)、停留时间的关系，如图 1 所示。

停留时间，是指在焚烧条件下，垃圾中有害组分氧化、分解直至破坏所需的时间。它有双层含义，一是垃圾在焚烧炉内的停留时间，即从垃圾进炉到炉渣排除所需的时间；二是焚烧的烟气在炉内的停留时间，即焚烧垃圾的烟气从逸出到从炉中排除所需的时间。停留时间的长短，直接影响垃

表 2 焚烧炉、锅炉和工业锅炉的过量空气系数

燃烧系统 (燃料)	过量空气系数	燃烧系统 (燃料)	过量空气系数
小型锅炉及工业炉 (天然气)	1.2	大型工业窑炉 (燃油)	1.2~1.5
小型锅炉及工业炉 (燃油)	1.3	固体焚烧窑炉 (垃圾)	1.8~2.5
大型工业锅炉 (天然气)	1.05~1.10	流化床焚烧炉 (垃圾)	1.31~1.5
大型工业锅炉 (燃油)	1.05~1.15	焚烧炉 (废气)	1.31~1.5
大型工业锅炉 (燃煤)	1.2~1.4	焚烧炉 (废油)	1.4~1.7
流化床锅炉 (燃煤)	1.2~1.3		

垃圾焚烧的完全度，是决定焚烧炉容积和尺寸的重要依据。在国家环保总局的GWKB3-2000《生活垃圾焚烧污染控制标准》中，把烟气的停留时间定义为“燃烧气体从最后空气喷射口或燃烧器到换热面(余热锅炉换热器)或烟道冷风引射口之间的停留时间”。

实际操作时，垃圾的停留时间，必须大于干燥、热分解、燃烧所需时间之和。尽管其它条件不变时，延长停留时间，可增加焚烧完全度，但是过长则导致垃圾焚烧处理量减少；过短则使焚烧完全度下降。因此，停留时间应根据具体情况来确定。停留时间的影响因素很多，其中垃圾形状影响明显。当垃圾的尺寸较小时，停留时间就较短。如果焚烧温度维持在800~1000°C，搅拌混合良好，水分易于蒸发，燃烧气体在焚烧炉内的停留时间约为1~2s。

混合强度，是指垃圾逸出的可燃物与助燃空气进行混合的充分程度指标。混合强度大时，垃圾焚烧完全度就大。提高混合强度的关键，在于如何造成垃圾扰动，扰动方式有空气流扰动、机械炉排扰动、流态化扰动、旋转扰动等，效果最好的是流态化扰动。若焚烧炉是机械炉排型的，则要求在炉排上垃圾有运动，以增加垃圾与氧气接触的机会、加速燃烧，控制空气和燃气的流速和流动方向，以促进气体混合。在二次燃烧室内，混合强度取决于空气和可燃气体的相互流动方式和气体流动的湍流度。湍流度表征空气与可燃气体的混合程度。湍流度大，燃烧反应完全度就大。湍流度的影响因素多，加大空气供给量，可提高湍流度，改善热质传递效果，有利于改进垃圾焚烧效果。通常把二次燃烧室内的气流速度控制在范围3~7m/s，可满足焚烧对混合的要求。若气流速度过大，虽然混合得到了强化，但是若气体在二次燃烧室的停留时间过短，则完全燃烧可能性，反而减小。

过量空气系数，是实际空气量与理论空气量的比值。实际空气量，是实际操作中向垃圾焚烧系统供给的空气量，通常大于理论空气量，以确保垃圾焚烧更完全一些。过量空气系数，对垃圾焚烧影响很大，直接关系到焚烧的完全度。提高过量空气系数，增加了炉内的氧气量，也增加了炉内的湍流度，通常有利于垃圾焚烧。但过大可能导致炉温下降，增加空气的输送能量和预热能量；过低，则造成焚烧不完全，甚至出现冒黑烟。因此，实际操作中有必要加强对过量空气系数的控制。工业锅炉、窑炉的过量空气系数，操作运行时要求尽量低于1.5，以确保燃料燃烧的高效率。但是，垃圾焚烧炉主要的目标是确保垃圾焚烧的完全度，过量空气系数通常高于1.5。焚烧炉、锅炉和工业锅炉的过量空气系数，列于表2中。通常，焚烧废液、废气时，过量空气系数取1.2~1.3；但是，焚烧固体垃圾时，要选取较高的过量空气系数1.5~1.9，有时甚至超过2。

§1.4 烟气、飞灰和炉渣

垃圾成分复杂，元素组成主要是C、H、O、N，可能还有S、P、卤族元素、某些重金属元素。垃圾焚烧，产生各种氧化物、卤化物、无机盐等。这些产物的载体，是**烟气**、**飞灰**和**炉渣**，排放控制要严格，以免引起二次污染。烟气中的污染物，主要是烟尘、酸性气体、NO_x、CO、有机氯化物等。烟气中污染物的含量，取决于垃圾组成、焚烧方式和烟气处理设备。垃圾炉的烟气，与其它工业锅炉的烟气相比，组成上差别较大。垃圾炉的烟气，HCl和O₂的浓度高，烟尘中氯化物和硫酸盐的含量高。垃圾炉烟气与其它工业锅炉烟气的组成，如表3所示。

表 3 垃圾炉烟气和其它工业锅炉烟气的组成

燃料	烟尘 (mg/m ³)	NO _x (mg/L)	SO ₂ (mg/L)	HCl (mg/L)	H ₂ O (mg/L)	温度 (°C)
城市垃圾(除尘前)	2000~5000	90~150	20~80	200~800	15~30	250~300
城市垃圾(除尘后)	2~100	90~150	20~80	200~800	15~30	200~250
天然气、石油气	~10	50~100	0	0	5~10	250~400
低硫重油	50~100	100	100~300	0	5~10	270~400
高硫重油	100~500	100~500	500~1500	0	5~10	270~400
炭	100~25000	100~1000	500~3000	~30	5~10	270~400

飞灰，即垃圾炉烟气中的烟尘，大致有三类：不可燃物质，无机盐类，碳粒和煤烟微粒。垃圾的不可燃物质，一部分形成焚烧炉残留灰渣，另一部分则是烟气的飞灰。飞灰的比例依赖于焚烧炉的操作条件，粒径通常大于10 μ m。有一部分无机盐类，在炉内高温下气化进入烟气，在炉外受冷却凝聚成颗粒。SO₂在炉外遇到水滴，也能形成雾状颗粒。碳粒和煤烟微粒，是焚烧不完全造成的，粒径范围大约是0.1~10 μ m。这些细微颗粒的去除，有难度。对这些细微颗粒进行控制，最好用高温下的氧化分解。烟气中的烟尘产量，取决于垃圾性质和焚烧方式。对于机械炉排焚烧炉，在标准情况下，炉膛出口烟尘浓度范围通常是1000~6000mg/m³，除尘器入口处烟尘浓度1000~4000mg/m³。换算成垃圾处理量表示的烟尘产量是，5.5~22 kg/t。烟尘的粒径分布很宽，细微烟尘所占份额偏大，通常30 μ m以下的烟尘份额可达50%~60%。

酸性气体，主要有SO₂、HCl和HF。这些污染环境的酸性气体，是由垃圾中的元素S、Cl、F通过焚烧反应，直接形成的。比如，含Cl的废塑料焚烧，会产生HCl；含F的废塑料焚烧，会产生HF；而焚烧橡胶或其它含硫的垃圾，会产生SO₂。

NO_x，即氮氧化物也是污染环境的。它的成因，一是炉内高温下空气中N₂氧化反应，二是含氮垃圾的焚烧反应。通常，把由前因生成的氮氧化物，叫做热NO_x，而由后因生成的氮氧化物，则称为燃料NO_x，所占份额为70%~80%。二次燃烧的送风位置，对烟气中NO_x的生成量影响很大，经验表明：把送风口安排在燃烧室的后段，可抑制烟气中NO_x的生成。对热NO_x的生成，影响因素有燃烧温度、过量空气系数、垃圾组成、火焰形状等，其中火焰温度是主要影响因素。若火焰温度高，热NO_x的生成量就大。过量空气系数的影响也不小，当过量空气系数稍大于1时，热NO_x的浓度最大；而当空气不足或过剩时，热NO_x的浓度则较小。热NO_x的生成量在达到最大值后，几乎不随空气量的增加而发生变化。

垃圾燃烧，含挥发分燃烧和固定碳燃烧。因此，燃料NO_x的成因，一是挥发分燃烧时生成的，二是固定碳中的氮转化的。对燃料NO_x，对它生成的主要影响因素是火焰温度和过量空气系数。火焰温度高，过量空气系数大，则燃料NO_x的生成量就大。

垃圾中的重金属物质，在垃圾焚烧之后，一部分残留在炉渣中，另一部分则气化进入烟气。有些重金属物质在炉中发生反应，生成氧化物、氯化物，它们比金属元素本身更容易气化。重金属元素、相应的氧化物、氯化物，以某种平衡存在于烟气中，且因其浓度不同，饱和温度不同，构成的连锁关系复杂。重金属元素挥发份额，与其饱和温度有关，饱和温度高的，容易凝结，残留在炉渣内的份额也就大。例如，Hg、As等蒸汽压，大于7mmHg(~933Pa)，在多数情况下，以蒸气的状态存在。焚烧炉烟气中重金属污染物的来源和存在状态，如表 4所示。

CO，是烟气中的污染物组分，有毒。CO燃烧需要很高的活化能。CO的主要成因，是垃圾的不完全燃烧，原因可能是燃烧温度偏低，或燃烧室容积过小，导致烟气停留时间较短。根据燃烧动力学，氧气含量高，有利于CO的氧化。但是垃圾焚烧炉的烟气中夹杂着碳颗粒，只要反应维持着，就可能继续产生CO。因此，在二次燃烧室的设计时，把燃烧温度、烟气停留时间分别取为1000°C和1s，是比

表 4 焚烧炉烟气中重金属污染物的来源和存在状态

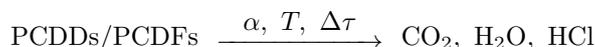
金属名称	来源	沸点(°C)	存在状态
Hg	废温度计、电子元件、电池等	357	气态
As	涂料、玻璃、医药、杀虫剂、除草剂等	615	气态
Cd	废涂料、电池、电镀件、焊料、颜料等	767	气、固态
Pb	染料、蓄电池、涂料、玻璃等	1620	气、固态
Zn	电镀件、镀锌原料等	907	固态
Cr	电镀件、不锈钢、油漆、颜料等	2200	固态
Ni	电镀件、不锈钢、电池、煤、燃油等	2900	固态

较适当的。

毒性有机氯化物,主要是指二噁英类。二噁英,是指多氯代二苯并一对二噁英 (polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs), 它是由两个苯环和两个氧原子结合而成。由于其周围能结合 1~8个Cl原子, 根据Cl原子的个数和置换位置, 可知二噁英总共有75种异构体。多氯代二苯并呋喃 (polychlorinated dibenzo furans, PCDFs) 的性质, 与PCDDs类似, 它是由两个苯环和一个氧原子结合而成。由于其周围同样可结合 1~8个氯原子, 所以总共有135种异构体。PCDDs和PCDFs合起来, 总共210种化合物, 统称为二噁英类 (PCDDs/PCDFs)。图 2 给出了二噁英类的分子结构, 表 5列举了二噁英类的异构体。

二噁英类, 自然界不能自然合成, 而是在垃圾焚烧、燃料燃烧、冶金、造纸、和农药生产过程中, 人工合成的。对于所有的二噁英的生成过程, 焚烧垃圾的二噁英排放量较大。对于所有的二噁英异构体, 毒性强度差别很大, 有17种 (全是2, 3, 7, 8位置被Cl原子置换的), 对人类的健康, 危害巨大。其中2, 3, 7, 8四氯代二苯并一对二噁英 (2, 3, 7, 8-TCDD), 毒性最强, 是氰化钾KCN的10000倍, 危害最大。焚烧垃圾产生二噁英的原因, 有三种: 垃圾本身就含有二噁英类物质, 焚烧时由含氯二噁英前驱物生成, 烟气冷却时发生的再合成。

城市垃圾成分复杂, 在杀虫剂、防腐剂、喷漆等有机溶剂普遍使用的情况下, 使垃圾中难免有二噁英类物质。国外的监测数据显示, 对于家庭垃圾, 二噁英的含量约为 11~255ng/kg, 其中塑胶类成分的含量较高, 可达 370ng/kg。对于工业垃圾和危险垃圾, 二噁英类的含量可能更高。二噁英类的分解温度不高, 约为 750~800°C。若焚烧炉的燃烧状况良好, 燃烧温度足够高, 停留时间足够长, 过量空气系数适当, 垃圾本身所含的二噁英类, 经焚烧大部分可分解,



二噁英前驱物来源有三种, 一是垃圾所含的氯置换基苯环, 如多氯联苯 (PCB)、氯苯 (CB)、氯酚 (CP) 等。二是垃圾所含的有机氯化物, 通过高温反应可产生二噁英的前驱物甚至二噁英本身, 如氯乙烯、四氯乙烷、三氯甲烷等; 垃圾的一些不含氯的有机物, 与垃圾烟气的氯化物NaCl、HCl结合, 生成二噁英前驱物。焚烧垃圾时, 前驱物分子通过重排、自由基缩合、脱氯、和其它反应形成二噁英类。这部分二噁英类在高温燃烧条件下, 大部分可得到分解。三是垃圾炉烟气冷却时发生的再合成 (de novo synthesis)。垃圾不完全燃烧时, 烟气未燃尽的碳氢化合物和碳, 附着烟尘上, 在特定的温度范围 (250~450°C) 内部分氧化成杂环碳氢化合物, 在铜等氧化物的催化下, 发生气固反应, 最终生成二噁英类。

二噁英类, 不仅存在于烟气, 还存在于炉渣、除渣水、余热锅炉积灰、除尘器飞灰。根据德国的监测数据, 表 6 给出了焚烧垃圾各阶段二噁英类的浓度。

焚烧垃圾的灰渣, 一般来说是无机物质, 主要有金属氧化物、氢氧化物、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐、和硅酸盐等。但是, 灰渣所含的大量重金属化合物、二噁英类, 属于环境污染物, 必须妥善处

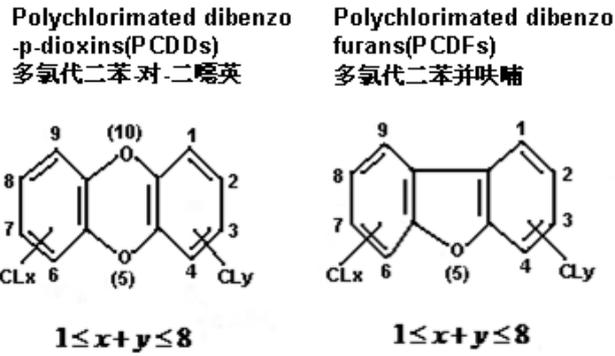


图 2 PCDDs和PCDFs的分子结构

表 5 二噁英类的异构体

氯原子数	名称	二噁英类 (PCDDs)			呋喃类 (PCDFs)		
		化学式	相对分子量	异构体数	化学式	相对分子量	异构体数
1	一氯化物monochloro (M ₁)	C ₁₂ H ₇ ClO ₂	218	2	C ₁₂ H ₇ ClO	202	4
2	一氯化物dichloro (D ₂)	C ₁₂ H ₆ Cl ₂ O ₂	252	10	C ₁₂ H ₆ Cl ₂ O	236	16
3	一氯化物trichloro (T ₃)	C ₁₂ H ₅ Cl ₃ O ₂	286	14	C ₁₂ H ₅ Cl ₃ O	270	18
4	一氯化物tetrachloro (T ₄)	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O ₂	320	22	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O	304	38
5	一氯化物pentachloro (P ₅)	C ₁₂ H ₃ Cl ₅ O ₂	354	14	C ₁₂ H ₃ Cl ₅ O	338	28
6	一氯化物hexachloro (H ₆)	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O ₂	388	10	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O	372	16
7	一氯化物heptachloro (H ₇)	C ₁₂ H ₁ Cl ₇ O ₂	422	2	C ₁₂ H ₁ Cl ₇ O	406	4
8	一氯化物Octachloro (O ₈)	C ₁₂ Cl ₈ O ₂	456	1	C ₁₂ Cl ₈ O	202	1

表 6 焚烧垃圾各阶段二噁英类浓度

采样位置	PCDDs/PCDFs浓度	采样位置	PCDDs/PCDFs浓度
炉膛	0.5~ 6 ng/m ³	未净化的原始烟气	4~ 39 ng/m ³
炉渣	0.6~ 10 ng/kg	电除尘器飞灰	1000~ 28000 ng/kg
混有电除尘器飞灰的炉渣	380~ 830 ng/kg	经除尘后的烟气	2~ 84 ng/m ³
除渣水	1~ 98 ng/L	布袋除尘器飞灰	2000~ 31000 ng/kg
余热锅炉飞灰	100~ 800 ng/kg	净化的烟气	0.2~ 63 ng/m ³

理。灰渣的产量，依赖于垃圾的种类，焚烧炉的类型、焚烧条件。通常，焚烧1吨垃圾，产生炉渣大约 100~150kg，除尘器飞尘约 10kg，而产生的余热锅炉飞灰量也在 10kg左右。炉渣，是垃圾的不可燃组分、可燃物灰分、未燃尽的成分的混合物。不可燃组分中，有垃圾的废玻璃陶瓷、废金属、金属制品、和砖瓦渣土等，可燃物中，有废纸、废塑料、废织物、费木材、和食物残渣等。若焚烧的是收集的湿垃圾，没有对垃圾作分类，则炉渣的产量大约是垃圾重量的 10%~15%；若焚烧的是已经分类的湿垃圾，则炉渣产量大约等于垃圾重量的 5%~10%。炉渣重金属的含量，大约是除尘器飞灰中浓度的 1%~50%。

除尘器飞灰，是钾盐、钠盐、硫酸盐、重金属颗粒物、和不可燃物飞灰的组合，产量大约是湿垃圾重量的 0.5%~1%。飞灰中重金属浓度是：Pb、Zn, 0.3~3%；Cd, 20~40mg/kg；Cr, 200~500mg/kg；Hg, ~110mg/kg。

余热锅炉飞灰，是焚烧炉飞灰中的大颗粒部分，其产量与除尘器飞灰量，基本相当。余热锅炉飞灰中的重金属浓度，介于炉渣和除尘器飞灰之间。

§1.5 焚烧垃圾工艺流程

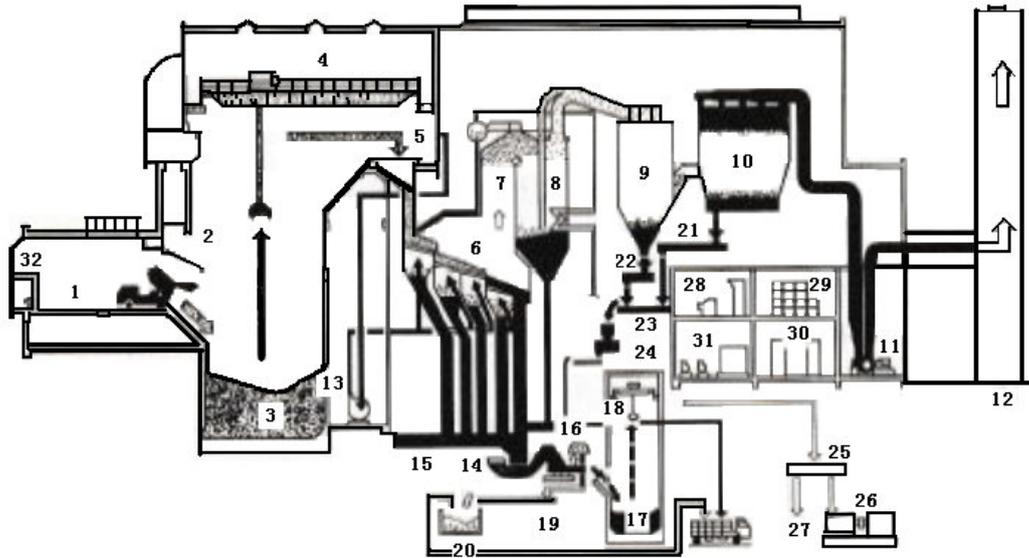
焚烧垃圾的目的，是减少垃圾储量，通过焚烧实现垃圾的无害化，以挖掘垃圾的热能，保护环境。焚烧，消除了垃圾的环境污染物；把垃圾可燃物的化学能，转变为热能。热能的回收是自然资源合理使用的举措；焚烧炉渣、飞灰的无害化，烟气、废水的净化，是减少了环境二次污染的举措。这些举措有益于社会的可持续发展。

对于焚烧垃圾，**工艺方案**确定的目的，是寻求垃圾焚烧完全度高的方式，使工艺流程简单，焚烧设备投资不大，尽量确保有良好的经济社会效益。工艺流程和焚烧炉的结构，主要取决于垃圾种类、辅助燃料的种类、焚烧的特性，也与垃圾焚烧的后处理、余热回收方法有关。因此，要确定效益好符合垃圾焚烧具体情况的工艺，必须对以上提及的各种影响因素，进行充分考虑、仔细分析。

通常，对数量少、可间歇操作的垃圾，相应的工艺流程和焚烧炉应尽可能进行简化设计，余热回收设备可不设置。但对于要连续焚烧的数量大的垃圾，工艺流程和焚烧炉应当用合理化的设计，使炉内温度、烟气停留时间、过量空气系数的设定符合实际情况，必须有余热回收的步骤，以降低垃圾焚烧处理的费用。余热回收的具体方法，有产生蒸汽供发电、提供生产生活用的蒸汽、或对焚烧的空气和垃圾本身进行预热。

对于大型垃圾焚烧厂，通常它的系统主要包括：垃圾前处理；焚烧炉；预热回收；烟气、灰渣、废水处理；助燃空气；自动控制。垃圾焚烧处理的**工艺流程**是：前处理把垃圾送入焚烧炉，垃圾在炉内与助燃空气混合并发生燃烧，释热用余热锅炉回收；焚烧炉烟气经余热锅炉冷却，进入烟气处理系统净化后，在经烟囱排入大气；烟气处理收集的飞灰作专门处理后，炉渣经炉渣处理系统处理后，送填埋场；废水经废水处理系统处理后或再利用、或排入河流；整个工艺流程的运行，由自动控制系统控制。

通常，垃圾的品种、形状差别较大，有块状、颗粒状的，也有糊状的；有可燃物较多的高热值垃圾，也有需辅助燃料才能焚烧的低热值垃圾。因此，对不同的垃圾，在焚烧处理时，为实现焚烧的高



1,卸料平台; 2,卸料门; 3,垃圾储坑; 4,垃圾吊车; 5,进料口; 6,炉排; 7,炉膛; 8,余热锅炉; 9,洗涤塔; 10,袋式除尘器; 11,引风机; 12,烟囱; 13,风机; 14,推灰器; 15,炉渣输送带; 16,筛选机; 17,灰渣储坑; 18,灰渣吊车; 19,床金属输送带; 20,床金属储坑; 21,飞灰输送带; 22,输送带; 23,混合输送带; 24,飞灰加湿器; 25,高压蒸汽联箱; 26,发电机; 27,自用蒸汽; 28,中央控制室; 29,低压配电室; 30,高压配电室; 31,液压室; 32,车辆控制室

图 3 大型机械炉排式垃圾焚烧炉工艺流程图

完全度，所选择的工艺流程和焚烧炉的结构，肯定有所不同。

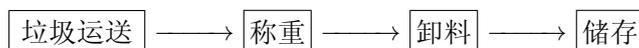
垃圾形态和焚烧方式，是决定焚烧工艺流程和焚烧炉型号的主要依据。若大多数垃圾是形状一定的块状物，是可以放置在炉排上的，且燃烧方式是表面燃烧和分解燃烧，则宜用炉排式焚烧炉及相应的焚烧工艺。而当垃圾颗粒较小时，则宜用炉床式焚烧炉。对于形状一定的垃圾，像废塑料那样，稍微加热未燃烧就发生熔融，则宜用炉床式焚烧炉、或流化床焚烧炉，以免炉排通风缝隙堵塞。**垃圾焚烧炉**，型号有机械炉排、回转窑、流化床三种。对于不同型号的焚烧炉，工艺流程和设备也有所不同。对于大型机械炉排焚烧炉，典型的工艺布置，如图 3 所示，相应的工艺流程简述如下。

运到焚烧厂的垃圾，通过卸料平台 1 的卸料门 2，倾入垃圾储坑 3。焚烧时，垃圾被吊车 4 抓起送入进料口 5，沿进料滑槽落入炉内。然后被饲料器推入炉排 6 预热段。在驱动机构的作用下，机械炉排的机械运动，导致垃圾在炉床上移动、翻搅、混合。移动中的垃圾，先被炉膛 7 的辐射热干燥、气化，再被高温引燃，然后燃尽变炉渣。炉渣被炉渣输送带 15 送至筛选机 16，回收废金属后，送入灰渣储坑 17。垃圾焚烧所用空气，是一次和二次送风。一次风可用蒸汽预热，从炉床底部送入，穿过炉排 6，进入垃圾层参与燃烧；二次风从炉膛 7 上部送入，旨在充分氧化烟气，使炉膛 7 温度不致于过高，否则炉体易损坏，污染物 NO_x 多产。但是，炉膛 7 温度，通常控制在 850°C 以上，旨在避免烟气中有未燃尽的有机物从烟囱 12 逸出，污染环境。当垃圾热值较低时，需要相应的助燃系统，旨在添加辅助燃料，提高炉膛 7 温度、垃圾焚烧完全度。

炉膛 7 出口的高温烟气，先经余热锅炉 8 冷却，在送入洗涤塔 9 除去酸性气体 SO_2 、 HCl 、 HF 等，然后送入袋式除尘器 10 除尘。垃圾焚烧热导致余热锅炉 8 产生的蒸汽，既可驱动汽轮机发电，也可在焚烧厂的蒸汽系统中使用。净化的烟气，在引风机的作用下，进入烟囱 12 而后排出。烟气洗涤塔和袋式除尘器排出的废渣、飞灰，被输送带（21、22、23）送入灰渣储坑 17。

§1.6 垃圾焚烧工艺的主要系统

前处理系统,即垃圾接收和储存系统,负责垃圾焚烧前的运送、称重、卸料、储存。对垃圾进行适当的预处理,可改善焚烧工况,提高焚烧完全度。前处理系统的工艺流程是:

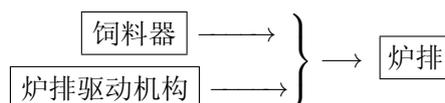


垃圾被运输车送到焚烧厂,经称重后进入卸料平台,经控制系统指定的卸料门把垃圾倾入储坑。大型焚烧厂卸料门多,通常是关闭的,以免垃圾储坑的气体逸出,污染周边环境。垃圾车的卸料和卸料门的开启,宜引入自动控制系统,以确保垃圾储坑堆高相对均匀。垃圾储坑,以储存3~5天的焚烧垃圾量为宜。储坑允许湿垃圾脱水;在储坑中,用吊车抓斗进行搅拌,使垃圾组分均匀化,击脱部分泥沙,以改进焚烧效果。垃圾的储坑停留时间过短,则脱水不充分,焚烧不易;时间过长,垃圾不在脱水,但可燃挥发分逸出太多,也会增加焚烧难度,造成能量损耗。

焚烧系统,是垃圾焚烧的关键部分,焚烧炉是垃圾焚烧的场所,形状和结构直接影响焚烧的完全度。焚烧系统的工艺流程是:

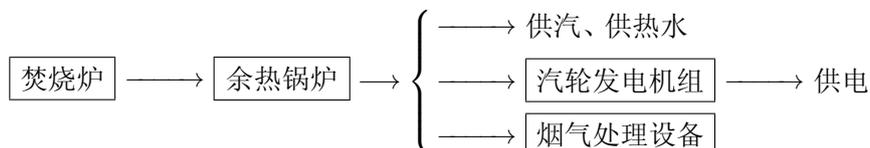


其中饲料器把垃圾送上炉排的预热段,炉排驱动机构造成垃圾的翻转运动,两者与炉排设计和使用效果,都是有着密切关系的:

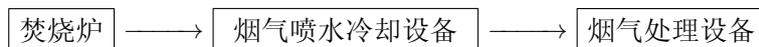


实际上,垃圾焚烧系统与垃圾前处理、余热回收、助燃、烟气处理、灰渣处理、废水处理、流程的自动控制系统,关系密切。垃圾被吊车抓斗送入进料口,沿着进料滑槽滑落,然后被饲料器推入炉排预热段。机械炉排的驱动结构,使垃圾依次通过炉排燃烧段和后燃尽段,变成炉渣后从焚烧炉排出。炉排的运动造成垃圾翻转利于焚烧;炉床上方的炉膛使废气在炉内有足够的停留时间。炉排下方的一次送风,促进了空气与垃圾层的混合;炉床上方的二次送风,提高了废气的搅拌时间。两者都有利于提高焚烧完全度。

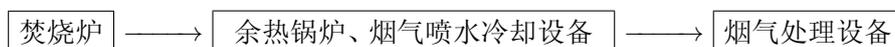
余热回收系统,目的是利用高温烟气的热能。高温烟气不能直接进入烟气处理系统,必须先冷却。在没有设置余热锅炉时,为降低烟气温度,可用喷水冷却,但余热没有得到回收。一般情况下,烟气余热可用于加热助燃空气、或加热水,既简单易行,有普遍有效。通常的方式是设置余热锅炉。大型垃圾焚烧厂的余热回收系统,都有余热锅炉和汽轮机发电设备。有余热锅炉的回收系统,方式也多。一种是用余热锅炉产生蒸汽,驱动汽轮机发电,另一种是向所需单位提供有一定压力和温度的蒸汽、热水。用余热锅炉回收余热的工艺流程是:



对于没有余热锅炉,但采用烟气喷水冷却的垃圾焚烧过程,其烟气冷却的工艺流程是:

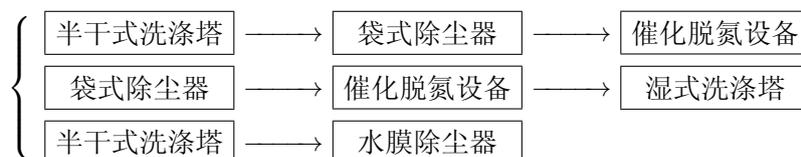


但也有采用余热锅炉和烟气喷水冷却相结合的方式,相应的工艺流程是:



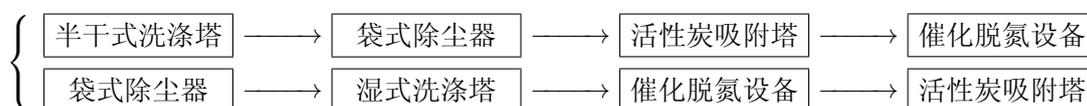
烟气处理系统,主要负责除去烟气中的烟尘、酸性气体、NO_x等有害物质,使烟气排放达标,改善生态环境。对于垃圾焚烧烟气,早期的处理方法,通常是用静电除尘器除去烟尘,再用湿式洗涤塔

除去酸性气体。近年来，大多用干式或半干式洗涤塔除去酸性气体，配合袋式除尘器除去烟尘和重金属，然后用催化脱氮设备除去NO_x。由于不同国家，不同地区，烟气排放标准有所不同，相应的垃圾焚烧烟气处理系统也有差别。通常，烟气处理系统的设备组合是：

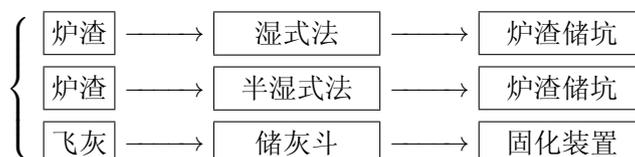


烟气处理，大多用前两种设备组合方式。在烟气排放要求较低的地区，对于小型的垃圾焚烧处理，第三种烟气处理的设备组合，仅供参考。

近年来，二噁英类污染得到普遍关注。垃圾焚烧是二噁英类的主要源头之一。目前，对二噁英类的形成机理，未达成共识，仅通过焚烧参数控制来抑制二噁英类的生成，效果很难确定。目前，除去二噁英类的方法，主要是用活性炭吸附设备和袋式除尘器的组合。这种方法，对重金属和酸性气体的除去，所起作用也良好。例如，用下列的工艺：

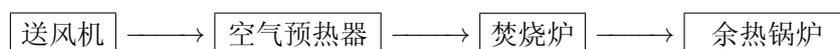


从焚烧炉出渣口排出的炉渣，温度高，需要冷却处理。炉渣冷却装置，通常采用水冷却方式。冷却后的炉渣，用输送机送入炉渣储坑。从静电除尘器、袋式除尘器排出的灰渣，称为飞灰，通常要把飞灰与焚烧炉出口的炉渣作分开处理，因为飞灰的重金属和二噁英类含量较多。一般的做法，是把飞灰当作危险品，固化后送填埋场处置。焚烧垃圾的炉渣，早期的处理方式是，当作一般废弃物，送填埋场。



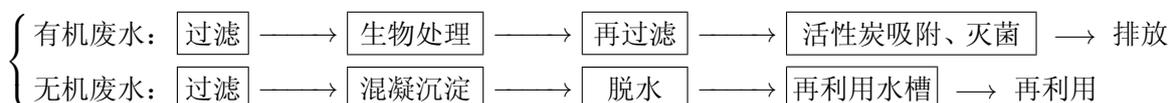
现在，随着环保要求的提高，炉渣的重金属污染问题，已经不能忽视，炉渣的固化和熔融成为目前处理炉渣的有效途径。新的炉渣处理方法，有待进一步探索。

助燃空气系统，负责垃圾正常焚烧所需的氧气。助燃送风的温度和风量，对焚烧完全度、炉膛温度、烟气污染物的含量，有直接影响。助燃空气系统的一般工艺流程是：

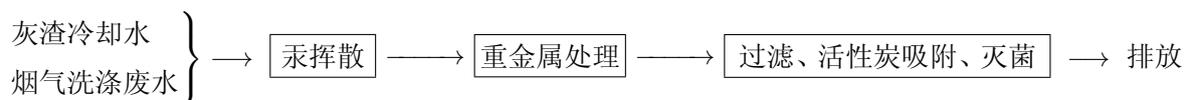


系统有一次、二次送风机。通常，一次风机从垃圾储坑上方抽取空气，经空气预热器加热，空气从炉排下方进入焚烧炉。二次风机从垃圾储坑上方、或厂房内抽取空气，经余热后，送入焚烧炉炉膛。焚烧炉的烟气和过量的空气，先进入余热回收系统，再进入烟气处理系统，最后从烟囱排出。

废水处理系统，负责处理垃圾焚烧过程中产生的废水，主要有垃圾渗沥水、洗车废水、洗地面和卸料平台废水、锅炉排污水、灰渣处理烟气洗涤废水、实验室废水、生活废水等。不同的废水，污染物含量不同，宜用不同的方法处理。按照污染物的种类划分，废水可分为有机、无机的两类，相应的处理方法和流程，也有所不同。尽管废水处理方法很多，废水处理工艺也有差别，但它们都是由几个物理、化学、生物处理单元组成。常用的废水处理工艺流程是：



对于灰渣冷却水、烟气洗涤废水，重金属含量较高，在相应的废水处理工艺流程中，应有重金属脱除的环节。对于这类废水，通常相应的工艺流程是：



经废水处理系统排除污染后，达到排放标准的废水，既可排入城市污水管网，也可重新回收利用。

自动控制系统，负责垃圾焚烧厂的安全、稳定、高效运作，减轻相应的操作工的劳动强度。对于可大量处理垃圾、回收余热的焚烧厂，设置自动控制系统是重要而明智的举措。

垃圾焚烧厂的自动控制系统，有三个发展阶段。在早期，由于把垃圾焚烧炉当作几个系统的组合，这几个系统包括焚烧系统、余热回收系统、助燃系统等，自动控制技术，主要应用在这些单独系统的自动化方面，如垃圾焚烧状态的视屏监视，各种设备通电状况的显示。在早期阶段，自动控制系统具有分散性、独立性。此后，为了提高焚烧设备的自动化管理水平，开发了垃圾焚烧炉的自动化燃烧系统，实现了供料、焚烧的自动化管理。另外，垃圾接收、灰渣输送、称重、吊车等相关设备，也应用了自动化技术。

随着计算机技术的发展，目前垃圾焚烧炉的运行，实现了日常操作的自动化，一些非日常操作，也实现了自动化，比如自动开启、关闭焚烧炉、汽轮机、烟气处理设备等。垃圾焚烧自动化的技术应用，大致在三个方面：设备运行所需的数据处理自动化，垃圾、灰渣运输车辆管理的自动化，设备运行操作的自动化。大型垃圾焚烧厂，通常用集散型计算机控制，中央控制室的主机，负责系统的集中监控；专用的计算机，负责对称重、车辆、吊车、燃烧等系统的分散控制，对全厂不稳定性的分散控制，以确保整个系统控制的可靠性。功能分散，有利于自动化系统的维护和改进。

§2 垃圾焚烧设备

垃圾焚烧系统，从广义上讲，是包括垃圾前处理、焚烧炉、烟气处理的整个垃圾焚烧厂。但是，在这里，所描述的焚烧系统，是指一个工艺过程，涉及垃圾吊车的进料，炉膛内垃圾焚烧，出渣，烟气处理和助燃系统的运行。

§2.1 焚烧炉的类型和原理

焚烧炉，作为垃圾焚烧的主要设备，作用是焚烧垃圾释放垃圾的热能，把垃圾变成炉渣和烟气，减小垃圾对环境的冲击。焚烧炉，可根据垃圾的特性、日处理量、余热回收方式、烟气冷却方式、净化方式进行分类。焚烧炉类型多，但原理基本相同。炉的结构，与垃圾的种类、性质和焚烧方式有关。通常，根据垃圾的危害性大小，把焚烧炉分成三类：城市垃圾焚烧炉；工业垃圾焚烧炉；危险垃圾焚烧炉。按照垃圾炉的炉型，焚烧炉可分为固定炉排炉、机械炉排炉、流化床炉、回转窑炉等。

§2.1.1 固定炉排焚烧炉

图 4 显示的固定炉排焚烧炉，是把垃圾放在固定的炉排上焚烧的炉子。垃圾从炉排的上方放入，尽量均匀地平铺在炉排上。炉排下方是灰坑，可兼作通风室。为提高垃圾焚烧完全度，焚烧时，要翻动垃圾，促进搅拌、混合，减少熔融。燃尽的炉渣从炉排落入灰坑。

图 4 所示的炉子，炉排是水平固定的。炉排也可以是倾斜固定、圆弧曲面固定的。有些焚烧炉中，在倾斜炉排后还布置水平炉排，增加炉排的倾斜段，可使垃圾有一个干燥段，适合焚烧含水量大的垃圾。

固定炉排焚烧炉，结构简单，造价低廉，但只能手工操作、间歇运行。炉膛温度不易控制，焚烧效率低，拨火不充分会引起焚烧不完全。此类焚烧炉，只适合小量易燃垃圾的焚烧。

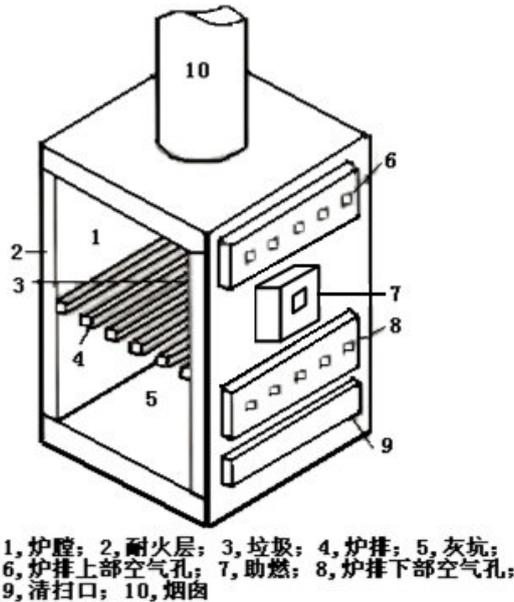


图 4 固定炉排焚烧炉

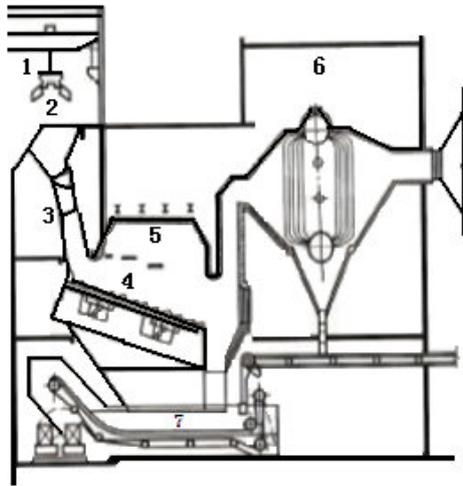
§2.1.2 机械炉排焚烧炉

发展历史最长、应用最广的，是**机械炉排焚烧炉**。这种炉的活动式炉排，有助于焚烧垃圾操作的连续和自动化。图 5 显示了一种典型的机械炉排焚烧炉，炉中设置了一系列炉排片组成的机械炉排。吊车1抓斗2等填料设备把垃圾送入焚烧炉后，受机械炉排往复运动的影响，导向炉排并随之移动。在炉排下方送入的一次风和炉排运动的影响下，垃圾在炉排上向前移动的过程中，被干燥，并被点燃、焚烧。燃尽后形成的灰渣，从炉排尾部落入灰斗。从原则上讲，炉排移动速度的选择，应当确保垃圾在抵达炉排尾部时能够完全燃尽，形成灰渣。炉排上垃圾焚烧所产生的烟气，上升而进入炉膛，并与炉排上方送入的二次风搅拌、混合、完全燃烧。随后，高温烟气被导入余热锅炉，进行余热回收。

机械炉排焚烧炉的**炉排**，形式多样。主要有并列摇动式、往复阶梯式、逆动式、履带式、滚筒式。许多炉排，已是国外企业的专利。机械炉排和炉膛是焚烧炉的关键设备，炉排的构造和性能，炉膛的构造，决定了焚烧炉的性能和焚烧完全度。为确保垃圾焚烧有好的效果，炉排和炉膛的性能要求是：

- (1) 炉排面积要适当，要为垃圾的干燥、燃烧提供足够大的面积；面积过小，火层厚度大，阻碍通风，造成燃烧完全度下降。
- (2) 炉排要有移动、搅拌垃圾的良好功能，以有效地干燥垃圾，达到增加垃圾与氧气的接触机会，提高垃圾焚烧速度，强化烟气与空气混合的目的。
- (3) 炉膛的结构形状，要与垃圾种类和焚烧方式相匹配，要适合二次风与烟气的充分混合；炉膛材料要耐高温、耐腐蚀，也要防止烟气泄露。炉膛温度要适当，过高，则NO_x生成量增加。

通常，机械炉排可分为三个部分，**干燥段**，**燃烧段**，**燃尽段**，如图 6 所示。向炉排各段供应的气量、炉排移动的速度，可调节。在干燥段，负责垃圾的干燥，机理涉及炉膛壁面（侧壁和炉顶）、火焰的辐射热干燥，炉排下方的高温空气的热对流干燥；高温烟气的热对流干燥；垃圾部分组分燃烧释热的干燥。通过炉膛壁面和炉内火焰对垃圾的热辐射干燥，可使部分垃圾表面发生燃烧。干燥垃圾的着火点温度，一般情况下约为 200°C。若从炉排下方送入的助燃空气，经预热温度超过这个垃圾着火点，干燥的垃圾就可着火发生燃烧。在炉排干燥段，垃圾的停留时间约为30min，经干燥段下方送入炉内的一次风量，大约是一次风总量的 15%。



1, 垃圾吊车; 2, 抓斗; 3, 进料滑槽; 4, 机械炉排; 5, 炉膛; 6, 余热锅炉; 7, 出渣机

图 5 机械炉排焚烧炉典型结构

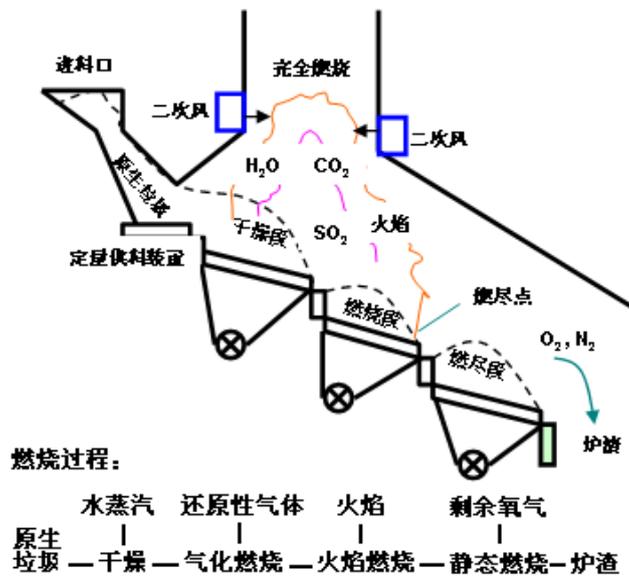


图 6 机械炉排焚烧炉燃烧过程

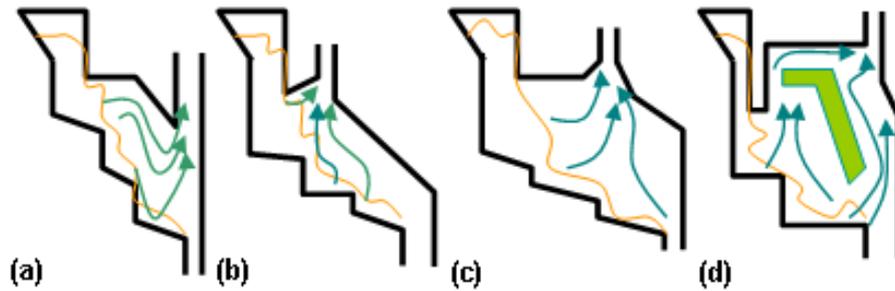


图 7 垃圾焚烧炉炉膛类型, (a)顺流式; (b)逆流式; (c)交流式; (d)复流式

在燃烧段,垃圾发生燃烧并形成火焰。燃烧段与燃尽段的界线,称为**燃烧终了点**。这个终了点要尽量保持不变,为此,炉排的运动速度要根据垃圾的性质,作适当调节。垃圾在燃烧段的停留时间,大约也是30min,但从炉排燃烧段送入的一次风量,却占一次风总量的60%~80%。垃圾的供给、搅拌混合、一次风在炉排的干燥、燃烧、燃尽段的风量分配,对垃圾焚烧完全度影响明显。一次风易从阻力小的缝隙流入焚烧炉。在空气流入过多的地方,会出现“火口”,造成垃圾熔融,甚至炉排烧损。炉排设计时,应考虑送风阻力对垃圾焚烧的影响,尽量避免火口效应。

在燃尽段,固定碳和燃烧炉渣中未燃尽的部分,逐渐完全燃烧。一般情况下,垃圾在燃尽段的停留时间,大约我60min。若燃尽段停留时间充裕,则炉渣的热灼减率可降低到1%~2%。炉渣的**热灼减率**,定义为经热灼减而减少的质量占原炉渣的百分数。

炉膛形状影响着炉内烟气的流动、垃圾焚烧的完全度。炉膛设计,要与炉排的结构相适应,在确保炉排实现其垃圾干燥、燃烧、燃尽功能的同时,既要让烟气在炉膛内有充裕的停留时间,以分解烟气中的污染物,也要保证余热回收系统的运行效率。

根据烟气流动、垃圾移动方向的关系,可把炉膛分为**顺流式**、**逆流式**、**交流式**、**复流式**四种类型,如图7所示。

- (1) 顺流式。如图7(a)所示,在炉排、炉膛的这种搭配情况下,预热的一次风与炉排上的垃圾垃圾移动方向相反,垃圾干燥效果好;烟气出口偏于炉排干燥段、燃烧段的交界处,烟气流动方向也与垃圾移动方向相反,炉膛壁面、火焰的热辐射,有助于垃圾干燥。这种炉膛类型,适合处理含水量高,热值低($Q_{net} = 2000 \sim 4000\text{KJ/kg}$)的垃圾。
- (2) 逆流式。如图7(b)所示,对于炉排、炉膛的这种搭配,一次风与炉排上的垃圾接触不良,烟气流动方向与垃圾移动方向一致,垃圾干燥效果不好;烟气出口偏于炉排燃尽段的右边。这种炉膛类型,适合处理含水量低,热值高 $Q_{net} \geq 5000\text{kJ/kg}$ 的垃圾。
- (3) 交流式。如图7(c)所示,炉排、炉膛的这种搭配,把烟气的出口设在燃烧终了点上方,使干燥一侧的烟气顺流,燃尽段一侧的烟气逆流,垃圾移动方向,与炉排上方烟气流向相交。这种炉膛类型,适合中等热值($Q_{net} = 2000 \sim 6300\text{KJ/kg}$)的垃圾。热值高的垃圾,烟气出口偏向燃尽段,反之则偏向干燥段。
- (4) 复流式。如图7(d)所示,把炉排上方炉膛从中间隔开,形成两个烟气通道,偏向燃尽段的是主烟道,燃烧的烟气从主烟道排出;偏向干燥段的是副烟道,未燃气体和混合不均的气体从副烟道排出。燃烧的烟气和未燃的气体在气体混合室中继续混合燃烧,以强化焚烧效果。这种炉膛类型,适合处理性质变化大的垃圾。

§2.1.3 流化床焚烧炉

流化床燃烧，是以固体流态化技术为基础，介于火床燃烧和悬浮燃烧之间的一种燃烧形式。流化床燃烧设备，燃料适应性强，去硫脱氮有效，传热效率高，在锅炉行业已经得到重视和发展。流化床焚烧炉，以前用于轻质木屑，近年来已经用于焚烧污泥、煤、城市生活垃圾。焚烧炉形式，主要有流化床、循环流化床两种。

这种焚烧炉的燃烧，伴随着流动介质（比如石英砂）的均匀传热和蓄热。受流化床燃烧形式的限制，在焚烧固体垃圾时，块状垃圾要先将垃圾捣碎，使之变成粒径较小的颗粒，然后再投入焚烧炉焚烧。在多数情况下，助燃空气从炉底部送入，所送的助燃空气流速度，对颗粒的流态化起控制作用。当空气流速度超过临界值时，颗粒中出现气泡，颗粒被搅拌，产生沸腾。

流化床焚烧炉的结构，如图 8 所示。将石英砂之类的流动介质放入焚烧炉内，用辅助燃烧器把介质加热。通常，垃圾要粉碎至 20cm 以下再投入炉内，使之与炉内的高温流动石英砂（650~800°C）充分混合，发生气化和燃烧。由于传热均匀，燃烧温度维持在较低的水平，NO_x的生成量相对较低。若在垃圾进料中，掺入石灰或其它碱性物质，垃圾焚烧时可把酸性气体直接除去。这是流化床焚烧炉在二次污染物控制方面的优点。流化床焚烧炉内，向上的气流速度大约为 1~3m/s，有些介质颗粒会被上升气流携带走。为减少介质补充的数量，可另外安装旋风分离器，收集大的介质颗粒返送入炉膛。

流化床中介质状态是悬浮的，气固两相介质混合充分，炉床燃烧区域的温度均匀。有些受热管可布置在流化床层内，有些则布置在流化床上方的二次燃烧室内。在二次燃烧室内燃烧的，是轻质垃圾和未燃尽的成分，燃烧释热约占总量的 40%，但燃烧室的容积却是流化砂层的 4~5 倍。二次燃烧室内温度，比流化砂层温度高 100~200°C。

石英砂与炉底炉渣一起从焚烧炉排出，经分离后，返回流化床焚烧炉继续使用，而炉渣则在适当的处理后送填埋场。垃圾焚烧的烟气飞灰，将送入烟气处理系统。流化床焚烧炉的烟气中，沙粒和可燃颗粒的数量可观。要在流化床内就将这些可观的颗粒排除，有难度。因此，可以采用**循环流化床**焚烧技术，它运行烟气携带沙粒和飞灰流出炉膛，在下游配备相应的装置专门回收沙粒、飞灰，再送回炉膛燃烧，如图 9 所示。

在**循环流化床**焚烧炉中，向上的气流速度有时可达 5m/s，比普通流化床中的向上气流速度大，这加大了垃圾颗粒混合、搅拌的强度，强化了传热，也加大了燃烧速率。

把垃圾投入流化床焚烧炉进行悬浮焚烧，确实有良好的焚烧效果，在抑制 NO_x 生成、在炉内去除酸性气体方面，的确有应用优势。但是，流化床焚烧炉要求垃圾颗粒大小均匀，填料连续，不能直接焚烧块状垃圾。对垃圾焚烧之前的预处理要求相当高，这是在垃圾处理领域发展应用流化床技术的限制性因素。

§2.1.4 回转窑焚烧炉

回转窑，是一只钢制空心筒，筒内衬耐火材料，筒体很长，稍微倾斜地沿水平方向放置。支撑空心筒，需两个以上的支撑轴轮，轴轮在齿轮驱动机制下，带动空心筒绕轴线旋转。通常，一座回转窑有 1~2 个燃烧器，安装在回转窑的前端或后端。启动时，由燃烧器先将回转窑炉温升高到所要求的水平，然后再把垃圾投入回转窑内焚烧。垃圾的干燥，主要靠窑体旋转对垃圾的混合搅拌作用，高温气体、回转窑壁面的热辐射。窑体旋转时，为有助于垃圾下滑，倾斜度要适当。经干燥燃烧到达回转窑另一端时，垃圾燃尽变成炉渣。

回转窑相对于水平方向的倾斜角，可提高支撑轴轮调节，通常是 1°~3°；窑体转速有齿轮驱动机制调节，通常是 0.75~2.5r/min；回转窑的长度，通常是窑体直径的 2~5 倍。垃圾在回转窑中的停留时间较长，有时可达几个小时。停留时间的长短，决定因素是窑体几何参数、倾斜角、转速、进料方式、烟气流动情况等。回转窑的二次燃烧室，通常也有一只或多只燃烧器，以把二次燃烧室的温度维持在较高的水平，促进挥发有机物和悬浮颗粒的燃烧。回转窑焚烧炉系统的基本形式，如图 10 所

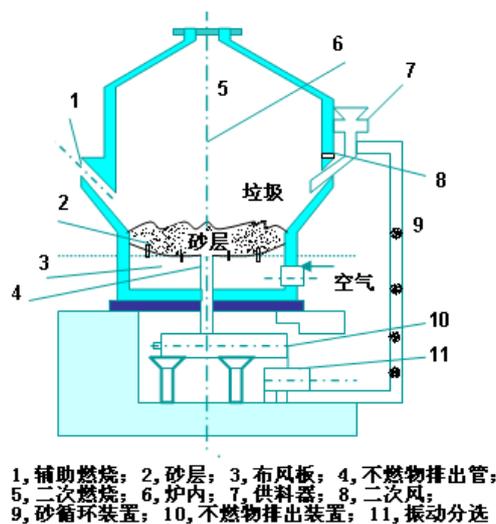


图 8 流化床焚烧炉结构

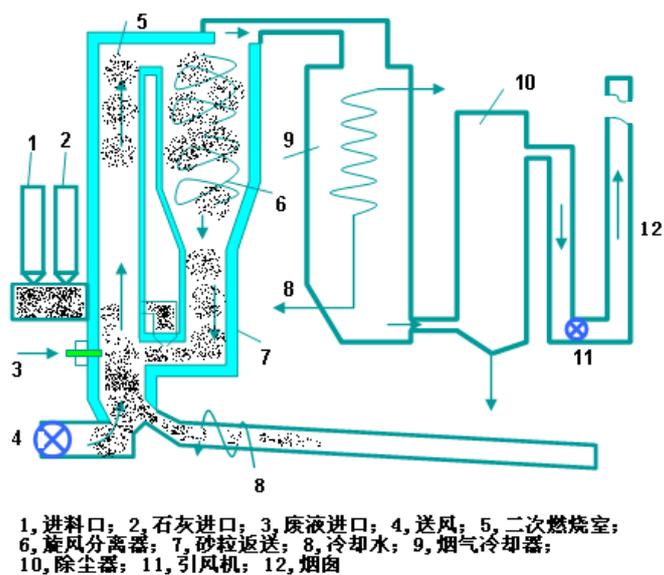


图 9 循环流化床焚烧炉

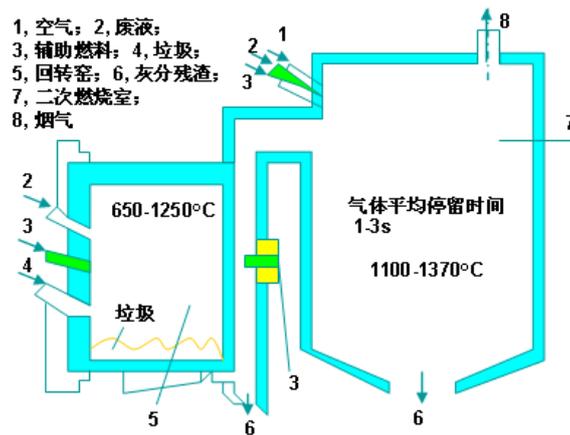


图 10 回转窑焚烧炉系统的基本形式

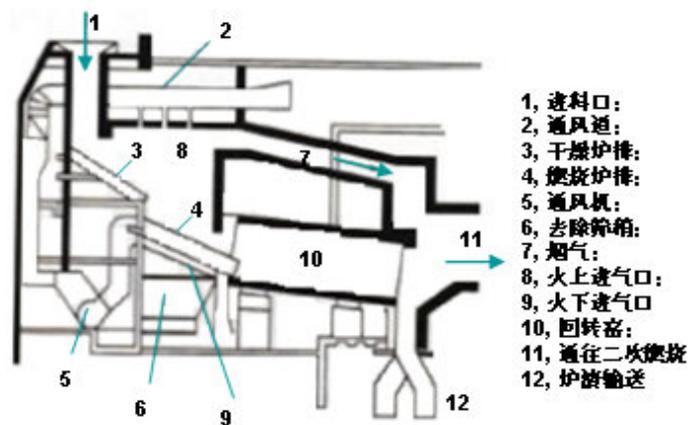


图 11 后回转窑焚烧炉系统的结构示意图

示。该焚烧系统，由回转窑和一个二次燃烧室组成。回转窑和二次燃烧室，辅助燃料是废液、或天然气。垃圾从回转窑的前端送入，在回转窑中干燥、燃烧，燃尽后变成炉渣从窑的后端排出。一部分挥发性有机物和悬浮颗粒，随烟气进入二次燃烧室，在 $1100\sim 1370^{\circ}\text{C}$ 的高温下，充分燃烧。二次燃烧室排除的高温烟气，可先导向余热锅炉进行热量回收，再进入烟气净化处理系统，最后从烟囱排出。

回转窑焚烧炉，可处理的垃圾种类多，特别适用于处理工业垃圾。在焚烧城市垃圾、掺入液体的大块垃圾时，通常采用的焚烧方式，是把回转窑串联在机械炉排炉后边，称为**后回转窑焚烧炉**，如图 11。垃圾送入炉之后，先在炉排上干燥，并把挥发性有机物释放出来。气体挥发物绕过回转窑进入二次燃烧室，余下的固体物质，在进入回转窑之前，就被点着，然后进入回转窑燃烧。垃圾燃尽后变成炉渣并被排出，所产生的烟气进入二次燃烧室，与悬浮的颗粒一起，实现充分燃烧。按照烟气流动和垃圾移动方向的对应关系，窑内灰渣的状态和温度范围，可作出以下分类：

- (1) **顺流式和逆流式炉型**。对于**顺流式炉型**，垃圾的干燥、燃烧、燃尽的阶段分界相当明显，在回转窑后端，烟气温度与灰渣温度近似相等。对于**逆流式炉型**，烟气与垃圾移动方向相反，有助于垃圾干燥、点火、提高燃烧速率。但气、固两相的相对速度较大，导致烟气中的飞灰含量偏高。目前，绝大多数的后回转窑焚烧系统，均采用**顺流式炉型**，这种炉型适合垃圾的送入，可增加烟气的停留时间，有利于烟气的充分燃烧。对像污泥之类的含水量偏高、可燃性差的垃圾，在焚烧时，可选择**逆流式炉型**，此时，辅助燃烧器，设置在回转窑的后端。
- (2) **熔渣式或灰渣式炉型**。若焚烧炉的温度低于 1100°C ，回转窑内的固体尚未出现熔融，则炉型属

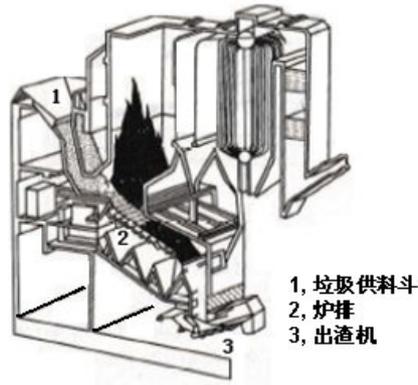


图 12 机械炉排焚烧炉燃烧设备

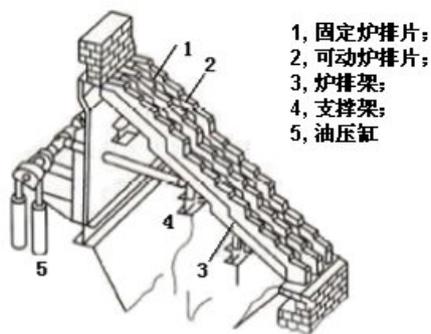


图 13 并列摇动式炉排示意图

于灰渣型。当炉温高于 1200°C ，回转窑内固体出现熔融时，炉型就是熔融型的。这时，除了熔点更高的金属和金属化合物，垃圾中的惰性物质都在窑内熔融，焚烧较完全。熔融状的炉渣从窑内排除，经急速冷却后成为类似矿渣或者岩浆的残渣。熔融炉的炉渣，透水性低，颗粒大，可包容重金属化合物，毒性低于灰渣炉的炉渣。

后回转窑焚烧炉，适应性强，可处理废液、固体垃圾，各种不同物态和形状的可燃废物，均可在回转窑焚烧炉中焚烧。

§2.2 机械炉排焚烧炉燃烧设备

机械炉排焚烧炉，广泛用于焚烧城市垃圾，是技术发展得最成熟的设备。这种炉的燃烧设备，主要包括炉排、垃圾供料斗、推料器、出渣机、炉体、辅助燃烧器等，如图 12 所示。为了炉排操作的自动化和连续化，炉排是活动式的。这种焚烧炉的特点，是垃圾无需预处理。

§2.2.1 机械炉排

机械炉排炉的炉排，形式多样，代表性形式包括并列摇动式、阶梯往复式、逆动式、阶梯式、履带式、滚筒式等。

- (1) **并列摇动式**。这种炉排的布置方式，如图 13 所示。炉排面倾斜，固定炉排片与可动炉排片，横向相隔、并列布置。可动炉排片通过液压驱动作往复运动，推动并搅拌垃圾。整个炉排由三个不同阶的倾斜炉排组成，通过阶段落差，提高垃圾的拆散和翻滚效果，促进垃圾的焚烧。
- (2) **阶梯往复式**。如图 14 所示，固定炉排和可动炉排的排片，纵向交替布置，形成阶梯状，可动炉排

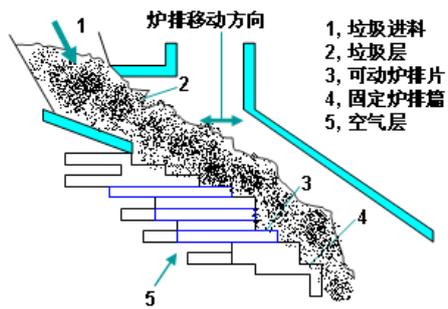


图 14 阶梯往复式炉排示意图

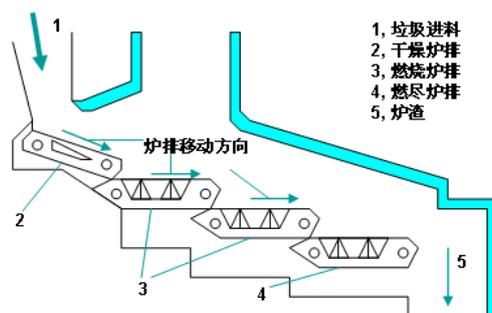


图 15 履带式炉排示意图

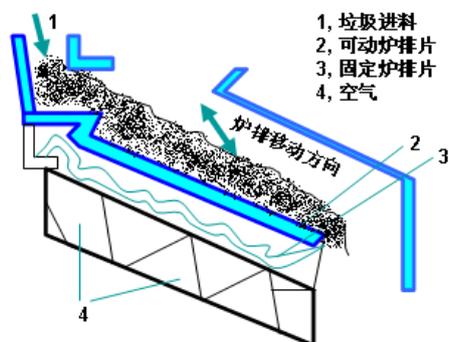


图 16 逆动式炉排示意图

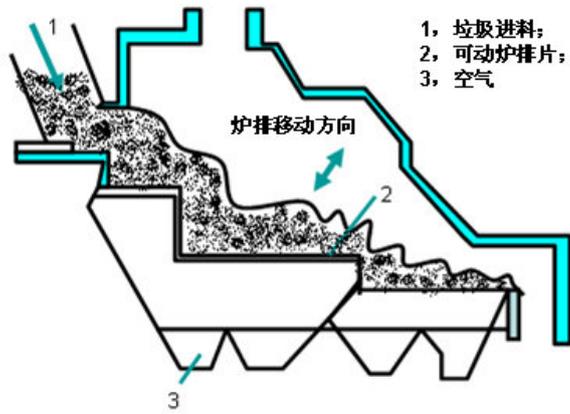


图 17 阶梯式炉排示意图

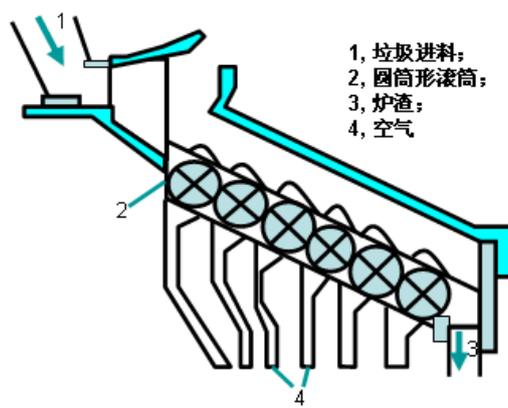


图 18 滚筒式炉排示意图

由机械装置或液压驱动，在水平方向作往复运动，往复运动的方向与垃圾移动方向一致。炉排片的往复运动，使垃圾翻动、搅拌的性能较好。

- (3) **履带式**。履带式炉排，见图 15，作用类似于带式输送机，负责携带一定数量的垃圾以给定的速度向前移动。这种炉排，结构简单，运行可靠。垃圾在履带式炉排上，逐步完成干燥、点燃、燃烧直至燃尽成炉渣。垃圾仅在一炉排落下时倾倒在下一炉排上时，才发生一些搅动，在同一炉排上，只有受携带的移动而无搅拌和翻动。因此，容易发生炉排上垃圾局部烧尽、局部垃圾未燃尽的问题，这种情况，对于大型焚烧炉更明显。履带式炉排，不适宜焚烧大量颗粒状垃圾、废塑料等。在国外，这种炉排已经很少采用，而在国内的一些小型焚烧炉系统，仍在使用。
- (4) **逆动式**。见图 16，结构形式类似于阶梯往复式，其可动炉排排片移动的方向，与垃圾运动方向相反。炉排片受液压驱动作往复运动，而推动垃圾逆流向上运动，这可使来自燃烧区的热灰渣与干燥区的垃圾充分混合，有利于垃圾点燃着火，并是垃圾层底部的部分垃圾得到充分燃烧。因此这种炉排适合焚烧含水量高、热值低的垃圾。
- (5) **阶梯式**。见图 17，这种炉排的固定炉排片和可动炉排片，纵向交替布置，分别组成阶段性的炉排，进而再形成阶梯状。可动炉排由液压驱动作往复运动，运动方向与垃圾移动方向一致，对垃圾搅拌，完全依靠炉排的往复运动。
- (6) **滚动式**。图 18给出了滚动式炉排的结构。通常，由5~7只圆形滚筒构成，以30°的斜度，倾斜排列。滚筒顺着垃圾进料移动的方向作旋转，相应的滚动使垃圾向炉排后部作波浪式运动，发生充分的搅拌和混合，有强的拨火作用，促进垃圾充分焚烧。受电力驱动的滚筒，转速可随垃圾的成分作调整。每个滚筒对应自个的动力电机、传动装置、送风导管和灰坑。空气可从导管送入，经滚筒表面的送气孔到达垃圾层，对炉排有良好的冷却效果。

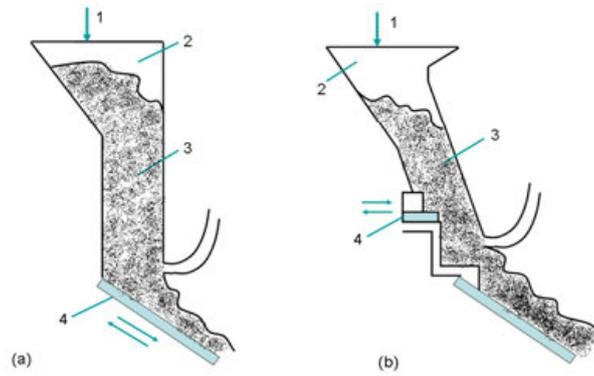
§2.2.2 附属设备

机械炉排焚烧炉的附属设备，主要有垃圾供料斗、垃圾推料器、出渣机。这些附属设备的结构和功能，可简单地描述如下：

- (1) **垃圾供料斗**。供料斗的结构形式，如图 19所示，有半喇叭形(a)和全喇叭形(b)；进料滑槽有垂直型和倾斜型。垃圾进料斗的作用是：垃圾短暂储存；不断地向炉内供给焚烧的垃圾；利用供料垃圾，尽量防止空气漏入炉内、烟气外泄。通常，供料斗的垃圾储存量，大约设计成焚烧炉60min的垃圾处理量。供料斗还设有开、关门，以防止开、关炉时空气漏入炉内。设有装置解决供料斗中有时出现的搭桥。
- (2) **垃圾推料器**。推料器类型多，主要形式有推送式、炉排式、螺旋式、螺旋阀式推料器，如图 20(a-d)所示。垃圾推料器的主要作用是：把供料斗的垃圾持续均匀地送入焚烧炉；按照焚烧炉的运行情况，调节垃圾供应量。
- (3) **出渣机**。垃圾焚烧的炉渣，包括炉排间的落下灰，炉排燃尽段的残渣。在焚烧炉运行中，焚烧炉渣必须及时从炉内排除，这就是出渣机的任务。通常，垃圾焚烧厂把炉灰、炉渣冷却、密封的工序一起合并处理，通常把炙热的炉渣浸入水中，消火冷却。常用的出渣方式有带刮板的履带式（又称湿法）和在水槽中将炉渣挤出的方式（又称半干法，见如图 21）。

§2.2.3 烟气净化工艺技术

焚烧垃圾的烟气中，有烟尘、重金属、酸性气体、NO_x、CO、有机氯化物二噁英类(PCDDs/PCDFs)等。烟气所含的这些物质，对环境空气有危害，称为二次污染物，必须严加防范。对于烟气中污染物，需要采用净化系统进行处理，使烟气中有害物质的浓度低于国家标准，再排入大气。对于烟气污染



1, 垃圾; 2, 进料喇叭口; 3, 进料滑槽; 4, 垃圾推料器

图 19 垃圾供料斗的形式, (a)半喇叭形; (b)喇叭形

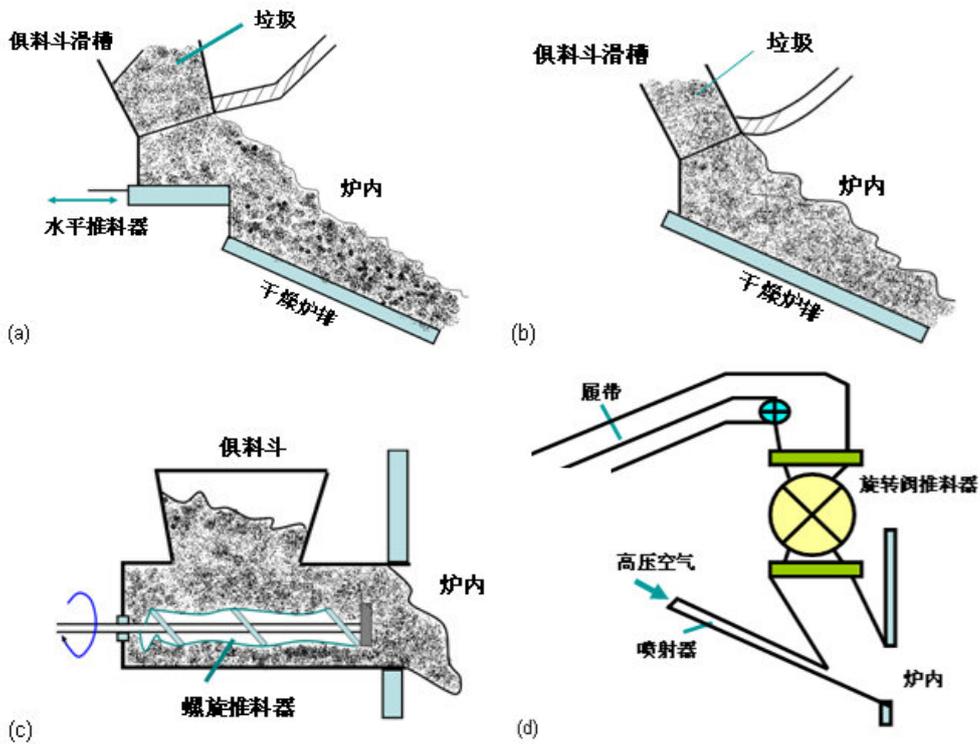


图 20 垃圾推料器类型, (a)推送式; (b)炉排式; (c)螺旋式; (d)螺旋阀式

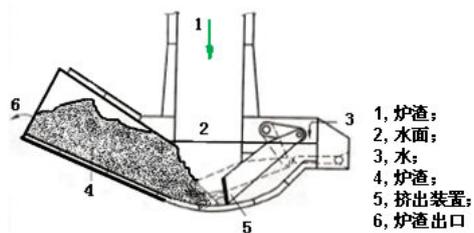


图 21 半干式出渣装置

表 7 垃圾焚烧炉大气污染物排放限值^[1]

序号	项目	单位	数值含义	排放浓度限值
1	烟尘	mg/m ³	测定均值	80
2	烟气黑度	林格曼黑度, 级	测定值 ^[2]	1
3	CO	mg/m ³	小时均值	150
4	NO _x	mg/m ³	小时均值	400
5	SO ₂	mg/m ³	小时均值	260
6	HCl	mg/m ³	小时均值	75
7	Hg	mg/m ³	测定均值	0.2
8	Cd	mg/m ³	测定均值	0.1
9	Pb	mg/m ³	测定均值	1.6
10	二噁英类	ng/m ³ TEQ ^[3]	测定均值	1.0

[1] 各标准限值均以标准状态下含11% O₂ 的干烟气为参考值换算;

[2] 烟气最高黑度时间, 1小时内不得超过5min;

[3] 二噁英类的浓度单位为毒性当量浓度。

物, 国家环保总局GWKB3-2000中限定的排放值, 列在表 7中。在本小节, 介绍垃圾焚烧烟气的净化工艺技术。

(1) 烟气净化的工艺。**烟气净化工艺**, 决定了烟气污染物是否可以大幅度减少, 减低对大气环境的危害。对于垃圾焚烧烟气, 相应的净化工艺很多, 典型的方法有湿法、半干法、干法三种, 每一种都有组合形式。**湿法**, 是指包括静电除尘器和袋式除尘器与文丘里洗涤器、文丘里洗涤器与洗涤塔和静电除尘器或袋式除尘器的不同组合。通常, 除尘器负责捕集烟尘, 文丘里洗涤器与洗涤塔负责净化烟气的酸性气体。湿法的净化效率最高, 完全可以使焚烧烟气在处理之后, 达到排放的标准, 在发达国家广泛应用, 工艺的组合形式也已经多样化。湿法的缺点是流程复杂, 配套设备多投资和运行费用高, 且有后续的废水处理问题。湿法的洗涤净化, 如洗涤塔, 可同时去除其它污染物, 在条件允许的情况下, 可以不用专门的除尘器。湿法净化的吸收剂, 可以是Ca(OH)₂或NaOH。CaSO₂可使净化设备结垢。湿法净化后, 烟气温度降低了, 通常需加热后才能从烟尘排出。

半干法, 是指喷雾干燥吸收塔和静电除尘器或袋式除尘器的组合。烟尘用除尘器捕集并去除, 酸性气体则在喷雾干燥吸收塔中去除。半干法, 对烟气污染物的净化效率比较高, 投资运行费用低, 流程简单, 无废水后处理问题, 有应用潜力。目前在城市垃圾焚烧烟气净化系统中, 应用越来越多。其缺点, 是对喷嘴和操作水平, 如烟气在喷雾干燥吸收塔中的停留时间、吸收液中吸收剂的粒度和浓度等, 要求偏高。

干法, 是指干式吸收反应器与静电除尘器或袋式除尘器的组合, 烟气的酸性气体通过干式吸收反应器去除。这种方法的烟气污染物净化效率较低, 但工艺简单, 投资和运行费用, 低于半干法。对操作水平的要求也较低, 也无废水后处理问题。近年来, 随着干法净化设备的技术完善, 污染物的净化效率有所提高, 因此干法有一定的实用性, 适用于经济不发达国家和地区。

上述的工艺, 主要净化的是焚烧烟气的烟尘和酸性气体, 同时对重金属、二噁英类也有较高的除去效率, 但对NO_x几乎没有净化效果。为此, 大量焚烧垃圾烟气的净化处理工艺, 必须设置单独的NO_x净化系统。随着烟气排放标准的提高, 对重金属和二噁英类规定的限值越来越严格。目前, 进一步净化重金属和二噁英类的方法, 通常是活性炭吸附或喷射吸附。应当指出, NO_x净化、活性炭吸附是对烟气净化主体工艺湿法、半干法、干法的完善和补充。

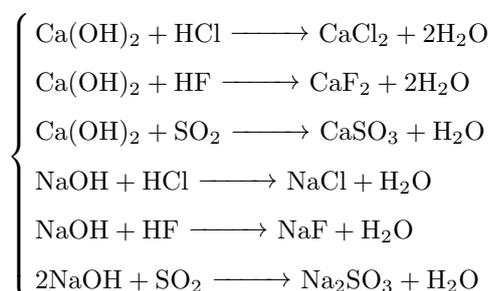
(2) 烟气净化技术。

1. **烟尘净化**。烟尘的净化形式，有静电分离、过滤、离心沉降、湿法洗涤等，相应的净化设备有静电除尘器，袋式除尘器、文丘里洗涤器。烟气中烟尘的粒径小（粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒含量高），为提高效率，必须采用高效除尘器。文丘里洗涤器虽然除尘效率高，但带来废水后处理问题，所以不在作为除尘的主要设备。

对于大量焚烧垃圾的烟气，烟尘处理广泛应用的设备是静电除尘器、袋式除尘器。实践表明，用静电除尘器净化烟气，可使烟尘的浓度控制在 $45\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，而用袋式除尘器，则相应的烟尘浓度更低，同时也伴随净化重金属和二噁英类的效果。袋式除尘器，容易受烟气温度、烟尘粘性的影响，导致工艺对耐高温、耐冲击的性能要求提高，是袋式除尘器造价增加、清灰不易，但除尘器的净化效率，不受**烟尘比电阻**和**原始浓度**的影响。当然，过高、过低的比电阻，会降低除尘器净化效率。因此袋式除尘器的烟尘净化效果，优于静电除尘器。

应当指出，近年来，国内外建成的大型垃圾焚烧厂，均采用袋式除尘器，主要原因是它在捕集烟尘的同时，兼有去除重金属和二噁英类的作用；由于除尘器滤料的阻流，烟尘在滤袋表面形成灰粉层，灰粉层对通过的烟气中的重金属和二噁英，起到了吸附和反应的作用，测量结果表明，袋式除尘器滤层的净化效果，非常显著。另一方面，烟气冷却和处理时，若处于温度范围 $250\sim 450^\circ\text{C}$ ，会发生二噁英类的再合成反应(de novo synthesis)，而静电除尘器的工作温度在 250°C 左右，除尘器中也含有较多的Cu、Ni、Fe微粒起催化作用，容易出现二噁英类的再合成。目前，某些已经建成的垃圾焚烧厂，仍在使用静电除尘器净化烟气，但是，在国外发达国家和我国的污染物控制标准中有规定：生活垃圾焚烧炉除尘装置，必须采用袋式除尘器。

2. **酸性气体净化**。烟气中的酸性气体，是指HCl、HF、 SO_2 等气体，不包括 NO_x 。对这些酸性气体的净化机理是酸碱中和反应。碱性吸收剂，如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、NaOH等，在洗涤塔、吸收反应器中，以湿法、半干法、干法净化形式，与酸性气体的反应是



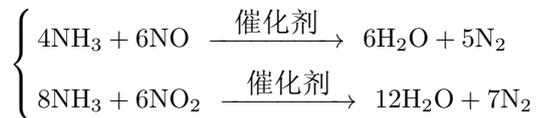
酸性气体的**净化效率**，取决于气液、气固相传质过程。由于气液传质系数大于气固传质系数，因此在其它条件相同的情况下，湿法的净化效果，明显高于半干法和干法。为提高净化效率，其它的途径是增加吸收剂的比表面积、吸收剂与污染物的当量比。实际操作时，发现更重要的是让酸性气体在净化设备中有足够的停留时间。

工程实践和技术研究得出的结论是：

- 湿法应用比例较高。仅用水，就可以有效去除HCl。但是，要有效去除HF、 SO_2 ，就得用强碱作为吸收剂，并适当延长焚烧烟气在净化设备的停留时间。为避免 CaSO_3 在设备壁面上结垢，湿法净化通常采用吸收剂NaOH，较少用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。**湿法净化**可分为一个或二个阶段，净化设备有填料塔、筛板塔之类的洗涤吸收塔，和文丘里洗涤塔。湿法伴随着废水的后处理，工艺流程复杂，投资运行费用高。
- 干法净化效率低，目前应用较少。为提高净化效果，需要让烟气流动有良好的湍流度，烟气与干态吸收剂有较长的接触时间，而且要尽量增大吸收剂比表面积。干法净化的吸收剂，大多是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉末。较高的吸收剂/污染物当量比，可增加净化效果，通常以2~4为宜，因为过高的当量比，净化效率不会明显提高。工艺形式，通常是干式吸收反应器加高效除尘器、或吸收剂管道喷射加高效除尘器的组合。**干法**的显著优点是反应产物是固态，可直接最终处理，不存在湿法那样的废水后处理问题。

- 半干法，介于湿法好干法之间的烟气处理工艺。这种工艺对操作技术有较高的要求，需要实践经验积累。经验表明，对于半干法净化器，停留时间是非常重要的参数。当停留时间足够长时，可以增大酸性气体的净化效果，也可以让净化反应产物CaCl₂的水分充分蒸发，并可以固态排出。运行经验也表明，对于上流式和下流式半干法净化器，最小停留时间分别是8s、18s。此外，净化器进、出口温差，对反应物能否固态排出，有直接影响。国外研究发现，该温差应大于60°C，也就是说，若净化器进口温度是220°C，则净化器出口温度要小于160°C。吸收剂的粒径大小、喷雾效果，对半干法的净化效果也有较大的影响，操作上也有相应的严格要求。半干法净化器，与后续的袋式除尘器或静电除尘器组合，构成半干法净化工艺。

3. NO_x净化。目前，NO_x净化方法，主要有选择性催化还原法、选择性非催化还原法、氧化吸收法、吸收还原法等。在垃圾焚烧的烟气中，NO_x主要成分是NO，占95%以上。NO为难溶于水的惰性气体，用常规的化学吸收法净化，效果不佳。选择性催化还原法(Selective Catalytic Reduction, SCR)，是在廉价的金属氧化物TiO₂、V₂O₅、WO₂的催化下，在反应温度低于400°C的条件下，用还原剂NH₃把NO_x还原成N₂的净化方法。NH₃/NO_x的当量比，约为0.6~1.3，NO_x净化效率可达50%~70%。主要反应是：



选择性非催化还原法(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)，是用还原剂氨(NH₃)、尿素(CH₄N₂O)在高温(800~1000°C)下把NO_x还原为N₂的方法。还原剂喷入高温烟气中，所发生的反应，与SCR方法基本相同，只是这种方法不需要催化剂，反应温度偏高。因此，用SNCR方法时，氨水或者尿素水溶液，作为还原剂被喷入垃圾焚烧炉炉膛中，还原反应是在炉膛中完成的；而SCR方法的还原反应，是在后续的烟气净化器内经催化完成的。

通常，氧化吸收法、吸收还原法都是与湿法结合的。氧化吸收法是在湿法净化器的吸收剂溶液中，加入强氧化剂，比如NaClO₂，先把烟气的NO氧化为NO₂，然后再用钠碱溶液把它吸收去除。吸收还原法是在湿法净化系统加入Fe²⁺离子，Fe²⁺离子把NO包围，形成EDTA化合物，EDTA再与吸收溶液中的HSO₃⁻和SO₃²⁻反应，释放N₂和SO₄²⁻。EDTA是一种重要的络合剂，用途很广，可用作彩色感光材料冲洗加工的漂白定影液，染色助剂，纤维处理助剂，化妆品添加剂，血液抗凝剂，稳定剂，合成橡胶聚合引发剂，EDTA是螯合剂的代表性物质。能和碱金属、稀土元素和过渡金属等形成稳定的水溶性配合物。据国外资料报道，吸收还原法的化学添加剂费用，低于氧化吸收法。

4. 重金属净化。烟气中重金属的净化机理如下：

- 把烟气冷却，使重金属达到饱和、凝结成颗粒，被除尘器收集、去除；
- 饱和温度较低的重金属，凝结不充分，但是，在飞灰表面的催化下，这些重金属会形成饱和温度较高的氧化物或氮化物，凝结后被除尘器收集、去除；
- 设法让仍以气态存在的重金属，吸附在飞灰或喷入的活性炭颗粒上，再被除尘器收集、去除；
- 对于凝结和吸附收效不大的部分重金属，用湿法工艺的洗涤液去除。

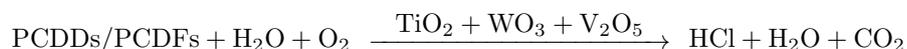
因此，高效的颗粒捕集和低温控制，是烟气重金属净化的两个主要措施。垃圾焚烧烟气的重金属，以固、液、气态进入除尘器。冷却烟气，气态部分转变为可收集的固态、或液态。但挥发性强的重金属，比如Hg，即使除尘器操作的温度最低，仍有部分以气态存在于烟气。总之，对于重金属，烟气净化器的工作温度低，有利于净化效果。为降低Hg的排放浓度，在干法工艺流

程中,可在袋式除尘器前的烟气中喷入活性炭,或者在烟气工艺流程尾端,用活性炭过滤设备,强化对Hg的吸附作用。在湿法烟气工艺流程中,在洗涤液中添加催化剂,比如 CuCl_2 ,促使生成更多水溶性 HgCl_2 ,在用EDTA螯合剂固定已吸收 Hg的循环液,确保吸收净化效果。

5. **有机氯化物净化**。有机氯化物二噁英类的净化,发达国家越来越重视,国内对二噁英类的排放浓度,也作了严格的规定。研究和实践表明:对于焚烧烟气的二噁英类,降低排放浓度的主要方法,是控制二噁英类的生成。对二噁英类排放浓度的严格规定,意味着垃圾焚烧的自动控制系统要尽量可靠,垃圾焚烧和净化工艺要尽量完善,对垃圾要分类收集,用预处理控制生活垃圾中氯和重金属含量高的物质进入垃圾焚烧厂。相应的主要措施,涉及以下几个方面:

- 炉排炉膛结构适当,确保垃圾焚烧充分。衡量焚烧充分度的是烟气中 CO 浓度,比较理想的指标是在标准状况下低于 $60\text{mg}/\text{m}^3$,浓度越低,表明焚烧越充分。
- 炉膛和二次燃烧室的温度维持在 850°C 以上,烟气在炉膛和二次燃烧室的停留时间不低于 2s , O_2 浓度不低于 6% ,合理控制助燃空气的温度、流量和送风位置。
- 为了抑制二噁英类的再合成反应(*de novo synthesis*),应当缩短烟气在温度范围 $300\sim 500^\circ\text{C}$ 的时间,使余热锅炉的排烟温度低于 250°C 。
- 用新的袋式除尘器,烟气进入除尘器的温度低于 200°C ,并在进入袋式除尘器的烟道上设活性炭吸附剂的喷射装置,进一步吸附二噁英类。
- 用活性炭吸附设备,吸附二噁英类。

实践表明,凝结和颗粒高效捕集,有利于有机氯化物的净化。对于有机氯化物的净化,袋式除尘器比静电除尘器有优势。净化效果对净化温度敏感,低的净化温度,可提高有机氯化物的去除效果。在廉价的金属氧化物的催化下,促成二噁英类分解的反应是:



国外进行了二噁英类催化氧化净化设备的研究和开发,把这种净化设备设在袋式除尘器之后,湿式洗涤器之前,相应的技术指标是:二噁英类的分解率高达 99% ;可保证烟气中二噁英类的排放浓度低于 $0.1\text{ng}/\text{m}^3\text{TEQ}$;净化器工作温度较低($200\sim 300^\circ\text{C}$),远低于二噁英类的热分解温度($850\sim 1200^\circ\text{C}$);催化剂上无二噁英类富集,易于处理;可与 NO_x 催化还原净化组合,通过添加 NH_3 ,在有效净化二噁英类的同时,去除 NO_x 。

参考文献

- [1] 汪军,马其良,张振东,工程燃烧学,中国电力出版社,2008.
- [2] 梁立刚,城市生活垃圾层状燃烧过程试验研究及数值模拟,哈尔滨工业大学,博士论文,2008.
- [3] 费俊,层燃炉排上固体垃圾燃烧过程的数值模拟,哈尔滨工业大学,硕士论文,2006.

索 引

- 2, 3, 7, 8-TCDD, 8
- CO, 7
- EDTA化合物, 28
- NO_x, 7
- 半干法, 26, 28
- 并列摇动式, 21
- 城市生活垃圾, 3
- 出渣机, 24
- 除尘器飞灰, 10
- 除尘器积灰, 8
- 除渣水, 8
- 低位热值, 3
- 多氯联苯, 8
- 二噁英, 8, 13
- 飞灰, 6, 7
- 废水处理系统, 13
- 焚烧, 4
- 焚烧方式, 11
- 焚烧炉, 14
- 焚烧温度, 5
- 焚烧系统, 12
- 粉碎预处理, 5
- 辅助燃料, 3
- 复流式, 17
- 干法, 26, 27
- 干燥段, 15
- 干燥垃圾, 4
- 高位热值, 3
- 工业固体垃圾, 3
- 工艺方案, 10
- 工艺流程, 10
- 滚动式, 24
- 过量空气系数, 6
- 后回转窑焚烧炉, 20
- 化学性质, 3
- 灰分, 3
- 灰渣冷却水、烟气洗涤废水, 14
- 灰渣式, 21
- 挥发分, 3
- 回转窑, 18
- 混合强度, 6
- 机械炉排焚烧炉, 15
- 交流式, 17
- 阶梯式, 24
- 阶梯往复式, 21
- 净化机理, 28
- 净化效率, 27
- 垃圾的特点, 3
- 垃圾焚烧, 5
- 垃圾焚烧炉, 11
- 垃圾焚烧系统, 14
- 垃圾供料斗, 24
- 垃圾推料器, 24
- 垃圾形态, 11
- 流化床燃烧, 18
- 炉排, 15
- 炉膛形状, 17
- 炉渣, 6, 8
- 炉渣冷却装置, 13
- 履带式, 24
- 氯苯, 8
- 氯酚, 8
- 氯置基苯环, 8
- 逆动式, 24
- 逆流式, 17
- 逆流式炉型, 20
- 前处理系统, 12
- 燃尽段, 15
- 燃料NO_x, 7
- 燃烧段, 15
- 燃烧设备, 21

燃烧終了点, 17
热NO_x, 7
热分解, 4
热值, 3
热灼减率, 17
熔渣式, 21
熔渣式或灰渣式炉型, 20

湿法, 26
湿法净化, 27

顺流式, 17
顺流式和逆流式炉型, 20
顺流式炉型, 20
酸性气体, 7
酸性气体净化, 27

停留时间, 5

危险垃圾, 3
吸收还原法, 28

选择性催化还原法, 28
选择性非催化还原法, 28
循环流化床, 18

烟尘比电阻, 27
烟尘的净化, 27
烟尘净化, 27
烟气, 6
烟气处理系统, 12
烟气净化工艺, 26
氧化吸收法, 28

有机氯化物, 8
有机氯化物净化, 29
余热锅炉的飞灰, 10
余热锅炉积灰, 8
余热回收系统, 12

元素组成, 3
原始浓度, 27

重金属, 7
重金属净化, 28
主要措施, 29
助燃空气系统, 13

自动控制系统, 14
自燃临界值, 3