

城市垃圾处理利用与二氧化碳控制技术进展

建设部城市建设研究院环卫工程研究所 徐海云

目前, 国内外广泛采用的城市生活垃圾处理方式主要有卫生填埋、焚烧、堆肥和综合利用(再生循环利用)四种处理方式。西方发达国家的垃圾处理对策或者说垃圾处理方式的选择原则是: 首先是尽可能进行回收利用; 其次是尽可能对可生物降解的有机物进行堆肥处理; 再其次是尽可能对可燃物进行焚烧处理, 最后是对不能进行其它处理的垃圾进行填埋处理。这里的尽可能含义就是以经济条件许可为前提, 现实状况是不可能做到百分之百分类收集, 不可能将所有可堆肥物进行堆肥处理, 同样也不可能是将所有的可燃物进行焚烧处理。

1 回收利用

进入九十年代以后, 发达国家的垃圾回收得到较快的发展。以美国为例, 1998 年城市垃圾回收利用量比 1990 年增加了 87%, 是 1980 年的 4.3 倍(见表 1), 其中废纸的回收量比 1990 年增加了 73%, 是 1980 年的 3 倍(见表 2)。目前, 发达国家的废纸回收率多在 50%以上(见表 3)。

表 1 1960~1998 年美国城市垃圾回收率

	1960	1970	1980	1990	1998
城市垃圾回收总量 (百万吨)	5.6	8.0	14.5	33.2	62.2
人均城市垃圾回收总量 (千克/人·天)	0.08	0.10	0.16	0.33	0.57
城市垃圾回收利用率(%)	6.4	6.6	9.6	16.2	28.2

注: 1.回收利用统计值包括庭院垃圾堆肥。

2.资料来源: Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 1998。

表 2 1960—1998 年美国废纸回收状况

	1960	1970	1980	1990	1998
纸及纸板回收总量(千吨)	5080	6770	11740	20230	34960
纸及纸板回收率 (%)	16.9	15.3	21.3	27.8	41.6

资料来源: Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 1998

表 3 1998 年部分国家和地区废纸回收率

国家与地区	美国	加拿大	德国	法国	日本	韩国	中国台湾
回收率 (%)	45.2	41.8	70.7	43.7	54	73.8	57.7

资料来源:再生资源研究, 2000 年, 5 期

对于城市垃圾回收利用, 各类包装垃圾的回收利用占最大的比例。据日本的城市垃圾成分统计分析, 包装垃圾占城市垃圾体积比为 55.5%, 重量比例为 22.6% (Annual Report on Health and Welfare 1999, Japan)。德国在 1989 年前还没有形成谁污染谁负责的制度, 当时现状为垃圾的产量越来越多, 据估计到 2000 年, 垃圾堆放和填埋的处理能力将达到极限。居民也强烈反对修建更多的垃圾处理厂, 后来经过对垃圾的调查研究, 发现垃圾中包装材料占体积比 50%以上, 重量占 30%以上, 可以通过回收可利用的包装材料来减少垃圾量。因此, 为改变这一现状, 德国在 1991 年 6 月 12 日正式实施包装条例法。包装条例规定: 贸易及工业界对运输包装、转换包装和销售包装的回收利用承担义务。同时, 该条例也为生产者和销售者提供了委托第三者帮助履行这一义务的可能性。德国绿点公司应运而生, 该公司按照包装条例的规定, 负责在用户附近建立回收系统, 回收使用后的商品包装, 并由此使销售者和生产企业从他们各自应履行的义务中摆脱出来。

城市垃圾的回收利用方式主要可分为材料回收和能量回收。垃圾回收作为再生材料其市场空间是受原材料市场影响。随着全球经济一体化, 以及技术进步, 在原材料的价格并没有增加, 有时甚至下跌的情况下, 利用垃圾再生的原材料的市场竞争力就可想而知了。因此, 经济技术发展水平和投入直接影响垃圾回收和利用。

德国双轨制系统股份公司将收集废塑料用于不来梅钢铁厂炼铁就是一个典型案例。由于塑料的化学成分与重油以及煤粉具有类似的特点，它们都具有高的 C、H 含量，因而可作为燃料和还原剂用于炼铁炉。该厂从 1995 年 7 月开始使用使用废塑料替代部分重油，每使用 1 kg 废塑料可替代 0.9 kg 重油。由于高温燃烧和烟气处理，使用废塑料并没有对烟气排放产生影响，二噁英的检测含量只有 0.002 ngTE/m^3 远低于规定值 0.02 ngTE/m^3 。绿点公司每年提供该厂废塑料约 9 万 t，支付给钢铁厂的费用约为 200 马克/t。

奥地利将回收塑料用于水泥生产也具有相同情形。水泥生产是一个高能耗的过程，能源消耗约占成本的 50%。考虑到节能和降低烟气中的氮氧化物含量，奥地利 Wopfinger 水泥厂从 1995 年开始使用加工成一定规格的废塑料于水泥生产(旋转水泥窑)。该厂年产水泥 20 万 t，年使用废旧塑料 8400t，相当于 1.4t/h ，占能源总消耗的 30%。由奥地利塑料协会将加工好的废旧塑料送到该厂，并支付给该厂 1800~2000 奥地利先令/吨（1 奥地利先令约折合人民币 0.5 元）。

废旧电池回收处理同样依靠消费者支付一定的费用才能取得回收处理财务平衡。瑞士废旧电池处理厂位于首都伯尔尼东南 Wimmis，该厂是一个股份制公司，成立于 1989 年。该厂利用热解和还原金属氧化物，将废电池中多种金属还原回收。处理后的材料销售费用只是整个处理成本的一小部分，处理厂的投资回收主要依靠消费者支付回收处理费用。在瑞士，当购买电池时，消费者需支付回收费用，生产者或进口者需要支付称为“先进处理费”给一信托公司，然后由该公司根据一定额及处理量支付给该废旧电池处理厂。

2 填埋处理

填埋处理作为垃圾最终处置手段一直占有重要地位，目前仍然是大多数国家主要的处理方式。垃圾填埋处理具有操作设备简单、适应性和灵活性强的特点，但理想的垃圾填埋场越来越少，特别是对于经济发达国家填埋处理所占比例进入 80 年代后有下降趋势。据美国环保署（EPA）统计预测，美国填埋场数量将由 1993 年的 3300 多座下降到 1998 年的 2314 座，2010 年将降到为 1200 座。导致填埋场数量下降的原因有三条：①旧填埋场逐渐达到其饱和状态；②新填埋场选址困难；③由于环境保护标准不断提高，一些不符合环保要求的垃圾填埋场被迫关闭。

垃圾卫生填埋场污染控制得到逐步加强。采用人工防渗层,提高防渗水平;加强渗滤液收集和处理,防治水污染;对填埋气体回收利用,保障填埋场安全、减轻大气污染并实现资源回收。美国环境署提出要求对年排放 150t 非甲烷有机化合物(NMOCs)的填埋场须设置填埋气体收集装置,并将收集的填埋气体进行焚烧处理或进行利用。利用填埋气体进行发电或其他利用,不仅减少了环境污染,而且产生一定效益。国内已经有杭州、广州、深圳等城市在进行这方面的工作。1998 年 10 月,我国第一个填埋气体发电厂在杭州天子岭填埋场建成发电;1999 年 6 月,广州大田山一期工程第一台机组投入运行。这些项目的实施,为我国填埋场填埋气体的开发利用奠定了基础。

由于填埋场是各种垃圾处理技术的最终消纳场所,因此填埋场的技术标准不断提高,新建垃圾填埋场逐步向大型化、高标准方向发展。填埋场的投资费用和运行成本也不断提高,为充分利用填埋空间,普遍采用垃圾压实,提高填埋场使用寿命。

由于垃圾资源再生利用率提高,同时也为减少垃圾填埋场污染物的产生,垃圾填埋场的填埋物有机物含量会逐步降低。例如,进入 90 年代以后,美国相继实施禁止庭院垃圾(Yard Waste)进行填埋处置的条例;德国规定在 2005 年以后,有机物含量大于 3%或 5%不能进入一级或二级填埋场,瑞士和奥地利也分别提出在 2000 年和 2004 年以后城市生活垃圾不能直接填埋处理。

3 有机垃圾处理

近入九十年代以后,堆肥处理在发达国家又呈上升的发展趋势。以美国为例,由于禁止庭院垃圾进行填埋处置的条例的实施,庭院垃圾堆肥处理场发展很快,1996 年全国庭院垃圾堆肥处理场达到 3400 座,比 1988 年增长了 4 倍以上。为提高城市垃圾再生利用率,城市垃圾堆肥处理也有明显增长(见表 4)。由于欧洲推行“填埋税”,使得垃圾填埋处理费用显著提高,以及限制进入填埋场的有机物含量的填埋标准将在欧盟内实施等因素的影响,欧洲大陆垃圾堆肥场从 1990 年 87 座增加到 1996 年 684 座;英国的垃圾堆肥场从 1990 年 4 座增加到 1996 年 57 座。

但是,需要注意的是发达国家的堆肥处理更多是采用庭院垃圾和分类收集后的可降解有机垃圾。而利用城市混合垃圾堆肥处理所占的比例并不高。

例如, 美国城市垃圾堆肥厂中, 采用混合垃圾堆肥的有 14 座, 总计处理规模为 900t/d, 主要分布在美国中西部地区(摘自 1997 年美国环境署报告)。

在美国、欧洲、日本、印度等都有针对城市混合垃圾, 配置机械化前处理的大型机械化垃圾堆肥场的经历, 其中多数已经关闭。其主要原因是堆肥成本较高, 而堆肥质量难以保证, 这也正是发达国家积极推行垃圾源头分类收集的一个重要原因。还有一些仍在运行的这类堆肥厂, 其堆肥产品也多用作垃圾填埋场的覆盖材料。奥地利 Salzburg 垃圾处理厂就是一个典型的案例。该厂不同时期建设的三种垃圾堆肥处理方式都在运行(滚筒式堆肥, 100,000t/a; 条形堆肥, 10,000t/a; 厌氧发酵, 20,000t/a)。其中针对城市混合垃圾的滚筒式动态好氧堆肥处理生产线, 其堆肥产品主要用作垃圾填埋场覆盖土; 主要针对庭院垃圾的条形堆肥处理, 堆肥产品用于农林花卉; 主要针对分类收集的有机垃圾的厌氧消化处理厂同时产出沼气和堆肥产品。

有机垃圾厌氧消化处理是一种在厌氧状态下利用微生物使垃圾中的有机物快速转化为甲烷和二氧化碳的过程, 其反应机理粪便产沼过程相同。它与传统的卫生填埋相比, 将厌氧消化过程由几年缩短到 30 天以内, 与好氧堆肥相比, 改变了占地大、处理时间长, 管理复杂和有气味等问题, 对于厨余垃圾具有较好的适应性, 厌氧消化处理具有过程可控制、易操作、降解快、生产过程全封闭, 产物可计量和再利用等特点。目前这项技术已得到较多应用。

表 4 美国 1988~1996 年垃圾(城市垃圾与庭院垃圾)堆肥场数量统计

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
城市垃圾(MSW)堆肥场	5	7	9	19	21	20	17	17	15
庭院垃圾(Yard Waste)堆肥场	651	986	1407	2201	2500	3000	3014	3202	3400
合 计	656	993	1416	2220	2521	3020	3031	3219	3415

资料来源: Wastes Management April 1997

目前, 国内外在运行的各种堆肥系统中, 采用最多的仍是静态堆肥、条形堆肥等低成本堆肥系统。德国是垃圾堆肥处理技术最先进的国家之一, 目前运行的堆肥处理场 379 座, 其中约 70% 的堆肥场采用静态堆肥、条形堆肥等低成本堆肥工艺(Wastes Management January 1998)。堆肥场的收入除一小部分来自出售堆肥外, 大部分依靠收取垃圾处理费。

4 垃圾焚烧处理

目前, 城市垃圾 (MSW) 焚烧在发达国家应用的主要有以下几种类型: 全量焚烧系统(Mass burn system)通常焚烧处理量 250~3000t / d, 用来焚烧混合垃圾; 另一类将混合垃圾进行分选处理制成一定尺寸规格的垃圾衍生燃料 (Refuse derived fuel 简称 RDF), 制成的 RDF 燃料比混和垃圾具有较好的均匀性, 可以和煤、木屑等其它燃料混和燃烧。块装组合式焚烧系统 (Modular system) 通常是指在制造厂制造好标准组件到现场组合安装, 此类型焚烧系统处理量相对较小(10~200t/d)。此外还有应用较少的处理工艺如流化床焚烧炉、热解 (Pyrolysis) 等。

在 70 年代后期和 80 年代早期, 由于公众对垃圾焚烧烟气污染特别是二恶英的关注, 在西方国家, 出现公众反对兴建垃圾焚烧厂的呼声。因此, 在这一时期, 新建垃圾焚烧厂出现下降趋势。随着垃圾焚烧烟气处理逐步受到重视, 特别是烟气处理技术不断进步(见表 5), 余热利用系统和尾气处理系统得到进一步完善, 垃圾焚烧炉又取得新发展。

表 5 垃圾焚烧烟气排放水平

单位(mg/Nm³, PCDD+PCDF 为 TE ng/Nm³)

年代	烟气污染控制技术	烟尘	HCl	SO ₂	NO _x	CO	Hg	PCDD/ PCDF
1900	无	5000	1000	500	300	1000	0.5	
<1970	旋风除尘	500	1000	500	300	1000	0.5	
1970-1980	静电除尘	100	1000	500	300	500	0.5	
1980-1990	静电+烟气污染控制技术	50	100	200	300	100	0.2	10
1990 后	最好的烟气污染控制技术	<10	<10	<50	<100	<10	0.05	<0.1

摘自《Studies In Environmental Science 67 Municipal Solid Waste Incinerator Residues》1997

进行余热利用的垃圾焚烧厂并被称为“能源回收工厂”(Waste -To-Energy)。目前, 全世界年生活垃圾焚烧量约为 1.1 亿 t, 绝大部分的垃圾焚烧处理分布于发达国家。日本现有焚烧厂约 1800 座, 年焚烧处理量近 4 千万 t, 是世界上生活垃圾焚烧处理规模最大的国家。美国生活垃圾年焚烧量仅次于日本, 约为 3600 万 t, 焚烧处理的比例约为 17%。日本、瑞士等国焚烧法已占城市生活垃圾处理总量的 60%~70%以上。我国台湾地区从九

十年代初开始建设垃圾焚烧厂，到 1998 年已建成 9 座垃圾焚烧厂，总设计处理规模达 9900t/d，计划到 2001 年将建成 21 座垃圾焚烧厂，总设计处理规模将达 21900t/d，焚烧处理比例将达 70%。

5 垃圾焚烧处理二噁英控制

氯化二苯二噁英和氯化二苯呋喃（PCDD 和 PCDF）统称为二噁英（Dioxin）。氯化二苯二噁英和氯化二苯呋喃是最具毒性的物质，其基本结构相同（两个苯环），包含碳 C，氢 H，氧 O 和氯 Cl，但在氯原子的数量和结构上各不相同。氯化二苯二噁英有 75 个同分异构体，而氯化二苯呋喃有 135 个同分异构体。在七十年代，意大利 Seveso 灾难之后不久，人们开始对城市生活垃圾焚烧厂的二噁英和呋喃的排放状况进行检测。一些科学家公布了对荷兰三家城市生活垃圾焚烧厂的初步研究结果，研究表明其烟气和飞灰中的二噁英成分普遍存在，随后出现了大量有关“城市生活垃圾焚烧和二噁英”的研究工作。他们认为，二噁英形成的先决条件是有机化合物，即所谓原子团、氧、氯以及热能。

城市生活垃圾焚烧厂烟气中二噁英排放当量（根据 Eadon 的计算方法）限定值，各国标准不一致（见表 6），对于新建的垃圾焚烧厂，最严格的标准是限制在 0.1 ng/Nm³ 以下。

表 6 新建垃圾焚烧厂二噁英(Dioxin)排放标准

单位：ng/Nm³

美国1991 (7%O ₂)	加拿大1989 (11%O ₂)	欧共体1994 (11%O ₂)	瑞士1992	日本1997 (12%O ₂)
30	0.5	0.1	-	0.1~5.0

注：美国、日本对处理规模不同的焚烧厂烟气排放指标要求不同，对于已运行的垃圾焚烧厂烟气二噁英(Dioxin)排放指标，美国要求 30~125 ng/Nm³，日本为 80ng/Nm³。

当垃圾被运往焚烧厂时，二噁英含量就已达 50 ng/ Nm³。此外，垃圾在焚烧过程中也会产生二噁英。因此，要采取有效措施消除它，特别是要消除在焚烧后期形成的二噁英，并至少应控制在最低水平。要控制二噁英形成，其有效方式是控制垃圾的焚烧过程(资料来源：UNIDO/ESETRC Municipal Solid Waste Management China Training Manuals March 1, 2000)。

(1)尽可能完善焚烧控制系统。改进自动焚烧控制系统, 尽量减少焚烧供风量, 充分燃烧飞灰, 炉渣和烟气 (离开焚烧炉膛的未燃尽的有机物质的成分越少, 二噁英再次形成的数量也就越少); 燃烧烟气与氧气充分混合, 并使燃烧烟气尽可能长时间地处于高温之下。

(2)避免灰尘积淀。焚烧炉膛、锅炉和静电除尘器上积淀的灰尘含有二噁英。应尽量减少燃烧区灰尘沉积, 可采取某些预防性措施如经常清灰。

(3)焚烧炉内抑制生成二噁英和呋喃。二噁英的形成需要铜化合物一类的重金属催化剂, 这些催化剂在烟气和扬尘里普遍存在。通过增加抑制剂(抑制或延缓化学反应), 可以大大降低二噁英和呋喃的合成速度。因此, 垃圾焚烧炉或锅炉内需要添加这种抑制剂, 三乙胺、尿素和氨水等都是抑制剂。冯诺尔 (Von Roll) 公司研究结果表明, 通过添加氨水到焚烧炉内, 二噁英的生成量可降低 90%。

(4)二噁英在焚烧后, 一部分被烟尘颗粒吸收, 一部分存在于烟气中。被吸入到烟尘颗粒的那部分要进行清除, 焚烧飞灰必须进行特别处理。清除烟气中的二噁英的有效方式是: 采用活性炭吸附和通过脱除氮氧化物催化装置脱除。在烟气洗涤之前添加活性炭还是有可能获得高达 90% 的去除率。通过脱除氮氧化物催化装置也可减少二噁英产生。对这种现象的一种可能性解释是, 当氨水与 NO_x 之间的反应刚一结束, 烟气中的有机化合物和氧气之间的催化反应就开始了。换言之, 在焚烧后的低温阶段, 二噁英被催化反应而脱除。脱除率受催化剂影响, 一般在 90%和 95%之间。

采用现有的先进的烟气处理工艺, 垃圾焚烧厂排出的烟气二噁英量是非常低的。例如奥地利维也纳生活垃圾焚烧厂 (Spittelau), 德国玻恩垃圾焚烧厂 (MVA Bonn)、及瑞士卢赛恩 (Luzern) 垃圾焚烧厂等, 目前其烟气中二噁英实际排放值只有 0.03 ng/Nm^3 , 远低于允许排放值。

参考文献 (略)