

21世纪高等学校规划教材

固体废物 污染控制工程

GUTI FEIWU

WURAN KONGZHI GONGCHENG

张小平 编著

第二版



化学工业出版社

21 世纪高等学校规划教材

固体废物污染控制工程

第二版

张小平 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以固体废物处理与利用流程为主线,从其源流、集运、预处理、处理、处置和资源化等方面,充分体现“循环经济(3R)”的理念,重点介绍固体废物物流过程的基本概念、基本理论和基本方法。总结了固体废物的来源、组成和性质;概括了固体废物的产生方式、污染途径和控制方法;介绍了固体废物的物理预处理技术(压实、破碎、分选等),热化学处理技术(焚烧、热解等)和生物处理技术(堆肥化等),固体废物填埋处置技术以及固体废物的资源利用技术等,包括过程原理、设备特征、技术方法和工艺流程。章后附有思考题和计算题。

本书适于环境工程、环境科学及相关专业的本科生、研究生作为教材使用,也可供相关学科的技术人员和管理人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

固体废物污染控制工程/张小平编著. —2版. —北京:
化学工业出版社, 2010.8
21世纪高等学校规划教材
ISBN 978-7-122-09497-1

I. 固… II. 张… III.
学校-教材 IV. X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 179592 号

责任编辑:唐旭华 满悦芝
责任校对:蒋 宇

文字编辑:刘莉珺
装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张18½ 字数473千字 2010年8月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:36.00元

版权所有 违者必究

第二版前言

本教材第一版于2004年8月由化学工业出版社出版，许多高校将其作为本科生教材使用，迄今已多次重印。近年来，由于固体废物处理过程及其污染控制技术飞速发展，许多新的研究成果不断涌现，书中的内容已不能较好地满足教学需要，调整书中的结构和补充新的内容已成必然。为此，编者在收集我校及兄弟院校修订意见的基础上，结合高等院校固体废物课程大纲和教学改革要求，对本书第一版进行了修订。

在保持第一版特色的基础上，删除了部分较陈旧或冗长的内容，更新和补充了新的内容和研究结果。主要做了如下修订：尽量使用最新的数据、图、表等代替原版陈旧的部分；删除了第一版第5章的全部内容，增加电子废弃物的处理与资源化作为新的一章；着力加强教材基本理论与实践过程的结合，达到在提高学生的理论水平的同时，增强实际创新能力；为了使读者了解我国最新的有关固体废物处理处置的法律法规、技术政策、规范和标准，补充了附录的内容。

需要新版电子课件的读者，可联系：cipedu@163.com。

虽然作了这些努力，书中疏漏仍在所难免，请读者批评指正。

编 者

2010年6月于华南理工大学

第一版前言

随着我国经济、社会的快速发展，固体废物产生量逐年剧增，其污染也日趋严重，对其污染的控制和治理亦受到全社会的普遍关注。为适应这一形势，全国各类高校的环境科学和环境工程专业均开设了有关固体废物的课程，并将其作为本科和研究生的专业主干课程之一。虽然近年来出版了不少固体废物方面的书籍，但相对于废水、废气的处理和控制在而言，固体废物污染控制方面的教材无论是从科技水平的发展，还是学科体系的建立都相对滞后，也不适应专业课程建设和教学的需要。因此，编写一本《固体废物污染控制工程》教材十分必要。

本教材有以下特点：首先，编排更适合教学的需要，更符合人们思维的习惯，即以处理方法而不是以处理对象为次序进行编排，这是因为尽管处理对象千差万别，但各单元在方法学上的相对稳定性和独立性却是永恒不变的，即各处理单元具有共同的规律，如焚烧单元，其过程机理不因处理对象不同而变化；其次，按照“循环经济”的概念，对于固体废物的污染防治，无论是无害化还是资源化，都应首先追溯到废物产生过程的“始端”进行减量，对于“末端”无可避免地产生的少量废物才予以处理和利用，即固体废物的处理应是一个从“始”到“终”的全流程闭路循环的污染防治过程（这也是本书名称的由来），而以往的处理处置、资源化，更多的是针对已经产生的固体废物的处理和利用；第三，作为教材，书中有较多的例题、思考题和计算题，使学生更易掌握所学的内容。

全书共12章，第1、2章主要介绍固体废物的来源、组成、性质、分类方法以及固体废物污染对环境和对人类健康的影响和危害，固体废物物流特征及其与循环经济的关系；第3章介绍了城市固体废物、工业固体废物和危险废物收集、运输及贮存方式，以及城市固体废物收集方案和运输路线的初步设计；第4章主要介绍固体废物压实、破碎及分选技术的基本原理和方法，以及各种方法的优缺点和适用范围；第5~10章作为本教材的重点部分，介绍了固体废物处理过程的化学法（中和、氧化还原等）、生物法（堆肥化）、热化学法（焚烧、热解等）、固化法的基本概念、基本原理和基本方法，以及污泥处理、处置和资源化的技术原理和方法特点；第11章重点介绍固体废物地质处置的基本概念、土地填埋的原理和方法、垃圾渗滤液处理技术和方法以及填埋气利用技术和方法；第12章主要介绍了城市和工业固体废物资源化的途径和方法，为城市和工业固体废物的综合开发和循环利用奠定基础。总之全书力求体现固体废物“循环”处理的思想，从其源流、集运、预处理、处理、处置和资源化等方面，重点介绍固体废物物流过程的基本概念、基本理论和基本方法，以及固体废物污染控制的过程原理、设备特征、技术方法和工艺流程。

本书内容已制作成用于多媒体教学的电子课件，并将免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用。如有需要可联系：manyz@cip.com.cn。

本教材是在我们已有讲义《固体废物工程》的基础上编写而成的，全书由张小平编写，由萧锦教授审定。研究生张丽、黄伟海、黄华存、王智慧、孔丽春等绘制了书中部分图表，在此对他们的辛勤劳动表示感谢。另外，本书在编写过程中参考了大量资料和许多学者的研究结果，编者对他们表示谢意。

固体废物相对于废水、废气来说，其污染控制还比较落后，技术也相对不够成熟，加之编者水平所限，时间仓促，资料收集不够全面，书中的不足和疏漏甚至错误在所难免，敬请专家、同行和广大读者批评指正。

编 者

2004 年 6 月于华南理工大学

目 录

1 绪论	1
1.1 固体废物的定义、特性和分类	1
1.2 城市固体废物的来源、组成和性质	3
1.3 工业固体废物的来源、类型及性质	9
1.4 危险废物的来源及特性	13
1.5 固体废物产生量及治理现状简介	16
1.6 固体废物污染的环境影响	21
1.7 固体废物的处理处置技术	23
1.8 固体废物的管理体系	24
思考题	25
2 固体废物物流特征与循环经济发展模式	26
2.1 固体废物物流特征	26
2.2 循环经济	27
2.3 循环经济应用于城市垃圾的处理	29
思考题	30
3 固体废物的收集、运输和贮存	31
3.1 工业固体废物的收集、运输	31
3.2 城市垃圾的收集、运输及贮存	31
3.3 危险废物的收集、运输及贮存	43
思考题	44
4 固体废物的预处理技术	45
4.1 固体废物的压实	45
4.2 固体废物的破碎	47
4.3 固体废物的分选	49
4.4 分选回收工艺系统	56
思考题	58
5 固体废物的焚烧处理技术	59
5.1 概述	59
5.2 燃烧反应过程的动力学规律	63
5.3 燃烧反应计算	73

5.4	焚烧系统	83
5.5	垃圾焚烧技术工艺	89
5.6	固体废物焚烧过程中烟气的产生及其控制	93
5.7	垃圾焚烧过程的环保标准	102
	思考题	103
	计算题	103
6	固体废物的热解处理技术	104
6.1	概述	104
6.2	热解原理	105
6.3	典型固体废物的热解	108
6.4	欧美日等国热解处理技术的发展计划	109
6.5	流态化热解过程简介	113
	思考题	118
7	固体废物的堆肥化处理技术	119
7.1	概述	119
7.2	堆肥化的基本原理	121
7.3	好氧堆肥化的基本工艺过程	128
7.4	堆肥化处理过程的几种组合形式	129
7.5	影响固体废物堆肥化的主要因素	129
7.6	堆肥化设备及工艺系统	136
7.7	堆肥腐熟度的评价指标	139
7.8	好氧堆肥化的未来展望	140
	思考题	141
	计算题	142
8	固体废物的固化处理技术	143
8.1	固化处理的原理和步骤	143
8.2	固化处理的基本方法	144
	思考题	146
9	污泥的处理处置技术	147
9.1	概述	147
9.2	污泥处理技术	157
9.3	污泥的处置技术	169
9.4	污泥的资源化技术	171
	思考题	178
10	固体废物的最终处置技术	179
10.1	概述	179

10.2	填埋场的基本构造和类型·····	185
10.3	填埋场中的生物降解行为·····	187
10.4	渗滤液的产生及控制·····	191
10.5	填埋场气体的产生与控制·····	195
10.6	矿化垃圾的开采与利用·····	198
	思考题·····	198
	计算题·····	199
11	固体废物的资源化 ·····	200
11.1	概述·····	200
11.2	城市固体废物的资源化·····	201
11.3	工业固体废物的资源化·····	219
11.4	典型固体废物的综合利用·····	233
11.5	农业固体废物的处理利用·····	240
	思考题·····	241
12	电子废弃物的处理与资源化 ·····	242
12.1	电子废弃物及其生态环境问题·····	242
12.2	电子废弃物环境管理与处理现状·····	245
12.3	电子废弃物的资源化回收方法·····	247
12.4	废弃印刷线路板资源化·····	251
	思考题·····	254
附录	·····	255
附录 1	中华人民共和国固体废物污染环境防治法 ·····	255
附录 2	城市生活垃圾处理及污染防治技术政策 ·····	263
附录 3	生活垃圾焚烧污染控制标准 ·····	265
附录 4	生活垃圾填埋场污染控制标准 ·····	269
附录 5	废弃家用电器与电子产品污染防治技术政策 ·····	277
附录 6	生活垃圾处理技术指南 ·····	281
参考文献	·····	286

1 绪 论

1.1 固体废物的定义、特性和分类

1.1.1 固体废物的定义及范畴

于2004年12月29日颁布、自2005年4月1日起施行的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中表明,固体废物,是指在生产、生活和其他活动中产生的丧失原有利用价值或者虽未丧失利用价值但被抛弃或者放弃的固态、半固态和置于容器中的气态的物品、物质以及法律、行政法规规定纳入固体废物管理的物品、物质。

根据物质的存在状态划分,废物包括固态、液态和气态废弃物质。在液态和气态废弃物中,若其污染物质混掺在水和空气中,直接或经处理后排入水体或大气,习惯上,将它们称为废水和废气,纳入水环境或大气环境管理范畴;而对于其中不能排入水体的液态废物和不能排入大气的置于容器中的气态废物,因其具有较大的危害性,则将其归入固体废物管理体系。

1.1.2 固体废物的特点和特征

(1) “资源”和“废物”的相对性

从固体废物定义可知,它是在某一时间和地点丧失原有利用价值甚至未丧失利用价值而被丢弃的物质,是在一定时间放错地方的资源。因此,此处的“废”,具有明显的时间和空间的特征。

① 从时间方面看 固体废物仅仅相对于目前的科技水平还不够高、经济条件还不允许的情况下暂时无法加以利用。但随着时间的推移,科技水平的提高,经济的发展,资源滞后于人类需求的矛盾将日益突出,今天的废物势必会成为明日的资源。

② 从空间角度看 废物仅仅相对于某一过程或某一方面没有使用价值,但并非在一切过程或一切方面都没有使用价值,某一过程的废物,往往会成为另一过程的原料。例如,煤矸石发电、高炉渣生产水泥、电镀污泥中回收贵金属等。

事实上,进入经济体系中的物质,仅有10%~15%以建筑物、工厂、装置器具等形式积累起来,其余都变成了所谓废物。因此固体废物成为一类量大而面广的新的资源将是必然趋势。“资源”和“废物”的相对性是固体废物最主要的特征。

(2) 成分的多样性和复杂性

固体废物成分复杂、种类繁多、大小各异,既有无机物又有有机物,既有非金属又有金属,既有有味的又有无味的,既有无毒物又有有毒物,既有单质又有合金,既有单一物质又有聚合物,既有边角料又有设备配件。其构成可谓五花八门、琳琅满目。

(3) 危害的潜在性、长期性和灾难性

固体废物对环境的污染不同于废水、废气和噪声。它呆滞性大、扩散性小，它对环境的影响主要是通过水、气和土壤进行的。其中由于污染成分在环境介质中的迁移、转化使其危害更大并在较短时间内难以发现，如浸出液在土壤中的迁移，是一个比较缓慢的过程，其危害可能在数年以致数十年后才能呈现。从某种意义上讲，固体废物，特别是有害废物对环境造成的危害可能要比水、气造成的危害严重得多。

(4) 污染“源头”和富集“终态”的双重性

废水和废气既是水体、大气和土壤环境的污染源，又是接受其所含污染物的环境。固体废物则不同，它们往往是许多污染成分的终极状态。例如一些有害气体或飘尘，通过治理，最终富集成废渣；一些有害溶质和悬浮物，通过治理最终被分离出来成为污泥或残渣；一些含重金属的可燃固体废物，通过焚烧处理，有害金属浓集于灰烬中。但是，这些“终态”物质中的有害成分，在长期的自然因素作用下，又会转入大气、水体和土壤，又成为大气、水体和土壤环境污染的“源头”。

1.1.3 固体废物的分类

分类是任何一门科学研究的基础工作，是对事物的深刻认识，固体废物的科学分类对其进行深入研究以及处理、处置和资源化利用具有重要意义。

固体废物按组成可分为有机废物和无机废物；按形态可分为固态、半固态和液（气）态废物；按污染特性可分为危险废物和一般废物；按来源分为工业固体废物、矿业固体废物、农业固体废物、有害固体废物和城市垃圾。

表 1-1 固体废物的分类、来源和主要组成物

城市生活垃圾	居民生活	指日常生活过程中产生的废物。如食品垃圾、纸屑、衣物、庭院修剪物、金属、玻璃、塑料、陶瓷、炉渣、碎砖瓦、废器具、粪便、杂品、废旧电器等
	商业、机关	指商业、机关日常工作过程中产生的废物。如废纸、食物、管道、碎砌体、沥青及其他建筑材料、废汽车、废电器、废器具，含有易爆、易燃、腐蚀性、放射性的废物，以及类似居民生活垃圾栏内的各类废物
	市政维护与管理	指市政设施维护和管理过程中产生的废物。如碎砖瓦、树叶、死禽死畜、金属、锅炉灰渣、污泥、脏土等
工业固体废物	冶金工业	指各种金属冶炼和加工过程中产生的废弃物。如高炉渣、钢渣、铜铅锍渣、赤泥、废矿石、烟尘、各种废旧建筑材料等
	矿业	指各类矿物开发、利用加工过程中产生的废物。如废矿石、煤矸石、粉煤灰、烟道灰、炉渣等
	石油与化学工业	指石油炼制及其产品加工、化学品制造过程产生的固体废物。如废油、浮渣、含油污泥、炉渣、碱渣、塑料、橡胶、陶瓷、纤维、沥青、油毡、石棉、涂料、化学药剂、废催化剂和农药等
	轻工业	指食品工业、造纸印刷、纺织服装、木材加工等轻工部门产生的废弃物。如各类食品糟渣、废纸、金属、皮革、塑料、橡胶、布头、线、纤维、染料、刨花、锯末、碎木、化学药剂、金属填料、塑料填料等
	机械电子工业	指机械加工、电器制造及其使用过程中产生的废弃物。如金属碎料、铁屑、炉渣、模具、砂芯、润滑剂、酸洗剂、导线、玻璃、木材、橡胶、塑料、化学药剂、研磨料、陶瓷、绝缘材料以及废旧汽车、冰箱、微波炉、电视、电扇等
	建筑业	指建筑施工、建材生产和使用过程中产生的废弃物。如钢筋、水泥、黏土、陶瓷、石膏、砂石、砖瓦、纤维板等
	电力工业	指电力生产和使用过程中产生的废弃物。如煤渣、粉煤灰、烟道灰等
危险废物	核工业、化学工业、医疗单位、科研单位等	主要来自于核工业、核电站、化学工业、医疗单位、制药业、科研单位等产生的废弃物。如放射性废渣、粉尘、污泥等，医院使用过的器械和产生的废物、化学药剂、制药厂废渣、废弃农药、炸药、废油等
农业固体废物	种植业	指作物种植生产过程中产生的废弃物。如稻草、麦秸、玉米秸，根茎、落叶、烂菜、废农膜、农用塑料、农药等
	养殖业	指动物养殖生产过程中产生的废弃物。如畜禽粪便、死禽死畜、死鱼死虾、脱落的羽毛等
	农副产品加工业	指农副产品加工过程中产生的废弃物。如畜禽内容物、鱼虾内容物、未被利用的叶叶、菜梗和菜根、秕糠、稻壳、玉米芯、瓜皮、果皮、果核、贝壳、羽毛、皮毛等

我国 1995 年 10 月 30 日和 2004 年 12 月 29 日颁布的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中，均将固体废物分为：①城市固体废物或城市生活垃圾（Municipal Solid Waste, MSW）；②工业固体废物（Industrial Solid Wastes or Commercial Solid Wastes, ISW）；③危险废物（Hazardous Wastes）三大类。本书以此分类原则，主要就上述三类固体废物作以介绍。将固体废物类型、来源和组成总结于表 1-1 中，其中农业固体废物量大面广，在我国其产量已超过工业固体废物的产生量，故也将其列入表中予以介绍。

1.2 城市固体废物的来源、组成和性质

1.2.1 城市固体废物的来源及特点

1.2.1.1 定义

城市固体废物或城市生活垃圾是指在城市居民日常生活中或为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废物。如厨余物、废纸、废塑料、废织物、废金属、废玻璃陶瓷碎片、粪便、废旧电器、庭院废物等。

1.2.1.2 来源

城市居民家庭、城市商业、餐饮业、旅馆业、旅游业、服务业、市政环卫业、交通运输业、文教卫生业和行政事业单位、工业企业单位以及水处理污泥等。

1.2.1.3 分类（类型）

城市固体废物种类繁多、组成复杂、性质多样，因而也有多种分类方法，主要有如下几种分类。

（1）按城市垃圾的性质分

① 可燃烧垃圾和不可燃烧垃圾；②高热值垃圾与低热值垃圾；③有机垃圾和无机垃圾；④可堆肥垃圾和不可堆肥垃圾。①和②可作为热化学处理的判断指标，而③和④可作为垃圾能否以堆肥化和其他生物处理的判断依据。

（2）按资源回收利用和处理处置方式分

① 可回收废品；②易堆腐物；③可燃物；④无机废物。可为资源回收利用和选择合适的处理处置方法提供依据。

（3）按垃圾产生或收集来源分

① 食品垃圾（厨房垃圾），居民住户排出垃圾的主要成分。②普通垃圾（零散垃圾），纸类、废旧塑料，罐头盒等。以上两项包括无机炉灰，统称为家庭垃圾，是城市垃圾可回收利用的主要对象。③庭院垃圾，包括植物残余、树叶及其他清扫杂物。④清扫垃圾：指城市道路、桥梁、广场、公园及其他露天公共场所由环卫系统清扫收集的垃圾。⑤商业垃圾：指城市商业、服务网点、营业场所产生的垃圾。⑥建筑垃圾：指建筑物、构筑物兴建、维修施工现场产生的垃圾。⑦危险垃圾，医院传染病房、放射治疗系统、试验室等场所排放的各种废物。⑧其他垃圾，以上所列以外的场所排放的垃圾。为城市垃圾分类收集、加工转化、资源回收以及选择合适的处理处置方法提供依据。

1.2.1.4 特点

（1）增长速度快，产生量不均匀

随着全球经济的持续发展和商品消费的增加，城市垃圾的产生和排放量也随之剧增。

① 全球 垃圾产量以 1%~3% 的增长率增长。如美国城市垃圾增长比人口增长快 3 倍，

约为 5%；发展中国家 6%~8% 的年增长率。

② 中国 近年来我国国民经济持续快速发展，城市化进程加快，人民生活水平不断提高。垃圾的产量和增长率也逐年增加。自 1979 年以来，中国城市生活垃圾以每年约 9% 的增长率增长。目前，垃圾的年产量 1.4~1.5 亿吨，占全世界产量的 1/4 多，人均日产垃圾的 1~1.2kg；清运量方面，1980 年，城市垃圾总清运量为 3132 万吨；1990 年，为 6770 万吨；1999 年，全国城市垃圾清运量达到 1.4 亿吨，2008 年，655 座城市生活垃圾清运量 1.54 亿吨。

总体来讲，城市固体废物的增长率，发展中国家高于发达国家。发达国家约 2%~5%；发展中国家约 6%~8%；中国平均约 9%。

产生量的不均匀性是指，城市固体废物的产生量在一年中随季节，一天中随时间的变化明显不同，并呈现一定规律。随季节不同，与燃料结构等有关；而一天中的波动，与城市垃圾的收集时间、收集方式和居民生活习惯有关。

(2) 成分复杂、多变，有机物含量高

因各地气候、季节、生活水平与习惯、能源结构的不同，使垃圾的成分和种类多种多样，不均匀，而且产量变化幅度也很大。例如：①燃烧构成改变，油改汽，无机炉灰大为减少；②冷冻食品、成品、半成品、净菜上市，食品垃圾也逐年降低；③包装材料的改变，纸、塑料、金属、玻璃则大量增加。

城市固体废物有机物含量高的特点亦很明显。以广州市区为例，通过对 16 个调查点垃圾成分的调查表明，广州市垃圾主要成分有：①厨余物：均值在 56%~71%，大部分为直径>15mm 的植物茎叶、果皮及较小的动植物碎屑；②易燃成分（竹木、纸类、布织物、橡塑类）：市区垃圾的易燃组分比例在 22%~33%。

(3) 主要成分为碳，其次为氧、氢、氮、硫等

分析测试表明：C 10%~20%；O 10%~20%；H 1%~3%；N 0.5%~1.0%；S 0.1%~1.2%。

(4) 处理处置方式目前仍以填埋为主

① 国外 1991 年美国约 70%、英国 90%、意大利 90%、加拿大 82%、法国 48%、德国 60%、荷兰 50% 的垃圾靠填埋处理。到 1995 年，填埋比例有所下降，分别为：美国 63%、英国 80%、意大利 74%、加拿大 80%、法国 45%、德国 46%、荷兰 45%、日本 20%。

② 国内 中国内陆城市垃圾基本上采用填埋处理（>70%），收集方式基本上是混合收集，使堆肥和焚烧的发展受到影响，大部分城市甚至采用堆放和简易填埋处理，乱堆乱放还相当普遍。

在 1990 年前，全国城市垃圾处理率还不足 2%。进入 20 世纪 90 年代以后，我国城市垃圾处理水平不断提高。1999 年，我国设市城市为 668 座，全国城市生活垃圾年清运 1.14 亿吨，共有垃圾处理厂（场）696 座，垃圾处理能力达到 $27.68 \times 10^4 \text{ t/d}$ ，垃圾处理率 63.4%。2008 年，全国 655 座设市城市生活垃圾清运 1.54 亿吨，集中处理量约 1 亿吨，集中处理率约 67%。

近 10 年来我国城市垃圾处理方式有明显的变化，特别是先进的垃圾处理技术逐步得到应用。例如，在近几年建设的许多填埋场中，一些城市如杭州、广州、深圳等对填埋气体进行回收利用，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 月广州大田山利用填埋气体发电机组投入运行，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。至 2008 年底全国有生活垃圾卫生填埋场 407 座。

垃圾焚烧处理从无到有，不断发展。深圳市于 1985 年从日本三菱重工业公司成套引进两台日处理能力为 150t·d⁻¹的垃圾焚烧炉，成为我国第一座现代化垃圾焚烧厂。1994 年底开始扩建的三号炉，结合国家“八五”攻关计划，完成了 3 号炉国产化工程，设备国产化水平达到 80%以上，在技术性能方面达到或超过了原引进设备的水平，为我国大型垃圾焚烧设备国产化打下了基础。至 2008 年底全国城市生活垃圾焚烧厂有 74 座。

堆肥处理是我国城市垃圾处理使用最早也是在早期阶段使用最多的方式。堆肥处理主要采用低成本堆肥系统，大部分垃圾堆肥处理场采用敞开式静态堆肥。“七五”和“八五”期间，我国相继开展了机械化程度较高的动态高温堆肥研究和开发，并取得了积极成果。20 世纪 90 年代中期先后建成的动态堆肥场典型工程有常州市环境卫生综合厂和北京南宫堆肥厂。目前全国有 20 余处堆肥场在运转。但近年来，由于受化学肥料的冲击，堆肥的销售量逐年下降，市场前景欠佳。有的堆肥场甚至将肥料送至填埋场处理。至 2008 年底全国城市生活垃圾堆肥厂共 14 座。

1.2.2 城市固体废物的组成

1.2.2.1 总体情况

城市固体废物的组成受多种因素影响。主要有：①自然环境；②气候条件；③城市发展规模；④居民生活习性（食品结构）；⑤经济发展水平等。

一般来说，垃圾成分工业发达国家，有机物（如厨余、纸张、塑料、橡胶）多，无机物少；不发达国家，无机物多，有机物少；在我国，南方城市较北方城市，有机物多，无机物少。经济发达、生活水平较高的城市，有机物含量较高。以燃煤为主的北方城市，受采暖期影响，垃圾中煤渣、沙石所占的份额较多。表 1-2 为我国部分城市固体废物的组成。

表 1-2 我国部分城市的城市垃圾的组成 单位：%（质量分数）

城市	有 机 废 物					无 机 废 物			
	厨余	废纸	纤维	竹、木制品	塑料、橡胶	废金属	玻璃、陶瓷	煤灰、水泥、碎砖	其他
北京	39.00	18.18	3.56		10.35	2.96	13.02	10.93	
上海	70.00	8.00	2.80	0.89	12.00	0.12	4.00	2.19	
广州	63.00	4.80	3.60	2.80	14.10	3.90	4.00	3.80	
深圳	58.00	7.91	2.80	5.19	13.70	1.20	3.20	8.00	
天津	50.11	5.53	0.68	0.74	4.81				
南京	52.00	4.90	1.18	1.08	11.20	1.28	4.09	20.64	3.00
无锡	41.00	2.90	4.98	3.05	9.83	0.90	9.47	25.29	2.58
常州	48.00	4.28	1.70	1.01	10.22	1.10	5.80	25.09	3.00
南通	40.05	4.20	1.72	1.31	8.90	0.82	5.10	34.40	3.50
合肥	44.97	3.57	2.98	2.52	10.22	0.80	4.24	28.40	2.30
九江	47.27	4.18	1.93	1.00	12.50	0.54	3.50	27.08	2.00
武汉	39.16	4.33	1.33	3.20	7.50	0.69	6.55	32.74	4.50
宜昌	29.54	1.22	0.73	1.05	1.18	0.41	8.03	55.84	2.00
重庆	38.76	1.04	0.97	1.58	9.10	0.53	9.03	37.99	1.00
惠州	20.00	2.10	2.12	3.27	12.00	2.91	2.20	25.40	
肇庆	50.00	2.10	1.89	4.10	12.60	2.50	4.35	22.46	
清远	53.00	2.00	1.51	3.20	11.12	2.40	2.10	24.67	

1.2.2.2 中国城市生活垃圾成分的地域性变化

中国地域辽阔，南北温差大，东西经济发展不平衡，燃料结构差别大，生活习惯也有很大不同，因此，中国城市生活垃圾的成分随地域而变化。如在燃气区，城市生活垃圾中的有机物占 72.12%，高于无机物（占 16.84%）和其他成分（占 12.04%）；在燃煤区，有机物

只占 25.09%，无机物却占 70.76%，远远高于燃气区，其他成分只占 4.52%；在发达地区，纸张在城市生活垃圾中所占比例很大，但在欠发达地区食品是生活垃圾的主要成分。

(1) 南北差异

表 1-3 是 2000 年对 73 座城市生活垃圾成分按南、北方分别进行统计的结果。从表 1-3 可明显地看出，南方城市生活垃圾中的有机物（特别是植物）和可回收物所占比例高于北方城市。其中，塑胶类（即塑料、橡胶类，下同）所占比例比北方城市高约 1 倍；而灰土等无机物的含量则要低于一半以上。北方城市冬季均需采暖，在燃煤区还需通过燃煤来供暖，由于家庭采暖产生的大量煤灰全部进入生活垃圾中，因此是造成其成分与南方城市存在差异的主要原因。

表 1-3 2000 年不同地域城市生活垃圾成分统计结果 单位：%（质量分数）

地区	城市数量/座	可回收物					有机物			无机物		其他
		纸类	塑料橡胶	织物	玻璃	金属	竹木	植物	动物	灰土	砖瓦陶瓷	
南方	41	6.88	13.76	2.13	2.37	0.80	3.01	48.15	2.29	12.73	3.42	4.46
北方	32	6.22	7.40	2.38	2.25	1.50	2.62	28.25	3.08	28.51	7.19	10.60

注：“其他”是指除前面 10 类组分外的物质，其中南、北方的划分标准按冬季是否有采暖设施考虑。

(2) 城市差异

不同规模的城市，其生活垃圾的成分也存在差异。大城市居民的生活和消费水平比中小城市高，城市居民燃气化率也较高，因而大城市与中小城市之间的垃圾成分存在一定差异。表 1-4 是 2000 年不同规模城市生活垃圾成分的统计结果。可以看出，大城市的渣石、灰土等无机物含量明显低于中小城市，仅为中小城市的 30% 左右；而有机物和可回收物，尤其是可燃物的含量明显高于中小城市（如纸类、塑胶等），可回收物所占比例则高达 30% 左右，比中小城市高 50% 以上。

表 1-4 2000 年不同规模城市生活垃圾成分 单位：%（质量分数）

城市规模	城市数量/座	可回收物					有机物			无机物		其他
		纸类	塑料橡胶	织物	玻璃	金属	竹木	植物	动物	灰土	砖瓦陶瓷	
大城市	13	7.87	12.07	1.99	3.29	0.83	3.19	53.17	1.51	11.42	2.65	2.01
中小城市	54	4.29	7.88	2.33	2.40	1.46	2.11	33.40	4.14	28.86	8.62	4.51

注：大城市是指市区人口大于等于 50×10^4 人的城市，中小城市是指市区人口小于 50×10^4 人的建制市。

1.2.3 城市固体废物的性质

1.2.3.1 城市固体废物的物理性质

城市固体废物的物理性质与其组成密切相关，组成不同，物理性质亦不同。其物理性质一般用组分、含水率和容重来表示。

(1) 组分

城市固体废物的组分以各成分质量占新鲜垃圾的质量分数表示。有湿基率（%）（含水分）和干基率（%）（去掉水分，如烘干）。

当垃圾的含水率已知时，用下式换算

$$G = a(1 - W) \times 100\% \quad (1-1)$$

式中，G 为新鲜湿垃圾中某成分的质量分数，%；a 为烘干垃圾中同类组分的质量分数，%；W 为垃圾的含水率，%。

(2) 含水率

含水率为单位质量垃圾的含水量，用质量分数（%）表示

$$W = \frac{A-B}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, A 为湿垃圾试样的原始质量; B 为烘干后垃圾质量。

(3) 容重

城市固体废物在自然状态下, 单位体积的质量称为垃圾的容重, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.2.3.2 城市固体废物的化学性质

城市固体废物的化学性质对选择加工处理和回收利用工艺十分重要。表示城市固体废物化学性质的特征参数有: 挥发分, 灰分、灰分熔点, 元素组成, 固定碳及发热值。

(1) 挥发分 (V_s)

挥发分也叫挥发性固体含量, 它是反映垃圾中有机物含量近似值的指标参数, 它以垃圾在 600°C 温度下的灼烧减量作为指标。

其计算式为

$$V_s = \frac{W_3 - W_4}{W_3 - W_1} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中, V_s 为垃圾的挥发性固体含量, %; W_1 为坩埚的质量; W_3 为烘干的垃圾质量 (W_2) + 坩埚的质量 (W_1); W_4 为灼烧残留量 ($W_{\text{残}}$) + 坩埚质量 (W_1)。

即

$$V_s = \frac{W_2 - W_{\text{残}}}{W_2} \times 100\%$$

测定方法与步骤:

① 用天平称取一定量的烘干试样 W_2 , 装入干坩埚内

$$W_2 + W_1 = W_3$$

② 将坩埚置于马弗炉内, 在 600°C 温度下, 灼烧 2h。

③ 取出后, 置于干燥器中冷却到室温再称重

$$W_1 + W_{\text{残}} = W_4$$

有的方法规定, 灼烧温度为 700°C , 有机质和结合水均消失。

(2) 灰分及灰分熔点

① 灰分 A 灰分指垃圾中不能燃烧也不挥发的物质, 即灰分是反映垃圾中无机物含量的参数, 常用 A 表示。其数值即是灼烧残留量 $W_{\text{残}}(\%)$, 也就是

$$\begin{aligned} W_4 - W_1 &= W_{\text{残}} = A \\ A &= 1 - V_s \end{aligned} \quad (1-4)$$

② 熔点 T_A 熔点与灰分的化学组成相关。主要决定于 Si、Al 等元素的含量。

(3) 元素组成

元素组成主要指 C、H、O、N、S 及灰分的含量 (%)。

① 意义 测知垃圾的化学元素组成, 可以: a. 估算垃圾的发热值, 确定焚烧的适用性; b. 估算生化需氧量 (BOD)、好氧堆肥化的适用性; c. 选择垃圾的处理工艺。

② 测定 组成复杂, 需用到常规的化学分析方法、仪器分析及先进的精密测量仪器。

如 C、H 联合测定采用碳、氢全自动测定仪; N 测定用凯氏消化蒸馏法; P 用硫酸过氯酸铜蓝比色法; K 采用火焰光度法; 金属元素采用原子吸收分光光度法。由此可见, 垃圾化学元素测定较之物理组成分析更难、更复杂, 普及也较困难。

据国外资料报道,经元素分析法测得的垃圾化学组成(质量分数,%)大致为:C 10%~20%;H 1%~3%;O 10%~20%;N 0.5%~1.0%;S 0.1%~1.2%;灰分 10%~25%;水分 40%~60%;热值 2930~5020kJ·kg⁻¹ (700~1200kcal·kg⁻¹)。

(4) 热值

① 定义 单位质量的垃圾完全燃烧所放出的热量,称为垃圾的热值。可用氧弹量热计来测定垃圾的热值。热值分为高位热值 Q_H (粗热值) 和低位热值 Q_L (净热值)。

高位热值是物料完全燃烧产生的全部热量,包括了全部氧化释放的化学能和燃烧产生的水蒸气消耗的汽化热。因此,用氧弹量热计测定的热值为 Q_H 。

实际燃烧过程中,温度高于 100℃,水蒸气不会凝结,因而这部分汽化潜热不能加以利用。因此,高位热值扣除水蒸气消耗的汽化热,即得 Q_L 。

② 热值计算 前面已讲过,当已知垃圾的元素组成时,可求得热值。可用下式(经验式)表示

a. 门氏公式

$$Q_H = 4.187[81C + 300H - 26(O - S)] \quad (1-5)$$

$$Q_L = 4.187[81C + 300H - 26(O - S) - 6(W + 9H)] \quad (1-6)$$

式中, C、H、O、S 分别为 C、H、O、S 的质量分数,%; W 为垃圾的含水率,%。

b. Q_L 与 Q_H 间的关系

$$Q_L = Q_H - 25.12(9H + W) \quad (1-7)$$

$$Q_L = Q_H - 2420 \left[H_2O + 9 \left(H - \frac{Cl}{35.5} - \frac{F}{19} \right) \right] \quad (1-8)$$

式中, H_2O 为焚烧产物中水的质量分数,%; H, Cl, F 分别为废物中 H, Cl, F 含量的质量分数,%。

c. 已知塑料含量

$$Q_L = [4400(1 - \alpha) + 8500\alpha]R - 600W \quad (1-9)$$

式中, R 为垃圾中可燃成分含率,%; α 为可燃成分中塑料的百分数,%; W 为垃圾的含水率,%。城市垃圾的热值及元素分析值见表 1-5。

表 1-5 城市垃圾热值及元素分析典型值

成 分	惰性残余物(燃烧后)		质量 /kg	热值 /(kJ·kg ⁻¹)	质 量 分 数/%				
	范围/%	典型值			C	H	O	N	S
食品垃圾	2~8	5	15	4650	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4
废纸	4~8	6	40	16750	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2
废纸板	3~6	5	4	16300	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2
废塑料	6~20	10	3	32570	60.0	7.2	22.8	—	—
破布等	2~4	25	2	17450	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15
废橡胶	8~20	10	0.5	23260	78.0	10.0	—	2.0	—
破皮革	8~20	10	0.5	17450	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4
园林废物	2~6	4.5	12	6510	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3
废木料	0.6~2	1.5	2	18610	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1
碎玻璃	6~99	98	8	140					
罐头盒	90~99	98	6	700					
非铁金属	90~99	96	1	—					
铁金属	94~99	98	2	700					
土、灰、砖	60~80	70	4	6980	26.3	3.0	2.0	0.5	0.3
城市垃圾			100	10470					