

固体废物处理与资源化丛书

# 城市固体废弃物 能源化利用技术

解强 主编 边炳鑫 赵由才 副主编



Chemical Industry Press

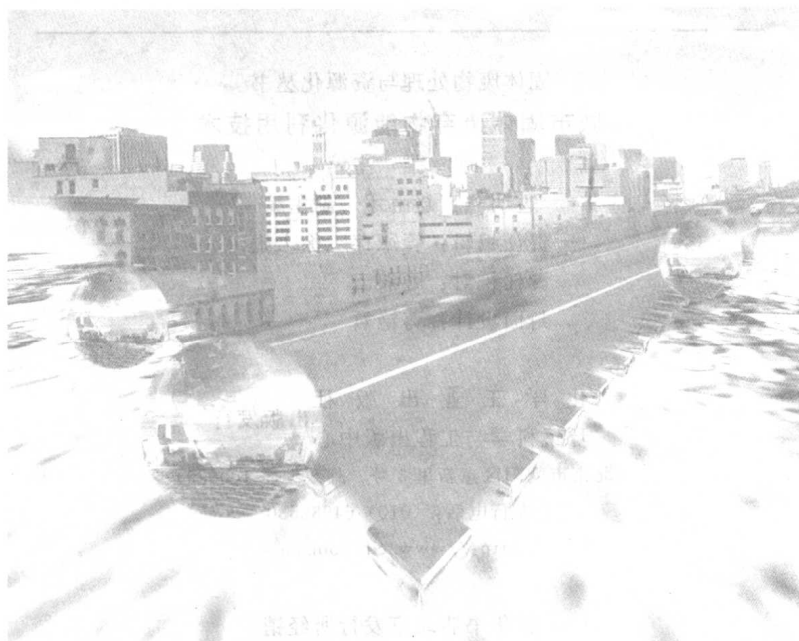


化学工业出版社  
环境科学与工程出版中心

固体废物处理与资源化丛书 (京)

# 城市固体废弃物 能源化利用技术

解强 主编 边炳鑫 赵由才 副主编



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

地址：北京市东城区东黄城根北街2号 邮编：100021

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

城市固体废弃物资源化利用技术/解强主编. —北京:  
化学工业出版社, 2004. 4  
(固体废物处理与资源化丛书)  
ISBN 7-5025-5456-4

I. 城… II. 解… III. 城市-固体废物-废物综合利用 IV. X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 039888 号

---

固体废物处理与资源化丛书  
**城市固体废弃物资源化利用技术**  
解 强 主编  
边炳鑫 赵由才 副主编  
责任编辑: 管德存 徐 娟  
责任校对: 顾淑云  
封面设计: 蒋艳君

化 学 工 业 出 版 社  
环境科学与工程出版中心 出版发行  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话: (010) 64982530  
<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销  
北京管庄永胜印刷厂印刷  
三河市延风装订厂装订  
开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$  字数 434 千字  
2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5025-5456-4/X·447  
定 价: 45.00 元

---

版权所有 违者必究  
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 序

随着我国国民经济和社会的发展，固体废物产生量在迅速增加。在我国的城镇中，以生活垃圾为主的固体废物的收集、运输、处理与处置、分类与分选、资源化循环利用等，不仅是当地政府的重要日常工作，也是当今社会可持续发展的核心内容。

固体废物处理与资源化，首先强调的是资源化，即物质的循环使用。所谓固体废物的资源化，一方面是固体废物通过简单加工后的再利用，另一方面是通过功能的改变而得到再利用。通过简单维修或转换使用者，不能认为是固体废物的资源化过程。分类的固体废物资源化过程应该比混合的各种固体废物资源化过程更容易实现。因此，实行固体废物分类收集、运输、储存和加工，是资源化的最佳路径，应该持之以恒地加以实施。

固体废物的处理，一般是指不考虑再利用的无害化方法，如生活垃圾的填埋与焚烧、放射性废物的固化与稳定化、危险废物的去毒化与安全填埋等。有机可降解废物的堆肥既是一种固体废物的处理方法，也是一种资源化方法。

近二十年来，我国在固体废物处理与资源化方面发展较快，越来越多的高等院校和科研单位开始进行固体废物的研究工作，许多企业也积极介入固体废物处理与资源化行业，从业人员数量迅速增加。同时，我国政府和企业固体废物处理与资源化方面的投入逐年增加，研究开发了一系列新技术、新方法，在传统技术的改造和改良方面也有进展。另外，国外大量相关企业也在我国开展业务，在管理和技术方面积累了许多经验教训。因此，全面总结和介绍国内外固体废物处理与资源化技术，对于发展我国的环境保护事业，具有重要的意义。

本丛书反映了国内外固体废物处理与资源化领域的发展现状和趋势，内容覆盖了生活垃圾、危险废物、一般工业废物、建筑废物、放射性废物等的处理与资源化各个方面，适于从事固体废物研究、开发、教学、培训和管理等的人员阅读参考。

赵由才

2004年1月

# 前 言

城市是社会发展和进步、人类文明进化的重要载体，也是人类社会活动的聚集地和主要场所，同时，城市消耗了 60% 的自来水、76% 的木材、60%~70% 的能源，也“贡献”了全球 78% 的碳排放总量和其他大多数污染物，其中包括城市固体废弃物（municipal solid waste, MSW）。

随着我国城市数量的增加、规模的扩大和人口的增多，城市垃圾的发生量以年平均增长率 8.98% 的速度迅猛增加。数量庞大的城市垃圾已对城市及城市周围的生态环境构成日趋严重的威胁。此外，垃圾爆炸事故不断发生，对人民的生命财产也造成了重大损失。为了贯彻可持续发展战略，落实“中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书”，必须对城市固体废弃物进行处理。

城市固体废弃物造成的生态与环境的危害是明显而巨大的，但从物质的观点，固体废弃物又是一种资源，而且是总量不断增长的资源。固体废弃物处理的目标是减容（量）、无害化和资源化，其中无害化（不产生二次污染）是处理技术的核心。在各种技术和方案中，城市固体废弃物能源化利用技术（目前主要是焚烧）由于具有减容、减量程度高，可同时获得能源等优势，已处于固体废弃物处理技术的中心地位，在保护环境、资源，促进可持续发展等方面均具有重大意义。

广义上的城市固体废弃物能源化利用技术，就是通过化学或生物转换，将垃圾中所含的能量释放出并加以利用技术的总称。目前开发、使用的城市固体废弃物能源化利用技术主要是垃圾的热处理技术（焚烧、热解、气化等）和生物转换技术（主要是填埋气利用）。

由于历史的原因，我国垃圾焚烧，特别是垃圾高效、洁净能源化利用技术的发展起步较晚。然而，随着人民生活质量的不断提高，我国垃圾的成分发生很大变化，热值大幅度增大，这为垃圾的能源化利用提供了物质基础。近年来在相当多的城市相继建设了生活垃圾的焚烧厂，更多的城市出现了建设垃圾焚烧厂的要求。目前，国内外对城市固体废弃物能源化利用技术的研究、开发和应用方兴未艾。

迄今，国内外有关城市固体废弃物处理与利用方面的图书中仅有少量的书籍涉及能源化利用技术，并且基本上是局限于生活垃圾的焚烧。而对于能达到城市固体废弃物高效洁净能源化利用目的的其他技术，如垃圾的热解、气化、填埋气利用等，尚未有专门图书面世。此外，各种文献里关于能源化利用技术的资料也有许多谬误，有些甚至混淆了垃圾“热解”和“气化”的概念。为此，我们结合近年来在城市固体废弃物能源化利用技术研究方面的成果，并搜集、归纳、整理了国内外最新研究进展，撰写了《城市固体废弃物能源化利用技术》一书，对城市固体废弃物能源化利用技术的概念、原理、工艺、设备等进行了系统的叙述。希望本书的出版对我国城市固体废弃物能源化利用技术的发展有一定的推动作用。

本书在编写过程中借鉴了一些能源化工的观点与方法。城市固体废弃物作为能源利用时间与煤在许多方面都有相似性：均为组成复杂、并随着空间和时间变化很大的固体含能物质；在能源化利用过程中都有可能产生严重的污染。因此，利用已较为成熟可靠的洁净煤技术（Clean Coal Technology, CCT），在考虑城市固体废弃物特性的基础上，把它们“嫁接”到

城市固体废弃物资源化利用技术的研发上,就具有技术上的可能性、技术开发周期的快速性和经济上的优越性。这是本书编写过程中的基本指导思想。

本书由解强主编,边炳鑫、赵由才副主编。具体分工为:解强(第一章,第二章第二节,第三章第五节,第四章第四节,第五章第一节、第二节,第六章第三节,第七章第一节、第二节,第八章第五节、第六节,第十章第二节、第五节);张宪生(第二章第一节、第三节,第五章第三节);边炳鑫(第三章第一节、第二节,第七章第三节,第八章第一节,第十章第一节、第三节);厉伟(第三章第三节、第四节,第四章第一~三节);赵由才(第五章第四节,第十章第四节、第六节);张沛君(第五章第五节部分,第六章第一节);焦学军(第五章第五节部分,第六章第五节);沈吉敏(第六章第二节、第五节,第八章第二~四节);舒新前(第九章)。全书由解强统稿。

近年来,城市固体废弃物资源化利用技术的研究与开发是国内外固体废弃物处理和处置领域研究的焦点、投资的热点,已取得了极大的进步,各种成果层出不穷。限于作者水平,对这些新成果的介绍可能挂一漏万,疏漏也在所难免,恳请读者不吝赐教。在本书最后整合、统稿的过程中,得到了刘伟、孙慧、杨丽丽、刘昕等同志的大力帮助,在此表示感谢。同时,对书中所引用文献的作者也表示深深的谢意。

本书的编写和出版受到建设部(垃圾衍生燃料(RDF)热解与气化的技术与工艺研究[03-2-055])、哈尔滨市科委(城市垃圾高效洁净资源化利用关键技术与设备[2003AA4CS128])的部分资助。

解 强

2004年3月于北京

## 编委会主任

赵由才

## 编委会成员

(按姓氏汉语拼音排列)

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 边炳鑫 | 柴晓利 | 陈彬  |
| 方建民 | 黄仁华 | 李广科 |
| 龙燕  | 牛冬杰 | 宋立杰 |
| 王罗春 | 吴军  | 张华  |

## 内 容 提 要

全书共分十章。第一章规范了以热加工为主的城市固体废物能源化利用技术的概念及其范畴,提出了固体废物能源化利用技术的基本原理;第二章讨论了城市固体废弃物的组成与特性,并研究了影响城市生活垃圾产生量及组成变化的因素;第三章论述了城市固体废物能源化利用前所进行的预处理的方法、原理、工艺、设备;第四章介绍了垃圾衍生燃料的概念、分类、生产工艺与研究进展;第五至七章分别介绍了城市生活垃圾或垃圾衍生燃料焚烧、热解、气化的概念、原理、工艺、设备,对这些技术的研究进展与发展趋势也进行了较全面的论述;第八章对填埋气产生的机制、能源化利用的途径与方法进行了系统描述,对填埋气的转化和化学品制备的方法与工艺也有所涉及;第九章前瞻了一些具有很应用前景的垃圾低温处理及能源化利用方法,对其原理、垃圾处理的方法和工艺进行了简单介绍;第十章专门讨论了城市固体废物能源化利用过程中主要污染物的种类、产生机制和控排方法。

本书是国内首部城市固体废物能源化利用技术方面的专门图书,内容系统完整。适合环境保护、能源化工等领域的工程技术人员、研究人员、大专院校相关专业的师生阅读使用。

# 目 录

|                               |    |                                |    |
|-------------------------------|----|--------------------------------|----|
| <b>第一章 概论</b> .....           | 1  | 三、压实流程 .....                   | 37 |
| 第一节 概述 .....                  | 1  | <b>第三节 垃圾的破碎</b> .....         | 38 |
| 第二节 城市固体废弃物处理处置方法 .....       | 1  | 一、概述 .....                     | 38 |
| 一、生活垃圾填埋技术 .....              | 2  | 二、固体废弃物的机械强度和破碎方法 ..           | 38 |
| 二、生活垃圾堆肥技术 .....              | 3  | 三、破碎比和破碎段 .....                | 39 |
| 三、生活垃圾焚烧技术 .....              | 3  | 四、破碎流程 .....                   | 40 |
| 四、生活垃圾处理技术比较 .....            | 4  | 五、破碎设备 .....                   | 40 |
| 五、我国城市生活垃圾处理处置现状 .....        | 5  | 六、特种破碎方法与工艺 .....              | 46 |
| 第三节 城市固体废弃物资源化利用 .....        | 10 | <b>第四节 垃圾的分选</b> .....         | 48 |
| 一、城市固体废弃物资源化利用的含义 ..          | 10 | 一、基本原理 .....                   | 49 |
| 二、城市生活垃圾热处理技术 .....           | 11 | 二、手工拣选 .....                   | 50 |
| 三、城市生活垃圾填埋场填埋气资源化             |    | 三、筛分 .....                     | 51 |
| 利用 .....                      | 11 | 四、重力分选 .....                   | 57 |
| 第四节 城市固体废弃物资源化利用的技术           |    | 五、磁选 .....                     | 64 |
| 构成 .....                      | 11 | 六、电选 .....                     | 68 |
| 一、引言 .....                    | 11 | 七、浮选 .....                     | 69 |
| 二、城市固体废弃物高效洁净资源化              |    | 八、其他分选方法 .....                 | 72 |
| 利用的技术构成 .....                 | 12 | <b>第五节 城市生活垃圾预处理集成工艺</b> ..... | 74 |
| 三、城市固体废弃物资源化利用的技术             |    | 一、概述 .....                     | 74 |
| 路线 .....                      | 15 | 二、垃圾焚烧预处理工艺 .....              | 74 |
| <b>第二章 城市生活垃圾的组成与性质</b> ..... | 16 | 三、垃圾有用物质分选回收系统 .....           | 75 |
| 第一节 城市生活垃圾的组成及分析 .....        | 16 | 四、原生城市生活垃圾分离系统 .....           | 75 |
| 一、城市生活垃圾的组成 .....             | 16 | <b>第四章 垃圾衍生燃料的制备技术与</b>        |    |
| 二、城市生活垃圾的工业分析 .....           | 18 | <b>工艺</b> .....                | 78 |
| 三、城市生活垃圾的元素分析 .....           | 21 | 第一节 概述 .....                   | 78 |
| 第二节 城市生活垃圾的性质 .....           | 26 | 第二节 RDF 的分类及性质 .....           | 78 |
| 一、城市生活垃圾的物理特性 .....           | 26 | 一、RDF 的概念 .....                | 78 |
| 二、城市生活垃圾的化学性质 .....           | 28 | 二、RDF 的分类 .....                | 78 |
| 三、城市生活垃圾的生化性质 .....           | 30 | 三、RDF 的性质和特点 .....             | 79 |
| 第三节 城市生活垃圾的产生量及其影响            |    | 四、RDF 的质量标准 .....              | 80 |
| 因素 .....                      | 31 | <b>第三节 RDF 的生产工艺</b> .....     | 80 |
| 一、城市生活垃圾的产生量 .....            | 31 | 一、概述 .....                     | 80 |
| 二、影响城市生活垃圾产生量的因素 .....        | 33 | 二、散状 RDF 制备工艺 .....            | 82 |
| <b>第三章 城市固体废弃物的预处理</b> .....  | 35 | 三、粉末 RDF 制备工艺 .....            | 83 |
| 第一节 概述 .....                  | 35 | 四、干燥成型 RDF 的加工工艺 .....         | 83 |
| 第二节 垃圾的压实 .....               | 36 | 五、化学处理 RDF 的加工工艺 .....         | 83 |
| 一、概述 .....                    | 36 | 六、液态垃圾衍生燃料的制备工艺 .....          | 85 |
| 二、压实设备 .....                  | 36 | <b>第四节 RDF 制备技术实例</b> .....    | 86 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 一、日本 RDF 制备技术 .....         | 86         |
| 二、美国 RDF 技术 .....           | 91         |
| 三、我国的 RDF 制备技术 .....        | 92         |
| 四、RDF 制备新工艺 .....           | 92         |
| <b>第五章 垃圾的焚烧 .....</b>      | <b>101</b> |
| 第一节 概述 .....                | 101        |
| 一、国外垃圾焚烧技术的发展与应用            |            |
| 现状 .....                    | 101        |
| 二、我国垃圾焚烧技术的发展与应用            |            |
| 现状 .....                    | 102        |
| 三、垃圾焚烧技术的特点 .....           | 102        |
| 第二节 焚烧的基本原理 .....           | 103        |
| 一、基本概念 .....                | 103        |
| 二、焚烧过程 .....                | 107        |
| 三、热重法研究垃圾的燃烧特性 .....        | 109        |
| 四、焚烧产物、焚烧效果评价与标准 .....      | 111        |
| 五、城市生活垃圾焚烧影响因素 .....        | 113        |
| 六、垃圾焚烧热平衡及热效率 .....         | 116        |
| 第三节 焚烧设备 .....              | 118        |
| 一、垃圾焚烧方式 .....              | 118        |
| 二、焚烧炉 .....                 | 121        |
| 三、国内制造的垃圾焚烧炉 .....          | 128        |
| 四、主要垃圾焚烧炉比较 .....           | 129        |
| 第四节 垃圾焚烧系统与工艺 .....         | 129        |
| 一、垃圾焚烧处理的原则流程 .....         | 129        |
| 二、城市生活垃圾焚烧厂系统构成 .....       | 130        |
| 三、垃圾焚烧厂的类型 .....            | 133        |
| 四、城市垃圾-煤流化床混烧工艺 .....       | 134        |
| 第五节 城市生活垃圾焚烧厂实例 .....       | 137        |
| 一、深圳市垃圾焚烧厂 .....            | 137        |
| 二、浦东垃圾焚烧厂 .....             | 139        |
| 三、上海江桥生活垃圾焚烧厂 .....         | 141        |
| <b>第六章 城市生活垃圾热解技术 .....</b> | <b>145</b> |
| 第一节 概述 .....                | 145        |
| 一、引言 .....                  | 145        |
| 二、城市生活垃圾热解技术的发展 .....       | 145        |
| 第二节 热解的基本原理 .....           | 147        |
| 一、基本概念 .....                | 148        |
| 二、热解过程参数控制 .....            | 154        |
| 三、热解动力学分析 .....             | 157        |
| 第三节 热解工艺及设备 .....           | 159        |
| 一、热解工艺分类 .....              | 159        |
| 二、常用热解设备 .....              | 160        |
| 第四节 垃圾热解工程实例 .....          | 163        |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 一、废塑料的热解 .....          | 163        |
| 二、污泥的热解 .....           | 163        |
| 三、新日铁垃圾热解熔融系统 .....     | 165        |
| 四、Purox 系统 .....        | 165        |
| 五、Torrax 系统 .....       | 166        |
| 六、Occidental 系统 .....   | 168        |
| 七、Landgard 系统 .....     | 169        |
| 八、Garrett 系统 .....      | 169        |
| 九、Battelle 系统 .....     | 170        |
| 第五节 垃圾热解产物加工 .....      | 171        |
| 一、甲烷转换 .....            | 171        |
| 二、甲醇转换 .....            | 174        |
| 三、氨的转换 .....            | 174        |
| <b>第七章 垃圾的气化 .....</b>  | <b>175</b> |
| 第一节 概述 .....            | 175        |
| 第二节 垃圾气化基本原理 .....      | 176        |
| 一、固体燃料的气化原理 .....       | 176        |
| 二、气化方式 .....            | 177        |
| 三、垃圾气化工艺流程 .....        | 181        |
| 第三节 垃圾气化新工艺 .....       | 182        |
| 一、生活垃圾气化熔融技术 .....      | 182        |
| 二、生活垃圾直接气化熔融技术 .....    | 185        |
| <b>第八章 城市生活垃圾填埋气能源化</b> |            |
| <b>利用 .....</b>         | <b>187</b> |
| 第一节 概述 .....            | 187        |
| 一、城市生活垃圾填埋气能源化利用的       |            |
| 意义 .....                | 187        |
| 二、国外城市生活垃圾填埋气能源化        |            |
| 利用概况 .....              | 188        |
| 三、我国城市生活垃圾填埋气能源化        |            |
| 利用现状与趋势 .....           | 189        |
| 第二节 填埋气的产生机理 .....      | 190        |
| 一、填埋气的产生过程 .....        | 190        |
| 二、填埋气发酵 .....           | 191        |
| 三、填埋气发酵的生化反应过程 .....    | 193        |
| 四、甲烷形成理论 .....          | 196        |
| 五、厌氧降解的反应热力学 .....      | 198        |
| 六、厌氧降解的动力学 .....        | 199        |
| 七、影响垃圾降解的因素 .....       | 202        |
| 第三节 填埋气的组成 .....        | 203        |
| 第四节 填埋气的产生量及影响因素 .....  | 204        |
| 一、影响填埋气产生量的因素 .....     | 205        |
| 二、提高产气的方法及技术 .....      | 209        |
| 三、填埋气产生量的估算 .....       | 210        |

|                      |     |                        |     |
|----------------------|-----|------------------------|-----|
| 第五节 填埋气的收集及预处理 ..... | 213 | 一、城市固体废物资源化利用过程        |     |
| 一、填埋气的收集 .....       | 213 | 污染物的种类 .....           | 240 |
| 二、填埋气的预处理 .....      | 216 | 二、城市固体废物资源化利用过程中       |     |
| 第六节 填埋气资源化利用 .....   | 218 | 污染物的产生机制 .....         | 241 |
| 一、概述 .....           | 218 | 三、城市固体废物资源化利用污染物       |     |
| 二、填埋气的燃烧 .....       | 220 | 控排原则 .....             | 243 |
| 三、填埋气资源化利用的方式 .....  | 223 | 第二节 城市固体废物资源化利用过程中     |     |
| 四、填埋气资源化利用的经济可行性     |     | 污染物控排技术 .....          | 243 |
| 分析 .....             | 226 | 一、煤-垃圾混烧过程气态污染物的自      |     |
| 第九章 城市固体废弃物的低温处理与    |     | 脱除 .....               | 243 |
| 资源化利用 .....          | 229 | 二、城市生活垃圾热解-气化新工艺 ..... | 245 |
| 第一节 低温等离子体处理 .....   | 229 | 第三节 酸性气体控制技术 .....     | 248 |
| 一、概述 .....           | 229 | 一、湿式洗气法 .....          | 248 |
| 二、低温等离子体反应器 .....    | 229 | 二、干式洗气法 .....          | 249 |
| 三、低温等离子体的发生及其作用      |     | 三、半干式洗气法 .....         | 249 |
| 机理 .....             | 230 | 四、酸性气体控制技术比较 .....     | 251 |
| 第二节 低温等离子体技术在固体废物    |     | 第四节 灰渣的处理与利用 .....     | 251 |
| 低温处理和资源化利用中的         |     | 一、灰渣的组成与特性 .....       | 251 |
| 应用 .....             | 232 | 二、灰渣中的重金属及其危害 .....    | 253 |
| 第三节 城市固体废弃物的中-低温催化   |     | 三、垃圾焚烧厂尾气中重金属的处理 ..... | 256 |
| 处理 .....             | 233 | 第五节 毒性有机氯化物的控排 .....   | 260 |
| 一、催化反应基础 .....       | 233 | 一、二噁英类物质 .....         | 260 |
| 二、催化剂在固体废物低-中温处理     |     | 二、垃圾焚烧过程二噁英的控排 .....   | 264 |
| 过程中的使用 .....         | 238 | 第六节 粒状污染物控制技术 .....    | 266 |
| 第十章 城市固体废物资源化利用      |     | 一、设备类型 .....           | 267 |
| 过程中的污染控制 .....       | 240 | 二、设备选择 .....           | 269 |
| 第一节 概述 .....         | 240 | 参考文献 .....             | 270 |

# 第一章 概 论

## 第一节 概 述

城市固体废弃物又称城市生活垃圾，是指城市居民在日常生活或为城市日常生活提供服务的活动中所产生的固体废物，其主要成分包括厨余物、废纸、废塑料、废织物、废金属、废玻璃陶瓷碎片、砖瓦渣土、粪便，以及废家用什具、废旧电器、庭院废物等。城市固体废弃物成分复杂、性质多变，并且受到垃圾产生地的地理位置、气候条件、能源结构、社会经济水平、居民消费水平、生活习惯等方面因素的影响。经济的快速发展和城市化进程的加快，使得我国城市数量不断增多、规模不断扩大，随之而来的是城市固体废弃物数量的急剧增长。城市固体废弃物的产生机制可用图 1-1 说明。

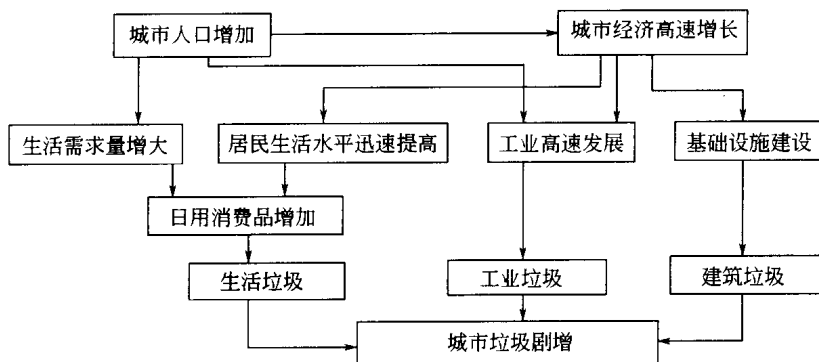


图 1-1 城市固体废弃物的产生机制

我国城市生活垃圾的发生量以年平均增长 8.98% 的速度迅猛增大，这些数量庞大的生活垃圾已对城市及城市周围的生态环境构成日趋严重的威胁：全国 668 座城市中至少有 200 个以上处于垃圾的包围之中；在城市周围历年堆存的生活垃圾量已达 60 亿吨，侵占了约 5 亿多平方米的地面；垃圾直接堆放和简易填埋场向大气释放大量的有害气体，其中还含有致癌、致畸物；垃圾在堆放腐败过程中产生大量酸性和碱性有机污染物，并溶解出垃圾中的重金属，形成有机物、重金属和病原微生物三位一体的污染源；此外，垃圾堆积场爆炸事故不断发生，造成重大损失。

为了贯彻可持续发展战略，落实《中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》，必须对城市固体废弃物进行处理。

## 第二节 城市固体废弃物处理处置方法

城市固体废弃物是一个长期存在的污染源，未经处理或处理不善会造成严重的大气污染、地下水污染、土壤污染，并使土地被垃圾占用、自然景观被破坏等问题日趋严重，危及人类的生存，其污染途径如图 1-2 所示。

固体废弃物处理的目标是减容、减量、无害化和资源化，其中无害化（不产生二次污

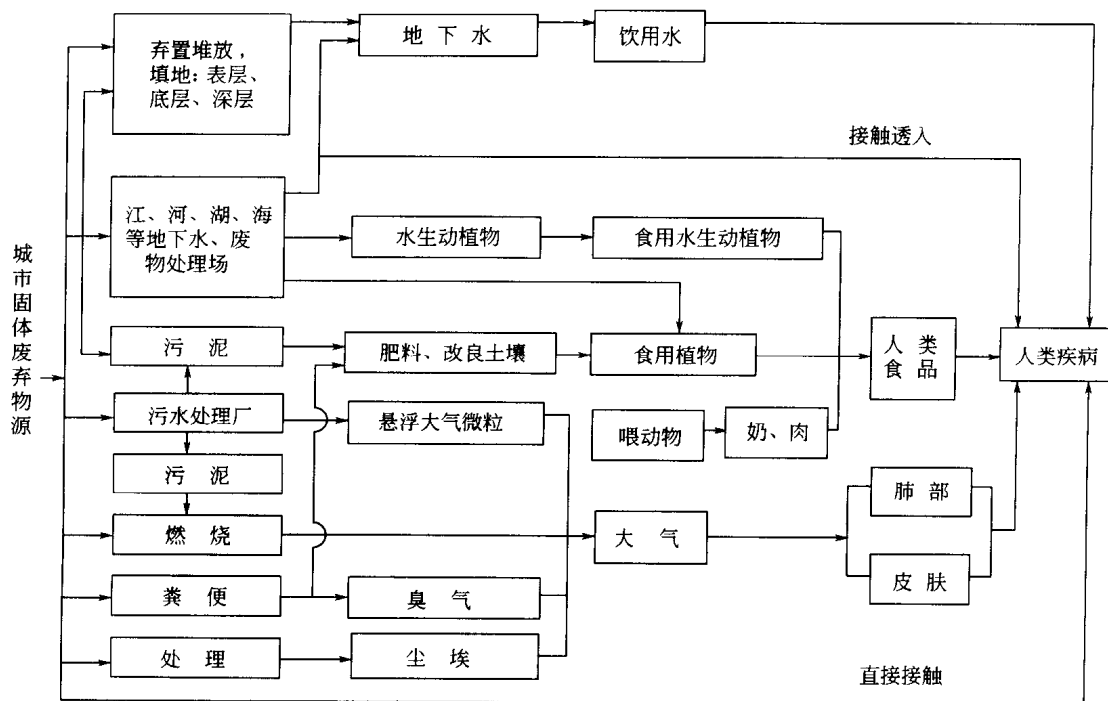


图 1-2 城市固体废弃物污染途径

染）是处理技术的核心。

目前，我国生活垃圾的处理方式主要有卫生填埋、堆肥、焚烧三种。这三种处理技术既可单独使用，也可组合使用。不同的城市或地区，由于具体情况各异，在实施过程中会采用不同的组合模式。

### 一、生活垃圾填埋技术

城市生活垃圾的填埋处置就是在陆地上选择合适的天然场所或人工改造出合适的场所，把垃圾用土层覆盖起来的方法。填埋处理是从堆放和回填处理方法发展起来的一项技术。

土地填埋可以有效地隔离污染物从而保护好环境，并能对填埋后的固体废弃物进行有效管理，这种方法在国内外应用都很普遍。其最大优点是工艺简单、成本低，能处置多种类型的固体废弃物；其致命的弱点就是场地处理和防渗施工比较难于达到要求。

填埋技术作为生活垃圾的最终处理方法，目前仍然是中国大多数城市解决生活垃圾出路的最主要方法。根据环保措施（主要有场底防渗、分层压实、每天覆盖、填埋气导排、渗滤水处理、虫害防治等）是否齐全、环保标准能否满足来判断，我国的生活垃圾填埋场可分为三个等级。

#### 1. 简易填埋场

这是近几十年来在我国一直沿用的填埋场，其特征是基本上没有考虑环保措施，也谈不上执行什么环保标准。目前我国相当数量的生活垃圾填埋场属于这个等级。这类填埋场也称为露天堆置场或简易堆场，它不可避免地会对周围的环境造成污染。

#### 2. 受控填埋场

这类填埋场目前我国也占较大比例，其特征是有部分环保措施，但不齐全；或者是虽然有比较齐全的环保措施，但不能全部达标。目前的主要问题集中在场底防渗、渗滤水处理

理、每天覆盖等不符合卫生填埋场的技术标准。

### 3. 卫生填埋场

发达国家普遍采用生活垃圾卫生填埋技术，其特征是既有完善的环保措施，又能满足环保标准。真正意义上的卫生填埋场目前我国较少，深圳下坪固体废弃物填埋场是其代表。该填埋场于 1997 年 10 月建成投产，每日填埋生活垃圾 1800~2000t，是目前国内少数几家铺设了人工合成防渗衬底的填埋场之一。

## 二、生活垃圾堆肥技术

利用微生物将城市生活垃圾中的有机物制成肥料的技术通常称为堆肥技术。城市生活垃圾中含有大量食品垃圾、纸制品、草木等有机物，这些有机物可以通过生物化学的方法使其转化为有用的产物。

堆肥过程是微生物对垃圾中的有机物实现降解的过程。如果在一定堆积状态的垃圾中含有适量的水分和有机质，则在一定的通风条件下或厌氧条件下，垃圾中的微生物会自然生长繁殖，并使有机物降解。各种微生物在生长繁殖过程中，在有氧条件下使有机物降解产生二氧化碳、水蒸气和其他物质，在厌氧条件下产生甲烷气和其他物质，并伴随着热量释放的过程，其最终产物均为富含腐殖质的有机肥料。

我国具有传统堆肥技术的悠久历史，目前我国常用的生活垃圾堆肥技术可分为两类。

### 1. 简易高温堆肥技术

这类技术的特征是工程规模较小、机械化程度低、采用静态发酵工艺、环保措施不齐全、投资及运行费用均较低。简易高温堆肥技术一般在中小型城市应用较多。

### 2. 机械化高温堆肥技术

这类技术的特征是：工程规模相对较大，机械化程度较高，一般采用间歇式动态好氧发酵工艺，有较齐全的环保措施，投资及运行费用均高于简易高温堆肥技术。

机械化高温堆肥技术在我国曾有辉煌时期，从 20 世纪 80 年代初期到 90 年代中期在北京、上海、天津、武汉、杭州、无锡、常州等城市均建有这类堆肥厂。

目前堆肥处理厂的堆肥化产品，存在两个主要问题：一是产品粗糙，堆肥中常夹杂有螺壳、玻璃、瓦砾、铁屑等碎块，影响农田应用；二是其中氮、磷、钾等营养元素低，在单施堆肥的情况下其增产效益无法与其他肥料相比，缺乏竞争能力。

## 三、生活垃圾焚烧技术

以过量的空气与被处理的生活垃圾在焚烧炉内进行氧化燃烧反应，在释放出能量的同时，垃圾中的有毒有害物质在高温下氧化、热解、燃烧而被破坏。垃圾焚烧可同时实现垃圾的减量化、无害化、资源化；经过焚烧处理，一般可实现垃圾体积减少 95%，并且可获得部分能量。

焚烧是一种热化学处理方法。垃圾焚烧是实现垃圾无害化和减量化的重要途径，因而自 20 世纪以来不少国家即采用焚烧方法处理垃圾。目前全世界已拥有 2000 多座现代化垃圾焚烧工厂，其中仅日本就有 300 多座，美国有 200 多座，西欧各国利用垃圾焚烧热能的工厂近 200 座，其中前联邦德国就有 40 多座。

统计表明，垃圾焚烧装置大多集中在发达国家，这一方面与国家工业科学技术水平、经济实力有关，另一方面也与垃圾的组成成分有关。

我国生活垃圾焚烧技术的研究起步于 20 世纪 80 年代中期，最早只在深圳等极少数城市

采用。随着我国东南沿海地区和部分中心城市的经济发展和生活垃圾低位热值的提高，为城市垃圾的焚烧处理提供了物质基础，近年来已有不少城市将建设垃圾焚烧厂提到了议事日程。

#### 四、生活垃圾处理技术比较

比较生活垃圾处理技术，应该综合分析该技术的可靠性、经济性、实用性和所能达到的减量化、无害化、资源化效果等。由于各地具体情况的差别及生活垃圾性质的差异，因而对生活垃圾处理技术的选择也难有统一模式，更无万全之策。表 1-1 是卫生填埋、焚烧和堆肥三种常用处理技术的比较。

表 1-1 卫生填埋、焚烧和堆肥三种常用处理技术的比较

| 比较项目          | 卫生填埋                               | 焚 烧                                       | 堆 肥                                            |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 技术可靠性         | 可靠,属常用处理方法                         | 较可靠,国外属成熟技术                               | 较可靠,我国有实践经验                                    |
| 工程规模          | 工程规模主要取决于作业场地、填埋库容、设备配制和使用年限,一般均较大 | 单台焚烧炉规格常用 100~500t/d,垃圾焚烧厂一般安装 2~4 台焚烧炉   | 静态或动态间歇式堆肥厂常用 100~200t/d,动态连续式堆肥厂可达 200~400t/d |
| 选址难度          | 较困难                                | 有一定难度                                     | 有一定难度                                          |
| 占地面积          | 大,500~900m <sup>2</sup> /t         | 较小,60~100m <sup>2</sup> /t                | 中等,110~150m <sup>2</sup> /t                    |
| 建设工期          | 9~12 月                             | 30~36 月                                   | 12~18 月                                        |
| 适用条件          | 进场垃圾的含水率小于 30%,无机成分大于 60%          | 进炉垃圾的低位发热量高于 4180kJ/kg,含水率小于 50%,灰分低于 30% | 垃圾中可生物降解有机物含量大于 40%                            |
| 操作安全性         | 较好,沼气导排要畅通                         | 较好,严格按照规范操作                               | 较好                                             |
| 管理水平          | 一般                                 | 很高                                        | 较高                                             |
| 产品市场          | 有沼气回收的卫生填埋场,沼气可用于发电等               | 热能或电能可为社会使用,需要政策支持                        | 落实堆肥产品市场有一定困难,需采取多种措施                          |
| 能源化           | 沼气收集后可用以发电                         | 垃圾焚烧余热可发电或综合利用                            | 采用厌氧消化系统,沼气收集后可发电或综合利用                         |
| 资源利用          | 填埋场封场并稳定后,可恢复土地利用或再生土地资源,陈垃圾可开采用   | 垃圾分选可回收部分物质,焚烧炉渣可综合利用                     | 垃圾堆肥产品可用于农业种植和园林绿化等,并可回收部分物资                   |
| 稳定化时间         | 10~15 年                            | 2h 左右                                     | 20~30d                                         |
| 最终处置          | 填埋本身是一种最终处置方式                      | 焚烧炉渣需进行处置,约占进炉垃圾量的 10%~15%                | 不可堆肥物需进行处置,约占进厂垃圾量的 30%~40%                    |
| 地表水污染         | 应有完善的渗滤水处理设施,但不易达标                 | 炉渣填埋时与垃圾填埋方法相仿,但水量小                       | 可能性较小,污水应经处理后排入城市管网                            |
| 地下水污染         | 场底需有防渗措施,但仍可能渗漏;人工衬底投资较大           | 可能性较小                                     | 可能性较小                                          |
| 大气污染          | 有轻微污染,可采用导气、覆盖、隔离带等措施控制            | 应加强对酸性气体、重金属和二噁英的控制和治理                    | 有轻微气味,应设除臭装置和隔离带                               |
| 土壤污染          | 限于填埋场区域                            | 灰渣不能随意堆放                                  | 需控制堆肥中重金属含量和 pH 值                              |
| 主要环保措施        | 场底防渗、每天覆盖、沼气导排、渗滤水处理等              | 烟气治理、噪声控制、灰渣处理、恶臭防治等                      | 恶臭防治、飞尘控制、污水处理、残渣处置等                           |
| 吨投资(不计征地费)    | 18~27 万元/t(单层合成衬底,压实机引进)           | 50~70 万元/t(余热发电上网,国产化率 50%)               | 25~36 万元/t(制有机复合肥,国产化率 60%)                    |
| 处理成本(不计折旧及运费) | 26~35 元/t                          | 50~80 元/t                                 | 35~50 元/t                                      |
| 处理成本(计折旧不计运费) | 35~55 元/t                          | 90~200 元/t                                | 50~80 元/t                                      |

续表

| 比较项目 | 卫生填埋                                        | 焚 烧                                                 | 堆 肥                                               |
|------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 技术特点 | 操作简单,适应性好,工程投资和运行成本均较低                      | 占地面积小,运行稳定可靠,减量化效果好                                 | 技术成熟,减量化和资源化效果好                                   |
| 主要风险 | 沼气聚集引起爆炸,场底渗漏或渗沥水处理不达标                      | 垃圾燃烧不稳定,烟气治理不达标                                     | 生产成本过高或堆肥质量不佳影响堆肥产品销量                             |
| 发展动态 | 准好氧或生态填埋工艺                                  | 热解或气化焚烧工艺                                           | 厌氧消化堆肥工艺                                          |
| 技术政策 | 卫生填埋是城市垃圾处理必不可少的最终处理手段,也是现阶段我国城市生活垃圾处理的主要方式 | 焚烧是处理可燃城市垃圾的有效方式,城市垃圾中可燃物较多、填埋场地缺乏和经济发达的地区可积极采用焚烧技术 | 堆肥是对城市垃圾中可生物降解的有机物进行处理和利用的有效方式,在堆肥产品有市场的地区应积极推广应用 |

从表 1-1 可以看出,采用堆肥和填埋处理城市垃圾,具有投资较少、处理费用低、可处理各种类型垃圾、操作简便等优势。然而,填埋法有场地建设与防渗施工难度大、填埋气利用困难的难题,并且由于垃圾填埋后产生的渗滤液可能对地下水造成长期严重的、难以完全预料的污染,目前发达国家趋于减少应用此法;堆肥处理的缺点是占地多、周期长、受环境(温度、湿度)影响,直接堆肥还有肥料质量差、有机质含量低、重金属含量高,污染农作物,进入人类的食物链,进而对人类造成危害。

垃圾焚烧由于具有减容减量程度高、可同时获得能源等优势,已处于垃圾处理技术的中心地位,目前在国内外得到越来越多的应用。工业发达的欧洲和美国、日本等国家和地区,城市垃圾经焚烧处理的比例高达 50%~70%,部分国家甚至超过 90%。

由于历史、经济发展水平等各方面的原因,垃圾填埋处理仍是目前我国主要的城市生活垃圾处理处置手段(图 1-3),堆肥占到了垃圾处理处置方法的 19%,焚烧法的应用正在逐渐推广。值得注意的是,由于填埋气是填埋场二次污染的主要来源之一,而填埋气本身含有较高的能量密度,最近对填埋气进行收集、能源化利用作为消除填埋场二次污染的手段得到充分的重视。

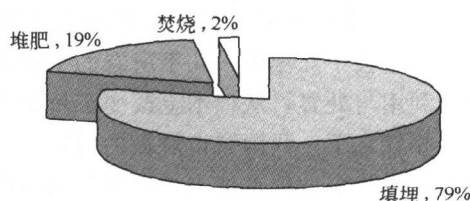


图 1-3 我国主要城市垃圾处理处置方法构成

## 五、我国城市生活垃圾处理处置现状

### 1. 我国城市生活垃圾的数量及变化特点

近 30 年来,我国城市生活垃圾产生量大幅度增加。自 1979 年以来,我国的城市生活垃圾平均以每年 8.98% 的速度增长,少数城市如北京的增长率达 15%~20%。目前我国城市生活垃圾清运量已达 1.18 亿吨。

我国城市生活垃圾在产量迅速增加的同时,垃圾构成及其理化问题也相应地发生了很大变化,垃圾构成有以下变化趋势:有机物增加、可燃物增多、可回收利用物增多、可利用价值增大。

### 2. 我国城市生活垃圾污染情况

生活垃圾未得到妥善处置,严重影响地表水、地下水的环境质量。每年全国有 7900 万吨生活垃圾简易填埋或露天堆放在城市郊区、江河沿岸,破坏城市(特别是城乡结合部)的自然景观,造成以下严重污染。

① 严重污染大气 垃圾露天堆放,大量氨、硫化物等有害气体释放。

② 严重污染水体 垃圾不但含有病原微生物,在堆放腐败过程中还会产生大量的酸性和碱性有机污染物,并将垃圾中的重金属溶解出来,形成有机物质、重金属和病原微生物三位一体的污染源,雨水淋入产生的渗滤液必然会造成地表水和地下水的严重污染。

③ 生物性污染 垃圾中有许多致病微生物,同时垃圾往往是蚊、蝇、蟑螂和老鼠的孳生地,这些必然危害着广大市民的身体健康。

④ 侵占大量土地 据初步调查,1998年全国668座城市中已有2/3被垃圾带所包围。全国垃圾存占地累计75万亩。

⑤ 垃圾爆炸事故不断发生 随着城市中有机物含量的提高和由露天分散堆放变为集中堆存,只采用简单覆盖易造成产生甲烷气体的厌氧环境,易燃易爆。

相当一部分“填埋场”未按技术施工,有的看起来比较正规,但却存在选址不当、没有铺设防渗层、渗滤液直排等问题;即便近几年新建成的填埋场,处理后的渗滤液排放超标也比较普遍。一些城市采用集中堆放或简易填埋方式处置城市垃圾,由于没有很好的压实机械,这些填埋场未达使用年限就填满封场。沿海省市垃圾填埋都很难再找到合适场地。许多城市缺乏资金,未能按标准要求建造填埋场地或焚烧设施,即使一次性的建设投资解决了,长期运行的费用也难以维持,因而也很难达到无害化处置目标。一些中小型焚烧厂的工艺不科学,运行工况不稳定,且没有烟气净化装置,达不到《生活垃圾焚烧污染控制标准》。监测数据表明,全国城市生活垃圾达到环保标准的无害化处理率不足15%。

### 3. 我国城市生活垃圾处理处置现状

在过去十几年中,几乎所有的工业化国家在城市垃圾的管理上,都在由单纯的处置转向综合利用与处置,从根本上改变了垃圾处置的内涵。

相较之下,我国城市垃圾的污染防治起步较晚。长期以来,我国城市垃圾的处理处置主要是以寻找合适地点加以“消纳”为目的。目前,我国城市垃圾处理的最主要方式是填埋,约占全部处理量的70%以上;其次是高温堆肥,约占20%;焚烧量甚微。截止至1999年,全国668个城市有垃圾处理厂696座。城市生活垃圾的处理率从1990年的2.3%增加到1999年的61.9%,但是真正达到环境无害化的部分还较低。

近年来随着我国经济的迅猛发展、经济实力的快速增长和人民生活水平的逐步提高,对城市生活垃圾的减量化、无害化、资源化处理和利用得到了各界的高度重视,取得了令人瞩目的高速发展。一些城市建成了一些大、中型城市垃圾卫生填埋场,如日处理量2000t的北京阿苏卫卫生填埋场;杭州、上海、深圳、广州等城市也都建成有城市垃圾填埋场。填埋容量的增加和使用年限的延长,以及填埋场防渗衬层质量的提高,使得填埋气的产生不但稳定、时间延长,而且有组织释放的气体所占比例增大,为填埋气的大规模回收利用提供了有利条件。在此基础上为沼气回收利用而必须增设气体收集和输送管网,以及发电设施所增加的额外投资,远小于沼气回收利用所带来的经济效益。如杭州天子岭垃圾填埋场和广州大田山填埋场的垃圾沼气发电项目已分别于1998年和1999年投产,产生较好的经济效益和环境效益。

我国垃圾焚烧供热、发电始于1986年深圳环卫综合处理厂的建成投产。一期工程为2×150t/d焚烧炉,每小时可提供20~26t压力为1.6MPa的饱和蒸汽,除一部分蒸汽经500kW饱和蒸汽汽轮发电机组发电自用外,剩余蒸汽外供给厂周围的用热企业。20世纪90年代后扩容至450t/d,并加装过热器为实现废能利用,提高蒸汽参数和增大汽轮发电机组系统,形成了三炉一机,最大发电能力为4000kW。近几年来,上海、北京、广州、宁波、珠海、北海也建成、运行了垃圾焚烧电厂。