

节 能 与 环 境 保 护 丛 书

城市垃圾的 处理与利用技术

安恩科 主编



化学工业出版社
环境·能源出版中心

节能与环境保护丛书

城市垃圾的处理与利用技术

安恩科 主编



化学工业出版社
环境·能源出版中心

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

城市垃圾的处理与利用技术/安恩科主编. —北京: 化学工业出版社, 2006. 4

(节能与环境保护丛书)

ISBN 7-5025-8496-X

I. 城… II. 安… III. ①城市-垃圾处理②城市-垃圾-废物综合利用 IV. X799.305

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 032425 号

节能与环境保护丛书

城市垃圾的处理与利用技术

安恩科 主编

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 汲永臻

责任校对: 周梦华

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13¼ 字数 322 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8496-X

定 价: 36.00 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

为了全面建设小康社会、不断开创中国特色社会主义事业的新局面，必须大力推进科技进步和创新，进一步发挥科学技术对经济社会全面发展的关键性作用。要大力发展高新技术和先进适用技术。要大力加强能源领域的科技进步和创新，提高我国资源特别是能源和水资源的使用率，减少资源浪费。要大力加强生态、环境领域的科技进步和创新，降低污染物的排放，加强对废弃物的再次利用，发展循环经济。这些都是中央当前对我国广大科技人员提出的殷切希望和要求。

我国虽然资源不少，但人口众多，人均能源资源十分有限。人均化石燃料仅为世界均值的 56%，石油天然气人均可采储量仅为世界均值的 8%。水力资源可开发量虽达 3.79 亿千瓦，但人均不到 0.3 千瓦。且一次能源消耗中主要为煤炭，约占总能源消耗的 70%，即使到 2050 年，煤炭耗量预计也将占一次能源总耗量的 50%，因此环境污染严重。我国三分之一以上国土受到酸雨危害，如不采取措施，二氧化碳排放量预计将从 2000 年占全球总量的 12.7% 增加到 2020 年的 16.7%。此外，空气中的粉尘、二氧化硫和氮氧化物的污染也很严重。因此，加强节能、提高能源利用率和改善能量利用中的环境保护已成为我国经济持续发展中的一个重要课题。

随着我国国民经济发展和人民生活水平的提高，家用电器的大量使用和建筑业的迅速发展不仅使能耗进一步增大，并且引起新的环境保护问题。

为了促进和推动节能工作，改善能量利用中的环境保护，特编辑出版了这一套丛书。这套丛书共 9 本，书名分别为：《强化传热技术》，《烟气热能的梯级利用》，《蒸汽凝结水的回收及利用》，《建筑环境与建筑节能》，《热泵技术》，《城市垃圾的处理与利用技术》，《冷热电联产技术》，《热管技术》和《洁净燃烧技术》。每本著作均由知名专家根据国内外近期科研成果和工程实践执笔编著，可供大专院校师生、科研院所和工矿企业相关科技人员应用和参考。希望这套丛书能对我国的节能和环保事业的发展有所裨益。

中国工程院院士

林宗虎

前 言

随着城市化进程的加快和人民生活水平的不断提高，城市垃圾产量不断增加，城市垃圾围城危机日益严重。城市垃圾污染大气、水体和土壤，对生态环境和人类健康构成很大威胁。城市垃圾是污染源，但作为一种物质形态，城市垃圾又是一种资源，而且城市垃圾是唯一随经济增长而不断增加的资源。

城市垃圾管理包括城市垃圾生产、城市垃圾收运和城市垃圾处理三个阶段。在城市垃圾的产生过程中，提倡循环经济、进行清洁生产和建立生态工程以尽可能的减少垃圾产量；在城市垃圾的收运过程中要严防城市垃圾二次污染；在城市垃圾处理与利用过程中，首先强调无害化，在此基础上进行减量，其次才是资源化。

城市垃圾处理与利用是包含管理、化学和环境等学科的复杂系统工程，城市垃圾处理与利用技术的关键是污染控制。

本书对城市垃圾管理、城市生活垃圾的预处理技术、填埋技术、生物化学处理技术、热化学处理技术和超临界湿解氧化技术、工业固体废弃物处理技术和危险固体废弃物处理技术等作了重点扼要的论述，并对城市垃圾综合利用技术、城市垃圾处理与利用工程的综合评价和典型实例进行了介绍。

随着经济的增长和人们认识水平的不断提高，城市垃圾处理与利用技术也在不断研究和发展。限于作者的水平，对书中存在的不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2005 年 12 月于同济大学

内 容 提 要

城市垃圾处理与利用是一门综合多学科的系统工程技术。本书对城市垃圾管理,城市生活垃圾预处理、填埋、生物化学处理、热化学处理和超临界湿解氧化,工业固体废弃物处理,危险固体废弃物处理作了重点扼要的论述,并对城市垃圾处理与利用工程综合评价和典型城市垃圾处理与利用工程进行了介绍。

本书在注重介绍理论的同时与实际情况紧密结合,对国内外城市垃圾管理、城市垃圾处理与利用技术的应用和研究发展均有涉及,注重实用,有一定的参考价值。

本书适用于环境工程、化学工程、热能工程和系统工程的研究、设计人员参考,也可供大、中专院校相关专业师生参考阅读。

目 录

1 城市垃圾管理总论	1
1.1 概论	1
1.2 城市垃圾性质	4
1.3 城市垃圾污染控制	11
1.4 城市垃圾的收集、运输及贮存	12
1.5 城市垃圾资源管理	16
1.6 循环经济	18
1.7 清洁生产	20
1.8 生态工程	21
2 城市生活垃圾的预处理技术	25
2.1 压实、破袋和洗涤	25
2.2 破碎处理	25
2.3 分选技术	29
2.4 城市生活垃圾预处理系统设计	38
3 城市生活垃圾填埋技术	41
3.1 填埋	41
3.2 卫生填埋	43
3.3 填埋场类型和运行模式	45
3.4 生物反应器填埋	49
3.5 垃圾填埋气预测与收集	51
3.6 填埋场的污染控制技术	54
3.7 填埋场的管理和发展方向	62
3.8 填埋场的工程投资	65
4 城市生活垃圾的生物化学处理技术	67
4.1 堆肥技术	67
4.2 好氧堆肥	68
4.3 厌氧发酵沼气化技术	74
5 城市生活垃圾的热化学处理技术	85
5.1 城市生活垃圾热解技术	85
5.2 城市生活垃圾气化技术	91
5.3 城市生活垃圾焚烧技术	92
5.4 城市生活垃圾热解气化焚烧集成转化技术	97
5.5 垃圾衍生燃料 (RDF) 技术	100
5.6 垃圾焚烧污染控制技术	101
5.7 垃圾焚烧厂设计要点	122

5.8	垃圾焚烧发电厂工程	124
6	城市生活垃圾超临界湿解氧化技术	127
6.1	城市生活垃圾高温高压湿解技术	127
6.2	超临界流体技术	127
6.3	萃取技术	128
6.4	超临界流体萃取技术	133
6.5	超临界水氧化技术	134
7	工业固体废弃物处理技术	137
7.1	废塑料再生利用技术	137
7.2	废橡胶再生利用技术	140
7.3	废纸再生利用技术	145
7.4	废玻璃再利用技术	147
7.5	电子废弃物的回收利用技术	150
7.6	报废汽车的回收利用技术	153
7.7	冶金废渣处理技术	156
7.8	炼钢厂烟尘处理技术	158
8	危险固体废弃物处理技术	160
8.1	医疗废弃物处理技术	160
8.2	废电池回收利用技术	167
8.3	含汞废弃物处理技术	176
9	城市垃圾综合利用技术	178
9.1	城市垃圾的综合处理	179
9.2	垃圾焚烧炉炉渣的综合处理	183
9.3	污水处理厂污泥的综合处理	184
10	城市垃圾处理与利用工程综合评价	185
10.1	综合评价体系	185
10.2	城市垃圾生命周期评价方法	188
11	典型城市垃圾处理与利用工程举例	195
11.1	御桥生活垃圾发电厂	195
11.2	上海江桥生活垃圾焚烧厂	197
11.3	上海美商生化垃圾处理厂	198
	参考文献	200

1 城市垃圾管理总论

1.1 概论

环境和发展是 21 世纪的主题，随着物质文明程度的提高和城市化进程的发展，工业废弃物和城市生活垃圾越来越多。据统计，世界城市垃圾以快于经济增长 3 倍的速度在增加，城市垃圾年平均增长速度约为 8.2%，经济发达国家如美国、日本、德国、荷兰及奥地利等国家每年投入的资源有 50%~75% 将在 1 年内以废物的形式重新返回到大自然。中国经济高速发展，GDP 的增长率为 8% 左右，城市垃圾的增长速度超过 10%。根据世界银行的中国环境公报测算，环境污染每年给中国大陆造成的损失高达 540 亿美元，几乎抵消了 GDP 的增长率。根据世界资源研究所和中国环境监测总站的报告，在世界城市污染最严重的排序中，中国城市占了 80%。目前，由社会发展产生的城市垃圾所造成的环境污染和资源浪费已经成为危害生态环境，制约经济发展和社会进步的主要因素。

城市垃圾的危害主要体现在对空间的占用和对环境的污染上，环境污染指全球变暖、臭氧层破坏、土壤酸化、水体的富营养化（氮、磷物质过多导致藻类大量繁殖，溶氧降低影响到鱼类和水生生物的生存）、光化学烟雾（有机物挥发分如碳氢化合物排放到大气中，在强烈太阳光的照射下经 NO_x 催化发生氧化反应形成臭氧）和生态毒性（有毒化学和生物物质对生态环境的影响，取决于毒性物质排放以及这些物质在环境中的致命性）等。城市垃圾对人类健康的危害主要是通过环境污染体现的。城市垃圾污染物的主要组分可分为：重金属（Cu、Fe、Pb、Hg、Cr、Cd、Se、As 等）及其化合物、非金属无机化合物（硫化物、硝氮、氨氮、氧化氮、卤化物和磷化物等）、有机化合物三类。

城市垃圾的绝大部分为固体废弃物。固体废弃物是三废（废水、废气和废固）中最难处理的，因为它含有的成分相当复杂，其物理性质如体积、水分、热值等也千变万化。城市垃圾的体积密度一般为 $300\sim 500\text{kg/m}^3$ ，一方面堆放会占用大量空间，另一方面如果对垃圾堆放地没有合适的处理，其中的有害物质会随雨水进入土壤。据法国某一垃圾堆放场的测量，其垃圾堆放地的土壤中重金属含量可达到正常值的 50~200 倍，在垃圾堆放地附近生长的植物，其植物中的相应重金属含量为正常植物含量的 80~800 倍，20 年的植物吸收，只能减少重金属积累量的 0.5%，进入地表的重金属不会被中性土壤渗漏下去，一旦进入土壤，其毒性会存留数千年。研究表明，重金属会抑制土壤的共生固氮过程，成倍的降低土壤中的微生物群落总量，破坏土壤的微生物平衡，扰乱生物的固氮和营养素循环。被污染的植物如果被人或动物所食用，最终破坏生态平衡，祸及人类。其次垃圾中的有害物质也会随渗沥水进入地表水和地下水体。上海某垃圾堆放场地的地表水和地下水被污染情况如表 1-1 和表 1-2 所示。垃圾对水污染会使水体变臭，幼儿发育畸形，成人患无名病症，出现生物死区。固体垃圾遇干旱被大风吹刮会发生严重的扬尘，垃圾的热化学和生化反应会产生大量的氮氧化物、硫氧化物、氨气、硫化氢和甲烷等污染气体，其中仅有机挥发性气体就多达 100 多种，许多可致癌、致畸，这些污染物扩散环境造成对大气的污染，如距垃圾堆场 1.5km 范围内，

居民会明显地感受到令人窒息的恶臭，恶臭招来和孳生蚊蝇虫鼠，使痢疾和急性肝炎等传染性疾病的发病率提高。

表 1-1 上海某垃圾场对地表水体的污染情况 / (mg/L)

化 学 成 分	COD	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	TFe	TCr	挥发性酚
堆场 1 背景值	3.0	38.2	11.0	2.0	0.12	3.51	<0.01	<0.002
堆场 1 污染值	19.0	982.5	44.0	14.0	6.40	0.53	<0.01	2.00
堆场 2 背景值	5.1	48.7	9.8	1.24	1.52	1.27	<0.01	0.004
堆场 2 污染值	8.3	50.4	23.3	2.6	1.80	2.20	<0.01	0.003

表 1-2 上海某垃圾场对地下水体的污染情况 / (mg/L)

化 学 成 分	COD	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	TFe	TCr	挥发性酚
堆场 1 背景值	17.91	396.2	8.0	0.004	0.40	7.36	<0.01	0.011
堆场 1 污染值	151.5	1097.6	53.0	10.23	170.0	18.17	<0.01	0.011
堆场 2 背景值	2.60	76.5	14.0	0.024	0.08	1.53	<0.01	0.004
堆场 2 污染值	43.8	565.8	5.6	1.16	14.0	15.81	0.013	3.0

城市垃圾中的废塑料对环境构成视觉污染和潜在污染。视觉污染是指散落在城市、旅游区、水体、道路旁的废塑料对视觉的不良刺激，这种情况被称为“白色污染”。潜在污染是指进入自然环境的废塑料不易被天然微生物菌所破坏，这些废塑料如不加以回收利用，将在环境中永久存在并不断积累。废塑料容易携带病菌，传播疾病，大量废塑料进入土壤，会影响农作物吸收水分和养分，造成农作物减产，大量废塑料进入水体，对于水泵会造成抽空和堵塞，对于水轮机也会造成堵塞，引起水电站停机，陆地和水体的废塑料容易被动物当作食物吞入，从而导致动物死亡。

城市垃圾中也含有大量的可以再生利用的物质，从这个角度看，城市垃圾是一种资源。城市垃圾是唯一伴随经济发展而增加的资源，随着人类文明的不断进步，人们越来越重视经济发展过程中所带来的环境问题，关注环境质量，积极进行垃圾治理和利用。正确的垃圾处理和利用，既可以保护环境，又可以减轻对资源的消耗，保护人类健康，促进经济可持续发展，而城市垃圾处置不当或不合格的垃圾处理则会加剧环境污染。如垃圾填埋在填埋场覆盖以前，垃圾中的轻质废品会随风飘散，点污染扩散成了面污染，另外混入生活垃圾中的废电池，不仅造成酸液污染，其中有害的铅、镉、砷等毒性元素会融入土壤，这些毒性元素均会被植物和原生动物富集吸收，不仅会破坏生物物种，而且通过生物链的传递作用最终危害人的身心健康。填埋气散放成了“不定时炸弹”；垃圾生化处理（堆肥）除产生恶臭外，还存在重金属和渗沥液的污染，垃圾热化学处理中的低温焚烧或者烟气在高温段的停留时间不足，会造成纳克级（ng）的二噁英排放，二噁英的毒性是氰化钾的 100 倍。因此城市垃圾处理关系人类生存空间，关系人类的可持续发展。

城市垃圾一般可分为城市生活垃圾、工业垃圾和有毒有害垃圾三大类。城市生活垃圾是指人们在日常生产和生活中所产生的固体废弃物，包括居民生活垃圾、街道保洁垃圾、事业单位集团如机关、团体、学校和第三产业在工作过程中产生的垃圾。工业垃圾是工业企业在生产过程中产生的垃圾，社会生产与人类生活密切相关的消费品，被人们消费后，不论包装还是消费品本身，最终都会转化成垃圾。因此，工业垃圾不仅包括除已经在国家危险废物名录外的工业企业单位在生产过程所排放的垃圾，也包括工业产品被消费后所转化成的垃圾。有害有毒垃圾又称为危险废物，包括医疗废物、医药废物、废酸碱、染料涂料废物和含重金

属废物等。含放射性的固体废物一般单独列为一类，有专门的处理方法和措施，污水处理厂的污泥也可以被列为城市垃圾中的一类。

城市生活垃圾的成分随产生源的不同而变化。居民生活垃圾受生活水平、能源结构、气候条件、食物种类和风俗习惯等多因素的影响，成分非常复杂。街道保洁垃圾中的泥沙、枯枝落叶和商品包装物较多，易腐有机质少，含水率低，热值一般高于居民生活垃圾。来源于机关、团体、学校和服务业的事业单位集团垃圾，它的成分较为单一稳定，含水率低，热值在城市垃圾中最高。

城市垃圾产量与人口、国内生产总值、居民生活水平和使用燃料种类有关。城市垃圾产量与城市人口几乎成正比例的关系。随着国内生产总值（GDP）的增加，城市垃圾的产量也在不断增加，但当 GDP 达到一定值后，城市垃圾产量的增值减缓，并逐渐趋于稳定。随着城市居民生活水平的提高，人们的生活方式发生变化，家具和生活用品的更新加快，势必造成垃圾产量的增加。使用煤燃料会增加垃圾产量。因此，作为人口高密度区和经济高密度区的大中城市，也是垃圾的高密度区。据统计，美国的城市垃圾产生量每人每年 3.2t，韩国的城市垃圾产生量每人每年 2.2t，法国的城市垃圾产生量每人每年 1t，发展中国家的城市垃圾产生量每人每年 0.5t。我国城市居民生活垃圾产量已超过 1.0kg/(人·d)，现在全国每年的城市生活垃圾有 1.4 亿吨，每年产生约 1.8 亿吨的工业固体废弃物。作为《国家危险废物名录》中的 1 号危险废物，医疗垃圾及一些化工行业的其它高度危险废物年产出量也高达 900 万吨（据卫生部统计信息，2001 年全国医疗垃圾产量为 95 万吨）。历年城市垃圾的堆存量有 60 亿吨，占用可用耕地面积高达 5 亿平方米，目前我国的大中城市基本都出现了被垃圾包围的局面。导致我国城市生活垃圾大幅增长的原因是：城镇发展速度快，而城市居民的环保、资源意识淡薄；方便性食品膨胀，一次性消费品大量进入家庭；城市家庭装修业兴起，人们将装修废物和废旧物品一并装入垃圾桶等。随着我国经济的快速发展，城市人口仍将持续快速增长，据建设部的预测，未来 15 年我国城市数量将超过 800 个，城市人口 6 亿~7 亿，约占总人口的 50%，城市垃圾的增长速度难以遏制，预计今后我国城市垃圾还将以 8%~10% 的增长速度持续增加，到 2010 年，全国城市垃圾年产量将达到 5.5 亿吨。

在垃圾管理的初期阶段，人们把注意力主要放在末端治理上，提出垃圾的资源化、减量化和无害化三原则。资源化也称为综合利用，通过对废物中有用成分的回收、加工、循环利用或其它再利用，使废物直接变为产品或转变为能量或转变为二次原料。减量化是指对已经产生的废物通过处理减少其体积和重量的过程。无害化是对已经产生的无法或暂时无法综合利用的废物通过处理降低或消除其危害性，使保证最终处置长期安全化的过程。城市垃圾的处理方法主要有填埋、堆肥和焚烧等方法。填埋方法的投资最少，但占地面积较大，填埋场的渗沥水会带来严重的二次污染，环保法规提高以后，垃圾填埋的费用急剧上升，美国已有从填埋场将垃圾挖出重新进行其它处理的实例。堆肥技术的投资居中，但要求对垃圾进行严格分类，处理过程容易产生臭气污染，制成产品肥效不高，销路不畅，市场有限也是其主要问题。焚烧方法的投资最高，其中尾气处理是重要的环节，该方法的减容减量非常明显。

从前面的分析可以看出，任何一种垃圾处理过程都有二次污染物发生，如填埋处理的渗沥水，堆肥处理的恶臭和焚烧产生的二噁英。在经历了许多事故和教训之后，人们越来越意识到对固体废弃物进行全过程管理的重要性，相应提出了控制废弃物污染的 3R 原则 [避免产生 (Refuse)、减量 (Reduce)、再循环 (Recycle)]，体现废弃物从摇篮到坟墓 (Cradle to Grave) 的全新管理理念。该原则要求在垃圾的产生阶段中贯彻清洁生产和清洁生活，在垃圾产生以

后，尽量进行生产源系统内外的回收利用，实现封闭式物质再循环，对在现有条件下无法循环利用的废弃物才进行无害化或稳定化的处理，无法再循环的残渣最终安全填埋。

1.2 城市垃圾性质

城市垃圾是各种物质的复杂混合物，它们包括：灰土、砖瓦、纸类、塑胶、厨余、果皮、金属、玻璃、生物质等。从大的构成来看，垃圾由有机物和无机物组成。

(1) 垃圾有机物组分

垃圾中的有机物主要有以下几种。

① 食物类：主要由厨余、过期或变质食品、果皮和蔬菜垃圾等，这部分垃圾可生物降解，但热值较低。

② 纸类：这部分包括废旧报纸、废旧杂志、废旧书籍、废旧海报、使用过的纸张和各类废旧纸包装等，这类垃圾容易燃烧，热值较高。

③ 塑胶类：该类垃圾为塑料、皮革和橡胶等的废弃物，难于生物降解，易燃，热值较高。

④ 织物类：天然或人造纤维等的废弃物，同样难于生物降解，容易燃烧，热值较高。

⑤ 生物质类：它包括草木、树叶和木材加工过程的废弃物等，主要组成为纤维素，容易燃烧，热值较高。

(2) 垃圾无机物组分

垃圾中的无机物主要有以下几种。

① 灰土：由卫生清扫物和煤燃料燃烧残渣组成，主要受燃料结构和大气环境的影响。

② 砖瓦：这部分由建筑垃圾和生长植被中的建筑杂物组成。

③ 玻璃：主要是废旧玻璃瓶和废旧玻璃器具。

④ 金属：指废旧金属制品、包装罐及零碎的金属小件等。

城市垃圾的组成受气候条件、季节因素、燃料结构、生活水平和生活习惯等影响，例如全国部分城市的垃圾组成如表 1-3 所示，同一城市不同区域的垃圾组成如表 1-4 所示，垃圾中的灰土和食物类随季节变化如表 1-5 所示，垃圾组成随生活水平提高的变化如表 1-6 所示。可以看出，我国城市垃圾中动植物厨余约为 50%，高档住宅区垃圾中可回收废物（塑料、纸类、织物、玻璃和金属等）的含量（64%）几乎为普通住宅区垃圾中可回收废物含量（32%）的两倍，而普通住宅区垃圾中动植物厨余含量（53.52%）明显高于高档住宅区垃圾中的动植物厨余含量（30.95%）。一般来说，大城市生活垃圾中有机物占总量的 80%，无机物约占总量的 10%，中小城市的生活垃圾中有机物约占总量的 50%，无机物的比例大约为 40%。因此，各个国家、各个城市、同一城市的不同区域和不同季节的垃圾成分是一直在变化的，这给垃圾处理带来了很大的困难。

表 1-3 我国部分城市的垃圾组成

城 市	动植物厨余	纸类	塑料	竹木	布类	金属	玻璃	渣石	年份
上海	67.50	8.02	13.93	1.43	2.87	0.85	4.14	1.26	2000
北京	44.15	14.28	13.61	7.47	2.02	1.17	6.34	10.46	2000
广州	60.97	6.39	17.54	2.43	4.31	0.79	3.01	3.86	1997
贵阳	41.97	7.96	7.46	0.45	1.21	0.52	2.47	37.92	1995

表 1-4 北京不同区域的垃圾组成 (1999)

区 域	动植物厨余	纸类	塑料	竹木	布类	金属	玻璃	渣石
普通住宅	53.52	10.53	14.13	6.83	1.45	0.97	4.85	15.48
高级住宅	30.95	30.26	16.02	4.79	4.20	1.45	12.23	0
商业区	33.25	29.79	17.05	2.85	3.70	2.05	11.32	0
事业单位	39.89	11.44	9.80	17.56	1.11	2.31	5.14	12.75
医院	30.59	23.34	11.64	6.04	4.24	1.56	22.59	0

表 1-5 北京垃圾中的灰土和食物类随季节变化 (1999)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
灰土	14.25	15.25	10.53	6.48	11.00	12.71	8.00	9.56	9.09	5.88	32.35	29.57
食物类	55.19	53.29	39.47	50.00	63.00	66.10	67.33	70.59	42.05	49.41	22.55	27.83

表 1-6 北京垃圾组成随年份 (生活水平提高) 变化

年 份	纸 类	塑 料	布 类	金 属	玻 璃
1991	6.23	5.18	1.07	1.41	2.10
1993	8.33	5.54	1.11	0.91	2.41
1995	7.43	8.84	2.90	0.66	5.70
1997	10.78	13.85	3.09	0.71	5.51
1999	12.04	16.74	1.36	1.37	7.72

城市垃圾的组成不同,城市垃圾的处理方法也应该有所不同,这是因为垃圾的物理性质、化学性质、生物性质和浸出毒性等不同的缘故。

1.2.1 垃圾的物理性质

垃圾的物理性质一般包括三个方面:垃圾组分分数、垃圾含水率和垃圾密度。

(1) 垃圾组分分数

垃圾组分分数就是指垃圾中不同组分的百分含量,通常用湿基表示,如表 1-3~表 1-6 所示,垃圾组成随着地理位置的不同、同一城市的不同区域、同一区域的不同季节,其组分是非常复杂并不断变化的。但变化是有规律的,如冬季用煤取暖时,垃圾中的灰土含量较大;夏季由于大量瓜果和蔬菜的上市,垃圾中的果蔬食物类组分明显增大。

(2) 垃圾含水率

垃圾含水率就是垃圾总质量中的水分百分含量,用公式表示如下:

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

式中 W ——垃圾含水率, %;

A ——垃圾收到基的试样质量, kg;

B ——垃圾试样烘干后的质量, kg。

垃圾含水率也可以用垃圾各组分的含水率进行计算:

$$W = \sum_{i=1}^n w_i = \sum_{i=1}^n (m_i c_i) \quad (1-2)$$

式中 w_i ——垃圾中第 i 种组分的含水率, %;

m_i ——垃圾中第 i 种组分的组分分数, %;

c_i ——第 i 种组分的含水率，%。

一般来说，垃圾中的食物类组分含量高时，垃圾的含水率较高，垃圾中的食物类组分含量低时，垃圾中的含水率较低。

(3) 垃圾密度

垃圾密度就是垃圾在自然状态下，单位体积的质量。垃圾的密度一般为 $200 \sim 500 \text{ kg/m}^3$ 。

1.2.2 垃圾的化学性质

垃圾的化学性质包括：垃圾的元素组成、垃圾的可燃基、垃圾的灼烧残留量和发热量等。

(1) 垃圾的元素组成

垃圾含有营养元素如 C、H、O、N、S，微量元素如硒，有毒元素如铅等重金属，稀有元素如硼等。垃圾的元素分析可用于选择适当的垃圾处理方法，如根据垃圾的元素分析估算垃圾的发热量以及垃圾好氧发酵时所需的耗氧量等。典型垃圾的元素分析如表 1-7 所示。

表 1-7 典型垃圾的元素分析

元 素	含量/%	元 素	含量/%	元 素	含量/%
碳(C)	12~38	钠(Na)	0.65	汞(Hg)	0.026
氮(N)	0.6~2.0	镁(Mg)	0.63	铬(Cr)	52.47
磷(P)	0.14~0.2	钙(Ca)	0.57	镉(Cd)	0.004
钾(K)	0.6~2.0	铅(Pb)	14.51	砷(As)	10.21

(2) 垃圾的可燃基

将垃圾在 600°C 温度下进行完全燃烧，垃圾的灼烧减量称为垃圾的可燃基，也称为垃圾中挥发性固体 (VS) 含量。垃圾的可燃基是衡量垃圾中有机物含量指标的参数。

(3) 垃圾的灼烧残留量

垃圾的灼烧残留量是衡量垃圾中无机物含量的参数，它是垃圾在 600°C 温度下完全燃烧后的残渣。大小可以用垃圾各组分的灰分百分含量进行估算：

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n (m_i a_i) \quad (1-3)$$

式中 A ——垃圾灼烧残留量 (垃圾灰分)，%；

A_i ——垃圾中第 i 种组分的灼烧残留量 (灰分)，%；

a_i ——第 i 种组分的灼烧残留物 (灰分) 百分率，%。

(4) 垃圾的发热量

1kg 垃圾完全燃烧时释放出来的热量称为垃圾的发热量，单位为 kJ/kg 。垃圾的发热量有高位发热量与低位发热量两种，把垃圾燃烧产物中水分的凝结潜热也计算在垃圾发热量内时，垃圾的发热量称为高位发热量，而把垃圾燃烧产物中水分的凝结潜热扣除在外时，垃圾的发热量就称为低位发热量。燃烧产物排放到大气时，烟气中的水分一般处于蒸汽状态，所以，垃圾的发热量一般用低位发热量。上海市生活垃圾的低位发热量随年份变化如表 1-8 所示。

表 1-8 上海市生活垃圾低位发热量 / (kJ/kg)

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1998	2000
低位热值	3000	4000	4200	4150	4500	4700	5000

若已知垃圾中各元素的质量分数，则垃圾低位发热量也可用门捷列夫经验公式计算：

$$Q_{ar,net} = 339C_{ar} + 1030(H_{ar} - O_{ar}/8) + 105S_{ar} - 25 [H_2O_{ar} + 9(H_{ar} - Cl_{ar}/35.5 - F_{ar}/19)] \quad (1-4)$$

式中 C_{ar} , H_{ar} , O_{ar} , S_{ar} , H_2O_{ar} , Cl_{ar} , F_{ar} ——分别为垃圾收到基中碳、氢、氧、硫、水、氯和氟的质量百分数，%。

垃圾收到基含水分较大，热值较低，一般也称为湿基。一段时间内垃圾水分的减少率称为失水率。自然堆放垃圾的含水率逐日降低，如表 1-9 所示。可以看出，垃圾的日均失水率基本相同，数天后当垃圾中的水分与空气中的水蒸气达到动态平衡时，垃圾中的水分将保持不变。

表 1-9 自然堆放条件下垃圾的失水率

项 目	第二天	第三天	第四天	第五天
累计失水率最大值	36.27	37.87	55.56	66.81
累计失水率最小值	0	1.06	1.87	1.87
累计失水率平均值	6.64	13.15	19.35	25.99
日平均值	6.64	6.51	6.20	6.64

垃圾的五日累计失水率与原含水率的关系如图 1-1 所示。从图上看，垃圾的五日累计失水率随原生垃圾含水率的增大呈微弱增加的趋势。

垃圾的五日累计失水率与空气湿度的关系如图 1-2 所示。从图中看出，垃圾的五日累计失水率基本不随空气湿度的变化而变化。

垃圾的五日累计失水率与空气温度的关系如图 1-3 所示。从图中看出，垃圾的五日累计失水率随空气温度的升高而增大。

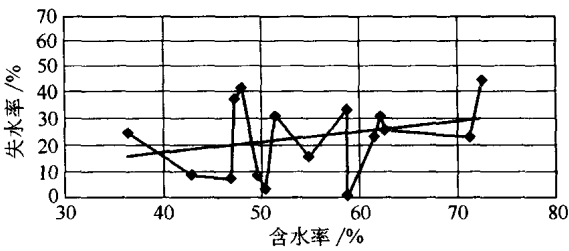


图 1-1 垃圾的五日累计失水率与原含水率的关系

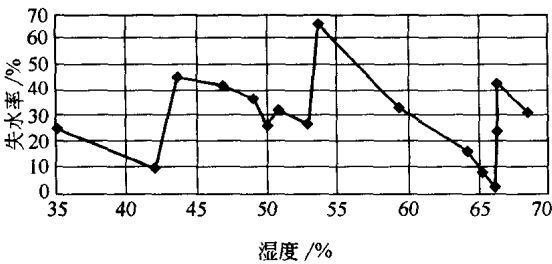


图 1-2 垃圾的五日累计失水率与空气湿度的关系

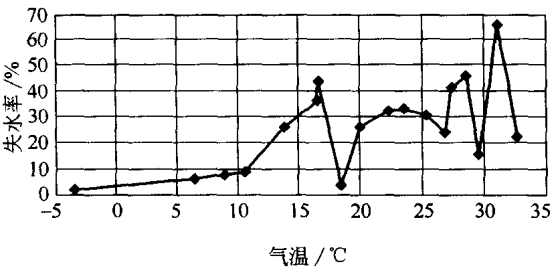


图 1-3 垃圾的五日累计失水率与空气温度的关系

把已经空气干燥的垃圾试样放在 105~110℃ 的恒温箱中干燥 2h，这时的垃圾试样为干基。因为垃圾中的水分随各种因素的变化而变化，所以，垃圾的发热量常用干基来表示。一般来说，垃圾发热量的测量设备氧弹试验只给出高位发热量，如氧弹试验可以测量第 i 种组分中可降解有机物干基的高位发热量 $q_{d,gr,i}$ 和不可降解有机物干基的高位发热

量 $Q_{d,gr,2}$ ，则垃圾中可降解有机物的高位发热量 $Q_{d,gr,1}$ 和不可降解有机物的高位发热量 $Q_{d,gr,2}$ 分别用下式计算：

$$Q_{gr,1} = \sum_{i=1}^n (x_{i1} - w_{i1}) q_{d,gr,i1} \quad (1-5)$$

$$Q_{gr,2} = \sum_{i=1}^n (x_{i2} - w_{i2}) q_{d,gr,i2} \quad (1-6)$$

式中 $Q_{gr,1}$ 、 $Q_{gr,2}$ ——分别为垃圾中生物可降解与不可降解有机质的高位热值，kJ/kg；
 x_{i1} 、 x_{i2} ——分别为垃圾中第 i 种组分生物可降解与不可降解的有机物含量，%；
 w_{i1} 、 w_{i2} ——分别为垃圾中第 i 种组分生物可降解与不可降解有机质的含水率，%；
 $q_{d,gr,i1}$ 、 $q_{d,gr,i2}$ ——分别为垃圾中第 i 种组分干基的生物可降解与不可降解有机质的高位发热量，kJ/kg。

典型城市生活垃圾的理化指标如表 1-10 所示。

表 1-10 垃圾的理化性质

项 目	含水率/%	灰分/%	有机质/%		高位热值/(kJ/kg)	
			生物可降解	不可降解	生物可降解	不可降解
理化参数	48.69	20.4	21.18	8.06	1806.4	2983

1kg 氢燃烧可以得到 9kg 水，水的潜热在常温常压下为 2500kJ/kg。垃圾的低位发热量 $Q_{ar,net}$ 可通过式 (1-7) 进行计算。

$$Q_{ar,net} = Q_{gr} - 2500[H_2O + 9(H - Cl/35.5 - F/19)] \quad (1-7)$$

(5) 垃圾的理论空气量

根据元素的氧化反应，1kg 垃圾完全燃烧所需的理论空气量（标准状态）由式 (1-8) 计算。

$$V_0 = 0.088 \cdot 0C_{ar} + 0.265H_{ar} + 0.0333S_{ar} - 0.0333O_{ar} \quad (m^3/kg) \quad (1-8)$$

空气密度按 1.293kg/m³，则换算成理论空气质量为：

$$L_0 = 0.115C_{ar} + 0.342H_{ar} + 0.0431S_{ar} - 0.0431O_{ar} \quad (kg/kg) \quad (1-9)$$

在缺乏元素分析数据时，可按垃圾的低位发热量估算燃烧所需的理论空气量标准状态，即

$$V_0 = 2.63 \times \frac{Q_{ar,net}}{10000} \quad (m^3/kg) \quad (1-10)$$

实际上为使垃圾完全和及时燃烧，供给垃圾燃烧的空气量大于理论空气量。实际燃烧的空气量 V_a 与理论空气量 V_0 的比值称为过量空气系数，用 α 表示，即

$$\alpha = \frac{V_a}{V_0} \quad (1-11)$$

一般来说，过量空气系数与燃烧方式和垃圾性质有关，垃圾热解焚烧的过量空气系数为 $\alpha = 1.05 \sim 1.2$ ，垃圾气化焚烧的过量空气系数为 $\alpha = 1.1 \sim 1.4$ ，垃圾直接焚烧的过量空气系数为 $\alpha = 1.6 \sim 2.2$ 。

(6) 垃圾燃烧的理论烟气量

在过量空气系数等于 1 的情况下, 1kg 垃圾完全燃烧产生的烟气量称为垃圾燃烧的理论烟气量, 用 V_{y0} 表示, 为:

$$V_{y0} = 0.001866C_{ar} + 0.111H_{ar} + 0.007S_{ar} + 0.08N_{ar} + 0.0124M_{ar} + 0.8061V_0 \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-12)$$

垃圾燃烧的实际烟气量 V_y 为:

$$V_y = V_{y0} + 1.0161(\alpha - 1)V_0 \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-13)$$

(7) 垃圾的理论燃烧温度

在过量空气系数等于 1 时, 垃圾完全燃烧的绝热火焰温度称为垃圾的理论燃烧温度 T_0 。垃圾燃烧烟气的比热容在 16~1100℃ 范围内约等于 1.254kJ/(kg·℃), 实际烟气标准状况下的密度约为 1.3kg/m³, 垃圾的理论燃烧温度为:

$$T_0 = 298 + \frac{Q_{ar,net}}{1.63V_{y0}} \quad (\text{K}) \quad (1-14)$$

垃圾完全燃烧的实际绝热火焰温度 T_a 为:

$$T_a = 298 + \frac{Q_{ar,net}}{1.63V_y} \quad (\text{K}) \quad (1-15)$$

1.2.3 垃圾的生物性质

城市垃圾中富含易腐有机质和水分, 是微生物生存和大量繁殖的适宜土壤, 由于微生物的作用, 垃圾有机质中的一部分会发生转化, 如有机大分子转变为小分子或气体等, 这部分有机质称为生物可降解有机质, 其余部分有机质就称为生物不可降解有机质。

在城市垃圾中, 生物可降解有机质一般包括: 过期霉变食物类、纸类、织物类和生物质等, 垃圾中的生物可降解有机质的含量可由式 (1-16) 计算:

$$X_1 = \sum_{i=1}^n (x_{i1} - w_{i1} - A_{i1}) \quad (1-16)$$

式中 X_1 ——垃圾中生物可降解有机质的含量, %;

x_{i1} ——第 i 种组分生物可降解有机质的含量, %;

w_{i1} ——第 i 种组分生物可降解有机质的含水率, %;

A_{i1} ——第 i 种组分生物可降解有机质的灼烧残留量, %。

在城市垃圾中, 生物不可降解有机质一般为塑料和橡胶, 它在垃圾中的含量可由式 (1-17) 计算:

$$X_2 = \sum_{i=1}^n (x_{i2} - w_{i2} - A_{i2}) \quad (1-17)$$

式中 X_2 ——垃圾中生物不可降解有机质的含量, %;

x_{i2} ——第 i 种组分生物不可降解有机质的含量, %;

w_{i2} ——第 i 种组分生物不可降解有机质的含水率, %;

A_{i2} ——第 i 种组分生物不可降解有机质的灼烧残留量, %。

在城市垃圾中, 有一部分有机质含有对人体或植物有害的病原体, 这部分垃圾可按照危险废物进行处理。

一般来说, 城市燃煤区的人均垃圾产量约为燃气区的两倍, 但同一地区每年 3~10 月份的有机垃圾含量基本不变。即生活垃圾中的总固体 (TS)、挥发性固体 (VS) 和 COD 含量基本不变。如表 1-11 所示。