



固体废物 处理与处置

主编 © 唐艳 刑竹 支金虎

中央民族大学出版社
China Minzu University Press

固体废物处理与处置

主 编 唐 艳 荆 竹 袁金虎
副主编 武首香 杨晓瑞
参 编 黄铂扬

中央民族大学出版社
China Minzu University Press

图书在版编目 (CIP) 数据

固体废物处理与处置 / 唐艳, 刑竹, 支金虎主编.

—北京: 中央民族大学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5660-0932-6

I. ①固… II. ①唐…②刑…③支… III. ①固体废物处理—IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 036016 号

固体废物处理与处置

主 编 唐 艳 刑 竹 支金虎

责任编辑 李苏幸

出 版 者 中央民族大学出版社

北京市海淀区中关村南大街 27 号 邮编: 100081

电话: 68472815 (发行部) 传真: 68932751 (发行部)

68932218 (总编室) 68932447 (办公室)

发 行 者 全国各地新华书店

印 刷 厂 北京荣玉印刷有限公司

开 本 787×1092 (毫米) 1/16 印张: 17.5

字 数 420 千字

版 次 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5660-0932-6

定 价 68.00 元

版权所有 翻印必究



出版说明

固体废物对环境的污染途径主要表现为对水体的污染、对大气的污染、对农田土壤的污染和传播疾病、引发安全事故等几个方面。随着固体废物产生量的增加和对环境污染的日益严重，国家对固体废物的污染控制也越来越重视。我国于1995年颁布实施《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，并于2004年进行了修订，从而为固体废物管理和处理、处置技术的发展奠定了法律基础。

《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》施行以来，我国的固体废物污染防治工作已取得初步成效，工业固体废物综合利用率稳中有升，城市生活垃圾无害化处理率逐步提高，危险废物处理与处置有所加强。但总体上，我国固体废物污染防治工作还处于起步阶段，历史欠账较多，基础设施薄弱，各地区发展不均衡，固体废物污染仍然十分严重。

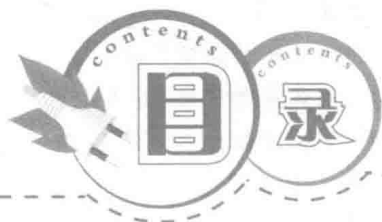
根据教育部关于环境工程专业认证标准的培养目标，环境工程专业培养具有可持续发展理念，具备废水、废气、固体废物等污染防治和给水排水工程、环境规划和资源保护等方面的工程知识，具有进行污染控制工程的设计及运营管理能力，制定环境规划和进行环境管理能力以及环境工程方面的新理论、新工艺和新设备的研究和开发能力，能在政府部门、规划部门、经济管理部门、环保部门、设计单位、工矿企业、科研单位、学校等从事规划、设计、管理、研究和教育开发方面工作的环境工程学科的高级工程技术人才。“固体废物处理与处置”在环境工程专业中占有重要的地位。

“固体废物处理与处置”是一门多学科交叉的综合性项目。为了提高读者的工程设计能力，满足国内固体废物污染控制的需求和培养高层次专业人员的需要，特别邀请了深圳市建筑设计总院的冯华高级工程师参加本书的编写工作。编者根据自己多年教学、科研成果和工程实践中积累的经验，参考国内相关专著，并结合我国固体废物管理和处理与处置的实际情况以及相关的法规和标准的要求，完成了本书的编写。

由于篇幅所限，本书没有涉及工业固体废物的处理与资源化、危险废物的固化与安全处置等内容，编者将另行编写介绍。

编 者

2018年4月



项目一 绪论 / 1



项目概述 / 1

项目要点 / 1

任务一 固体废物的概念 / 1

任务二 固体废物的来源与分类 / 3

任务三 固体废物的污染危害及控制 / 4

任务四 固体废物处理工程概述 / 7

任务五 固体废物管理概述 / 16

拓展与思考 / 21

项目二 固体废物的产生 / 23



项目概述 / 23

项目要点 / 23

任务一 城市固体废物的产生 / 23

任务二 电子固体废物的产生 / 35

任务三 农业固体废物的产生 / 39

任务四 城市污泥的产生 / 41

拓展与思考 / 43

项目三 固体废物的收集与运输 / 44



项目概述 / 44

项目要点 / 44

任务一 工业固体废物的收集、运输 / 44

任务二 城市垃圾的收集、运输 / 45

任务三 危险废物的收集、贮存与运输 / 54

拓展与思考 / 56

项目四 固体废物的预处理/ 57



项目概述 / 57

项目要点 / 57

任务一 固体废物压实/ 57

任务二 固体废物的破碎/ 63

任务三 固体废物分选/ 81

拓展与思考 / 101

项目五 固体废物的脱水/ 102



项目概述 / 102

项目要点 / 102

任务一 概述/ 102

任务二 脱水方法/ 104

拓展与思考 / 125

项目六 固体废物的热化学处理/ 126



项目概述 / 126

项目要点 / 126

任务一 固体废物的焙烧处理/ 126

任务二 固体废物的焚烧处理/ 130

任务三 固体废物的热解处理/ 142

拓展与思考 / 149

项目七 固体废物的生物处理/ 150



项目概述 / 150

项目要点 / 150

任务一 固体废物的堆肥化处理技术/ 150

任务二 固体废物厌氧消化技术/ 164

任务三 固体废物生物处理案例/ 173

拓展与思考 / 180

项目八 固体废物填埋处置/ 181



项目概述 / 181

项目要点 / 181

任务一 固体废物填埋的分类和卫生填埋的选址/ 181

任务二 填埋场总体设计/ 185

- 任务三 填埋场防渗系统/ 189
- 任务四 垃圾填埋气体的产生及收集处理/ 198
- 任务五 渗滤液的产生及收集处理/ 215
- 任务六 垃圾填埋场封场/ 222
- 拓展与思考 / 226

项目九 固体废物制备建筑材料/ 227



- 项目概述 / 227
- 项目要点 / 227
- 任务一 建筑材料/ 227
- 任务二 典型固体废物制备建筑材料的方法/ 235
- 拓展与思考 / 251

项目十 典型固体废物处理与处置专题/ 252



- 项目概述 / 252
- 项目要点 / 252
- 任务一 危险废物处理处置/ 252
- 任务二 电子废弃物处理处置/ 256
- 任务三 固体废物与全球变暖问题/ 265
- 拓展与思考 / 270

参考文献 / 271



项目一 绪 论

项目概述 >>>

本项目系统简要地介绍了固体废物及其处理工程和管理等方面的概念,包括固体废物的来源与分类、污染危害及控制措施,固体废物的物相组成和显微组织结构研究方法、处理利用和处置方法,我国固体废物管理体系及相关技术、经济政策和法律法规等。通过本项目的学习,要求重点掌握固体废物的概念、污染危害及控制措施,我国固体废物管理体系及相关技术、经济政策等内容。

项目要点

- 固体废物的概念
- 固体废物的来源与分类
- 固体废物的污染危害及控制
- 固体废物处理工程概述
- 固体废物管理概述

任务一 固体废物的概念



在人类生存空间中,固体废物随处可见,人们所共知的有生活垃圾、废纸、废旧塑料、废旧玻璃、陶瓷器皿等固态物质。但是,许多国家把污泥、人畜粪便等半固态物质和废酸、废碱、废油、废有机溶剂等液态物质也列入固体废物。可见人们对固体废物的理解并不完全一致。目前,固体废物的定义尚无学术上统一的确切界定。从环境保护角度考虑,我国于1995年颁布的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》(简称《固废法》)给出了法律定义:固体废物是指生产建设、日常生活和其他活动中产生的污染环境的固



态、半固态废弃物质。如矿业废物、工业废渣、城市生活垃圾、农业废物等。另外，我国现行的固体废物管理体系还把具有较大危害性的不能排入水体的液态废物和不能排入大气而置于密闭容器中的气态废物也归入固体废物，如废油、废酸、废氯氟烃等。人们通常将各类生产活动中产生的固体废物称为废渣，各类生活活动中产生的废物称为垃圾。

固体废物的概念随着时间和空间的变迁而具有相对性或二重性。从时间上看，在当时科学技术和经济条件下的实际生产和生活活动中，人们往往只利用了原料、商品或消费品中所需的部分或只利用了一段时间，而将暂时无法利用或失效的部分物质丢弃。由于原材料性质、工艺技术水平和使用目的不同，被丢弃的物质是多种的，仍含有许多有用组分。随着科学技术的进步和一次性资源日益枯竭，今天被丢弃的物质势必又将成为明天的资源。从空间上看，废弃物仅仅相对于某一过程或某一方面没有使用价值，并非在一切过程或一切方面都没有使用价值，经过一定的技术加工处理，某一过程的废弃物有可能成为另一过程的原料，某一地点的废弃物有可能在另一地点发挥作用。例如，高炉渣过去被作为冶金废弃物，现在却成了重要的建材原料，用于生产水泥、矿棉、微晶玻璃等；粉煤灰过去被作为电厂的废弃物，现在已用于生产水泥、砖、加气混凝土等硅酸盐制品，成了不废之物。因此，固体废物又有“放错地方的资源”之称。

固体废物的产生有其必然性。在具体的生产和生活活动中，由于人们在索取和利用自然资源时受到实际需要和技术条件的限制，总要将其其中的一部分作为废物丢弃。另外，任何一种产品都有一定的使用寿命，超过一定期限，就会成为废物。随着人类社会文明的进步、科学技术和生产力的迅速发展、人民生活水平的不断提高，固体废物的种类及其产生量日益剧增，固体废物污染问题日趋严重。据有关资料统计，目前，全世界每年产生工业固体废物约 21 亿吨，危险废物约 3.4 亿吨。其中，美国约 4 亿吨，日本约 3 亿吨。一些发达国家工业固体废物的排放量每年平均增长 2%~4%，放射性废物的产生量也在逐年增加。全世界城市垃圾的增长也十分迅速，发达国家增长率为 3.2%~4.5%，发展中国家增长率为 2%~3%。全球年产垃圾超过 100 亿吨，其中美国约 30 亿吨。

随着工业化的迅速发展和人民生活水平的不断提高，我国每年产生的固体废物数量也不断增加，且种类繁多、成分及性质复杂。据不完全统计，我国每年工业废渣产量达 6 亿多吨，其中危险废物约占 5%。我国工业废渣二次资源化利用率约为 40%，大部分仍处于简单堆放、任意排放的状况，历年累计堆积量已近 60 亿吨，占用了大量土地。近年来，我国城市垃圾产生量也有较快增长，年增长率在 9% 以上，全国每年垃圾产生量约为 1.42 亿吨，由于处置设施严重不足，目前已有 2/3 的城市陷入垃圾包围之中。据统计，早在 2000 年我国城市垃圾产生量已达 1.5 亿吨，占地达 6 万公顷。

在当今的社会里，人们享受着现代化带来的物质文明的同时，每年要消耗大量的自然资源，排放出数百亿吨的各种废弃物质，堆放到地球上，不仅占用大量土地，而且严重地污染了环境，破坏了生态平衡，对人类的生存空间和环境造成了巨大威胁，同时，因资源无节制地消耗而造成资源短缺的状态也日趋严重。早在 20 世纪初期，人们就已认识到工

业化社会的发展势必导致进一步的资源危机和环境恶化。固体废物的污染问题也成为人们普遍关注的问题之一。特别是 20 世纪下半叶,发达国家迫于资源危机和环境恶化的巨大压力,认识到固体废物环境污染防治和资源化利用的紧迫性及其对社会可持续发展的重要性,从而开展了对固体废物回收利用的研究,使固体废物资源化利用发展到一个新阶段。固体废物处理工程就是在这种开发回收利用废旧物质的基础上建立并发展起来的一门新型工程学科,它包含了固体废物的管理、处理利用和处置等方面的工程技术,并引入了材料科学技术、化学工程和生物工程等学科的理论与技术,已成为环境科学和环境工程学的重要组成部分。

任务二 固体废物的来源与分类



固体废物来源广泛,种类繁多,组分复杂,分类方法亦有多种。按其化学成分可分为有机废物和无机废物;按其危害性可分为一般固体废物和危险固体废物;按其形态可分为固体(块状、粒状、粉状)废物和泥状(污泥)废物。为了便于管理,通常按其来源分类,在我国的《固废法》中将固体废物分为城市生活垃圾、工业固体废物和危险废物三大类。考虑到我国是农业大国,而且目前我国农业废弃物的数量已超过工业废物,对环境的污染越来越严重,有必要把它单独列出。因此,本教程将固体废物分为城镇生活垃圾、工业固体废物、农业固体废物和危险废物等四大类,它们的来源及其主要物质组成列于表 1-1。其中,危险废物是指列入国家危险废物名录或是根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定具有危险特性的废物。危险特性通常包括急性毒性、易燃性、反应性、腐蚀性、浸出毒性和急病传染性等。根据这些性质,各国均制定了相应的鉴别标准和危险废物名录。我国于 1998 年制定并颁布了《国家危险废物名录》和《危险废物鉴别标准》。

表 1-1 固体废物的分类、来源和主要组成物

分类	来源	主要组成物
城镇生活垃圾	居民生活	指家庭日常生活过程中产生的废物。如食物垃圾、纸屑、衣物、庭院修剪物、金属、玻璃、塑料、陶瓷、炉渣、灰渣、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,以及类似居民生活栏内的各种废物
	市政维护与管理	指市政设施维护和管理过程中产生的废弃物。如碎砖瓦、树叶、死禽死畜、金属、锅炉灰渣、污泥、脏土等

分类	来源	主要组成物
工业固体废物	矿业	指矿山开采、选矿、矿物加工利用过程中产生的废物。如废矿石、煤矸石、尾矿、金属、废木、建筑废渣等
	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、铜铝铬汞渣、赤泥、废矿石、烟尘、各种废旧建筑材料等
	石油与化学工业	指石油炼制及其产品加工、化学工业产生的废弃物。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、电视和电扇等
	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、石棉、砂石、砖瓦、纤维板、建筑废渣等
	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
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、未被利用的菜叶、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
危险废物	核工业、化学工业、医疗单位、科研单位等	主要指核工业、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、制药厂药渣、废弃农药、炸药、废油等

任务三 固体废物的污染危害及控制

一、固体废物的污染特点

废水、废气在环境空间中的迁移和扩散能力强、速度快，可以直接污染环境，污染效果显现快，生物体感知快，人们可以适时地采取防治措施。固体废物的污染具有明显不同于废水、废气的污染特点。

①固体废物是各种污染物的终态，特别是从污染控制设施中排出的固体废物浓集了许多有毒有害物质，人们却往往对这类污染物产生一种稳定、呆滞、污染慢的错觉，放松对

它们的防治。

②在自然条件下,固体废物中的一些有毒有害组分会转移到大气、水体和土壤中,参与生态系统的物质循环,对生物体具有潜在的、长期的危害性。

③固体废物污染的上述两个特点,决定了其从产生到运输、处理利用、处置的每一个过程都必须严格控制,使其不危害人类环境,即具有全过程管理的特点。

因此,对固体废物,特别是对含有有毒有害物质的固体废物处理不当时,其中的有毒有害组分会通过各种途径潜在、持久地危害人体健康。

根据固体废物的物质成分特点,可将其污染途径分为化学物质型和病原体型两种。工业固体废物的化学成分,特别是重金属和有机污染物会造成化学物质型污染;人畜粪便和生活垃圾是各种病原微生物的滋生地和繁殖场,会造成病原体型污染。固体废物的污染途径如图 1-1 所示。

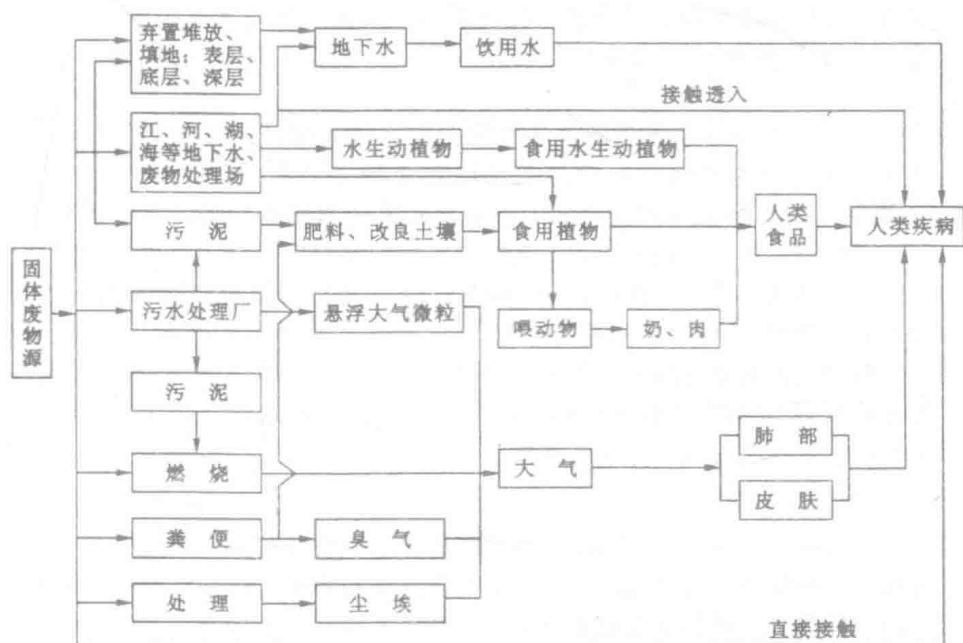


图 1-1 固体废物的污染途径

二、固体废物的污染危害

固体废物对人类环境的危害,主要表现在以下六个方面。

1. 侵占土地

固体废物不加利用而堆放需占用土地,堆积量越大,占地越多。据估算,每堆积 1 万吨废物,约占地 1 亩(约为 666.67m^2)。截至 1994 年,我国仅工矿业固体废物的累计堆积量已达 66 亿多吨,占地 90 多万亩。我国的城市垃圾大多堆存市郊,侵占了大量农田,也严重破坏了地貌、植被和自然景观。高空远红外探测结果显示,北京市区几乎被环状的垃圾群所包围。目前,我国有 $2/3$ 的城市陷于垃圾包围之中。



2. 污染土壤

废物堆放或未采取适当防渗措施的垃圾填埋场地,其中的有毒有害组分很容易因遭受日晒雨淋、地表径流的侵蚀风化而渗入土壤,使土壤毒化、酸化、盐碱化,改变了土壤的性质,破坏了土壤的结构,影响土壤微生物的活动或被杀灭,使土壤丧失腐解能力,导致草木不生。另外,被废物污染的土地面积往往大大超过堆放所占据的面积。例如,20世纪80年代,我国内蒙古一个尾矿坝污染了大片土地,造成一个乡的居民被迫搬迁。20世纪70年代,美国的密苏里州,曾把混有四氯二苯一对二噁英(2,3,7,8-TCDD)的废渣铺设路面,造成严重污染。土壤中TCDD含量达300ppb,污染深度达60cm,致使牲畜大批死亡,居民备受多种疾病的折磨。最后,美国政府花3300万美元买下了该城镇的全部地产,还赔偿了包括居民搬迁在内的一切损失。

3. 污染水体

固体废物随天然降水和地表径流进入江河湖泊,或随风飘迁落入水体使地面水污染;随渗滤水进入土壤则使地下水污染;直接排入河流、湖泊或海洋,能造成更大的水体污染。

美国的Love Canal事件是典型的固体废物污染水体事件。1930—1953年,美国虎克化学工业公司在纽约州附近的Love Canal废河谷填埋了2800多吨桶装有害固体废物,1953年用土填平。1978年大雨和融化的雪水造成有害固体废物外溢,并陆续发现该地区井水变臭,婴儿畸形,居民得怪异疾病,大气中有害物质浓度超标500多倍,测出有毒物质82种,其中11种能致癌,包括剧毒的二噁英。1978年,美国政府颁布法令,710多户居民全部迁出,并拨款2700万美元进行治理。

我国一家合金厂的铬渣堆场,未采用防渗措施,Cr⁶⁺污染了20多平方公里的地下水,致使7个自然村的1800多眼水井无法饮用。另一个锡矿山长期堆放的含砷废渣,随雨水渗透,污染水体,曾一次造成300多人中毒,6人死亡。

4. 污染大气

一些有机废物在适宜的温度和湿度下被微生物分解,会释放出有害气体;细粒状的废渣和垃圾在堆放、运输和处理过程中,会产生有害气体和粉尘。这些有害气体和粉尘在大风吹动下会随风飘逸,扩散的范围越来越大、距离越来越远,造成大气污染。例如,煤矸石自燃会散发出大量的SO₂、CO₂、NH₃等气体,造成严重的大气污染,陕西铜川市每天由于煤矸石自燃产生的SO₂就达37t。另外,采用焚烧法处理固体废物(如农作物秸秆等)也会污染大气。

5. 影响环境卫生

我国工业固体废物的综合利用率很低,据300个城市统计,城市垃圾的清运量仅占产量的40%~50%,无害化处理率平均只有1.6%,50%以下的垃圾堆存在城市的一些死角,98%以上的垃圾、粪便未经无害化处理进入环境,严重影响人们的居住环境的卫生状况,导致传染病菌繁殖,对人们的健康构成潜在的威胁。

6. 其他危害

某些特殊的有害固体废物的排放,除以上各种危害外,还可以造成燃烧、爆炸、接触中毒、严重腐蚀等特殊损害。

三、 固体废物的污染控制

固体废物污染控制应遵循防治污染和综合利用的原则。控制措施主要有以下四个方面。

1. 改革生产工艺

(1) 采用清洁生产

生产工艺落后是产生固体废物的主要原因,因而首先应当结合技术改造,从改革工艺着手,采用无废或少废的清洁生产技术,从发生源消除或减少污染物的产生。例如,传统的苯胺生产工艺是采用铁粉还原法,该法在生产过程中产生含大量硝基苯、苯胺的铁泥和废水,造成环境污染和巨大的资源浪费。南京化工厂开发的流化床气相加氢制苯胺工艺,便不再产生铁泥废渣,固体废物产生量由原来每吨产品 2500 kg 减少到 5 kg,还大大降低了能耗。

(2) 采用精料

原料品位低、质量差,也是造成固体废物大量产生的主要原因。如一些选矿技术落后、缺乏烧结能力的中小型炼铁厂,渣铁比相当高。如果在选矿过程提高矿石品位,便可少加造渣熔剂和焦炭,大大降低高炉渣的产生量。一些工业先进国家采用精料炼铁,高炉渣产生量可减少一半以上。因此,应当进行原料精选,采用精料,以减少固体废物的产生量。

(3) 提高质量

提高产品质量和使用寿命,使其不过快地变成废物。

2. 发展物质循环利用工艺

发展物质循环利用工艺,使第一种产品的废物成为第二种产品的原料,使第二种产品的废物又成为第三种产品的原料等,最后只剩下少量废物进入环境,以取得经济、环境和社会的综合效益。

3. 进行综合利用

有些固体废物中含有可以回收利用的成分。如高炉渣中的主要成分是 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和少量 MgO ,与水泥、砖瓦、砌块等的成分相似,可用来生产水泥和砖瓦等硅酸盐制品。再如,硫铁矿烧渣、废胶片、废催化剂等含有 Au 、 Ag 、 Pt 等贵金属,只要采用适当的物理、化学熔炼等加工方法,就可以将其中的有价值物质回收利用。

4. 进行无害化处理与处置

危险固体废物用焚烧、热解等方法,改变废物中有害物质的结构和性质,可使之转化为无害物质或使有害物质含量降低到国家规定的排放标准。

任务四 固体废物处理工程概述



固体废物处理工程是包括各种处理、资源化利用和最终处置方法等功能单元全过程的系统工程。在固体废物处理与处置之前必须查明其物质组成、显微结构特点和有毒有害组分的赋存状态,以便采取合理的工艺措施,取得更好处理处置效果。

一、 固体废物研究方法

固体废物的种类繁多，通常由多种矿物相组成，往往富含有毒有害组分，且结晶程度较差，颗粒细小。固体废物的化学成分、矿物组成及其相互间的共（伴）生关系（即显微组织结构特点）决定了其处理利用的工艺过程。了解这些矿物相的物理性质和化学性质，对固体废物的有效处理利用有着重要指导意义。因此，必须采用一些现代分析测试技术对其进行分析研究。固体废物及其处理处置产物的化学成分可以采用常规化学分析方法、X射线荧光光谱、原子吸收光谱和等离子体发射光谱等进行测定。这些方法在分析化学和环境监测等课程中已作了介绍，本书不再重述。这里主要介绍研究固体废物及其处理处置产物的矿物组成和显微结构的常用方法及原理。

1. 矿物和晶体的概念

矿物是地壳中的化学元素在各种地质作用下形成的，并在一定的条件下相对稳定的单质或化合物，如石墨（C）、金刚石（C）、石英（SiO₂）、方解石（CaCO₃）、石盐（NaCl）和石膏（CaSO₄·2H₂O）等，是岩石和矿石的组成单位。矿物具有比较均一的化学组成和内部结构，因此，它们是具有一定的几何形态、对称性、物理和化学性质的自然物体。绝大多数矿物为固体，也有呈液体（如水、汞、石油等）和气体（如天然气、H₂S等）形式存在。人们在试验和生产过程中得到的许多人工合成物，如人造金刚石、人造水晶、水泥熟料和高炉矿渣中的硅酸三钙（A矿、C₃S）和硅酸二钙（B矿、C₂S）等，它们的化学成分和物理、化学性质皆类似于天然矿物，被称之为“人造矿物”、“合成矿物”或“工艺矿物”。固体废物，特别是工业废渣中的矿物均为人造矿物。

固体矿物按其内部构造特点可分为晶体和非晶体。凡内部质点（离子、原子或分子）按一定的规律在三维空间作规则周期性重复排列而成的固体称为晶体。由于内部质点规则排列，使晶体内部具有格子构造。如石盐晶体中Na⁺和Cl⁻离子在任一方向上都是按一定的距离重复出现，显示出格子状构造，如图1-2所示。

凡内部质点呈不规则排列的物体称为非晶体。它们没有规则的几何多面体形态，如玻璃、蛋白质、塑料、火山玻璃等。绝大多数天然矿物都为晶体。绝大多数固体废物，特别是工业废物，如高炉矿渣、钢渣、粉煤灰、硫酸烧渣和污泥等都含有相当数量的非晶体物质。

化学组成相同的晶体和非晶体通常具有相同的结构单元，不同之处在于排列的周期性。例如，SiO₂的晶体和非晶体分别为石英和玻璃，它们的结构单元都是硅氧四面体[SiO₄]，各[SiO₄]都是通过共用顶点氧连接成三维空间网络。但是石英晶体中[SiO₄]是在三维空间严格按周期性重复排列的。在二氧化硅玻璃中[SiO₄]则是无序排列的，缺

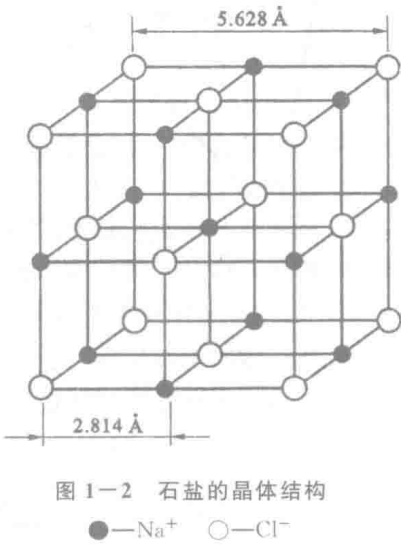


图 1-2 石盐的晶体结构

●—Na⁺ ○—Cl⁻

乏对称性和周期重复性,如图 1-3 所示。

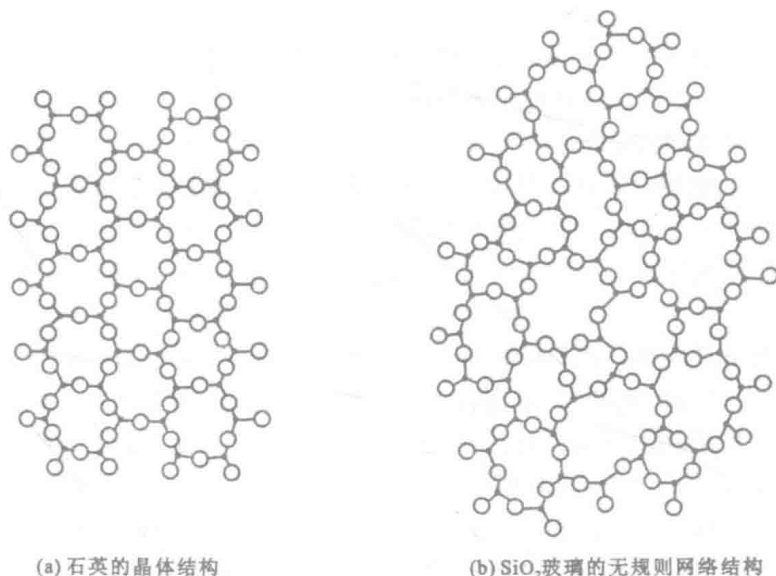


图 1-3 晶态和非晶态 SiO_2 的内部结构示意图

●—Si ○—O

2. 固体废物的研究方法

为了有效地处理和利用固体废物,必须首先查明它们的化学成分、矿物组成和显微结构特点。目前,常用光学显微镜、电子显微术、X 射线分析和热分析等方法进行分析研究。

(1) 光学显微镜分析

光学显微镜分析是根据晶体光学原理,采用偏光显微镜直观地观测各物相的光学性质数据及其相互间的结合关系,即显微组织结构特点,为固体废物的加工处理提供微观依据。

对于非金属类固体废物,将其磨制成 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.03\text{mm}$ 大小的薄片,在透射偏光显微镜下观察可见光透过薄片后物相所发生的折射、反射、干涉等现象,测定其折射率、双折射率、消光类型和消光角等光性参数,观察物相的形状、大小、颜色和解理等物理性质,从而对非金属类透明物相进行鉴别研究。

固体废物中金属类不透明物相对可见光的吸收率很大,在透光显微镜下难以观测研究,必须在反射偏光显微镜下进行观测。将金属类固体废物磨制成 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times (5 \sim 10)\text{mm}$ 大小的光片,在反射偏光显微镜下根据可见光在磨光面上反射时所产生的现象,观测金属类物相的反射率、反射色、内反射、偏光图等光性参数和颗粒形状、大小、解理等物理性质,从而对固体废物中不透明物相进行鉴别研究。

光学显微镜的分辨本领理论上可达 $180 \sim 200\text{ nm}$,放大倍数可达 1000 倍。实际上,通常在小于 500 倍的倍率下观测效果较好,而物相粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的废物则难以在光学显微镜下观测研究。

(2) X 射线分析

X 射线射入物质时,其能量被重新分配,便产生了一系列复杂的现象。其中一部分能



量透过物质；一部分给予物质中原子的电子；另有一部分则用于产生相干散射、荧光散射和不相干散射，统称为二次散射。

当 X 射线射入晶体时，引起晶体中原子内层电子的振动，其产生的二次射线与入射线的波长相同，但方向不同，这种现象称为相干散射或古典散射，这是 X 射线衍射物相分析和结构分析的理论基础。

当 X 射线射入物质时使物质中的原子处于激发态，而由激发态恢复到正常状态时释放出的能量就转变为 X 光量子，其波长与物质中原子的种类有关，这种现象称为荧光散射或特征散射。此种散射是 X 射线荧光光谱进行物质化学成分分析的理论基础，但在 X 射线衍射结构分析中它会产生不希望有的背景。

入射 X 射线量子与晶体中原子的外层电子相碰时，把一部分能量传递给电子，使其飞出原子，剩下的那一部分能量转变为能量小、频率低的量子，这种现象称为量子散射。量子散射的波长比入射 X 射线的波长要长些，不能产生干涉作用，因此，也称为不相干散射。

①X 射线物相分析。入射 X 射线的波长与晶体内部原子（或离子）间的距离及晶胞大小相近，属于同一数量级，因此，晶体可以看成是 X 射线的立体光栅。当一束 X 射线射入晶体时发生相干散射，便按布拉格方程产生衍射效应。由于每一种结晶物质都有其特定的化学组成和晶体结构（晶胞的形状和大小、原子的排列方式等），因此当入射 X 射线通过某一晶体后必将产生相应特定的衍射图样。分析这种衍射图样就可确定结晶物质的种类或物相，并可确定其内部质点间的距离和排列方式。因此，X 射线衍射分析已成为物相分析和研究晶体结构的最常用、最有效的方法。

X 射线物相分析是根据晶体对 X 射线的衍射效应，即衍射方向和衍射强度鉴定结晶物质的一种方法。衍射方向取决于结晶物质的晶胞的形状和大小，衍射强度取决于晶胞中原子的种类和排列方式。此法采用粉末状（粒径 $< 75 \mu\text{m}$ ）的多晶体样品，用照相法或衍射仪法获得样品的衍射图。根据布拉格方程计算出各衍射峰相应的反射面网的面网间距（ d 值）。将衍射峰的面网间距和相对强度（ I/I_0 ）与标准衍射数据相对比，便可作出鉴定。对于多种物相组成的固体废物，根据各物相的特征衍射峰强度可以估算出各结晶相的相对含量。X 射线物相分析的特点是样品用量少（照相法只需芝麻至绿豆大小体积的粉末，衍射仪法约需 1 g 粉末），不受晶体大小的限制，不改变和损耗样品，制样简单，速度快，结果准确，最适合于固体废物的物相分析研究。

②X 射线结构分析。晶体结构分析是根据衍射方向确定衍射线所对应的反射面网的面网指数、计算晶胞参数、确定晶体的对称性和空间群；根据各衍射线的衍射强度，经过一系列的复杂计算、对比、修正，最终确定原子在单位晶胞中的位置。

③X 射线化学成分分析。物质中的原子受到高能辐射激发时，便发射出具有一定波长的特征 X 射线谱。特征 X 射线的波长（ λ ）与原子序数（ Z ）呈简单的关系，符合莫塞莱定律。X 射线荧光光谱分析就是根据试样中各元素所发出的特征 X 射线谱与原子序数间的关系进行元素定性定量分析的一种简单快捷的有效方法。测得特征谱线的波长即可确定元素的种类，测得其强度即可确定元素的相对含量。X 射线荧光光谱不仅可以对常量元素进行定性定量分析，而且也能进行微量元素的测定，一般可测定元素周期表中 9 号（F）至