

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

JIANZHU FEIWU CHUZH  
HE ZIYUANHUA WURAN KONGZHI JISHU



# 建筑废物处置 和资源化污染控制技术

赵由才 余毅 徐东升 等著



化学工业出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

JIANZHU FEIWU CHUZH  
HE ZIYUANHUA WURAN KONGZHI JISHU

# 建筑废物处置 和资源化污染控制技术

---

赵由才 余 毅 徐东升 等著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要介绍了覆盖化工、冶金、轻工、加工等行业所涉及的一般建筑废物以及重金属、难降解有机物、火灾和爆炸以及地震灾区建筑废物等处置和资源化污染控制技术。本书共分 11 章，分别是：概论、建筑废物取样技术及设备、建筑废物样品预处理与分析方法、建筑废物的污染特征、受污染建筑废物产生机制、建筑废物中污染物在环境中的迁移转化、受污染建筑废物再生利用浸出毒性及污染控制、建筑废物无害化处理技术、含重金属建筑废物重金属富集回收、建筑废物污染防治管理建议、建筑废物资源化再利用技术。

本书适合于从事建筑废弃物管理、建筑废物处置、建筑废物再生利用领域的工程人员、管理人员参考，也可供高等学校环境工程、市政工程及相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑废物处置和资源化污染控制技术/赵由才等著.  
北京：化学工业出版社，2016.10  
环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书  
ISBN 978-7-122-27949-1

I. ①建… II. ①赵… III. ①建筑垃圾-垃圾处置-研究 IV. ①TU746.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 206796 号

|                                                              |          |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| 责任编辑：左晨燕                                                     | 文字编辑：汲永臻 |
| 责任校对：宋 玮                                                     | 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：大厂聚鑫印刷有限责任公司                                             |          |
| 787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 425 千字 2017 年 11 月北京第 1 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。                                   |          |

# 《环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书》

## 编著委员会

顾 问：黄润秋

组 长：邹首民

副组长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

# 《建筑废物处置和资源化污染控制技术》

## 著者名单

著 者：赵由才 余 毅 徐东升 黄 晟 高小峰

谢 田 孙艳秋 李 强 杨德志 阮志伟

马建立 牛冬杰 柴晓利 施庆燕 杨 韬

苏良湖 左敏瑜 米 琼 肖 灿 易天晟

李杭芬 李 阳 陆沈磊 王声东 吴奇方

王瑟澜

# 序 言

目前，全球性和区域性环境问题不断加剧，已经成为限制各国经济社会发展的主要因素，解决环境问题的需求十分迫切。环境问题也是我国经济社会发展面临的困难之一，特别是在我国快速工业化、城镇化进程中，这个问题变得更加突出。党中央、国务院高度重视环境保护工作，积极推动我国生态文明建设进程。党的十八大以来，按照“五位一体”总体布局、“四个全面”战略布局以及“五大发展”理念，党中央、国务院把生态文明建设和环境保护摆在更加重要的战略地位，先后出台了《环境保护法》、《关于加快推进生态文明建设的意见》、《生态文明体制改革总体方案》、《大气污染防治行动计划》、《水污染防治行动计划》、《土壤污染防治行动计划》等一批法律法规和政策文件，我国环境治理力度前所未有，环境保护工作和生态文明建设的进程明显加快，环境质量有所改善。

在党中央、国务院的坚强领导下，环境问题全社会共治的局面正在逐步形成，环境管理正在走向系统化、科学化、法治化、精细化和信息化。科技是解决环境问题的利器，科技创新和科技进步是提升环境管理系统化、科学化、法治化、精细化和信息化的基础，必须加快建立持续改善环境质量的科技支撑体系，加快建立科学有效防控人群健康和环境风险的科技基础体系，建立开拓进取、充满活力的环保科技创新体系。

“十一五”以来，中央财政加大对环保科技的投入，先后启动实施水体污染控制与治理科技重大专项、清洁空气研究计划、蓝天科技工程等专项，同时设立了环保公益性行业科研专项。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》、《国家创新驱动发展战略纲要》、《国家科技创新规划》和《国家环境保护科技发展规划》，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 479 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、化学品、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，已验收的项目中，共提交各类标准、技术规范 997 项，各类政策建议与咨询报告 535 项，授权专利 519 项，出版专著 300 余部；专项研究成果在各级环保部门中得到较好的应用，为解决我国环境问题和提升环境管理水平提供了重要的科技

支撑。

为广泛共享环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版《环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书》。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，是环境领域不可多得资料文献。该丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，不断提高环境治理能力现代化水平，为持续改善我国环境质量提供强有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长  
黄润秋

## 目 前 言

建筑废物又被称作建筑垃圾，是一种资源和原材料，又是一种废物。本书按建筑废物是否被污染、材料本身是否含有有毒有害物质（如石棉、油基漆等）将建设废物分为一般建筑废物和危险建筑废物。危险建筑废物主要是指受有毒有害物质污染和本身材质含有有毒有害物质，含量超过一定限值的建筑废物。其中，受有毒有害物质污染的建筑废物（受污染建筑废物）主要来源于废弃工厂车间及由于安全事故毁坏的工厂车间产生的建筑废物，也可称为污染工业建筑废物。危险建筑废物必须经过无害化处理后方可进行最终处置和资源化利用；否则，将会带来严重的环境风险，污染土壤和地下水，影响周边生态环境，对居民造成潜在健康威胁。一般建筑废物是指不含有有毒有害物质的或含量低于限值的建筑废物，可直接利用之。

针对当前我国建筑废物尤其是危险建筑废物无害化处置和资源化利用的环境管理缺失及环境压力大的现状，在 2013 年环境保护部公益性科研专项资助下，开展了覆盖化工、冶金、轻工、加工等行业所涉及的一般建筑废物以及重金属、难降解有机物、火灾和爆炸以及地震灾区建筑废物等处置和资源化污染控制技术研究；提出了建筑废物代表性取样技术与方法；阐明受污染建筑废物的产生和污染特点、有害物质存在特征及其在环境介质中的迁移转化规律；揭示了利用消纳和填埋处置过程中污染物的释放潜力，比选可控制和消除污染物释放的技术，并据此提出污染防治技术路线；描述建筑废物资源化利用的典型产品特征污染物在环境中的释放速率和释放量，并评价其环境安全性和风险，提出了实现污染控制要求的利用方式等。构建了“源头鉴别—分类分离富集—堆场监测评估—重金属洗脱和固化稳定化—有机物辐照降解—粉尘抑制—再生集料高值利用—最终产品再利用风险评估—管理政策支撑”的建筑废物源头至末端全过程高效处置和监管链，并实现了无害化过程污染物的零排放。

本书第 1 章为绪论，通过建筑废物的定义、来源与性质、产量估算和国内外建筑废物的管理法规和条例的介绍，旨在帮助读者对建筑废物产业有较为系统的了解，同时这一部分也是后续章节所阐述的无害化和资源化技术的重要基础。

第 2 章介绍了几种建筑废物取样技术及设备，提出了包括一套用于危险环境的固体颗粒取样收集装置及方法，一套可具备切割、刮磨、抽吸、除尘、收集、破碎功能的建筑废物剥离分级机等在内的拆毁前建筑废物取样技术；综合生活垃圾取样规范、污染土壤取样规范以及工业固体废物采样制样技术规范，结合实际勘测经验，针对重金属和有机污染建筑废物扩充了权威采样法，提出了拆毁后建筑废物取样技术。

第 3 章介绍了建筑废物样品预处理与分析方法，通过干燥-破碎-消解预处理，建筑

废物固体中重金属加标回收率大于 90%。通过索氏提取、超声提取等对比，确定了超声-离心耦合萃取-硅胶固相萃取柱净化预处理技术，有机污染物加标回收率平均为 97.6%。

第 4~第 6 章对受污染建筑废物的产生和污染特点、有害物质存在特征及其在环境介质中的迁移转化进行了系统地表征。汞的含量跟行业使用的原料、加工过程均有关，化工建筑废物汞的平均含量是最高的，轻工行业建筑废物墙体橡胶保温夹层汞含量较高；重金属污染主要集中在化工、冶金等行业，特别是电镀厂和炼锌厂。轻工样品中镉呈现高环境风险。电镀厂和冶锌厂中锌具有高或非常高的环境风险，其次为铬、铜和镍，而铅和镉呈现出无或低环境风险。来自于生产车间的建筑废物，重金属含量很高，且大部分集中在酸可提取态、可还原态、可氧化态中。酸可提取态的迁移性很高，可能对环境造成危害，威胁人体健康，这些受污染的建筑废物处置前需进行无害化处理。

有机物以石油污染、多环芳烃、农药及其中间体为主要特征污染物，其分布在农药厂区内差异显著。重污染点处于农药厂大型贮料罐内部，潜在的风险为罐体氧化开裂造成内部污染物泄漏造成的二次污染。管理和处置应针对其生产工艺，快速排查确立高污染风险污染点，开展原位削减或源头分离。农药污染物浓度可能较大，三种污染最严重的区域分别为建筑废物集中收集点、废弃贮罐表面以及封闭车间，露天随意丢弃的建筑废物堆体污染同样严重，其致癌风险虽然较低，但是非致癌毒性风险极高。

火灾、爆炸现场地面散落固体废物中，土壤中污染物浓度要小于建筑废物表面刮取物。高浓度污染建筑废物主要来自小块散落的建筑废物残骸。火灾/爆炸建筑废物是重要的污染源和污染扩散方式，具有比较大的环境风险。

建筑废物具有一定的酸中和能力，填埋堆体中 Zn 的释放量呈现强酸性降雨<中性降雨<弱酸性降雨，Pb 的释放量也呈现弱酸性降雨<强酸性降雨<中性降雨，Cu、Cd、Cr 的释放量变化规律与 Cu 相同，呈现弱酸性降雨<中性降雨<强酸性降雨的规律，重金属的累积释放规律符合负指数衰减模型。农药等非持久性有机污染物，其浓度及释放潜力随环境变化大，复合因素复杂，随着通风条件变好，农药衰减速率先增大后减小；阴凉干燥密闭极端环境下，挥发性较强的农药衰减速率仍较慢；光照和气温条件是重要的挥发和衰减调控因子；日光直射的宽敞的仓库内，固体表面几乎无残留。

水泥砖与再生集料的孔隙率较大。整体上建筑废物粒径越小对汞吸附量越大，不同建筑材料表面结构也能影响其汞吸附能力，红砖是最容易受污染的建筑材料，其次是泡沫混凝土和再生砂石。主要污染存在于表层 0~1.5cm 范围内，汞污染严重的工厂和车间等在拆迁、改建过程中，可对其表层剥离，去除汞污染。通过浸出浓度和浸出率，评估了重金属的环境风险。对比研究了几种浸出方法。TCLP 法重金属浸出率低于 1.5%；SPLP 浸出法重金属元素浸出率大多低于 0.5%；而 EA NEN7371 浸出法比 TCLP 和 SPLP 浸出率高，其重金属浸出率高于 9%，浸出率最高为 Cu，高达 18.6%。浸出量随有机物种类变化较大，冰醋酸-氢氧化钠体系≥水体系>硫酸-硝酸体系，浸出量提高 10%~25%。中间体浸出基本不随浸提剂变化，高浓度有机磷农药浸出率仅为 0.1%左右。石块、渣土为主的地面建筑废物浸出浓度较高，而墙体、砖等建筑废物浸出浓度较低。

研究了都江堰灾区现场粉尘迁移传播规律与粉尘控制措施,包括采用 SEF 技术封闭模块式建筑垃圾处置系统,设备立体布局、模块组合,建筑垃圾整个处置过程在封闭模块里进行。

第 7 章对于再生利用典型产品之再生混凝土,考察了不同建筑材料制备再生混凝土块重金属的溶出机理,为系统评估其环境影响和再生混凝土块的应用潜能提供参考。总体而言,宝钢耐火砖制备的再生混凝土块重金属浸出毒性相对偏高,其次为水泥砖制备的再生混凝土块,但泡沫混凝土、红砖、都江堰再生集料和浦东再生砂石制备的再生混凝土块浸出率均较低。

第 8 章对比研究了几种建筑废物的无害化技术,检测了经酸洗—水洗—固化稳定化处理的建筑废物的浸出毒性。重金属建筑废物经柠檬酸洗、水洗后,采用磷酸二氢钙和石灰可达到较好的稳定化效果,采用 0.1mol/L 柠檬酸洗—水洗—25g/kg 石灰固化或 0.05mol/L 柠檬酸洗—水洗—80g/kg 磷酸二氢钙固化的处理方法,重金属建筑废物的浸出液中重金属浓度可到达《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅲ类水质标准限值。

对比了草甘膦和腐殖酸溶液的洗脱效果,去除率最高的 Cu 为 31.3%,其次是 Zn (27.5%),最低的是 Cd (13.5%)。腐殖酸重金属洗脱率从高到低排序为  $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd}$ 。草甘膦对 Cr、Cu 和 Zn 的洗脱率均超过 80%,Cr 去除率高达 85.9%。草甘膦对 Zn 和 Cu 的去除率是腐殖酸的 2~3 倍,对 Cr、Pb 和 Cd 的去除率是腐殖酸的 4~5 倍。草甘膦是一种有效的重金属洗脱剂。纳米铁粉固定和草甘膦洗脱对受重金属污染 CRG 的修复效果均较好,处理后浸出液重金属浓度远低于国家危险废物鉴别标准阈值 (GB 5085.3—2007)。Zn、Cr 和 Pb 使用草甘膦洗脱能达到一个更低的浸出率,而 Cu 和 Cd,使用纳米铁粉固定效果更好。

针对封闭阴暗空间,设计发明了一种受有机污染物污染建筑废物原位处理系统,向涂有微波吸附涂层的受污染建筑表面发射特定功率微波,微波吸附涂层在微波作用下急剧升温,对受污染建筑加热,使其中残留的有机污染物在高温条件下挥发分解,4-氨基联苯去除率达到 97.35%。

探讨了超高压液压压制在建筑废物中的作用特点和效果。压制后,污染物浸出浓度均得到降低,有机物最高降低 59%,重金属最高降低 19%。相比于重金属、有机复合污染建筑废物,单一污染源浸出浓度削减率更高,说明压制过程中污染物可能存在的耦合/固定等作用存在竞争效应。

建立了组合式水洗脱氯流程,先采用 500W 微波预加热样品 3min;再取出加热后样品,在 150W 超声波辐射下,水洗 40min (50℃, 10 : 1L/S)。此优化后的水洗脱氯流程可脱除掉样品中 85% 的氯,比普通水洗脱氯效率高约 20%。

第 9 章介绍了含重金属建筑废物的重金属富集技术,围绕如何有效回收建筑废物强碱浸出液中的溶解铝,降低锌电解成型的控制风险开展了研究,发现添加 CaO 去除化强碱液体中溶解铝的效果显著。在不同钙铝摩尔比,铝回收率可达 58%~63%。采用物理风选等方法初步提质分选含锌颗粒物,设计了一套基于文丘里管的风选装置,开展了风选产物在强碱介质中的浸出行为研究,发现在低浓度碱液和低液固比时,微波辐射

对浸出效率则有明显的提高。总结了微波强化浸取的最佳工艺条件为微波辐射循环次数为 4, NaOH 浓度为 5mol/L, 液固比为 10 : 1; 当超声辅助浸出反应时间达到 80min 时, 液固比为 6 : 1 和 8 : 1 时超声强化可分别使浸出效率约提高 15% 和 10%。

第 10 章对建筑废物总体防治管理、工业企业火灾和爆炸建筑废物污染防治和应急处置、建筑废物填埋场污染控制管理以及再生利用监管提出建议, 旨在基于科学研究成果, 结合现代信息化技术, 科学有效地防控建筑废物污染, 并通过技术创新推动制度创新, 实现建筑废物再生利用技术的快速发展。

第 11 章在再生集料利用工艺的基础上, 介绍了建筑废物再生利用工程实例, 其中重金属污染建筑废物洗脱-固定稳定化技术应用于上饶市建筑垃圾资源化项目, 项目一期年处理建筑废物 30 万吨; 资源循环利用年产再生集料 5 万吨、再生微粉 8 万吨等; 有机污染建筑废物原位热处理技术应用于苏州市建筑材料再生资源利用中心工程; 基于建筑废物文丘里风力分离分选的重金属 (主要为锌和铅) 的富集技术应用于南通市区建筑废物资源化利用项目, 该项目年处理建筑废物 100 万吨, 并配有专门的建筑废物试验车间, 为南通市城市建筑废物再生资源化的规范管理及建筑废物研究项目的建设、运行提供了支撑。

另外, 为便于读者进一步了解建筑废物处置及资源化污染相关知识, 本书后特附加了光盘。

本书主要由赵由才、余毅、徐东升等著, 其他作者还有黄晟、高小峰、谢田、孙艳秋、李强、杨德志、阮志伟、马建立、牛冬杰、柴晓利、施庆燕、杨韬、苏良湖、左敏瑜、米琼、肖灿、易天晟、李杭芬、李阳、陆沈磊、王声东、吴奇方、王瑟澜等。

限于著者水平, 书中不足和疏漏之处在所难免, 敬请读者提出批评和修改建议。

著者

2017 年 9 月

# 目 录

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 概 论</b>            | <b>1</b>  |
| 1.1 建筑废物定义、来源与分类            | 1         |
| 1.2 建筑废物组成与性质               | 2         |
| 1.3 建筑废物产量估算                | 2         |
| 1.4 国内建筑废物管理现状              | 5         |
| 1.5 国外建筑废物管理政策及法规现状         | 6         |
| 1.5.1 美国                    | 7         |
| 1.5.2 欧盟                    | 8         |
| 1.5.3 日本                    | 9         |
| <b>第 2 章 建筑废物取样技术及设备</b>    | <b>10</b> |
| 2.1 建筑废物代表取样技术              | 10        |
| 2.1.1 建筑废物污染物的鉴别            | 10        |
| 2.1.2 拆毁前建筑废物取样技术           | 16        |
| 2.1.3 拆毁后建筑废物取样技术           | 18        |
| 2.1.4 地震灾区建筑废物取样技术          | 19        |
| 2.2 建筑废物取样工具及设备             | 20        |
| 2.2.1 典型工业企业车间建筑废物取样工具      | 20        |
| 2.2.2 建筑废物远程取样装置            | 21        |
| 2.2.3 建筑废物表层剥离分离设备          | 24        |
| <b>第 3 章 建筑废物样品预处理与分析方法</b> | <b>27</b> |
| 3.1 建筑废物样品中重金属测试分析          | 27        |
| 3.1.1 样品预处理                 | 27        |
| 3.1.2 样品中重金属定性及总含量分析        | 27        |
| 3.1.3 汞含量分析                 | 29        |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 3.1.4 | BCR 形态分析 .....             | 29 |
| 3.1.5 | 重金属浸出毒性分析 .....            | 30 |
| 3.1.6 | X 射线粉末衍射分析 .....           | 32 |
| 3.1.7 | X 射线光电子能谱法 .....           | 32 |
| 3.2   | 建筑废物样品中有机污染物和氰化物检测分析 ..... | 32 |
| 3.2.1 | 样品制备与保存 .....              | 34 |
| 3.2.2 | 有机物提取 .....                | 34 |
| 3.2.3 | 提取液净化 .....                | 34 |
| 3.2.4 | GC-MC 定性定量分析 .....         | 35 |
| 3.2.5 | 方法回收率 .....                | 35 |
| 3.2.6 | 有机物浸出毒性分析 .....            | 39 |
| 3.2.7 | 氰化物分析 .....                | 43 |

**第 4 章 建筑废物的污染特征 .....** **45**

|       |                                |    |
|-------|--------------------------------|----|
| 4.1   | 建筑废物中汞的污染特征 .....              | 45 |
| 4.1.1 | 不同来源建筑废物中汞的分布特征 .....          | 46 |
| 4.1.2 | 汞污染单因子评价 .....                 | 48 |
| 4.2   | 建筑废物中砷的污染特征 .....              | 49 |
| 4.2.1 | 不同来源建筑废物砷的分布特征 .....           | 49 |
| 4.2.2 | 建筑废物中砷与铁、锰、硫和磷相关性分析 .....      | 51 |
| 4.2.3 | 建筑废物砷污染单因子评价 .....             | 52 |
| 4.2.4 | 建筑废物中砷、铁、锰的化学形态和风险评估 .....     | 53 |
| 4.3   | 建筑废物中铜/锌/铅/铬/镉/镍的污染特征 .....    | 55 |
| 4.3.1 | 总含量分析 .....                    | 57 |
| 4.3.2 | 元素组成 (XRF) 分析 .....            | 60 |
| 4.3.3 | 建筑废物矿物晶体 X 射线衍射 (XRD) 分析 ..... | 61 |
| 4.3.4 | 风险评估 .....                     | 61 |
| 4.4   | 不同来源建筑废物重金属浸出毒性 .....          | 65 |
| 4.5   | 重金属污染建筑废物性质表征 .....            | 70 |
| 4.5.1 | X 射线衍射 (XRD) 分析 .....          | 70 |
| 4.5.2 | 热重分析 .....                     | 71 |
| 4.5.3 | 形貌分析 .....                     | 71 |
| 4.6   | 建筑废物中重金属的形态分布 .....            | 73 |
| 4.6.1 | 重金属建筑废物中重金属 BCR 形态分析 .....     | 73 |
| 4.6.2 | 化工冶金建筑废物中重金属化学形态分析 .....       | 77 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 4.7 建筑废物中有机物、重金属/有机物复合污染特征 ..... | 89  |
| 4.7.1 建筑废物中多环芳烃的污染特征 .....       | 90  |
| 4.7.2 农药厂挥发性有机物存在特征 .....        | 92  |
| 4.7.3 农药厂建筑废物污染特征 .....          | 93  |
| 4.8 有机磷农药污染建筑废物场地风险评估 .....      | 100 |
| 4.8.1 污染风险评估概述 .....             | 100 |
| 4.8.2 污染建筑废物分析结果与评价 .....        | 100 |
| 4.8.3 暴露评估 .....                 | 101 |
| 4.8.4 毒性评估 .....                 | 105 |
| 4.8.5 风险表征 .....                 | 105 |
| 4.9 氰化物污染建筑废物 .....              | 107 |

## 第5章 受污染建筑废物产生机制 ..... 110

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 5.1 重金属静态浸泡 .....               | 110 |
| 5.1.1 pH 变化 .....               | 110 |
| 5.1.2 单一重金属浸泡液中重金属的吸附量变化 .....  | 112 |
| 5.1.3 混合重金属浸泡液中重金属吸附量变化 .....   | 114 |
| 5.2 表面接触性重金属的污染深度 .....         | 116 |
| 5.2.1 pH 变化 .....               | 117 |
| 5.2.2 溶液中重金属浓度变化 .....          | 117 |
| 5.2.3 混凝土中重金属分布 .....           | 118 |
| 5.2.4 小结 .....                  | 120 |
| 5.3 不同建筑材料对气态汞的吸附模拟研究 .....     | 121 |
| 5.3.1 建筑材料表征 .....              | 121 |
| 5.3.2 不同建筑材料对气态汞吸附分析 .....      | 123 |
| 5.3.3 水泥混凝土立方体标准试块汞模拟吸附 .....   | 126 |
| 5.4 外源有机物污染物与建筑废物的交互作用 .....    | 128 |
| 5.4.1 有机污染物在建筑废物表面的嵌合机制 .....   | 128 |
| 5.4.2 建筑废物对重金属-有机复合污染物的吸附 ..... | 129 |
| 5.4.3 挥发性有机污染物的吸附和解吸 .....      | 133 |

## 第6章 建筑废物中污染物在环境中的迁移转化 ..... 137

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 6.1 酸中和容量 (ANC) 与重金属浸出研究 ..... | 137 |
| 6.1.1 酸中和容量 .....              | 137 |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 6.1.2 | 重金属浸出行为 .....                | 138 |
| 6.2   | 重金属污染建筑废物在不同酸雨条件下的污染迁移 ..... | 139 |
| 6.2.1 | 渗滤液产量 .....                  | 141 |
| 6.2.2 | pH 变化 .....                  | 141 |
| 6.2.3 | 电导率与溶解性总固体含量 .....           | 142 |
| 6.2.4 | 重金属与钙的迁移 .....               | 143 |
| 6.3   | 不同气候条件下有机污染物的迁移和转化规律 .....   | 149 |
| 6.3.1 | 光照、通风、温度和湿度的影响 .....         | 149 |
| 6.3.2 | 迁移柱的搭建和取样 .....              | 150 |
| 6.3.3 | 农药的迁移规律 .....                | 150 |

## 第 7 章 受污染建筑废物再生利用浸出毒性及污染控制 ..... 153

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 7.1   | 重金属污染建筑废物再生混凝土试块-浸出毒性特征 ..... | 153 |
| 7.2   | 六种不同建筑材料制备再生混凝土块-浸出毒性特征 ..... | 156 |
| 7.2.1 | 受重金属污染建筑材料的制备 .....           | 156 |
| 7.2.2 | 再生混凝土试块的制备及浸出毒性特征 .....       | 157 |

## 第 8 章 建筑废物无害化处理技术 ..... 160

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 8.1   | 重金属污染建筑废物处理技术 .....    | 160 |
| 8.1.1 | 柠檬酸洗脱 .....            | 160 |
| 8.1.2 | 草甘膦洗脱 .....            | 163 |
| 8.1.3 | 固定稳定化 .....            | 164 |
| 8.1.4 | 草甘膦和纳米铁粉重金属处理的对比 ..... | 165 |
| 8.1.5 | 柠檬酸洗-水洗-固化稳定工艺 .....   | 172 |
| 8.1.6 | 草甘膦洗脱工艺 .....          | 174 |
| 8.2   | 有机物污染建筑废物热处理修复技术 ..... | 176 |
| 8.3   | 超高压液压压制大密度污染建筑废物 ..... | 178 |
| 8.4   | 粉尘控制措施 .....           | 180 |

## 第 9 章 含重金属建筑废物重金属富集回收 ..... 181

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 9.1   | 风选富集含铅锌建筑废物 .....       | 181 |
| 9.2   | 富集含锌铅建筑粉尘中分离去除杂质氯 ..... | 183 |
| 9.3   | 含铅锌建筑粉尘强碱浸出工艺 .....     | 186 |
| 9.3.1 | 浸出影响因素分析 .....          | 186 |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 9.3.2 | 微波辅助浸取 .....                 | 187 |
| 9.3.3 | 超声辅助浸取 .....                 | 189 |
| 9.3.4 | 压力强化浸取 .....                 | 192 |
| 9.3.5 | 各种工艺的浸出渣及最佳条件下的金属离子浸出率 ..... | 193 |
| 9.4   | “低电压直流电解-活性锌粉置换”两步法回收铅 ..... | 195 |
| 9.4.1 | 低电压电解回收 .....                | 195 |
| 9.4.2 | 活性锌粉置换回收铅 .....              | 197 |
| 9.4.3 | 置换过程的影响因素 .....              | 199 |
| 9.5   | 氧化钙添加法回收建筑废物中的铝 .....        | 201 |
| 9.6   | 锌电解回收工艺 .....                | 201 |
| 9.6.1 | 电解锌粉的工艺条件 .....              | 202 |
| 9.6.2 | 碱法电解锌粉工艺中的金属杂质 .....         | 209 |
| 9.6.3 | 铅、铝对成核过程的影响 .....            | 213 |

## **第 10 章 建筑废物污染防治管理建议 ..... 218**

|        |                                |     |
|--------|--------------------------------|-----|
| 10.1   | 工业厂房构筑物重金属污染防治 .....           | 218 |
| 10.1.1 | 污染防治设计与施工 .....                | 218 |
| 10.1.2 | 污染防治措施的运营与维护 .....             | 221 |
| 10.2   | 建筑废物污染鉴别与分离 .....              | 222 |
| 10.2.1 | 污染建筑废物的鉴别 .....                | 222 |
| 10.2.2 | 受污染建筑废物的分离 .....               | 224 |
| 10.3   | 建筑废物监管建议 .....                 | 225 |
| 10.3.1 | 建筑废物污染防治管理建议 .....             | 225 |
| 10.3.2 | 工业企业火灾、爆炸建筑废物污染防治问题及对策建议 ..... | 227 |
| 10.3.3 | 填埋场污染控制管理建议 .....              | 228 |
| 10.3.4 | 建筑废物再生利用的监管建议 .....            | 230 |

## **第 11 章 建筑废物资源化再利用技术 ..... 233**

|        |                               |     |
|--------|-------------------------------|-----|
| 11.1   | 建筑废物再生集料制备利用 .....            | 233 |
| 11.1.1 | 再生集料生产工艺 .....                | 233 |
| 11.1.2 | 再生集料后续利用 .....                | 237 |
| 11.2   | 建筑废物再生利用工程实例 .....            | 242 |
| 11.2.1 | 南通市建筑垃圾资源化处置项目 .....          | 242 |
| 11.2.2 | 上饶市建筑垃圾资源化项目 .....            | 248 |
| 11.2.3 | 苏州市建筑材料再生资源利用中心工程 .....       | 253 |
| 11.2.4 | 都江堰市灾毁建筑垃圾处理及资源综合循环利用工程 ..... | 257 |

|      |                                              |     |
|------|----------------------------------------------|-----|
| 附录一  | 建筑废物重金属含量检测方法标准（草案）                          | 259 |
| 附录二  | 工业源建筑废物重金属污染程度鉴别技术规范（草案）                     | 262 |
| 附录三  | 建筑废物污染环境防治管理办法（草案）                           | 265 |
| 附录四  | 《异源或同源不同功能区建筑废物再生产品环境保护质量标准》（草案）             | 270 |
| 附录五  | 《受污染建筑废物作为再生集料、再生砂石、再生砌块的污染控制技术规范（3类产品）》（草案） | 275 |
| 参考文献 |                                              | 279 |

# 第1章 概论

## 1.1 建筑废物定义、来源与分类

建筑废物又被称作建筑垃圾,在我国建筑废物的收运常与城市其他生活垃圾相混杂,各相关的法律法规制定的标准还未统一,专家学者对其定义也有众多观点,所以目前建筑废物还没有非常明确和详尽的内涵。传统的建筑废物是建设、施工单位或个人对建筑物、构筑物等进行建设、拆除、修缮及居民装饰房屋过程中所产生的余泥、余渣、泥浆及其他固体废物。香港环境保护署对建设废物的定义为:建筑废物意指任何物质、物体或东西因建筑工程而产生,不管是否经过处理或贮存,而最终被弃置;工地平整、掘土、楼宇建筑、装修、翻新、拆卸及道路等工程所产生的剩余物料,统称建筑废物。建设部2003年颁布的《城市建筑垃圾和工程渣土管理规定(修订稿)》中规定,建筑垃圾、工程渣土是指建设、施工单位或个人对各类建筑物、构筑物、管网等进行建设、铺设、拆除、修缮及居民装饰房屋过程中所产生的余泥、余渣、泥浆及对建筑物本身无用或不需要的其他垃圾。在这项法规中对建筑垃圾的定义更加详尽,不仅明确了建筑垃圾产生渠道的多样性,而且将余泥、余渣、泥浆等也归在建筑废物之中。2005年3月23日建设部又发布并于同年6月1日施行了《城市建筑垃圾管理规定》,在该规定中又对建筑废物做出了补充说明:所谓建筑废物,是指建设单位、施工单位新建、改建、扩建和拆除各类建筑物、构筑物、管网等以及居民装饰装修房屋过程中所产生的弃土、弃料及其他垃圾。

根据其来源不同,建筑废物主要可以分为5大类:a.土地开挖垃圾,指的是一般未做特殊处理的土地在开挖过程中产生的垃圾,分为表层土和深层土;b.道路开挖垃圾,根据道路性质不同又分为混凝土道路开挖垃圾和沥青道路开挖垃圾,包括废弃混凝土块、沥青混凝土块等;c.建筑物拆除垃圾,主要分为石块、混凝土、渣土、木材、灰浆、屋面废料、钢铁和废弃金属类;d.建筑施工垃圾,包括建设施工项目和装修项目产生的垃圾,主要包括废弃砖头、混凝土、石头、渣土、桩头、石膏、灰浆、木材、塑料、玻璃等;e.建材生产垃圾,主要是指为生产各种建筑材料所产生的废料和废渣,以及在建材成品加工和运输过程中产生的碎块、碎片等。

建筑废物还可以按照其可资源化程度进行分类。首先建筑废物的资源化是指采取物质回收、物质交换、能量转换等管理和技术手段从建筑废物中回收有用的物质和能源,而可资源化程度是指建筑废物在一定技术或管理条件下被资源化的难易程度。

按建筑废物是否被污染,材料本身是否含有有毒有害物质(如石棉、油基漆等)分