

无废城市 —— 固体废物资源化利用丛书

生活垃圾焚烧炉渣 资源化理论与**与**实践

THEORY AND PRACTICE OF MUNICIPAL SOLID WASTE
INCINERATION BOTTOM ASH

过震文 李立寒 胡艳军 徐斌 / 著

 上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

生活垃圾焚烧炉渣资源化理论与实践 / 过震文等著.
—上海: 上海科学技术出版社, 2019.2
(无废城市: 固体废物资源化利用丛书)
ISBN 978 - 7 - 5478 - 4383 - 3

I. ①生… II. ①过… III. ①生活废物—垃圾焚化—
炉渣—废物综合利用—研究 IV. ①X799.305

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 043343 号

生活垃圾焚烧炉渣资源化理论与实践
过震文 李立寒 胡艳军 徐 斌 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)
苏州望电印刷有限公司印刷
开本 787×1092 1/16 印张 19.75
字数 430 千字
2019 年 2 月第 1 版 2019 年 2 月第 1 次印刷
ISBN 978 - 7 - 5478 - 4383 - 3/TU · 274
定价: 150.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

当前焚烧技术已成为各大城市处理生活垃圾的主流技术之一,但炉渣技术的发展并未与焚烧技术的发展相匹配。对炉渣简单的矿产挖掘,无环境监管的加工过程,无规范指导的项目应用,给生产场地的土壤污染和工程项目的质量安全都埋下隐患。

本书立足于生活垃圾焚烧炉渣,以客观、全面、科学的视角介绍了炉渣的来源、组成及特性的基础上,展开三个方面论述。从矿产角度,分析了炉渣的成矿过程、矿产资源分布、选矿技术及相应矿选金属的质量提升技术;从环境角度,分析了炉渣潜在的环境影响因素,炉渣加工对场地环境的影响,炉渣应用的环境评估技术;从材料角度,分析了炉渣用于以道路工程为代表的土木工程的技术要求与行为特点,分析了其潜在的安定性问题及材料行为的特殊表现。

本书是作者多年研究与实践的总结,可作为炉渣管理工作从业者的指导用书,也可供环境和土木工程专业的高等院校师生或研究人员学习参考。

序 言

习近平总书记在十九大报告中提出了“建设美丽中国”的畅想,强调“要着力解决突出环境问题”,要求“加强固体废弃物和垃圾处置”。我国是人口大国,必然也是固体废物产生大国。如果不进行妥善处理和利用,在对环境造成严重污染的同时,也将造成资源的极大浪费,不利于生态中国的建设推进。事实上,“废物”是放错位置的资源,如能将其减量化、资源化,对建设“无废城市”、促进我国可持续的发展意义重大。

炉渣是生活垃圾焚烧产生的二次废弃物,包括炉排上残留的焚烧残渣及从炉排间掉落的颗粒物。2017年,我国202个大中城市每年产生约2.02亿t生活垃圾,据统计资料,每焚烧1t生活垃圾将产生约0.22t的炉渣。大量焚烧炉渣的产生和堆放,不仅占用土地、污染环境,而且造成巨大的资源浪费。科学地认识炉渣、合理地使用炉渣、控制炉渣对生态环境的不利影响,是实现垃圾焚烧二次废弃物资源化利用中必须面对和解决的问题。上海在生活垃圾焚烧以及相应炉渣材料的资源利用技术研究和利用方面走在全国前列,对炉渣材料资源化利用有深刻认识与技术储备。

本书将炉渣纳入“城市矿产”对象,阐述了炉渣中矿物的形成与转换、炉渣中有价矿物的分布与选矿技术、炉渣中矿选金属的品质提升等内容,旨在规范炉渣处理厂的选矿工艺和作业流程。以炉渣在道路工程中的应用为主线,以控制炉渣材性缺陷对使用对象品质影响为前提,评估了炉渣集料替代天然集料应用的潜在特征,将炉渣纳入“绿色建材”行列;阐述了炉渣的工程应用途径,为保护自然资源、强化生态文明建设提供了切实有效的解决思路。从炉渣固有的环境属性、炉渣加工过程中的环境问题、面向炉渣应用过程中的环境问题全方位地对炉渣实施环境评估,有助于促进固体废物资源化产业健康、规范发展。

本书有机地集成了与生活垃圾焚烧炉渣产业协同相关的选矿、建材、环境等方面的理论研究与工程实践成果,体系性地介绍了炉渣资源化利用的关键技术。其中,国内相关研究成果充分体现了我国在炉渣资源化利用方面的技术贡献。

本书的作者为上海市市政规划设计研究院有限公司过震文、徐斌,同济大学李立寒和浙江工业大学胡艳军。他们一直从事生活垃圾焚烧炉渣的资源化利用研究,本书作为他

们多年资源化利用科研和工程应用实践的结晶,是国内首部系统介绍生活垃圾焚烧炉渣资源化利用的专著。其新理念、新模式、新技术、新路径,定会为固体废弃物资源化利用提供借鉴,为“无废城市”作出应有贡献。



中国工程院院士、中国科学院广州能源研究所研究员

笔者参与土木工程建设已数十载,无论是桥梁工程,还是道路工程,目睹了消耗以石料为代表的大量原材料。一方面石料数量和质量的要求越来越高,另一方面“绿水青山就是金山银山”的理念越来越深入人心,保护山体、减少石料开采成为生态文明建设的重要抓手。似乎相悖的两个走向,对现代以道路为代表的土木工程发展提出了严峻而现实的挑战。

而与此同时,城市日新月异的发展,也带来了固体废弃物数量急剧增加的后果。面对城市化的这一痼疾,2019年1月国务院办公厅印发《“无废城市”建设试点工作方案》,提出了包括固体废弃物资源化在内的城市固体废弃物解决方案,将固体废弃物经过一定的处理,用于包括道路在内的工程项目,真正起到了“一举三得”的作用。

本书选择生活垃圾焚烧炉渣这一典型城市固体废弃物,它是诸多固体废弃物当中非常具有代表性的一种:第一,产生量巨大,如上海,按照目前生活垃圾焚烧厂的焚烧规模,一年产生量在100万t左右;第二,具有“城市选矿”的极佳基础,是以铁为代表的黑色金属和以铝、铜为代表的有色金属的一个重要的城市内生“矿源”;第三,含大量的重金属污染物,是研究固体废弃物环境影响的理想宿体,如果把生活垃圾焚烧飞灰也考虑在内,则对生活垃圾焚烧污染物的研究,将对其他固体废弃物有着典型而普遍的指导意义;第四,具有良好的级配和材料特性,可以作为集料使用,也可以作为补充结合料使用,具有固体废弃物作为材料使用的典型表现。

本书以作者及其团队十余年在国内外开展的大量研究为基础,结合了实际的工厂化运营与炉渣工程应用,同时也消化吸收了国外最前沿的研究成果,因此具有客观、全面的背景支撑。本书也不回避一些敏感的话题,如在矿产学方面,存在湿法选矿与干法选矿之争。如果不考虑环境成本,则湿法选矿可以获得包括贵金属在内的有色金属最大的回收率,但它对工艺水的污染与生产场地土壤的污染也不可回避,同时炉渣过细的破碎也限制了它的资源化应用场合;相对应的,干法选矿作为发展最早、研究最多的技术,如何尽可能提高这一技术的金属回收率,是目前炉渣技术研究的一个热点。一条途径是将干法技术与湿法技术结合,另一条途径则是干法排渣技术的应用,但它也带来了生产效率、臭气封闭与粉尘污染问题,可见选择什么样的工艺,并没有绝对的说法,而是需要综合考量,兼顾

经济效益与社会效益。因此,对生活垃圾焚烧炉渣从矿产学、环境学、材料学方面进行的全面研究,将深刻地惠及其他固体废弃物的资源化应用,其意义重大。

在环境评估方面,炉渣在道路结构层中应用之后表现出的环境行为,是需要关注的一个主题。尽管生活垃圾焚烧炉渣在我国被归类为“一般废弃物”,但由于炉渣组成的变异性,尤其当生活垃圾与生活污水的污泥联合焚烧所产生的炉渣中,某些重金属元素存在超标的可能,因此如何对其检测与评估仍是需要进一步研究的课题。

在材料学方面,炉渣集料同时存在着对材料性能有益的连续级配、棱角形状、自黏结特性与火山灰特性等性质,也存在着“氢爆”、氧化铁膨胀、碱骨料反应、石膏膨胀等潜在不利的材料安定性问题。这些问题在炉渣集料制作成免烧砖时表现得较为明显,而在像道路基层或土路基等大体积应用方面,多年的使用经验表明,未观察到明显的不利影响。

我国生活垃圾焚烧的起步较晚。21世纪初,上海江桥、御桥建成日处理垃圾量1 000 t 级以上的生活垃圾焚烧发电厂,一批学者才真正开始对炉渣进行研究。对于炉渣的认识,大体经历了“补贴期”“逐利期”与“规范期”三个阶段,目前基本处于“逐利期”阶段。

生活垃圾焚烧厂成立之初,我们就引进、吸取了发达国家一百多年垃圾焚烧的技术和经验,这使得决策者对生活垃圾焚烧炉渣的规范化、高科技化运营充满期待。当时参照国外的炉渣处理补贴模式,处理炉渣,政府给予一定补贴。近二十年间,发达国家炉渣处理技术取得了很大进步,而国内大部分炉渣处理机构并未更新处理技术,且形成了一家一个做法的业态,这使得决策者对炉渣处理缺乏信心。尽管2010年9月2日发布了《生活垃圾焚烧炉渣集料》(GB/T 25032—2010),但相应的应用规程缺失,炉渣工艺改造与应用研究周期长,再加上市场上众多力量开始竞相关注炉渣处理的得利,政府对炉渣的补贴逐渐减小,直至出现了负补贴(购买炉渣),即从财政的意义上,炉渣已经不成为“废弃物”,转型为“资源”。

近十年来,炉渣已经从“补贴期”转移到了“逐利期”。这股逐利的浪潮主要来自湿法对炉渣中金属的提取。在“补贴期”时,炉渣处理主要使用了干法,将重心瞄着后端应用,而当时的干法(还没有应用涡电流)对金属的提取效率要比传统的重力分选湿法低得多。使用湿法从金属提取中获取了更大利益,但其缺陷是炉渣破碎过细,影响了炉渣作为道路材料的大面积使用(目前湿法炉渣多被用来制砖,但砖的质量缺乏监管),湿法中水的利用带来了水的处理成本(简单的沉淀池工艺,存在池周土壤污染与污泥处理问题),目前这些问题并没有真正引起重视,这无形中让社会承担了部分成本,从而需要有关机构将炉渣市场从“大乱”的现状向“大治”的发展方向引导。

我们期盼炉渣早日进入“规范期”,实现性能可预测、过程可监控、应用可增值。性能

可预测,要解决原状垃圾组成与焚烧炉渣组成之间的对应关系,要搞清楚焚烧炉渣性质变异的特点与根源,从可靠度的角度把握炉渣的性质,要能粗略预测纯炉渣的强度发展;过程可监控,要利用传感器实时监测手段,掌握炉渣的含水量、老化程度以及其他敏感指标,并追踪炉渣中提取金属的品位和回收率,根据反馈数据及时做出调整;应用可增值,要进一步挖掘炉渣中有价值的组分(如非金属有价矿物的提取),并掌握稀土金属和贵金属的分布规律并利用城市选矿手段予以提取,要进一步尝试炉渣中玻璃、陶瓷、矿渣等的分离,确保分离组分更高的残余价值。边研究,边实践,边标准化,使炉渣技术发展进入一个良性循环。

炉渣的技术也远未达到完善,本书仅是对目前工作的一个总结,还有很多方面有待继续研究,如生活垃圾焚烧时炉渣的成矿过程与焚烧参数及原生垃圾组成的关系、炉渣中所含比例最高的可选组分氧化铁的矿选与资源化加工、炉渣中贵金属的矿选技术、作为附加特性的炉渣自黏结性能与火山灰性能的定量评估、炉渣湿法矿选过程中所产生污泥的资源化利用等。期待本书的出版能激发技术人员在这方面的研究热情,从而促成我国炉渣技术的持续进步。

本书在写作过程中,得到了上海兴盛路基材料有限公司、东江环保股份有限公司、常熟市畅晟环保科技发展有限公司、江苏天合嘉能再生资源有限公司等的大力支持,在此一并表示感谢。同时,阮仁勇、何昌轩、张绪国、毛协民、谈定生、孙文州、林振芬、刘栋、胡明君、冯警蓉等同事同仁从各方面对本书的撰写提供了帮助,也一并致以谢意!

过震文

第一章 生活垃圾焚烧炉渣概述	1
1.1 引言 / 1	
1.2 生活垃圾焚烧技术 / 2	
1.3 炉渣与飞灰 / 4	
1.4 一些易混淆概念的解释 / 6	
1.5 影响炉渣组成及性质的因素 / 8	
第二章 生活垃圾焚烧炉渣矿物学过程与特征	11
2.1 生活垃圾焚烧炉渣与飞灰的元素分割 / 11	
2.2 生活垃圾焚烧过程中炉渣矿物的变化特征 / 15	
2.3 生活垃圾焚烧炉渣水淬过程中的矿物学变化 / 17	
2.4 生活垃圾焚烧炉渣老化过程中的矿物学变化 / 19	
2.5 炉渣中金属的物理化学变化特征 / 22	
第三章 炉渣内金属的回收潜力及分布特点	27
3.1 测试炉渣中金属含量的方法 / 27	
3.2 炉渣中金属的含量及价值 / 30	
3.3 焚烧炉渣中关键元素的回收潜力 / 32	
3.4 不同来源炉渣回收潜力国内外对比案例 / 35	
第四章 生活垃圾焚烧炉渣的物理分选	47
4.1 炉渣的破碎技术 / 47	
4.2 炉渣的筛分技术 / 48	

- 4.3 炉渣中轻质物的风选分离技术 / 50
- 4.4 炉渣的重力分选技术 / 52
- 4.5 炉渣的磁性分离技术 / 54
- 4.6 炉渣基于传感器的自动分选 / 57
- 4.7 涡电流分离 / 59
- 4.8 重金属的磁密度分离技术 / 62
- 4.9 高级干式回收 / 64
- 4.10 荷兰干法和湿法分选的典型工艺介绍 / 66
- 4.11 炉渣高级分选的典型案例 / 69
- 4.12 泡沫浮选技术 / 78

第五章 生活垃圾焚烧炉渣矿选金属的升级技术

81

- 5.1 废铁的升级技术 / 81
- 5.2 废铝的升级技术 / 89
- 5.3 废铜的升级技术 / 98

第六章 生活垃圾焚烧炉渣的物理特征与力学特性

107

- 6.1 生活垃圾焚烧炉渣集料的组成 / 107
- 6.2 生活垃圾焚烧炉渣集料的物理特性 / 116
- 6.3 生活垃圾焚烧炉渣集料的力学特性 / 122
- 6.4 生活垃圾焚烧炉渣底泥的组成与性能特征 / 124

第七章 生活垃圾焚烧炉渣在回填工程中的应用

130

- 7.1 生活垃圾焚烧炉渣的路基回填特性及结构行为分析 / 130
- 7.2 生活垃圾焚烧炉渣回填的安定性因素及其评价 / 138
- 7.3 生活垃圾焚烧炉渣处治土的回填特性及结构行为分析 / 143
- 7.4 生活垃圾焚烧炉渣在其他回填工程中的应用 / 148
- 7.5 生活垃圾焚烧炉渣在海岸围垦造地中的应用 / 151

第八章 生活垃圾焚烧炉渣在道路路面工程中的应用

157

- 8.1 生活垃圾焚烧炉渣在水泥稳定碎石基层中的应用 / 157

- 8.2 生活垃圾焚烧炉渣在石灰粉煤灰稳定材料中的应用 / 168
- 8.3 炉渣集料在沥青混合料中的应用 / 172
- 8.4 炉渣底泥作为填料在沥青混合料中的应用 / 184

第九章 生活垃圾焚烧炉渣的其他应用 188

- 9.1 生活垃圾焚烧炉渣集料在制备免烧砖中的应用 / 188
- 9.2 生活垃圾焚烧炉渣用于生产生态水泥 / 191
- 9.3 生活垃圾焚烧炉渣在水泥混凝土中的应用 / 194
- 9.4 生活垃圾焚烧炉渣用于制造玻璃陶瓷材料 / 202

第十章 生活垃圾焚烧炉渣的环境特性 207

- 10.1 生活垃圾焚烧炉渣化学组成 / 207
- 10.2 炉渣重金属浸出毒性 / 211
- 10.3 焚烧炉渣的浸出特征 / 216
- 10.4 生活垃圾焚烧炉渣的有机毒性评估 / 222

第十一章 生活垃圾组分对焚烧炉渣化学特性的影响 225

- 11.1 材料与炉渣取样 / 225
- 11.2 废旧塑料对炉渣化学特性的影响 / 233
- 11.3 小型电子垃圾焚烧对灰渣特性影响 / 235
- 11.4 市政污泥混烧对炉渣特性影响 / 239
- 11.5 废旧汽车粉碎毛料对垃圾焚烧炉渣化学特性影响 / 241
- 11.6 含铝废料生活垃圾混烧炉渣中金属铝分布 / 244

第十二章 生活垃圾焚烧炉渣分选处理过程的环境影响 257

- 12.1 国内湿法和干法炉渣处理工艺 / 257
- 12.2 炉渣堆对周边土壤环境影响 / 259
- 12.3 炉渣堆雨水径流的环境质量分析 / 261
- 12.4 湿式炉渣处理过程循环水的环境特性 / 266
- 12.5 污水沉淀池中污泥环境质量分析 / 271

第十三章 生活垃圾焚烧炉渣作为道路建设材料的环境评价

275

- 13.1 再生材料的环境评价方法 / 275
- 13.2 道路材料毒性浸出的试验方法 / 278
- 13.3 道路建设中炉渣应用的环境评价 / 280

第十四章 炉渣加工实例

290

- 14.1 国外实施案例 / 290
- 14.2 国内实施案例 / 297

第一章

生活垃圾焚烧炉渣概述

1.1 引言

填埋、堆肥向焚烧的转移,已经是全世界城市生活垃圾处理处置的发展趋势,尤其是在土地紧张、人口众多的城市地区,焚烧几乎成为不二选择。譬如在欧盟出台的《废弃物管理指令》中,规定了废弃物管理的一个梯次架构,即填埋、焚烧、再生、再利用、预防。填埋作为固废管理的托底方案,防止废弃物的产生成为第一选择。值得注意的是,焚烧并未被归入再生环节,表明了对城市生活垃圾作为矿物资源和材料资源内蕴价值的挖掘,优先于其作为潜在能源的挖掘。同时也说明,如果我们对焚烧产物,如炉渣和飞灰,不加以有效地再生利用,焚烧的意义就大打折扣。

城市生活垃圾真正的工业化焚烧,出现在一百多年前的英国曼彻斯特与德国汉堡,而焚烧炉渣资源化从一开始就伴随着生活垃圾焚烧的出现而产生。这种资源化主要体现在两方面:一是用磁铁从炉渣中分离铁质金属,二是将炉渣用作道路材料或填埋场覆土。这样一种粗放资源化模式,百年来进步不大。而与此同时,焚烧热效率的提升、热能利用、焚烧尾气处理,以及在中国比较典型的垃圾渗沥液处理,在技术上都取得了长足的进步。不过,近十年来,炉渣资源化已经发生了深刻改变,这种改变主要体现在炉渣产生、加工与应用三个环节。

炉渣排放中,水淬一直是不可或缺的环节。研究发现,水淬对炉渣中以铁、铝为代表的金属减值严重,也极大影响了湿炉渣的后续金属提取。于是,以瑞士焚烧厂为代表,包括日本若干家焚烧厂在内,近年来陆续采纳了干法排渣技术,金属的品质与回收率都得到了极大提升,这是一直作为焚烧技术变革的被动参与者的炉渣,变身为焚烧技术的主动影响者的历史节点,是炉渣的资源属性被充分认识的深刻体现。

在炉渣加工技术上,从代尔夫特大学研发的 ADR 炉渣撞击分离技术,到涡电流技术的性能改进与包括 Magnus 涡电流和湿式涡电流在内的新型涡电流技术的开发,到磁密度分离技术的商业化,到德国目前仍在优化中的基于高压电脉冲的选择性破碎技术,乃至美国仍在开发中的有色金属高速识别的 X 射线荧光谱分选技术,可以说,近十几年来炉渣加工技术发生着前所未有的变革,不只给炉渣资源回收、质量提升以机遇,也惠及其他固废的处理。

在应用技术上,炉渣的特性,尤其是老化特性、体积稳定性和火山灰活性,都已经从理论上和实践上得到了全面的认识,而且除了道路使用外,还开拓了陶瓷烧结、生态水泥生产、混凝土生产等新的应用方向。总体上,炉渣的特殊性得到了确认和利用,炉渣的应用性能得到了保证。

本书从矿物学、环境学、材料学的角度,论述了当前炉渣技术取得的进步。

从矿物学角度看,生活垃圾焚烧炉渣首先是一个矿藏,一定意义上,包含了能源矿(这是炉渣的前体矿藏,在垃圾焚烧中被充分挖掘)、金属矿(目前关注的是单质状态的废旧金属,氧化状态的金属还未被开发)、石矿(再生集料)。从石矿角度出发,焚烧过程产生了类似岩浆岩的成岩环境,而水淬过程是一个典型的“岩石”变质过程,最终到炉渣堆放、使用过程中的风化(熟化)。利用城市选矿技术(常见的三种手段,重力选矿、磁力选矿、光学选矿)、城市冶金技术,对生活垃圾焚烧炉渣中包括铁、铝、铜在内的有价金属实施提取与升级。炉渣的矿物学认识,体现了城市采矿的基本思想,是炉渣资源化的“根本”。

从环境学角度看,生活垃圾焚烧炉渣是有着环境风险的固体废弃物。要从元素总量、最大浸出、有效浸出三方面分析炉渣的本体环境学,从城市选矿内在的环境要求(噪声、振动、气味等);选矿工艺附加的环境要求(如湿法加工的水污染控制、干法加工的粉尘污染控制);加工环境的累积环境影响(如对加工场地土壤的影响、对加工场地周围地表水和地下水的影响)分析炉渣的生产环境学,以与实际浸出形式对应的批量浸出、柱浸出或平板浸出形式分析炉渣的应用环境学,并考虑污染物的源头枯竭、扩散、溶解平衡,考虑固废材料的基质约束、水的迁移以及土壤的吸附,模拟并评估实际应用中炉渣的环境影响。炉渣的环境学认识,体现了可持续发展的基本思想,是炉渣资源化的“焦点”。

从材料学角度看,生活垃圾焚烧炉渣是一种次级建材,可用于各种应用。炉渣的各项应用,基本利用了炉渣的元素贡献(如用于烧结水泥、玻璃、陶瓷等)、颗粒贡献(如回填、各种道路材料)、内聚贡献(如凝固剂开发),尤其关注于炉渣的不均匀性和长期的体积稳定性,通过前期加工和材料配比设计等,将炉渣及其产品纳入质量可控的范围。炉渣的材料学认识,体现了循环经济的基本思想,是炉渣资源化的“归宿”。

这三个方面既相对独立,又相互关联。如从炉渣中提取铝和铁,既实现了“城市选矿”的增值,同时也对炉渣材料的体积稳定性以及应用中的环境影响产生了积极作用。又如,用水泥等结合料稳定炉渣,既是一种环境保护的方式,也是建材利用的一种形式。作为建材,希望消除由于老化带来的炉渣性质变异,这也是德国等国家要求炉渣作为建材利用之前,必须先熟化三个月的原因。作为炉渣处理企业,必须充分认识、有机融合炉渣的这三个属性,确保炉渣产业的增值性、规范性和科学性。

1.2 生活垃圾焚烧技术

一座典型的生活垃圾焚烧厂,包括了如图 1-1 所示的单元功能和过程组件。

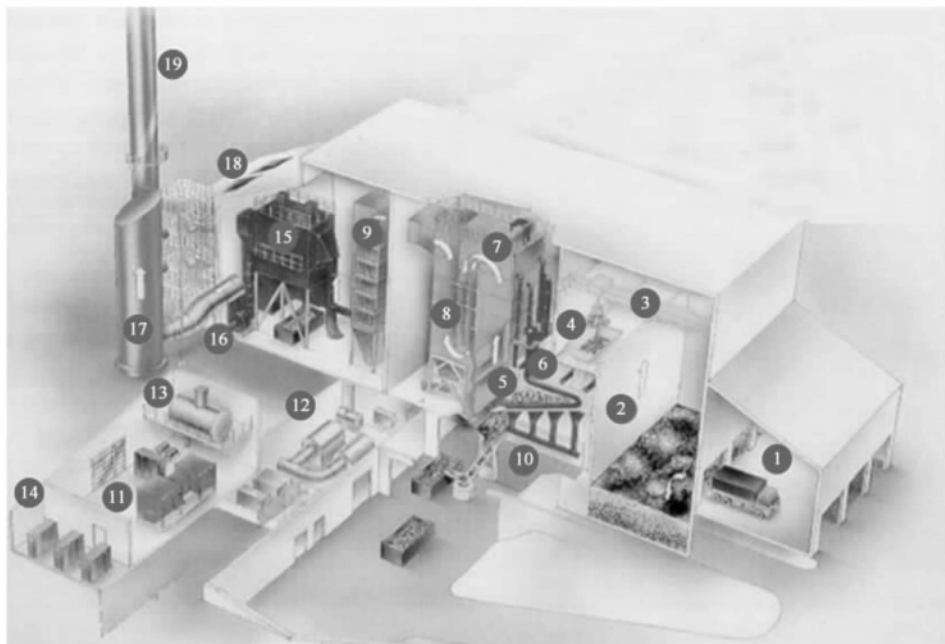


图 1-1 典型生活垃圾焚烧设施(混合焚烧)的分解图

1—收料大厅；2—垃圾地坑；3—桥式吊车；4—料斗；5—炉子；6—燃烧空气系统；7—锅炉；8—超热器；
9—省煤器；10—炉渣系统；11—涡轮机/发电机；12—冷凝器；13—脱气装置；14—配电室；
15—静电沉淀器；16—引风机；17—废气清洗；18—废水处理；19—烟囱

单元功能和过程的组件简要描述如下：

- (1) 垃圾登记与控制。开具单据、监视与控制，垃圾进入工厂后，申报，称重，登记。
- (2) 垃圾的缩小、分选及检查(可选)。依赖垃圾的类型及其来源，可能有必要缩小尺寸(例如大件垃圾)，分选，检查所有收料或一部分收料。
- (3) 卸载区与垃圾料斗。垃圾被卸到一个地坑或料斗系统中。储存能力应虑及垃圾数量每天和每周的波动，并考虑待喂送到炉子中的垃圾的混合(均匀化)。
- (4) 上料系统。将均匀化了的垃圾，从料斗喂送到炉子内，通常使用桥式吊车。
- (5) 炉子。在可移动炉排的一系列燃烧区中，首先使垃圾干燥，然后点燃并完全燃烧。废气在后燃烧室完全烧尽。
- (6) 能量回收系统。能量以电、热或蒸气(或其组合)形式被回收，具体依赖当地的能量市场。
- (7) 灰和渣的移出系统。收集烧尽的灰和渣，放在传送带或推料机系统中传送。可以针对回填、道路建设或类似目的，对灰渣进行筛分、分选和使用。淘汰的灰渣，在卫生填埋场内处置。
- (8) 空气污染控制(air pollution control, APC)系统。依赖期望的清洁水平，主要的APC系统为静电沉淀器或袋式过滤室，物理移出粉尘和某些重金属；干/半干洗涤塔中额

外的废气化学清洗,之后织物过滤器或湿式洗涤塔,冲洗/喷淋废气;特殊过滤器中去除残余 NO_x 或二噁英。

(9) 烟囱。处理后的废气,最终通过烟囱排放。烟囱高度依据当地的地貌以及主控气象条件。

各单元功能和过程中的技术,如图 1-2 所示。

单元功能/过程	典型技术	备选技术	
垃圾接收与控制	控制和开单的地磅和员工	基于自我申报的自动称重和开单	手工测量和报告
尺寸缩小、分选和检查(可选)	如需要,检查地面和旋转刀片/粉碎机	特定类型垃圾用的手工分选传送机	超尺寸垃圾移出用的较小的吊车
卸载区和垃圾料斗	从车上直接卸垃圾用的深斗	卸载和检查用的同一水平的料斗/地面	
进料系统	手工桥式吊车	半自动桥式吊车	
炉子	可移动炉排炉	回转窑炉	流化床炉
能量回收系统	针对地区加热的热回收或仅发电	热电联合生产	
灰渣移出系统	机械或液压推料机	传送机系统	渣灰分选和筛分,进行再利用
废气清洗系统(空气污染控制)	静电沉淀器	外加干、半干或湿式APC	残余二噁英或 NO_x 去除
烟囱	70 m以上烟囱		

图 1-2 生活垃圾焚烧厂单元功能和过程中的技术

1.3 炉渣与飞灰

文献中,一般将垃圾焚烧后的残余物分为两类,即“bottom ash”和“fly ash”,译作“底

灰”和“飞灰”。不过, bottom ash 一般被称为“炉渣”, 本书也沿用了此习惯。灰(ash)一般指燃烧后的残余物(粉煤灰、草灰、炭灰等), 渣(slag)一般指氧化物的熔融产物(钢渣、铜渣、铅锌渣等)。因此, 从严格定义上来说, “底灰”的说法可能更精确一些, “底灰”中也的确包含有熔渣, 而且数量不少, 故称作炉渣也无可厚非。应注意的是, 将渣磨细后, 不能叫“灰”, 而是叫“粉”(powder)。

事实上, 炉渣和飞灰指的都是—类废弃物。炉渣包括炉排间掉落灰(grate sifting)、炉排底灰、锅炉余灰(boiler ash), 其中锅炉余灰又包括了超热器灰(superheater ash)、锅炉灰(蒸发器灰, evaporator ash)和省煤器灰(economizer ash), 有些焚烧厂将锅炉余灰纳入飞灰进行处理。而飞灰包括空气污染控制残余物、布袋除尘室或静电沉淀器捕获灰以及烟道灰。炉渣一般被归类为普通废弃物或非危险废弃物, 而飞灰则被归类为危险废弃物。焚烧废弃物每吨产生的上述残余物数量如表 1-1 所示。

表 1-1 焚烧废弃物每 t 产生残余物的典型数量 (kg/t)

残余物类型	所产生的典型数量(进料)
底灰	250~420
炉排间掉落灰	5
锅炉灰	2~12
省煤器灰	很少
飞灰	10~30

由于炉排存在净空, 占节段面积约 2%, 且炉排间的开口有宽 9.5 mm 的间隙, 总面积占节段 7%。这使得燃烧过程中不断有残余物掉落, 被称为“炉排间掉落灰”。炉排间掉落灰可燃物含量低, 相比底灰, 粒径较小, 常常发现有熔融的金属珠(主要是熔点较低的铝与锌等)、玻璃碎片、土(焚烧时间不够长, 脱水不充分)和小的金属物件, 如长钉、螺钉、瓶盖、锡罐盖子等。也有矿渣颗粒可见。

一座典型生活垃圾焚烧装置中各种灰的产生位置和条件如图 1-3 所示, 底灰、超热器灰、锅炉灰、省煤器灰的外观如图 1-4 所示。

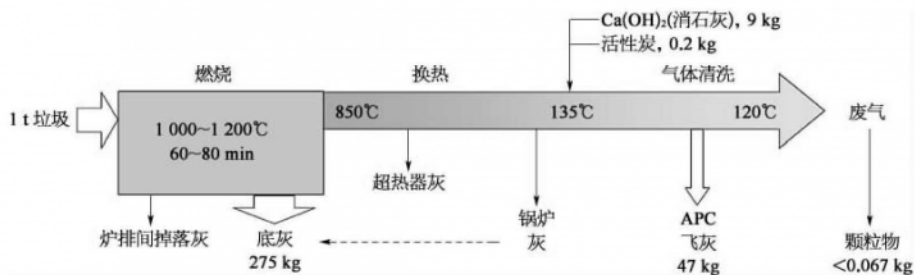


图 1-3 焚烧装置中的质量平衡