

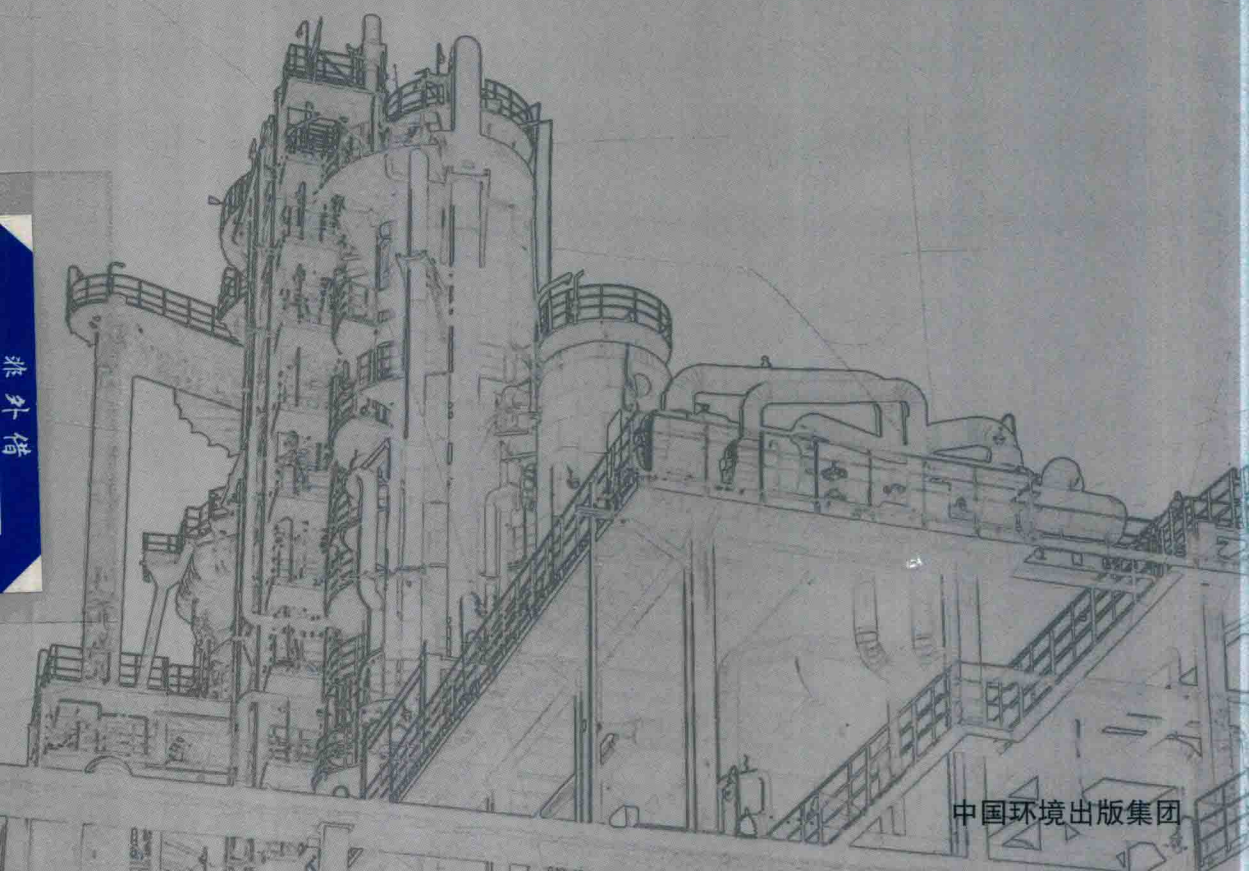
挥发性有机物污染控制系列丛书

VOCs

固体废物处置 污染物排放研究

Solid Waste Disposal

王赫婧 沙莎 闵健 郎兴华 黄敏超 等 编译
李天威 吕巍 审校



非外借

中国环境出版集团

挥发性有机物污染控制系列丛书

固体废物处置污染物排放研究

王赫婧 沙 莎 闵 健 郎兴华 黄敏超 等 编译

李天威 吕 巍 审校

中国环境出版集团·北京

图书在版编目(CIP)数据

固体废物处置污染物排放研究/王赫婧等编译.

—北京: 中国环境出版集团, 2018.12

(挥发性有机物污染控制系列丛书)

ISBN 978-7-5111-3862-0

I. ①固… II. ①王… III. ①固体废物处理—
研究 IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 292634 号

出 版 人 武德凯
责任编辑 李兰兰
责任校对 任 丽
封面设计 宋 瑞



更多信息, 请关注
中国环境出版集团
第一分社

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (第一分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2018 年 12 月第 1 版
印 次 2018 年 12 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 11.5
字 数 200 千字
定 价 47.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载、违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序

城市固体废物处理处置已日益成为世界范围内普遍关注的问题，是一项十分艰巨的综合性、系统性工程。随着城市发展和人民生活水平的不断提高，城市生活垃圾及固体废物等产生量逐年增加，引起的环境污染问题越来越严重。据统计，2012 年我国垃圾清运量约为 1.71 亿 t，2016 年已达到 2.15 亿 t，折合每天 58.9 万 t。我国已经制定和出台了大量有关固体废物处理的法律、法规、行业标准与鼓励政策。这些法律、法规以及行业标准机制的建设，是我国固体废物处理处置有序健康发展的基本保证。

城市固体废物是指在城市日常生活中或者为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为城市生活垃圾的固体废物。在我国，各个城市固体废物处理处置水平和方式有较大差异，我国垃圾收集目前大多数城市采用混合收集的方式，垃圾的成分复杂，含水率高达 30%~50%，其中煤渣、砂石、金属、玻璃等无机物含量很高，而纸张、塑料、木料、纺织物、皮革等高热值物质含量较少，垃圾的综合热值较低。大多数城市固体废物规范化处理处置刚刚起步，卫生填埋为多数城市固体废物的主要处理处置方法，部分城市还有简易的垃圾填埋场在运行。另外，焚烧作为一种传统的处理方法，也是城市固体废物处理的主要方法之一。将废物用焚烧法处理后，废物能减量化，节省用地，还可消灭各种病原体。现代的固体废物焚烧炉皆配有良好的烟尘净化装置，能有效减少对大气的污染。

美国 20 世纪就开始针对固体废物的处理处置过程中的污染物开展检测分析, 其中重点针对包含挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 等污染物排放进行深入研究。本书为“挥发性有机物污染控制系列丛书”之一, 为美国国家环境保护局发布的《固体废物处置污染物排放研究》(Solid Waste Disposal, EPA, AP-42, 第五版, 第一卷) 的中文译本。

AP-42 固体废物处置部分的内容为美国国家环境保护局 1995 年 1 月发布的第五版, 在 VOCs 定义与表征、监测方法、排放量估算方法以及污染控制标准体系方面的研究较为全面和深入, 是 VOCs 管理研究的首要借鉴对象。本书介绍了固体垃圾处置过程及其污染物/排放物和控制处理技术, 其中涵盖城市生活垃圾焚烧、污水污泥焚化、医疗垃圾焚化、城市生活垃圾填埋、露天焚烧、汽车车身焚化等污染物处置过程, 并总结了不同污染源排放规律和各种污染因子 (其中包括 SO_2 、 NO_x 、PM、CO、VOCs、微量金属等) 的处理技术及措施, 分门别类地给出了大量的归纳性排放系数。

本书的翻译出版, 将为我国企业、事业、环保部门的环境管理人员, 科研院校的研究、教学人员, 设计院、环境影响评价编制单位的技术管理人员等工作提供有益的帮助, 对挥发性有机物在污染源归类分析、环境影响评价、排污许可、环境执法、科研课题等方向的工作开展具有参考和借鉴意义。

谭记号

前 言

在美国，城市固体废物产生量持续增加。美国城市生活垃圾等固体废物的管控主要有填埋、焚化和回收等处理方法。固体垃圾处理操作会造成大气排放物（气态污染物或颗粒物）增多。排放物的种类十分多样，究其原因主要取决于固体废物类型和成分、垃圾处理方式以及其他因素。固体废物不仅是产生量增长，在成分上也有质的变化。除大规模的工业废弃物污染外，固体废物中的有毒废弃物污染在 20 世纪中期也是屡见不鲜的。这种早期的污染物排放即便停止了，有毒物质也会长期滞留于环境中，对人类及其他生物的生存造成威胁，对生态环境的自净循环系统造成破坏。

固体废物中的污水污泥和医疗垃圾是特定类型的垃圾，需要专门设计装置进行处置。除了焚化，还可通过土地利用处理污水污泥。但由于医疗垃圾的传染性问题，主要处置方法是焚化。2010 年焚烧技术在美国垃圾处置比例占到了 11.7%，在中国垃圾处置比例为 19.2%。中国垃圾无害化率仅为 77.9%，仍有 20% 的垃圾处于无序管理状态。随着全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设的深入，2015 年我国城市生活垃圾无害化处理率已达到 92.5%。

为了深入研究城市固体废物的排放与管理，环境保护部环境工程评估中心组织翻译了美国国家环境保护局发布的《固体废物处置污染物排放研究》（*Solid Waste Disposal*, EPA, AP-42, 第五版，第一卷）。主要内容为：第 1 章城市生活垃圾焚烧处置；第 2 章污水污泥焚化处置；第 3 章医疗垃圾焚化处置；

第4章城市生活垃圾填埋处置；第5章露天焚烧处置；第6章汽车车身焚化处置；第7章锥形燃烧器。

参与本书翻译的有王赫婧、沙莎、闵健、郎兴华、黄敏超等，审校由李天威、吕巍负责。

本书的翻译得到了生态环境部环境影响评价与排放管理司相关领导的帮助与支持。

本书的翻译工作十分复杂，我们力求忠于原文，尽量试图表述清晰达意。同时，原文为20世纪文稿，选用的多为历史数据，本书的国际单位制和英制数据取值均和原文保持一致，供读者参考。

鉴于译校者的知识面和水平有限，仍会有不当之处，望读者不吝指正，以供再版时修改。

目 录

1	城市生活垃圾焚烧处置.....	1
1.1	概述.....	1
1.2	工艺过程说明.....	6
1.3	排放物.....	12
1.4	控制.....	15
1.5	汞的控制.....	20
1.6	排放物数据.....	21
1.7	其他类型的焚烧炉.....	33
1.8	参考文献.....	36
2	污水污泥焚化处置.....	49
2.1	工艺过程说明.....	49
2.2	排放物及其控制.....	56
2.3	参考文献.....	95
3	医疗垃圾焚化处置.....	104
3.1	工艺过程说明.....	104
3.2	排放物及其控制.....	109
3.3	参考文献.....	130

4	城市生活垃圾填埋处置.....	134
4.1	概述.....	134
4.2	工艺过程说明.....	135
4.3	控制技术.....	135
4.4	排放物.....	136
4.5	参考文献.....	148
5	露天焚烧处置	155
5.1	概述.....	155
5.2	排放物.....	156
5.3	参考文献.....	166
6	汽车车身焚化处置.....	169
6.1	工艺过程说明.....	169
6.2	排放物及其控制.....	169
6.3	参考文献.....	170
7	锥形燃烧器	171
7.1	工艺过程说明.....	171
7.2	排放物及其控制.....	171
7.3	参考文献.....	172
	附件：计量单位换算表.....	174

1 城市生活垃圾焚烧处置

废品焚烧是指焚毁垃圾和其他无害固体，这些废品一般统称为城市生活垃圾 (Municipal Solid Waste, MSW)。用来焚毁废品的焚烧设备包括以下 3 种类型：单室设备、多室设备和槽式焚化炉。

1.1 概述¹⁻³

自 1992 年 1 月起，美国已建成 160 多座日处理能力超过 36 Mg (megagrams per day, Mg/d) 的生活垃圾焚烧厂 (Municipal Waste Combustor, MWC)，MSW 处理能力总规模约 100 000 Mg/d¹。预计到 1997 年，MWC 处理能力总规模将会达到 150 000 Mg/d，相当于美国到 2000 年为止 MSW 产出值估算总量的 28% 左右。

MWC 联邦法规目前属于《美国联邦法规》(Code of Federal Regulations, CFR) 第 40 章第 60 篇第 3 分篇。E 分篇介绍了 1971 年后建成、MSW 焚烧量超过 45 Mg/d 的 MWC 设备。Ea 分篇对 1989 年 12 月 20 日之后开始兴建或改建、处理能力超过 225 Mg/d 的 MWC 设备设立了《新污染源行为标准》(New Source Performance Standards, NSPS)。Ca 分篇对 1989 年 12 月 20 日之前兴建或改建、处理能力超过 225 Mg/d 的 MWC 设备设立了排放指标 (Emission Guideline, EG)。分篇 Ea 和 Ca 法规均于 1991 年 11 月颁布。

分篇 E 包含颗粒物 (Particulate Matter, PM) 标准。分篇 Ca 和 Ea 目前设立了 PM、四到八氯代二苯并二噁英 (Chlorinated Dibenzo-p-dioxin, CDD)/氯代二苯并呋喃 (Chlorinated Dibenzofurans, CDF)、氯化氢 (HCl)、二氧化硫 (SO₂)、

氮氧化物 (NO_x) (仅在分篇 Ea 中设立) 和一氧化碳 (CO) 的标准。此外, 按照 1990 年《清洁空气法修正案》(*Clean Air Act Amendments*, CAAA) 第 129 条的要求, 针对新型和现有设施制定了汞 (Hg)、铅 (Pb)、镉 (Cd) 和 NO_x (仅用于分篇 Ca) 的标准。

除了要求对分篇 Ca 和 Ea 法规进行修订, 第 129 条还要求美国国家环境保护局 (EPA) 对这些分篇中目前涉及污染物的标准和指南进行审核。修订后的法规很可能会更加严格。法规的范围还扩展为包括处理能力不高于 225 Mg/d 的新型和现有 MWC 设施。修订后的法规可能会包括处理能力低至 18~45 Mg/d 的设施。这些设施目前只纳入了州级法规。

1.1.1 焚烧炉技术

焚毁 MSW 的技术主要分为三大类: 全量焚烧、垃圾衍生燃料 (Refuse-Derived Fuel, RDF) 焚烧和模块化焚烧炉。本节简要介绍这三类焚烧炉。每类焚烧炉设计结构与操作的详情参见 1.2 节。

对于全量焚烧设备, 除了要将体积过大无法通过进料系统的物品清理掉, MSW 的焚烧无须任何预处理。典型的全量焚烧炉是将废品置于炉排上平移穿过焚烧炉。超出化学当量的助燃空气, 可通过炉排下方 (一次风) 和上方 (燃尽风) 提供。全量焚烧炉通常现场安装 (与在别处预制的完全不同), MSW 的单位吞吐量为 46~900 Mg/d。全量焚烧炉可分为水冷壁全量焚烧炉 (Mass Burn Waterwall, MB/WW)、旋转式水冷壁全量焚烧炉 (Mass Burn Rotary Waterwall Combustor, MB/RC) 和耐火墙全量焚烧炉 (Mass Burn Refractory Wall, MB/REF)。水冷壁全量焚烧炉的设计结构是炉壁上铺满充水的管子, 用来回收蒸汽和电力生成的热量。旋转式水冷壁全量焚烧炉的燃烧室是旋转式的, 结构也是炉壁上铺满充水的管子。耐火墙是老式全量焚烧炉的设计结构, 通常没有任何热量回收装置。图 1-1、图 1-2 和图 1-3 是三张流程图, 分别展示了典型的 MB/WW 焚烧炉、MB/RC 焚烧炉和炉排式/回转窑式 MB/REF 焚烧炉。

垃圾衍生燃料焚烧炉用来焚烧处理过的垃圾, 包括粉碎垃圾以及适合与粉煤混燃的细碎燃料, 其垃圾处理能力为 290~1 300 Mg/d。图 1-4 展示了典型 RDF 焚烧炉的流程。垃圾处理通常包括筛除不燃物质和碎片, 这样可以增加热值, 燃

料也更统一。所用 RDF 的类型取决于锅炉设计结构。大多数焚烧 RDF 的锅炉设计结构都使用抛煤机，并以半悬浮的模式焚烧碎絮 RDF。还有一种 RDF 技术是流化床焚烧炉（Fluidized Bed Combustors, FBC）。

模块化焚烧炉与全量焚烧炉类似，都是焚烧未经处理的垃圾，但模块化焚烧炉一般是工厂预制，MSW 处理能力为 4~130 Mg/d。模块化焚烧炉最常见的一种类型是缺氧型焚烧炉（或称为热解气化型焚烧炉），这种焚烧炉包含两个燃烧室。图 1-5 展示了典型模块化缺氧型（Modular Starved-air, MOD/SA）焚烧炉的流程。提供给一次风室的是亚化学当量级空气。未完全燃烧的产物（CO 和有机物）进入二次风室，从中再充入一些空气，完成燃烧。还有一种模块化焚烧炉，它是由两个燃烧室组成的模块化过量空气（Modular Excess Air, MOD/EA）焚烧炉，功能上与在一次风室使用过量空气的全量焚烧装置类似。

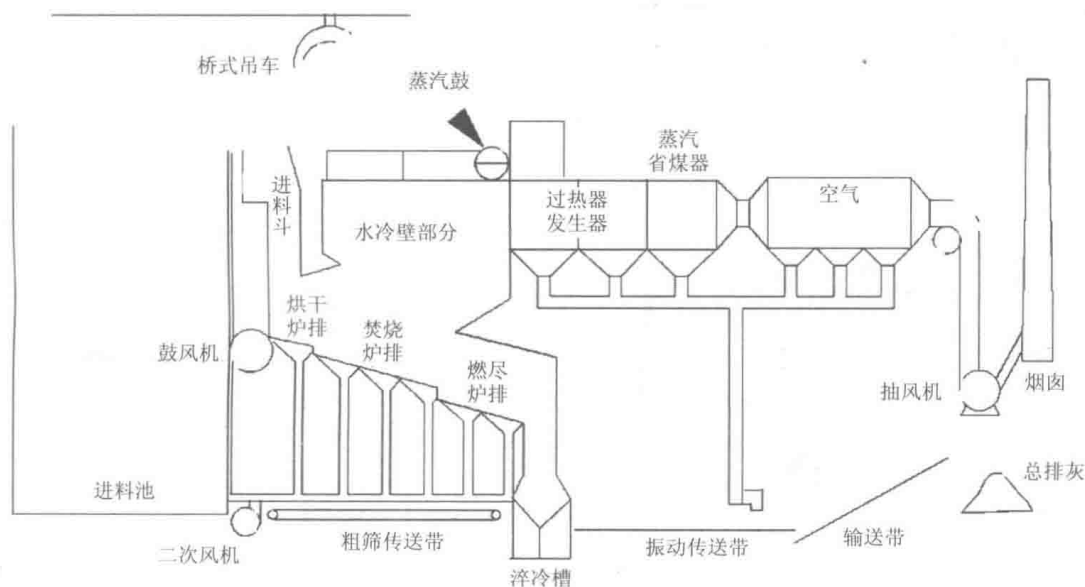


图 1-1 典型水冷壁全量焚烧炉

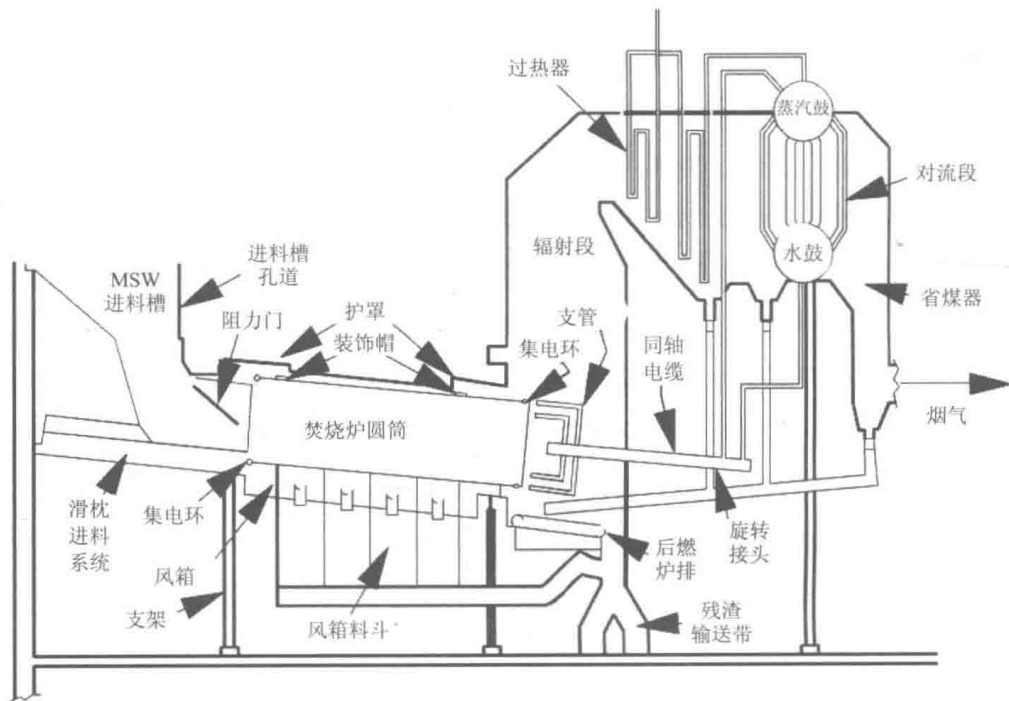


图 1-2 旋转式水冷壁焚烧炉简化流程

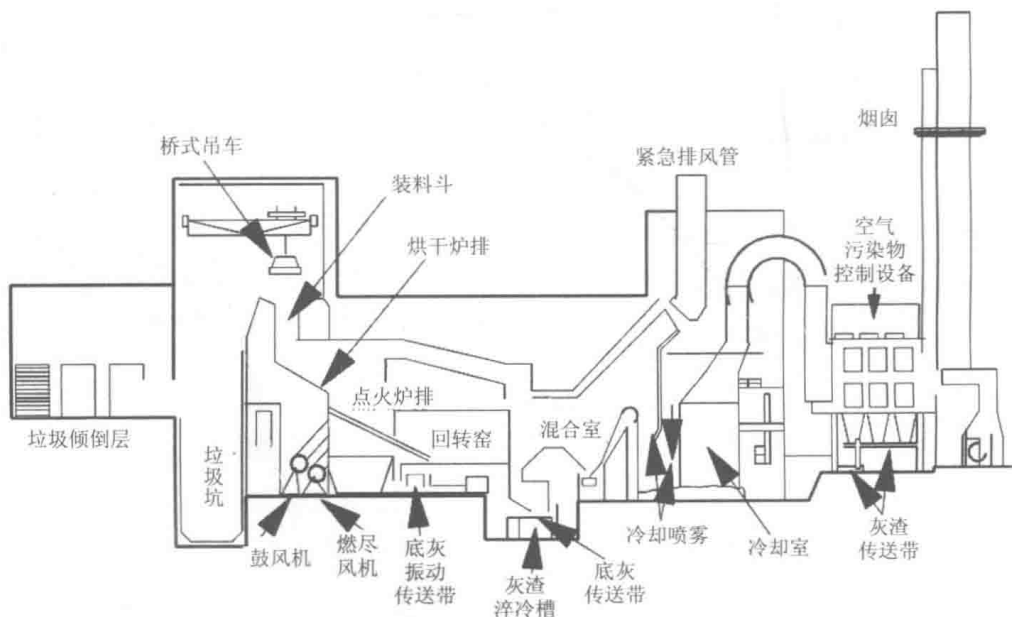


图 1-3 炉排式/回转窑式耐火墙全量焚烧炉

1.2 工艺过程说明⁴

本节介绍以下类型的焚烧炉：

- 水冷壁全量焚烧炉
- 旋转式水冷壁全量焚烧炉
- 耐火墙全量焚烧炉
- 垃圾衍生燃料焚烧炉
- 流化床焚烧炉
- 模块化缺氧型焚烧炉
- 模块化过量空气焚烧炉

1.2.1 水冷壁全量焚烧炉

MB/WW 设计结构是代表现有大型 MWC 的主要技术，预计将有超过 50% 的新型设备会使用 MB/WW 设计。MB/WW 装置的焚烧炉炉壁由充满循环高压水的金属管道构建，用来回收燃烧室的热量。燃烧室内火力偏小的区域，容易出现腐蚀，炉壁通常浇灌耐火材料做内衬。热量还可以从焚烧炉的对流段（即过热器或省煤器）回收。

使用这类焚烧炉，未处理的垃圾（筛除体积庞大的物品后）由桥式吊车运送到进料斗，由此将垃圾送往燃烧室。早期的 MB/WW 设计结构使用的是自流式进料装置，现在多用液压式单滑枕或液压式双滑枕的方式进料。

几乎所有新式 MB/WW 设施都使用往复式炉排或辊式炉排将垃圾运往燃烧室。炉排一般分为三部分：第一部分称为烘干炉排，用来削减垃圾燃烧前的水分；第二部分称为焚烧炉排，用来进行大部分的焚烧工作；第三部分称为燃尽炉排或终结炉排，用来焚烧垃圾中残余的可燃物。小型设备可能只包含两个单独的炉排部分。底灰从终结炉排排放到充水淬冷槽或滑枕排灰装置，湿灰从此处排往传送带系统，在进行处理之前传送到装灰或存灰区。干灰系统只在某些设计结构中使用，并未广泛推广。

燃烧空气从炉排下方经由一次风集气室充入。大部分 MB/WW 系统通过多个

集气室向各个炉排提供部分一次风,增强对垃圾层焚烧和散热的控制。燃尽风通过焚烧炉侧壁上的多行高压喷嘴喷入,将垃圾层生成的富燃料气体氧化,完成焚烧过程。燃尽风系统设计操作得当有助于烟气中有机物的混合和燃尽。通常,MB/WW MWC 的操作会用到 80%~100%的过量空气。

烟气从焚烧炉中排出,穿过附加热回收装置,去往一个或多个空气污染物控制设备(Air Pollution Control Device, APCD)。1.4 节将介绍会用到的 APCD 类型。

1.2.2 旋转式水冷壁全量焚烧炉

MB/RC 是较为独特的全量焚烧设计结构,装有这种设备的垃圾处理厂的处理能力为 180~2 400 Mg/d,每座处理厂通常装有 2~3 个。这类系统使用旋转式燃烧室。对体积过大无法进入焚烧炉的垃圾进行粗分后,垃圾通过滑枕装填到倾斜的旋转式燃烧室,它缓慢旋转,使垃圾在焚烧时向前翻滚。一次风穿过垃圾层喷入,燃尽风在垃圾层上方喷入。底灰从旋转式焚烧炉排放到补燃器炉排,然后进入湿式淬冷槽。湿灰在进行处理之前从此处传送到装灰或存灰区。

将近 80%的燃烧空气都是沿着旋转式燃烧室的长度方向提供的,而且绝大部分是燃烧室前半段提供。其余的燃烧空气位于锅炉旋转式燃烧室出口的上方,供后燃器炉排使用。典型的 MB/WW 焚烧系统在 80%~100%的过量空气水平下运行,相比较而言,MB/RC 在 50%左右的过量空气水平下运行。旋转式燃烧室中流经管道的水回收焚烧产生的热量,其他热量通过锅炉水冷壁、过热器和省煤器回收。烟气通常从省煤器引入 APCD。

1.2.3 耐火墙全量焚烧炉

1970 年之前,大量 MB/REF MWC 投入使用,旨在完成减废工作,但这种焚烧炉通常没有能源回收装置。20 世纪 70 年代和 80 年代兴建或拟建的 25 座 MB/REF 厂通过静电除尘器(Electrostatic Precipitator, ESP)减少 PM 排放,其中只有几座 MB/REF 厂安装了热回收锅炉。大多数 MB/REF 焚烧炉的垃圾处理能力为 90~270 Mg/d。预计美国日后不会再修建其他 MB/REF 厂。

MB/REF 焚烧炉的设计结构包括若干种:一种是圆柱形或正方体的分批进料直立式焚烧炉;还有一种是带有链条式、摇动式或往复式炉排的长方体燃烧室。

后一种焚烧炉是连续进料，并在过量空气模式下运行。如果垃圾在链条式炉排上移动，前进过程中通过焚烧炉时会通气不足。因此，燃料层厚度抑制垃圾的燃尽和完全焚烧，就很可能会有未焚烧的垃圾排放到底灰槽。摇动式和往复式炉排系统会在垃圾层前进通过燃烧室时搅动垃圾保持通气，因此垃圾与燃烧空气就可以接触良好，可燃物也就更容易燃尽。这种装置通常在炉排尾端将灰渣排到淬冷水槽，以便日后在填埋场进行收集和处理。

由于 MB/REF 焚烧炉没有传热介质（如新式能源恢复装置中的水冷壁），因此运行条件的过量空气率（150%~300%）一般比 MB/WW 焚烧炉高（80%~100%）。较高的过量空气水平是为了防止温度过高造成耐火材料损毁、出渣、积垢和腐蚀问题。过量空气水平高的其中一个负面作用是可能会造成燃烧室中夹带的 PM 增多，从而最终导致烟囱排放率升高。如果下游催化区域表面积增加，夹带 PM 过多还会导致 CDD/CDF 排放量增多。过量空气水平高的另一个负面作用是导致焚烧反应淬冷（冷却），妨碍有机物的热破坏。

为了解决上述问题，新型 MB/REF 焚烧炉都采用 Volund 设计结构（图 1-3 展示了这种 MB/REF 设计结构），这种设计结构大大减少了其他 MB/REF 系统带来的某些问题。耐火拱安装在焚烧区上方，不仅可以减少辐射散热损失并促使固体燃尽，还可以将烘干炉排及焚烧炉排流过旁通管的部分上升气体导入混合室。上升气体在混合室中与燃尽炉排或烧窑中的气体混合。底灰传送至灰渣淬冷槽。Volund MB/REF 焚烧炉在 80%~120%过量空气模式下运行，这更加符合 MB/WW 设计结构中的过量空气水平。因此，与 MB/REF 相比，这种设计结构的 CO 水平更低，有机物破坏效果更佳。

1.2.4 垃圾衍生燃料焚烧炉

垃圾衍生燃料焚烧炉是将处理程度不同的 MSW 进行焚烧，包括通过切碎简单地处理成大量不可燃的物品，以及批量加工生产成适于煤粉锅炉混烧的细碎燃料。由于筛除的不燃物数量庞大，因此从 MSW 到 RDF 的处理通常会增加垃圾的热值。

美国材料与试验协会建立了一套将 RDF 类型进行归类的标准。所用 RDF 的类型取决于锅炉设计结构。将 RDF 作为一次燃料的锅炉设计结构都使用抛煤机，