SHENGHUO LAJI FENSHAO FEIHUIZHONG
DIANXING WURANWU KONGZHI JISHU

生活垃圾焚烧飞灰中典型污染物控制技术

朱芬芬　等编著

化学工业出版社

SHENGHUO LAJI FENSHAO FEIHUIZHONG
DIANXING WURANWU KONGZHI JISHU

生活垃圾焚烧飞灰中典型污染物控制技术

朱芬芬　等编著

化学工业出版社
·北京·

《生活垃圾焚烧飞灰中典型污染物控制技术》主要介绍垃圾焚烧飞灰的治理技术，内容涉及焚烧飞灰中典型污染物种类，飞灰中典型污染物的去除技术，包括无机氯盐去除技术、重金属处理处置技术、二噁英处理技术；最后介绍了焚烧飞灰控制系统的展望和发展趋势。

本书具有较强的技术性和针对性，可供从事大气污染物控制、垃圾焚烧、固体废弃物处理处置等的科研人员和技术人员参考，也可供高等学校环境科学与工程及相关专业师生参阅。

图书在版编目（CIP）数据

生活垃圾焚烧飞灰中典型污染物控制技术/朱芬芬等编著. —北京：化学工业出版社，2019.8

ISBN 978-7-122-34390-1

Ⅰ.①生… Ⅱ.①朱… Ⅲ.①生活废物-垃圾焚化-污染防治 Ⅳ.①X799.305

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 081058 号

责任编辑：刘兴春　刘　婧　　文字编辑：刘兰妹

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　　刷：三河市航远印刷有限公司

装　　订：三河市宇新装订厂

710mm×1000mm　1/16　印张 13¼　字数 208 千字

2019 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888　　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。

定　　价：78.00 元

版权所有　违者必究

前言

近年来由于经济快速发展和生活水平的提高，中国的废物产生量逐年增加，但废物处理处置能力以及管理还不到位，导致了其不合理处置、非法丢弃、土壤被污染等的发生，被认为是重大环境问题。2016年，中国生活垃圾的清运量约 2.0×10^{8}t，是同年日本一般废物产生量（4.317×10^{7}t）的近5倍。中国生活垃圾无害化处理率为96.6%，其中37.5%采用焚烧处理，处理量高达 7.378×10^{7}t，是同年日本一般废物焚烧处理量（3.294×10^{7}t）的2倍以上。目前，中国已经成为世界上垃圾焚烧量最大的国家。从最近中国生活垃圾处理方式倾向来看，焚烧处理急剧增加，2005年中国有67个（处理能力 3.3×10^{4}t/d）生活垃圾焚烧设施，至2016年年底增加至249个（处理能力 2.5585×10^{5}t/d）。由此推算，2015年中国焚烧飞灰的产生量约 4.0×10^{6}t。

直到2008年，中国的垃圾焚烧飞灰一直是固化稳定化后安全填埋，但2008年以后，焚烧飞灰量激增，面对如此大量的飞灰，中国政府需要改变其处理处置方式。中国的垃圾焚烧设施主要依靠民间资本进行建设和运营（PFI），因此要尽量节约设施运行费用。提高发电输出以增加销售收入并且减少处置费用很高的飞灰产生成为当前的重大课题。因此，自2008年以来，飞灰从固化稳定化后进行卫生填埋，开始向利用水泥窑烧成、烧结、熔融处理等进行建材利用方向发展。虽然焚烧飞灰仍是危险废物，但是根据2016年相关规定，除了某些限制条件以外，私营企业也可以在没有许可证的情况下处置危险废物。也就是说，我们目前需要关于垃圾焚烧飞灰典型污染物控制的相关知识参考和案例借鉴。

本书总结了编著者及其研究团队前后近10年焚烧飞灰的研究成果，并对其他研究者相关的研究内容也做了一些综述。主要内容涉及焚烧飞灰中无机氯盐和重金属存在形式、去除工艺、水洗行为、烧结行为，重金属的资源化和稳定化，以及二噁英的处理技术。同时本书也介绍了引

入同步辐射的 X 射线近边吸收精细结构方法（XANES）进行元素形态分析的内容，并且对目前国内还没有采用 $NaHCO_3$ 作为中和剂而产生的飞灰进行了研究。其中，本书第 2 章以日本某焚烧厂飞灰为主，第 3 章既有日本焚烧飞灰也有中国某焚烧厂飞灰的内容。本书具有较强的针对性和技术性，希望能对相关研究者和工程技术人员有所帮助。

本书能出版得到了很多的支持，首先要感谢中国人民大学 2018 年度中央高校建设世界一流大学（学科）和特色发展引导专项资金的支持；其次要感谢熊轶群博士、柳晓燕博士对本书内容和格式补充修改，以及研究室所有学生的支持和帮助；最后，感谢化学工业出版社的支持。

限于编著者水平及编著时间，书中不足和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2019 年 2 月

目录

第1章 绪论 1

1.1 背景 …… 1
1.2 焚烧飞灰中的典型污染物 …… 2
1.3 生活垃圾焚烧飞灰现有处理技术简述 …… 3
1.3.1 无机氯盐去除技术简述 …… 3
1.3.2 重金属处理处置技术 …… 4
1.3.3 二噁英处理处置技术 …… 11
1.3.4 其他 …… 12
参考文献 …… 14

第2章 无机氯盐去除技术 21

2.1 生活垃圾焚烧飞灰中无机氯盐存在形式及分布 …… 21
2.1.1 背景 …… 21
2.1.2 几种焚烧飞灰及其元素组成 …… 21
2.1.3 化合物形态分析新方法——XANES …… 22
2.1.4 3种飞灰中无机氯盐的形态分析 …… 23
2.1.5 小结 …… 33
2.2 焚烧飞灰水洗工艺优化 …… 33
2.2.1 背景 …… 33
2.2.2 水洗工艺参数选择 …… 34
2.2.3 水洗工艺优化 …… 36
2.2.4 小结 …… 44
2.3 无机氯盐在水洗工艺中的行为研究 …… 44
2.3.1 背景 …… 44
2.3.2 $Ca(OH)_2$ 和 $NaHCO_3$ 中和飞灰在水洗工艺中无机氯盐的行为对比研究 …… 45
2.3.3 锅炉/急冷塔中的飞灰在水洗工艺中无机氯盐的行为研究 …… 59

2.3.4 小结 …… 71
2.4 水洗焚烧飞灰的烧结工艺优化 …… 72
2.4.1 背景 …… 72
2.4.2 几种焚烧飞灰水洗残渣元素组成 …… 73
2.4.3 烧结工艺优化 …… 73
2.4.4 小结 …… 88
参考文献 …… 88

第3章 重金属处理处置技术 92

3.1 不同类型的城市垃圾焚烧飞灰中重金属形态的研究 …… 92
3.1.1 背景 …… 92
3.1.2 4种不同来源焚烧飞灰元素组成 …… 93
3.1.3 4种飞灰中重金属形态分布 …… 94
3.1.4 飞灰中重金属浸出特性 …… 99
3.1.5 重金属形态分布与浸出特性的关系讨论 …… 99
3.1.6 小结 …… 101
3.2 “水洗+烧结” 过程中重金属行为及去除机理 …… 102
3.2.1 背景 …… 102
3.2.2 4种焚烧飞灰“水洗+烧结” 过程中重金属行为分析 … 103
3.2.3 Pb的行为讨论 …… 114
3.2.4 小结 …… 117
3.3 重金属资源化技术 …… 117
3.3.1 背景 …… 117
3.3.2 湿法 …… 118
3.3.3 火法 …… 128
3.3.4 电化学技术 …… 130
3.3.5 小结 …… 131
3.4 重金属稳定化技术 …… 132
3.4.1 背景 …… 132
3.4.2 烧结 …… 132
3.4.3 熔融 …… 134
3.4.4 药剂稳定法 …… 135
3.4.5 小结 …… 138

参考文献 …… 139

第4章 二噁英处理技术 148

4.1 焚烧炉系统中二噁英控制技术 …… 148
4.1.1 背景 …… 148
4.1.2 基本控制技术 …… 148
4.1.3 烟气中的控制技术 …… 152
4.1.4 小结 …… 155
4.2 热处理技术 …… 155
4.2.1 背景 …… 155
4.2.2 高温热处理技术 …… 155
4.2.3 低温热处理技术 …… 156
4.2.4 小结 …… 156
4.3 新技术综述 …… 157
4.3.1 等离子体技术 …… 157
4.3.2 NO_x 和二噁英联合去除(SNCR 技术) …… 158
4.3.3 光催化降解技术 …… 158
4.3.4 活性炭负载金属催化技术 …… 159
4.3.5 低温药剂脱氯还原技术 …… 160
参考文献 …… 161

第5章 展望和趋势分析 167

5.1 焚烧炉系统的发展趋势 …… 167
5.1.1 未来垃圾成分特性 …… 167
5.1.2 焚烧炉及工况控制条件 …… 177
5.1.3 烟气控制系统 …… 179
5.1.4 小结 …… 182
5.2 焚烧飞灰中无毒害无机氧化物的利用方式 …… 182
5.2.1 水泥窑 …… 183
5.2.2 陶粒 …… 184
5.2.3 其他 …… 185
5.2.4 小结 …… 186

5.3 焚烧飞灰在“自然+ 人类社会” 大物质循环中的意义 …… 187
5.4 小结 …… 188
参考文献 …… 188

附录 191

附录 1 …… 191
附录 2 …… 193
附录 3 …… 194
附录 4 …… 195
附录 5 中英文对照 …… 199

第1章 绪论

1.1 背景

自从1962年《寂静的春天》出版以来[1]，它给予人类强有力的警示，让人们开始关注环境问题。由于社会发展对环境造成的负面影响不容易修复，而且人们保护环境的行动或人们对环境的认识还不够全面[2~4]，所以，尽管人们已有所行动[5]，但是有些地方的环境仍没有得到很大的改善甚至有些地方更加恶化，导致人们现在面临着全球变暖[6,7]、荒漠化严重[8,9]、能源和资源危机等严重威胁人类自身生存的问题。显然，人类需要与环境和谐共处[10~13]。

科学家和环保工作者一直在思考、实践，提出并发展了一系列相关的理论，例如“减量化（Reduce）、再利用（Reuse）、资源化（Recycle）”3R原则[14,15]、清洁生产、可持续发展[16~19]、和谐社会[20]、生态文明等。我们用这些理论指导生产、生活和相关政策的制定[21~24]。

显然，城市固体生活垃圾处理也基于这些概念的指导[5]。城市生活垃圾的处理一般经过收运、中转、收运、卫生填埋/焚烧/堆肥、（卫生填埋）这几个过程。卫生填埋、焚烧和堆肥作为使用时间最长、应用最广的三大处理处置技术，它们各有利弊。其中，焚烧是一种在有氧条件下充分燃烧的废物处理技术。它将生活垃圾转化为气态、液态和固态产物，同时释放热能[5,25]。

由于国土面积狭小、天气多雨潮湿，日本和一些欧洲国家广泛采用焚烧技术来处理城市生活垃圾[26,27]。图1.1显示了2007～2016年日本

的城市生活垃圾处置方式及相应处理量。



图 1.1　日本城市固体废物处理处置情况

从图 1.1 可以看出，在日本，超过 75%的城市生活垃圾通过焚烧处理。不仅在发达国家，在中国等发展中国家的一些大城市中，焚烧炉也在逐渐建成[28,29]。

垃圾焚烧有很多优点。首先，它可以有效地减少废物量，减容率可达 90%以上。

其次，垃圾焚烧比垃圾填埋场和堆肥占地少得多，这点在生活垃圾处理场地狭窄时非常重要；而且，可以通过回收焚烧过程中产生的热量来发电或获得热水。

但是，垃圾焚烧技术也有其缺陷：投资成本和运行成本高[30]、二次污染控制系统产生危险废物、因为二次污染控制不当导致危险成分外溢。其实，焚烧技术成本高的一个主要原因就是为了控制其二次污染。作为二次污染控制系统产生的危险废物——飞灰，如果能得到很好的资源化利用，将对焚烧系统发展和成本降低有重要的意义。

1.2　焚烧飞灰中的典型污染物

飞灰通常是含水率较低的细小颗粒，颜色从白色到灰色和黑色不

等，依其组成而定，颗粒细小，持水量较高，易冻胀且难于压实。飞灰富含重金属、二噁英类化合物、盐等污染物。重金属主要来自焚烧的生活垃圾，最为典型的包括具有高浸出特征的铅（Pb）、铜（Cu）、镉（Cd）、铬（Cr）和锌（Zn）等元素，在城市生活垃圾焚烧（MSWI）飞灰中的重金属通常以无定形和玻璃态形式存在于各种化合物和矿物中，可能会随着流经飞灰的液体发生迁移，污染周围环境。二噁英类化合物也是飞灰中的重要污染物，其主要是在垃圾焚烧和烟气净化过程中产生。随着烟气净化系统二噁英去除效率的改善，烟气中绝大部分的二噁英被净化系统截留在飞灰中。二噁英类物质具有水溶性低、脂溶性高的特点，主要是通过在生物体内聚积后经过食物链被摄入人体。飞灰中的水溶性盐分一部分由垃圾带入，包括垃圾本身含有的盐分以及焚烧过程中转化而成的盐分；另一部分是在烟气净化系统中产生的，包括烟气中的酸性气体（HCl、SO_2 和 NO_x 等）与碱性添加剂的反应产物，以及过量的添加剂。飞灰中水溶性盐分主要包括 K^+、Na^+、Ca^{2+} 等金属阳离子以及 OH^-、SO_4^{2-}、Cl^- 等阴离子。在稳定化处理时，飞灰中高含量的 NaCl 不利于飞灰的固化处理；在填埋场中，渗滤液中高浓度的 Ca^{2+} 会导致渗滤液收集和处理系统的结垢和堵塞。

1.3 生活垃圾焚烧飞灰现有处理技术简述

1.3.1 无机氯盐去除技术简述

生活垃圾中有丰富的含氯有机物（橡胶、聚氯乙烯等）及无机物（NaCl、KCl），在处理过程中会主要以氯化氢（HCl）的形式排出，高达几百甚至几千 mg/L。氯会影响重金属的迁移和分布，并作为元素之一形成二噁英。因此，在中高温条件下去除氯是垃圾尾气处理的任务之一。

烟气脱除 HCl 技术按其脱氯方式及脱氯反应产物的形态可分为湿法、半干法和干法。

① 湿法系统为烟气先经过喷雾干燥塔初洗，然后通过除尘器后再进入湿法洗涤吸收塔洗涤，一般以水溶液或者 $Ca(OH)_2$、NaOH 等碱性浆液作为脱氯剂，生成的脱氯产物存在于水溶液或者浆液中。湿法吸

收性能最好，但是工艺复杂，成本高。

② 半干法是石灰浆在喷雾吸收反应塔内被雾化，雾滴和热烟气相接触，经过复杂的传质传热反应过程 HCl 被脱除，是以水溶液或者浆液为脱氯剂，而生成的脱氯产物为干态的脱氯工艺。该法虽设备简单投资比湿法要低，但是效率不高。

③ 干法脱氯是加入的脱氯剂为干态，生成脱氯产物也为干态的脱氯工艺。干式烟气净化系统由于对污染物的净化效率较高，吸收剂利用率高，操作简单，生产费用低而成为脱氯优选。欧洲[31]主要采用干法系统，在 240℃下对 HCl 和 S 化进行联合脱除，脱氯剂采用 $NaHCO_3$ 和天然碱，脱除效率 HCl 高达 99%，SO_2 达到 95%。

1.3.2 重金属处理处置技术

重金属处理处置技术主要包括化学稳定法、化学提取法等化学法，水泥固化等固化与稳定化技术，熔融、烧结或煅烧等热处理技术，以及其他一些综合处理技术。

(1) 化学稳定法

化学稳定法是使用化学试剂如螯合剂或其他化合物与飞灰中的重金属反应形成稳定的化合物，如螯合物或沉淀[32~37]。化学试剂包括乙二胺四乙酸盐（EDTA）、二乙烯三胺五乙酸盐（DTPA）、有机硫化物、硫脲、磷酸盐、铁酸盐、硫化物等[33~37]。螯合剂的优点之一是它们通常在中等 pH 值条件下反应[37]。EDTA 可以浸出灰分中的重金属；NaOH 可用于浸出锌，但所得浸出残渣应进一步处理[35]；有的甚至在碳酸盐飞灰中加入二氧化碳来稳定铅和锌[38]。能沉淀的磷酸盐相非常多，特别是磷酸钙和重金属磷酸盐；Cu，Pb，Zn（$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$）；$Ca_4H(PO_4)_3 \cdot 2.5H_2O$；$Ca_4(PO_4)_2$；$Ca_5H(PO_4)_3(OH, Cl, F)$；$Cu_4PO_4OH$；$Cu_3Al_4(PO_4)_3(OH)_9 \cdot 4H_2O$；$Cu_6(NO_3)_2(PO_4)(OH)_7$；$(Cu, Zn)_6(PO_4)_2(OH)_6 \cdot H_2O$，$Pb_5(PO_4)_3Br$；KNa；$Pb_8(PO_4)_6$；$\beta$-$Pb_9(PO_4)_6$；$Pb_5(PO_4)_3Br$；$KPb_4(PO_4)_3$；$PbHPO_4 \cdot H_2O$；$KZn_2H(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$；$\alpha$-$CaZn_2(PO_4)_2$；$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$；$Zn_3(PO_4)_2$；$(Cu,Zn)_6(PO_4)_2(OH)_6 \cdot H_2O$[39]。这些化合物稳定飞灰的机理与不断增加的磷酸盐沉淀[40,41]和微环境效应有关。在富含钙的介质中，通常以碳酸

钙的形式存在，大部分可浸出的金属在磷酸钙沉淀过程中被捕获[39]。一些研究人员倾向于使用聚合物来稳定飞灰，特别是热塑性聚合物，将残留物包裹在基质中[36]。最常见的热塑性聚合物是不饱和聚酯（UP）树脂。

化学稳定后，飞灰中的重金属比原飞灰中的状态更稳定，然而它们仍然存在被浸出的风险，并且螯合物和沉积物仍然存在问题。所以一些化学处理法需要与其他处理方法如水泥固化法相结合[42]。此外，尽管化学处理法在日本连续运行焚烧炉飞灰处理中得到了广泛的应用，但螯合剂的成本依旧较高[42]。

（2）化学提取法

化学提取法与化学稳定法有些相似，化学稳定法是使用化学试剂与目标元素和分离的沉积物或溶液反应以回收目标元素或使其稳定[43]。化学提取使用酸、碱或水来提取重金属以获得溶液，然后使用化合物形成沉积物[44~47]，在将金属溶解到溶液中之后，需要湿法冶金如电渗析法来提取出目标金属，这里更强调回收的目的[39,48]。目标金属通常是 Cu、Ni、Co 和 Zn。有一种名为“酸浸提—硫化物稳定化工艺（AES 工艺）”的化学提取典型处理方法，其原理就是在飞灰中加入水将其转化成泥浆，然后用酸性试剂提取易溶重金属，加入硫化钠来浆化以稳定剩余的重金属，从而防止脱水饼块中的重金属浸出[49]。

化学提取法有此复杂并且不易实现，但研究人员更倾向于利用飞灰中金属的连续提取来研究浸出行为的特征[50~54]。逐步化学提取（SCE）最早由 Tessier 提出[55]，目前它已被广泛用于研究焚烧飞灰中重金属的物理化学形态。为了研究飞灰的特性，有时将逐步化学提取与其他方法如 X 射线衍射（XRD）分析和 X 射线荧光（XRF）分析相结合[51]。有时，SCE 的步骤将根据实际目的进行简化[53]。

（3）水泥固化

水泥固化是一种用水泥作为螯合剂处理焚烧飞灰的方法，通过利用常温下水泥的水化过程来稳定重金属[32,56~63]。水泥固化是一种成本较低的处理方法。

无侧限抗压强度（UCS）是评估凝固的重要因素[73]。当普通波特兰水泥（OPC）与焚烧飞灰混合时，随着焚烧飞灰与 OPC 比例的增加，混合水泥的水量增加、强度降低[56]。低含量波特兰水泥和更高的

废物含量导致最终产物强度降低，因此通常使用0.4～0.5的“废料/螯合剂”比率，水/固比为0.4～0.6。螯合剂（水泥）含量的提升增加了体积密度，因为黏合剂填充了固化样品的空隙空间。随着结晶相的增加，UCS减少[57]。所以初始凝固时间和水合过程在混合中很重要。OPC报告的标准初始和最终设定时间分别不应少于45min和不超过10h[58]。文献表明，水合速率在0～40℃范围内对温度不敏感。据报道，含铅废水或水泥基质的较低固化温度降低了水泥中形成的铅盐的溶解度，导致颗粒上的凝胶状涂层增加[59]。碳化是影响最终产品UCS的另一个因素。与非碳酸化产品相比，碳酸化后的稳定化/固化（S/S）产品具有更高的强度[60,61]。碳酸化涉及与如AFt/AFm［基于$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (13\sim19)\ H_2O$的水铝钙石结构的水合铝酸钙］、硅酸钙水合物（CSH）凝胶和水合钙（CH）等相的反应。CSH凝胶被认为在固定有毒物种方面发挥着重要作用，主要通过碳酸化来固定[57]。

水泥固化后的焚烧飞灰目前主要送往垃圾填埋场。焚烧飞灰因为氯化物、硫酸盐和碱含量较高，所以不能直接作为混合水泥使用[63]。因此，即使焚烧飞灰进行了水泥固化，由于垃圾填埋场的复杂环境，仍然存在潜在的浸出环境风险[64]。事实上，用波特兰水泥固化焚烧飞灰存在一些缺点，即需要防止湿度的破坏和重金属的浸出[65～68]。此外，由于添加水泥和水以形成刚性和多孔固体，最终产品的体积增大导致处理成本增加[35]。如果想回收焚烧飞灰作为水泥中的优质成分或添加剂，应对焚烧飞灰进行预处理以去除其中的一些影响水泥品质和生产的成分[69～79]，例如水洗焚烧飞灰。焚烧飞灰在水洗过程中，与水的相互作用会生成水合化合物，例如钾石膏、石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）、钙矾石（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$）、羟基锌酸钙［$CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$］和月桂酸锂［$CH_3(CH_2)_{10}COOLi$］[70,71]。洗涤过程的一个缺点是向混合物中加入洗涤水会增加最终的水/固体（W/S）比，从而降低最终产品的UCS。此外，水泥固化不适用于富铅飞灰，因为Pb在高pH值下易于从固相中析出，这是由水泥本身成分引起的[37]。

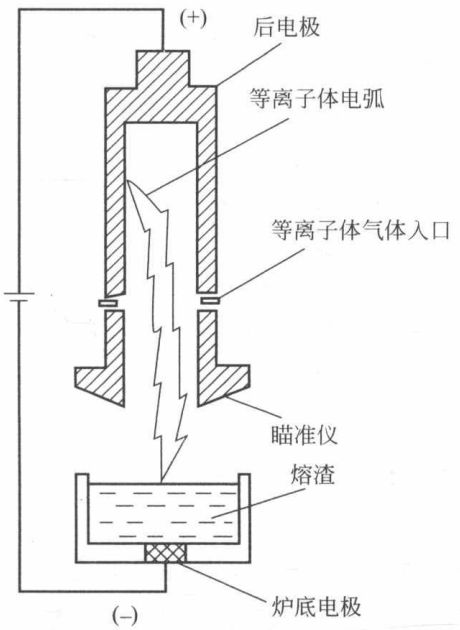
（4）熔融

熔融技术自20世纪90年代以来开始发展[80]。它被认为危险废物稳定化最彻底的技术[80]，由于熔融过程是将飞灰加热至通常高于1200℃的熔合温度，在此条件下飞灰转化为更稳定的玻璃熔渣[43,80,81]。

融化过程中有机污染物会分解，飞灰体积可减少 70%。更重要的是，由于重金属已经稳定在玻璃渣中，所以熔渣可以通过一些简单的预处理而用于玻璃和陶瓷工业中[43,80~83]。

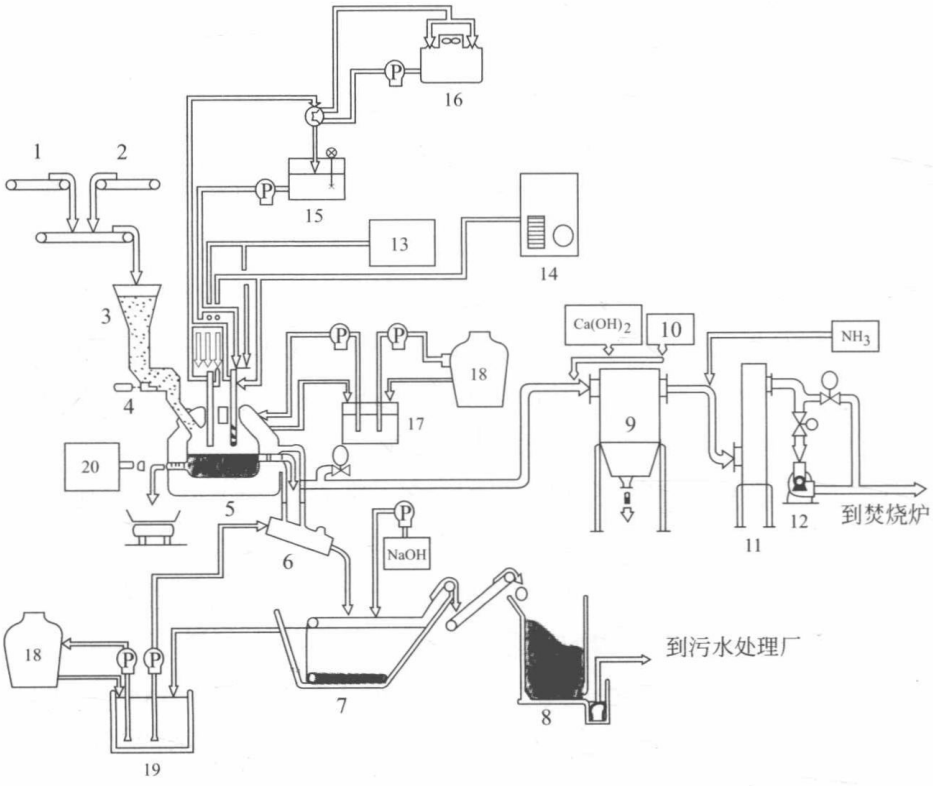
熔融炉有多种类型，如等离子熔窑、反射炉熔窑、DC 电焦耳加热系统等[84~87]。图 1.2 展示了等离子炬和等离子灰熔融系统的原理。现在多使用电作为熔融的热源，在实际的工厂中使用的电力都是垃圾焚烧产生的电力。很多熔融炉建设在焚烧厂内或者焚烧厂附近。

熔融可以有效减少飞灰的体积，稳定效果也非常好[81]。然而，熔融过程也产生熔融飞灰，并且该飞灰中的重金属浓度远大于来自焚烧炉的原始飞灰，其毒性更强[81,85]。一些熔融厂将产生的飞灰输送到采矿厂[81,88]，以湿法冶金方法回收有价值的金属[89]。一些熔融厂则将其稳定化处理后送至最终处置场，如垃圾填埋场。尽管如此，焚烧飞灰仍旧是一个问题。此外，高成本也是熔融的另一个关键问题。根据“城市固体废物焚烧设施总账（连续燃烧，2016 年）”，在 1154 个连续运行的城市生活垃圾焚烧工厂（MSWI）中，仅有 46 家工厂采用熔融法处理焚烧飞灰。其中一个重要原因是熔融建设和运行成本都很高，而且在能源如此紧张的情况下熔融更是不受推荐[81]。



(a) 等离子炬的原理

图1.2



(b) 等离子灰熔融系统流程

图 1.2　等离子体熔融系统的示意[84]

1—焚烧灰；2—飞灰；3—灰接收料斗；4—供料器；5—灰熔融炉；6—炉渣生产系统；7—炉渣分离输送机；8—渣坑；9—袋式除尘器；10—鼓风机；11—脱氮塔；12—感应扇；13—电源；14—空气压缩机；15—火炬冷却水池；16—火炬冷却水热交换器；17—灰熔融炉冷却水箱；18—冷却塔；19—渣水冷却供水箱；20—泥枪

熔融的温度一般都超过 1000℃，而飞灰中一般都含有高浓度的氯化物和其他低沸点盐，会给熔融的运行带来麻烦，所以，生活垃圾焚烧炉的飞灰最好进行预处理脱盐[90,91]。

(5) 烧结或煅烧

烧结过程或煅烧过程与熔融过程类似，但两个过程的操作温度低于熔融过程中的温度[43]。

与熔融相比，由于加热温度较低，烧结需要更少的能量，而烧结对于稳定和解决飞灰也是有效的，特别是解决二噁英的问题[92~94]。由于两种工艺的操作温度都不如熔融工艺中的那么高，所以最终产品的减容要小于熔融工艺。另一个缺点是烧结过程的性能与生焚烧飞灰的化学组成密切相关，并且在许