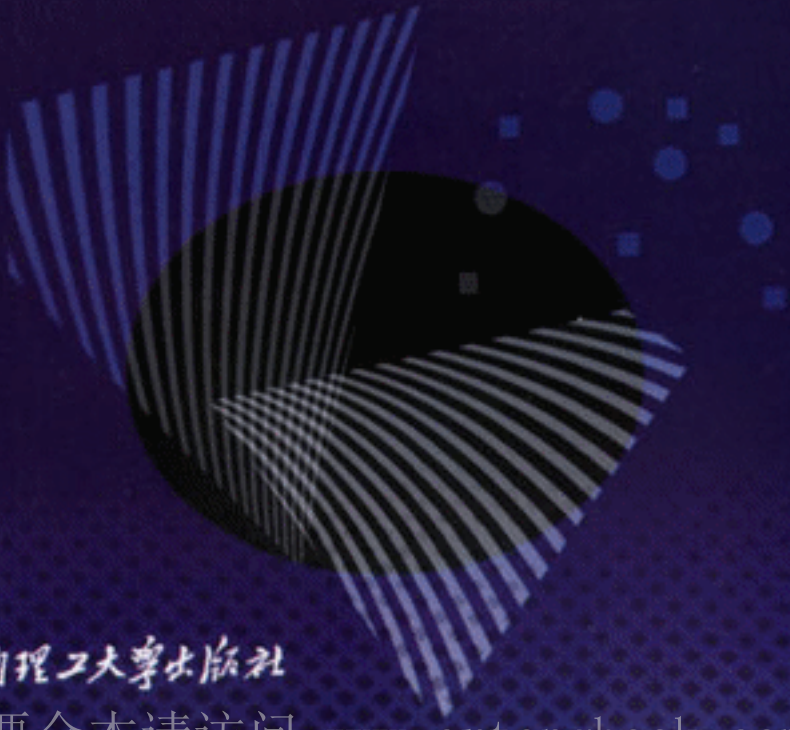
广东省自然科学基金研究团队项目[003045]资助出版

固体废弃物能源利用

陈勇　马晓茜　李海滨　赵增立　著



华南理工大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

广东省自然科学基金研究团队项目［003045］资助出版

固体废弃物能源利用

陈勇　马晓茜　李海滨　赵增立　著

华南理工大学出版社

·广州·

图书在版编目（CIP）数据

固体废弃物能源利用/陈勇，马晓茜，李海滨，赵增立著. —广州：华南理工大学出版社，2002.7
ISBN 7-5623-1814-X

Ⅰ.**固…** Ⅱ.①**陈…**②**马…**③**李…**④**赵…** Ⅲ.**固体废物-废物综合利用** Ⅳ.X705

中国版本图书馆 CIP **数据核字（**2002**）第** 028563 **号**

总 发 行：华南理工大学出版社
（广州五山华南理工大学 17 **号楼，邮编** 510640**）**
发行电话：020-87113487 87111048**（传真）**
E-mail：scut202@scut.edu.cn
http：//www2.scut.edu.cn/press
责任编辑：王魁葵
印 刷 者：广东农垦印刷厂
开 本：850×1168 1/32 **印张：**10 **字数：**260 **千**
版 次：2002 **年** 7 **月第** 1 **版第** 1 **次印刷**
印 数：1—1 000 **册**
定 价：20.00 **元**

版权所有 盗版必究

内容提要

全书分为两大部分。第一部分为固体废弃物能源利用系统评价与优化，包括：造纸厂固体废弃物排放的调研，以及造纸过程环境影响的生命周期评价；造纸厂固体废弃物能源利用方案的生命周期评价；生物质气化发电与燃煤发电的生命周期评价；固体废弃物处理系统的热平衡分析与优化。第二部分为固体废弃物能源利用系统热力特性研究，包括：固体废弃物物化特性与热解、燃烧机理；热带地区几种典型固体废弃物的干燥热解特性；垃圾焚烧、气化过程中流动与传热特性；固体废弃物焚烧炉热力分区模型；几种新型固体废弃物焚烧技术；垃圾焚烧的污染与腐蚀机理及其控制；垃圾焚烧灰渣的成分分析及其熔融特性；烟气流动的非线性机理与炉内温度场模拟建模。

本书可作为动力工程及工程热物理、环境科学等领域的研究人员的参考资料，也可供环境卫生管理部门和固体废弃物处理厂的开发、设计、运行的工程技术人员参阅，还可作为大专院校相关专业的教师、研究生、本科生的参考书。

前　言

固体废弃物是指从资源中获得的原材料经加工、产品生产、产品使用或消费、再生循环利用过程后排出的固态物质，如：生活垃圾、工业垃圾、农产品废弃物和医院垃圾等，若裸露堆放或简单填埋不仅侵占土地，而且污染周围环境和地下水源。但是，固体废弃物也是一种潜在的资源，除了实现可再生资源回收利用外，还可对它实现能源化利用。固体废弃物能源化利用方法，是目前一种较好的固体废弃物减量化、无害化、资源化的处理方法。

广东省经济发展迅速，但经济发展带来的固体废弃物环境污染也非常严重。2000 年全省固体废物产生量 2573.39 万吨。其中，生活垃圾 879.06 万吨，占总量 34.16%；工业固体废物产生量 1694.33 万吨，比上年减少 9.75%，其中工业危险废物 53.91 万吨。环境污染和资源缺乏将制约经济发展，使经济发展成为短期行为。转变传统的发展模式，节约资源，减少能源消耗，实施环境保护是实现广东省经济可持续发展的关键。

在这样的背景下，广东省科技厅于 2001 年开始，在首批启动的广东省自然科学基金研究团队项目中，对“固体废弃物能源利用”研究团队给予资助。广东省自然科学基金研究团队项目是基础研究领域的创新之举，旨在促进具有共同研究方向和兴趣的科技工作者之间的交流和合作，发挥团队优势，实现资源共享。“固体废弃物能源利用”项目由中科院广州能源研究所承担，华南理工大学参加，团队核心成员有中科院广州能源研究所陈勇研究员，吴创之研究员，林伯川研究员，李海滨研究员，华南理工

需要全本请访问 www.ertongbook

大学马晓茜副教授。陈勇研究员为协调人，全面负责项目的组织实施。

团队研究项目立项的意义及主要研究内容是：针对广东省经济迅速发展带来的固体废弃物污染问题，通过“逆向分析”、“逆生产过程”分析（即从末端进行分析），建立以固体废弃物能源利用为末端控制的资源循环型生产体系的评价方法，确立相应的再生利用技术和工艺，并确定最终作为能源利用的固体废物种类、数量以及能源利用的理论和技术，为广东省经济的可持续发展和产业结构的优化升级提供可靠的理论依据和切实可行的固体废弃物能源利用技术工艺，实现经济发展中资源开发、能源利用和环境保护的协调发展。

研究团队的远期目标是：

（1）为构造适合广东省经济、文化、资源条件的固体废弃物能源利用的末端控制的资源循环型生产体系，提供评价方法系统；

（2）提供针对各种固体废弃物能源利用的技术方案及可行性论证体系；

（3）形成固体废弃物能源利用的系统理论与技术体系。

为了达到这一远期目标，团队在原有的研究基础上，制定了切实可行的近期、中期目标：

（1）收集信息和资料，进行分析、评价，找到切入口，制定适合广东省经济可持续发展的项目实施方案；

（2）初步建立评价体系，并对一二个生产体系进行实例分析评价，提出以固体废弃物能源利用的末端控制的资源循环生产体系方案；

（3）医疗垃圾等难处理垃圾的热解焚烧技术、多种生物质废物的气化发电技术工业示范；

（4）在理论研究与技术开发的同时，使 2～3 项技术实现产

业化；

（5）形成若干个实用技术，如：垃圾衍生燃料技术、造纸废渣能源利用技术、废弃物联合循环发电技术、固体废弃物纯氧燃烧技术及气化技术、固体废弃物制油技术、生物质等离子体气化技术、制氢技术等；

（6）按研究团队建设要求，组织队伍，完善管理体系。

研究团队在对第一年度成果进行总结时，完成了 3 个年度报告：

（1）固体废弃物能源利用 2001 年度工作总结报告；

（2）固体废弃物能源利用调研报告（以造纸厂为对象的调查与分析）；

（3）固体废弃物能源利用系统热力特性研究报告。

团队研究工作受到了同行专家和有关领导的好评。在年度报告的基础上，以阶段性研究成果为素材，撰写了《固体废弃物能源利用》这本专著。

全书分为两大部分：第一部分为固体废弃物能源利用系统评价与优化；第二部分为固体废弃物能源利用系统热力特性研究。中科院广州能源研究所陈勇研究员撰写了前言，绪论，第四、五章，并对全书进行了统稿；李海滨研究员撰写了第九、十章；赵增立副研究员撰写了第三、六章、林伯川研究员撰写了十一章；华南理工大学马晓茜副教授撰写了第一、二、七、八、十二章。中科院广州能源研究所吴创之研究员、黄海涛研究员、阎常峰助理研究员、王志奇博士、郭小汾博士、杨雪莲、熊祖鸿，华南理工大学管霖副教授、李飞、卢苇、张笑冰、孙振刚、彭思众、周春艳等，他们也参加了本书的部分工作，提供了有用的资料。

广东省科技厅的领导及基础与社会发展处的同志对本书出版给予了极大的支持，在此一并致以诚挚的谢意。

由于该书的主要内容来自团队研究的年度报告，而研究报告

注重的是时效性和创新性，因此难免有些观点一时难以得到普遍的认同，作者大胆地把它们发表出来，是为了起到抛砖引玉的作用。另外，由于作者水平有限，书中错漏与不当之处在所难免，也希望读者批评指正。

作者

2002.3

目　　录

绪论……（1）
一、固体废弃物及其污染 ……（1）
二、固体废弃物处理方法概述 ……（4）
三、固体废弃物能源化利用概述 ……（5）
四、固体废弃物能源利用系统评价 ……（11）
参考文献……（15）

第一部分　固体废弃物能源利用系统评价与优化

第一章　造纸厂环境影响的生命周期评价 ……（21）
1.1　造纸厂固体废弃物概述 ……（21）
1.1.1　迅速发展的造纸工业……（21）
1.1.2　造纸厂固体废弃物的危害 ……（22）
1.1.3　造纸厂环境影响的评价方法 ……（23）
1.2　造纸厂固体废弃物排放的调查 ……（24）
1.2.1　木材造纸为主的固体废弃物排放 ……（24）
1.2.2　废纸造纸的固体废弃物排放 ……（25）
1.3　造纸厂工艺过程的编目计算与比较 ……（26）
1.3.1　小型造纸厂环境评价的 LCA 模型 ……（26）
1.3.2　大型造纸厂环境评价的 LCA 模型 ……（27）
1.4　环境影响比较 ……（33）
1.4.1　4 种制浆工艺的环境影响 ……（33）
1.4.2　3 种产品纸的综合比较 ……（33）
参考文献……（35）

第二章　造纸厂固体废弃物能源利用的生命周期分析 …… (36)
2.1　固体废弃物燃料特性 …… (36)
2.1.1　固体废弃物的工业分析 …… (36)
2.1.2　固体废弃物的干燥热解实验 …… (37)
2.1.3　干燥热解实验结果的整理 …… (41)
2.1.4　干燥热解动力学规律 …… (42)
2.2　固体废弃物能源利用方案的编目分析 …… (45)
2.2.1　对小型造纸厂的编目分析 …… (45)
2.2.2　对大型造纸厂的编目分析 …… (48)
2.3　方案比较 …… (54)
2.3.1　小型造纸厂两种方案的比较 …… (54)
2.3.2　大型造纸厂四种方案的比较 …… (56)
2.3.3　方案选择的一般性原则 …… (58)
2.4　效益分析 …… (59)
2.4.1　经济效益 …… (59)
2.4.2　环境效益 …… (60)
参考文献 …… (63)
第三章　生物质气化发电与燃煤发电的生命周期评价 …… (65)
3.1　生物质气化联合循环发电方案的生命周期分析 …… (65)
3.1.1　基本假设 …… (65)
3.1.2　气化联合循环发电的生命周期过程 …… (67)
3.1.3　生物质发电周期过程主要排放物计算结果 …… (68)
3.2　燃煤发电的生命周期分析 …… (68)
3.2.1　基本假设 …… (68)
3.2.2　燃煤发电的生命周期过程 …… (69)
3.2.3　燃煤发电周期过程排放计算结果 …… (70)
3.3　生物质气化后与煤混烧发电方案的生命周期分析 …… (71)
3.3.1　基本假设 …… (71)

3.3.2 生物质气化后与煤混烧发电的生命周期过程 …… (71)
3.3.3 混烧发电周期过程主要排放物计算结果 …… (72)
3.4 比较与综合评价 …… (73)
参考文献 …… (75)
第四章 固体废弃物处理系统的能量平衡与优化设计 …… (76)
4.1 控制氧量燃烧系统——燃室工况 …… (76)
4.1.1 热平衡模型与计算 …… (76)
4.1.2 达到热平衡的几种措施 …… (79)
4.1.3 优化工况 …… (81)
4.2 层燃炉中最优工况分析 …… (82)
4.2.1 炉内热平衡分析 …… (82)
4.2.2 炉内燃烧稳定性分析 …… (84)
4.3 高水分垃圾建立能量自给型焚烧—堆肥系统 …… (85)
4.3.1 系统简介 …… (85)
4.3.2 堆肥部分计算 …… (85)
4.3.3 发电部分计算 …… (86)
4.3.4 分析与讨论 …… (89)
4.4 焚烧垃圾发电系统的智能优化 …… (90)
4.4.1 垃圾处理流程及变量定义 …… (91)
4.4.2 垃圾焚烧发电优化的数学模型 …… (93)
4.4.3 智能优化搜索算法 …… (95)
4.4.4 垃圾焚烧发电优化结果及分析 …… (97)
参考文献 …… (101)

第二部分 固体废弃物能源利用系统热力特性研究

第五章 固体废弃物物化特性与热解、燃烧机理 …… (105)
5.1 垃圾物化特性 …… (105)
5.1.1 垃圾取样 …… (105)

需要全本请访问 www.ertongbook

5.1.2 垃圾成分分析 …… (106)
5.2 垃圾中可燃物的热解机理 …… (108)
5.2.1 热解实验装置与方法 …… (108)
5.2.2 可燃物热解的基本过程 …… (108)
5.2.3 热解动力学规律 …… (109)
5.2.4 热解机理分析 …… (112)
5.2.5 热解产物分析 …… (113)
5.3 垃圾中可燃物的燃烧机理 …… (114)
5.3.1 燃烧实验装置与方法 …… (114)
5.3.2 可燃物燃烧的基本过程 …… (114)
5.3.3 燃烧反应动力学参数 …… (117)
5.3.4 垃圾的燃烧模型 …… (120)
参考文献 …… (123)
第六章 热带地区固体废弃物典型组分的干燥热解特性研究 …… (125)
6.1 干燥热解实验 …… (125)
6.1.1 实验对象 …… (125)
6.1.2 实验方法 …… (127)
6.2 干燥热解规律 …… (127)
6.2.1 失重曲线 …… (127)
6.2.2 干燥热解反应动力学规律 …… (130)
6.3 影响干燥热解过程的因素 …… (133)
6.3.1 不同含水率生物质干燥热解实验 …… (133)
6.3.2 现象与分析 …… (136)
6.4 基于多层前馈网络的生物质热解失重过程模拟 …… (138)
6.4.1 经典模型的局限性 …… (138)
6.4.2 基于多层前馈神经网络的热解失重模型 …… (140)
6.4.3 模拟的分析与讨论 …… (141)

参考文献 …… (145)
第七章　垃圾焚烧炉内流动与传热特性 …… (146)
7.1　高水蒸气成分烟气多孔介质辐射 …… (146)
7.1.1　垃圾焚烧炉中烟气辐射特点 …… (146)
7.1.2　多孔介质中 L 值的确定 …… (147)
7.1.3　高水蒸气分压时 k 值的修正 …… (150)
7.2　非理想多孔介质系统流动特性 …… (154)
7.2.1　冷态实验研究 …… (154)
7.2.2　非理想系统流动特性的数值研究 …… (159)
7.3　焚烧炉中多孔介质状垃圾团块传热分析 …… (162)
7.3.1　局部容积平均法简介 …… (163)
7.3.2　模型的建立 …… (165)
7.3.3　数学模型的数值求解 …… (170)
参考文献 …… (174)
第八章　固体废弃物焚烧炉热力分区模型 …… (176)
8.1　马丁炉热力分区模型 …… (176)
8.1.1　基本假设和依据 …… (176)
8.1.2　马丁炉各区域特征描述 …… (177)
8.2　CAO 系统热力分区模型 …… (178)
8.2.1　CAO 系统基本工艺过程简介 …… (178)
8.2.2　CAO 各区域特征描述 …… (179)
8.3　加热干燥区多孔介质有效导热系数传热模型 …… (180)
8.3.1　加热干燥区升温过程 …… (180)
8.3.2　热解气化区升温过程 …… (182)
8.4　气化过程不规则孔隙网络模型 …… (182)
8.4.1　多孔介质模型的建立 …… (182)
8.4.2　热解气化区的气化反应 …… (184)
8.5　残炭燃烧 …… (184)

8.6 二燃室反应动力控制模型 …… (186)
参考文献 …… (189)
第九章 固体废弃物的几种新型焚烧技术…… (191)
9.1 回转式固体废弃物焚烧/气化装置 …… (192)
9.1.1 回转窑内物料的流动模型 …… (192)
9.1.2 回转窑物料流动冷态试验 …… (197)
9.1.3 造纸厂固体废弃物焚烧实验 …… (200)
9.1.4 城市生活垃圾焚烧实验 …… (201)
9.2 高温空气回转式垃圾焚烧装置的概念设计 …… (202)
9.2.1 高温空气燃烧技术的特点 …… (202)
9.2.2 方案设计 …… (205)
9.3 粉末状固体废弃物——蔗糠的悬浮燃烧特性研究 …… (207)
9.3.1 蔗糠燃料特性 …… (208)
9.3.2 可燃气着火下限 …… (208)
9.3.3 燃烧器后着火判别 …… (209)
9.3.4 挥发分燃烧 …… (212)
9.4 喷流—移动床 RDF 热解燃烧特性研究 …… (217)
9.4.1 喷流—移动床热解实验 …… (218)
9.4.2 反应器温度分布特性 …… (221)
9.4.3 气体产物分布特性 …… (225)
参考文献 …… (229)
第十章 垃圾焚烧的污染与腐蚀及其控制…… (232)
10.1 垃圾焚烧二□□类物质污染物生成与控制 …… (232)
10.1.1 二□□的基本问题 …… (232)
10.1.2 二□□的生成机理 …… (235)
10.1.3 二□□产生的抑制机理 …… (240)
10.2 RDF 热解燃烧过程中几种污染物的释放特性 …… (242)
10.2.1 CO 的释放特性 …… (242)

10.2.2 NO_x 的释放特性 …… (244)
10.2.3 $Ca(OH)_2$ 的脱氯特性 …… (245)
10.3 污泥型煤的污染性气体释放 …… (247)
10.4 垃圾焚烧时炭黑的形成与燃烧分析 …… (250)
10.4.1 炭黑生成量的估算 …… (250)
10.4.2 炭黑的燃烧 …… (253)
10.5 硫和氯及其化合物的腐蚀与控制概述 …… (255)
10.5.1 高温腐蚀 …… (256)
10.5.2 硫及其化合物的腐蚀 …… (257)
10.5.3 氯及其化合物的影响 …… (258)
10.5.4 高温腐蚀的防护 …… (260)
参考文献 …… (263)
第十一章 垃圾焚烧灰渣的特性及其处理 …… (266)
11.1 垃圾焚烧灰渣的熔融特性 …… (266)
11.1.1 试验过程和测试结果 …… (266)
11.1.2 垃圾灰渣熔点与积灰位置温度的关系 …… (268)
11.1.3 垃圾灰熔融特性分析 …… (269)
11.1.4 垃圾灰渣与低灰熔点煤灰的比较 …… (271)
11.2 垃圾焚烧灰渣的污染与控制 …… (274)
11.2.1 灰渣的污染性 …… (274)
11.2.2 灰渣的处理方法 …… (276)
参考文献 …… (278)
第十二章 烟气流动的非线性机理与炉内温度场模拟建模 …… (279)
12.1 烟气流动的混沌机理 …… (280)
12.1.1 烟气羽流数学模型 …… (280)
12.1.2 烟气羽流存在混沌现象 …… (282)
12.1.3 空间尺度对烟气羽流混沌行为的影响 …… (283)

12.1.4 Prandtl 数对混沌解的影响 …… (285)
12.1.5 Rayleigh 数变化对方程解的影响 …… (288)
12.2 基于多层前馈神经网络的炉内温度场的模拟 …… (294)
12.2.1 实验测得离散的温度分布点 …… (295)
12.2.2 神经网络建模 …… (298)
12.2.3 炉内温度场的模拟 …… (300)
参考文献 …… (303)

绪　论

一、固体废弃物及其污染

近几十年来，随着工农业生产的发展和人们生活水平的提高，固体废弃物排放量越来越大，全世界年产垃圾约 450 亿 t，且每年平均以 8%～9%的增长率递增。西方发达国家大致以每年 2%～5%的增长率递增，日本每人每日平均垃圾抛弃量近 10 年内增加了一倍。到 20 世纪 90 年代末期，我国历年积存垃圾已超过 60 亿 t，且每年以 8%～10%的增长率递增，侵占土地 50 万公顷，有 200 多个城市陷入垃圾的包围之中[1]。

近 20 年来，广东省经济发展十分迅速，城市化进程加快，各种资源的开发和消耗不断增加，同时，维持这种经济发展带来的固体废弃物环境污染也非常严重。1998 年全省固体废物产生量 2797.06 万 t，其中：生活垃圾 1025.36 万 t，占总量36.66%；工业固体废物产生量 1771.7 万 t，含工业危险废物 58.8 万 t，比上年增加 17.6%。环境污染和资源缺乏严重制约经济发展，使经济发展成为短期行为，难以维持。转变传统的发展模式，节约资源和能源，实施环境保护是实现广东省经济可持续发展的关键。

生活垃圾通常含有纸、布、塑料、橡胶、厨余、草木、砖瓦、沙土、金属、玻璃等，但各组分的含量随各地区的生活习惯、经济发展水平、气候状况等的不同而异。在发达国家，城市生活垃圾的产量大，其中食品废物、纸、布、塑料等有机物占很大比重，可燃物含量很高，热值也很高，一些国家的城市垃圾组成[2,3]见表 1。我国垃圾总体上来讲无机物的含量相对高些，但近年来，由于生活水平的提高，城市煤气的普及，垃圾中的有机成分也在逐渐增多，垃圾重量增加不多，但体积增加较快，热值

需要全本请访问 www.ertongbook