



能源与环境出版工程
(第二期)

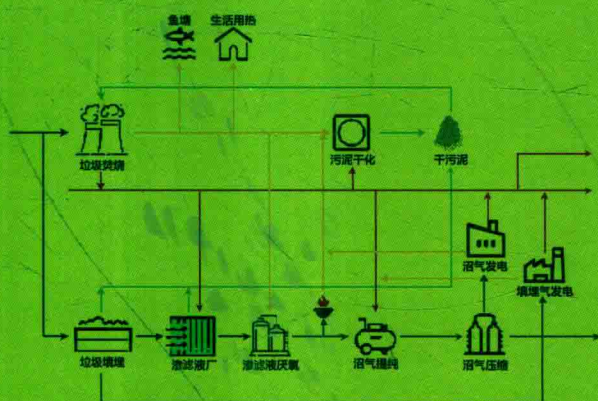
总主编 翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目
上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

城市固废综合利用基地与 能源互联网

Integrated Urban Solid Waste Management
Plant and Energy Internet

解大 邵俊 王瑟澜 陈善平 张延迟 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



能源与环境出版工程

(第二期)

总主编 翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目

上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

城市固废综合利用基地与 能源互联网

Integrated Urban Solid Waste Management
Plant and Energy Internet

解大 邵俊 王瑟澜 陈善平 张延迟 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为“十三五”国家重点图书出版规划项目“能源与环境出版工程”之一。本书探讨了在资源循环利用和可持续发展前提下城市固废利用基地和能源互联网的相关技术,重点研究了利用固废基地建设能源互联网的规划问题、信息互联和云平台建设问题、大数据分析方
法,以及能源路由器的理论建模问题。主要内容包括:城市固废垃圾的处理技术和城市固废
基地的典型构成、城市固废基地的能源互联的需求、固废基地能源互联网的建设和大数据
分析技术,以及能源互联网的关键装备能源路由器的基础理论。

本书适合从事环境工程、能源互联网、电气工程研究的技术人员和相关专业师生阅读
参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市固废综合利用基地与能源互联网 / 解大等著.
—上海:上海交通大学出版社,2018
(能源与环境出版工程)
ISBN 978-7-313-19581-4

I. ①城… II. ①解… III. ①垃圾—废物综合利用
IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 126831 号

城市固废综合利用基地与能源互联网

著 者:解 大 邵 俊 王瑟澜 陈善平 张延迟
出版发行:上海交通大学出版社
邮政编码:200030
出 版 人:谈 毅
印 制:上海万卷印刷股份有限公司
开 本:710 mm×1000 mm 1/16
字 数:453 千字
版 次:2018 年 8 月第 1 版
书 号:ISBN 978-7-313-19581-4/X
定 价:168.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号
电 话:021-64071208
经 销:全国新华书店
印 张:24.25
印 次:2018 年 8 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究
告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:021-56928178

能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主 任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委 员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑 平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄震(上海交通大学副校长、教授)

编委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

顾璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十年间(2002—2012 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 125 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 52 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 28.8 亿吨油当量竟有 57.7% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,规划能源新技术的研发和应用。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长的著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工

程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果;

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍,为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考;

三是优化能源与环境专业教材,为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书,满足人才培养对教材的迫切需求;

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线,重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题,主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、大气污染与气候变化等专业方向,汇集能源与环境领域的关键性技术和成果,注重理论与实践的结合,注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块,其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也包括能源与环境工程一线的理论 and 实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作;黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值,出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家,组建了学术指导委员会和编委会,并召开了多次编撰研讨会,商谈丛书框架,精选书目,落实作者。

该学术丛书在策划之初,就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注,与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审,Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*),《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权,John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

翁史烈

2013年8月

前 言

可持续发展问题是关于自然、科学技术、经济、社会协调发展的理论和战略问题,而城市的可持续发展则与人类社会的存在形态密切相关。从人类社会的角度看,可持续发展是指保护和加强环境系统的生产和更新能力,并转向更清洁、更有效的技术——接近“零排放”或“密封式”工艺方法,尽可能减少能源和其他自然资源的消耗。

城市固体废物(以下简称固废),即固废垃圾的处理问题是现代城市可持续发展的重要问题之一。随着现代城市的大型化以及人们生活方式的改变,城市固废的种类更加复杂,数量增长迅速,降解时间更长,垃圾围城变成当代城市的头号难题,这不仅给城市的管理者带来困扰,同时对城市环境带来了巨大的压力。因此,如何利用合适的技术手段实现固废的循环利用成为了当前环境科学研究者的重要问题。

现代处理固废的技术手段针对生活垃圾和其他固体废物。其中生活垃圾采用的处理技术包括卫生填埋技术、焚烧技术、气化技术、等离子技术和堆肥,其他固体废物包括污泥、工业固废和建筑垃圾等,后两者一般可以再利用,污泥的处理可以选择填埋、生化处理和协同燃烧。在垃圾燃烧、气化、堆肥等过程中,同时生产出大量的能源,因此,固废基地不仅是一个消耗能源处理垃圾的基地,也是一个事实上的能源生产基地。在这里,能源问题与环境问题很好地结合起来了。

能源互联网概念的提出引起国内外学者的广泛关注。能源互联网具有以可再生能源为主要一次能源、支持超大规模分布式发电系统与分布式储能系统接入、基于互联网技术实现广域能源共享和支持交通系统的电气化这四个特征。一个完善的固废基地从前两点满足了能源互联网建设的基本要求,如果采用互联网技术进行信息融合,就会发现固废基地与能源互联网

具有天然的一致性,它们反映了一个问题即可持续发展问题的两个方面:能源与环境。

本书共分为七章,第1章由解大、邵俊、张延迟撰写,第2、3、4章由邵俊、王瑟澜、陈善平撰写,第5、6、7章由解大撰写,全书由解大负责定稿并修改。

本书的许多研究成果是由作者所在的上海交通大学、上海环境卫生工程设计院、上海电机学院研究组及所指导的研究生共同工作所取得的。其中,上海环境卫生工程设计院工程师余召辉,上海交通大学研究生陈爱康、苗洁蓉、孙俊博、罗天、陆轶祺参与了大量课题研究,上海电机学院研究生辛苗苗、李敏等进行了大量的数据校核工作,部分内容是与英国巴斯大学顾承红博士合作的成果。此外,本书写作过程中,得到了上海交通大学电气工程系的领导和同事的大力支持,作者谨表示衷心感谢。

本书的研究工作得到了上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”社会发展领域项目——2016年度“能源互联网数据集成和网络应用技术”和2018年度“多能形式的能源路由器关键技术与示范”的支持,本书各种现场数据的实际测试得到了上海城投集团下属各生产单位的帮助,在此一并深表感谢。

在本书的编写中,由于作者的水平所限,缺点和错误在所难免,恳请读者给予批评和指正。

作 者

2018年5月于上海

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 城市固废处置技术现状	002
1.1.1 城市固体废物污染及处理现状	003
1.1.2 城市固体废物的处置技术	004
1.2 城市固废综合处理园区发展概述	009
1.2.1 “静脉产业”概念	009
1.2.2 我国部分静脉产业园概要	010
1.3 能源互联网技术发展概述	011
1.3.1 能源互联网技术发展现状	012
1.3.2 能源互联网关键技术	016
1.3.3 能源互联网的 ICT 技术	019
1.4 固废基地与能源互联网的关系	026
参考文献	028
第 2 章 生活垃圾卫生填埋技术	030
2.1 概述	030
2.1.1 卫生填埋场的基本分类	030
2.1.2 卫生填埋处理的国内发展现状	031
2.2 卫生填埋场基本构造	041
2.2.1 卫生填埋场防渗系统	042
2.2.2 渗滤液收集系统	045
2.2.3 渗滤液处理系统	049
2.2.4 填埋气收集与处理系统	054

2.2.5 封场覆盖	058
2.3 填埋场关键技术工艺	059
2.3.1 精细化填埋技术	059
2.3.2 缺陷地基土上高维卫生填埋技术	064
2.3.3 填埋场稳定化过程及生态修复技术	064
2.3.4 填埋场能源化及清洁发展机制	067
2.3.5 大型气撑式膜结构应用	068
2.3.6 共填埋技术	068
2.3.7 臭气削减关键技术	069
2.4 生活垃圾卫生填埋的发展走向	073
参考文献	074

第3章 生活垃圾焚烧及其他处理技术 078

3.1 生活垃圾焚烧技术	078
3.1.1 行业的发展趋势	078
3.1.2 发展现状	082
3.1.3 垃圾焚烧炉系统	089
3.1.4 烟气净化系统	092
3.1.5 热能利用系统	101
3.1.6 自动控制系统	103
3.1.7 生活垃圾焚烧工艺	105
3.1.8 垃圾接收与储存系统	106
3.1.9 飞灰处理处置	111
3.1.10 生活垃圾焚烧技术的发展前景	111
3.2 气化处理技术	115
3.2.1 基本原理	116
3.2.2 分类方式	116
3.2.3 典型工艺流程	116
3.3 等离子体技术	117
3.3.1 原理和优缺点	117

3.3.2 国内外现状	118
3.4 堆肥处理技术	119
3.4.1 堆肥的原理	119
3.4.2 堆肥技术在我国的应用	119
3.4.3 主要工艺技术类型	120
3.4.4 主要技术工艺流程	121
3.5 综合处理技术	122
3.5.1 生活垃圾综合处理系统	123
3.5.2 生活垃圾综合处理工艺	123
3.5.3 生活垃圾综合处理实例	124
3.6 城市污泥	125
3.6.1 填埋处理	125
3.6.2 生化处理	125
3.6.3 协同焚烧	126
3.6.4 其他资源化利用	126
3.7 工业固废	127
3.7.1 赤泥的综合利用现状	127
3.7.2 脱硫石膏的综合利用现状	128
3.7.3 磷石膏的综合利用现状	129
3.7.4 铝灰的综合利用现状	130
3.7.5 粉煤灰的综合利用现状	130
3.8 建筑垃圾	131
3.8.1 国外处置经验	132
3.8.2 资源循环利用	134
3.9 电子废弃物及其处理处置技术	140
3.10 其他处置对象	143
3.10.1 飞灰的稳定化技术	143
3.10.2 垃圾焚烧炉渣处理及资源化技术	145
参考文献	148

第 4 章 典型固废综合利用基地的应用特点 153

4.1 固废综合处置园区概述 153

4.1.1 固废综合处置园区的定义 153

4.1.2 固废综合处置园区的类型 153

4.1.3 固废综合处置园区的构成 155

4.2 垃圾填埋场及焚烧发电厂经典案例 157

4.2.1 国内垃圾填埋场经典案例 157

4.2.2 国外垃圾填埋场经典案例 158

4.2.3 国内垃圾焚烧发电经典案例 160

4.2.4 国外垃圾焚烧发电经典案例 163

4.3 综合处置园区经典案例 164

4.3.1 国内固废综合处置园区经典案例 164

4.3.2 国外固废综合处置园区经典案例 170

4.4 上海老港固废处置基地的构成 171

4.4.1 老港基地整体概述 171

4.4.2 老港填埋场 177

4.4.3 老港再生能源利用中心(垃圾焚烧发电厂) 181

4.4.4 老港渗滤液处理厂 183

4.4.5 其他部分 185

4.5 国内固废综合处置园区发展面临的问题及未来方向 188

4.5.1 国内固废综合处置园区面临的问题 188

4.5.2 未来发展方向 189

参考文献 190

第 5 章 固废基地能源互联的需求分析和园区规划 194

5.1 固废基地产能分析 194

5.1.1 固废基地发电环节 195

5.1.2 固废基地产热环节 200

5.1.3 固废基地产气环节 202

5.2 固废基地用能分析 204

5.2.1 固废基地用电分析	204
5.2.2 固废基地用热分析	205
5.2.3 固废基地用气分析	205
5.3 固废基地的混合能源网络	207
5.3.1 城市固废基地能流网络结构	208
5.3.2 固废处置基地电力网络	210
5.3.3 固废处置基地沼气网络	210
5.3.4 固废处置基地热力网络	212
5.3.5 固废基地能源互联效益	213
5.4 固废基地能源互联园区规划	217
5.4.1 垃圾热值分析	218
5.4.2 气热电关联模型	219
5.4.3 燃气系统分析	222
5.4.4 热力系统分析	222
5.4.5 电力系统分析	224
5.4.6 规划结果求解	226
5.4.7 规划效果评估	227
5.5 具备的优势和需要克服的问题	229
5.5.1 固废基地能源互联网具备的优势	229
5.5.2 需要克服的问题	230
参考文献	231

第6章 固废基地能源互联网的数据集成及云平台建设

234

6.1 固废基地能源互联网信息采集及数据集成	235
6.1.1 固废基地能源互联网网络架构	235
6.1.2 固废基地能源互联网数据采集	237
6.1.3 固废基地的信息源级数据集成	248
6.2 固废基地能源互联网多级云平台建设	254
6.2.1 能源互联网云平台关键技术	254
6.2.2 固废基地云平台架构	263

6.2.3 固废基地云平台基础建设 271

6.2.4 大数据网络安全问题 273

6.3 基于大数据技术的固废基地能源信息处理及可视化实现 274

6.3.1 大数据概念及其关键技术 274

6.3.2 数据挖掘算法 276

6.3.3 大数据分析流程 283

6.3.4 算例分析(基于改进 Apriori 算法的风电状态评估) 286

6.3.5 固废基地多能源信息处理技术及可视化实现 297

参考文献 309

第 7 章 电热气混合能源互联系统 312

7.1 电-热-气混合能源互联系统稳态分析 312

7.1.1 电-热-气混合能源互联系统稳态建模 313

7.1.2 电-热-气混合能源互联系统稳态求解 316

7.2 电-热-气混合能源互联系统暂态分析 320

7.2.1 电-热-气混合能源互联系统动态建模 320

7.2.2 实例分析 331

7.3 电-热-气混合能源互联系统经济优化分析 337

7.3.1 热电联供系统介绍 337

7.3.2 最大利润控制器 341

7.3.3 并网式热电联供系统利润优化分析 342

7.3.4 最优负荷等级调整路线 353

7.3.5 实例分析 356

参考文献 361

索引 368

第1章 绪 论

自20世纪80年代以来,能源行业的技术基础、组织结构与经济模式一直在逐步转变。推动这一转变的主导性因素包括:①由于化石能源广泛利用所导致的气候变化等环境危机日益深化;②随着人口众多的发展中国家的崛起,传统的依赖不可再生能源的工业与经济发展模式难以持续;③可再生能源与信息技术的快速发展。能源行业变革的最终目标是建立更加高效、安全与可持续发展的能源利用模式,从而解决能源利用这一人类社会面临的重大难题。

美国学者杰里米·里夫金在其著作《第三次工业革命》一书中,提出了能源互联网的愿景,引发了广泛关注。里夫金认为,能源互联网应具有四大特征:①以可再生能源为主要一次能源;②支持超大规模分布式发电系统与分布式储能系统接入;③基于互联网技术实现广域能源共享;④支持交通系统的电气化(即由燃油汽车向电动汽车转变)。可以看出,里夫金所倡导的能源互联网的内涵主要是利用互联网技术实现广域内的电源、储能设备与负荷的协调;最终目的是实现由集中式化石能源利用向分布式可再生能源利用的转变。由于能源互联网的概念才提出不久,其定义、架构、组成和主要功能都还需要不断完善。里夫金提出的只是能源互联网的愿景,并没有给出能源互联网明确严格的定义。

针对多类型能源广泛互联的愿景,本书从实际试验基地入手,以试验基地数据为基础,强调了热、电、气多种能源的融合,介绍了能源互联网与城市固体废物(以下简称固废)综合利用基地相结合的运行策略,从不同的角度来剖析能源互联网。

第1章介绍城市固废垃圾的处理现状、垃圾处理的主要技术手段、处置园区的发展以及能源互联网的国内外研究现状,并针对垃圾综合处理园区和能源互联网技术的发展需求,阐述了建设城市固废综合处置基地的能源互联网的发展意义。

考虑到城市固废垃圾种类繁多,对应的处理技术手段多样,本书第2、3章针对国外垃圾处理的发展趋势以及国内垃圾处理的发展现状,分别介绍了城市生活垃圾的卫生填埋技术、城市生活垃圾的其他处理技术以及其他城市垃圾的处理技术。

第4章介绍固废综合处置园区的案例。首先介绍了固废综合处置园区的定义、类型及基本构成,接着选取国内外垃圾焚烧和填埋两大垃圾处置方法的典型案