

现代实践环境生物工程技术丛书

SWGC

固废处理工程技术

G U F E I C H U L I G O N G C H E N G J I S H U

主 编: 刘良栋 陈 娟
主 审: 干 信



教育部直属师范大学
华中师范大学出版社

现代实践环境生物工程技术丛书

固废处理工程技术

主编：刘良栋 陈 娟

主审：干 信

华中师范大学出版社

内 容 提 要

本书在顾及固废处理技术传统内容的同时,介绍和归纳了新的技术方法和思维策略,围绕废纸再生技术、工矿业固废再利用技术、污泥处理技术、生活垃圾生物处理技术、固体废物的热处理技术等几个方面进行了系统的阐述。

本书内容层次分明、深入浅出,注意固废处理理论知识和实践技能的综合应用,可作为环境等相关学科的应用型教材,亦可供相关行业工程技术人员参考。

新出图证(鄂)字10号

图书在版编目(CIP)数据

固废处理工程技术/刘良栋,陈娟主编. —武汉:华中师范大学出版社,2009.12
(现代实践环境生物工程技术丛书)

ISBN 978-7-5622-4105-8

I. 固… II. ①刘… ②陈… III. 固体废物—废物处理 IV. X705

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第212853号

固废处理工程技术

主 编:刘良栋 陈 娟◎

选题策划:华中师范大学出版社第二编辑室 电话:027—67867362

出版发行:华中师范大学出版社

社 址:湖北省武汉市珞喻路152号 邮编:430079

销售电话:027—67863426 67863040 67867076 67867371 67861549

邮购电话:027—67861321 传真:027—67863291

网址: <http://www.ccnpublish.com> 电子信箱: hscbs@public.wh.hb.cn

责任编辑:靳春玲

责任校对:陈志华

封面设计:罗明波

印 刷 者:武汉理工大印刷厂

督 印:章光琼

开本/规格:787mm×1092mm 1/16 印 张:9

字 数:230千字

版次/印次:2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷

印 数:1—2000

定 价:18.00元

欢迎上网查询、购书

敬告读者:欢迎举报盗版,请打举报电话027—67861321。

中南民族大学工商学院

《现代实践环境生物工程技术丛书》编委会

编委会主任	干 信 (环境与生命科学系主任、教授、博士生导师)
编委会成员	李德华 (环境与生命科学系环境教研室主任、副教授)
	吴士筠 (环境与生命科学系实验教学中心主任、高级实验师)
	刘鲁建 (环境与生命科学系环境教研室副主任、讲师、硕士)
	陈 娟 (环境与生命科学系环境教研室副主任、讲师、硕士)
	肖慧萍 (环境与生命科学系环境教研室 副教授、博士)
	刘红丽 (环境与生命科学系环境教研室 讲师、硕士)
	刘良栋 (环境与生命科学系环境教研室 讲师、硕士)
	徐承睿 (环境与生命科学系环境教研室 讲师、硕士)
	董 俊 (环境与生命科学系实验教学中心 讲师、硕士)
	李红丽 (环境与生命科学系生物教研室副主任、讲师、硕士)
	朱晨刚 (环境与生命科学系生物教研室 副教授、博士)
	周 焱 (环境与生命科学系生物教研室 讲师、硕士)
	林 佳 (环境与生命科学系生物教研室 讲师、硕士)
	刘彦昌 (环境与生命科学系生物教研室 讲师、硕士)
	龚乃超 (环境与生命科学系生物教研室 讲师、硕士)
	刘爱华 (环境与生命科学系实验教学中心 讲师、硕士)
	张 凡 (环境与生命科学系实验教学中心 讲师、硕士)

序

环境工程和生物工程是 21 世纪科学技术发展的前沿学科。实践环境生物工程技术作为其中的主要分支，是环境工程和生物工程发展的主要基础与实践先导。特别是在应对 21 世纪人类面临的人口健康、资源紧缺、环境污染等严峻挑战方面，实践环境生物工程技术具有无可替代的重要作用。

随着国家对资源、环境、生态等问题的日益重视，可持续发展战略已被提高到与科教兴国战略并列的重要位置。实践环境生物工程技术工作者对此责无旁贷，有必要在难开采矿产资源（二次采油的低产油井、低品位金属矿石和尾矿、海水中的重金属等）开发、环境污染物（废水、废气和废渣等）治理、清洁生产工艺（全封闭、无排放、低能耗工艺等）研究、环境友好产品（生物可降解塑料、生物农药、生物肥料、氢能源等）研制、工农业废弃物生物转化为新资源（生物燃料、饲料及化工产品等）等领域，开展关系国计民生长远发展的战略性研究，同时培养和造就一大批优秀的实践环境生物工程技术人才，为将来实现可持续发展作出应有的贡献。

本套丛书包括工程技术（《生物制药工程技术》、《酶工程技术》、《固废处理工程技术》、《生物带废水处理工程技术》）和工程设计（《微生物发酵工程设计》、《生物工程下游技术设计》、《生物化学工程设计》、《固废处理控制工程设计》、《废水处理控制工程设计》、《废气和噪声控制工程设计》）共 10 个分册，均由工作在实践环境生物工程技术示范教学第一线的研究者撰写。丛书概括了上述学科的发展背景，从研究前沿与实践方案相结合的角度，侧重介绍最新的研究进展和可操作的应用技术、设计，内容力求深入浅出、通俗易懂，可作为环境与生物工程、化学化工、农业及环境资源等学科的应用型教材，亦可供相关行业工程技术人员参考。

期望本丛书的出版能为推动我国实践环境生物工程技术教育和研究开发作出微薄的贡献。

于 信
2009 年 8 月

前 言

固废处理工程技术的目标是拓展、创新和实践固废处理的各种技能，并最终发展成为商业化的产品或技术工艺。尽管固废处理技术对几乎所有（环境或生物）部门都有渗透，但主要表现为对固废处理进步的巨大推动。

固废处理技术，从概念上讲，是以开发和应用固废处理和处置为目的的技术。传统的固废处理技术以减量化、无害化和资源化为基础，如焚烧、填埋、循环利用等，这些技术依然是固废处理技术的重要内容。但随着现代生物处理新技术、自动化流程处理技术、废弃物再加工再利用技术等固废处理技术各方面的应用，固废处理的研发具有了多学科交叉、多功能综合利用、固废处理产业化等新特点。因此，本书在顾及固废处理技术传统内容的同时，更多地介绍和归纳了新的技术方法和思维策略，以此为读者提供更多的实践技能参考和思路。

在本书的内容安排上，我们首先对固废处理的基础做了介绍，之后围绕固废处理技术的几个方面进行了系统的阐述，包括废纸再生技术、工矿业固废再利用技术、污泥处理技术、生活垃圾生物处理技术、固体废物的热处理技术，这些也是固废处理技术中进展最多和形成学科交叉最多的方面。本书的核心素质表现在综合应用固废处理专业知识和实践技能。

本书的编写是我们在中南民族大学工商学院环境与生命科学系开设的固废处理工程技术课程的基础上完成的。该课程的发展经历了从固废处理实验到固废处理技术两学年的探索，反映了学科发展的特色方向。

全书由中南民族大学工商学院环境与生命科学系编写，第一、二章由刘良栋、陈娟合编，第三、四章由刘良栋编写，第五、六章由陈娟编写，参加编写的还有刘红丽、徐承睿等。最后感谢干信教授，他在百忙之中抽出宝贵时间认真审读了全书，并提出了一些很有价值的修改意见。

书中的不妥之处，敬请读者指正和讨论。

刘良栋 陈娟

2009年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 固废处理研究现状	1
1.1.1 工业固体废物的产生、处理及研究现状	1
1.1.2 城市生活垃圾的处理及研究	1
1.1.3 农业固体废物的处理及研究	2
1.1.4 畜禽排泄物的处理及研究	2
1.2 固废处理工程技术应用	3
1.2.1 固体废物的生物处理技术与工程应用	3
1.2.2 固体废物的焚烧处理技术与工程应用	5
1.2.3 固体废物的热解处理技术与工程应用	7
第 2 章 废纸再生技术	9
2.1 简介	9
参考文献	10
2.2 废报纸再生处理技术	11
2.2.1 简介	11
2.2.2 废报纸再生处理阶段研究	12
2.2.3 废报纸再生处理关键技术	15
2.2.4 废报纸再生处理过程控制	17
参考文献	17
2.3 废办公用纸再生处理技术	18
2.3.1 简介	18
2.3.2 废办公用纸再生处理阶段研究	19
2.3.3 废办公用纸再生处理关键技术	21
2.3.4 废办公用纸再生处理过程控制	22
参考文献	23
2.4 废彩印纸再生处理技术	23
2.4.1 简介	23
2.4.2 废彩印纸再生处理阶段研究	24
2.4.3 废彩印纸再生处理关键技术	27
2.4.4 废彩印纸再生处理过程控制	29
参考文献	29
第 3 章 工矿业固废再利用技术	30
3.1 简介	30
参考文献	32
3.2 粉煤灰再利用技术	32

3.2.1 简介	32
3.2.2 粉煤灰再利用阶段研究	33
3.2.3 粉煤灰再利用关键技术	36
3.2.4 粉煤灰再利用过程控制	38
参考文献	39
3.3 含铜矿渣浸出技术	39
3.3.1 简介	39
3.3.2 含铜矿渣浸出阶段研究	40
3.3.3 含铜矿渣浸出关键技术	43
3.3.4 含铜矿渣浸出过程控制	45
参考文献	46
3.4 含铁矿渣浸出技术	47
3.4.1 简介	47
3.4.2 含铁矿渣浸出阶段研究	47
3.4.3 含铁矿渣浸出关键技术	52
3.4.4 含铁矿渣浸出过程控制	55
参考文献	55
第4章 污泥处理技术	56
4.1 简介	56
参考文献	57
4.2 城市污水处理厂剩余污泥处理技术	58
4.2.1 简介	58
4.2.2 城市污水处理厂剩余污泥处理阶段研究	59
4.2.3 城市污水处理厂剩余污泥处理关键技术	63
4.2.4 城市污水处理厂剩余污泥处理过程控制	66
参考文献	66
4.3 疏浚污泥处理技术	67
4.3.1 简介	67
4.3.2 疏浚污泥生物处理阶段研究	68
4.3.3 疏浚污泥生物处理关键技术	71
4.3.4 疏浚污泥生物处理过程控制	74
参考文献	74
4.4 含铬重金属污泥固化处理技术	75
4.4.1 简介	75
4.4.2 含铬重金属污泥固化处理阶段研究	75
4.4.3 含铬重金属污泥固化处理关键技术	77
4.4.4 含铬重金属污泥固化处理过程控制	79
参考文献	80
第5章 生活垃圾生物处理技术	81
5.1 简介	81
参考文献	81
5.2 餐厨垃圾的好氧堆肥处理技术	82

5.2.1 简介	82
5.2.2 餐厨垃圾好氧堆肥处理阶段研究	83
5.2.3 餐厨垃圾好氧堆肥处理关键技术	89
5.2.4 餐厨垃圾好氧堆肥处理过程控制	90
参考文献	92
5.3 养殖垃圾的厌氧消化处理技术	92
5.3.1 简介	92
5.3.2 养殖垃圾的厌氧消化处理阶段研究	93
5.3.3 养殖垃圾的厌氧消化处理关键技术	101
5.3.4 养殖垃圾的厌氧消化处理过程控制	103
参考文献	104
5.4 有机垃圾的厌氧消化处理技术	104
5.4.1 简介	104
5.4.2 有机垃圾的厌氧消化处理阶段研究	105
5.4.3 有机垃圾的厌氧消化处理关键技术	108
5.4.4 有机垃圾的厌氧消化处理过程控制	110
参考文献	111
第6章 固体废物的热处理技术	112
6.1 简介	112
参考文献	113
6.2 生活垃圾的焚烧处理技术	113
6.2.1 简介	113
6.2.2 生活垃圾的焚烧处理阶段研究	114
6.2.3 生活垃圾的焚烧处理关键技术	117
6.2.4 生活垃圾的焚烧处理过程控制	118
参考文献	119
6.3 污泥的焚烧处理技术	120
6.3.1 简介	120
6.3.2 污泥的焚烧处理阶段研究	121
6.3.3 污泥的焚烧处理关键技术	123
6.3.4 污泥的焚烧处理过程控制	125
参考文献	126
6.4 废塑料的热解处理技术	126
6.4.1 简介	126
6.4.2 废塑料的热解处理阶段研究	127
6.4.3 废塑料的热解处理关键技术	131
6.4.4 废塑料的热解处理过程控制	133
参考文献	134

第1章 绪 论

1.1 固废处理研究现状

固体废物是指人类在生产建设、日常生活和其他活动中产生的，在一定时间和地点无法利用而被丢弃的污染环境的固体、半固体废弃物。固体废物来源于人类的生产和生活活动，物质消耗越多，废物产生量也就越多。随着经济的发展，固体废物产生量越来越大，妥善处理固体废物是人类必须面临的新课题。

1.1.1 工业固体废物的产生、处理及研究现状

工业固体废物是指在工业、交通、矿业等生产过程中产生的固体废物，主要包括矿山固体废物、冶金固体废物、化工固体废物、其他工业固体废物（如粉煤灰、水泥厂窑灰、炉渣等）。2007年，中国工业固体废物产生量为 $1.76 \times 10^9 \text{ t}$ ，比上年增长 15.9%；工业固体废物综合利用量为 $1.10 \times 10^9 \text{ t}$ ，工业固体废物排放量为 $1.20 \times 10^7 \text{ t}$ ；危险废物产生量为 $1.17 \times 10^7 \text{ t}$ ，比上年增长 17.1%。1999年—2003年，中国的工业固体废物产生量的年均增长率为 6.4%，排放量年均递减率为 15.9%，综合利用量年均增长率为 11.9%。工业固体废物成分相对单一（与城市生活垃圾相比），排放相对稳定，综合利用相对方便。1999年固体废物的综合利用率为 45.6%，2007年为 62.1%，上升了 16.5%。随着技术及环保要求的提高，综合利用率还有较大的上升空间。工业固体废物主要用于生产水泥、混凝土、充填材料、骨料和用于制砖、筑路等。对于不能利用的部分，一般采取填埋的方式进行处置。

1.1.2 城市生活垃圾的处理及研究

2007年，全国城市生活垃圾清运量约为 $2 \times 10^8 \text{ t}$ ，无害化处理率超过 60%。目前，国内外城市生活垃圾处理的方法主要有卫生填埋、堆肥、焚烧等。其中，填埋约占垃圾全部处理量的 60%~70%，堆肥约占 10%~20%，焚烧约占 10%，其他方法占少量。卫生填埋的优点是处理量大，总成本较低；缺点是占用宝贵的城市土地，而且对大多数城市来说，可供填埋的土地越来越少。焚烧的优点是在短时间内减量幅度大（可达 80%~90%），可以回收能源，能彻底消灭各种病毒、细菌，卫生状况好；缺点是初期投资大，运行成本也高，我国很多城市难以承担，另外还会产生大气污染。堆肥的资源化程度较高，但由于垃圾成分复杂，其工艺条件难以控制，即使经过精细分选的肥料也仍然含有一定的玻璃、金属、塑料等杂物，会造成田间操作的困难。此外，堆肥在制作过程中容易产生恶臭，且垃圾的减量化效果较差，即使在发达国家堆肥也受到严格限制。城市生活垃圾的处理方法还有厌氧发酵、热解等。厌氧发酵就是垃圾中的有机成分在厌氧的条件下被微生物分解，产生甲烷和一氧化碳的过程。热解是在高温及与空气隔绝的情况下垃圾分解的过程。

目前,垃圾研究的重点有以下几方面:

1. 形成较完善的垃圾卫生填埋技术;
2. 进一步完善中小型垃圾焚烧技术,开发大型垃圾焚烧炉;
3. 研究、开发高技术层次垃圾堆肥成套技术及配套设备,对厌氧堆肥技术的鉴定、推广;
4. 完成废塑料、废轮胎、废纸利用技术,无机垃圾制建材技术优化等资源利用技术的开发、研究;
5. “十五”期间开发研究的环卫车辆和垃圾收运设备的定型、生产;
6. 垃圾热解、气化技术的研究、开发。

1.1.3 农业固体废物的处理及研究

中国各类农作物秸秆资源十分丰富,总产量大于 $7 \times 10^8 \text{t}$,而且每年以 6% 的速度增加。目前,秸秆的处理方式主要是还田。2003 年,农业部把实施重点地区农作物秸秆机械化还田利用作为 2003 年为农民办的十一件实事之一。在北京、重庆等 10 个城市郊区,北京首都机场、天津机场等 5 个重点机场周边,京珠、成渝等 5 条高速公路沿线建设 50 个农作物秸秆机械化还田区,并推广秸秆机械化还田 $6.67 \times 10^5 \text{hm}^2$ 。目前,全国机械化秸秆还田面积达 $1.50 \times 10^7 \text{hm}^2$,比上年增加 $1.79 \times 10^5 \text{hm}^2$,青贮秸秆 $1.4 \times 10^8 \text{t}$,氨化秸秆 $5.65 \times 10^7 \text{t}$,建设秸秆气化集供气工程 488 处。其中,10 个重点省(市)秸秆机械化还田利用面积达到 $9.3 \times 10^6 \text{hm}^2$,比上年底增加 $3.24 \times 10^6 \text{hm}^2$,秸秆综合利用面积达到 $1.45 \times 10^7 \text{hm}^2$ 。秸秆处理的第一个方法是用作饲料,秸秆直接饲喂,牲畜不喜食,消化率也较低,改用青贮、微贮和氨化方法处理秸秆,实践证明是一种有效和经济的方法。秸秆处理的第二个方法是秸秆育苗,秸秆含一定量的蛋白质和矿物质元素,育苗生物转化率高,与其他配料科学配比后用作食用菌栽培料越来越普遍。秸秆处理的第三个方法是秸秆纤维利用,用秸秆可制造的产品包括火板、纸浆、包装纸等。此外,秸秆还可以被气化,主要工艺流程是秸秆经切碎后,直接进入气化炉点燃分解,不需外加热源,后经提纯、净化,送至气柜,然后经管道送至用户作燃料。

1.1.4 畜禽排泄物的处理及研究

目前,我国畜禽养殖粪便每年产生量超过 $2 \times 10^9 \text{t}$,所含污染物的化学需氧量为 $7.118 \times 10^7 \text{t}$,已超过全国工业废水与生活污水的化学需氧量,全国畜禽粪便 N、P 流失总量分别为化肥 N、P 流失总量的 12 倍和 13 倍,已成为农业面源污染的主要来源,畜禽养殖污染产生的环境问题日益突出。据统计,近 20 年来我国肉类、奶类和禽蛋产量以 6%~10% 的速度递增,自 1994 年开始,我国肉、奶、蛋的总产量多年保持世界第一,从而导致畜禽粪便量激增。

减少畜禽粪便的排放是减轻环境污染的首要方法。凡是能够提高日粮营养物质消化利用率的措施,在一定程度上均能减少畜禽粪便的产生。因此,从治本的角度出发,目前许多经济比较发达的国家都采用一些增添饲料添加剂的方法,用于提高畜禽对饲料蛋白质的利用率。欧洲饲料添加剂基金会指出,适当添加氨基酸可使畜禽 N 的排放量减少 20%~25%。近年来研究证明,畜禽对饲料中 P 的利用率较低(40%~50%),其所摄入的超过 50% 的 P

被排出体外,直接渗入地下水或沉积在土壤中,引起环境污染。在饲料中添加酶制剂,能够更好地提高畜禽的消化率,如添加植酸酶,可以弥补由于日粮中缺P而对猪仔生长所造成的不良影响,提高各种营养元素的利用率。

此外,畜禽粪便的处理方法还有生物技术和废渣还田、用作燃料、制造有机肥料、制造再生饲料等。其中,生物技术在近年研究较多,应用较为广泛,是一种非常有前景的畜禽粪便处理方法,它主要分为厌氧发酵法和好氧发酵法。

总之,中国人口众多,经济发展迅猛,固体废物产生量大且增长迅速,固体废物污染防治形势严峻。国家应尽快出台相关的政策法规,以促进固体废物处理产业化,并借鉴其他国家有益经验,使固体废物的管理思路转变到“避免再生、循环利用、末端处理”的方式上,同时,全社会都应大力推行清洁生产,倡导循环经济,只有这样,中国的可持续发展战略才能实现。

1.2 固废处理工程技术应用

1.2.1 固体废物的生物处理技术与工程应用

固体废物生物处理技术比较广泛地应用在堆肥化、沼气化、废纤维素糖化、废纤维素饲料化(蛋白化)等工业过程中。以下对固体废物的堆肥化和沼气化应用作简单介绍。

1.2.1.1 固体废物的堆肥化应用

我国城市生活垃圾的处理率逐年上升,截至2001年底,我国664个城市建有各类生活垃圾处理厂(场)740座,年垃圾处理量为 $7.84 \times 10^7 \text{t}$ 。城市生活垃圾处理率已由20世纪80年代初的2%提高到现在的58.2%。至2003年,全国660个城市生活垃圾清运量达到 $1.49 \times 10^8 \text{t}$,比1980年增加了4.96倍。但实际的垃圾无害化处理率较低,全国城市生活垃圾无害化处理率不足15%。时至今日,在胡锦涛总书记提出的“建立资源节约型国民经济体系和资源节约型社会”这一战略目标的指引下,资源的重复利用、可持续利用已被提升到一个战略的高度,而城市生活垃圾作为一种废弃物被处理的同时,应该同时看到其中蕴藏的资源价值。以郑州市为例,每天的垃圾产出量约3000t,每年约 10^6t 。其中,废纸类、塑料类、金属类、玻璃类等可回收再利用的资源占40% ($4 \times 10^5 \text{t}$),按现行最低收购价计算约2.5亿元。生活垃圾中的可自然降解有机物质占45% ($4.5 \times 10^5 \text{t}$),经生物工程技术处理可年产生物堆肥约 $5 \times 10^5 \text{t}$,可以改良8000hm²农田,并可防止土壤板结,减少化肥使用量约50%。以每公顷节约化肥225元计,即可减少180万元农业投入,从而可实现以有机肥保土、无机肥增产的良性循环状态。而且伴随着城市生活垃圾中有机成分、可堆腐物和回收利用物的增加,垃圾堆肥化处理达到了垃圾的资源化、无害化、减量化目的,是一种较好的、具有可持续性的促进城市环保产业形成和废弃物循环利用的模式。

生物工程的概念是著名生态学家Odum H T和马世骏教授分别在20世纪60年代和70年代提出的。工程是依据生物系统中物种共生与循环再生原理、结构与功能协调原则,结合最优化方法设计的分层多级利用物质的生产工艺系统。城市生活垃圾生物工程堆肥处理法,是以生态工程为前提,以传统的堆肥发酵为基础(原理),以现代高科技——生物工程技术(以微生物参与腐解发酵,同时添加固N菌、解P菌、解K菌以促进堆肥肥效)为渗透,以

当今领先的机械设备为主体的生活垃圾资源化、减量化、无害化、规模化的可持续发展的处理方法。堆肥化过程实际上就是微生物的发酵降解过程，要实现高效的动态过程控制，就必须对该降解过程有充分的了解和把握。

1.2.1.2 固体废物的沼气化应用

利用厌氧消化能产生沼气的现象早已为人们所知，其应用也已有 100 多年的历史，进入 20 世纪以来，科学家分离出产甲烷的厌氧细菌，进一步揭示出有机物厌氧消化产生沼气的微生物学机理。1896 年，英国小城 Exeter 建起了一座处理生活污水污泥的厌氧消化池，所产沼气可用作一条街道的照明燃料；1906 年，印度 Matunga 建造了利用人粪生产沼气的沼气池。随着工艺的进步与发展，厌氧消化被应用于畜牧业和农产品加工废料的处理，并逐渐在高浓度有机废水的处理上得到广泛应用，但将其应用于固体废物的处理，尤其是有机生活垃圾的处理，则只有十余年的历史。

美国对垃圾填埋沼气利用发展较快，1982 年—1990 年，利用填埋沼气的填埋场由 16 个发展到 244 个。美国对填埋沼气的利用主要集中在发电行业，也有部分将填埋沼气转化为管道天然气。据估算，美国全国天然气消费量的 1% 可以被填埋气体中的甲烷所代替，全国约有 1000 个填埋场适合开展填埋气体的利用，每年可产生 $5.70 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的沼气，如果全部加以利用可产生 4~5 亿美元的价值。

截至 1990 年，欧盟的垃圾填埋沼气利用项目就有 175 个。欧洲对填埋沼气的利用以将其转换为热能和发电为主。欧洲第一个完全使用垃圾填埋沼气发电的工厂建于 1987 年。到 1995 年底，英国共有 33 个商业性填埋气体利用项目，另有 20 个项目正在规划和建设中，其发电总装机容量约为 190MW。据估计，英国可利用的垃圾填埋沼气总能源价值相当于 500MWh~600MWh。德国垃圾填埋沼气的主要利用方式是通过内燃机发电和直接燃烧供热，到 1991 年，295 个正在运行的城市垃圾填埋场中有 32% 的填埋场拥有气体利用设备。

从 1996 年起，荷兰填埋沼气的利用量为 $1.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中约 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 用于直接燃烧以供热，约 $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 经过加工处理用作燃料气，大部分（约 $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ ）用于发电，其发电量为 150MWh，可以满足约 5 万个荷兰家庭的用电。此外，热电联产机组用沼气生产供热 31MWh。在荷兰，1t 垃圾在 20 年中可产生 200 m^3 沼气，发电成本为 0.03~0.05 美元/度，上网售价为 0.05~0.07 美元/度。拉丁美洲自 1977 年以来，已完成 5 个填埋沼气利用项目，在发展中国家中居于领先地位。填埋沼气经过净化后主要用于厨房、照明、机动车燃料和管道煤气，年利用量约为 $2.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

近年来，在可持续发展原则指导下，欧洲国家纷纷立法，限制有机垃圾进入垃圾卫生填埋场。在德国，2005 年以后，有机物含量高于 5% 的垃圾即被禁止直接进入垃圾卫生填埋场。这种情况下，有机垃圾的处理和利用成为一个迫切的问题。由于堆肥存在这样或那样的问题，人们不断探讨有机垃圾处理、利用的新技术和方法。近十年来，有机垃圾厌氧消化系统在德国、瑞士、奥地利、芬兰、瑞典等国家发展尤其迅速，日本荏原公司也从欧洲引进技术，建设了日本首座厌氧消化示范工程。有机垃圾的厌氧消化处理成为有机垃圾处理的一种新趋势。

我国对城市垃圾填埋制取沼气技术的研究起步较晚，只是近十年来进行了一些试验性研究。1997 年，国家环保总局在南京、鞍山和马鞍山三城市启动了“促进中国城市垃圾填埋沼气收集利用”项目。目前，南京市已成功实现气体收集发电的目标，鞍山市的“收集甲烷用于汽车燃料”项目和马鞍山市的“收集甲烷用于焚烧医院有毒有害废物”项目也已于

2003年完成。

2002年8月开始运营的广州市兴丰生活垃圾卫生填埋场是我国第一座与国际技术和管理接轨的大型生活垃圾处理设施。兴丰垃圾场设置有垂直和水平填埋沼气收集管网系统,有130个竖井,气体收集率可达70%。根据兴丰垃圾场未来的垃圾量计算,该场至少能发电20年以上,最高发电装机容量可达 $1.3 \times 10^4 \text{ kW}$ 。

由国家计委、国家环保总局、国家经贸委、财政部、建设部、科技部等共同编写的《中国城市垃圾填埋气体收集利用国家行动方案》于2002年10月23日正式出台,预计到2015年中国城市垃圾填埋无害化处理将达到60%~70%。据专家估计,到2015年,我国的城市垃圾年产量将达 $1.79 \times 10^8 \text{ t}$,预计其中60%采用卫生填埋处理,则每年需填埋处置 $1.1 \times 10^8 \text{ t}$ 垃圾,假设对填埋垃圾所产生的沼气全部进行回收利用,按每千克垃圾产生 $0.064 \text{ m}^3 \sim 0.44 \text{ m}^3$ 填埋气来计,则可产生总量相当于 $1 \times 10^9 \text{ m}^3 \sim 7 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的天然气,其最小值与目前我国煤层气产量相当,最大值相当于我国目前天然气产量的1/5,这是一个相当可观的数字。同时,大量减少甲烷排放量对环境保护所起的作用将更为可观。

1.2.2 固体废物的焚烧处理技术与工程应用

1.2.2.1 垃圾的焚烧处理应用

垃圾焚烧发电技术在西方发达国家已有很长的发展历史,最先利用垃圾发电的是德国和法国,近几十年来,美国和日本在垃圾发电方面的发展也相当迅速,处于世界领先行列。我国垃圾焚烧应用发展迅速,但相比之下,我国垃圾焚烧发电设备的设计、生产、应用的水平和规模与发达国家的差距还很大。

国内第一个垃圾焚烧发电厂于1987年投入运行。垃圾焚烧发电在“九五”期间得到一些城市特别是南方大中城市的重视,从2000年到2003年共建成二十多套日处理量在200t以上的焚烧装置,主要分布在上海、广州、深圳、杭州、郑州、哈尔滨等大城市以及南方一些中等城市如苏州、宁波等,其中规模最大的纯垃圾焚烧处理装置(基本不需要利用辅助燃料)的日垃圾处理量为1800t,装机18MW。此外,目前在广东等地还有一些项目在建设之中。虽然近两年发展迅速,但因为起步晚,垃圾处理总量和装机总量都不大,只占我国生活垃圾总量的3%左右,发电总装机容量也只有200多兆瓦。不过,垃圾焚烧发电得到了政府的大力支持,由于其社会效益和经济效益日趋明显,一些经济发达城市在推广垃圾焚烧发电技术方面做了大量的工作。

垃圾的产生量和分布与人口、城市分布等密切相关。2002年,我国共有660个城市,年垃圾清运量为 $1.365 \times 10^8 \text{ t}$,以垃圾的平均热值 $4200 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计算,垃圾作为能源资源年总量为573TJ。根据国家环保总局预测,2010年我国城市垃圾年产量将为 $1.52 \times 10^8 \text{ t}$,2015年和2020年将达到 $1.79 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $2.1 \times 10^8 \text{ t}$ 。根据专家估计,到2010年大中城市的生活垃圾基本能够达到直接焚烧的要求,届时能够达到这一要求的垃圾约占总量的50%,热值按 $5000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计算,则垃圾能源资源总量为760TJ,可利用量为380TJ,可利用的垃圾发电装机潜力为2500MW,提供电力约18TWh;2020年如考虑同样的比例,垃圾能源资源总量为1050TJ,可利用量为525TJ,可利用的垃圾发电装机潜力为3450MW,提供电力约25TWh。因此垃圾焚烧发电从资源角度来说潜力很大。

我国中央和地方政府都很支持垃圾焚烧发电产业的发展,目前建设的垃圾焚烧发电装置

的投资大都来源于当地财政,并且都是在经济条件相当好的大中城市。国家环保总局在2000年出台了有关垃圾焚烧发电的污染控制标准和规范。中央在2001年11月出台了对垃圾焚烧发电项目实行增值税即征即退的优惠政策,这一政策非常明确且易于操作。

1.2.2.2 污泥的焚烧处理应用

欧洲许多国家如德国、丹麦、瑞典、瑞士等国以及日本从20世纪90年代起就开始以焚烧工艺作为处理市政污泥的主要方法。德国有近40个污水处理厂已经拥有多年的污泥经焚烧工艺实际运行经验。在德国,污泥焚烧炉首先始于多段竖炉,而后流化床焚烧炉逐渐取代了多段竖炉。目前,流化床焚烧炉的市场占有率已超过90%。丹麦每年约有25%的污泥经焚烧处理。瑞士宣布从2003年1月1日起禁止污水处理厂的污泥用于农业,所有污水处理厂的污泥都要进行焚烧处理,这也意味着瑞士政府每年将耗资5800万欧元用于污泥焚烧工艺。焚烧法处理污泥在日本应用得最广,如1992年日本采用1892座焚烧炉处理75%的市政污泥,现在日本规模较大的污水处理厂都采用焚烧法处理污泥。

在国内,浙江大学热能所在用异重流化床燃用洗煤泥的基础上,从1992年起首先系统开展了污泥流化床焚烧技术的研究,并取得很大成功。秦华在2001年首次对北京地区的城市市政污泥的焚烧处理进行了研究,他以高碑店污水处理厂的污泥为主要研究对象,分析了污泥的成分特点和燃烧特性,并在预防二次污染方面,通过分析重金属元素在污泥中的存在形式对污泥焚烧前后重金属含量的变化进行检测,研究了重金属在焚烧过程中的迁移特性,并对污泥焚烧灰渣的处理提出了建议。

1.2.2.3 危险废物的焚烧处理应用

目前,在美国大约有170多个焚烧装置在运行,过去十年中的许多严格测试已经表明,一个周全设计、正确操作并备有尾气和废水污染控制设备的焚烧装置对人类健康和环境的不利影响很小,通过良好的燃烧条件和适当的污染控制设备,任何污染物质都将减少到最低水平。

涉及危险废物处理的活动总是包括一些废物被释放到环境的威胁,但与焚烧处置技术本身无关,并可通过恰当计划、正确操作设备和发展安全工艺来减少危害的可能性。RCRA要求所有的危险废物容器被密封,以减少容器中危险废物的气味,并要求从业机构采取行动以减少在场点和贮存或转移废物等过程中的气味,其操作也不应影响周围声级水平,还要求业主减少在废物转移过程中泄漏或溢出的发生机会及保证泄漏或溢出的发生能得到迅速和安全的清理。通过适当的处理、贮存和焚烧,废物的着火和爆炸机会极小。RCRA要求,在贮存过程中隔离能起火的材料和可燃危险废物,禁止不相容物质的混合等,这些规定的执行使事故发生可能性减小。此外,还有特定规章管理废物的运输,规定特殊废物运输的路线,这些法规涉及废物源(产生者)、承运人和任何处理废物者。

目前,对焚烧新技术的研究正与处置工作同步进行,处于实验阶段并最有希望的技术包括熔盐技术、热解系统、电力反应器和等离子体系统等,但对危险废物焚烧处置工作的更多努力是针对现有技术的提高和进一步减少危害。现有技术有许多方面需要改进,以降低能耗,减小焚烧装置的规模,降低投资和运行费用,如利用更好的连续跟踪产物监测仪、废物投料控制设备、空气/液体混合设备,更好的操作监测和控制,以及更好的操作程序等。处理各种废物的专用焚烧装置的建造、运行及废物成分分析论证费用昂贵,在许多国家,小型设施和选择石灰窑、水泥窑或骨料窑等现有工艺设施在处置某些危险废物时显得更合理。

焚烧的主要优势是能最大程度和永久地消除废物中的有害有机物,预防任何将来的环境问题,可以说是最为实用的有害废物处置方案,实际上对于 PCBs 这样的难分解化合物,焚烧是唯一的既安全又适当的处置方法。

1.2.3 固体废物的热解处理技术与工程应用

1.2.3.1 城市垃圾的热解处理应用

世界上已有许多国家应用热分选煤气化技术建立垃圾处理厂。1992 年意大利在米兰北部建立了示范厂;1998 年德国在法兰克福南部的卡兹鲁克建成了商业运行的热分选垃圾气化处理厂;1999 年日本川崎重工将热分选技术引入日本,在东京千叶县建成了示范厂,至今已经建成投产 7 家工厂,意在改造日本现有的 1000 多座焚烧炉(众所周知,日本是工业化国家中二恶英污染最严重的国家,1900 多座垃圾焚烧炉是主要祸首)。我国的上海、杭州、哈尔滨等城市也正在酝酿建立垃圾热解气化发电厂。

垃圾资源化热解处理技术为垃圾处理多样化提供了一条新的途径,符合减量化、无害化、资源化的固废处理发展方向,具有能源回收率高、产生二次污染小、综合经济效益好等优点。目前国内已研制了比较完善的垃圾热解处理和热解气回收成套设备,其设计合理,自动化水平高,占地面积少,设备运转正常,具备工程应用及市场转化条件,具有广阔的推广应用前景。该系统采用废弃物自身产生的热能实现能量循环,降低了能耗和处理成本,具有较好的经济效益。

1.2.3.2 废塑料的热解处理应用

葡萄牙里斯本的 Portugal 国家工程和工业技术研究所将建立一套 250kg/d 的装置,把废塑料转化为燃料油或炼厂原料,目前正在进行小规模试验。此热解工艺把塑料废物碎屑悬浮在一反应器内的流动液流中,温度为 $400^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$,压力为 1.5MPa。此反应维持 5min~30min,具体依废塑料性质而定。此工艺把某些热解气体燃油化,但约 85%重量分率的输入物料转化为液体,它可用作炼厂原料。此原料可供生产新塑料,或经蒸馏作液体燃料。据称,约 50%蒸馏出的产品其沸点在汽油的馏程范围内。此装置约耗资 300 万美元,操作费用约为 80 美元/吨。建厂地址尚未选定,但它将从靠近市内的废物处理装置取得混合原料。

目前的塑料回收法以树脂再生材料为主,已经有许多材料回收试验装置和工业规模的装置在运转。但是这种方法再生的材料物性不是很好,用途有限,因此能用塑料回收法处理的废塑料非常有限。今后塑料回收法将以能量回收为主,但是其基本技术即焚烧技术存在两个问题:一个是如何应对焚烧炉的高温造成的困难,废塑料的热值比纸张和一般垃圾高,故焚烧温度高,熔融的塑料附着在炉壁表面容易损伤炉壁;另一个是如何处理聚氯乙烯焚烧时产生的致癌物质。

1.2.3.3 污泥的热解处理应用

利用污泥热解制油是近年来处置有机污泥的一种新技术,它在无氧条件下加热污泥至一定温度,使污泥中的有机物热解为油、水、不凝性气体等产物。国外对污泥热解制油技术的研究始于 20 世纪 80 年代。Lee 等的研究表明,当对污水处理厂的一级处理污泥直接进行萃取时产油率为 0.181%,经过热解反应后萃取,则产油率可达 31.4%。Suzuki 等发现,消化污泥的热解产油率 $< 25\%$,而剩余污泥的热解产油率可达 $41\%\sim 45\%$ 。此外,在加拿大的多伦多和澳大利亚的悉尼还分别建造了干污泥处理能力为 4t/d 和 45t/d 的演示性装置。

国内在这方面的研究不多,只有欧国荣、何品晶、贺利民等进行了油化实验,尚无成熟的技术及理论。喻建良等采用低温催化热解法处理大连市马栏河污水处理厂的污泥,分析了其热解特性,并考察了温度、反应时间以及催化剂用量对产油率的影响。

1.2.3.4 农业废弃物的热解处理应用

广州迪森能源集团已成功研制将农林废弃物(秸秆、稻壳、木屑、树叶等)通过快速裂解方式制备成生态油的高新技术,这意味着中国有望实现彻底摆脱石化能源格局,进而展开生态“大油田”建设。

据迪森集团“生态油”项目负责人介绍,和化石能源一样,植物废渣在炼化同时也产生固、液、气三种产品,包括70%左右的生态油、15%左右的草木灰和15%左右的可燃气(主要可燃成分是甲烷和一氧化碳,可用于小型燃气发电机直接发电)。“生态油”工业示范设备在启动之时需要外部的电能,启动后燃气发电机组可以做到能量自给自足,这对于在农村、山区等缺电的地方建生态油工厂是十分有利的。

据悉,对于原油替代技术和生物质能的探索一直是新能源开发的一个方向。但无论是子虚乌有的“水变油”、环保成本过大的“煤变油”,还是已被叫停的“粮食变乙醇”项目,均没有找到经济成本和社会效益俱佳的模式。以美国、巴西为代表的一些国家大力发展以玉米和甘蔗为原料的醇基燃料,以德国为代表的欧洲各国开发以油料植物为原料的生物柴油技术,这两个研发方向一个是“与人争粮”,一个是“与粮争地”,都不适合中国国情。而目前使用的三大化石能源——煤、石油、天然气都是由海底和陆地森林转化而来,它的生态油技术可让这种自然界需要千百万年才能完成的转化在1s~2s内就可实现。

据了解,迪森集团生产的生态油已经开始销售,而且目前正在扩建。迪森集团总裁马革对于生态油的未来很有信心:“2t生态油的热值同1t柴油相当,1t柴油价格大约为5000元,而生态油1t价格只有1000多元,对企业而言,等于节省了30%到40%的燃料成本。”他分析说,中国的耕地保有量必须达到18亿亩,这是一个高压线,也就是说中国每年至少有 $7\times 10^8\text{t}\sim 8\times 10^8\text{t}$ 的各种农林废弃物产生。从理论上讲,如果全部用来制备生态油,中国就不再需要进口石油。

广东是能源消费第一大省,能源对外依赖度高达90%以上,但广东有丰富的“生态油”资源,仅稻秆每年就有 10^7t 以上,另外,还有大量的甘蔗渣和丰富的林业废弃物资源。按资源分布,广东全省可建万吨级的生态油工厂500个以上,这就相当于把中大型油田搬到了广东。如果每个工厂年产 $2\times 10^4\text{t}$ 生态油,一个工厂就相当于10口油井,而其建设成本仅相当于中大型油田的1/5左右,建设周期仅相当于中大型油田的1/2~1/3。