

资源回收工程原理

UNIT OPERATIONS IN RESOURCE RECOVERY ENGINEERING

【美】P. A. 维西林德 A. B. 赖莫 著



资源回收工程原理

[美] P. A. 维西林德 A. E. 赖莫 著

吴柏青 路继广 齐大中 译

李富勤 校

机械工业出版社

资源回收工程是近年发展起来的一门新学科，是机械工业的一个新兴领域。

本书系统而全面地阐述了资源回收工程的基本原理、工艺及其设备，重点介绍固体废物的特性、产生数量及回收潜力；固体废物的收集、贮存、输送、破碎、分选、处理以及能源回收技术等。书中列举出大量计算实例，每章末附有思考题。

本书可供从事资源回收工程工作的科技人员、使用人员以及有关学校的师生参考。

Unit Operations in Resource Recovery Engineering

P. Aarne Vesilind Alan E. Rimer

Prentice-Hall, Inc. 1981

资源回收工程原理

[美] P. A. 维西林德 / A. E. 赖莫 著

吴柏青 路继广 齐大中 译

李富勤 校

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 12 1/4 · 字数 367千字

1986年10月重庆第一版；1986年10月重庆第一次印刷

印数 0.001—1.000 · 定价 3.85 元

统一书号 15033·5868

译 者 的 话

材料与能源是人类社会赖以生存、发展的两大物质基础。随着社会经济的发展，传统的材料与能源日益紧张；与此同时，工业废物与生活废物却日益增多。目前城市固体废物多采用填埋方法处理，随之带来资源未能充分利用，容纳场地短缺与环境污染严重等问题。所以，从充分利用资源和保护环境两方面来看，都有必要研究资源回收问题。近年来，围绕着从城市固体废物等回收能源和各种有用材料的研究，产生了一门新的学科——资源回收工程。各国对这一新兴技术十分重视，美、英、日等国都把从城市固体废物中回收能源列为重点节能课题。

从城市固体废物中回收资源的潜力是巨大的。目前，回收的比例还很低，如充分回收这些材料，其经济效益是非常惊人的，不但能回收材料和能源，而且还可以获得大量的优质肥料。

我国历来有重视资源回收工作的传统，许多城市都普遍设有废旧物资回收网点。不过，现有的资源回收工作主要以人工分检为基础，无论从回收效率、回收规模、回收程度来看，都是相当低的。随着社会主义经济建设的发展和人民生活水平的不断提高，各种废弃物，包括城市固体废物将迅速增加。例如1981年，北京市区每天垃圾运出量为四千五百吨以上，和70年代初相比增加了近一倍。同时，废弃物的急剧增加，对环境污染的矛盾也日益突出。古老的手工回收方法

已适应不了形势发展的要求，需要积极开展以现代科学技术为基础的资源回收工作。

美国学者维西林德 (P. A. Vesilind) 和赖莫 (A. E. Rcmer) 合著的《资源回收工程原理》一书，将机械工程学、电学、化学、生物学和环境科学等多种学科综合在一起，系统而全面地阐述了现代资源回收工程的基本原理、工艺及设备。因此，该书的翻译，将对我国从事资源回收工程工作的科技人员及其使用人员有一定的参考价值。

本书在翻译过程中保留了原有的单位制，对原书中个别明显的错漏之处作了修正。本书前言和第一、二、五章由路继广译，第三、四、六、十章由吴柏青译，第七、八、九章和附录由齐大中译，全书由李富勤审校。

资源回收工程是一门综合性技术，它涉及到很多的学科，限于我们的水平，书中不妥和错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

译者

1983年1月

前 言

由于原材料的加速开采和长期供应不足，以及废物处置在环境和道德伦理方面所受到的限制，致使人们对从固体废物，特别是从混杂的城市废物中回收各种物料和能源的兴趣日益增加。对这个领域的迅速发展评价不一，有的认为是显著的，有的认为仅给人以深刻印象。

有关从城市废物这类非均质和随时变化的废物中，回收能源和各种物料的问题，形成了一般称为资源回收工程这门学科。这门专业的基础主要是采矿、土木、化工和机械工程。但也利用了某些生物学、化学和社会科学方面的知识。从废物中回收资源一定要用到很多不同领域的知识。从表面上看，资源回收工程是个肮脏的专业，但实际并非如此。

本书的目的是借用各种必要的知识，提供资源回收工程综合教材。我们希望本书不仅仅是目前资源回收设备的情况介绍，而且是从基本的观点介绍分选各种物料和回收能源的情况。因此，本书提供了多单元作业的精辟分析的基础材料，这些单元作业可用来发展成套的资源回收工艺。

虽然本书包括了固体废物的收集、填埋和其他有关的固体废物等论题。本书原来并不打算成为一本固体废物工程的基础教科书，然而，本书的分析要比一般性的介绍详细，打算使用此书作为基本教材的教师也许会发现这一点。

当作者参加由国家科学基金会所赞助的资源回收工程趋势材料的研究时，便产生了写本书的愿望。本书的大部分材

料是第一作者准备的，是他在担任新西兰怀卡托 (Waikato) 大学高级讲师时写的。对于该大学，特别是环境研究室主任汤姆·福克斯 (Tom Fookes) 先生的合作与支持表示深切的感谢。

本书一部分原稿由厄恩斯特·施洛曼 (Ernst Schloemann)、查尔斯·欧·维勒载 (Chales O. Velzy)、杰丽·勒·琼斯 (Jerry. L. Jones)、雷蒙德·里根 (Reymond Ragan) 和勒·吉·奥斯汀 (L. G. Austin) 校订。此外，狄克 (Duke) 大学的很多学生也提出了很多建设性的建议，他们的看法是很有价值的。

从一开始，作者便得到他们的同事乔治·维·皮尔索尔 (George W. Pearsall) 的指导及在编辑工作方面的帮助。他对本书某些章节所提的意见，具有无可估量的价值。对于他在此项编写工作中给予的合作，谨表示衷心的感谢。大部分手稿的打字和总的编排是由琼戴·爱德华兹 (Judy Edwards) 女士完成的，我们对她致以谢意。

P. A. 维西林德

A. E. 赖莫

目 录

译者的话

前言

第一章 固体废物的特性、产量和资源回收的潜力..... 1

第一节 社会中的物流 1

第二节 固体废物的数量和特性 8

第三节 从固体废物中回收有用物资和能源的潜力 40

第四节 资源回收的障碍 42

第五节 结语 44

思考题 46

参考文献 46

第二章 固体废物的收集 49

第一节 固体废物收集系统 49

第二节 固体废物收集效果 73

第三节 分离后废物的收集 78

第四节 杂乱废物 82

第五节 结语 89

思考题 90

参考文献 91

第三章 固体废物的贮存、输送和破碎 95

第一节 贮存和输送 95

第二节 压实 104

第三节 破碎 106

第四节 碎浆 146

第五节 辊式破碎机 147

第六节 结语 150

思考题	151
参考文献	151
第四章 机械分选	156
第一节 物料分选的一般公式	157
第二节 手工检选	163
第三节 筛分	165
第四节 气流分选	178
第五节 跳汰机	204
第六节 气动分选床	211
第七节 沉降/升浮分选装置	211
第八节 斜槽	218
第九节 摇床	220
第十节 浮选	223
第十一节 色别分选	229
第十二节 结语	231
思考题	231
参考文献	232
第五章 磁选和机电分选	237
第一节 磁选	237
第二节 涡流分选	246
第三节 静电分选	263
第四节 磁液分选	269
第五节 结语	273
思考题	275
参考文献	276
第六章 生物化学处理	279
第一节 沼气分解制沼气	281
第二节 废物填埋坑产沼气	288
第三节 堆肥	299

第四节	利用酸解和酶水解生产葡萄糖	308
第五节	其他生化处理方法	313
第六节	结语	314
思考题		315
参考文献		315
第七章	燃烧	320
第一节	历史沿革	320
第二节	燃烧原理	321
第三节	燃烧热平衡	328
第四节	燃烧过程的物料平衡	331
第五节	燃烧过程变化因素	331
第六节	结语	333
思考题		334
参考文献		334
第八章	焚化与能量回收	337
第一节	引言	337
第二节	焚化炉设计概念	338
第三节	其他焚化工艺	368
第四节	废热回收	377
第五节	空气污染控制设备	387
第六节	结语	398
思考题		399
参考文献		399
第九章	高温分解	405
第一节	引言	405
第二节	历史沿革	406
第三节	过程的特征	407
第四节	过程控制参数	411
第五节	反应器	415

第六节 其他高温分解产物	433
第七节 对环境的影响	437
第八节 结语	438
思考题	438
参考文献	439
第十章 最终处理	442
第一节 废物残渣最终处理方法的选择	442
第二节 填埋	443
第三节 危险性物质	474
第四节 结语	478
思考题	479
参考文献	481
附录	485
附录一 颗粒尺寸	485
附录二 筛子尺寸	493
附录三 固体废物分析技术	496
附录四 换算系数	506

第一章 固体废物的特性、产量和资源回收的潜力

第一节 社会中的物流

一、资源回收的理由

图 1-1 是我们社会中的物料流程图。该图强调我们并没有“消耗”物料，相对于外界周围环境来说，我们只不过使用了它们并最后将它们归还于外界环境。使用与归还经常处于交变状态。供“消费者”使用的商品生产需要输入物料，这些物料来源于三方面：在地球表面上发现的用于产品制造的原材料；在产品制造中产生的废料；产品使用后的回收物料。工业生产并不都是有效的，因而会生产出一些废物，这些废物必须重新处理。最终加工出来的产品卖给用户，用户在使用以后对此产品的处理有三种选择：处理掉这些材料；收集足够数量的物料用于生产能源或返回到工业部门中重复使用，不再重新加工，将此物料重新用于同样的或不同的目的。

要注意到这是一个封闭系统，只有一个输入和一个输出，这再次强调了我们的世界是有限的这一特性。在稳定状态下，进入到此过程中的物料必须等于返回到外界的材料。这个过程适用于所有物料的总和，也适用于某些特殊材料。例如铝制饮料容器的生产要使用铝土矿，用它精炼出铝。最终产品即罐头出售给消费者。一些罐头是次品或由于其他原因而不能提供给消费者使用，而作为工业废料回收。消费者

使用过的罐头，空的容器或其他的物品采用通常的方式处置掉。一些铝被回收到工业部门用于重新炼制，一些铝在家庭生活中做其他用。被回收用于生产加工的铝，只有通过那些收集和回收物料的公司或其他组织的努力才能收集到，对于大多数物料，这种回收经常是亏本的。

物流与“外界”的相互作用是发生在原材料的输入处和废物的排出处。图 1-1 的这两个交界面分别用 A 和 B 表示， A 表示原材料， B 表示返回到外界的材料。

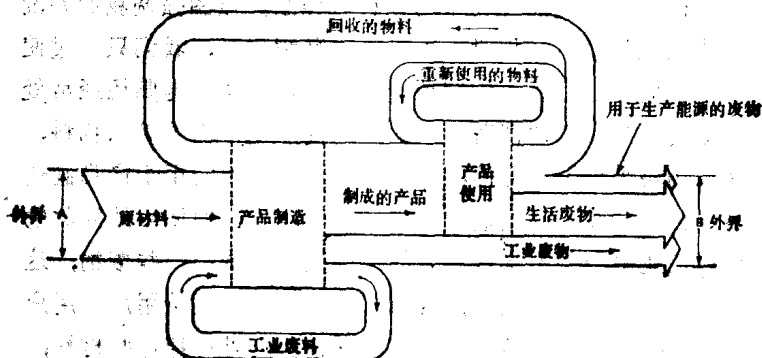


图 1-1 社会中的物流

A 和 B 应尽可能大，因为通过增加这些数值可以得到很多好处，这点是可以证明的。例如，用于生产过程中的大量的原材料表明了原材料工业很高的利用率，由于原材料的大量生产，从而使原材料较为便宜，降低了生产费用。

废物处理工业（它涉及到各种各样的地方废物收集者和制造地面处理重型设备的大型公司的总裁）与人们所处理掉的物料的数量有着重要的利害关系。从这个意义上说， B 部分越大也就越有利， B 部分大就意味着废物处理工业有更多的工作。

但是, A 和 B 部分越大也有着不利的作用。首先, 大量的原材料输入意味着开采了大量的无法再补充的原材料 (通常不采用象现代露天开采这种环境敏感的方法)。同样地, 大量的废物具有明显的不利的作用, 需要占用很多的土地来处置这些废物, 或在焚烧炉燃烧这些废物, 这样在局部地区会产生空气严重污染的问题。

原材料高速开采最终会导致自然资源枯竭。目前在美国已耗尽了国产的一些无法再补充的原材料, 如铜、锌、锡等, 这些材料现在是进口的主要部分^[3]。显然, 如果世界上其他国家也达到了目前发达国家的生活水平, 那么原材料的供应就不能满足需要了。我们目前的生活方式建立在从集中的资源 (矿石) 中获得这些原料的基础之上, 利用这些原料制成产品, 然后再分配到广大地区, 这样的分配显然使得回收和重新利用资源都很困难。

最后关于每个国家的国家安全问题都是以该国家获得可靠的原材料供给的能力为基础的。我们已经看到了象石油这样的必需品依靠其他国家所可能产生的问题。毫无疑问, 那些拥有大量的原材料储备的国家将发展卡特尔垄断组织, 象铝、锡和橡胶等产品的价格将显著提高。

因此实行将清除外界环境的废物数量降低到最小是有充分理由的。显然, 应该重新设计我们的经济体系, 以达到这个目的。

二、降低原材料的使用和废物产生的数量

图 1-1 清楚地表明, 如果系统是处在稳定的状态, 则输入必定等于输出。因此, 不论 A 和 B 哪一方面的降低, 都必定引起另外一方的降低。换句话说, 可以从两方面着手解决这个问题。

首先A部分可以通过以下几种方法降低：增加重新加工利用的工业废料数量；减少商品生产的数量；增加从消费后的废物流中回收物料的数量。增加重新加工利用的工业废料，包括增加“内部废料”（重新在工厂内部利用的废料）和“当场交付的工业废料”（被分离出来的清洁的工业废料即可由其他公司使用）。但是废料多代表效率低，工业生产的最终目标是所产生的废料要尽量少。显然，降低原材料的需求量，要靠后两个方法中的一个。

为了少用原材料，第二种可能的办法是降低商品生产的数量。这就需要重新设计使用材料和耗用能源都较少的产品。提高原材料的价格或采用政府行政命令的方法可以降低用于商品生产的原材料的数量。在“减少废物”的名义下，联邦政府评价了用法律规定的几种降低原材料耗用的方法，象高额的包装税、包装费用（例如1美分/磅）和强制的产品寿命等都在考虑之列。

第三种可能的办法是增加物料的回收。如果做到这点，则所生产的消费品的总数量和工业加工制造的商品数量不需要降低，但是可能降低系统的原材料输入量和预定处置的物料数量。这种策略看来不仅是可行的，而且是经济的、有政治意义的和有实际吸引力的。

从图1-1的物料处置端看，虽然只有两种降低处置物料数量的办法。一是增加回收和增加重新利用的部分，另一个办法是增加用于生产能源的废物的利用。如图所示，能重新使用的产品是指消费者可以做某些其他用途或再次使用而无需将产品运回到制造厂的物品。反之，材料的回收要牵涉到物料的重新加工或制造。再次使用和回收都取得减少使用原材料的效果。另一方面，增加用于生产能源的废物数量，将

仅仅降低废物的处置数量，并仅能间接地影响原材料的开采。

总之，减少原材料消耗和废物产生量的可行方法为：

- (1) 减少废物；
- (2) 增加回收；
- (3) 增加重新使用。

以下分别讨论这些减少固体废物和利用天然资源的方法。

1. 减少废物

采取减少废物的措施可以显著地节约原材料。例如，俄勒冈型瓶子法规规定啤酒和软饮料容器应有80%重新灌装使用，最多可以往返装瓶厂来使用18次并非不合理。用使用寿命为10~13万公里（6~8万英里）的汽车轮胎代替现有的使用寿命仅3万公里（2万英里）的轮胎，似乎将可一定做到。几乎在所有情况下，花很少的钱重新设计产品，就能使其寿命提高10~15%。

如果仅此三项目标达到的话（重新灌装饮料容器，较好的轮胎和较长的产品寿命），那么就可能减少1800万吨^①（2000万短吨）消费后的废物，或者说减少1985年预计废物量产生的15%是可能的⁽⁴⁾。

减少废物可以选取或同时采取以下两种基本方法：(1) 在不损害产品效能的情况下，减少单个产品的材料耗用量；(2) 提高产品的使用寿命。

通过重新设计目前销售所使用的某些包装，也许可以迅速地降低单个产品的材料耗用量，例如，拉制的薄铁皮罐头

① 1短吨等于2000磅，合0.907吨。

比普通的焊缝锡罐头可节约用料25~30%。重新设计汽车，减少5%的用钢，每年即可节约315000吨（350000短吨）钢。

以汽车为例，来说明如果提高产品寿命将会出现一种什么情况。目前，美国小汽车的平均寿命约10年（比其他国家短的多），平均重量约1800公斤（4000磅）。如果寿命仅增加两年（预期1990年寿命为12年），那么就能节约540万吨钢（600万短吨）。13.5万吨铝（15万短吨）和13.5万吨锌（15万短吨）。

值得强调的是，在产品的材料和设计方面这样的减少和改变无疑会产生某些经济结果。如果要制定这样的规则和法规，必须是在充分了解所产生的经济效果的前提下拟定。

2. 重新使用

目前，在家庭中我们重新使用很多的物品，这些物品简单地予以利用，其价值还在于有着不止一种的用途，例如，从超级市场拿来的纸袋经常用于装垃圾，将垃圾从住房送到垃圾桶，旧报纸卷起来用于点燃壁炉里的木柴，咖啡盒用来盛放钉子等，所有这些都是重新使用的实例。遗憾的是，所有这些二次使用，没有一个对我们社会所耗用的原材料的数量产生很大的经济影响。

相比之下，重新灌装的饮料容器将成为重新使用的主要形式。目前在美国每年大约要消耗600亿个啤酒和软饮料容器，这大约折合800万吨（900万短吨）固体废物，约占固体废物物流的8%。也许更为重要的是，这些物品在可见的杂乱废物中占了大部分。

3. 物料回收