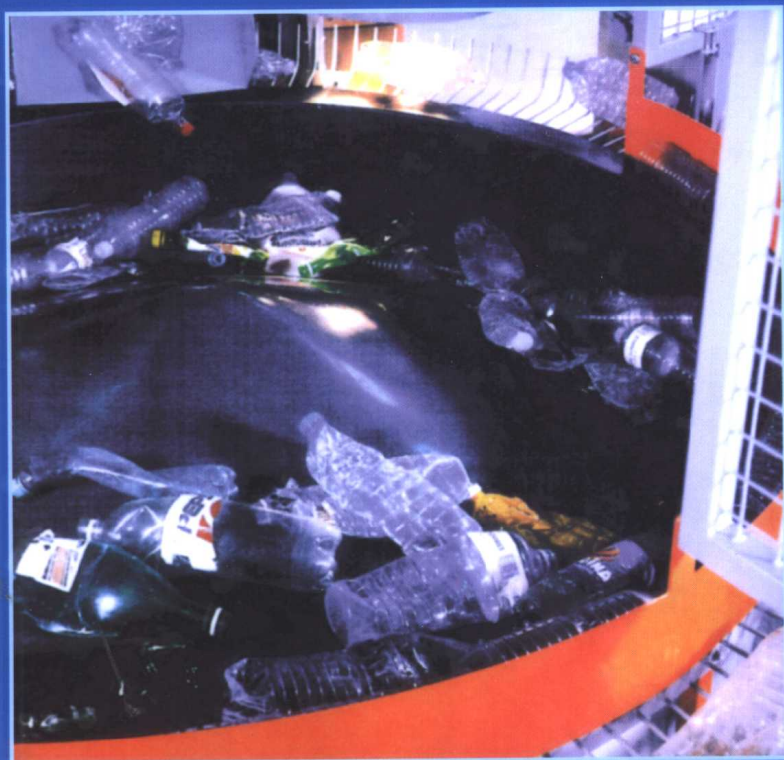


聚合物回收

——科学、技术与应用

[澳] 约翰·沙伊斯 著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

聚 合 物 回 收

——科学、技术与应用

[澳] 约翰·沙伊斯 著
纪奎江 陈占勋 等译



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

聚合物回收——科学、技术与应用/[澳]沙伊斯(Scheirs, J.)著,
纪奎江,陈占勋等译. —北京:化学工业出版社,2004.3
书名原文:Polymer Recycling: Science, Technology and Applications
ISBN 7-5025-5288-X

I. 聚… II. ①沙…②纪…③陈… III. 聚合-高聚物-
回收 IV. TQ317.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 020225 号

Polymer Recycling: Science, Technology and Applications/by John Scheirs
ISBN 0-471-97054-9
Copyright © 1998 by John Wiley & Sons Ltd. All rights reserved.
Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Ltd.
本书中文简体字版由 John Wiley & Sons 出版公司授权化学工业出版社出版发行。
未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2003-8464

聚 合 物 回 收

——科学、技术与应用

[澳] 约翰·沙伊斯 著

纪奎江 陈占勋 等译

责任编辑:李晓文

文字编辑:林 丹

责任校对:李 林

封面设计:潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 29 $\frac{1}{4}$ 字数 502 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5288-X/TQ·1941

定 价: 65.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

内 容 提 要

本书作者系澳大利亚的约翰·沙伊斯博士，他是聚合物回收及其降解和分析专业领域的资深专家。作者用大量的工业生产实例，概述了近十年来聚合物回收的最新技术；例举了欧美发达国家回收聚合物的高效生产设备；详细论述了多种通用的热塑性聚合物制品的回收利用技术；讨论了废轮胎综合利用的新进展。

本书从高分子材料的基本原理出发，重点侧重于回收聚合物的综合利用技术、工装、工艺，并介绍了欧美多家公司的现场回收利用设备、生产线流程、实际应用的技术，特别强调了回收聚合物的质量控制。可供从事聚合物回收、加工和应用研究的工程技术人员，高分子材料科学和工程专业院校的师生参考，亦可供资源回收、环境保护特别是固体废弃物的循环利用行业以及政府有关部门制定法规和产业政策作参考用书。

译者前言

人类只有一个地球，她是我们共同的家园，然而她所蕴藏的原生资源却日趋枯竭。处在经济全球化的今天，也必然会使资源全球化。所以，如何使现存的资源得到最合理、最有效的利用，最大限度地减少废弃物排放，逐步使生态系统进入良性循环，使全球由“线性经济”走向“资源—产品—再生”的“循环经济”，这是人类的共同目标。

中国是一个自然资源人均占有量极低，环境容量不容乐观的发展中大国，宏观全面建设小康社会的目标与满足该目标所需的自然资源储备之间的矛盾日益突出，因而发展循环经济应是我国的当务之急。只有解决好资源利用和生态环境保护，才能保持经济的可持续发展。

再生资源是世界上最大的“富矿”，被誉为绿色工程。发达国家迫于既发展经济（资源消耗），又要保护环境的双重理念，从20世纪70年代对再生资源产业投入巨额资金，实施优惠政策，到本世纪初再生资源产业规模已增至6000亿美元。出于对解决我国资源、环境、就业问题等根本出路的思考，发展再生资源产业已被列为21世纪的可持续发展工程。

聚合物材料特别是工程塑料、橡胶、纤维等高聚物在生产部门和人民生活中的广泛应用已给人类带来了巨大的物质财富，但同时也将产生数以亿吨计的废弃聚合物及其产品，它既是宝贵的再生资源，又会对环境造成无法弥补的危害，所以对聚合物的回收和循环利用已成为当今世界的重大课题。本书是Wiley聚合物科学丛书中的分册之一。它对国际上的塑料、橡胶等高聚物的回收和应用技术，特别是20世纪90年代以来的发展作了较全面的总结，我们相信本书出版后将对我国聚合物回收利用的发展起到重要的推动作用，并会产生不可估量的经济价值和社会效益。

多年从事聚合物回收利用研究的纪奎江教授和陈占勋教授受化学工业出版社之托，组织完成了本书的翻译工作，并对译著进行了全面审核和校订。本书前言及第1~4章由赵丽芬、鲁闻生、孙立梅三位在读博士翻译，第5~8章、12章及索引由杜爱华副教授（博士）翻译，第9章由程宝家博士翻译，第10、11、13~15章由朱娜硕士翻译。

本书在翻译出版过程中得到了中国城通资源再生开发利用公司陈胜杰董事长、山东日照岚星资源再生有限公司林相英董事长、山东滨州丰华橡胶有限公司王书光董事长和四川海联环保科技有限公司张树清董事长、澳大利亚 JINZE International Ltd. PTY 朱力先生和于丽萍女士的大力支持和热情帮助，化学工业出版社为本书出版付出了艰辛的劳动，在此一并深表谢意。

限于译者水平，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

译者于青岛科技大学

2004 年 2 月

前 言

由于经济、法律及民众意识等方面的原因，将废旧塑料用掩埋方法处理已越来越不可行。在发达国家，环保意识的增强和可用的掩埋式垃圾处理场空间的减少促进了塑料回收工业的发展，但是现在只有大约 5%~25% 的废旧塑料被回收。伴随着全球人口的增长，塑料的消费量也会急剧增长，这样，回收塑料也必将增加。目前，发达国家的人均塑料消耗量是非工业化国家的 5 倍。高度发展中国家如中国、印度也将大量消费塑料，这必将会促使废旧塑料的增加。

占有所有材料总量 8%、体积分数达 18% 的聚合物会被弃入垃圾场，其中 40% 是塑料包装用品。由于它们随处可见、种类多、生物降解性差、使用周期短，因而备受关注。近来数据表明，在欧洲，使用回收塑料方法包括焚烧能量回收（14%）、机械回收（6%）、原料或化学回收（0.3%）。

刺激回收塑料应用的因素包括生态原因、消费者的需求、回收法规及降低成本等。直到最近，这些仍是消除不利影响的重要因素。采用回收塑料的不利之处有物质组分变动、杂质涉入、由于降解导致机械性能损失、原料供应缺乏标准及变动大。现在，大多数问题已通过采用各种措施得到了解决，完善了回收质量标准，统一了收集系统。塑料回收的 3 个基本要素是：可以进行可靠收集与分离的稳定供料源；经济上可行的环保友好型的回收工艺；回收聚合物的制品要有市场价值，要取得消费者信任。

聚合物回收是一项具有挑战性的工作，因为聚合物有 10~20 个主要种类、上千种不同树脂牌号及共混物。此外，多层产品、层压制品及复合产品的应用，使聚合物种类更加繁多。聚合物很少不含添加剂，而且一般含过量的添加剂和改性剂，如填充剂、色料、抗氧剂和阻燃剂，这些都会干扰回收工艺。另一个复杂因素是，单一的聚合物（如 PE）熔体指数也很宽，热稳定性变动很大。

在最近 6 年里，塑料回收有很大变化。如在 20 世纪 90 年代早期主要强调机械法回收塑料，今天塑料回收形成了原料回收和焚烧能量回收的组合方法；在 20 世纪 90 年代早期回收主要集中在随处可见的塑料包装用品上，现在回收

耐用品、汽车用塑料、橡胶轮胎、地毯/织物、计算机外壳等则是优先考虑的。由于回收法规的完善、回收品价位合理、回收技术的成熟及统一回收网络的形成，回收品的需求正稳定增长。尽管回收塑料是高效率、高效益的技术，仍需建立合适的、稳定的市场。

聚合物回收中另一个有趣的变化在于观念上的变化。最初的回收政策是靠政府力量来执行，引发了激烈的争议，而现在视线集中在科学与技术方面。这本书的出版及时地满足了这一需要，重点论述技术。近年来，形成了一套塑料回收的可行方案，即采用混合回收技术，根据聚合物本身的性质、用途和杂质含量来确定各回收技术的比例。1990 年回收塑料用在混合塑料简单制品（如花瓶）上，后来用于工程塑料回收循环里。这一例子清楚地说明了这一转变。采用均衡的方法，聚合物用机械法重复回收后，可用于原料回收或焚烧能量回收。

本书描述的高效回收法已不再是一种理想的概念，而是对各类型聚合物都可行的技术。当然这里仍有一些障碍，如收集费用高、缺乏市场回报、公众异议（焚烧时）。本书讲述的技术都是聚合物回收领域的最新进展，所引文献大多是来自 20 世纪 90 年代，这使得本书称为聚合物回收可行技术的最新著作。伴随着全球社会和立法压力的增加，各回收工艺与技术在 21 世纪一定会有更进一步的发展。

大多数聚合物回收的一个重要方面是将废旧塑料分离成单一组分，混合塑料一般价值低、产品性能差且不稳定，而分离后则可用于价值高的制品。第 1 章讲述了有效分离废旧塑料的自动鉴别技术，包括浮降法、空气分离、水旋法、浮沫法、选择性溶解、中红外和近红外分光法、X 射线分析法、光二极管扫描或 CCD 摄像及静电技术。

尺寸减小对大多数塑料回收工艺是一个不可缺少的部分，本书第 2 章对其进行论述。其可分为切割工艺（包括撕碎、造粒、旋转研磨）、稠化工艺（如凝结或压实）和磨粉工艺（如盘式粉碎机、叶轮研磨、锤研磨、低温粉碎和固态剪切挤出新技术）。减小废旧塑料的尺寸是将其变成适于运输、计量及加料等进行下一步回收工艺的不可缺少的步骤。减小尺寸常用于从复合材料或多层产品中获得材料。例如，与空气淘洗同时使用可分离塑料复合材料，如织物增强的塑料管、纤维增强的塑料膜、泡沫底垫子和废旧地毯。

本质上回收塑料常含有各种外来杂质如纸、金属、纤维、玻璃和不相容聚合物，本书第 3 章针对这个问题论述了熔融过滤系统，它从聚合物中除去杂质，提高了回收塑料的价值，并扩大其应用范围。熔融过滤对吹塑用回收树脂是必需的，因为杂质存在会导致瓶壁的吹裂，挤塑中杂质会引起管嘴阻塞，导

致薄膜表面的缺陷。熔融过滤可分为不连续和连续两类，由于回收聚合物与原聚合物相比杂质含量高，连续过滤、无间断的操作应属首选。对杂质含量高的物质，已有可自动回流的连续操作筛子更换器。熔融过滤领域的最新进展包括所谓的激光过滤器，它由激光钻空的硬钢盘组成，这种过滤器可从高杂质含量的回收组分中连续过滤出杂质。

PET（第4章）的回收是聚合物回收最成熟最普遍的例子。这是因为它应用广泛，尤其是在饮料工业中（这是PET回收的主要用途），供量相对稳定，废PET瓶易于使用。因此PET的处理价值在铝之后排第二位。虽然PET回收很成功，但仍有一些局限，包括：微量商标杂质会引起PET变色或透明性变差；热降解和氧化降解引起产品变黄或机械性能变差；残留的潮气会使PET熔融时快速降解。而且，如PVC之类杂质在高温挤出时产生的卤化氢杂质是PET处理的一个主要问题。PET断链是酸催化的，PVC杂质即使含量很低，也会由于PVC炭化引起大量变色及黑斑，这是由于PVC在PET的处理温度时会严重降解。废旧瓶回收的PET非常适于作填充纤维，这是因为纤维的特性黏度要求比饮料瓶低，而熔融处理一般导致聚合物的特性黏度低。Wellman已通过EcospunTM将回收PET制得的纤维商业化，已有衣物在销售，如毛衣、袜子。其他回收PET瓶制得的产品包括新地毯、皮带、热成型蚌壳式包装片材、薄膜、玻璃填充注塑树脂、废食品用瓶子，甚至食品用制品（用强清洗工艺处理的回收PET）。各种保持PET分子量的新技术也会讨论到，如固态熔融缩合和扩链技术。

第5章讲述了在公共废旧组分中含量最大的聚烯烃组分的回收。平均超过60%的家庭包装用废塑料含聚烯烃，回收聚烯烃的基本来源为HDPE瓶、LDPE膜、HDPE燃料箱、PP电池箱。用过的HDPE奶瓶是回收PE的主要来源，因为其用量大，易辨认，而且产生了非常类似且组分均一的回收物。用HDPE均聚物制的日用瓶分子量高（熔体指数低）、耐环境开裂应力差，这些因素限制了它的回收制品的应用。大量的可回收纯HDPE树脂及各类改性剂可弥补回收瓶得到的HDPE存在的缺陷。回收HDPE制品有发动机油箱、物品袋、排水管、共挤出制品的内层，或吹塑容器、垫子、垃圾袋、回收箱、独木舟等。从电池箱和汽车保险杠回收的PP可应用于新的汽车制品，如挡泥板、导气、导热管，甚至做成新的保险杠。聚烯烃杂质问题会详细讨论。

第6章讲述PVC的回收。尽管PVC在世界消费中排第二位，但并没有像PET和聚烯烃那样大量回收。PVC主要用于耐用品（如管道、窗框、绝缘电线），因此，它并没有大量进入城市固体废弃物中。本章讲述PVC各种制品如矿泉水瓶、绝缘电线电缆、窗框等、PVC底织物及PVC汽车部件（如乙烯边

条料、家具靠垫材料、PVC 包覆的减震垫) 的回收工艺。回收 PVC 用于共挤出 PVC 管、共挤出乙烯涂层材料, 用于房侧、锁圈、共挤出窗框、注塑管、非食品用瓶、毛衣纤维、嵌接的袜子等。PVC 回收的问题包括许多废 PVC 制品收集量低, 制品成分复杂, PVC 热稳定性较差, 而且常含 PET 杂质。

第 7 章主要讨论 PS, 主要是发泡 PS (EPS) 的回收。回收 EPS, 由于其体积密度低 ($15\sim 50\text{kg/m}^3$), 从而面临许多挑战。EPS 质轻, 在作为一个优势的同时也意味着在任何给定地点的条件下可用回收量相当有限。由于运费高、供料有限, PS 回收一直没有普遍展开。由于原料 PS 与回收 PS 价格差别很小, 这种情况至今也没有太大改善。废旧 PS 主要源自制造业、工业和商业操作中, 这样, 大量 PS 泡沫被弃置于固定位置才使得回收变得经济可行。掩埋式处理 EPS 的高额费用 ($500\sim 2500$ 美元/t) 是促进 EPS 回收的一个主要力量。尺寸减小的 EPS 制品有土壤调节剂 (防止挤压, 便于排水)、堆肥助剂 (通过促进通气增加微生物活动)、集中排水系统、轻质混凝土 (提高绝缘性和隔音效果)、改性灰浆 (比普通灰浆难开裂)、绝热建筑、鸡蛋盒、衣架、包装用泡沫垫、可溶性的聚合物。

尼龙地毯的回收在第 8 章讨论。世界上 $30\%\sim 40\%$ 的尼龙用地毯上。尽管地毯在城市固体废弃物中质量仅为 1% (体积为 2%), 但它确实是一种非常宝贵的回收资源。回收脏地毯有许多技术挑战, 除了尼龙基体, PP 底、黏着的乳胶、脏物和添加剂 (如燃料、颜料、抗静电剂、光亮剂) 等都要从尼龙中分离出去。可以分离除去这些杂质, 可在循环中用各种化学方法回收尼龙 6, 如酸解、水解、氨解或在真空中催化降解, 这可使聚合物降解为单体——己内酰胺。回收得到的己内酰胺可用来生产新地毯的尼龙 6 纤维。

第 9 章讲述热塑性工程塑料的回收, 如 PC、PBT、ABS 及共混物/合金 (PC-ABS 和 PC-PBT)。由于工程聚合物主要用于耐用制品, 所以寿命一般在 $5\sim 10$ 年, 之后才会遇到处理问题, 这样就使它们的回收比通用塑料落后。典型的工程树脂回收来源有电脑外壳、家用电器外壳、连接器、复印机外壳、汽车仪表盘和格窗、压缩盘、尼龙纤维碎片、PC 水杯等。回收工程聚合物可制得的制品有办公设备外壳、汽车轮罩和水箱、仪表盘、车灯反射镜体等。与通用塑料相比, 工程塑料回收在经济上更有吸引力, 因为回收工程塑料性能要比一般通用塑料的原材料还好, 工程塑料如 PC 和聚缩醛类的价值是常用于包装制品的通用聚合物的 4 倍。计算机外壳是工程塑料回收的主要来源, 因为计算机行业更新速度快, 现有计算机使用一个很短的时间可能就过时了。许多计算机生产商回收旧电脑, 在新产品中混入回收料, 大多工程塑料可通过加入适当添加剂重新配合和加强, 然后采用机械回收。但是, 缩聚醛最好通过酸解来化

学回收单体，许多工程塑料在制品中被染色，如电脑壳、控制壳、电器设备外壳、仪器基架等。除去这种外层的技术也有论述（如水解、高温处理、机械腐蚀、低温研磨、干压等）。

第 10 章讲述回收聚氨酯的技术。聚氨酯代表了一大类从线型到高度交联结构的聚合物，它们可满足从坐垫到汽车保险杠各种制品要求。作为热固性聚合物，不降解是无法用挤出工艺来熔融再处理的。聚氨酯的主要来源是柔韧的泡沫制品和汽车配件。机械回收聚氨酯用再键合和再粉碎技术已建立起来，PU 回收最简单的办法是切细回收泡沫或碎片，用 PU 黏合剂处理压缩或化学键合的泡沫体。回收 PU 被割缝去皮，用来生产地毯底层、家具的抗冲垫层或健身房用垫子。从废旧制冷器回收的固体聚氨酯泡沫甚至可用于新制冷器的真空绝缘板。许多先进的化学回收方法（如水解、氨解、糖解）可将 PU 降解成多元醇，重新用来生产 PU。

纤维增强复合材料如片状注塑化合物的板材是热固性的，高填充的 170% 的无机填料仍可用从可控粉碎到低温降解的各种办法回收（见第 11 章）。SMC 物质广泛应用于运输舱、通风橱、门、卡车或公交车嵌架、船壳、化学物质容器等。因为质轻、耐腐蚀，而且 SMC 嵌架可一步模压完成，这相当于现在汽车工业中使用的钢铁贴合技术，所以它们在汽车工业中的应用已在增加。最简单的回收方法是 SMC 切细，造粒成小纤维，然后在新 SMC 产品中用作填料。但是，为了使回收组分的复合材料价值高一些，应使回收物料尽可能接近它们的原始形状。先进的 SMC 研磨工艺可最大限度地保持纤维长度，使回收物料成为一种很好的增强剂。这种回收工艺可从碎 SMC 中生产出可控制长度的纤维回收品。例如，德国 ERCOM 生产的 3 种粉料和 3 种纤维都可用于新 SMC、模塑化合物或其他制品，这种回收组分可用于 Audi、VW、Mercedes 轿车和卡车，电话亭，宇航服等。Chrysler 在一些制品中用回收 SMC 纤维代替一半玻璃纤维。SMC 碎片可在可控制无机残留组分（主要是玻璃纤维和碳酸钙）时用热降解来回收。无机残留组分可用在新 SMC 中作为填料物质的替代品，甚至在中性或氧化条件下的热降解；无机组分还可作为增强剂。热降解的另一个好处是不但可分出再用组分，还可利用 SMC 的树脂所含的能量来熔融这一过程。当处理含杂质的 SMC 或不同组分混合的 SMC 时，焚烧回收能量是首选。在流化床燃烧厂中，最好将 SMC 与煤炭一起在煤层燃烧。这不但可通过煤炭来供应能量，而且 SMC 中的碳酸钙洗涤了在煤炭燃烧时放出的硫化物，因而导致了低散发性。

第 12 章讲述橡胶轮胎的回收。由于轮胎是织物纤维和钢丝增强的各种橡胶交联键的复合材料，所以轮胎的回收是一个挑战性课题。此外，轮胎的结

构、弹性及体积密度低，这都造成了它们运输及减小尺寸的困难。直到最近，大量废旧轮胎堆积形成了传播病菌的蚊子和老鼠的繁殖基地，这种堆积场也会引发火灾，造成环境污染和地面污染。现在已有许多橡胶回收的成功例子。轮胎可磨成橡胶屑，用于大量橡胶产品，如运动跑道、操场路面、救生设备的衬里及沥青的硬化剂。这些碎屑还可通过表面改性用于高价制品，如 Reebok 鞋套（含量可达 50%）。Michelin 已作出含 10% 回收胶粉的轮胎，在 2000 年用于 Ford 汽车。而且，碎橡胶热量比煤炭高 30%，所以可代替煤炭烧制水泥，这是碎轮胎的一个很有吸引力的应用，因为产生的高热量可使水泥有更好的性能，而且由于它成了溶渣，不用再处理固体废弃物。

原料（或第三级）回收可克服机械回收的许多缺陷（如杂质或性质下降）。塑料的三级回收技术通过溶解来回收处理机械回收极限之后仍残留的废旧塑料组分，或者处理杂质含量高或组分复杂、分离费用高的混合材料。原料回收将废塑料变成石油原料，可用作生产石油化学物质或塑料，通常不会导致性能恶化，而且对其使用性能没有任何限制。原料的热回收是利用高温打断聚合物骨架的化学键，这种分解在没有空气的情况下进行时称为高温降解或热裂解，在氢气氛围中进行时称为氢化，在可控量的氧气存在时称为气化。依据变化路线的不同，最终产品组成和质量也不同。一些回收工艺可在现有厂房中进行（如氢化），而其他的则要采用新技术和新厂房（如高温降解）。第 13 章讲述了一些成熟的技术，如 BASF 高温，BF-university of Hamburg Fluidized Bed 高温降解、VEBA 氢化工艺及热选择性气化降解。这些工艺中遇到的问题也有讨论，如物理分离无机杂质（如脏颗粒、土、填料）和化学分离杂质原子（如 Cl、O、N）。

焚烧废旧塑料回收能量（也称 quarternary 回收）在第 14 章讲述。废旧塑料含有大量可通过各种燃烧途径回收的能量。实际上，大多数情况下，这些塑料的生热量相当于或高于煤炭，而且塑料燃烧没有灰，硫化物也很少。燃烧回收能量非常适用于混合和含杂质的废旧塑料。可通过各种方法进行废旧塑料的能量回收，如与各种固体废物一起燃烧、单独燃烧、与石油一起燃烧或作为水泥溶渣的燃料（作煤炭或焦炭的替代品）。对小塑料包装件如膜、小袋子、酸奶杯、泡沫盘等，用机械回收既不经济也不环保，最好用作燃料进行能量回收。但是，燃烧废塑料会遭到公众反对并且遭受指责，使得运至燃烧地点费用很高。而且，不充分燃烧会使一些物质未燃，还会产生存在于灰烬里的有毒物质及一些有毒气体。第 14 章对燃烧废旧塑料进行了完整的讨论。

混合塑料废物的一个有意义应用是生产塑料材料（第 15 章）。塑料材料是混合塑料的最好应用如“tailings”，它是瓶子分离中的残留物。塑料材料一般

挤成厚板、杆、条板、舌槽板，它们的优点是没有纹理结构，所以质地均匀性比木材好，因而不易开裂或破碎。塑料材料可用于长间接接触受破坏的环境（如木材会缩短寿命的强酸性环境），它不受白蚁攻击，在潮湿环境或用于海水用品不腐烂，无需加有毒化学物质来防止藤蔓生长，自身可防破坏。塑料材料有许多公园娱乐用途，如人行道、海水建筑、停车场、码头桩等。尽管塑料材料比天然木材产品贵，但仍有许多竞争优势，因此在灶壁器具方面赋予了许多优势。塑料材料也有许多局限，如比木材软 5~6 倍，因此不提倡用作主要结构，如支撑柱梁或地板托梁及钉子和其他长时间会从木材中挤出的紧固件，而且长时间受热胀冷缩会导致其连接变松。

作者简介

约翰·沙伊斯是在聚合物回收、降解及分析等领域有深入研究的专家。他曾参与用回收聚合物制造许多回收聚合物产品，如用回收 PE、橡胶轮胎碎屑、PET 制造移动垃圾箱、杂货袋、橡胶软管、塑料板材和食品包装。其研究的重点领域是回收聚合物的杂质问题及提高回收塑料的质量和性能。沙伊斯博士著有 50 余篇科技论文，其中包括 8 篇百科全书章节。他是美国塑料工程师协会塑料回收部的成员，也是《聚合物的降解与稳定》杂志的编委。同时，他也是美国化学会、材料协会和澳大利亚皇家化学会的成员。

致谢

我非常感谢我的妻子为本书的调研、手稿准备以及索引所付出的辛勤劳动。我也感谢 Ron 和 Kay 对本书进行了认真仔细的校对。

我特别感激众多的个人和公司为本书提供了大量的信息。我已在相应章节的后面予以致谢。

我也想感谢 Elizabeth Holloway 女士、Monica Twine 女士和 Wiley 编辑部，正是他们的帮助、合作及认真才得以保证本书以最高的质量出现在 Wiley 聚合物科学丛书中。

目 录

第 1 章 分类与分离技术	1
1.1 引言	1
1.2 手工分离	1
1.3 密度分离法	2
1.3.1 浮降法（湿分离）	2
1.3.2 干法分离	3
1.3.3 离心分离	4
1.3.4 准流体分离	6
1.3.5 选择性溶剂吸收浮降法	8
1.3.6 流水浮降法	9
1.3.7 浮沫法	9
1.4 光分离	11
1.4.1 颜色分离器的操作	11
1.4.2 商业化模式	13
1.5 高级分光镜分离	15
1.5.1 中红外分光法（MIR）	15
1.5.2 近红外分光法（NIR）	17
1.5.3 声光感应	26
1.5.4 拉曼分光法	26
1.5.5 激光发射光谱分析分离法	26
1.5.6 等离子体发射光谱法	26
1.5.7 各种分光技术	30
1.6 X 射线荧光分离 PVC	31
1.6.1 XRF 分离 PVC 瓶	31
1.6.2 XRF PVC 絮片分离系统	33
1.7 静电分离技术	34
1.7.1 摩擦电笔	34
1.7.2 用摩擦静电进行连续分离	36
1.8 熔点（软化点）分离	40

1.9 选择溶解分离	41
1.10 通过减小尺寸分离	43
1.11 通过涡流分离器分离金属杂质	43
致谢	43
参考文献	44

第 2 章 减小回收塑料尺寸	47
2.1 引言	47
2.2 切割工艺	47
2.2.1 撕碎机	47
2.2.2 旋转研磨机	51
2.2.3 旋转切割机（造粒机）	51
2.2.4 切片机	55
2.2.5 螺杆切割机	55
2.2.6 利用减小尺寸法进行片层分离	55
2.3 稠化工艺	56
2.3.1 凝结	56
2.3.2 减容/压实薄膜	64
2.3.3 辊筒压实	66
2.4 磨粉工艺	66
2.4.1 简介	66
2.4.2 盘式粉碎机	67
2.4.3 旋转叶轮粉碎	69
2.4.4 锤研磨	70
2.4.5 低温粉碎	70
2.4.6 固态剪切挤出	70
2.5 化学法减小尺寸	72
致谢	73
参考文献	73

第 3 章 回收聚合物的熔融过滤	74
3.1 引言	74
3.2 不连续筛子更换器	75
3.3 连续流筛子更换器	76
3.3.1 连续式过滤带状筛子更换器	76
3.3.2 回流熔体过滤体系	76