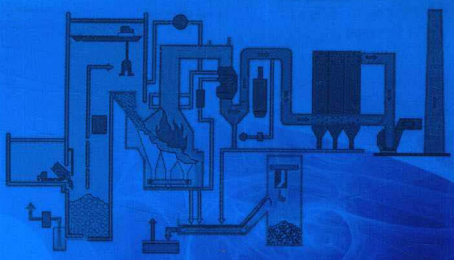
# 固体废物处理与资源化实验教程

主编　张鸿郭　庞 博　陈镇新



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 固体废物处理与资源化实验教程

主　编　张鸿郭　庞　博　陈镇新
副主编　王筱虹　夏建荣

学院图书馆
藏书专用章

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书根据当前高等教育教学改革的发展趋势和对学生创新能力培养的要求，培养具有沟通能力、合作能力、资源回收利用专业知识技能、终身学习能力以及健全的世界观和责任感，能满足资源节约型社会需求的环境工程专业技术人才。本书共设置了六个部分的内容，第一部分是实验操作基础，其中包括实验教学基本要求和实验过程中常用的一些操作和仪器设备；第二部分是实验设计与数据处理，包括实验设计简介、目的和常用的实验设计方法等；第三部分是误差分析与实验数据处理；第四部分是固体废物基础性实验，包括固体废物样本的采集与保存，固体废物物理化学等性质的测定实验；第五部分是固体废物专业实验，包括固体废物破碎、分选和固化等专业实验；第六部分是固体废物综合设计性实验，包括生物质热解和污泥制备陶粒等实验。本书力求从实验教学角度，促进工程专业技术人才的培养，同时使实验教学手段与当前科技发展趋势保持一致。

**版权专有　侵权必究**

**图书在版编目（CIP）数据**

固体废物处理与资源化实验教程 / 张鸿郭，庞博，陈镇新主编. —北京：北京理工大学出版社，2018.1
ISBN 978-7-5682-5224-9

Ⅰ. ①固…　Ⅱ. ①张…　②庞…　③陈…　Ⅲ. ①固体废物处理–高等学校–教材　Ⅳ. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 007633 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编 / 100081
电　　话 / （010）68914775（总编室）
　　（010）82562903（教材售后服务热线）
　　（010）68948351（其他图书服务热线）
网　　址 / http://www.bitpress.com.cn
经　　销 / 全国各地新华书店
印　　刷 / 三河市华骏印务包装有限公司
开　　本 / 710 毫米×1000 毫米　1/16
印　　张 / 12.5
字　　数 / 176 千字
版　　次 / 2018 年 1 月第 1 版　2018 年 1 月第 1 次印刷
定　　价 / 38.00 元

责任编辑 / 杜春英
文案编辑 / 郭贵娟
责任校对 / 周瑞红
责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

# 编 委 会

**主　编**　张鸿郭　庞　博　陈镇新

**副主编**　王筱虹　夏建荣

**编　委**（以拼音字母先后为序）

常向阳　陈镇新　龚　剑　黄晓武

孔令军　庞　博　彭　燕　苏敏华

唐进峰　王伟彤　王筱虹　夏建荣

肖唐付　张鸿郭

# 前 言

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、半固体废弃物质，是伴随着人类社会存在和发展的必然产物，固体废物的概念随时、空的变迁而具有相对性。一方面，固体废物作为各种污染物的最终形态，具有种类繁多，成分复杂，极易进入大气、水体和土壤中而参与物质循环的特点，对于生态环境和人类健康具有潜在的、长期的危害。但另一方面，固体废物中又蕴含着巨大的资源，人类可从废弃物中开发所需的各类生产资源。我国面临着“资源约束趋紧和环境污染严重”的现状，节约资源和保护环境已是我国的基本国策，废弃物资源再生利用已成为我国缓解资源约束的必要途径和减轻环境污染的重要措施。

固体废物的处理技术主要包括破碎、分选、生物处理、焚烧、热解、危险废物固定化等，以研究固体废物的处理及资源化利用为主要内容的固体废物处理与处置技术是环境类专业的必修课程，而实验教学是固体废物处理与处置技术教学的重要组成部分。

《固体废物处理与资源化实验教程》作为固体废物处理与处置技术的配套实验教程，是根据当前高等教育教学改革的发展趋势和对学生创新能力培养的要求，培养具有沟通能力、合作能力、资源回收利用专业知识技能、终身学习能力以及健全的世界观和责任感，能满足资源节约型社会需求的环境工程专业的技术人才。根据当前高等教育教学改革的发展趋势和对学生创新能力培养的要求，本教程力求做到简单易行，但又不失实验项目实用性、科学性和综合设计性的特点，编写了六个部分的内容，包括实验操作基础、实验设计与数据处理、误差分析与实验数据处理、固体废物基础性实验、固体废物专业实验和固

需要全本请访问 www.ertongbook.com

体废物综合设计性实验。

本书可作为高等院校环境工程专业、环境科学专业以及其他相关专业的实验教学用书，也可供科研、设计及管理人员参考。各校可根据实际情况选用其中的实验项目进行教学与实践。

由于编者水平和时间所限，有疏漏之处，恳请读者批评指正。

编　者

2017 年 09 月于广州大学

# 目 录


第一部分 实验操作基础 …… 1

1.1 实验教学基本要求 …… 1

1.2 重量分析基本操作 …… 3

1.2.1 溶解 …… 3

1.2.2 沉淀 …… 3

1.2.3 过滤和洗涤 …… 4

1.2.4 干燥和灼烧 …… 11

1.3 酸度计及其使用方法 …… 14

1.4 离心机及其使用方法 …… 17

1.4.1 离心机操作的具体规程 …… 17

1.4.2 离心机安全注意事项 …… 18

1.5 原子吸收分光光度计及其使用方法 …… 18

1.5.1 原子吸收分光光度法原理 …… 19

1.5.2 原子吸收分光光度计测定操作步骤 …… 20

第二部分 实验设计与数据处理 …… 22

2.1 实验设计简介 …… 22

2.1.1 实验设计目的 …… 22

2.1.2 实验设计的基本概念 …… 23

2.1.3 实验设计的应用 …… 24

2.1.4 实验设计的步骤 …… 25

2.2 单因素实验设计 …… 26

2.2.1 均分法……26
2.2.2 对分法……27
2.2.3 0.618 法……27
2.2.4 分数法……29
2.3 双因素实验设计……31
2.3.1 从好点出发法……32
2.3.2 并行线法……32
2.4 正交实验设计……33
2.4.1 正交表与正交设计……34
2.4.2 正交实验分析举例……40
2.5 响应曲面法实验设计……44
**第三部分 误差分析与实验数据处理**……49
3.1 误差的基本概念与分析……50
3.1.1 真值与平均值……50
3.1.2 误差与误差的分类……52
3.1.3 误差的表示方法……53
3.1.4 精密度和准确度……55
3.1.5 误差分析……56
3.2 实验数据整理……58
3.2.1 有效数字与运算……58
3.2.2 可疑观测值的取舍……59
3.3 实验数据的方差分析……61
3.3.1 方差分析的用途……61
3.3.2 等重复实验的方差分析……61
3.3.3 不等重复实验的方差分析……63
3.4 实验数据的表示法……64
3.4.1 列表表示法……65
3.4.2 图形表示法……65

3.4.3 方程表示法 …… 67
第四部分 固体废物基础性实验 …… 75
4.1 固体废物的采样和制样 …… 75
4.1.1 固体废物的采样 …… 75
4.1.2 固体废物的制样 …… 78
4.2 固体废物物理化学性质测定实验 …… 80
4.2.1 固体废物水分含量的测定 …… 80
4.2.2 固体废物挥发分、灰分、可燃分的测定 …… 81
4.2.3 固体废物样品吸水率、抗压强度和颗粒容重的测定实验 …… 83
4.2.4 固体废物样品氮含量分析 …… 86
4.2.5 固体废物样品磷含量分析 …… 88
4.2.6 固体废物样品钾含量分析 …… 91
4.2.7 固体废物中的重金属（铅、镉）含量分析 …… 93
4.2.8 固体废物中的重金属（铜、锌）含量分析 …… 95
4.2.9 固体废物中的重金属（汞）含量分析 …… 97
4.2.10 固体废物中砷含量分析 …… 100
4.2.11 固体废物热值测定 …… 103
第五部分 固体废物专业实验 …… 109
5.1 固体废物破碎实验 …… 109
5.2 固体废物压实实验 …… 123
5.3 生活垃圾风选实验 …… 129
5.4 固体废物中污泥比阻实验 …… 132
5.5 固体废物的粒度分析实验 …… 137
5.6 危险废物重金属含量及浸出毒性测定实验 …… 139
5.7 固体废物焚烧与热解实验 …… 141
5.8 有害固体废物的固化处理实验 …… 144
5.9 BET 容量法测定固体物质的比表面 …… 146

第六部分 固体废物综合设计性实验 …… 157
6.1 城市生活垃圾的分类实验 …… 157
6.2 参观城市垃圾的收运、压实、中转、堆肥及资源化过程 …… 158
6.3 生物质热解实验 …… 158
6.4 固体废物特性分离实验 …… 160
6.5 污泥制备陶粒 …… 162
6.6 有机垃圾生物处理模拟实验 …… 165
6.7 餐厨垃圾厌氧消化实验 …… 176
6.8 垃圾填埋场稳定化过程模拟 …… 181
6.9 焚烧炉灰处理方案设计 …… 185
参考文献 …… 186

# 第一部分　实验操作基础

## 1.1　实验教学基本要求

1. 课前预习

为完成好每个实验，学生在课前必须认真阅读实验教材，清楚地了解实验项目的目的和要求、实验原理和实验内容，写出简明的预习提纲。预习提纲包括：

（1）实验目的和主要内容。

（2）需测试项目的测试方法。

（3）实验注意事项。

（4）准备好实验记录表格。

2. 实验设计

实验设计是实验研究的重要环节，是获得满足要求的实验结果的基本保障。在实验教学中，宜将此环节的训练放在部分实验项目完成后进行，以达到使学生掌握实验设计方法的目的。

3. 实验操作

学生在实验前应仔细检查实验设备、仪器仪表是否完整齐全；实验时要严

需要全本请访问 www.ertongbook.com

格按照操作规程认真操作，仔细观察实验现象，精心测定实验数据，并详细填写实验记录；实验结束后，要将实验设备和仪器仪表恢复原状，将周围环境整理干净。学生应注意培养自己严谨的科学态度，养成良好的学习和工作习惯。

4. 实验数据处理

通过实验取得大量数据以后，必须对数据进行科学的整理和分析，去伪存真、去粗取精，以得到正确可靠的结论。

5. 编写实验报告

编写实验报告是实验教学必不可少的环节，这一环节的训练可为学生今后写好科学论文或科研报告打下基础。实验报告包括下述内容：

（1）实验目的。

（2）实验原理。

（3）实验装置和方法。

（4）实验数据和数据的整理结果。

（5）实验结果讨论。

对于设计性、研究性等综合开放性实验，要求学生通过查阅有关书籍、文献资料，了解和掌握与课题有关的国内外技术状况、发展动态，并在此基础上，根据实验课题要求和实验室条件，提出具体的实验方案，包括实验工艺技术路线、实验条件要求、实验计划进度等。综合开放性实验研究报告的内容应包括：

（1）课题的调研。

（2）实验方案的设计。

（3）实验过程的描述。

（4）实验结果的分析讨论。

（5）实验结论。

（6）参考文献等。

## 1.2　重量分析基本操作

重量分析是通过称量被测组分的质量来确定被测组分百分含量的分析方法。一般是先将被测组分从试样中分离出来，并转化为一定的称量形式后进行称量，再由称得的物质的质量计算被测成分的含量。重量分析的基本操作包括样品的溶解、沉淀、过滤、洗涤、干燥和灼烧等步骤。

### 1.2.1　溶解

将样品称于烧杯中，沿杯壁加溶剂，盖上表面，轻轻摇动，必要时可加热促其溶解，但温度不可太高，以防溶液溅失。

如果样品需要用酸溶解且有气体放出，则应先在样品中加少量水调成糊状，盖上表面，从烧杯嘴处注入溶剂，待作用完以后，用洗瓶冲洗表面凸面并使之流入烧杯内。

### 1.2.2　沉淀

重量分析对沉淀的要求是尽可能地完全和纯净。为了达到这个要求，应该按照沉淀的类型选择不同的沉淀条件，如沉淀时溶液的体积、温度，加入沉淀剂的浓度、数量及加入速度、搅拌速度和放置时间等。因此，必须按照规定的操作要求进行。

一般进行沉淀操作时，左手拿滴管滴加沉淀剂，右手持玻璃棒不断搅动溶液，搅动时玻璃棒不要碰烧杯壁或烧杯底，以免划损烧杯。若溶液需要加热，则一般在水浴或电热板上进行。样品沉淀后应检查沉淀是否完全，检查的方法是：待样品沉淀下沉后，在上层澄清液中，沿杯壁加 1 滴沉淀剂，观察滴落处是否出现浑浊。若无浑浊出现，则表明已沉淀完全；如出现浑浊，则需再补加

沉淀剂，直至再次检查时上层澄清液中不再出现浑浊为止，然后盖上表面。

### 1.2.3 过滤和洗涤

1. 用滤纸过滤和洗涤

（1）滤纸的选择。

滤纸分定性滤纸和定量滤纸两种，重量分析中常用定量滤纸（或称无灰滤纸）进行过滤。定量滤纸灼烧后灰分极少，其质量可忽略不计，如果灰分较重，则应扣除空白。定量滤纸一般为圆形，按直径分为 11 cm、9 cm、7 cm 等几种；按滤纸孔隙的大小分为快速、中速和慢速 3 种。根据沉淀的性质选择合适的滤纸，如 $BaSO_4$、$CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$ 等细晶形沉淀，应选用慢速滤纸过滤；$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ 为胶状沉淀，应选用快速滤纸过滤；$MgNH_4PO_4$ 等粗晶形沉淀，应选用中速滤纸过滤。根据沉淀量的多少，选择不同大小的滤纸。表 1–1 是常用国产定量滤纸的灰分质量，表 1–2 是国产定量滤纸的类型。

**表 1–1 常用国产定量滤纸的灰分质量**

| 直径/cm | 7 | 9 | 11 | 12.5 |
|---|---|---|---|---|
| 灰分/（g·张$^{-1}$） | $3.5\times10^{-5}$ | $5.5\times10^{-5}$ | $8.5\times10^{-5}$ | $1.0\times10^{-4}$ |

**表 1–2 国产定量滤纸的类型**

| 类型 | 盒上色带标志 | 滤速/（s·（100 mL）$^{-1}$） | 适用范围 |
|---|---|---|---|
| 快速 | 白色 | 60～100 | 无定形沉淀，如 $Fe(OH)_3$ |
| 中速 | 蓝色 | 100～160 | 中等粒度沉淀，如 $MgNH_4PO_4$ |
| 慢速 | 红色 | 160～200 | 细粒状沉淀，如 $CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$ |

（2）漏斗的选择。

用于重量分析的漏斗应该是长颈漏斗，颈长为 15～20 cm，漏斗锥体角应为 60°，颈的直径要小些，一般为$\phi$3～5 mm，以便保留颈内的水柱，其出口

处磨成 45°，如图 1–1 所示。漏斗在使用前应洗净。

（3）滤纸的折叠。

折叠滤纸的手要洗净擦干，滤纸的折叠如图 1–2 所示。

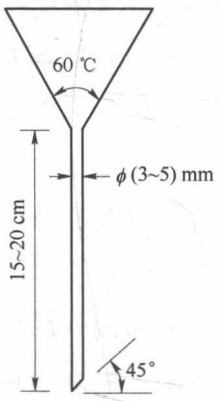



图 1–1　漏斗

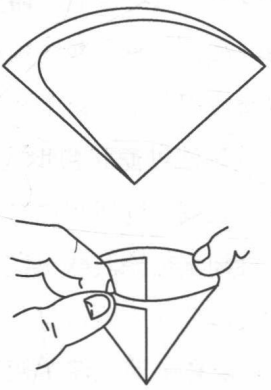


图 1–2　滤纸的折叠

先把滤纸对折并按紧一半，然后再对折但不要按紧，把折成圆锥形的滤纸放入漏斗中。滤纸的大小应低于漏斗边缘 0.5～1 cm，若高出漏斗边缘，则可剪去一圈。观察折好的滤纸是否能与漏斗内壁紧密贴合，若未紧密贴合，则可以适当改变滤纸的折叠角度，直至与漏斗贴紧后把第二次的折边折紧。取出圆锥形滤纸，将半边为三层滤纸的外层折角撕下一块，这样可以使内层滤纸紧密贴在漏斗内壁上，撕下来的那一小块滤纸保留作擦拭烧杯内残留的沉淀用。

（4）做水柱。

滤纸放入漏斗后，用手按紧使之密合，然后用洗瓶加水润湿全部滤纸。用手指轻压滤纸，赶去滤纸与漏斗壁间的气泡，然后加水至滤纸边缘，此时漏斗颈内应全部充满水，形成水柱。若滤纸上的水全部流尽后，漏斗颈内的水柱应仍能保持住，那么此时液体的重力可起抽滤作用，故可加快过滤速度。

若水柱做不成，则可用手指堵住漏斗下口，稍掀起滤纸的一边，用洗瓶向滤纸和漏斗间的空隙内加水，直到漏斗颈及锥体的一部分被水充满，然后边按紧滤纸边慢慢松开下面堵住出口的手指，此时水柱应该形成。如仍不能形成水柱，或水柱不能保持，而漏斗颈又确已洗净，则是因为漏斗颈太大。实践证明，

漏斗颈太大的漏斗是做不出水柱的，此时应更换漏斗。

做好水柱的漏斗应放在漏斗架上，下面用一个洁净的烧杯承接滤液，滤液可用作其他组分的测定。滤液有时是不需要的，但考虑到过滤过程中可能有沉淀渗滤，或滤纸意外破裂，需要重滤，所以要用洗净的烧杯来承接滤液。为了防止滤液外溅，一般将漏斗颈出口斜口长的一侧贴紧烧杯内壁。漏斗位置的高低，以过滤过程中漏斗颈的出口不接触滤液为度。

（5）倾泻法过滤和初步洗涤。

首先要强调，过滤和洗涤一定要一次完成，因此必须事先计划好时间，不能间断，特别是过滤胶状沉淀。

过滤一般分 3 个阶段进行：第一阶段采用倾泻法把尽可能多的清液先过滤过去，并将烧杯中的沉淀做初步洗涤；第二阶段把沉淀转移到漏斗上；第三阶段清洗烧杯和洗涤漏斗上的沉淀。

过滤时，为了避免沉淀堵塞滤纸的空隙，影响过滤速度，一般多采用倾泻法过滤，即倾斜静置烧杯，待沉淀下降后，先将上层清液倾入漏斗中，而不是一开始过滤就将沉淀和溶液搅混后过滤。

倾泻法过滤的操作如图 1–3 所示，将烧杯移到漏斗上方，轻轻提起玻璃棒；将玻璃棒下端轻碰一下烧杯壁使悬挂的液滴流回烧杯中；将烧杯嘴与玻璃棒贴紧，玻璃棒直立，下端接近三层滤纸的一边，慢慢倾斜烧杯，使上层清液沿玻

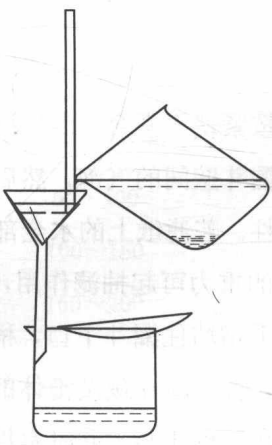


图 1–3 倾泻法过滤

璃棒流入漏斗中，漏斗中的液面不要超过滤纸高度的 2/3，或使液面离滤纸上边缘约 5 mm，以免少量沉淀因毛细管作用越过滤纸上缘而造成损失。

暂停倾注时，应沿玻璃棒将烧杯嘴往上提，逐渐使烧杯直立，等玻璃棒和烧杯由相互垂直变为几乎平行时，将玻璃棒离开烧杯嘴并移入烧杯中。这样才能避免留在玻璃棒端及烧杯嘴上的液体流到烧杯外壁上去。玻璃棒放回原烧杯时，勿将清液搅混，也不要靠在烧杯嘴处，因为烧杯嘴处沾有少量沉淀。如此重复上述操作，直至上层清液倾完为止。当烧杯内的液体较少而不便倾出时，可将玻璃棒稍向左倾斜，使烧杯倾斜角度更大些。

在上层清液倾注完以后，在烧杯中做初步洗涤。选用什么洗涤液洗沉淀，应根据沉淀的类型而定。

① 晶形沉淀：可用冷的稀沉淀剂进行洗涤，因为同离子效应可以减少沉淀的溶解损失。但是如果沉淀剂为不挥发的物质，就不能用作洗涤液，此时可改用蒸馏水或其他合适的溶液洗涤沉淀。

② 无定形沉淀：用热的电解质溶液作洗涤剂，以防止产生胶溶现象，大多采用易挥发的铵盐溶液作洗涤剂。

③ 对于溶解度较大的沉淀，采用沉淀剂加有机溶剂洗涤沉淀，可降低其溶解度。

洗涤时，沿烧杯内壁四周注入少量洗涤液，每次约 20 mL，充分搅拌，静置，待沉淀沉降后，按倾泻法过滤洗涤。如此洗涤沉淀 4～5 次，每次应尽可能地把洗涤液倾倒尽，再加第二份洗涤液。随时检查滤液是否透明、是否含沉淀颗粒，如果出现混浊或沉淀颗粒则应重新过滤，或重做实验。

（6）沉淀的转移。

沉淀用倾泻法洗涤后，在盛有沉淀的烧杯中加入少量洗涤液，搅拌混合，全部倾入漏斗中。如此重复 2～3 次，然后将玻璃棒横放在烧杯口上，玻璃棒下端比烧杯口长出 2～3 cm，左手食指按住玻璃棒，大拇指在前，其余手指在后，拿起烧杯，放在漏斗上方，倾斜烧杯使玻璃棒仍指向三层滤纸的一边，用洗瓶冲洗烧杯壁上附着的最后少量沉淀，使之全部转移到漏斗中，如图 1–4 所示。最后用保存的小块滤纸擦拭玻璃棒，再将滤纸放入烧杯中，用玻璃棒压住

需要全本请访问 www.ertongbook.com