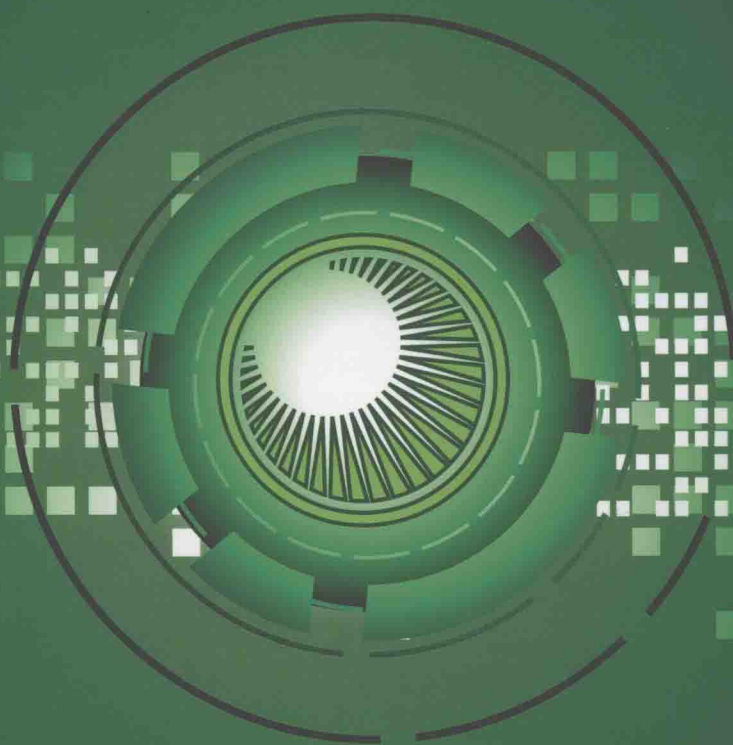


过程设备与工业应用丛书

分离技术、设备 与工业应用

廖传华 江晖 黄诚 著



化学工业出版社

过程设备与工业应用丛书

分离技术、设备 与工业应用

廖传华 江晖 黄诚 著



化学工业出版社

· 北京 ·

《分离技术、设备与工业应用》是“过程设备与工业应用丛书”的一个分册，本书在系统介绍传质分离过程机理的基础上，分别详细介绍了蒸馏和精馏、特殊精馏、吸收、气-液传质设备、液-液萃取、超临界流体萃取、干燥、过滤、膜分离技术、生物分离技术等传质分离过程的工作特性、设计原理、设备、工业应用及评价，并对结晶、吸附、离子交换等其他类型的传质分离过程及传统的过滤过程等进行了简要阐述。

《分离技术、设备与工业应用》不仅适用于石油、化工、生物、制药、食品、医药、环境、机械等专业的高等学校的教师、研究生及高年级本科生阅读，同时对分离科学与技术、分离过程、化学分离工程等相关行业的工程技术人员、研究设计人员也会有所帮助。

图书在版编目 (CIP) 数据

分离技术、设备与工业应用/廖传华，江晖，黄诚
著. —北京：化学工业出版社，2017.9
(过程设备与工业应用丛书)
ISBN 978-7-122-30268-7

I. ①分… II. ①廖…②江…③黄… III. ①分离设
备 IV. ①TQ051.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 173872 号

责任编辑：卢萌萌 仇志刚
责任校对：边 涛

装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 刷：三河市航远印刷有限公司
装 订：三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 25½ 字数 632 千字 2018 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888(传真：010-64519686) 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：148.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

在现代过程工业生产中，分离工程一方面为反应提供符合质量要求的原料；另一方面对反应产物进行分离提纯，得到合格的产品，并且使未反应的物料可以循环利用，对生成的三废进行末端治理。因此，分离工程在提高过程工业生产过程的经济效益和社会效益中起着举足轻重的作用。目前，分离工程已广泛应用于医药、材料、冶金、食品、生化、原子能和环境治理等过程工业。可见，分离工程对于过程工业的技术进步和经济的持续发展起着至关重要的作用。为此，在江苏高校品牌专业建设工程资助项目（PPZY2015A022）的资助下，我们组织策划了这本《分离技术、设备与工业应用》，除理论阐述外，还针对各种分离设备列举了工业应用实例，具有很强的实践性，力求使读者能通过本书的学习，对目前过程工业中涉及的分离设备及其应用特性有一个概括性的了解。

全书共分13章。第1章根据过程工业所用原料和生产产品的特性，提出了对分离过程与设备的要求；第2章介绍了蒸馏和精馏过程；第3章介绍了特殊精馏；第4章介绍了吸收过程；第5章介绍了气-液传质设备及其工业应用；第6章介绍了液-液萃取设备及其工业应用；第7章介绍了超临界流体萃取设备及其应用；第8章介绍了吸附设备及其工业应用；第9章介绍了干燥设备及其工业应用；第10章介绍了过滤设备及其工业应用；第11章介绍了膜分离设备及其工业应用；第12章介绍了结晶设备及其工业应用；第13章介绍了几种生物分离技术。

全书由南京工业大学廖传华、江晖和南京三方化工设备监理有限公司黄诚著，其中第1章~第3章、第5章、第7章、第12章、第13章由廖传华著，第4章、第6章、第9章、第11章由江晖著，第8章、第10章由黄诚著，全书由廖传华统稿。

全书从选题到材料的收集整理、文稿的编写及修订等方面都得到了南京工业大学黄振仁教授的大力支持，在此深表感谢。南京三方化工设备监理有限公司赵清万、许开明、李志强，南京工业大学李政辉对本书的撰写工作提出了大量宝贵的建议，南京朗润机电进出口公司朱海舟提供了大量图片资料，研究生赵忠祥、闫正文、王太东、李洋、刘状、汪威、李亚丽、廖玮、宗建军等在资料收集与文字处理方面提供了大量的帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书的写作与修订工作历时三年，虽经多次审稿、修改，但由于作者水平有限，不妥及疏漏之处在所难免，敬请广大读者不吝赐教。在写作过程中参考了大量的相关资料，但书中没有一一列出，在此谨对原文作者致以衷心的感谢。

著者

2017年8月于南京工业大学

第1章 绪论

- 1.1 分离技术的发展 /001
- 1.2 分离技术的应用 /003
- 1.3 分离过程的分类和特征 /004
- 1.4 分离过程的集成 /006
 - 1.4.1 反应过程与分离过程的耦合 /006
 - 1.4.2 分离过程与分离过程的耦合 /007
 - 1.4.3 过程的集成 /007
- 1.5 分离过程的选择 /008
 - 1.5.1 可行性 /008
 - 1.5.2 分离过程的类型 /009
 - 1.5.3 生产规模 /010
 - 1.5.4 设计的可靠性 /010
 - 1.5.5 分离过程的独立操作性能 /011
- 1.6 分离设备 /012

第2章 蒸馏和精馏

- 2.1 蒸馏的特点与分类 /014
 - 2.1.1 蒸馏的特点 /014
 - 2.1.2 蒸馏的分类 /015
 - 2.1.3 精馏操作流程 /015
- 2.2 简单蒸馏和平衡蒸馏 /016
 - 2.2.1 装置流程 /016
 - 2.2.2 简单蒸馏及平衡蒸馏的原理 /017

- 2.3 双组分精馏 /018
 - 2.3.1 精馏的原理 /018
 - 2.3.2 全塔物料衡算 /020
 - 2.3.3 理论塔板数 /026
 - 2.3.4 塔高与塔径的计算 /029
 - 2.3.5 回流比的影响及选择 /031
 - 2.3.6 间歇精馏 /033
 - 2.3.7 精馏装置的热量衡算 /036
- 2.4 多组分精馏 /037
 - 2.4.1 多组分精馏的特点及流程 /037
 - 2.4.2 多组分精馏过程的计算 /039
 - 2.4.3 复杂精馏简介 /046
- 2.5 蒸馏与精馏操作 /049
 - 2.5.1 双组分精馏的操作型计算 /049
 - 2.5.2 影响精馏操作的主要因素 /049
 - 2.5.3 间歇精馏的新型操作方式 /052
- 参考文献 /055

第3章 特殊精馏

- 3.1 非理想溶液的性质 /058
 - 3.1.1 非理想物系的恒沸物 /058
 - 3.1.2 三组分系统的相图 /060
- 3.2 恒沸精馏 /060
 - 3.2.1 恒沸精馏的原理 /061
 - 3.2.2 夹带剂的选择 /061
 - 3.2.3 恒沸精馏流程 /062
 - 3.2.4 恒沸精馏过程的计算 /063
- 3.3 萃取精馏 /064
 - 3.3.1 萃取精馏的基本原理 /064
 - 3.3.2 萃取剂的选择 /065
 - 3.3.3 萃取精馏流程 /066
 - 3.3.4 萃取精馏过程的计算 /066
 - 3.3.5 萃取精馏的注意事项 /068
- 3.4 其他特殊精馏操作及应用 /069
 - 3.4.1 盐效应精馏及应用 /069
 - 3.4.2 分子蒸馏及应用 /070

- 3.4.3 几种特殊精馏方法的比较 /072
- 3.5 精馏操作的节能优化技术 /073
 - 3.5.1 精馏过程的热力学不可逆性 /073
 - 3.5.2 多效精馏 /074
 - 3.5.3 低温精馏的热源 /075
 - 3.5.4 设置中间冷凝器和中间再沸器 /078
- 参考文献 /078

第4章 吸收

- 4.1 吸收过程 /080
 - 4.1.1 吸收剂的选择 /081
 - 4.1.2 物理吸收和化学吸收 /081
 - 4.1.3 气体吸收的工业应用 /082
 - 4.1.4 吸收操作的经济性 /082
 - 4.1.5 吸收与蒸馏操作的区别 /083
 - 4.1.6 吸收塔设备类型 /083
- 4.2 吸收平衡及吸收推动力 /083
 - 4.2.1 吸收平衡 /083
 - 4.2.2 相平衡与吸收过程的关系 /084
- 4.3 吸收传质机理 /084
 - 4.3.1 质量传递机理 /085
 - 4.3.2 对流传质理论 /086
- 4.4 传质速率方程 /086
 - 4.4.1 对流传质速率方程 /086
 - 4.4.2 传质阻力的控制 /089
- 4.5 吸收(解吸)过程的计算 /090
 - 4.5.1 物料衡算与操作线方程 /091
 - 4.5.2 吸收剂用量的确定 /092
 - 4.5.3 解吸 /095
 - 4.5.4 吸收塔径的计算 /095
 - 4.5.5 吸收塔高的计算 /096
- 4.6 其他吸收工艺 /099
 - 4.6.1 多组分吸收 /099
 - 4.6.2 化学吸收 /100
 - 4.6.3 高组成气体的吸收 /100
- 4.7 吸收操作实例分析 /101

- 4.7.1 逆流与并流操作的比较 /101
- 4.7.2 吸收剂用量对吸收过程的影响 /103
- 4.7.3 温度等对吸收过程的影响 /107
- 参考文献 /108

第5章

气-液传质设备

- 5.1 板式塔 /110
 - 5.1.1 板式塔的结构 /110
 - 5.1.2 塔板的类型及性能 /111
 - 5.1.3 板式塔的操作特性 /115
 - 5.1.4 板式塔的设计 /120
- 5.2 填料塔 /131
 - 5.2.1 填料塔的结构 /131
 - 5.2.2 填料的类型及性能 /132
 - 5.2.3 填料塔的操作性能 /137
 - 5.2.4 填料塔的内件 /139
 - 5.2.5 填料塔的设计 /142
- 5.3 气-液传质设备应用分析 /146
 - 5.3.1 处理能力 /146
 - 5.3.2 效率及其影响因素 /147
 - 5.3.3 气-液传质设备的发展 /148
- 参考文献 /149

第6章

液-液萃取

- 6.1 液-液萃取过程的选择 /151
 - 6.1.1 液-液萃取的选择 /151
 - 6.1.2 液-液萃取操作的特点 /152
- 6.2 液-液萃取的相平衡与物料衡算 /152
 - 6.2.1 三角形相图 /153
 - 6.2.2 三角形相图中的相平衡关系 /153
 - 6.2.3 三角形相图中的杠杆定律 /155
- 6.3 液-液萃取的操作流程和计算 /156
 - 6.3.1 液-液萃取的操作流程 /156
 - 6.3.2 单级萃取流程和计算 /158

- 6.3.3 多级错流萃取流程和计算 /159
- 6.3.4 多级逆流萃取流程和计算 /161
- 6.4 液-液萃取过程萃取剂的选择 /164
- 6.5 液-液萃取设备 /166
 - 6.5.1 萃取设备的分类 /166
 - 6.5.2 液-液萃取设备的设计 /174
- 参考文献 /178

第7章 超临界流体萃取

- 7.1 超临界流体 /180
 - 7.1.1 超临界流体的特性 /180
 - 7.1.2 超临界流体的传递性质 /181
 - 7.1.3 超临界流体的选择 /182
- 7.2 超临界二氧化碳的性质 /183
 - 7.2.1 超临界二氧化碳的性质 /184
 - 7.2.2 超临界二氧化碳溶解性能的影响因素 /185
- 7.3 超临界二氧化碳萃取 /186
 - 7.3.1 超临界二氧化碳萃取工艺 /186
 - 7.3.2 超临界二氧化碳萃取的工艺流程 /188
 - 7.3.3 固态物料超临界二氧化碳萃取的工艺过程 /191
 - 7.3.4 超临界二氧化碳萃取与其他分离方法的耦合 /195
 - 7.3.5 液态物料超临界二氧化碳流体萃取的工艺过程 /200
- 7.4 超临界二氧化碳萃取的工业化应用 /204
- 7.5 超临界萃取技术的优点及存在的问题 /208
 - 7.5.1 超临界萃取技术的优点 /208
 - 7.5.2 超临界萃取技术存在的问题 /209
- 参考文献 /209

第8章 吸附

- 8.1 吸附现象与吸附剂 /212
 - 8.1.1 吸附现象 /212
 - 8.1.2 吸附的分类 /212
- 8.2 吸附平衡和吸附速率 /214
 - 8.2.1 吸附平衡 /214

- 8.2.2 吸附速率 /214
- 8.2.3 吸附速率的测定 /216
- 8.3 吸附容量与吸附等温线 /216
 - 8.3.1 吸附容量 /216
 - 8.3.2 吸附等温线 /217
 - 8.3.3 吸附的影响因素 /220
 - 8.3.4 吸附剂的选择 /222
 - 8.3.5 吸附剂的再生 /223
- 8.4 吸附工艺与设计 /226
 - 8.4.1 间歇吸附 /226
 - 8.4.2 固定床吸附 /228
 - 8.4.3 移动床吸附 /231
 - 8.4.4 流化床吸附 /232
 - 8.4.5 液相移动床吸附 /233
 - 8.4.6 参数泵 /234
- 参考文献 /235

第9章 干燥

- 9.1 湿空气性质和湿度图 /238
 - 9.1.1 湿空气的性质 /238
 - 9.1.2 湿空气各温度之间的关系 /241
 - 9.1.3 湿空气的湿度图 /242
 - 9.1.4 湿度图的应用 /243
- 9.2 干燥过程的物料衡算与热量衡算 /244
 - 9.2.1 物料衡算 /244
 - 9.2.2 干燥器热能消耗分析 /246
- 9.3 干燥速率和干燥时间 /247
 - 9.3.1 干燥推动力 /247
 - 9.3.2 干燥速率 /249
 - 9.3.3 湿分在湿物料中的传递机理 /251
 - 9.3.4 干燥时间 /252
- 9.4 干燥器 /256
 - 9.4.1 干燥器的分类 /256
 - 9.4.2 常用干燥器的工作原理及特点 /257
 - 9.4.3 其他干燥方法 /262
- 9.5 干燥设备的选型 /264

- 9.6 超临界流体干燥技术 /268
 - 9.6.1 超临界流体干燥过程的机理 /268
 - 9.6.2 超临界流体干燥工艺与设备 /270
 - 9.6.3 超临界流体干燥过程的影响因素 /272
 - 9.6.4 超临界流体干燥过程的热力学计算 /273
 - 9.6.5 超临界流体干燥技术的应用 /273
 - 9.6.6 控制技术及其注意点 /274
- 参考文献 /275

第10章 过滤

- 10.1 过滤的基本原理及其应用 /278
 - 10.1.1 过滤的分类 /278
 - 10.1.2 过滤的要素 /279
 - 10.1.3 快速过滤的机理 /280
- 10.2 过滤的基本方程式及操作方式 /281
 - 10.2.1 过滤基本方程式 /281
 - 10.2.2 过程的操作方式 /285
- 10.3 表层过滤及过滤机 /288
 - 10.3.1 过滤机 /289
 - 10.3.2 过滤机的生产能力 /295
 - 10.3.3 过滤机的选型 /298
- 参考文献 /299

第11章 膜分离技术

- 11.1 膜分离过程 /302
 - 11.1.1 几种主要的膜分离过程 /302
 - 11.1.2 膜分离过程的特点 /303
 - 11.1.3 膜分离的表征参数 /304
 - 11.1.4 膜材料与分离膜 /304
 - 11.1.5 膜组件 /305
- 11.2 反渗透与纳滤 /307
 - 11.2.1 反渗透现象和渗透压 /308
 - 11.2.2 反渗透原理 /308
 - 11.2.3 影响反渗透的因素 /310
 - 11.2.4 纳滤原理 /310

11.2.5	反渗透膜与膜组件	/310
11.2.6	反渗透工艺流程	/314
11.2.7	工艺设计	/316
11.2.8	反渗透膜的污染及其防治	/317
11.2.9	反渗透和纳滤技术的应用	/319
11.3	超滤与微滤	/324
11.3.1	超滤与微滤的分离原理	/324
11.3.2	超滤膜与微滤膜	/325
11.3.3	超滤的操作方式	/329
11.3.4	微滤的操作方式	/330
11.3.5	影响渗透通量的因素	/331
11.3.6	超滤技术的应用	/332
11.4	电渗析	/335
11.4.1	电渗析的原理	/335
11.4.2	离子交换膜及其作用机理	/338
11.4.3	浓差极化与极限电流密度	/340
11.4.4	电渗析器的构造与组成	/342
11.4.5	电渗析的工艺流程	/344
11.4.6	电渗析器的工艺参数	/345
11.4.7	电渗析的工艺设计与计算	/346
11.4.8	电渗析技术的应用	/347
11.5	扩散渗析	/350
11.5.1	扩散渗析的原理	/350
11.5.2	扩散渗析的应用	/351
11.6	液膜分离	/351
11.6.1	液膜及其类型	/351
11.6.2	液膜分离的传质机理	/353
11.6.3	流动载体	/354
11.6.4	液膜分离流程	/355
11.6.5	液膜分离技术的应用	/356
11.7	气体膜分离	/357
11.7.1	气体膜分离的原理	/357
11.7.2	气体膜分离流程及设备	/359
11.7.3	气体膜分离技术的应用	/359
11.8	膜分离技术的发展趋势	/361
11.8.1	技术上的发展趋势	/362
11.8.2	应用上的发展趋势	/363
	参考文献	/363

第12章 结晶

- 12.1 结晶的基本原理 /368
- 12.2 结晶过程的相平衡 /369
 - 12.2.1 相平衡与溶解度 /369
 - 12.2.2 溶液的过饱和与介稳区 /370
- 12.3 结晶动力学 /370
 - 12.3.1 晶核的形成 /370
 - 12.3.2 晶体的成长 /371
 - 12.3.3 杂质对结晶过程的影响 /372
- 12.4 工业结晶方法与设备 /372
 - 12.4.1 结晶方法的分类 /372
 - 12.4.2 结晶器的分类 /372
 - 12.4.3 冷却结晶器的选型 /373
 - 12.4.4 浓缩结晶器的选型 /374
 - 12.4.5 使用与注意事项 /377
- 12.5 结晶过程的产量计算 /377
 - 12.5.1 结晶过程的物料衡算 /377
 - 12.5.2 物料衡算式的应用 /378
- 12.6 其他结晶方法 /379
- 参考文献 /380

第13章 生物分离技术

- 13.1 生物分离过程的特点 /381
 - 13.1.1 生物产品生产过程中的特点 /381
 - 13.1.2 生物分离的一般步骤和单元操作 /382
- 13.2 泡沫分离 /382
 - 13.2.1 泡沫分离的工作原理与特点 /382
 - 13.2.2 泡沫分离技术的分类 /383
 - 13.2.3 泡沫分离设备与操作方式 /384
 - 13.2.4 泡沫分离技术的应用 /387
- 13.3 色层分离技术 /391
 - 13.3.1 色层分离方法的分类 /392
 - 13.3.2 基本原理 /392
 - 13.3.3 色层分离技术的应用 /393
- 参考文献 /394

第1章

绪论

1.1 分离技术的发展

在原始社会，人类完全靠大自然中“天生”的东西来解决生活中的一切需要。为了求得生存和改善生活条件，人类不断地与大自然进行斗争，在改造客观世界中形成了生产力，并使之不断发展。随着生产力自低级向高级发展，人类不断改善自己的物质生活，同时也创造了文化。

地球上的物质，绝大多数是与其他物质混在一起的（称为混合物）。天然存在的单纯物质少之又少。生产实践证明，将地球上的各种各样混合物进行分离和提纯是提高生产和改善生活水平的一种重要途径。由于发明了冶炼术，把金属从矿石中分离出来，使人类从石器时代进入铜器时代，大大提高了生活的质量，开始向文明社会进军。放射性铀的同位素的分离成功，迎来了原子能时代，原子能的和平利用使我们的生活水平又大大提高了一步。将水和空气中微量杂质除去的分离技术，大幅度提高了超大规模集成电路元件的成品合格率，使它得以实现商品化生产。深冷分离技术使我们从混合气体中分离出纯氧、纯氮和纯氢，获得了接近绝对零度的低温，为科学研究和生产技术提供了极为宽广的发展基础，为火箭提供了具有极大推力的高能燃料。从水中除去盐和有毒物质的蒸馏、吸附、萃取等分离技术，使我们能从取之不尽的大海中提取淡水，从工业、农业污水中回收干净水和其他有用的物质。

在工业生产中，很多生产过程处理的物料为流程性物料，如气体、液体、粉体等。从原材料到最后产品的生产过程中要进行一系列的化学、物理过程，以改变物质的状态、结构、性质。过程工业是以流程性物料为主要处理对象、完成上述各种过程或其中某些过程的生产的总称。过程工业中进行的各种过程往往在密闭状态下连续进行，它遍及几乎所有现代工业生产领域。化学工业是最传统、典型的过程工业，化肥、石油化工、生物化工、制药、农药、染料、食品、炼油、轻工、热电、核工业、公用工程、湿法冶金、环境保护等生产过程大都处理流程性物料，处理过程中几乎都包含改变物质的状态、结构、性质的生产过程。在这些过程中都需要使用各种类型的分离设备以完成生产过程中原料和产品的分离与提纯。

过程工业是国民经济的重要基础产业，其产品渗透到人们的衣、食、住、行等各个领域。过程工业的产值是衡量一个国家国民经济发展水平的重要标志之一。其显著的特点是所用原料广泛，生产工艺不同，产品品种繁杂，性质各异。但归纳起来，各个产品的生产工艺都遵循相同的规律：即原料预处理、加工精制、产品后处理。原料的预处理是过程工业生产前必要的准备工作，因为存在于自然界的原料多数是不纯的。例如，石油是由多种烃类化合物为主组成的混合液体；煤是组分复杂的固体混合物。其中有生产过程需要的物质，也有生产过程不需要的甚至是有害的物质。如果直接采用这样的原料进行化学反应，让那些与反应无关的多余组分一起通过反应器，轻则影响反应器的处理能力，使生成的产物组成复杂化；重则损坏催化剂和设备，使反应无法顺利进行，因此反应前的分离操作往往是必不可少的。当使用气体（或液体）原料时，预处理包括采用一定的分离手段，对原料气进行制备、净化和配制，要求制得的原料具有一定的组成、浓度和纯度，尽量少含杂质（特别是有害杂质）。当使用矿物原料时，预处理包括选矿、配矿、粉碎、筛分，有时还需要干燥或煅烧。原料矿粉应具备一定的组成（或品位）及一定的细度，以利于化学反应。产品的后加工，主要是指对从反应器出来的中间产物或粗产品进行分离和提纯以及对未反应物的回收利用。因为绝大多数有机化学反应都不可能百分之百地完成，而且除主反应外，尚有副反应发生，这样从反应器出来的产物往往是由目的产物、副产物以及未反应的原料组成的。要得到产品，必须进行分离。最常用的分离方法有冷冻冷凝、精馏分离和结晶分离。未反应物的回收利用常常采取循环作业。此外，固体产品的造粒成型、干燥和包装也是产品后加工不可缺少的内容。

通常所说的“三传一反”即概括了过程工业生产的全部特征。“三传”为动量传递、热量传递和质量传递（化工单元操作），“一反”为化学反应过程。质量传递过程是自然界和工程技术领域普遍存在的现象。敞口容器中的水向空气中蒸发；糖块在水中溶解；用吸收方法脱除烟气中的二氧化硫；从植物中提取药物；催化反应中反应物向催化剂迁移等都是常见的质量传递过程。在近代化学工业的发展中，传质分离过程起到了特别重要的作用。几乎没有一个过程工业的生产不包含对原料或反应产物的分离提纯操作，从原油中分离出各种燃料油、润滑油和石油化工原料到有机、无机、精细化学品的合成，都离不开对混合物的分离。

分离技术是随着化学工业的发展而逐渐形成和发展的。化学工业具有悠久的历史，而现代化学工业开始于18世纪产业革命以后的欧洲。当时，纯碱、硫酸等无机化学工业成为现代化学工业的开端。19世纪以煤为重要原料的有机化工在欧洲也发展起来。当时的煤化学工业规模还没有十分巨大，主要着眼于苯、甲苯、酚等各种化学产品的开发。在这些化工生产中应用了吸收、蒸馏、过滤、干燥等操作。19世纪末~20世纪初大规模的石油炼制业促进了化工分离技术的成熟与完善。到20世纪30年代在美国出版了第一部《化学工程原理》，50年代中期提出传递过程原理，把单元操作进一步解析成三种基本传递过程，即动量传递、热量传递和质量传递以及三者之间的联系。进入20世纪70年代以后，化工分离技术向更加高级化的方向发展，应用更加广泛。与此同时，分离技术与其他科学技术相互交叉渗透产生了一些更新的边缘分离技术，如生物分离技术、膜分离技术、环境化学分离技术、纳米分离技术、超临界流体萃取技术等。21世纪，分离技术将面临着一系列新的挑战，其中最主要的是来自能源、原料和环境保护三大方面。此外，分离技术还将对农业、食品和食品加工、城市交通和建设以及保健方面做出贡献。

中国是世界文明古国之一，古代劳动人民在长期的生产实践中，在科学技术和化学工艺等方面有不少发明创造，对于中国社会的发展和世界文明曾做出过卓越的贡献。如陶瓷、冶

金、火药、燃料、酿酒、染色、造纸和无机盐等的生产技术，一直到西方出现资本主义以前，都走在世界前列。现代许多化工生产都是在古代化学工艺的基础上发展起来的。

近年来，科技人员在传质过程及设备的强化和提高效率、分离技术研究和过程模型、分离新技术开发几个主要方面做了大量的工作，取得了一批成果。对板式塔的研究已深入到板式塔内气、液两相流动的动量传递及质量传递的本质研究，开发了新型填料和复合塔；对萃取、蒸发、离子交换、吸附、膜分离等过程也做出了有意义的研究和开发工作。通过这些研究成果的工业应用，改进和强化了现有生产过程和设备，在降低能耗、提高效率、开发新技术和设备、实现生产控制和工业设计最优化等方面发挥了巨大的作用，同时也促进了过程工业的进一步发展。

当代工业的三大支柱是材料、能源和信息。这三大产业的发展都离不开新的分离技术。人类生活水平的进一步提高也有赖于新的分离技术。在 21 世纪，分离技术必将日新月异，再创辉煌。

1.2 分离技术的应用

过程工业涉及的范围非常广泛，以石油、天然气为原料的化学工业包括石油加工、基本有机化工、无机化工、高分子合成、精细化学品合成等，而任何一个工业生产过程都包含分离技术的应用。事实上，在实际过程工业生产中，无论在基础建设阶段，还是在正常生产过程中，尽管反应器是至关重要的设备，但分离设备在整个流程中的数量远远超过反应设备，在投资上也不在反应设备之下，而消耗于分离的能量和操作费用在产品成本中也占有很大的比例，因此，对分离过程必须予以应有的重视。

以石油化工为例。以地下原油为原料生产汽油、煤油、柴油、润滑油和基础化工产品。从原油的初馏、催化裂化、加氢催化、催化重整到润滑油的生产，所有工艺过程都离不开分离操作。如常压塔、减压塔、吸收塔、汽提塔、抽提塔、芳香烃蒸馏塔等都是典型的分离过程。以直馏汽油为原料，生产各种轻质芳香烃为目的的催化重整装置包括原油的预处理（预分馏和预加氢）、催化重整、溶剂油抽提和芳香烃精馏四个部分。此生产过程除催化重整属化学反应外，原油的预处理（预分馏和预加氢）、溶剂油抽提和芳香烃精馏均属于分离过程。实际上，现代炼油厂中的前、后处理工序占用着企业的大部分设备投资和操作费用。由此可见，分离技术对提高生产过程的经济效益和产品质量起着举足轻重的作用。大型石油工业和以化学反应为核心的化工生产过程，分离装置的费用占总投资的 50%~60%。

在某些化工生产装置中，分离操作就是整个过程的主体部分，如石油裂解气的深冷分离，碳四馏分分离生产丁二烯，和上述的芳烃分离等过程。在无机化工和有机化工中，虽然产品品种繁多，但是所有生产工艺过程仍然离不开“三传一反”，也就是离不开分离过程。

在冶金、食品、生化和原子能等工业也都广泛地应用到分离过程。例如，从矿产中提取和精选金属；食品的脱水、除去有毒或有害组分；抗生素的净制和病毒的分离；同位素的分离和重水的制备等都要采用分离技术。

随着现代工业趋向大型化生产，所产生的大量废气、废水、废渣更加集中排放，对它们的处理不但涉及物料的综合利用，而且还关系到环境污染和生态平衡。如原子能废水中微量同位素物质，很多工业废气中的硫化氢、二氧化硫、氧化氮等都需要妥善处理。近年来，由于能源紧张，石油提价，对分离过程的能耗要求越来越苛刻，随之对设备性能的要求也越来

越高。分离技术的应用越来越得到人们的高度重视。

上述种种原因都促使对常规分离过程如精馏、吸收、吸附、萃取、结晶、蒸发等不断进行改进和发展；同时新的分离技术与方法，如超临界流体萃取、固膜与液膜分离、热扩散、色层分离等也不断出现和得到工业化应用。

1.3 分离过程的分类和特征

分离过程可分为机械分离和传质分离两大类。机械分离过程的分离对象是由两相以上所组成的混合物，其目的只是简单地将各相加以分离，如过滤、沉降、离心分离、旋风分离和静电除尘等。传质分离过程用于各种均相混合物的分离，其特点是有质量传递现象发生。按所依据的物理化学原理不同，工业上常用的传质分离过程又可分为两大类，即平衡分离过程和速率分离过程。

(1) 平衡分离过程

平衡分离过程系借助于分离媒介（如热能、溶剂、吸附剂等）使均相混合物系统变为两相体系，再以混合物中各组分在处于平衡的两相中分配关系的差为依据而实现分离。

分离媒介可以是能量媒介（ESA）或物质媒介（MSA），有时也可以两种同时应用。ESA是指传入系统或传出系统的热；还有输入或输出的功。MSA可以只与混合物中一个或几个组成部分互溶，此时，MSA常是某一相中浓度最高的组分。例如，吸收过程中的吸收剂，萃取过程中的萃取剂等。MSA也可以和混合物完全互溶。当MSA与ESA共同使用时，还可选择性地改变组分的相对挥发度，使某些组分彼此达到完全分离，如萃取精馏。

根据两相状态不同，平衡分离过程可分为如下几类。

- ① 气液传质过程：如吸收、气体的增湿和减湿，液体的蒸馏与精馏。
- ② 液液传质过程：如萃取。
- ③ 液固传质过程：如结晶、浸取、吸附、离子交换、色层分离、参数泵分离等。
- ④ 气固传质过程：如固体干燥、吸附等。

上述的固体干燥、气体的增湿与减湿、结晶等操作同时遵循热量传递和质量传递的规律，一般列入传质单元操作。表 1-1 列出了工业常用的基于平衡分离过程的分离单元操作。

表 1-1 工业常用的基于平衡分离过程的分离单元操作

序号	名称	原料相态	分离媒介	产生相态或 MSA 的相态	分离原理	工业应用实例
1	闪蒸	液体	减压	气体	挥发度(蒸汽压)有较大差别	由海水淡化生产纯水
2	部分冷凝	气体	热量(ESA)	液体	挥发度(蒸汽压)有较大差别	由氨中回收 H ₂ 和 N ₂
3	精馏	气体、液体或气液混合物	热量,有时用机械做功	气体或液体	挥发度(蒸汽压)有差别	石油裂解气的深冷分离
4	萃取精馏	气体、液体或气液混合物	液体溶剂和塔釜加热	气体或液体	溶剂改变原溶液组分的相对挥发度	以苯酚作溶剂由沸点相近的非芳烃中分离甲苯
5	共沸精馏	气体、液体或气液混合物	液体共沸剂和热量	气体或液体	共沸剂改变原溶液组分的相对挥发度	以醋酸丁酯作共沸剂从稀溶液中分离醋酸
6	吸收	气体	液体吸收剂	液体	溶解度不同	用乙醇胺类吸收以除去天然气中的 CO ₂ 和 H ₂ S