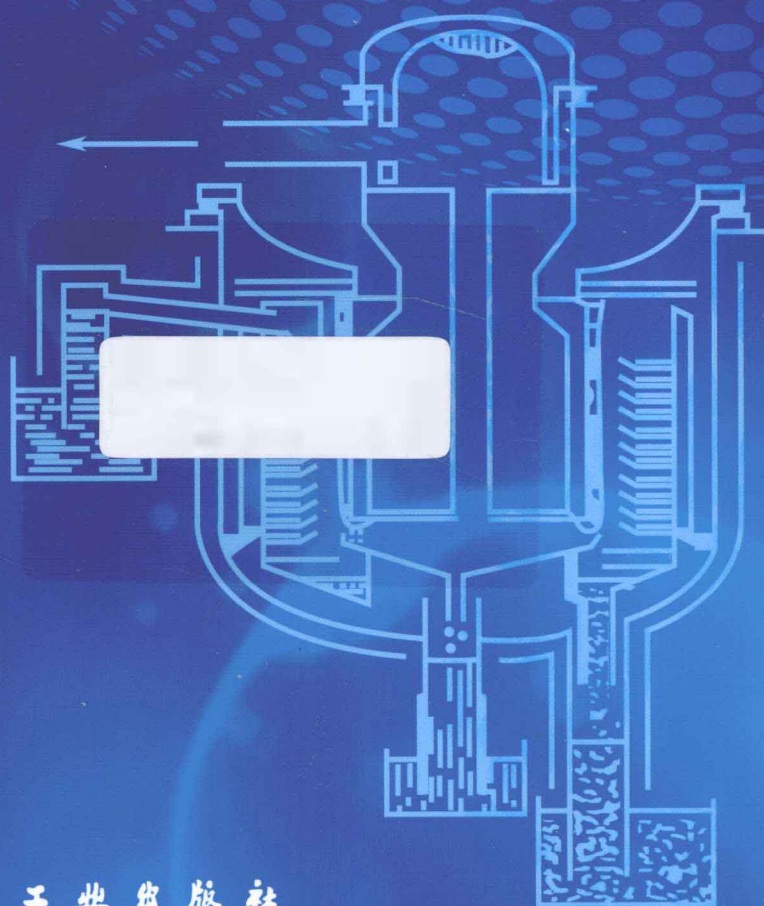




真空科学技术丛书

真空蒸馏

王德喜 陆峰 邹惠芬 编



化学工业出版社



真空科学技术丛书

真空蒸馏

王德喜 陆峰 邹惠芬 编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了真空科学技术在混合物分离领域的应用。主要内容包括真空蒸馏的基本原理、典型设备及其在冶金、石油等工业中的应用。

本书可供需要真空蒸馏技术的相关技术人员以及大专院校师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

真空蒸馏/王德喜, 陆峰, 邹惠芬编. —北京: 化学工业出版社, 2013. 10

(真空科学技术丛书)

ISBN 978-7-122-18411-5

I. ①真… II. ①王…②陆…③邹… III. ①减压蒸馏
IV. ①TF803. 14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 216125 号

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 刘砚哲

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 史利平

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: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 402 千字 2014 年 1 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: 68.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2013—14 号

丛书序

真空科学技术是现代科学技术中应用最为广泛的高技术之一。制备超纯材料需要超高真空技术，太阳能薄膜电池及芯片制作需要清洁真空技术，航天器空间环境地面模拟设备需要大型真空容器技术。真空科学技术已渗透到人们的教学、科研、生产过程、经济活动以及日常生活中的方方面面，人们普遍认识到了真空科学技术的重要性。

真空科学技术是一门涉及多学科、多专业的综合性应用技术，它吸收了众多科学技术领域的基础理论和最新成果，使自己不断地进步和发展。真空科学技术的应用标志着国家科学和工业现代化的水平，大力发展真空科学技术是振兴民族工业，实现国家现代化的基本出发点。

多年来，党和国家政府非常重视发展真空科学技术。大学设立了真空科学技术专业，培养高层次真空专业人才；兴办真空企业，设计、制造真空产品；成立真空科学技术研究所开发新技术，提高真空应用水平；建立了相当规模和水平的真空教学、科研和生产体系；独立自主地生产出各种真空产品，满足了各行业的需求，推动了社会主义经济的发展。

在取得丰硕的物质成果和经济效益的同时，真空科技人员积累了宝贵的理论认知和实践经验。在和真空科学技术摸、爬、滚、打的漫长岁月中，一大批人以毕生的精力、辛勤的劳动亲身经历了多少次失败的痛苦和成功的喜悦。通过深刻的思考与精心的整理换得了大量的实践经验，这些付出了昂贵代价得来的知识是书本上难以学到的。经历了半个世纪沧桑岁月，当年风华正茂的真空科技工作者均年事已高，霜染鬓须，退居二线。唯一的希望是将自己积累的知识、技能、经验、教训通过文字载体传承给新一代的后来人，使他们能够在前人搭建的较高平台上工作。基于这一考虑，在兰州物理研究所支持下，我们聚集在一起，成立了《真空科学技术丛书》编写委员会，由全国高等院校、科研院所及企业中长期从事真空科

前言

真空蒸馏是在真空环境下，通过加热蒸发使混合物中不同组分，在不同的温度下变成蒸气，再通过冷凝使蒸气变成液体或固体，来实现混合物分离的过程。由于真空蒸馏具有低碳、节能、环保等许多特点，使得其在冶金、化工、医药、食品、海水淡化等工业领域得到了大量的应用，其发展前景广阔，受到许多学者、科研人员和企业的关注。

本书是真空科学技术系列丛书中的一本，目的是介绍真空科学与技术在混合物分离领域里的应用，主要是收集、整理和介绍真空蒸馏的基本原理、典型设备及其在国民经济发展中的应用，以方便需要真空蒸馏知识和技术的学生、工程技术人员的学习、参考和应用。

本书采用深入浅出的方法编写，尽量让读者容易阅读。适应的读者对象是各大专院校的本科生、硕士研究生，有关企业的工人、技术人员，也可以供博士研究生、科研单位的技术人员参考。

本书在编写过程中学习了有关老专家编写的书籍，查阅了大量同行学者发表的学术论文，在这里对原作者表示感谢。

本书第1、2章由陆峰编写，第3、4章由邹惠芬编写，第5~7章由王德喜编写，全书由王德喜统稿，由徐成海审核校对。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，欢迎读者批评指正。

编 者

2013年5月2日

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论 1

1.1 真空蒸馏的特点	1
1.2 真空蒸馏的分类	1
1.3 真空蒸馏的应用	2
1.3.1 真空蒸馏在金属冶炼中的应用	2
1.3.2 真空蒸馏在石油化工领域中的应用	3
1.3.3 真空蒸馏在其他领域中的应用	4
1.3.4 分子蒸馏的应用	4
1.4 真空蒸馏技术的现状和发展前景	8
1.4.1 食用油精炼过程中的节能技术	8
1.4.2 真空膜蒸馏技术的研究现状	11
1.4.3 真空膜蒸馏技术的发展方向	12
1.4.4 分子蒸馏技术的前景	12

第 2 章 真空蒸馏原理 13

2.1 真空蒸馏的技术基础	13
2.1.1 液体混合物的可分离性	13
2.1.2 蒸气压	14
2.1.3 理想二元混合物	14
2.2 真空蒸馏过程的描述	16
2.2.1 挥发过程	16
2.2.2 气相传质过程	17
2.2.3 冷凝过程	18
2.2.4 传热过程	18
2.3 金属真空蒸馏的技术基础	20
2.3.1 纯金属的蒸气压	20
2.3.2 金属气体的结构	21
2.3.3 合金元素的蒸气压	26
2.3.4 合金的蒸气组成	28

2.3.5	合金元素的蒸发	32
2.3.6	真空蒸馏粗金属时杂质和主体金属蒸发量	41
2.3.7	温度对物质蒸发速率的影响	43
2.3.8	真空蒸馏的方法和选择	48
2.3.9	真空炉的进料和出料	52

第3章

分子蒸馏

54

3.1	概述	54
3.2	分子蒸馏的过程和特点	55
3.2.1	分子蒸馏的过程	55
3.2.2	分子蒸馏的特点	56
3.3	分子蒸馏的技术原理	57
3.3.1	分子蒸馏的工作原理	57
3.3.2	分子蒸馏的传热与传质	58
3.4	分子蒸馏装置	60
3.4.1	分子蒸馏装置的构造	60
3.4.2	分子蒸馏器的分类	60
3.4.3	分子蒸馏器的主要特征	62
3.4.4	分子蒸馏装置的设计原则	62
3.5	分子蒸馏的技术应用	62

第4章

真空蒸馏设备

64

4.1	几种典型的真空蒸馏设备	64
4.1.1	冶金用的间歇式真空蒸馏设备	64
4.1.2	冶金用的半连续真空蒸馏设备	65
4.1.3	冶金用的连续真空蒸馏设备	66
4.1.4	实验用的多级真空蒸馏装置	66
4.2	真空蒸馏分离(蒸发)器(塔、炉、罐、釜)	70
4.2.1	原油真空蒸馏塔的类型	70
4.2.2	原油真空(减压)蒸馏塔内部结构	73
4.2.3	减压加热炉及减压转油线系统	83
4.2.4	减压深拔条件下的设备	83
4.2.5	润滑油型减压蒸馏关键设备	87
4.2.6	几种典型真空蒸馏蒸发器	90
4.3	冷凝器的结构设计原则	91
4.4	真空蒸馏设备的真空系统	92
4.4.1	真空蒸馏设备真空系统的特点与类型	92
4.4.2	真空蒸馏设备真空机组的选型方法	96

4.4.3 真空蒸馏设备真空系统的应用实例	106
-----------------------------	-----

第5章 真空蒸馏在冶金工业中的应用	111
--------------------------	------------

5.1 铅及其合金的真空蒸馏	111
5.1.1 铅、锌分离	111
5.1.2 铅的真空精馏	113
5.2 铅银合金的真空蒸馏	118
5.2.1 铅银在真空中分离	118
5.2.2 铅银合金真空蒸馏分离实践	119
5.3 锌及其合金的真空蒸馏	120
5.3.1 锌的真空蒸馏	120
5.3.2 锌合金的真空蒸馏	122
5.3.3 热镀锌渣的真空蒸馏	126
5.3.4 锌镉合金真空蒸馏	130
5.4 锡及其合金的真空蒸馏	133
5.4.1 粗锡的真空蒸馏	133
5.4.2 锡合金的真空蒸馏	134
5.4.3 钢锡合金真空蒸馏	142
5.5 铋及其合金的真空蒸馏	145
5.5.1 粗铋的真空蒸馏	145
5.5.2 铋铅合金的真空蒸馏	146
5.6 精铋的真空蒸馏	148
5.6.1 精铋真空蒸馏硫化除铅机理	148
5.6.2 精铋真空蒸馏实验	149
5.6.3 实验结果及讨论	149
5.7 溴化铈材料的真空蒸馏	151
5.7.1 实验方案	151
5.7.2 结果与讨论	153
5.8 真空蒸馏法制备高纯金属镧	156
5.8.1 热力学分析	156
5.8.2 实验材料与设备	157
5.8.3 实验方法与分析	157
5.8.4 结果与讨论	158
5.9 砷、硒和碲的真空蒸馏	159
5.9.1 砷的真空蒸馏	159
5.9.2 砷、铅、锡合金的真空蒸馏	160
5.9.3 硒的真空蒸馏	162
5.9.4 碲的真空蒸馏	163
5.10 铝、镁、镓、铟、铍的真空蒸馏	164

5.10.1	铝镁合金的蒸馏	164
5.10.2	镁屑的真空蒸馏	164
5.10.3	铝硅铁合金的真空蒸馏	165
5.10.4	铟和镓的真空蒸馏	166
5.10.5	铍的真空蒸馏	166

第 6 章 真空蒸馏在石油化工领域中的应用

168

6.1	原油的常减压蒸馏	168
6.1.1	原油的一般性质	168
6.1.2	原油蒸馏工艺流程	169
6.1.3	常压蒸馏与减压蒸馏的关系	169
6.1.4	环保措施	170
6.2	减压蒸馏概述	170
6.2.1	减压蒸馏技术与应用	170
6.2.2	减压蒸馏技术的现状及发展	173
6.2.3	减压深拔技术	175
6.3	减压蒸馏工艺概论	176
6.3.1	常压渣油的特征及性质	176
6.3.2	减压蒸馏的作用及流程	177
6.3.3	减压蒸馏的主要操作参数	178
6.4	减压蒸馏的生产方案与操作模式	180
6.4.1	减压蒸馏的生产方案	180
6.4.2	减压蒸馏的操作模式	183
6.4.3	优化减压蒸馏的措施	183
6.5	减压深拔	184
6.5.1	减压深拔的基本概念	184
6.5.2	减压深拔需要解决的问题	186
6.6	润滑油型减压蒸馏工艺	187
6.6.1	润滑油基础油生产及对减压馏分油的要求	187
6.6.2	润滑油型减压蒸馏的基本特征	192
6.7	焦油的真空蒸馏	194
6.7.1	焦油减压连续蒸馏	194
6.7.2	焦油常-减压连续蒸馏	199
6.8	己内酰胺的真空蒸馏	205
6.8.1	真空蒸馏工艺的选择	205
6.8.2	真空蒸馏设备的选型	207
6.8.3	操作参数的控制	208
6.8.4	初馏水及残液的回收利用	209
6.9	氨碱纯母液的真空蒸馏	210

6.9.1	母液真空蒸馏工艺	210
6.9.2	工艺过程的操作与控制	211
6.10	利用真空蒸馏分解废橡胶生产柴油和炭黑	211
6.10.1	生产工艺	212
6.10.2	技术要求与应用前景	213
6.11	采用汽化冷凝真空蒸馏对混合脂肪醇进行分离提纯	214
6.11.1	中试研究	214
6.11.2	生产试验	215

第7章	真空蒸馏在其他领域中的应用	219
------------	----------------------	------------

7.1	真空蒸馏在医药领域中的应用	219
7.1.1	真空蒸馏——萃取法提纯天然生育酚	219
7.1.2	维生素 E 的提纯	221
7.2	真空蒸馏在海水淡化领域中的应用	222
7.2.1	真空蒸馏处理海水技术 (VDT)	222
7.2.2	真空膜蒸馏 (VMD) 海水淡化技术	226
7.2.3	海水淡化浓盐水真空蒸馏技术	233
7.3	真空蒸馏在制冷工业领域中的应用	239
7.3.1	水/乙二醇与水/二甘醇真空蒸馏装置与方法	240
7.3.2	影响真空蒸馏的因素分析	240
7.3.3	结论	242
7.4	真空蒸馏在地质勘探领域中的应用	242
7.4.1	系统设计的理论依据	242
7.4.2	系统的工作原理	244
7.4.3	自动真空蒸馏脱气器与电动脱气器效果比较	245
7.5	真空蒸馏在食用油精炼中的应用	247

参考文献	249
-------------	------------

第 1 章

绪 论

混合物是由许多不同的成分组成的，各种成分的沸点不同，通过加热蒸发成气体、再冷凝成液体或固体来实现物质分离的这一过程，我们可以定义为蒸馏。真空蒸馏就是在真空状态下，利用蒸馏方法实现混合物中各组成成分分离的技术。

1.1 真空蒸馏的特点

真空蒸馏工艺在石油化工、金属冶炼等行业中使用较普遍，与常压下蒸馏相比，真空蒸馏具有许多优点：

- ① 真空环境下物质的沸点降低，有利于物质的分离；
- ② 在真空状态下，聚合物分解后重新聚合的概率降低，能进行低温处理；
- ③ 真空蒸馏工艺中物质容易加热，保温简单，热损失减小；
- ④ 空气中的氧、水蒸气等成分的影响减小；
- ⑤ 相对挥发度大，物质更容易分离；
- ⑥ 平衡关系改变，真空下共沸混合物消失等。

由于真空蒸馏工艺的操作环境要求严格，真空蒸馏也有不足之处：

- ① 真空系统是获得真空工作环境的必要设备，真空蒸馏设备费及操作费较高；
- ② 装置的密封性能要求必须满足工作真空度；
- ③ 真空蒸馏工艺中，沸腾现象常见，对传热方式有一定的要求；
- ④ 冷凝器、捕集器均要求低温。

1.2 真空蒸馏的分类

按蒸馏系统操作压力的不同，真空蒸馏可分为下面几种。

① 减压蒸馏。常见的减压蒸馏过程，大多在 10^4 Pa 以上的压力范围内操作。减压蒸馏机理与常压蒸馏差不多，常压蒸馏装置形式，基本上可用。

② 真空蒸馏。压力范围为 $2\sim 100$ mmHg ($1\text{mmHg}=133.3\text{Pa}$)，气体的流动属黏滞态。在这个压力范围内进行蒸馏操作是容易实现的。

③ 高真空蒸馏。压力范围为 $0.01\sim 2$ mmHg，此时气体接近过渡流状态，对真空蒸馏装

置的选型、设计、制造、安装、操作等都有较为严格的要求。

④ 真空膜蒸馏 (VMD)。在膜的一侧为常压, 另一侧抽真空, 使溶液通过膜, 实现分离和蒸馏的作用。

⑤ 准分子蒸馏。压力范围为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ mmHg, 此时, 气体分子的平均自由程与蒸馏器尺寸相近, 气体呈过渡流状态。

⑥ 分子蒸馏。操作压力在 10^{-4} mmHg 以下。在分子蒸馏或准分子蒸馏装置中, 气体的流动为分子的自由运动, 也就是说, 可以忽视该系统中的其他分子的碰撞和干扰, 此时, 蒸馏过程受来自液面的蒸发所支配。

按蒸馏器的形式不同, 真空蒸馏可以分为: 塔式蒸馏、釜形式蒸馏、喷雾式蒸馏、离心式蒸馏、填充式精馏、薄膜式蒸馏、回转式精馏。

按蒸馏方法分为单蒸馏和精馏两大类。

按蒸馏操作分为间歇式蒸馏和连续式蒸馏。

1.3 真空蒸馏的应用

真空蒸馏技术应用广泛, 除了在冶金和石油化工领域有大量应用之外, 在医药卫生、海水淡化、制冷工业、地质勘探和食品工业等领域都有应用, 这里仅举一些应用的实例。

1.3.1 真空蒸馏在金属冶炼中的应用

真空蒸馏技术在金属冶炼中的应用主要体现在有色金属的冶炼。有色金属的种类繁多, 冶炼方法也不少。但是, 采用真空蒸馏法冶炼有色金属具有工艺流程短、冶炼金属纯度高、无环境污染、清洁、环保、节能等许多优点。所以, 在有色金属冶炼过程中得到了广泛的应用。

1.3.1.1 真空蒸馏在粗金属精炼中的应用

传统的有色金属冶金中粗金属精炼的方法有: ① 加剂法, 通过添加一定剂量的元素, 达到去除杂质的目的, 例如粗铅加锌除银、加硫除铜等; ② 氧化法, 利用氧化反应, 除去粗金属中的砷、锑、锡等; ③ 电解法, 普遍采用湿法电解技术, 在电能转化成化学能的时候, 使电解槽内电极附近产生氧化还原反应, 从而在电极上还原出一定纯度的金属, 如金属铜的电解精炼。这些方法是精炼金属的主要方法, 但在使用中也会存在一些问题, 如流程长、工序多、试剂消耗量大、副产渣种类多、对环境污染严重、金属回收率低、基建投资较大、加工费用较多等。

采用真空蒸馏精炼金属技术, 是 20 世纪 50 年代开始, 真空蒸馏具有流程短、消耗小、金属回收率高、基本无三废 (废渣、废水、废气)、对环境无污染、基建投资少、加工费用低等优点。目前, 应用于工业的有: 粗锡、粗锌、粗镉、粗铅、粗锑、粗铋等。

在采用真空蒸馏技术精炼粗金属时, 有时候和其他的方法配合使用, 可以获得更好的精炼效果和经济效益。

1.3.1.2 真空蒸馏在合金分离中的应用

采用真空蒸馏技术处理一些合金, 主要是在真空状态下, 通过加热, 使较易挥发的组分形成蒸气, 然后冷凝成金属, 从而实现了合金分离。由于这一过程是在真空环境下进行的, 没有氧化反应发生, 因此, 使工艺流程和设备大为简化, 投资成本较少, 占地面积较小, 金

属回收率提高, 是传统冶金方法难于处理的某些合金分离技术的最佳选择。

迄今, 在工业上得到应用的真空蒸馏分离合金有铅锡合金、银锌壳、热镀锌渣、铅铋合金、铅银合金、锰铁、锡铋合金等等, 随着再生金属种类的增多, 需要处理的合金种类增多, 真空蒸馏技术在合金分离中的应用将会越来越多。

1.3.2 真空蒸馏在石油化工领域中的应用

真空蒸馏在石化领域中的应用主要体现在原油的真空炼制。石油(原油)从地下抽取出来之后, 需要炼制成工业生产用的汽油、煤油、柴油等油品, 炼制成工业用的各种化工原料, 原油的炼制过程主要工艺是真空蒸馏(或减压蒸馏)。

真空蒸馏的最大用途是石油炼制中高沸点烃的加工。常压下重质原油中的很多组分由于热分解等原因实际上无法被加热到其泡点温度, 采用真空蒸馏就可以避免。可以利用真空处理的其他物料还有矿物油、增塑剂、脂肪酸、单甘油酯、维生素和石蜡等。

1.3.2.1 原油的减压深拔

由于油品性质和操作条件的限制, 传统上减压蒸馏通常只能将原油拔到切割点 $520\sim 540^{\circ}\text{C}$ (TBP)。多年来, 炼油工作者致力于提高减压拔出率, 降低减压渣油收率的研究。但受到多方面的限制, 一方面, 提高减压拔出率之后, 减压渣油的质量更差, 密度过大, 沥青质、焦质、残炭、金属含量都很高; 另一方面, 拔出的重蜡油残炭、重金属、含硫量、黏度、密度也都升高。因此, 如何进一步加工这些重质蜡油等一系列的问题, 在某种程度上制约了减压深拔技术的发展。

随着经济的发展, 能源日趋紧张, 加之环保要求的日趋严格, 对石化产品的质量提出了更高的要求。随着焦化等重油深加工工艺技术的发展, 使得其可以加工更劣质的减压渣油。因而减压蒸馏可以合理地提高拔出率, 以降低减压渣油的产率, 这样不仅可以有效提高原油的利用率, 同时还能增加炼油厂的经济效益。

国外, 减压深拔技术发展较快, 大多数炼油厂都可以把原油切割到 540°C (TBP) 以上, 部分炼油厂超过 560°C (TBP), 有的炼油厂达到 590°C (TBP) 以上, 重质减压蜡油收率的显著提高, 在一定条件下给原油加工企业带来了显著的经济效益。

1.3.2.2 润滑油基础油的生产

润滑油是我国重点发展的一大类石油产品。从 20 世纪 50 年代末期开始, 就采用了丙烷脱沥青、溶剂精制、溶剂脱蜡等现代工艺。使用的溶剂主要有糠醛、酚和 *N*-甲基吡咯烷酮, 使用的脱蜡溶剂主要为甲基乙基酮-甲苯。为了提高基础油的质量, 又采用了提高黏度指数的润滑油高压加氢处理和异构脱蜡等技术, 以生产符合 API II、API III 类润滑油基础油质量要求的产品。

1.3.2.3 焦油的真空蒸馏

煤焦油简称焦油, 是煤在干馏和汽化过程中生成的液体产品, 是具有刺激性臭味的黑色或黑褐色的黏稠状液体, 是生产一系列芳烃、工业油和电极沥青等的原料。

1.3.2.4 己内酰胺的真空蒸馏

己内酰胺在工业上主要用作锦纶-6 纤维的单体, 单体中若含有微量的化学杂质, 会降低纤维的抗张强度和耐热性等多种性能, 铁质会使己内酰胺发黄, 并影响聚合过程中链的生成, 致使聚酰胺变脆; 机械杂质, 会影响纤维的强度; 水分则使己内酰胺存放时结块, 甚至水解。因此, 对己内酰胺的质量应有严格的要求。

由于己内酰胺生产过程中，化学反应复杂，采用的辅助原料较多，因此，粗己内酰胺粗油中，一般除含约 65% 的己内酰胺，30%~35% 的水外，还含有 1%~1.5% 的硫铵和 1%~2% 的多种杂质。工业生产中，采用和研究了多种方法进行精制，常见的方法有：用苯、三氯乙烯（和水）等溶剂进行萃取，己内酰胺的重结晶，多段真空蒸馏，吸附过滤净制（用活性炭、分子筛、珠光粉等吸附），催化加氢精制，离子交换树脂净化法，添加净化剂等。通常采用萃取-加碱真空蒸馏（有时配合重结晶），并结合其他净制方法，以达到分离和净制的目的。己内酰胺蒸馏，是采用粗油经萃取、脱水浓缩后的 90% 左右的粗己内酰胺的水溶液。由于己内酰胺的沸点（常压下为 262.5℃）和水的沸点差较大，分离比较容易，照理，用一般简单蒸发的方法，是可以将其水分除净，但是，由于己内酰胺浓缩液中，尚含有组成复杂的多种杂质，这些杂质虽然各国进行过大量的研究工作，但至今尚难一一查清。目前已获悉，这些杂质中有：环己酮及其衍生物、环己酮肟、八氢化吩嗪、 $\gamma(\delta)$ -己内酯、双-2-巯基环己酮、硝基苯、氨基己酸、苯胺、无机硫及硫化物、铁、钙、镁离子等杂质。己内酰胺生产过程中，操作条件的波动或原料及辅助原料质量的变化，均会引起杂质种类和含量的变化。这些杂质中，有些沸点与己内酰胺较为相近，因此，用一般简单单塔蒸馏的方法，很难将这些杂质除净。在蒸馏时，这些杂质大量地夹杂在初馏水、前期及后期中馏分和蒸馏残液中，因此，己内酰胺蒸馏时，应设法将这些馏分切除。

己内酰胺在 200℃ 以上长时间地受热，将在一定程度上聚合。特别在水溶液中，当有酸性物质存在时，更易发生聚合，使己内酰胺发黄，这样，不但影响己内酰胺的质量，而且使蒸馏收率下降。由于己内酰胺的沸点为 262.5℃，因此，己内酰胺蒸馏要在真空下进行，这样可以降低己内酰胺的沸点，并使其与杂质的沸点差增大。

1.3.2.5 石油化工领域里的其他应用

石油化工领域涉及的范围很广，如：

- ① 氨碱母液的真空蒸馏；
- ② 利用真空蒸馏分解废橡胶；
- ③ 采用真空蒸馏提纯混合脂肪醇。

1.3.3 真空蒸馏在其他领域中的应用

真空蒸馏在医药、食用油精炼、海水淡化、制冷工艺、地质勘探等领域都有应用。其中真空蒸馏海水淡化的意义重大，淡水资源短缺成为当今社会发展的重要问题，海水资源丰富，海水淡化是淡水来源的重要途径，特别是一些海岛上根本没有淡水资源，生活用水只能靠海水淡化，远洋航海的船只、军用战舰、航空母舰等使用的淡水都需要海水淡化。海水淡化的方法有多种，其中真空蒸馏和真空膜蒸馏（VMD）技术有较多的优点，在海水淡化方面具有较好的应用前景。

1.3.4 分子蒸馏的应用

在 20 世纪 60 年代以前，分子蒸馏技术只在少数国家，如日本、美国、德国有些研究和应用，且应用面狭窄，发展较慢。但进入 80 年代后，随着生活水平的提高和人们对天然食物的青睐，作为对天然物质提取有效手段的分子蒸馏自然引起人们的重视，目前已在许多领域得到了应用。

1.3.4.1 食品工业

有害的化学物质，导致加工的食品失去其天然性。于是，研究者们便一直研究开发新技术，以解决这个问题。分子蒸馏技术最大的特点就是能尽量保持食品的纯天然性，其具有加工温度不高、无毒、无害、无残留物、无污染、分离效率高等特点。分子蒸馏技术，尤适用于热敏性天然营养素的提取分离和精制。

分子蒸馏分离混合油脂，可获纯度达90%以上的单甘油酯，如硬脂酸单甘油酯、月桂酸单甘油酯、丙二醇甘油酯等；提取脂肪酸及其衍生物，生产二聚脂肪酸等；从动植物中提取天然产物，如鱼油、米糠油、小麦胚芽油等。马传国等利用分子蒸馏技术对高酸值花椒油进行蒸馏脱酸，取得了良好效果。对于酸值高达41.2mg KOH/g的花椒籽油，脱酸后油脂酸值降至3.8mg KOH/g。二十碳五烯酸（EPA）和二十二碳六烯酸（DHA）具有很高的药用价值和营养价值，对大脑机能有活化作用，在治疗和防止动脉粥样硬化、老年性痴呆症以及抑制肿瘤等方面都有较好疗效。分别用尿素沉淀法和分子蒸馏法研究了二十碳五烯酸（EPA）、二十二碳六烯酸（DHA）乙酯的分离提纯，其实验结果表明，尿素沉淀法和分子蒸馏法都能提纯到较高的品位。两种方法对比，分子蒸馏法提纯工序简单，效率高，尿素沉淀法工序繁杂，效率低，尿素沉淀法因使用了尿素，可能会在终产品中有一定量的残留，分子蒸馏法则避免了化学残留。对鱼油进行多级分子蒸馏也能够提取高度不饱和脂肪酸酯。

1.3.4.2 油脂工业

食用乳化剂在食品加工中起乳化、分散、稳定、起泡、抗老化等重要作用。单脂肪酸甘油酯（简称单甘酯）则是其中最重要的产品，其消耗量占乳化剂总量的65%。食用油真空蒸馏脱臭、脱色是比较广泛采用的精炼工艺。

单甘酯生产的工艺路线一般是通过直接酯化或甘油酯交换反应来合成，其反应产物是单甘酯约40%~45%，其余为双酯和三酯的混合酯以及过量的甘油。双酯与单甘酯的作用不同，其表面活性只有单酯的1%；单酯有强烈的起泡作用，而双酯则是良好的消泡剂，它们分别适用于不同的食品中。

目前国际上50%是使用高纯度单甘酯。由于油脂的沸点很高，必须采用分子蒸馏技术才能进行分离得到高纯度的单甘酯。其工艺过程为：氢化动植物油脂与甘油进行酯交换，再经过滤后，反应混合物被送入分子蒸馏装置；第一级140℃、500Pa真空的条件下进行脱水、脱气，除去部分甘油；第二级175℃、75Pa真空的条件下除去剩余甘油和游离脂肪酸；第三级200~210℃、0.5Pa真空的条件下蒸馏出单甘酯除去双酯和三酯；最后液态蒸馏单酯进入喷雾系统进行制粉。

高碳脂肪醇是指二十碳以上的直链饱和脂肪醇。它们一般常与高级脂肪酸结合成酯存在于虫蜡或植物蜡中，如米糠蜡、蜂蜡、蔗蜡、棉籽蜡等，是米糠油工业的深加工高附加值的产品。

目前，国外科学家进行了大量的生理及应用研究，发现高碳脂肪醇对人体及动物具有很强的生理活性，并开发了一系列的产品。国内以天然蜡为原料提取高碳脂肪醇的工艺过程大致为：醇相皂化→溶剂萃取→有机溶剂精制。这种工艺除步骤繁多、劳动量大、欠安全外，其产品残留有机溶剂，作为保健品或药品难以获得通过。若应用分子蒸馏精制，不但避免了有机溶剂对环境的污染和对人体健康的损害，而且对前工序的残留溶剂也可进行极有效的去除，使产品达到应用于食品和药品的要求。其工艺操作安全可靠，自动化程度高，产品色泽浅，完全可与国外产品相媲美。实验结果见表1-1。

表 1-1 高碳醇的精制试验结果

批号	原料含量(C ₂₈ +C ₃₀) /%	分子蒸馏条件			蒸出物含量(C ₂₈ +C ₃₀) /%
		级别	温度/℃	真空度/Pa	
1	49.9	一级蒸馏	151	6.5	20.1
		二级蒸馏	175	4.8	64.4
		三级蒸馏	190	1.2	80.2
2	49.9	一级蒸馏	145	6.5	14.8
		二级蒸馏	160	4.8	51.3
		三级蒸馏	175	1.2	83.5

1.3.4.3 医药工业

分子蒸馏是近年来才应用于中药产业的高新技术。可用来提取合成天然维生素 A、E；制取氨基酸及葡萄糖衍生物等。

天然维生素 E 的原料可以用富含维生素 E 的植物油（如豆油、小麦胚芽油、菜油等）或其脱臭馏出物及皂脚等。如果以植物油为原料，则成本较高、得率较低；若用脱臭馏出物及皂脚作原料，则成本较低，但因脱臭馏出物及皂脚的液体混合物组分复杂，难以提纯，技术难度较大。由于维生素 E 的相对分子质量较大，沸点较高，热敏性差，易氧化，若采用普通蒸馏，产品质量难以进入国际市场参与竞争。

因此天然维生素 E 的浓缩精制采用分子蒸馏的工艺较好。其制取方法通常以油脂精炼脱臭馏出物为原料（一般含维生素 E 量 8%~20%），可将其甲酯化，然后分离出甾醇结晶，余物在 10^{-3} ~ 10^{-2} mmHg 的高真空中进行分子蒸馏，将其分为脂肪酸甲酯部分与维生素 E 浓缩部分。采用分子蒸馏反复进行操作，可进一步提高产品浓度，维生素 E 的纯度最高可达 98%，回收率在 50%~60% 左右。表 1-2 为维生素 E 浓缩工艺条件及蒸馏结果。

表 1-2 浓缩工艺条件及蒸馏结果

操作顺序	蒸馏温度 /℃	操作压力 /Pa	全馏出率 /%	原料中馏出液		
				脂肪酸/%	维生素 E/%	其他/%
原料				33.5	11.5	53.1
脱气	90	13.6	0	—	—	—
初馏-1	135	2.8	20.6	79.6	1.8	18.6
初馏-2	158	2.8	36.4	55.9	14.3	29.8
主馏-1	195	1.5	47.4	17.0	33.9	49.1
主馏-2	213	1.5	54.8	6.7	28.8	65.9

注：1. 原料装入量 16.5kg，全馏出量 9.0kg，各操作只进行一次。

2. 残渣液组成：脂肪酸 2.7%，维生素 E 3.0%，其他 94.3%。

利用离心式分子蒸馏器对大豆脱臭馏出物进行分离。先用甲醇对馏出物进行甲酯化，分离出甾醇结晶溶剂后，再于 10^{-3} ~ 10^{-2} mmHg 的高真空下进行分子蒸馏，可以得到浓缩的脂肪酸甲酯部分和维生素 E 浓缩部分。还可以利用分子蒸馏纯化大豆油中的生育酚，例如采用多级蒸馏的方法，可以得到纯度在 70% 以上生育酚浓缩物，回收率达 50%~60%。利用分子蒸馏技术对毛叶木姜子果挥发油中所含柠檬醛进行了分离纯化工艺的研究，结果所得到的柠檬醛的纯度达到了 95%，产率为 53%（柠檬醛/毛叶木姜子果油）。

1.3.4.4 香料工业

分子蒸馏用来处理天然精油，脱臭、脱色、提高纯度，使天然香料的品位大大提高，如桂皮油、玫瑰油、香根油、香茅油、山苍子油等。应用分子蒸馏精制分离技术提取天然辣椒