



Energy Saving and Intensification Technologies for Distillation Process

# 蒸馏过程节能与 强化技术

李鑫钢 等编著

Energy Saving and Intensification  
Technologies for Distillation Process



化学工业出版社



Energy Saving and Intensification Technologies for Distillation Process

# 蒸馏过程节能与 强化技术

李鑫钢 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书在编著者多年的应用基础研究和工程化实践经验的基础上编著而成,全面介绍了各种蒸馏过程节能与强化技术。节能技术主要包括设备节能、流程节能、系统节能和低温热回收利用等;蒸馏过程强化技术包括设备强化、超重力技术和催化反应蒸馏技术等,并附有节能和强化技术的工程应用实例,为从事化工分离工程的科研人员提供一本反映当今国内外蒸馏节能和强化技术新发展和新成果的参考书籍。

本书可供科研、设计及生产单位的科技人员参考,同时也可供高校化工专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

蒸馏过程节能与强化技术/李鑫钢等编著. —北京:化学工业出版社, 2011.9

ISBN 978-7-122-12161-5

I. 蒸… II. 李… III. 蒸馏-节能-技术 IV. TQ028.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 174003 号

---

责任编辑:路金辉

文字编辑:陈元

责任校对:宋玮

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张16¼ 字数324千字 2012年2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:58.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

蒸馏过程是石油化工工业中应用数量最多、能耗最大和涉及面最广的单元操作。各种蒸馏节能新技术、新操作方法、新型塔内件以及其他辅助设备应用于蒸馏过程节能降耗改造,都将会产生巨大的经济效益和社会效益,因此开展蒸馏过程的强化与节能研究十分必要。鉴于此,天津大学组织相关人员编写了本书,重在介绍蒸馏过程及设备节能主要途径,并附工程应用实例说明。本书可供有关科研、设计及生产单位的科技人员参考。

本书分七章论述:第一章蒸馏系统的能耗分析及其节能技术,综述了蒸馏过程的能量消耗特点及强化节能途径;第二章蒸馏过程设备及节能,介绍了多种新型塔内件及其辅助设备,介绍了将计算流体力学、计算固体力学方法和三维可视化技术应用于设备的设计、改进和优化以实现节能效果;第三章蒸馏过程典型节能技术,论述了热泵、增设中间再沸器和冷却器、梯级冷凝等几种典型的节能方案;第四章蒸馏过程的耦合节能技术,介绍了差压热集成、多效精馏、热耦精馏以及差压热耦合等精馏技术;第五章蒸馏过程流程节能技术,介绍了分离顺序优化、换热网络优化及控制系统优化等流程节能技术;第六章蒸馏过程低温余热的回收,介绍了精馏过程低温余热特点及回收方法;第七章蒸馏过程的强化技术,介绍了精馏技术设备强化、超重力蒸馏技术以及催化反应精馏技术等强化途径。

与已有的同类书相比,本书不仅涵盖了目前最先进的精馏过程节能途径和技术,而且包括新型塔内件设备、可视化设计新方法、耦合精馏新工艺、低温余热利用与回收、分离强化技术等,并附有实际应用案例,突出了本书的实用性。本书偏重于工程化,将为蒸馏技术在节能降耗中应用提供较全面的知识体系。

参加本书编写的人员有:李鑫钢(第一章,第七章);隋红(第二章部分内容、第五章);李洪(第三章部分内容、第四章);刘丽艳(第六章);干爱华(第二章);夏清(第三章部分内容);李永红(第七章部分内容);张敏革

(第七章部分内容);高鑫(第四章和第七章部分内容);吴巍(第一章部分内容);李国涛(第五章部分内容);高国华(第二章部分内容);崔小遯(第二章部分内容);郑艳梅(第三章部分内容)。内容校正:李鑫钢、隋红、李洪。

本书的编著工作主要由天津大学精馏技术国家工程研究中心承担,有幸得到了余国琮院士的指导和支持,在此表示衷心的感谢。

由于蒸馏强化和节能技术涉及内容繁多,且限于编著者的水平,书中难免有遗漏及不妥之处,敬请读者提出宝贵意见和建议。

编著者

2011年10月于天津大学

# 目 录

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>1. 蒸馏系统的能耗分析及其节能技术</b> | <b>1</b>  |
| 1.1 化学工业与炼油工业的能耗及节能       | 1         |
| 1.1.1 化学工业的能耗及节能          | 1         |
| 1.1.2 炼油工业的能耗及节能          | 4         |
| 1.2 蒸馏系统能耗分析              | 6         |
| 1.2.1 用能特性                | 6         |
| 1.2.2 蒸馏过程的能耗             | 6         |
| 1.2.3 蒸馏过程节能的重要意义         | 6         |
| 1.3 蒸馏系统的节能               | 7         |
| 1.3.1 节能潜力                | 7         |
| 1.3.2 蒸馏系统有效能损失分析         | 7         |
| 1.3.3 蒸馏系统的节能方案           | 8         |
| 1.4 蒸馏系统节能基本途径分析          | 9         |
| 1.4.1 蒸馏过程所需功             | 9         |
| 1.4.2 蒸馏过程不可逆性分析          | 10        |
| 1.4.3 蒸馏过程节能的基本方法         | 10        |
| 1.5 蒸馏过程强化与节能             | 11        |
| 1.5.1 蒸馏过程强化技术            | 11        |
| 1.5.2 蒸馏过程节能技术            | 12        |
| 参考文献                      | 13        |
| <b>2. 蒸馏过程设备及节能</b>       | <b>15</b> |
| 2.1 蒸馏过程设备的发展             | 15        |
| 2.2 蒸馏过程设备节能技术            | 15        |
| 2.3 现代精馏设备节能主要途径          | 16        |
| 2.3.1 计算流体力学技术            | 16        |
| 2.3.2 计算固体力学技术            | 17        |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 2.3.3 三维可视化设计技术 .....        | 18 |
| 2.4 新型填料技术 .....             | 19 |
| 2.4.1 规整填料 .....             | 20 |
| 2.4.2 散堆填料 .....             | 22 |
| 2.5 新型塔盘技术 .....             | 25 |
| 2.5.1 对气液有导向作用型浮阀塔板 .....    | 26 |
| 2.5.2 SUPER V 型浮阀塔板 .....    | 27 |
| 2.5.3 ADV 微分浮阀塔盘 .....       | 28 |
| 2.5.4 SUPERFRAC 塔板 .....     | 29 |
| 2.5.5 GSV 塔板 .....           | 29 |
| 2.5.6 DJ 塔板 .....            | 29 |
| 2.5.7 复合斜孔塔板 .....           | 30 |
| 2.5.8 波纹筛板 .....             | 30 |
| 2.5.9 SLIT 塔板 .....          | 30 |
| 2.5.10 VORTEXTRAY .....      | 31 |
| 2.6 其他关键塔内件技术 .....          | 31 |
| 2.6.1 新型液体分布器 .....          | 31 |
| 2.6.2 新型进气初始分布器 .....        | 32 |
| 2.6.3 桁架梁 .....              | 33 |
| 2.6.4 其他 .....               | 34 |
| 2.7 计算流体力学在流场和结构优化中的应用 ..... | 34 |
| 2.7.1 计算流体力学在流场计算中的应用 .....  | 35 |
| 2.7.2 计算流体力学在结构优化中的应用 .....  | 38 |
| 参考文献 .....                   | 41 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| <b>3. 蒸馏过程典型节能技术 .....</b>     | <b>46</b> |
| 3.1 蒸馏操作过程和工艺的最优化 .....        | 46        |
| 3.1.1 采用最佳回流比 .....            | 46        |
| 3.1.2 选择最佳操作压力 .....           | 48        |
| 3.1.3 选择最佳进料位置 .....           | 50        |
| 3.1.4 选择最佳进料状态 .....           | 51        |
| 3.2 热泵精馏节能技术 .....             | 52        |
| 3.2.1 热泵精馏原理 .....             | 52        |
| 3.2.2 热泵精馏流程 .....             | 53        |
| 3.2.3 热泵精馏应用范围及实例 .....        | 56        |
| 3.3 增设中间再沸器和中间冷凝器的精馏节能技术 ..... | 59        |
| 3.3.1 中间再沸器和中间冷凝器原理 .....      | 59        |

|       |                        |    |
|-------|------------------------|----|
| 3.3.2 | 中间再沸器和中间冷凝器流程 .....    | 60 |
| 3.3.3 | 中间再沸器和中间冷凝器的设置 .....   | 60 |
| 3.3.4 | 中间再沸器和中间冷凝器应用范围 .....  | 61 |
| 3.3.5 | 中间再沸器和中间冷凝器的工业应用 ..... | 62 |
| 3.4   | 梯级冷凝工艺的节能技术 .....      | 63 |
| 3.4.1 | 梯级冷凝节能原理 .....         | 63 |
| 3.4.2 | 梯级冷凝技术的工业应用 .....      | 66 |
| 3.5   | 附加回流及蒸发精馏节能技术 .....    | 70 |
| 3.5.1 | SRV 原理与流程 .....        | 71 |
| 3.5.2 | SRV 精馏的应用 .....        | 73 |
| 3.6   | 精馏过程的热量回收利用 .....      | 74 |
| 3.6.1 | 精馏过程的显热回收 .....        | 74 |
| 3.6.2 | 精馏过程的潜热回收 .....        | 78 |
|       | 参考文献 .....             | 81 |

|           |                          |           |
|-----------|--------------------------|-----------|
| <b>4.</b> | <b>蒸馏过程的耦合节能技术 .....</b> | <b>83</b> |
| 4.1       | 多塔差压热集成蒸馏节能技术 .....      | 83        |
| 4.1.1     | 差压热集成蒸馏的基本原理 .....       | 83        |
| 4.1.2     | 差压蒸馏的应用 .....            | 83        |
| 4.2       | 多效精馏节能技术 .....           | 91        |
| 4.2.1     | 多效精馏的原理 .....            | 91        |
| 4.2.2     | 多效精馏流程 .....             | 92        |
| 4.2.3     | 多效精馏节能效果与效数的关系 .....     | 94        |
| 4.2.4     | 多效精馏应用准则 .....           | 95        |
| 4.2.5     | 多效精馏的应用举例 .....          | 95        |
| 4.3       | 热耦精馏 .....               | 98        |
| 4.3.1     | 热耦精馏的基本概念 .....          | 98        |
| 4.3.2     | 热耦精馏节能原理及适用范围 .....      | 103       |
| 4.3.3     | 热耦精馏的设计 .....            | 104       |
| 4.3.4     | 工业实例分析 .....             | 106       |
| 4.3.5     | 分隔壁蒸馏塔节能技术 .....         | 110       |
| 4.4       | 差压热耦合蒸馏技术 .....          | 118       |
| 4.4.1     | 差压热耦合蒸馏技术基本原理 .....      | 118       |
| 4.4.2     | 差压热耦合蒸馏技术节能实例 .....      | 120       |
| 4.5       | 内部热交换型蒸馏技术 .....         | 122       |
| 4.5.1     | 内部热交换型蒸馏技术概述 .....       | 123       |
| 4.5.2     | 应用实例 .....               | 124       |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 参考文献 .....                  | 126        |
| <b>5. 蒸馏过程流程节能技术 .....</b>  | <b>129</b> |
| 5.1 流程节能技术的基本原理——流程重构 ..... | 131        |
| 5.2 分离顺序的优化 .....           | 131        |
| 5.3 换热网络的优化 .....           | 132        |
| 5.3.1 根据温-焓图优化换热器网络 .....   | 132        |
| 5.3.2 热力学最小传热面积网络的改进 .....  | 137        |
| 5.3.3 夹点设计法 .....           | 138        |
| 5.4 蒸馏过程流程节能技术应用实例 .....    | 153        |
| 5.4.1 吸收稳定系统 .....          | 153        |
| 5.4.2 原油常减压蒸馏 .....         | 160        |
| 5.5 蒸馏塔控制系统的优化 .....        | 166        |
| 5.5.1 背景 .....              | 166        |
| 5.5.2 目标 .....              | 167        |
| 5.5.3 控制变量 .....            | 167        |
| 5.5.4 物料平衡控制 .....          | 168        |
| 5.5.5 能量平衡控制 .....          | 169        |
| 5.5.6 成分及温度控制 .....         | 169        |
| 5.5.7 压力及冷凝器的控制 .....       | 169        |
| 5.5.8 再沸器的控制 .....          | 169        |
| 5.5.9 基于人工神经网络的估计和控制 .....  | 170        |
| 5.5.10 精馏塔节能优化控制 .....      | 170        |
| 参考文献 .....                  | 172        |
| <b>6. 蒸馏过程低温余热的回收 .....</b> | <b>174</b> |
| 6.1 蒸馏过程的低温余热 .....         | 174        |
| 6.2 蒸馏过程低温热的回收方法 .....      | 175        |
| 6.2.1 低温热的热泵回收技术 .....      | 176        |
| 6.2.2 低温热发电技术 .....         | 191        |
| 参考文献 .....                  | 201        |
| <b>7. 蒸馏过程的强化技术 .....</b>   | <b>202</b> |
| 7.1 概述 .....                | 202        |
| 7.2 蒸馏技术的设备强化 .....         | 203        |
| 7.2.1 高效塔盘和填料 .....         | 203        |
| 7.2.2 高效换热器 .....           | 212        |

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 7.2.3 | 计算流体力学在设备强化中的应用 ..... | 215 |
| 7.2.4 | 高效蒸馏设备应用实例 .....      | 221 |
| 7.3   | 超重力蒸馏技术 .....         | 225 |
| 7.3.1 | 超重力技术 .....           | 225 |
| 7.3.2 | 超重力蒸馏技术 .....         | 226 |
| 7.4   | 催化反应蒸馏技术 .....        | 229 |
| 7.4.1 | 催化蒸馏技术概述 .....        | 229 |
| 7.4.2 | 催化剂的装填 .....          | 231 |
| 7.4.3 | 催化蒸馏技术的模拟计算 .....     | 240 |
| 7.4.4 | 催化蒸馏技术的工业应用 .....     | 241 |
| 7.4.5 | 反应精馏技术与其他技术的耦合 .....  | 244 |
|       | 参考文献 .....            | 244 |

# 1. 蒸馏系统的能耗分析及其节能技术

## 1.1 化学工业与炼油工业的能耗及节能

### 1.1.1 化学工业的能耗及节能<sup>[1]</sup>

化学工业是国民经济的重要支柱产业和原材料工业，我国生产的化工产品中有70%以上直接为农业、轻纺工业提供原料。化学工业与人类生产、生活资源密切相关，主要经济指标居全国工业各行业之首。

化学工业与能源关系密切，表现在煤、石油、天然气等化石燃料及其衍生的产品不仅是化学工业的能源，而且还是化学工业的原料，这两项加起来占产品成本的25%~40%，在氮肥行业更是达到70%~80%。因此，广义的化学工业是工业部门中的第一用能大户。目前我国化学工业主要产品能源单耗比国际先进水平高40%，这主要是受能源结构、生产规模、技术和管理水平等因素限制。

欧美主要先进工业化国家的化学工业能源结构以石油、天然气、电力为主，而我国以煤为主，工业煤的消耗比例远高于工业先进国家。我国以煤为主的能源资源利用率较低，导致能耗上升和污染严重。

我国化学工业生产规模过小，这也造成化学工业能耗高于工业先进国家。以乙烯生产为例，2005年我国单套装置规模为39.7万吨/年，而西欧平均规模为51.6万吨/年，美国为70.1万吨/年，日本为48.7万吨/年<sup>[2]</sup>。合成氨面临的问题更加突出，我国合成氨总量已跃居世界第一，但60%的产量仍是由小于5万吨/年的小合成氨厂提供，而在工业发达国家规模小于10万吨/年的合成氨厂已基本淘汰。

此外，我国化学工业中各行业之间能耗差别大，即使在行业内部由于技术和管理水平发展不一，相同规模装置间产品能源单耗相差较大。以某燃料油-润滑油（润滑脂）-化工型企业为例，该企业拥有常减压、催化裂化、柴油加氢改质、酮苯脱蜡（脱油）、催化重整等多套装置，总加工能力达300万吨/年，由于装置加工流程长、产品加工深度大等原因，在实施优化公用系统（蒸汽系统、燃料系统、水系统、电系统）和加强装置间的热联合等节能措施后，到2008年全厂综合能耗降低到85.33kg标油/t，相比国内先进企业仍有较大差距。该企业计划采用改造催化装置余热锅炉、提高加热炉热效率、开展热联合、综合优化动力系统和充分利用低温余热等节能技术，使能耗进一步降低12.9%~24.6%，达到国内先进能耗

水平<sup>[3,4]</sup>。

由此可以看出,我国化学工业能耗与先进工业国家之间存在较大差距,现有能源利用率不足,具有很大的节能潜力。

化学工业节能并非简单地少用能源,而是运用技术成熟、经济合理的方法,充分有效地发挥能源的作用。根据第一次全国经济普查数据显示,2004年我国的GDP占世界的份额只有4.4%,而我国消费的煤和石油却分别占全世界消费总量的31%和7.4%。这说明我国能源并没有得到充分利用,能源问题已成为我国经济发展所面临的严峻问题,合理、有效地利用能源是国民经济持续、快速、健康发展的重要保证。

具体到我国化学工业,能源利用率仅为美国和日本的一半左右,倘若化学工业能源利用率提高1%,能节约150万吨标准煤。化学工业的节能水平是由错综复杂的多种因素所决定的,如自然条件、经济体制、经济因素、管理水平、政策导向、社会因素、技术水平等,这些节能方法可被归为节能的三个方面。

(1) 结构节能 我国经济的单位产值能耗较高,除了技术和管理水平落后外,经济结构不合理也是重要的原因,主要包括以下四个方面。

① 产业结构 不同行业、不同产品对能源的依赖程度是不同的,需要依据各工业之间的比例关系,合理调整各工业之间的比重,形成节能型产业结构,如增加省能型工业的比重,减少耗能型工业的比重,那么,产业结构就会朝着节省能源的方向发展。

② 产品结构 产品结构应努力向高附加值、低能耗的方向发展。如工业发达国家化学工业结构中低能耗、附加值高的精细化工发展迅速,到20世纪末期欧美、日本等发达国家和地区精细化工率已达70%,而我国在2010年仅达到45%左右。所以,应大幅增加石油化工、精细化工、生物化工、医药化工及化工新材料等能耗低而附加值高的行业。

③ 企业结构 中小企业与一般大型企业相比,具有规模小、行业发展水平低、技术装备落后等特点,中小企业能耗水平、环境污染程度远远高于大型企业。所以应有步骤地调整企业的结构,缺乏竞争力及高耗能的小企业应关、停、并、转,对新建厂应有经济规模的限制。

④ 地区结构 需将资源优化配置,调整部分耗能型工业的地区结构。如将耗能型工厂建在能源富裕地区或矿产资源就近地区;在集中了我国主要原油、地理位置靠海而便于石油进口的东部地区,应发展石油化工;在我国煤炭主要产地的中部地区,则应发展煤化工和电力工业。

(2) 管理节能 管理节能主要分为宏观调控层次和企业经营管理层次。

① 宏观调控 主要是指国家通过制定有关能源节约的法律、法规对产业发展进行规范,通过价格政策、税收等手段对产业发展进行调控,以降低能源消耗。如理顺能源价格,提高节能经济效益;对节能项目应优先给予贷款方优先支持;对节

能产品和节能新技术转让实行税收方面的优惠。

② 企业经营管理 建立健全能源管理机构,以管理和监督能源的合理使用,制定节能计划,实施节能措施,并进行节能培训等;建立企业的能源管理制度,对各种设备及工艺流程要制定操作规程,对各类产品确定能耗定额,对节约和浪费能源建立相应的奖罚制度等;合理组织生产,根据原料、能源、生产任务的实际情况确定设备的合理负荷率,并根据生产工艺按质用能,注意能质匹配和梯级用能;加强计量管理,建立健全仪表维护检修制度,强化节能监测,推动定额管理、能量平衡、经济核算和计划预测等一系列科学管理工作的深入开展。

### (3) 技术节能

① 工艺节能 工艺节能技术主要包括化学反应器和分离工程,其中化学反应器又取决于催化剂和化学反应工程两个方面因素。

a. 催化剂。催化剂在现代化学工业中占有极其重要的地位,约有 80%~90% 的化学工艺使用催化剂。性能良好的催化剂可以形成更有效的工艺过程,使反应转化率和选择性大幅度提高,反应温度和压力条件更加温和,产品单位能耗显著下降。

b. 化学反应工程。化学反应通常伴随着动量、质量和热量传递,强化传递过程、合理利用反应热效应可以降低能耗。

分离过程可分为两类:机械分离,例如过滤、沉降、离心分离、旋风分离和静电除尘等;传质分离,包括闪蒸和部分冷凝、精馏、吸收、结晶、吸附、离子交换、膜分离等。每一类方法又包含多种方法,依据工艺要求选择合适的方法可以有效降低能耗,如开发有机物/有机物分离的渗透汽化膜过程,以取代传统的精馏操作或与精馏过程集成,包括从汽油中分离苯,从柴油中分离芳烃等。还可以改进工艺方法和设备,如精馏塔由板式塔改为规整填料塔,可以减少全塔压降,降低塔底温差,减少回流比,减少能量消耗。

② 化工单元操作设备节能 化工单元操作设备种类繁多,各类设备都有其特有的节能方式,如:流体输送机械,需选择与负荷匹配的机械,并注意调节转速,使机械处于最佳效率下工作;换热设备可加强设备保温,防止结垢,保持合理传热温差,强化传热;对锅炉和加热炉可控制过量空气,预热燃烧空气,提高燃烧特性,降低排烟温度,减少散热损失;蒸发设备可采用多效蒸发、二次蒸汽的利用、冷凝水的利用、热泵蒸发等节能措施;塔设备节能措施较多,如采用热泵、多效精馏、增设中间再沸器和冷凝器、多级冷凝、热耦精馏、差压热耦技术等;干燥设备节能可考虑如下途径,提高进气温度和降低出口温度以减少热风用量、循环利用出口热风、回收余热、热泵干燥、太阳能干燥等。

③ 化工过程系统节能 化工过程系统节能是指从系统合理用能的角度,对生产过程中与能量的转换、回收、利用等有关的整体系统所进行的节能工作,主要包括:合理配置整个工艺过程;系统工程中能量分级利用和综合利用;回收利用好低位能。如云南解化集团的鲁奇炉出口温度不到 200℃,但煤气带有大量蒸汽,过去

耗费大量冷却水, 现在通过废热锅炉产生低压蒸汽用于低温甲醇洗脱碳的氨吸收制冷方面, 替代电驱动冰机。

④ 控制节能 一方面节能需要操作控制, 通过仪表加强计量工作, 做好生产现场的能量衡算和用能分析, 为节能提供基本条件; 系统在节能改造后, 设备之间、物流之间关联紧密, 操作弹性下降, 使得操作控制成为必需; 在生产过程中, 各种参数的波动是不可避免的, 若对生产进行即时优化, 将能取得很大的节能效果。计算机使得这种优化控制成为了可能。另一方面是通过操作控制节能, 如准确控制工艺参数, 保证产品质量合格但又不过剩, 以减少过程能量消耗。控制节能投资小、潜力大、效果好, 目前尚未引起足够的重视, 但以后会大有发展。

### 1.1.2 炼油工业的能耗及节能<sup>[6]</sup>

炼油工业是提供发动机和炉用燃料的二次能源生产部门。炼油工业既加工能源, 又在加工过程中消耗能源, 属能量密集行业。我国原油加工能力已居世界第二位, 截至 2010 年末, 我国原油加工能力约 5 亿吨/年, 拥有千万吨级炼厂 17 家, 2010 年全国原油加工量约 4.2 亿吨。我国已成为炼油大国, 但仍未成为炼油强国: 2005 年中国石化(中国石油化工集团公司)炼油综合能耗为 68.59kg 标油/t, 比国外综合水平高出 28.9%, 节能潜力相当于新增一个年产 500 万吨级的油田; 从炼油厂综合商品率看, 国外一般为 92.5%, 日本可达 95.2%, 而我国平均只有 90.68%, 这意味着我国每加工 1 亿吨原油, 就比国外少产 186 万吨成品油, 损失达十几亿元。这说明我国能源利用率与国际先进水平相比仍有较大差距, 所以开发节能降耗新技术与新装备, 是长期且十分重要的研究课题。近 20 年来, 随着装置大型化和先进设备与先进技术的应用, 我国主要炼油生产装置能耗逐年降低, 到 2006 年中国石化和中国石油(中国石油天然气集团公司)两大集团综合能耗在 70kg 标油/t 以上, 单因能耗 12~13kg 标油/(t·因数)左右, 但国外炼油综合能耗最好水平已达 53.2kg 标油/t, 单因能耗 9.5~10kg 标油/(t·因数), 这说明我国的平均能耗较国外水平仍有一定差距, 存在较大的节能潜力和经济效益。

我国的炼油工业, 可通过以下措施进行节能。

(1) 优化能量供需 进行能量平衡测试和平衡分析, 不仅考虑能量在数量上守恒, 还要反映能量质量在转换、传递及利用过程中的变化。能量优化通过用能分析, 找出节能潜力, 一般不用改动设备和机器, 只需加以调整就可以做到节能。这种优化过程, 已经打破单元之间、工艺装置与公用工程之间, 甚至工厂与工厂之间的局部界限, 在全局范围内通过联合优化匹配、按需产能、梯级用能使能位逐级多次利用, 来实现总体优化的节能效益。夹点技术、能量三环节分析等先进的节能理念和方法在工艺设计中的广泛应用, 取得了投资少、节能效益好的效果。

(2) 优化工艺与操作 选用先进的节能工艺是过程高效用能的内在因素, 也是从工艺环节出发, 降低工艺总能耗的首要措施。CDTech 公司的 CDHydro/

CDHDS 工艺将加氢脱硫反应与催化蒸馏技术组合在一座塔器中进行, 该工艺采用二段法催化蒸馏使 FCC 汽油脱硫率可大于 99.5%, 而且产率高, 辛烷值损失小<sup>[6]</sup>。开发在线清洗技术可确保换热器在良好的传热条件下工作, 如美国海湾石油公司费城炼油厂在表面冷凝器管束中安置尼龙刷式自动刷洗系统, 我国荆门炼油厂在 FCC 装置气压机表面冷凝器安装在线清洗系统。加强炼油上、下游装置间物料的热联合, 在大系统内进行“高热高用, 低热低用”匹配, 合理用能, 提高用能效率, 减少公用工程消耗。

(3) 低温余热回收 在炼油生产过程中消耗的能量除一部分转入产品之中外, 绝大部分高品位能量变成低品位能量, 并以各种形式排放至环境而损失掉, 对其的回收利用是深入节能的重要领域, 包括同级利用和升级利用。同级利用就是根据低温热源的温位, 选择适宜的用户利用低温余热直接或间接代替高、中位热源; 升级利用是指通过热泵 (如吸收式热泵和化学热泵)、制冷 (如溴化锂吸收剂制冷) 或发电机组 (有机朗肯循环热机) 将低温余热转化为电、冷水或其他高品位的能源再进行利用。

(4) 选用优化设备 采用高效节能设备, 可使炼油装置获得节能降耗效益, 如: 在美国、瑞士、加拿大等国炼油厂的原油蒸馏装置上应用的高效板式换热器, 可使预热系统与加热原油有关的能量费用节省 25% 或者更多一些, 取得良好节能效果<sup>[7]</sup>; 在加热炉改进中, 应用新型节能燃烧器、磁化器, 提高燃料的燃烧效率, 通过微机进行燃烧过程管理, 实现低氧燃烧, 并应用冷进料、回转式、波纹管、扰流子及热管等空气预热器或其组合, 回收烟气余热; 采用规整填料代替板式塔, 降低流动阻力, 可使压降减小至约 1/3, 从而使每吨油降低能耗 3.4kg 标油<sup>[8]</sup>; 变频调速、液力耦合器调速等高效节能机泵可使泵在最高效率点附近工作; 选用新型保温材料, 减少加热炉、储罐等设备和管道热损失, 是重要的节能措施。

(5) 优化控制管理系统 现代工厂控制管理已经不是单纯的生产过程控制, 而是包括了各类管理的广义的控制。控制管理系统不仅谋求工艺过程或单元设备的局部优化, 而且涉及将企业所有活动组合在一起的总体优化, 因此控制管理系统的水平和质量直接关系到生产运行的质量。实现控制系统的主要设备是多级工厂网络中的各类计算机群和微处理器化的仪器仪表和辅助设备, 工厂控制系统中的各类通用和专用软件可根据需要实现不同层次的控制管理。分散型控制系统 DCS 将管理、操作、控制、开发和维护功能融为一体; 专家系统作为一种高级的先进控制策略, 在生产开停工、产率管理、异常诊断、质量控制等方面起到了优化控制的作用; 国外崛起的 TFA (总工厂自动化) 和 CM (计算机一体化) 系统, 综合生产过程控制层、数据处理及工厂管理层、企业决策层以实现总体优化。

(6) 装置的大型化 蒸馏过程通过关键设备大型化实现规模效应, 可以提高设备效率, 减少废物排放, 减少操作人员, 从而降低设备投资和过程能耗。据美国能源部资料, 建设 1 座加工能力为 1000 万吨/年的炼油厂, 相比建设 2 座 500 万吨/

年的炼油厂，投资可节省 20% 左右，劳动生产率提高 21%；而 1 座炼能 1000 万吨/年炼油厂与 4 座 250 万吨/年规模炼油厂相比，加工费用可减少 0.15 美元/立方米，生产成本降低 12%~15%。如中石化镇海炼化 2010 年上半年加工原油 1001.7 万吨，综合能耗降到 48.91 千克标油/吨，优于国内大部分炼厂，节能减排和经济效益显著。

## 1.2 蒸馏系统能耗分析

### 1.2.1 用能特性

蒸馏是化学工业中能耗高，余热大的化工单元操作。从能量本质来分析，蒸馏过程是将物理有效能转化为扩散有效能的过程，过程中伴随着物理有效能的降阶损失。造成蒸馏过程有效能损失的原因是混合相浓度不平衡物流间的传质或不同浓度物流间的混合、不同温度物流之间的传热、流体流动的压力降的不可逆性<sup>[9]</sup>。

蒸馏过程通过多级冷凝蒸发，实现不同沸点组分从混合液中的分离。在一般蒸馏塔中，再沸器 95% 的能量被塔顶冷凝器中的冷却水或冷却空气带走，而仅 5% 的能量被有效利用。同时又由于换热设备结垢、水蒸气泄漏，以及设备维修不良而引起的其他问题等，使得蒸馏过程本来很低的能量利用率进一步降低<sup>[5]</sup>。

### 1.2.2 蒸馏过程的能耗

化学工业和炼油工业是国民经济中能耗最大的加工业，约占全国工业能耗的 25%，据估算分离过程能耗占到化学工业和炼油工业能耗的 40% 以上。而蒸馏过程具有处理量大和连续操作的优势，其应用广度明显高于结晶、吸附和萃取等传统分离过程，蒸馏能耗占整个分离过程能耗的 50%~70%。

表 1-1 列出了我国化学工业能源消耗量，从而可推算出我国蒸馏过程系统消耗的能量相当大，其能量消耗相当于发达国家 20 世纪 70 年代的水平。由此可见，我国蒸馏过程的能量利用率还很低，有很大的节能潜力。

表 1-1 化学工业能源消耗量和构成

| 年份   | 原煤<br>/万吨 | 焦炭<br>/万吨 | 原油<br>/万吨 | 重油<br>/万吨 | 天然气<br>/亿立方米 | 电力<br>/亿千瓦时 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------|
| 1999 | 8347.24   | 1004.37   | 1613.21   | 500.13    | 83.91        | 1134.91     |
| 2000 | 7886.23   | 1057.39   | 1609.84   | 507.84    | 90.32        | 1204.00     |
| 2001 | 7414.54   | 1061.49   | 1823.37   | 496.66    | 95.50        | 1291.49     |
| 2002 | 7782.65   | 1171.40   | 1877.01   | 515.47    | 102.02       | 1464.23     |

### 1.2.3 蒸馏过程节能的重要意义

蒸馏过程能耗高、余热量大，系统中动量、热量和质量传递推动力越大，则系

统能量损失越大。我国能源利用率较低,据估计我国化工万元产值能耗为工业发达国家的 2.5~6 倍,能耗一般只相当于工业先进国家 20 世纪 70 年代末的水平。在化学工业和炼油工业的节能改造过程中,蒸馏过程节能所创造的经济效益居各装置之首。蒸馏节能技术和工艺不断发展,对于节约设备投资、减少能源消耗、降低生产成本和保护环境具有十分重要的意义。

## 1.3 蒸馏系统的节能

### 1.3.1 节能潜力

蒸馏过程能耗大,蒸馏节能一直是节能研究的重点。在美国,1976 年蒸馏能耗约为 315Mbbl/a 原油 (1bbl=1 桶=159L),而 1991 年蒸馏能耗达到 438Mbbl/a 原油,能耗量增加了 1.39 倍,而总产值增加了 2 倍多,蒸馏能耗的增长速度远小于产值的增长速度,因此相当于节能 192Mbbl 原油<sup>[10~12]</sup>。

通过几十年的发展,我国蒸馏装置的节能效果十分显著,创造了显著的经济效益。如我国原油的炼油技术水平低、装置规模小、能耗高,总能耗约折合原油加工量的 8.73%,相当于消耗一个年产 2800 万吨的油田。2005 年我国石化炼油综合能耗为 68.59kg 标油/t,比国外水平高出 28.9%,其节能潜力相当于新增一个年产 500 万吨级的油田<sup>[13]</sup>。由此可见,我国蒸馏装置仍有很大的节能潜力,需要进一步推广行之有效的节能措施。

### 1.3.2 蒸馏系统有效能损失分析<sup>[14]</sup>

蒸馏过程是将物理有效能转化为扩散有效能的过程,并且过程中伴随着物理有效能的降阶损失。因此要降低精馏系统的能耗就应当降低其有效能损失,精馏系统有效能损失的形式有以下四种。

(1) 由非平衡的物流在塔板上混合造成的有效能损失 对于常规精馏塔来说,进、出塔板的汽液相物质在组成及温度上处于不平衡状态,它们在塔板上直接混合,造成精馏塔内有效能损失。因此要降低由于非平衡的物流在塔板上直接混合造成的有效能损失,就必须减少各板传热及传质推动力,尽量使操作线与平衡线靠近,这点可以在工艺上,通过蒸馏本身的热集成实现。

(2) 由流体流动的压力降造成的有效能损失 流体流动过程必须有一定的压差作为推动力,而压差越大,则造成的有效能损失越大。一般来说,塔板上液层越厚,板数越多则压差越大,有效能损失也越大。因此减小有效能损失的途径有增大塔径、降低板上液层高度,但必然会增加设备投资,降低塔板效率。因此,需要综合考虑上述因素。

(3) 由换热过程的温差造成的有效能损失 在塔釜再沸器、塔顶冷凝器以及