

# 化工节能原理与技术

冯霄 李勤凌 编著

化学工业出版社

化工节能原理与技术

# 化工节能原理与技术

冯 霄 李勤凌 编著

化学工业出版社

·北 京·

# (京)新登字 039 号

## 图书在版编目(CIP)数据

化工节能原理与技术/冯霄,李勤凌编著. —北京:化学工业出版社,1998.1

ISBN 7-5025-2075-9

I. 化… II. ①冯… ②李… III. 化学工业-节能 IV. TQ083

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 26912 号

---

### 化工节能原理与技术

冯霄 李勤凌 编著

责任编辑:陈丽

责任校对:陶燕华

封面设计:于兵

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

\*

开本 850×1168 毫米<sup>1/32</sup> 印张 7<sup>5/8</sup> 字数 211 千字

1998 年 1 月第 1 版 1998 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500

ISBN 7-5025-2075-9/TQ·1021

定价:18.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

## 内 容 提 要

本书系统介绍了化工节能的理论与技术,包括当前最先进的节能技术如夹点技术、膜分离等。本书还介绍了作者在近年来在化工节能方面创造性的技术成果,如不同节能方法的比较,热泵的经济可行的应用范围,夹点技术的新进展等。全书共分五章:总论、节能的热力学原理、化工单元过程与设备的节能、几种新型的具有节能效果的设备、过程系统节能——夹点技术。

本书内容系统、全面、学科体系较完整,概念清晰,理论联系实际,实用性较强。对从事化工节能的管理人员、技术人员、大专院校有关专业的师生有一定的参考价值。

21.193

# 目 录

<b>第 1 章 总论</b> .....	1
1.1 能源与能源的分类 .....	1
1.1.1 能源 .....	1
1.1.2 能源的分类 .....	1
1.2 化学工业节能的潜力与意义 .....	4
1.2.1 我国化学工业的特点 .....	4
1.2.2 化学工业节能的潜力 .....	5
1.2.3 节能的意义 .....	7
1.3 节能的途径 .....	7
1.3.1 结构节能 .....	8
1.3.2 管理节能 .....	9
1.3.3 技术节能 .....	10
参考文献 .....	13
<b>第 2 章 节能的热力学原理</b> .....	15
2.1 基本概念 .....	15
2.1.1 热力系统 .....	15
2.1.2 平衡状态 .....	17
2.1.3 状态参数 .....	17
2.1.4 功和热量 .....	20
2.1.5 可逆过程 .....	21
2.2 能量与热力学第一定律 .....	22
2.2.1 封闭系统能量衡算式 .....	22
2.2.2 稳定流动开口系统能量衡算式 .....	23
2.3 焓和热力学第二定律 .....	27
2.3.1 热力学第二定律的几种表述 .....	27
2.3.2 熵的概念和孤立系统熵增原理 .....	29
2.3.3 热力学第二定律的熵衡算方程式 .....	30

2.3.4	能量和焓 .....	31
2.4	能量的焓计算 .....	33
2.4.1	环境与物系的基准状态 .....	33
2.4.2	机械形式能量的焓 .....	35
2.4.3	热量焓 .....	36
2.4.4	封闭系统的焓 .....	39
2.4.5	稳定流动系统的焓 .....	39
2.4.6	化学反应的最大有用功 .....	41
2.4.7	气体的扩散焓 .....	45
2.4.8	元素和化合物的化学焓 .....	45
2.4.9	燃料的化学焓 .....	48
2.5	焓损失和焓衡算方程式 .....	49
2.5.1	焓损失和焓衡算方程式 .....	49
2.5.2	封闭系统的焓衡算方程式 .....	50
2.5.3	稳定流动系统的焓衡算方程式 .....	52
2.6	装置的焓效率和焓损失系数 .....	53
2.6.1	焓效率的一般定义 .....	53
2.6.2	焓效率的不同形式 .....	54
2.7	可避免焓损失与不可避免焓损失 .....	56
	符号表 .....	59
	参考文献 .....	60
<b>第3章</b>	<b>化工单元过程与设备的节能 .....</b>	<b>62</b>
3.1	流体流动及流体输送机械 .....	62
3.1.1	流体流动 .....	62
3.1.2	流体机械 .....	62
3.2	换热 .....	64
3.2.1	换热过程 .....	64
3.2.2	设备和管道的保温 .....	66
3.3	蒸发 .....	67
3.3.1	多效蒸发 .....	68
3.3.2	额外蒸汽的引出 .....	74
3.3.3	冷凝水热量的利用 .....	76
3.3.4	二次蒸汽的再压缩 .....	76

3.4 精馏 .....	81
3.4.1 预热进料 .....	83
3.4.2 塔釜液余热的利用 .....	84
3.4.3 塔顶蒸气余热的回收利用 .....	85
3.4.4 减小回流比 .....	86
3.4.5 增设中间再沸器和中间冷凝器 .....	87
3.4.6 多股进料和侧线出料 .....	89
3.4.7 热耦精馏 .....	94
3.4.8 多效精馏 .....	95
3.4.9 热泵精馏 .....	100
3.5 干燥 .....	106
3.5.1 排气的再循环 .....	106
3.5.2 采用换热器的余热回收 .....	107
3.5.3 热泵的应用 .....	107
3.5.4 其他 .....	108
3.6 反应 .....	109
3.6.1 化学反应热的有效利用或提供 .....	109
3.6.2 反应装置的改进 .....	112
3.6.3 催化剂的开发 .....	113
3.6.4 反应与其他过程的组合 .....	114
符号表 .....	120
参考文献 .....	121
<b>第4章 几种新型的具有节能效果的设备 .....</b>	<b>122</b>
4.1 热管换热器 .....	122
4.1.1 热管工作原理 .....	122
4.1.2 热管工作特性 .....	124
4.1.3 热管换热器及其设计计算 .....	128
4.1.4 热管换热器应用举例 .....	134
4.2 热泵 .....	136
4.2.1 压缩式热泵 .....	137
4.2.2 吸收式热泵 .....	140
4.2.3 蒸汽喷射式热泵 .....	145
4.2.4 第二类吸收式热泵 .....	148

4.2.5	经济上可行的工业热泵的临界 COP .....	149
4.3	蓄热器 .....	151
4.3.1	蓄热器的用途 .....	151
4.3.2	蓄热器的原理 .....	152
4.3.3	蓄热器的热力计算 .....	154
4.3.4	蓄热器的连接系统 .....	156
4.4	膜分离 .....	157
4.4.1	概述 .....	157
4.4.2	反渗透 .....	157
4.4.3	超滤 .....	160
4.4.4	电渗析 .....	162
4.4.5	气体膜分离 .....	163
4.5	变压吸附 .....	164
	符号表 .....	167
	参考文献 .....	168
<b>第5章</b>	<b>过程系统节能—夹点技术 .....</b>	<b>169</b>
5.1	绪论 .....	169
5.1.1	过程系统节能的意义 .....	169
5.1.2	夹点技术的应用范围及其发展 .....	172
5.2	夹点的形成及其意义 .....	174
5.2.1	温-焓图和复合曲线 .....	174
5.2.2	夹点的形成 .....	176
5.2.3	问题表法 .....	179
5.2.4	夹点的意义 .....	182
5.3	换热网络设计目标 .....	183
5.3.1	能量目标 .....	183
5.3.2	换热单元数目目标 .....	183
5.3.3	换热网络面积目标 .....	185
5.3.4	经济目标 .....	186
5.3.5	最优夹点温差的确定 .....	187
5.4	换热网络优化综合 .....	188
5.4.1	夹点技术设计准则 .....	188
5.4.2	流股的分支 .....	191



5.4.3	热负荷回路的断开与换热单元的合并 .....	194
5.4.4	阈值问题 .....	201
5.4.5	换热网络改造综合 .....	202
5.4.6	换热网络优化综合实例 .....	206
5.5	蒸汽动力系统优化综合 .....	210
5.5.1	总复合曲线 .....	211
5.5.2	多级公用工程的配置 .....	213
5.5.3	热机的设置 .....	216
5.5.4	热泵的设置 .....	220
5.6	分离系统优化综合 .....	221
5.6.1	精馏系统的热集成 .....	222
5.6.2	分离系统在整个过程系统中的合理设置 .....	227
	符号表 .....	230
	参考文献 .....	231

# 第 1 章 总 论

## 1.1 能源与能源的分类

### 1.1.1 能源

能源是指可以直接或通过转换为人类生产与生活提供能量和动力的物质资源。世界能源大会推荐的能源类型有：固体燃料(如煤炭、焦炭)、液体燃料(如石油、酒精)、气体燃料(如天然气、煤气、氢气)、水力、电能、核能、风能、太阳能、地热能、海洋能、生物质能、核聚变等。它们可以按人类的需要被转化为热能、机械能、电能、光能、声能、化学能等形式加以利用。

能源是发展国民经济和保障人民生活的重要物质基础。世界各国经济、技术发展的事实表明，能源消耗与国民生产总值之间有着非常密切的关系。在正常情况下，能源消费量的增长速度和国民生产总值的发展速度之间成正比关系。因此，若要加快国民经济的发展，就必须保证能源消费量有相应的增长速度。反之，如果能源供应不足，则会影响国民经济的发展，甚至造成巨大的损失。例如从 70 年代开始，发生了石油危机，主要工业国家国民生产总值的增长率普遍下降。1975 年，美国由于短缺 1.16 亿吨标准煤，使国民生产总值减少了 930 亿美元；日本由于短缺 0.6 亿吨标准煤，国民生产总值减少了 485 亿美元。其他工业国家也相类似。据分析估算，由于能源不足引起的国民经济损失大约为能源本身价值的 20~60 倍。

由于能源消费急剧增加，造成能源供应紧张，而容易被利用的能源资源有限，因此，世界各国都在积极寻找各种方法，更加有效地开发和利用能源。可以说，能源问题已成为一个世界性的突出问题。

### 1.1.2 能源的分类

根据不同的基准，能源有不同的分类方法。

1107666

### 1.1.2.1 按其来源分类

按其来源分类,能源可分为三大类。

(1)来自地球以外天体的能量,其中最主要的是太阳辐射能。目前人类所用的绝大部分能源,都直接或间接地来源于太阳能。各种植物通过光合作用,把太阳能转化为化学能,在植物体内储存下来,形成生物质能。煤炭、石油、天然气等矿物燃料就是由古代动植物沉积在地下经过漫长的地质年代形成的,而其能量来源于固定下来的太阳辐射能。水能、风能、海洋能等也来源于太阳辐射能,太阳的辐射使地球表面的水分蒸发,上升为高空中的水汽,而后又凝结以雨雪的形式返回地面,在高山地区的雨水通过江河流向大海,形成了巨大的水力资源。地球表面各地不均匀的太阳辐射热,使各处大气中的温度和压力不同而导致了空气流动,形成了风能。风力还使海洋表面的水形成波浪能;由于海洋各处接受太阳辐射强度的不同而形成了海洋能;同时海洋表面和内部温度的不同形成了海洋温差。

从数量上看,太阳能非常巨大。据估计,地球表面一年从太阳获得的总能量可达174000TW/a。但太阳能能量密度比较低,又受到气候变化的影响,目前尚难以加以利用。当前主要是利用太阳能直接供热,如提供热水、房间采暖、太阳灶做饭、空调制冷、海水淡化、干燥等。太阳能发电等尚处于实验阶段。

(2)地球本身蕴藏的能量,主要有地热能和原子核能。地球内部有大量热源,在45亿年以前地球形成以来逐步冷却,至今地球的核心部分仍具有5000℃的高温,因此,地球本身是个大热库。地热能的数量很大,但品位低,因此开发数量不大,仅有一些温泉和少量的地热发电站是利用地热能。原子核能是某些物质(如铀、钍、氘和氚等)的原子核在发生反应时释放出来的能量。原子核反应有裂变反应和聚变反应两种。现在各国的原子能电站,都是使用铀原子裂变时放出的能量。核聚变能量的和平利用尚在研究之中。

(3)地球和其他天体相互作用而产生的能量,如潮汐能。地球和月亮、太阳之间的引力和相对位置的变化,使海水涨落形成了潮汐能。目前人类对潮汐能还利用得很少,仅建成少量的潮汐发电站。

### 1.1.2.2 按能源的转换和利用层次分类

按有无加工转换,可将能源分为三大类。

(1)一次能源:自然界自然存在的、未经加工或转换的能源。如原煤、石油、天然气、天然铀矿、水能、风能、太阳辐射能、海洋能、地热能、薪柴等。

根据能否再生,一次能源可再分为可再生能源与非再生能源。

①可再生能源:指那些可以连续再生,不会因使用而日益减少的能源。这类能源大都直接或间接来自太阳,如太阳能、水能、风能、海洋能、地热能、生物质能等。

②非再生能源:指那些不能循环再生的能源,如煤炭、石油、天然气、核燃料等,它们随人类的使用而越来越少。

(2)二次能源:为满足生产工艺或生活上的需要,由一次能源加工转换而成的能源产品。如电、蒸汽、煤气、焦炭、各种石油制品。

(3)终端能源:通过用能设备供消费者使用的能源。二次能源或一次能源一般经过输送、储存和分配成为终端使用的能源。

### 1.1.2.3 按使用状况分类

按人类使用能源的状况,又可将能源分为常规能源和新能源。

(1)常规能源:指那些开发技术比较成熟、生产成本比较低、已经大规模生产和广泛利用的能源。如煤炭、石油、天然气、水力等。

(2)新能源:指目前尚未得到广泛使用、有待科学技术的发展以期更经济有效开发的能源。如太阳能、地热能、潮汐能、风能、原子能等。

这种分类是相对的。例如核裂变应用于核电站,目前基本上已经成熟,就要成为常规能源。即使是常规能源,目前也在研究新的利用技术,如磁流体发电,就是利用煤、石油、天然气作燃料,把气体加热成高温等离子体,在通过强磁场时直接发电。又如风能、沼气等,使用已有多年历史,但目前又采用现代技术加以利用,也把它们作为新能源。

### 1.1.2.4 按对环境的污染程度分类

按对环境的污染程度,能源可分为清洁能源和非清洁能源。

(1)清洁能源:无污染或污染小的能源,如太阳能、风能、水力、海洋能、氢能、气体燃料等。

(2)非清洁能源:污染大的能源,如煤炭、石油等。

## 1.2 化学工业节能的潜力与意义

### 1.2.1 我国化学工业的特点

化学工业是国民经济中的重要原材料工业。我国生产的化工产品中,有70%以上直接为农业、轻纺工业提供化肥、农药、配套原料和生活必需品,所以同农业、轻纺工业和国民经济各部门的发展以及人民生活水平的提高关系极大。

化学工业有一个重要的特点,就是煤、石油、天然气等,既是化学工业的能源,又是化学工业的原料,该两项加起来占产品成本25%~40%,在氮肥行业达70%~80%。因此广义的化学工业是工业部门中的第一用能大户。这一特点使得节能工作在化学工业中有着极为重要的意义。

在化工生产中需要进行一系列化学反应,有的反应是吸热反应,即反应过程中要吸收热量;另一类反应是放热反应,即反应过程中放出热量。化工生产往往需要在较高的温度、压力下操作,有的甚至采用电解、电热等操作,因而对热能和电能的需求量较大。被加热了的物料往往还要进行冷却,需要大量的冷却水,故化学工业也是用水大户。化学工业能量消费的复杂性,使得工艺与动力系统的紧密结合成为现代化学工业的一个显著特点。因此,抓住节能这个重要环节,也就抓住了化学工业现代化的一个关键。

能源消费以煤为主,是我国化学工业不同于世界其他国家化学工业的一个特点。下表给出了各国化学工业固体能源消费比例,可见我国化学工业煤的消耗比例要大大地高于先进的工业国家。这是由于我国的能源资源是以煤为主所致。这种能源消费结构,带来能耗上升和污染严重的后果。

各国化学工业的固体能源消费比例

国 别	美国	德国	日本	英国	中国
固体能源消费,%	9.3	14.5	6.3	1.8	55.4

大宗化学品生产规模太小,是我国化学工业不同于其他国家的又一特点。国外炼油厂规模一般在 1000 万 t/a 以上,而国内达到此规模的炼厂属凤毛麟角。再以乙烯生产工厂为例:西欧平均规模为 40 万 t/a,美国为 104.7 万 t/a,日本为 53.7 万 t/a,而我国只有 21.7 万 t/a(其中一半生产量由 11.5 万 t/a 生产厂提供)。合成氨更是如此,虽然我国合成氨产量已跃居世界第一,但工业发达国家中规模小于 10 万 t/a 的合成氨厂已基本不存在了,而我国 60% 的产量是由小于 5 万 t/a 的小厂提供的。生产规模太小,是造成我国化工生产消耗指标偏高的另一重要原因。

化学工业内部行业很多,各行业之间能耗差别很大,这一点是化学工业不同于其他工业的一个特点。而我国的化学工业即使同一行业之间,差距也不小,这一点又是不同于其他国家的。以合成氨和氯碱厂为例,即使同类原料同类规模的生产企业之间单位产品能耗相差也很大,大、中企业可以差别 20%~50%,小企业可差 67%~68%。

### 1.2.2 化学工业节能的潜力

节能就是应用技术上可行、经济上合理、环境和社会可以接受的方法来有效地利用能源。所以,节能并不简单地意味着少用能源,其实质是充分有效地发挥能源的作用,使同样数量的能源,可以提供更多的有效能,从而生产出更多、更好的产品,创造出更多的产值和利润。

节能潜力有两种涵义:(1)节能总潜力;(2)可实现的节能潜力。节能总潜力为一技术极限值,取决于现有的技术以及根据热力学计算的理论极限值。可实现的节能潜力是指技术成熟、经济合理、预计在一定时期内可实现的节能量,其取决于技术、投资、社会、环境和其他政策等因素。本节所讨论的,是第二种涵义的节能潜力,即可实现的节能潜力。

要准确计算节能潜力是困难的,这是因为影响实现节能潜力的技术、经济、社会等因素太多,有些是难以预料的不定因素。但通过调查研究,对节能潜力进行分析估算,是可能的。还有一点要指出的是,从不同的角度、采用不同的指标(如单位产品能耗下降率、单位产值能耗下降率等),计算出的节能潜力是不同的。

下面,从不同的角度粗略地分析我国化学工业的节能潜力。

### 一、从单位产值能耗估计节能潜力

“七·五”计划以来,化工行业在节能方面成绩显著,1985~1990年间,万元产值能耗以每年3.78%的速率下降,1992年又比1990年下降了10.6%,而1994年又比1992年下降了6.9%。但应当看到,我国化工行业生产能耗仍然很高,除个别行业外(如炼油行业较先进),一般只相当于工业先进国家70年代末的耗能水平,以至我国的化工万元产值能耗为工业发达国家的2.5~6.0倍,因此,节能的潜力仍很大。另外,各行业之间的万元产值能耗相差也很大,如氮肥行业为全化工系统的两倍,而橡胶制品行业仅为六分之一。

### 二、从提高能源利用率看节能潜力

与工业发达国家相比,我国的能源利用率较差,工业能源利用率仅为美国和日本的一半左右,可见节能潜力很大。我国化学工业的能源利用率即使提高1%,也能节省150万吨标准煤。

### 三、从主要产品单位能耗的差距分析节能潜力

我国大多数化工产品单位能耗都比国外同类产品高出许多。例如,我国合成氨平均单耗比国际先进水平高了近一倍,乙烯平均单耗比国外大约高出一倍多,烧碱的吨产品能耗比国际先进水平高40%以上,每吨电石的耗电量比国外高20%,每吨黄磷的耗电量比国外高30%。因此,可挖掘的潜力很可观。

### 四、从主要耗能设备技术水平分析节能潜力

从企业中各类设备的热效率看,差距同样十分明显。我国工业锅炉的平均热效率为55%~60%,而工业发达国家(主要烧油)多在80%以上。氯碱生产中的蒸发工序,国内的蒸发效数低于国外,因而能耗相差比较大。蒸煮工序差别就更大了,国内大部分工厂仍采用大铁锅熬制,而国外大多采用降膜蒸发器,能耗相差达一倍以上。在烧碱的电解工艺上,国外工业发达国家采用先进的离子交换膜法的比例占18%以上(日本甚至达75%以上),而我国只有4%左右。其他如风机、水泵、电动机等通用设备的效率也比工业发达国家的水平低。能够挖掘的潜力是到处存在的。

总之,不管从哪个角度分析,我国化学工业的节能潜力都是很大的。

### 1.2.3 节能的意义

我国国民经济正处于一个高速发展的时期,这就不可避免地出现能源消耗的大幅度上升趋势。为了保证国民经济持续、快速、健康地发展,必须合理、有效地利用能源,不断提高能源利用效率。1978年以来,我国政府开始重视节能工作,明确提出“开发与节能并重,近期把节能放在优先地位”的方针。

节能是一项长期的工作,其意义在于:

一、随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,对能源的需求越来越大,而容易被利用的能源资源有限,加上能源的开发需要大量资金和较长周期,因此,搞好节能工作,节约资源,是保持人类社会可持续发展的重要措施;

二、在化学工业中,煤、石油和天然气,既是能源,又是宝贵的原料,大致用作原料的约占能源消费总量的40%,因此,节省了能源,也就是节省了宝贵的化工原料;

三、节能可以促进生产,在同样数量能源的条件下,生产更多的产品;

四、节能可以降低成本,特别在化工企业中,能源费用在产品成本中占的比例较高,节能可以明显降低成本,增加利润;

五、节能能促进管理的改善和技术的进步,节能的过程,就是一个生产现代化的过程,对管理和技术工艺,都提出了更高的要求,因此,通过节能,有利于改变企业的落后面貌;

六、节能有利于保护环境。

节能,意味着减少了能源的开采与消耗,从而减少了烟、尘、灰、硫以及其他污染物的排放。燃煤1吨仅烟尘就排放6~10kg,而我国的能源结构中煤炭约占75%,这就使我国北方乃至南方城市空气中含尘量分别超过世界卫生组织规定的人体健康标准含尘量的5倍及3倍,此外还有大量CO<sub>2</sub>及SO<sub>2</sub>等。

## 1.3 节能的途径

一个企业、一个行业、乃至一个国家的能耗水平是由错综复杂的多种因素影响决定的,如自然条件、经济体制、经济因素、管理水平、政策



倾向、社会因素、技术水平等。我们将这些因素归结为三个方面,即结构节能、管理节能、技术节能。

### 1.3.1 结构节能

我国的单位产值能耗之所以高,除技术水平和管理水平落后外,经济结构不合理也是重要的原因。经济结构包括产业结构、产品结构、企业结构、地区结构等。

#### (1) 产业结构

不同行业、不同产品对能源的依赖程度是很不相同的,有些耗能高,有些耗能低。在今后的经济发展中,若增加省能型工业(如仪表、电子等)的比重,减少耗能型工业(如钢铁、化肥等)的比重,全国的产业结构就会朝省能的方向发展。但国民经济的发展,各个工业之间存在着客观的比例关系,因此,应研究合理的省能型产业结构。

#### (2) 产品结构

随着产业结构向省能型的方向发展,产品结构也应努力向高附加值、低能耗的方向发展。在化学工业中,西方八十年代开始着重发展耗能少、附加值高的精细化工产品,他们 1985 年精细化工率占化学工业产值的 53%~63%,到九十年代一般在 60%以上,而我国才只有 35%。石油化工、精细化工、生物化工、医药工业及化工新型材料等能耗低而附加产值高的行业应大幅度增长。

#### (3) 企业结构

调整生产规模结构是节能降耗的重要途径。与大型企业相比,中、小企业一般能耗较高,经济效益较差。所以应该有计划、有步骤地调整企业的组织结构,新建厂应当有经济规模的限制,缺乏竞争力的小企业应关、停、并、转。

#### (4) 地区结构

地区结构的调整主要是指资源的优化配置,调整部分耗能型工业的地区结构。将部分耗能型工业的工厂转移到能源富裕地区或矿产资源就近地区,从全局看,可以节省很多能源。在化学工业方面,乙烯生产基地应靠近油田或大型炼油厂;我国东部地区集中了我国主要油田,又有沿海便于进口石油的条件,应发展石油化工;我国中部地区是我国煤