

化工节能

原理与技术

冯 霄 编著

第二版



化学工业出版社

化工节能原理与技术

第二版

冯 霄 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/冯霄编著. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2003. 11

ISBN 7-5025-4915-3

I. 化… II. 冯… III. 化工过程-节能 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 100591 号

化工节能原理与技术

第二版

冯霄 编著

责任编辑: 陈丽

文字编辑: 刘莉珺

责任校对: 吴桂萍

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)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 10 $\frac{1}{4}$ 插页 1 字数 287 千字

2004 年 1 月第 2 版 2004 年 1 月北京第 3 次印刷

ISBN 7-5025-4915-3/TQ·1860

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

第二版前言

能源是经济发展的原动力，是现代文明的物质基础。随着世界人口的不断增长和工业的持续发展，能源将越来越短缺。工业节能已成为人类社会持续发展的重要前提之一。广义的化学工业是用能大户，因此化工节能尤其重要。

本书重点介绍了节能的热力学原理（第2章），化工单元过程与设备的节能技术（第3章），过程系统节能中的夹点技术（第4章），以及采用过程集成方法使新鲜水用量和废水排放量最小的水系统集成技术（第5章）。

本书可供化工领域工程技术人员参考，也可作为化工专业学生的教材。

本书的编写工作得到钱立伦教授、张早校教授、傅秦生教授、王彦峰博士、朱平博士等人的帮助，特此致谢。

由于作者学识有限，书中难免有错误或不妥之处，恳请读者批评指正，以利日后修订。

编者

2003年7月

内 容 提 要

本书系统介绍了化工节能的理论与技术。包括单元过程与设备的节能技术，过程系统节能技术中的夹点技术，以及采用过程集成方法使新鲜水用量和废水排放量最小的水系统集成技术。

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。可供化工领域工程技术人员使用，也可作为化工专业学生的参考书。

目 录

第 1 章 总论	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	2
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	6
1.2.3 节能的意义	8
1.3 节能的途径	9
1.3.1 结构节能	9
1.3.2 管理节能	10
1.3.3 技术节能	12
参考文献	16
第 2 章 节能的热力学原理	17
2.1 基本概念	17
2.1.1 热力系统	17
2.1.2 平衡状态	19
2.1.3 状态参数和状态方程式	20
2.1.4 功和热量	23
2.1.5 可逆过程	24
2.2 能量与热力学第一定律	25
2.2.1 闭口系统能量衡算式	26
2.2.2 稳定流动开口系统能量衡算式	26
2.3 焓和热力学第二定律	31
2.3.1 热力学第二定律的几种表述	31
2.3.2 熵的概念和孤立系统熵增原理	33
2.3.3 热力学第二定律的熵衡算方程式	34

PIAG 10/10

2.3.4	能量和焓	36
2.4	能量的焓计算	37
2.4.1	环境与物系的基准状态	37
2.4.2	机械形式能量的焓	40
2.4.3	热量焓	40
2.4.4	封闭系统的焓	44
2.4.5	稳定流动系统的焓	45
2.4.6	化学反应的最大有用功	46
2.4.7	气体的扩散焓	50
2.4.8	元素和化合物的化学焓	51
2.4.9	燃料的化学焓	53
2.5	焓损失和焓衡算方程式	55
2.5.1	焓损失和焓衡算方程式	55
2.5.2	封闭系统的焓衡算方程式	55
2.5.3	稳定流动系统的焓衡算方程式	57
2.6	装置的焓效率和焓损失系数	61
2.6.1	焓效率的一般定义	61
2.6.2	焓效率的不同形式	63
2.7	节能理论的新进展	65
2.7.1	可避免焓损失与不可避免焓损失	65
2.7.2	热经济学	67
2.7.3	有限时间热力学	69
2.7.4	积累焓理论	70
2.7.5	能值分析	71
2.7.6	综合考虑资源利用与环境影响的焓分析	72
	符号表	74
	参考文献	75
第3章	化工单元过程与设备的节能	77
3.1	流体流动及流体输送机械	77
3.1.1	流体流动	77
3.1.2	流体机械	77
3.2	换热	81
3.2.1	换热过程	81

3.2.2	设备和管道的保温	83
3.3	蒸发	84
3.3.1	多效蒸发	85
3.3.2	额外蒸汽的引出	91
3.3.3	二次蒸汽的再压缩	93
3.3.4	冷凝水热量的利用	98
3.4	精馏	98
3.4.1	预热进料	100
3.4.2	塔釜液余热的利用	101
3.4.3	塔顶蒸气余热的回收利用	103
3.4.4	多效精馏	104
3.4.5	热泵精馏	109
3.4.6	减小回流比	117
3.4.7	增设中间再沸器和中间冷凝器	118
3.4.8	多股进料和侧线出料	120
3.4.9	热偶精馏	126
3.5	干燥	128
3.5.1	排气的再循环	128
3.5.2	采用换热器的余热回收	129
3.5.3	热泵的应用	129
3.5.4	其他	130
3.6	反应	131
3.6.1	化学反应热的有效利用和提供	131
3.6.2	反应装置的改进	134
3.6.3	催化剂的开发	135
3.6.4	反应与其他过程的组合	136
	符号表	142
	参考文献	143
第4章	过程系统节能——夹点技术	145
4.1	绪论	145
4.1.1	过程系统节能的意义	145
4.1.2	夹点技术的应用范围及其发展	148
4.2	夹点的形成及其意义	150

4.2.1	温-焓图和复合曲线	150
4.2.2	夹点的形成	152
4.2.3	问题表法	154
4.2.4	夹点的意义	158
4.3	换热网络设计目标	159
4.3.1	能量目标	159
4.3.2	换热单元数目目标	160
4.3.3	换热网络面积目标	162
4.3.4	经济目标	163
4.3.5	最优夹点温差的确定	163
4.4	换热网络优化设计	166
4.4.1	夹点技术设计准则	166
4.4.2	初始网络的生成	169
4.4.3	热负荷回路的断开与换热单元的合并	173
4.4.4	阈值问题	180
4.5	换热网络改造综合	183
4.5.1	现行换热网络的分析	183
4.5.2	换热网络改造综合的设计目标	186
4.5.3	换热网络改造步骤	187
4.5.4	受网络夹点控制装置的改造分析	191
4.5.5	换热网络改造综合实例	195
4.6	蒸汽动力系统优化综合	205
4.6.1	总复合曲线	206
4.6.2	多级公用工程的配置	209
4.6.3	热机的设置	216
4.6.4	热泵及热泵的设置	221
4.6.5	蒸汽动力系统可调节性分析	243
4.7	分离系统优化综合	247
4.7.1	精馏系统的热集成	247
4.7.2	分离系统在整个过程系统中的合理设置	253
4.7.3	不同分离过程的热集成	256
4.8	反应器的热集成	260
4.8.1	反应器的热集成特性	260

4.8.2	反应器的合理设置	261
4.9	间歇过程的热集成	263
4.9.1	间歇过程夹点分析法	263
4.9.2	改进的时间温度复合分析模型	265
4.9.3	间歇过程换热网络的目标函数	269
4.9.4	间歇过程换热网络的设计	272
4.9.5	间歇过程工艺物流与公用工程的综合	278
	符号表	282
	参考文献	284
第5章	水系统集成	287
5.1	绪论	287
5.2	用水单元模型与水极限曲线	290
5.2.1	用水单元模型	290
5.2.2	负荷-浓度图与水极限曲线	291
5.2.3	用水单元质量衡算	292
5.3	水夹点的形成及其意义	293
5.3.1	极限复合曲线	293
5.3.2	水夹点的形成及其意义	294
5.3.3	问题表法	295
5.4	用水网络的超结构及数学模型	298
5.4.1	用水网络的超结构	298
5.4.2	非线性数学模型	299
5.4.3	数学模型的求解	301
5.5	水直接回用的水网络的综合	304
5.5.1	用水网络的描述	304
5.5.2	最大传质推动力法	306
5.5.3	最小匹配数法	310
5.6	再生回用与再生循环的水网络	314
5.6.1	水的直接回用、再生回用和再生循环	314
5.6.2	再生回用	315
5.6.3	再生循环	320
5.7	具有中间水道的水网络结构及其综合方法	321
5.7.1	具有中间水道的水网络结构	321

5.7.2 多组分单中间水道用水网络设计方法	322
符号表	326
参考文献	327
附录 1 龟山-吉田环境模型的元素化学焓	插页
附录 2 主要的无机化合物和有机化合物的摩尔标准化学焓 E_{298}^{\ominus} 以及温度 修正系数 ξ (E_{298}^{\ominus} 用龟山-吉田环境模型计算)	329

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。

能源是经济发展的原动力，是现代文明的物质基础。安全、可靠的能源供应和高效、清洁地利用能源是实现社会经济持续发展的基本保证。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 20 世纪 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，美国由于能源短缺 1.16 亿吨标准煤，使国民生产总值减少了 930 亿美元；日本由于能源短缺 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。在我国，在过去的 20 年里能源消费量随着经济的发展已翻了一番，超过了 13 亿吨标准煤，成为世界上的第二能源消费大国。能源和能源消费引起的环境问题已成为制约我国可持续发展的重要问题之一。

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。

1.1.2.1 按其来源分类

按其来源分类，能源可分为三大类。

第一类，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能获得的总能量可达 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。

第二类，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。核聚变尚在研究之中。

第三类，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。

第一类，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。

第二类，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、生物质能、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。

目前生物质能的利用越来越受到关注。生物质能是太阳能的一种存在形式，它是通过生物的光合作用把光这种过程性能源转化为化学能保存在了生物质中。它的使用量仅次于煤、油、天然气排在第4位，但一直是以极度分散的非工程形式利用。例如秸秆的气化，生物制氢，能源植物的利用。能源植物是指那些具有较高的还原成烃的能力，可以产生接近石油成分或是石油替代品的富含油的植物。瑞士计划用10年的时间用生物石油替代50%的年用油量。

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。

第一类，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。

第二类，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。经过五十多年的发展，化学工业已具有相当的工业基础，成为我国经济发展的重要支柱产业，主要经济指标居全国工业各行业之首。

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%，在氮肥工业达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主要国家化学工业的一个特点。表1-1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。

表 1-1 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 $1000 \times 10^4 \text{t/a}$ 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 $40 \times 10^4 \text{t/a}$ ，美国为 $104.7 \times 10^4 \text{t/a}$ ，日本为 $53.7 \times 10^4 \text{t/a}$ ，而我国只有 $22.5 \times 10^4 \text{t/a}$ 。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 $10 \times 10^4 \text{t/a}$ 的合成氨厂已基本不存在了，而我国60%的产量是由小于 $5 \times 10^4 \text{t/a}$ 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，来合理有效地利用能源。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。

(1) 从单位产值能耗估计节能潜力

我国是世界上单位 GDP 能耗最高的国家之一。按 1995 年价格计算的 GDP 单耗，1999 年世界平均为每百万美元 270t 标准油，其中美国每百万美元 GDP 能源消耗为 272t 标准油，OECD 国家平均为 198t 标准油，日本为 96.2t 标准油。同期我国每百万美元