

化工节能 原理与技术

HUAGONG JIENENG
YUANLI YU JISHU

第4版

4th Edition

冯霄 王彧斐 编著



化学工业出版社

化工节能 原理与技术

HUAGONG JIENENG
YUANLI YU JISHU

第4版

4th Edition

冯 霄 王彧斐 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工节能原理与技术》系统介绍了化工节能的理论与技术。包括节能的热力学原理, 化工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, 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以及氢系统优化。相比第3版, 本版在第2章增加了焓分析的应用实例, 在第3章的精馏操作中补充了回流比的操作优化, 在第4章中增加了循环水系统的优化和装置/厂际之间的热联合两节, 使之更符合生产的实际。

全书内容系统、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。

图书在版编目(CIP)数据

化工节能原理与技术/冯霄, 王彧斐编著. —4版. —北京: 化学工业出版社, 2015.5

ISBN 978-7-122-23401-8

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第058164号

责任编辑: 袁海燕

装帧设计: 韩 飞

责任校对: 边 涛

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: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张12 插页1 字数324千字

2015年6月北京第4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: 38.00 元

版权所有 违者必究

第 4 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，受到国家政府和各企业的高度重视。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（第 3 章），过程系统节能技术中的夹点技术（第 4 章），使新鲜水用量和废水排放量最小的水系统集成技术以及使氢气使用量最小的氢系统优化技术（第 5 章）。

相比第 3 版，在第 2 章增加了焓分析的应用实例，在第 3 章的精馏操作中补充了回流比的操作优化，在第 4 章中增加了循环水系统的优化和装置/厂际之间的热联合两节。所有的增补部分由王彧斐执笔。

希望本书能成为化工领域工程技术人员的参考书以及化工专业学生的教材。

本书的工作得到钱立伦教授、张早校教授、傅秦生教授、刘桂莲教授、王彦峰博士、朱平博士、孙晋博士等的帮助，特此致谢。

本书的部分工作还得到国家重点基础研究发展计划项目（2012CB720500）和国家自然科学基金项目（21276204 和 21476256）的资助，在此表示感谢。

本书得以出到第 4 版，特别感谢读者对本书的厚爱以及化学工业出版社的大力支持！

由于编著者学识有限，书中难免有疏漏或不妥之处，恳请读者批评指正，以利日后之修订。

编著者

2015 年 2 月

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	3
1.2.1 我国化学工业的特点	3
1.2.2 化学工业节能的潜力	4
1.2.3 节能的意义	5
1.3 节能的途径	7
1.3.1 结构节能	7
1.3.2 管理节能	8
1.3.3 技术节能	9
参考文献	14
第 2 章 节能的热力学原理	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 状态参数和状态方程式	18
2.1.4 功和热量	21
2.1.5 可逆过程	22
2.2 能量与热力学第一定律	23
2.2.1 闭口系统能量衡算式	24
2.2.2 稳定流动开口系统能量衡算式	24
2.3 焓和热力学第二定律	29
2.3.1 热力学第二定律的几种表述	29

2.3.2	熵的概念和孤立系统熵增原理	31
2.3.3	热力学第二定律的熵衡算方程式	32
2.3.4	能量和焓	34
2.4	能量的焓计算	36
2.4.1	环境与物系的基准状态	36
2.4.2	机械形式能量的焓	38
2.4.3	热量焓	38
2.4.4	封闭系统的焓	42
2.4.5	稳定流动系统的焓	43
2.4.6	化学反应的最大有用功	45
2.4.7	气体的扩散焓	48
2.4.8	元素和化合物的化学焓	49
2.4.9	燃料的化学焓	52
2.5	焓损失和焓衡算方程式	53
2.5.1	焓损失和焓衡算方程式	53
2.5.2	封闭系统的焓衡算方程式	54
2.5.3	稳定流动系统的焓衡算方程式	56
2.6	装置的焓效率和焓损失系数	59
2.6.1	焓效率的一般定义	59
2.6.2	焓效率的不同形式	61
2.7	焓分析的应用实例	63
2.7.1	煤制天然气甲烷化过程反应热回收分析	63
2.7.2	己内酰胺装置蒸汽系统分析与优化	67
2.8	节能理论的新进展	70
2.8.1	可避免焓损失与不可避免焓损失	70
2.8.2	热经济学	72
2.8.3	有限时间热力学	74
2.8.4	积累焓理论	75
2.8.5	能值分析	76
2.8.6	综合考虑资源利用与环境影响的焓分析	77
	符号表	79

参考文献	80
第3章 化工单元过程与设备的节能	82
3.1 流体流动及流体输送机械	82
3.1.1 流体流动	82
3.1.2 流体机械	82
3.2 换热	86
3.2.1 换热过程	86
3.2.2 设备和管道的保温	88
3.3 蒸发	89
3.3.1 多效蒸发	90
3.3.2 额外蒸汽的引出	96
3.3.3 二次蒸汽的再压缩	98
3.3.4 冷凝水热量的利用	103
3.4 精馏	103
3.4.1 预热进料	105
3.4.2 塔釜液余热的利用	106
3.4.3 塔顶蒸气余热的回收利用	108
3.4.4 多效精馏	109
3.4.5 热泵精馏	114
3.4.6 减小回流比	122
3.4.7 增设中间再沸器和中间冷凝器	123
3.4.8 多股进料和侧线出料	126
3.4.9 热偶精馏	132
3.5 干燥	134
3.5.1 排气的再循环	134
3.5.2 采用换热器的余热回收	135
3.5.3 热泵的应用	135
3.5.4 其他	136
3.6 反应	137
3.6.1 化学反应热的有效利用和提供	137
3.6.2 反应装置的改进	140

3.6.3	催化剂的开发	141
3.6.4	反应与其他过程的组合	142
	符号表	148
	参考文献	149
第4章	过程系统节能——夹点技术	151
4.1	绪论	151
4.1.1	过程系统节能的意义	151
4.1.2	夹点技术的应用范围及其发展	154
4.2	夹点的形成及其意义	156
4.2.1	温-焓图和复合曲线	156
4.2.2	夹点的形成	158
4.2.3	问题表法	160
4.2.4	夹点的意义	164
4.3	换热网络设计目标	165
4.3.1	能量目标	165
4.3.2	换热单元数目目标	166
4.3.3	换热网络面积目标	168
4.3.4	经济目标	169
4.3.5	最优夹点温差的确定	169
4.4	换热网络优化设计	172
4.4.1	夹点技术设计准则	172
4.4.2	初始网络的生成	175
4.4.3	热负荷回路的断开与换热单元的合并	179
4.4.4	阈值问题	186
4.5	换热网络改造综合	189
4.5.1	现行换热网络的分析	189
4.5.2	换热网络改造综合的设计目标	192
4.5.3	换热网络改造步骤	193
4.5.4	受网络夹点控制装置的改造分析	197
4.5.5	换热网络改造综合实例	201
4.6	蒸汽动力系统优化综合	225

4.6.1	总复合曲线	226
4.6.2	多级公用工程的配置	228
4.6.3	热机的设置	241
4.6.4	热泵及热泵的设置	245
4.6.5	蒸汽动力系统可调节性分析	268
4.7	循环水系统的优化	271
4.7.1	设计问题中循环水量目标的求解	272
4.7.2	改造问题中循环水量目标的求解	273
4.7.3	循环水系统中泵网络的优化	276
4.8	分离系统优化综合	278
4.8.1	精馏系统的热集成	278
4.8.2	分离系统在整个过程系统中的合理设置	284
4.8.3	不同分离过程的热集成	287
4.9	反应器的热集成	290
4.9.1	反应器的热集成特性	290
4.9.2	反应器的合理设置	292
4.10	装置/厂际之间的热联合	294
4.10.1	装置/厂际之间热联合的方式	294
4.10.2	全厂复合曲线	295
4.10.3	通过全厂复合曲线确定装置/厂际热联合能量目标	297
4.10.4	通过全厂复合曲线确定装置/厂际热联合改造目标	299
4.10.5	装置/厂际间的低温热联合	300
4.11	间歇过程的热集成	302
4.11.1	间歇过程夹点分析法	302
4.11.2	改进的时间温度复合分析模型	303
4.11.3	间歇过程换热网络的目标函数	309
4.11.4	间歇过程换热网络的设计	311
4.11.5	间歇过程工艺物流与公用工程的综合	318
	符号表	322
	参考文献	323

第 5 章 水系统集成和氢系统优化	327
5.1 绪论	327
5.2 常用节水方法与用水单元模型	328
5.2.1 常用节水方法	328
5.2.2 用水单元模型	329
5.2.3 负荷-浓度图与水极限曲线	330
5.2.4 用水单元质量衡算	331
5.3 水夹点的形成及其意义	332
5.3.1 极限复合曲线	332
5.3.2 水夹点的形成及其意义	333
5.3.3 问题表法	334
5.4 用水网络的超结构及数学模型	337
5.4.1 用水网络的超结构	337
5.4.2 非线性数学模型	338
5.4.3 数学模型的求解	340
5.5 水直接回用水网络综合	343
5.5.1 用水网络的描述	344
5.5.2 最大传质推动力法	345
5.5.3 最小匹配数法	349
5.6 再生回用与再生循环的水网络	353
5.6.1 水的直接回用、再生回用和再生循环	353
5.6.2 再生循环	355
5.6.3 再生回用	356
5.7 具有中间水道的水网络结构及其综合方法	358
5.7.1 具有中间水道的水网络结构	359
5.7.2 多组分废水直接回用中间水道用水网络设计方法	360
5.8 氢系统优化	363
5.8.1 最小氢气公用工程用量的计算与分析	363
5.8.2 氢气网络的优化匹配原则	364
5.8.3 实例分析与计算	365
符号表	368

参考文献	369
附录 1 龟山-吉田环境模型的元素化学焓	
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_{xc}^0 以及温度修正系数	371

第 1 章 总 论

1.1 能源与能源的分类

1.1.1 能源

能源是可以直接或通过转换提供人类所需的有用能的资源。世界上的能源可以分为 11 种类型：化石能源（如煤炭、石油、天然气）、水能、核能、电能、太阳能、生物质能、风能、海洋能、地热能、氢能、受控核聚变^[1]。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、清洁的利用能源是实现社会经济持续发展的基本保证^[2]。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。其他工业国家也类似。据分析估算，由于能源不足引起的国民经济损失为能源本身价值的 20~60 倍^[3]。

在我国，由于经济的快速发展，能源的消耗量也急剧增加，2011 年的能源消费量达到 34.8 亿吨标准煤^[4]，现在已成为世界上的第一能源消费大国。由于容易被利用的能源的有限性，节能就成为政府以及企业都非常关注的解决能源问题的最有效途径。

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。

第一类，一次能源：从自然界取得的未经任何改变或转换的能源^[1]。如原煤、原油、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) 不可再生能源：指那些不能循环再生的能源，如煤炭、石油、天然气、核能等，它们随人类的使用而越来越少。

第二类，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得到的能源产品。如电、蒸汽、煤气、热能、氢能、焦炭、各种石油制品。

第三类，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加工、转换、输送、储存和分配成为终端使用的能源。终端能源通常分为5类：固体燃料（煤、焦炭、型煤等）、液体燃料、气体燃料（天然气、液化石油气、煤制气等）、电力、热力^[1]。

1.1.2.2 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：又称传统能源，指那些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，目前已经成熟，可以算作常规能源。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、沼气等的使用已有多年历史，但目前又采用现代技术加以利用，也把它们作为新能源。

1.1.2.3 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：指大气污染物和温室气体零排放或排放很少的能源，主要有3类：可再生能源、氢能和先进核能^[1]。

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^[5]，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。经过六十多年的发展，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^[6]。

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%^[7]。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。

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%，小企业可相差 67%~68%^[7]。

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。尽管我国单位 GDP 能耗呈长期下降的趋势，但到 2012 年，我国按汇率计算的单位 GDP 能耗为 474 吨标煤/百万美元，为美国的 2.3 倍，日本的 4.2 倍，世界平均值的 1.9 倍。按购买力平价计算，2011 年我国为

330 吨标煤/百万美元，为日本和欧盟的 2.1 倍。美国和世界平均水平的 1.5 倍^[8]。虽然该值涉及人口、产业结论、能源结构折算标准等因素^[9]以及汇率的影响，不能准确地进行比较，但也能在一定程度上说明能耗问题。因此，节能的潜力仍很大。

(2) 从提高能源利用率看节能潜力

到 2009 年，全国能源利用效率约为 33%，比发达国家约低 10%^[10]。工业能耗高达 70%，特别是工业行业中冶金、化工、建材等高耗能工业，产值不足工业总产值的 20%，但能源消耗已超过工业用能总量的 60%^[9]。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^[7]。

(3) 从主要产品单位能耗的差距分析节能潜力

2000 年以来，技术进步加速，行业集中度提高，使高耗能产品能耗降幅加大，与国际先进水平的差距缩小，但仍存在差距。2012 年，我国合成氨平均单耗是国际先进水平的 1.57 倍，乙烯平均单耗是国际先进水平的 1.42 倍，烧碱的平均吨产品能耗是国际先进水平的 1.08 倍，纯碱的平均吨产品能耗是国际先进水平的 1.21 倍，每吨电石的耗电量是国际先进水平的 1.12 倍^[8]。因此，可挖掘的潜力仍然可观。

(4) 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，也存在明显的差距。我国中小型电动机效率平均为 87%，比美国低 5%；燃煤工业锅炉运行效率 60%~65%，国外为 75%~85%^[11]。

总之，不管从哪个角度分析，我国化学工业的节能潜力都是可观的。

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。当前我国的能源消费量已超过世界能源消费总量的 20%^[12]，但是我国的人均能源消费量仍低于世界平均水平，这种情况表明未来我国经济发展所面临的能源问题将更加突出、更加严峻。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。

我国政府一直重视节能工作，早在 1981 年第五届全国人大第四次会议就确定了“开发与节能并重，近期把节能放在优先地位”的能源发展方针；在 1991 年确定了节能是我国经济和社会发展的一项长远战略方针^[13]；于 1997 年第八届人大常委会第二十八次会议通过《中华人民共和国节约能源法》，于 1998 年 1 月 1 日起实施，并于 2007 年 10 月 28 日第十届全国人大常委会第三十次会议通过了修订的《节能法》，修订后的《节能法》于 2008 年 4 月 1 日实施；2007 年 12 月 26 日国务院新闻办首次发布《中国的能源状况与政策》白皮书，对节能进行了重点阐述。

节能是一项长期的工作，其意义在于：

① 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。

② 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、温室气体以及其他污染物的排放。我国的环境污染为典型的能源消费型污染。据分析，各项能源消费与 SO₂、NO₂、PM₁₀排放量的关联度都在 0.7 以上^[14]，世界 CO₂ 排放总量中，99.6%来自化石能源消费^[15]。

③ 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%^[16]，因此，节省了能源，也就是节省了宝贵的化工原料。

④ 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。

⑤ 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。

⑥ 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。