

华 贲 编 著

GONGYIGUOCHENG

工 艺 过 程

用 能 分 析 及 综 合

YONGNENG FENXITIZONGHE

烃 加 工 出 版 社

工艺过程用能分析及综合

华 贲 编著

烃 加 工 出 版 社

内 容 提 要

本书是在运用第二定律分析 (The Second Law Analysis) 和热经济学 (Thermoeconomics) 理论和方法, 研究开发炼油过程节能综合技术和总结近年来从事炼油厂节能工作实践基础上编写的。所提出的方法和思路亦适用于石油化工和其他流动体系热加工工艺过程。

本书共三篇。上篇讲述过程用能原理, 包括热力学基础、热力学分析、动力学和工程经济问题三章。中篇为过程用能分析, 包括能量核查、能量平衡分析和焓分析三章, 详细介绍了分析的模式和方法。下篇(七至十一章)是过程用能综合和优化改进, 通过大量实例从五个主要方面阐明了用能综合的基本原则、思路和途径; 最后一章介绍了炼油厂用能综合设计和改进规划的方法步骤。

本书编写过程中, 得到了中国石油化工总公司洛阳石化工程公司领导 and 许多同志的关切和支持, 并经蔡祖恒、史美声高级工程师和其他同志校阅。全书由大连工学院袁一教授审订。

本书可供炼油、石油化工等企业及有关科研、设计部门的工程技术人员在设计、开发、生产和用能管理工作中参考和借鉴, 亦可供化工类高等院校师生作为教学参考。

工艺过程用能分析及综合

华 贲 编著

•
烃加工出版社出版

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

•
850×1168毫米 32开本 17印张 3插页 434千字 印数1—2900

1989年1月北京第1版 1989年2月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-033-2/TQ·024 定价: 6.00元

前 言

1. 近几年来, 我国炼油和石油化工等工业部门节能工作取得了显著的成绩, 但与工业发达国家相比, 能量利用的水平还有相当的差距。国民经济的发展和我国能源的储藏及生产形势, 要求我们必须把工业生产节能作为一个长期的、战略性的任务。

在已取得的节能成果基础上, 节能的进一步深入, 即用能过程的进一步改进和完善, 只靠一些局部的具体经验的总结就不够了; 它需要系统的理论的指导, 需要在揭示、阐明用能过程本身的规律性的基础上由自发到自觉地运用规律, 找到深入的症结, 开辟新的途径, 从而达到新的水平。在能源和经济形势的推动下, 近几年来焓(有效能)分析——也称“热力学第二定律分析”——在炼油、化工、冶金、能量转换等各部门的运用, 便是这种为形势所推动的理论同实际结合、理论用于实际和指导实际的努力的体现。目前, 在国内外, 这种努力正方兴未艾, 成果不等, 水平不一, 但都还没有形成完整的理论体系; 相应地, 各实际过程的用能水平, 也都还未取得重大的突破; 但是, 这个发展方向和光明前景, 已经为越来越多的人所认识。

2. 本书是作者在中国石油化工总公司洛阳设计研究院(现为洛阳石油化工工程公司)从事工艺过程节能技术开发工作期间, 在总结实际工作经验, 汇集课题开发成果的基础上, 参照国内外有关著作而编写的。鉴于节能工作深入开展的需要, 同工艺设计和过程用能技术管理和规划改进工作中, 尚没有用能基础理论和分析及综合的技术资料可循之间的矛盾, 本书的主旨是向炼油及石油化工过程设计、生产、科研人员介绍过程用能原理和针对我国现实情况而开发建立的一个过程用能分析和综合的方法体系, 使一般工程技术人员都能很快掌握和运用。因此本书的特点

是，不强调理论的系统性，数学推导和表示的严谨及完整性，而力求通过实际用例，深入浅出地阐明概念和规律的实质，并按实际运用的要求尽可能给出明确的用能分析和综合的工作方法和步骤。

然而，本书又不是各项具体的节能技术的汇总和介绍；而是着重于说明如何按照用能原理在综合中选择各种节能技术并将其运用到恰当的程度。读者可循着所给出的参考文献的线索，对所感兴趣的具体节能技术作深入的探究。

本书初印稿为洛阳石油化工工程公司技术开发课题（KT56）的成果报告，亦曾作为中国石化总公司炼厂用能分析及节能技术培训班的讲义。承洛阳石油化工工程公司准予出版，特此致谢。

3. 本书上篇简要阐述工艺过程用能的原理和基本规律；中篇以炼油过程为对象，介绍过程用能分析的具体分析方法和步骤；下篇则为过程设计中用能综合或现有实际过程优化改进的原则、内容及方法步骤。所介绍的原理和方法体系，原则上也适用于石油化工、轻工、食品……等工艺过程生产体系。

4. 由于能量利用工程科学尚在迅速发展，和实际生产过程的多样性和复杂性，并限于作者本人的理论水平和实际经验，无论是整个方法体系还是各具体原则、步骤，都还有待于在进一步的广泛实用中不断改进和完善。衷心欢迎各方面专家和广大读者提出宝贵的批评意见。

5. 遵照国发〔1984〕28号文的规定，在计算中一般均力求采用中华人民共和国法定计量单位、即国际单位制（SI制）。鉴于过去习用公制单位，故在计算例题中仍在括号内标出公制单位及数值。SI制与公制常用单位的换算关系，参见附录C。

目 录

前言

上篇 工艺过程用能原理

绪言	(1)
第一章 工艺过程用能的热力学基础	(4)
引言	(4)
第一节 基本概念	(4)
§1-1 体系·热力学体系·闭系和开系·流动体系	(5)
§1-2 环境·外界	(6)
§1-3 状态·状态参数·寂态	(6)
§1-4 过程·运动和变化	(8)
§1-5 过程中体系和外界的相互作用·功和热	(8)
§1-6 可逆过程与不可逆过程	(9)
§1-7 用能过程·用能过程热力学	(10)
§1-8 能位函数·能量	(12)
第二节 热力学第一定律及其应用	(18)
§2-1 第一定律的经典热力学表达式及其意见	(18)
§2-2 第一定律的用能过程热力学表达式	(21)
§2-3 第一定律在工艺过程中的实用式	(22)
§2-4 第一定律在用能分析中的实用式——能耗方程式	(23)
§2-5 “第一定律效率”讨论	(24)
第三节 热力学第二定律及其应用	(27)
§3-1 第二定律的经典热力学表达式及其统计本质	(27)
§3-2 第二定律的用能过程热力学表达式及其意义	(29)
§3-3 用能过程热力学基本方程式·焓和能级	(30)
§3-4 实际过程中的焓损与熵增·能的降质	(35)
§3-5 热力学焓差和焓损耗(理想功和损耗功)·实际过程的推动力	(38)

§3-6	用能过程热力学基本方程的实用式	(40)
§3-7	基本方程在用能分析中的实用式——烟耗方程式	(43)
§3-8	“第二定律效率”(烟效率)讨论	(44)
第二章	工艺过程用能的热力学分析	(49)
引言		(49)
第一节	单元操作过程的热力学分析	(50)
§1-1	流体流动过程	(50)
§1-2	传热过程	(56)
§1-3	传质过程	(61)
§1-4	化学反应过程	(67)
第二节	复杂工艺过程用能的宏观分析	(71)
§2-1	工艺过程用能的特点	(72)
§2-2	工艺过程用能三环节模式	(72)
§2-3	三个用能环节的关联制约和总体评价	(79)
第三节	工艺过程用能的分析评价方法	(83)
§3-1	能量平衡的建立和初步评价	(84)
§3-2	工艺用能合理性的深入剖析	(87)
§3-3	工艺过程烟平衡分析	(94)
第三章	工艺过程用能的动力学、工程和经济问题	(99)
引言		(99)
第一节	过程动力学与能量利用	(99)
§1-1	过程动力学规律和工程考虑	(99)
§1-2	烟损耗与过程推动力的关系——工艺过程能量利用的本质	(102)
§1-3	重视过程阻力的作用	(105)
第二节	经济性——能量利用合理性的判据	(106)
§2-1	工艺过程经济性与能耗的关系	(106)
§2-2	经济性是能量利用合理性的判据	(108)
§2-3	系统最优化是能量利用经济性的目标	(110)
第三节	能量利用经济学	(116)
§3-1	能量价值的合理计算	(116)
§3-2	工艺过程烟——价值分析模式	(121)
§3-3	烟——价值分析方程在工艺过程用能经济评	

价中的应用.....	(129)
------------	---------

中篇 工艺过程用能分析

绪言.....	(136)
---------	---------

第四章 能量核查和核定.....	(137)
------------------	---------

引言.....	(137)
---------	---------

第一节 工艺装置(单元)的能量核查和核定.....	(142)
---------------------------	---------

§1-1 原料、产品及主要工艺设备的能量核定.....	(142)
-----------------------------	---------

§1-2 加热炉的能量核查和核定.....	(147)
-----------------------	---------

§1-3 泵、压缩机、风机和燃气轮机的调查一览和效率核定...	(152)
---------------------------------	---------

§1-4 冷换设备、功回收设备和循环及热进物流的核查和核定.....	(156)
------------------------------------	---------

§1-5 汽、电、水的供、产、用、出平衡核查和核定.....	(165)
--------------------------------	---------

§1-6 设备表面散热和物流排弃能核查和核定.....	(168)
-----------------------------	---------

第二节 辅助系统的能量核查和核定.....	(171)
-----------------------	---------

§2-1 储运单元的能量核查和核定.....	(172)
------------------------	---------

§2-2 污水处理场的能量核查和核定.....	(174)
-------------------------	---------

§2-3 循环水场和新鲜水站的能量核查和核定.....	(174)
-----------------------------	---------

§2-4 锅炉、动力站、水处理站、空压站的能量核查和核定...	(176)
---------------------------------	---------

§2-5 系统损失的核查和核定.....	(180)
----------------------	---------

§2-6 非直接生产用能和外部用能核查.....	(180)
--------------------------	---------

第三节 全厂能量核查、统计和平衡.....	(186)
-----------------------	---------

§3-1 全厂基准工况能量核查的统计平衡.....	(186)
---------------------------	---------

§3-2 附加能耗的核查和核定.....	(190)
----------------------	---------

第五章 能量平衡分析.....	(197)
-----------------	---------

引言.....	(197)
---------	---------

第一节 工艺装置(单元)的能量平衡分析.....	(198)
--------------------------	---------

§1-1 由能量核查及核定数据计算能量平衡各项数值.....	(198)
--------------------------------	---------

§1-2 能量平衡汇总中其他问题的说明和处理.....	(207)
-----------------------------	---------

§1-3 能流图的绘制, 能量平衡的分析评价.....	(209)
-----------------------------	---------

第二节 工艺用能合理性的深入剖析.....	(216)
-----------------------	---------

§2-1 能量流程图的绘制方法和步骤.....	(216)
-------------------------	---------

§2-2 工艺总用能 E_N 的深入剖析.....	(219)
-----------------------------	---------

第三节 辅助单元的能量平衡分析.....	(225)
----------------------	---------

§3-1	储运单元	(225)
§3-2	污水处理场	(228)
§3-3	循环水场和新鲜水站	(229)
§3-4	锅炉房、动力站和水处理站	(231)
第四节	全厂能量平衡及分析评价	(234)
§4-1	基础数据的汇总整理	(234)
§4-2	全厂基准工况能量平衡的汇总计算	(235)
§4-3	全厂基准工况能量平衡结果的表示、评价和剖析	(242)
§4-4	全厂用能的分析评价	(243)
第六章	烟分析	(251)
引言		(251)
第一节	由能量平衡数据进行烟平衡计算	(252)
§1-1	过程热力学烟差(理想功)的计算	(252)
§1-2	单体设备的烟平衡和过程烟耗计算	(256)
第二节	过程烟平衡计算汇总	(265)
§2-1	能量转换环节	(265)
§2-2	能量回收环节	(268)
§2-3	能量的工艺利用环节	(274)
§2-4	体系烟平衡校核和汇总表示	(276)
第三节	过程烟平衡结果的剖析评价	(277)
§3-1	工艺过程烟损耗 D_x 的剖析	(277)
§3-2	排弃烟 D_f 的剖析	(283)
§3-3	过程能量——烟综合分析	(285)
§3-4	过程烟分析评价	(286)
§3-5	过程烟经济分析评价	(288)

下篇 工艺过程用能综合和优化改进

绪言	(293)
第七章	改进工艺过程以减少用能和烟损 (295)
引言	(295)
第一节	降低现有工艺过程的总用能 (295)
§1-1	合理降低工艺总用热能 E_{NH} (295)
§1-2	合理减少工艺总用蒸汽能 E_{Ns} (298)

§1-3	节省工艺总用动力能 E_{NF}	(299)
§1-4	降低现有装置 E_N 措施的特点.....	(301)
第二节	采用新工艺、优化总流程.....	(302)
§2-1	新催化剂、助剂、溶剂的节能效应.....	(302)
§2-2	新的工艺条件、设计思想和局部流程改进.....	(303)
§2-3	总流程的节能优化组合.....	(304)
第三节	降低工艺利用环节的烟损耗.....	(306)
§3-1	减少分离过程的烟损失.....	(306)
§3-2	降温、降压烟差的有效利用.....	(307)
§3-3	避免混合烟损.....	(309)
第八章	能量供需的大系统优化匹配.....	(311)
引言		(311)
第一节	大系统优化匹配的原理、限制因素和发展趋势.....	(311)
§1-1	大系统优化匹配是减少烟损的重要途径.....	(311)
§1-2	大系统联合匹配的工程和经济限制因素.....	(313)
§1-3	发展概况和趋势.....	(316)
第二节	联合匹配的范围和形式.....	(317)
§2-1	单元内部的匹配改进.....	(317)
§2-2	工艺装置之间的联合.....	(321)
§2-3	蒸汽-动力系统的优化和与工艺过程的联合.....	(323)
§2-4	储运单元与工艺装置间的联合.....	(327)
§2-5	内外各种低温热阱的利用.....	(328)
第三节	能量的升级利用.....	(330)
§3-1	升级利用的途径.....	(330)
§3-2	升级利用的技术开发和应用概况.....	(333)
§3-3	升级利用技术的烟分析和应用技术经济条件.....	(335)
第四节	过程高温端的功热联产.....	(340)
§4-1	燃机功热联产技术在石油化工厂应用概况和形势.....	(341)
§4-2	燃机功热联产省能原理和热力学分析.....	(344)
§4-3	当前发展燃机功热联产技术的现实工程、经济问题.....	(347)
第五节	大系统优化匹配的工作方法和步骤.....	(351)
§5-1	热量的大系统优化匹配.....	(351)
§5-2	蒸汽产、用的统筹安排.....	(360)

§5-3 动力供需的平衡安排.....	(363)
§5-4 三个子系统的相互关联和统筹安排.....	(366)
第九章 强化单元操作过程.....	(369)
引言.....	(369)
第一节 传热过程的强化.....	(370)
§1-1 节能进展给冷换设备带来的变化和要求.....	(370)
§1-2 提高传热技术水平的途径.....	(372)
第二节 传质过程的强化.....	(380)
§2-1 降低分馏能耗与强化传质过程的关系.....	(380)
§2-2 强化传质过程的途径.....	(383)
第三节 动量传递和转换过程的强化.....	(388)
§3-1 动量传递过程的阻力剖析.....	(388)
§3-2 流动系统能耗最小化的优化设计.....	(390)
§3-3 强化流动能耗转换过程.....	(391)
第十章 减少排弃能耗.....	(396)
引言.....	(396)
第一节 减少散热损失.....	(397)
§1-1 散热和冷损的能耗经济分析.....	(397)
§1-2 客观条件影响散热损失的规律.....	(400)
§1-3 改进保温、保冷的途径.....	(403)
第二节 减少物流排弃能耗.....	(406)
§2-1 减少显热排弃.....	(406)
§2-2 减少排弃或回收潜热.....	(408)
§2-3 减少排弃物流的化学能损失.....	(409)
第三节 减少冷却排弃的途径与限度.....	(409)
§3-1 减少冷却排弃的途径.....	(409)
§3-2 减少冷却排弃的热力学限度.....	(410)
§3-3 减少冷却排弃的客观条件和技术经济限度.....	(410)
第十一章 保持优化的运行状态.....	(412)
引言.....	(412)
第一节 正常运行下的波动因素和监控措施.....	(412)
§1-1 加热炉的节能监控.....	(412)

§1-2	分馏塔的节能监控.....	(413)
§1-3	过程系统的分级控制.....	(414)
§1-4	蒸汽系统的节能监控.....	(415)
第二节	负荷率对能耗的影响和优化对策.....	(418)
§2-1	负荷率对能耗的影响和估算方法.....	(419)
§2-2	低负荷运行时的节能对策.....	(422)
第三节	其他变化因素对用能的影响和对策.....	(424)
§3-1	原料性质的变化.....	(424)
§3-2	加工方案的变化.....	(425)
§3-3	气候条件的变化.....	(425)
第十二章	炼油厂用能综合设计和改进规划.....	(427)
引言		(427)
第一节	过程用能综合的方法和思路.....	(428)
§1-1	过程用能改进的一般方法程序.....	(428)
§1-2	过程用能改进的基本原则.....	(430)
§1-3	过程用能综合或改进的总体思路.....	(431)
第二节	工艺装置设计用能综合.....	(433)
§2-1	工艺装置设计和改进中的自身用能综合.....	(433)
§2-2	内外用能联合匹配的优化调整.....	(435)
§2-3	装置用能设计方案的分析评价和反馈调整.....	(436)
第三节	初步可行性研究阶段的全厂用能综合.....	(438)
§3-1	由地理条件、能源构成的技术经济分析决定用能策略 原则.....	(438)
§3-2	由现状估计和发展预测确定统一的技术经济尺度.....	(440)
§3-3	总流程方案和用能方案的相互关联制约.....	(441)
§3-4	工作方法和步骤.....	(442)
第四节	全厂总体设计用能综合.....	(444)
§4-1	工厂设计用能综合工作的组织.....	(444)
§4-2	工厂设计用能综合的工作步骤.....	(446)
§4-3	综合方案最终结果的表示和说明.....	(449)
第五节	现有炼厂用能改进的规划.....	(451)
§5-1	制定规划的决策.....	(451)
§5-2	委托和组织.....	(452)

§5-3 前提和准备.....	(453)
§5-4 现状的用能分析.....	(455)
§5-5 用能改进总体方案的初步制订.....	(455)
§5-6 用能改进方案的落实安排.....	(456)
符号表.....	(458)
附录A 焓的计算.....	(463)
A-1 焓计算的基本式.....	(463)
A-2 基准态.....	(465)
A-3 物理焓的计算.....	(467)
A-4 化学焓的计算.....	(477)
附录B 元素和化合物的化学焓	(492)
附录C 常用单位SI制与公制换算表	(497)
参考文献	(498)

上 篇

工艺过程用能原理

绪 言

什么是能量？

各种工艺过程需要能量，人们的日常生活离不开能量。燃料的化学能、机械运动的能、电能、核能乃至太阳能、生物能、海洋能……纷繁的种类，千差万别的形式所描绘的“能量”世界的图景令人眼花缭乱，如何从中把握它们的共同的本质性的涵义呢？

作为哲学范畴来说，一般意义的能量，就是物质运动变化的属性，是物质运动变化及其相互作用的量度。

各种不同形式的能源和不同的利用形式，不过是反映了客观存在的物质运动形式的多样性。但是，不论运动形式有多少，它们的相互作用的本质都是共同的，都以能量来表现和量度。因而，能量乃是各种运动形式，纷繁世界相互联结、作用、转化的唯一媒介和桥梁。

然而为了揭示能量利用的原理，停留在这个一般意义的理解上显然是不够的。必须对上述物质的运动变化和相互作用的涵义作进一步的、具体的探索。

综观人类对各种能量的利用，在其千差万别的目的和结果中存在着一种共性。烧炉子是为了烧饭、取暖，工业炉则是把冷原料加热后或分解、或化合、或塑型……用电机是为了机床转动，把坯料切削成零件，车辆用燃料是为了把载荷从一地运移到另一地，泵送流体是为了令它通过所有必要的工艺设备。由此已可概

括出，这共性就是完成某种为人所需要的变化。完成这些变化都是靠利用能量。因此，从实用的意义上可以说：能量就是促成变化的能力。

而当我们回过头来看看那些给我们提供能量的资源——“能源”时，又可以发现另外一种共性。燃料有化学能，是因为它（例如碳C）有能够（在一定条件下：燃点）同空气中 O_2 化合成 CO_2 的本性或趋势， CO_2 则没有自发分解为C和 O_2 的趋势。昆仑山流下的长江水力能在于它有从几千米海拔高度流向海平面的趋势。电能在于在高于大地电压之下，自由电子有流向零电位的趋势……总之，从溯源的意义上说，能量又是（客体自身）发生变化的趋势和能力（这个认识十分重要。它提醒我们，在说到任何一个物质、一个体系在某个状态下所具有的能量时，总是指它从这个状态变化到另一个状态的趋势或能力。只有一个状态，而不提相对于另外某个状态，就谈不到变化趋势，也就不能定义具体的能量）。

由此可见能量的利用的本质，是在人的安排下（通过某种相互作用）以某些自然发生的变化去促成人类所需要的变化。

能量既然寓于物质的运动变化和相互作用，因此能量的形式也同物质运动变化的形式一样多。就迄今所认识的物质结构和运动形式来说，能量大致可有下列几级：

(1) 宏观物体的机械运动 在万有引力和其他宏观力作用下的天体运动，各种自然或人工的机械运动；相应的动能，位能，自然界中的水力能，潮汐能等等。

(2) 分子级的运动 各种力的作用都可能产生分子的热运动；与之相应的能量形式有热（能）、膨胀功、（压力能）表面功（能）等等。

(3) 电子级的运动 包括在电磁力作用下原子外层电子的运动和变化（化学变化和化学能）和自由电子的运动（电、磁能）。

(4) 核子级的运动 在核力作用下，原子核的自然或人工的裂变或聚变、基本粒子的相互作用和转化；相应的核能，太阳辐

射能等。

每种运动又都可有物质流和波动两种能量传布方式。

而从可供人类利用的自然能量资源的角度，能源又可分为：

(1) 地球内部伴随地球形成和变化而存在的：矿物核能、地热能。

(2) 过去的太阳能所造成的：化石燃料的化学能。

(3) 现在的太阳和天体作用形成的能：包括直接的——太阳辐射能；间接的——海洋温差能、潮汐能、生物能、江河水力能、风能等。

工艺过程迄今主要是利用化石燃料化学能资源，通过转换，以热、电、机械能的形式加以利用。

研究能量利用过程的任务，就在于揭示前后两个变化及其相互关联的内在规律和定量的关系，从而提高能量利用的效率，即以最少的直接能源和间接资源消耗取得最大的目的过程完成的效果。

第一章 工艺过程用能的热力学基础

引 言

热力学是研究能量转换及其有关规律的科学，因而它是研究工艺过程能量利用的最主要的理论基础。但须指出，无论是经典热力学，还是工程热力学，以前的体系，都是侧重于研究由热到功的转换，及其在各种热机上的应用。化学热力学则侧重于应用热力学方法研究化学反应的方向和限度。而就工艺过程（这里“工艺过程”一词泛指多由连续、稳定流动的物流的物理、化学等变化构成的各种工业生产过程，如炼油、化工、轻工、冶金及其他部门中的大部分过程）中能源怎样才能得到合理的利用，以及前述自然界的能源的利用怎样才能达到尽可能高的效率这样的课题来说，老的热力学体系和与之相适应的各种定律的表达方式显然已不完全适应。近年来发表的研究进展和出版的教科书中，大都不同程度地反映了热力学发展的这种趋势，并且提出了“寂态热力学”（Dead State Thermodynamics）^{〔1〕}的概念，以示在经典热力学（Classical Thermodynamics）的基础上更加强调系统与环境间的作用，以及这一类过程的特点。它可能成为热力学的一个分支，但目前尚未形成公认的完整的体系。

在本书中，将采用“用能过程热力学”一词^{〔2〕}，并将从有利于更清楚和简捷地阐明用能过程的角度，表达和运用热力学的基本定律，从而使它们具有与在经典热力学中不同的形式。

第一节 基本概念

为了在以后的应用中得到科学的概念和准确的涵义，首先介绍一些热力学的基本概念和术语。其中，有的将同经典热力学所