

烟分析节能技术

项新耀 李东明 吴照云 编著



石油工业出版社

烔分析节能技术

项新耀 李东明 吴照云 编著

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书从全面阐述能的量与质的性质及其变化规律入手,深入浅出地介绍了烟的基本知识和烟分析原理。在此基础上,重点介绍了著者对烟分析工程应用研究的主要成果:1.以“两箱法”为主体的工程烟分析方法;2.以“三箱法”为特征的工程烟平衡分类组合测试法;3.具有工程实用性和具备使用可操作性的烟分析系统节能技术。三部分内容形成一个整体,为工程技术人员学习、运用烟分析解决工程实际中的用能问题提供了基础。

本书适用于中、初级各类工程技术人员和技术管理人员阅读,也可用作高等、中等院校能源应用类专业的参考书。

烟分析节能技术

项新耀 李东明 吴照云 编著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 $7\frac{5}{8}$ 印张 3插图 195千字 印1-1000

1995年2月北京第1版 1995年2月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-1163-8/TE·1072

定价:15.00元

前 言

本世纪七十年代初的世界性能源危机，引发了国际性的烱分析热。不过，之所以形成烱分析热，却是偶然之中的必然。一方面，随着世界范围内经济的高速发展，无论生产还是生活，对能源的需求量均急剧增长，如何更科学、合理地利用能源，自然就成为众所瞩目的热门课题；另一方面，有关烱的理论及其派生的烱分析方法，经过二十余年的研究、发展，已逐渐进入某些应用领域，开始显示其对科学用能的巨大指导作用。因此可以说，研究、应用烱分析的热潮，乃是势在必发，而能源危机的引发作用，只不过加速了原来较为缓慢的进程。

我国虽未受到能源危机的直接冲击，但我国学术界却敏感于国际性的烱分析热。一些研究者、能源工作者，于七十年代末，竟不约而同地投入了这股国际性的学术洪流，并于1981年召开了首届烱分析学术会议。此后，每二年举行一次，至今已接连开了六届。值得指出的是，1990年由大庆石油学院负责筹办的第五届会议，一改历届会议以大专院校、科研院所的科研人员为主的传统，积极吸收了一批石油、石化企业的科技人员参加会议，使会议在保持往届会议有浓厚的学术气氛的同时，又增添了讲求效用的工程气息，在1992年广州召开的第六届会议上又继续推进了这一趋势。可以看出，一个发展烱分析工程应用研究与工程技术人员广泛应用烱分析的势头正在兴起。事实上，近几年来，在一些部门，如石化、石油、化工等系统，已有一批为数不少的工程技术人员以及管理人员，结合自己的工作实践，在学习、应用烱分析知识和技术。可以预见，将会有越来越多的科技人员投入到这样的学习中去。

对于工程技术人员和能源管理人员来说，他们首先渴望学

习、了解焓分析方面的知识，并进而要求解决如何尽快地将理论知识应用于工程实际和工作实践。编著、出版本书的目的正是为了适应、满足这一需要。

本书与国内已出版的十余种焓分析专著、译作在立意上有所不同。概言之，本书着重于论述焓分析在工程应用中的技术性，强调焓分析的工程实用性和应用过程的可操作性，并以获取节能效益作为最终目标，因之，将本书定名为《焓分析节能技术》。

本书的主要内容是著者多年来对焓分析工程应用进行广泛研究取得的成果，其中核心部分是以“黑箱—白箱法”（设备）与“黑箱—灰箱法”（系统），即“两箱法”为主体内容的工程焓分析方法和以“三箱”（黑箱、白箱、灰箱）分类组合测试为特征的工程焓平衡测试方法，以及焓分析系统节能技术。实践证明，这些方法和技术确是运用焓分析理论解决工程用能实际问题的有效方法。

本书适宜于一般工程技术人员和技术管理人员阅读。为此，在内容方面不涉及过深的理论阐述和计算公式推导，而尽量采用由感性及理性，从现象到本质的阐述方法，这就为广大非能源应用专业类的科技人员阅读创造了条件。

本书由大庆石油学院热能工程研究室组织撰写，其中第七章由李东明编写，第九章由吴照云编写，其余各章由项新耀编写。全书由项新耀担任主编并统稿。

限于著者的学术和技术水平，书中定有错误和不当之处，恳请读者批评指正。

作者

1993.6.

符 号 表

英 文

B 燃料耗量	V 容积
C 热容	v 比容
c 比热、速度	W 功
E 能量	w 比功
F 力	x 千度、摩尔成分
G 重量	z 高度
g 重力加速度	
H 焓	A_n 炆
h 比焓	a_n 比炆
M 摩尔质量	c_p 定压比热
m 质量	c_v 定容比热
$\dot{m}$ 质量流率	E_x 炯
N 功率	e_x 比炯
n 千摩尔数	Q_h 高位发热值
p 压力	Q_l 低位发热值
Q 热量	S_f 熵流
R 气体常数	S_g 熵产
r 汽化潜热	R_m 通用气体常数
S 熵	W_f 摩擦功
s 比熵	W_l 损失功
t 摄氏温度	W_s 轴功
T 热力学温度	W_t 技术功
U 内能	E_{xa} 空气炯
u 比内能	E_{xf} 燃料炯

E_{xh} 焓焔

E_{xk} 动焔

E_{xl} 焔损失

E_{xm} 物流焔

E_{xp} 位焔

E_{xQ} 热焔、热量焔

$E_{xQ'}$ 冷焔、冷量焔

W_{ef} 有效功

W_{en} 环境功

A_{nf} 炆流

A_{ng} ρ^2

E_{xef} 有效焔

E_{xch} 化学焔

E_{xch}^0 标准化学焔

E_{xph} 物理焔

E_{xefc} 有效耗焔

E_{xeft} 有效输出焔

E_{xinef} 无效焔

希 文

α 过量空气系数

γ 重度

Δ, δ 变化量

ε 热力学力完善度

ζ 温度修正系数

η 效率

θ (正、反) 焔效率偏差率

λ 能级、能质系数、焔损系数

ρ 密度

Σ 连加号

σ 焔损率

ϕ 能质

ρ 相对湿度

κ 焔损系数偏差率

λ_c 能损系数

η_c 能量(源)利用率

η_h 热效率

η_I 热力学第一定律效率

η_{II} 热力学第二定律效率

η_{ex} 焔效率

上 角 标

f 应用基

s 系统

下角标

a 空气、干空气

c 冷 (物流)

e 能量

f 摩擦、燃料

h 热 (物流、介质)

k 动能

l 损失

m 混合物

n 基准态

o 环境态

p 位能

s 系统、饱和状态

v 水蒸气

+ 正 (平衡)、加入

- 反 (平衡)、放出

br 带入

ef 有效

en 环境

ex 焓

in 输入、内部

out 输出、外部

sin 系统内部

sup 供给

目 录

符号表

第一章 绪论	(1)
第一节 用能效率	(1)
第二节 传统用能理论的不足	(4)
第三节 全面认识能的基本属性	(6)
第四节 关于炯分析节能技术	(10)
思考分析题	(11)
第二章 能量与能量守恒原理	(13)
第一节 常用能量的形式	(13)
第二节 能量的转换形式	(14)
第三节 能量系统	(16)
第四节 能量守恒原理及其应用	(20)
第五节 能量 (平衡) 分析	(26)
思考分析题	(29)
第三章 能质与能质蜕变原理	(32)
第一节 能的价值论	(32)
第二节 能的不等价性的实质	(34)
第三节 能质概念的建立	(37)
第四节 能质蜕变原理	(38)
附: 熵与熵产	(43)
思考分析题	(44)
第四章 炯的基本知识及炯值计算	(46)
第一节 基本概念	(46)
第二节 炯的定义	(54)
第三节 物理炯和化学炯	(58)

第四节 传递焓	(66)
第五节 几种工程常用物质焓的计算	(68)
思考分析题	(77)
第五章 焓分析原理	(78)
第一节 用能分析的实质	(78)
第二节 两类能量损失	(79)
第三节 两种焓损失	(81)
第四节 焓平衡模型与焓平衡方程	(87)
第五节 焓分析准则	(91)
第六节 焓分析的特点	(99)
思考分析题	(103)
第六章 工程焓分析方法	(105)
第一节 概述	(105)
第二节 工程焓平衡方程	(109)
第三节 工程焓分析准则的计算式	(112)
第四节 三种基本分析模型	(114)
第五节 单体设备的焓分析方法——“黑箱—白箱”分析法	(120)
第六节 生产系统的焓分析方法——“黑箱—灰箱”分析法	(128)
思考分析题	(136)
第七章 生产系统的焓平衡测试	(137)
第一节 工程焓平衡测试的目的、要求及特点	(137)
第二节 焓平衡测试原理	(138)
第三节 焓平衡测试模型	(139)
第四节 生产系统的焓平衡测试方法	(145)
思考分析题	(151)
第八章 焓分析系统节能技术	(153)
第一节 节能技术概述	(153)
第二节 系统焓分析的操作程序	(156)
第三节 系统用能优劣评定	(162)
第四节 系统用能薄弱环节识别	(167)

第五节 系统的节能及节能潜力估算	(170)
第六节 系统用能改进决策	(174)
思考分析题	(176)
第九章 热经济学基本原理及其应用	(178)
第一节 概述	(178)
第二节 焓成本的代数方法	(181)
第三节 热经济学应用	(185)
思考分析题	(197)
附录	(198)
附录 1 元素标准化学焓 (据龟山—吉田环境模型) ⁽²⁷⁾	插页
附录 2 元素标准化学焓 (据何耀文环境模型) ⁽²⁸⁾	插页
附录 3 主要无机化合物的化学焓 (日本国标)	199
附录 4 主要有机化合物的化学焓 (日本国标)	201
附录 5 化学焓的温度校正系数 ξ ⁽²⁹⁾	202
附录 6 有机物质的标准热力学数据 (latm, 298.15k) ⁽³⁰⁾	204
附录 7 无机物质的标准热力学数据 (latm, 298.15k) ⁽³⁰⁾	210
附录 8 空气在理想气体状态下的热力性质表	225
参考文献	230
附图 水蒸气的焓—熵图	

第一章 绪 论

第一节 用能效率

人类利用能量的历史，是一部不断地提高用能效率，以适应人们生活需要和社会生产发展的历史。

所谓用能效率，简单地讲就是供给能中有效利用的能量所占的百分比。

人类探索提高用能效率，经历了一个由自发到自觉、从用量到量、质并用的漫长历程。

用能史上，最早采用的是很简单的用能方式，如直接释取太阳能，简易地利用风能、水力能等。这是人类的原始用能时代。在大自然中，太阳能、风能、水力能，比比皆是，取之不尽。然而这种原始用能受诸多因素约束，难以遂人所愿。比如太阳能，虽可以方便地用于取暖晒物，但阳光照射既有周期性，又变化无常，并不听令于人；风能到是扬帆的动力，但风力、风向不都规律，常常无从控制。可见原始用能是一种被动式的用能。人类为了摆脱这种被动，不断寻求新的用能途径。一个突出的成就是懂得了用火。据一个英国勘探队在肯尼亚的发现，确认早在 140 多万年前就有了粘土的火制品^{〔1〕}。天然起火本是人类的一种灾难。火山爆发，致使生灵涂炭。雷电酿起的森林火海，更令人恐怖生畏。人类的祖先也许是从尝到了火烧兽肉的香味中萌发了用火的念头，又经过了不知多少人无数次试验，才终于学会了如何取得天然火种，保存火种，以及用火的方法，这大概是人类最早的用能技术吧。

天然火的利用，并没有使人类摆脱被动用能。可以说，整个原始用能时代，只不过是一种“听天由命”的自然用能而已。

人工取火，是用能史上一项伟大发明，是人类变被动用能为

主动用能的转折点。特别是人工取火与矿物燃料的利用相结合，使人类进入了广泛应用热能的时代，从而使热能由取暖、熟食等的单纯生活利用，逐渐发展到焙烧陶瓷、冶炼金属、熔铸器皿等各种生产利用。在数千年（抑或数万年）的用热实践过程中，人们努力探索，改进用热方法，发明、制造了大量的燃烧设备和用热器具，以满足生产发展的需要。毫无疑问，整个热能时代，积累的用热经验是极其丰富的，但也只是经验积累、感性认识而已，还未能升华到科学理性认识的高度。可以说，这是一个自发地追求用能效率的漫长历史时期。

十八世纪中叶，开始了人类的蒸汽时代，热能动力应运而生，这是人类用能史上具有划时代意义的里程碑。据记载，中国在 1678~1679 年就有人试验蒸汽车、蒸汽船⁽²⁾，这比英国人瓦特 1763 年发明的蒸汽机早了八十多年。不过当时处于资本主义兴起的英国，才使瓦特蒸汽机得到了实际应用，从而揭开了波及全球的产业革命序幕。

倘若说数千年的用热实践孕育、促成了热力学第一定律的建立，那么始于十八世纪中叶，持续近一个世纪的对热动力科学技术的探索、实践，则导致了热力学第二定律的发现。一、二定律终于在十九世纪五十年代和六十年代先后创立。由此开始，人类的用能才有了科学理论指导，蒸汽动力时代也以前所未有的速度向前发展。继瓦特蒸汽机的发明，1829 年英国人乔治·斯蒂芬森开始用蒸汽机车，有力地推动了交通运输业的发展。1882 年，瑞典人德·拉伐尔制成冲动式汽轮机。1884 年，英国人帕森斯制成反击式汽轮机。汽轮机的发明，不仅为大工业提供了强大动力，也使蒸汽动力时代推向技术高峰。

与此同时，内燃动力也不断问世，投入实用。1876 年，德国人奥托发明了煤汽机。1892 年，狄塞尔发明了柴油机⁽²⁾。内燃机的发明使用，使陆上交通大为改观，航海、航空业也随之兴起。

蒸汽动力与内燃动力都属于热能动力，由此而形成了热动力

时代。这一时代的显著特征是用能效率（热效率）迅速提高。最早的蒸汽机，热效率不过 1~2%。蒸汽动力装置的循环热效率，本世纪初也不到 10%，但四十年代就提高到 30%，八十年代超过了 40%。热效率之所以能迅速提高，不能不归功于用能理论的巨大指导作用。

在以用能理论指导用能实践的过程中，随着人们对能的属性认识的不断深入，用能效率的概念也随之发生变化。在相当长的一段时间，人们只是以热力学第一定律为依据，单纯从能量平衡的观点，以热效率作为用能评价的基本指标。但无论是从理论上或是从使用价值看，能不仅有量的多少，而且还有质（能质）的差异。热效率只是反映了能的数量有效利用程度，并不能全面地反映能的有效利用状况。

十九世纪三十年代以来，一些研究者以热力学第二定律为指导，开始注重对能质进行研究⁽³⁾，从而导致了五十年代一个新的热力学参数——焓的建立。表示能质有效利用的准则——焓效率也随之产生。从热效率到焓效率，不只是用能效率的含意发生了“质”的变化，而且推动了一种新的用能技术，能量与能质得以全面利用的新技术——总能技术的广泛应用⁽⁴⁾。

总能技术的最初形式是热电厂的热电联产。七十年代以来，这一技术又迅速发展应用到化工、冶金、机制、轻工、建材等多种工业部门，形成了蒸汽型的热—电联供、热—动联供总能系统，燃气型的热—电联供、热—动联供总能系统、内燃机总能系统、热—电—冷联供总能系统等多种形式。

总能技术的出现，标志着人类进入了一个用能新时代——总能利用时代。倘若说热能时代主要是解决如何提高设备用热效率，热动力时代主要是解决如何提高装置焓效率的问题，那么，总能利用时代则是将上述二者结合，创造了一种使热效率与焓效率得以同步提高的用能成套新技术。

实践证明，以热力学第一、第二定律为指导，同时注重能量与能质利用的总能利用技术，为人类提供了合理地、有效地利用

能量的科学方法，从而使人类用能达到一个新水平。

第二节 传统用能理论的不足

随着热力学第一定律的建立和应用，传统的用能观点也随之形成，日趋完善。至今，以传统用能观点指导用能已有一百四、五十年的历史。

如上所述，用能设备和用能技术是在热能时代开始形成、发展起来的。对用热来说，最早出现的是产生热能和利用热能二者合为一体的设备，如烧水用的热水锅炉，熔炼矿石的冶炼炉，用于物料升温的加热炉等。为了评价这些炉子的用热状况，提出了一个技术指标——热效率，它表示有效利用的热量占（燃料）提供能量的百分比。即：

$$\eta_h = \frac{\text{有效能量}}{\text{供给能量}} \times 100\% \quad (1-1)$$

显然有效利用的热量越多，热效率就越高。此后，热效率这个指标逐渐推广应用到了各种用热设备，成为一个普遍采用的用热设备的评价指标。

传统的用能理论采用热效率作为用能评价的基本指标，这是它与别的用能理论之间的主要区别。另外，在进行能量分析时，把设备向外界（环境）排放的能量视为设备唯一的能量损失，也是传统用能理论的一个要点。

在用能史上，特别是热能时代，有关如何提高热效率的研究，对用能水平的提高曾起了巨大的作用。然而，随着用热范围的日益扩大和用能方式的不断改进，传统用能理论的缺陷（热效率应用上的局限性）逐渐暴露出来。试看下面几个实例。

例 1：有两种不同的采暖方式，一种是锅炉供热水采暖，以燃料能为供给能计算，系统热效率为 65%；另一种为电热器取暖，以输入电能为供给能计算，热效率高达 95%。后者的热效

率显著高于前者。能否由此得出结论：电热采暖系统优于热水采暖呢？答案是否定的。因为电热器的热效率纵然很高，但就常识判断，以昂价的电来换取低品位的热是划不来的。（通常电热成本至少要比燃料取热成本高五、六倍）。

例 2：一个集中供热系统，系统热效率为 65%。一套蒸汽动力装置，热效率为 33%。二者的热效率相差一倍。是否可以据此认为供热系统优于动力装置呢？当然不是，众所周知，动力装置输出的是电或机械能，而供热系统仅是提供低品位的热而已。无论是经济价值或实际效用，电远比热更有价值。

上述两例说明，对于不同种类能量转换为同种能量（例 1），或反之，由同种能量转换为不同种能量（例 2），都不能仅用热效率一个指标来评价用能水平。

我们再来讨论转换前后能量形式都相同的情况，此类现象更为普遍。如加热炉、冶铁高炉、炼钢转炉等，输入的都是燃料能，输出（或有效利用）的都是热能。对于这种情况，通常也是取热效率作为用能评价的基本指标，但从下面的例子中，我们同样会发现一些问题。

例 3：两台锅炉，一台为生产 90℃ 热水的供热锅炉，一台为生产 3.8MPa、450℃ 水蒸汽的动力锅炉。两台锅炉的热效率均为 85%，试问二者“等价”吗？显然并不等价。不言而喻，动力锅炉生产的蒸汽，可以推动汽轮—发电机组发电，而供热的热水一般则不能。因此，从“产品”的价值和效用来说，二者是有显著差异的。

由此看来，仅以热效率^①作为用能评价的基本指标，在很多情况下是无法对用能状况作出全面的科学的评价的，甚至有时还会导致错误的结论，这不能不说是传统用能理论的一大缺陷。

传统用能理论的另一缺陷是在节能以及与之相关的对能量损失的认识方面。这可以从下面的例子中得出来。

① 还包括以后随着用能范围的扩大而引入的能量利用率或能源利用率。

例 4: 一台供热锅炉的热效率达到了最高极限, 或者说能量损失已降到最低限度。试问这台锅炉还有没有节能潜力? 能损失还能不能减少? 若用传统的用能理论回答, 无疑都是否定的。然而按现代用能理论来分析, 则是肯定的。二者的区别在于对能量损失的认识上。按现代用能理论, 能量损失不仅存在于用能系统的外部(由系统向外界排放引起的损失), 而且还存在于用能系统的内部^①。对锅炉来说, 通常内部损失要比外部损失大得多, 且内部损失是可以减少的。这就表明它还有节能潜力, 甚至有很大的节能潜力。

由此看来, 传统用能理论不是完整无缺、无懈可击。从以上几个例子至少可以说明两点: 一是热效率这个指标在使用上有一定的局限性, 仅用它来作用能评价是欠科学的; 二是只承认外部能量损失的观点具有片面性, 甚至可能由此导致错误的结论。显然, 在热效率之外, 还得建立一个新的用能评价指标, 以组成一个科学评价用能水平的指标体系; 同时, 还要在既承认外部能损, 又承认内部能损的基础上, 建立一个全面分析能量损失的方法。众多研究者为此作出了巨大努力, 幸运的是, 现代用能理论的创立, 使这一切都迎刃而解了。

第三节 全面认识能的基本属性

为什么热效率这个指标的使用有局限性? 为什么在能量平衡中只有外部能量损失? 要回答这些问题, 得从对能的基本属性的认识说起。

热力学第一定律确认, 无论何种形式的能, 都可以取它的量来表示。因之, 能具有确定的量——能量, 无疑是能的一个基本属性。比如, 给定的电能、热能、水力能(动能及位能)都相应地可以表示为一定的电量、热量、水力能量。

自从有了能量的概念, 随之也就产生了如何计量能量的问

^① 这是由系统内部的不可逆性引起的损失, 在第五章第二节将详细论述。