

能源工程中焓的浅释

〔日〕信澤寅男 著

化学工业出版社

内 容 提 要

本书是向具有一定热能管理基础知识的人员系统介绍燃烧的一本入门书。书中对什么是燃烧作了通俗解释；对实际应用中出现的燃烧的分析方法作了具体的或数学式的阐述；研究了燃烧是如何失败和散失的，以及防止燃烧损失的基本考虑方法；介绍了一般装置通用的、运用燃烧的概念进行能量分析的方法；介绍了各种典型设备运用燃烧概念进行能量分析的具体方法；探讨了燃烧的适用方法以及节能的可能性。全书通俗易懂，比较结合实际。本书可供从事能源工作的广大科技人员阅读，也可供大专院校师生参考。

エネルギー——工学 の た め の エネルギー——入門

信澤寅男 著 1980

株式会社 オーム社

昭和55年10月25日第一版第一刷発行

能 源 工 程 中 燃 的 浅 释

朱明善 刘颖 译

王锦成 增

责任编辑：谭俊杰

封面设计：任辉

化学工业出版社出版

(北京和字第七十六号)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₃₂印张9 字数196千字印数1—1,720

1987年8月北京第1版1987年8月北京第1次印刷

统一书号15663·3890 定价1.90元

译 者 的 话

本书是根据日本关西大学教授、工学博士信泽寅男1980年所著的《能源工程中烟的浅析》一书译出的。原书是作者向日本具有一定热能管理知识的工程技术人员介绍有关烟的基本知识和应用的一本入门书。通俗易懂,概念清晰,而且侧重于工程实际运用。书中列举了锅炉、余热锅炉、工业炉、冶金炉、换热器、空调、干燥、火力发电和热电联产等方面的烟分析实例,内容丰富。因此,我们认为此书对于我国在热动力、石油、化工、冶金、建材以及轻工业等工业企业部门中从事能源管理、能源技术和能源经济工作的广大工程技术人员将会起到一定的作用。对于高等院校上述有关专业的师生,同样会有所裨益,可以作为相应的参考教材。

本书由清华大学热能工程系朱明善(第一、三章)、刘颖(序言、第五章的前九节)、王维城(第四章、第五章的后三节、第六章、结束语)和增增(第二章)翻译,并且进行了互校,最后由朱明善统稿。限于译者的水平,译文难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

译 者

1983年10月

序 言

1973年以来的六年间，原油价格已飞涨到15倍，根据一般预测，今后十年中，原油价格还要上涨到2~3倍。即使如此，对日本来说，仍然不得不从国外继续进口原油。日本人以其勤奋和技术赚取的外汇，转眼间又将落入中近东各国之手。

对于日本，可以说是摄取的能量“营养”过多，以致患上了高血压症。需要适当控制和减少能量的使用，以恢复成健壮的青年人。其食物疗法在于节能，真正长肌肉、壮身体的营养将是烟。为了使烟真正发挥作用，必须了解烟、掌握烟的使用方法。

本书是由欧姆出版社热心组织出版，向具有一定热能管理基础知识的人员系统介绍烟的一本入门书。就烟来说，也还有一些地方没有彻底研究清楚，也存在着发现划时代的新的能源使用方法的可能性。为了加深理解，有些内容可能显得有些过于重复。另外，本书尽可能采用SI制，因而可能使一些读者稍感不便，敬请鉴谅。

本书第一章绪论部分，对什么是烟，它是什么时候开始使用的，作了通俗解释，对本书后面各章节将出现的有关术语给出了定义；并就烟和一般的能量之间的联系等问题作了简要的说明。第二章，对实际应用中出现的烟的分析方法作了具体的或数学式的阐述，对于在各种形态的能量中烟的存在方式作了分析说明。第三章，较为详细地研讨了烟是如何

失效和散失的，并对防止烟损失的基本考虑方法作了讲述。第四章，介绍了一般装置通用的、运用烟的概念进行能量分析的方法。第五章，就各种典型设备，对运用烟概念进行能量分析的具体进行方法作了介绍。第六章，从节能的角度，就如何有效使用烟，以及节能的可能性问题，讲述了作者个人的一些意见。

本书是在参考了以德国朗特（Rant）为首的许多学者大量宝贵的研究成果的基础上写成的。出版过程中，又承蒙许多方面的同仁提出了宝贵的意见、指教和帮助，这些已在本书中加以采纳。作者对此表示衷心的感谢。对允许将有关数据、图表和术语引用和转载于本书的各位同仁表示深切的谢意。有些数据可能没有经过允许就冒昧引用，在此表示歉意。

作者

1980年9月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 什么是焓	1
1.2 焓的起源	2
1.3 基本术语	3
1.4 能量的形态	6
1.5 能量的作用	8
1.6 能量守恒原理	9
1.7 焓与熵	10
1.8 焓与焓	12
1.9 焓减原理	17
1.10 物理焓和化学焓	18
第二章 焓的分析方法	21
2.1 节能	27
2.2 能量的损失	25
2.3 第二种损失	26
2.4 热量的传递和焓	28
2.5 高温物质的焓	29
2.5.1 比热已知的物质的焓	31
2.5.2 潜热的焓	40
2.5.3 比热随温度变化很大的场合	42
2.6 水和蒸汽的焓	43
2.7 低温物质的焓 (冷焓)	50
2.7.1 比热和潜热已知的物质的低温焓	51
2.7.2 无相变而比热为定值的物质的低温焓	55

2.8 压力和焓	56
2.9 机械焓	58
2.10 物质的混合及分离	59
2.10.1 理想气体	59
2.10.2 含湿气体	62
2.10.3 实际混合气体	63
2.10.4 溶液	64
2.11 化学焓	65
2.12 燃料的化学焓	74
2.13 反应焓	78
2.14 原子核的焓	81
2.15 电磁焓	83
2.15.1 静电能	83
2.15.2 电磁能	84
2.15.3 电能	85
2.15.4 电磁波能	86
2.16 光的焓	86
2.17 粒子的焓	89
2.18 波动的焓	90
第三章 焓损失	92
3.1 什么是焓损失	92
3.2 燃烧	95
3.2.1 理论燃烧	95
3.2.2 空气预热时的理论燃烧	99
3.2.3 过量空气时的燃烧	99
3.2.4 富氧空气时的燃烧	102
3.2.5 纯氧燃烧	104
3.2.6 不完全燃烧	105
3.3 传热	106

3.3.1 无散失热时的传热	107
3.3.2 考虑散失热时的情况	110
3.4 散失热	111
3.4.1 通过器壁的散失热	112
3.4.2 喷焰损失	114
3.4.3 排气损失	115
3.4.4 漏入空气	117
3.4.5 冷却损失	118
3.4.6 其他损失	119
3.5 混合	120
3.5.1 气体的混合	120
3.5.2 溶液的混合	122
3.5.3 化合与分解	122
第四章 烟的使用方法	125
4.1 能量设备的分析	126
4.2 能量设备的评价指标	128
4.2.1 效率	128
4.2.2 单位烟耗	136
4.2.3 工作系数	137
4.3 能流系统图	138
4.4 烟·熵流图	140
4.5 烟的评价图线	142
第五章 烟的应用举例	147
5.1 锅炉的烟分析	147
5.2 余热锅炉的烟分析	152
5.3 工业炉的烟分析	157
5.3.1 钢材连续加热炉	158
5.3.2 水泥窑	177
5.3.3 高炉	183

5.4 换热器	187
5.5 空调	192
5.5.1 供暖、供热水	193
5.5.2 湿度的调节	196
5.5.3 冷气、制冷、超低温	201
5.5.4 热泵	206
5.6 干燥	216
5.7 火力发电	222
5.8 热电联产	228
5.8.1 能量评价	229
5.8.2 以蒸汽透平为中心的热电联产	230
5.9 燃料电池	235
5.10 能量的输送	239
5.10.1 燃料输送	239
5.10.2 电力输送	241
5.10.3 热能的输送	244
5.10.4 化学能的输送	247
5.11 能量的贮存	252
5.12 运输机械(交通机械)	254
第六章 节能措施的建议	256
6.1 软能量和硬能量	256
6.2 烟的需要	258
6.3 余热的烟	263
6.4 自然能量	266
6.5 废弃物的烟	269
6.6 吸收式朗肯装置	270
6.7 综合能量规划	271
结束语	274

第一章 绪 论

1.1 什么是焔^①

在东京，冬天气温为 0°C 时，周围环境的水温大体上也就是 0°C 左右。此时，如将 $1\text{kg } 80^{\circ}\text{C}$ 的热水，与 1kg 周围环境的水混合，很容易就得到 $2\text{kg } 40^{\circ}\text{C}$ 的水。按照已往的思考方法（热力学第一定律），这里完全没有能量的损失。可是，如果不外加任何能量，只用 $2\text{kg } 40^{\circ}\text{C}$ 的水，要想得到 $1\text{kg } 80^{\circ}\text{C}$ 的水是绝对不可能的，也就是说，逆过程是不成立的。由此，我们会很自然地想到，当初不同温度的水在混合时一定是失掉了某种什么东西。

这种东西就是一种称之为焔（exergy）的量。在各种能量中，都含有焔。也就是说，不仅热能，而且在电能、光能、波动能、矿物燃料和核燃料中也都含有焔。

我们可以把焔正确地表述如下：“所谓焔，就是指理论上可能从某种能量中可逆地取出的最大的有用机械功”。如果两种能量具有相同的焔值，从理论上讲，就能从一种能量转换为另外一种能量，同样，也能逆向转换。例如， $1\text{kg } 80^{\circ}\text{C}$ 的热水，含有 41.2kJ 的焔，而 $1\text{kg } 40^{\circ}\text{C}$ 的温水含焔 11.2kJ 。因此，从理论上讲，由 $1\text{kg } 80^{\circ}\text{C}$ 的热水可以得到 $3.68\text{kg } 40^{\circ}\text{C}$

① 焔这个术语，英文为exergy，日文为エクセルギー，德文为exergie，俄文为эксергия。在国内外，也有称之为有效能、可用能、能的可用性，作功本领等等。——译者

的温水；反之，如果有 $3.68\text{kg}40^\circ\text{C}$ 的温水，也可以得到 $1\text{kg}80^\circ\text{C}$ 的热水。初看起来，这似乎有点奇妙，但是只要没有熵的损失，这是一种能够实现的现象^①。像这样，理论上能发生逆向变化，且对外界不残留任何痕迹的状态变化，称为可逆变化。给熵下定义时，可逆变化是不可缺少的条件之一。

实际上，熵的减少是必然要发生的，严格的可逆变化是没有的。这与称之为热力学第二定律的经验法则是相对应的。也就是说，热力学第二定律也可以表述为：“能量的转换，必定沿熵的总和减少的方向进行”。

就能量而言，存在着两种情况。既有像热量与机械功那样的能够迁移的量（称为迁移量），又有由物质的温度、压力、比容和组成等参数所确定的量（称为状态量）。与此对应，熵也存在迁移量与状态量这样两种情况。

另外，熵是以外界（或环境）作为基准而得出的相对量，当与环境达到平衡^②状态时，熵值变为零。反之，与环境不相平衡的状态或物质，就必然具有正的熵值。例如，低于环境温度的低温物质具有负的能量值，但其熵值却是正的。被大气包围的容器中的真空空间（或负压空间）也具有正的熵值。此外，与环境湿度不同的室内空气也具有正的熵值。

1.2 熵的起源

1956年朗特（Z. Rant）提出了一种称之为熵的概念，德意志技术工作者协会（VDI）正式采用了熵^③这个术语。但是，着眼于热力学第二定律的能量分析方法，早在第二次

① 这个在理想热机中能否实现，以后再讨论。（参看第10页）。

② 就平衡而言，有温度、压力、组成等的平衡。

③ H. D. Hannemann: BWK 8(1956)212。

世界大战之后不久，已由伏斯捷柯维克(F. Bošnjakovic)^①等人作过介绍，在日本也早已发表过松山^②等人的研究成果，可是，他们都是使用作功本领 (Arbeitsfähigkeit)、有效能 (available energy)、能的可用性 (energie utilisable) 等名称，或者是用熵来表述。后来，在日本虽然也有一部分人使用了有效能等术语，但由于这种术语与平时常用的有效的能量很难区别，易于混同，所以更要求使用新的术语熵，给它以明确的定义，使之在技术上具有确定的含义。熵这个术语，在日本也已逐渐得到普及。

1.3 基本术语

熵是一种适用于热力学的术语，所以，与熵相关的其它术语，也必须规定不能与热力学相矛盾。

在热力学中，把作为研究对象的物质或它的集合体叫做**系或系统** (system)，系统以外的统称**外界**。为了便于分析，把划分系统与外界的假想边界面称为**控制面** (control surface)。由控制面所包围的系统，专门叫做**控制体** (control system) 有时可以把控制体看成是由进一步分割成若干个支控制体 (subsystem) 的集合，而这些支控制体是由支控制面所包围的。通过控制面有物质和能量进出的系统称为**开口系统** (open system)，通过控制面有能量进出而无物质进出的系统称为**闭口系统** (closed system)。通过控制面既无能量进出又无物质进出的系统称为**孤立系统** (isolated system)。例如，发电厂内的燃料-燃烧产物-排气的

① F. Bošnjakovic: Technische Thermodynamik I (1948).

② 松山卓藏: 化学机械 14(1950)183.

系统是开口系统，而给水-蒸汽-冷凝水-给水的系统则是闭口系统。表演魔术用的密闭容器，接近于孤立系统。

表述系统状态的物质的宏观性质，称为状态量。例如，温度 T 、压力 P 、比容 v 、成分（比率） x_i 、相（固相、液相、气相）等，都是状态量。如前所述，就能量而言，既有状态量，又有迁移量，内能 U 、焓 H 、自由能 G ^① 等是状态量，而与物质本身没有关联的热量，机械功、电能和波动能等，则是迁移量。因此，如前所述，就焓而言，也有状态量与迁移量两种。

有各式各样的外界，而且外界本身又是变动和不稳定的。我们把“假想的、无限广阔的、保持着均一状态的理想外界”称为基准外界。原则上讲，焓是用相对于基准外界状态所得到的相对量来表示的。但是使用焓进行分析时，我们可以把基准外界简称为外界或环境。根据过程的目的，可以把空气作为环境，也可以把地表或海洋表面的状态作为环境。

两个系统的压力、温度和组成相等时，我们说这两个系统处于平衡状态。某个系统与环境相平衡时，则这个系统的焓值为零。然而，当系统封闭与环境之间没有物质传递时，即便其组成与环境不同，但只要温度和压力相同，仍可认为它与环境是平衡的。在像锅炉、凝汽式透平那样的稳定循环系统中，如果与环境之间没有水和蒸汽的传递，就可以把冷凝水温度作为参考基准，取冷凝水状态下的水的焓值为零来进行计算。

物质可以有固体、液体、气体、游离原子、等离子体等集合状态，这些集合状态称为相，往往用 s 、 l 、 g 分别表

① 书中此处的自由能 G 实指自由焓。——译者

示固相、液相和气相。在一个系统中，两个相能够稳定共存时，就认为这两个相处于平衡状态。例如，同一压力下的饱和水与饱和蒸汽是平衡的。因而，处于相对湿度为 100% 的空气中的饱和蒸汽与饱和水，它们的焓值都为零。化学中也常常用到平衡这个词，但此时是指在给定的温度下两个系统的自由能相等。可是，焓不一定相等。不过，就热力学而言，这是不矛盾的。

使系统的状态发生变化的途径称为过程。有定容过程、定压过程、定温过程、绝热过程，以及它们的复合过程。同样，还可以分为发生物理量变化的物理过程和存在化学反应的化学过程。还可以分为理想的可逆过程和实际发生的不可逆过程。在可逆过程中，即便对系统正在进行变化的那个瞬间来讲，系统内部以及边界面上，也必定保持着平衡。与此相反，在系统内部或边界面上存在着温度差、压力差、浓度差等等的过程，都是不可逆过程。具有焓值的某个系统，当经历可逆过程朝着与环境相平衡的状态变化时，可以作出最大有用功^①，这个最大有用功的量与系统初始的焓值相一致。如果中间存在不可逆过程，将有一部分焓失效，有用功变小。

系统发生状态变化后，又回到原来状态的过程称为循环过程。循环过程中，可以从外界取得能量，变换形态后向外界放出能量，这是一种能量转换过程。卡诺循环就是其中一例，系统从高温热源吸热，对外作功，剩余的热量排放给低温受热体（环境），系统再次回到初始状态。卡诺循环是可逆过程，所以可以进行完全的逆向过程，也就是说，可以从

① 在有用功中，不包含系统膨胀时反抗外压所作出的挤压功。

低温热源吸热，从外界得到机械功，升高温度后向高温热源放热。此时，不仅系统内部而且连外界也全部回到原先的状态。就是说卡诺循环是一种可逆循环。

1.4 能量的形态

能量可以以各式各样的形态存在、提取、转换和散逸。能量可以分为如表1.1所示的五大类，还可分得更细一些。

储存能，是指在自然环境中比较稳定地存在着，不怎么发生流动和变化的那种能量。换句话说，为了提取这种能量，必须给予温度、氧、压力、中子、电流等方面的适当的刺激。这里所说的储存能，并不是指那些借助蓄热器、储能器、飞轮、水库等暂时蓄积起来的能量。可以认为，储存能就是指那些能够在自然形态下比较容易、长期、大量储存的能量，核能和化学能是它的主要形态。

不规则能，是由于构成物质的分子和原子等粒子，在各个方向上的振动和比较自由的不规则运动所产生的能量，宏观上可以以温度和压力而被观测出来。由于分子运动的方向等都是不规则的，所以从这种能量中能够提取出的机械功就比较少。也就是说，作为能量来讲，它的质量低，而且含焓的比率（焓与相对焓值的比率称为能质系数）小。另一方面，冷能^①、负压能，具有负的焓值，但它们的焓值是正的。冷能的焓值，随温度的降低而增大。同样，负压空间越接近于真空，焓值就越高。

机械能，包含物体的宏观动能、位能或旋转动能以及弹簧、发条等的弹性能等能量。机械能，从本质上讲与焓是相

① 有时把冷能 (die Kälte) 称为冷热。

表 1.1 能量的分类

		例
能	化学能	—生物燃料
		—矿物燃料
		—核燃料
		—电池
		—化学能
		—浓度差
	热能	—热能
		—压力能
		—冷能
		—机械能
	电磁能	—动能
		—位能
		—振动能
		—电能
	辐射能	—静电能
		—磁能
		—太阳热
		—电磁波
	其他	—声波
		—核放射线
		—弹性波

等的，但由于焓是相对于环境的相对量，所以动能焓，要用相对于大地的相对速度来计算，位能焓要用从地表面（或水

准面)起算的高度来计算。运动物体遭受摩擦阻力、粘性阻力、惯性阻力时,它的一部分动能将转换成热能。压缩唧筒、鼓风机、爆炸物、运输机械、机床等全都是实施机械功的工具。记机械功直接转变成化学能和核能的方法,目前尚未发现。不过,在不久的将来会有所发现的。

电磁能中,最主要的是由电压与电荷移动量的乘积所得出的电能,理论上100%都是焓。实际上,90%以上的电能可以转换为机械能。所发生的损失,仅仅是由电阻所产生的热能和向周围的放电。低阻抗电磁线圈中产生的电磁能、电容器中蓄积的静电能,可以用作能量的暂时蓄积。电能可以通过蓄电池的充电或电解转换成化学能,而化学能可以通过电池的放电或燃料电池转换成电能。此外,如果电路中产生振荡,则可向外界发送电磁波的能量。

辐射能的典型代表是太阳能。太阳能约含95%的焓,但是用现代技术能提取出来的焓只有10%左右。波长比可见光长的电磁波的能量,可以由它的电场和磁场求算。与可见光波相同, γ 射线和X射线的能量,可以通过普朗克(Planck)常数与周波数来计算。此外,带电粒子射线的焓可以用它的电荷与外加电压的乘积来计算。声波与弹性波释放的能量,与它的振幅和频率的二次方成比例。

1.5 能量的作用

能量具有各式各样的形态,并且可以通过各种方法为人类所利用。按利用方法,大体上可分为以下五类:

(1) 参与生理活动:呼吸、循环、消化、运动、感觉、思考

(2) 作机械功:荷重、推进、机械加工、压缩、破