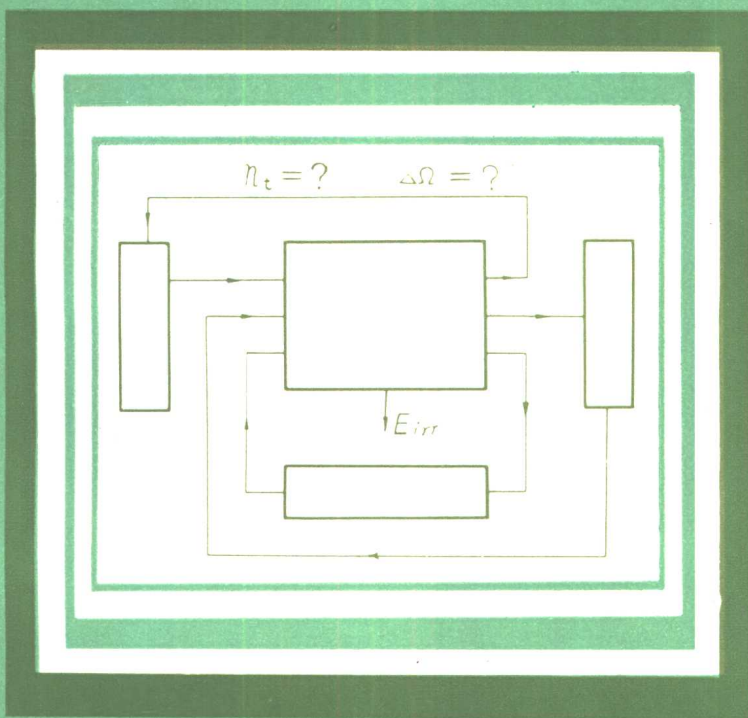


焯分析和 能级分析

杨东华 著



科学出版社

焯分析和能级分析

杨东华 著

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书试图就焓分析和能级分析,结合国内外最新理论方面的研究成果进行系统的阐述和总结。全书共分八章,具体内容包括:绪论、基本概念、化学焓、焓效率、质量评定和薄弱环节的焓分析、最优参数的焓分析、能级平衡理论、论焓分析和焓分析、附录。

本书可供工程热物理、化工、动力等专业的科技人员参考,也可作有关专业研究生教材。

焓分析和能级分析

杨东华 著

责任编辑 李雪芹 陈文芳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街252号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

1986年1月第一版 开本:787×1092 1/32

1986年1月第一次印刷 印张:6 1/4 插页:1

印数:0001—2,600 字数:134,000

统一书号:15031·687

本社书号:4511·15—10

定价:1.55元

序

七十年代以来,石油危机推动了热力学第二定律分析法的发展.热力学第二定律分析法的发展,又反过来促进能量利用率的提高和能量的合理利用.本书试图就热力学第二定律分析法中两个组成部分——焓分析和能级分析,结合国内外最新理论方面的研究成果(着重著者本人的研究成果),进行系统的阐述和总结.

本书的特点:

1.着重总结近年来国内外理论方面的研究成果,特别是著者提出的能级分析法.

2.着重讲清基本概念,首先注意讲清有物理边界的物质系统和无物理边界而只有几何边界的物质系统,然后引进约束性平衡和非约束性平衡两个概念.这样就为后面讲清物质系统的物理焓和化学焓奠定了基础.

3.对物质系统的焓和熵,本书给出了物理意义清楚、普遍适用的统一表达式,然后按各种不同的物质系统给出了它们的具体计算公式.这种处理方法既能揭示各种物质系统的焓和熵的共同的物理本质,又能给出它们的具体计算方法.本书还列出了著者及其合作者提出的不稳定物质流的焓和熵的计算公式.

4.对物质系统的化学焓,本书注意讲清它的计算基准(由基准物质及其基准浓度确定的寂态化学势 $\mu_i^{(0)}$)和计算模式,然后根据给定物质是否就是基准物质而区分的两种不同的情况,讲清了扩散(化学)焓和反应(化学)焓.为使化学焓表达

形式完美和概念明确，本书引进了虚拟的基准物质寂态化学势的概念。

5. 本书中，控制质量是唯一给出的(物质)系统，而控制体或开口系统则是进行各种平衡(衡算)的对象。作为平衡对象的开口系统，它同外界有三种相互作用，即热、功和物质交换。对于这三种相互作用的有效性和无效性，本书只引进物质(系统)的焓和熵的概念，而对热和功，则引进了有效热和无效热以及有效功和无效功概念。

经这样处理后，本书中唯一给出的是物质系统的焓和熵，从而避免引进名目繁多的各种焓的概念，可使读者明确在给定环境模型下，焓和熵均为状态参数。如果引进各种不同焓的概念，其中有的是状态参数，有的却不是(例如热焓)，就容易引起概念上的混乱。

经这样处理后，本书便不再引进(载有稳定物质流的)开口系统的焓和熵的概念。事实上，开口系统的焓和熵是由稳定流入开口系统的物质(系统)的焓和熵，经传递和转换得来的。

6. 本书重视焓效率定义的讨论，因为焓效率是用焓的概念进行分析和综合的目标函数，是质量评定焓分析和薄弱环节焓分析的准则，也是复杂系统用能模型的基础。它的定义是否正确和合理，将直接关系到这些分析和综合工作的结果。

7. 以焓概念为基础的热经济学，是热力学第二定律分析法和技術经济学的结合，是当前的一个新动向。本书对此作了介绍。

8. 本书将焓分析的工程应用问题分为三类，即质量评定焓分析、薄弱环节焓分析和最优参数的焓分析。这种处理方法与根据不同用途的装置而展开它的应用部分的处理方法不同。

何耀文同志对本书作了认真、细致的审阅并提出了许多宝贵的意见,特此表示衷心的感谢。

由于著者水平所限,错误难免,恳切希望读者给予指正。

杨东华

1984年

符 号 表

<i>A</i>	焓	kJ/kmol
<i>a</i>	比焓	kJ/kg
	每吨热绝缘价格	¥/t
<i>b</i>	每 10^6kcal 热量价格	$\text{¥}/(10^6\text{kcal})$
<i>b₀</i>	每度电价格	$\text{¥}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
<i>C</i>	烟的单位成本	¥/kJ
<i>c</i>	速度	m/s
<i>c_p</i>	定压比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
<i>d</i>	直径	mm
<i>E</i>	能量	kJ/kmol
<i>e</i>	比能量	kJ/kg
<i>E</i>	烟(流)率	kJ/s
<i>EX</i>	烟	kJ/kmol
<i>ex</i>	比烟	kJ/kg
<i>F</i>	单位推力	N/kg
<i>G</i>	自由焓	kJ/kmol
<i>g</i>	比自由焓	kJ/kg
	重力加速度	m/s^2
\bar{G}	偏千摩尔自由焓	kJ/kmol
<i>H</i>	焓	kJ/kmol
<i>h</i>	比焓	kJ/kg
<i>HHV</i>	高热值	kJ/kmol
<i>hhv</i>	高热值	kJ/kg
<i>Lo</i>	理论空气量	kg/kg
<i>M</i>	分子量	kg/kmol

m	质量	kg
\dot{m}	质量(流)率	kg/s
\mathcal{M}	年运行时	h/y
N	千摩尔数	
ϑ	热绝缘分摊额	%
\dot{P}	年出厂产品率	1/y
p	压力	bar
Q	热量	kJ/kmol
\dot{Q}	热量(流)率	kJ/s
q	比热量	kJ/kg
\dot{Q}	能量(流)率	kJ/s
q_i	热量(流)率	kJ/(m \cdot s)
R	气体常数	kJ/(kg \cdot K)
β	能量利用分配比	
\bar{R}	通用气体常数	kJ/(kmol \cdot K)
S	熵	kJ/(kmol \cdot K)
s	比熵	kJ/(kg \cdot K)
ΔS_{T_1}	熵产量	kJ/(kmol \cdot K), kJ/K
T	绝对温度	K
t	温度	$^{\circ}$ C
t_s	冷凝温度	$^{\circ}$ C
U	内能	kJ/kmol
u	比内能	kJ/kg
V	容积	m 3 /kmol
v	比容	m 3 /kg
W	功(量)	kJ/kmol
w	比功(量)	kJ/kg
\dot{W}	功率	kJ/s, kW
W_e	有效功	kJ/kmol, kJ
\dot{W}_e	有效功率	kJ/s, kW
X	浓度	

	摩尔成分	
	决策变量	
Y	年工作费用	¥/y
z	标高	m
i	区的年投资	¥/y
α	放热系数	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$
	抽汽分额	
β	燃料系数	
γ	热绝缘比重	kgf/m^3
	活度系数	
δ	相关因子	
η_1	热效率	%
η_{ex}	炯效率	%
κ	系数	
λ	导热系数	$\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$
	拉格朗日乘子	
μ	化学势	kJ/kmol
$\bar{\mu}$	比化学势	kJ/kg
ζ	校正系数	
	质量成分	
ξ	温度校正系数	$\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
π^0	相对压力	
ρ	密度	kg/m^3
σ	熵产率	$\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{s})$
	总压损失系数	
Ω	能级	
τ	时间	s

上角标

0 约束性平衡状态
 00 非约束性平衡状态
 + 输入
 - 输出

下角标

a 空气
Ash 灰
c 冷凝器
ch 化学
con 逆联
com 压气机
cs 消耗
D 装置
dij 拓压管
dist 精馏
ec. 经济
el 电
en 环境
ex 棚 外部
exc 换热器
exh 排气
f 燃料 生成
g 燃气 气
gn 收益
h 煨 回热器
i 入口
im 有效输入
in 内部
inex 内部及外部
irr 不可逆

<i>i</i>	输入 反应物
<i>k</i>	输出 生成物
<i>l</i>	液
<i>m</i>	平均
<i>mo</i>	推动力
<i>n</i>	标准状态 (298.15K 1.01325bar = 1atm)
<i>nox</i>	喷管
<i>o</i>	出口 制冷
<i>obj</i>	目的
<i>p</i>	压力
<i>pa</i>	并联
<i>ph</i>	物理
<i>pr</i>	主(设备所要求的)
<i>r</i>	反应
<i>res</i>	能源
<i>rev</i>	可逆
<i>s</i>	轴 汽轮机 固
<i>sc</i>	副(非设备所要求的)
<i>ser</i>	串联
<i>t</i>	热
<i>thr</i>	推力
<i>tot</i>	总
<i>tub</i>	涡轮
<i>T</i>	任务
<i>u</i>	用户
<i>w</i>	废水、余水、冷却水

目 录

符号表.....	vii
第一章 绪论.....	1
§ 1-1 问题的提出	1
§ 1-2 历史发展	8
§ 1-3 近年来的进展	10
第二章 基本概念.....	13
§ 2-1 系统	13
§ 2-2 环境	14
§ 2-3 物质系统与环境的平衡	15
§ 2-4 有效性和无效性	15
§ 2-5 物质系统的焓和熵	20
第三章 化学焓.....	34
§ 3-1 化学焓的计算基准和计算模式	34
§ 3-2 扩散(化学)焓和反应(化学)焓	37
§ 3-3 环境模型	38
§ 3-4 纯物质的化学焓	46
§ 3-5 复杂物质的化学焓	51
第四章 焓效率.....	59
§ 4-1 统一的损失尺度与统一的完善性尺度	59
§ 4-2 定义焓效率的一般规律	62
§ 4-3 四种常见的焓效率	65
§ 4-4 过程焓效率和任务(目的)焓效率	75
§ 4-5 能量单元法	77
§ 4-6 其它形式的焓效率	87

第五章 质量评定和薄弱环节的焓分析.....	91
§ 5-1 质量评定焓分析	91
§ 5-2 薄弱环节焓分析	93
第六章 最优参数的焓分析.....	101
§ 6-1 动力系统的最优参数的焓分析	101
§ 6-2 传热系统的热力学最优化	108
§ 6-3 传热-动力系统热经济最优化——架空管道热绝缘的 经济厚度	112
§ 6-4 热经济学	118
§ 6-5 热系统优化设计的热经济学方法	127
第七章 能级平衡理论.....	130
§ 7-1 问题的提出	130
§ 7-2 能量利用的合理性	130
§ 7-3 能级平衡分析法	138
§ 7-4 余热利用的能级分析法	145
第八章 论焓分析和熵分析.....	151
§ 8-1 前言	151
§ 8-2 焓分析法的困难和不足	151
§ 8-3 焓分析法的理论和实践意义	157
§ 8-4 结论	158
参考文献.....	160
附录.....	163
一、物质的标准生成焓 ΔH_f^\ominus 、标准生成自由焓 ΔG_f^\ominus 及标准 绝对熵 S_f^\ominus	163
二、斯蔡尔古特环境模型	176
三、龟山-吉田环境模型.....	插页1
四、何耀文环境模型	插页2
五、化学焓的温度校正系数 ξ	179
六、热力学补充知识	180

第一章 绪 论

§ 1-1 问题的提出^[1]

当前，能源问题已成为世界性的突出问题之一。大家知道，解决能源问题有两条途径：(1)开发新能源，特别是再生能源；(2)节能。要节能，一方面要不断提高能量转换、传递、储存和利用过程中的技术水平，以减少损失，另一方面要加强节能的基础性理论研究。随着节能工作的深入，仅从热力学第一定律的能量守恒观点来评价能量的利用，已显得越来越不够了。因此，对能量的利用从热力学第一定律的能量守恒观点，以及同时从热力学第二定律的能量贬值观点来评价和分析，已是当务之急。前者就是传统的用能和节能观点，以这样一种传统的观点展开的过程热力学分析，称之为热平衡分析法。以后一种观点展开的过程热力学分析，称之为热力学第二定律分析法。本书仅就热力学第二定律分析法中两个组成部分——焓分析和能级分析，进行系统的阐述，以与传统的观点进行比较，从而对能量利用过程作出合理的安排。

1 用焓和节焓

传统的用能和节能观点，实质上只是简单地从能量守恒的数量关系上去考察能量的利用和节约。因为能量是守恒的，进出任何系统的能量在数量上总是相等的。除去无意义的向外泄漏和排放，就是得到利用的能量。因此，用传统的观点去指导节能工作，必然会把注意力集中于如何减少系统的

能量的泄漏和排放,以提高能量的利用率。例如,迄今仍有人将发电厂的冷凝排热看作发电厂的主要损失;又如,有人往往只注意减少锅炉和炉子的散热。

但是,如果从过程推动力和实现能量转换以获得动力的观点来考察能量的利用和节约,我们关心的就会是技术上可利用来作功¹⁾的那部分能量,这部分能量,称之为焔 (Exergie)。因此,用这种观点去指导节能工作,就必然会把注意力集中于如何减少系统内部因种种不可逆因素(例如,实际过程中的传热、传质、燃烧、流动等)造成的能量的贬值,这种贬值引起的使能量中焔的数量的减少,称之为内部焔损失。除此之外,我们还仍然要注意如何减少系统向外界无意义的泄漏和排放的能量,但是,我们关心的是如何减少泄漏和排放能量中的焔,这一种损失,称之为外部焔损失。

人们从焔的角度去考察节能工作,就会认识到节能实质上是节焔。用这种观点去指导节能工作,就不会只注意去减少锅炉和炉子的散热,而对炉膛中由于燃烧、传热的不完善造成的焔损失却注意不够。

那么,什么是焔呢?从热力学第二定律对能量转换的约束可知,无论何种形式的能量,均由焔和炆 (Anergie) 两部分组成,其中焔是在给定环境下能量的可转换部分,而炆是余下的部分,即在给定环境下能量的不可转换部分^[2]。这就是说,能量中焔和炆所占的比重,是同环境有联系的。事实上,物质系统的焔就是在与其环境达到平衡的过程中所能作出的最大有效功。因此,物质系统同其环境的差异(状态的差异、成份的差异)越大,物质系统所携有的能量中焔的比重就越大。如果从过程推动力和实现能量转换以获得动力的观点来评价能

1) 这种功,工程热力学上称之为技术功,或狭义地称之为轴功,在本书中,则称之为有效功。

量的质量(品位),则此时其质量就越优。由此可知,能量具有两个方面的性质,即其数量和质量。数量由其两个组成部分(焓和熵)的总和表征;质量则由其焓的相对比重——能级 $Q = [焓 / (焓 + 熵)]$ 来表征,其数值大小表征能量质量的优劣。当物质系统与其环境取得平衡后,差异就不再存在。此时,物质系统的焓为零,因而其能级也为零。这种无差异的状态,称为寂态。此时,一切实际过程停止。因此焓实质上是一切实际过程得以进行的推动力。

传统的用能和节能观点,只从数量关系上去考察用能和节能,由此可以得到一个评价用能过程优劣的准则——能量利用率或热效率 η_t 。根据这个准则可以获得所供应的能量中有多少得到了利用的信息,但不能获得所供应的能量的质量是否符合用户需要的信息。

认为用能就是用焓、节能就是节焓,是从过程推动力和实现能量转换以获得动力的观点来考察用能和节能。这是一种较新的观点,但它仍然是从数量关系上去考察用能和节能,它只不过是依据热力学第一定律和第二定律,从焓量不守恒(焓只灭不生)的数量关系上去考察用能和节能,由此可以得到另一个评价用能过程优劣的准则——焓效率 η_{ex} 。根据这个准则可以获得所供应的能量中的焓有多少得到了利用的信息,但不能获得所供应的能量的质量是否符合用户需要的信息。

以用能就是用焓、节能就是节焓这样一种观点展开的过程热力学分析,称之为焓(平衡)分析法。由于它所依据的是热力学第一和第二两大定律,所以它是热力学第二定律分析法的一个组成部分。焓分析法不仅可以评价用能过程,而且可以揭示出分析对象(系统)在热力学完善性意义上的薄弱环节,也可以在这一意义上进行质量评定和最优参数分析(详见第五章和第六章)。焓分析法注意了用焓和节焓,但它忽视

了用焓。焓虽然不能用来作过程推动力和作有效功以获得动力,却用来加热、取暖,甚至制冷。但根据焓效率,不能获得所供应的能量中的焓有多少得到了利用的信息。

2 既要节能¹⁾,又要能级匹配用能

如上所述,我们自然会得出这样的结论:全面的用能和节能观点,应该是既要用焓,也要用熵,即不仅要求所供应的能量中焓完全得到了利用,而且熵也完全得到了利用。此时,实质上就是不仅所供应的能量完全得到了利用,而且其质量恰好符合用户的需要,即所供应的能量的能级恰好等于用户所需要的能量的能级(两者的能级差 $\Delta Q = 0$)。因为,一家用户获得了能量供应,并不等于获得了符合它工作需要的能级的能量。能级过高或过低,不适合需要,都会造成浪费。因此,用户获得的能量的能级应当适合它的工作需要。这就是能级匹配用能——一个大家熟知的用能和节能的热力学原则^[3]。简言之,全面的用能和节能观点,应该是既要节能,又要能级匹配用能。这样,人们就可以从数量关系上和质量关系上全面地考察用能和节能。以既要节能、又要能级匹配用能这样一种观点展开的过程热力学分析,称为能级(平衡)分析法^[4]。由于它所依据的也是热力学第一和第二两大定律,所以它也是热力学第二定律分析法的一个组成部分。

让我们用这几种观点来考察电热取暖这样一个常见的用能过程。如果由电源输入电炉的电所转换成的热,全部由电炉输给用户(室内取暖),那么,用传统的用能和节能观点来评价,其热效率 $\eta_t = 100\%$,这当然是最理想的。但如用全面的用能和节能观点来评价,即除用 η_t 进行评价之外,还要用

1) 指减少系统向外界无意义地泄漏和排放的能量。