

高等学校教学参考书

烟分析及其应用

赵冠春 钱立伦 编著

高等教育出版社

高等学校教学参考书

烟分析及其应用

赵冠春 钱立伦 编著

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是作者在长期从事科研、教学及收集大量国内外文献资料的基础上写成的,内容丰富、新颖。焓分析方法是最近二、三十年间得到迅速发展的热力学分析方法。用焓分析方法可以检验用能设备或装置系统能量利用的有效程度。因此,焓分析方法与能源的合理利用和节能工作有密切的关系。本书深入地阐述了焓的基本概念和焓分析的方法,并以实例说明了焓分析方法的应用。在我国已确定了“实行开发和节约并重,近期要把节能放在优先地位”的能源总方针的现阶段,本书将对从事能源及节能工作的广大科技人员有重要参考价值。

全书共十五章。第一至第六章运用热力学的基本定律阐述了焓的基本概念、焓的计算和焓分析的方法,并对化学焓作了较详细的阐述;第七至十五章为焓分析的应用部分,包括动力、低温工程、制冷、热电联合生产及余热利用等多种装置系统的焓分析。书中一些内容是作者结合工程实际应用焓分析法的研究成果。本书采用国际单位制(SI)。

本书可作为高等工科院校动力、制冷、低温工程、化工、冶金等专业的高年级学生、研究生的教学参考书,也可供有关专业的教师及从事能源和节能工作的科技人员参考。

高等学校教学参考书

焓分析及其应用

赵冠春 钱立伦 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张9.375 插页2 字数226,000

1984年1月第1版 1984年10月第1次印刷

印数00,001—3,790

书号15010.0559 定价2.25元

序

焓，是环境条件下能量中理论上能够转变为有用功的那部分能量。焓又称有效能。

焓分析法，又称热力学第二定律分析法，是最近二、三十年间受到重视，并得到迅速发展的热力学分析法。在苏联、德、日、欧美各国，焓分析法已广泛应用于能源利用以及动力、低温工程、制冷、热泵、化工、冶金等工业部门。在我国，最近十几年来也在这些领域中作了焓分析基础理论及其应用的研究，并引起了科技界和高等工科院校的广泛重视。其原因主要在于：

1. 焓或能质(焓与能量之比)的大小是衡量能量作功能力大小的统一尺度。能量的焓值越大，表示能量可能转变为有用功的部分越多，能量的价值越高，有用程度越大，对于这类能量就愈要讲究节约；

2. 焓效率(或焓损失系数)是衡量设备或装置系统的技术完善程度或热力学完善度的统一指标。焓效率愈接近于1，表示设备或装置系统的热力学完善度愈好，焓损失愈小；

3. 采用焓效率(或焓损失系数)作为用能设备或装置系统的目标函数，可以获得设备和系统的优化条件；

4. 焓分析法可以准确地揭露装置系统中焓损率最大的薄弱环节，为改进设备、节约能源提供目标，以便采取对策；

5. 焓分析法中的一个重要发展方向是，试图在系统设计中形成一个切实可行的热力和经济学计算方法，其特点是焓分析与经济分析相结合，并正在形成一门“热经济学”，目标是使整个系统设计最优化。

焓分析法与能源的合理利用及节能工作有密切的关系, 且是广大工程技术人员和从事节能的工作者经常用到的热力学分析方法。但是, 在现在的普通工程热力学的教学中, 由于教学时数的限制, 不能深入讲解焓分析法, 也不能把它提高到足够重要的地位。因此, 作为工程热力学教材中有关焓分析内容的深入和补充, 有必要编写“焓分析及其应用”一书。作者殷切期望广大科技工作者在实际工作中重视和应用焓分析法。

本书第一章至第六章运用热力学基本定律阐述焓的基本概念、焓的计算和焓分析的方法, 亦对化学焓作了较详细的阐述, 是焓与焓分析的基础理论部分。第七章至第十五章为焓分析的应用部分, 包括动力、低温工程、制冷、热电联合生产及余热利用等多种装置系统的焓分析, 其中对动力、制冷和低温工程的应用写得较多。书中不少内容是编著者结合工程实际应用焓分析法的研究成果。为便于读者使用本书, 书中附有较多的例题和计算图表, 并说明了必要的计算步骤。

本书可作为高等工科院校动力、制冷、低温工程、化工、冶金等专业的高年级学生、研究生的教学参考书, 对其它有关专业的教师以及从事能源和节能工作的科技工作者也有参考价值。

本书先后承杨东华和吕灿仁二位同志审阅, 并提出许多宝贵意见, 在此谨致谢意。

由于作者水平有限, 错误和不妥之处在所难免, 谨希读者批评指正。

编 著 者

1983.5

主要符号表

拉丁字母

A	熵
a	比熵
c	质量比热
C	摩尔比热
E	焓; 摩尔焓; 焓流 率
e	比焓; 焓焓
$E_{ch}(e_{ch})$	化学焓
$E_D(e_D)$	扩散焓
$E_f(e_f)$	燃料焓
E_{gain}	收益焓
$E_h(e_h)$	焓焓
$E_l(e_l)$	焓损失
E_{pay}	耗费焓
$E_u(e_u)$	内能焓
f	压比因子
G	自由焓
ΔG_f^0	标准生成自由焓
H	焓; 摩尔焓; 焓流 率
h	比焓
ΔH_f^0	标准生成焓
K	比值

M	千摩尔质量
m	质量; 质量流率
N	功率; 摩尔数
n	摩尔数
p	压力
p_s	饱和压力
Q	热量; 热量流率
Q'	冷量
Q_h	燃料高发热量
Q_l	燃料低发热量
q	单位质量传递热 量
q_j	抽汽放热量
R	气体常数
R_M	通用气体常数
r	潜热
S	熵; 摩尔熵; 熵流 率
s	比熵
S^0	标准绝对熵
S°	气体温度函数
T	开尔文温度(或绝 对温度)
t	摄氏温度

i	水的比焓	η_{oi}	相对内效率
T_{eq}	折合绝对温度	η_i	热效率
$T_s(t_s)$	饱和温度	κ	绝热指数; 比热容比
U	内能; 摩尔内能; 内能流率	λ	温度比
u	比内能	ξ	焓损失系数
V	容积	π	压力比
v	比容	π°	相对压力比
$\bar{V}$	速度	ρ	密度
W	功; 功量流率(功率)	τ_j	给水焓升
w	单位质量作的功	φ	相对湿度; 焓率
$W_A(w_A)$	有用功	ψ	混合物的摩尔成分或容积成分
x	干度; 质量成分	Ω	能级或能质
Y	焓耗增加系数	$\delta\Omega$	能级降或能质降
y	液化率	角标符号	
z	高度; 焓耗增加率	a	湿空气中干空气; 空气
希腊字母		B	锅炉
α	抽汽量份额	C	冷凝器; 压气机
β	燃料系数	COM	压缩机
γ_j	疏水放热量	CL	冷却器
ε	制冷系数; 化学焓的环境温度系数	c, v	控制体或开口系统
ξ	焓损率; 压力损失系数	E	发电机
η	效率	E'	输电线路
η_c	卡诺效率; 卡诺系数	EV	蒸发器
η_e	焓效率	f	燃料
		G	回热加热器

<i>g</i>	燃气
<i>H</i>	热用户; 热源; 加 热器
<i>in</i>	进口; 输入
<i>i, s</i>	孤立系统
<i>L</i>	冷源; 低温物体
<i>M</i>	机械
<i>m</i>	混合物
<i>n</i>	标准状态
<i>0</i>	环境或环境状态
<i>opt</i>	最佳
<i>out</i>	出口; 输出
<i>P</i>	泵; 生成物
<i>Q</i>	热量; 冷量

<i>R</i>	冷箱; 冷库; 反应 物
<i>S</i>	定熵过程
<i>T</i>	透平; 定温过程
<i>THR</i>	节流阀; 节流
<i>TU</i>	管道
<i>v</i>	湿空气中的水蒸 气; 蒸气
<i>W</i>	功
β	燃料系数为 β 的 实际燃气
$\beta=1$	理论燃气
$\beta=0$	纯空气

目 录

符号	1
第一章 能量和热力学第一定律	1
1-1 热力系统	1
1-2 热力学平衡	2
1-3 热量和功	3
1-4 热力学第一定律	4
1-5 封闭系统能量平衡方程式	5
1-6 稳定流动开口系统能量平衡方程式	6
第二章 焓和热力学第二定律	9
2-1 热力学第二定律的几种表述	9
2-2 过程的不可逆性	10
2-3 可逆过程	11
2-4 热力学第二定律的熵平衡方程式	12
2-5 能量和焓	16
第三章 几种形式能量的焓	20
3-1 自然环境和环境状态	20
3-2 机械形式能量的焓	22
3-3 热量焓和冷量焓	23
3-4 封闭系统的焓	30
3-5 稳定流动系统的焓	34
3-6 焓焓图和焓焓图	46
3-7 理想气体的焓焓	53
第四章 焓损失和焓平衡方程式	59
4-1 不可逆过程和焓损失	59
4-2 焓损失和焓平衡方程式	62
4-3 封闭系统的焓平衡方程式	63
4-4 稳定流动系统的焓平衡方程式	66

4-5	循环系统的焓平衡方程式	75
4-6	热交换系统的焓损失	78
4-7	混合过程的焓损失	81
第五章	热工设备或装置的焓效率和焓损失系数	85
5-1	焓效率的一般定义	85
5-2	焓效率的不同形式	87
5-3	考虑外部焓损失的焓效率	89
5-4	常用热工设备或装置的焓效率	92
第六章	化学焓和燃料焓	100
6-1	化学焓的概念	100
6-2	化学反应的最大有用功	101
6-3	气体的扩散焓	103
6-4	燃料的化学焓	104
6-5	元素和化合物的化学焓	111
6-6	混合气体及可燃混合气体燃料的焓	118
6-7	燃气的焓	120
6-8	湿空气的焓	122
第七章	蒸汽动力循环	125
7-1	简单蒸汽动力装置循环——朗肯循环	125
7-2	凝汽式汽轮机回热系统参数的合理调整	129
第八章	热电合产相对于分产的节能效果	152
8-1	热电合产系统的焓分配和焓效率	152
8-2	热电分产系统的焓分配和焓效率	157
8-3	热电合产与分产燃料焓节约的比较	158
8-4	计算实例	161
第九章	余热的合理利用	163
9-1	余热利用系统的热力学模型	164
9-2	衡量余热合理利用程度的指标	166
9-3	折合绝对温度对拟选余热利用方案工作的指导意义	169
9-4	最佳蒸发温度	172
9-5	太阳能利用系统的能级分析	177

9-6 几点结论	179
第十章 燃气轮机装置循环	181
10-1 实际燃气的热力性质	181
10-2 实际燃气的焓	184
10-3 燃料系数和绝热燃烧温度	185
10-4 燃气轮机装置循环计算举例	186
第十一章 气体制冷机布雷顿循环	196
11-1 不考虑系统的压力损失的循环	196
11-2 考虑系统的压力损失的循环	201
11-3 考虑工质为实际气体的循环	203
第十二章 蒸气制冷装置循环	209
12-1 R22 单级蒸气压缩制冷装置	209
12-2 氨单级蒸气压缩制冷装置	212
12-3 氨制冷压缩机	214
12-4 氨冷凝器与氨蒸发器	219
12-5 氨中间容器	221
12-6 蒸汽引射式制冷装置	223
第十三章 气体的液化循环	226
13-1 林德空气液化循环	228
13-2 克劳德空气液化循环	229
13-3 液氮预冷克劳德氮液化循环	231
第十四章 空气分离装置	241
14-1 氧-氮二元混合物的化学焓	241
14-2 制氧机流程焓分析举例	245
第十五章 工业企业动力车间热电合产方案的经济分析	251
15-1 某化肥厂动力车间热电合产方案 I 简介	251
15-2 方案 I 的焓平衡计算	253
15-3 方案 II、III 及其经济效益	255
15-4 方案的经济比较	257
附录	258
附表 1 一些气体的千摩尔质量、气体常数和低压下的比热容	258

附表 2	气体的平均定压摩尔比热容	258
附表 3	空气的热力性质表	259
附表 4	氮的热力性质表	260
附表 5	大气氮的热力性质表	260
附表 6	氧的热力性质表	261
附表 7	二氧化碳的热力性质表	261
附表 8	一氧化碳的热力性质表	262
附表 9	水蒸气(理想气体状态)的热力性质表	262
附表 10	氢的热力性质表	263
附表 11	氨的热力性质表	263
附表 12	几种气体及 C_8H_{16} 燃料的理论燃气的 H 计算式和系数表	264
附表 13	几种气体及 C_8H_{16} 燃料的理论燃气的 S° 计算式和系数表	265
附表 14	元素的标准化学焓(1atm, 298.15K)	(插页)
附表 15	有机物质的标准热力学数据表(1atm, 298.15K)	266
附表 16	无机物质的标准热力学数据表(1atm, 298.15K)	269
参考文献		276
附图 1	氨的焓-焓图	281
附图 2	R12 的焓-焓图及环境温度对焓值的修正($P_0=1at$, $T_0=303.15K$) ^[57]	283
附图 3	乙烷(C_2H_6)的焓-焓图	284
附图 4	丙烷(C_3H_8)的焓-焓图	284
附图 5	空气的焓-焓图	285
附图 6	氮的焓-焓图	286

第一章 能量和热力学第一定律

1-1 热 力 系 统

在对能量相互转换的现象和过程作热力学分析时,从相互作用的物体中取出的作为主要研究对象的物体或范围称为热力系统,或简称系统。热力系统以外,与系统有相互作用的物体统称为外界。热力系统与外界之间的分界面称为系统的边界。系统的边界可以是固定的,也可以是移动的;可以是真实的,也可以是假想的。热力系统通过边界与外界间的相互作用,可以是以热和功等形式的能量交换,也可以是物质交换。从系统与外界的相互作用来分,外界可以是热源、功源和物质源。在焓的研究中,将周围自然环境也作为单独的外界。

与系统进行热量交换的外界物体统称为热源。在研究热力循环时,有时也将热源区分为高温热源和低温热源。对动力循环而言,向系统提供热量的热源称为高温热源(或简称热源);从系统接受热量的热源称为低温热源(或简称冷源)。根据提供热量或接受热量时温度是否有变化,有时将热源分为恒温热源或变温热源。变温热源也可以看成是由温度依次相差无穷小量($dT \rightarrow 0$)的无穷多个恒温热源组成。与系统进行功量交换的外界物体统称为功源。与系统进行物质交换的外界物体统称为物质源。

系统与周围自然环境可以有热量、功量和物质的交换,而环境的温度和压力仍保持不变。

功源、热源、物质源和周围自然环境,就其本身而论,它们也是一个热力系统。在对系统作热力学第一定律的能量分析中,我们

只要研究热力系统的状态及其变化,以及系统与外界交换的能量,而不必研究热源和功源等的状态及其变化。但是,在对系统作热力学第二定律的焓分析中,有时也要研究热源、功源和周围环境的某些性质及其变化情况。

按热力系统与外界有无物质交换,可以将热力系统区分为封闭系统和开口系统。通过边界与外界没有物质交换的系统称为封闭系统。封闭系统内的质量是固定不变的,所以也称定质量系统。通过边界与外界有物质交换的系统称为开口系统。开口系统内的质量可以是变化的。由于通过开口系统的边界有物质的流进和流出,所以开口系统也可称为流动系统。有时将开口系统的边界面称为控制面,而将控制面内的空间物体称为控制体。

通过边界与外界没有热量交换的系统称为绝热系统。通过边界与外界既无能量交换又无物质交换的系统称为孤立系统。在作热力学分析时,常常将所研究的热力系统与其有关的外界组成一个复合系统来研究,这种复合系统就是一个孤立系统。

1-2 热力学平衡

当系统与外界不发生相互作用时,如果系统各部分的宏观状态不随时间发生变化,则称此系统处于平衡状态。当系统内不存在不平衡力时,系统内各部分之间不会发生相对位移,此时称系统处于力的平衡。如果忽略重力的影响,则处于力平衡的流体系统应该具有均匀的压力。当系统内不存在温度差时,系统内各部分之间不会发生热量的传递,则称系统处于热的平衡。处于热平衡的系统应该具有均匀的温度。当系统内不存在化学势差时,系统内各部分之间不会发生化学反应和扩散等物质变化,则称系统处于化学平衡。所以,如果系统内部同时满足热平衡、力平衡和化学平衡条件,则称此系统处于热力学平衡状态,简称处于平衡状态。

如果系统内部不存在或不涉及化学反应及扩散、相变等因素,例如对于纯质的单相系统,则热力学平衡只要求满足热的平衡和力的平衡。

一般来说,当一个系统处于热力学平衡状态时,要求系统与外界之间也处于热力学平衡,即系统与外界之间同时满足热平衡、力平衡和化学平衡。但在大多数的热力学分析中,当系统处于热力学平衡时,只要求系统与外界之间满足热平衡和力平衡。有时将前者称为完全的热力学平衡,后者称为不完全的热力学平衡。

当热力学平衡的任何一个条件不满足时,系统处于不平衡状态。经典热力学只研究处于平衡状态的系统,或者系统在状态变化过程中,至少其初终状态应该是平衡状态。

1-3 热量和功

当系统与外界之间的相互作用是由于温度差引起时,系统和外界间将发生能量的转移。这种仅仅由于温度的不同而从系统向外界,或从外界向系统所传递的能量叫做热量。热量是通过系统边界在传递过程中的一种能量形式。热量是过程量,不是系统所含有的能量。热量一旦从热源传递给了系统就转变为系统内部的能量。热量不是系统的状态函数。在微元过程中传递的微元热量用 δQ 表示。按照符号规则,系统吸热为正,放热为负。

当系统与外界之间的相互作用是由于除温度差以外的原因所引起时,系统与外界之间也将发生能量的转移。如果系统对外界的单一效果是在外界提起一个重物,则称此系统对外界作了功,所传递的能量叫做功量。这里功的定义并不一定意味着真的举起重物,而是说过程所产生的效果相当于或归结于提起一个重物,所以功的计算并不一定就是重物的重量与所提起的距离之积,可以是膨胀功、轴功或电功等。因此,功量和热量一样,也是通过系统边

界在传递过程中的一种能量形式。功量不是系统所含有的能量，不是系统的状态函数，功量是过程量。微元过程中传递的微元功量用 δW 表示。按照符号规则，系统对外界做功为正，得到功为负。

1-4 热力学第一定律

在自然界，一切物质都具有能量。能量是物质运动的量度。物质的运动存在各种不同的形态，因而能量也具有各种不同的形式，例如机械能、电能、热能、化学能、核能、光能等等。能量转换与守恒定律揭示：“能量不能被创造，也不能被消灭，而只能在一定条件下从一种形式转变为另一种形式。在转换中，能量的总量保持不变”。热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力学中的应用。热力学研究范围内的一切热力过程都应遵守热力学第一定律。

根据热力学第一定律，对任何热力过程建立热力系统的能量平衡方程式是进行热力学分析的基本方法，能量平衡方程式则是进行热力学分析的基本方程式。根据热力系统在状态变化过程中各项能量变化和它们的总量守恒的原则，按下列一般形式来建立热力系统的能量平衡方程式：

系统初始储存的能量 + 进入系统的能量

= 离开系统的能量 + 系统最终储存的能量或

进入系统的能量 = 离开系统的能量 + 系统储存能量的变化

系统储存能量的形式有系统的宏观动能 $m\bar{v}^2/2$ 、宏观位能 mgz 和系统内部的微观能量，简称系统内能 U 。系统内能包括因分子和原子等微粒热运动而具有的热力内能或内热能、原子结合为分子而具有的化学能以及原子内部的核能等。如果在系统状态变化过程中，物质分子结构和原子结构都不发生变化，则化学能和原子核能等都不起作用，可以不必考虑，系统内能只是系统的内热

能。所以，在一般的热力学分析中，如不加说明，则系统内能就是指狭义的内热能，只在涉及有化学反应的过程中，才把化学能包括在内能之中。系统内能是热力状态函数，而宏观动能和位能则取决于系统的力学状态。

1-5 封闭系统能量平衡方程式

一个与外界没有因物质交换引起能量变化的封闭系统可以与外界有热量交换和功量交换。按热量和功量的符号规则，封闭系统的能量平衡方程式可以写成

$$Q = \Delta(U + \frac{1}{2}mV^2 + mgz) + W \quad (1-1)$$

对于静止的封闭系统，上式可以简化为

$$Q = \Delta U + W \quad (1-2)$$

对于微小的状态变化过程，上式可以写成

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (1-3)$$

对于单位质量，式(1-2)和式(1-3)可以分别写成

$$q = \Delta u + w \quad (1-4)$$

和

$$\delta q = du + \delta w \quad (1-5)$$

以上各式中， $\Delta U = U_2 - U_1$ ，内能增量 ΔU 总是终态内能 U_2 减去初态内能 U_1 。在以下的阐述中，如不加说明，所说的封闭系统即指静止的封闭系统。

这里要指出的是，式中的 W 是指封闭系统在热力过程中对外界作的功。如果外界不仅有功源，还考虑有自然环境大气，则 W 是对功源所作的有用功 W_A 和对环境大气所作的环境功 W_0 之和，即有

$$W = W_A + W_0 \quad (1-6)$$