

日本化学工程协会编
陈松茂 楼益明 译
龚云表 校

化 学 --- 工 程 --- 概 论

上海科学技术文献出版社

化 学 工 程 概 论

日本化学工程协会 编
陈松茂 楼益明 译
龚云表 校

上海科学技术出版社

日本化学工学协会编

化 学 工 学

——解说与练习

日本东京榎書店, 1984

化 学 工 程 概 论

日本化学工程协会 编

陈松茂 楼益明 译

龚云表 校

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号)

新华书店经销

昆山亭林印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 8.5 字数 205,000

1990年 3月第1版 1990年 3月第1次印刷

印数: 1—1,800

ISBN 7-80513-537-1/T·156

定 价: 4.40 元

《科技新书目》211-310

前 言

化学工程是工程技术的一个重要分支，是探讨化工生产装置中所进行过程的规律性，并根据对这些规律性的认识来解决化工生产中的工程问题。在有关各工业部门，如化学、石油及天然气加工、冶金、食品、造纸、海水综合利用、原子能等工业中，均占有十分重要的地位。

化学工程所研究的内容，不但包括具有化学变化的过程，而且还包括改变物理状态和性质的各种过程。它以化学、物理学和数学等为基础、研究化学、石油、冶金、轻工、原子能等工业中具有共同特点的单元操作和化学工程，以及有关的流体力学、热量传递、物质传递、热力学和化学动力学等的原理，以指导上述各工业过程及设备的改进和发展，使之技术上更趋先进，经济上更趋合理，对国民经济的发展具有重要的作用。

本书原名《化学工程——解说和练习》，由日本化学工程协会编著，于1984年3月初版。全书取材严格，内容精炼，共包括化学工程基础、流体流动、传热和蒸发、蒸馏和萃取、气体吸收、调湿和干燥、粉粒体操作、固液分离、搅拌和混合等九章。本书可供化工、轻工、冶金等工业研究、设计、生产部门的工程技术人员和高等院校化学及有关专业的师生参考

本书第一～四章由陈松茂同志翻译，第五～九章由楼益明同志翻译。全书译稿由龚云表同志校阅。由于译校者水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

一九八八年二月

41466

目 录

前 言

第一章 化学工程基础	1
1.1 单位与因次	1
1.2 衡算	7
1.3 燃烧计算	11
第二章 流体流动	16
2.1 牛顿(Newton) 流体及粘度	16
2.2 层流与湍流	17
2.3 流速分布	20
2.4 能量平衡	26
2.5 力的平衡(运动方程式)	32
2.6 压头损失与摩擦系数	34
2.7 流体输送设备的种类及选用	38
2.8 流量测定装置	48
第三章 传热·蒸发	53
3.1 传热基本原理	53
3.2 热传导	54
3.3 对流传热	62
3.4 辐射传热	69
3.5 热交换器	77
3.6 蒸发装置	88
第四章 蒸馏·萃取	98

4.1	气液平衡关系	98
4.2	简单蒸馏与平衡蒸馏	102
4.3	连续多级蒸馏	106
4.4	蒸馏装置和精馏塔的设计	114
4.5	萃取	120
第五章	气体吸收	132
5.1	气液平衡	132
5.2	吸收设备	133
5.3	吸收速度	137
5.4	吸收设备的设计	142
第六章	调湿·干燥	157
6.1	调湿基础	157
6.2	湿度图表及其使用法	160
6.3	调湿器	163
6.4	调湿装置容积的计算	165
6.5	干燥基础	166
6.6	干燥器的分类及操作方法	171
6.7	干燥器的设计	172
第七章	粉粒体操作	178
7.1	粉体	178
7.2	粉碎	195
7.3	分级	199
7.4	集尘	206
第八章	固液分离	215
8.1	沉降分离	215
8.2	过滤	226
第九章	搅拌·混合	41

9.1	搅拌槽的构造	241
9.2	流动特性	242
9.3	搅拌所需功率	246
9.4	混合性能	249
9.5	放大模拟试验	250
9.6	搅拌槽传热	252
9.7	气液系的搅拌	253
9.8	固液系的搅拌	255
9.9	液液系的搅拌	256
9.10	固体混合	257

第一章 化学工程基础

1.1 单位与因次

(1) **单位制** 客观地表示长度、质量、时间、力、温度等各种物理量的大小,并以这些特定量为基准,用相当于若干倍的形式表示数值的大小,这在化学工程的计算中是十分重要的。这种特定基准量即是单位。单位可分为基本单位和衍生单位两类。所有的物理量均可用这些单位表示其大小。但是,即使相同的物理量,由于基本量的选择不同,单位的表示方法也不同。传统单位制可分为绝对单位制、重力单位制和工程单位制三种。这些单位制又可分为米制单位与英制单位。现在,为了克服学术领域及各国使用单位制不同的不便,国际上已广泛采用了国际单位制(Le Systeme International d'Unités, 简称 SI)。

过去,在化学工程领域,采用与质量有关的物理量(质量、密度、粘度等)时,用绝对单位制(MLT 制)。采用与力有关的物理量(力、压力、表面张力、功、功率等)时,用重力单位制(FLT 制)。习惯上又常用质量(M)、力(F)、长度(L)、时间(T)等4个基本量因次构成的工程单位制(FMLT 制)。这种工程单位制,因质量与力的单位混合使用,要使因次相同,就得进行单位换算。为统一为 $(MLF^{-1}T^{-2})$ 的因次,要引入重力换算系数 g_c ,此值与国际标准的重力加速度值(北纬45°海面上的值)相等。

$$g_c = 9.80665 \text{ kg} \cdot \text{m} / (\text{kg} \cdot \text{s}^2) \quad (\text{米制单位}) \quad (1.1)$$

$$g_c = 32.1740 \text{ lb} \cdot \text{ft} / (\text{Lb} \cdot \text{s}^2) \quad (\text{英制单位})$$

通常,对于质量与力的有关物理量,在重力单位制与绝对单

位制之间换算时,采用如下所示的重力系数 g_c 。

$$\text{重力单位制} \xrightleftharpoons[\text{除 } g_c]{\text{乘 } g_c} \text{绝对单位制}$$

现在所采用的国际单位制是 1981 年修订的,它是将传统的 MKS (m, kg, s) 绝对单位制经过合理地调整,使之体系化。其特征为:对于一个物理量仅为一个对应单位;用基本单位可机械组合成所有的实用单位,称为联合单位制。

表 1.1 SI 基本单位及 SI 辅助单位

物 理 量	单 位 名 称		国际符号
长度	米	metre	m
质量	千克	kilogram	kg
时间	秒	second	s
热力学温度	开尔文	kelvin	K
物质的量	摩尔	mole	mol
电流	安培	ampere	A
发光强度	坎德拉	candela	cd
平面角	弧度	radian	rad
立体角	球面度	steradian	sr

表 1.2 词 头

因数	名 称		国际符号	因数	名 称		国际符号
10^{-1}	分	deci	d	10	十	deca	da
10^{-2}	厘	centi	c	10^2	百	hecto	h
10^{-3}	毫	milli	m	10^3	千	kilo	k
10^{-6}	微	micro	μ	10^6	兆	mega	M
10^{-9}	毫微	mano	n	10^9	千兆	giga	G
10^{-12}	微微	pico	p	10^{12}	兆兆	tera	T
10^{-15}	毫微微	femto	f	10^{15}	千兆兆	peta	P
10^{-18}	微微微	atto	a	10^{18}	兆兆兆	exa	E

表 1.3 具有专门名称的 SI 导出单位

物 理 量	单 位 名 称	符号	用SI基本单位表示的表达式
力	牛 顿 newton	N	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{S}^{-2}$
压强、应力	帕斯卡 pascal	Pa	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{S}^{-2}$
能、功、热量	焦 耳 Joule	J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{S}^{-2}$
功率、辐通量	瓦 特 watt	W	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{S}^{-3}$
频 率	赫 兹 hertz	Hz	S^{-1}
电量、电荷	库 仑 coulomb	C	$\text{A} \cdot \text{S}$
电位、电压、电动势、电势	伏 特 volt	V	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{S}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
电 阻	欧 姆 ohm	Ω	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{S}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
电 容	法 拉 farad	F	$\text{S}^4 \cdot \text{A}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
电 导	西 门 子 siemens	S	$\text{S}^3 \cdot \text{A}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
电 感	亨 利 henry	H	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{S}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
磁 通	韦 伯 weber	Wb	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{S}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
磁感应、磁通密度	特 斯 拉 tesla	T	$\text{kg} \cdot \text{S}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
光 通	流 明 lumen	lm	$\text{cd} \cdot \text{Sr}$
照 度	勒克斯 lux	lx	$\text{cd} \cdot \text{Sr} \cdot \text{m}^{-2}$
活 度	贝可勒尔 becquerel	Bq	S^{-1}
吸收剂量	戈 瑞 grey	Gy	$\text{m}^2 \cdot \text{S}^{-2}$
摄氏温度	摄氏度 degree celsius	$^{\circ}\text{C}$	$t[^{\circ}\text{C}] = (t + 273.15)$ [K]
剂量当量	希沃特 sievert	Sv	$\text{m}^2 \cdot \text{S}^{-2}$

SI单位是由 7 个基本单位和 2 个辅助单位以及由这些单位衍生的、持有固有名称的 19 个导出单位所构成。为使 SI 数值的大小容易应用规定为 16 个词头,如表 1.1~1.3 所示。

在使用SI单位的符号和词头时,应注意以下几点:

1) 单位符号用罗马字,均用单数表示,单位末不写句号。如单位名称是固有名称,则SI单位符号仅第一字母大写,其余均为小写。

2) 导出单位以两个以上积的形式表示时,可以为 $\text{N} \cdot \text{m}$ (加点)或 Nm (空半字)。注意词头为同一单位符号时,应避免混淆,

如为避免牛顿·米与毫牛顿 mN 混同,可写成 Nm 或 N·m。

3) 导出单位是一个单位被其他单位相除时,可用 m/S 或 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 表示。但任何场合,不带括号的斜线,在同一行不能有两条。例如 $\text{J}/(\text{molK})$, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, $\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ 不能写成 $\text{J}/\text{mol}/\text{K}$, 尤其 $\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ 会误解为 $(\text{J}/\text{mol})\text{K}$, 应写成 $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

4) 上述3)的表示方法,也适用于数值。如 $(123/456)/789$, 不能写成 $123/456/789$ 。

5) 词头的符号紧接单位符号后面,写成一体化,它们之间不留空白,它们的正负指数构成新的单位符号,还可以构成与其他单位符号连接的导出单位符号。例如, 1km^2 是 $1\text{km}^2=1(\text{km})^2=1(10^3\text{m})^2=10^6\text{m}^2$; 1ms^{-1} 是 $1\text{ms}^{-1}=10^{-3}\text{s}^{-1}$ 。尤其米每秒时是 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (加点)或 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (空半字)。但由于后者易误写成 ms^{-1} , 因此还是以前者表示方法为好。

6) 含两个以上单位符号的导出单位时,仅为一个最初单位符号的词头。因此,摩尔浓度单位以写成 kmol/m^3 为好,而不宜写成 mol/dm^3 。

7) 不能用两个以上合成词头。例如不能用 $\text{m}\mu\text{m}$, 而应当用 nm 。

8) 质量基本单位的名称千克(kg),因 SI 单位的词头含千(k),故质量单位10的整数次方的名称以克(g)作词头表示。例如, 10^3kg 不能写成 1kkg , 而应写成 1Mg 。

9) 注意大写与小写。例如, K(开氏)与 k(千); S(西门子电阻单位,相当于欧姆)与 s(秒); C(温度绝缘单位)与 c(厘米); N(牛顿)与 n(毫微)。

10) 数值与单位符号间要留半个字空白。在位数多时,从小数点后3位开始留空白,余额不能加小数点。例如,不可写成 $.1234\times 10^4$ 应写成 0.1234×10^4 , 而又以 1.234×10^3 的表示

方法为最好。

11) 以10的整数次方表示的数值,原则上选择在0.1~1000之间。例如, 1.5×10^4 N用 15kN, 1500Pa 用 1.500kPa 表示。

12) 表或图的坐标轴用纯粹数(无因次数)表示。例如,纵坐标用压力 P (MPa)、横坐标用温度 T (K)的图表标记法,纵坐标为 P/MPa ,横坐标为 T/K 。由于此标记法较为特殊,故本书仍沿用传统标记法。

另外,除 SI 单位以外,目前还在并用的单位,示于表 1.4。

表 1.4 与 SI 单位并用的单位

物 理 量	名 称	符 号
长 度	△ 埃	Å
	△ 海里	n.mile
面 积	△ 靶恩	b
	△ 公亩	a
体 积	○ 升	l 或 L
质 量	○ 吨	t
时 间	○ 分	min
	○ 时	h(不用 hr)
	○ 日	d
速 度	△ 节	kn
加 速 度	△ 伽	Gal
压 力	△ 巴	bar
	△ 标准大气压	atm
能 、 功	○ 千瓦小时	kWh
	○ 电子伏特	eV
放 射 能	△ 居里	Ci
放射线强度	△ 伦琴	R
吸收剂量	△ 拉德	rd
角度(平面角)	○ 度	°
	○ 分	'
	○ 秒	"

注 ○ 为与SI并用的单位, △ 为暂时容许存在的单位。

(2) **单位的换算** 由于 SI 单位目前还处于推广阶段,过去已发表的文献、词典等,往往仍采用习惯单位,如果要利用这些重要的研究资料及公式,就必须进行单位换算。

单位换算包括单位制相同和单位制不同两种情况。单位制相同时,可用基本单位间的换算率来进行单位换算。尤其在 SI 的范围内,换算率常为 1,没有复杂的单位换算,单位制不同时,单位换算用重力换算系数 g_c ,如 (1.2) 式所示。

数式的单位换算,左右两边相等的即因次健全的式子是不成问题的。按照物理法则导出理论式时,只限于因次健全式子统一了的单位制。单位制的变换不需要进行任何系数的变换。但是,对于实验式中,两边因次不一致的因次不健全式,由于这些式子各项因次不同,式中所含物理量的种类、大小亦不同,变换单位制时,式中的系数值也要变化,换算的方法有多种。

为将因次不健全式中的因次统一,给系数本身以假定的因次,从而与因次健全式同样处理。用同样的方法可对这个假定的因次系数的单位换算与数值的单位换算。

(3) **因次解析与无因次数** 在化工原理领域,由于现象复杂,进行理论解析颇为困难。如果影响因素已经明了,作为影响因素的物理量的相互关系,可进行某种程度的预测。此种方法称为因次解析。

现设有关现象的物理量与因次常数共 n 个, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 它们间成立如下关系

$$f(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n) = 0 \quad (1.3)$$

式(1.3)如为因次健全式,则 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, 组合得到的 p 个无因次项 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_p$, 可用下式变换为

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_p) = 0 \quad (1.4)$$

其中,在采用的单位制中,基本量为 m , 无因次项数 p 等于 (n

- m)。将此称为 π 定理。

将有关现象的物理量的相互关系, 使用因次解析的方法归纳为无因次项的形式, 用实验数据可作成适用性广泛的实验式, 在化工原理上是可行的。表 1·5 中列举了化工原理常用无因次数。

表 1·5 在化学工程中常用的无因次数

名 称	符 号	定 义
比奥(<i>Biot</i>)数	<i>Bi</i>	hL_m/k
欧拉(<i>Euler</i>)数	<i>Eu</i>	$p/(\rho u^2)$
摩擦系数	<i>f</i>	$\Delta p d/(2\rho u^2 L)$
傅立叶(<i>Fourier</i>)数	<i>Fo</i>	$k\theta/(\rho C_p L^2)$
费劳得(<i>Froude</i>)数	<i>Fr</i>	$u^2/(gL)$
伽里略(<i>Galilei</i>)数	<i>Ga</i>	$L^3 g \rho^2 / \mu^2$
格拉斯赫夫(<i>Grashof</i>)数	<i>Gr</i>	$L^3 \rho^2 \beta g \Delta T / \mu^2$
格里茨(<i>Gractz</i>)数	<i>Gz</i>	$w C_p / (kL)$
努赛尔特(<i>Nusselt</i>)数	<i>Nu</i>	$h\bar{a}/k$
皮克里特(<i>Pecle</i>)数	<i>Pe</i>	$u \rho C_p L / k$ 或 uL/D
普兰得特(<i>Prandtl</i>)数	<i>Pr</i>	$C_p \mu / k$
雷诺(<i>Reynolds</i>)数	<i>Re</i>	$du \rho / \mu$
施密特(<i>Schmidt</i>)数	<i>Sc</i>	$\mu / (\rho D)$
薛乌德(<i>Sherwood</i>)数	<i>Sh</i>	kmL/D
斯坦顿(<i>Stanton</i>)数	<i>St</i>	$h/(C_p u \rho)$
韦伯(<i>Weber</i>)数	<i>We</i>	$\rho u^2 L / \sigma$

1.2 衡算

(1) 衡算概要 在化工厂的操作设计中。知道物质、能量在内部怎样运动是极重要的。在工厂中可以通过测定流量、温度、压力等操作因素, 但这些测定还不能明确所有的情况。在设计时, 通常出口条件是产品的要求所决定的。而进口条件, 是原料方面的要求所决定。为此, 关于规模的大小、对象的范围、质量和

能量的积存,还可以从已知的条件推算出未知量。质量或能量,其本身只能变换形态,而不能创造与消失。可以下列通式表示:

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积存量} \quad (1.5)$$

此式称为平衡式。此式用于物质流动时,称为物料衡算;用于能量时称为能量衡算。稳定的连续操作,积存量不随时间变化,在某一时间内,系统内进入的物质全部输出。此状态称为稳定状态,平衡式可简化为下式

$$\text{输入量} = \text{输出量} \quad (1.6)$$

在无特殊情况下,按下列经验顺序进行考虑是可行的。

① 明确平衡系统的范围 因平衡式与系统大小无关,故整个工厂也可以看成一个系统。即使单一设备的某一部分也可作为一个系统,但最初假定的系统在计算过程中不可变更。平衡式理解为仅仅在假定系统的范围内成立。

② 明确已知量和未知量 平衡系统确定后,整理该系统输出入物质或能量的流动,将其以方框图形式加以归纳。此时,进入系统的物质以进入方向箭头画出,输出物质以输出方向箭头画出。再在图上写出已知物质的数值及未知物质的符号。由此明确了已知量、未知量及其出入关系,从而使整理过程中不至出现疏漏。

③ 基准的选定 衡算中应有统一的基准,选定的基准以对平衡双方都能适合为好。一般间歇操作以每批为基准;连续操作以单位时间为基准;产品或原料的单位量,根据情况,可用单位容积或单位面积作基准。另外必须注意,衡算中所用数据的基准。特别是对于焓,不同文献常有不同的基准,在使用时应予确认。

④ 列出并解出平衡式 由 ①~③,按守恒定律列出具体的平衡式,并将其用数字解出。

(2) **物理操作的物料衡算** 化学过程是由伴随化学反应的操作与物理操作(单元操作)组合构成的。物理操作包括流动、传热、蒸发、蒸馏、萃取、吸收、调湿、过滤、混合等。关于上述操作的详细情况,本书在以下各章予以介绍。

(3) **伴有反应操作的物料衡算** 如上所述,化学过程通常均要伴随一些化学反应。在进行物料衡算时,除供给物的形态变化外,物理操作上平衡各方不变。例如,供给物为10kg,积存量为零,输出即为10kg。化学反应以后,质量不增减,化学反应应按照化学反应式计算。

通常,所有原料均按化学反应的摩尔量投入,其中一部分超过摩尔量使反应加速,直至成为产品。此时,如供给量正好或接近摩尔量,它即为限定物质。化学反应由限定物质所限制,其它物质是未反应的残留物。

(4) **焓与反应热** 将温度为 T_1 的固体物质在恒压下逐渐加热,研究物质的温度变化及相变化如图1.1所示。

首先,固体从A状态(温度 T_1)开始以一定的速度加热,物质的温度也按照一定速度上升,然后,到达状态B(温度 T_2),温度停止上升,物质开始熔融,此时温度即为熔点。物质均成为液体状态C(温度 T_2)后,温度再开始上升,至状态D(温度 T_3),液体沸腾,此时温度即为沸点。然后,物质均成为蒸汽状态E(温度 T_3),温度继续上升。

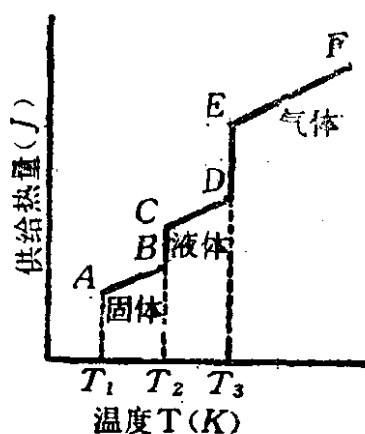


图 1.1 物质的状态变化

研究上述过程焓的变化。A 状态焓的增加为 ΔH

$$\begin{aligned}\Delta H &= \Delta H_{AB} + \Delta H_{BC} + \Delta H_{CD} + \Delta H_{DE} + \Delta H_{EF} \\ &= H_F - H_A\end{aligned}\quad (1.7)$$

其中, ΔH_{AB} 是从 A 向 B 的状态变化时焓的增加, ΔH_{BC} 等也同样。 H_F 为状态 F 持有的焓, H_A 为状态 A 持有的焓。而 ΔH_{AB} 、 ΔH_{CD} 、 ΔH_{EF} 为固体、液体、气体不包括相变化, 仅仅温度上升增加的焓, 称为显热。与此相反, ΔH_{BC} 、 ΔH_{DE} 是在一定温度下, 相变化所必须的焓, 称为潜热。潜热除熔融热、蒸发热外, 还包括由固体变为气体的升华热, 结晶态转移中的转移热。

计算焓必须的比热, 在固体或液体的场合, 无温度变化时, $c_p \Delta T$ 即可计算焓的变化。对于气体, 恒压比热与定容比热分别为 c_p 与 c_v , 通常采用 c_p 。 c_p 是温度的函数, 由下列实验式表示

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (1.8)$$

常数 a 、 b 、 c 、 d 可参阅化工词典等专门书籍。

伴有化学反应的过程, 通常有热的输入与输出。在反应中产生或吸收的热即能量是化学工程中的重要因素之一。例如, 由能的变化可了解反应状态; 反之, 供给或移去能量可控制反应。焓的平衡必然与反应热有关。以反应热为中心进行研究称为热化学。

热化学以霍斯 (Hess) 定律(在化学反应中, 如生成物与反应物状态相同, 那么所产生的热量相同, 与过程无关)为基础, 而且反应热也按此定律计算。即反应热是生成物与反应物的标准生成热 (1atm, 25°C, 从元素合成时的每摩尔热量) 的差。反应系统焓的变化 ΔH_r 用反应物的标准生成热与生成物的标准生成热之差表示

$$\Delta H_r = \sum (\Delta H_f)_p - \sum (\Delta H_f)_r \quad (1.9)$$

和标准生成热一样, 标准燃烧热 (1atm, 25°C, 由氧分子的氧化反应所产生的每摩尔的热量) ΔH_c 可表示为

$$\Delta H_r = \sum (\Delta H_c)_r - \sum (\Delta H_c)_p \quad (1.10)$$

无机化合物常用标准生成热的实测值, 而有机化合物常用