

化 工 計 算

上 册

С. Д. 别斯科夫著

商 务 印 書 館

本書系根据苏联化学出版社(Государственное научно-техническое издательство химической литературы)出版的別斯科夫(С. Д. Бесков)所著“化工計算”(Техно-химические расчеты) 1950年修正本譯出。原書經苏联高等教育部审定为化工学院及化工系教学参考書。

譯本分上下兩册出版：第一册包括原書前四章及附录 I 与附录 II；第二册为原書后四章。譯本于 1953 年 9 月初版，1956 年經原譯者等作了修訂。

参加本書翻譯和校訂工作的为北京工業学院化工系張汉良、熊楚才、梁嘉玉、蕭天鈞、張国熊、丁微等同志。参加修訂工作的有朱鶴孙同志。

各習題的答数，或因原書排版的錯誤，以致有时与实际算出的数字不相符合，尚希讀者注意。

化 工 計 算

上 册

С. Д. 別斯科夫著 張汉良等譯

商 務 印 書 館 出 版

北京東總布胡同 10 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 107 號)

新 華 書 店 總 經 售

商 務 印 書 館 上 海 廠 印 刷

統一書號 15017·100

1953 年 9 月初版

開本 850×1168 1/32

1956 年 8 月 2 版

字數 195,000

1956 年 8 月上海第 3 次印刷

印數 9,001—10,000

印張 9 (另附圖表 1 冊)

定價(10) 2.00

原 序

本書第一版係在 1938 年問世，以“化工計算概論”命名的。

寫現在這本書時，作者曾將全部材料重新審查，並將其中很大一部分加以根本修改；而書中某些章節則已另行寫過。

本書係化工學院學生的參考書。其中列有實際運用物理化學的基本定律來計算個別化工過程的例題。學生在這些例題的基礎上，認識了某種製造的技術過程，懂得了化工計算的一般原則，因而能夠計算任何化學過程。

在化工計算的實踐中，爲了加速和減輕計算的工作，廣泛地使用圖表與算圖。因此在本書中，除了一般的分析計算法外，在很多場合還引用了圖解。根據圖解所作的計算，其精確度因圖解的比例尺度而定，但其誤差一般不超過 1%。

化工計算中最常用的數值參考表，列在附錄中。

作者對工科博士 Н. М. 沙方羅科夫教授 (Н. М. Жаворонков)，化學副博士 Г. В. 費諾格拉多夫 (Г. В. Виноградов) 及工科副博士 А. М. 拉斯托夫切夫 (А. М. Ластовцев) 所給予本書的幫助，表示深切的謝意。

С. Д. 別斯科夫

本書所用的符號表

A ——功。

$a_{\pm}$ ——離子活動值。

$a\%b\%$ ——物質的濃度，以重量百分率表示。

$a_0\%b_0\%$ —— A, B 等物質的濃度，以分子百分率表示，對於氣體也即是體積百分率。

B ——大氣壓力，以[毫米]汞柱表示。

b ——水蒸汽壓。

C ——電量。

C ——真正分子熱容。

$\bar{C}$ ——平均分子熱容。

C_s ——物體或系統的真正熱容的通式。

$\bar{C}_s$ ——物體或系統的平均熱容的通式。

c ——光速。

c ——物質的濃度，以[克/升]表示。

c ——物質濃度的一般符號。

c ——真正比熱容。

$\bar{c}$ ——平均比熱容。

$c_{00}, \bar{c}_{00}$ ——體積熱容及平均體積熱容。

$c_p, \bar{c}_p, C_p, \bar{C}_p$ ——定壓時的比熱容，平均熱容，分子熱容及平均分子熱容。

$c_v, \bar{c}_v, C_v, \bar{C}_v$ ——定容時與上相同的各項熱容。

δ ——活化能。

E ——電極電勢。

E ——原電池的電動勢；電解質的分解電壓。

E_0 ——標準電極電勢。

E_c ——當溶液中離子濃度為(c)時相應的電極電勢。

E_k ——動能。

e ——分子內各原子的鍵能。

$E_{\text{沸}}$ ——溶劑的比沸點降低常數。

$E_{\text{冰}}$ ——溶劑的比冰點降低常數。

e_i ——極化及過電壓的電動勢。

e'_i ——氫的過電壓。

e''_i ——擴散電勢(電解質濃差的極化電動勢)。

e'''_i ——化學極化。

F ——自由能。

F ——法拉數。

f ——系統的相數,電極面積。

f_a ——離子的活動係數。

G ——物質的重量。

g ——重力加速度。

g ——混合物中各組份的重量。

$G_{\text{陽極}}$ ——陽極附近的離子重量,以[克]計。

$G_{\text{陰極}}$ ——陰極附近的離子重量,以[克]計。

$G_{\text{原料}}$ ——原料的總重量。

$G_{\text{產品}}$ ——產品的總重量。

I ——系統的總熱含量。

i ——系統中個別組份的熱含量。

i ——溶質的分子總數與它離解時生成的分子數之比。

i ——電流強度。

i_0 ——電流密度。

$K_{\text{電離}}$ ——電離常數。

$K_{\text{阻力}}$ ——容器的阻力常數(在電化學中)。

K ——化學反應平衡常數。

K_c ——平衡常數,以反應物的[克-分子/升]表示濃度的。

K_p ——平衡常數,以反應物的分壓表示濃度的。

K_n ——平衡常數,以反應物的分子百分率表示濃度的。

$K_{\text{離解}}$ ——熱離解常數。

$K_{\text{比}}$ ——比分配係數。

k ——系統的組份數。

k ——化學反應速度常數。

k ——電解質的分解電壓的溫度係數。

L, l ——長度。

l ——所測的溶液導電度。

l_A ——陰離子遷移數。

l_k ——陽離子遷移數。

M ——物質的分子量。

M, m ——質量。

M_i ——物質耗量的一般標誌。

m ——電解時在一個電極上析出的電解質的質點數。

m ——一分子物質分解成的質點數。

m ——物質離解的校正數。

m ——多變曲線的指數。

N ——在指定體積內氣體質點的總數。

n ——物質的分子總數。

n_0 ——物質的價數。

$n_A, n_B, \dots$ ——A, B...物質的濃度,以[克-分子]/[升]表示。

$n_{e_A}, n_{e_B}, \dots$ ——在 A, B 等物質的溶液內,物質 C 的[克-分子]數。

$n_i = \frac{n_A}{n_B}$ ——A 物質的分子數與 B 物質分子數之比。

$n_{A_i} = \frac{n_A}{n_A + n_B + \dots}, n_{B_i} = \frac{n_B}{n_A + n_B + \dots}$ ——在 A, B 等物質的混合物(氣相的液相的或固相的)中 A, B 等物質的分子分數。

n_r ——在溶液中氣體的分數。

n_{0_i} ——在溫度 T_0 時 A 物質的分子數與 B 物質的分子數之比。

P ——總壓力。

p ——分壓力。

p_0 ——計壓或大氣壓力。

p_a ——絕對壓力或真正壓力,以[大氣壓]表示。

p_h ——真空表壓(稀薄度)。

p_m ——表壓或超氣壓以[大氣壓]表示。

p_n ——動壓力(速度頭)。

Q ——生產循環的總熱量,或物系的總熱量。

Q_H^P ——燃料的低熱值。

Q_B^P ——燃料的高熱值。

q ——單獨過程的熱量,或任何生產階段的熱量(反應熱,溶解熱,等等)。

q_a ——活化熱。

R ——氣體常數。

r ——導電體(電解質)的阻力。

$r_{\text{熔}}$ ——熔化熱。

- $r_{\text{蒸}}$ ——蒸發熱。
 $r_{\text{昇華}}$ ——昇華熱。
 S, s ——導體的橫截面。
 S ——熵。
 s ——系統的自由度數。
 T ——絕對溫度(愷氏溫標)。
 t ——以百度溫標表示的溫度。
 U ——物體的內能。
 V ——總體積。
 V ——在外線圈的電動勢或外路電壓(外電動勢), 電池兩極的電壓。
 V_0 ——在 0°C 及 760[毫米]汞柱時的氣體體積。
 v ——分體積。
 v ——化學反應速度。
 W ——功率。
 w ——物體運動速度。
 $w_{\text{平均}}$ ——氣體的平均速度。
 $w_{\pm}$ ——陰離子遷移數。
 $w_{\text{陽離子}}$ ——電解時陽離子的遷移速度。
 $w_{\text{陰離子}}$ ——電解時陰離子的遷移速度。
 Z ——物質的當量。
 α ——解離度(熱的與電解質的)。
 α ——過剩空氣係數。
 α ——導電度係數。
 γ ——物質的比重。
 η ——熱機效率。
 η ——電流利用係數, 或電流“產率”; 電解時的電流

效率。

χ ——定壓熱容與定容熱容之比。

λ ——熱傳導係數。

λ ——溶液的當量導電度。

λ_{∞} ——無限稀釋當量導電度。

$\nu_1 \nu_2$ ——化合量係數。

ρ ——比電阻。

ρ ——在給定情況時的物質密度。

ρ_0 ——在標準情況(0°C , 760[毫米]汞柱)時的物質密度。

τ ——時間。

χ ——比電導度。

ψ ——亨耳(Генрь)常數(係數)。

上 冊 目 錄

原序

本書所用的符號表	1
概論	1
第一章 基本概念與量度單位	5
量度單位與因次	5
長度、面積與體積	6
質量與重量	6
力	10
壓力	10
速度	15
功與能	17
功率	19
熱	20
溫度	21
量電單位	21
物質百分率(濃度)的相互關係	23
習題	30
第二章 工業產品成份的計算與反應物量的計算	32
工業產品的數量與其成份的計算	32
反應物量的計算	35
物料清算方程式	37
計算例題	38
習題	53
第三章 氣體定律	57
波義耳定律	57
蓋-呂薩克定律	58
查理加德羅定律	61
理想氣體的狀態方程式	62
道爾頓定律——混合氣體	63
真實氣體的狀態方程式	71
計算例題	75
習題	83

第四章 熱與能的定律	88
熱力學第一定律	88
等溫過程的功	89
絕熱過程與多變過程的功	93
等壓過程的功	101
等容過程	103
熱量清算方程式	105
熱容	110
熱含量	129
化學變化的熱與物理變化的熱	138
燃料熱值與燃燒溫度	161
計算例題	167
習題	197

附錄一

表 1——某些元素的原子量	207
表 2——各種度量制中的物理量單位	208
表 3——各種量度單位中能量的轉換係數	209
表 4——在各種不同溫度下的飽和水蒸汽壓	210
表 5——常用氣體的某些常數	211
表 6——氣體與蒸汽的真正分子熱容的溫度函數	212
表 7—— H_2 , CO , 及 N_2 在各種不同壓力下的真正分子熱容的溫度函數	214
表 8—— $P=1$ [大氣壓] 時由 $0^\circ C$ 到 $t^\circ C$ 氣體的平均分子熱容的溫度函數	215
表 9——定容時從 $0^\circ C$ 到 $t^\circ C$ 氣體的平均分子熱容的溫度函數	216
表 10—— $P=1$ [大氣壓] 時由 $0^\circ C$ 到 $t^\circ C$ 氣體的平均分子熱容	216
表 11——定容時從 $0^\circ C$ 到 $t^\circ C$ 氣體的平均分子熱容	217
表 12——固體的真正比熱容的溫度函數及熔化熱	218
表 13——固體的平均比熱容的溫度函數	221
表 14——室溫時固體的平均比熱容	226
表 15——液體的汽化熱與比熱容	228
表 16—— $P=1$ [大氣壓] 時在各種不同溫度下的氣體熱含量	230
表 17—— $P=1$ [大氣壓] 及 $\sim 20^\circ C$ 時最主要化合物的生成熱	231
表 18—— $18^\circ C$ 及 $P=1$ [大氣壓] 時有機物的燃燒熱	246
表 19——元素的鍵能 (在 $20^\circ C$ 及 $P=1$ [大氣壓] 時)	250
表 20——溶解熱 (在 $20^\circ C$ 時)	251
表 21——某些燃料的熱值	252
表 22——熱力學函數表 (標準情況的)	254
表 23——某些化合物的自由能變化的溫度函數 ($P=1$ [大氣壓] 時)	258
表 24——最重要化學反應的熱效應及其平衡常數的溫度函數 ($P=1$ [大氣壓] 時)	260

表 25——	涅恩斯特方程式計算化學反應平衡常數的規定化學常數	270
表 26——	在不同溫度下 $f = \ln \frac{T}{298} + \frac{298}{T} - 1$ 函數值	270
表 27——	在不同溫度下某些氣體在水中的溶解度	271
表 28——	硫酸與硝酸溶液的比重	272
表 29——	鹽酸溶液的比重	272
表 30——	氨溶液的比重	273
表 31——	碳酸鈉溶液的比重	274
表 32——	苛性鈉溶液的比重	275

附錄二 算圖與算表(另本隨附)

概 論

凡在着手設計任何化學生產設備(冷凝器,熱交換器,接觸器,洗滌器,燃燒爐,等等)之前,應對整個生產過程,或其中與設計的設備直接有關的部份,事先作一詳細的化工計算。每一設備或全部過程的物料清算與熱量清算,就是一切設計計算的基礎。

有化學或物理化學過程在其中進行的設備,一般在沒有作出熱量清算之前,是不能進行設計計算的;而熱量的清算,則必須根據設備的物料清算的數據來完成。例如着手設計一個簡單設備——熱交換器,必須知道它的尺寸大小。其尺寸只能在算出熱交換器內由某一物質給予另一物質的熱量之後才能確定,即須作出它們的物料與熱量清算之後才能計算。

化工計算不僅為設計計算之用,而且是計算成品的生產耗費係數所十分需要的。因此,每位化學工程師應當掌握運用化工計算的方法。

一切化工計算是以自然的兩個基本定律為基礎的:物質重量(質量)不滅定律和能量不滅定律;它們是由 M.B. 羅蒙諾索夫(M.B. Ломоносов)首先提出的。一切物料的計算,即作某一過程的物料清算,是以前一定律為根據的;一切能量的計算,包括熱的計算在內,即作熱量清算時,是以後一定律為基礎的。

物質重量(質量)不滅定律是:在一個孤立物系中,不論物質發生什麼變化,它的重量(質量)始終不變。換言之,物質不能從無到有,也不能無影無蹤地消失掉。由此可見,在任何孤立的生產循環中,在任何單獨設備內的物質的量(質量,重量)始終是不變的,物質只能發生物理形態的改變(例如從氣體轉變為液體,固體,或者相反的轉變)或成份的變化,即發生某些化學變化(例如一個複雜物質分解為若干組份,或與其他物質化合,生成某種新物質,等等)。但無論如何,放入器內各物質的

量，必等於從此器放出之量。因此物質重量不減定律，可以簡單地表述如後：過程最初用物之量恆等於最後產物之量。這是製成全部過程的，或設備的，或一部份過程的，物料清算的基礎。因此，作物料計算時，必需計算加入器內各組份的重量（收入）與從此器放出各組份的重量（支出）。此時，不論加入物或放出物的成份如何，即不論它們通過此器時遭遇到什麼樣的變化，組份的收入總和，必須等於組份的支出總和。

物質質量（重量）不減定律，嚴格說來，不是絕對精密的。因為在A，B…等物之間互相發生化學作用時，即隨着發生質量差 Δm ：

$$A + B + \dots = D + E + \dots + \Delta m.$$

化學反應的質量差，可由質能底相互關係（ $E = mc^2$ ）來決定；在此情況，這個關係具有如下的形式：

$$Q = \Delta mc^2 \text{ 或 } \Delta m = \frac{Q}{c^2},$$

上式中 Q ——反應時放出的熱量：

$$A + B + \dots = C + D + \dots + Q;$$

Δm ——質量差，即因反應時放出熱量 Q ，物質重量所受的“損失”；

c ——真空中光速度，等於 3×10^{10} [厘米]/[秒]。

但在計算生產過程中的化學反應時，質量差（損失）是沒有意義的，因為它的值太小了。

取炭的燃燒為例來說明：



將反應時放出的熱量折算為功的單位（爾格），即得：

$$Q = 97800 \times 4.182 \times 10^7 = 4.1 \times 10^{12} \text{ [爾格]},$$

$$\Delta m = \frac{4.1 \times 10^{12}}{(3 \times 10^{10})^2} = 4.55 \times 10^{-9} \text{ [克]}.$$

因此

所以燃燒 12 [克] 炭得不着 44 [克] 的 CO_2 ，而是得出比 44 克少

4.55×10^{-9} [克]的 CO_2 ; 但在工業上的計算, 這個誤差自然沒有什麼關係。

在計算核反應時, 質量差就有很大的作用, 因它是構成該項過程的能量清算底基礎。

能量不滅定律可以表述如後: 在一個孤立系統中各種形式的能量總和不變; 它既不能消失於無蹤, 也不能從無中產生; 它只能轉變為另一種精確當量的能。由於熱是能的形式之一, 如果它在用器內不轉變為他種形式的能, 在此情況下, 這個定律就可表述如後: 在一個孤立的生產循環中, 收入的熱量, 必須準確地等於支出的熱量。此時既須計算在過程中, 或在用器內, 加入各物的熱含量, 也須計算放出各物的熱含量及與四週介質交換的熱量。

如上所述, 在生產過程中, 一切物質都要發生某些變化。這些變化可能是物理的, 其結果是物質改變了自己的物理性質(形式, 外表, 溶解度, 等等); 也可能是化學的, 其結果是物質發生了涉及它化學成份的深刻變化。但是不論物質發生什麼樣的變化, 它們總是按照一定的規律來進行。這些規律的詳細研究, 屬於獨立的學識部門, 如: 物理, 化學, 物理化學, 熱力學, 水力學, 等等。在物質加工過程中, 如果不知物質發生物理變化或化學變化所根據的這些規律, 則不能進行任何計算。所以在着手製成各種工藝過程的物料與熱量清算, 及計算耗費係數, 成品與半成品的產率之前, 必須清楚地、明析地想像該過程的進程, 因而也是明確過程所服從的規律性。根據這些規律性, 用該過程已知的數據, 確定計算的方法。這個方法不僅由生產種類來決定, 而且與加工的方法, 原料的性質, 設備的使用情況, 以及生產的其他實際的因素和條件等有關。

許多重要過程的計算原則, 以及將化學和物理化學的規律性實際運用到化工生產的計算法, 特別是圖表計算法, 大半是由俄國科學家所製定的。例如燃料氯化過程的計算, 是根據 H. H. 多布洛荷夫 (H. H.

Доброхотов), В. Е. 克魯-克惹麻羅 (В. Е. Грум-Гржимайло) 與 А. П. 且耳能舍夫 (А. П. Чернышев) 的方法來進行的。依據元素的成份, 計算燃料的熱值, 則普遍採用 Д. И. 門德雷也夫 (Д. И. Менделеев) 的公式。由 Н. С. 古耳納科夫 (Н. С. Курнаков) 研究出的物理化學分析法, 是鹽類結晶過程, 固體合金成份, 多元系的蒸發和冷凝, 以及其他類似過程的計算基礎。在物理化學方程式的計算方面, 由 Г. В. 魏諾格拉多夫 (Г. В. Виноградов) 與 А. И. 客拉喜里斯契科夫 (А. И. Красильщиков) 製定了許多最通用的算圖。在化學的生產設備與生產過程方面的計算, 由教授 А. Г. 卡薩特金 (А. Г. Касаткин), Н. С. 格爾布撒林 (Н. С. Гелбперин), С. Я. 格耳時 (С. Я. Гарц) 及其他諸教授, 提供了巨大的供獻。Д. В. 納哥耳斯基 (Д. В. Нагорский), С. П. 洗洛麥特尼科夫 (С. П. Сыромятников), Д. А. 且耳諾巴也夫 (Д. А. Чернобаев) 及其他諸教授, 給出了燃料燃燒過程與燃燒設備的計算方法。

第一章 基本概念與量度單位

量度單位與因次

物質的每一種具體狀態，是用一定的，並能測量的，物理因素或參變數（重量，壓力，速度，溫度，等等）來表明的。表示這些參變數則用量度單位（長度，時間，質量等單位）；這些單位是任意選擇的數值（[厘米]，[公尺] ①，[秒]，[小時]，[克]，[公斤] ②，[噸]，等等），用它們和一些未知的，而要測量的同類數值相比較。但為使用各種物理因素聯系的數學方程式在書寫時免去一些係數，實際規定量度單位以不任意取用，較為合理。因此，確立了度量制，或量度單位；其中只有三四個單位，是任意獨立選定的，而其他的單位則由它們導衍而得。

在目前許多制度中，確立了三種同名度量制，每種包含有三個量度單位。

絕對度量制 *CGS*（[厘米]，[克-質量]，[秒]）；它的長度（ l ）單位為[厘米]（ cm ），質量（ M ）單位為[克]（ g ），時間（ τ ）單位為[秒]（ sec ）。

蘇聯用的標準度量制 *MTS*（[公尺]，[噸-質量]，[秒]），它的長度（ l ）單位為[公尺]（ m ），質量（ M ）單位為[噸]（ m ），時間（ τ ）單位為[秒]（ sec ）。

工程度量制 *MKS* ③（[公尺]，[公斤-力]，[秒]），它的長度（ l ）單位為[公尺]（ m ），力（ F ）單位為[公斤-力]（ kgf ），時間（ τ ）單位為[秒]（ sec ）。

但是這些度量制，不包括所有表明物態特性的各種參變數或因素；用它們僅能表明幾種物理參變數，即只能說明物體的質量，和它在空間的長度，與隨時間的變動各因數。因此，存在着一系列其他的量度單

① 譯者按物理上用[米]及[仟克]，工程上用[公尺]及[公斤]，今後對[公尺]及[公斤]以下的數值，仍用物理上的名稱。

② 在某些教學參考書中，以 *MKS* 表示工程度量制。