

化學工業過程及設備

序

本書係由高等教育部組織小組編寫的，並經審定為高等工業學校的試用教材。

本書編寫的目的是企圖根據學習蘇聯並結合中國實際的精神，編寫一本適合於我國目前需要的教材。

本書編寫時所遵循的方針，主要有下列數項：

(1) 本書的內容和章節次序概以高等教育部所頒佈的「化學工業過程及設備」的統一教學大綱為依據，僅在極個別的地方略有出入。

(2) 本書的內容，除首先滿足作為一門基礎技術課所應具有的基本理論和典型設備的敘述外，還根據教學大綱所規定的範圍，適當地介紹本學科最近的成就和進展。

(3) 為了貫徹學習蘇聯的先進科學技術，本書的編寫，係以卡薩特金教授的「化學過程及設備」一書為依據，並結合本課程教學法指導書的精神而成。

(4) 本書稱為「化學工業過程及設備」，顧名思義，可知機械設備部份亦為主要內容之一。但本書中在處理有關設備時，祇介紹典型設備的操作原理與其主要構造及應用範圍。至於各種機械類型以及構造細節等，可通過這門課程的實驗和生產實習獲得解決。

(5) 根據本課程教學大綱的規定，凡列為可講或不講部份（在大綱中標有雙星的），在本書中概用小號字排印；凡列為可以講淺些的部份（在大綱中標有單星的），則根據內容或全部或部份地用小號字排印。又關於理論方程式的推演，則力求適合於我國學生的程度，有些繁複的推演則用小號字排印。這樣可使主從分明，繁簡自如，而便於選擇。

(6) 為了幫助學生對原理的瞭解，每章均附有少數典型例題。至於與本書互相配合的習題、課程設計和實驗教材，高等教育部正在組織力量，進行編寫。

因限於編者的政治和業務水平，上述方針恐還未能很好地貫徹，書中缺點必多；因此歡迎同志們的批評指正，即使涉及一字一句，也所歡迎，以求本書在試用中獲得修正和改進。

還應指出，本書在編寫過程中，各兄弟學校有關教研組的同志們，曾經提供了許多寶貴意見；又在集中定稿期間，得到了天津大學、華東化工學院及成都工學院黨、行政和同志們的支持。這些都給編者以莫大的鼓勵和許多便利，特此深致謝意。

編 者

1955年12月

緒 論

(一) 化學工程的研究對象及本課程的目的與性質

化學工程的研究對象為化學工業製造過程及進行此種過程的最有效方法。

人類經過長時期的實踐，從周圍大自然所發生的複雜現象中總結出若干規律，這些規律稱為自然科學規律。以此為基礎，人類進而研究了許多生產過程，這些過程都是獲得生活資料和生產資料所不可缺少的。

將作為原料的自然產物或是農業產物製成生產資料和生活資料的過程，稱為工業製造過程，而研究工業製造過程的學科稱為工程學。

工程學的發展始自十八世紀末葉，工業革命之後，它隨着工業中機械的大規模採用並在科學理論與生產實踐二者相輔相成的影響下，獲得了更迅速的發展。它不僅改進了原有的生產過程，還創造了新的生產過程。

工程學的最終目的，無論其為化學工程學或他種工程學，都是為了一個崇高理想的實現，即：如何能馴制並利用自然界的無窮無盡的資源和變化多端的現象，使之為人類服務，為人類增進幸福。此一理想的徹底實現，祇是在社會主義制度的條件下，才有可能，因為在這種制度下，工程學遵循着國家當前的政治與經濟任務而發展，並依國家經濟計劃所規定的具體任務而定出它的各部門的發展方向。由於這樣，工程學才能保證生產技術的不斷進步，生產能力和勞動生產率的不斷提高，從而達到更好地為人民謀幸福的目的。蘇聯近年科學技術的飛躍進步和人民生活水平的不斷提高，即為顯著的例證。

化學工程學的特點在於它所研究的工業製造過程，其所用的原料，無論是自然產物或農業產物，不僅在物理性質上有了變化，在物質的化學性質上也有了變化，這種以化學變化或化學處理為主的工業製造過程，稱為化學工業製造過程。在研究這些過程時，化學工程學的任務不僅要保證能夠製造出來所需要的生產資料和生活資料，而且還要經常注意到生產技術的改進、勞動條件的改善、操作的機械化、生產管理的自動化等問題。這樣才能降低成本、提高產量和產品的質量，以保證最大限度地滿足人民的需要。

化學工業種類繁多，所用製造方法亦各有不同，但若將其製造過程加以分析整理，則見其中有若干應用較廣而為數不多的基本過程，這些基本過程具有共同的基本原理並各有其通用的典型設備。例如在燒鹼製造中，鹼液藉蒸發而濃縮；同樣地，在食鹽精煉，植物單寧提取以及製糖等工業中，各有關溶液亦須藉蒸發而獲得濃縮。所以蒸發為一化工基本過程。又如在合成氮肥料的製造中，其所獲得的晶體肥料須要乾燥；在純鹼製造中，純鹼亦須要乾燥；他如耐火材料廠中的塊狀磚坯，造紙廠中的片狀紙張，亦皆須要經過乾燥，故無論物料的性質和形狀如何，需要乾燥的目的則一，所以乾燥也是一個基本過程。因此可以獲得一個結論：任何化學工業的製造程序，無論情況如何錯綜複雜，均可歸納為若干基本過程；同時若干基本過程結合到生產的具體要求，也可加以串聯組合，構成一個製造程序。

本課程——化學工業過程及設備（簡稱「化工過程及設備」）——的目的即在於研究這些基本過程，闡明其共同原理，熟諳其計算方法，並瞭解其典型設備，課程的性質是屬於基礎技術課程的。

(二) 化工過程的歷史概述

化學工業過程及設備之成為一門獨立學科，始於二十世紀初葉，此學科的最初發端者為俄國學者A. K. 克魯普斯基教授和N. A. 吉辛科教授。前者在1909年發表一篇論文，「化學工學設計初稿」，

於其中確定了未來「化工過程及設備」的主導概念，後者在1912年在莫斯科高等工業學校首開「化工過程及設備」一課，同時印出該課程的幾章初稿。而遲在1915年，美國李特爾氏始建議採用「化工單元操作」以教學，以後美國麻省理工學院開設一門「化工原理」獨立課程，在1923年始將講義編寫為書。由此可以肯定，在化學工業過程及設備這門學科的歷史發展中，俄國克魯普斯基與吉辛科兩教授才是真正的奠基者。

尤其在十月社會主義革命之後，隨着各個五年計劃的實行，化學工業過程及設備這門學科在蘇聯有飛躍的發展，結果在這門學科的領域中獲得了卓越的成就，積累了化學工業製造的經驗，成為世界上最先進的科學技術。

除上述的克魯普斯基和吉辛科教授外，蘇聯學者們對這門學科的巨大貢獻，實難以罄述。例如Д.П.康諾瓦洛夫、П.П.卡皮查等之於傳熱、蒸餾和冷凍；Л.Ф.福金之於氣體和液體的精製；М.В.基爾皮巧夫、М.А.米海耶夫等之於傳熱；Н.И.吉爾彼林之於蒸發和蒸餾；В.М.拉姆、М.Д.庫茲涅錯夫等之於吸收；П.К.拉木金、А.В.雷柯夫、М.Ю.盧立業等之於乾燥以及基爾皮巧夫、П.Г.羅曼考夫、П.К.康帕科夫、В.В.卡法羅夫等之於相似理論及其應用等等，皆是極有成就的。

至於我國，由於勞動人民的勤勞和智慧，自古以來在化工生產和製造方面的成就，早已聞名於世。「天工開物」，「圖書集成」等著述所載，即為例證。過去由於封建統治階級的輕視科學技術，這些寶貴經驗未能系統地總結出來，有的甚至湮沒失傳。近數十年來，在帝國主義和反動統治雙重壓迫之下，我國的科學技術更難得到重視，人民的智慧也就更難發揮。雖然如此，我國學者和勞動人民仍不斷地有傑出的貢獻，但就其數量而言，實嫌過少。

解放後的新中國，由於社會制度的改變和我國社會主義建設的開始，工業和農業有了空前的發展，這就給科學技術開闢了無限廣闊的道路。我國勞動人民，在馬克思列寧主義思想的指導下，學習了蘇聯的先進經驗，從而發揮了他們的集體智慧與力量，無論在化工的生產過程和科學理論方面，皆已取得了不少的輝煌成績。很明顯地，這些成績的獲得是和中國共產黨與人民政府的正確領導分不開的，而且這些成就還將隨着國家經濟建設的發展而日益增多，日益擴大。

(三) 我國化學工業建設與本學科的關係

我國在過渡時期的中心任務是社會主義工業化，正如毛澤東主席所說：「沒有工業，便沒有鞏固的國防，便沒有人民的福利，便沒有國家的富強。」社會主義工業化可使我國從落後的農業國成為現代化的工業國，而社會主義工業化的中心環節，則是優先發展重工業，同時也相應地發展輕工業，以滿足人民物質生活和文化生活的不斷增長的需要。

在我國發展國民經濟的第一個五年計劃中，就化學工業來說，我們將大力發展肥料工業、石油工業、煉焦工業、酸鹼工業、染料工業、橡膠工業、水泥工業、造紙工業等，這些工業的發展顯然與化工基本過程具有密切的關係，而他種工業，如鋼鐵工業、燃料工業、有色金屬工業等也與化學變化或化學處理有關。與此同時，還將在第一個五年計劃中，建立一些我國前所未有的化工機械製造廠；這樣，將對化學工業過程的機械化和生產管理的自動化創造條件。再就發展的速度而言，其增長情況，亦是驚人的；例如，若以1952年的生產量為1，則在1957年的生產量將為：硝酸銨5.88，硫酸銨2.78，焦炭2.33，純鹼2.45，水泥2.10，糖2.76等。

為了勝利完成我國第一個五年計劃和今後幾個五年計劃所規定關於化學工業發展的任務，高等工業學校在培養化工專業人材方面所負的使命是重大的。在教學計劃中，「化學工業過程及設備」這門課程賦有為專業奠定基礎的重要意義，也就是說，要在本課程的良好基礎上，才能有效地培養出各項化工專業人材，另一方面，為了更好地完成化學工業的生產計劃，尚需在工人階級集體的創造性勞動的

基礎上，採取若干必要的措施，如提高生產技術水平，改進生產過程，改善產品質量，增加產品數量，加強原材料和副產品的利用，以及使生產過程和操作管理機械化和自動化等等。這些方面皆有不少的問題，尚待研究與解決，這又均與本門學科息息相關。

總之，無論是發展化學工業中的重工業或輕工業，本門學科在其中都能起一定的重要作用。

(四) 化工過程的分類

對於化學工業過程，根據過程的基本規律，按照蘇聯卡薩特金教授的分類法，將其組合成下列幾類：

(一) 流體動力過程 包括遵循流體動力學諸規律的過程，如流體的流動與輸送、氣相非均一系的分離，液相非均一系的分離，物料的攪拌等。

(二) 熱過程 包括遵循熱交換諸規律的過程，如傳熱、蒸發、結晶等。

(三) 擴散過程 包括遵循擴散諸規律的過程，如乾燥、蒸餾、吸收、萃取等。

(四) 熱力過程 包括遵循熱力學諸規律的過程，如冷凍等。

(五) 機械過程 包括遵循固體力學諸規律的過程，如固體的粉碎、固體顆粒的過篩等。

(六) 化學過程 包括遵循化學反應諸規律的過程，如氧化、還原磺化、硝化、水解等。

除化學過程的討論，係屬於有關專業課程與工業化學的範圍外，其餘五類過程，將在本課程內初步地加以論述。

從操作的方式而論，上述各項過程的操作，又可分為間歇的，連續的，和聯合的三種。

(一) 間歇操作 間歇操作的特點是所有的工作步驟在同一位置而分別在不同的時間進行。例如，在板框式過濾機中，濾漿的過濾，濾餅的洗滌以及濾餅的去除等項步驟，係依次在不同的時間進行。因之間歇操作的狀態是不穩定的，隨時間而改變。受處理物料的各個物理量或參變數（如溫度、壓強、濃度、濕含量、熱含量、速度等）亦將在操作中隨時間而改變。間歇操作的設備也就間歇地排出產品，卸料完畢後再加入新料，週而復始地循環操作。

(二) 連續操作 連續操作的特點是所有的工作步驟分別在不同的位置而在同一時間進行，操作狀態穩定且連續不斷地進料和卸除最後產品。例如在迴旋式乾燥器中，加料、乾燥和卸料各個工作步驟皆分別在不同區域內在同一時間進行。受處理的物料在進程中任何一點或在連續運轉的設備的任一斷面上，其物理量或參變數在操作進行時間內，實際均保持不變。

(三) 聯合操作 聯合操作係以上二者的聯合處理，其中有些工作步驟為連續操作，有些為間歇操作，例如在沉降器中沉降一種稀薄懸浮液時，懸浮液連續進入，澄清液連續排出，而沉降於器底的沉澱則係經過適當時間後間歇地排除。在一般情況下，聯合操作通常可作為連續操作處理。

與間歇和聯合操作相比較，連續操作具有下列的重要優點：

(一) 可能使操作全部自動化和機械化，減低手工勞動到極少程度，並提高生產能力；

(二) 產品均勻，因而提高了產品的質量；

(三) 進行操作所需的設備緊湊，因而減低生產設備的基本費用和修理費用。

因之，現代化的工廠均儘可能地不採用間歇操作而採用連續操作。

(五) 物料衡算與能量衡算

對於每個生產過程，除了需消耗勞力外，尚需知道被處理物料的数量和所需的能量，以及實現此項過程所必需的設備。

工業上，參與生產過程的物料，無論其為原料、成品或半成品，都不是絕對的純粹狀態，而是幾種組份的混合物。混合物的組成，一般以重量百分數，重量份數或重量比率表示。但在許多情況下，

爲了計算方便，常用分子百分數或分子份數來表示。

物料衡算 物料衡算爲質量守衡定律的一種表現形式。依此定律，凡引入某一設備以進行操作的物料重量，必須等於操作後所得產品的重量。但事實上，在實際製造過程中，物料不可避免有損失，亦即輸出的量較輸入的量爲少，其差額即爲物料損失量，如式（I）所示：

$$G_1 = G_2 + G_n \quad (I)$$

式中 G_1 爲輸入的物料量， G_2 爲輸出的物料量， G_n 爲物料的損失量。此種物料衡算式適用於整個過程，也適用於過程的任何一個步驟。在物料衡算中，可以作總的物料衡算，也可以對混合物中某一組份作部份物料衡算。

物料衡算對於製造過程的正確進行，具有極重要的實用意義。在實際操作中，物料衡算可以揭示物料的浪費和設備操作的反常情況，從而可以訂出改善方案，以及減少副產品和雜質的途徑。同時，物料衡算也可反映出生產過程的完善程度及生產狀況。如果物料衡算能列得愈完全愈細緻，則表示對操作的瞭解愈全面，而對操作進行的控制也愈正確。在設計新的生產過程中，物料衡算可以幫助正確地選擇製造過程的流程和設備的大小。

※※例題（一）某廠硝化車間的廢酸經分析後，得知其中含有 23% HNO_3 ，57% H_2SO_4 和 20% H_2O ，均以重量表示。現擬摻入 93% 濃度的 H_2SO_4 和 90% 濃度的 HNO_3 ，以製備含有 27% HNO_3 和 60% H_2SO_4 的混合酸。試問製備每 1000〔千克〕的混合酸，需要若干〔千克〕的廢酸與濃硝酸和硫酸？假定物料無損失。

〔解〕：取 1000〔千克〕混合酸爲計算基準，分別以 x 、 y 、 z 代表需用廢酸，濃硫酸與濃硝酸的重量。因無物料損失，故式（I）爲 $G_1 = G_2$ 。

$$\text{物料總衡算：} \quad x + y + z = 1000 \quad (1)$$

$$\text{硫酸的衡算：} \quad 0.57x + 0.93y = 1000(0.60) = 600 \quad (2)$$

$$\text{硝酸的衡算：} \quad 0.23x + 0.90z = 1000(0.27) = 270 \quad (3)$$

解上述（1），（2），（3）三聯立方程式，得

$$x = 418 \text{〔千克〕}, y = 390 \text{〔千克〕}, z = 192 \text{〔千克〕}。 \quad ※※$$

成品率、生產能力和生產操作強度 成品率係操作完畢後，所得成品數量與輸入原料數量之比，以百分數表示；如以 η 代表之，則

$$\eta = \frac{G_2}{G_1} \cdot 100\% \quad (II)$$

由於製造中的損耗，成品率恒小於 100%；顯然 η 愈接近於 100%，則操作愈完善。若遇生產過程係由幾個步驟所組成，而其中每個步驟都有其成品率，則全部過程的成品率爲各個步驟成品率的乘積。

在化學過程中，若已知化學反應方程式，則成品率可表示爲實際得到的產品數量與理論上從化學反應式算出的數量的百分比。在無精確的化學反應式可遵循時，成品率可依原料的總數量或其中的任一物料的数量來計算；在後者的情況下，成品率可能小於，也可能大於 100%。

生產能力 爲器械或設備的主要性能，以每單位時間進入物料的数量或所得成品的數量表示。所用的時間單位可爲〔分〕、〔小時〕、〔日〕，所用的數量單位可用（1）重量單位，如〔千克〕、〔噸〕，（2）體積單位，如〔公升〕、〔米³〕，或（3）件數等等。例如，水泥粉碎機的生產能力以每小時〔噸〕或〔噸/小時〕數，液體輸送設備的生產能力以每小時〔公升〕或〔公升/小時〕數，塑料成品壓製機的生產能力以每小時〔件〕或〔件/小時〕數表示。

生產操作強度 爲足以表示器械或設備性能的基本單位的生產能力。例如，蒸發器的操作強度以每小時每平方公尺加熱面所蒸發的水份量表示，硫酸塔的操作強度以每日每立方米塔體積所製成的硫酸

量表示。

增加生產操作強度，為提高技術水平和提高勞動生產率的最重要任務之一。生產操作的加強，可使同一器械、同一裝置、同一單位時間，同一操作人員所獲得產品的數量提高。

能量衡算 能量衡算係基於能量守恆定律，其涵義是：凡引入操作的能量，必須等於操作後輸出的能量。正確的能量衡算，應包括與操作有關的各種不同形式的能，如熱能，機械能，電能，輻射能，化學能，原子能等。但在許多情況下，操作所涉及的能僅為熱能，則能量衡算即為熱量衡算，如式(II)所示：

$$Q_1 = Q_2 + Q_n \quad (II)$$

式中 Q_1 與 Q_2 分別代表熱的輸入與輸出量，而 Q_n 為損失的熱量。熱量衡算為化工製造過程中用以測驗操作之是否完善或正常的重要方法之一。在過程設計時，熱量之是否需由外界引入或向外界發散，均可由此種衡算來確定。

※※例題(二) 在貯槽內用飽和蒸汽將20,000[千克]的某溶液自20°C加熱至50°C。蒸汽在110°C通入貯槽中加熱蛇管內，冷凝水則在95°C排出。溶液的平均比熱(或熱容)為0.9[千卡/千克°C]。操作期間，貯槽散失於四周的熱量共計60,000[千卡]，問需用蒸汽多少[千克]？

[解]：此為一熱量衡算題，進行計算時，可取0°C為基準溫度。設蒸汽用量為W。

熱量輸入各項為：

$$\text{溶液本身所含熱量，} Q_1' = (0.9)(20,000)(20) = 360,000 \text{ [千卡]}$$

$$\text{蒸汽所含熱量，} Q_1'' = 643.3W \text{ [千卡]} \quad (643.3 \text{ 為蒸汽在} 110^\circ\text{C} \text{ 的熱含量，由蒸汽表查得})$$

熱量輸出各項為：

$$\text{溶液本身所含熱量，} Q_2' = (0.9)(20,000)(50) = 900,000 \text{ [千卡]}$$

$$\text{冷凝水所含熱量，} Q_2'' = 95W \text{ [千卡]} \quad (95 \text{ 為水在 } 95^\circ\text{C} \text{ 的熱含量})$$

熱量損失各項為：

$$\text{貯槽散失的熱量，} Q_n = 60,000 \text{ [千卡]}$$

故熱量衡算式為：

$$Q_1' + Q_1'' = Q_2' + Q_2'' + Q_n$$

$$360,000 + 643.3W = 900,000 + 95W + 60,000$$

解上式，得 $W = 1095$ [千克]。

※※

物系的平衡關係與變化速率 除了可以通過物料和能量衡算以瞭解每個生產過程的進行情況外，對於許多化工過程，也同時可從物系的平衡關係和變化速率的角度，去加以觀察分析。

物系自然發生變化時，其變化必趨向於一定的方向，如果聽其自然，結果必將達於平衡。惟須着重指出，此平衡乃是動平衡。例如在一定溫度下不飽和的某鹽溶液與該鹽接觸時，鹽向溶液中溶解，直到溶液為鹽所飽和，鹽即表面上停止溶解，因其與溶液已達於動平衡。因此，平衡為物系變化的極限，除非影響物系的情況(如上述例中的溫度)有變，否則其變化的極限不致改變。對於許多化工過程，物系的平衡關係具有實際意義，因為過程之能否進行，以及能進行到何種程度，均可由平衡關係推知。

平衡關係表示物系變化的極限，但物系變化的快慢不決定於平衡關係，而為多種因素所影響。可惜對支配各種不同物系的變化速率的因素，所知還不够完全明確，殊難將變化速率用一種能普遍應用的數學公式來代表。但在化工製造過程中，時間因素往往較平衡關係所指出能達到的變化的最大限度，更為重要。因此，為了能幫助分析許多化工過程，可將物系變化速率表述為與推動力和阻力之間的關係。例如，冷物體與熱物體接觸時，由於兩物體的溫度不同，熱由熱物體流向冷物體；此傳熱

速率的快慢，則視溫度差和熱阻力的大小而定。直到此二物體的溫度相等時，此時溫度差為零，傳熱亦表面上停止，則稱此二物體已達到熱平衡。

(六) 物理量的因次與單位制度

凡參與生產過程的物質，皆具有各種不同的物理性質，如粘度、密度、導熱係數等。而且常須用各種不同的參變數，如溫度、壓強、速度等，以表示其特徵。這些物理量可通過三、四個彼此獨立的基本量來表示，其大小則用各種單位來量度。常用的基本量或稱因次為長度 L 、質量 M 、時間 τ 和溫度 T ，應用這些基本量以表示物理量的特性的式子稱為量綱或因次式，例如速度的量綱為 $L\tau^{-1}$ ，加速度的量綱為 $L\tau^{-2}$ 等。

用以表示各個物理量的大小的單位，有各種不同的度量衡制度，如公制和英制。公制中又有絕對單位制和工程單位制，在絕對單位制如厘米—克—秒單位制中，長度、質量和時間為基本量，厘米、克和秒為各個基本量的基本單位，其中克為質量的單位，在米—千克—秒工程單位制中，長度、力和時間為基本量，而千克為力的基本單位。在英制中，以呎為長度的單位，磅為質量或力的單位，秒為時間的單位；由於力與質量不分，皆以磅表示，致常引起混亂。

在運用計算時，無論採用何種單位，均應貫徹到底，不應將不同的單位混合使用，特別應該注意的是在工程單位制中，[千克]為力的單位而非質量的單位。

解放前的中國，由於帝國主義的侵略，化學工廠中大都採用英制的呎—磅—秒單位制。現在各廠多已改用較為優越的度量衡制度—公制，因其為國際單位制且係十進位制，而且也符合於我國已有的度量衡制。本書所採用的為米—千克—秒工程單位制；但為區別起見，當千克作為質量的單位時，則以千克（質）表示。茲將厘米—克—秒絕對單位制和米—千克—秒工程單位制兩種不同制度中某些物理量的因次關係列表於後，以供參考。至於因次式在本課程中的具體應用，容在第一章中介紹因次論時再行敘述。

兩種不同制度中某些物理量的單位和因次式表

物 理 量	單 位		因 次 式	
	厘米—克—秒制	米—千克—秒制	厘米—克—秒制	米—千克—秒制
長 度	[厘米]	[米]	L	L
質 量	[克]	[千克·秒 ² /9.81米]	M	$F\tau^2L^{-1}$
時 間	[秒]	[秒]	τ	τ
速 度	[厘米/秒]	[米/秒]	$L\tau^{-1}$	$L\tau^{-1}$
加 速 度	[厘米/秒 ²]	[米/秒 ²]	$L\tau^{-2}$	$L\tau^{-2}$
力(或重量)	[達因]或[克·厘米/秒 ²]	[千克]	$ML\tau^{-2}$	F
功	[爾格]或[克·厘米 ² /秒 ²]	[千克·米]	$ML^2\tau^{-2}$	FL
功 率	[爾格/秒]或[克·厘米 ² /秒 ³]	[千克·米/秒]	$ML^2\tau^{-3}$	$FL\tau^{-1}$
壓 強	[巴]或[克/厘米·秒 ²]	[千克/米 ²]	$ML^{-1}\tau^{-2}$	FL^{-2}
密 度	[克/厘米 ³]	[千克·秒 ² /米 ⁴]	ML^{-3}	$F\tau^2L^{-4}$
粘 度	[泊]或[克/厘米·秒]	[千克·秒/米 ²]	$ML^{-1}\tau^{-1}$	$F\tau L^{-2}$

第一編 流體動力過程

目 錄

第一章 流體力學的基本原理

第一節 流體的定義及其特性

1-1	物質的液態及氣態	(1-1)
1-2	密度和重度	(1-1)
1-3	壓力強度(壓強)	(1-1)
1-4	粘度	(1-2)

第二節 流體靜力學

1-5	流體靜壓力強度	(1-5)
1-6	流體靜力學的基本方程式	(1-5)
1-7	連通器	(1-7)

第三節 流體動力學

1-8	流體的流動速度與流量	(1-8)
1-9	流體流動的性質與雷諾準數	(1-8)
1-10	水力半徑	(1-10)
1-11	穩定流動與不穩定流動	(1-10)
1-12	流體運動的連續性	(1-11)
1-13	歐拉流動微分方程式	(1-11)
1-14	柏努利方程式	(1-12)
1-15	流體的流出	(1-17)

第四節 相似論及因次論的基本概念

1-16	相似論的基本概念	(1-18)
1-17	因次論的基本概念	(1-21)
1-18	流體動力相似	(1-25)

第五節 流體在導管中流動時的阻力

1-19	阻力計算的一般方程式	(1-28)
1-20	流體在直管中呈滯流時的摩擦阻力	(1-29)
1-21	流體在直管中呈湍流時的摩擦阻力	(1-29)
1-22	管壁糙度對摩擦係數的影響	(1-31)
1-23	可壓縮流體在直管中流動時的壓強損失	(1-33)
1-24	局部阻力的計算	(1-35)
1-25	摩擦阻力損失的總計算	(1-37)

第六節 流體壓力、液面和流量的測定

1-26	流體壓強的測定	(1-38)
1-27	液面的測量	(1-40)
1-28	流體流速及流量的測定	(1-41)

第一篇 流體動力過程

在化學工業生產過程中，受處理的物料很多是處於液態和氣態。這些物料在平衡和運動時，皆遵循流體力學的規律。與流體力學有關的各個化工基礎過程，稱為流體動力過程。

俄國科學院院士 Л. 歐拉為古典流體力學的理论奠定了基礎，1755年他推演出流體運動的基本方程式。在實用流體力學方面，傑出的創始者當推俄國科學院院士 Л. 柏努利。近50年來，由於相似原理和因次原理的發展，對流體力學中關於理論和實驗方面的結果，進行了歸納和綜合的工作。

在流體力學的理论和實驗方面作出卓越貢獻的俄國和蘇聯學者有：Н.П. 彼特洛夫，Н.Е. 茹柯夫斯基，С.А. 查普累庚，Н.Н. 巴甫洛夫斯基，Л.С. 雷秉宗，М.А. 維立卡諾夫，А.Я. 米洛維奇，F.A. 古爾仁柯等。在各個流體動力過程方面，蘇聯學者也作了很多有價值的研究：例如列辛科、斯姆賀寧、考渥卓夫等之於氣相非均一系的分離，沙柯格夫、布列麥爾、茲納明斯基等之於液相非均一系的分離，羅曼柯夫、康托洛維奇、卡法若夫等之於物料的攪拌，等。

我國科學家錢學森、顧毓珍、林正仙、林家翹等在流體動力過程方面進行了有價值的研究，尤其是優秀科學家錢學森對於流體力學作出傑出的貢獻。

本篇分為流體力學的基本原理、液體的輸送、氣體的壓縮與輸送、氣相非均一系的分離、液相非均一系的分離、和物料的攪拌六章。

第一章 流體力學的基本原理

第一節 流體的定義及其特性

1-1 物質的液態和氣態 液態和氣態的物質統稱為流體，流體的特徵在於其質點幾乎有無限的流動性，且可以幾乎毫無阻力地將其形狀分裂或改變。

流體物質由其受壓或受熱時所引起的變化之不同，乃分為液體和氣體。凡流體幾乎不具壓縮性，而且受熱時體積的膨脹很小，則此種流體稱為液體，其存在狀態稱為液態。液體的密度幾乎不隨壓強與溫度而變。與此相反，氣態流體具有很強的壓縮性而且受熱時體積膨脹比較大，因此，氣體的密度隨壓強與溫度的變化而有很大的改變。

實際上一般液體均略具壓縮性，且其體積亦隨溫度而改變，質點間並具有摩擦力。但是為了簡化對許多有關液體的靜止或運動狀態的理論問題的研究，在流體力學上一般均假定液體本身絕對無壓縮性，其體積不隨壓強和溫度而改變，且其質點間也無摩擦力。這種液體特稱為理想液體。

1-2 密度和重度 每單位體積流體的質量稱為密度，以 ρ 代表之。若以 m 為流體的質量， V 為流體的體積，則

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

每單位體積流體的重力稱為重度，以 γ 代表之。若以 G 為流體的重力， V 為流體的體積，則

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ [千克/米}^3\text{]} \quad (1-2)$$

已知 $G = mg$ ，此處 g 為重力加速度，其單位為 $\text{[米/秒}^2\text{]}$ ，則比較式 (1-1) 和式 (1-2) 得

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g} \text{ [} \frac{\text{千克} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4} \text{]} \quad (1-3)$$

工程上常用的單位為重量，故重度 γ 為工業上所廣泛採用，其單位為 $\text{[} \frac{\text{千克}}{\text{米}^3} \text{]}$ 。

化工製造過程中常遇到的流體多為混合體。對於溶液的重度，當在工業計算上不要求特別精確時，可如氣體混合物一樣由下式求之：

$$\gamma_m = \gamma_1 a_1 + \gamma_2 a_2 + \gamma_3 a_3 + \cdots + \gamma_n a_n \quad (1-4)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \cdots, \gamma_n$ 等為混合物每一組份的重度， $a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n$ 等為混合物中每一組份的體積分數。

工業上有時以物質的重度與純水在溫度 4°C 的重度相比，以表示各種物質的輕重。所得比率稱為比重，用 S 表示。

1-3 壓力強度 (壓強) 流體每單位面積上所受的力稱為壓力強度，簡稱壓強，以 p 表之。若以 P 為作用於流體表面上的力， F 為流體的表面積，則壓強為：

$$p = \frac{P}{F} \text{ [} \frac{\text{千克}}{\text{米}^2} \text{]} \quad (1-5)$$

壓強的單位還可以用大氣壓，汞柱高度或其他種流體的高度來表示。

1 [大氣壓] 相當於每平方厘米面積上受 1.033 [千克] 的壓力，亦相當於 760 [毫米] 汞柱高的壓強或 4°C 時 10.33 [米] 水柱高的壓強，此種大氣壓稱為物理大氣壓。但工業中為了計算便利，常採用以 1 [大氣壓] 相當於 1 [千克/厘米²] 或 10 [米] 水柱高的壓強為單位，稱為工程大氣壓。

工程大氣壓與物理大氣壓的各種表示方式，有如下的關係：

$$1[\text{物理大氣壓}] = 760[\text{毫米}] \text{汞柱} = 10.33[\text{米}] \text{水柱} = 1.033[\text{千克/厘米}^2] = 10330[\text{千克/米}^2]$$

$$1[\text{工程大氣壓}] = 735.6[\text{毫米}] \text{汞柱} = 10[\text{米}] \text{水柱} = 1[\text{千克/厘米}^2] = 10000[\text{千克/米}^2]$$

工業上用以測量器內流體壓力強度的儀表，一般稱為壓力（強）計，其讀數係表示器內的絕對壓強與當時大氣壓之差。此壓強計表示的壓強差，稱為表壓強或真空度。流體的絕對壓強與表壓強或真空度有如下的關係：

$$\text{流體絕對壓強} = \text{大氣壓} + \text{表壓強}$$

$$\text{流體絕對壓強} = \text{大氣壓} - \text{真空度}$$

顯然，前者適用於絕對壓强大於大氣壓的情況，後者則適用於絕對壓強小於大氣壓的情況，即減壓的情況。

1—4 粘度 流體的另一重要性質為粘滯度，簡稱粘度。此種特性在流體運動中具有極端重大的意義。

在理想流體中，係假定沒有粘度，亦即流體質點作相對運動時沒有內部摩擦力；但是實際流體是有粘度的，亦即在其流動時必然有內部摩擦力產生。這種內部摩擦力通常以每單位面積來計算，即力學中所謂剪應力，嚴格地講要稱為剪應力強度。圖1—1所示為流體在圓管中的運動情況。如某層流體質點的流速為 w ，在極小距離 dy 處的相鄰層流體質點的流速為 $w+dw$ ，則根據牛頓粘性定律，剪應力強度可由下式所列關係來決定：

$$k = \mu \frac{dw}{dy} \quad [\text{千克/米}^2] \quad (1-6)$$

式中： k = 剪應力強度[千克/米²];

μ = 粘度或內部摩擦力係數[$\frac{\text{千克} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$];

$\frac{dw}{dy}$ = 速度梯度[1/秒]。

從上式知粘度的定義為剪應力強度與速度梯度之商，即

$$\mu = \frac{k}{\frac{dw}{dy}} \quad [\frac{\text{千克} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}] \quad (1-7)$$

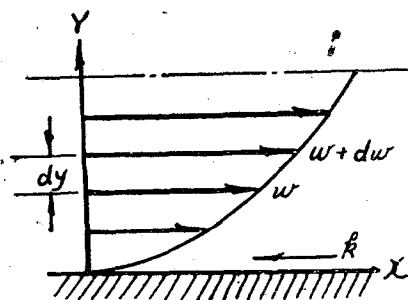


圖1—1 牛頓粘性定律

當速度梯度等於1，粘度的數值即為剪應力強度的數值。在CGS制中，粘度的單位為[$\frac{\text{達因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2}$]，稱為泊，即

$$1[\text{泊}] = 1\left[\frac{\text{達因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2}\right] = 1\left[\frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}\right]$$

由於〔泊〕的單位太大，在文獻中常用的爲〔厘泊〕，即

$$1[\text{厘泊}] = 0.01[\text{泊}]$$

在工程單位中，以〔千克·秒/米²〕爲粘度的單位，其與〔泊〕和〔厘泊〕有如下的關係：

$$1\left[\frac{\text{千克} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}\right] = \frac{981000}{10000}\left[\frac{\text{達因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2}\right] = 98.1[\text{泊}] = 9810[\text{厘泊}]$$

此外粘度還可以相對粘度和動力粘度表示之。相對粘度係流體的絕對粘度與同溫度下水的絕對粘度之比。動力粘度係絕對粘度與流體密度之比。

動力粘度一般以 ν 代表之。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \text{ g}}{\nu} \quad (1-8)$$

動力粘度的單位是〔斯〕(CT)，1〔斯〕等於1〔厘米²/秒〕或100〔厘斯〕(CCT)。

粘度的倒數 $\frac{1}{\mu} = \eta$ ，稱爲流度。

液體和氣體物質的粘度，須由實驗加以測定，此類數據可從手冊中查出。此外，尚可用一些經驗公式，以計算粘度的近似值。

※※

關於粘度的近似計算法，茲述數種於後：

(1) 有機液體的粘度可以下式求之：

$$\log(\log \mu) = K \frac{S}{M} - 2.9 \quad (1-9)$$

式中： μ = 液體在1〔大氣壓〕及20〔°C〕的粘度以〔毫泊〕，即0.001〔泊〕表示；

S = 液體的比重；

M = 液體的分子量；

K = 常數，隨物質的結構而異，其數值依下式計算。

$$K = \sum A_n + \sum p \quad (1-10)$$

式中 A 代表有機液體分子中相同原子的數目， n 爲粘度的原子常數值， p 爲按原子團種類與鍵的性質所加的校正數。上項 p 與 n 的數值可從物理—化學數據表中查出。

(2) 不互溶和不適合液體混合物的粘度，可由下式算得：

$$\log \mu = x_1 \log \mu_1 + x_2 \log \mu_2 + x_3 \log \mu_3 + \dots \quad (1-11)$$

式中 μ 爲混合物的粘度， μ_1 、 μ_2 、 μ_3 等爲混合物中各個組份的粘度， x_1 、 x_2 、 x_3 等爲各個組份的分子分數。

(3) 懸浮液的粘度

$$\mu = \mu_0(1 + 4.5\varphi) \quad (1-12)$$

式中 μ 爲懸浮液的粘度， μ_0 爲懸浮液中分散介質的純液體之粘度， φ 爲懸浮液中所含懸浮固體的容積與懸浮液總容積之比。

(4) 氣體混合物的粘度

$$\frac{1}{\nu} = \frac{x_1}{\nu_1} + \frac{x_2}{\nu_2} + \frac{x_3}{\nu_3} + \dots \quad (1-13)$$

式中 ν 爲氣體混合物的動力粘度， ν_1 、 ν_2 、 ν_3 等爲氣體混合物中各個組份的動力粘度， x_1 、 x_2 、

x_3 等為各個組份的分子分數或體積分數。

※※

流體的粘度為流體內部摩擦力的表現，為流體的溫度所影響。當溫度昇高時，液體的粘度劇烈下降，而且粘度愈大，下降愈快；相反地，氣體的粘度則隨溫度的上升而增大。此種關係較為複雜，尚不能用一個共同的公式來代表所有溫度下的關係。

氣體的粘度，根據現有的分子運動學說，應與其壓強無關。但在高溫下，氣體的粘度開始隨壓強的增大而增大；在低壓下，則隨真空度的增加而減小。壓強對液體粘度的影響，一般很小，實際上可以忽略不計。

※※

液體和氣體在不同溫度的粘度，除從手冊中查出外，尚可以下列近似方法求之。

(1) 不同溫度下液體粘度的求法 若已知某一液體在任何兩溫度時的粘度，則該液體在其他任意溫度下的粘度可以與一個類似的或標準的液體粘度比較而求出其近似值；作為標準的液體，其粘度應在極大的溫度範圍內為已知。此種方法係基於化工函數的直線法則，應用時可藉圖解法或數學法以求得粘度。

如圖1—2，以水為標準液體。圖中橫坐標表示水的溫度 t_w [°C]，左側縱坐標表示某液體的溫度 t [°C]，右側縱坐標表示水和液體的粘度 [泊]。在各溫度下水的粘度為已知，如曲線所示。設辛烷在溫度 t 時的粘度與水在 t_w 時的粘度相同，如 D 點所示，又在溫度 t' 時的粘度與水在 t_w' 時的粘度相同，如 E 點所示。由 D 與 E 兩點引二垂直線與自 t 與 t' 所引的水平線分別相交於 A 與 B 兩點，通過 A 與 B 作一直線，即得辛烷的粘度和溫度的關係線。例如由此關係線，可知辛烷在 24 [°C] 時的粘度等於水在 53.5 [°C] 的粘度，其值為 0.52 [厘泊]。同理得氯化乙烯及甲醇的粘度和溫度的關係線。

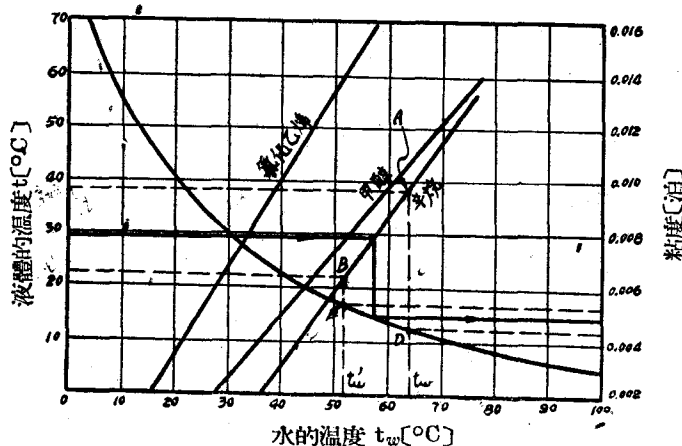


圖1—2 液體粘度的求法

上述關係亦可用圖解法而以數學方法解之。圖中直線的斜度 $\left(\frac{AC}{BC}\right)$ 為一常數，即

$\left(\frac{t-t'}{t_w-t_w'}\right)$ 等於一常數，可以 K 代表之，K 之值可自己知兩點的情況計出。既知 K，則可自下式求得 t_w' 之值。

$$t_w' = t_w - \frac{t-t'}{K} \quad (1-14)$$

t_w' 時水的粘度值即該液體的粘度。式中 t 為某液體的任一溫度，在該溫度時液體的粘度等於水在 t_w

時的粘度； t' 為某液體的規定溫度，其在該溫度下所要求得的粘度即等於水在 t_w' 時的粘度。

(2) 不同溫度下氣體和蒸氣的粘度求法

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{273+C}{T+C} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-15)$$

式中： μ = 在溫度 $t[^\circ\text{C}]$ 下的氣體或蒸氣的粘度。

μ_0 = 該氣體或蒸氣在 $0[^\circ\text{C}]$ 時的粘度。

T = 氣體或蒸氣的絕對溫度， $[^\circ\text{K}]$ 。

C = 常數，依氣體或蒸氣的性質而定，其值可自表 1-1 中查出。

表 1-1 常數 C 之值

氣體或蒸氣	常數 C	氣體或蒸氣	常數 C	氣體或蒸氣	常數 C
氮	102	空氣	122	氮的氧化物	195
氫	626	二氧化碳	233	一氧化碳	101
苯	380	氧化亞氮	312	二氧化硫	396
氫	83	氧	110	氯	351
蒸汽	961	甲烷	198		

※※

第二節 流體靜力學

液體靜力學 是研究流體在靜止和平衡時的力學，此時流體不顯示內部摩擦力；其情況與理想液體接近。

1-5 流體靜壓力強度 在成平衡狀態的液體中，取一小塊面積 ΔF ，則由於液體本身的重量，作用於此面積上的力 ΔP 必須垂直於 ΔF ，不然就會發生一個與該面積成平行的分力，使流體不能維持平衡。在此種情況下，每單位面積所受的力，即 $\frac{\Delta P}{\Delta F}$ ，稱為平均流體靜壓力強度。此比例的極限

值 $\lim_{\Delta F \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta F} \right) = p$ 即表示一點的靜壓力強度，簡稱為靜壓強，其單位為 $[\text{千克}/\text{米}^2]$ 。

液體內任一點所受靜壓力的大小與所選擇的方向無關。

但液體中任一點的靜壓力與其所在的位置有關，可以空間坐標上點的函數表之，即

$$p = f(x, y, z)。$$

1-6 流體靜力學的基本方程式 在靜止液體中任取一垂直液柱，如圖 1-3 所示，其上下底面與基準水平面的距離為 z_0 和 z ，底面積等於 F 。研究作用於此被分離出來的液柱上的諸力。在液柱側面上為垂直作用於其上、大小相等、方向相反的靜壓力的水平分力。在液柱的上下兩端面上作用於單位面積上的流體靜壓強為 p_0 和 p 。此外尚有作用於液柱重心的重力 $G = \gamma F(z_0 - z)$ 。根據力學上的物體平衡條件，當物體處於平衡狀態，則作用於其上的一切力在任意坐標軸上的投影之和必須等於零。將作用於此分離出來的液柱上的諸力，均投影於垂直軸上，則

$$pF - p_0F - \gamma F(z_0 - z) = 0，$$

以 γ 除方程式的各項並移項，得：

$$z + \frac{p}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma} \quad (1-16)$$

此方程式稱為流體靜力學的基本方程式，又可寫成以下形式：

$$\frac{p - p_0}{\gamma} = z_0 - z \quad (1-17)$$

由式 (1-17) 可知 p/γ 的因次和單位為：

$$\left[\frac{p}{\gamma} \right] = [L] = [\text{米}]$$

式 (1-17) 說明液體內任何一點所受靜壓強的大小僅與液體位置的高低有關，即在同一水平面上各點所受的壓強相同，不同水平面上的各點的壓強，則視距液體表面的遠近而異。

巴斯噶定律 流體靜力學的基本方程式 (1-16) 又可寫成

$$p = p_0 + \gamma(z_0 - z) \quad (1-18)$$

從上式可以看出，當液體內任一點 z_0 上的壓強 p_0 有任何數量上的改變時，液體內其他各點上的壓強 p 也有同樣的改變。此式即用數學等式來表示的巴斯噶定律。依據此定律，施於器內液體上的壓強，能以同樣的大小傳遞到液體內各點。

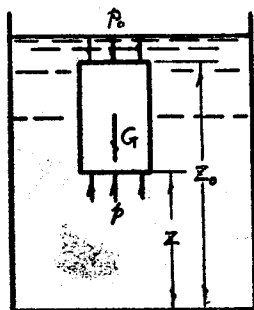


圖 1-3 流體靜力學基本方程式推演圖

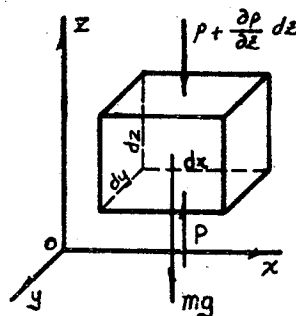


圖 1-4 流體平衡微分方程式的推演圖

※※

流體平衡微分方程式 在處於平衡狀態的流體中分出一微分的方形體，其體積為 dV ，其邊長為 dx, dy, dz (圖 1-4)。由於流體呈平衡狀態，因此所有作用於此方形體上的力在坐標軸上投影之和應等於零。

此方形體沿 z 軸方向的重力，其方向向下，故具負號：

$$-mg = -\rho g dV = -\gamma dV$$

作用於下端面積上的壓力 (總壓力) 為 $p dx dy$ 。

作用於上端面積上的壓力為 $-(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz) dx dy$ 。

上述三力的代數和應為零：

$$-\gamma dV + p dx dy - (p + \frac{\partial p}{\partial z} dz) dx dy = 0$$

即

$$-\gamma dV - \frac{\partial p}{\partial z} dx dy dz = -\gamma dV - \frac{\partial p}{\partial z} dV = 0$$