

化工过程及设备

上册



第六版序

作者在編写“化工过程及设备”一書第六版时，因考虑到前一版是按“化工过程及设备”課程的教学大綱編写的，而且已翻譯成捷克、羅馬尼亞、波蘭、匈牙利、中国、朝鮮和德国等各国文字，所以力求仍保持原版的篇幅和編排次序。

“气体非均一系的分离”和“液体非均一系的分离”兩章加入了計算沉降速度的新方法（应用阿基米得准数）和确定沉降式及过滤式离心机的生产能力的新方法。

本書第三篇“擴散過程”的改變很大。專門添入了“物質傳遞”一章，闡述對於一切擴散過程均同等適用的物質傳遞一般方程式。這樣就可以大大削減“吸取過程”一章的內容，並在“液體蒸餾”一章中作一些概括性的更改。

此外在本書中也修改了上一版中所發現的各不當之處。

A. Γ. 卡薩特 全

期限表

請于下列日期前將書還回

28.

上册目录

第六版序

緒 論	1
1. 化学工学的研究对象和本课程的任务	1
2. 过程的分类	2
3. 物料计算和能量计算	2
物料衡算的一般概念 成品率 生产能力 生产过程的强度	
能量衡算 功率和效率	
4. 物理量的因次	5

第一篇 流体动力过程

第一章 流体力学基础	7
(甲)流体静力学	7
5. 基本定义	7
物质的液态和气态 重度 密度 可压缩性 压强	
6. 流体平衡方程式	9
流体静压强 尤拉平衡微分方程式 流体静力学的基本方程式	
巴斯噶定律 连通器 液体作用于器底与器壁的压力	
(乙)流体动力学	14
7. 流体运动的基本因素	14
流体的流动速度与流量 粘度 液体的流动型态 水力半径	
稳定流与不稳定流	
8. 流体流动的基本方程式	22
流体的连续性方程式 尤拉运动微分方程式 奈维—斯托克斯	
运动方程式	
9. 柏努利方程式	26
10. 液体的流出	30
容器内保持一定液位时经过器底小孔的流出 容器内保持一定液	
位时从侧壁上小孔的流出 容器内液面随时变动时的流出	
11. 相似论及因次分析法的基本原理	32
基本概念 相似定理 用相似方法转换微分方程式 因次论	
的基本原理	

12. 層流时的流量公式	39
13. 流体动力相似	42
14. 导管中的阻力	44
阻力的一般方程式 流体在导管中作層流时的摩擦阻力 流体	
在导管中作湍流时的摩擦阻力 管壁糙度对阻力的影响 局部	
阻力的計算	
15. 管徑的选择	52
16. 导管中流体速度和流量的測定	54
压强計 測速管 节流流速計	
第二章 液体的輸送	59
17. 容积泵	59
單动泵 双动泵 差动泵 送液能力 容积效率 泵的	
流量曲綫圖 泵筒的大小与泵的轉数	
18. 往复泵的压头高度与功率	64
吸入高度 空气室 泵的功率与效率	
19. 容积泵的構造	69
往复泵 廻轉泵	
20. 离心泵	72
操作原理 液体在泵内的运动 离心泵的基本方程式 吸入	
高度 离心泵的送液能力、軸功率和效率 泵的特性曲綫	
离心泵的相似 比轉数	
21. 离心泵的構造	79
泵的类型 离心泵和往复泵的比較	
22. 其他类型泵。虹吸管	82
渦流泵 酸蛋 噴射泵 空气升液器 虹吸管	
第三章 气体的压缩	88
23. 基本概念	88
絕热、等温与多变压缩和減压 机器的分类	
24. 往复压缩机	91
作用原理 压缩机的理論功圖与示功圖 多段压缩 压缩机	
的生产能力 压缩机消耗的功率	
25. 往复压缩机的構造	99
往复压缩机的分类 單段压缩机 双段与多段压缩机 往复	
式真空泵 旋轉压缩机和鼓風机 廻轉真空泵 往复压缩机	
和真空泵的安裝	
26. 渦輪鼓風机及渦輪压缩机	107
操作原理和分类 压头 生产能力 功率与效率 渦輪鼓	
風机与渦輪压缩机的構造	

27. 气体喷射泵及压缩机	113
蒸汽喷射泵及压缩机 水喷射泵	
28. 送风机	117
离心式送风机 轴流式(旋桨式)送风机 自然通风	
29. 气 櫃	120
湿式低压气櫃 干式低压气櫃 高压气櫃	
第四章 气体非均一系的分离	126
30. 气体非均一系	126
气体非均一系的性质及其分离方法	
(甲) 气体的流体力学法淨制	127
31. 利用重力作用的气体淨制	127
沉降速度 沉降设备的生产能力 沉降设备的構造	
32. 利用离心力淨制气体	133
离心降塵器的作用原理 离心力和分离因数 沉降速度 旋風分离器的尺寸及其效率 旋風分离器的構造	
33. 湿法气体淨制	140
湿法淨制气体设备的構造 泡沫设备	
34. 气体过滤	144
气体过滤器的構造	
(乙) 气体的电淨制法	147
35. 电淨制的理論	147
电淨制过程的物理原理 电流强度与电压 沉降速度 电能用量	
36. 电除塵器的構造	151
第五章 液体非均一系的分离	158
37. 液体非均一系	158
悬浮液 乳濁液	
(甲) 沉 降	159
38. 沉降与傾析	159
沉降速度 沉降器的生产能力	
39. 沉降器的構造	162
(乙) 过 濾	165
40. 概 述	165
过滤速度 濾渣的洗滌	
41. 过滤方程式	167
42. 間歇式过滤机	173
过滤机的分类 粒狀过滤隔層过滤器 濾布过滤机 固定的剛性过滤隔層过滤器	

43. 連續式過濾机	183
外濾面式轉筒真空過濾机 內濾面式轉筒真空過濾机 圓盤真 空過濾机 鏈帶式真空過濾机 毡帶式過濾机 加压連續式 過濾机	
(丙) 离心分离	191
44. 离心机的計算基础	191
离心力及分离因数 鼓內的液面 离心分离过程的特点 离 心机的生产能力 离心机轉軸的功率	
45. 离心机的構造	198
离心机的分类 間歇式离心机 連續式离心机	
第六章 物料的攪拌	208
(甲) 液体介質中的攪拌	208
46. 机械攪拌	208
攪拌过程中的流体动力相似 运轉功率 起动功率 影响所 需功率数值的各种因素	
47. 机械攪拌器的構造	216
平槳式攪拌器 旋槳式攪拌器 渦輪式攪拌器 特种攪拌器	
48. 气体攪拌	220
(乙) 在固体、散粒狀及糊狀物料中的攪拌 (混合)	221
49. 固体、散粒狀及糊狀物料的混合器	221
帶有轉动槳叶的混合器 螺旋混合器 混合筒	

第二篇 热 过 程

第七章 傳 热	224
50. 热傳导	224
温度場与温度梯度 傅立叶定律与导热系数 固体的导热系数 液体及气体的导热系数 热傳导微分方程式 在稳定热流时平壁的热傳导 在稳定热流时圓筒壁的热傳导 不稳定热流中的热傳导	
51. 热輻射	234
总論 斯蒂凡—波茨曼定律 克希霍夫定律 兩固体間的互 相輻射 气体的热輻射	
52. 对流傳热 (給热)	242
总論 給热定律 对流傳热微分方程式 热相似	
53. 給热的实验数据	249
在圓形直管中强制湍流的給热系数 过渡狀況的給热系数 圓 形直管中强制層流的給热系数 任意形狀管中的給热系数 弯	

管内的給热系数	为机械攪拌器攪拌的液体給热系数	√ 流体对單管作强制垂直流动时的給热系数	√ 流体对管束作强制垂直流动时的給热系数	流体自由运动时的給热系数	流体沿垂直面成膜狀流动时的給热系数	气体沿平壁强制流动时的給热系数	√ 蒸气冷凝时的給热系数	√ 液体沸騰时的給热系数	流体直接接触时的給热系数
54. 恒温傳热	.....	260	輻射—对流的总給热	平壁的恒温傳热方程式	筒壁的恒温傳热方程式				
√ 55. 变温傳热	.....	265	√ 流体流动的方向	流体并流时的傳热方程式	流体逆流时的傳热方程式	流体錯流时的傳热方程式	流体折流时的傳热方程式	√ 流体流动方向的选择	温度随時間而变化时的傳热方程式
√ 壁温	√ 流体的平均温度	√ 比热和傳热系数改变时加热面积的計算	不稳定热交换过程的傳热方程式	損失于周圍介質中的热量					
第八章 加热、冷却及冷凝	.....	276	(甲) 加热	.....	276	56. 热源和加热方法	.....	276	57. 水蒸汽加热
	.....	278	直接蒸汽加热	間接蒸汽加热	冷凝水和气体的排除	58. 热交换器	.....	281	夾套式热交换器
	.....	281	蛇管式热交换器	套管式热交换器	列管式热交换器	列管式热交换器的流体阻力	螺旋狀热交换器	双管式热交换器	翅片管式热交换器
59. 煙道气加热	.....	297	燃料的性質	燃料燃燒过程的計算	爐的热量衡算和燃料的消耗量	爐膛的尺寸	燃燒温度	加热爐的構造	
60. 間接加热	.....	305	矿物油加热	过热水加热	有机載热体加热	熔鹽加热	水銀和液体金屬加热		
61. 电热法	.....	313	加热方法及加热裝置的类型	电阻爐	电阻爐的計算	感应电流加热法	介电加热法		
(乙) 冷却和冷凝	.....	320	62. 达到常温的冷却	.....	320	自然散热冷却法	自动蒸發冷却法	加冰加水冷却法	用間壁冷却器的冷却法
	.....	320	冷却水的消耗量						

63. 間壁冷凝器中的蒸气冷凝	323
概念 水冷間壁冷凝器	
64. 混合冷凝器	327
混合冷凝器的構造 在混合冷凝器中水的受热 自冷凝器中抽 出空气的体积 混合冷凝器的大小	
第九章 蒸 發	335
65. 蒸發的方法	335
概論 單效蒸發 多效蒸發 在帶有热泵的設備中的蒸發	
66. 多效蒸發裝置的物料衡算及热量衡算	343
蒸發裝置的物料衡算 蒸發裝置的热量衡算 加热第一效蒸發裝置的蒸汽消耗量	
67. 蒸發裝置中的温度損失	349
溶液的蒸气压降低 (温度衰減) 因流体靜压强而引起的溶液沸 点温度升高 各效間导管中二次蒸汽的冷却 总温度損失	
68. 有效温度差在各效中的分配	352
有效温度差按蒸發裝置加热面积的总和为最小的条件分配于各效 有效温度差按各效加热面积相等的条件分配于各效 有效温度差 按已給的二次蒸气温度分配于各效 效数的限度	
69. 影响蒸發器生产能力及生产强度的各种因素	358
蒸發器的傳热系数 液体的循环速度 影响蒸發强度的其他因 素	
70. 蒸發器的構造	361
概論 蒸汽夾套和蛇管式蒸發器 臥式蒸發器 加热室在器 內的豎式蒸發器 加热室在外的蒸發器 液膜蒸發器 強制 循环蒸發器 热泵蒸發器	

緒 論

1. 化学工学的研究对象和本课程的任务

在我們周圍的自然界中，不斷地進行着複雜且多種多樣的變化和現象，這些變化或現象我們稱之為自然過程。

在大多數情況下，自然過程都是異常複雜的；如使之向一定方向進行，要受很多因素的限制。研究自然過程，這就是物理學、數學、化學和其他科學的研究對象和任務。

根據研究自然過程所得到的結果而實現了許多工業過程，用以加工天然產物（原料）成為生產資料和消費資料。

將天然產物製成生產資料和消費資料的工業過程稱為生產過程或工藝過程（технологический процесс）。

研究工藝過程並尋找其實現的最有效方法，即是工學（технология）的研究對象。
• 這一門科學是在十八世紀末年隨大機器工業的發展而產生的，成為實用科學的一個獨立部門。工學是研究物理學、化學、力學及其他諸科學之規律的實際運用，以更有效進行各種工藝過程的綜合性科學。

作為一門科學，工學在其發展途徑中蒐集了廣泛的理論和實驗材料，並根據這些材料加以綜合，研究出新的生產過程和改進原有的生產過程。

工學與自然科學不同，它是直接與生產聯繫着的，而大家都知道，生產永遠不會停留在一點上，而總是處於改變和發展中的。所以，現代工業中任一個工藝過程的現有形式，無論何時都不能認為是最終形式。

在社會主義制度的條件下，工學遵循着國家當前的基本政治任務和經濟任務而發展，它決定於規定各工業部門發展方向及具體任務的國民經濟計劃。在化學工學方面，這些任務是：制定並採用新的工藝過程和強化現有的工藝過程，繁重和體力勞動作業的全面機械化，生產管理的自動化，改善勞動條件，降低原料、燃料和能量的消耗，充分利用副產品和生產廢料。

化學工學與機械工學不同的是，後者所研究的过程中被加工的物料僅改變其外形或物理性質，而化學工學所研究的过程中，原材料經過更深入的变化，不僅在物理性質上有改變，而且在物態和化學性質上也有變化產生。

工學之所以分為機械工學和化學工學，僅僅是相對的，因為實質上技術是一個整體，任一生產領域中的發明或改進，如果技術上可能，經濟上有利的話，都必然會引用到其他各個部門。

在化學工學中，依過程進行的條件和被加工物料的性質，採用着各種不同設備。決定設備形式最重要的因素是：參與過程的物質的化學性質，以及它們的物態、溫度、壓力、熱效應、熱交換強度等等。

隨着化學工業的發展，化學工學也分成了許多部分，每一部分包括一些性質相近的多少較狹小範圍內的过程，這些过程只是某些工業部門才具有的。但不管化學工學的分

类如何,有一些过程和設備对各不同部門都是共同的。此外,不同的工艺过程也可以归併成若干类,这样就可对属于某一类諸过程的共同基本原理加以研究。

“化工过程及設備”課程的研究对象和任务是研究化学工学中一切部門所共有的过程以及这些过程的共同原理。本課程將研究工艺过程的理論和实际基础,計算方法,以及过程进行所用的典型設備和机器。

2. 过程的分类

到現在为止,化工过程还没有任何完全固定的分类方法。实际上根据过程进行的基本規律,可以合理地組合成下列几类:

- 1) 流体动力过程;
- 2) 热过程;
- 3) 扩散过程;
- 4) 冷冻过程;
- 5) 机械过程,即与处理固体有关的过程;
- 6) 化学过程,即被处理物料的化学变化过程。

其中每一类过程又可分为:

- 1) 間歇过程; 2) 連續过程; 3) 綜合过程。

間歇过程的特征是此过程的每一个阶段都在同一地点进行,状态不稳定,是随時間而变的。間歇过程是在間歇運轉的設備内进行的,最終产品每經一定時間后自設備中全部或部分卸出。卸料后,再加入一份新的原料,週而复始地循环操作。因为間歇过程的状态是不稳定的,故在被处理物料的任一点上,或設備的任一截面上,說明物質加工过程和状态的各物理量或参数(如温度、压力、濃度、比热、速度等)在过程进行中均随時間而改变。

連續过程的特征是所有各操作阶段都在同一時間进行,状态稳定,且連續卸出最終产品。連續过程是在連續運轉的設備中进行的。由于状态是稳定的,在被处理物料的任何一点,或在設備的任一断面上,其物理量或参数在过程进行的全部時間内实际上是不变的。

綜合过程或者是連續过程而其中个别操作阶段是間歇进行的,或者是間歇过程而其中有一个或几个阶段是連續进行的。

連續过程較之間歇和綜合过程,具有許多重要的优点,首先在于:

- 1) 可能实行过程的全部自动化和机械化,这就可以使手工劳动減到最少;
- 2) 所得产品质量均匀,因而也就提高了产品的质量;
- 3) 过程进行所需之設備紧凑,因此可減少設備投資以及修理費用。

所以,現在一切技术部門都力求將旧的間歇式生产过程改变为新的連續式生产过程。

3. 物料計算和能量計算

对任一生产过程,除了需消耗劳动力外,尚需要有1)被处理的物料; 2)处理物料所

需能量；3)过程进行所利用的設備和机器。

参与生产过程的物料，不管是原料、半成品或成品，事实上总不可能是绝对純粹的，而是几个單質（組份）的混合物。

混合物的組成以重量百分数或重量分数表示。但在許多情况下为求工艺計算方便起見，物料及其混合物的組成不用一般的重量分数及重量百分数，而用分子百分数或分子分数（克分子分数）来表示。

物料衡算的一般概念 为了求得原材料的消耗量，成品率，設備大小及其生产能力，需要預先进行物料計算。計算的根据是物質不灭定律和以化学方程式所表示的化学計量关系。

按物質不灭定律，被处理物料的重量 G_1 应等于制造后所得物料的重量 G_2 ，即：

$$G_1 = G_2$$

但实际上在生产过程中总是有物料的損失，所以操作后所得产品重量总是小于被处理的原料重量，因之

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

式中 G_n 为物料損失，仟克。

方程式(I)称为**物料衡算方程式**。此式無論对于某一定工序或整个过程，或是对于过程中某一阶段，都是同样适用的。

物料衡算或按全部参与过程的物質列出，或以任一某組份为基准列出。

例如，湿物料干燥过程中，以一个組份为基准的衡算，可按被干燥物料中干物質重量，或按物料中水分重量列出。

在列出一个化学过程的物料衡算时，必須应用表示該过程所进行反应的方程式。

物料衡算的数据通常多列为物料輸入及輸出表，有时为了更明显起見，除表以外尚輔以圖示，用一定比例来表示物質流动的多少。

物料衡算对保証工艺过程正确进行有很大的实用意义。在設計新的生产过程时，可使更正确地选择工艺流程和設備大小。在实际生产操作中，物料衡算可以揭示物料的非生产性損失，定出副产品及雜質的組成和数量，并指出减少副产品及雜質的途徑。

物料衡算反映出生产过程的完善程度和生产狀況。物料衡算列得愈完全，則該工艺过程也研究得愈細致；損耗及副产品愈少，則操作进行得愈为正确。

如果物料衡算列不出来，則表示該过程还研究得不够。如在物料衡算中有大量損耗，則証明过程是不完善的，应当加以改进。

成品率 过程进行所得成品量与被处理原料量之比，以百分数表示，称为**成品率**。

如果化学过程的进行在量的关系上可以用已知的化学計量方程式表示，則最終产品的成品率就是实际所得产品量和理論上应得产品量的百分比。理論上的量是完全按照反应計量方程式所得的量。

由于有損耗，成品率实际上总是小于100%。显然，成品率愈接近于100%，則过程愈完善，原料的消耗愈少，成品价格亦愈低。

如果还没有精確的化学过程方程式，則用別的方法表示成品率，即产品量或与原料总量相比，或与原料中任一物料的重量相比。在第一种情况，成品率永远小于100%；

在第二种情况，成品率可能小于，也可能大于100%。

生产能力 生产能力是设备和机器的一个主要特性。生产能力可以用单位时间(秒、分、小时、晝夜)内进入的物料量表示，或以单位时间内制造出的成品量表示。被处理的物料量可用下列单位表示：

- 1)重量单位—千克，吨；
- 2)体积单位—升，米³；
- 3)件数—当处理成件的物料时用之。

例如，粉碎机和磨的生产能力通常以千克/小时和吨/小时表示；汲送液体的泵生产能力以升/分、米³/秒、米³/分、米³/小时表示；塑料制品压制机，生产能力以件/小时、件/晝夜表示，等等。

当所有其他条件相同时，设备和机器的生产能力决定于其大小及其中所进行过程的速度。设备和机器愈大，过程进行速度愈快，则其生产能力愈高。

生产过程的强度 设备或机器的生产能力对于某一表示该设备或机器性能的基本单位之比称为过程强度。例如，蒸发器的强度以每小时每一米²加热面所蒸发的水分量表示，硫酸生产中，塔的强度以每一米³塔体积每晝夜所得硫酸量表示，等等。

过程强度的提高，可以减少同一生产规模所需的设备数量或缩小设备尺寸；相应地也就减小了基本建设、设备修理和保养的费用，同时提高了劳动生产率这一个基本的生产经济指标。

生产的强化，即增加生产过程的强度，是过渡到更高度的技术水平和提高劳动生产率最重要的任务之一。强化生产过程可使同一设备，同一装置，在同一单位时间内，由同一数量的操作人员，制得更多的产品。

能量衡算 在工艺过程中，物料的处理牵涉到能量(热能、机械能、电能等)的消耗。

为了确定能量的消耗量，需列出能量衡算。表1列出了主要换算当量，此当量是根据以下几个基本计算的量：

- 1)重力加速度=9.81 米/秒²；
- 2)热功当量=427 千克(力)米/仟卡；
- 3)米制马力=75 千克(力)米/秒；
- 4)仟瓦功率=102 千克(力)米/秒。

能量衡算是以能量不灭定律为基础而列出的。依照该定律，引入过程的能量应等于过程进行结果所得的能量；换句话说，在任何过程中输入的能量均应等于输出的能量。

实际上如将一切能量损失(这是任何生产过程中都不可避免的)计入，此等式关系仍可成立。

令

Q_1 ——随物料进入过程的物理热量，仟卡；

Q_2 ——自外界引入过程中的热量，仟卡；

Q_3 ——由于过程进行的结果所放出的热量，仟卡；

Q_4 ——随物料自过程中排出的物理热量，仟卡；

Q_5 ——损失于外界的热量，仟卡。

則熱量衡算方程式的形式如下：

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 \quad (\text{II})$$

如果其中四個為已知的話，由此式可求出五個數量中的任一個。通常在設計時，必須由熱量衡算方程式求出需自外界引入的熱量，而在檢查運轉中的設備機器時，則由熱量衡算方程式確定熱量的損失。

功率和效率 除生產能力外，設備和機器還以功率表示其性能。功率是單位時間內消耗或獲得的功，通常以仟瓦或馬力表示。必須將消耗于機器主軸上的功率和帶動此機器的發動機功率區分開來。發動機的功率因它本身和各傳動機件都有能量損失，所以總應大於設備或機器主軸所消耗的功率。

因此，有效功或有效功率永遠小於實際上消耗的功或功率。有效功率 N 及包括了各項損失的實際消耗功率 N_e 之比，稱為機器或設備的效率：

$$\eta = \frac{N}{N_e} \quad (\text{III})$$

實際上效率永遠小於1。效率愈接近於1，則該設備或機器愈為完善。

4. 物理量的因次

參與工藝過程的物質具有各種不同的物理性質（密度、粘度等），而這些物質的狀態和過程進行條件又可以各種不同的參數（速度、溫度、壓力等）表示。這些物理量及參數都可以用不同的單位來量度。

因為所有物理量的量度結果取決於量度所用的尺度大小，所以為了確定諸物理量間量的相互關係，應事先規定用什麼單位制作為度量的基礎。

用一定單位制的基本量來表示某一物理量，稱為該物理量的因次（размерность）。依此，物理量的因次不僅與該量本身有關，而且與所採用的單位制有關。同一物理量在不同的單位制中可以具有不同的因次。

一個單位制的建立，系從三個基本而相互獨立的單位出發，即：長度單位、時間單位、質量或力的單位。根據所採用的長度和質量單位的不同，有兩種基本單位制：

1. CGS（厘米-克-秒）單位制，長度單位用厘米，質量單位用克，時間單位用秒；
2. MKS（米-仟克-秒）單位制，其中長度單位採用米，力的單位採用仟克（力），時間單位用秒。

使用量度單位時，決不應當將不同制度的單位參混使用。特別應當記住，在MKS制中仟克是力的單位，而不是質量的單位。

在工業實用上，經常是採用MKS單位制。

表1列出各種不同制度的力學量度單位。

在研究工藝過程時，往往可用物理量的因次來作一些歸納。為此最好將三個基本量——長度、時間和質量（或力）——不管採用什麼單位制，均可以一般形式表示為：
 L —長度， T —時間， M —質量， F —力。

任一物理量可以CGS制表示成下列形式：

$$\text{速度}[w] = [LT^{-1}],$$

各种制度的力学量度单位①

第1表

量	单 位		因 次 式	
	厘米, 克, 秒(CGS)制	米, 千克, 秒(MKS)制	CGS制	MKS制
长 度	1 厘米	1 米	L	L
质 量	1 克(质)	1 千克 = $\frac{\text{千克(力)} \cdot \text{秒}^2}{9.80665 \text{ 米}}$	M	FT^2L^{-1}
时 间	1 秒	1 秒	T	T
速 度	1 厘米/秒	1 米/秒	LT^{-1}	LT^{-1}
加 速 度	1 厘米/秒 ²	1 米/秒 ²	LT^{-2}	LT^{-2}
力	1 达因 = 1 克(质)厘米/秒 ²	1 千克(力)	LMT^{-2}	F
功	1 尔格 = 1 克(质)厘米 ² /秒 ²	1 千克(力)米	L^2MT^{-2}	LF
功 率	1 尔格/秒 = 1 克(质)厘米 ² /秒 ³	1 千克(力)米/秒	L^2MT^{-3}	LFT^{-1}
压 力	1 巴 = 1 达因/厘米 ² = 1 克(质)/厘米秒 ²	1 千克(力)/米 ²	$L^{-1}MT^{-2}$	$L^{-2}F$

$$\text{加速度}[a] = [LT^{-2}],$$

$$\text{力}[f] = [MLT^{-2}],$$

$$\text{功率}[N] = [ML^2T^{-3}]$$

这些式子称为因次式, 其中的幂次也就是该物理量对所取基本物理量的因次。

将各种不同物理量用因次式表示, 是因次论的研究对象和任务, 其基本概念将在以后叙述。

① 本书以前各版以及各译本中力(重量)的因次都写作 KL , 而没有写成 KL 。本版以后也将如此。(原註)
本书译本是以千克表力的单位, 没有写作千克(力)——译者註。

第一篇 流体动力过程

第一章

流体力学基础

化学工业生产过程中所处理的物料多半是液态和气态。流体力学（应用力学的一个部門）就是研究液体和气体平衡及运动规律的科学。

同样，利用流体力学的方法以使非均一系分离的过程：沉降、过滤、离心分离，以及攪拌等，在化学工艺过程中也应用極广。

进行流体力学过程时，需利用到：重力（在沉降及悬浮液的分离时用）、压力（过滤时用）和离心力（在离心分离时用）。这些过程在外表上虽然不同，但都是基于液体、气体和固体質点在一定介质中的共同运动规律，因此可以称为流体力学过程（гидравлический процесс）或流体动力过程（гидродинамический процесс）。

要研究这些过程，必须具备流体力学的基本知識。

（甲）流体静力学

5. 基本定义

物質的液态和气态 呈流体状态的物質其特征在于其質点几乎有無限的流动性，而且可以几乎毫無阻力的將其形状分裂或改变。

流体物質又分为液态和气态。凡物体几乎絲毫不能压缩，而且受热时膨胀極小，則此种物体的存在状态称为液态（капельно-жидкое состояние）；液体的密度几乎不随压强和温度而改变。

相反地，气态的特征是具有極显著的可压缩性，和較大的体膨胀系数。因此，气体的密度随温度与压强的变化而有很大的改变。气体的运动，只要其速度沒有达到一定的限度，即沒有达到音速，其规律仍与液体的运动规律类似。

当研究很多关于液体的静止和运动状态的理論問題时，在流体力学上都采用所謂理想液体（идеальная жидкость），即受到压强的作用絕對不被压缩，本身的体积也不随温度而改变，同时液体質点也沒有內摩擦力。在流体力学中一般所指“理想液体”，具有不变的密度，而温度膨胀系数与質点的內部摩擦力都認為等于零。

重度 單位体积的液体或气体的重量，称为重度（удельный вес）（ γ ）。

令

G ——液体或气体的重量，仟克；

V ——液体或气体的体积，米³。

則重度的因次可由以下等式求出:

$$G = \gamma V$$

因此,

$$[\gamma] = \left[\frac{G}{V} \right] = [\text{仟克/米}^3] \quad (1-1)$$

除用工業單位, 仟克/米³來表示重度外, 也可用其他的單位: 仟克/分米³, 克/厘米³, 噸/米³。各種重度單位間的關係可以用下式表示:

$$1000 \text{ 仟克/米}^3 = 1 \text{ 仟克/分米}^3 = 1 \text{ 克/厘米}^3 = 1 \text{ 噸/米}^3 = 0.001 \text{ 仟克/厘米}^3。$$

實際上, 對於用不着特別精確的工業計算, 則假定液體的某些性質是可以相加的, 因此, 溶液的重度像氣體混合物一樣, 可以依下式求得:

$$\gamma_{\text{pac}} = 0.01(\gamma_1 a_1 + \gamma_2 a_2 + \dots + \gamma_n a_n) \quad (1-2)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ——混合物各個組份的重度;

$a_1, a_2, \dots, a_n$ ——混合物中各個組份的百分組成。

密度 每單位體積流體的質量, 稱為密度 (плотность), 以 ρ 表之。密度的因次由以下等式求出:

$$m = \rho V$$

用 $m = \frac{G}{g}$ 之值代入 (此處 g ——重力加速度, 米/秒²), 得:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma V}{gV}$$

$$[\rho] = \left[\frac{\gamma}{g} \right] = \left[\frac{\text{仟克} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4} \right] \quad (1-3)$$

可壓縮性 (сжимаемость) 在液體表面上增加 1 個氣壓的壓強而減小的液體體積, 稱為壓縮係數, 水的壓縮係數約等於 $44 \times 10^{-6} \sim 47 \times 10^{-6}$, 苯的壓縮係數為 82×10^{-6} 。

實際上我們都假定液體是不可壓縮的, 因此在以後所有的推論中可以認為液體的密度與重度都不隨壓強的改變而變化。

氣體和蒸氣與液體不同的地方是有甚大的壓縮性, 因此他們的密度和重度都隨溫度及壓強而改變。理想氣體的體積依狀態方程式隨溫度及壓強而變化:

$$Pv = RT$$

式中 P ——氣體的壓強, 仟克/米²;

v ——氣體的比容, 米³/仟克;

R ——氣體常數, 等於 $\frac{848}{M}$ (M ——氣體的分子量);

T ——氣體的絕對溫度, °K。

壓強 流體每單位面積上所受的力, 叫做壓力強度 (удельное давление) 若令 P 為作用於流體表面上的力, F 為表面面積, p 為壓力強度, 於是:

$$p = \frac{P}{F} \quad (1-4)$$

压力强度以气压 (атмосфера^①, 简称为 ат), 毫米水银柱, 米或毫米水柱表示。而且气压还分为物理气压和工业气压两种。物理气压即相当于 760 毫米高的水银柱在 0°C 时的压强, 或相当 10.33 米高的水柱于在 4°C 时的压强, 亦即等于每厘米² 面积上受到 1.033 仟克的压强。在工业上为了计算方便, 采用所谓工业气压, 即等于每厘米² 面积上受 1 仟克或 981000 达因的压力。

因此, 在压强的各种单位之间存在有下列的关系:

$$1 \text{ 物理气压} = 760 \text{ 毫米水银柱} = 10.33 \text{ 米水柱} = 1.033 \text{ 仟克/厘米}^2,$$

$$1 \text{ 工业气压} = 735.6 \text{ 毫米水银柱} = 10 \text{ 米水柱} = 1 \text{ 仟克/厘米}^2.$$

测量液体或气体在导管或器内的压强所用的仪器 (压强计), 一般都表示器内的绝对压强与大气压之差。这种压强叫做表压 (剩余压强 избыточное давление), 并以表压 (атм.) 表示。而绝对压强 (以气压为单位) 即等于表压加气压计压强 (барометрическое давление) (通常为一个气压) 以绝对气压 (ата) 表示。

6. 流体平衡方程式

流体力学中研究液体与气体的静止和平衡的部分, 叫做流体静力学 (гидростатика)。流体在静止状态时, 没有内部摩擦力, 在平衡时, 实际流体物质的存在情况与理想流体相近。因此对流体平衡上的问题可以求出很精确的解答。

流体静压强 设想在呈平衡状态的液体中, 取一单元面积 ΔF 。在液体内有一段液柱的压力 ΔP 垂直作用于面积 ΔF 上。假若作用于这一单元液面上的力是倾斜的, 那么这个力就可分为与这一表面垂直及平行的两个分力。平行分力就会使液体单元移动, 而破坏其平衡状态。

单位面积上所受的力, 即 $\frac{\Delta P}{\Delta F}$, 称为平均流体静压强。

这个比例的极限 $\lim_{\Delta F \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta F} \right) = p$ 即表示一点的静压力强度。以后简称为静压强, (гидростатическое давление), 以字母 p 表示。从比值 $\frac{\Delta P}{\Delta F}$ 可以看出: 静压强系用单位面积上的力作单位, 即仟克/米² 来量度。

在液体内任取一点, 其所受流体静压强的大小与所选择的方向无关。换句话说, 若经过液体内所取的一点任作一平面, 则平面上所受的压强大小相同。这一原理在流体平衡方程式的推演中即可证明。

但是静压强在液体的不同点上也不同。而取决于这些点在液体中的位置。

位置靠近液体表面的一些点与离液体表面较远的一些点受有不同的压强。在数学上表示成 $p = f(x, y, z)$, 即静压强的一般形式是点的空间坐标的函数。

尤拉平衡微分方程式 在呈平衡状态的流体内取一单元平行六面体, 其体积为 dV , 每边之长为 dx, dy, dz (圖 1)。

① 本書中將作為压强單位的 атмосфера 譯為“气压”而將表示外界大氣压强(即气压計压强)的 атмосферное давление 譯作“大氣压”——譯者註。