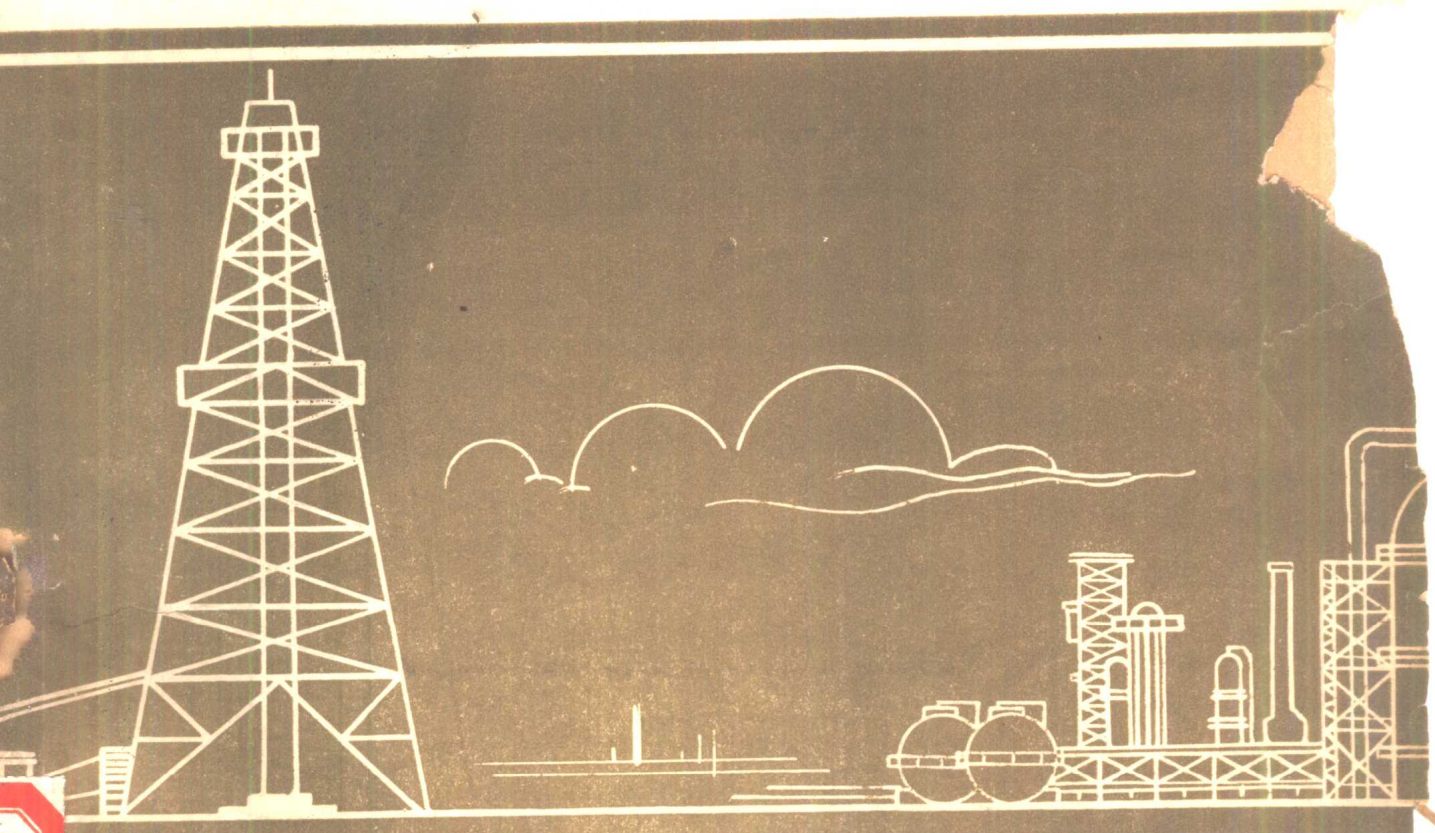


石油化工过程及设备

(一分册)

石油化工过程及设备教研室編



北京石油学院

一九六三年七月

前 言

“石油化工过程及设备”分四分册出版，一分册包括緒論，流體力學基礎，因次論相似論及模型法，泵及鼓風機，二分册包括導熱，對流換熱，傳熱及換熱設備，熱輻射，管式加熱爐，蒸發，及附錄。三分册包括擴散傳質概論，蒸餾及精餾，吸收，提取，吸附，增濕減濕與干燥。四分册包括流體力學過程概論，固體流態化，氣相非均一系分離，液相非均一系分離。

按我院教學計劃，現有煉油工程，人造石油，重有機合成，液體燃料，煉廠機械及石油工業經濟及組織等專業需要學習本課程。自1953年以來教研室在教學過程中逐漸積累了部分教學資料，先後編輯出版過“石油加工过程及设备講義”(1956)，蘇聯專家庫茲涅佐夫來華講稿“石油加工工業主要过程及设备”(1957)，“石油加工过程及设备講義”上冊及下冊一部分(1959)。本書系在上述教材基礎上加以增刪修正而成，由於近年來石油化工技術及理論上發展很快，此次全部新編或作重大修改補充的章節，有一分册的緒論，因次論相似論及模型法，和三、四分册的全部章節（其中吸附一章采自1960年卡薩特金化工过程及设备編譯，離心一章選自張洪沅等編教科書）。一、二分册其餘章節也以1959年講義為基礎，作了局部修改。為適應于石油工業系統化工專業特點，本書內容除結合一般化工基礎以外，力圖反映石油工業特點，每一章并均配有例題及習題，書末附有常用的一些數據及圖表。

限于教研室人力及水平的本學期編寫又極倉促，未能充分反映1958年以來我國技術革命及教學革命成果，也未及作更多的推敲修改，無論內容體系以及文字和份量上，均有待在教學實踐中進一步摸索訂正，本着先解決教材有無問題為主的精神，即行付印，熱誠希望使用本書的同志們及時指正。

參加本書編寫和修正過程的有沈復，臧福錄（現在東北石油學院），郭天民，黃祖祺，劉益嶸，張連陞，鄭遠揚，楊光鵬，劉衍烈（現在福州大學，曾參加編寫59年流體力學基礎等章）以及教研室教師研究生實驗員等同志，并有我院56，57，60級部分同學參加工作。

北京石油學院石油化工过程及设备教研室1961.7月

目 錄

緒 論

第一章 流体力学基礎

第一节 流體靜力学..... 4

- 一、流體的物理性質
- 二、靜压强
- 三、靜力学基本方程式
- 四、靜压柱
- 五、压力計及压差計
- 六、水平面上及斜平面上液體的压强

第二节 流體动力学.....15

- 一、稳定流动及不稳定流动
- 二、流體在管內的流量及流速
- 三、流體流动的連續性方程式
- 四、柏諾利方程式
- 五、柏諾利方程式对于液體在管路及設備內流动的應用
- 六、流體的流动状态
- 七、水力半徑及当量直徑
- 八、管路阻力概述
- 九、流體經過長的直管时的摩擦阻力
- 十、局部阻力及局部阻力系数
- 十一、可压缩性流體在恒定截面的直管中的流动，柏諾利方程式的應用
- 十二、流體通过小孔及堰板的流动
- 十三、流體流量的測量原理及設備
- 十四、管路計算
- 十五、非等温流动特点
- 十六、非牛頓流體的流动特点

流體力学基础習題

参考書

第一章 附：因次論，相似論及模型法

第一节 序言.....80

- 一、經驗方法
- 二、数学分析方法

第二节 因次論.....89

- 一、因次、因次式或量綱
- 二、物理性方程式的因次和諧性
- 三、因次分析法

四、 π 定理	
五、无因次数群函数式的实验解法	
第三节 相似論簡介	94
一、相似概念和相似常数	
二、相似准数	
三、微分方程式的相似轉換法	
四、相似定律	
五、相似准数式的实验测定法	
第四节 模型法及近似模化	102
第五节 小結	104

第二章 泵及鼓風机

第一节 往复泵或活塞泵	107
一、往复泵的操作原理及分类	
二、往复泵的構造	
三、生产能力（或排液量）及容积效率	
四、往复泵之排液情况及空气室	
五、揚程，水力效率和吸入高度	
六、功率和效率	
七、往复泵的选用和操作	
第二节 离心泵	129
一、概論	
二、离心泵的基本方程式	
三、离心泵的生产能力 Q ，功率 N 和效率 η	
四、离心泵的特性	
五、离心泵在管路中的工作	
六、軸向推力	
七、在石油工厂用离心泵之标准系列，典型構造和选用泵的方法	
八、离心泵和往复泵之比較	
九、渦流泵	
十、轉子泵	
十一、氣體压液器	
第三节 通風机和鼓風机	164
一、通風机	
二、离心式通風机和压气机	
三、旋轉式鼓風机和压气机	
四、液（水）环式真空泵	

泵及鼓風机習題

参考書

总附录 目 录

附表1 單位的換算

附表2 水—瓦斯鋼管

附表3 国产无縫鋼管規格

附表4 一般管子的绝对粗糙度

附圖1—1 碳氢化合物的对比粘度

附圖1—2 在各种温度下，特性因素与粘度的关系

附圖1—3 碳氢化合物蒸汽的粘度

附圖1—4 油品的比重与温度的关系圖

附圖1—5 油品粘度随温度的变化

附圖1—6 粘度換算圖

附圖1—7 石油餾份之液體比热圖

附圖1—8 石油餾份之热焓圖

附圖2—1 国产“K”型水泵的 Q—H 总圖

附圖2—2 国产“D”型水泵的 Q—H 总圖

附圖2—3 国产CTД—57型离心通風机选择曲綫圖

附圖2—4 国产高压离心通風机8—18, 9—27型綜合性能选择綫圖

緒 論

一、本科学的特点，研究对象，任务及内容分类。

石油化工过程及设备的对象是石油厂，人造石油厂及化学工厂中的典型的单元过程及设备，其任务是研究这些典型过程和设备的基本科学原理及设计计算方法。

在炼油及化学工业中按照原料特点及产品要求，有许多的生产过程或工艺过程，如常减压蒸馏，催化及热裂化，润滑油精制，固体燃料干馏，水煤气合成及加氢，烃类（如石蜡）的氧化等等。各种工艺过程都有其自己的特点，但它们都可被看作是由一些比较简单的单元过程所组成。这种单元过程的例子是：流体的流动，输送，液体的加热，汽化、蒸汽之冷凝，冷却，溶液的蒸馏，吸收，提取，混合物的沉降，过滤，离心等等。每一种单元过程是依靠相应的典型设备来实现的，例如流体的输送过程用泵及鼓风机来实现，加热过程用不同形式的换热器，加热炉来完成，蒸馏及吸收等过程在相应的蒸馏设备，吸收设备中进行。这些设备的构造必须适应于该过程的特点，并且要经济、可靠。

石油化工过程及设备的内容分类，至今并未固定，根据单元过程所服从的基本规律，可以比较合理地综合成几类，每一类中包括着基本原理相同的一些单元过程。

1. 流体力学过程及设备——以流体力学的基本原理为基础。

- (1) 流体流动与输送过程及设备
- (2) 固体流态化及气力输送过程及设备
- (3) 沉降过程及设备
- (4) 过滤过程及设备
- (5) 离心过程及设备
- (6) 搅拌过程及设备

2. 换热过程及设备——以热量传递基本理论为基础。

- (1) 加热，冷凝及冷却过程及设备
- (2) 火力加热过程及设备
- (3) 蒸发过程及设备

3. 扩散传质过程及设备——以物质扩散运动理论为基础。

- (1) 蒸馏过程及设备
- (2) 吸收过程及设备
- (3) 吸附过程及设备
- (4) 提取过程及设备
- (5) 增湿及减湿过程及设备
- (6) 干燥过程及设备
- (7) 结晶过程及设备

4. 机械力学过程及设备——以机械力学为基础。

- (1) 固体的粉碎过程及机械
- (2) 固体物料的输送过程及机械。

5. 化学反应过程及设备——以化学反应动力学为基础。

列入本課大綱的主要是前面四大类，至于化学反應过程及设备尽管在煉油生产装置中應用較多。但从單元过程及設備的角度看还極不成熟，僅有少数嘗試[1]，关于这方面的問題，目前主要是在相應的工艺学中研究。

應該指出，按單元过程所服从的最基本規律来分类，并不意味着每一种單元过程只有一种基本規律起作用，例如对流傳热过程既服从傳热学的基本規律，同时去服从流體流动的基本規律，而在精餾、吸收等擴散过程中通常是擴散，流體流动及傳热三种基本規律同时起作用的。有时候为了研究上的方便，需要分别从流體力学，傳热学等各个側面去研究單元过程的規律，然后綜合地对單元过程进行分析。另外要指出，所謂單元过程及设备是从实际生产过程中抽象出来的，往往为了研究方便，須要对过程作某些簡化。实际过程要复杂得多，而且在生产上，这个單元过程与那个單元过程間总是有机地联系着的。为此，在运用这些單元过程的基本科学原理来解决生产問題时，必須結合实际情况，具體分析。

本学科的發展是和石油及化学工業生产的發展密切联系着的，例如，过去在天然原油加工工業中，蒸餾釜被輻射式管式炉及精餾塔所代替后，使小規模不連續的煉油生产發展成为大規模的連續生产，使产品质量，工人劳动及安全技术条件也有了大大改善的可能。正是这样，所以火力加热过程及管式炉，精餾过程及精餾塔就成了石油化工中重要的單元过程及设备，也充实和丰富了本学科的内容。又如有机合成工業，硫酸工業，以及油品催化裂化生产等工艺过程中，本来使用固定床反應器，而近来固體流态化反應器的采用，又使这些生产过程前进了一步。于是固體流态化过程及设备的研究，也就成了本学科中新的内容之一。

學習的目的不僅在于認識客觀世界，而且在于改造客觀世界。學習石油化工單元过程及设备的基本科学原理的目的，不僅在于學習正确的設計計算方法，而还應該注意进一步运用这些基本原理，改进这些过程及设备，强化生产过程及设备，改进和提高产品质量，降低生产的成本，改善劳动条件，提高劳动生产率。为此，學習及运用本学科的知識时必须注意联系生产实际来了解生产实际中的特点，和發現生产实际中的問題，联系有关自然科学的基本原理来加深对單元过程及设备規律的理解，注意实验及計算技术的能力的提高和注意联系有关的生产工艺学科的知識。

二、研究本課程常用的原理及方法

自然科学中的一些基本原理和計算方法，除了各类过程特有的原理以外，在本課程經常运用的有下列几个：

1. 物質不灭定律及物料平衡方程式

用通式表示

$$G_{\text{入}} = G_{\text{出}} + G_{\text{損}} + G_{\text{存}}$$

$G_{\text{入}}$ ， $G_{\text{出}}$ ， $G_{\text{損}}$ ， $G_{\text{存}}$ 分別为进入原料，产品，損耗的及存于設備內的量。

物料平衡計算，对保証工艺过程正确进行有很大实用意义，在設計新的生产过程时，可以更正确地選擇工艺流程及设备的大小。在生产操作中，則可以揭示物料非生产性損耗，定出付产品及雜質的組成和数量，并指出減少雜質的途徑等。

2. 能量不灭定律及能量平衡方程式：

用通式表示：

$$Q_{\text{入}} = Q_{\text{出}} + Q_{\text{損}} + Q_{\text{存}}$$

$Q_{\text{入}}$ ， $Q_{\text{出}}$ ， $Q_{\text{損}}$ ， $Q_{\text{存}}$ 分別为进入，輸出，損耗的及存于設備內的能量。

能量平衡计算的实用意义与物料平衡计算相同。

3. 物相平衡的有关定律及相平衡关系式:

这一关系在处理扩散传质过程及化学反应过程时应用, 以热力学第二定律为根据, 实用上用来判断在已知操作条件下过程进行的方向及限度, 或反之, 用来指导选定必要的操作条件。

4. 能量及物质传递速度方程式:

用通式表示:

$$\text{过程速度} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

过程速度对于决定设备尺寸有着密切联系, 而在一定的设备中, 提高速度往往是强化生产过程的主要内容, 此一关系指出了提高速度的途径在于增加推动力及减少阻力。

综合应用上述基本原理和方程式, 以及反映本过程特点的一些原理和方程式, 就有可能分析计算每一单元过程及设备。但是由于科学技术水平发展不够, 理论资料不足, 在许多情况下, 有关单元过程及设备的基本规律和计算公式, 还是实验室设备或生产设备的某些局部的经验总结, 和经验公式。为此在具体运用这些规律及计算公式时, 特别要注意它们的适用程度及范围。

第一章 流体力学基础

流体力学是研究关于液体及气体宏观运动规律的科学。在这一章中我们将介绍关于液体及气体宏观运动的规律，以及这些规律在实际中的应用。研究流体相对静止时的平衡条件的部分称为流体静力学，研究流体流动时的部分称为流体动力学。

在石油炼制过程以及在化学生产过程中我们曾经常遇到关于液体及气体平衡及流动的问题，我们要解决这些问题就需要流体力学的知识，因此对于一个石油工作者来说，流体力学是研究各个单元过程最基础的知识。

第一节 流体静力学

这一部分是研究流体在相对平衡时的规律以及这些规律在实际中的应用。

一、流体的物理性质

1. 液体及气体

液体及气体统称之为流体。液体几乎是完全不可压缩的，它的体积及重度随着温度及压力的变化非常小。

气体具有很大的可压缩性，体积膨胀系数很大，因此气体的重度随着温度及压力的变化有很大的变化范围。气体的流动当它的速度未超过声速时，其流动之规律与液体的类同。

在讨论一系列有关液体静止及运动状态的理论问题时，我们常应用“理想液体”这个名词。所谓理想液体是这种液体在压力作用下不可压缩，体积不随着温度及压力变化，并且没有内摩擦力。换句话说，理想液体的密度是常数，温度膨胀系数及内摩擦力等于零。

2. 重度：

单位体积液体或气体的重量称为重度。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-1)$$

式中 G ——液体或气体的重量， kg ；

V ——液体或气体的体积， m^3 ；

γ ——液体或气体的重度， kg/m^3 。

重度一般表示为 kg/m^3 ；除此而外，也可以表示为： T/cm^3 ， T/m^3 ；它们之间的关系如下：

$$1000\text{kg}/\text{m}^3 = 1\text{T}/\text{cm}^3 = 1\text{T}/\text{m}^3 = 0.001\text{T}/\text{cm}^3$$

当有几种液体混合在一起时，混合物的平均重度可用下式计算：

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

式中

$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ——混合物中各个组份的重度；

$a_1, a_2, \dots, a_n$ ——混合物中所含各个组份的体积百分数。

或用下式计算：

$$\gamma_{\text{CM}} = \frac{G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n}{\frac{G_1}{\gamma_1} + \frac{G_2}{\gamma_2} + \frac{G_3}{\gamma_3} + \dots + \frac{G_n}{\gamma_n}} \quad (1-3)$$

式中 $G_1, G_2, \dots, G_n$ ——混合物中每一组份的单独重量。

比重是液体在20°C或15°C的重度与水在4°C或15°C的重度的比值，分别用 d_4^{20} , d_4^{15} 和 d_{15}^{15} 来表示。

在石油工业中有时也用比重指数 (API) 来表示油品的比重，其与 d_{15}^{15} 之关系是

$$API = \frac{141.5}{d_{15}^{15}} - 131.5 \quad (1-4)$$

油品的比重随温度的变化关系可用下式来表示：

$$d_t = d_{15} - a(t - 15) \quad (1-5)$$

式中 d_t ——在指定温度下的比重；

d_{15} ——在15°C时的比重；

t ——温度，°C；

a ——实验常数。

3. 密度

单位体积的流体所具有的质量称为密度，用 ρ 来表示。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g} \quad (1-6)$$

式中 ρ ——密度， $\text{кг} \cdot \text{сек}^2 / \text{м}^3$

m ——质量， $\text{кг} \cdot \text{сек}^2 / \text{м}$ ；

V ——体积， м^3

g ——重力加速度， $\text{м} / \text{сек}^2$ 。

4. 压强

液体或气体在单位面积上所作用的力称为压强。令 P ——表面上所受的力， кг ； F ——表面的面积， м^2 ；于是压强 P 用下式表示：

$$P = \frac{P}{F} \quad (1-7)$$

压强可表示为大气压 (ат)，毫米汞柱 (ммHg)，米或毫米水柱 (м，或 ммH₂O)。大气压分为两种，一种为物理大气压，一种称为工程大气压。物理大气压相当于0°C时的760ммHg，或4°C时10.33米水柱，或1.033кг/см²。在工程上为了便于计算，采用工程大气压，它等于1кг/см²的压力。因此：

$$1 \text{ 物理大气压} = 760 \text{ ммHg} = 10.33 \text{ мH}_2\text{O} = 1.033 \text{ кг/см}^2;$$

$$1 \text{ 工程大气压} = 735.6 \text{ ммHg} = 10 \text{ мH}_2\text{O} = 1 \text{ кг/см}^2.$$

压强分为表压，绝对大气压及真空度。表压一般表示设备或管路内流体高于外界大气压的压强，也就是指装置的压力表上指示的压强。表压加上外界大气压即为绝对压强。表压一般用 атм 来表示。绝对压强用 ата 来表示。真空度表示设备内的压强低于外界大气压的数字，例如真空度为400ммHg，即设备内的压强比外界大气压低400ммHg，绝对压强为760—400=360 ммHg。

5. 粘度

流体流动时，产生内部摩擦阻力，流动状况与内部摩擦阻力有关。我们通常是用粘度来衡量内部摩擦阻力的。

想象流体流动时分为若干层，每层的流动速度不相同，因此产生了相对运动。根据牛顿定律，一层流体对于其相邻一层流体作相对运动时所产生的力（即内摩擦力）与它们的相对运动速度及接触表面积成正比，而与这两层的距离成反比。用公式表示为：

$$S = \mu F \frac{dW}{dL} \quad (1-8)$$

式中 S ——内摩擦力；
 F ——两层流体的接触表面积；
 dW ——相对运动速度；
 dL ——两层流体的距离；
 $\frac{dW}{dL}$ ——速度梯度，1/сек；
 μ ——粘度系数，简称为粘度。

由 (1-8) 式，得

$$\mu = \frac{S}{F} \cdot \frac{dL}{dW} \quad (1-8g)$$

取 $F = 1 \text{ cm}^2$ ； $\frac{dW}{dL} = 1 \text{ 1/сек}$ 得到

$$\mu = S$$

于是粘度可被认为是当接触面为 1 cm^2 ，距离为 1 cm 及相对运动速度为 1 cm/сек 时的内部摩擦阻力，它的单位是 дин·сек/см^2 ，称为绝对粘度单位，用泊来表示。即

$$1 \text{ 泊}(\text{п}) = \left[\frac{\text{дин·сек}}{\text{см}^2} \right] = \left[\frac{\text{г·см}}{\text{сек}^2} \cdot \frac{\text{сек}}{\text{см}^2} \right] = \left[\frac{\text{г}}{\text{см·сек}} \right]$$

因为泊的单位太大，在化工计算中我们常用它的百分之一作为一个单位，称为厘泊，即

$$1 \text{ 厘泊}(\text{сн}) = \frac{1}{100} \text{ 泊}(\text{п})$$

在水力学中我们常应用工程单位，它的因次为 кг·сек/м^2 ：它与厘泊的关系为：

$$1 \text{ кг·сек/м}^2 = \frac{981000}{10000} \text{ дин·сек/см}^2 = 98.1 \text{ дин·сек/см}^2$$

也就是

$$1 \text{ кг·сек/м}^2 = 98.1 \text{ 泊} = 9810 \text{ 厘泊}$$

流体的绝对粘度与其密度的比值称为运动粘度，用 ν 来表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma} \quad (1-9)$$

运动粘度的单位为 $[\text{см}^2/\text{сек}]$ ，称为斯托克斯 (СТ)，简称为沱，百分之一沱称为厘斯托克斯 (сст) 或简称厘沱。运动粘度的工程单位应为 $[\text{м}^2/\text{сек}]$ ，因此：

$$1 \text{ м}^2/\text{сек} = 10000 \text{ см}^2/\text{сек} = 10^6 \text{ 厘沱}$$

除此而外，在实验室中常应用恩氏粘度计来测量粘度，表示为 $^\circ\text{E}$ ，当粘度大于 1 厘泊时，用下式来进行换算：

$$\mu = \left(7.24^\circ\text{E} - \frac{6.25}{^\circ\text{E}} \right) \frac{\gamma}{g \cdot 10^6} \text{ кг·сек/м}^2 \quad (1-10)$$

式中 $^\circ\text{E}$ ——液体的恩氏粘度；
 γ ——液体的重度， кг/м^3 ；

g ——重力加速率, $9.81\text{M}/\text{cek}^2$ 。

在工程單位中我們也常把粘度与重力加速度合在一起即 $[\mu g]$, 在水力学的某些計算中頗为方便。它的因次为 $[\text{кг}/\text{м} \cdot \text{сек}]$ 或 $[\text{кг}/\text{м} \cdot \text{час}]$ 。

相互溶解的液态混合物的粘度用下式來計算:

$$\lg \mu_{\text{CM}} = x_1' \lg \mu_1 + x_2' \lg \mu_2 + x_3' \lg \mu_3 + \dots \quad (1-12)$$

式中 μ_1, μ_2, μ_3 ——各个組份的粘度

x_1', x_2', x_3' ——各个組份的分子分率。

对于氣體混合物, 它的粘度可用下式計算:

$$\frac{1}{\nu_{\text{CM}}} = \frac{x_1'}{\nu_1} + \frac{x_2'}{\nu_2} + \frac{x_3'}{\nu_3} + \dots \quad (1-12)$$

式中 ν_1, ν_2, ν_3 ——各个組份的运动粘度;

x_1', x_2', x_3' ——各个組份的分子分率;

对液體粘度随着温度的升高而减小; 对氣體則反之, 粘度随温度的升高而增大。

关于粘度的数据介紹如下, 一部分可參閱附录。

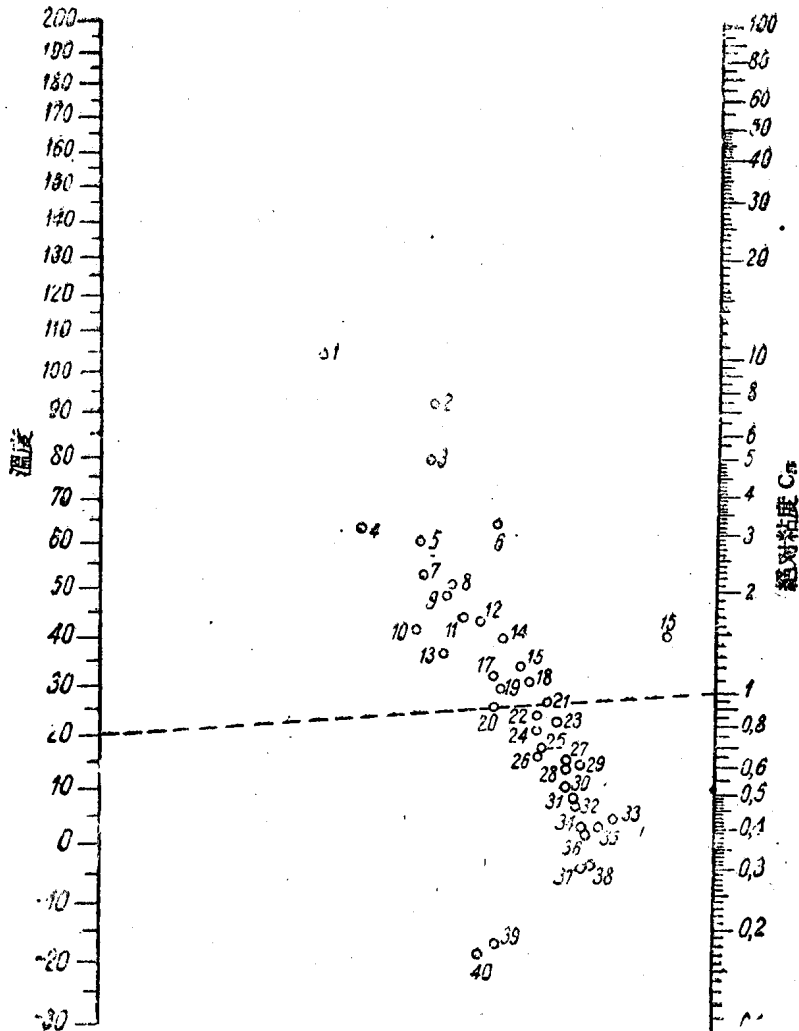


圖1—1 液體粘度的諾模圖

数字	物質名称	数字	物質名称	数字	物質名称	数字	物質名称
1	甘油 100%	11	丁醇	21	四氯化碳	31	庚烷
2	硫酸 111%	12	醋酸 70%	22	氯化苯	32	乙酸甲酯
3	硫酸 98%	13	甲醇 30%	23	氯乙烷	33	二硫化碳
4	乙烯乙二醇	14	硝基苯	24	甲醇 90%	34	丙酮
5	酚	15	汞	25	苯	25	二氧化硫
6	硫酸 60%	16	松节油	26	甲醇 100%	36	正己烷
7	甘油 50%	17	戊醇	27	甲苯	37	乙醚
8	苯胺	18	醋酸 100%	28	辛烷	38	戊烷
9	萘	19	乙醇 100%	29	氯仿	39	氨
10	乙醇 40%	20	H ₂ O	30	乙酸乙酯	40	二氧化碳

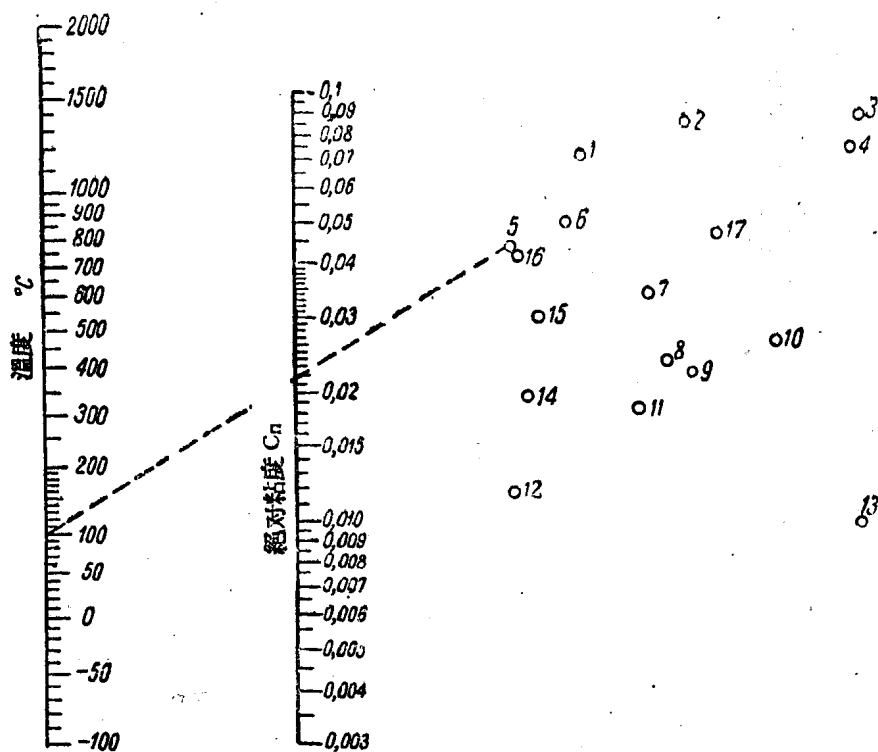


圖1—2 氣體粘度的諾模圖

数字	物質名称	数字	物質名称	数字	物質名称	数字	物質名称
1	O ₂	6	N ₂	11	C ₂ H ₆	16	CO
2	He	7	SO ₂	12	H ₂	17	Cl ₂
3	CO ₂	8	CH ₄	13	C ₆ H ₆		
4	HCl	9	H ₂ O	14	9H ₂ + N ₂		
5	空气	10	NH ₃	15	3H ₂ + N ₂		

二、静压强

所有浸没于流体中的物体以及盛有流体的器壁都会受到流体方面的压力。当流体静止时，平行于流体与物体接触面方向的力相加应等于零，否则流体会发生流动。因此自然可以认为在静止的流体中，压力的方向永远垂直于物体、壁或底的表面。假设一个平面 ΔF 上受到的力为 ΔP ，那么平均静压强为 $p_{cp} = \frac{\Delta P}{\Delta F}$ ， $\lim_{F \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta F} \right)$

表示点的静压强，一般即称为静压强 p

流体在任一点的静压强数值与所选择的方向无关，也就是说作用于任一点的静压强值在各个方向都是相同的。可用下法证明。

在流体中取一个极小的四面体 如图1—3所示。这个四面体的顶点A, B, C位于XY及Z三个坐标轴上。设ABC面的面积为 dA ，压强为 p ，于是作用于 dA 上的力为 pdA 。设此 p 与三个坐标轴所形成的角度分别为 α, β 及 γ 。用 dF 表示作用于 dA 的力， dF_x, dF_y, dF_z 分别表示平行于三个轴的分力，于是

$$\left. \begin{aligned} dF &= pdA \\ dF_x &= pdA \cos \alpha \\ dF_y &= pdA \cos \beta \\ dF_z &= pdA \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

设坐标面上的压强为 p_x, p_y 及 p_z 。于是作用于三个面的力分别为：

$$\left. \begin{aligned} dF_x &= p_x \frac{dydz}{2} \\ dF_y &= p_y \frac{dxdz}{2} \\ dF_z &= p_z \frac{dxdy}{2} \end{aligned} \right\} \quad (b)$$

但 $dydz/2 = dA \cos \alpha$ ， $dxdz/2 = dA \cos \beta$ 及 $dxdy/2 = dA \cos \gamma$ 。因为流体处于平衡状态，因此：

$$\left. \begin{aligned} pdA \cos \alpha &= p_x dA \cos \alpha \\ pdA \cos \beta &= p_y dA \cos \beta \\ pdA \cos \gamma &= p_z dA \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (c)$$

由此得到

$$p = p_x = p_y = p_z \quad (1-13)$$

由此可见在平衡状态下，任一点的静压强值在各个方向都是相同的。

三、静力学基本方程式

流体内各个点的静压强是不相同的，与这些点所处的位置有关。用数学的形式可以表示为： $p = f(x, y, z)$ 。我们可以用数学的方法把这种关系表示出来，此即为静力学基本方程式。

首先讨论一下平衡的条件。在处于静止状态的流体中取一个正六边形 它的边为 dx, dy

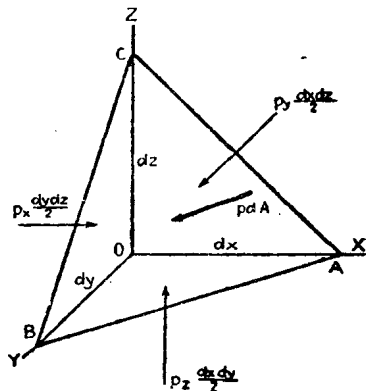


图1—3 作用于一点的静压图

及 dz ，體积为 dV 因为流體是靜止的，因此各个方向所作用的力应当相等。 Z 向靜压力的合力为：

$$pdx dy - (p + \frac{\partial p}{\partial z} dz)dxdy = -\frac{\partial p}{\partial z} dxdydz = -\frac{\partial p}{\partial z} dv \quad (a)$$

Z 向还有重力，因此 Z 向力的总和为：

$$-\rho g dv - \frac{\partial p}{\partial z} dv = 0 \quad (b)$$

消去 dv ，得到

$$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (1-14)$$

同样，对于 x 軸

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1-14a)$$

对于 y 軸

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1-14b)$$

式 (1-14) (1-14a) (1-14b) 称为欧拉平衡微分方程式。它指出了流體內任一單元體积的平衡条件。由此我們看到流體內同一水平面上各点的靜压是相同的，靜压只是沿着高度在变化。

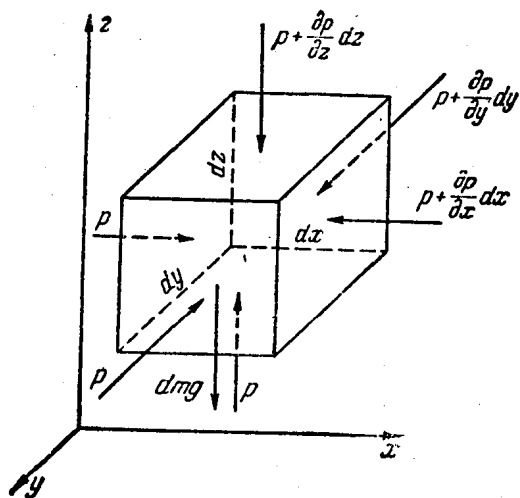


圖1—4 欧拉平衡微分方程式的說明

下边我們只討論靜压沿着軸 z 变化的情况

对于 (1-14) 式可写为：

$$-\rho g dv - \frac{\partial p}{\partial z} dv = 0 \quad (a)$$

因为 x 向及 y 向我們可以不考慮，因此 (a) 可写成：

$$-\rho g dx dy dz - \frac{dp}{dz} dz dx dy = 0 \quad (b)$$

簡化后得到

$$-\rho g dz - dp = 0 \quad (c)$$

积分后得到

$$p + \gamma Z = p_0 + \gamma Z_0 \quad (1-15)$$

式中 p_0, Z ——为流體表面上的压强和高度

p, Z ——流體内部深度为 Z 的一点的静压强和高度

若在液體内部任一点的压强为 p_1 ，此点高度为 Z_1 ，那么高度为 Z_2 的一点它的静压强为

$$p_2 = p_1 + \gamma (Z_1 - Z_2) \quad (1-16)$$

(1-15) 或 (1-16) 式称为流體静力学的基本方程式。

如果我们已知 0 点的压强 p_1 ，垂直坐标为 Z_1 ，那么 M 点的压强 p_2 即可用 (1-16) 式计算出。由公式 (1-16) 看出：当液體内 0 点的压强增加任一值时，那么 M 点的压强也增加同一个值，其它各点也增加同一个值。此即为巴斯加定理。即：施于器内液體上的压强，能以同样大小傳遞到液體内其它各点。工业上所用的水压机就是利用了这一原理。

四、静压柱

静压强用液體的重度来除即得到所謂静压柱

$$h_p = \frac{p}{\gamma} \quad (1-17)$$

它的因次为：

$$[h_p] = \frac{[p]}{[\gamma]} = \frac{[F/L^2]}{[F/L^3]} = [L]$$

即静压柱的因次为长度。

下边解释一下静压柱的意义。

如图 1-6 所示。假若设备 S 内的液體在 0 点的表压为 p_0 。显然若在 0 点打一小孔，液體自然会由小孔中喷射出来。如果给小孔上连一根足够长的垂直管，那么液體即會上升到这个管内。当液體在管内上升到一定的高度之后，即达到平衡；液柱的重量与 S 内压强达到平衡。用公式表示如下：

在点 0， $Z=0$ ，表压 $p=p_0$ 。在点 a， $Z=h_p$ ，表压 $p'=0$ ，根据公式 (1-15) 可写出

$$p_0 = h_p \cdot \gamma \quad (1-18)$$

于是

$$h_p = \frac{p_0}{\gamma}$$

因此我們可認為：静压柱就是液體由于内压作用在垂直管内上升的高度。

对于式 (1-16) 我們也可以写作

$$\frac{p_2}{\gamma} + Z_2 = \frac{p_1}{\gamma} + Z_1 \quad (1-19)$$

因此，对于静止的液體内所有各点 静压柱及各高的和是一个常数。

如果在任一个设备内，液體在静止状态 各点的压强及位高如图 1-7 所示 根据式 (1-16) 我們看到

$$\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 = \frac{p_3}{\gamma} + Z_3 = \frac{p_4}{\gamma} + Z_4 = H \quad (1-20)$$

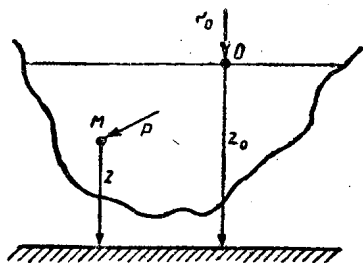


圖 1-5 静液中压强的分布圖

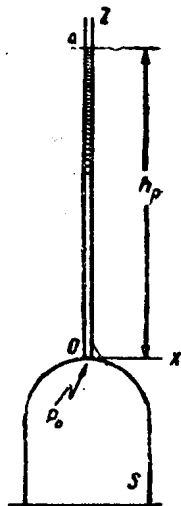


圖 1-6 静压柱

由圖1—7看到,在連通容器內盛任一種液體,當在靜止狀態及自由表面上壓強相同時各容器中液面一樣高。

五、壓力計及壓差計

壓差計為測量壓強差及壓強的一個器械。最簡單的一般為U形管,現在用靜力學的基本方程式來解釋它的原理。

常用的U形管形式如圖1—8及1—9所示。1—8為簡單U形管,內充以液體A。它的重量為 γ_A 。在液體A上為氣體或液體B,重量為 γ_B ,這兩種流體完全不互溶,B輕於A。

p_1 作用於管的一端, p_2 作用於管的另一端,可寫出下邊的關係式:

$$\text{對於點 2} \quad p_2 = p_1 + (Z_m + R)\gamma_B \quad (a)$$

$$\text{對於點 3} \quad p_3 = p_2 + Z_m\gamma_B + R\gamma_A \quad (b)$$

根據靜力學原理,2點的靜壓等於3點的靜壓,因此 $p_2 = p_3$, 即

$$p_1 + (Z_m + R)\gamma_B = p_2 + Z_m\gamma_B + R\gamma_A$$

最後得到

$$p_1 - p_2 = R(\gamma_A - \gamma_B) \quad (1-21)$$

[例1—1] 一個U形管內充以液體A, 重量 $\gamma_A = 13600 \text{ kg/m}^3$ 。液體A上面為液體B, 重量 $\gamma_B = 1260 \text{ kg/m}^3$; $p_1 = 1.136 \text{ kg/cm}^2$, $p_2 = 0.667 \text{ kg/cm}^2$ 。求R等於多少?

根據公式 (1—21)

$$p_1 - p_2 = R(\gamma_A - \gamma_B)$$

$$0.471 \times 10000 = R(12340)$$

$$R = \frac{4710}{12340} = 0.382 \text{ m}$$

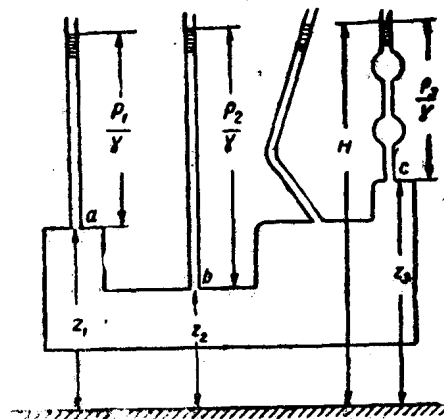


圖1—7 連通器

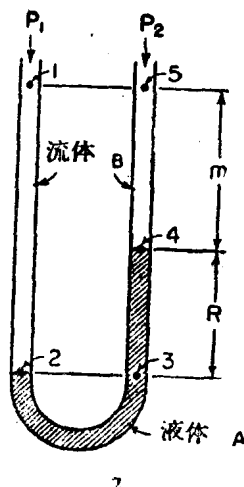


圖1—8 簡單壓差計

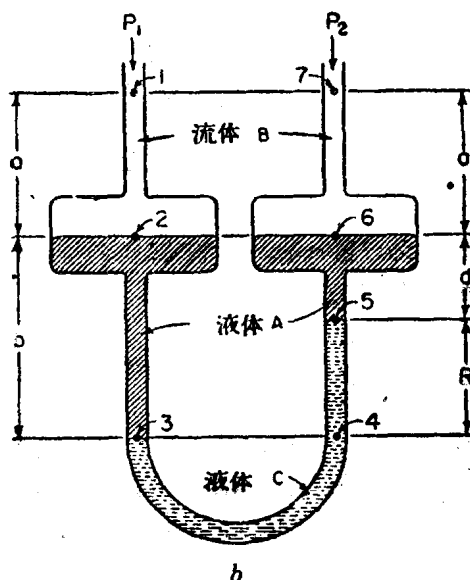


圖1—9 微分壓差計