

中等专业学校教学用书

人造石油加工过程及设备

撫順石油学院人造石油教研組編



中国工业出版社

中等专业学校教学用书



人造石油加工过程及设备

撫順石油学院人造石油教研組編

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国工业出版社

本書包括流体动力过程、热过程及扩散过程三篇。第一篇敘述了流体力学的基本原理，流体的輸送，气相、液相非均一系的分离；第二篇敘述了传热原理，换热設備、幅射换热和加热設備，以及蒸发与結晶；最后一篇敘述了扩散理論、气体的吸收与吸附，气体的增減湿及提取。

本書在一般基本过程理論的基础上，着重的討論人造石油厂中典型設備的計算方法与工艺結構，並在每章中均有例題，說明基本原理的实际应用。

本書可作各中等专业学校人造石油专业教学用書，也可供石油煉制专业使用並供石油厂技术人员和工人参考。

人造石油加工过程及設備

撫順石油学院人造石油教研組編

石油工业部图书編輯室編輯(北京北郊六鋪炕石油工业部)

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

化工印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张18·插頁1·字数427,000

1961年9月北京第一版·1962年2月北京第二次印刷

印数1,738—2,397·定价(9-4)1.75元

*

統一书号: K15165·229(石油-47)

前 言

本書是根据我国中等专业学校人造石油专业“人造石油过程与设备”课程的教学大纲编写的。

我国石油工业的高速度的发展，迫切需要大量的又红又专的石油工业建设干部。但是在过去教学工作中，没有符合专业要求的教科书或教学参考书，使培养干部和提高教学质量的工作受到一定的影响。为此，我们根据党对教育工作的指示，石油工业发展的需要和几年来教学工作的体会以及现有资料，由教研组几名教师集体编写了这本书。由于时间仓促，资料和参考书不足，以及编者的水平和实际经验所限，错误和缺点一定很多。请各校教师，同学，有关工程技术人员和工人同志给予批评指导，以便再版时更正。

撫順石油学院人造石油教研组

目 录

前言 緒論

第一篇 流 体 动 力 过 程

第一章 流体力学的基本原理.....	4
第1节 流体静力学及其应用	4
第2节 流体动力学及其应用	12
第二章 流体的輸送設備.....	30
第1节 輸送管路	30
第2节 液体的輸送	36
第3节 气体的压縮与輸送	62
第三章 气相、液相非均一系的分离	78
第1节 气相非均一系的分离	79
第2节 液相非均一系的分离	92

第二篇 热 过 程

• 第四章 傳热原理	96
第1节 基本概念	96
第2节 热传导	96
第3节 对流传热	102
第4节 給热系数实验数据	107
第五章 傳热及換热設備.....	118
第1节 基本概念	118
第2节 換热設備在石油工业中的应用	124
第3节 換热器設備的計算 (列管式)	130
第4节 冷却器的計算——噴淋式	133
第5节 換热器的清洗及对热載体的流程选择	134
第6节 标准換热器的选择及特性比較	135
第六章 輻射換热及加热設備	141
第1节 輻射基本概念	141
第2节 固体表面間的輻射換热及計算	147
第3节 气体輻射	148
第4节 燃料与燃烧	156
第5节 加热設備——蓄热式加热爐	164
第七章 蒸发与結晶	176
第1节 蒸发操作基本概念	176
第2节 单效蒸发設備及計算	177
第3节 真空蒸发	179
第4节 多效蒸发 及流程	180
第5节 多效蒸发器的溫差損失	181
第6节 影响蒸发器的生产能力及生产强度的因素	183

第7节 蒸发设备的构造	184
第8节 結晶	185
第9节 結晶过程的計算	190

第三篇 扩 散 过 程

第八章 扩散过程的基本定律	195
---------------------	-----

第1节 扩散原理	195
第2节 扩散速率	199

第九章 气体的吸收	201
-----------------	-----

第1节 吸收与解吸的概念	201
第2节 吸收理論	202
第3节 吸收设备与流程	206
第4节 輕質油吸收塔計算	214
第5节 化学吸收的基本原理	229
第6节 硫銨塔計算	230

第十章 气体的增湿与减湿	237
--------------------	-----

第1节 气体增减湿过程的基本概念	237
第2节 洗滌飽和塔及其計算	241
第3节 泡沫式冷却塔	246
第4节 柵板式冷却塔	255
第5节 凉水塔及其計算	257

第十一章 提取过程	261
-----------------	-----

第1节 提取过程的实质及在人造石油工业中的应用	261
第2节 提取的基本方法及其比較	262
第3节 提取过程中所利用的设备及其主要条件	263

附录	265
----------	-----

附录1. 水的粘度	265
-----------------	-----

附录2. 某些固体在 3—100°C 时的平均比热	265
---------------------------------	-----

附录3. 飽和水蒸汽 (以溫度計)	266
-------------------------	-----

附录4. 单位換算	267
-----------------	-----

附录5. 英制单位換算为公制单位	267
------------------------	-----

附录6. 固体的物理性質	268
--------------------	-----

附录7. 材料的輻射系数	269
--------------------	-----

附录8. 水的物理性質	270
-------------------	-----

附录9. 水蒸汽压力	270
------------------	-----

附录10. 飽和水蒸汽的性質	271
----------------------	-----

附录11. 硫酸銨溶液之比重	272
----------------------	-----

附录12. 硫酸溶液上的水蒸汽压力	272
-------------------------	-----

附录13. 硫酸銨溶液之沸点	273
----------------------	-----

附录14. 填料的性值	273
-------------------	-----

附录15. 弓形面积計算表	274
---------------------	-----

附录16. 煤气在不同溫度时的容积, 含热量, 及水汽量	276
------------------------------------	-----

附录17. 化学产品的潛热及凝固热	278
-------------------------	-----

附录18. 液体比重	278
附录19. 液体的导热系数	278
附录20. 液体粘度	278
附录21. 各种温度下的洗油粘度	279
附录22. 液体比热	279
附录23. 气体及蒸汽在 3 °C 时之粘度	280
附录24. 气体及蒸汽的导热系数及系数的方程式	280
附录25. 湿气体的 I—X 图	281
附录26. 氨, 二氧化碳及硫化氢在水中之溶解度	281
附录27. 在 20 °C 时, 硫酸溶液之性质	281
附录28. 由 100 × 10 (毫米) 板条 (間隙 10 (毫米)) 組成的弦柵填料与空塔流速之关系	282
附录29. 弦柵垫料的特性	282

緒 論

一、“人造石油过程与設備”的研究对象与目的:

“人造石油过程与設備”是人造石油专业的主要专业課之一,它与“人造石油工艺学”一起,在培养人造石油技术人材中起着很大的作用。我們知道,人造石油工业是一門將固体燃料、重質液体燃料或气体燃料經過一系列热加工与化学加工制造成石油类似物的工业。儘管人造石油制造方法不同,但制造时都要进行一些同一类型的物理过程(加热,冷却,除尘吸收,蒸脫蒸发,結晶等单元过程),以及为了达到这些目的而采用的典型設備。

“人造石油过程与設備”就是要研究这些物理过程的基本原理,以及实现这些过程的典型設備的类型,构造、性能与計算方法。掌握了这門課程,就可以:

1.在人造石油厂管理生产时,为現有的加工設備制定最适宜的操作方法与指标,改进操作,提高設備的生产能力与产品的質量。

2.在設計新的人造石油企业时,根据工艺要求,选择高效能的設備,並通过計算决定这些設備的基本尺寸。

3.在进行科学研究时,研究影响这些过程的基本因素,並將这些实验結果运用到生产与設計中去。

由此可見,这門課程就成为人造石油工业生产、設計与科学研究的理論基础,在降低基建成本、提高生产能力与产品質量方面作用很大,如从粗煤气中回收輕質油为例,采用一般的木格填料塔,则需要高达30多米的塔3个,若改用高效能的柵板塔,則只需用一个十多米高的塔,而且吸收效率还能提高,就为国家节约了大量鋼材和木材,增产更多的宝贵产品。

二、人造石油过程与設備的特点和分类:

人造石油工业是化学工业的一个重要組成部分。由于它对国民經济的关系重大,目前已发展成为一个独立的工业部門,但就其生产过程的实質来看,仍屬於化学工业范畴。因此,“人造石油过程与設備”与“化工过程与設備”(或称化工原理)的性質基本相同。它們的区别在于;“化工过程与設備”只涉及一般化学工业所共有的基本过程与設備的原理,关于各工业的專門設備的計算將归到專門工艺学中去講。本課程則是在研究一般普遍性共同規律的基础上进一步去研究人造石油工业所有典型設備的操作条件、結構、性能与計算方法,因而它是一門理論与实践紧密結合的課程。毛主席在矛盾論中教导我們:“矛盾的普遍性即寓于矛盾的特殊性之中”在本書中,我們遵照毛主席的指示,在分析普遍問題的基础上着重分析与人造石油有关的特殊問題,进一步貫徹理論与实际相結合的原則。

人造石油生产过程可根据它們遵循的基本規律分成下列几大类:

1.流体动力过程:包括遵循流体力学規律的流体流动与輸送,气相非均系分离,液相非均系分离。人造石油工业自始至終都包含着流体的流动与輸送,气体的淨制,液体的搅拌与沉降,同时也是其他基本过程的基础,因而具有突出的重要意义。

2.热过程:包括遵循传热学基本規律的各个过程。在人造石油过程中如干餾气体和油品加热与冷却,硫铵母液的蒸发与結晶等都屬於这一基本过程。

3. 扩散过程 (或称传质过程): 包括遵循扩散原理的吸收、蒸馏、干燥、提取等过程, 由于本课程与“石油加工过程与设备”有所分工, 因此在本书中将重点讲解气体的吸收与增减湿, 油品的蒸馏将移到石油加工过程与设备或专门工艺学中讲解。

4. 热力过程: 遵循热力学基本规律的过程, 如冷冻与深度冷冻。

5. 机械过程: 遵循固体力学基本定律的过程, 如固体燃料的破碎、筛分与运输。

6. 化学过程: 遵循化学热力学与动力学诸定律的化学反应, 如固体燃料的干馏、气化、油料的加氢、一氧化碳与氢的合成等。

根据教学大纲规定的课程协作关系, 热力过程, 由热工学中讲授; 机械过程与化学反应过程将由人造石油工艺学讲授; 有关石油蒸馏设备如精馏塔, 加热炉等由炼制工学讲授。本课程着重研究人造石油工业所共有的物理过程—流体动力过程、热过程、与扩散过程及其典型设备。

三、基本概念:

如上所述“过程与设备”的最终目的是根据工艺要求选择效能最高的设备, 并决定其主要尺寸。为了达到这个目的就必须对进出该设备的物料数量与能量进行清算。因此掌握下列基本概念是十分必要的。

1. 物料衡算: 物料衡算为物质守恒定律的一种表现形式, 依此定律, 凡引入设备以进行操作的物料重量 ($\sum G_{入}$), 必须等于操作后所得产物之重量 ($\sum G_{出}$)。但在实际生产过程中, 物料不可避免地有所损失, 即输出量少于输入量, 其差额即为物料损失, 故写成物料平衡方程式的形式:

$$\sum G_{入} = \sum G_{出} + G_{损失}$$

物料衡算, 对生产的指导意义在于: 可揭示物料的浪费和操作的反常现象, 从而确定先进而又合理的方案。同时物料衡算也能反映生产过程的完善程度。

2. 生产能力及操作强度: 生产能力为设备的主要性能, 以单位时间进入设备物料数量来表示。

生产操作强度: 是设备的单位截面积或容积的生产能力, 如硫酸铵蒸发器的操作强度, 以每小时每平方米加热面所蒸发的重量表示, 即公斤/米²·小时。

3. 热量衡算: 热量衡算为能量守恒定律一种表现形式, 即进入设备的热量应等于输出之热量。如以引入热量为 $\sum Q_{入}$, 输出热量为 $\sum Q_{出}$, 其中热量损失为 $Q_{损失}$, 则

$$\sum Q_{入} = \sum Q_{出} + Q_{损失}$$

热量衡算, 可用以检验热量利用完善程度, 如抚顺式二段页岩干馏炉在干馏抚顺页岩时, 所需热量三分之二是来自发生段, 三分之一热量由循环煤气供给, 其相互数量之关系即由干馏炉的热衡算确定。

四、物理量的因次与单位制度:

凡参与生产过程的物质, 皆具有各种不同的物理性质 (如粘度、密度、重度、比热等) 和各种不同的参变数 (如温度、压强、速度等) 来表示生产过程的特征。这些物理量 (物理性质、参变数) 可通过三个而且互相独立的基本单位表示。常用的基本单位 (或称因次) 为: 长度 (L)、质量 (M)、力 (F) 及时间 (t)。应用这些基本单位以表示物理量的特性的式子称为因次或称为导出单位, 例如速度的因次式为 Lt^{-1} , 加速度的因次式为 Lt^{-2} 。

用以表示各个物理量大小的单位, 有各种不同的度量衡制度, 最普遍应用的单位制度

是下面两种：

1) 物理单位制即厘米—克—秒 (C.G.S) 制，在该制度中以长度 (厘米)，质量 (克) 和时间 (秒) 单位作为基本量。该制度常用在科学研究中。

2) 实用单位制即米—公斤—秒 (M.K.S.) 它与物理单位制区别在于以米作为长度单位，重量以公斤为基本单位，而质量在此单位制中是导出单位。●

这二种单位制中，时间单位为秒 (实际上常采用小时) 温度为摄氏温度。在 CGS 制度中热量单位为卡，而 M.K.S 制度为仟卡。

我国目前广泛采用的度量衡制度为公制，因为国际单位系十进位制符合我国已有度量衡制。

必须指出，在工艺计算中，无论采用那种单位均应统一，不应将不同单位混合使用，一定要符合于物理量的因次概念。简单来说，就是等式两边的因次必须相等。本书采用的为 (米—公斤—秒) 公制单位。兹将厘米—克—秒物理单位与工程单位制度中某些物理量的因次关系列于表内，以供参考。

两种不同制度中某些物理量的单位和因次式表

物 理 量	单 位		因 次 式	
	厘米-克-秒制	米-公斤-秒制	厘米-克-秒制	米-公斤-秒制
长 度	[厘米]	[米]	L	L
质 量	[克]	[公斤·秒 ² /9.81米]	M	$\frac{1}{9.81}L^{-1}$
时 间	[秒]	[秒]		
速 度	[厘米/秒]	[米/秒]	Lt^{-1}	Lt^{-1}
加 速 度	[厘米/秒 ²]	[米/秒 ²]	Lt^{-2}	Lt^{-2}
力 (或重量)	[达因]或[克·厘米/秒 ²]	[公斤]	MLt^{-2}	F
功	[尔格]或[克·厘米 ² /秒 ²]	[公斤·米]	ML^2t^{-2}	FL
功 率	[尔格/秒]或[克·厘米 ² /秒 ³]	[公斤·米/秒]	ML^2t^{-3}	FLt^{-1}
压 强	[巴]或[克/厘米·秒 ²]	[公斤/米 ²]	$ML^{-1}t^{-2}$	FLt^{-2}
密 度	[克/厘米 ³]	[公斤·秒 ² /米 ⁴]	ML^{-3}	Ft^2L^{-4}
粘 度	[泊]或[克/厘米·秒]	[公斤·秒/米 ²]	$ML^{-1}t^{-1}$	FtL^{-2}

① 在物理和实用单位制中，公斤和克是质量单位，以公斤 (Kg) 和克 (g) 表示；在工程单位制中公斤和克是力的单位，以公斤 (力) (Kg) 和克 (g) 表示。

第一篇 流体动力过程

第一章 流体力学的基本原理

具有无限流动性和能够无阻力改变其形状的物质——液体和气体称为流体。

在人造石油的整个过程中，最主要和数目最多的过程都是流体力学过程，如干馏炉内气体的流动，瓦斯的排送，塔顶液体的喷洒，焦油和水的输送等。就“人造石油过程与设备”的整个内容来说，流体力学是各种过程的基础。例如物质的传热和扩散便是直接和流体的流动状态有关。

流体力学包括：

1. 流体静力学——研究流体在静止和平衡时的力学。
2. 流体动力学——研究流体运动规律的力学。

在流体力学的学习中我们要解决的任务有以下两方面：

- 1) 了解流体的性质和流体流动的规律。
- 2) 决定输送流体的动力和输送机械的选择。

应当指出，许多流体力学公式都明显的体现了能量和物质不灭这一基本定律。

在流体力学的发展过程中，俄国科学家欧拉和伯努利曾做了重要贡献。我国科学家钱学森、顾毓珍等在流体动力过程方面进行了许多有价值的研究，尤其是优秀科学家钱学森对于空气动力学有杰出的贡献。

第1节 流体静力学及其应用

一、基本定义

1. 重度 单位体积流体的重量称为重度，以 γ 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 公斤/米}^3. \quad (1-1)$$

式中 G ——流体的重量，公斤；

V ——流体的体积，米³。

重度的单位常用克/厘米³，公斤/米³，吨/米³等表示。其关系为：

$$1 \text{ 克/厘米}^3 = 1000 \text{ 公斤/米}^3 = 1 \text{ 吨/米}^3.$$

对于混合物的重度如不需特别精确时，可用下式计算：

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

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ——混合物中各组分的重度；

$a_1, a_2, \dots, a_n$ ——混合物中各组分的含量百分数。

2. 密度 单位流体的质量称为密度，以 ρ 表示。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{Vg} = \frac{\gamma}{g} \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4. \quad (1-3)$$

式中 m ——流体的質量，公斤·秒²/米；

g ——重力加速度9.81米/秒²。

密度的單位在物理上用克/厘米³，工程上用公斤·秒²/米⁴表示，其关系为：

$$1 \text{ 克/厘米}^3 = 10^3 \text{ 公斤/米}^3 = \frac{10^3}{9.81} \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 = 102 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$$

3. 比重 物質的重度与4℃时純水的重度之比称为比重，以 d 表示， d 为无因次数。

由于4℃时純水的重度为1克/厘米³，所以当用克/厘米³作为重度的單位时，物質的比重与重度在数值上相等。一般流体的比重是以20℃时的重度与4℃时純水的重度之比，以 d_4^{20} 表示。

4. 压强 作用在單位面积上的流体压力称为压强，以 p 表示。

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

式中 P 为作用在面积 F 上的压力。

压强的單位一般用公斤/厘米²、公斤/米²、毫米汞柱、毫米水柱、大气压等表示。

大气压分为物理大气压和工程大气压。

1物理大气压=760毫米汞柱=10333毫米水柱=10333公斤/米²=1.0333公斤/厘米²。

1工程大气压=735.6毫米汞柱=10000毫米水柱=10000公斤/米²=1.000公斤/厘米²。

压强有以下几种表示法：

绝对压强 在單位面积上所受外界的实际压力，称为绝对压强。

表压强 绝对压强与大气压强之差，称为表压强。表压强等于

$$P_{\text{表}} = P_{\text{绝对}} - P_{\text{大气}}$$

真空度 小于大气压之压强称为真空度（即負压状态），真空度等于

$$P_{\text{真}} = P_{\text{大气}} - P_{\text{绝对}}$$

由上述定义可知：流体的重度、密度和比重是与流体的体积有关的，在温度升高时流体的重量並不变化，但其体积却增加了，所以在温度变化时这三个量是有相应的变化的。

对于液体的重度、密度和比重与温度的关系可通过在某温度下其体积的膨胀关系进行計算，也可利用經驗公式計算，例如：

$$d_4^{t_1} = d_4^{20} - \alpha (t - 20) \quad (1-5)$$

式中 α ——比重的温度校正值。

因为一般我們把液体看做是不可压缩的，所以可忽略压力对液体重度、密度和比重的影响。

对于气体当温度和压强发生变化时其体积將发生显著改变，所以关于气体的重度、密度和比重在实际应用时一定要考虑这种影响。如把气体看做是理想气体时，这种影响可用理想气体方程式进行計算，即：

$$PV = \frac{G}{M} RT \quad (1-6)$$

①有关液体比重与温度关系的具体数据及图表可于一般化工計算手册中查出。

經整理后可得:

$$\frac{PM}{RT} = \frac{G}{V} = \gamma$$

即

$$\gamma = \frac{PM}{RT} \quad (1-7)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{PM}{gRT} \quad (1-8)$$

式中 M —— 气体分子量;

T —— 绝对温度, $^{\circ}\text{K}$;

R —— 气体常数。

气体常数 R 的值随所用压力的单位不同而不同。当 $P = 1$ 大气压, $\frac{G}{M} = 1$ 公斤分子,

$T = 273^{\circ}\text{K}$, $V = 22.4$ 米³ 时由 (1-6) 解出 R :

$$R = \frac{PV}{\frac{G}{M} T}$$

若 P 用工程大气压, 则

$$R = \frac{22.4}{273} = 0.082 \text{ 大气压} \cdot \text{米}^3 / \text{公斤分子} \cdot ^{\circ}\text{K}.$$

若 P 用物理大气压, 则因为 1 物理大气压 = $\frac{760}{735.6}$ 工程大气压 = 1.032 工程大气压, 所以:

$$R = \frac{1.032 \times 22.4}{273} = 0.0848 \text{ 大气压} \cdot \text{米}^3 / \text{公斤分子} \cdot ^{\circ}\text{K}.$$

一般工程上均使用 $R = 0.082$ 大气压 $\cdot$ 米³ / 公斤分子 $\cdot$ $^{\circ}\text{K}$

常用几种物质的比重:

石油的比重 $d_4^{20} = 0.76 - 0.90$; 撫順頁岩焦油的比重 $d_4^{20} = 0.86 - 1.00$ 。

水在 4°C 时的重度为 $\gamma = 1000$ 公斤/米³; 在 15°C 时 $\gamma = 990$ 公斤/米³。

空气在标准状况下的重度 $\gamma = 1.293$ 公斤/米³; 干瓦斯的重度 $\gamma \approx 1.2$ 公斤/米³。

5. 粘度 为在相邻两层流体层发生相对运动时所显示出来的流体的内部摩擦, 这是流体分子间存在着各种相互吸引的内聚力的表现。这种内部摩擦力的大小与两流体层相对运动的速度和接触面积成正比, 与其间的距离成反比, 即

$$k \propto F \frac{d\omega}{dn}$$

或

$$k = uF \frac{d\omega}{dn} \quad (1-9)$$

式中 k ——内部摩擦力;

F ——接触面积;

$\frac{d\omega}{dn}$ ——两流体层間每单位距离上的速度增量(即速度梯度);

μ ——粘度系数, 简称粘度。

由公式(1—9)解出 μ :

$$\mu = \frac{k}{F \frac{d\omega}{dn}} \quad (1-10)$$

当面积 $F = 1$ 单位面积, 速度梯度 $\frac{d\omega}{dn} = 1 \frac{1}{\text{秒}}$ 时, $\mu = k$ 。即相距1单位长度(厘米或米), 面积为1单位面积(厘米²或米²)的两流体层間維持单位速度差时, 所施加于

克服流体内部摩擦阻力的力(两者相等), 即为该流体的粘度, 称为流体的绝对粘度。

按所用单位制的不同, 由(1—10)式可得出绝对粘度 μ 的物理单位和工程单位。

$$\text{物理单位} \frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2 \cdot \frac{\text{厘米/秒}}{\text{厘米}}} = \frac{\text{克} \cdot \text{厘米} \cdot \text{秒}}{\text{秒}^2 \cdot \text{厘米}^2} = \frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}.$$

$$\text{工程单位} \frac{\text{公斤}}{\text{米}^2 \cdot \frac{\text{米/秒}}{\text{米}}} = \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}.$$

绝对粘度的单位称为泊, 规定:

$$1 \text{ 泊} = 1 \text{ 克/厘米} \cdot \text{秒}.$$

绝对粘度的工程单位与物理单位的换算关系如下:

$$1 \text{ 公斤} \cdot \text{秒/米}^2 = \frac{981000 \text{ 达因} \cdot \text{秒}}{10000 \text{ 厘米}^2} = 98.1 \text{ 克/厘米} \cdot \text{秒} = 98.1 \text{ 泊}.$$

实用中单位泊太大, 常用厘泊,

$$1 \text{ 厘泊} = 0.01 \text{ 泊}$$

20.2°C时水的绝对粘度 $\mu_{\text{水}}^{20.2} = 1.00 \text{ 厘泊}$ 。20°C时空气的绝对粘度 $\mu_{\text{空气}}^{20} = 0.0183 \text{ 厘泊}$

$$= \frac{0.0183}{9810} \text{ 公斤} \cdot \text{秒/米}^2 = 1.866 \times 10^{-6} \text{ 公斤} \cdot \text{秒/米}^2.$$

绝对粘度的倒数 $\frac{1}{\mu}$ 称为流度。

流体的粘度尚有一些其他表示法:

运动粘度——为绝对粘度与流体密度之比, 以 ν 表示。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma} \text{ 米}^2/\text{秒或厘米}^2/\text{秒}。 \quad (1-11)$$

运动粘度的单位为斯，规定：

$$1 \text{ 斯} = 1 \text{ 厘米}^2/\text{秒} = 100 \text{ 厘斯}。$$

相对粘度——一种流体的粘度与同温度下水的粘度之比。

恩氏粘度——在标准的恩氏粘度计中，在 $t^\circ\text{C}$ 时经小孔流出200毫升某液体与在同一仪器中于 20°C 时流出同体积的水所需时间的比。以E表示。

恩氏粘度较易测得，其与绝对粘度的换算关系如下：

$$\mu = \left(7.24E - \frac{6.25}{E} \right) \frac{\gamma}{g \times 10^6} \text{ 公斤} \cdot \text{秒}/\text{米}^2。$$

式中 γ ——流体重度；

g ——重力加速度。

例1-1：

已知某油品在 210°C 时的绝对粘度为6.6厘泊，比重 $d_4^{210} = 0.89$ ，问此时该油品的工程单位运动粘度是多少？

解：应用公式 (1-11)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma}$$

先把 μ 换算成工程单位

$$\mu = \frac{6.6}{9810} = 6.74 \times 10^{-4} \text{ 公斤} \cdot \text{秒}/\text{米}^2$$

$$\text{求 } \gamma \quad \because d = \frac{\gamma_{\text{油}}}{\gamma_{\text{水}}}, \text{ 而所给比重为油品在 } 210^\circ\text{C} \text{ 时的重度与 } 4^\circ\text{C} \text{ 时}$$

水的重度之比，已知水在 4°C 时其重度为 $1000 \text{ 公斤}/\text{米}^3$ ，

$$\therefore \gamma_{\text{油}} = d_4^{210} \gamma_{\text{水}} = 0.89 \times 1000 = 890 \text{ 公斤}/\text{米}^3。$$

求 ν

$$\nu = \frac{\mu g}{\gamma} = \frac{6.74 \times 10^{-4} \times 9.81}{890} = 7.43 \times 10^{-6} \text{ 米}^2/\text{秒}。$$

无缔合现象的液体混合物的粘度可按下列式计算：

$$\log \mu_{\text{混合物}} = m_1 \log \mu_1 + m_2 \log \mu_2 + m_3 \log \mu_3 + \dots$$

式中 μ_1, μ_2, μ_3 ——各组成物的绝对粘度；

m_1, m_2, m_3 ——混合物中各组成物的克分子浓度。

气体混合物的粘度可用下列式计算：

$$\frac{1}{\nu_{\text{混合物}}} = \frac{m_1}{\nu_1} + \frac{m_2}{\nu_2} + \frac{m_3}{\nu_3} + \dots \quad (1-12)$$

式中 ν_1, ν_2, ν_3 ——各组成物的运动粘度、

m_1, m_2, m_3 ——混合物中各组成物的克分子分数或体积分数。

液体的粘度随温度的升高而减小，气体的粘度随温度的升高而增大，它们之间的关系可通过液体或气体的粘度-温度曲线或图表查出。对于气体亦可用下式计算：

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}$$

式中 T ——绝对温度 $^{\circ}\text{K}$ ；

μ_0 ①—— 0°C 时的粘度；

C ②——常数。

例1-2：炉气的成分按容积为： CO_2 ——16%， O_2 ——5%， N_2 ——79%，试计算该气体的粘度。已知该气体的温度为 400°C ，压力为1工程大气压。

解：该气体的粘度可依公式（1-12）进行计算。

1) 从温度粘度曲线图③中求出各组成气体的粘度： $\mu_{\text{CO}_2}^{400^{\circ}\text{C}} = 0.035$ 厘泊； $\mu_{\text{O}_2}^{400^{\circ}\text{C}} = 0.03$ 厘泊；

$\mu_{\text{N}_2}^{400^{\circ}\text{C}} = 0.0335$ 厘泊。

2) 400°C 时各组成气体的重度为：

$$\gamma_{\text{CO}_2} = \frac{44 \times 273}{22.4 (273 + 400)} = 0.8 \text{ 公斤/米}^3。$$

同理 $\gamma_{\text{O}_2} = 0.58 \text{ 公斤/米}^3$ ； $\gamma_{\text{N}_2} = 0.51 \text{ 公斤/米}^3$ 。

3) 依公式（1-11），即 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ，算出各气体的运动粘度。

$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{800}{1000,000} \text{ 克/厘米}^3 = 0.0008 \text{ 克/厘米}^3$ ； $\rho_{\text{O}_2} = 0.000672 \text{ 克/厘米}^3$ ； $\rho_{\text{N}_2} = 0.000652 \text{ 克/厘米}^3$ 。

$$\nu_{\text{CO}_2} = \frac{0.00035}{0.0008} = 0.438 \text{ 厘米}^2/\text{秒}；\nu_{\text{O}_2} = 0.672 \text{ 厘米}^2/\text{秒}；\nu_{\text{N}_2} = 0.652 \text{ 厘米}^2/\text{秒}。$$

4) 应用公式（1-12）可得：

$$\frac{1}{\nu_{\text{炉气}}} = \frac{0.16}{0.438} + \frac{0.05}{0.672} + \frac{0.79}{0.652} = 1.650，$$

$$\nu_{\text{炉气}} = \frac{1}{1.650} = 0.606 \text{ 厘米}^2/\text{秒}。$$

5) 炉气的重度为：

$$\gamma_{\text{炉气}} = 0.8 \times 0.16 + 0.05 \times 0.58 + 0.79 \times 0.51 = 0.56 \text{ 公斤/米}^3。$$

6) 求出所述温度下炉气的粘度为：

$$\mu = \frac{\nu \gamma}{g} = \frac{0.606 \times 10^{-4} \times 0.56}{9.81} = 0.0346 \times 10^{-4} \text{ 公斤·秒/米}^2$$

或 $\mu = 0.0346 \times 10^{-4} \times 9810 = 0.0339$ 厘泊。

二、流体静力学基本方程式

①，② μ_0 ， C 值可由一般化工计算手册中查得。③查П.П.罗曼科夫主编“化工原理习题（1953年商务印书馆出版，P400、图95）。

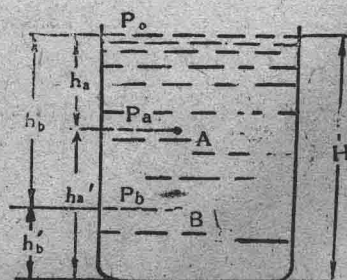


图 1—1 液体静力学
基本方程式推导

1. 方程式的得出

有一内盛液体的容器（图 1—1）；底面所受液体的总压力为该液体的总重量，即 $G = \gamma HF$ (F 为底面积)，其压强为

$$p = \frac{G}{F} = \frac{\gamma HF}{F} = \gamma H。$$

对于液体内任一点的压强此公式仍适用，即液体中某点所受液体的压强仅与此点距液面的高度 (H) 和该液体的重度 (γ) 有关。

今取液体中距液面分别为 h_a 和 h_b 的两点 A 和 B ，其与底的距离分别为 h_a' 和 h_b' ，于是 A 、 B 两点所受液体的压力分别为：

$$p_A = \gamma h_a$$

$$p_B = \gamma h_b$$

解出 h_a 和 h_b ，

$$h_a = \frac{p_A}{\gamma}$$

$$h_b = \frac{p_B}{\gamma}$$

$$\therefore h_a + h_a' = h_b + h_b' = \text{常数} (H)$$

$$\therefore \frac{p_A}{\gamma} + h_a' = \frac{p_B}{\gamma} + h_b' = \text{常数} (H) \quad (1-13)$$

这一结果说明：液体中任一点所受上方液柱的静压强与该液体重度之比与由此点到器底的距离的和为一常数。此即所谓流体静力学基本方程式。式中 $\frac{p}{\gamma}$ 为长度单位，相当于所论点到液面的高度，一般称为液压高度或压头。

由公式 (1—13) 解出 p_B (或 p_A)：

$$p_B = p_A + \gamma (h_a' - h_b')。 \quad (1-14)$$

若液体中各点的位置不变 [即公式 (1—14) 中 $\gamma (h_a' - h_b')$ 项不变]，其中任一点 (如 A 点) 的压强 p_A 改变时，则由 (1—14) 式可知另一点 B 点的压强 (p_B) 必同样改变，这一规律称为巴斯噺定律。连通器 (见图 1—2) 即此规律的实际应用。

在以上的讨论中，所用均为表压强；如用绝对压强，则所有的 p_A 与 p_B 均应加上液面所受的大气压强 p_0 ，即：

$$P_A = p_0 + p_A = p_0 + \gamma h_a。$$

2. 连通器 流体静力学基本方程式可用以解释液体在连通器内的平衡状况。

设有两个开口的彼此连通的容器——连通器 (图 1—2)，其中盛着液体。

1) 当器内盛着同一种重度为 γ 的液体和液面上的压强 $p_a = p_b$ 时，在连通器内任一水平面 $C-C'$ 上于 A 器内和 B 器内各取一点 O_A 和 O_B ，它们所受的压强为：

$$p_{O_A} = p_a + \gamma h_a$$

$$p_{O_B} = p_b + \gamma h_b$$