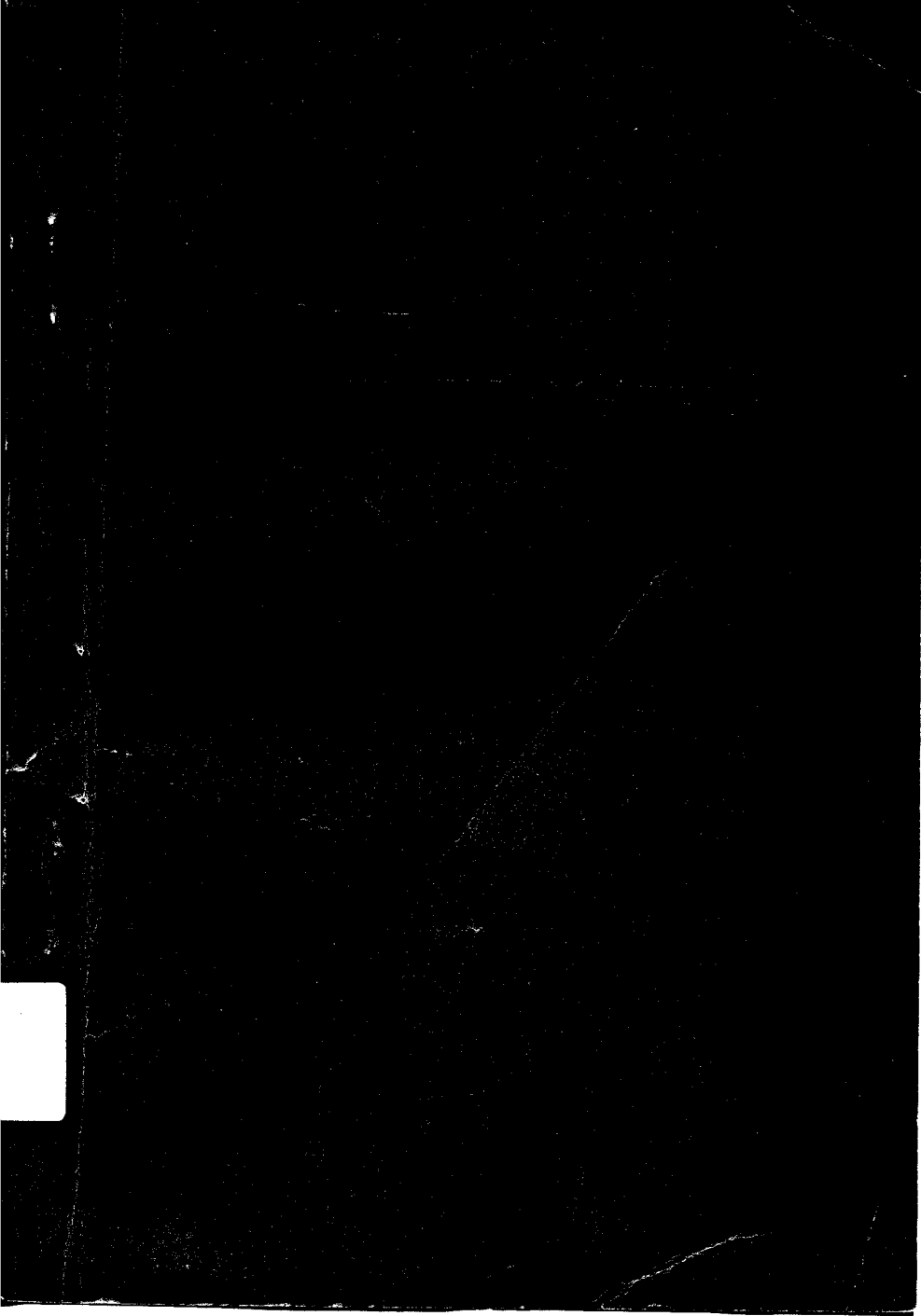




内 容 提 要

《单元操作原理》一书分三篇共十八章，系统地论述了轻工、化工生产中各单元操作的原理和应用。第一篇流体动力过程，内容是绪论、流体力学原理、流体输送、气态非均相物系分离、液态非均相物系分离、固体流态化。第二篇热过程，内容是导热和辐射原理、对流传热、传热设备、内部热源和不稳定导热、蒸发。第三篇：传质过程，内容是传质过程导论、蒸馏和精馏、萃取、吸收、传质设备、干燥。书中还在最后编著了轻工生产中常用的气力输送和结晶。

本书可供高等工业院校本科轻工、化工专业（如食品、发酵、造纸、塑料、轻机、日化、盐化、轻工自动化）教学用书，也可供上述专业的研究、生产、设计单位技术人员参考。书中*号内容，教学时可作为选学内容。

*

*

*

轻化工单元操作原理

刘澂等编著

责任编辑 陆其科 左秉坚

*

学术书刊出版社出版（北京海淀区学院南路86号）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

天津瑞华印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：14.75 字数：316千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷

印数：2000册 定价9.50元

ISBN 7—80045—595—5/TQ·1

序

《轻化工单元操作原理》一书是结合轻工、轻化工特点编写的一本好书。

全书分十八章编写，书中内容针对轻工、轻化工的特点，在流体输送一章中加强了离心泵离角的讨论，和离心泵，通风机串、并联管路计算及工作点的内容。在第九章中应塑料成型的需要编写了不稳态导热的内容。

又由于在发酵、食品、精细化工工业中，常用浮阀塔，筛板塔，在十五章中对这类塔的设计做了较详细的介绍，作者还将他们的科研论著有针对性地引入书中。

总之，本书虽是一本化工单元操作的著作，但由于是结合轻工，轻化工的特点编写的，所以对于从事轻工，轻化工等领域工作的教师、技术工作者以及学生大有裨益，是一本很难得的好书。和一切事物一样，这本教材也不会是尽善尽美的，希望作者们在现有良好的基础上，进一步提高本书的质量，在内容的取舍上尽量使其结合轻工，轻化工的特点。这些话都是后话，是今后努力的方向。我热烈祝贺本书问世，她为单元操作增添了新鲜血液。

全国化工原理教学指导委员会副主任委员 天津化工过程及设备技术研究会名誉理事长 天津大学化工系教授

王绍亭 1989. 8. 10

前 言

本书是作者在轻工、化工院校长期的教学, 科研工作中, 根据教学实践中的体会, 经验和科研中的成果首次为轻、化工专业编著的高校本科教学用书, 也可供轻、化工科研、生产、设计技术人员作为参考用书。

本书对下列专业尤为适用, 即食品、发酵、塑料、造纸、轻工机械、盐化、精细化工、日用化工、轻工自动化及相关的化工专业。本书为塑料、造纸、食品、轻机及自动化专业增写了具有内热源及不稳定导热内容; 为发酵、食品、造纸、日化、精细化工、轻机专业增写了浮阀式和筛板式的精馏塔设计。

本书由三篇组成; 共分十八章, 参加编著人员分工(按篇、章次序排列): 全书由刘激任总编, 第一篇由刘激主编, 第二篇由芦淑珍主编, 第三篇由刘佩茹主编。绪论、第一、二、八、十四、十五、十七章刘激, 第三章杨洪珍, 第四章徐善述, 第五章吴礼刚, 第六章芦淑珍, 第七章庞金钊, 第九章薛健, 第十和十六章张恺瑞, 第十一章陈金鏢, 第十二章刘佩茹, 第十三章邓宇, 第十四章张建伟, 第十八章左秉坚、李宝存、附录及部分章节习题刘激。

本书聘请天津化工过程及设备研究会第一副理事长, 天津理工学院教授蒋靖和天津轻工业学院教授, 技术科学副博士包志泉负责审稿。天津轻工业学院化工系主任邬义明教授、赵鸣山副教授, 天津大学化工系柴诚敬副主任, 天津轻工业学院化工系党总支焦文田书记, 天津碱厂总工程师陈跃汉和禹振环高级工程师、天津大沽化工研究所所长韩玉墀高级工程师的热情支持, 谨此表示感谢。

编著者学识有限, 书中不足欠妥之处, 望读者指正。

前 言

本书是作者在轻工、化工院校长期的教学, 科研工作中, 根据教学实践中的体会, 经验和科研中的成果首次为轻、化工专业编著的高校本科教学用书、也可供轻、化工科研、生产、设计技术人员作为参考用书。

本书对下列专业尤为适用, 即食品、发酵、塑料、造纸轻工机械、盐化、精细化工、日用化工、轻工自动化及相关的化工专业。本书为塑料、造纸、食品、轻机及自动化专业增写了具有内热源及不稳定导热内容; 为发酵、食品、造纸、日化、精细化工、轻机专业增写了浮阀式和筛板式的精馏塔设计。

本书由三篇组成; 共分十八章, 参加编著人员分工(按篇、章次序排列): 全书由刘澂任总编, 第一篇由刘澂主编, 第二篇由芦淑珍主编, 第三篇由刘佩茹主编。绪论、第一、二、八、十四、十五、十七章刘澂, 第三章杨洪珍, 第四章徐善述, 第五章吴礼刚, 第六章芦淑珍, 第七章庞金钊, 第九章薛健, 第十和十六章张恺瑞, 第十一章陈金鏢, 第十二章刘佩茹, 第十三章邓宇, 第十四章张建伟、第十八章左秉坚、李宝存、附录及部分章节习题刘澂。

本书聘请天津化工过程及设备研究会第一副理事长, 天津理工学院教授蒋靖和天津轻工业学院教授, 技术科学副博士包志泉负责审稿。天津轻工业学院化工系主任郭义明教授、赵鸣山副教授, 天津大学化工系柴诚敬副主任, 天津轻工业学院化工系党总支焦文田书记, 天津碱厂总工程师陈跃汉和禹振环高级工程师、天津大沽化工研究所所长韩玉墀高级工程师的热情支持, 谨此表示感谢。

编著者学识有限, 书中不足欠妥之处, 望读者指正。

目 录

第一篇 流体动力过程.....	(1)
绪 论.....	(1)
第一章 流体力学原理.....	(5)
第一节 流体主要特性.....	(5)
第二节 流体流动的基本方程.....	(9)
第三节 流体流动的性质.....	(27)
第四节 流体流动时的阻力.....	(36)
第五节 管路的计算和布置.....	(47)
第二章 流体输送.....	(60)
第一节 泵的分类.....	(60)
第二节 离心泵.....	(61)
第三节 通风机和真空泵.....	(89)
第三章 气态非均相物系分离.....	(99)
第一节 重力沉降.....	(100)
第二节 离心沉降.....	(107)
第四章 液态非均相物系分离.....	(119)
第一节 过滤.....	(119)
第二节 离心机.....	(140)
第五章 固体流态化.....	(145)
第一节 基本概念.....	(145)
第二节 流化床特征的物理量.....	(151)

第二篇 热过程	(158)
第六章 导热和辐射	(158)
第一节 导热的基本概念.....	(158)
第二节 付立叶定律.....	(159)
第三节 无内部热源的一维稳定导热.....	(159)
第四节 热辐射.....	(163)
第七章 对流传热	(174)
第一节 对流传热系数关联式.....	(174)
第二节 冷凝和沸腾传热.....	(184)
第三节 间壁传热计算.....	(194)
第八章 传热设备	(207)
第一节 换热器构造.....	(207)
第二节 列管换热器的分析.....	(214)
第三节 换热器的选用及计算.....	(217)
第九章 导热方程和不稳定导热	(226)
第一节 付立叶—克希可夫方程.....	(226)
第二节 不稳定导热的数值解法.....	(231)
第十章 蒸发	(236)
第一节 概述.....	(236)
第二节 单效蒸发.....	(238)
第三节 多效蒸发.....	(246)
第四节 蒸发设备简介.....	(260)
第五节 蒸发器的生产强度.....	(263)
第三篇 传质过程	(266)
第十一章 传质过程导论	(266)
第一节 基本概念.....	(266)

第二节	相际平衡.....	(266)
第三节	扩散原理.....	(271)
第十二章	蒸馏和精馏.....	(286)
第一节	概述.....	(286)
第二节	蒸馏及精馏原理.....	(287)
第三节	双组分连续精馏塔的计算.....	(296)
第十三章	萃取.....	(312)
第一节	液—液萃取.....	(312)
第二节	固—液萃取.....	(325)
第十四章	吸收.....	(331)
第一节	概述.....	(331)
第二节	吸收理论.....	(332)
第三节	吸收塔计算.....	(338)
第十五章	气液传质设备.....	(358)
第一节	板式塔特点.....	(358)
第二节	板式塔的水力学性能.....	(359)
第三节	塔板主要结构参数.....	(372)
第四节	塔板操作条件分析.....	(377)
第五节	板式塔负荷性能图.....	(389)
第六节	塔设计要素.....	(395)
第十六章	干燥.....	(396)
第一节	湿空气性质及其图示.....	(397)
第二节	对流干燥设备的物料衡算及热量衡算...	(408)
第三节	干燥速度和干燥时间.....	(415)
第四节	干燥设备.....	(428)
第十七章	气力输送.....	(431)

第一节	概述.....	(431)
第二节	气力输送的基本特征.....	(432)
第三节	气流输送的流体力学性质.....	(433)
第十八章	结晶.....	(441)
第一节	结晶过程及计算.....	(441)
第二节	晶核形成.....	(447)
第三节	晶体生长.....	(454)

第一篇 流体动力过程

绪 论

轻工、化工、石油、精细化工等生产过程中，加工过程复杂多样。在长期从事上述的工业生产实践里，人们把多样的行业生产过程中，所共同具有的基本操作过程，诸如流体的输送、沉降、过滤、传热、蒸发、蒸馏、吸收、萃取、干燥等等抽提出来，这些操作过程属于基本的物理过程，工程中称为单元操作，习惯上亦称化工原理或化学工程。

一、单元操作原理的性质和内容

单元操作在工业生产中是极为普遍和重要的，若干单元操作串联组合则可构成一个完整的工艺制造过程。

单元操作原理主要是研究单元操作中的基本原理、工艺设备的计算、造型或设计，为工业生产、设计、科研工作中达到强化生产过程、提高生产效率、降低原材料、能源的消耗和设备的投资、防止污染和使生产过程安全可靠提供理论依据。

本书是首次为轻工、轻化工及化工方面编著的教材。编著者们长期甚至一生中从事轻工、化工专业的教育，深感为造纸、塑料、发酵，食品、精细化工、轻工业机械及其自动化等专业的高校本科学生编著一本较为实用书籍的重要，做了此次的尝试，以少而精、理论与实践结合的原则，分别叙述下列三方面的内容：

(一) 流体动力学 (第一篇)

研讨流体流动和与之触及的固相物体的运动时的规律, 涉及此方面的单元操作有: 流体流动原理、流量测量与管路系统、液体输送、气体输送、气相非均系分离、液相非均系分离。

(二) 热过程 (第二篇)

研讨传热的规律, 涉及此方面的单元操作有: 传热原理、传热设备计算、蒸发。

(三) 传质过程 (第三篇)

研讨物质传递过程中的规律, 涉及此方面的单元操作有: 蒸馏、吸收、萃取、干燥。

本书特点是: 鉴于学习者的接受能力, 取材不过于庞杂, 与物理学相关的内容力图于精简和承前启后, 决不重复。例题与工程实际吻合, 每章后尽力用一小型设计例 (或较大的综合计算例) 说明操作原理在工程实践中的应用。为适合塑料成型、造纸和轻工机械专业的需要, 加入了导热微分方程和不稳定导热, 对食品发酵专业加入了浮阀塔设计; 对映了轻工专业特色。

二、单位和单位换算

(一) 单位

本书根据《中华人民共和国计量单位名称与符号方案》, 采用国际单位制。

国际单位制共规定了七个基本单位, 长度单位 m (米)、时间单位 s (秒)、质量单位 kg (千克)、热力学温度单位 K (开尔文)、电流单位 A (安培)、物质质量单位 mol (摩

尔)、光强度单位cd(坎德拉)。国际单位制,其国际符号为SI。

查阅科技文献过程中,由于历史和地区的不同,还会接触到其它不同的单位制如:物理单位制(CGS制)其长度单位是cm、时间单位是S、质量单位是g;工程单位制其长度单位是m、时间单位是S、力的单位是kgf。

SI制还规定了以下几个方面:

1. 有一套词冠来表示单位的倍数或分数(代号应用正体,词冠代号和单位代号之间不留间隔,如km(千米)、mm(毫米))。表示的方法是:M表示兆(10^6)、K表示千(10^3)、h表示百(10^2)、da表示十(10)、d表示分(10^{-1})、c表示厘(10^{-2})、m表示毫(10^{-3})、 μ 表示微(10^{-6})。

2. 有二个辅助单位:A. 平面角它的单位是弧度,代号为rad, B. 立体角其单位是球面度,代号为sr。

3. 与SI单位并用的单位:时间采用日(d)、小时(h)、分(min);质量单位采用吨(t);容积采用升(l);平面角采用度($^{\circ}$)、分(')、秒(")。

(二) 单位换算

以压强为例, 1 atm的压强和10.332mH₂O的压强是两个相等的物理量, 写成等式形式:

$$1 \text{ atm} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O}$$

再写成下列形式

$$10.33 \text{ mH}_2\text{O} / 1 \text{ atm} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} / \text{atm}$$

上式中, 表示了彼此相等而各有不同单位的两个物理量之比, 称之为换算因数(参见附录)。换算因数表明了物

理量在单位转换方面的特性。

由此可见，物理量由一种单位换成另一单位时，量本身不变，但数值要变，换算时要乘以两单位间的换算因数。

例 1、将 $760\text{mmHg}=1.0332\text{kgf/cm}^2$ 换算成 SI 单位。

〔解〕利用附录中的数据：

$$1\text{kgf}=9.81\text{N} \quad 1\text{cm}=1/100\text{m}$$

$$\begin{aligned} \text{得出 } 760\text{mmHg} &= 1.033 (\text{kgf/cm}^2) (9.81\text{N}/1\text{kgf}) \\ &\quad (100\text{cm}/1\text{m})^2 \\ &= (1.033 \times 9.81 \times 100^2) (\text{kgf} \times \text{N} \times \\ &\quad \text{cm}^2/\text{cm}^2 \times \text{kgf} \times \text{m}^2) \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{N/m}^2 = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} \end{aligned}$$

第一章 流动力学原理

第一节 流体主要特性

一、流体特征

液态和气态物质总称流体。液体分子间距较气体小，压力或温度改变时其密度改变很小，一般可忽略不计，工程上称为不可压缩流体。气体则不然，其分子间距较液体大，当压力或温度改变时其密度显著变化，称为可压缩流体。

流体力学从宏观角度研讨流体的运物规律，假设流体是由大量分子构成的集团（即质点）组成的连续介质，即代表流体物理性质的物理参数连续可微，这些质点的尺寸与设备（容器或管道）尺寸相比微不足道，据此假设研讨出的流体力学规律，已通过生产实践证实在工程中是可行的，但在高度真空下的气体和在 $1\mu\text{m}$ 以下空间（容器或管道）的常压气体，由于气体分子主要是与容器碰撞，气体分子间很少互相碰撞，则各项物理参数如粘度等都失去通常的意义，此时就不能视为连续介质。

二、密度、比容和重量

（一）密度 对于均匀流体，单位体积所具有的质量称为密度。

$$\rho = m/V \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-1)$$

式中 m 为流体质量， kg ； V 为流体体积， m^3 。

(二) 重度 对于均匀流体, 单位体积的重量称为重量称为重度。

$$\gamma = G/V \quad \text{kgf/m}^3 \quad (1-2)$$

式中 G 为流体重量, kgf ; V 为流体体积, m^3 。

重度用工程单位是 (千克(力)/米³)。工程单位表示的重度与国际单位表示的密度在数值上相等, 但二者的物理意义完全不同。密度和重度的关系, 如同质量和重量的关系:

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

(三) 比容 流体密度的倒数称比容, 对于均匀流体, 比容表示为:

$$v = V/m \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-4)$$

三、压力 (压强)

流体垂直作用于单位面积上的力称压强, 习惯上压强也称压力, 作用于整个面积上的力称总压力, 压强的表达式为:

$$p = P/A \quad \text{N/m}^2 \quad (1-5)$$

式中 p 为流体压强, N/m^2 ; P 为垂直作用于流体表面上的总压力, N ; A 为作用面的面积, m^2 。

国际单位制中压强单位是 N/m^2 , 称帕斯卡 Pa , 但工程中有许多其它单位制的单位, 应用又非常广泛, 如标准大气压 (atm)、工程大气压 ($1 \text{工程大气压} = 1 \text{kgf/cm}^2$)、 kgf/cm^2 、水柱高度、汞柱高度, 它们的换算关系见附录。

压强的表示方法, 还有下列几种, 它们的定义, 换算关系, 请读者熟练掌握。

(一) 绝对压强 以绝对零压作计算起点的压强称为绝对压强。

(二) 表压强 被测流体的绝对压强比外界大气压强高出的数值称为表压强。

$$\text{表压强} = \text{绝对压强} - \text{大气压强}$$

(三) 真空度 被测流体的绝对压强低于大气压强的数值，称为真空度。

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强}$$

值得注意的是：

1. 外界大气压强随所在地区海拔高度、温度、湿度有关，计算时尤应注意，记录真空度时还要注出当地大气压，若没有注出，大气压即认为等于1标准大气压。

2. 对压强的不同表示方法，在具体数字后，应注明压强形式如300mm—Hg（真空度）；1000N/m²（表压）。

四、粘度和流度

(一) 粘度 实际流体在流动时，必然有内部摩擦力产生。这内部摩擦力以剪应力形式存在。如流体在圆管中流动时，可将流体按流速大小分成若干层（一定条件下，分成若干同心圆层），若某层流体质点的流速为 u ，在极小垂直距离 dy 处，相邻层流体质点的流速为 $u + du$ ，则按牛顿粘性定律知：

$$\tau = \mu \cdot du/dy \quad (1-6)$$

式中 τ 为剪应力强度，N/m²； du/dy 为两层流体质点与流动方向垂直的速度梯度（1/s）； μ 为内摩擦力系数，N·S/m²又称粘度，粘度因流体不同而异。粘度还有称为

粘滞系数或动力粘度的。若将粘度除以密度 ρ 即 μ/ρ ，称为运动粘度， m^2/S 。

某些流体粘度，可从附录查出，常用粘度单位有下列二种：

国际单位制

$$\begin{aligned} [\mu] &= [\tau] / [dv/dy] = (\text{N}/\text{m}^2) / [(\text{r}/\text{s})/\text{m}] = \text{N} \cdot \text{S}/\text{m}^2 \\ &= \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

物理单位制：

$$\begin{aligned} [\mu] &= [\tau] / [dv/dy] = (\text{dyne}/\text{cm}^2) / [(\text{cm}/\text{s})/\text{cm}] \\ &= \text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = \text{g}/\text{cm} \cdot \text{s} = \text{P}[\text{泊}] \end{aligned}$$

通常采用厘泊（cP），100厘泊=1泊

下列又是单位换算的一例，今后的计算中，往往由附录（或手册）查出的数据单位是厘泊（cP），而计算时采用同一单位制，将厘泊换算成国际单位制（ $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ），必须熟记换算的方法和结果。

$$\begin{aligned} 1 \text{ cP} &= 0.01 \text{ dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = (1/100) \cdot (1/10^6) \text{ N} \cdot \text{s}/ \\ & (1/100)^2 \text{ m}^2 = 1/10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

（二）流度 粘度的倒数称流度。

五、本节注意事项

（一）计算时，用同一种单位制列出计算式，不能将用各种单位表示的量混用在一个算式中；

（二）从附录中查取数据时，要注意所需的温度、压力、浓度等条件，初学者最易发生此类疏忽。

（三）各物理量间的关系，如比容是密度的倒数，即 $v=1/\rho$ ，单位间的关系 $1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ，要熟记。