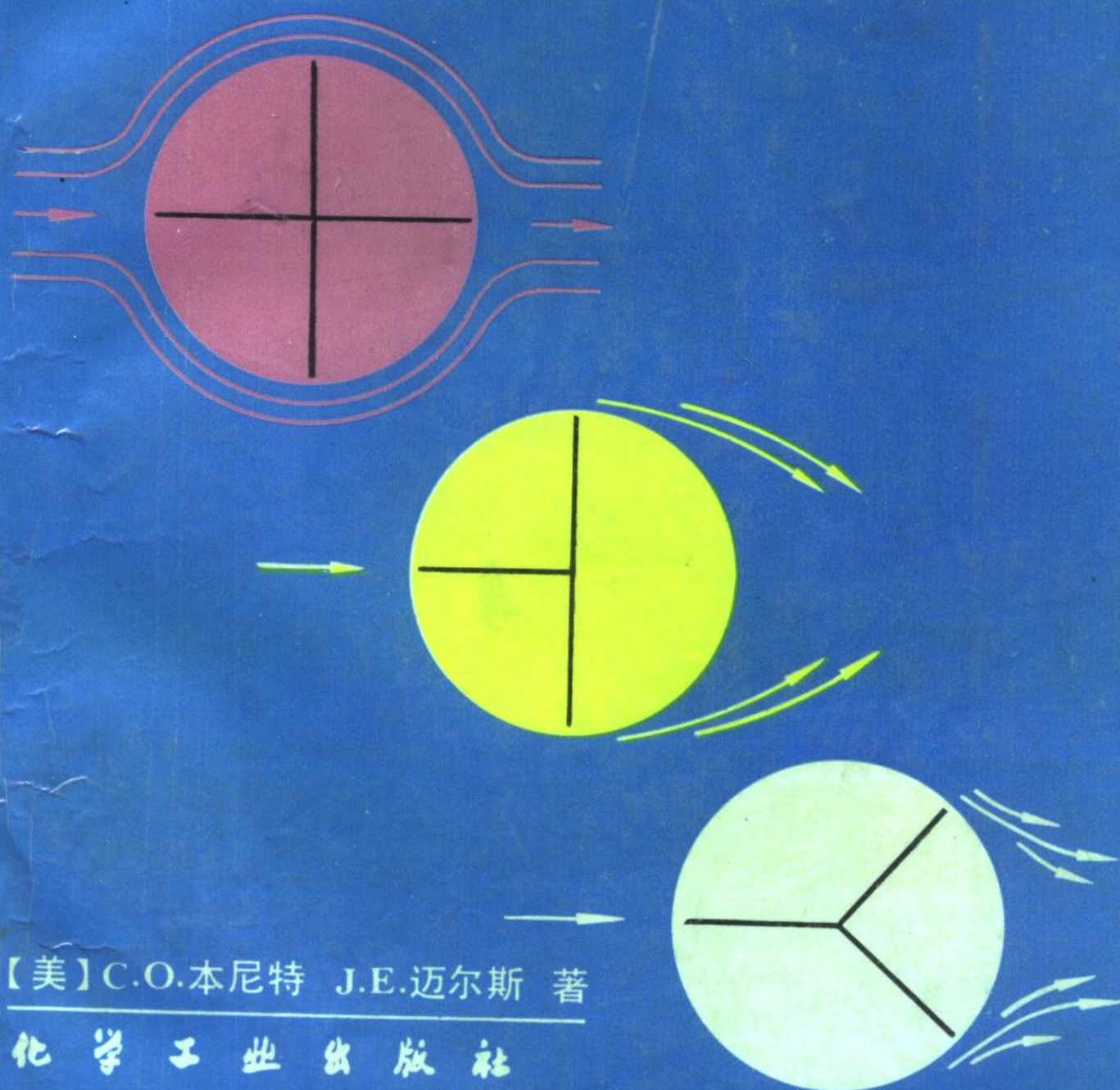


动量 热量和质量传递

第三版



【美】C.O.本尼特 J.E.迈尔斯 著

化学工业出版社

动量 热量和质量传递

第 三 版

〔美〕 C.O.本尼特 J.E.迈尔斯 著

张统潮 陈岚生 译

王绍亭 校

化学工业出版社

内 容 提 要

本书是根据C. O. Bennett和J. E. Myers所著“Momentum, Heat, and Mass Transfer”一书的第三版(1982年版)译成的。

本书是将三传理论与单元操作结合起来的大学本科教材,全书分为动量传递(流体动力学)、热量传递,质量传递三篇,共四十章。各篇中即有理论叙述,又有实用探讨。各章都列有大量的例题和习题,可以帮助读者加深对内容的理解和应用。

本书中,国际单位制(SI)与美制单位(U. S. Unit)并用,并附有单位换算表,供读者演算习题时使用。

本书选材广泛,深度适中。即可作为化工及其有关专业的本科生、研究生的教学参考书,又可作为在有关领域从事科研、设计和生产工作的科技人员的参考读物。

陈岚生译第二章至第二十五章;张统潮译了序,第一章,第二十六章及第二十八章至第四十章和附录;王绍亭译了第二十七章,并对全书作了详细的审校。

C. O. BENNETT J. E. MYERS
Momentum, Heat, and Mass Transfer

Third Edition
McGRAW-HILL BOOK COMPANY
New York 1982

动量 热量和质量传递

第 三 版

张统潮 陈岚生 译

王绍亭 校

责任编辑:陈 丽

封面设计:任 辉

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $34^{1/4}$ 字数855千字

1988年10月第1版 1988年10月北京第1次印刷

印 数 1—2100

ISBN 7-5025-0118-5/TQ·80

定 价8.90元

第 二 版 序

本书是作为学习动量、热量和质量传递的一本大学教科书而编写的。它不是一部完整的专论，所以无论在理论方面还是实际方面我们并不要求这门被探讨的宽广学科能够包括它的一切方面，而是力图对该学科领域里的理论和应用方面的最重要部分，特别详细、严格而又有条理地加以论述。

由于书中所包括的学科领域如此广泛，所以本书只能起着入门的作用。如果学生想要学习更多的内容，可继续学习流体动力学、热量传递、质量传递以及单元操作方面的专业课本。但是鉴于目前工科学生要学习的课目如此繁多，所以我们认为编写一本在一年内可以学完的传递过程统编入门课本是很有必要的。我们力图对传递过程的大部分重要内容都加以论述，此外还提供足够详细的资料，以使读者有可能利用所给出的资料求解典型题目。

在本书中，作为理论的应用，我们介绍了各单元操作，还指出了工程师在过去一直使用的关联式的基础知识，以期在将来需要的时候，让他们自己也能提出新的关联式。本书不仅仅是为那些成绩最优秀的学生或将要上研究生院的学生编写的，也是为最终要参加工作的全体学生编写的。在他们工作中，目前还没有其它的书籍能起到基本理解传递过程的作用。尽管本学科内容的构成是建筑在理论基础之上，但我们仍然期望学生能够应用本书，将科学原理应用于具体的实际情况中去，能够由手册中找到数据，能够理解工程术语，还能够求得问题的数值解。

现今已有许多书籍，对各种各样的过滤器、蒸发器以及其它过程设备作了冗长的描述，并附有大量的图片。尽管我们已使用了足够多的图和照片来阐明本学科的内容，但是为了查明设备和经验关联式的细节，仍建议读者查阅Perry编写的《化学工程师手册》。

随着对各工程领域理解的深化，各学科之间的差异也会越来越小。虽然作者一直研究化学工程方面的问题，但我们仍然期望本书作为一门课程，能在所有其它动量、热量与质量传递领域中介绍给工程师们。本书在对流体动力学和热量传递的处理方法中，介绍了一些基本概念和定律，这些概念和定律是所有工程师都应该知道的。对质量传递篇的学习，在过去几乎完全局限在化学工程师的范围中。而如今，其它领域的工程师对质量传递的兴趣也大大增加。按我们的看法，这些工程师如果能够对质量传递有和动量、热量传递同等程度的知识，他们将会由此得到好处。

本书的编写原则是基于读者已具有热力学，微积分和常微分方程方面的基础知识。在本书的正文中，未使用向量符号，但在附录中，重要的方程则以简练的算符表达。因而，教师或读者可自行选择基本公式的表达方式。

本书的全部内容和选作习题大约需125学时，即作为两学期每周4学时的课开设。如果热力学和物理化学课程可以提前安排，则本门课程可延续至第三学年（四年制大学）。如果课程内容作两学期每周3学时的课安排，此时若干章节可作定性的论述或删除，这样做并不会影响连贯性。例如：第一篇“流体动力学”中的微分衡算和湍流速度分布等章节就可以这样处理。学科内容的种种选择意见，应该由有资格的教师提出，我们不便擅自向他们提出最适合于学生情况的细目。

本书之有今日,是多年来与许许多多同事和学生相互交流的结果,对他们的名字这里不再一一列举。当他们读到这个版本时,我们相信他们会证实我们已多处采纳了他们的建议。

C. O. 本尼特

J. E. 迈尔斯

第三版序

本书的第三版是为了对在课堂讲授传递过程的教师在部分使用国际单位制 (SI) 时有所帮助而编写的。虽然有人赞成立即放弃过去的工程单位制, 但我们还是认为有充分理由说明为什么学生应同时接受使用传统的工程单位制和 SI 单位制的教育。单位磅 (力)、磅 (质) 和英尺已深深地留在我们的文化中, 并且可能在今后的一段时间内仍然如此。对于大多数学生而言, 既使不增加他们由于完全采用陌生单位表达运算结果而带来的困难, 单就学习采用数学式来表达工程问题来说已经是够困难的了。所有工科一年级学生很可能都见过压力表, 他们对 1 磅力和 1 平方英寸的大小都会有一些概念, 但很少有人见到过读数以帕斯卡 (Pascal) 单位表示的仪表, 而且在今后一段时间内, 多数人也不见得会看到这样的仪表。我们认为: 工科学生开始学习“传递过程”时, 重要的是希望他们能够尽快地取得问题的数值答案, 以便使他们开始就能养成严格估算答案值的习惯。如果答案能表示成具有某些意义的单位, 这就是最好的了。

本书中仅将部分单位转换为 SI 单位的第二个理由是: 目前大多数工程数据资料仍以传统的工程单位表示, 因此在今后的一段时间里, 工程师们必须能够做到由一种单位制迅速转换成另一种单位制。如果我们的学生不能掌握两种单位制, 他们就会对我们有意见。

在本书的公式推导中, 我们选择了继续使用美国化学工程计算中所惯用的因次常数 g_c 。如果学生记住在 SI 制中 $g_c = 1$, 且无因次, 则使用 SI 单位制将不会带来任何麻烦; 然而在使用另一个单位制时, 上述的因次常数仍然是不可少的。在本书的大多数章节中, 第一个例题仍使用工程单位, 而在第二个例题和以后每相隔一道例题中则转换成 SI 单位。在流体力学和热量传递篇中, 大约有半数的习题已经改用 SI 单位制陈述。然而, 在质量传递篇中大多数习题仍保留原样未变。未改动的主要原因是改动的价值不大。在质量传递篇中, 许多量仍然保留非 SI 单位制的米制单位, 其原因是由于从资料查到这些量的数值都是以米制单位表示的。

在本版中, 我们几乎未作其它改动。不管是使用传统的单位制还是 SI 单位制, 我们对所有度量单位的缩写词都作了更新, 以便与美国国家标准研究所 (ANSI) 推荐的通用符号一致。譬如, 以前的 sec 现改为 s, 以前的 hr 现改为 h。此外, 我们还对参考文献作了一些更新; 为了反映比较近代有兴趣的问题以及反映解决某些问题的新方法, 对少数章节也作了重新修改。总的说来, 本书所采用的讲授传递过程的方法, 至今大家还是很感兴趣的。以前的版本, 在国外已有五个国家采用三种外国语言出版过。我们仍然相信: 通过应用理论解决实际工程问题的办法来完整而统一地学习传递过程中重要的物理基础知识和数学基础知识, 是培养工程师的最好方式。

C. O. 本尼特, J. E. 迈尔斯

附表 常用的美制单位与SI单位间的换算因子

美 制 单 位	以SI单位表示的换算值
埃 (angstrom)	0.1nm
标准大气压 (atmosphere)	101.325kPa
Btu	1.055056kJ
Btu/(lb·°F) (热容量)	4.1868kJ/(kg·K)
Btu/h	0.2939711W
Btu/ft ²	11.35653kJ/m ²
Btu/(ft ² ·h·°F) (传热系数)	5.678263W/m ² ·K
Btu/(ft ² ·h) (热通量)	3.154591W/m ²
Btu(ft·h·°F) (热传导度或导热系数)	1.730735W/m·K
卡(calorie)	4.1868J
cal/(g·°C) (热容量)	4186J/kg·K
cal/g mol	4186J/kmol
cal/(g mol)(K)	4186J/kmol·K
厘泊 (centipoise) (绝对粘度)	1.0mPa·s
厘沱 (centistoke) (运动粘度)	1.0×10 ⁻⁶ m ² /s
t(°F)	(t+459.67)/(1.8)K
T(°R)	T/(1.8)K
达因(dyne)	10.0μN
英尺(foot)	0.3048m
ft ²	9.290304×10 ⁻² m ²
ft ³	2.831685×10 ⁻² m ³
加仑 (美制gallon)	3.785412×10 ⁻³ m ³
马力(horsepower)(550ft·lb _f /s)	745.6999W
英寸(inch)	2.54×10 ⁻² m
in.Hg(60°F) (英寸汞柱压力)	3.37685kPa
in.H ₂ O(60°F) (英寸水柱压力)	0.24884kPa
kg _f (千克力)	9.80665N
传质系数	0.004450kmol/m ³ ·s
质量 (传递) 通量	0.001356kmol/m ² ·s
英里(mile)	1609.344m
mm Hg(0°C) (毫米汞柱压力)	0.133322kPa
泊(poise) (绝对粘度)	0.1Pa·s
lb _f (磅力)	4.448222N
lb (磅质——英国常衡制)	0.4535924kg
lb _f /in ² ① (每平方英寸磅压力)	6.894757kPa
沱(stoke) (运动粘度)	1.0×10 ⁻⁴ m ² /s

1Pa=1N/m²① 原书为lb/in², 疑有误——译者注。

第一章 绪 言

工程师常在具有如下特点的许多工业部门中工作,即在这些工业部门中,通过化学反应和物理变化的手段,将原料转化为产品。靠化学变化进行生产的工业过程有:由硫铁矿生产硫酸,氨的生产以及将石油转换成各种各样的石油化学产品。另一类工业过程,例如由甜菜制取糖,或由玉米中提取玉米油的生产,物理变化占有优势。由此可知,大多数工业操作都是由一系列物理变化和化学变化组成,这些工序可称为过程 (process)。

在工业部门中,许多工程师的工作都包括过程的开发和设备装置的设计与操作。过程开发 (process development) 是工程师们用来描述探索过程的最佳设备、最佳条件的一条术语。构成过程的那些工序通常是已知的,将这些工序加以组合以便使得该过程在大规模设备中实现时产生效益,这样的工作称为“开发”过程。化学工程师们在设计方面的工作,通常是确定设备的某些通用规格和尺寸。例如,他们应该确定精馏塔的高度、直径、塔板数和控制方法。塔壁厚度和设备基础的尺寸,可能是由机械工程师负责确定的,而控制系统的细节,通常是由电气工程师考虑。设备操作工程师的职责,不仅要管理日常生产,还要改进现有的过程来提高设备效率。如果工程师们能通晓过程中化学变化和物理变化的原理,那么他们就能很好地履行自己的职责。

早在化学工程专业出现以前,化学工业就已被人们所认识。那时,由于把每一工业的工艺技术认为是一门专门知识,所以当时把现今看来应该做化学工程师工作的人,当作化学家、机械工程师和工艺学家来培养。早期的化学工程课程是以研究工业的工艺技术为基础的。由于单元操作概念的引进,这些课程的内容发生了很大的变化。在千差万别的各类行业中存在着物理变化的类似性,这就导致了研究这些行业的共同工序,这些共同的工序即称为单元操作 (unit operations)。例如,人们都公认不管是在制糖过程中,还是在化肥生产过程中发生的溶液中液体的蒸发,其所遵循的原理都是相同的。因而,蒸发就成为人们最早认识的单元操作之一。取得单元操作资格的其它工序还有:流体流动、热量传递、增湿、干燥、蒸馏、气体吸收、萃取、破碎与磨碎、结晶、过滤和混合等。

随着人们对各单元操作更加深入地了解,显然发现这些单元操作是没有本质差别的。过滤很显然是流体流动的特殊情况;蒸发是热量传递的一种形式;萃取和气体吸收都包含有质量传递。干燥和蒸馏可认为是热量传递和质量传递都同样重要的操作。因而,人们又将这些单元操作视为热量传递,质量传递和流体流动的特殊情况或组合。工程师们将后者 (热量传递、质量传递和流体流动) 称为传递现象 (transport phenomena), 它们是所有单元操作的基础。单元操作的任何基础研究,终究会变成对这些传递现象的研究。

大多数重要的单元操作都与过程设备中流体的流动特性有关。化学反应器,通常是过程的核心,在这里工程师可能同时利用流体力学、热量传递和质量传递的原理以及化学动力学和热力学的原理。在反应物的制备和产品的分离中,过滤、浸出、吸收、萃取和蒸馏等单元操作都是重要的。流体流动和热量传递的原理是这些过程每一工序的基础。流体一定要被输送,它的温度一定要控制。在化学过程中,因为组成是一个变量,所以在设计分离设备和反应设备时,质量传递原理是必不可少的。

传递现象是研究单元操作的基础，现在它也成为航空工程师和机械工程师解决流体流动和热量传递方面问题的基础。流体流动和热量传递方面的问题，并不因有化学反应而使问题如传统所知道的那么复杂，而现今所讨论的只限于较简单的几何形体，例如圆管内的流体流动或绕回转体的流体流动。由于在化学反应系统中，同时发生热量和质量传递，以及相间接触器件的几何形状复杂等原因所造成的困难，因而对化学工程师来说，经验方法仍是很有效的一种处理问题的方法。直到最近，流体动力学和热量传递的基本原理，多半是由物理学家、机械工程师和航空工程师进行研究的。另一方面，化学工程师们在质量传递方面也作出了卓越的贡献。因而近几年来，其它领域的工程师对质量传递也逐渐感兴趣起来，同时化学工程师也发现了流体动力学原理和热量传递原理在许多方面的应用。数字计算机已大大地提高了理论在实际上重要性。数字计算机的出现，有可能将理论应用于原先必须用经验方法处理的复杂场合。

由上所述，很显然，各行业的工程师在他们各自领域的研究中都取得了进展，划分传统专门化所遵循的那些差异也随之缩小了。不管专业领域如何，现在传递现象原理的研究，已成为每个工程师的中心课题。尽管在本书中说明原理的许多实例，来自化学工程方面的实际应用，但是仅第十五章“过滤”和第三十九章“双组分混合物的蒸馏”是专门针对化学工程师的课目的。

解决传递现象和单元操作问题的更主要的方法——解析法，已显得更加重要。计算机，除了在设计计算中的应用外，现在正用它来控制设备中的操作变量。为了使计算机在上述情况下得以应用，给它提供指令去控制某过程，使之处于经济上最佳状态下运行，通常有必要建立该过程的数学模型。数学模型取决于对该过程较过去更加详尽的认识和更多的数学分析。

在计算机控制的工厂里，可通过计算机频繁地改变操作条件来适时地适应诸如原料、催化剂的活性、设备大小、气候条件或市场需要等各方面情况的变化。因而，工程师更需要了解过程的不稳态特性，这时要明确数学模型就更加困难了。通常人们把这一学科称为过程动态学 (process dynamics)。

由以上所列举的几点理由，读者会发现：本书着重强调数学分析法，以期为今后完成更复杂的工程问题打下牢固的基础。

符号，单位与因次

本章末尾所附的符号表，对本书中大多数的符号都作了说明。某些符号还会在正文中作更详细的说明。对于仅使用几次的某些符号，就不在该表中列出。

在大部分力学问题的讨论中，人们时常把与牛顿定律相关的那些单位，定义为所谓的“基本单位”。牛顿定律为

$$F = Ma \quad (1-1)$$

这样做便可导出如下关系：

厘米-克-秒 (cgs) 制：

$$1\text{dyn(达因)} = \frac{(1\text{g})(1\text{cm})}{\text{s}^2} \quad (1-2)$$

米-千克-秒 (mks) 制:

$$1 \text{ N (牛顿)} = \frac{(1 \text{ kg})(1 \text{ m})}{\text{s}^2} \quad (1-3)$$

英尺-磅-秒 (fps) 制^①:

$$1 \text{ pdl (磅达)} = \frac{(1 \text{ lb})(1 \text{ ft})}{\text{s}^2} \quad (1-4)$$

以上列举的三种单位制中, 力的单位是由质量、长度和时间的单位导出的。在力学中通常将质量、长度和时作为基本单位, 在我们所说的 $[M]$, $[L]$, $[\theta]$ 因次系统中^②, 力的因次为 $[ML/\theta^2]$ 。

另一方面, 在所谓的美国工程单位制中, 又将 lb_f (磅力)作为基本单位, 于是有

$$1 \text{ lb}_f = \frac{(1 \text{ slug})(1 \text{ ft})}{\text{s}^2} \quad (1-5)$$

1 磅力规定为: $1 \text{ lb}_f = (0.4536)(9.807) = 4.448 \text{ N}$, 亦即 $4.448(\text{kg})(\text{m})/\text{s}^2$ 。在 $[F]$, $[L]$, $[\theta]$ 单位制中, $1 \text{ slug (斯勒)} = 1(\text{lb}_f)(\text{s}^2)/\text{ft}$, 因而质量的因次为 $[F\theta^2/L]$ 。

按美国化学工程界的传统实践, 一直是采用四个基本单位和四个基本因次, 而不是三个, 即: 秒, 英尺, 磅和磅力。磅力的定义是: 使1磅(质量)的物体产生 32.1740 ft/s^2 加速度所施加的力。这个加速度相当于标准重力场中的重力加速度。由于对于单位作了这样的选择, 因此在牛顿第二定律中有必要使用因次常数, 即:

$$F = \frac{Ma}{g_c} \quad (1-6)$$

于是

$$1 \text{ lb}_f = \frac{(1 \text{ lb})(32.17 \text{ ft})/\text{s}^2}{g_c} \quad (1-7)$$

所以因次常数 g_c 等于

$$g_c = 32.17(\text{lb})(\text{ft})/(\text{lb}_f)(\text{s}^2) \quad (1-8)$$

以 $[F]$, $[M]$, $[L]$, $[\theta]$ 系统定义的磅力, 具有一固定不变的值, 如同磅重或千克重一样, 与重力加速度 g 的当地值无关。当然, g_c 是人们规定的, 以便使1磅质量在标准地球引力场的作用下产生1磅力。本书的大部分写成此单位制, 我们称其为美国化学工程单位制 (USChE system)。

采用上述单位制与大多数工业测量仪表所采用的单位制是一致的。在美国, 的确很难找到一组“斯勒”刻度的称重仪器; 在英国, 也很难找到以“磅达/平方英寸”作为读数的压力表。实际上, 甚至在采用公制单位制的国家里也这样, 都是采用巴 ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 0.9869 \text{ atm}$), 或 $\text{kg}_f/\text{cm}^2 (= 0.9628 \text{ atm})$ 作为压力单位。以帕斯卡 (N/m^2) 表示的压力表, 的确是很稀少的。

现在世界各国有一种倾向, 即采纳由公制改型^③而来的国际单位制 (systeme intern-

① 原文为英质量制——译者注。

② 例如, 表达式 $\mu = [M/L\theta]$ 意指粘度具有 $[M/L\theta]$ 的因次。

③ J. W. Mullin, AIChE J., 18:222(1972); J. Y. Oldshue, Chem. Eng. Progr., 73(8):135 (1977)。

ational)。国际单位几乎全部是选自于mks单位制，而不是cgs单位制。这一个合理化的改革，在电学单位中是最先进的，但是要渗透到其它过程工业中还需要若干时间。因而，在符号表中我们仍保留英制的基本单位。然而，对称职的工程师，也应会同样熟练地使用公制单位。

为了使某方程对于任何一贯的一组单位制均适用，该方程在因次上必须是齐次的，即式中的各项必须具有相同的因次。在 $[F]$, $[M]$, $[L]$, $[\theta]$ 的因次系统中，为了保证牛顿第二定律在因次上的齐次性，需要有一个因次常数 g_c 。 g_c 的数值，取决于选择什么样的单位制，例如，可使 $g_c = 9.81(\text{kg})(\text{m})/(\text{kg}_f)(\text{s}^2)$ 。在因次齐次代数方程中，任何数都是无因次的。如将式(1-6)写成 $32.2F = Ma$ ，则该方程就不再是因次齐次的。该方程只对式(1-8)所给出的单位适用，而对其它任何单位均不适用。另一方面，在 $[M]$, $[L]$, $[\theta]$ 因次系统中，式(1-1)也是因次齐次的，在该系统中，由于少定义一个基本因次， F 又具有 Ma 的因次，所以 $g_c = 1$ ，且无因次。

到此为止，我们所讨论的仅仅是力学系统，如果热效应是重要的，我们就得采用热能因次 $[H]$ 和温度因次 $[T]$ 。因而，本书所采用的全套基本因次是： $[F]$, $[M]$, $[L]$, $[\theta]$, $[H]$ 和 $[T]$ 。当然，基本因次的数目是可以减少的，正如已经讨论过的那样，上述基本因次的数目不仅针对力学物理量可以减少，而且针对热能因次 $[H]$ 也可以减少，其原因是因为 $[H]$ 具有 $[FL]$ 的因次。SI制中的单位焦耳，既适用于表达热能也适用于表达机械能。

符号 $\bar{V}$, $\bar{H}$ 等涉及的是物理量的强度性质，即 ft^3/lb 或 Btu/lb ，其广延性质则借助上标表示，如 $\bar{V} = MV$, $\bar{H} = MH$ ，指的是总体积或总焓。我们也使用了另一个上标来表示摩尔量，如采用 $\bar{V}$ 或 $\bar{H}$ 表示摩尔体积 $\text{ft}^3/\text{lb mol}$ ，或摩尔焓 $\text{Btu}/\text{lb mol}$ ，该上标也用来区别质量通量 G , $\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$ 和摩尔通量 $\bar{G}$, $\text{lb mol}/(\text{h})(\text{ft}^2)$ ；质量分率 x_A 和摩尔分率 x_A ；以及其它许多类似符号。

所采用的变量的因次，可按符号表中列出的单位推想出来。例如，表中的粘度 μ ，单位是 $\text{lb}/(\text{ft})(\text{h})$ ，因而因次为 $[M]/[L][\theta]$ 。在cgs制中，粘度的单位则变成 $\text{g}/(\text{cm})(\text{s})$ 或泊；在mks制中，其单位又是 $\text{kg}/(\text{m})(\text{s})$ ；在SI制中通常表示成 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。数值的换算可借助本书序言后面的附表进行。

例1-1 我们将要学习到：粘度 μ 与剪应力 τ 以及速度梯度 du/dy 的关系，三者的关系可以下式表示

$$\mu = \frac{g_c \tau}{du/dy}$$

试证明：上述方程在美国化学工程(USChE)单位制和SI单位制中，其因次均是齐次的。

解 若将单位代入方程的右侧，则得到：

$$\frac{(\text{lb})(\text{ft})}{(\text{lb}_f)(\text{s}^2)} \times \frac{(\text{lb}_f)/(\text{ft}^2)}{\text{ft}/(\text{s})(\text{ft})}$$

或 $\text{lb}/(\text{s})(\text{ft})$ ，即粘度单位。在SI制中， g_c 的单位变成 $(\text{kg})(\text{m})/(\text{N})(\text{s}^2)$ ，按照1牛顿的定义式[式(1-3)]，即 g_c 是数值为1的无因次数。因而 μ 的单位为

$$\frac{1 \times (\text{N}/\text{m}^2)}{(\text{m})/[(\text{s})(\text{m})]} = \frac{\text{s}\cdot\text{N}}{\text{m}^2}$$

或相当于 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 或 $\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}$ ^①。

令人感兴趣的是：在公制的许多实际应用中， g_c 的使用是含蓄的。在欧洲，维修站的值班员检查你的汽车轮胎时，所指的压强不是以帕斯卡（SI制，即 N/m^2 ）或巴（ $10^6\text{dyn}/\text{cm}^2$ ）来度量，而是以“1800 g”来度量。这里的g指的是 $\text{g力}/\text{cm}^2$ ；而在此单位制中， g_c 是 $980(\text{g})(\text{cm})/(\text{g力})(\text{s}^2)$ 。

现在，SI单位制在美国化学工程师学会（AIChE）的出版物中，用标准的单位制，所以工程师们终将发现他们必须使用这一单位制进行工作。可是，这个转变一直进展得很慢，故在今后好多年之内，他们将仍然以每平方英寸的磅数（ lb_f/in^2 ）作为读数的压力表，以加仑/分（ gal/min ）指示的流量计和以英热单位/磅（ Btu/lb ）给出的数据。由于这些原因，美国化学工程（USChE）单位制和SI单位制在本书中都同时被采用。不过应强调：书中所有方程，其因次在实际上都是一致的。人们可以使用任何一种一贯的单位制，特别是cgs，SI和USChE单位制；不过对cgs和SI制， $g_c=1$ ，而对USChE单位制， g_c 是式(1-8)所给出的值。

SI制的优点，在于它能使人们将因次一致的方程所要求的那些单位，象日常的单位一样使用。但我们还是希望巴、升、千瓦和其它一些单位仍继续使用。对于任何单位制，这样做尽管是正确的，但是工程师必须认识到这些单位毕竟不是可代入方程的单位。 $1\text{bar}=10^5\text{Pa}$ ，如同 $1\text{psi}=144\text{ lb}_f/\text{ft}^2$ 一样。自然，在手动计算器的日子里，两者的换算都是很容易的。当我们以 s^{-1} 表示所讨论的速率时，同时还要会用非SI制（如，年）来表示它们。在以SI制表示的蒸汽表中，Haywood^②使用了 kN/m^2 ， MN/m^2 和 kJ/kg 等单位，而Irvine和Hartnett^③却使用了巴和 kJ/kg 单位。虽然mol（克摩尔）属于SI单位，但是我们将使用kmol（千克摩尔）。这个单位与用 kg/kmol 表示的分子量相吻合。最后，通用气体常数为 $8314\text{J}/\text{kmol}\cdot\text{K}$ 。

① 请注意，在整本书中，传统单位的形式(s)(m)，当包括SI时，应写成 $\text{s}\cdot\text{m}$ 。

② R. W. Haywood, "Thermodynamic Tables in SI (metric) Units," Cambridge University Press, London, England, 1972.

③ T. F. Irvine, Jr. and James P. Hartnett, "Steam and Air Tables in SI Units," Hemisphere Publishing Corp., Washington, 1976.

符 号 表

符 号	说 明	单 位	
		USChE制	SI制
A	面积; 截面积	ft^2	m^2
$\mathcal{A}$	吸收因子, $\tilde{L}/m\tilde{G}$	无因次	—
A_i	界面面积	ft^2	m^2
B	底部产品或萃取液的质量流率	lb/h	kg/s
C	声速	ft/s	m/s
C_D	曳力系数	无因次	—
C_{D^0}	无主体流动下的 C_D 值	无因次	—
C_o	孔板流量计的流量系数, 定义式为式 (6-13)	无因次	—
C_p	定压比热	$\text{Btu}/(\text{lb})(^\circ\text{F})$	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
C_{pH}	湿热, 定义式为式 (36-46)	$\text{Btu}/(\text{lb})(^\circ\text{F})$	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
C_r	转子流量计的流量系数, 定义式为式 (6-12)	无因次	—
C_v	定容比热	$\text{Btu}/(\text{lb})(^\circ\text{F})$	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
	文丘里流量计的流量系数, 定义式为式 (6-12)	无因次	—
D	直径	ft	m
	馏出液或萃取液的质量流率	lb/h	kg/s
D_{AB}	A 在 B 中的扩散系数	ft^2/h	m^2/s
D_{ABo}	涡流扩散系数	ft^2/h	m^2/s
D_{ABT}	热扩散系数	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft})$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}$
D/D_0	随体导数算符	s^{-1}	s^{-1}
E	总能量, 定义式为式 (4-2)	$(\text{ft})(\text{lb}_f)/\text{lb}$	J/kg
E_o	Murphree气相级[板]效率	无因次	—
E_{oP}	Murphree气相点效率	无因次	—
E_o	总效率	无因次	—
Eu	欧拉数, $g_c p/u^2 \rho$	无因次	—
F	加料速率	lb/h	kg/s
	力	lb_f	N
$\check{F}_d$	曳力	lb_f	N
$\check{F}_g$	重力	lb_f	N
$\check{F}_{xd}$	控制面承受的总曳力在 x 方向的分量	lb_f	N
$\check{F}_{xp}$	由压力差产生的 x 方向的作用力	lb_f	N
$\check{F}_x, \check{F}_y, \check{F}_z$	力向量在 x, y, z 方向的分量	lb_f	N
$F_{12}, \bar{F}_{12}, \mathcal{F}_{12}$	辐射换热的角系数	无因次	—
Fr	弗鲁德数, u^2/gL	无因次	—
G	气相质量通量	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
G_B	组分 B 的质量通量	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
Gr	格拉斯霍夫数, $gL^3\beta\Delta t/\nu^2$	无因次	—
H	焓	Btu/lb	J/kg
H_A, H_x, H_y	组分 A 、液相或气相的焓	Btu/lb	J/kg
H_G, H_L	气相、液相传递单元高度	ft	m
H_{OG}, H_{OL}	总传递单元高度	ft	m
H_{tx}, H_{ty}	传热单元高度	ft	m
I	湍流强度	无因次	—
	辐射强度	$\text{Btu}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	W/m^2
$\tilde{I}_A$	相对于摩尔平均速度 $\tilde{u}$ 组分 A 的摩尔通量	$\text{lbmol}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kmol}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
J	热功当量	$778(\text{ft})(\text{lb}_f)/\text{Btu}$	1

续表

符 号	说 明	单 位	
		USChE制	SI制
J_A	相对于质量平均速度 u 组分 A 的质量通量	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
K	稠度系数 式 (12-42) 中的常数 ^①	$[(\text{lb})(\text{ft})/\text{s}^2]\text{s}^n$	$\text{kgm}\cdot\text{s}^{n-2}$
K_A	组分 A 的平衡汽化比, $\bar{y}_A/\bar{x}_A$	无因次	—
K_{ABT}	热扩散比	无因次	—
$K_\rho, K_x, K_y,$ $K_{\bar{x}}, K_{\bar{y}}$	总传质系数	无因次	—
L	液相的质量速度	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
	长度; 厚度; 滞动标度	ft	m
L_{AB}	现象系数, 定义式为式 (29-5)	$\text{lbmol}/(\text{ft})(\text{h})(\text{Btu})$	$\text{kmol}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{J}$
L_C	组分 C 的质量速度	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
L_e	进口段的长度	ft	m
L_f	滤饼厚度	ft	m
Le	刘易斯数, $Sc/Pr = k/\rho D_{AB}C_p$	无因次	—
M	质量	lb	kg
M_c	滤饼质量	lb	kg
M_A, M_B, M_m	分子量	lb/lbmol	kg/kmol
Ma	马赫数, u/C	无因次	—
N	级数: 管数	无因次	—
	相对于静止坐标的质量通量	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
N_A	相对于静止坐标组分 A 的质量通量	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
N_p	粒子数	无因次	—
N_1	排数	无因次	—
Nu	努塞尔数, hL/k	无因次	—
Nu_o	努塞尔数, h_oL/K	无因次	—
Nu_m	平均努塞尔数, h_mL/k	无因次	—
Nu_x	局部努塞尔数, h_xL/k	无因次	—
O	液相的质量流率	lb/h	kg/s
O_c	组分 C 的质量流率	lb/h	kg/s
P	上游压力	lb/ft^2	$\text{N}/\text{m}^2(\text{Pa})$
	功率	$(\text{ft})(\text{lb}_f)/\text{s}$	W
$\check{P}_x, \check{P}_y, \check{P}_z$	x, y, z 方向的动量分量	$(\text{lb})(\text{ft})/\text{s}$	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}$
Pe	彼克列数, $Re\cdot Pr = C_p\rho uL/k$	无因次	—
Pr	普兰德数, $C_p\mu/k$	无因次	—
Q	单位质量物质吸收的热量	Btu/lb	J/kg
R	干燥速率	$\text{lb}/(\text{h})(\text{ft}^2)$	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$
	热阻	$(^\circ\text{F})(\text{h})/\text{Btu}$	$\text{K}\cdot\text{s}/\text{J}$
	压力损失恢复分数	无因次	—
R_i	组分 i 的生成速率	lb/h	kg/s
R_m	过滤介质的流动阻力	ft^{-1}	m^{-1}
R_x, R_y, R_z	在 x, y, z 方向总合力的分量	lb_f	N
$R(y)$	相关系数	无因次	—
Re	雷诺数, $Du_b\rho/\mu$	无因次	—
Re_L	雷诺数, $Lu_o\rho/\mu$	无因次	—
Re_ρ	雷诺数, $Du_b\rho/\mu(1-\varepsilon)$	无因次	—
Re_x	雷诺数, $xu_o\rho/\mu$	无因次	—
S	焓	$\text{Btu}/(\text{lb})(^\circ\text{R})$	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
φ	汽提因子, $\tilde{m}G/\tilde{L}$	无因次	—

符 号	说 明	单 位	
		USChE制	SI制
S_p	颗粒的表面积	ft ²	m ²
S_p	比表面积, S_p/v_p	ft ⁻¹	m ⁻¹
Sc	施米特数, $\mu/\rho D_{AB}$	无因次	—
Sh	舍伍德数, $h_p L/D_{AB}$	无因次	—
St	斯坦顿数, $h/C_p u \rho$	无因次	—
T	绝对温度	°R	K
T_c	临界温度	°R	K
U	内能	Btu/lb	J/kg
	总传热系数	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
V	比容	ft ³ /lb	m ³ /kg
	气相质量流率	lb/h	kg/s
V_B	组分B的质量流率	lb/h	kg/s
V_f	滤液体积	ft ³	m ³
$\checkmark$			
$\checkmark$	转子流量计的转子体积	ft ³	m ³
W	单位质量流体所作的功	(ft)(lb _f)/lb	J/kg
$W_{B\lambda}$	波长 λ 与 $\lambda+d\lambda$ 范围内的辐射能除以 $d\lambda$ 后的辐射能通量	Btu/(h)(ft ³)	W/m ³
W_s	单位质量流体的轴功	(ft)(lb _f)/lb	J/kg
$\dot{W}$	做功的速率, 功率	(ft)(lb _f)/h	W
$\dot{W}_s$	轴功率	(ft)(lb _f)/h	W
We	韦伯数, $\rho u^2 L/\sigma$	无因次	—
X, Y, Z	单位质量流体体积力在 x, y, z 方向的分量	lb _f /lb	N/kg
X_A	组分A在液相中的质量比率	无因次	—
X_c	临界湿含量	无因次	—
X_e	平衡湿含量	无因次	—
Y	Δt_{lm} 的校正因子	无因次	—
Y_A	组分A在气相中的质量比率	无因次	—
a	单位体积的界面积	ft ² /ft ³	m ² /m ³
a_A	组分A的活度	无因次	—
a_x, a_y, a_z	加速度 a 在 x, y, z 方向的分量	ft/s ²	m/s ²
e	粗糙表面的有效高度	ft	m
f	摩擦系数, $g_c D lw_f/2Lu_b^2$	无因次	—
f_p	摩擦系数, 定义式为式 (14-21)	无因次	—
g	重力加速度	ft/s ²	m/s ²
g_c	常数	32.17(lb)(ft)/(lb _f)(s ²)	1
h	对流传热系数	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
h_o	基于算术平均温度差的对流传热系数	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
h_d	污垢系数	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
h_{lm}	基于对数平均温度差的对流传热系数	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
h_m	对流传热系数 h 的平均值 (恒温 t_s 下)	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
h_r	辐射对流传热系数	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
h_x	对流传热系数 h 的局部值	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
h^o	无主体流动情况下的对流传热系数	Btu/(h)(ft ²)(°F)	W/m ² ·K
$\tilde{h}_R, \tilde{h}_n$	焓	Btu/lb mol	J/kmol
j_H	Colburn传热 j 因数	无因次	—
j_M	Colburn传质 j 因数	无因次	—
k	导热系数	Btu/(h)(ft)(°F)	W/m·K

续表

符 号	说 明	单 位	
		USChE制	SI制
	比热的比率, C_o/C_o	无因次	—
h_x, h_y	基于 Δx_A 或 Δy_A 的传质分系数	lb/(h) (ft ²)	kg/s·m ²
$h_{x'}, h_{y'}$	基于 Δx_A 或 Δy_A 的传质分系数	lbmol/(h) (ft ²)	kmol/s·m ²
h_ρ	基于 $\Delta \rho_A$ 的传质分系数	ft/h	m/s
$h_{x''}, h_{y''}$	无主体流动情况下的 h_x 或 h_y 值	lb/(h) (ft ²)	kg/s·m ²
$h_{\rho''}$	无主体流动情况下的 h_ρ 值	ft/h	m/s
$h_{\rho'}$	传质分系数, 定义式为式 (36-7)	ft/lb	m/s
l	普兰德混合长	ft	m
lw	摩擦功或损耗功	(ft) (lb _f)/lb	J/kg
lw_f	管道中沿程摩擦损耗功	(ft) (lb _f)/lb	J/kg
m	液体[水]对于滤饼的质量比率	无因次	—
	级数	无因次	—
	平衡关系式 $\tilde{y}_A = m\tilde{x}_A$ 中的常数	无因次	—
n	流变指数; 级数	无因次	—
n_G, n_L, n_{OG}, n_{OL}	传递单元数	无因次	—
p	总压	lb _f /ft ²	Pa
p_A	组分A的蒸汽压	lb _f /ft ²	Pa
$\bar{p}_A$	组分A的分压	lb _f /ft ²	Pa
p_i	作用在过滤介质上的压力	lb _f /ft ²	Pa
p_o	临界压力; 远离物体处的压力 ^①	lb _f /ft ²	Pa
p_s	作用在滤饼上的机械应力	lb _f /ft ²	Pa
q	传热速率	Btu/h	W
	体积流率	ft ³ /h	m ³ /s
	加料板上每摩尔料液产生液体的摩尔数	无因次	—
r	半径	ft	m
r_H	水力半径	ft	m
r_A, r_i	组分A或i的生成速率	lb/(h) (ft ³)	kg/s·m ³
s	悬浮液中固体的质量分率	无因次	—
	表面更新的相对速率	s ⁻¹	s ⁻¹
t	温度	°F	°C
t_{as}	绝热饱和温度	°F	°C
t_b	流体的主体(混合杯)温度	°F	°C
t_m	流体介质的温度	°F	°C
t_o, t_∞	边界层外的温度	°F	°C
t_{st}	表面温度	°F	°C
t_{so}	饱和蒸汽的温度	°F	°C
t_s	饱和液体的温度	°F	°C
t_{wb}	湿球温度	°F	°C
u	速度; 速度向量的大小	ft/s	m/s
u_b	主体速度 ^②	ft/s	m/s
u_{br}	转子流量计环隙孔道处的主体速度	ft/s	m/s
u_{bo}	表观速度, 空塔速度	ft/s	m/s
u_o	边界层外的速度	ft/s	m/s
u_x, u_y, u_z	速度向量在 x, y, z 方向的分量	ft/s	m/s
$u_{y'}$	表面处垂直于表面方向的速度	ft/s	m/s

① 原书中为自由流(动)处的压力——译者注。

② 这里主体速度系指平均(混合环)速度——译者注。

续表

符 号	说 明	单 位	
		USChE制	SI制
u_x', u_y', u_z'	脉动速度在 x, y, z 方向的分量	ft/s	m/s
u^*	摩擦速度	ft/s	m/s
$\overline{u_x}, \overline{u_y}, \overline{u_z}$	时均速度分量	ft/s	m/s
u^+	u/u^*	无因次	—
v_p	颗粒的体积	ft ³	m ³
w	质量流率	lb/h	kg/s
x, y, z	直角坐标距离	ft	m
x	由前缘算起的距离	ft	m
x_A	液相中组分A的质量分率	无因次	—
x_o	冷凝膜的厚度	ft	m
y	距表面的距离	ft	m
y_A	气相中组分A的质量分率	无因次	—
y^+	$y u^* / \nu$	无因次	—
z	塔高; 压力计中液柱的高度	ft	m
α	速度向量与控制面外法线方向间的夹角	rad	rad
	热扩散系数, $k/\rho C_p$	ft ² /h	m ² /s
	滤饼的比阻	ft/lb	m/kg
	吸收率; 相对挥发度	无因次	—
α_{AB}	组分A对组分B的相对挥发度	无因次	—
α_o	涡流热扩散系数	ft ² /h	m ² /s
β	x 方向与向下垂直线间的夹角	rad	rad
	直径比	无因次	—
	热膨胀系数	(°R) ⁻¹	K ⁻¹
Γ	单位周长的质量流率	lb/(h)(ft)	kg/s·m
γ	角 ϕ 的变化速率	rad/s	rad/s
γ_A	组分A的活度系数	无因次	—
Δ	终态减始态, 或出口减进口的算符, 例如 $\Delta w = w_2 - w_1$	无因次	—
	级末净流率	lb/h	kg/s
δ	边界层厚度	ft	m
δ_o	浓度边界层厚度	ft	m
δ_m	膜厚度	ft	m
$\delta_{t,h}$	温度(热)边界层厚度	ft	m
ε	空隙率; 辐射率	无因次	—
η	无因次距离, $y\sqrt{u_0/\nu x}$	无因次	—
η_f	翅片效率	无因次	—
η_p, η_r	泵效率或透平机效率	无因次	—
θ	时间	s	s
	极坐标中的角度	rad	rad
Λ	Kármán 数, $Re\sqrt{f}$	无因次	—
λ	潜热	Btu/lb	J/kg
	波长	ft	m
μ	粘度	lb/(ft)(h)	kg/s·m
μ_A	组分A的化学势	Btu/lb mol	J/kmol
ν	运动粘度	ft ² /h	m ² /s
ν_o	涡流运动粘度	ft ² /h	m ² /s
ρ	密度	lb/ft ³	kg/m ³
	反射率	无因次	—