



高等院校能源与动力类专业“十二五”规划教材

传递 过程原理

Principle of Transport Processes

陈卓 周萍 梅焱 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

高等院校能源与动力类专业“十二五”规划教材

传递过程原理

陈卓 周萍 梅焱 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

传递过程原理/陈卓,周萍,梅焱编著. —长沙:中南大学出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-5487-0328-0

I. 传... II. ①陈... ②周... ③梅... III. 传递-热工过程-理论 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 135463 号

传递过程原理

陈卓 周萍 梅焱 编著

责任编辑 邓立荣

责任印制 文桂武

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙市华中印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 27.75 字数 688 千字

版 次 2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-0328-0

定 价 49.80 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

前 言

20多年前,原中南工业大学出版社(现中南大学出版社)出版了由梅焱编著的《冶金传递过程原理》,它对学科的发展起到了一些积极的促进作用。近年来科技发展很快,特别是对湍流的应用研究更加深入,数值方法的应用更加广泛。另外,该书的读者范围也在迅速扩大,远超出了单一的专业范围。为了适应这些变化,我们编写了这本《传递过程原理》。总的想法仍是坚持编写思路的科学性与严谨性,以及取材内容的工程实用性。

几乎所有工程技术领域,包括过程工程、制造工程、能源与动力工程、材料工程、建筑与环境工程等领域都离不开物质流和能量流,且同时伴生各种信息流。深入研究物质与能量的传递规律与强化措施,挖掘更多的信息流,则是不断提高过程效率及其整体操控水平的科技基础。

生产实践与科学实验表明,从基本原理上看,所有物质流、能量流都是由动量传递、热量传递与质量传递三种传递过程(简称“三传”)组成,而这三种传递过程的微观动力机制是相通和统一的,其传递规律的数学表达形式也是相同的。所以从“三传”类似的角度来理解和研究传递过程,就构成了本书在知识结构上的大框架。

动量传递原理部分是按紧密结合工程中常见的典型流动现象与流动体系进行的。除了流体与流动的物理基础和力学基础(第1、2章)外,本书着重介绍了恒密度、匀相流体的一维流(或管流,见第3章)与多维流(空间喷射流,第5章);为了便于和前面的恒密度、不可压缩型流动对比,第4章介绍了密度与内能随流动变化的压缩性气体流动;对应于前面介绍的匀相单流体流动,第6章介绍了非匀相的流固两相流,其中有通过散料层(固定床)的渗滤流(6.3节)、散料层被流体搅混翻腾的流化床内流(流态化床,6.4节)以及流体和颗粒相混合的悬浮流(6.5节)。这部分介绍的重点在阐明流体内的黏性应力、界面作用力、流动体系内的流速分布、压力变化以及能量耗损等。

热量与质量传递原理部分按传统传热传质学的习惯以及传递机理分类的方式,分别介绍以固体(或层流)内分子(质点)振动与扩散方式进行传递的传导传热(第9章)与传导传质(第14章);以分子微团位移、搅混方式进行传递的对流传热(第10章)与对流传质(第15章);以电磁波或量子辐射方式进行跃迁式传递的辐射传热(第11章)。顺便说明一下,与辐射传热类似,某些特殊物质以原子核内微粒子嬗变的方式也可以进行跃迁式传质(放射性传质),对此有专门的研究学科,不在本书讨论范围之内。

前面各章讨论的是单一方式传递过程,第12章与第16章则介绍稳态综合传热与传质过程的分析与计算;对应于稳定态(温度、浓度场不随时间而变)传热传质,作为对比,第13章则介绍了几种较规整几何条件下的非稳态传递过程的解析思路与计算方法。

在传递过程研究的定量化与精确化方面,本书遵循先定性,即首先深入了解各种传递现象与过程的物理本质和微观机理,然后定量;定性与定量或半定量相结合,实验公式近似定

量与半理论半实验公式定量相结合。为了更精确，特别是对于复杂几何形状与复杂边界条件的研究对象可尽量采用数值计算方法，以求获得关于速度场(动量传递信息)、温度场(热量传递信息)与浓度场(质量传递信息)的大量数值信息，最终实现描述全过程的信息化结果(又称“数值仿真”)。关于数值计算，本书只提供了基础理论准备和方法上的粗线条介绍(第17章)，有兴趣的读者还可参阅本书的姊妹篇《传递过程原理及其数值仿真》(周萍等编著，中南大学出版社，2006)。

本书是经编者集体讨论后分头编写的。陈卓编写绪论，第1~7章，第14~16章以及附录；周萍编写第8~13章及第17章；梅焱对全书进行了校阅和修改；全书由陈卓负责定稿。

本书可作为热能、动力、冶金、材料、建筑、环境、机械、化工等专业本科生和研究生的教材，也可供其他相关领域工程技术人员研究参考。

由于作者学识水平的限制，书中定会有不少错漏之处，敬希读者多加批评指正，不胜感激之至。

编著者

2011年5月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 传递过程的研究对象	(1)
1.2 “三传”间的类似性	(1)
1.3 单位与量纲	(4)
单位换算习题	(7)

第 1 编 流体力学基础与动量传递

2 流体基本性质与静压平衡方程	(8)
2.1 流体的分散性与连续介质模型	(8)
2.2 流体的压缩性与不可压缩模型	(9)
2.3 流体的黏性与理想流体模型	(12)
2.4 牛顿流体与非牛顿流体	(15)
2.5 流体的静压	(16)
2.6 流体静压平衡方程	(19)
2.7 气体的位压头与静压头	(22)
思考题与习题	(25)
3 流体流动基本方程	(28)
3.1 流体流动基本概念	(28)
3.2 流动型态	(29)
3.3 湍流的基本概念	(31)
3.4 边界层概念	(34)
3.5 圆管内流动的速度分布	(37)
3.6 流动质量平衡——连续性方程	(41)
3.7 理想流体动量传递方程——欧拉流动微分方程	(44)
3.8 黏性流体流动动量传递方程——奈维 - 斯托克斯方程	(45)
3.9 流体机械能平衡方程——伯努利方程	(50)
3.10 流体流动的总能量平衡	(56)

3.11	能量方程应用举例	(57)
3.12	稳定流的动量平衡——动量方程	(64)
	思考题与习题	(69)
4	流动阻力与流体输送	(73)
4.1	概述	(73)
4.2	层流时圆管中沿程阻力及达西公式	(73)
4.3	湍流时圆管中的沿程阻力	(75)
4.4	非圆形管中的沿程阻力	(81)
4.5	管道流的局部阻力	(82)
4.6	稳定流动管路计算举例	(88)
4.7	流体输送设备	(97)
	思考题与习题	(108)
5	压缩性气体流动	(111)
5.1	压力波、音速与流体的可压缩性	(111)
5.2	压缩性气体的能量方程	(112)
5.3	压缩性气体流动的连续性方程	(114)
5.4	压缩性气流中各参数的变化规律	(116)
5.5	压缩性气体经管嘴与拉伐尔喷管的流动	(119)
5.6	压缩性气体等温流动	(124)
5.7	有热交换的压缩性气体流动	(127)
	思考题与习题	(130)
6	气体喷射流	(132)
6.1	等温自由射流的特性	(132)
6.2	射流中的热量与质量传递——温差与浓差射流	(138)
6.3	两射流间的相互作用	(141)
6.4	射流与平壁相遇	(142)
	思考题与习题	(144)
7	流-固两相流	(145)
7.1	概述	(145)
7.2	颗粒体的几何特征	(146)
7.3	滤过流	(149)
7.4	流化床	(155)
7.5	悬浮流	(167)
	思考题与习题	(177)

第 2 编 热量传递原理

8 传热概论	(179)
8.1 基本传热方式	(179)
8.2 温度场与热态	(180)
8.3 传热速率、传热系数与热阻	(180)
9 稳态导热	(182)
9.1 导热的基本定律	(182)
9.2 导热系数及不同物质的导热机理	(182)
9.3 平壁导热	(186)
9.4 圆筒壁导热	(191)
9.5 固体导热微分方程	(193)
思考题与习题	(196)
10 对流传热	(198)
10.1 对流传热概述	(198)
10.2 边界层积分方程组的建立和求解	(200)
10.3 动量传递与热量传递的类似——类似律解法	(210)
10.4 相似理论指导下的实验求解法	(217)
10.5 强制对流传热的实验公式	(223)
10.6 自然对流传热	(233)
10.7 冷凝与沸腾过程传热	(235)
思考题与习题	(241)
11 辐射传热	(244)
11.1 热辐射的基本概念	(244)
11.2 黑体、白体和透热体	(245)
11.3 黑体辐射的基本定律	(246)
11.4 灰体及实际物体的辐射与吸收	(247)
11.5 辐射能在空间的分布	(254)
11.6 两表面构成封闭体系时的辐射换热	(259)
*11.7 辐射传热与电量传递的类似——电类似解法	(264)
11.8 气体的辐射与吸收	(269)
11.9 气体及火焰的发射率	(271)

11.10	气体与围壁间的辐射换热	(276)
	思考题与习题	(278)
12	稳态综合传热	(280)
12.1	气体与表面间的换热	(280)
12.2	火焰炉内的综合传热	(281)
12.3	通过间壁的传热	(287)
12.4	换热器传热计算	(292)
*12.5	通过肋片传热	(306)
	思考题与习题	(309)
13	非稳态导热	(311)
13.1	非稳态导热过程及其求解方法	(311)
13.2	分析解法及热相似准数	(311)
13.3	表面温度恒定时半无限厚物体加热	(313)
13.4	周围介质温度恒定时的加热与冷却	(315)
13.5	薄材在恒温介质中的加热与冷却	(319)
	思考题与习题	(324)

第 3 编 质量传递原理

14	传质基本概念与传导传质	(326)
14.1	传质的基本概念	(326)
14.2	菲克第一定律与扩散系数	(329)
14.3	稳态扩散传质	(337)
14.4	非稳态扩散	(344)
	思考题与习题	(346)
15	对流传质	(347)
15.1	对流传质机理与传质系数	(348)
15.2	对流传质微分方程与传质相似准数	(353)
*15.3	气体与下降液膜的传质	(356)
15.4	流体与平板表面间的对流传质——积分方程法近似解	(359)
15.5	若干对流传质的实验公式	(361)
15.6	对流传质与对流传热的类似	(363)
	思考题与习题	(367)

16 综合传质问题	(369)
16.1 相际平衡与平衡浓度	(369)
16.2 双膜传质理论与贯通传质系数	(370)
16.3 相界面有化学反应时的传质——炭粒燃烧过程	(373)
* 16.4 多孔介质内部的扩散与化学反应	(377)
16.5 传热与传质同时发生的综合传递过程	(379)
思考题与习题	(387)

第 4 编 传递过程的数值计算与应用

17 湍流传递过程的数值计算	(389)
17.1 湍流流动的控制方程	(389)
17.2 湍流传递过程的通用控制方程	(392)
17.3 湍流传递过程数值求解的基本思想与步骤	(393)
17.4 稳态导热问题	(395)
17.5 非稳态导热问题	(402)
17.6 流动问题	(407)
17.7 商业软件及其应用	(410)
思考题与习题	(413)
附录	(416)
附录 I 基本常数与单位换算	(416)
附录 II 流体的物性参数	(418)
附录 III 局部阻力系数	(423)
附录 IV 误差函数(erf)表*	(427)
附录 V 物质表面发射率	(428)
附录 VI 常用符号表	(430)
参考文献	(433)

1 绪 论

1.1 传递过程的研究对象

“传递过程”系动量传递、热量传递与质量传递(简称“三传”)的总称。有的文献上也称作“传递现象”或“传输现象”(Transport phenomena)。由于传递过程原理在工业应用中主要研究传递速率大小与传递推动力及阻力之间的关系,所以又可称之为速率过程(rate processes)^①。

流体流动中流速的变化,即动量的变化,总是体现着一定的正应力或切应力的作用;反过来,任何正应力或切应力的作用也对应着流体一定的动量变化(或动量转移)。简明地说,所谓动量传递过程也就是通常所称的流体动力过程。

热量传递原理研究给定温度场内热量传递速率,或在给定条件下研究温度场的特性,也就是通常所称的传热学的内容。

质量传递原理是研究连续介质内由于浓度分布不均所引起的物质迁移的规律及迁移速率的大小。

将上述三种传递过程的研究组合在一起形成一门独立的课程,这并非人为地凑合,而是有其内在的联系。实际上在连续介质中发生的三种现象之间在机理上存在着深刻的类似性。另外,在冶金、化工或其他一些工程现象中,“三传”过程往往是两两同时或三者同时发生的。

1.2 “三传”间的类似性

“三传”现象的类似性表现在其过程机理的相通性以及数学描述与研究方法等方面的高度相似性。从微观机理而言,三种传递过程都同样受以下几种作用力的共同支配:

(1) 连续介质中的分子运动和扩散:如层流黏性(动量传递),固体或层流中的导热(热量传递),以及固体或层流中的物质组分扩散(质量传递);

(2) 流体中的微团掺混:如湍流黏性(湍流附加切应力)体现的动量传递、对流传热与传质;

(3) 跃迁式传递:如流体流动中的激波(以声子或机械波为载体的动量跃迁),辐射传热(以量子或电磁波为载体的能量跃迁),以及放射现象(以原子核内微粒子为载体的物质嬗变)。

表1-1中简明分析比较了“三传”现象的类似性,以帮助初学者对本课程建立一个整体的轮廓印象。当然,要建立对三种传递过程之间相似性的深入的理解,在认真学习本课程之余,还必须依靠读者自己不断地进行系统的分析和思考。

^① 广义的速率过程还包括化学反应过程。

表 1-1 “三传”间的类似性

项目名称	符号	动量传递	热量传递	质量传递
场特性参数	φ	速度 (u)	温度 (T)	浓度 (C)
被传递的物理量	E	单位体积内的动量 (ρu)	单位体积内的热量 ($\rho c T$)	单位体积内的质量 (C)
传递推动力	ΔE	$\Delta(\rho u)$ 或 Δu	$\Delta(\rho c T)$ 或 ΔT	ΔC
传递速率(通量)	Φ	切应力 (τ) = $\frac{\text{动量}}{\text{米}^2 \cdot \text{秒}}$ [$\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	热流 (q) = $\frac{\text{热量}}{\text{米}^2 \cdot \text{秒}}$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	物质流 (N) = $\frac{\text{质量}}{\text{米}^2 \cdot \text{秒}}$ [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
物理现象		层流粘度	层流或固体内传导传热	层流或固体内传导传质(扩散)
传递微分方程	$\Phi = -\Gamma \cdot \frac{dE}{ds}$	$\tau = -\nu \cdot \frac{d(\rho u)}{ds}$ (牛顿粘性定律)	$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{ds} = -a \frac{d(\rho c T)}{ds}$ (傅立叶、导热定律)	$N = -D \frac{dC}{ds}$ (菲克第一定律)
扩散系数	Γ	$\nu = (\mu/\rho)$ (m^2/s)	$a = [\lambda/(c \cdot \rho)]$ (m^2/s)	D (m^2/s)
物性准数	ν/Γ		$\nu/a \equiv Pr$ (Prandtl 准数)	$\nu/D \equiv Sc$ (Schmidt 准数)
稳态传递速率 (唯象表达式)	$\Phi = \frac{\Gamma}{s} \cdot \Delta E$	$\tau = \frac{\nu}{s} (\rho u_1 - \rho u_2)$	$q = \frac{a}{s} (\rho_1 c_1 T_1 - \rho_2 c_2 T_2)$	$N = \frac{D}{s} (C_1 - C_2)$
分子传递阻力	$R = s/\Gamma$	s/ν (s/m)	s/a (s/m)	s/D (s/m)

(扩散过程)
分子(或质点)传递

续表 1-1

项目名称	符号	动量传递	热量传递	质量传递
流体微团混 湍流传递	物理现象	湍流粘度	对流传热	对流传质
	传输微分方程	$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)$ $= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_0 + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] - S_u$	$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h)$ $= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_0}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_h} \right) \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \right] - q_r$	$\frac{\partial(\rho \omega_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega_i)$ $= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_0}{Sc} + \frac{\mu_t}{\sigma_Y} \right) \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x_j} \right) \right] - S_{\omega_i}$
	唯象表达式	$\tau = -(\nu_0 + \nu_T) \frac{d(\rho u)}{ds}$	$q = \frac{\alpha_h}{\rho \cdot c} (\rho_1 c_1 T_1 - \rho_2 c_2 T_2)$	$N = \alpha_D (c_1 - c_2)$
	传递系数 (交换系数)	$\xi_m = \nu_0 + \nu_T = \nu_e$	$\xi_h = \frac{\alpha_h}{\rho \cdot c}$	$\xi_D = \alpha_D$
	湍流传递阻力	$R_m = \frac{1}{\nu_e}$	$R_h = \frac{\rho \cdot c}{\alpha_h}$	$R_D = \frac{1}{\alpha_D}$
跃迁式传递	对比阻力 分子传递阻力 = 湍流传递阻力	$S = \frac{\xi}{\Gamma}$	$\frac{\alpha_h \cdot S}{\lambda} \quad (\equiv Nu) \text{ Nusselt 准数}$	$\frac{\alpha_D \cdot S}{D} \quad (\equiv Sh) \text{ Sherwood 准数}$
	物理现象	激波(声子或机械波跃迁)	热辐射(量子或电磁波跃迁)	放射性(原子核内微粒子嬗变)

表中符号: s——特征长度

c, ω——浓度, 物质组分
 ν_i ——湍流运动黏度
 D——扩散系数
 q_r ——能量源项
 α_h ——表面传热系数

c——比热容

ν_0 ——分子运动黏度
 α ——热扩散系数(导热系数)
 S_u ——动量源项
 S_{ω_i} ——物质源项
 α_D ——表面传质系数

t——时间

h——焓
 μ_0 ——分子动力黏度
 μ_t ——湍流动力黏度

1.3 单位与量纲

在工程上,对物理现象或物理量的度量称为量纲;各物理量的大小则用单位来表示,如力的单位取为牛顿(N)。

物理量的量纲可分为基本量纲和导出量纲两大类。在国际单位制中,常用的基本量纲有长度(L)、质量(M)、时间(T)和温度(Θ)。在工程单位制中,则一般取长度(L)、力(F)、时间(T)和温度(Θ)作为基本量纲。一旦选定了基本量纲,其他物理量的量纲(导出量纲)就都可以用基本量纲来表示。应用基本量纲表示导出量纲的式子,称为量纲式(或因次式)。例如,力的因次式为 $L \cdot M \cdot T^{-1}$,速度的量纲式为 $L \cdot T^{-1}$ 。由此可见,物理量的量纲或因次实质上表征的是该物理量的属性或种类,即物理量的性质。

对应于基本量纲和导出量纲,工程中的所有物理量也可以相应分为基本物理量和导出物理量两类。基本物理量与全部导出量的单位的总和则构成了单位制(或单位系)。目前全世界广泛应用的主要为两种单位制:英国工程制(English engineering system,简称英制)和国际单位制(Le Système International d'Unités)。

由于历史的原因,不同国家曾使用不同的单位制,反映到工程界就出现了多种单位制混杂的现象。如我国以前主要使用的单位制就包括有英制和米制,米制中又有绝对单位制(CGS制与MKS制),重量制(以长度、时间和重量为基本单位)和工程制(长度、时间、质量和重量四个量作基本单位)。我国国务院于1984年规定,我国的计量单位一律采用以国家单位制为基础的《中华人民共和国法定计量单位》^①;1993年我国制定的国家标准(GB 3100—1993)中规定,国际单位制(简称SI)是我国法定计量单位的基础,一切属于国际单位制的单位都是我国的法定计量单位,包括国际单位制的基本单位(见表1-2)、辅助单位与具有专门名称的导出单位。由于实用上的广泛性和重要性,除了国际单位制的单位以外,另又选定15个单位作为我国的法定计量单位,可与国际单位制单位并用,如时间单位中的分(min)、时(h)、日(d),质量单位中的吨(t),体积单位中的升(L),级差单位中的分贝(dB)等。

表 1-2 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	英文名称	单位符号
长度	米	meter	m
质量	千克(公斤)	kilogram	kg
时间	秒	second	s
电流	安[培]	ampere	A
热力学温度	开[尔文]	kelvin	K
物质的量	摩尔	mole	mol
发光强度	坎[德拉]	candela	cd

注:1. 圆括号中的名称,是它前面名称的同义词;

2. 无方括号的量的名称与单位名称均为全称;方括号中的字,在不致引起混淆、误解的情况下可以省略;去掉方括号中的字,即为其名称的简称。

为便于比较和区分,现将常用物理量的新旧单位制列表对照如下(见表1-3)。

① 国家计量局单位制办公室编. 中华人民共和国法定计量单位资料汇编. 计量出版社, 1984.

表 1-3 不同单位制对照表

量纲名称	量纲符号	国际单位制		绝对单位制		换算关系
		单位名称	单位符号	用基本量纲表示	CGS 制	
长度	L, l	米	m	m	cm	1 m = 100 cm
质量	m	公斤	kg	kg	g	$1 \text{ kg} = \frac{1}{9.807} (\text{kgf} \cdot \text{s}^2) / \text{m}$
时间	τ	秒	s	s	s	
力	F	牛[顿]	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	dyn	$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyn} = \frac{1}{9.807} \text{ kgf}$
密度	ρ	公斤/米 ³	kg/m^3	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}$	g/cm^3	$1 \text{ kg}/\text{m}^3 = 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3 = \frac{1}{9.807} \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$
压力、应力	p	帕[斯卡]	$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	dyn/cm^2	$1 \text{ Pa} = 10 \text{ dyn}/\text{cm}^2 = \frac{1}{9.807} \text{ kgf}/\text{m}^2$
动力粘度	μ	帕[斯卡]·秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$p = \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2}$	$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = \frac{1}{9.807} \text{ kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
运动粘度	ν	米 ² /秒	m^2/s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{St} = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St}$
功、能、热量	W	焦[耳] = 牛·米	$\text{J} = \text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	$\text{erg} = \text{dyn} \cdot \text{cm}$ cal	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 10^7 \text{ dyn} \cdot \text{cm} = \frac{1}{9.807} \text{ kgf} \cdot \text{m}$ $1 \text{ J} = 0.239 \text{ cal}$ (热化学) $= 0.2388 \text{ cal}$ (国际蒸汽表)
功率	P	瓦[特] = 焦[耳]/秒	$\text{W} = \text{J}/\text{s}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$	$\text{erg}/\text{s} = (\text{dyn} \cdot \text{cm})/\text{s}$	$1 \text{ W} = 1 \text{ J}/\text{s} = 10^7 \text{ erg}/\text{s} = \frac{1}{9.807} (\text{kgf} \cdot \text{m})/\text{s}$

工程中经常遇到单位制间的换算问题,而且往往由于换算不正确造成混乱和大的误差。因此必须严格地按换算因数(见附表 I),先将同一算式中所有物理量换算成同一种单位制,然后进行运算。

【例 1-1】 将 1 kgf/cm^2 换算成 Pa, 将 $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 换算成 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

【解】 从附表 I 查出: $1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}$, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgf/cm}^2 &= 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{9.807 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \cdot \frac{10^4 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 \\ &= 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

查表得 1 kcal (国际蒸汽表) = 4.1868 kJ

$$\begin{aligned} 1 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} &= 1 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \frac{4.1868 \times 10^3 \text{ J}}{1 \text{ kcal}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 1 \frac{^\circ\text{C}}{\text{K}} \\ &= 1.163 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} = 1.163 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

【例 1-2】 将下列经验公式换算成国际单位制。

$$\alpha = 39 \Delta t^{2.33} \cdot p^{0.5} [\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})]$$

式中: p 为绝对大气压, kgf/cm^2 ; Δt 为温度, $^\circ\text{C}$ 。

【解】 这类经验公式的函数与变量原来都不是国际单位,换算时应特别注意,不能只换算函数单位而忽略了变量单位换算,或者相反。应该分别对函数和自变量同时换算。分两步来理解:

(1) 先将函数换算成国际单位:这时各自变量应该用原定单位制代入才正确,如若自变量也使用国际单位,则必进行第二步,即:

(2) 将公式中各自变量由国际单位换算成原单位。

第一步 将 α 函数的 $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 换算成 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 即

$$\begin{aligned} \alpha &= (39 \cdot \Delta t^{2.33} \cdot p^{0.5}) [\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})] \\ &= (39 \cdot \Delta t^{2.33} \cdot p^{0.5}) \times 1.163 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \\ &= 45.357 (\Delta t^{2.33} \cdot p^{0.5}) [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \end{aligned}$$

此时公式中的 Δt 与 p 仍为原单位未动,即使用此经验公式时要求 Δt 与 p 应按原单位制代入。假如现在要求自变量 Δt 与 p 也用国际单位制,则为了保持自变量与函数的实验关系不变,应该将国际制的变量换算成原单位制的变量再代入,即要求进行第二步换算:

$$\text{第二步} \quad \Delta t (\text{K}) = \Delta t (\text{K}) \times \frac{^\circ\text{C}}{\text{K}} = \Delta t (^\circ\text{C})$$

$$1 \text{ bar} = 1.0197 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 45.357 [\Delta t^{2.33} \cdot (1.0197 \times p)^{0.5}] \\ &= 45.8 \Delta t^{2.33} \cdot p^{0.5} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \end{aligned}$$

式中: p 的单位为 bar。

【例 1-3】 将 $G = 2.45u^{0.8} \cdot \Delta p$ ($\text{pb}(\text{weight})/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$) 换算成用国际单位制表达的公式。式中 u 的原单位为 ft/s , Δp 的单位为 atm 。

【解】 因 $1 \text{ pb}(\text{weight}) = 0.4535 \text{ kg}$

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{故: } 1 \frac{\text{pb}(\text{weight})}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} &= 1 \frac{\text{pb}(\text{weight})}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \cdot \frac{0.4535 \text{ kg}}{1 \text{ pb}(\text{weight})} \cdot \frac{1 \text{ ft}^2}{(0.3048 \text{ m})^2} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \\ G &= 1.356 \times 10^{-3} \times (2.45u^{0.3} \cdot \Delta p) \\ &= 3.32 \times 10^{-3} \times u^{0.8} \cdot \Delta p \text{ [kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \end{aligned}$$

上式中的 u 的单位是 ft/s, Δp 的单位为 atm,

又

$$1 \text{ m/s} = 3.28 \text{ ft/s}$$

$$1 \text{ bar} = 1.0197 \text{ atm}$$

$$\begin{aligned} G &= 3.32 \times 10^{-3} \times (3.28u)^{0.8} \cdot (1.0197\Delta p) \\ &= 8.756 \times 10^{-3} u^{0.8} \cdot \Delta p \text{ [kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \end{aligned}$$

换算后式中的 u 用 m/s, Δp 用 bar 表示。

单位换算习题

1-1 将 pb(weight)/ft² 换算成 N/m²; 将 N/m² 换算成 pb(weight)/ft²; 将 [pb(force) · h]/ft² 换算成 (N·m)/m²。 (答: 47.88; 1.45 × 10⁻⁴; 1.723 × 10⁵.)

1-2 将 (kgf·m)/s 换算成 W; 将 Pa·s 换算成 (kgf·s)/m²; 将 (kgf·s)/m⁴ 换算成 kg/m³。 (答: 9.807; 0.10197; 9.807)

1-3 将 cal/(cm²·s·°C) 换算成 W/(m²·K); 将 kcal/(m²·h·°C) [千卡/米²·时·°C] 换算成 W/(m²·K)。 (答: 4.1868 × 10⁴; 1.163)

1-4 $\alpha = \beta \frac{\gamma \cdot u^{0.8}}{d^{0.2}} \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 式中 β 为常数, γu 为重量流速, kgf/(m²·K); d 为直径, m。将上式的函数和变量都换算成国际单位制。

(答: $1.163\beta \frac{(\rho u)^{0.8}}{d^{0.2}} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 式中: ρ , kg/m³; u , m/s)。

1-5 将 $\alpha = 0.0257 \frac{(\rho u)^{0.6}}{d^{0.4}}$ (英热制单位/(h·ft²·°F)) 全部都换算成国际单位。原式中 ρu 为质量流速, pb(weight)/(ft²·h); d 为直径, ft。

(答: $\alpha = 497.766 \frac{(\rho u)^{0.6}}{d^{0.4}} (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ρu , kg/(m³·s); d , m)。