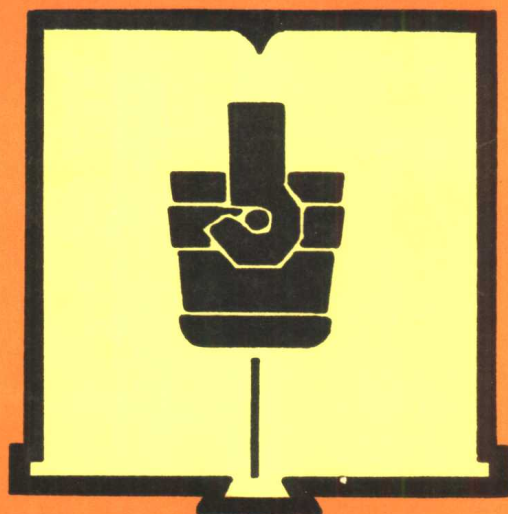


高等专科学校教学用书

冶金炉热工基础

蒋光羲 编

GAODENG ZHUANKE XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



重庆大学出版社

高等专科学校教学用书

冶金炉热工基础

重庆钢铁高等专科学校 蒋光羲 编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书是冶金类高等专科学校的通用教材。全书分七章,全面系统地介绍了动量传输、热量传输和质量传输理论及其在冶金工业上的应用,以及热工基础计算。本书附有较多的习题及例题,以增强学生解决生产实际问题的能力。

本书可供高等专科学校冶金专业学生、冶金工程技术人员及相关学科的工程技术人员使用。

冶金炉热工基础

蒋光葵 编

责任编辑 何光杰

重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆市大足新华印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:536千

1993年12月第1版 1993年12月第1次印刷

印数:1—2000

标准书号: ISBN 7-5624-0632-4 定价:10.23元
TF·6

(川)新登字 020 号

前 言

本书系根据高等冶金专科学校冶金类教学计划中《冶金炉热工基础》课程教学大纲编写的。本书适用于钢铁冶金、压力加工及有色冶金等专业。各专业可根据本专业特点及需要,在内容上加以取舍。

冶金炉热工基础是冶金类各专业的技术基础课程之一。随着科学技术的发展,传输原理已构成了冶金过程中物理过程的基本理论(热工过程是冶金物理过程之一)。传输原理在冶金过程中的应用,使冶金过程中的一些物理过程得到了深入而准确的解析,使冶金中热工过程的分析与研究大大地提高了一步,特别是与电子计算机的结合与应用,解决了不少实际问题。各高等院校都已将《冶金炉热工基础》课改造为《传输原理》课,其中传输原理包括动量传输、热量传输和质量传输三部分。考虑到专科教学以应用为主的特点,作者在编写过程中删减了冗长的数学推导过程,着重于阐明物理概念,指出解题的思路、结论的应用范围及使用条件。

根据高等专科培养生产第一线应用型高等技术人材的特点,本书对冶金热工过程的一般现象,如燃料燃烧、炉内气体流动、炉内传热及热平衡等内容也作了简明扼要的介绍。为加强基本技能的训练,每章末附有一定数量的习题。

本书的体系是独特的,它不同于传输原理,也不同于过去的冶金炉热工基础的体系。本书曾作内部讲义在重庆钢铁高等专科学校炼铁、炼钢、压力加工专业中连续用过四届,证明该体系是可行的,其内容对专科学校是适用的。在本书的形成和编写过程中,得到重庆大学冶金及材料工程系冶金炉教研室各位老师,特别是高家锐教授的大力支持与帮助,编者深表敬意。

本书由重庆钢铁高等专科学校蒋光羲副教授编写,重庆大学刘成全副教授、重庆钢铁高等专科学校张盈森副教授审稿。在审稿过程中,结合专科学校的特点,提出不少宝贵意见,在此表示衷心谢意。

由于编者水平有限,本书在形成过程中虽经多次修改,但缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者

1992年2月

EAC51/10

目 录

绪 论

§ 0.1 本课程内容梗概	(1)
§ 0.2 单位及单位制	(1)
§ 0.3 坐标及坐标系	(2)

第1章 动量传输

§ 1.1 流体的主要性质	(4)
1.1.1 流体的压缩性及膨胀性	(4)
1.1.2 流体的粘性	(6)
1.1.3 流体上的作用力、能量及动量	(9)
§ 1.2 流体运动的基本特性	(10)
1.2.1 流体流动的起因	(11)
1.2.2 流体流动的两种状态	(11)
1.2.3 连续介质、质点、微团及控制体	(14)
1.2.4 流体运动的研究方法	(15)
1.2.5 流体的流量及流速	(17)
1.2.6 梯度、散度及旋度	(18)
1.2.7 流函数	(23)
1.2.8 势函数	(26)
§ 1.3 动量传输的基本定律	(28)
1.3.1 流体质量平衡方程式——连续性方程式	(28)
1.3.2 粘性流体动量平衡方程式(纳维——斯托克斯方程)	(31)
1.3.3 理想流体动量平衡方程式——欧拉方程	(36)
1.3.4 伯努利方程	(37)
1.3.5 流体静力平衡方程式	(46)
1.3.6 紊流动量传输方程简介	(51)
1.3.7 附面层积分方程简介	(52)
§ 1.4 流体动量传输中的阻力	(55)
1.4.1 不可压缩流体的管流摩阻	(55)
1.4.2 管流局部阻力损失	(60)
1.4.3 管流系统的阻力损失	(61)
1.4.4 绕流阻力	(64)
§ 1.5 流体的流出	(64)
1.5.1 不可压缩流体自小孔的流出	(65)
1.5.2 可压缩性流体的流出	(67)
1.5.3 液体通过容器底部小孔的流出	(75)

§ 1.6 射流	(76)
1.6.1 自由射流	(76)
1.6.2 两自由射流相互作用	(79)
1.6.3 半限制射流——射流与平面相遇	(81)
1.6.4 限制射流	(83)
1.6.5 旋转射流	(84)
§ 1.7 两相动量传输简介	(89)
1.7.1 气、液两相流动	(89)
1.7.2 气、固两相流动	(91)
§ 1.8 相似原理及因次分析	(98)
1.8.1 相似的概念	(99)
1.8.2 相似定理	(102)
1.8.3 相似原理求解物理方程	(103)
1.8.4 因次分析及 π 定理	(106)
1.8.5 相似模型法	(108)
§ 1.9 习题	(112)

第2章 热量传输

§ 2.1 基本概念及基本定律	(117)
2.1.1 基本概念	(117)
2.1.2 基本定律	(119)
§ 2.2 稳定导热	(125)
2.2.1 一维平壁稳定导热	(125)
2.2.2 一维圆筒壁稳定导热	(130)
§ 2.3 对流换热	(137)
2.3.1 概述	(137)
2.3.2 流体流过平板时的对流换热	(139)
2.3.3 流体在管内流动时的对流换热	(143)
2.3.4 流体通过其他物体时的对流换热	(148)
2.3.5 自然对流换热	(153)
2.3.6 强制对流与自然对流共同存在时的对流换热	(156)
§ 2.4 辐射换热	(156)
2.4.1 热辐射的基本概念	(157)
2.4.2 热辐射的基本定律	(159)
2.4.3 固体表面间的辐射换热	(166)
2.4.4 气体与固体间的辐射换热	(176)
2.4.5 对流与辐射共同存在时的热量传输	(184)
§ 2.5 不稳定导热	(184)
2.5.1 不稳定导热中的基本概念	(185)
2.5.2 第三类边界条件下的薄材加热	(187)
2.5.3 第三类边界条件下有限厚物体的不稳定导热	(189)
2.5.4 第一类边界条件下有限厚物体的不稳定导热	(194)

2.5.5 通过表面热通量 q_w 为常数的第二类边界条件下的不稳定导热	(196)
§ 2.6 导热的有限差分解法	(198)
2.6.1 有限差分法的基本概念	(198)
2.6.2 稳定导热的差分解法	(199)
2.6.3 一维不稳定导热的差分解法	(203)
§ 2.7 习题	(206)

第3章 质量传输

§ 3.1 质量传输的基本概念及基本定律	(209)
3.1.1 浓度及其表示方法	(209)
3.1.2 质量传输基本定律	(211)
§ 3.2 扩散传质	(216)
3.2.1 稳定扩散传质	(216)
3.2.2 不稳定扩散传质	(218)
§ 3.3 对流传质	(220)
3.3.1 对流传质的基本概念	(220)
3.3.2 流体流过物体表面时的对流传质	(222)
§ 3.4 动量、热量、质量传输的类比	(223)
3.4.1 雷诺类似律	(223)
3.4.2 柯尔本类似律	(224)
3.4.3 热量、质量传输共同存在时的类比关系	(224)
§ 3.5 习题	(225)

第4章 燃料及燃烧计算

§ 4.1 燃料的通性	(226)
4.1.1 燃料的化学组成	(226)
4.1.2 燃料的发热量	(230)
§ 4.2 燃料的燃烧	(231)
4.2.1 气体燃料的燃烧	(231)
4.2.2 液体燃料的燃烧	(234)
4.2.3 固体燃料的燃烧	(234)
§ 4.3 燃烧计算	(235)
4.3.1 燃料燃烧的分析计算法	(235)
4.3.2 经验公式计算法	(241)
4.3.3 空气消耗系数	(242)
§ 4.4 燃烧温度及其计算	(245)
4.4.1 燃烧温度的概念	(245)
4.4.2 燃烧温度的计算	(248)
4.4.3 影响燃烧温度的因素	(250)
§ 4.5 习题	(250)

第5章 冶金炉内气体流动

§ 5.1 热气体相对于大气的特殊规律	(252)
---------------------------	-------

5.1.1 热气体的压头	(252)
5.1.2 热气体平衡方程式	(255)
5.1.3 热气体管流的伯努利方程式	(255)
5.1.4 热气体管流时的阻力损失计算	(256)
§ 5.2 排烟系统及烟囱	(257)
5.2.1 烟囱	(257)
5.2.2 烟道	(260)
§ 5.3 供气系统及其有关计算	(263)
5.3.1 供气管道	(263)
5.3.2 常用风机简介	(264)
5.3.3 离心式通风机特性及选择计算	(266)
5.3.4 喷射器	(272)
§ 5.4 习题	(276)

第6章 冶金炉内传热

§ 6.1 火焰炉炉膛内热交换	(278)
6.1.1 火焰炉炉膛内传热量的计算公式	(278)
6.1.2 炉膛热交换公式的分析	(280)
§ 6.2 散料层内热交换	(283)
6.2.1 料块内部热阻很小($Bi \leq 0.25$)时的热交换	(284)
6.2.2 炉气与料块间的换热系数	(286)
6.2.3 考虑料块内热阻时的热交换	(287)
§ 6.3 余热利用设备及其热工计算	(287)
6.3.1 换热器	(288)
6.3.2 蓄热室	(295)
§ 6.4 习题	(300)

第7章 热平衡及烟平衡

§ 7.1 热平衡	(301)
7.1.1 概述	(301)
7.1.2 热收入项计算	(302)
7.1.3 热支出项计算	(303)
7.1.4 热平衡表的编制及燃料消耗量的确定	(305)
§ 7.2 烟及烟平衡	(306)
7.2.1 烟及烟值计算	(306)
7.2.2 烟损的计算	(307)
7.2.3 用烟的观点对冶金燃料进行评价	(308)
7.2.4 烟平衡及其热工分析	(309)
附录	(311)
主要参考文献	(336)

绪 论

§ 0.1 本课程内容梗概

“冶金炉热工基础”是高等工程专科学校冶金类各专业(炼铁、炼钢、有色冶炼、压力加工等)的专业基础技术课。

冶金过程一般可分为化学及物理两大过程。冶金炉热工所研究的问题是物理过程的范畴,它不涉及化学反应等方面的问题。传输理论又称传输原理,构成物理系统方面的理论基础,传输理论是近代科学技术发展过程中出现的一门独立学科。传输与传递、转移同义,都是指自然界不同条件下的物质或能量随空间及时间的变化。所谓传输现象(Transport Phenomena)是指流体的动力过程、传热过程和物质传送过程等的统称。在这些过程中进行着动量、热量、质量的传递。三种过程具有类似的运动规律,能以类似的微分方程加以描述,因此可以通过某类现象去研究另一类现象;特别有利于存在两种以上现象的综合分析与解析。60年代初期,传输理论作为一门独立科学而出现,应用于许多科学技术领域之中,发展迅速,国外称之为关键工程学(Key Engineering Science),成为各类工程专业必修的基础学科。

从冶金炉热工理论的提出和发展来看,实际上也是从传输角度开始形成及逐步发展起来的。比如本世纪初提出的“炉子水力学原理”,被认为是炉子热工的最早理论,就是首先将流体动量传输的某些原则应用于炉子热工过程的分析。尔后出现的诸如“炉子能量理论”、“炉子一般原理”、“炉子现代理论”等,进一步把流体动量传输及热量传输的个别理论应用于炉子热工过程的研究和解析。随着冶金工业的发展及科学技术水平的不断提高,这些热工理论从深度及广度上已不能适应现代化生产的要求了。70年代初,传输理论直接引入冶金学科,与此同时也极大地发展了热工过程理论及其研究方法。传输理论已成为现代冶金炉热工理论的基础。本书第1章至第3章将对动量、热量、质量传输的基本理论予以系统的、重点的介绍。

冶金炉热工过程牵涉到很多计算问题。尽管各种炉子都有一套适合于该炉子的设计计算方法,但是对热工过程而言,一些基本的计算方法是具有共性的;它们是燃料燃烧计算、炉子系统的气体流动计算、炉内传热计算、热平衡计算等。大多数热工过程计算的基本公式来源于传输理论的解析式。从这个意义上讲热工过程基本计算是传输理论的具体应用。本书第4章至第7章将介绍这些计算方法以及相关的基本知识。

§ 0.2 单位及单位制

传输理论是指物质或能量随空间及时间的变化现象,具体地说是各类物理量对空间及时间的变化规律。热工过程涉及到质量、长度、时间、力、能、速度、温度、粘度……等诸多物理量。众所周知,一个物理量包括数字及单位(因次)两个部分,同一物理量,依所选用的单位不同而有不同的数值。通常将物理量的单位分为基本单位及导出单位两大类,随基本单位不同会导出

一系列导出单位,称之为单位制。

本书采用国际单位制。它的基本单位是:质量以千克(kg)表示,长度以米(m)表示,时间以秒(s)表示,电流强度以安培(A)表示,物质的量以摩尔(mol)表示,发光强度以坎伯拉(cd)表示,共7个。其它物理量均系这些基本量的导出单位。例如密度为 kg/m^3 , 力为牛顿($1\text{N}=\text{kgf} \cdot \text{m/s}^2$)等。能量诸如机械能、电能、热能等均用焦耳($1\text{J}=1\text{N} \cdot \text{m}$)。国际单位制记为SI。

由于历史上的原因,一些文献中仍有采用工程单位制的,所以也顺便提一下工程单位制。在工程单位制中基本单位有长度以米(m)表示,时间以秒(s)表示,力以千克力(kgf)表示,温度以摄氏度($^{\circ}\text{C}$)表示,热量以千卡(kcal)表示。本书对常用的工程单位或用〔 〕标注在国际单位制之后,或给出两者的换算表供查用。此处只拟提出两点值得注意之处。

其一是质量单位。国际单位制中质量是基本单位,力是导出单位。 1N 的力能使 1kg 质量产生 1m/s^2 的加速度。工程单位制中力是基本单位, 1 千克力的大小等于国际单位制中 1kg 质量在重力加速度为 9.80665m/s^2 的海平面上的重力或重量。根据牛顿第二定律,工程单位制中 1 千克力等于国际单位制中 1 牛顿力的 9.80665 倍。工程单位制中质量是导出单位,称为工程质量单位,没有专门名称,单位是千克力·秒²/米($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$),这一单位质量,在 1 千克力作用下只能产生 1m/s^2 的加速度。

其二是能量单位。特别是热能单位经常遇到。在国际单位制中能量单位是焦耳(J),且 $1\text{J}=1\text{N} \cdot \text{s}$, 功率单位为瓦(W),且 $1\text{W}=1\text{J/s}$, 或者分别用 kJ、kW 来表示。工程单位制中热能单位用千卡(kcal)表示,且 $1\text{kcal}=4.187\text{kJ}$ 。在工程单位制中常碰到千卡/小时(kcal/h)这个单位,它与瓦(W)的换算关系如下:

$$1\text{kcal/h} = \frac{4.187 \times 10^3}{3600} \text{J/s} = 1.163 \text{J/s} = 1.163 \text{W}$$

§ 0.3 坐标及坐标系

一个物理量在空间中的位置依坐标系而异。例如速度向量在直角坐标系可用 $w(x, y, z)$ 表示它的位置,而且分解为 x, y, z 三个方向上的速度分量 w_x, w_y, w_z 。见图 0-3-1

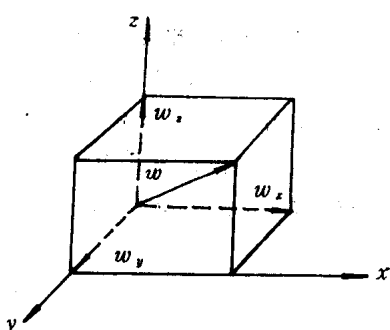


图 0-3-1 直角坐标系

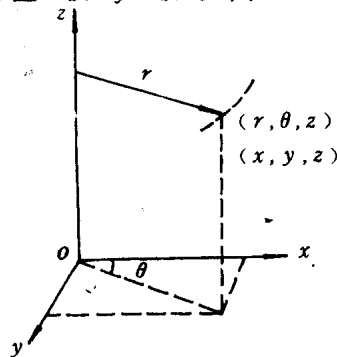


图 0-3-2 柱坐标系

从数学分析中可知

$$w = iw_x + jw_y + kw_z, w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}$$

式中 i, j, k 分别代表 x, y, z 方向上的单位矢量。 w 的方向由方向余弦 $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ 决定,其中 α, β, γ 分别为 w 与 x, y, z 三个轴的夹角。

对一些轴对称的问题,应用圆柱坐标比较方便。圆柱坐标分别以 r 、 θ 、 z 为径向、周向、轴向坐标,它与直角坐标 x 、 y 、 z 的相应关系见图 0-3-2 所示。

从图中可以看出

$$x=r\cos\theta, y=r\sin\theta, z=z$$

相应各方向的分速度为

$$w_r=w_y\sin\theta+w_x\cos\theta, w_\theta=w_y\cos\theta-w_x\sin\theta, w_z=w_z$$

本书中如不特别指出均按直角坐标系分析。在传输理论中有时还要用到球坐标系,限于篇幅不另赘述。

第1章 动量传输

物质及能量的传输过程,按其存在及产生的条件可分为物性传输和对流传输两大类。物性传输主要决定于物体本身的物性。而对流传输则是由于物体的质量运动(空间上的宏观位移)而引起,它不仅与物性有关,还取决于物体的流动状态。由于物质及能量的传输过程本身就包括着时间概念,因此传输过程又有速率过程之称。

动量传输主要研究流体的性质及流动特性。它涉及的范围包括流体的静力学及动力学等。流体在流动过程中存在着各种力、能、动量之间的平衡与传递。力、能、动量的含义不同,但它们之间存在着内在联系,是不同条件下的不同表现形式。所以动量传输可理解为流体流动过程中力或能量的平衡及传递。

冶金过程中,流体的流动与传热及传质常常同时存在。例如,换热器中的高温气体把热量传给较低温度的器壁时,器壁受热升温,热量传输的速率与流体的性质及流动形式有关。又如,石墨溶于铁液的过程,其溶解速率与靠近石墨的铁液流动状况有关。所以动量传输可以被认为是传输现象中的最基本传输过程。

§ 1.1 流体的主要性质

流体是相对固体而言,在自然界中能够流动的物质如液体及气体统称流体。从物体的受力特点看,固体在受剪力的作用下仅能表现为一定的变形,而且当作用力不变时,该变形就会停止。由于流体内部的内聚力极其微小,相对于拉力及剪切力来讲,它们都可以被认为是没有抵抗力的。当流体受有任何剪切力时就能连续变形(流动)。流体的流动性就是与固体不同的这种容易变形即流动的特性。由于气体分子的平均间距远大于液体,分子间的引力较小而更易自由流动,因此气体分子的自由运动使之能充满容器的空间。液体虽然也具有受容器限制的一定体积,但在其与气体共存于一定空间时,则存在着一定的自由表面。流体除流动性外还具有压缩性及粘性。

1.1.1 流体的压缩性及膨胀性

流体的体积随所受的压力增加而减少,或随温度的升高而减小称为流体的压缩性,相反过程则称为膨胀过程。流体的体积变化将引起密度的变化,密度是流体的一个重要特性。

1. 流体的密度及重度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度(ρ);单位体积流体的重量(重力)叫重度(γ)。

对质量分布不均匀的流体,某点密度的定义式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1-1)$$

式中 ΔV ——流体微元体积, m^3 ; Δm ——微元体积的质量, kg 。

对质量分布均匀的流体(均质流体)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-1-2)$$

式中 V ——流体的体积, m^3 ; m ——流体的质量, kg 。

均质流体的重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad \text{N/m}^3 \quad (1-1-3)$$

式中 G ——流体的重量(重力), N ; g ——重力加速度, m/s^2 。

单位质量流体所占有的体积称为比容, 用 v 表示, 显然, 比容与密度互为倒数, 即

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

重量及重度的概念一般只在工程单位制中应用, 在国际单位制中常用 ρg 来代表重力, 有时采用 γ 比较方便, 但要注意其单位是 N/m^3 , 而不是工程单位制中的 kgf/m^3 。

由于工程单位制中 1kg 重(力)之物, 其质量正好是国际单位制中的 1kg , 故国际单位制中的密度(每 m^3 中的质量)在数值上就等于工程单位制中的重度(每 m^3 中的重量)。常用流体的密度(或重度)值, 可参考附表 1、附表 2、附表 3。

【例 1-1-1】 已知水的重度 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1000\text{kgf/m}^3$, 空气的重度 $\gamma_a = 1.293\text{kgf/m}^3$, 试确定其密度。

解: 在工程单位制中

$$\text{因为 } \gamma = \rho g \quad \text{所以 } \rho = \frac{\gamma}{g}$$

$$\text{对水 } \rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1000}{9.81} = 102\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

$$\text{对空气 } \rho_a = \frac{1.293}{9.81} = 0.132\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

在国际单位制中, 因为国际单位制中密度的数值与工程单位制中重度的数值相等, 所以

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000\text{kg/m}^3, \quad \rho_a = 1.293\text{kg/m}^3$$

2. 液体的膨胀性及压缩性

液体的分子本来靠得比较近, 当压缩液体时, 分子被挤压, 排斥力增大, 分子越靠近, 排斥力越大, 故液体很难压缩。例如, 水在 $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 、 $1 \sim 500\text{atm}$ 范围内, 每增加 1atm 水的体积只被压缩 $1/20000$, 其他液体的情况也与此相类似。在工程压力范围内, 实际上可以认为液体是不可压缩的。液体温度升高时, 体积略有膨胀, 在 1atm 、 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内, 温度每升高 1°C , 液体体积仅增加 $1.5/10000$ 。温度较高时体积膨胀系数也不超过 $1/1000$ 。在实际工程计算中, 除特殊场合外, 一般不考虑液体的体积变化。

3. 气体的膨胀性及压缩性

气体分子间距较大, 彼此间的吸引力小, 当压力或温度发生变化时, 其体积(或比容)、密度(或重度)等将发生很大变化。对理想气体而言, 这种变化数量间的关系可用气体状态方程式表示, 即

$$pV_\mu = R_0 T \quad (\text{对 } 1\text{kmol 气体}) \quad (1-1-5)$$

$$pV = RT \quad (\text{对 } 1\text{kg 气体}) \quad (1-1-6)$$

$$pV = GRT \quad (\text{对 } G\text{kg 气体}) \quad (1-1-7)$$

式中 R_0 ——通用气体常数, $8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ [$848\text{kgf} \cdot \text{m}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$];

R ——气体常数, 随气体种类而异, 且 $R = R_0/\mu, \text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$;

μ ——气体的分子量； p ——气体的绝对压力； v ——气体的比容；

V_μ ——千摩尔气体的体积； V —— G 千克气体的体积。

气体在等温压缩时，根据式(1-1-6)，下式成立

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (1-1-8)$$

式中 p_1, p_2 ——两种状态下气体的压力，Pa(N/m²)；

v_1, v_2 ——两种状态下气体的比容，m³/kg。

由式(1-1-4)及式(1-1-8)可得

$$\left. \begin{aligned} \rho_2 &= \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \\ \gamma_2 &= \gamma_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-9)$$

式中 ρ_1, ρ_2 ——两种状态下气体的密度，kg/m³；

γ_2, γ_1 ——两种状态下气体的重度，N/m[kgf/m³]。

气体在恒压下，根据状态方程式，下式成立

$$V_1 T_1 = V_2 T_2 \text{ 或 } V_2 = V_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (1-1-10)$$

式中 T_1, T_2 ——气体在两种状态下的温度，K。

若设气体在 $t^\circ\text{C}$ 下的比容为 v_t ，标准状态下的比容为 v_0 ，则对式(1-1-8)可转换为

$$v_t = v_0 (1 + \beta t) \quad (1-1-11)$$

式中 β ——气体的膨胀系数，1/273。

因此可以得到

$$\left. \begin{aligned} \rho_t &= \frac{\rho_0}{(1 + \beta t)} \\ \gamma_t &= \frac{\gamma_0}{(1 + \beta t)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-12)$$

式(1-1-11)中的比容可以用气体的体积或体积流量 V (单位时间通过一定截面气体的体积，m³/s。也用 V 表示)，则体积流量、流速与温度之间的关系为

$$V_t = V_0 (1 + \beta t) \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1-1-13)$$

$$w_t = w_0 (1 + \beta t) \quad \text{m/s} \quad (1-1-14)$$

气体在绝热状态下压缩时，由热力学决定的压力及比容关系为

$$p_1 V_1^K = p_2 V_2^K \text{ 或 } V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (1-1-15a)$$

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (1-1-15b)$$

式中 K ——气体的绝热指数， $K = c_p / c_v$ ； c_p ——气体的定压比热，(kJ/kg · K)；

c_v ——气体的定容比热，kJ/kg · K。

各种常见气体的气体常数 R ，比热(包括定压及定容比热) c_p, c_v ，以及绝热指数 K 的数值可查附表 5。

1.1.2 流体的粘性

1. 流体的粘性及粘性力

在自然界中，实际流体流动时，其本身所表现出的一种阻滞流体流动的性质称为粘性。流

体的粘性是由流体分子之间的内聚力和分子的扩散而造成的。流体与另一流体表面或固体表面接触时表现为流体分子对表面的附着力。

现以图 1-1-1 说明粘性力的建立过程及其特征。设有粘性的流体充满两平行的平板之间,上板固定不变,下板以不变的速度 w_0 运动。当下板开始移动的瞬间($t=0$ 时刻),附着于下板的流体薄层亦随之以 w_0 的速度开始运动,如图 1-1-1a 所示。由于靠近平板流体薄层的运动,与之相邻的流体因粘性作用亦被带动并按同一方向流动,如图 1-1-1b 所示。经过一段时间以后,两平板之间的流体逐次被相邻流层所带动,形成如图 1-1-1c 所示的稳定状态。从图中看出流速沿 y 方向变化且为线性分布规律。若流速沿 y 方向不是线性分布规律,则如图 1-1-2 所示。无论速度分布规律如何,当这种速度分布规律不随时间变化时,即处于稳定状态时,流体内部流层及流体与平板之间会出现速度差。由于分子的热运动,一部分流体分子由较快的一层进入较慢的一层;也有一部分流体分子由较慢的一层进入较快的一层,这样在两流层之间就产生动量交换。较快的一层显示出一种拉力(拖力)带动较慢的一层,而较慢的一层则显示出一种与拉力大小相等、方向相反的阻力(滞力)阻止较快的一层前进,这一对力称为切应力。

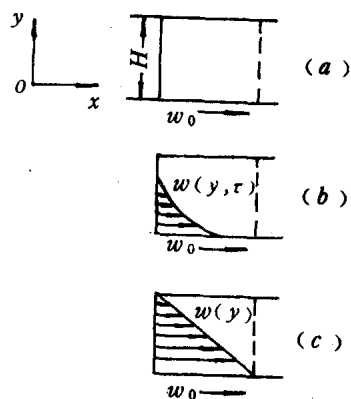


图 1-1-1 流体的粘性

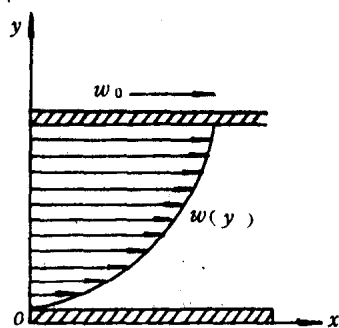


图 1-1-2 非线性流速分布

分子之间的内聚力对相邻两流层也起着带动或阻止流动的相互作用。所以,分子的热运动及内聚力是产生切应力的根源。流体流层间产生切应力的现象叫流体的粘性,而这种切应力称为粘性力。一般对流体内部流层之间的粘性力叫内摩擦力,流体与表面之间的粘性力称为摩擦力。

2. 牛顿粘性定律

牛顿在 1686 年就提出了粘性定律的假说,直到 1841 年为普阿节尔通过实验所证实。牛顿定律指出,流体的粘性力(F)与速度成正比,与接触面积(A)成正比,与法线方向距离(y)成反比。数学表达式为

$$F \propto \frac{w}{y} A \quad (1)$$

若求两流层之间的粘性力 F ,按图 1-1-1 的情况为

$$F \propto \frac{\Delta w}{\Delta y} A \quad (2)$$

按图 1-1-2 的情况为

$$F \propto \frac{dw}{dy} A \quad (3)$$

式(2)是式(3)的特殊情况,将式(3)写为等式,则

$$F = \mu \frac{dw}{dy} A \quad \text{N} \quad (1-1-16a)$$

单位面积上的切应力 τ_{yx} (表示在 y 方向有速度变化,流向为 x 方向)为

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A} = \pm \mu \frac{dw}{dy} \quad \text{N/m}^2 \quad (1-1-16b)$$

式中正负号的出现是因为： τ_{yx} 为正值， μ 亦为正值，而 dw/dy 可为正也可为负，为了保证 τ_{yx} 为正值，所以在 dw/dy 为负时，公式前取负号。例如图 1-1-2 所示，因速度沿 y 方向是减低的， dw/dy 为负，所以公式前取负号。

3. 粘性系数

由式(1-1-16)可以看出， μ 为决定流体粘性的比例系数，称为流体的动力粘性系数或动力粘度。 μ 的单位为导出单位，可由公式(1-1-16)导出

$$\mu = \frac{\tau_{yx}}{dw/dy} \quad \text{N} \cdot \text{s/m}^2 \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad [\text{kgf}/(\text{m} \cdot \text{s})] \quad (1-1-17a)$$

10^{-1} 帕(Pa)为 1 泊(p)， 10^{-2} 泊为 1 厘泊(cp)。

μ 的物理意义为，在 y 方向的速度变化率 dw/dy (称速度梯度，梯度的概念后面再详细介绍)为一单位时，单位面积上的切应力。

为了应用上的方便， μ 可以用运动粘度 ν 及内摩擦系数 η 来表示，它们被定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (1-1-17b)$$

$$\eta = \mu g \quad \text{kg/s}^3 \quad [\text{kgf}/(\text{m} \cdot \text{s})] \quad (1-1-17c)$$

ν 也常用沱(st)的单位，1 沱等于 $1\text{cm}^2/\text{s}$ 即 $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ 。

一般来讲压力变化对流体的粘性没有多大影响，可以认为粘度仅与温度有关。

水的 ν 与温度间的关系可用下面的经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0837t + 0.000221t^2} \quad \text{cm}^2/\text{s} \quad (1-1-18a)$$

液体分子的间距小，它的粘性以分子内聚力为主，所以液体粘度随温度升高而加大。几种液体在不同温度下的粘度见附表 3。

气体分子间距大，内聚力小，粘性主要由分子热运动产生，所以温度升高 μ 值增大，可用下式作近似计算

$$\mu = \mu_0 \frac{273+C}{T+C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (1-1-18b)$$

式中 μ_0 ——气体在 0°C 时的粘度； T ——气体的绝对温度，K； C ——实验常数。

常见气体的 μ_0 、 C 值见附表 4。混合气体的粘度按下式近似计算

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot M_i^{1/2} \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n a_i \cdot M_i^{1/2}} \quad (1-1-19)$$

式中 a_i ——混合气体中 i 组分的体积百分数；

M_i ——混合气体中 i 组分的分子量；

μ_i ——混合气体中 i 组分的粘度。

4. 粘性动量传输及动量通量

牛顿粘性定律说明了粘性力的起因和特点，它也可以说明流体的粘性所构成的动量传输过程。粘性是流体的物性，故粘性动量传输属于物性传输。

由于流体本身具有一定的质量，速度不等的流层就意味着各流层的动量不等；一个流层带动另一个流层运动，这说明前者将动量传给后者。也就是说不同流层之间的这种粘性力作用就是流体进行着动量传输。

单位时间通过单位面积所传递的动量称为动量传输通量,相当于单位面积上的作用力。在速度不等的流层之间单位面积上的粘性力 τ_{yx} 已由式(1-1-20)所确定, τ_{yx} 也就是粘性动量通量。即

$$\tau_{yx} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho w_x)}{dy} = -\nu \frac{d(\rho w_x)}{dy} \quad \text{Pa} \quad (1-1-20)$$

流体的密度 ρ 为单位体积流体的质量,则 $d(\rho w_x)/dy$ 相应为单位体积流体在 y 方向的动量梯度,其单位为 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}}{\text{m}}$ 。 τ_{yx} 的单位为 N/m^2 或改写为 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$,即单位面积单位时间的动量,称之为粘性动量通量。运动粘度称为粘性动量传输系数。

粘性动量与粘度不同之处在于传递方向不同。粘性动量从高速流层向低速流层方向传递,正如热量由高温向低温传递一样。值得指出的是,粘性动量的传输公式只适用于层流状态,在紊流状态时应按匀速度来考虑流速。层流与紊流的更详细说明见后面流体流动特性。

5. 理想流体模型

流体的粘性及其影响因素都比较复杂,这就给研究流体运动规律带来很多不便,因此流体动量传输中常采用理想流体(无粘性流体)模型。此模型假定流体不存在粘性力,即无内摩擦力。在处理实际流体(粘性流体)时,首先运用理想流体模型求出理论分析解,再借助实验手段对实际流体所存在的粘性加以修正和补充,使理论与实际统一起来。需注意的是,这里的理想流体模型与气体状态方程式中的理想气体不是同一概念,后者忽略了气体分子间的吸引力,为了区别起见,有时将后者称为“完全气体”。

1.1.3 流体上的作用力、能量及动量

作用在流体上的力可分为表面力及体积力两大类。

表面力是指作用在流体表面上(包括流体与固体的界面,不同流体之间的界面及流体内部流层之间的界面)与表面积成比例的力。表面力的产生是由于分子运动的结果。最常遇到的表面力是压力(指压强)。压力是流体分子运动对器壁所施加的力,对流体而言则为器壁对流体表面的力。无论静止的流体或运动的流体都存在这种作用力。流体的压力有两个基本特征。其一是,流体的压力作用方向与作用面垂直并指向作用面,如图 1-1-3 所示。从流体中取出的任一体积,其表面上的压力均具有此特性。其二是,流体中任一点上的压力在各个方向上均相同,而且任一点的压力可传向各方,所以压力是标量,但总压力是矢量。当压力在流体内部传递过程中如果不存在其他因素的影响(如其他作用力及能量)则其值不变。另一种表面力为切应力即粘性力。粘性力的作用方向与表面平行,且出现在有相对运动的流层界面上,因此,若流体内部无相对运动就没有粘性力存在。表面张力也是表面力的一种。

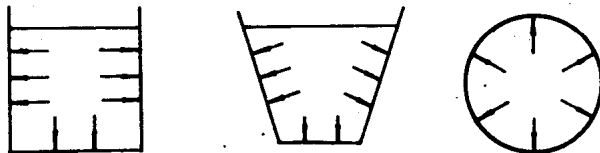


图 1-1-3 流体的静压力

无论静止的流体或运动的流体都存在这种作用力。流体的压力有两个基本特征。其一是,流体的压力作用方向与作用面垂直并指向作用面,如图 1-1-3 所示。从流体中取出的任一体积,其表面上的压力均具有此特性。其二是,流体中任一点上的压力在各个方向上均相同,而且任一点的压力可传向各方,所以压力是标量,但总压力是矢量。当压力在流体内部传递过程中如果不存在其他因素的影响(如其他作用力及能量)则其值不变。另一种表面力为切应力即粘性力。粘性力的作用方向与表面平行,且出现在有相对运动的流层界面上,因此,若流体内部无相对运动就没有粘性力存在。表面张力也是表面力的一种。

体积力是指作用在流体内部质点上的力,其大小与流体的质量成正比,故又称质量力。重力、惯性力、电磁力等都是质量力。质量力的作用点一般认为在物体的重心上。

下面再看流体在流动过程中的能量、动量以及与作用力的关系。

流体在流运过程中的三种基本能量为