

• 高等学校教学用书 •

冶金传输原理

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

TF01
27

高等学校教学用书

冶金传输原理

北京钢铁学院 张先棹 主编

bx485/21

冶金工业出版社

B 521298

高等学校教学用书

冶金传输原理

北京钢铁学院 张先焯 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 28 1/2 字数 681 千字

1988年10月第一版 1988年10月第一次印刷

印数00,001~2,200册

ISBN 7-5024-0296-9

TF·76 (课) 定价5.55元

前 言

本书系根据钢铁冶金专业教学计划《传输原理》课程教学大纲编写的。

本书阐述了冶金过程中传输的基本原理，内容包括“动量的传输”、“热量的传输”及“质量的传输”。

冶金过程包括化学过程和物理过程。前者是关于物质的化学反应及其平衡问题，它牵涉到反应物质的浓度和质量、温度和热量等数量之间的关系，构成了化学热力学过程的主要内容；后者是关于质量和热量的传输问题，它牵涉到反应物质的质量和热量传递速率关系，构成了化学动力学过程的主要内容。由于冶金过程大多数是在高温下进行的，化学热力学问题已不是主要矛盾，而化学动力学问题则成为限制过程的关键性环节，因此传输原理引起了广大冶金工作者的兴趣和重视，出现了新的工程理论，即综合性的传输原理。

传输原理在冶金过程中的应用，使冶金中有的物理过程得到深入而准确的解析。在过去的设计计算和试验研究中，往往处于对表面现象的判断和粗略的估计水平，定性的多，定量的少，抓不到问题的本质，更不能通过严格的理论分析和精确的数据计算求得问题的解答。现在，对某些问题的认识有了根本性的提高，不仅可以从本质上找到相互的联系，还可以列出物理模型和数学模型，通过计算机来求得精确的答案。

传输原理主要包括以下三方面的内容：动量的传输、热量的传输和质量的传输。三者具有类似的机理和关系，也具有相互的关连和作用，尤其是动量的传输，成为运动流体体系中或边界条件上热量传输和质量传输的基础。

学习传输原理可以使我们深入了解复杂的反应过程中各因素影响的机理，从而改进操作和设备，提高控制 and 设计水平。同时为我们提供物理模型和数学模型，应用电子计算机来求解许多课题，使我们可以计划预测，及时控制，以求得最佳的经济效益。

无论工程技术人员还是科研工作者都会经常碰到动量、热量和质量传输问题，它与多种生产技术和科技领域都有密切的联系。因此，1960年以来，各先进工业国家都将传输原理列入理工科大学的必修课程，我国自1980年以来，也陆续在有关的大学中列为必修课，使学习者对传输原理有一个基本的了解，并能逐步地加以应用，解决实际问题。随着传输原理学科的发展，它所能解决的问题越来越多，越来越宽和越来越深，成为工程技术人员和科研人员得力的工具。

本书第一篇为动量的传输，为了适应初学者的需要，首先介绍了流体的物性，流体静力学和流场的描述方法等内容，然后才介绍动量传输的基本内容。它采用对微元体的分析和控制体的分析二种方法来说明动量平衡时各参数的变化规律，并对动量传输方程的微分形式和积分形式应用于解决若干具体问题作了阐述。为了利用相似原理来处理试验数据和进行模型试验，对相似原理作了简明的介绍。最后对发展中的气固二相流和热气体的流动作了简要的介绍，以便今后对这类问题有一个初步概念。第二篇为热量的传输，除了作一些基本概念的介绍外，对热量传输方程作了较详细的推导，其目的在于阐明热量传输的机理。对传导传热问题中的稳态和不稳态作了较多的介绍，这是因为它对冶金工业来说应用较广。同时采用离散技术中的差分方法应用计算机来求解热量传输问题，而这个方法目前

已为工程技术人员广泛采用。对于对流传热，尤其是辐射传热，对冶金工作者来说，需要有比较深入的了解，所以作了详细介绍。至于凝固传热，不言而喻，对冶金工作者来说也是重要的，也作了必要的叙述。第三篇为质量的传输，它对冶金过程有更直接的影响，无论对分子扩散传质还是对流流动传质都需要有一定深度的了解。特别对相际传质，更应深入理解，因此应用具体例子对该内容进行了阐述。另外还对动量、热量和质量传输三者的类似关系作了简要介绍，作为传输原理的概括和综合。

本书对传输原理只作了一些基本的阐述，但仍嫌篇幅大，内容深，各校可根据专业的需要而舍弃某些章节，或补充某些内容。关于传输原理的具体应用问题，如燃烧供热装置、余热回收装置、真空装置、流态化装置、气力输送以及除尘装置等，在单元操作及总体设计课程中再作介绍，它们已不属本书的范围。

本书作为钢铁冶金专业教材，也可作为有色冶金、热能利用、金相热处理、压力加工、动力、机械、采暖与通风等专业的大学生、研究生和教师的参考书，并可供科研、设计和生产部门的科技人员参考。

本书动量传输篇由沈颐身编写，热量传输篇由吴懋林编写，质量传输篇由张先棹编写，全书由张先棹主编。本书定稿前曾开过审稿会，由昆明工学院周振刚、东北工学院唐铁驹、中南工业大学王淑泉、华东冶金学院沈新民等同志参加审定，他们对本书提出了许多宝贵意见，仅表衷心的感谢。

限于编者的水平，书中难免有不当之处，欢迎读者批评指正。

编 者

一九八七年十月

目 录

第一篇 动量的传输	1
第一章 动量传输的基本概念	1
1.1 流体及连续介质	1
1.2 流体的密度和重度	2
1.3 流体的压缩性	3
1.4 流体的粘性	4
1.5 粘性动量通量	10
1.6 作用在流体上的力	10
1.7 体系及控制容积	11
1.8 单位与量纲	13
第二章 积分质量、动量和能量平衡	14
2.1 积分质量平衡方程	14
2.2 积分动量平衡方程	16
2.3 积分能量平衡方程	18
第三章 动量传输的微分方程	23
3.1 描述流体运动的两种方法	23
3.2 迹线和流线、流束和流管	25
3.3 流体微团运动分析	29
3.4 平面有势流动与旋转流动	33
3.5 连续性方程	40
3.6 理想流体运动方程——欧拉方程	42
3.7 实际流体运动方程——纳维—斯托克斯方程	49
3.8 涡量输运形式的纳维—斯托克斯方程	57
第四章 管道中的流动	59
4.1 流体运动的两种状态	59
4.2 圆管中的层流流动	62
4.3 圆管中的湍流流动	66
4.4 圆管中摩擦压力损失的计算	73
4.5 局部压力损失	77
4.6 管路计算	82
第五章 边界层流动	86
5.1 边界层概念	86
5.2 边界层微分方程式	88
5.3 边界层积分关系式	94
5.4 边界层脱离现象	104
第六章 射流	108
6.1 自由射流	108
6.2 半限制空间射流	116

6.3 旋转射流	117
第七章 可压缩气体的流动	124
7.1 可压缩气体的一些概念	124
7.2 可压缩气体一元稳定等熵流动的基本方程	127
7.3 一元稳定等熵气流的基本特性	130
7.4 气流参数与流通截面的关系	135
7.5 渐缩喷管与拉瓦尔喷管	137
7.6 激波	142
第八章 热气体相对于大气的流动	147
8.1 流体静力学的基本方程式	147
8.2 热气体几何压头的分布规律	150
8.3 热气体内表压力沿高度的分布	151
8.4 热气体平衡方程式	152
8.5 热气体管道流动的柏努利方程	153
8.6 炉门孔的逸气与吸气	154
8.7 烟囱	156
第九章 气固两相流动	163
9.1 单个颗粒在流体中的运动	163
9.2 通过固定床的流动	169
9.3 通过流化床的流动	174
9.4 气力输送系统	178
第十章 相似原理与模型研究方法	181
10.1 相似的概念	181
10.2 对现象的一般数学描述及单值条件	183
10.3 相似原理——相似三定理	184
10.4 相似准数	188
10.5 模型研究方法	195
第二篇 热量的传输	198
第十一章 热量传输概论	198
11.1 热量传输的基本概念	198
11.2 热量传输的基本方式和基本定律	200
11.3 热阻	207
第十二章 热量传输微分方程	209
12.1 热量传输微分方程	209
12.2 柱坐标系和球坐标系的热量传输微分方程	213
12.3 初始条件和边界条件	214
第十三章 导热	217
13.1 通过平壁的一维稳态导热	217
13.2 通过圆筒壁的一维稳态导热	224
13.3 二维稳态导热	230
13.4 不稳态导热的基本概念	234
13.5 薄材的不稳态导热	238

13.6	半无限大物体的一维不稳态导热	240
13.7	有限厚物体的一维不稳态导热	245
13.8	二维、三维不稳态导热	256
13.9	有限差分方法的基本原理	258
13.10	稳态导热的有限差分方法	260
13.11	不稳态导热的有限差分方法	267
第十四章 对流给热		275
14.1	对流给热的一般分析	275
14.2	平板层流给热的分析解法	277
14.3	层流边界层的近似积分解	282
14.4	动量传输和热量传输的类比方法	286
14.5	相似理论指导下的实验方法	291
14.6	强制对流给热的准数方程	295
14.7	自然对流给热	300
第十五章 辐射换热		306
15.1	热辐射的基本概念	306
15.2	黑体辐射的基本定律	310
15.3	实际物体的辐射	313
15.4	角系数	318
15.5	两表面间的辐射换热	325
15.6	辐射换热的网络方法	328
15.7	气体辐射	333
15.8	气体与围壁表面间的辐射换热	340
15.9	辐射给热系数	341
第十六章 相变传热		342
16.1	凝固传热概述	342
16.2	移动界面的边界条件	342
16.3	砂模中的凝固	344
16.4	金属模中的凝固	348
16.5	凝固传热问题的积分解法	356
16.6	连续铸锭中的凝固传热	358
16.7	沸腾给热	363
第三篇 质量的传输		372
第十七章 质量传输的基本概念		372
17.1	二种质量传输方式	372
第十八章 质量传输平衡方程式		376
第十九章 分子扩散传质		379
19.1	分子扩散传质方程	379
19.2	气体通过间壁的扩散	380
19.3	分子扩散传质系数	383
19.4	静止介质中不稳态扩散传质	388
第二十章 对流流动传质		391

20.1 对流流动传质模型	391
20.2 层流流动时的质量传输	393
20.3 湍流流动时的质量传输	397
20.4 其他边界条件下的对流流动传质	399
第二十一章 相际传质	402
21.1 相际平衡与平衡浓度	402
21.2 双膜理论与相际稳态综合传质	403
21.3 具有化学反应的相际稳态综合传质	404
21.4 具有传热过程的相际稳态综合传质	408
第二十二章 类似原理及类似试验方法	411
22.1 动量传输与热量传输的类似	411
22.2 动量传输与质量传输的类似	414
22.3 动量传输、热量传输和质量传输三者的类似	417
22.4 类似试验方法	421
附录一 单位换算表	423
附录二 气体和液体的物性参数	427
附录三 金属与非金属的物性参数	433
附录四 常用相似准数表	438
附录五 通用常数	441
附录六 高斯误差函数表	442
附录七 气体动力函数表	443
附录八 正激波表	445

第一篇 动量的传输

动量的传输现象与大多数冶金过程有着密切的关系。例如，氧气顶吹转炉炼钢过程就涉及到：超音速射流的获得，氧气射流与熔池的相互作用，气泡的成核和长大，气泡搅动下的循环流动等。此外，包括高炉、烧结的气—固两相流动，真空脱气、吹氩搅拌的气—液两相流动，废钢熔化、脱氧剂和合金熔化的液—固两相流动，渣—钢间传质的液—液两相流动等等，都可以说明动量的传输现象在冶金工艺过程中所起的作用。研究上述问题可以分为两大类：

第一类是研究系统内流动参数间的整体关系。例如，管道中流体流量与压差的关系，钢包钢水流出所需的时间等。我们只要根据质量、能量和动量平衡原理，就能较容易地计算出结果来。

第二类是研究系统内部的“微细结构”。例如，研究某一流场中速度分布，研究湍流能量的耗散模型等。显然，这要复杂得多，需要求解非线性偏微分方程的数值解。

本篇首先介绍动量传输的基本概念，在此基础上建立积分质量、动量和能量平衡，建立动量传输的微分方程。而以后各章，如管道内流体流动、边界层流动、射流、可压缩气体流动、相对于大气的热气体流动、气固两相流动等都是基本方程在具体条件下的应用。最后，本篇还要介绍相似原理及模型实验研究方法。上述内容对冶金类专业的学生来说，是非常必要的专业基础知识，对他们日后的工作实践也有所裨益。

第一章 动量传输的基本概念

流体和固体的物理性质有许多不同之处：流体具有易流动性、可压缩性和粘性。其中粘性是流体的一个重要的物理性质。流体的上述性质都是它的大量运动着的分子微观特性的宏观表现。我们是把流体作为连续介质来研究的。本章将主要叙述流体及其物理性质，在此基础上介绍有关动量传输的一些基本概念。

1.1 流体及连续介质

自然界的物质一般以三种形态存在，即气态、液态和固态，通常称为气体、液体和固体。物质三态中的气体和液体通称流体。随着科学技术的新发展，科学家们又发现物质除上述三态外，还有等离子态和超固态。

事物总是在不断地运动着、发展着的。物质的三态也不是固定不变的。在一定的条件下能够互相转化，例如，在标准大气压下的水，常温下是液体，温度低于 0°C 变成固体（冰），高于 100°C 变成气体（水蒸汽）。又如，在标准大气压下，氧气低于 -182.8°C 变为液氧，氮气低于 -195°C 变为液氮。人们认识和掌握不同形态的物体在一定条件下能互相转化这种特性，就可以利用它为人类服务。在冶金中常将固态的金属加热后，使其熔化成

液态金属而浇铸成型。

流体是易于流动的物体，它是相对于固体而言的。它和固体的主要区别在于其分子间的内聚力很小，所以在任何微小切应力的作用下，即可发生连续的变形。这就是易流动性。

液体和气体的区别是液体可以随其容器形状不同而改变其形状，且在相当大的压力下几乎不改变其原有的体积，故通常称为不可压缩流体。液体与其它流体形成的分界面称为自由表面。气体则具有很大的压缩性和膨胀性，如果对气体施加压力，则其体积很容易缩小，反之，如果压力无限减小，则气体可无限地膨胀，充满容纳它的空间，所以它没有自由表面，故通常称为可压缩流体。但是流体的可压缩性与否不是绝对的，不是所有液体在任何情况下都作为不可压缩流体来看待，亦不是所有气体都必须按可压缩流体来处理，例如泵站突然断电时以及水电站中因载荷变化而关小阀门来改变管道的流量时所发生的水击现象，必须考虑水的压缩性，而气体在低速流动时（一般马赫数 $M < 0.3$ 时），则可认为它服从于不可压缩流体的运动规律。

众所周知，一般流体都是由运动着的分子所组成，分子之间是有一定的空隙的。因此，从微观方面来考虑流体问题，就需要从分子运动学说来研究，但我们所研究的不是个别分子的微观运动，而是从流体的宏观特性，即大量分子的统计平均特性来考虑，把流体当作充满其所占有空间，由大量的没有间隙存在的流体质点所组成，也就是说，把流体作为连续介质来研究的。因此，连续介质的概念只适用于宏观的情况。我们只要在同一流体中，任取一很微小的体积，其中所包含的分子数，能够足以构成平均统计意义时，连续介质的概念才能成立。这样，流体的一切属性，如速度、压强、密度、温度、浓度等都可以看作是坐标和时间的连续函数，从而可以利用连续函数这个有力的数学工具来进行传输理论的分析研究。需要指出的是对于稀薄气体，由于分子间的距离非常大，此时连续介质的概念就不适用了。

1.2 流体的密度和重度

在均质流体中取体积为 ΔV 的流体，其中包含有 ΔM 的质量，则 ΔM 与 ΔV 的比值称为密度 ρ ，即

$$\rho = \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-1)$$

对于非均质流体，可应用数学中取极限的方法来定义 ρ ，即所谓点密度，亦即当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时， $\frac{\Delta M}{\Delta V}$ 比值的极限为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-2)$$

由此可见，密度是指单位体积内所具有流体的质量。在国际单位制（SI）中以质量（kg）和长度（m）为基本单位，因而密度单位为 kg/m^3 。

应当指出，式（1-2）是点密度的数学定义，从物理上来理解，在连续介质内对某一点取极限时，把该点取得极小，但却包含有足够多的分子，即宏观上足够小而微观上足够大，使其不失去连续介质的特性而有确定的物理值（这里是密度），所取的这个点我们称

之为流体质点。其它的物理量也同样是利用数学分析的工具来确定流体质点的物理值。

比容 v 是单位质量流体所占有的体积，所以比容与密度有如下关系：

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

v 的单位为 m^3/kg 。

对于液体，密度随温度变化略有变化，而压强变化对它影响不大，因此在一般情况下，可近似认为液体的密度是常数。而对于气体，则其密度受压强和温度的影响都很大。对于完全气体来说，它们之间的关系服从状态方程

$$pv = RT \quad (1-4)$$

式中 p 为作用在气体的绝对压强，其单位为 N/m^2 ，亦称 Pa ； v 为比容； T 为绝对温度 ($T = 273 + t^\circ\text{C}$)； R 为气体常数，其单位为 $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 。

某液体的相对密度是指该液体的密度与在一个大气压下， 4°C 水的密度之比，而一个大气压下 4°C 水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。某气体的相对密度是指该气体的密度与在一个大气压下 0°C 的空气或氢气的密度之比。相对密度是一个无量纲量。

在工程单位制中经常用到重度 γ ，它与密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

式中 g 为重力加速度。 γ 的单位为 N/m^3 。

1.3 流体的压缩性

当作用在流体上的压强增加时，流体的体积将减少，这被称为流体的压缩性，可用体积压缩系数 β_p 来表示， β_p 表示当流体保持温度不变，增加一个单位压强时体积 V 的相对变化率

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-6)$$

β_p 的单位为 $1/\text{Pa}$ ，体积压缩系数的倒数为体积弹性模数，以 E_v 表示，则

$$E_v = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{V}{dV} dp \quad (1-7)$$

E_v 的单位为 Pa 。液体的体积压缩系数一般都很小，或体积弹性模数都非常大，因此液体的压缩性一般都可忽略不计。

对于气体来说，它的体积弹性模数是随气体状态变化的不同而不同的。例如在等温压缩过程中

$$pv = \text{const} \quad (1-8)$$

微分后得

$$p dv + v dp = 0 \quad (1-9)$$

或

$$\frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p} \quad (1-10)$$

因为气体比容的相对变化等于其体积的相对变化，所以

$$E_v = -\frac{v}{dv} dp \quad (1-11)$$

将式 (1-10) 的 $\frac{dv}{v}$ 值代入上式, 则得

$$E_v = \frac{p}{dp} dp = p \quad (1-12)$$

由上式可知, 当气体作等温压缩时, 其体积弹性模数等于作用在气体上的压强。

当气体作理想绝热压缩时, 则

$$pv^k = \text{const} \quad (1-13)$$

微分后得

$$pkv^{k-1}dv + v^k dp = 0 \quad (1-14)$$

各项除以 pv^k , 则

$$kv^{-1}dv + \frac{dp}{p} = 0 \quad (1-15)$$

或

$$\frac{dv}{v} = -\frac{1}{k} \frac{dp}{p} \quad (1-16)$$

将式 (1-16) 的 $\frac{dv}{v}$ 值代入式 (1-11), 则得

$$E_v = \frac{kp}{dp} dp = kp$$

由此可知, 当气体作理想绝热压缩时, 其体积弹性模数等于绝热指数乘以压强 p , 例如空气在一个标准大气压下进行绝热压缩时,

$$E_v = 1.4 \times 1.013 \times 10^5 = 1.419 \times 10^5 \text{ Pa}$$

〔例题1-1〕 求在常温和常压下, 将水的体积缩小5/1000时所需增加的压强。

解: 由式 (1-7) 得

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{V} E_v$$

由附录表 1 查得在一个大气压、温度为 20°C 时水的弹性模数为 $2.18 \times 10^9 \text{ Pa}$, 依题意

$\frac{\Delta V}{V} = 0.005$, 将这些值代入上式得

$$\Delta p = 0.005 \times 2.18 \times 10^9 = 10.9 \times 10^6 \text{ Pa}$$

一个大气压为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, 所以

$$\Delta p = \frac{10.9 \times 10^6}{1.013 \times 10^5} = 107.6 \text{ 大气压}$$

显然, 在常温和常压下, 将水的体积缩小5/1000, 需要增加107.6大气压才能实现。

1.4 流体的粘性

流体的粘性是流体在运动时所表现出的抵抗剪切变形的能力。首先来观察流体以较低的速度流过水平放置的壁面的情况(图1-1)。此时流体作稳定流动, 在与壁面直接接触处, 由于粘性的作用, 流体附着在壁面上, 所以此处的速度为零, 称为无滑移边界条件。稍离

壁面,则流体就有流动,流动速度 v_x 随离壁面的垂直距离而逐渐增大。在流体中取一面积为 A (垂直于纸面),厚度为 dy 的流体层,其下层速度为 v_x ,上层速度为 $v_x + dv_x$,由于上下层流速的不同,使这块流体发生变形,从而产生内摩擦力 F 。根据牛顿的假说及实验证

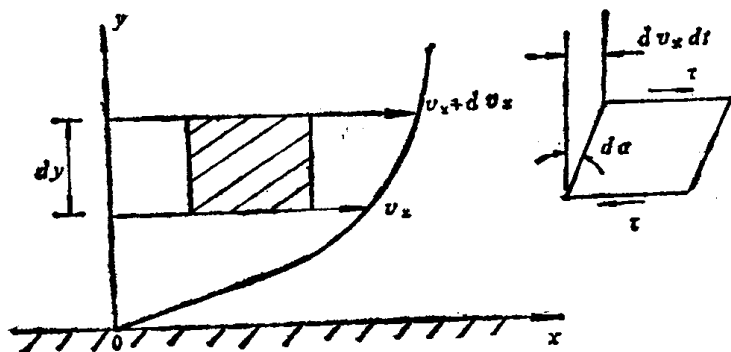


图 1-1 粘性流体流动的剪切变形

明,内摩擦力(或粘性力) F 的大小与面积 A 和速度梯度 $\frac{dv_x}{dy}$ 成正比,即

$$F \propto A \frac{dv_x}{dy}$$

或写成

$$F = \mu \frac{dv_x}{dy} A \quad (1-17)$$

单位面积上的内摩擦力即内摩擦应力(或粘性切应力) τ 为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1-18)$$

上两式中的比例系数 μ 称为动力粘性系数或简称粘度。这就是牛顿内摩擦(或粘性)定律。

式(1-17)、(1-18)中出现的与流体性质有关的粘性系数,其意义是:当速度梯度 $\frac{dv_x}{dy}$ 为1时,流体粘性切应力的数值就是粘性系数的大小。它的单位为 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

工程上常采用另一种单位泊,用 P 表示, $1P = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

显然,在相同的条件下,流体的粘性系数愈大,所产生的粘性切应力也愈大,流体的阻力也愈大。为了克服这种内摩擦力所造成的阻力而使流体维持运动,必须供给一定的能量,这就是流体运动时必然会造成能量损失的一个原因。而当流体处于静止状态时,或各流体层之间没有相对速度时,流体的粘性就表现不出来了。

在工程上常常要用到粘性系数 μ 与流体密度 ρ 的比值,它称为运动粘性系数,以 ν 表示,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-19)$$

式中 ν 的单位为 m^2/s 。工程上采用沱为单位,用 St 表示, $1\text{St} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ 。

由式(1-18)可知,粘性切应力 τ 的大小取决于速度梯度和粘性系数。这里的速度梯度可理解为角变形速率。设在图(1-1)中, t 时刻取一长方形流体微元平面,因上层与

下层流速不一样，经过 dt 时间后，这个微元平面由原来的直角长方形变为锐角斜方形，角度减小了 $d\alpha$ （如图1-1所示）， $\frac{d\alpha}{dt}$ 就是角变形速率。不难看出

$$\frac{d\alpha}{dt} \approx \frac{\text{tg}(d\alpha)}{dt} = \frac{dv_x \cdot dt/dy}{dt} = \frac{dv_x}{dy} \quad (1-20)$$

由此可见粘性切应力正比于角变形速率。

粘性系数 μ 的大小与流体的种类有关，例如在同一温度的情况下，油的 μ 值比水大，而水又比空气大得多。所以 μ 是流体的一个物性参数。对于同一种流体， μ 的数值与温度有密切关系，而与压强的关系不大。一般说来，液体的粘性系数 μ 和运动粘性系数 ν 随温度的升高而减小，而气体则随温度的升高而增大。这是由于液体与气体具有不同分子运动

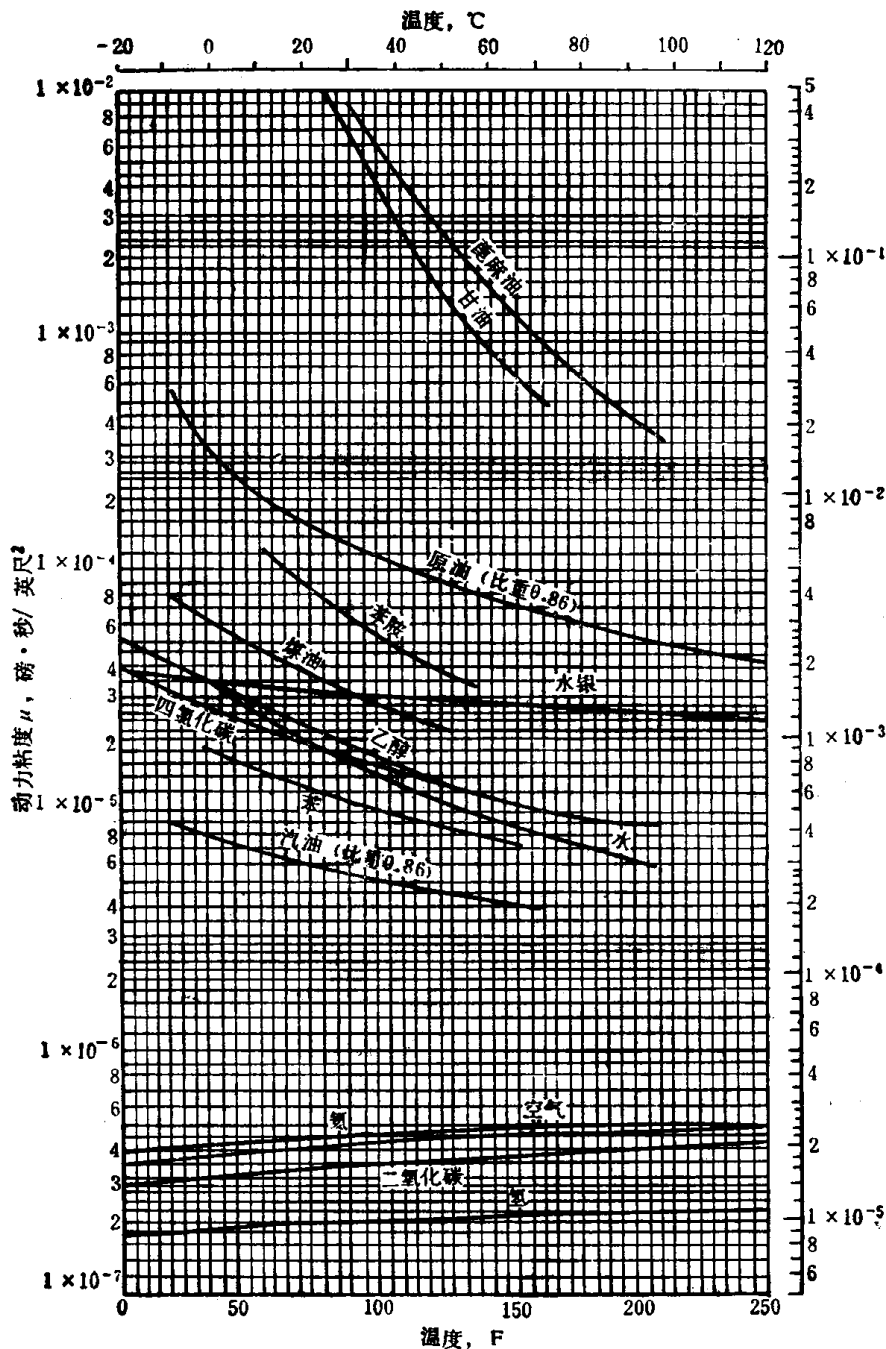


图 1-2 几种液体与气体的动力粘度

状态的缘故。图1-2和图1-3表示出几种液体和气体的 μ 与 ν 随温度而变化的曲线。

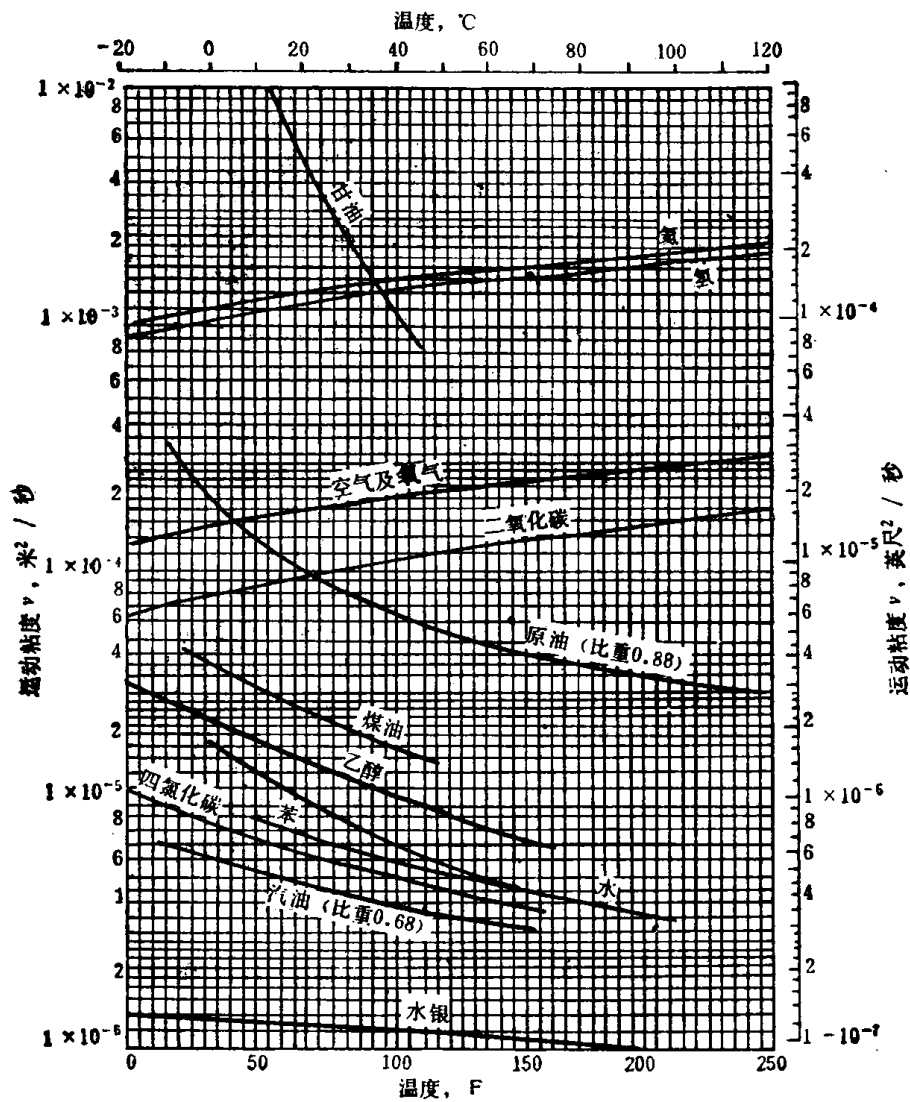


图 1-3 几种液体与气体的运动粘度

水的运动粘性系数 ν 与温度 t 的关系，可由下面的经验公式表示

$$\nu = \frac{0.0178}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (\text{St}) \quad (1-21)$$

式中 ν 的单位为 cm^2/s ，其换算关系为

$$1\text{m}^2/\text{s} = 10000\text{cm}^2/\text{s} = 10000\text{St}$$

气体的粘性系数 μ 与温度 t 的关系，可由下式确定

$$\mu = \mu_0 \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}} \quad (1-22)$$

式中 μ_0 ——气体 0°C 时的动力粘性系数；

T ——气体的绝对温度， $T = 273 + t^\circ\text{C}$ ，K；

C ——常数，几种气体的 C 值，见表1-1。

我们可以用分子运动学来解释上述现象：在液体中，分子间距小，分子互相作用的力

表 1-1 几种气体的C值

气体种类	空气	氢	氧	氮	蒸汽	二氧化碳	一氧化碳
C 值	122	83	110	102	961	260	100

较强，这样，阻止了流体层间相对滑动而产生内摩擦力，即表现为粘性。当液体的温度升高时，分子间距加大，引力减弱，因而粘性则减小；在气体中，分子间距比液体大得多，引力很弱，分子运动的自由行程大，分子间相互掺混，速度快的分子可以进入低速流层中，速度慢的分子可以进入高速流层中，两相邻流体层间进行分子动量交换，从而阻止了流体层间相对滑动，呈现出粘性。而分子间引力的作用，相比之下微乎其微，可忽略不计。当气体的温度升高时，内能增加，分子运动更加剧烈，动量交换亦更加激烈，所以粘性增大。

在冶金过程中，人们对熔融金属的粘性系数更感兴趣。为了使读者对铁水粘性系数有所了解，表 1-2 给出了它的实际数值。

表 1-2 铁水在各种温度下的粘性系数值

温 度, °C	粘 性 系 数, N·s/m ²
1550	6.7×10^{-3}
1600	6.1×10^{-3}
1700	5.6×10^{-3}
1800	5.3×10^{-3}
1850	5.2×10^{-3}

研究表明，气体、熔融金属和熔渣的粘性系数可能随组分的变化而显著变化，而且对组分的这种依赖关系通常并不遵循简单的线性迭加法则。在某些熔渣中，混合物的粘性系数可能显著低于混合物中任何组分的粘性系数。这一现象往往对炼铁、炼钢和其它冶金工艺过程十分有利，因为通过调整熔渣的组分就能得到所需要的低粘性渣，从而便于渣-金属间的接触以及放出熔渣来。对于熔融金属粘性系数的计算问题以及冶金工艺过程中所遇到的多元渣系粘性系数的计算问题，可参考有关文献。

服从牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。自然界中大部分流体如水、空气、一般气体和各种油类都属于牛顿流体，但是有些流体就不服从式(1-17)的规律，如重油、泥浆、胶态溶液、高分子溶液等，这种流体称为非牛顿流体。图1-4表示牛顿流体与非牛顿流体所服从的规律。本书涉及的都是牛顿流体。

有关水和空气以及其它一些常见的液体和气体的物理性质见附录二。

存在于自然界中的实际流体都具有一定的粘性，即粘性流体。为了研究的方便，使问题简化，在某些情况，可不考虑流体的粘性。这种流体，称为无粘性流体。无粘性流体是假设的一种理想流体。研究理想流体的运动规律有其重要意义：一方面，从理想流体入手，分析、推导流体运动的基本规律，然后再把粘性的影响考虑进去，加以修正，而使问题得到解决。另一方面，在某些情况下，理想流体的运动规律基本上能符合粘性不大的实际流体的运动规律，这样就提供了近似于实际流体的运动模型。

【例题 1-2】一块可动平板与另一块不动平板间充满某种液体，两板间的距离为