

高等学校试用教材

858040

582

4031.2

热工基础及设备

李启云 主编



南京工学院出版社

高等学校试用教材

热工基础及设备

(第二版)

李启云 唐敦余 林方辉 合编

南京工学院出版社

内 容 提 要

本书为高等学校建筑材料及制品专业的教材。内容包括工程流体力学、工程热力学、传热、传质,以及干燥和热养护设备、热工测量仪表等。对建筑材料制品如混凝土制品、各种构件的蒸汽养护过程,作了详细的叙述。此外,对各种附属设备如泵及风机、管路计算、小型锅炉的造型设计和计算等,也作了介绍。

该书除可供建筑材料及制品专业和土建类的师生使用外,对从事混凝土制品工作的工艺、设计、科研人员,也可作为参考。

责任编辑:张新建

热 工 基 础 及 设 备

李启云 主编

南京工学院出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 如东县彩印厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张21 字数495千字

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数: 1—8000册

ISBN 7-81023-051-4

TU·4 定价: 3.50元

前言(第一版)

本书是建筑材料及制品专业的专业课教材。它的主要任务是：培养学生掌握热工基础理论，进行热工分析及计算，了解热养护及干燥设备的构造、工作原理和热工特性，使学生对热养护设备能进行初步设计并具有技术改造的能力。

本书的内容主要分两部分：基础理论部分主要叙述工程流体力学、传热学和水蒸汽及湿空气。专业热工设备部分重点叙述热养护设备的构造、热工特性和热工计算，对建筑制品的干燥设备只作适当介绍。为了正确选用附属设备，还简介了主要附属设备的构造、性能和选型。

随着混凝土建筑制品预制化程度的提高和科学技术的不断发展，热养护工艺也发生了较大的变化。这是由于采用热养护方法来加速混凝土制品的硬化，在保证制品质量、缩短养护时间和降低成本等方面均具有明显的优越性。例如，当温度从 20°C 提高到 80°C ，混凝土的硬化速度可增加 $8\sim 12$ 倍。因此热养护方法虽早在一百年前已开始应用，而今后它仍然是加速混凝土硬化的主要手段之一。

传统的热养护工艺（蒸养工艺）虽然大大缩短了养护时间，但也存在一定的缺陷。例如养护周期仍然偏长（一般在 14h 以上），介质温度不均匀，蒸汽用量大，热利用率低（ 1m^3 制品蒸汽用量一般为 $400\sim 800\text{kg}$ ，而其中有效利用的仅 $150\sim 200\text{kg}$ ）以及机械化和自动化程度低等。针对上述缺陷，人们进行了大量的试验研究工作并提出改进措施。这些改进主要有：用饱和蒸汽代替蒸汽—空气混合物作为热养护介质，用强制定向流动的介质代替基本静止的介质，用连续作业代替间歇作业以及不断提高设备的机械化和自动化程度。同时，采用密封热养护和密封加压热养护，低压热养护（表压为 $0.5\sim 0.6$ 工程大气压）以及干湿热养护等，也收到了较好的效果。此外，混凝土热养护技术的发展还表现在热源的变化方面，一些利用其它热源（如热空气、烟气、热油、红外线、太阳能、电能和微波等）的热养护设备已成功地应用于工业生产，这就进一步推动了混凝土热养护技术的发展。

由于本书涉及面较广，编写时间又比较仓促，书中可能存在缺点和错误，请使用本书的师生及各地读者提出宝贵意见，以便再版时改进。考虑到目前国内专业文献的实际状况，本书仍采用工程单位制，而在书后附有国际单位制的换算表。

本书由南京工学院李启云主编。编写的分工为：南京工学院李启云（第二、四、五章）；重庆建筑工程学院林方辉（第三、六章）；同济大学张增炎（第一章）。全书由武汉建筑材料工业学院郭光玉主审，李应开审阅了部分章节。

7A V 13 10 7

前 言 (第二版)

本书是在第一版的基础上,按照1984年7月在上海召开的无机非金属材料类教材编委会审议通过的“热工基础及设备”教学大纲编写的。基于第一版教材使用六年来建筑材料热处理工艺的新发展和教学水平不断提高的需要,本教材作了如下的修改。

改写了工程流体力学部分,将泵、风机和管路计算并入,使学科更加系统和完整,并增添了必要的例题,以增强适用性;充实和加深了工程热力学的基础内容,突出重要概念和公式,更加体现出专业特点;对传热学和热辐射的内容作了一些调整和充实,这样有助于学生对热辐射基本定律的理解;拓宽了砼制品热养护设备的知识,增加了国内外先进生产工艺和技术的有关内容,使理论和实际紧密联系;在本版教材中还增加了传质和热工测量仪表两章内容,对传质过程的基本概念和必要的计算公式作了阐述和推导;同时还对与建筑材料制品有关的常用热工仪表的工作原理、构造和实际使用方法作了介绍。

另外,本书还增设了习题和必要的附录,以便于学生学习,对生产实际也有一定的指导作用。本书除作为高等学校建筑材料和制品专业教材外,也可供其它有关专业师生及工程技术人员参考。

本书由南京工学院李启云主编。

因工作的变动,参加本版编写的为南京工学院李启云(绪论、第三、四、五章)和唐敦余(第一、七章),重庆建筑工程学院林方辉(第二、六章)。

本书由哈尔滨建筑工程学院廉乐明主审,刘正蓉审阅了部分章节。他们对教材的修改提出了许多有益的意见和建议,在此表示感谢。

鉴于编者学识有限,书中错误和缺点在所难免,恳请读者批评指正。

编者 1987.10

目 录

绪 论	(1)
第一章 工程流体力学	(4)
第一节 流体的主要物理性质	(4)
第二节 流体静力学	(9)
第三节 流体动力学	(20)
第四节 流体在管内的流动	(36)
第五节 风机和泵	(55)
第二章 工程热力学基础	(65)
第一节 工质及气体状态方程式	(65)
第二节 气体的比热及热量的计算	(70)
第三节 稳定流动能量方程式	(74)
第四节 水蒸汽	(81)
第五节 湿空气	(95)
第六节 燃料及小型锅炉	(104)
第三章 传热	(113)
第一节 稳定导热	(113)
第二节 对流换热	(131)
第三节 辐射换热	(153)
第四节 综合传热	(171)
第五节 换热器	(174)
第六节 不稳定导热	(180)
第四章 传质	(196)
第一节 概述	(196)
第二节 传导传质	(199)
第三节 对流传质	(206)
第四节 水分在空气中蒸发时的热质交换分析	(211)
第五节 毛细多孔体的热质传递	(212)
第五章 干燥及干燥器	(215)
第一节 干燥过程的物料平衡与热量平衡	(215)
第二节 干燥速率	(223)
第三节 建材制品干燥器	(228)
第六章 混凝土制品热养护设备	(233)
第一节 热养护过程	(234)
第二节 间歇作业热养护设备	(244)
第三节 连续作业热养护设备	(262)
第四节 其它热养护方法和设施	(270)

第七章 热工测量仪表	(278)
第一节 温度测量	(278)
第二节 湿度测量	(289)
第三节 热流量测量	(291)
习 题	(294)
附 录	(304)
附录一 单位换算表	(304)
附录二 标准大气压力时干空气物理参数	(306)
附录三 烟气的物理参数	(306)
附录四 饱和水蒸汽的物理参数	(307)
附录五 未饱和水(标准大气压力时)和饱和水的物理参数	(308)
附录六 几种气体在理想气体状态下的平均定压质量比热	(309)
附录七 饱和水与饱和水蒸汽表(按温度排列)	(310)
附录八 饱和水与饱和水蒸汽表(按压力排列)	(311)
附录九 未饱和水与过热蒸汽表	(313)
附录十 金属的物性	(317)
附录十一 非金属材料的物性	(318)
附录十二 隔热材料的导热系数	(319)
附录十三 某些材料在法线方向上的黑度	(320)
附录十四 相对湿度(φ)表(以%计)	(322)
附录十五 铂铑—铂热电偶分度简表	(323)
附录十六 镍铬—镍硅(镍铬—镍铝)热电偶分度简表	(323)
附录十七 铜—康铜热电偶分度简表	(324)
附录十八 热电阻分度简表	(325)
附录十九 $H-X$ 图	(326)

绪 论

(一) 本课程在专业中的作用和地位

“混凝土制品生产热工基础及设备”这门课程是研究混凝土及建筑制品生产的热工过程及其设备的科学。在许多国家里,热工设备是混凝土及建筑制品生产中的主要工艺设备,它和产品质量、能源消耗以及工厂的生产率有着极其紧密的关系。

在常温下,混凝土制品要经过20多天的养护才能达到设计强度的要求。为了加速混凝土的硬化过程,生产上常采用下列四种加速硬化的方法,即化学促硬法(如早强水泥、特种水泥和掺外加剂等)、机械法、热养护法以及综合法。目前不少国家仍以采用载热载湿的饱和水蒸汽介质为主,对混凝土及建筑制品进行热养护,以加速其硬化过程。由于热养护法对于缩短养护周期和加速模板周转具有极为明显的效果,因此它是当前混凝土及建筑制品生产中应用最普遍并且效果较好的一种加速硬化的方法。

特别值得指出的是,对于混凝土及建筑制品的生产来说,热养护过程又是一个耗能最大的工艺环节,据国家建筑材料工业局技术情报标准研究所和苏州混凝土水泥制品研究院的统计资料表明,离心电杆、各种水泥管材、轨枕和石棉水泥制品等全部或绝大部分都采用热养护,其能耗约占生产工艺总能耗的85~97%。另外,目前我国的混凝土制品工厂,大多数仍采用间歇作业热养护窑,其中以养护坑为主。由于这些间歇作业热养护窑存在下列诸问题,如生产工艺落后、窑的围护结构不够合理、热工参数的检测与自动控制手段不足以及管理不善等,因而,其单位制品能耗极高,目前这类热工设备的热能利用率仅为6~10%,而国外热养护设施的热能利用率可达15~35%。因此我国的热养护窑,主要是指间歇作业养护坑,亟待进行节能改造工作。

(二) 混凝土制品热工设备发展简介

采用饱和水蒸汽介质加速混凝土硬化过程的方法已有一百多年的历史。据美国混凝土学会(ACI)的资料介绍,1868年,美国人詹梅士·鲁兰(James Rowland)根据哥纳尔曼(H. F. Gonnerman)的研究成果首先采用高压蒸汽养护法生产建筑制品;1880年德国人米哈哀里斯(W. Michaelis)采用 $(7\sim 8) \times 10^5 \text{ Pa}$ 的高压蒸汽制造出硅酸盐砖。不久在俄国也使用了德国制造的蒸压釜进行生产,该釜的直径为2 m,长度为9 m。美国和苏联的学者对蒸压养护混凝土及建筑制品的硬化机理和材性进行了大量的研究工作,本世纪40年代提出了这方面的论文和专著。之后,又在石棉水泥制品和加气混凝土生产上得到应用。

同时,人们对常压蒸汽养护方法进行了大量的研究工作,并应用于混凝土及建筑制品生产上。从40年代末50年代初起,美国、英国、苏联、德国等国的学者对此种热养护

的原理和材性作了大量深入的研究工作，发表了许多论文和专著，使它得以广泛地应用于各种混凝土及建筑制品生产中。尤其是苏联和东欧各国常压蒸汽养护在建筑构件和水泥制品生产方面得到了非常广泛地应用。自50年代起，为了与输送带生产工艺相配套，从间歇作业养护坑向连续作业的大型蒸养窑发展，如水平型隧道式蒸养窑、蒸养立窑、门型蒸养窑和折线型蒸养窑等，从而提高了混凝土及建筑制品厂的生产率并使其能源消耗大幅度下降。

自60年代以来，许多国家都逐渐采用新的能源代替传统的饱和水蒸汽介质，这些新能源有热空气、热烟气、热油、远红外线、太阳能、电能、高频电能和微波等，以加速混凝土的硬化过程。采用新的能源或者将它们与饱和水蒸汽介质综合使用，对于缩短养护周期、改善制品质量、节约能源、加快模板周转、改善劳动条件以及降低成本诸方面比传统饱和水蒸汽介质更为有益。但是到目前为止，上述一些新能源热养护法尚处于试生产或少量投产阶段，有些方法还有一定的局限性和区域性，如热烟气法、电能法以及太阳能法；有些方法因投资和成本较高，尚未能在生产中推广使用，如高频电能法和微波法。因此，这些新能源热养护法还有待于进一步地研究与开发。

另外，在此期间不少国家广泛采用了自动检测、记录与调节的热工仪表，也有的将电子计算机技术运用于热养护过程的自动控制中。

我国自解放以来，随着工农业建设的蓬勃发展和基本建设规模的逐步扩大，建立了一批建筑预制构件厂和混凝土及水泥制品厂。

从50年代开始，我国混凝土工厂中的热养护设施主要采用间歇作业养护坑。直至70年代后期，随着大板建筑体系在我国一些大城市住宅建筑中得到推广应用，在某些大型建筑构件工厂中先后采用了连续作业蒸养设施，如蒸养立窑、水平型隧道式蒸养窑、折线型蒸养窑等。同时也有少数工厂采用远红外线和太阳能热养护设施。

但调查结果表明，目前我国间歇作业养护坑仍占多数，约占总热养护设施的70%左右。养护坑具有不少优点，如它对于产品品种变化的适应性较强、投资较低、耗钢量少和收效较快等。但它的最大缺点是能源消耗大。因此，改造现有的旧式养护坑是摆在我们面前的一项重要而又紧迫的任务。目前主要从下列诸方面开展对养护坑的节能改造工作，即热养护工艺（如采用干-湿热养护工艺等），重新设计与改造其围护结构，供汽系统的改造（如热介质定向循环等），以及装设自动检测与自动控制介质温度和湿度的仪表系统等。

（三）本课程的任务和要求

由于在热工设备中存在热介质的流动、热量传递、质量传递以及机械能的转换过程，为了研究混凝土及建筑制品的热养护过程，必须掌握热工基础理论的一些基本概念和定律，如工程流体力学、工程热力学、传热学和传质学。尤其应该了解如何使这些热工理论很好地应用于混凝土及建筑制品生产工艺中去。同时，这些热工知识也为学习建筑材料的性质与工艺打下一定的基础。

本课程是无机非金属材料科学与工程（混凝土及制品）专业带有专业课性质的专业基础课。它的主要任务和要求是使学生掌握热工基础理论的基本知识，能进行热工分析

和计算，了解热养护设施的构造、工作原理和热工特性，使学生对热养护窑具有初步设计和技术改造(尤其是节能改造)的能力，并掌握热工测量的基本知识和基本技能。

第一章 工程流体力学

工程流体力学是研究流体的平衡和运动规律以及流体与固体之间相互作用，并用其规律为生产实践服务的一门科学。

流体分为液体和气体，两者性质不完全相同。

工程流体力学根据所研究的流体性质不同，可分为水力学与空气动力学。水力学是研究水和其它液体的平衡和运动规律的一门科学；空气动力学则是研究各种气体运动及气体和固体之间相互作用的一门科学。

本书主要讲述工程流体力学的一般规律，因此不按液体、气体分别讲述。但在应用工程流体力学的基本规律时将指出气体所具有的一些特点。

工程流体力学在建筑材料与制品生产中有着广泛的应用。例如材料和制品的加热、干燥，热养护中流体介质的流动和热质交换问题，各种流体的输送(包括粉状物料的气力输送)和含尘气体的净化等等。这些问题都将涉及有关流体平衡和机械运动规律的具体应用。

本章主要阐述流体的基本物理性质，静止流体和运动流体的基本定律，流体流动的能量损失及基本管路计算方法，最后介绍一下流体输送机械——风机和泵的基本知识。

第一节 流体的主要物理性质

一、连续性

从微观角度来看，液体和气体都是由大量分子所组成，这些分子都在不停地作不规则的热运动。而每个分子又包含有一个、两个或两个以上原子。分子与分子之间以及分子内部的原子与原子之间有一定的空隙存在。所以，流体内部结构是不连续的。流体力学不研究分子或原子的运动，而只研究大量分子的集体运动。我们将整个流体分成许多分子集团，每个分子集团称为质点，质点与质点之间不存在任何空隙。质点相当于几何上的一个点，它相对于整个流体来说，其尺寸可以忽略不计。因此，质点是研究流体的最小单位，质点是连续的，这就是流体的连续性。

既然流体被看作是连续的，那么反映流体质点运动特性的各种物理量即速度、密度、压力等也是连续的，这样就可以用数学方法来分析流体平衡和运动的规律，因为数学方法是建立在连续函数的基础上的。

对于极稀薄的气体，连续性就不适用了。

在研究流体平衡和运动规律时，我们是从质点这一角度来考虑问题的，而在研究粘滞性等现象时还需要从分子运动的观点来阐述，但是在这里分子运动学说只用来说明这些现象产生的原因，而并不是用来分析流体机械运动的规律。

二、流动性

流体的流动性是它与固体的根本区别。所谓流动性并不是指物体能否变形，因为所有实际物体在外力作用下都能发生变形。但在变形时，流体与固体所表现出的性质是截

然不同的。固体变形的大小与外加作用力有关，作用力愈大，变形也愈大；反之，要得到较大的变形，就要用较大的力。对于固体，所需的力的大小完全决定于对变形的要求，而与发生变形的快慢无关。对于流体，却不是这样。流体变形也产生阻力，但这种阻力与变形的快慢有关。要使流体很迅速地变形，需要用很大的力，而在用力的时间充分长，或者说，变形的过程相当慢时，任何微小的力也能够使流体产生非常大的变形，产生流动。这种性质称为流体的流动性。

流体具有流动性，因此流体没有固定的形状。液体和气体都随着容器形状的不同而改变自身的形状。不过，液体和气体的流动性还是有差别的。当装有流体的容器形状和大小改变时，对于液体，虽然形状随着容器而改变，但其体积不变化；对于气体，它在流动中改变自身形状的同时，它的体积也随着容器的容积而改变，它总是充满整个容器。

三、压缩性和膨胀性

流体受压力作用时，体积缩小，密度增大的性质，称为流体的压缩性。流体随着温度的升高，体积膨胀，密度减小的性质，称为流体的膨胀性。

流体的压缩性通常以压缩系数 β_p 表示。它表示压力每增加1Pa，流体体积的相对变化值。其数学式为

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

式中 V ——流体的体积， m^3 ；

$\frac{dV}{dp}$ ——流体的体积相对于压力的变化， m^3/Pa 。

压缩系数 β_p 的单位是 m^2/N 。水的压缩系数见表1—1。

0℃时水的压缩系数 β_p

表1-1

压力 $p(10^5 Pa)$	5	10	20	40	80
$\beta \times 10^{10}(m^2/N)$	5.38	5.36	5.31	5.28	5.15

由表1—1看出，水的压缩系数随压力升高而略有降低，当压力为 $10 \times 10^5 Pa$ 时，压力每升高101325Pa，其体积变化为

$$-\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = 5.36 \times 10^{-10} \times 101325 = 5.43 \times 10^{-5}$$

式中 101325Pa为标准大气压力时的压力数值。

由此看出，在压力为 $10 \times 10^5 Pa$ 时，压力每升高 $10^5 Pa$ ，水的体积仅变化万分之零点左右，显然，在一般情况下是可以忽略不计的。因此一般工程实际中都把水当作不可压缩的，其它液体的情况也是如此。

气体的压缩系数比液体大得多，而且其压缩系数随气体的热力学过程而定，随压力升高而增大。空气在压力为 $1 \times 10^5 Pa$ 、温度为0℃时，其压缩系数是水的2万倍。

流体的膨胀性用温度膨胀系数 β_T 表示。 β_T 表示温度升高1K时，流体体积的相对变化，其数学表达式为

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-2)$$

式中 V ——流体的体积, m^3 ;

$\frac{dV}{dT}$ ——流体体积相对于温度的变化, m^3/K 。

β_T 的单位为 $1/K$ 。

液体的膨胀系数也是很小的, 如水在 $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 情况下, 温度每升高 $1K$, 水的体积大致只改变 0.015% 。即使在较高温度下($90 \sim 100^\circ\text{C}$), 温度每升高 $1K$, 水的体积也只改变 0.07% 。在工程实际中, 这种变化一般也不予考虑。

气体的膨胀系数比液体大得多。当气体的压力不太高而温度不太低时, 气体体积变化近似地遵守理想气体定律, 其关系为

$$pv = RT \quad (1-3)$$

式中 p ——气体压力, Pa ;

v ——气体比容, m^3/kg ;

T ——气体温度, K ;

R ——气体常数, $R = \frac{8314}{M} \text{ J}/(\text{kg} \cdot K)$, M 为气体分子量。对于空气, $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot K)$ 。

四、密度

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度, 用 ρ 表示。对于在所占有体积内各处密度都相同的流体称均匀流体。均匀流体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-4)$$

式中 m ——流体的质量, kg ;

V ——质量为 m 的流体所占据的体积, m^3 。

密度的单位是 kg/m^3 。

对于非均匀流体, 因为各点处密度不同, 按照式(1-4)所计算的只是平均密度, 而某一点处的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-5)$$

式中 dm ——所取流体微元体 dV 的质量, kg ;

dV ——微元体体积, m^3 。

随着温度和压力的变化, 液体的密度变化甚微, 在一般情况下, 这种微小的变化可以不予考虑。气体的密度随温度和压力的变化而变化, 其变化关系为

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (1-6)$$

表1—2为 101325 Pa 的压力下水的密度随温度的变化关系, 表1—3为空气的变化关系。

压力为101325Pa时水的密度

表1-2

温度(°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
密度(kg/m ³)	999.9	1000	999.7	998.2	995.7	992.2	988.1	983.2	977.8	971.8	965.3	958.4

压力为101325Pa时空气的密度

表1-3

温度(°C)	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
密度(kg/m ³)	1.584	1.515	1.453	1.395	1.342	1.293	1.247	1.205	1.165	1.128	1.093
温度(°C)	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	250
密度(kg/m ³)	1.060	1.029	1.000	0.972	0.946	0.898	0.854	0.815	0.779	0.746	0.674
温度(°C)	300	350	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
密度(kg/m ³)	0.615	0.566	0.624	0.456	0.404	0.362	0.329	0.301	0.277	0.257	0.239

在这里我们顺便提一下与流体密度有关的物理量，即比容、重度和比重。

比容是单位质量流体所占据的体积，其单位为m³/kg，用 ν 表示：

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-7)$$

重度表示流体的重力特性，即单位体积流体的重力，其单位为N/m³。对于均质流体，其表示式为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-8)$$

比重定义为流体的密度与4°C纯水的密度之比，其表示式为

$$S = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-9)$$

比重仅是比值而没有单位。

【例1-1】已知某地的大气压力为99325Pa，其温度为300K，求该地空气的比容、密度、重度和比重。

【解】由式(1-3) $p\nu = RT$ 得

$$\nu = \frac{RT}{p} \quad (1-10)$$

$$R = 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

代入式(1-10)得

$$\nu = \frac{287 \times 300}{99325} = 0.867 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rho_1 = \frac{1}{\nu_1} = \frac{1}{0.867} = 1.153 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_1 = \rho_1 g = 1.153 \times 9.807 = 11.31 \text{ N/m}^3$$

$$S_1 = \rho_L / \rho_K = \frac{1.153}{1000} = 0.001153$$

五、粘滞性

流体内部质点间或流层间，由于相对运动而产生内摩擦力以反抗相对运动的性质，称为流体粘滞性。

流体产生粘滞性的实质是，流体内部微观分子作用的宏观表现。其物理原因是微观分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力而形成阻力。

微观分子不规则运动的动量交换形成阻力，是由于分子作不规则运动，各流体层之间互有分子迁移掺混。当流层之间相互运动时，快层分子比慢层分子运动速度快，当快层分子迁移到慢层时，其分子动量就带给慢层，这种动量交换给慢层以向前的碰撞，形成拖力使慢层加速；与此相反，慢层分子迁移到快层时，分子的动量给快层以向后的碰撞，形成阻力而使快层减速。

分子间吸引力形成的阻力，是当流体各层之间没有相对运动时，各方向的吸引力平衡。当相邻层有相对运动时，破坏了原来的分子排列，相邻层分子距有所增加，这时快层分子引力为拖动慢层，而慢层分子引力为阻滞快层，从而形成阻力。

对气体来说，由于分子距大，分子引力小，而分子不规则运动极强烈。所以气体的粘滞性，主要决定于分子不规则运动的动量交换所形成的阻力。对于液体，由于其分子不规则运动微弱，所以液体的粘滞性主要决定于分子间吸引力所形成的阻力。

假定有两块足够大的平行平板A和B（如图1—1所示），两块板之间距离比较近，它们之间充满了液体。板A是静止不动的，板B以匀速度 u_1 平行于板A运动。由于直接

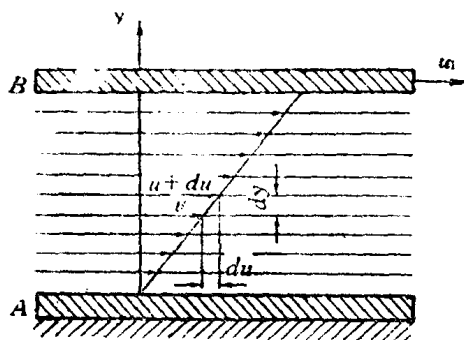


图1-1 速度梯度

粘附在板表面上的一薄层液体的运动速度必然与板的运动速度一样，所以，粘附在板B上的薄层液体也以匀速度 u_1 随同板B运动；粘附在板A上的一薄层液体是静止不动的。这两薄层之间的液体，由于受到板的拖动和牵连，分别以不同的速度分层运动。如某层液体的速度为 u ，相距为 dy 的相邻层液体，速度则为 $u + du$ 。因为各层液体的运动速度不同，产生了滑动，在液体的内部必然出现摩擦力，这种内摩擦力的大小，由实验知道，与面积 A 成正比，与速度梯度

$\frac{du}{dy}$ 成正比，这种关系称牛顿内摩擦力定律，即

$$F = \mu \cdot \frac{du}{dy} \cdot A \quad (1-11)$$

式中， μ 为比例系数，称为动力粘滞系数或粘度。

对于单位面积上的内摩擦力，称为内摩擦应力或剪应力，用 τ 表示，

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

μ 的单位为帕·秒。在 CGS 单位制中, 其单位为达因·秒/厘米², 称为泊, 泊的 1/100 称厘泊; 在工程单位制中, 粘度的单位是 kgf·s/m²。其单位换算如表 1-4。

粘 度 单 位 换 算

表 1-4

单 位	泊	Pa·s	kgf·s/m ²
1 泊	1	0.1	10×10^{-3}
1 Pa·s	10	1	0.102
1 kgf·s/m ²	98.1	9.81	1

流体的粘度与温度有关。温度升高, 液体的粘度急剧下降, 气体则相反, 其粘度随温度上升而增大。

动力粘度 μ 与同温度时的该流体密度 ρ 的比值, 称运动粘度或运动粘滞系数, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-13)$$

ν 的单位为 m²/s。在 CGS 单位制中为 cm²/s, 称为沱。

表 1-5 是压力为 101325 Pa 时水和空气的粘度。

水和空气的动力粘度 μ 及运动粘度 ν

表 1-5

温 度	水		空 气	
t(°C)	$\mu \cdot 10^3$ (Pa·s)	$\nu \cdot 10^3$ (m ² /s)	$\mu \cdot 10^3$ (Pa·s)	$\nu \cdot 10^3$ (m ² /s)
-20	—	—	15.6	11.3
-10	—	—	16.2	12.1
0	1795	1.80	16.8	13.0
10	1304	1.30	17.4	13.9
20	1005	1.01	18.2	14.9
40	655	0.661	19.1	17.0
60	474	0.482	20.3	19.2
80	357	0.368	21.5	21.7
100	283	0.296	22.9	24.5

第二节 流体静力学

一、作用在流体上的力

作用在流体上的力按其作用形式的不同可以分为表面力和质量力两类。

1. 表面力

表面力是作用在被研究流体体积的表面上, 并与表面面积成比例的力。这种力可以分成两种形式, 一种是和流体表面相垂直的法向力, 另一种是和流体表面相切的切向

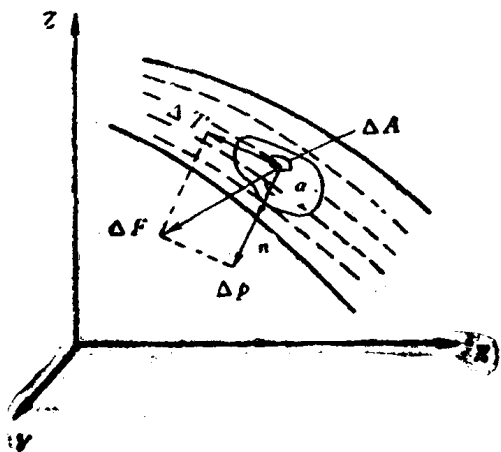


图1-2 表面力

力。图1-2为从管中流动的流体中隔离出一块体积，其四周的流体必然有力作用在它的表面上。在该体积表面上围绕 a 点取一微小面积 ΔA ，四周流体作用于其上的力为 ΔF ，一般情况下，这个力与 ΔA 斜交，并与其法线成 α 角。现把 ΔF 分解成两个分力，一个是沿微小面积法线方向的分力 ΔP 为压力；另一个是沿微小面积切线方向的分力 ΔT ，称为切向力或摩擦力。

比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 表示微小面积 ΔA 上的平均压

值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 的极限叫做 a 点的压力，用 p 表示，

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-14)$$

比值 $\frac{\Delta T}{\Delta A}$ 表示微小面积 ΔA 上的平均切向力。当微小面积 ΔA 无限缩小而趋近于 a 点时，比值 $\frac{\Delta T}{\Delta A}$ 的极限叫做 a 点的切应力，用 τ 表示：

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-15)$$

2. 质量力

质量力是作用在流体的每一质点上，并与受作用流体的质量成比例的力，例如重力、离心加速度力等。在均质流体中，质量力与受作用的流体体积成比例，所以又叫做体积力。

质量力的大小用单位质量力来度量。单位质量力就是作用在单位质量流体上的质量力。设均质流体的质量为 m ，所受的质量力为 G ，则单位质量力为 G/m 。若 G 在各直角坐标轴上的投影为 G_x 、 G_y 、 G_z ，则单位质量力在各个坐标轴上的投影 X 、 Y 和 Z 为

$$X = \frac{G_x}{m}, \quad Y = \frac{G_y}{m}, \quad Z = \frac{G_z}{m} \quad (1-16)$$

单位质量力的单位为 m/s^2 。

二、流体静压力及其特性

(一) 流体静压力

处于相对静止状态下的流体，在重力或其它外力作用下，对于约束它的容器壁就产生压力，同时容器壁也有一个大小相等、方向相反的反作用力作用于流体表面，这种压力称为流体静压力或静压强。同样，流体内部各部分之间也有压力存在。