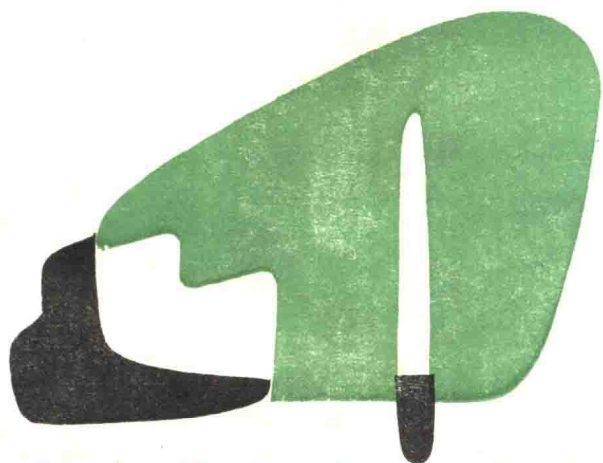


中等专业学校试用教材

# 硅酸盐 工业 热工基础

李志明 樊德琴 编

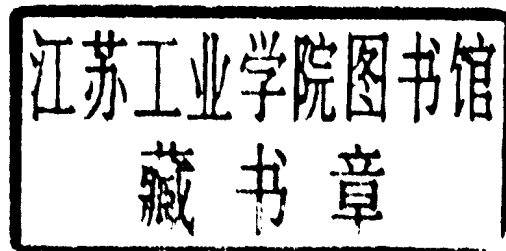


中国建筑工业出版社

中等专业学校试用教材

# 硅酸盐工业热工基础

李志明 樊德琴 编



中国建筑工业出版社

本书为中等专业学校硅酸盐各专业通用的热工基础理论部分教材，内容包括流体力学及流体输送设备、燃烧计算、燃料燃烧机理及燃烧设备、固体和液体燃料的气化、传热、干燥过程等六章。书中结合硅酸盐各专业实际附有较多的例题和习题并附有答案。

本书除作中等专业学校玻璃、陶瓷、水泥、耐火材料等硅酸盐专业的热工理论基础教材外，也可供上述专业的技工学校、职工业余教育及技术人员参考。

中等专业学校试用教材  
**硅酸盐工业热工基础**  
李志明 樊德琴 编

\*  
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*  
开本：787×1092毫米 1/16 印张：25¼ 字数：614千字  
1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷  
印数：1—9,100册 定价：3.10元  
统一书号：15040·5109

## 前 言

中等专业学校用书《硅酸盐工业热工基础》，是根据国家建材局1983年中等专业学校教材工作会议规定的教材编审计划而编写的。本教材是硅酸盐各专业通用的基础理论部分，包括流体力学基础、燃料及燃烧计算、燃料燃烧过程及设备、固体及液体燃料的气化、传热、干燥与干燥过程等六章，适用教学时数为80学时左右。为适应各专业的要求，教材内容理应稍广一些，各专业在使用时，可根据本专业的特点和要求进行选择 and 取舍。

本书由上海建筑材料工业学院李志明主编。书中第五章由上海建筑材料工业学院樊德琴编写，其余各章均由李志明编写。

本教材由上海建筑材料工业学院孙晋涛副教授主审。参加审稿的人员有：山东建筑材料工业学院韩梅祥、北京建筑材料工业学校杨树森、天津建筑材料工业学校李国安、上海建筑材料工业学院徐佐璋。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，希望读者不吝批评指正。

编 者  
1985年12月

# 目 录

绪论	1
第一章 流体力学基础	4
第一节 概述	4
第二节 流体的物理性质	5
第三节 流体静力学基础	12
第四节 流体动力学基础	22
第五节 流体流动的阻力及管路计算	47
第六节 高压气体的流出	59
第七节 颗粒流体力学	66
第八节 流体输送设备	79
第二章 燃料及燃烧计算	123
第一节 概述	123
第二节 燃料的主要性质	124
第三节 燃烧计算	139
第四节 影响实际燃烧温度的因素	152
第三章 燃料燃烧过程及设备	158
第一节 燃烧过程的基本理论	158
第二节 气体燃料的燃烧过程及设备	164
第三节 液体燃料的燃烧过程及设备	174
第四节 固体燃料的燃烧过程及设备	202
第四章 固体及液体燃料的气化	219
第一节 发生炉煤气的反应过程	219
第二节 混合发生炉煤气的制造原理	222
第三节 煤的性质对气化过程的影响	232
第四节 煤气发生炉的构造	233
第五节 煤气发生炉的操作	237
第六节 煤气的净化	239
第七节 煤气发生炉的选型	245
第八节 液体燃料的气化	247
第五章 传热学	250
第一节 传热的基本方式	250
第二节 传导传热	253
第三节 对流传热	268
第四节 辐射传热	285
第五节 综合传热	317
第六节 非稳态导热	324

第六章 干燥过程 .....	347
第一节 概述 .....	347
第二节 湿空气的基本性质 .....	347
第三节 湿空气的 $I-x$ 图 .....	352
第四节 干燥静力学 .....	361
第五节 干燥动力学 .....	369
附录(一) 绝对粘度与各种相对粘度的换算关系 .....	388
附录(二) 气体粘度算图 .....	388
附录(三) 局部阻力系数 $K$ 图表 .....	389
附录(四) 不同孔嘴的速度系数 $\varphi$ 、缩流系数 $\epsilon$ 、流量系数 $\mu$ 和局部阻力系数 $K$ .....	392
附录(五)(a) G4-73-11型单吸入离心式锅炉通风机性能选择曲线 .....	393
(b) Y4-73-11型单吸入离心式锅炉引风机性能选择曲线 .....	393
附录(六) 饱和水的热物理性质 .....	394
附录(七) 干饱和水蒸汽的热物理性质 .....	394
附录(八) 在大气压力 ( $p=760\text{mmHg}$ ) 下烟气的热物理性质 .....	395
附录(九) 干空气的热物理性质 ( $p=760\text{mmHg}\approx 1.01\times 10^5\text{Pa}$ ) .....	396
附录(十) 湿空气的相对湿度表 (%) .....	397
附录(十一) 湿空气的 $I-X$ 图 (高温) .....	398
参考书目 .....	399

## 绪 论

硅酸盐工业属高温化学工业，其产品无论水泥、玻璃、陶瓷或耐火材料等，都必须在特定的窑炉中进行煅烧或熔炼。在热处理过程中，物料在窑内要发生一系列物理、化学变化。如果窑炉设计不合理或操作管理不当，必然会影响产品的产量和质量或增加原材料与能源的消耗，严重时还可能产生废品。因此，人们形象地把窑炉比拟为硅酸盐工厂的心脏，说明其重要性。就经济方面而言，燃料等能源消耗在产品成本中占较大的比例，有些产品高达20~30%。兴建一座现代化硅酸盐工业窑炉需投资数百万乃至数千万元之巨。

我国是世界上公认的生产陶瓷最早的国家。从西安半坡遗址的发掘中，证明远在五千年以前，我们的祖先就创造了升焰式窑烧制陶器。早在战国时代，我国就发明了利用山坡的自然倾斜兴建了龙窑。至明代又出现了著名的德化阶梯窑，稍后创造了景德镇的蛋形窑。前两种窑能很好地利用余热，燃烧温度能达1300°C以上，其工作原理与现代的隧道窑及多室窑相似。就是在这些窑炉中烧制出了闻名于世的“中国瓷器”，以致许多国家仍以瓷器代表中国，例如在英语中瓷器与中国是同一个词。以上历史事实，说明了我国古代劳动人民在同自然作斗争中，在陶瓷和窑炉方面所取得的巨大成就，并为世界文明作出了巨大的贡献。

但是，由于长期的封建统治，特别是解放前的一百多年，封建统治阶级的闭关锁国和残酷统治及帝国主义的侵略，使有着悠久历史传统的我国陶瓷工业以及其他硅酸盐工业不仅得不到发展，而且已濒于绝境。新中国成立后，在中国共产党的正确领导下，古老的陶瓷工业获得了新生，其他硅酸盐工业也得到了很大的发展，年轻的玻璃纤维工业也迅速发展起来。大型现代化的各种硅酸盐工厂在全国各地如雨后春笋不断兴建，工业布局也更趋合理。

由于十年动乱的严重破坏，把原来已经缩小了的国际差距又拉大了，致使我国硅酸盐工业生产水平远落后于国际先进水平。产量、质量、劳动生产率、原料和能源消耗等各项技术经济指标与国际先进水平均有相当大的差距。

党的十一届三中全会以后，各方面进行了拨乱反正，实行对外开放，加强国际交流，我国硅酸盐工业又开始了欣欣向荣的局面。我国自行设计以及从国外引进的各种现代化硅酸盐工业设备和大、中型现代化硅酸盐工厂，正在有计划地在全国各地兴建，为我国硅酸盐工业更快地达到世界先进水平，创造了有利的条件。

窑炉的设计与操作管理，涉及许多基础理论知识。例如，要保证燃料在窑炉内得到合理的充分燃烧，就要掌握燃烧学的知识。要保证燃烧产物在窑内物料或制品间合理地流动，使温度分布合理并能最大限度地利用热能，尽可能提高传热速率，就必须掌握有关流体力学和传热学的基本知识。如设计的窑炉不符合气体运动规律，将造成窑内温度分布极不均匀，导致高温烟气由燃烧室中产生以后不能均匀分布于窑炉内物料或制品间，而集中于窑炉顶部或者通过短路直接进入烟囱，造成能源的浪费。同样，不了解燃料的燃烧规律和热传递规律所设计的窑炉，是不能保证燃料热能充分利用的，窑炉的热效率必然很低，

甚至达不到工艺要求的温度。另一方面，窑炉设计虽是合理的，但因操作管理人员缺乏必要的基础理论知识以致操作管理不当，也会影响产品的产量和质量以及窑炉的使用寿命。此外，有些硅酸盐产品的半成品，如陶瓷、耐火材料和砖瓦等的坯体，在入窑煅烧前，还须进行干燥，如干燥不当，坯体就会因开裂或变形而报废。这就要求操作管理人员掌握有关干燥的基本理论。由此可见，学习和掌握基础理论知识，对硅酸盐工业窑炉的设计和 operation 管理有着重要的意义。

由于硅酸盐窑炉中的反应过程非常复杂，有些机理至今尚未完全掌握，这就需要在生产实践中注意观察和总结经验。理论来源于实践又反过来指导实践，促进实践的发展；实践的发展又赋予理论以新的内容，进一步丰富了理论。因此生产实践同理论一样具有重要的地位，把理论同实践结合起来，才能不断地推动事物的发展。

与其他科学事业一样，硅酸盐工业窑炉也在不断地发展着，近数十年中发展特别迅速，各种新型窑炉不断研制成功并投入生产。以水泥窑为例，五十年代以前主要是回转窑和立窑；五十年代在回转窑上附设各种类型的余热利用装置，提高了窑的热效率；六十年代中期，各种带悬浮预热器的回转窑不断涌现；到七十年代又出现了带窑外分解炉的回转窑，相继研究新的熟料煅烧设备，如沸腾层煅烧窑等。由于新型窑的出现，使回转窑的单机产量不断提高。带悬浮预热器的窑在窑直径不超过7米的情况下，单机日产量可提高到5000吨，而带分解炉的窑提高到8000~10000吨，而且热耗比一般回转窑低三分之一左右。平板玻璃熔窑同样获得了飞速发展。五十年代末以前，平板玻璃成型主要是垂直引上法，玻璃原板宽一般不超过2.5米，大型玻璃熔窑的日熔料量为250~300吨。六十年代初，浮法成型工艺问世后，玻璃熔窑的规模和生产能力迅速扩大。六十年代初，浮法熔窑的生产能力为143~280吨/天，原板宽为2.54~3.25米。六十年代中期，浮法窑的生产能力达到500吨，原板宽为3.5~4.06米，电子计算机开始用于控制生产过程。七十年代中期，浮法窑的生产能力达700吨/天，原板宽达5.6米，生产过程全部由电子计算机自动控制，热耗较垂直引上法低40%左右。八十年代初，浮法窑生产能力已达到1000吨/天，熔窑的宽度已超过12米。此外，带旋风预热器的新型熔窑及粉料粒化、浸没式燃烧等新技术正在进行工业性试验。新型高级耐火材料的研制和应用，使玻璃熔窑的寿命从过去的2~3年延长到7~8年。

陶瓷和耐火材料烧成窑的发展也很快。五十年代初，我国的陶瓷烧成窑大多是传统的间歇式室式窑。耐火材料制品烧成窑大多是间歇式的倒焰窑。五十年代末，兴建了一些大、中型连续式隧道窑。目前，我国大型的陶瓷隧道窑窑长为80~100米，可年产日用瓷器1100万件左右。大型耐火材料隧道窑窑长为150~200米，可年产耐火材料制品4~5万吨。近二十年来，随着陶瓷纤维等新型轻质隔热材料及高速烧嘴等新技术的出现，新型窑炉不断发展，出现了一些窑型小，烧成周期短，自动化程度高的新型间歇式窑和连续式窑。新型的间歇窑有窑底可活动的台车式窑及窑体可活动的帽罩式窑等。烧瓷器时，烧成周期可小于24小时且成品率高。新型连续窑有步进梁式隧道窑、网带式隧道窑和气垫式隧道窑等。这些新型的隧道窑体型都很小，烧成速度快、热耗低。如窑长为14.6米有效宽1.0米，有效高0.3米的步进梁式隧道窑，用天然气为燃料，烧成时间仅4小时，可年产瓷碗50万件，燃料消耗为0.65千克/千克瓷。在气垫窑中素烧面砖，烧成周期仅15分钟。

硅酸盐工业窑炉新技术的研究和应用，为窑炉设计工作者及操作管理人员提供了更加



丰富的内容并提出了更高的要求。

《硅酸盐工业热工基础》是一门重要的专业基础课，它是基础课和专业窑炉课之间的桥梁。本课程着重介绍流体力学基础，燃料的性质、制备、输送及其在窑炉内燃烧的过程和燃烧计算方法、窑内气体流动和热交换过程的基本规律，并介绍干燥的基本理论。通过学习，使学生能应用所学的基础理论知识分析硅酸盐工业窑炉中的一些气体流动、燃料燃烧和传热、传质现象，提高分析和解决问题的能力。为进一步学好专业课程和从事硅酸盐工业生产管理打下热工理论基础。

本书采用国际单位制，单位一律用法定符号或文字表示并置于圆括号内，如 $\frac{\text{牛顿}}{\text{米}^2}$ 表示为 $(\text{N}/\text{m}^2)$ 。无法定符号时，采用汉语拼音大写字母表示，如 $\frac{\text{千克}}{\text{标米}^3}$ 用 $(\frac{\text{kg}}{\text{Bm}^3})$ 表示。书末附有国际单位制与其他单位制的换算表。

本书中的重力加速度值一律采用 $g = 9.80\text{m}/\text{s}^2$ 。热量换算一律用热化学卡，即 $1\text{cal}_m = 4.184\text{J}$ 。

# 第一章 流体力学基础

液体和气体统称为流体。研究流体平衡和运动规律的学科称为流体力学。现代硅酸盐工业在生产过程中会遇到许多涉及流体力学的问题，如水、燃料油及各种气体的输送，磨料的分级、粉料的选分与气力输送及收尘，泥浆的输送、高温玻璃液的流动等等。了解并掌握流体力学的基本原理，对从事硅酸盐工业生产和科研的技术人员来说是颇为重要的。

学习流体力学时，要注意对基本原理、基本概念和基本方法的理解和掌握；要注意液体与气体的共性与特性，理解共性寓于特性之中的哲理；要学会理论联系实际地分析和解决实际问题。

## 第一节 概 述

### 一、流体的力学特性

从力学观点来看，流体与固体的区别主要在于受剪应力后的表现有很大的差异。固体受剪应力后与受压应力或张应力有类似的表现，即在弹性极限范围内，产生弹性变形，当应力超过弹性极限时就会产生永久畸变或称为塑性变形，应力再大时则被破坏。流体受剪应力后即使剪应力很小，也会不断变形并流动，这就是说流体只能承受压应力，不能承受拉力和剪力，否则就会变形流动，即流体具有流动性。

液体与气体的主要差别主要在于受压后的表现。液体受压后体积变化很小，在一般情况下可以忽略不计，因此液体常称为不可压缩流体。气体受压后体积变化较大，所以通常称气体为可压缩流体。然而，可压缩与不可压缩的概念不是绝对的而是相对的。若压力不太大，气体的体积变化小于原体积的20%时，也可近似看作不可压缩流体，如通风管路中的空气，窑炉中的烟气等都可作为不可压缩流体处理。这样可使问题大为简化。此外，由于液体分子间的内聚力远大于气体，所以液体的形状虽随容器的形状而变，但其体积不变，而气体的形状和体积都不一定，它总是充满着容器。

### 二、流体的连续性

从物质结构来看，流体是由分子组成的，分子之间有一定的空隙，使分子能够产生不规则的运动。从这点来看，流体本身并不是连续的介质。可是，要从分子热运动规律来研究流体宏观运动的规律，那是非常困难的。因此，流体力学将流体看成是由大量的一个一个连续质点所组成的，每一个质点本身是一个含有大量分子的集团，质点之间没有空隙。这就是说流体力学所研究的是大量分子的统计平均宏观属性，可以将数学中有关连续函数的概念运用于流体力学的研究中，这样可使流体力学的研究大为简化。但须注意，流体力学中所说的质点本身具有一定的尺度，此尺度的大小要比分子平均自由程大得多。我国科学家钱学森认为，流体力学中的质点尺寸应大于分子平均自由程的100倍，否则由连续介质概念而得出的一切结论往往是无效的。这就是说在一般情况下，由连续介质概念得出的流体力学的一切结论是有效的，但当流体运动的速度大到与分子运动速度同数量级，或者对

于稀薄气体以及研究对象的尺度与分子平均自由程同数量级时，由连续介质概念得出的流体力学的一切结论，往往不仅误差很大甚至是完全错误的。

## 第二节 流体的物理性质

### 一、密度

单位体积流体的质量称为流体的密度，用 $\rho$ 表示，单位为 $\text{kg/m}^3$ 。

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

式中  $m$ ——流体的质量(kg)；

$V$ ——流体的体积( $\text{m}^3$ )。

在标准状态下气体的密度可写成：

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad (\text{kg/Bm}^3) \quad (1-2)$$

式中  $V_0$ ——在标准状态下气体的体积( $\text{Bm}^3$ )。

工业中常见的低压气体可以近似看成为理想气体，其标准状态下的密度可用下式计算：

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4} \quad (\text{kg/Bm}^3) \quad (1-3)$$

式中  $M$ ——气体的千克分子量( $\text{kg/kmol}$ )，在数值上等于气体的分子量。

流体的密度通常由实验测得，常用流体的密度值可由表1-1中查得。

几种常见流体的密度值

表 1-1

流体名称	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	测试条件	流体名称	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	测试条件
纯水	1000	4°C	空气	1.293	标准状态
海水	1020	15°C	燃烧产物	1.30~1.34	标准状态
汞	13600	15°C	CH <sub>4</sub>	0.716	标准状态
汽油	680~790	15°C	SO <sub>2</sub>	2.858	标准状态
重油	900~950	15°C	H <sub>2</sub> S	1.521	标准状态
O <sub>2</sub>	1.429	} 标准状态	CO <sub>2</sub>	1.963	标准状态
H <sub>2</sub>	0.090		H <sub>2</sub> O	0.804	标准状态
CO	1.250		N <sub>2</sub>	1.250	标准状态

液体的密度仅与温度有关，气体的密度与温度及压强有关。理想气体在某一状态下的密度可由理想气体状态方程求得：

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

式中  $p$ ——气体的压强( $\text{N/m}^2$ )或( $\text{Pa}$ )；

$M$ ——气体的千克分子量( $\text{kg/kmol}$ )；

$T$ ——气体的温度( $^{\circ}\text{K}$ )；

$R$ ——通常气体常数，其值为 $8314.3$ ( $\text{J/kmol}\cdot\text{K}$ )。

由(1-4)式很容易得出理想气体在某一状态下的密度 $\rho$ 与标况密度 $\rho_0$ 之间的关系：

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 \cdot p}{T \cdot p_0} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-5)$$

式中  $T_0$  和  $p_0$  代表标态下的温度和压强,  $T$  和  $p$  是某一状态下的温度和压强。在硅酸盐工业窑炉中可以认为  $p \approx p_0$ , 于是有

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} = \frac{273}{273+t} \rho_0 \quad (1-6)$$

式中  $t$  —— 摄氏度 $^{\circ}\text{C}$ 。

混合气体的密度可用加和法则计算:

$$\rho_m = a_1 \rho_1 + a_2 \rho_2 + \dots + a_n \rho_n = \sum_{i=1}^n a_i \rho_i \quad (1-7)$$

式中  $\rho_m$  —— 混合气体的密度 ( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_i$  —— 混合气体中各相应气体的密度;

$a_i$  —— 混合气体中各种气体的体积百分比。

混合液体的密度可用下式计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \dots + \frac{x_n}{\rho_n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\rho_i} \quad (1-8)$$

式中  $\rho_m$  —— 混合液体的密度 ( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_i$  —— 混合液体中各相应液体的密度;

$x_i$  —— 混合液体中各种液体的质量百分比。

密度的倒数表示单位质量流体占有的容积用字母  $v$  表示, 称为流体的比容。

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-9)$$

密度  $\rho$  与重力加速度  $g$  的乘积表示单位质量流体的重力, 称为流体的重度, 用字母  $\gamma$  表示:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-10)$$

**【例题 1-1】** 容积为  $0.035 \text{m}^3$  的氧气瓶中装有压强为  $15 \text{MPa}$  (即兆帕)、温度为  $20^{\circ}\text{C}$  的氧气, 外界大气压为  $0.1 \text{MPa}$ , 求瓶中氧气的质量和自由容积 (指在外界大气压及  $20^{\circ}\text{C}$  时的容积)。

**【解】** 已知氧气的分子量  $M = 32$ , 按 (1-4) 式有

$$m = \frac{p \cdot V \cdot M}{R \cdot T} = \frac{15 \times 10^6 \times 0.035 \times 32}{8314.3 \times (273 + 20)} = 6.9 \quad (\text{kg})$$

令  $V_1$ ,  $p_1$  表示氧气的自由容积及外界大气压, 等温时有

$$p_1 \cdot V_1 = p \cdot V$$

由此可得:

$$V_1 = \frac{p \cdot V}{p_1} = \frac{15 \times 10^6 \times 0.035}{0.1 \times 10^6} = 5.25 \quad (\text{m}^3)$$

**【例题 1-2】** 已知烟气的体积组成百分比如下:  $\text{H}_2\text{O} 12\%$ ,  $\text{CO}_2 18\%$ ,  $\text{N}_2 70\%$ , 求此烟气在标态及  $200^{\circ}\text{C}$  时的密度。

**【解】** 上述三种气体的标态密度可在表 1-1 中查得, 烟气的密度按 (1-7) 式:

$$\rho_{m,0} = \sum_{i=1}^3 a_i \rho_i = 0.12 \times 0.804 + 0.18 \times 1.963 + 0.7 \times 1.250 = 1.325 \quad (\text{kg/Bm}^3)$$

200[°C]时的烟气密度为

$$\rho_{m,t} = \rho_{m,c} \cdot \frac{273}{273+t} = 1.325 \times \frac{273}{273+200} = 0.765 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

**【例题 1-3】** 将密度为1600kg/m<sup>3</sup>的糖浆按1:1的质量比用清水稀释, 求稀释后糖浆溶液的密度。

**【解】** 按题意, 糖浆和水各占50%, 按(1-8)式

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} = \frac{0.5}{1600} + \frac{0.5}{1000} = 8.125 \times 10^{-4}$$

$$\therefore \rho_m = \frac{10^4}{8.125} \doteq 1230 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

## 二、流体的压缩性与膨胀性

流体在外力作用下改变自身容积的特性, 称为流体的压缩性。通常用压缩系数 $\alpha$ 表示流体的压缩性, 它表示温度一定时, 压强每增加1帕时, 流体容积的相对变化率。在某一压强 $p$ 时流体的压缩系数可用下面的微分式表示

$$\alpha = - \frac{dV}{V} \cdot \left( \frac{1}{Pa} \right) \text{ 或 } \left( \frac{m^2}{N} \right) \quad (1-11a)$$

式中负号表示流体的容积随压强增大而减小。在某一压强范围 $\Delta p$ 压缩系数的平均值为

$$\bar{\alpha} = - \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} \text{ (m}^2\text{/N)} \quad (1-11b)$$

式中  $V$  —— 流体受压前的容积 (m<sup>3</sup>);

$-\Delta V$  —— 压强增加 $\Delta p$ 时流体容积减少的量 (m<sup>3</sup>)。

流体受热后改变容积的特性称为流体的膨胀性。通常用膨胀系数 $\beta$ 表示流体的膨胀性, 它表示压强一定, 而温度升高1度时流体容积的相对变化率。在某一温度下流体的膨胀系数可用下面的微分式表示:

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT} \text{ (1/K)} \quad (1-12a)$$

在某一温度范围 $\Delta T$ 的平均膨胀系数为:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T} \text{ (1/K)} \quad (1-12b)$$

式中  $\Delta V$  —— 温度升高 $\Delta T$ 后流体容积增加量 (m<sup>3</sup>);

$V$  —— 温度变化前流体的容积 (m<sup>3</sup>)。

液体的压缩系数与膨胀系数都很小, 例如水、汞、液化石油气在15°C左右的平均压缩系数 $\bar{\alpha}$ 值分别为 $5 \times 10^{-10}$ 、 $4 \times 10^{-11}$ 和 $7 \times 10^{-9}$ m<sup>2</sup>/N, 相应的膨胀系数平均值 $\bar{\beta}$ 分别为 $1.5 \times 10^{-4}$ 、 $1.8 \times 10^{-4}$ 和 $2.2 \times 10^{-3}$ 1/K。可见除非压强变化非常大, 一般都可把液体看作不可压缩流体。但必须注意的是液体的压缩性和膨胀性虽然很小, 当容器充满液体时, 液体温度的升高会引起很大的附加应力, 会损坏容器甚至造成事故。这种附加应力的大小可从(1-11)和(1-12)二式得出:

$$\Delta p = - \frac{\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \Delta T \quad (1-13)$$

例如，10°C时将液化石油气充满钢瓶，当瓶中的液态石油气升高到30°C时，产生的附加应力是

$$\Delta p = -\frac{\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \Delta T = \frac{2.2 \times 10^{-3}}{7 \times 10^{-9}} \times (30 - 10) = 6.29 \quad (\text{MPa})$$

这样大的附加应力会使钢瓶破裂而酿成事故。因此装液化气的钢瓶只允许装至容量的80%而不许装满。凡盛装液体的密封容器都不允许装满，必须留出足够的气体空间，起缓冲作用。

气体的压缩性和膨胀性比液体大得多，理想气体的压缩系数和膨胀系数分别为：

$$\alpha = -\frac{1}{p} \quad (1-14)$$

$$\beta = -\frac{1}{T} \quad (1-15)$$

在标准状态下理想气体的压缩系数 $\alpha$ 和膨胀系数 $\beta$ 为：

$$\alpha = -\frac{1}{101325} \approx -10^{-5} \quad (\text{m}^2/\text{N})$$

$$\beta = -\frac{1}{273.15} \approx -\frac{1}{273} \quad (1/\text{K})$$

其数值分别为水的20000倍和24倍。

若令 $V_0$ 表示理想气体在标态时的容积( $\text{Bm}^3$ )，等压加热到 $t$ [°C]时，其体积应为：

$$V = V_0(1 + \beta t) \quad (\text{m}^3) \quad (1-16)$$

**【例题 1-4】** 燃烧一千克重油需空气12( $\text{Bm}^3$ )，今将空气预热到1000[°C]，试求预热后空气的容积。

**【解】** 窑炉系统中气体的压强与外界大气压近似相等，可以认为是等压加热过程，所以

$$V = V_0(1 + \beta t) = 12 \times \left( 1 + \frac{1000}{273} \right) = 56 \quad (\text{m}^3)$$

### 三、流体的粘滞性

#### (一) 牛顿内摩擦定律和粘度系数

从物理学中知道，二个互相接触的固体相对运动时，在它们的接触面上有摩擦阻力产生。在运动着的流体本身之间以及流体与固体壁之间也存在着摩擦力。当我们观察河道中的水流时，常常会看到河道中心的水流动快，越靠近河岸，水的流速越慢，在紧贴河岸处的水会停止不动。实验表明，在渠道或管道中流动的流体也有这种现象，如图1-1所示。图中 $R$ 为管道的半径， $u$ 是距管壁为 $y$ 处流体的点速度( $\text{m/s}$ )。为什么会产生这种现象？

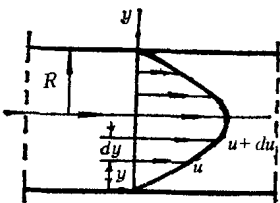


图 1-1 流体在管道内的速度分布

物质的分子理论表明，一切物质均由分子组成，分子之间有引力存在，固体中分子间的引力最大，液体次之，气体间分子引力最小。当流体沿固体壁面运动时，由于固体壁面的分子引力以及固体表面的不平整，对流体质点产生了约束力，使这部分流体质点停滞不前。离开固体壁面越远，这种

约束力越小，到一定距离时，固体表面的这种约束力就为零。但流体质点之间的分子引力及分子热运动产生的动量交换依然存在，即流体质点之间的约束力依然存在。于是紧贴固体壁面的一层静止的流体质点约束着与其相邻的运动流体的质点，速度慢的一层流体质点约束相邻而速度较快的一层流体。这样一层影响一层，使运动着的流体在一定的范围内好象分层似的互相制约着。这种流动流体质点之间的约束力称做流体的内摩擦力或剪力，它与两个相对运动着的固体表面之间的摩擦力有较大的差别。

牛顿用实验证实了运动流体之间的内摩擦力的大小与两层流体的接触面积成正比，与两层流体之间的速度梯度成正比。用数学式表示为：

$$f = -\mu F \frac{du}{dy} \quad (\text{N}) \quad (1-17)$$

或

$$\tau = \frac{f}{F} = -\mu \frac{du}{dy} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-18)$$

式中  $f$  —— 两层流体之间的内摩擦力或剪力 (N)；

$F$  —— 两层流体之间的接触面积 ( $\text{m}^2$ )；

$\frac{du}{dy}$  —— 两层流体之间的速度梯度 ( $\frac{\text{m/s}}{\text{m}}$ )；

$\mu$  —— 比例系数，称为绝对动力粘度系数，简称粘度系数或粘度；

$\tau$  —— 单位面积上的剪力，也叫剪应力 ( $\text{N/m}^2$ )。

负号表示内摩擦力的方向与流体运动方向相反。

上述二式均称做牛顿内摩擦定律。若令式中的  $F = 1 \text{ m}^2$ ， $du/dy = 1 \frac{\text{m/s}}{\text{m}}$ ，则

$$f = -\mu$$

可见流体的粘度系数  $\mu$  是单位接触面积和单位速度梯度时两层流体之间的内摩擦力。由 (1-17) 式可知粘度系数的国际单位为  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  或  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  (帕·秒)。除国际制外目前还有用粘度的物理制 P (泊) 和工程制 [千克力·秒/米<sup>2</sup>]，它们之间的换算如表 1-2 所示。

粘度单位换算

表 1-2

单 位	P	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	$\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
1 泊	1	0.1	$10.2 \times 10^{-3}$
1 帕·秒	10	1	0.102
$1 \frac{\text{千克力}\cdot\text{秒}}{\text{米}^2}$	98.0	9.80	1

比泊更小的物理制是厘泊 (CP)，纯水在  $20.2^\circ\text{C}$  时的粘度就是 1 CP。1 P = 100 CP  
动力粘度系数  $\mu$  与流体密度  $\rho$  的比值叫做流体的运动粘度系数，简称运动粘度，用符号  $\nu$  表示：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-19)$$

运动粘度的国际制和工程制都是  $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$  或 (米<sup>2</sup>/秒), 目前还有用它的物理制  $\text{cm}^2/\text{s}$  (厘米<sup>2</sup>/秒), 这个单位也称沱, 比沱更小的单位是厘沱, 它们之间的换算关系是  $1 \text{ 米}^2/\text{秒} = 10000 \text{ 沱} = 10^6 \text{ 厘沱}$ 。

剪应力符合牛顿内摩擦力定律的流体称为牛顿流体, 如水、各种低粘度油类、各种气体等都是牛顿流体。剪应力不符合牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体, 泥浆、高粘度油类等属于非牛顿流体。没有内摩擦力, 即粘度为零的流体称为理想流体。理想流体实际上是不存在的, 但当流体的粘度很小或流速很低以致内摩擦力小到可以忽略时, 就可以近似看作为理想流体, 这样可使所研究的问题大为简化。

若以速度梯度  $du/dy$  为横轴, 剪应力  $\tau$  为纵轴, 上述三种类型流体的区别如图1-2所示。本书所讨论的都是指牛顿流体而言。

### (二) 相对粘度及粘度的换算

动力粘度和运动粘度都称为绝对粘度。目前在工程技术中除上述绝对粘度外还广泛地采用着各种相对粘度。相对粘度也叫条件粘度。视测试条件不同, 相对粘度有多种表示法。我国和东欧国家多采用恩格拉粘度或简称恩氏粘度, 用符号  $^{\circ}\text{E}$  表示。所谓恩氏粘度是200ml的试液在测定温度下从恩氏粘度计(图1-3)中流出所需要的时间  $\tau$  (s) 与同量蒸馏水在20°C下从同一仪器中流出所需的时间  $\tau_0$  (s) 之比值

即

$$^{\circ}\text{E} = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (1-20)$$

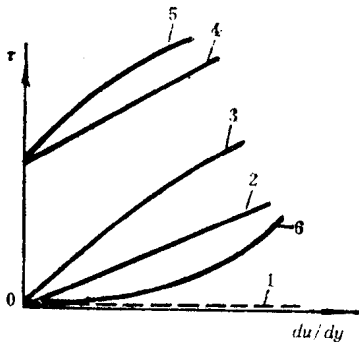


图 1-2 牛顿流体与非牛顿流体剪应力图

- 1—理想流体 ( $\tau=0$ ); 2—牛顿流体; 3—拟塑性流体;  
4—塑性流体; 5—塑料; 6—膨胀性拟塑性流体

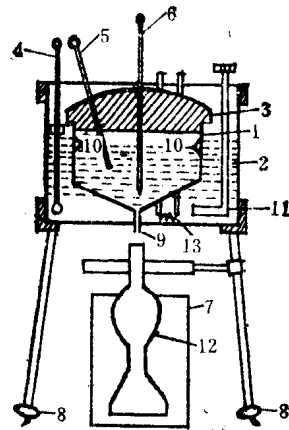


图 1-3 恩氏粘度计构造

- 1—不锈钢容器; 2—水浴; 3—保温盖; 4—测水浴温度的温度计; 5—测被测液体温度的温度计; 6—开止栓; 7—防止液体溢出的烧杯; 8—调水平用螺丝; 9—被测液体流出孔; 10—液面标志夹; 11—手动搅拌器; 12—承受被测液体的容量瓶; 13—加热蛇形管

式中  $\tau_0 = 51 \pm 1 \text{ s}$ , 称为仪器常数。也有直接用试液从仪器中流出所需的时间秒数来表示相对粘度的大小, 如恩氏秒, 用  $^{\circ}\text{E}$  表示。

美国和西欧各国常用雷氏粘度或国际赛氏粘度表示相对粘度。各种相对粘度的名称、



符号及换算关系可见附录一。

### (三) 粘度与温度的关系

实验证明, 压强在 5 MPa 以下及真空度在 3000 Pa 以上时, 压强的变化对流体粘度几乎没有影响。但温度的变化对粘度影响很大。由于液体与气体产生内摩擦力的主要原因不同, 所以它们对温度的反映也不同。液体产生内摩擦力的主要原因是分子引力。温度升高时, 液体体积膨胀, 分子间距离加大, 引力减小。因此液体的粘度随温度升高而减少。气体产生内摩擦力的主要原因是分子热运动的动量交换。温度升高时气体分子热运动的速率增大, 所以粘度也增大。水的粘度与温度的关系可用下式表示:

$$\mu = \frac{1.787 \times 10^{-3}}{1 + 0.0337t + 0.00022t^2} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-21)$$

式中  $t$  ——水的温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

水的粘度可从图 1-4 饱和水的粘度与温度的关系中方便地查出。

气体的粘度与温度的关系可近似用下式计算:

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{273 + c}{T + c} \right) \cdot \left( \frac{T}{273} \right)^{1.5} \quad (1-22)$$

式中  $T$  ——气体的温度(K);

$\mu_0$  ——273(K)时气体的粘度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );

$c$  ——与气体性质有关的常数。

对空气:  $\mu_0 = 1.72 \times 10^{-5}$ ;  $c = 122$

对烟气:  $\mu_0 = 1.578 \times 10^{-5}$ ;  $c = 173$

高温烟气的粘度可由图 1-5 高温烟气粘度与温度的关系中查得。常见气体从  $-100 \sim 1000^{\circ}\text{C}$  的粘度可由附录二求得。

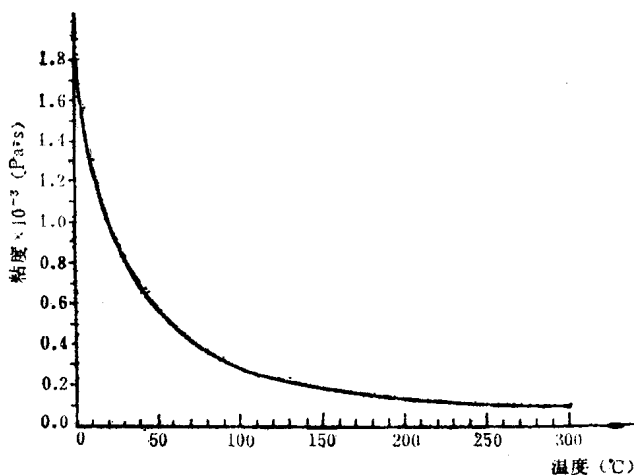


图 1-4 饱和水的粘度与温度的关系

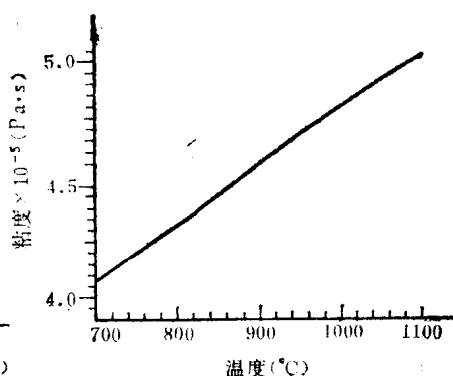


图 1-5 高温烟气粘度与温度的关系

**【例题 1-5】** 试求烟气在  $1000^{\circ}\text{C}$  时的粘度。

**【解】** 由式 (1-22):

$$\mu = 1.578 \times 10^{-5} \cdot \left( \frac{273 + 173}{1273 + 173} \right) \cdot \left( \frac{1273}{273} \right)^{1.5} \approx 4.90 \times 10^{-5} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s})$$