



数据加载失败，请稍后重试！

封面设计：秦 川

ISBN 7-81020-433-5/TF·022

定价：5.00 元

工 业 炉

陈文修 编著

中南工业大学出版社

内 容 提 要

本书内容分两篇，共九章。第一篇工业炉热工基础，阐述流体力学基础、传热原理与筑炉材料基本知识。第二篇工业炉各论，主要阐明燃料炉（包括燃料燃烧）、电阻炉、感应电炉以及真空电炉（简介）的工作原理、技术特性及炉型结构；最后两章介绍工业炉设计以及工业炉节能基本知识。书中列有例题、习题与思考题。

本书可作高等学校金属压力加工专业、金属材料与热处理专业教材，也可供粉末冶金、铸造、锻压和热能工程等专业的师生以及工程技术人员参考。

湘新登字 010 号

工 业 炉

陈文修 编著

责任编辑：秦瑞卿

*

中南工业大学出版社出版
湖南省地质测绘印刷厂印装
湖南省新华书店发行

*

开本：850×1168/32 印张：9.375 字数：252 千字

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

印数：0001—5000

*

ISBN 7-81020-433-5/TF. 022

定价：5.00 元

前 言

本书是在中南工业大学等校金属压力加工专业、金属材料与热处理专业所用教材《金属材料加工用炉》(1980)基础上,结合教学经验,改编而成。这次正式出版作了较大删减和补充,具有以下特点:①加强热工基础理论的系统性,又注意针对性。②深入浅出阐明主要工业炉炉型的工作理论。③反映国内外当代有关工业炉的先进科学技术,如新理论、新炉型、新辅助装置以及新设计计算方法。④炉型介绍全面而有重点。⑤较大幅度增加习题与思考题供选作。⑥注意理论联系实际。⑦力求叙述的逻辑性,以启发思维。⑧大大压缩篇幅。⑨改用国际单位制。

全书请中南工业大学梅炽教授主审。编写过程中中南工业大学热能工程教研室给予了热情支持。谨表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,殷切希望使用本书的读者批评指正。

编 者

1990年8月

目 录

绪 论	(1)
-----	-------

第 1 篇 工业炉热工基础

第 1 章 流体力学基础	(3)
1.1 概述	(3)
1.2 流体静力学	(12)
1.3 流体动力学	(24)
1.4 流体流动过程中能量损失	(46)
1.5 流体输送设备	(57)
第 2 章 传热原理	(65)
2.1 概述	(65)
2.2 传导传热基础理论与稳态传导传热	(67)
2.3 对流给热	(80)
2.4 辐射传热	(89)
2.5 综合传热	(113)
2.6 非稳态传导传热	(119)
第 3 章 筑炉材料	(136)
3.1 概述	(136)
3.2 耐火材料的一般性能	(137)
3.3 耐火材料种类与特性简介	(141)
3.4 耐火材料使用寿命	(146)
3.5 隔热材料	(148)
3.6 其他筑炉材料	(149)

第 2 篇 工业炉各论

第 4 章 燃料炉	(151)
4.1 概述	(151)

4.2	炉用燃料种类、组成和特性	(152)
4.3	燃烧计算	(160)
4.4	燃烧方法与燃烧装置	(169)
4.5	火焰炉内气体流动	(179)
4.6	火焰炉内传热	(188)
4.7	燃料炉炉型结构与特性	(188)
第5章	电阻炉	(199)
5.1	概述	(199)
5.2	电热元件简介	(200)
5.3	电热元件的容许表面负荷	(204)
5.4	电热元件尺寸计算	(208)
5.5	辐射型电阻炉	(212)
5.6	对流型电阻炉	(216)
5.7	传导型电阻炉	(219)
第6章	感应电炉	(223)
6.1	概述	(223)
6.2	感应电炉的物理基础	(223)
6.3	感应加热炉	(226)
6.4	无芯(坩埚式)感应熔炼炉	(239)
6.5	有芯(熔沟式)感应熔炼炉	(247)
第7章	真空电炉(简介)	(255)
7.1	真空电阻炉	(255)
7.2	真空感应炉	(257)
7.3	真空电弧炉	(258)
7.4	等离子炉	(260)
7.5	电子束炉(电子轰击炉)	(262)
第8章	工业炉设计基本知识	(265)
8.1	炉型方案选定	(265)
8.2	炉体主要尺寸确定	(266)
8.3	筑炉材料选择计算	(267)

8.4	最大燃料或电能消耗量计算	(269)
8.5	供热装置选择计算	(271)
8.6	辅助设备选择计算	(271)
8.7	绘制施工图	(272)
第9章	工业炉节能.....	(274)
9.1	热平衡分析	(274)
9.2	烟分析	(276)
9.3	工业炉节能一般途径	(279)
附录 1、2、3、4、5、6、7、8、9		(283)
参考文献		(289)

绪 论

1 工业炉是完成物料物理状态变化、物理机械性能改善或化学成分变化等某种工艺过程的热工设备（靠热能工作的设备）。广义工业炉包括各工业部门的一切工业炉窑。但习惯上工业炉通常指金属熔炼、加热及热处理用炉。

2 工业炉类型繁多。按热源，分燃料炉与电炉。按用途，分熔炼炉、熔化炉、加热炉与热处理炉。按作业方式，分间歇式炉与连续式炉。按气氛，分普通气氛炉、真空炉及可控气氛炉。

工业炉演变与生产发展紧密联系在一起。我国刀剑制造、青铜冶铸以及陶瓷烧制历史悠久，产品精致，充分表明我们祖先早已掌握相当高明的炉窑技术。可惜由于几千年封建制度桎梏，炉窑技术未得到进一步发展。全国解放后，随着工业生产特别是金属加工业与机械制造业的不断扩大，我国工业炉水平获得前所未有的提高。新型燃烧装置、新型电热元件、新品种筑炉材料、新炉型、新结构、电子计算机辅助设计、微机控温等先进技术，在国内工业炉上逐步得到应用。然而，与世界工业炉先进水平相比，我国尚有较大差距，主要表现在：炉龄不长，能耗偏高，自动化程度较低，某些新技术尚未掌握等。必须迎头赶上，缩小差距。

在有色金属加工厂，工业炉用于纯金属或合金熔化、锭坯压力加工前加热与金属材料热处理。工厂产量、产品质量以及成本，与工业炉关系密切。以铝合金材料淬火为例，淬火炉必须保证热处理温度波动范围不超过 $\pm 2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ ，否则，可能造成废品。国内某大型铝加工厂各种工业炉能源年消耗量占全厂 50% 左右。所

以，工业炉一般应满足高产、优质（产品质量优良）、低耗（能耗低）、长寿（炉龄长）、操作方便及环保条件好等要求。为此，从事金属压力加工专业、金属材料与热处理专业的工程技术人员，必须掌握工业炉热工基础理论、主要炉型工作原理、结构、特性、常用计算方法以及初步设计等基本知识。

第1篇 工业炉热工基础

第1章 流体力学基础

1.1 概 述

1.1.1 流体力学研究对象与研究方法

流体是液体（包括金属、炉渣等固体的熔融体）与气体的统称，是一类受任何微小拉力或剪力都能发生变形的物体。流体力学是研究流体处于平衡，运动以及流体与固体相互作用的力学规律，以及这些规律在实际工程中应用的一门学科。

不论液体或气体，皆由无数不连续分布的、处于杂乱热运动状态的分子所组成，分子之间都有间隙。但流体力学不研究个别分子的微观运动，而是研究由大量分子所组成的宏观流体在外力作用下的机械运动。所以，在流体力学中，用流体质点（或流体微团）取代分子，作为研究流体的单元。流体质点的体积为无穷小，与流动空间尺寸相比，流体质点体积可忽略不计。但每个质点又包含大量分子（标准状态下， 1mm^3 气体有 2.7×10^{21} 个分子， 1mm^3 液体有 3×10^{23} 个分子），可见分子间距极其微小，相对于质点体积而言，分子间距又可忽略不计。因此，流体力学认为流体

可看成是由无限多个质点组成的连续介质，假定质点之间不存在间隙。这样，可将流体速度、压力和密度等物理量看成是空间坐标和时间的连续函数，从而可引用连续函数解析方法来研究流体的平衡与运动规律。流体为连续介质的假定对大多数工程技术问题都适用，但对某些特殊问题则不适用，例如较高真空条件下流动的气体，分子平均自由程与流动空间尺寸相比不可忽略，就不能当作连续介质来研究。

许多工业炉都利用高温气体（如燃料炉的火焰以及对流式电阻炉内的热空气）作为载热介质，用来加热或熔化炉料。高温气体流动情况如何，直接影响着加热、熔化速度以及温度的均匀性。此外，燃料炉煤气、燃料油与助燃空气的的输送，炉内烟气的排出，工业炉某些部件的水冷，某些熔炼炉（如感应熔炼炉）内金属熔体的流动等等，皆属于流体流动问题。所以，为了进行工业炉的设计计算以及选择使用，必须掌握流体力学的基础知识。工业炉系统中虽然既存在高温气体流动，又有冷却水和液态金属熔体的流动，但影响最大、牵涉面最广的是高温气体的流动。所以，本章在阐述流体力学一般概念基础上，着重探讨气体力学。

1.1.2 流体主要物理性质

流体本身物理性质是决定流体运动规律的内部原因。

1.1.2.1 流体惯性

流体与固体一样，具有反抗外力作用而维持其固有运动状态的性质（称为惯性）。质量愈大，惯性愈大。单位体积的质量，称为密度，用符号 ρ 表示。

流体（特别气体）密度随温度和压力而变，后两者又都是空间点坐标 (x, y, z) 与时间 τ 的函数。因此，密度也是空间点坐标和时间的函数：

$$\rho = f(x, y, z, \tau) \quad (1-1a)$$

若体积 $V(\text{m}^3)$ 流体具有质量 $M(\text{kg})$ ，则平均密度为

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

工业炉系统的气体一般都是混合气体（如煤气、炉气等），其密度可按下列式计算：

$$\rho = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \cdots + \rho_n V_n \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-1c)$$

式中 $\rho_1, \rho_2 \cdots \rho_n$ 为各组成气体的密度， kg/m^3 ； $V_1, V_2 \cdots V_n$ 为各组成气体的体积百分数， $\%$ 。

密度的倒数称为比容，即流体单位质量的体积：

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

作用于流体单位体积的重力，称为流体的重度。设体积 V (m^3) 流体受到重力为 G (牛顿 N)，则平均重度为

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

流体重度等于密度乘以重力加速度 g (m/s^2)：

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

标准大气压下， 20°C 纯水的 $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ ， $\gamma = 9.79 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ ；同等条件下空气的 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ ， $\gamma = 11.82 \text{ N/m}^3$ 。

1.1.2.2 流体的压缩性与膨胀性

(在等温条件下，流体受到的压力不同时，自身体积发生变化的特性，称为压缩性。) (在等压条件下，流体由于温度不同引起体积变化的特性，称为膨胀性。)

A 液体的压缩性与膨胀性

a) 压缩性 压缩性大小，用体积压缩系数 β_r 表示，其定义为等温条件下，每改变单位压力所引起的体积相对变化量。设液体原体积为 V (m^3)，压力变化 dp (Pa) 时的体积变化为 dV (m^3)，则

$$\beta_r = -\frac{dV}{V} \frac{1}{dp} \quad 1/\text{Pa} \quad (1-2a)$$

其中 dp 与 dV 的变化方向相反， dp 增大时 dV 减小，反之亦然，故上式右边加一负号，以保证 β_r 始终为正值。

液体的体积压缩系数很小，如 $^\circ\text{C}$ 纯水在压力等于 $9.8 \times 10^5 \text{ Pa}$

时的 β 值仅有 $0.537 \times 10^{-9} \text{ 1/Pa}$ 。因此,一般认为液体不可压缩。

b) 膨胀性 膨胀性由体积膨胀系数 β 量度,即等压条件下,改变单位温度所引起的体积相对变化量:

$$\beta = \frac{dV}{V} \frac{1}{dt} \quad \text{1/K 或 1/}^\circ\text{C} \quad (1-2b)$$

式中 dt 为温度改变量, K 或 $^\circ\text{C}$ 。

液体的体积膨胀系数同样很小,如 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 压力下纯水在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 温度范围内 $\beta_t = 1.5 \times 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$,即温度每升高 1°C ,体积仅膨胀原有体积的万分之一点五。

B 气体的压缩性与膨胀性 气体压力和温度改变,都将引起体积的显著变化,并服从理想气体状态方程。设作用于气体的绝对压力为 p (Pa)、气体温度为 T (K),比容为 v (m^3/kg),则方程为

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

式中 R 为气体常数, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$ 。

气体常数物理意义是:1 kg 质量气体在定压条件下,温度升高 1 度时所做的膨胀功。空气为 $287 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$ 。

对于气体的等温和等压过程,理想气体状态方程 (1-3) 可演变成不同形式。大多数工业炉系统的气体在流动过程中压力变化不大,可当作等压过程处理。设气体温度 273 K (T_0) 时,压力为 p_0 ,比容为 v_0 ;温度升高至 TK ($T = T_0 + \Delta T$) 时,压力为 p_t ,比容为 v_t ,则由式 (1-3) 可写出:

$$p_0 v_0 = RT_0; \quad p_t v_t = RT$$

两式相除,注意到等压过程 $p_0 = p_t$,可得

$$v_t = v_0 \frac{T}{T_0}$$

以 $T_0 = 273 \text{ K}$ 与 $T = 273 + \Delta T$ 代入,得

$$v_t = v_0 \left(1 + \frac{1}{273} \Delta T\right) = v_0 (1 + \beta \Delta T) \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-4a)$$

式中 β 为气体的体积膨胀系数,等于 $1/273$, $1/\text{K}$ 或 $1/^\circ\text{C}$ 。

若质量 M (kg) 的气体体积为 V (m^3),则上式成为

$$V_t = V_0(1 + \beta \Delta T) \quad \text{m}^3 \quad (1-4b)$$

式(1-4a)与(1-4b)表明压力不变条件下一定质量气体体积随温度升高而膨胀的规律,即温度每升高 1K, 体积增加 273K 时体积的 1/273, 此即盖·吕萨克定律。

将 $v = 1/\rho_t$ 代入式 (1-4a), 可得

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta \Delta T} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-5a)$$

此即等压条件下, 一定质量气体密度与温度的依变关系式。其中 ρ_0 是 273K 时密度, ρ_t 是 $(273 + \Delta T)$ K 时的密度。

为方便计, (1-4) 与 (1-5) 中热力学温差 ΔT K 可用对应的摄氏温度 $\Delta t^\circ\text{C}$ 或 $t^\circ\text{C}$ 取代, 结果不变。

C 不可压缩流体的假设 根据流体密度是否随压力改变而变化, 流体可区分为可压缩与不可压缩两大类。

液体的体积压缩系数很小, 压力变化 (包括温度变化) 对体积的影响可忽略不计, 即密度看作常数, 故一般认为液体是不可压缩流体。只在高压液压传动以及水下爆炸等压力变化很大, 密度不保持常数的条件下, 才将液体视作可压缩。

气体压力改变对体积的影响显著, 密度是变量, 通常认为气体是可压缩流体。然而, 工业上许多气流 (包括大多数工业炉系统的气流) 在流动过程中, 压力变化不大, 对密度的影响不明显。例如气流速度 50m/s 时, 由于压力改变所引起的密度相对变化量仅稍大于 1%。在这种条件下, 气体也可当作不可压缩流体处理。本书除特别申明以外, 皆假定气体为不可压缩流体。

1.1.2.3 流体的粘性

流体粘性是指流体运动时, 内部有抵抗剪切变形, 阻碍流体流动的特性。实际流体不论液体或气体皆具有粘性。

A 流体粘性的物理实质 如图 1-1 所示, 设流体从很大空间流至一静止平板上。平板对流体存在附着力, 使紧贴表面的流体薄层的流速为零。此薄层与邻近流层之间由于分子吸引力或分子热运动扩散所引起的动量交换, 在两流层的接触面上产生内摩

擦力(或称粘性力)。此力平行于作用面,属于切应力,方向与邻近平板的流层流动方向相反,起阻碍流动作用。因此,导致该流层减速。同理,此流层与上面邻近的流层之间由于流速不同也存在内摩擦力,使得上面邻近的流层减速。如此自下

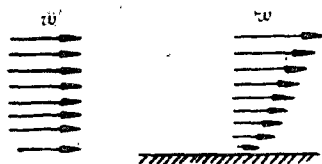


图 1-1 粘性对流速分布的影响

而上,在内摩擦力作用下,一层层减速,但减速趋势逐渐变弱,到远离平板处的流层则保持原来在空间中的流速 ω 。

与固体间相对运动所产生的摩擦力类似,流体内摩擦力也是成对出现的。对于快流层,内摩擦力方向与之相反,起减速作用。而对于慢流层,内摩擦力方向与之相同,起加速作用。所以,内摩擦力总是阻碍流体作相对流动。图 1-1 示出流体流至平板上之后,由于内摩擦力影响,平均流速小于原来在空间中的流速。

从上所述,流体粘性也可理解为流体运动时内部产生摩擦力的特性。

B 牛顿内摩擦定律 牛顿经过研究,于 1686 年阐述了以下规律:流体内摩擦力大小,与流层间接触面积成正比,与速度梯度成正比,与流体种类、温度等因素有关。写成数学表达式,称为牛顿内摩擦定律,即内摩擦力 F 等于:

$$F = \mu \frac{d\omega}{dy} A \quad \text{N} \quad (1-6)$$

式中 A ——流层间的接触面积, m^2 ;

速度梯度 $\frac{d\omega}{dy}$ ——接触面 A 处垂直于流动方向的速度梯度,即单位距离的流速 ω 变化率, $1/\text{s}$, 这里流动方向取 X 轴向,速度梯度则与 Y 向一致;

动力粘度 μ ——反映流体种类、温度等因素对内摩擦力影响的系数,其单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = \text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ 。因含有动力

· 学量纲，故称为动力粘性系数或动力粘度，简称为粘度。

对于大多数液体与气体，当温度一定时，粘度为常数，其内摩擦力与速度梯度成直线关系，即完全服从牛顿内摩擦定律，称为牛顿流体。另一类流体，如聚合物溶液，悬浮溶液等，其内摩擦力与速度梯度成非直线关系，不遵守牛顿内摩擦定律，称为非牛顿流体。本章只探讨牛顿流体。

C 粘度 由式 (1-6b) 可知，当 $dw/dy=1$ 时， $\mu=f$ ，故粘度在数值上等于速度梯度为 1 时单位接触面积的内摩擦力，粘度物理意义表征流体本身粘性的强弱。粘度的国际单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。过去常用绝对单位泊(p)和厘泊(cp)，与国际单位的换算关系为 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ p} = 1000 \text{ cp}$ 。

在流体力学公式中常用到运动粘性系数（或称运动粘度），它为动力粘性系数 μ 与流体密度 ρ 的比值，以符号 ν 表示之：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (1-7)$$

ν 的国际单位为 m^2/s ，实际常用绝对单位： cm^2/s = 斯托克斯简称斯(st)， $1 \text{ st} = 100 \text{ 厘泊(cst)}$ 。与国际单位的换算关系为 $\text{m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ st}$ 。

粘度数值大小与流体种类、温度以及压力有关。在普通压力下，压力变化对粘度的影响甚微，可忽略不计，只在 $20 \times 10^6 \text{ Pa}$ (约 200 大气压) 以上的高压下，才考虑压力的影响。温度对粘度的影响则很大，但由于液体和气体产生粘性的微观机理不同，故影响也不同。对于液体，粘性主要由于分子间吸引力所造成，随着温度升高，分子间距增大，分子吸引力减小，故粘度下降。对于气体，粘性主要因分子热运动在相邻两流层间进行动量交换所引起，温度升高，分子热运动加剧，动量交换增强，粘度随之增大。

水的动力粘度随温度变化值，列于表 1-1。