

电瓷生产热工设备

高等学校试用教材

电瓷生产热工设备

湖南大学 杜海清 肖著珏 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

机械工业出版社
101746-174社

高等学校试用教材

电瓷生产热工设备

湖南大学 杜海清 肖著珏 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章



机械工业出版社

本书包括电瓷生产热工过程及热工设备两大部分。热工过程部分包括气体力学、传热原理、燃料燃烧及燃烧计算等内容；热工设备部分系统地介绍了各种窑炉及干燥设备的结构、工作原理、操作及设计计算。各章均有例题及习题。

本书可作高等学校电瓷或陶瓷类专业的教材，也可供有关研究、设计和生产单位的技术人员参考。

电 瓷 生 产 热 工 设 备

湖南大学 杜海清 肖著珏 主编

*

责任编辑：刘家琼 版式设计：胡金璆

责任印制：王国光 责任校对：熊天荣

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $23 \frac{1}{2}$ ·字数 577 千字

1989年5月北京第一版·1989年5月北京第一次印刷

印数 0,001—1,100·定价：4.65 元

*

ISBN 7-111-01450-2/TM·181(课)

前 言

本书是根据1978年4月在天津召开的高等院校原一机部对口专业座谈会的精神和1983年12月在西安交通大学由原机械工业部高等工业学校专业教材编审委员会电工绝缘技术教材编审小组召开的电气绝缘、电缆、电瓷三专业教材会议所订的教材编写大纲编写的。

本教材系统地阐述了电瓷生产过程中各种热工设备的结构，热工过程、设计计算、技术性能和使用要点。且着重阐述热工基本理论和计算原理，并注意了反映国外先进技术。

本书由湖南大学杜海清教授、肖著珏副教授主编。参加编写的同志有杜海清（绪论、第一、二、三、四、五章），肖著珏（第六、七、八章），胡智荣（第九章），胡启智（第十章）。

本书由南京化工学院沈慧贤教授主审，参加本书审查的同志还有桂林电器研究所张书缙高级工程师，西安电瓷研究所田运钧高级工程师、西安高压电瓷厂刘志厚工程师，醴陵电瓷厂饶伯俊工程师等。上述诸同志对本书初稿提出了许多宝贵意见，谨致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬希读者予以批评指正。

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 热工设备的理论基础

第一章 气体力学	3
§ 1-1 气体的基本参数	4
§ 1-2 气体静力学基础	6
§ 1-3 气体动力学基础	9
§ 1-4 气体流动形态及压头损失	18
§ 1-5 柏努利方程式的应用实例	28
§ 1-6 窑炉内气体的运动	33
§ 1-7 烟囱	39
§ 1-8 风机	43
§ 1-9 喷射器	48
§ 1-10 相似原理基础	50
第二章 传热原理	58
§ 2-1 传热的基本概念	58
§ 2-2 稳定态导热	59
§ 2-3 对流换热	74
§ 2-4 辐射传热	89
§ 2-5 稳定态综合传热	106
§ 2-6 不稳定态导热	111

第二篇 燃料、燃烧及燃烧设备

第三章 燃料	124
§ 3-1 燃料的种类与选用	124
§ 3-2 燃料的组成及表示方法	126
§ 3-3 燃料的发热量	130
§ 3-4 燃料的热工特性	132
第四章 燃烧过程及燃烧计算	141
§ 4-1 燃烧过程的理论基础	141
§ 4-2 燃烧计算	149
第五章 燃料燃烧装置	164
§ 5-1 块状固体燃料的燃烧装置	164
§ 5-2 液体燃料的燃烧装置	172
§ 5-3 气体燃料的燃烧装置	186

第三篇 电 瓷 工 业 窑 炉

第六章 火焰窑炉	191
§ 6-1 概述	191
§ 6-2 倒焰窑	192
§ 6-3 近代间歇窑	213
§ 6-4 隧道窑	215
§ 6-5 窑炉的革新技术	251
§ 6-6 窑炉的自动控制和调节	256
第七章 窑炉砌筑	265
§ 7-1 筑炉材料	265
§ 7-2 地基与基础	278
§ 7-3 窑体砌筑	279
§ 7-4 管路、轨道安装及窑车砌筑	281
第八章 电炉	284
§ 8-1 概述	284
§ 8-2 电阻炉	285
§ 8-3 其它电热窑炉	307

第四篇 干燥及干燥设备

第九章 干燥原理	313
§ 9-1 概述	313
§ 9-2 表征湿空气性质的参数	314
§ 9-3 干燥过程的物料平衡及热平衡	319
§ 9-4 $I-x$ 图及其应用	324
§ 9-5 干燥机理及干燥速度	337
第十章 干燥方法及干燥设备	345
§ 10-1 概述	345
§ 10-2 干燥坯料的对流干燥设备	347
§ 10-3 干燥浆料的对流干燥设备	351
§ 10-4 其它干燥方法	357
附录	365

绪 论

一、热工设备在电瓷工业中的作用

电瓷厂热工设备包括窑炉、干燥器及其附属设备。成型后的坯件要在干燥器内进行干燥，在窑炉内进行烧成，而烧成是电瓷生产中重要工序之一。在烧成过程中，往往因为窑炉结构和操作上的不当，使产品达不到质量要求而大量报废，在人力和物力上造成极大的浪费。因此，熟悉热工理论与技术，掌握它们的内在联系和共同规律，并且在保证电瓷制造工艺干燥与烧成过程顺利实现的前提下，建造更加完善的热工设备，强化操作，提高产量和质量，对于电瓷工业的发展，有着极其重要的意义。

二、窑炉的发展过程

我国是世界上造窑制瓷最早的国家，从西安半坡村遗址的发掘中证明，远在5000年前，我们勤劳智慧的祖先就能利用升焰式窑烧制陶器。在2000年前，又先后建造了倾斜式的龙窑和馒头窑，这些窑炉的烧成温度可高达1573 K，且能控制窑内气氛。以后，又发展了景德镇窑、德化阶级窑，所烧制的瓷多被视为珍品。现在的倒焰窑和隧道窑，它们都是在中国古代窑炉基础上发展起来的。半倒焰式馒头窑是倒焰窑的前身，龙窑是隧道窑的前身，隧道窑是龙窑的机械化。所有这些都足以说明，我国劳动人民对窑炉发展作出了卓越的贡献，取得了巨大的成就。

设计、研制新型热工设备是发展电瓷工业的重要环节，而研究基础理论又是发展新型热工设备的必要条件。热工设备的先进性除了表现在操作中广泛应用电子计算技术、实现自动控制外，其本身也必须有先进的各项热工指标（如产量、单耗、热效率等）。一般说来，对于窑炉的基本要求是：燃料在窑炉中必须充分燃烧并能根据工艺要求控制窑内气氛，最大限度地利用热能，尽可能提高传热速率，保证制品在窑炉内完成必要的物理、化学反应。为此，必须研究燃料燃烧学、气体力学和传热学，这是指导窑炉设计和生产的三大基础理论。基础理论对窑炉实践的指导意义是十分明显的。例如，设计得不符合气体运动规律时，将造成窑内温度极不均匀。这样的错误设计，将导致烟气由燃烧室中产生于顶部，或者通过短路直接进入烟道，造成热能的浪费。同样，不了解燃料的燃烧机理和传热规律，所设计的窑炉不能保证燃料热能的充分利用，甚至不能达到工艺要求的烧成温度。由此可见，必须善于把普通规律（即上述理论基础）与窑炉热工过程结合起来，使它成为指导生产和设计窑炉的理论，才能正确地分析影响生产的各种因素，进而指导生产实践。

现在，电瓷工业已成为具有一定水平和规模的独立工业体系。就电瓷厂热工设备和烧成技术而言，普遍地采用了现代的间歇窑和隧道窑，发展了抽匣窑、蒸笼窑和各种高温电炉，采用了无匣钵烧成、快速烧成等先进技术，大大缩短了烧成周期，提高了产品质量，降低了生产成本。在干燥技术方面，改进了传统的对流干燥技术和设备，推广了喷雾干燥、辐射干燥和工频电干燥等先进干燥技术。现在，电瓷生产热工设备正朝向更高的机械化和自动化方向发展。随着热工设备的机械化和自动化，将大大提高产品质量，降低能耗，降低生产成本，提高劳动生产率，改善劳动条件。

三、本课程的任务和要求

本课程内容包括两部分：热工理论基础（气体力学、传热原理、燃料燃烧和干燥原理等）和热工设备（结构、操作、设计），既是专业基础课，又是专业课。通过本课程的学习，可为从事热工设备的设计和操作，总结先进经验，进行热工技术和热工理论的研究，打下良好的基础。

第一篇 热工设备的理论基础

第一章 气体力学

在各种以固体、液体或气体燃料作为热能来源的窑炉内，传递热能的媒介是燃料燃烧后所放出的炽热的气态燃烧产物，换句话说，燃料燃烧所放出的热能是以运动着的气态燃烧产物作为媒介而传递给被加热物的。当这些燃烧产物放出大部分热能后，便经过排气装置排入大气中。若排出的燃烧产物的温度较高，还可用废热回收装置再收回部分热能，用它来加热煤气和助燃空气，以提高热能的利用率。由此可见，电瓷的烧成时间和质量与窑炉内气体的运动有着密切的关系。因此，为了很好地研究窑炉内进行的热工过程，首先应具有气体力学的知识。

燃料燃烧时需要供给一定量的空气，要想使空气中的氧气与燃料中的可燃物进行反应，必须给它们创造良好的接触或混合条件，为此就应当知道气体与燃料的接触条件以及混合规律，从而设计出合理的燃烧装置。

电瓷窑炉是一个热交换设备，窑炉内的热交换过程在极大的程度上和窑内气体运动的性质、速度和方向等有关，因此，为了掌握热交换过程，必须知道气体流动与传热的关系。

从产品的质量上来看，也需要具备气体力学的知识。窑内气体是热能传递的媒介，气体在窑炉内的分布情况，影响窑炉内温度的分布和加热的均匀性，如果掌握了窑炉内气体运动的规律，就能更好地控制窑内气体流动使窑内加热均匀。

只有在废气能顺利排出和新的燃料及助燃空气连续供入，并在窑炉内保持正常燃烧及流动的情况下，窑炉方能很好地进行工作。要想使气体流动，必须使气体具备一定的能量，以克服在流动过程中的各种阻力，并保证窑炉具有一定压力。因此就必须知道气体在流动时的阻力问题，以便更好地设计排气及通风装置。

由此可见，为了正确地掌握窑炉的操作或者设计一个完善的窑炉，气体力学的知识是不可缺少的。

研究证明，气体和液体之间具有一些共同的特性。例如：无论液体或气体都是内部分子间内聚力极其微小的物体，它们对拉力和缓慢的变形都没有抵抗力，因此把它们统称为流体，把研究它们的平衡和运动规律的科学称为流体力学，所以它们的许多基本定律都是相同的。

液体的体积几乎是不随压力的改变而有所变化，即液体是不可压缩的。而气体则在压力的作用下会改变自己的体积，因此气体是可压缩的。但是在窑炉内，除个别情况（如高压喷嘴）外，气体的压力变化很小，从而不会引起气体体积的显著改变。所以，在窑炉内可以把气体看成是不可压缩的气体。

液体的体积几乎不随温度的高低有所变化，而气体的体积则随温度的升高而显著增大。

此外, 液体的粘度 (内摩擦力) 一般随温度的升高而降低, 而气体的粘度则随温度的升高而增大。

由于液体分子间的引力较大, 所以液体拥有一自由表面, 而气体则充满其所占有的全部空间, 不能拥有一自由表面。

直接在高温窑炉内进行气体运动的研究是困难的, 它要消耗大量的人力和物力。如果以相似原理和模型法为基础, 在小模型中研究实际现象的某些规律, 那就方便多了; 在一定条件下模型中所得到的研究结论, 能基本反映实际现象, 因此用模型实验方法来研究窑炉内气体运动等热工过程已日益广泛。

§ 1-1 气体的基本参数

一、气体的密度

单位体积气体的质量称为气体的密度, 以 ρ 表示之。气体在标准状态下的密度为

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

式中 m —— 气体的质量;

V_0 —— 气体在标准状态下的体积。

二、气体体积与温度的关系

压力一定时, 气体体积随温度升高而增大, 其关系式为

$$\frac{V_t}{V_0} = \frac{T}{T_0} = \frac{273 + t}{273}$$

$$V_t = V_0 \frac{T}{T_0}$$

式中 V_0 、 V_t —— 0°C 和 t 时的气体体积;

T_0 、 T —— 0°C 和 t 时气体的绝对温度值;

t —— 温度。

单位质量的气体体积称为比容 (又称比体积), 用符号 v 表示, 单位是 m^3/kg 。比容的倒数是密度, 即 $\rho = 1/v$, 因此可得出气体密度与温度之间的关系为

$$\rho_t = \frac{1}{v_t} = \rho_0 \frac{T_0}{T}$$

式中 ρ_0 、 ρ_t —— 0°C 和 t 时气体的密度。

三、气体体积与压力的关系

温度一定时, 气体体积 (比容) 与绝对压力成反比。即

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \dots = pV$$

或

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \dots = pv$$

式中 p_1 、 $p_2 \dots p$ —— 气体绝对压力;

V_1 、 $V_2 \dots V$ —— 相应压力下气体的体积;

v_1 、 $v_2 \dots v$ —— 相应压力下气体的比容。

注意到 $v = 1/\rho$, 可得气体的密度与绝对压力成正比。即

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} = \dots = \frac{p}{\rho}$$

上式表明，气体流动时，如果有压力变化，必然引起密度的变化。

四、气体的状态方程

一定量的气体在平衡状态下，其体积、压力与温度的关系的表达式，称为气体的状态数值方程，即

$$pV = \frac{m}{M} R_0 T$$

式中 p ——气体绝对压力，单位为Pa；

V ——气体体积，单位为 m^3 ；

T ——气体的热力学温度，单位为K；

m ——气体质量，单位为kg；

M ——气体的摩尔质量，单位为 kg/mol ；

R_0 ——通用气体常数， $8.314\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

如用单位质量的气体表示气体的体积，则气体的状态方程式可写成

$$pv = \frac{R_0}{M} T = RT$$

式中 R ——气体常数， $R = \frac{R_0}{M}$ ；

v ——气体的比容， m^3/kg 。

实践证明，气体在通常的条件下，一般都遵循状态方程的规律。例如空气在压力不超过20MPa，温度不低于 -20°C 时，状态方程的误差不超过4%。

五、气体的粘性力

所谓粘性力就是指流体相对移动时产生内摩擦力的这种性质。

单位面积上内摩擦力的大小就是切应力的数值，该数值按照牛顿的假定并经过实践证明，可用下式求得：

$$F_{\text{粘}} = \mu \frac{dv}{dn} A$$

式中 $F_{\text{粘}}$ ——粘性力（内摩擦力），单位为N；

$\frac{dv}{dn}$ ——气体的速度梯度，单位为 s^{-1} ；

μ ——动力粘度，单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

A ——相邻两流层之间的接触面积，单位为 m^2 。

为了应用方便，粘性还可以运动粘度 ν 和内摩擦系数 f 表示，其关系如下：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$$f = \mu g$$

气体的粘性力主要决定于相邻流层分子之间的动量交换，温度升高标志着分子热运动加剧，加强了流层之间的动量交换，因此粘性力增大。粘度与温度的关系可用下面数值方程表示：

$$\mu_t = \mu_0 \left(\frac{273 + C}{T + C} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}$$

式中 μ_t ——该温度下气体的粘度，单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

μ_0 —— 0°C 时气体的粘度，单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

T ——气体的绝对温度，单位为 K ；

C ——与气体性质有关的常数，单位为 K 。

各种气体的 μ_0 与 C 值见表 1-1。

自然界中存在的气体是具有粘性的，称为“实际气体”。为了便于分析和推导气体力学中的一些基本公式，往往假设气体的粘度为零（即 $\mu = 0$ ），这种粘度为零的气体称为“理想气体”。实际气体并不完全符合这一条件。但是，当温度远高于气体的液化温度而压力又不很高的情况下，则非常接近于理想气体的条件。许多不易被液化的实际气体，如 N_2 、 H_2 、 O_2 、 He 等在常温常压下可近似地看作理想气体，其计算结果又非常接近实际情况。窑炉内很多气体（如空气和烟气等），在许多方面都可当作理想气体进行分析计算。还应当指出，“理想气体”与适合气体状态方程式（即 $pV = RT$ ）的气体，并不是同一概念，为了区别起见，把满足状态方程的气体称为“完全气体”。

表 1-1 各种气体的 μ_0 和 C 值

气 体	$\frac{\mu_0}{10^5 \text{Pa} \cdot \text{s}}$	$\frac{C}{\text{K}}$	$\frac{C \text{ 值 适用 的温度范围 }}{^\circ\text{C}}$
空气	1.70	114	0~300
N_2	1.66	118	50~100
O_2	1.87	138	17~186
CO_2	1.37	239.7	~21~302
CO	1.66	118	15~100
H_2	0.84	71.7	~21~302
CH_4	1.20	198	17~100
C_2H_2	0.96	225.9	~21~302
NH_3	0.96	377	15~184
SO_2	1.17	416	18~100
H_2O	0.82	673	—
发生炉煤气	1.45	~150	—
燃烧产物	1.47	~170	—

注 选用 C 值时，气体的实际温度一定符合表 1-1 中 C 值适用的温度范围。

§ 1-2 气体静力学基础

一、气体的静压力、静压能、静压头

气体的静压力是气体分子在无规则的热运动中对容器壁频繁撞击和气体自身重力作用而产生对容器壁的作用力。通常所说的静压力是指垂直作用在单位面积上的力的大小，物理学上称为压强。即

$$p = \frac{F}{A}$$

式中 F ——总压力；

A ——总作用面积。

气体的压力单位用Pa表示，过去曾用大气压、mmH₂O、bar等表示，各单位之间的变换关系如下：

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.8 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ 标准大气压} = 760 \text{ mmHg} = 10333 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$1 \text{ 工程大气压} = 736 \text{ mmHg} = 10000 \text{ mmH}_2\text{O}$$

压力按所取标准不同，有两种表示方法：一种是绝对压力，用 p_a 表示，它是以绝对真空为起点计算的气体压力。一种是表压力，又称相对压力，用 p_r 表示，它是以大气压力为起点计算的气体压力，即绝对压力和大气压力的差值，用公式表示为

$$p_r = p_a - p_a$$

或

$$p = p_a - p_a$$

式中 p ——气体表压力；

p_a ——大气压力。

气体不仅具有静压力，而且这种静压力可以作功，作功的能力称为压力能。其单位为 $\text{J/m}^3 = \text{N} \cdot \text{m/m}^3 = \text{Pa}$ 。

例如一管道内充满绝对压力 $p_0 = p_a$ 的气体（图1-1），在外力 F 的作用下推动活塞将气体压缩，则外力将对气体作功，使气体的绝对压力增大到 p_1 。当外力 F 去掉以后由于 $p_1 > p_0$ ，气体就要推动活塞对外界作膨胀功，其值应等于外力压缩气体时所作的功。当外力推动活塞前进的 dx 距离时，气体的压力增加到 p_1 ，则气体对外界所作的功应为

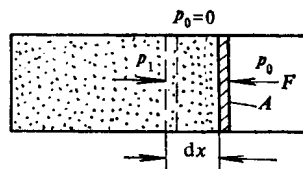


图1-1 压力做功示意图

$$dW = p_1 A dx = p_1 dV$$

上式就是体积为 dV 的气体对外界所作的功，单位体积的气体所具有的作功能力（即压力能）称为静压能，即

$$\text{静压能} = \frac{dW}{dV} = \frac{p_1 dV}{dV} = p_1$$

显然，气体的静压能是指单位体积气体具有的作功能力，而气体的压力则是指气体作用在单位面积上的力，二者物理意义不同，但数值相同。

在窑的燃烧室炉门附近，经常发现燃烧室内的高温气体从炉门处向外“冒火”，或者是燃烧室外的冷空气通过炉门吸入燃烧室内，这是由于燃烧室内气体的静压能与燃烧室外同一高度的大气具有的静压能不同而产生的，可见，燃烧室内外具有静压能差，这种静压能差称为“静压头”，用符号 h_s 表示。所以，静压头是指单位体积气体具有的相对静压能，用公式表示为

$$h_s = p_a - p_a$$

式中 p_a ——气体压力。

二、气体的位能、位压能和位压头

将一物体垂直向上移动某一高度后，这一物体就具有了位能。气体的位能为气体的重力

和相距基准面高度 H 的乘积。设某气体体积为 V ，密度为 ρ ，当距基准面高度为 H 时如图1-2所示，则该气体具有的位能为

$$\text{位能} = V\rho gH$$

单位体积的气体具有的位能，称为位压能，即

$$\text{位压能} = \frac{\text{气体位能}}{\text{气体体积}} = \frac{V\rho gH}{V} = H\rho g$$

由此可知，气体的位压能，就是单位体积气体对某一基准面做功的能力。由于气体受地心引力作用，表现为垂直向下做功的能力，因此距基准面愈高，位压能愈大。

当气体处于空气之中时，由于空气的浮力作用，使气体在空气中受到向上的空气浮力和向下的自身重力的相互作用。当浮力小于气体的重力时，气体就要向下落；当浮力大于气体的重力时，气体就要上升。如氢气球在空中就具有上升的能力。我们所研究的对象——窑炉内高温气体的密度小于空气的密度，因而具有上升的能力。这种气体的位压能与周围同高度的空气的位压能的差值称为该气体的相对位压能或位压头，用 h_g 表示。由图1-2可得气体的位压头为

$$h_g = H\rho_g g - H\rho_a g = Hg(\rho_g - \rho_a)$$

由上式可知，气体的位压头大小(h_g)与炉内气体和周围空气的密度差以及距基准面高度有关。当气体的密度 ρ_g 小于空气密度 ρ_a 时， h_g 为负值，这种情况下位压头变化的定性规律是愈向上面的气体位压头愈小，愈向下面的气体位压头愈大，气体由高面向低面流动时，位压头增大。反之由低面向高面流动时，位压头减小。

三、气体平衡方程式

处于静止状态的气体，主要受静压力和自身重力的作用。静止气柱沿高度方向的压力分布方程式，称为气体平衡方程式。如图1-3

a所示，在静止的气体中取一底面积为 A ，高度为 H_2 的长方气柱，如果气体静止不动，则此气柱在水平和垂直方向的力必然处于平衡状态。

在垂直方向上，气柱受到三个力的作用，即：(1) I面处气柱的向上总压力为 $p_1 A$ ；(2) III面处气柱受的向下总压力为 $p_3 A$ ；(3) 气柱本身的重力为 $G_2 = H_2 A \rho g$ 。设气体密度不随高度而变，当气体处于静止状态时，这些力应保持平衡。即可列出气体平衡方程式：

$$p_1 A = p_3 A + H_2 A \rho g$$

等式两边同除以 A 得：

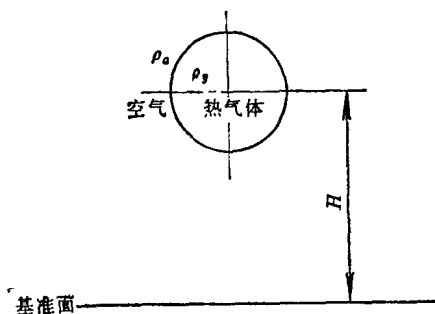


图1-2 气体位能示意图

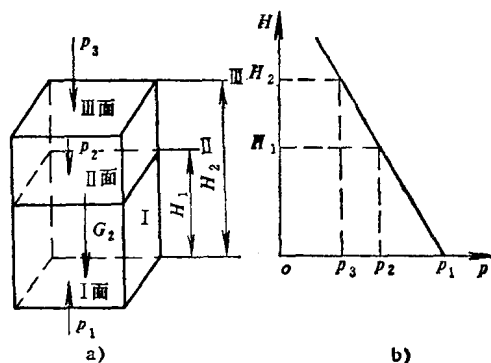


图1-3 静止气体能量平衡示意图

$$p_1 = p_2 + H_2 \rho g$$

同理可得出:

$$p_1 = p_2 + H_1 \rho g$$

式中 p_1 、 p_2 、 p_3 ——各为 I 面、II 面、III 面上的静压力, 单位为 Pa;

H_1 、 H_2 ——各为 II 面、III 面到 I 面的垂直高度, 单位为 m。

此式说明温度均匀的气体处于静止状态时, 上平面的静压力比下平面的静压力小, 其压力差应等于两水平面之间的高度乘以气体的密度差及重力加速度。平面的位置愈高, 静压力愈小。对于这个气柱中的任一平面, 可以引出

$$p_1 = p + H \rho g$$

式中 p ——任意水平面上的压力;

H ——该水平面到 I 面的垂直高度;

g ——重力加速度。

上式也可表示为

$$p_2 + H_1 \rho g = p_3 + H_2 \rho g = p + H \rho g = p_1$$

由此可见, 对于静止状态的气体, 任一高度上 $H \rho g$ 与 p 之和为一常数。这就是气体的平衡方程式。当气体密度不随温度变化时, 压力沿垂直高度呈直线关系, 如图 1-3 b 所示。

气体平衡方程式不仅说明静止气体沿高度的压力分布, 也代表静止气体的能量平衡关系。压力 p 代表单位体积气体所具有的压力能 (静压能), $H \rho g$ 代表单位体积气体具有的位能 (位压能)。式 (1-18 a) 说明静止气体中的各个高度上静压能和位压能之和为常数。

例 1-1 若地面上的大气压力为 101263 Pa (10333 mm H₂O), 问在高出地面 100 m 的水平面上大气压力是多少? 认为空气密度为定值, 即 $\rho_{\text{空}} = 1.293 \text{ kg/m}^3$ (标准状态下)。

解 根据式 (1-18 a) 得:

$$p = p_1 - H \rho g = (101263 - 100 \times 1.293 \times 9.8) \text{ Pa} = 99996 \text{ Pa}$$

即在 100 m 的高处。大气压力比地面减少了 1267 Pa。

例 1-2 设有一热气柱, 其高为 100 m, 在 100 m 高处气柱上部所受的压力是 99996 Pa, 若它的密度是 0.4 kg/m^3 , 求热气柱下部地面上所受的压力是多少。

解 这里 $p = 99996 \text{ Pa}$

$$H \rho g = 100 \times 0.4 \times 9.8 \text{ Pa} = 392 \text{ Pa}$$

根据式 (1-18) 得

$$p_1 = p + H \rho g = (99996 + 392) \text{ Pa} = 100388 \text{ Pa}$$

上面两个例题除了说明式 (1-18) 的应用外, 还说明若两气柱的高度相同时, 则热气柱底面上的压力小于冷气柱底面上的压力。若使两气柱的底部相通, 则由于冷气柱的底部的压力大于热气柱底部的压力, 前者必向后者流动, 直到两气柱底部压力相等为止。

§ 1-3 气体动力学基础

在研究窑炉内气体流动问题前, 必须先了解气体在流动时的各种规律, 例如在各种不同条件下气体的流动情况 (窑炉内气体的流动、低压及高压下气体的流动等); 各种排气工具的工作原理及其计算原理等。研究了这些问题后, 就可以对气体的运动规律有一基本的了

解, 从而正确地控制气体的流动, 并掌握有关气体流动问题的计算方法, 为设计窑炉打下基础。

一、稳定流动和不稳定流动

所谓稳定流动指的是流体中任一点上的物理量不随时间改变的流动过程。即 $\frac{\partial u}{\partial \tau} = 0$, u 为流体的某一物理量。若 $\frac{\partial u}{\partial \tau} \neq 0$, 亦即 u 随时间改变, 则称为非稳定流动。在气体力学中主要是讨论气体在稳定流动下的运动。

二、流线和流管

所谓流线就是由流体中相距极近的质点的速度矢量所构成的曲线。流线上每一点的运动速度的矢量都和流线相切 (见图1-4)。

很明显, 在稳定流动的情况下, 流线的形状是不随时间而改变的, 因此, 通过流线就可以具体地表示出在稳定流动情况下流体质点运动的轨迹。

由无数流线所围成的其截面是一封闭曲线的空间称为流管 (见图1-5)。

根据流线的概念可以知道, 流管内的流体不会穿过管壁流到管外, 同理, 流管外的流体也不会穿过管壁流到管内, 而且通过流管每截面的流量必然相等。

三、气体运动的连续方程式

连续方程式实际上是物质不灭定律在气体力学上的应用。对不可压缩和稳定流动的流体而言, 其连续方程式可推导如下:

在不可压缩的流体内取一单元六面体, 其各边之长为 dx 、 dy 、 dz , 体积为 dV (见图1-6)。

将气流速度按三个相互垂直的坐标方向分解成 v_x 、 v_y 、 v_z 。在 $d\tau$ 时间内沿 x 坐标通过单元体左边一面 ($abcd$ 面) 进入单元的气体质量为

$$\rho v_x dy dz d\tau$$

式中 ρ ——密度。

在同一时间内通过右边一面 ($a'b'c'd'$) 的气体质量为

$$\rho \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dy dz d\tau$$

两者之差等于

$$\begin{aligned} & \rho \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dy dz d\tau - \rho v_x dy dz d\tau \\ &= \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy dz d\tau = \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} dV d\tau \end{aligned}$$

上式为在 x 坐标轴的方向上气体流出单元体多于流入单元体的质量。

用同样的方法对其余两坐标可得到

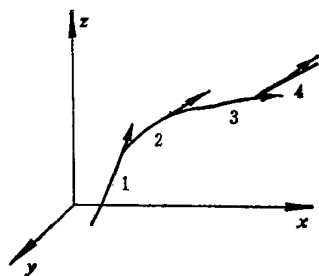


图1-4 流线

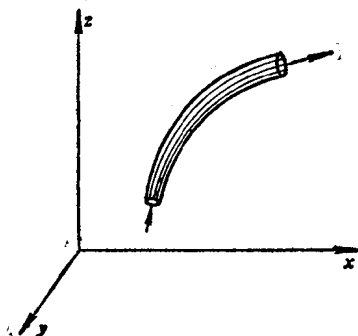


图1-5 流管

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial y} dV d\tau \quad \text{和} \quad \rho \frac{\partial v_z}{\partial z} dV d\tau$$

故由单元六面体多流出气体的总量为

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dV d\tau$$

根据物质不灭定律, 这超出的总量必等于零。否则不成为连续流动, 即

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dV d\tau = 0$$

因为式中的 ρ , dV 、 $d\tau$ 都不等于零, 故

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1-1)$$

式中 $\frac{\partial v_x}{\partial x}$, $\frac{\partial v_y}{\partial y}$, $\frac{\partial v_z}{\partial z}$ ——速度沿各坐标轴方向上的变化率。

式 (1-1) 系稳定流动情况下不可压缩气体的连续方程式。

若气体为单向流动, 则式 (1-1) 变为

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0$$

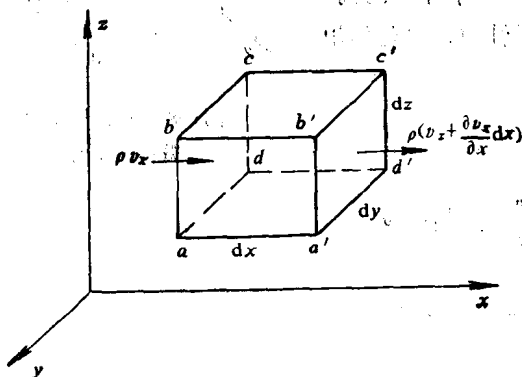


图1-6 微小的空间六面体

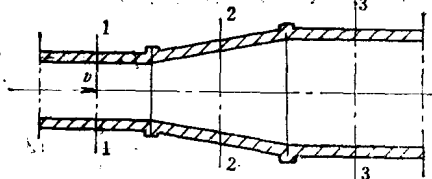


图1-7 断面变化的管道示意图

若气体是压缩的和稳定的流动, 那么在推导连续性方程式时应同时考虑到气体流速和密度的变化。因为在流管的任意断面上通过一定体积的气体, 只有在该气体体积内密度不发生变化的情况下方成立。故可压缩的气体在不稳定流动时其连续性方程式可用下式表示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

若为稳定流动时, 则上式化为

$$\frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

若气体在管道内作稳定流动时, 那么, 根据物质不灭定律, 可知道通过管道任一截面的气体的质量流量必然相等 (见图 1-7)。