

中等专业学校  
教学用书

HONGDENG

ZHUANYE

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

加 热 炉

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

# 加 热 炉

蒋光羲 吴德昭 编

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

**加 热 炉**

蒋光羲 吴德昭 编

\*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街德胜门北墙39号)

新华书店总店科技发行所发行

怀柔东茶坞印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张27.75 字数 660 千字

1987年6月第一版 1995年7月第四次印刷

印数 13501~16500 册

ISBN 7-5024-0669-9

TF·152(课) 定价15.90元

## 前 言

本教材是根据四年制中专“加热炉”教学大纲编写的。本书初稿经重庆钢铁专科学校、鞍山钢铁学校、上海冶金工业学校、攀钢冶金工业学校试用，并审查修改后定稿。

本教材在取材上力求贯彻少而精的原则，内容叙述上尽力做到简明扼要，理论联系实际。全书采用国际单位制，在从工程单位制换算到国际单位制的过程中，做了大量工作。它供具有初中文化程度的全日制冶金中专轧钢专业“加热炉”课程教学使用；总教学时数为150~180学时。同样适用于全日制二年制中专及成年人中专“加热炉”课程的教学需要；对从事加热炉工作的技术人员、技术工人及技工学校师生也有一定参考价值。

本书共分三篇十六章。第一篇——炉子热工基础，由鞍山钢铁学校吴德昭编写；绪论，第二篇——加热炉，第三篇——加热炉热工参数检测及调节由重庆钢铁专科学校蒋光羲编写；并由蒋光羲统一全书。

上海冶金工业学校、攀钢冶金工业学校等兄弟学校，在本教材的试用及审稿过程中提出不少宝贵意见，在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，加之完稿时间仓促，缺点和错误在所难免，恳望读者提出批评和指正。

编 者

1986.6

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第一篇 炉子热工基础

<b>第一章 气体力学原理</b>	<b>3</b>
第一节 气体力学的基本概念和基本定律	4
第二节 气体流动的性质和压头损失	27
第三节 气体的流出	37
第四节 火焰炉内的气体流动	44
第五节 炉子的排烟装置	52
第六节 加热炉的供气系统	60
第七节 喷射器简介	66
<b>第二章 燃料燃烧</b>	<b>72</b>
第一节 燃料的性质	72
第二节 燃烧计算	83
第三节 燃料的燃烧过程	97
<b>第三章 传热原理</b>	<b>115</b>
第一节 概 述	115
第二节 稳定态导热	117
第三节 对流换热(稳定态)	128
第四节 辐射换热	142
第五节 稳定态综合换热	170
第六节 不稳定态导热	183
<b>第四章 钢的加热工艺</b>	<b>203</b>
第一节 钢加热时物理和机械性能的变化	203
第二节 钢的加热缺陷	205
第三节 钢的加热温度和加热速度	216
第四节 钢加热制度的制订	221

## 第二篇 加 热 炉

<b>第五章 加热炉的生产率及热效率</b>	<b>236</b>
第一节 加热炉的生产率	236
第二节 加热炉的燃耗及热效率	238
<b>第六章 加热炉用筑炉材料</b>	<b>241</b>
第一节 概述	241
第二节 耐火材料的性能	242

第三节	硅酸铝质耐火材料	245
第四节	硅质耐火材料	248
第五节	镁质耐火材料	249
第六节	散状耐火材料	250
第七节	轻质耐火材料及绝热材料	253
<b>第七章</b>	<b>加热炉的基本组成</b>	<b>256</b>
第一节	炉膛	256
第二节	炉子的燃烧装置	260
第三节	炉子冷却装置	271
第四节	余热利用装置	277
第五节	燃料输送、供气及排烟系统	284
<b>第八章</b>	<b>连续加热炉</b>	<b>289</b>
第一节	连续加热炉的特点及分类	289
第二节	连续加热炉的炉型	290
第三节	连续加热炉的主要尺寸	296
第四节	轧钢厂常用加热炉举例	300
<b>第九章</b>	<b>其他加热炉</b>	<b>306</b>
第一节	均热炉	306
第二节	热处理炉	311
<b>第十章</b>	<b>炉子热平衡及节能</b>	<b>317</b>
第一节	炉膛热平衡	318
第二节	加热炉的热平衡测定	324
第三节	加热炉的节能	326
第四节	烟及烟平衡简介	329

### 第三篇 加热炉热工参数检测及调节

<b>第十一章</b>	<b>检测基本知识</b>	<b>335</b>
第一节	检测仪表的组成	335
第二节	单元组合仪表简介	336
第三节	有关测量的一些基本知识	338
<b>第十二章</b>	<b>温度检测</b>	<b>341</b>
第一节	概述	341
第二节	感温元件	343
第三节	温度变送器	355
<b>第十三章</b>	<b>显示仪表</b>	<b>360</b>
第一节	动圈显示仪表	360
第二节	电子自动平衡显示仪表	366
<b>第十四章</b>	<b>压力检测</b>	<b>375</b>
第一节	压力检测仪表分类	375

第二节	弹性压力计.....	376
第三节	压力变送器及差压变送器.....	378
第四节	其他压力计.....	380
<b>第十五章</b>	<b>流量检测</b> .....	<b>383</b>
第一节	基本知识.....	383
第二节	节流式流量计.....	384
第三节	其他流量计.....	393
<b>第十六章</b>	<b>自动调节简介</b> .....	<b>399</b>
第一节	自动调节基本知识.....	399
第二节	调节器及其调节规律.....	404
第三节	加热炉调节系统举例.....	415
<b>附录</b>	.....	<b>421</b>

## 绪 论

“加热炉”是轧钢专业的专业课程之一。

加热炉是冶金炉的一大类别，它是指被加热的材料在炉内不发生物态变化的炉子，以此与熔炼炉（在炉内有物态变化）加以区别。从广义上讲，诸如金属压力加工前的加热、金属制成品及半成品的热处理、原材料的烘烤及焙烧等用炉均属加热炉之列。本书所指的加热炉是狭义上的加热炉，即钢料在轧制前加热用炉及轧制过程中必要的热处理用炉。

随着科学技术的不断发展，加热炉的理论和实践也在不断深化和日臻完善。

炉子最早的理论是本世纪初所提出的“炉子水力学原理”。它把炉子比作一个倒置的河床，把水力学的某些原则应用于炉子的热工分析上，对解决自然通风下炉子的理论、计算及实践提供了重要的依据。尔后，相继出现的“炉子能量理论”、“炉子一般理论”、“炉子现代理论等，进一步把流体力学（动量传输）、传热学（~~热量传输~~）的一些个别理论应用于炉子热工过程的解析及研究，对炉子理论的发展起了重要作用。~~随着冶金工业的发展和科学技术水平的提高，这些理论无论在深度和广度上都远远不能满足分析和解决现代生产中炉子热工理论的要求，特别是在计算技术及计算机广泛应用后，更显得不足。~~60年代初期，传输理论（动量、热量、质量传输的统称）作为一门新兴的独立科学应运而生。70年代以后，传输理论被直接引用于冶金工程，从而使炉子热工理论获得了根本性的提高与发展，极大地发展了热工理论的研究方法。传输理论应用于许多科学技术领域之中，在国外称为“关键工程学”，它是一门新兴的边缘科学。限于篇幅，本课程不可能详细介绍这些理论。在第一篇炉子热工基础中，将围绕加热炉所遇到的基本热工理论问题来讨论气体力学，传热量，燃料燃烧等方面的某些基本规律。通过该篇学习，为对加热炉进行理论分析提供必要的基本知识。

由于加热炉热工理论不断发展，加热炉的结构型式也在不断演进。高产、优质、低消耗的新式炉型不断涌现，加热炉的结构，目前仍处在不断变革之中。本课程第二篇中将着重讨论加热炉的最基本组成部分及其所起的作用，加热炉常用筑炉材料的性能及使用。对轧钢生产中最常见到的连续加热炉的炉型及其基本尺寸的计算进行讨论，并简要介绍一些常用均热炉及热处理炉。众所周知，炉子热平衡计算是分析炉子热工作好坏的基本方法。近年来，为了深化炉子热工作好坏的分析，提出了焓（有效能）平衡问题。前者基于热力学第一定律，后者基于热力学第二定律。通过这些知识的学习，将对选择加热炉的炉型、材料、燃烧装置、余热利用设备等原则有一定程度的了解。

现代加热炉都具有炉子热工参数的检测及调节用仪表。通过对热工参数的检测及调节，不仅能指导加热炉的操作，而且为计算机的使用也提供原始数据。热工参数检测及调节仪表品种繁多，结构多样，各种新型仪表不断出现。本课程不可能对每种仪表进行分析研究，即使是常用仪表也不可能逐一介绍。第三篇中将对加热炉最基本的热工参数——温度、压力、流量检测的原理、方法及最常用的检测仪表构成原理加以讨论，并简要介绍自动调节的一些基本知识，达到会选择及使用主要检测及调节仪表的目的。



通过本课程的学习，应对加热炉有一整体了解，能够初步分析和解决加热炉热工方面的理论和实践问题；能够根据轧制工艺的要求来选择炉型、燃烧器、余热利用设备、冷却设备、主要筑炉材料及最常用的热工参数检测及调节仪表。

# 第一篇 炉子热工基础

## 第一章 气体力学原理

在工业炉的设计和操作中将会遇到大量气体力学方面的问题。比如炉子的供热、供风、排烟、炉压和炉温的调节、烧嘴设计、管道烟道及烟囱计算、换热器和风机选择计算、以及炉型结构参数的确定等都和气体力学原理密切相关。能否正确地处理和解决上述问题，对于炉子的高产、优质、低耗有重大影响。

炉子气体力学原理是在水力学（或流体力学）的基础上发展起来的。它的特点是气体温度一般较高，温度和密度在炉子流动系统中变化较大，并且在流动过程中还伴随有热量传输和质量传输。本章主要讨论炉子气体力学的基本理论和基本知识。

本书采用国际单位制（SI）。由于工程单位制在气体力学计算中仍很普遍，读者尚须熟悉两者的换算关系，现列表说明如下：

### 1) 国际单位制与公制工程单位换算表1-1

表 1-1 国际单位与公制工程单位换算表

量	国际制单位		公制工程单位		1 公制工程单位 换成国际制单位 应乘的系数	备 注
	中文	英文	中文	英文		
长度	米	m	米	m		
质量	千克(公斤)	kg	工程质量单位	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	9.806	在公制工程单位中为导出单位
时间	秒	s	秒	s		
温度	开	K	摄氏度(°C)			$T(K) = t(^{\circ}C) + 273.15$
力	牛顿	N	公斤(千克力)	kgf	9.806	在公制工程单位中为基本单位
能量	焦耳	J	公斤·米	kgf·m	9.806	$1kcal = 427kgf \cdot m = 4186J$
功率	瓦	W	公斤米/秒	$kgf \cdot m \cdot s^{-1}$	9.806	

### 2) 压力的单位及其换算

国际制单位压力为牛顿/米<sup>2</sup>(N/m<sup>2</sup>)或帕(Pa)

1 标准物理大气压  $1atm = 760$ 毫米汞柱

1 工程大气压  $1at = 1kgf/cm^2$

现将压力单位的换算列入表1-2中

在实际工程中对于精确度要求不太高时，常常为了使用上的方便而作如下的近似处理：

$$1at = 0.98067 \times 10^5 Pa = 0.098067 \times 10^6 Pa \approx 0.1MPa (\text{兆帕}) \\ = 10000mmWG$$

### 3) 粘性系数的单位换算

$$1\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = 9.807\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

$$1\text{Ns}/\text{m}^2 = 1\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$$

$$1\text{P}(\text{泊}) = 0.1\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = 1.02 \times 10^{-2}\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

$$1\text{cP}(\text{厘泊}) = 10^{-2}\text{P}$$

$$1\text{St}(\text{斯}) = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$$

$$1\text{cS}(\text{厘斯}) = 10^{-2}\text{St}$$

表 1-2 压力单位换算

	N/m <sup>2</sup> (帕斯卡Pa)	at (工程大气压)	mmWG (毫米水柱)	atm (物理大气压)	mmHg (毫米汞柱)
1N/m <sup>2</sup> =	1	1.0197 × 10 <sup>-3</sup>	0.10197	0.9869 × 10 <sup>-5</sup>	0.7501 × 10 <sup>-2</sup>
1at=	0.98067 × 10 <sup>5</sup>	1	1.0000 × 10 <sup>4</sup>	0.9678	0.7356 × 10 <sup>3</sup>
1mmWG=	1.0133 × 10 <sup>5</sup>	1.000 × 10 <sup>-4</sup>	1	9.6781 × 10 <sup>-5</sup>	0.7356 × 10 <sup>-1</sup>
1atm=	1.0133 × 10 <sup>5</sup>	1.0333	1.0333 × 10 <sup>4</sup>	1	760
1mmHg=	1.333 × 10 <sup>2</sup>	1.3595 × 10 <sup>-3</sup>	13.5955	1.3158 × 10 <sup>-3</sup>	1

## 第一节 气体力学的基本概念和基本定律

物质有固体、液体和气体三种状态。固体，由于分子排列紧密间距甚小，分子间的引力较大从而使其具有整形性。液体分子间距大于固体又远远小于气体，这就使得液体分子间的引力还能够一定程度上控制其表面。液体在重力作用下表现出的边界（自由）液面，在实际意义上就是具有不可压缩性。液体在外力作用下具有抗压而不抗拉的力学性质。它和气体一样都能按外力的作用而流动并沿着外力作用的方向传递力的大小，故常常把液体又称为非弹性流体，一般情况下可把液体视为其体积不受温度和压力的影响。

气体分子间距很大，分子间的引力很小从而使得气体分子微团失去了对其外形的控制能力。加上它不停地作不规则的热运动，就使得气体能够以微小的质量去占据很大的空间，即气体具有充满性。由于气体分子间引力极弱从而使它很容易被压缩。

流体是液体和气体的总称。按照欧拉的建议，把流体当作连续介质进行讨论（对此以后不再加以说明）。在炉子系统中由于相对压力较小，而为了使问题简化，我们总是认为炉气是不可压缩的，只有当类似气体通过高压管嘴流出这类问题时才必须考虑气体在流动中密度的变化。由于研究炉内气体流动时总是和大气相联通，因而炉压在流动中将受到大气温度、压力变化的影响，液体则可以忽略这些影响。

气体的物理状态完全由其状态参数来决定。气体的这些状态参数是：温度 ( $T$ ) 压力 ( $p$ )，体积或比容 ( $V$  或  $v$ )，密度 ( $\rho$ ) 等。气体的状态参数在一定条件下可以通过气体状态方程来计算确定。

### 一、基本概念和定律

#### 1. 密度和重度

均质流体的密度等于其质量和体积的比值，即：

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

式中  $\rho$ ——密度, 千克/米<sup>3</sup>;  
 $M$ ——均质流体的质量, 千克;  
 $V$ ——均质流体的体积, 米<sup>3</sup>。

在国际单位制(SI)中, 质量的单位是千克, 体积的单位是米<sup>3</sup>, 密度的单位是千克/米<sup>3</sup>。

我们把单位质量均质流体所占的体积称为比容以  $v$  表示。显然,

$$v = \frac{1}{\rho} \text{米}^3/\text{千克} \quad (1-2)$$

重力(重量), 是指物体在地球重力场中所受到的重力作用。一般来说同一物体在地球上各个地方所受到的重力是不同的(即同一物体将表现出不同的重量), 根据牛顿第二定律可知流体的重力和质量的关系是:

$$G = M \cdot g \quad (1-3)$$

式中  $G$ ——流体的重力, 牛顿(N)(以下简称牛);  
 $M$ ——流体的质量, 千克(kg);  
 $g$ ——重力加速度, 米/秒<sup>2</sup>(m/s<sup>2</sup>)。

在SI制中重力的单位1牛=1千克×米/秒<sup>2</sup>。重力加速度 $g$ 的单位为米/秒<sup>2</sup>, 它是随纬度和海拔高度而变化的, 在北纬45°海平面上物体的重力加速度 $g=9.80665$ 米/秒<sup>2</sup>, 本书取9.806或9.81米/秒<sup>2</sup>。

在工程上把单位体积的重量称为重度以  $\gamma$  表示, 即  $\gamma = \frac{G}{V}$  (1-4)

SI单位制中重度 $\gamma$ 是导出单位用牛/米<sup>3</sup>表示, 在工程单位制中则为千克力/米<sup>3</sup>。由式1-1和式1-4可得:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g}$$

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

而密度 $\rho$ 在国际单位制中是基本单位,  $\rho$ 的工程单位则是导出单位为千克·秒<sup>2</sup>/米<sup>4</sup>。鉴于炉子气体力学中常常在有关计算公式中以重度 $\gamma$ 出现, 而生产实际中又习惯于使用工程单位, 本书以国际单位为主。凡是有关公式的表述和导出均以密度 $\rho$ 的形式出现。今后在有关文献书籍中出现重度 $\gamma$ 的地方都采用 $\rho g$ 代换之。为了照顾工程使用上的习惯、本书相应地把各种计算的结果用括号以工程单位并列表示。必须注意: 密度 $\rho$ (SI制)在数值上与工程单位中的重度 $\gamma$ 完全相同。但它们的单位不同, 物理含意不一样。

〔例1-1〕若水的密度 $\rho$ 为1000千克(质)/米<sup>3</sup>(SI制), 求水在工程制中的密度, 重度和SI制中的重度 $\gamma$ 值?

解: SI制中水的密度 $\rho=1000$ 千克/米<sup>3</sup>。

$$\begin{aligned} \text{水的重度 } \gamma &= \rho \cdot g = 1000 \text{千克/米}^3 \times 9.81 \text{米/秒}^2 \\ &= 9810 \text{千克} \cdot \text{米/秒}^2 \cdot \text{米}^3 = 9810 \text{牛/米}^3 = 9.81 \text{千牛/米}^3. \end{aligned}$$

在工程单位制中水的重度 $\gamma=1000$ 千克(力)/米<sup>3</sup>

$$\text{则其密度 } \rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1000 \text{千克力/米}^3}{9.81 \text{米/秒}^2} = 102 \text{千克(力)秒}^2/\text{米}^4$$

表 1-3 几种常见气体在标准状态下的密度 $\rho_0$ 值

气 体	$\rho_0$ (千克/标米 <sup>3</sup> )	气 体	$\rho_0$ (千克/标米 <sup>3</sup> )
空气	1.293	CO	1.250
O <sub>2</sub>	1.429	CO <sub>2</sub>	1.963
N <sub>2</sub>	1.250	H <sub>2</sub> O	0.804
H <sub>2</sub>	0.090	SO <sub>2</sub>	2.858
CH <sub>4</sub>	0.716	气体燃料	0.5~1.2
H <sub>2</sub> S	1.521	烟 气	1.3~1.4

## 2. 压力

气体在单位面积上所受的力称为压强。在气体力学中习惯上把压强也简称作压力。在实际应用中压力根据所取基准的不同可以采用不同的计量方法来表示。以完全真空为基准算起的压力称为绝对压力 ( $p$ )。以大气压力为基准算起的压力称为相对压力 (表压力  $p_b$  或计示压力)。绝对压力与表压力之间相差一个大气压。绝对压力等于大气压力与表压力之和, 而表压力为绝对压力与大气压力之差即:

$$p = p_a + p_b \quad (1-6)$$

$$\text{或} \quad p_b = p - p_a \quad (1-7)$$

式中  $p$ ——绝对压力;

$p_a$ ——大气压力;

$p_b$ ——表压力。

工程上常用的压力表或压力计的读数一般为表压力 (相对压力, 计示压力)。当流体中某处的绝对压力小于大气压力时, 则该处处于真空状态。此时大气压力与绝对压力的差值叫做真空度 (真空压力), 即

$$p_v = p_a - p \quad (1-8)$$

式中  $p_v$ ——真空度;

$p_a$ ——大气压力;

$p$ ——绝对压力。

流体中某处的绝对压力愈小则该处的真空度愈大。理论上当绝对压力为零时其真空度为最大, 等于一个大气压的数值。但在实际上要把容器抽成完全真空是很难办到的。特别是当容器中盛有液体时, 只要压力降到液体的饱和蒸气压, 液体便要开始气化, 压力便不会再下降了。绝对压力, 表压力和真空度之间的关系可用图1-1表示。

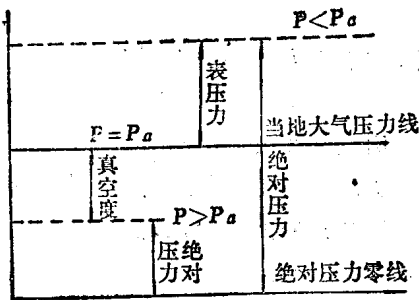


图 1-1 绝对压力, 大气压力, 表压力、真空的相互关系

气体压力的实质就是气体分子作不规则热运动时撞击在物体 (容器壁) 上的结果, 气体压力的大小可由分子撞击的速度和频率来衡量。

在地球外面的宇宙中没有气体那里几乎是绝对真空, 气压为零。但是地球上的气体并未因此而飞向茫茫太空, 这完全是地球引力的作用而使大气层被那无形的“绳子”拴住了。因为地球引力随着大气高度的增加而递减, 这就使得引力所能“拉住”的气体亦随之

而逐渐减少，从而造成了大气密度沿海拔高度的增加而递减，于是引起了大气压力沿高度方向的递减。在地球上任何容器中的气体都将受到地球引力作用而产生这种沿高度方向压力的递减现象。加热炉中炽热的炉气也不例外。

压力的单位在SI制中为： $P_a = N/m^2 = kg/m \cdot s^2$ （帕 = 牛/米<sup>2</sup> = 千克/米·秒<sup>2</sup>），在工程上压力还常用液柱高度，大气压等作为单位。压力单位的换算关系见表1-2。

### 3. 盖·吕萨克定律

一定质量的气体、在压力恒定时，气体的体积与其绝对温度成正比例即：

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

$$\begin{aligned} \text{或} \quad V_t &= V_0 \left( \frac{T_t}{T_0} \right) = V_0 \left( \frac{273+t}{273} \right) = V_0 \left( 1 + \frac{t}{273} \right) \\ &= V_0 (1 + \beta t) \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中  $T_0$ ——0℃时气体的绝对温度，开（K）；

$T_t$ —— $t$ ℃时气体的绝对温度，开（K）；

$V_0$ ——0℃， $1.0133 \times 10^5 Pa$ 下（标准状态）气体体积，米<sup>3</sup>；

$V_t$ —— $1.0133 \times 10^5 Pa$ （760mmHg） $t$ ℃时气体的体积，米<sup>3</sup>；

$\beta = \frac{1}{273}$  称为气体的温度膨胀系数。

加热炉内炉气的温度在1000℃左右，这时炉气的密度 $\rho$ （或重度 $\gamma$ ）比周围冷空气小4~6倍，故计算中将经常用到密度随温度变化的关系。因恒压下在气体质量一定时，气体的密度（或重度）与体积成反比例故有：

$$\rho_t = \rho_0 \left( \frac{1}{1 + \beta t} \right) \quad (1-10)$$

$$\text{或} \quad \gamma_t = \gamma_0 \left( \frac{1}{1 + \beta t} \right) \quad (1-11)$$

式中  $\rho_0, \gamma_0$ ——气体在标准状态的密度重度，千克(质)/标米<sup>3</sup>，牛/标米<sup>3</sup>；

$\rho_t, \gamma_t$ —— $t$ ℃时气体的密度重度千克(质)/米<sup>3</sup>，牛/米<sup>3</sup>。

加热炉中常常遇到混合气体的计算，对于混合气体在标准状态下的密度（重度） $\rho_{0m}$ （ $\gamma_{0m}$ ）可按下式求得

$$\rho_{0m} = \rho_{01} \cdot a_1 + \rho_{02} \cdot a_2 + \rho_{03} \cdot a_3 + \dots + \rho_{0n} \cdot a_n$$

$$\text{或} \quad \gamma_{0m} = \gamma_{01} \cdot a_1 + \gamma_{02} \cdot a_2 + \gamma_{03} \cdot a_3 + \dots + \gamma_{0n} \cdot a_n$$

式中  $\rho_{01}, \rho_{02}, \rho_{03}, \dots, \rho_{0n}$ ——混合气体中各组成物在标准状态下的密度；

$\gamma_{01}, \gamma_{02}, \gamma_{03}, \dots, \gamma_{0n}$ ——混合气体中各组成物在标准状态下的重度；

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ ——混合气体中各组成物的百分数%。

### 4. 查理定律

容积不变时一定质量的气体其压力与绝对温度成正比例即：

$$p_t = p_0 (1 + \beta t) \quad (1-12)$$

式中  $p_0, p_t$ ——分别为0℃和 $t$ ℃时气体的压力；

$\beta = \frac{1}{273}$ ——叫做气体的压力温度系数。

### 5. 气体状态方程

气体状态方程表明，一定质量的理想气体在平衡状态下，体积、压力和温度三者间的关系，即：

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} = \dots = \frac{pV}{T} = R \quad (1-13)$$

式中  $p_1, p_2, p_3, \dots, p$ ——分别表示气体在相应状态下的绝对压力；

$V_1, V_2, V_3, \dots, V$ ——分别表示气体在相应状态下的比容；

$T_1, T_2, T_3, \dots, T$ ——分别表示气体在相应状态下的绝对温度；

$R$ ——气体常数，各种气体的  $R$  值不同，当  $p, V, T$  所用单位不同时，同一气体的气体常数  $R$  值亦不同。

注意式1-13是以一摩尔或千摩尔 (kmol) 气体为研究对象所表达出的气体状态方程式。如果所研讨的气体为  $n$  个摩尔时，则气体状态方程的通用表达形式为：

$$\frac{pV}{T} = nR \text{ 或 } pV = nRT \quad (1-14)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压力，帕 (公斤/米<sup>2</sup>)；

$V$ ——气体的体积，米<sup>3</sup> (m<sup>3</sup>)；

$T$ ——气体的绝对温度，开 (K)；

$n$ ——研究气体的千摩尔数。

因  $n = \frac{\text{重量}}{\text{分子量}} = \frac{G}{M}$  则1-14改写为：

$$pV = \frac{G}{M} RT \quad (1-14a)$$

此时1-14a中气体常数  $R$  的单位为：牛·米/千摩尔·开，千克·米/千克分子·开。在标准状态下，工程单位  $p = 10333$  千克/米<sup>2</sup>， $T = 273$  开，对一千克分子的任何理想气体的体积均为  $22.4$  米<sup>3</sup> 于是得：

$$R_0 = \frac{10333 \times 22.4}{273} = 848 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{千克分子} \cdot \text{开}$$

显然，这一  $R_0$  值是不因气体种类而异的。它对任何理想气体均为一常数我们称之为通用气体常数并以  $R_0$  表示以示区别于1-13式中的气体常数  $R$ ，这样一来对千克分子量为  $M$  的气体，则其气体常数  $R$  为：

$$R = \frac{R_0}{M} \quad (1-15)$$

注意：通用气体常数  $R_0$  虽不随气体种类而异为一定值，但当  $p, V, T$  所选用的单位不同时该定值的数值和单位将是不同的。

工程单位时  $R_0 = 848 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{kmol} \cdot \text{K}$  (千克·米/千摩尔·开)

国际单位时  $R_0 = 86.5 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kmol} \cdot \text{K}$  (牛·米/千摩尔·开)

气体状态方程严格来说只适用于理想气体，实际气体并不完全满足理想气体条件，但对于

常压和炉温条件下的气体、可近似地按理想气体对待，而对于高速流动，压差很大条件下的气体就不允许按理想气体对待了，否则计算结果将产生较大的误差。因为这时气体的密度变化很大，故必须考虑气体本身的压缩性。

各种常用气体的气体常数  $R$  的值见表1-4。

表 1-4 常用气体的气体常数  $R$  值

气体名称	分子式	气体常数 $R$	
		国际单位： 牛·米/千克·开	工程单位：米/开
氢	H <sub>2</sub>	4129	420.90
氧	O <sub>2</sub>	259.9	26.52
氮	N <sub>2</sub>	295.6	30.13
一氧化碳	CO	294.3	30.00
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	189.0	19.27
水蒸汽	H <sub>2</sub> O	462.1	47.10
甲烷	CH <sub>4</sub>	519.9	53.00
空气		287.1	29.27

〔例 1-2〕 有一台制氧机每小时能生产标准状态下的氧气6000米<sup>3</sup>，问每天能生产多少吨氧气？

解：标准状态时采用  $p = 10333$  牛/米<sup>2</sup>， $T = 273$  开， $V = 6000$  米<sup>3</sup>。于是由  $pV = nR_0T$  中求出  $n$  再由  $n = \frac{G}{M}$  而求得氧气的重量  $G$  来。SI制时  $R_0 = 86.5$  牛·米/千摩尔·开。

故有：
$$n = \frac{10333 \times 6000}{86.5 \times 273} = 2625.42 \text{ 千摩尔 (质)}$$

于是每天生产氧气的重量  $G$  为：

$$G = n \cdot M / 9.81 = \frac{2625.42 \times 32}{9.81} = 8564.06 \text{ 千克/时}$$

故每天生产氧气的吨数为：

$$G = 8564.06 \times 24 \times \frac{1}{1000} \approx 206 \text{ 吨/天}$$

## 6. 巴斯加原理

1653年法国科学家巴斯加在其“关于液体的平衡”这篇论文中详述了液体中压强的传递规律即“巴斯加原理”。它说明：静止液体内部任意一点压强的变化，将以同样的大小传递到液体内部所有各点上，即加在静止流体上的外部压强能够大小不变地由流体内部向各个方向传递，也就是外力施加于液体的压力（指压强）在液体内部各个方向上所产生的内部压强均相等。显然，对静止的液体内部在同一高度上其压强必相等。巴斯加的这一原理也同样适用于气体。巴斯加原理在工程技术上得到了广泛的实际应用。比如连通器，水压机，蓄能器，液压千斤顶，液力变压器……等都是建立在巴斯加原理的基础上而制成的。

## 7. 阿基米德原理

通过大量试验阿基米德指出：浸没在液体中的物体都要受到液体的浮力作用而减轻部分重量，其数值等于该物体所排开同体积液体的重量。这就是阿基米德原理。同理，浸没



在气体中的物体它所受到的浮力将等于它所排开同体积气体的重量。

设有一容积为 $V$ ，其内盛满密度为 $\rho$ 的热气体的容器，它的周围皆是冷空气其密度为 $\rho'$ ，则由阿基米德原理可知，热气体将受到冷空气的浮力作用，其数值应当等于容器所排开同体积冷空气的重量 $G'$

即 
$$\text{浮力} = G' = V \cdot \rho' \cdot g (\text{牛顿})$$

而热气体本身的重量为 $G$

即 
$$\text{重力} = G = V \cdot \rho \cdot g (\text{牛顿})$$

因为浮力 $G'$ 是恒向上的，重力 $G$ 是竖直向下的所以当 $G' > G$ 时，则热气体将自动上升，其总的上升力 $G_{\text{升}}$ （指热气体本身，不含容器自重）为：

$$\begin{aligned} G_{\text{升}} &= \text{浮力} - \text{重力} = G' - G = V\rho'g - V\rho g \\ &= Vg(\rho' - \rho) \end{aligned} \quad (1-16)$$

于是对单位体积热气体而言，其上升力等于冷热气体的密度差乘以重力加速度 $g$ 。

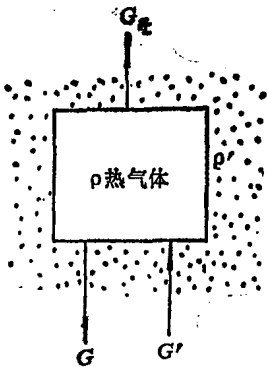


图 1-2 阿基米德原理示意

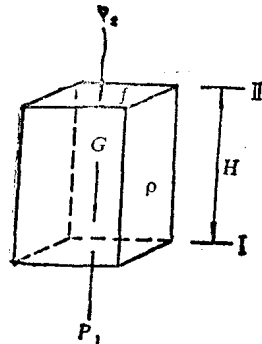


图 1-3 气体绝对压力分布

在大气中气体的升降沉浮取决于该气体的密度 $\rho$ ，只要 $\rho$ 小于冷空气的密度 $\rho'$ 则此气体必上升。加热炉内的炉气温度很高而使得炉气比冷空气轻很多，所以炉气具有上升力 $G_{\text{升}}$ 。

〔例 1-3〕 有一容积为 $20\text{米}^3$ 的容器质量为 $10$ 千克，其内装满温度为 $800^\circ\text{C}$ 的热空气，若将此容器置于 $0^\circ\text{C}$ 的冷空气中，问此容器是上升或下落？其上升力 $G_{\text{升}} = ?$

解 
$$\begin{aligned} \text{上升力 } G_{\text{升}} &= Vg(\rho' - \rho) = 20 \times 9.81 \left( 1.293 - \frac{1.293}{1 + \frac{800}{273}} \right) \\ &= 189.3 \text{ 牛顿} \end{aligned}$$

将上升力减去容器的重力即 $189.3 - 10 \times 9.81 = 91.2$ 牛还富余上升力 $91.2$ 牛，所以该容器将自动升起。

## 二、气体静力平衡方程

气体静力平衡方程是研究静止气体的压力变化的平衡方程式。实际上自然界中并不存在处于绝对静止状态的气体。但可以认为某些情况下的气体（如气罐中的煤气，加热炉内非流动方向上的烟气等）是处于相对静止状态。现就这种相对静止状态气体的压力变化规律加以讨论如下：