

中等专业学校教学用书

冶金炉热工基础

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

冶金炉热工基础

贺成林 李月娥 编

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书
冶金炉热工基础
贺成林 李月娥 编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口 74 号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 10 1/2 字数 276 千字

1979年12月第一版 1982年9月第二次印刷

印数9,501~12,500册

统一书号: 15062·3493 定价1.05元

前 言

本教材是根据1978年冶金部制订的冶金类中等专业学校教学计划和冶金炉热工基础教学大纲编写的。

本书内容共分四篇：第一篇为气体力学原理，主要介绍有关冶金炉气体力学的基本概念、定律、计算原理和计算方法；第二篇为燃料及燃烧，介绍冶金企业常用燃料的主要性能和用途，燃料燃烧计算的基本原理和方法，以及各种燃料的燃烧方法和燃烧设备；第三篇为传热原理，主要介绍传热过程的基本概念、定律和有关的计算原理和方法；第四篇为耐火材料，着重介绍冶金企业常用耐火材料的主要性能和用途。

本书可作为黑色冶金、有色冶金（稀冶、轻冶和重冶）及金属压力加工等专业的教材，亦可供冶金炉热工工作者及工厂技术人员参考。

本书由太原冶金工业学校贺成林（第一、三篇）和沈阳有色金属学校李月娥（第二、四篇）编写，并由贺成林统一整理。在编写过程中得到了兄弟学校和有关单位的协助和支持，在此谨表感谢。

编 者

1979年1月

目 录

第一篇 气体力学原理

第一章	气体的主要物理性质和气体平衡方程式	2
第一节	气体的主要物理性质	2
第二节	巴斯加原理、阿基米德原理	11
第三节	气体平衡方程式	12
第二章	气体流动的动力学	17
第一节	流体流动的状态	17
第二节	运动气体的连续方程式	22
第三节	气体的能量	26
第四节	柏努利方程式	30
第五节	柏努利方程式和连续方程式应用实例	36
第三章	压头损失与气体输送	41
第一节	压头损失	41
第二节	烟囱排烟	55
第三节	炉子的供气系统	62
第四章	高压气体的流出	72
第一节	高压气体流出的基本规律	73
第二节	管嘴的设计和计算	85
第三节	喷射器	91
第四节	自由流股	96

第二篇 燃料及燃烧

第一章	冶金企业常用燃料	102
第一节	概述	102
第二节	常用燃料的特性	103
第三节	常用燃料的种类、性质和用途	113
第二章	燃烧计算	125
第一节	概述	125

第二节	燃料燃烧的分析算法	128
第三节	燃烧温度	143
第三章	燃料燃烧	154
第一节	煤气燃烧	154
第二节	重油的燃烧	171
第三节	粉煤的燃烧	181
第四节	块煤的燃烧	186
第四章	冶金炉热能的合理利用	191
第一节	概述	191
第二节	炉子能源的合理选择	191
第三节	炉内热能的节约	193
第四节	二次能源的充分利用	195

第三篇 传热原理

第一章	稳态态导热	201
第一节	导热的基本方程式(傅立叶方程式)	201
第二节	导热系数	202
第三节	平壁导热	205
第四节	圆筒壁导热	210
第二章	对流给热	215
第一节	对流给热的本质及其基本公式	215
第二节	对流给热系数的确定——相似理论 在对流给热中的应用	217
第三节	对流给热系数的若干实验公式	223
第三章	辐射传热	232
第一节	热辐射的基本概念	232
第二节	辐射的基本定律	234
第三节	两物体间的辐射热交换	238
第四节	气体与固体间的辐射热交换	243
第四章	综合传热	250
第一节	对流和辐射同时存在的综合传热	250
第二节	流体通过固体对另一流体的传热	251

第三节	火焰炉内传热	255
第四节	竖炉内热交换	260
第五章	金属加热(冷却)计算	265
第一节	不稳定态导热的一般特点	265
第二节	不稳定态导热中的相似准数	267
第三节	炉温不变时薄材加热(冷却)计算	269
第四节	炉温不变时厚材加热(冷却)计算	271
第五节	物体表面温度不变时加热(冷却)计算	277

第四篇 耐火材料

第一章	耐火材料的种类和性能	283
第一节	耐火材料的定义和分类	283
第二节	耐火材料的主要性能	284
第二章	硅酸铝质耐火材料	290
第一节	粘土质耐火材料	290
第二节	高铝质耐火材料	294
第三节	半硅质耐火材料	296
第三章	氧化硅质耐火材料	297
第一节	二氧化硅的结晶转变	297
第二节	硅砖的性质及用途	300
第四章	氧化镁质及其他碱性耐火材料	302
第一节	镁石质耐火材料	302
第二节	镁铝砖和镁铬砖	304
第三节	白云石质耐火材料	306
第五章	其他耐火材料和隔热材料	308
第一节	碳质耐火材料	308
第二节	其他耐火材料	310
第三节	隔热材料	316
第四节	耐火材料的选用	318
附图	320
附表	322

第一篇 气体力学原理

目前大部分冶金炉（除电炉外）热能的主要来源是靠燃烧燃料来供给。燃料燃烧需要供入炉内大量空气，并在炉内产生大量的炉气。高温的炉气是传热的介质，当它将大部分热能传给被加热的物料以后就从炉内排出。如果排出的炉气温度较高，还可用废热回收装置再收回部分热能，然后再经过排气装置排入大气。炉内气体的运动，对炉子的产量、产品质量、生产成本、炉子寿命、安全操作等方面都有直接影响。因此，根据炉子的生产要求正确地向炉内供气，合理地组织炉内气体运动，根据炉子的生产需要及时地将炉内产生的炉气排出，是组织好炉子生产的极重要环节。

气体在炉内的流动，根据流动产生的原因不同，可分为两种：一种叫自由流动，一种叫强制流动。自由流动是由于温度不同所引起各部分气体重度差而产生的，强制流动是由于外界的机械作用，如鼓风机鼓风产生的压力差而引起的气体流动。

引起自由和强制流动的许多原因合在一起，就决定了炉内气体流动的性质。

冶金生产中，各种炉子对组织气体流动都有各自的特殊要求，并且有些气体流动现象（如炉内气体流动）同炉内的工艺过程密切相关，只有结合工艺过程才能深入分析这些气体流动问题，因此，这些问题将在有关的专业课中解决。即便是供气和排烟系统的气体流动也同许多专业设备有关，因此，本篇只能介绍一些基本规律和基本原则。

第一章 气体的主要物理性质

和气体平衡方程式

第一节 气体的主要物理性质

一切物体都是由许多永不停止的作无规则运动的微粒——“分子”所组成。分子的无规则运动与温度密切相关，因此，称为分子的热运动。分子间的空隙不同，则分子间的作用力和分子热运动的情况不同，各种物体的性质也不同。

液体和气体，由于分子间空隙较固体大，它们都不能保持一定的形状，而具有固体所没有的一种性质——即流动性，因此，常将液体和气体称为流体。由于液体和气体具有流动性，因而它们能将自身重力和所受的外力按原来的大小向各个方向传递，这是气体与液体的共同性。但是气体和液体之间还具有不同的特性。

在一般情况下，液体的体积和重度（每米³气体或液体具有的重量）随温度和压力的变化量很小，所以，常认为液体是不可压缩性流体（或称非弹性流体）。气体的体积和重度通常随温度和压力的变化量较大，所以，常认为气体是可压缩性流体（或称弹性流体）。在研究气体运动时，应注意气体的体积和重度随温度和压力的变化，此为气体区别于液体的一个显著特性。

液体的重度较大（如每米³水的重量为1000公斤），所以液体在流动过程中基本不受周围大气的影晌。气体的重度较小（如每米³烟气的重量约为1.3公斤），而且与空气的重度相近（每米³空气的重量为1.293公斤），所以气体在流动过程中受周围大气的影晌。在研究气体运动时，应考虑其与大气的相互关系，此为气体区别于液体的又一个显著特性。

上述分析表明，在研究气体运动时常遇到气体的温度、压力、

体积、重度等一些物理参数。说明气体物理性质的这些物理参数常随气体的存在状态而变化。因此，要了解气体的性质，必须了解这些参数的物理意义及其影响因素。

一、气体的温度

气体的温度是表示气体冷热程度的物理参数。工程上有两种常用的温度表示方法：一种是摄氏温度，用 t 表示，单位是 $^{\circ}\text{C}$ ；一种是绝对温度，用 T 表示，单位是 K 。二者的关系式如下

$$T = t + 273 \text{ K} \quad (1-1)$$

可见，绝对温度是把摄氏温度零下 273°C 作为它的零度点。

气体在运动过程中有温度变化时，气体的平均温度常取为气体的始端温度 t_1 和终端温度 t_2 的算术平均值，即

$$t_{\text{中}} = \frac{t_1 + t_2}{2} \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1-2)$$

二、气体的压力

由于气体自身的重力作用和气体内部的分子运动作用，气体内部都具有一定的对外作用力，这个力称为气体的压力。显然，气体压力是气体的一种内力，它是表示气体对外作用力大小的一个物理参数。物理学上常把单位面积上气体的对外作用力称为压强，工程上却常把压强简称为压力。冶金炉上所说的压力也是指单位面积上气体的对外作用力，即其在物理意义上相当于物理学上的压强。

气体压力的单位可用大气压、毫米汞柱、毫米水柱、公斤/米²和公斤/厘米²等表示。这些压力单位之间的关系如下：

$$1 \text{ 大气压} = 760 \text{ 毫米汞柱} = 10333 \text{ 毫米水柱} = 10333 \text{ 公斤/米}^2$$

工程上习惯用工程大气压表示，即

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 735.6 \text{ 毫米汞柱} = 10000 \text{ 毫米水柱} \\ &= 10000 \text{ 公斤/米}^2 = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 \end{aligned}$$

冶金炉上常用毫米水柱表示气体的压力。1毫米水柱相当于1米²面积上气体具有1公斤的压力，因此，毫米水柱和公斤/米²具有相同的物理意义。

气体的压力与温度密切相关，实验研究指出：当一定质量的气体体积保持不变（即等容过程）时，气体的压力随温度呈直线变化，即

$$P_t = P_0(1 + \beta t) \quad (1-3)$$

式中 P_t, P_0 ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 时气体的压力；

β ——体积不变时气体的压力温度系数。根据实验测定，一切气体的压力温度系数都近似地等于

$$\frac{1}{273}^\circ$$

气体的压力有绝对压力和表压力两种表示方法。以真空为起点所计算的气体压力称为绝对压力，通常以符号 $P_{绝}$ 表示。通常所说的标准大气压（大气压力为760毫米汞柱）和实际大气压（该地该时的实际大气压）都是指大气的绝对压力。设备内气体的绝对压力与设备外相同高度的实际大气压的差称为气体的表压力，常以符号 $P_{表}$ 表示。显然表压力和绝对压力的关系为

$$P_{表} = P_{绝} - P_{大气} \quad (1-4)$$

式中 $P_{绝}$ ——设备内气体的绝对压力；

$P_{大气}$ ——设备外同高度的实际大气压；

$P_{表}$ ——设备内气体的表压力。

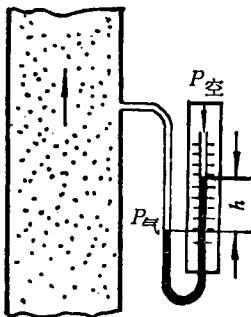


图 1-1 测量气体压力

当气体的表压为正值时，称此气体的表压为正压。当气体的表压为负值时，称此气体的表压为负压。当气体的表压为零值时，称此气体的表压为零压。具有零压的面常称为零压面。

实际生产中常用U型液压力计测量气体的表压力，U型压力计的一端和大气相通，另一端和被测的气体相接（见图1-1），因此，实际所测的为相对压力。压力计上所指示的液体柱高度差 h 即为

气体的表压力。

三、气体的体积

气体的体积是表示气体所占据的空间大小的物理参数。冶金炉内常以每公斤重气体所具有的体积表示气体体积的大小。每公斤气体具有的体积称为气体的比容，用符号 V 表示，单位是米³/公斤。

气体体积随其温度和压力的不同有较大的变化，此为气体区别于液体的特点之一。

1. 气体体积与温度关系 一定质量的气体，在恒压条件下，其体积与其绝对温度成正比，即

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_t}{T_t} \quad (1-5)$$

式中 T_0 ——0°C时气体的绝对温度，K；

T_t —— t °C时气体的绝对温度，K；

V_0 ——标准状态下气体的体积，米³；

V_t ——760毫米汞柱 t °C时气体的体积，米³。

显然，当压力不变时，气体的体积随温度升高而增大，随温度降低而减小。

为了计算方便，上式常写成

$$V_t = V_0 \left(\frac{T_t}{T_0} \right) = V_0 \left(\frac{273 + t}{273} \right) = V_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) \text{米}^3 \quad (1-6a)$$

式中 $\frac{1}{273}$ 常用符号 β 表示，称为气体的温度膨胀系数。因此，上式可写成

$$V_t = V_0 (1 + \beta t) \text{米}^3 \quad (1-6b)$$

应当指出，当压力变化不大时，也可用上式计算不同温度下的气体体积。

2. 气体体积与压力的关系 一定质量的气体，在恒温条件下，其体积与其绝对压力成反比，即

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots = PV \quad (1-7a)$$

式中 P_1, P_2, \dots, P ——相同温度下气体的各绝对压力，毫米水柱或公斤/米²；

V_1, V_2, \dots, V ——各相应压力下气体的比容，米³/公斤。

在绝热条件下，一定质量的气体，其体积与绝对压力间存在如下关系

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k = \dots = PV^k \quad (1-7b)$$

式中 P_1, P_2, \dots, P ——气体的各绝对压力，毫米水柱或公斤/米²；

V_1, V_2, \dots, V ——各相应压力下气体的体积或比容，米³/公斤；

k ——气体的绝热指数，其值为二原子气体 $k=1.4$ 、三原子气体 $k=1.33$ 、单原子气体 $k=1.135$ 。

显然，气体的体积或比容随气体压力的增大而降低，随气体压力的降低而增大。

3. 气体的状态方程式 表明气体的温度、压力、体积的综合关系式称为气体的状态方程式。该式为

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{PV}{T} = R \quad (1-8)$$

式中 T_1, T_2, \dots, T ——气体的各绝对温度，K；

P_1, P_2, \dots, P ——气体的各绝对压力，公斤/米²；

V_1, V_2, \dots, V ——气体在各相应温度和相应压力下的比容，米³/公斤；

R ——气体常数，米/K，其值见表1-1所示。

在研究高压气体流动时常用此式表示气体的体积、温度、压力的关系。

4. 气体的重度 单位体积气体具有的重量称为气体的重度，用符号 γ 表示，单位是公斤/米³。气体重度是表示气体轻重

程度的物理参数。

常用气体的气体常数 R

表 1-1

气体名称	符 号	R (米/K)	气体名称	符 号	R (米/K)
空 气		29.27	水蒸汽	H ₂ O	47.10
氧 气	O ₂	26.52	一氧化碳	CO	30.30
氮 气	N ₂	30.13	二氧化碳	CO ₂	19.27
氢 气	H ₂	420.90	甲烷	CH ₄	53.00

当气体重量为 G 公斤，在标准状态下的体积为 V_0 米³ 时，则此气体在标准状态下的重度 γ_0 为

$$\gamma_0 = \frac{G}{V_0} \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-9a)$$

常用气体在标准状态下的重度 γ_0 如下表。

常用气体在标准状态下的 γ_0 值

表 1-2

气体名称	符 号	γ_0 (公斤/米 ³)	气体名称	符 号	γ_0 (公斤/米 ³)
空 气		1.293	一氧化碳	CO	1.251
氧 气	O ₂	1.429	二氧化碳	CO ₂	1.997
氮 气	N ₂	1.251	二氧化硫	SO ₂	2.927
氢 气	H ₂	0.0899	甲 烷	CH ₄	0.7168

冶金生产中常见的气体（如煤气、炉气等）都是由几种简单气体组成的混合气体。混合气体在标准状态下的重度可用下式计算

$$\gamma_{混} = \gamma_1 a_1 + \gamma_2 a_2 + \dots + \gamma_n a_n \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-9b)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ —— 各组成物在标准状态下的重度，公斤/米³；

a_1, a_2, \dots, a_n —— 各组成物在混合气体中的百分数，%。

〔例题1-1〕 某煤气的成分为：CO=27.4%；CO₂=10%；H₂=3.2%；N₂=59.4%。试求此煤气在标准状态下的重度？

解：由表1-2中查得各组成物在标准状态下的重度为： $\gamma_{\text{CO}} = 1.251$ 公斤/米³； $\gamma_{\text{CO}_2} = 1.997$ 公斤/米³； $\gamma_{\text{H}_2} = 0.0899$ 公斤/米³； $\gamma_{\text{N}_2} = 1.251$ 公斤/米³。将所查数值及各组成物成分代入式(1-9b)，则得此煤气在标准状态下的重度为

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{煤气}} &= \gamma_{\text{CO}} a_{\text{CO}} + \gamma_{\text{CO}_2} a_{\text{CO}_2} + \gamma_{\text{H}_2} a_{\text{H}_2} + \gamma_{\text{N}_2} a_{\text{N}_2} \\ &= 1.251 \times 0.274 + 1.997 \times 0.1 + 0.0899 \times 0.032 \\ &\quad + 1.251 \times 0.594 = 1.286 \text{公斤/米}^3 \end{aligned}$$

前已指出，气体的重度随其温度和压力的不同而有较大的变化，此为气体区别于液体的特性之一。下面分析这种变化。

(1) 气体重度随温度的变化。在标准大气压时，气体在 $t^\circ\text{C}$ 下的重量和体积分别为 G 和 V_t 时，则在 $t^\circ\text{C}$ 下气体的重度为

$$\gamma_t = \frac{G}{V_t} \text{公斤/米}^3 \quad (1-9c)$$

将式(1-6b)和式(1-9a)代入式(1-9c)可得

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + \beta t} \text{公斤/米}^3 \quad (1-10)$$

应当指出，此式也可用于低压气体。

显然，对一定 γ_0 的气体而言，其重度 γ 随着本身温度 t 的升高而降低。各种热气体的重度都小于常温下大气的重度，亦即设备内的热气体都轻于设备外的大气。此为设备内热气体的一个重要特点。此特点对研究气体基本方程有重要作用。

(2) 气体重度随压力的变化。气体重度 γ 是气体比容 V 的倒数，即

$$\gamma = \frac{1}{V} \text{公斤/米}^3 \quad (1-11)$$

因此，将式(1-11)分别代入式(1-7a)和式(1-7b)则得在恒温条件下和在绝热条件下的气体重度与气体绝对压力的关系式为

$$\frac{P_1}{\gamma_1} = \frac{P_2}{\gamma_2} = \dots = \frac{P}{\gamma} \quad (1-12a)$$

$$\frac{P_1}{\gamma_1^h} = \frac{P_2}{\gamma_2^h} = \dots = \frac{P}{\gamma^h} \quad (1-12b)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma$ ——在各相应压力下的气体重度，公斤/米³。

显然，气体重度随气体绝对压力的增加而增大，随绝对压力的降低而减小。

(3) 气体重度随气体温度和压力的变化。将式(1-11)代入式(1-8)内得气体重度随温度和压力的变化关系式为

$$\frac{P_1}{\gamma_1 T_1} = \frac{P_2}{\gamma_2 T_2} = \dots = \frac{P}{\gamma T} = R \quad (1-13)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma$ ——在各相应温度和各相应压力下的气体重度，公斤/米³。

上述分析表明，气体重度随气体温度和气体压力的不同都发生变化。气体重度随气体压力而变的特性称为气体的可压缩性。气体都具有可压缩性，此为气体的特性之一。

应当指出，冶金炉上的低压气体在流动过程中的压力变化多不超过1000毫米水柱，在此压力变化下的重度变化不超过10%。工程上常忽略这个变化，认为冶金炉上的低压气体属于不可压缩性气体。对被认为是不可压缩性气体的低压气体而言，气体重度不随压力而变，气体重度只随温度按式(1-10)的关系变化。

但是也应当指出，冶金炉上的高压气体在流动过程中的压力变化常超过1000毫米水柱，在此压力变化下的重度变化较大，因此，这些气体仍属于可压缩性气体。对于可压缩性气体而言，气体重度同时随气体温度和气体压力按式(1-13)的关系变化。

〔例题1-2〕 某气罐内压缩空气的表压为7大气压，实际温度为30°C。当实际大气压为1大气压时，此压缩空气的实际重度为多少？

解：压缩空气的绝对压力和绝对温度可分别按式(1-4)和式(1-1)计算如下

$$P_{绝} = P_{表} + P_{大气} = 7 + 1 = 8 \text{ 大气压} = 80000 \text{ 毫米水柱}$$

$$T = 273 + t = 273 + 30 = 303 \text{ K}$$

按式 (1-13) 可得压缩空气在实际温度和实际压力下的重度为

$$\gamma = \frac{P}{TR} = \frac{80000}{303 \times 29.27} = 9.02 \text{ 公斤/米}^3$$

5. 气体的密度 单位体积气体具有的质量称为气体的密度, 用符号 ρ 表示, 单位是公斤·秒²/米⁴。气体的密度也是表示气体轻重程度的物理参数。

当气体的质量为 m 公斤·秒²/米, 其标准状态下的体积为 V_0 米³时, 则气体在标准状态下的密度 ρ_0 为

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 \quad (1-14)$$

当重力加速度 $g = 9.8$ 米/秒²时, 气体的重量 G (公斤) 与气体的质量 m (公斤·秒²/米) 间存在如下的关系

$$G = mg \text{ 公斤} \quad (1-15)$$

根据式 (1-9a)、式 (1-14) 和式 (1-15) 可得气体在标准状态下重度和密度的关系为

$$\rho_0 = \frac{\gamma_0}{g} \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 \quad (1-16)$$

显然, 当 γ_0 已知时, 可用上式计算气体在标准状态下的密度 ρ_0 。

气体的密度也随气体的温度和气体的压力而变。将式 (1-10)、式 (1-12a)、式 (1-12b) 和式 (1-13) 中的重度 γ 代以密度 ρ , 则可求出气体密度随气体温度和气体压力的变化关系式。

习 题 1-1

1. 某低压煤气的温度为 $t = 527^\circ\text{C}$; 表压力为 $P_{\text{表}} = 10$ 毫米水柱; 煤气成分为 $\text{CO} = 70\%$, $\text{CO}_2 = 13\%$, $\text{N}_2 = 17\%$ 。试求:

- (1) 煤气的绝对温度为多少?
- (2) 当外界为标准大气压时, 煤气的绝对压力为多少?
- (3) 标准状态下煤气的重度和比容为多少?