

职业技术学校教学用书

# 冶金炉 热工基础

(第2版)

贺成林 主编

冶金工业出版社

职业技术学校教学用书

# 冶金炉热工基础

(第2版)

贺成林 编

北 京

冶金工业出版社

2004

**图书在版编目(CIP)数据**

冶金炉热工基础/贺成林编. —2版. —北京:冶金工业出版社,  
1990.5(2004.2重印)

ISBN 7-5024-0706-5

I. 冶… II. 贺… III. 冶金炉-热工学-专业学校-教材 IV. TF061.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 06430 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 程志宏

北京燕南印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1979 年 12 月第 1 版,1990 年 5 月第 2 版,2004 年 2 月第 11 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 20 印张; 478 千字; 312 页

29.50 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 第 2 版 前 言

本书是 1979 年出版的《冶金炉热工基础》的修订再版。《冶金炉热工基础》自 1979 年出版发行以来,经四次印刷受到广大读者欢迎。为使教材更适合于当前的需要,对原有内容进行了必要的充实和更新。

本次教材的修订内容是根据 1987 年在太原市召开的冶金类教材会议所制定的《冶金炉热工基础》课程教学大纲而编写的。总教学时数为 90~120 学时。可供职业技术学校冶金类专业作为教材使用。使用本书时,可结合各校专业的具体情况进行必要的调整和增删。本书还可作为冶金工厂工程技术人员、技术工人及技工学校师生的参考书。

本次修订的内容在下列几个方面作了一定努力和考虑:

1. 在保持初版的体系下,力求贯彻少而精的原则,在内容的叙述上尽力做到简明扼要,理论联系实际。充实一些必要的新内容,如简要介绍一些新型耐火材料。考虑到工厂节能的需要,在本次修订版中增加了冶金炉热能的合理利用一篇。

2. 为了有利于培养学生分析问题的能力和把理论用于解决实际问题的能力,增加了各章例题的数量。

3. 为便于学生复习巩固和自学,增加了每章所附思考题和习题的数量,在书后附有参考答案。

4. 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,力求作到完善。

5. 更新和补充了一部分插图,以利于学生直观理解。

本书由山西工程职业技术学院贺成林编写,修订稿完成后,有关学校进行讨论和审定,并提出了许多宝贵意见,在此表示诚恳的感谢。参加修订审稿的有长沙有色金属专科学校张诚仁、攀钢冶金工业学校曹晋明、北京钢铁学校乔东伟、河北省冶金工业学校潘丽明、内蒙古工业学校李富山。

限于编者学识水平,肯定会有错误和不妥之处,殷切希望使用本教材的教师和读者,多予批评和指正。

编 者

# 目 录

## 1 气体力学原理

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1.1 气体的主要物理性质和气体平衡方程式  | 1  |
| 1.1.1 气体的主要物理性质        | 1  |
| 1.1.2 阿基米德原理           | 10 |
| 1.1.3 气体平衡方程式          | 11 |
| 1.2 气体流动的动力学           | 14 |
| 1.2.1 流体流动的状态          | 14 |
| 1.2.2 运动气体的连续方程式       | 19 |
| 1.2.3 气体的能量            | 22 |
| 1.2.4 柏努利方程式           | 24 |
| 1.2.5 柏努利方程式和连续方程式应用实例 | 28 |
| 1.3 压头损失与气体输送          | 33 |
| 1.3.1 压头损失             | 33 |
| 1.3.2 烟囱排烟             | 44 |
| 1.3.3 炉子的供气系统          | 49 |
| 1.3.4 喷射器              | 60 |
| 1.4 压缩性气体的流出           | 65 |
| 1.4.1 压缩性气体流出的基本规律     | 65 |
| 1.4.2 管嘴的设计和计算         | 74 |
| 1.5 炉内气体流动             | 78 |
| 1.5.1 火焰炉内的气体流动        | 78 |
| 1.5.2 转炉内的气体流动         | 89 |
| 1.5.3 竖炉内的气体流动         | 91 |

## 2 燃料及燃烧

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 2.1 冶金企业常用燃料        | 97  |
| 2.1.1 概述            | 97  |
| 2.1.2 常用燃料的特性       | 97  |
| 2.1.3 常用燃料的种类、性质和用途 | 104 |
| 2.2 燃烧计算            | 110 |
| 2.2.1 概述            | 110 |
| 2.2.2 燃料燃烧的分析计算法    | 112 |
| 2.2.3 燃烧温度          | 122 |
| 2.2.4 空气消耗系数的计算     | 128 |
| 2.3 燃料燃烧            | 131 |
| 2.3.1 煤气燃烧          | 131 |

|             |     |
|-------------|-----|
| 2.3.2 重油的燃烧 | 146 |
| 2.3.3 粉煤的燃烧 | 151 |
| 2.3.4 块煤的燃烧 | 154 |

### 3 传热原理

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 3.1 稳定态导热                       | 159 |
| 3.1.1 导热的基本方程式 (傅立叶方程式)         | 159 |
| 3.1.2 导热系数                      | 159 |
| 3.1.3 平壁导热                      | 162 |
| 3.1.4 圆筒壁导热                     | 166 |
| 3.2 对流给热                        | 171 |
| 3.2.1 对流给热的类型和机理                | 171 |
| 3.2.2 对流给热的基本公式 (牛顿公式)          | 172 |
| 3.2.3 对流给热系数的确定, 及相似理论在对流给热中的应用 | 173 |
| 3.2.4 对流给热系数的若干实验公式             | 181 |
| 3.3 辐射传热                        | 192 |
| 3.3.1 热辐射的基本概念                  | 192 |
| 3.3.2 辐射的基本定律                   | 194 |
| 3.3.3 两物体间的辐射热交换                | 197 |
| 3.3.4 气体与固体间的辐射热交换              | 202 |
| 3.4 综合传热                        | 209 |
| 3.4.1 对流和辐射同时存在的综合传热            | 209 |
| 3.4.2 流体通过固体对另一流体的传热            | 210 |
| 3.4.3 火焰炉内传热                    | 213 |
| 3.4.4 竖炉内热交换                    | 216 |
| 3.5 金属加热 (冷却) 计算                | 219 |
| 3.5.1 不稳定态导热的一般特点               | 219 |
| 3.5.2 不稳态导热中的相似准数               | 220 |
| 3.5.3 炉温不变时薄材加热 (冷却) 计算         | 222 |
| 3.5.4 炉温不变时厚材加热 (冷却) 计算         | 223 |
| 3.5.5 物体表面温度不变时加热 (冷却) 计算       | 227 |

### 4 耐火材料

|                  |     |
|------------------|-----|
| 4.1 耐火材料的种类和性能   | 231 |
| 4.1.1 耐火材料的定义和分类 | 231 |
| 4.1.2 耐火材料的主要性能  | 232 |
| 4.2 硅酸铝质耐火材料     | 236 |
| 4.2.1 粘土质耐火材料    | 236 |
| 4.2.2 高铝质耐火材料    | 237 |
| 4.2.3 半硅质耐火材料    | 239 |
| 4.3 氧化硅质耐火材料     | 240 |
| 4.3.1 二氧化硅的结晶转变  | 240 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 4.3.2 硅砖的性质及用途·····         | 242 |
| 4.4 氧化镁质及其它碱性耐火材料·····      | 243 |
| 4.4.1 镁石质耐火材料·····          | 243 |
| 4.4.2 镁铝砖、镁铬砖和镁碳砖·····      | 245 |
| 4.4.3 白云石质耐火材料·····         | 247 |
| 4.5 其他耐火材料、散状耐火材料和隔热材料····· | 248 |
| 4.5.1 碳质耐火材料·····           | 248 |
| 4.5.2 散状耐火材料·····           | 249 |
| 4.5.3 隔热材料·····             | 254 |
| 4.5.4 耐火材料的选用·····          | 256 |

## 5 冶金炉热能的合理利用

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 5.1 炉子能源的合理选择·····       | 257 |
| 5.1.1 高炉燃料的选用·····       | 258 |
| 5.1.2 平炉燃料的选用·····       | 295 |
| 5.1.3 熔炼冰铜的反射炉燃料的选用····· | 260 |
| 5.2 节约燃料的途径·····         | 260 |
| 5.2.1 热平衡和燃料消耗·····      | 260 |
| 5.2.2 燃料的节约·····         | 268 |
| 5.3 余热利用·····            | 272 |
| 5.3.1 预热空气和煤气的作用·····    | 273 |
| 5.3.2 换热器·····           | 274 |
| 5.3.3 蓄热室·····           | 292 |
| 5.3.4 余热锅炉·····          | 295 |
| 5.3.5 汽化冷却·····          | 297 |
| 习题答案·····                | 301 |
| 附图·····                  | 304 |
| 附表·····                  | 307 |

# 1 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，还可利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，根据炉子生产的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密度差而产生的，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。本篇只介绍一些基本规律和基本原则。

## 1.1 气体的主要物理性质和气体平衡方程式

### 1.1.1 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，由于分子间的空隙比固体大，它们都不能保持一定的形状，因而具有固体所没有的一种性质——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。但是气体和液体又各自具有不同的特性。

在一般情况下，液体的体积和密度（每米<sup>3</sup>气体或液体具有的质量）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）。气体的体积和密度通常随温度和压力的变化较大，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密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。

液体的密度较大（如每米<sup>3</sup>水的质量为1000千克），所以液体在流动过程中基本不受周围大气的影 响。气体的密度较小（如每米<sup>3</sup>烟气的质量为1.3千克），而且与空气的密度相近（每米<sup>3</sup>空气的质量为1.293千克），所以气体在流动过程中受周围大气的影 响。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、密度等一些物理参数，这说明通过这些物理参数的变化反映了气体物理性质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。

### 1.1.1.1 气体的温度

气体的温度常用各种测温仪表来测量。要测出气体的温度,首先必须确定温标。所谓温标是指衡量温度高低的标尺,它规定了温度的起点(零点)和测量温度的单位。

目前国际上常用的温标有摄氏温标和绝对温标两种:

A 摄氏温标:又名百度温标,是我国使用最广泛的一种温标。这种温标规定:在标准大气压下(760mmHg)把纯水的冰点定为零度,沸点定为100度,在冰点与沸点之间等分为100个分格,每一格的刻度就是摄氏温度1度,用符号 $t$ 表示,其单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。此外,还可以用同样的间隔继续标示 $0^{\circ}\text{C}$ 以下和 $100^{\circ}\text{C}$ 以上的刻度。本书都采取摄氏温度( $^{\circ}\text{C}$ ),作为温度的单位。

B 绝对温标:即热力学温标,又名开尔文温标,用符号 $T$ 表示,其单位符号为K。这种温标是以气体分子热运动平均动能趋于零的温度为起点,定为0 K,并以水的三相点温度为基本定点,定为273.16K,于是1 K就是水三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}$ 。

绝对温标1 K与摄氏温标 $1^{\circ}\text{C}$ 的间隔是完全相同的。在一个标准大气压下,纯水冰点的热力学温度为273.15K,它比水的三相点热力学温度低0.01 K,水的沸点为373.15 K。绝对温标与摄氏温标的关系是

$$T = 273.15 + t \quad \text{K}$$

在不需要精确计算的情况下,可以近似地认为,同一气体的绝对温度比摄氏温度大273度,即

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

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

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

### 1.1.1.2 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,亦即在物理意义上相当于物理学上的压强。

#### A 压力的单位

在工程单位制即米制中,气体的压力大小有以下三种表示方法:

a 以单位面积上所受的作用力来表示,例如公斤/厘米<sup>2</sup> ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) 或公斤/米<sup>2</sup> ( $\text{kgf}/\text{m}^2$ )。

b 用液柱高度来表示,例如米水柱 ( $\text{mH}_2\text{O}$ )、毫米水柱 ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) 和毫米汞柱 ( $\text{mmHg}$ )。

c 用大气压来表示。地球表面包围着一层厚达几百公里的大气层。大气重量对地球表面上所造成的压力称为大气压力,常用单位是mmHg。大气压力的数值随着所在地区海

拔高度的升高而降低，也就是说，海拔越高，空气越稀薄，大气压力也就越低。就是在同一地区，大气压力的数值也因季节、晴雨等气候变化而稍有差异。

国际上规定，将纬度45°海平面上测得的全年平均大气压力760mmHg定为一个标准大气压，或者称为物理大气压，它与其他压力单位的换算关系是：

$$\begin{aligned} 1 \text{标准大气压 (atm)} &= 760 \text{mmHg} \\ &= 1.0332 \text{kgf/cm}^2 \\ &= 10332 \text{kgf/m}^2 \\ &= 10332 \text{mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$

工程上为了计算方便，规定1kgf/cm<sup>2</sup>作为一个工程大气压，简称气压 (at)，于是：

$$\begin{aligned} 1 \text{工程大气压 (at)} &= 1 \text{kgf/cm}^2 \\ &= 10000 \text{kgf/m}^2 \\ &= 10 \text{mH}_2\text{O} \\ &= 10000 \text{mmH}_2\text{O} \\ &= 735.6 \text{mmHg} \end{aligned}$$

由此可得

$$\begin{aligned} 1 \text{mmH}_2\text{O} &= 1 \text{kgf/m}^2 \\ 1 \text{mmHg} &= 13.6 \text{mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$

应当注意，“标准大气压”和“工程大气压”都是压力的计量单位，不要与所在地区的实际大气压相混淆。在高压容器中，气体的压力相当高，往往是几倍或几十倍于大气压的，因此，对这些设备中气体的压力计量单位通常用工程大气压表示。通风机的送风压力、风道和烟道中气体的压力较小，通常用毫米水柱表示。在实际工程中提到的大气压，除了特别注明是物理大气压外，一般都是指工程大气压。

在国际单位制中，压力的单位是帕斯卡，简称帕，其代号为Pa。1帕斯卡是指1平方米表面上作用1牛顿 (N) 的力，即

$$1 \text{Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

由于帕斯卡的数值较小，它的1000倍称为千帕斯卡 (kPa)

$$1 \text{kPa} = 1000 \text{ N/m}^2$$

它的百万倍称为兆帕斯卡 (MPa)  $1 \text{MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$

米制与国际单位制压力换算关系如下：

$$\begin{aligned} 1 \text{标准大气压} &= 1.0332 \text{kgf/cm}^2 = 101325 \text{Pa} = 101.325 \text{kPa} \\ &= 0.101325 \text{MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{工程大气压} &= 1.0 \text{kgf/cm}^2 = 98066 \text{Pa} = 98.066 \text{kPa} \\ &= 0.098066 \text{MPa} \end{aligned}$$

$$1 \text{mH}_2\text{O} = 9806.6 \text{Pa} = 9.8066 \text{kPa}$$

$$1 \text{mmH}_2\text{O} = 9.8066 \text{Pa} \approx 9.81 \text{Pa}$$

#### B 气体的压力与温度的关系

气体的压力与温度密切相关，实验研究指出：当一定质量的气体其体积保持不变（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  $t$  °C 和 0 °C 时气体的压力；

$\beta$ ——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  $\frac{1}{273}$ 。

### C 绝对压力和表压力

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101325Pa）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。

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，负压那部分的数值，称为真空度。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，当气体压力高于大气压力时如图1-1所示，当气体压力低于大气压力时如图1-2所示。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。

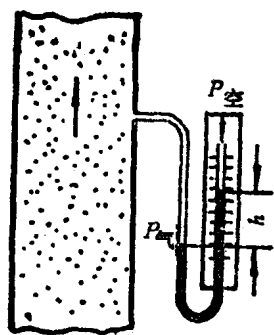


图 1-1 当气体压力高于大气压力时测量气体压力

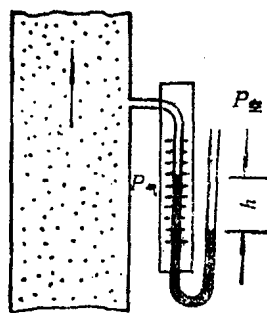


图 1-2 当气体压力低于大气压力时测量气体压力

#### 1.1.1.3 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。冶金炉内常以每千克质量气体所具有的体积表示气体体积的大小。每千克气体具有的体积称为气体的比容，用符号  $v$  表示，单位是  $m^3/kg$ 。

气体体积随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。

#### A 气体体积与温度关系

1千克质量的气体，在恒压条件下，其体积与其绝对温度成正比，即

$$\frac{v_0}{T_0} = \frac{v_t}{T_t} \quad (1-5a)$$

式中  $T_0$ ——0℃时气体的绝对温度，K；

$T_t$ —— $t$ ℃时气体的绝对温度，K；

$v_0$ ——标准状态下1千克气体的体积， $m^3$ ；

$v_t$ ——压力为101325Pa温度为 $t$ ℃时1千克气体的体积， $m^3$ 。

设 $V$ 代表 $m$ 千克质量气体的体积，上式两端同乘以 $m$ ，则可得

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

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

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

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

$$V_t = V_0 (1 + \beta t) \quad m^3 \quad (1-6b)$$

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。

#### B 气体体积与压力的关系

1千克质量的气体，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，Pa或 $N/m^2$ ；

$v_1, v_2, \dots, v$ ——各相应压力下气体的比容， $m^3/kg$ 。

同理对 $m$ 千克质量气体可得

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

式中  $V_1, V_2, \dots, V$ ——各相应压力下 $m$ 千克气体的体积， $m^3$ 。

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。

#### C 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。对于1千克理想气体的状态方程式为

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \dots = \frac{Pv}{T} = R \quad (1-8a)$$

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， $N/m^2$ ；

$v_1, v_2, \dots, v$ ——气体在各相应温度和相应压力下的比容， $m^3/kg$ ；

$R$ ——气体常数， $J/kg \cdot K$ 。

在国际单位制中，压力的单位是Pa[ $N/m^2$ ]，比容的单位是[ $m^3/kg$ ]，温度 $T$ 的单位是[K]，功的单位是焦耳，用符号J表示，即 $1J = N \cdot m$ 。所以，气体常数 $R$ 的单位是

$$R = \frac{Pv}{T} = \frac{[N/m^2][m^3/kg]}{[K]} = J/kg \cdot K$$

〔例题1-1〕 若空气在标准状态时的比容为 $0.773\text{m}^3/\text{kg}$ ，求空气的气体常数 $R$ 为多少。

解：由式(1-8a)将标准状态的数值代入得

$$R = \frac{P_0 v_0}{T_0} = \frac{101325 \times 0.773}{273} = 287.33 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$R$ 的物理意义是，1千克质量的气体在定压下，加热升高1度时所做的膨胀功。对于空气来说，此膨胀功数值为 $287.33\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ，为简便起见，一般忽略小数而取 $R$ 为 $287\text{J/kg} \cdot \text{K}$ 。各种气体常数数值见表1-1。

常用气体的气体常数 $R$

表 1-1

| 气体名称 | 符 号          | $R(\text{J/kg} \cdot \text{K})$ | 气体名称 | 符 号                  | $R(\text{J/kg} \cdot \text{K})$ |
|------|--------------|---------------------------------|------|----------------------|---------------------------------|
| 空 气  |              | 287.0                           | 水蒸汽  | $\text{H}_2\text{O}$ | 461.5                           |
| 氧 气  | $\text{O}_2$ | 259.8                           | 一氧化碳 | $\text{CO}$          | 296.8                           |
| 氮 气  | $\text{N}_2$ | 296.8                           | 二氧化碳 | $\text{CO}_2$        | 188.9                           |
| 氢 气  | $\text{H}_2$ | 4124.0                          | 甲 烷  | $\text{CH}_4$        | 511.6                           |

如果气体的质量不是1千克而是 $m$ 千克，可将方程式(1-8a)的各项分别乘以气体的质量 $m$ ，这时气体的体积 $mv$ 用 $V$ 表示，则可得到适用于 $m$ 千克气体的状态方程式

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

当已知 $P$ 、 $V$ 、 $T$ 三个参数时，可按式(1-8b)计算出气体的质量 $m$ 。

在国际单位制中，1克分子量叫做1摩尔(mol)，1千克分子量叫做1千摩尔(kmol)。例如氧气( $\text{O}_2$ )的分子量是32，则32g氧称为1mol，32kg氧称为1kmol。实验证明，在标准状态下，理想气体的每千摩尔体积或称千克分子体积都等于22.4标准米<sup>3</sup>，如以 $M$ 表示气体的分子量 $\text{kg/kmol}$ ，即

$$Mv_0 = 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

针对1kmol的气体，可以写出它的状态方程式，即在气体状态方程式各项分别乘以 $M$

$$PvM = MRT \quad (1-8c)$$

将标准状态下的压力、温度和摩尔体积数值代入式(1-8c)中，得

$$MR = \frac{P_0 Mv_0}{T_0} = \frac{101325 \times 22.4}{273} = 8313.84\text{J/kmol} \cdot \text{K} \approx 8314\text{J/kmol} \cdot \text{K}$$

这个 $MR$ 称为通用气体常数(或摩尔气体常数)，对于所有理想气体，其数值都等于8314。

〔例题1-2〕 某压缩空气贮气罐，压力表读数为7气压(at)、温度计读数为25℃，贮气罐的体积为3m<sup>3</sup>，当地大气压力取为1气压(at)，试求罐内空气的重量。

解：根据公式(1-8b)，压缩空气的质量为

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{(7+1) \times 10^4 \times 9.81 \times 3}{287 \times (273+25)} = 27.53 \text{ kg}$$

则罐内空气的重量为

$$G = mg = 27.53 \times 9.81 = 270 \text{ N}$$

【例题1-3】 某封闭容器内贮有压缩空气，用压力表测得：当大气压为745 mm Hg时，压力表上读数为2气压 (at)。若大气压改变为770 mm Hg时，压力表上读数为多少？

解： 由公式 (1-4)  $P_{\text{绝}} = P_{\text{表}} + P_{\text{大气}}$

由于大气压力改变时容器内压缩空气的状态没有发生变化，即容器内空气的绝对压力  $P_{\text{绝}}$  是个常数，仅仅是由于  $P_{\text{大气}}$  不同而使压力表上的读数发生变化。现将  $P_{\text{表}1}$  和  $P_{\text{表}2}$  表示压力表示值在变化前后的读数，则，

$$P_{\text{表}1} + P_{\text{大气}1} = P_{\text{表}2} + P_{\text{大气}2}$$

即

$$P_{\text{表}2} = P_{\text{表}1} + P_{\text{大气}1} - P_{\text{大气}2} = 2 + \frac{745}{735.6} - \frac{770}{735.6} = 1.97 \text{ at}$$

【例题1-4】 在一煤气表上读得煤气的消耗量是683.7 m<sup>3</sup>。在使用期间煤气表的平均表压力是44 mm H<sub>2</sub>O，其温度平均为17℃。大气压力平均为100249 Pa。求：

(1) 相当于消耗了多少标准 m<sup>3</sup> 的煤气？

(2) 如煤气压力降低至30 mm H<sub>2</sub>O，问此时同一煤气耗用量的读数相当于多少标准 m<sup>3</sup>？

(3) 煤气温度变化时，对煤气流量的测量有何影响，试以温度变化30℃为例加以说明？

解： 由公式 (1-8b)，已知  $V_1 = 683.7 \text{ m}^3$ ， $P_{\text{表}1} = 44 \text{ mm H}_2\text{O}$ ， $T_1 = 17 + 273 = 290 \text{ K}$ ， $P_{\text{大气}} = 100249 \text{ Pa}$

$$(1) V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_1} = 683.7 \times \frac{(100249 + 44 \times 9.81)}{101325} \cdot \frac{273}{290} = 639.53 \text{ m}^3$$

(2) 已知  $P_{\text{表}1} = 30 \text{ mm H}_2\text{O}$ ， $T_1 = 290 \text{ K}$

$$V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_1} = 683.7 \times \frac{(100249 + 30 \times 9.81)}{101325} \cdot \frac{273}{290} = 638.66 \text{ m}^3$$

(3) 已知  $P_{\text{表}1} = 44 \text{ mm H}_2\text{O}$ ， $t_1 = 30^\circ\text{C}$  (即  $T_1 = 303 \text{ K}$ )

$$V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_1} = 683.7 \times \frac{(100249 + 44 \times 9.81)}{101325} \cdot \frac{273}{303} = 612.09 \text{ m}^3$$

通过上述计算看出，温度变化时，对流量的测量影响比较大。而压力变化时则影响比较小。

#### 1.1.1.4 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  $\rho$  表示，单位是 kg/m<sup>3</sup>。气体密度是表示气体轻重程度的物理参数。

当气体的质量为  $m \text{ kg}$ ，其标准状态下的体积为  $V_0 \text{ m}^3$  时，则气体在标准状态下的密度  $\rho_0$  为

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \text{ kg/m}^3 \quad (1-9a)$$

常用气体在标准状态下的密度  $\rho_0$  见表1-2。

单位质量的气体所占有的体积称为气体的比容，用符号  $v$  表示，单位是 m<sup>3</sup>/kg。显然，比容与密度互为倒数，即

常用气体在标准状态下的 $\rho_0$ 值和 $\gamma_0$ 值

表1-2

| 气体名称 | 符 号            | $\rho_0$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_0$<br>(N/m <sup>3</sup> ) | 气体名称 | 符 号             | $\rho_0$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_0$<br>(N/m <sup>3</sup> ) |
|------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|------|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 空 气  |                | 1.293                            | 12.684                            | 一氧化碳 | CO              | 1.251                            | 12.272                            |
| 氧 气  | O <sub>2</sub> | 1.429                            | 14.019                            | 二氧化碳 | CO <sub>2</sub> | 1.997                            | 19.591                            |
| 氮 气  | N <sub>2</sub> | 1.251                            | 12.272                            | 二氧化硫 | SO <sub>2</sub> | 2.927                            | 28.714                            |
| 氢 气  | H <sub>2</sub> | 0.0899                           | 0.882                             | 甲 烷  | CH <sub>4</sub> | 0.7168                           | 7.032                             |

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-9b)$$

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密度可用下式计算

$$\rho_{\text{混}} = \rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 + \cdots + \rho_n a_n \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-9c)$$

式中  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——各组成物在标准状态下的密度, kg/m<sup>3</sup>;

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

〔例题1-5〕 某煤气的成分为: CO=27.4%; CO<sub>2</sub>=10%; H<sub>2</sub>=3.2%; N<sub>2</sub>=59.4%。试求此煤气在标准状态下的密度?

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

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

前已指出, 气体的密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。

#### A 气体密度随温度的变化

在标准大气压时, 气体在  $t$  °C 下的质量和体积分别为  $m$  和  $V_t$  时, 则在  $t$  °C 下气体的密度为

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-9d)$$

将式 (1-6b) 和式 (1-9a) 代入式 (1-9d) 可得

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-10)$$

应当指出, 此式也可用于低压气体。

显然, 对一定  $\rho_0$  的气体而言, 其密度  $\rho_t$  随着本身温度  $t$  的升高而降低。各种热气体的密度都小于常温下大气的密度, 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。

#### B 气体密度随压力的变化

将式 (1-9b) 代入式 (1-7a) 则得在恒温条件下的气体密度与气体绝对压力的关系式

为

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} = \dots = \frac{P}{\rho} \quad (1-11)$$

式中  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho$ ——在各相应压力下的气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

显然, 气体密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。

C 气体密度随气体温度和压力的变化

将式 (1-9 b) 代入式 (1-8 a) 内得气体密度随温度和压力的变化关系式为

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2} = \dots = \frac{P}{\rho T} = R \quad (1-12)$$

式中  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho$ ——在各相应温度和各相应压力下的气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

上述分析表明, 气体密度随气体温度和气体压力的不同都发生变化。气体密度随气体压力而变化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 9810 Pa, 在此压力变化下的密度变化不超过 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, 气体密度不随压力而变, 气体密度只随温度按式 (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 9810 Pa, 在此压力变化下的密度变化较大, 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, 气体密度同时随气体温度和气体压力按式 (1-12) 的关系变化。

〔例题 1-6〕某气罐内压缩空气的表压为 7 大气压 (at), 实际温度为 30℃。当实际大气压为 1 大气压 (at) 时, 此压缩空气的实际密度为多少?

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

$$P_{\text{绝}} = P_{\text{表}} + P_{\text{大气}} = 7 + 1 = 8 \text{ 大气压} = 784800 \text{ Pa}$$

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

按式 (1-12) 可得压缩空气在实际温度和实际压力下的密度为

$$\rho = \frac{P}{T R} = \frac{784800}{303 \times 287} = 9.03 \text{ kg}/\text{m}^3$$

#### 1.1.1.5 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  $\gamma$  表示, 单位是  $\text{N}/\text{m}^3$ 。气体重度也是表示气体轻重程度的物理参数。

当气体重量为  $G$  牛顿, 在标准状态下的体积为  $V_0$  米<sup>3</sup>时, 则此气体在标准状态下的重度  $\gamma_0$  为

$$\gamma_0 = \frac{G}{V_0} \text{ N}/\text{m}^3 \quad (1-13)$$

当重力加速度  $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$  时, 气体的重量  $G$  (N) 与气体的质量  $m$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 间存在如下的关系

$$G = mg \text{ N} \quad (1-14)$$

根据式 (1-9 a)、式 (1-13) 和式 (1-14) 可得气体在标准状态下密度和重度的关系为



$$\gamma_0 = \rho_0 g \quad \text{N} \quad (1-15)$$

显然, 当 $\rho_0$ 已知时, 可用上式计算气体在标准状态下的重度 $\gamma_0$ 。

气体的重度也随气体的温度和气体的压力而变。将式(1-10), 式(1-11) 和式(1-12) 中的密度 $\rho$ 代以重度 $\gamma$ , 则可求出气体重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 $P_{\text{表}} = 10\text{mmHg}$ , 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Pa?
- (3) 标准状态下煤气的密度和比容为多少?
- (4) 实际状态下煤气的密度和比容为多少?

2. 重油喷枪以空气做雾化剂时, 将空气压缩至绝对压力为7个大气压, 并预热至 $300^\circ\text{C}$ 。求这时空气的密度。

3. 今有一台离心式通风机, 在工业标准状态下即压力为 $760\text{mmHg}$ , 温度为 $20^\circ\text{C}$ 时, 其风量为 $30000\text{m}^3/\text{h}$ , 如果这台风机在空气温度为 $27^\circ\text{C}$ 和大气压力为 $745\text{mmHg}$ 下工作, 试求此时风机输送空气的质量比它在工业标准状态下改变了多少?

4. 一容积为 $4\text{m}^3$ 的容器充有绝对压力1个工程大气压, 温度为 $20^\circ\text{C}$ 的空气, 抽气后容器的真空度为 $700\text{mmHg}$ , 当时当地大气压为1个工程大气压, 求:

- (1) 抽气后容器内气体的绝对压力为多少Pa?
- (2) 抽气后容器内空气的质量多少kg?
- (3) 必须抽走多少kg的空气, 才能保证容器中真空度为 $700\text{mmHg}$ ?

5. 水银压力计中混进了一个空气泡, 因此, 它的读数比实际的气压小, 当精确的气压计的读数为 $768\text{mmHg}$ 时, 它的读数只有 $748\text{mmHg}$ , 此时管内水银面到管顶的距离为 $80\text{mm}$ , 若气压的读数为 $734\text{mmHg}$ 时, 求实际气压, 设空气的温度保持不变。

6. 质量为 $1.2\text{kg}$ 的空气, 在80个工程大气压下其体积为 $0.08\text{m}^3$ , 求该状态下的温度、千摩尔质量、比容及千摩尔体积各为多少?

7. 有一台鼓风机, 当外界处于标准状态时, 每小时能输送 $300\text{m}^3$ 的空气, 如果外界空气温度上升至 $t_2 = 27^\circ\text{C}$ , 大气压力仍为 $760\text{mmHg}$ , 此时鼓风机送风量仍为 $300\text{m}^3/\text{h}$ , 试求此鼓风机输送空气的质量变化了多少kg?

8. 某工厂有一条新安装的煤气管道, 为了检查其是否漏气, 需要进行密封试验。其方法是, 将 $P_1 = 15\text{at}$ ,  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ 的空气送入系统, 然后将管道封死, 过一天后, 测得温度 $t_2 = 27^\circ\text{C}$ , 如无漏气现象, 试问系统压力降低到多大?

9. 引风机入口处流过的烟气量为 $4 \times 10^5\text{m}^3/\text{h}$ , 此处负压为 $300\text{mmHg}$ , 烟气的温度为 $130^\circ\text{C}$ , 试求此烟气量在标准状态下的体积(当地大气压力为 $755\text{mmHg}$ )。

10. 进入锅炉空气预热器的风量为 $2000\text{m}^3/\text{h}$ , 温度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , 设在定压条件下将空气加热至 $t_2 = 300^\circ\text{C}$ , 试求每小时由空气预热器流出的风量是多少 $\text{m}^3$ ?

### 1.1.2 阿基米德原理

对固体和液体而言, 阿基米德原理的内容可表达如下: 固体在液体中所受的浮力, 等于所排开同体积该液体的重量。此原理同样亦适用于气体。

设有一倒置的容器, 如图1-3所示, 高为 $H$ , 截面积为 $f$ , 容器内盛满热气(密度为