

高等学校教学用书

# 冶金炉热工基础

冶金工业出版社

091

高等学校教学用书

# 冶金炉热工基础

重庆大学 刘人达 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书  
**冶金炉热工基础**  
重庆大学 刘人达 主编

\*

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

\*

787×1092 1/16 印张 33 3/4 字数 806 千字  
1980年7月第一版 1980年7月第一次印刷  
印数00,001~10,000册  
统一书号: 15062·3530 定价 3.45 元

## 前 言

《冶金炉热工基础》是根据冶金工业部一九七八年教材工作会议制订的钢铁、有色冶炼等专业教学计划进行编写的教材。本书着重阐述炉子热工的基本理论和计算原理，并注意反映国内外先进科学技术成就。本书内容包括气体力学及相似原理、传热及传质、燃料及燃烧和耐火材料等四部分。前两部分作为重点。

参加本书编写工作的有重庆大学刘人达（气体力学及相似原理篇）缪徵德（耐火材料篇）、西安冶金建筑学院蔡冶生（燃料及燃烧篇）和中南矿冶学院梅炽（传热及传质篇）等。刘人达任主编。北京钢铁学院邱国仕、张玉明校审。本书初稿写成后由参加编写和校审的院校有关教师进行审阅、讨论和修改，最后由主编和校审单位定稿。

本书虽经几次讨论修改，但由于时间短促以及编者的水平有限，缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

本书供高等工科院校钢铁及有色冶炼专业教学使用。各专业根据自己的要求，对本书的内容和重点可作适当取舍。本书也可供从事冶金炉热工技术工作者参考。

编 者

## 序 言

冶金炉热工是研究熔炼炉内进行的各种热工过程（如气体流动、热交换和燃烧过程）的一门技术科学。炉子热工理论是以物理学和化学作为基础，但又不是单纯研究物理和化学中的气体力学、传热学和燃烧学等类的问题，而是在这些理论上发展起来的一门综合技术科学。它是应用这些理论，研究冶金炉内进行着的各种热工过程以及这些过程计算的一般原理。

应用炉子热工理论和先进的热工技术，不断改进炉子的热工作，对提高产品产量和质量，降低消耗，节约能源，改善劳动条件和解决环境污染，促进冶金工业迅速发展有着十分重要的意义。

近二十年来，世界上钢铁和有色金属冶炼的热工技术及工艺设备，有了很大发展，如高炉大型化、氧气转炉炼钢、喷吹技术、连续铸锭以及用电子计算机控制炉子热工及工艺过程，实现冶金生产自动化等新工艺、新技术已广泛采用，使冶炼工艺和热工技术的关系更加密切。因此从事钢铁和有色金属冶炼的科技人员，必须学习和掌握冶金炉热工的基本理论和基本知识。《冶金炉热工基础》是钢铁及有色金属冶炼专业学生必修的课程。本书着重介绍熔炼炉内气体运动和热交换过程的基本定律、基本理论和计算原理以及燃料的燃烧原理和计算方法。通过学习，使学生能应用所学的物理、化学知识分析炉内冶炼过程的气体流动和传热、传质现象，提高分析和解决炉内热工技术问题的能力。为进一步学好专业课程和从事冶金科学技术工作打下热工理论基础。

本课程是基础课和专业课之间的桥梁，数学、物理是本课程的基础。本书一至三篇均附有习题，通过解题运算，可进一步加深对所学热工理论的理解和应用。

# 目 录

|    |    |
|----|----|
| 序言 | VI |
|----|----|

## 第一篇 气体力学及相似原理

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 气体的基本参数            | 2  |
| 第一节 气体的重度和密度           | 2  |
| 第二节 气体体积与温度的关系         | 3  |
| 第三节 气体体积与压力的关系         | 3  |
| 第四节 气体的状态方程            | 3  |
| 第五节 气体的粘度              | 4  |
| 第二章 气体静力学基础            | 6  |
| 第一节 作用在气体上的力           | 6  |
| 第二节 静止气体具有的能量          | 7  |
| 第三节 气体平衡方程式            | 8  |
| 第四节 在大气作用下热气体表压力沿高度的变化 | 9  |
| 第三章 气体运动的基本方程          | 11 |
| 第一节 基本概念               | 11 |
| 第二节 连续性方程式             | 13 |
| 第三节 理想气体的流动方程式         | 15 |
| 第四节 粘性气体的流动方程式         | 17 |
| 第五节 柏奴里方程式             | 17 |
| 第六节 欧拉冲量方程式            | 22 |
| 第四章 气体流动的性质及压头损失       | 24 |
| 第一节 层流和紊流              | 24 |
| 第二节 管道内的速度分布           | 25 |
| 第三节 边界层                | 27 |
| 第四节 摩擦阻力引起的压头损失        | 28 |
| 第五节 局部阻力引起的压头损失        | 31 |
| 第六节 特殊阻力引起的压头损失        | 34 |
| 第七节 供气管道和排烟烟道内的压头损失    | 44 |
| 第五章 气体的流出              | 49 |
| 第一节 非压缩性气体的流出          | 49 |
| 第二节 压缩性气体的流出           | 54 |
| 一、绝热条件下的气体参数           | 54 |
| 二、气体的音速                | 56 |
| 三、气体的马赫数               | 57 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 四、压缩性气体流出的能量方程     | 59  |
| 五、压缩性气体从容器中流出时的速度  | 60  |
| 六、亚音速流与超音速流的差异     | 61  |
| 七、超音速气流的临界参数       | 64  |
| 八、压缩性气体流出的参数比      | 66  |
| 九、压缩性气体流出的有效断面比    | 66  |
| 十、压缩性气体流出的流量计算     | 68  |
| 十一、压缩性气体喷管的设计计算    | 70  |
| 十二、激波和膨胀波          | 77  |
| 十三、喷管的工作特性         | 80  |
| 第六章 风机             | 84  |
| 第一节 离心式通风机         | 84  |
| 第二节 离心式鼓风机         | 96  |
| 第三节 回转式鼓风机         | 97  |
| 第七章 烟囱             | 101 |
| 第一节 烟囱的工作原理        | 101 |
| 第二节 烟囱计算           | 102 |
| 第八章 喷射器            | 107 |
| 第一节 喷射器的基本原理       | 107 |
| 第二节 喷射器效率分析及合理尺寸确定 | 111 |
| 第三节 喷射器的应用及计算      | 114 |
| 第九章 射流             | 120 |
| 第一节 自由射流的基本规律      | 120 |
| 第二节 两自由射流相遇        | 125 |
| 第三节 同心射流的混合        | 127 |
| 第四节 射流与平壁相遇        | 129 |
| 第五节 弯曲管道中射出的射流     | 131 |
| 第六节 限制射流的特点        | 132 |
| 第七节 超音速紊流自由射流的特点   | 136 |
| 第十章 炉内的气体流动        | 140 |
| 第一节 火焰熔炼炉内的气体流动    | 140 |
| 第二节 转炉内的气体流动       | 144 |
| 第三节 竖炉内的气体流动       | 147 |
| 第四节 流化炉内的气体流动      | 154 |
| 第十一章 气力输送          | 164 |
| 第一节 球形颗粒的极限下落速度    | 164 |
| 第二节 水平管道内的气力输送     | 168 |
| 第三节 垂直管道内的气力输送     | 173 |
| 第四节 气力输送中的压力降      | 175 |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第十二章 相似原理 ..... | 179 |
| 第一节 相似的概念 ..... | 179 |
| 第二节 单值条件 .....  | 181 |
| 第三节 相似准数 .....  | 181 |
| 第四节 相似三定理 ..... | 187 |
| 第五节 模型实验 .....  | 192 |
| 习 题 .....       | 198 |
| 附 录 .....       | 203 |

## 第二篇 传热与传质

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第十三章 传热概论及稳定态传导传热 .....     | 223 |
| 第一节 传热概论 .....              | 223 |
| 第二节 稳定态传导传热 .....           | 225 |
| 一、导热的基本定律 .....             | 225 |
| 二、导热系数及不同物质的导热机理 .....      | 225 |
| 三、平壁导热 .....                | 229 |
| 四、圆筒壁导热 .....               | 235 |
| 五、球壁导热 .....                | 238 |
| 六、空心六面体的导热 .....            | 239 |
| 七、接触热阻 .....                | 240 |
| 第十四章 对流给热 .....             | 242 |
| 第一节 对流给热的类型与机理 .....        | 242 |
| 第二节 牛顿公式与对流给热系数 .....       | 243 |
| 第三节 对流给热过程的微分方程及热相似准数 ..... | 243 |
| 第四节 对流给热的准数方程 .....         | 247 |
| 第五节 自然对流给热 .....            | 250 |
| 第六节 紊流下强制对流给热 .....         | 252 |
| 第七节 紊流时热量传递与动量传递的类似 .....   | 259 |
| 第八节 层流及过渡流中的强制对流给热 .....    | 264 |
| 第九节 液态金属给热 .....            | 267 |
| 第十节 沸腾及冷凝过程的给热 .....        | 268 |
| 第十五章 辐射传热 .....             | 272 |
| 第一节 热辐射的基本概念 .....          | 272 |
| 第二节 黑体、白体和透热体 .....         | 273 |
| 第三节 黑体辐射的基本定律 .....         | 274 |
| 第四节 灰体及实际物体的辐射与吸收 .....     | 276 |
| 第五节 辐射能在空间的分布 .....         | 282 |
| 第六节 两表面构成封闭体系时的辐射热交换 .....  | 287 |
| 第七节 通过孔口的辐射 .....           | 293 |



|      |                          |     |
|------|--------------------------|-----|
| 第八节  | 气体的辐射与吸收 .....           | 295 |
| 第九节  | 气体及火焰黑度 .....            | 297 |
| 第十节  | 气体与通道壁间的辐射热交换 .....      | 301 |
| 第十六章 | 稳定态综合传热 .....            | 304 |
| 第一节  | 气体与表面间的热交换 .....         | 304 |
| 第二节  | 火焰炉内的综合传热 .....          | 305 |
| 第三节  | 通过间壁的传热 .....            | 311 |
| 第四节  | 换热器的传热计算及换热器工作的强化 .....  | 316 |
| 第五节  | 散料层内的热交换 .....           | 328 |
| 第六节  | 流化床内的热交换 .....           | 334 |
| 第十七章 | 不稳定态导热计算 .....           | 341 |
| 第一节  | 不稳定态导热过程的特点及其求解方法 .....  | 341 |
| 第二节  | 分析解法及单值条件 .....          | 341 |
| 第三节  | 表面温度为常数时半无限厚平板的加热 .....  | 343 |
| 第四节  | 表面温度为常数时有限厚物体的加热 .....   | 346 |
| 第五节  | 通过表面传热速率为常数时物体的加热 .....  | 349 |
| 第六节  | 周围介质温度为常数时的加热与冷却 .....   | 351 |
| 第七节  | 周围介质温度为常数时薄材的加热与冷却 ..... | 355 |
| 第八节  | 蓄热室传热计算 .....            | 359 |
| 第九节  | 凝固或熔化过程的导热 .....         | 364 |
| 第十八章 | 传质 .....                 | 368 |
| 第一节  | 传质的基本概念 .....            | 368 |
| 第二节  | 传导传质——分子扩散过程 .....       | 368 |
| 第三节  | 对流传质 .....               | 374 |
| 第四节  | 通过相界面的传质 .....           | 384 |
| 习 题  | .....                    | 390 |
| 附 录  | .....                    | 396 |

### 第三篇 燃料及燃烧

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 第十九章  | 概述 .....              | 407 |
| 第二十章  | 燃料的特性 .....           | 409 |
| 第一节   | 燃料的化学组成 .....         | 409 |
| 第二节   | 燃料的发热量及计算 .....       | 414 |
| 第三节   | 冶金生产中常用燃料的特性和用途 ..... | 416 |
| 第四节   | 燃料选用的一般原则 .....       | 423 |
| 第二十一章 | 燃烧计算 .....            | 425 |
| 第一节   | 燃料燃烧的分析计算法 .....      | 425 |
| 第二节   | 空气消耗系数 .....          | 433 |
| 第三节   | 燃烧温度 .....            | 438 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第二十二章 燃料的燃烧及燃烧装置 ..... | 443 |
| 第一节 气体燃料的燃烧 .....      | 443 |
| 一、气体燃料的燃烧过程 .....      | 443 |
| 二、气体燃料的燃烧方法 .....      | 449 |
| 三、气体燃料的燃烧装置——烧嘴 .....  | 454 |
| 第二节 液体燃料的燃烧 .....      | 463 |
| 一、重油燃烧过程的基本原理 .....    | 463 |
| 二、重油燃烧方法与重油燃烧装置 .....  | 467 |
| 三、油渗水乳化燃烧方法简介 .....    | 474 |
| 四、重油喷嘴的计算 .....        | 474 |
| 第三节 固体燃料的燃烧 .....      | 477 |
| 一、块煤的燃烧 .....          | 477 |
| 二、粉煤的燃烧 .....          | 480 |
| 第四节 燃料的合理使用 .....      | 485 |
| 习 题 .....              | 487 |

#### 第四篇 耐火材料

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第二十三章 概述 .....            | 489 |
| 第二十四章 耐火材料的一般性质 .....     | 493 |
| 第一节 耐火材料的化学矿物组成 .....     | 493 |
| 第二节 耐火材料的物理性质 .....       | 493 |
| 第三节 耐火材料的工作性质 .....       | 497 |
| 第二十五章 常用块状耐火制品 .....      | 502 |
| 第一节 硅酸铝质耐火制品 .....        | 502 |
| 第二节 氧化硅质耐火制品 .....        | 506 |
| 第三节 氧化镁质耐火制品 .....        | 508 |
| 第四节 白云石质耐火制品 .....        | 511 |
| 第五节 含碳耐火制品 .....          | 514 |
| 第二十六章 耐火混凝土和不定型耐火材料 ..... | 516 |
| 第一节 耐火混凝土 .....           | 516 |
| 第二节 不定型耐火材料 .....         | 521 |
| 第二十七章 绝热材料 .....          | 524 |
| 第一节 绝热材料的分类 .....         | 524 |
| 第二节 几种常用绝热材料 .....        | 524 |
| 附 录 .....                 | 529 |

## 第一篇 气体力学及相似原理

气体力学是研究气体平衡和运动规律的科学。

冶金生产中绝大部分冶金炉是通过燃料燃烧提供热能。高温的气态燃烧产物（火焰）把热能传给被加热物体后，通过排烟系统排出。因此炉子作为一种热设备，需要正确处理和解决气体的输送和排除、火焰组织、热能交换和炉温炉压控制等许多热工问题，才能提高炉子的产量、产品质量和寿命。了解和掌握气体力学的基本理论和基本知识，对于解决炉子设计、计算和操作等方面的问题，具有十分重要的意义。

随着冶金炉热工技术的发展，气体力学知识在冶金炉的设计和操作中得到了更加广泛和进一步的应用。为此，在这一篇中着重介绍非压缩性气体和压缩性气体的运动规律。

在研究气体运动的规律时，首先应该了解气体的物理性质，这里主要介绍气体的力学性质，即流动性、压缩性和粘性。

（1）流动性。气体和液体一样都是内部分子之间内聚力极其微小的物体，它们对拉力和切向力都可认为是没有抵抗力的，很小的外力就能使气体变形。这种性质就是气体和液体都具有的流动性，因此把它们统称为流体，研究流体平衡和运动规律的科学称为流体力学。因为气体力学和水力学的基本规律都是基于流体力学，所以它们的许多基本定律都是相同的。

（2）压缩性。任何物质分子内部不仅具有内聚力，而且还具有排斥力。固体和液体是很难压缩的，这是因为它们的分子间的排斥力作用的结果。液体分子本来靠得很近，当压缩液体时，分子被压紧，排斥力立即起作用，越压紧则分子越靠近，排斥力越大，故液体难以压缩（例如大约一千个大气压下，水的体积仅减少5%）。而在通常情况下，气体分子间排斥力作用很小，故气体很易压缩。由于压力变化引起气体体积或密度发生变化的性质，称为气体的压缩性。在冶金炉内，当气体运动过程中压力变化不大时，气体的密度变化很小，可近似地将气体看做非压缩性气体。当气体在运动过程中压力变化较大因而引起气体密度发生明显变化，这类气体叫做压缩性气体。

（3）粘性。气体在运动时，相邻两层气体之间，存在着抵抗气体切应变的力，这种抵抗力称为粘性力。气体具有的这种抵抗相邻两层气体相对切应变的性质称为气体的粘性。气体的粘性（又称粘度）随温度升高而增大，液体的粘性则随温度升高而降低。

此外，气体由于分子间引力较小，不易形成固定表面，而总是充满其所占有的全部空间，但液体则因分子之间的引力较大，在大气中易于形成一自由表面。

在冶金炉内直接进行气体运动规律的研究是十分复杂和困难的。应用相似理论进行模型实验研究，不仅简化了实验条件和数据整理，而且所得的研究结论能基本上反映炉内气体运动的实际现象。本篇最后一章将简要介绍相似的基本理论和模型实验研究方法。

# 第一章 气体的基本参数

## 第一节 气体的重度和密度

气体由于受地球引力的作用而具有重力，重力的大小称为气体的重量，用 $G$ 表示之，单位为公斤<sup>①</sup>。单位体积的气体所具有的重量，称为重度，用 $\gamma$ 表示之，单位为公斤/米<sup>3</sup>。

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

式中  $V$ ——气体的体积，米<sup>3</sup>

如气体体积在标准状态下用 $V_0$ 表示，则气体在标准状态下的重度 $\gamma_0$ 为：

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

几种常用气体在标准状态下的重度 $\gamma_0$ ，可由表1-1中查得。

在生产中，燃烧生成的烟气是由几种简单的气体组成的混合气体，其平均重度计算为：

$$\gamma = \gamma_1 a_1 + \gamma_2 a_2 + \gamma_3 a_3 + \dots + \gamma_n a_n \quad (\text{公斤/米}^3) \quad (1-2)$$

式中  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ——各组成气体在标准状态下的重度，公斤/米<sup>3</sup>；

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

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

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad (\text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 \text{ 或 公斤/米}^3) \quad (1-3)$$

式中  $m$ ——气体的质量，公斤 $\cdot$ 秒<sup>2</sup>/米（或公斤）。

密度和重度的关系，可用下式表示：

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

式中  $g$ ——重力加速度， $g=9.8$ 米/秒<sup>2</sup>。

表 1-1 气体在标准状态下的重度

| 气 体              | $\gamma_0$ (公斤/标米 <sup>3</sup> ) | 气 体              | $\gamma_0$ (公斤/标米 <sup>3</sup> ) |
|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|
| O <sub>2</sub>   | 1.429                            | CH <sub>4</sub>  | 0.716                            |
| N <sub>2</sub>   | 1.250                            | SO <sub>2</sub>  | 2.858                            |
| H <sub>2</sub>   | 0.090                            | H <sub>2</sub> S | 1.521                            |
| CO               | 1.250                            | 空 气              | 1.293                            |
| CO <sub>2</sub>  | 1.963                            | 气体燃料             | 0.5~1.2                          |
| H <sub>2</sub> O | 0.804                            | 燃烧产物             | 1.3~1.34                         |

① 按国际制基本单位规定，质量单位为千克（公斤），与正文中介绍的重量单位（公斤）相同。

## 第二节 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:

$$\frac{V_t}{V_0} = \frac{T_t}{T_0} = \frac{273+t}{273} = 1 + \frac{t}{273} = 1 + \beta t$$
$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad (\text{米}^3) \quad (1-5)$$

式中  $V_0, V_t$ —— $0^\circ\text{C}$ 和 $t^\circ\text{C}$ 时的气体体积, 米<sup>3</sup>;

$T_0, T_t$ —— $0^\circ\text{C}$ 和 $t^\circ\text{C}$ 时的气体绝对温度 (或热力学温度), 开 (开耳文);

$\beta$ ——气体的体积膨胀系数,  $\beta = \frac{1}{273}$ ,  $1/^\circ\text{C}$ 。

单位重量的气体体积称为比容 (又称比体积), 用符号 $v$ 表示, 单位是米<sup>3</sup>/公斤。比容的倒数是重度, 即 $\gamma_t = 1/v_t$ , 因此可得出气体重度与温度之间的关系为:

$$\gamma_t = \frac{1}{v_t} = \frac{1}{v_0(1 + \beta t)} = \frac{\gamma_0}{1 + \beta t} \quad (1-6)$$

式中  $v_0, v_t$ —— $0^\circ\text{C}$ 和 $t^\circ\text{C}$ 时气体的比容, 米<sup>3</sup>/公斤;

$\gamma_0, \gamma_t$ —— $0^\circ\text{C}$ 和 $t^\circ\text{C}$ 时气体的重度, 公斤/米<sup>3</sup>。

同理可求得 $t^\circ\text{C}$ 时气体的密度 $\rho_t$ 为:

$$\rho_t = \frac{\gamma_t}{g} = \frac{\gamma_0}{g(1 + \beta t)} = \frac{\rho_0}{(1 + \beta t)} \quad (1-7)$$

## 第三节 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:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots = PV \quad (1-8)$$

或

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 = \dots = Pv \quad (1-8a)$$

式中  $P_1, P_2, \dots, P$ ——气体绝对压力, 公斤/米<sup>2</sup>①;

$V_1, V_2, \dots, V$ ——相应压力下气体的体积, 米<sup>3</sup>;

$v_1, v_2, \dots, v$ ——相应压力下气体的比容, 米<sup>3</sup>/公斤。

注意到 $v = 1/\gamma$ , 可得气体的重度与绝对压力成正比。即:

$$\frac{P_1}{\gamma_1} = \frac{P_2}{\gamma_2} = \dots = \frac{P}{\gamma} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 表明, 气体流动时, 如果有压力变化, 必然引起重度的变化

## 第四节 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, 称为气体的状态方程。

$$PV = \frac{G}{M} R_0 T \quad (1-10)$$

式中  $P$ ——气体绝对压力, 公斤/米<sup>2</sup>;

① 按国际单位制规定, 压力 (压强) 单位采用帕斯卡, 代号为帕 (Pa),  $1 \text{ 公斤/米}^2 = 9.8 \text{ 帕斯卡}$ 。

$V$ ——气体体积，米<sup>3</sup>；

$T$ ——气体的绝对温度（热力学温度），开；

$G$ ——气体重量，公斤；

$M$ ——气体的公斤分子量，公斤/公斤分子；

$R_0$ ——通用气体常数， $R_0=848$ 公斤·米/公斤分子·K。

如用单位重量（ $G=1$ 公斤）的气体表示气体的体积，则 $v$ 是气体的比容。气体的状态方程可写成：

$$Pv = \frac{R_0}{M}T = RT \quad (1-11)$$

式中  $R$ ——气体常数， $R = \frac{R_0}{M}$ ，米/K；

$v$ ——气体的比容，米<sup>3</sup>/公斤。

常用气体的气体常数 $R$ 值见表1-2。

表 1-2 常用气体的气体常数 $R$ （米/开）

| 气体名称 | 分子式            | $R$    | 气体名称 | 分子式              | $R$   |
|------|----------------|--------|------|------------------|-------|
| 空气   | —              | 29.27  | 二氧化碳 | CO <sub>2</sub>  | 19.27 |
| 氧    | O <sub>2</sub> | 26.52  | 一氧化碳 | CO               | 30.00 |
| 氮    | N <sub>2</sub> | 30.13  | 甲烷   | CH <sub>4</sub>  | 53.00 |
| 氢    | H <sub>2</sub> | 420.90 | 水蒸气  | H <sub>2</sub> O | 47.10 |

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200个大气压，温度不低于-20°C时，状态方程的误差不超过4%。

## 第五节 气体的粘度

当气体沿着一平板平行流动时（图1-1），由于分子附着力的作用，靠近板壁的气流速度为零，离平板表面愈远，则速度逐渐增加。当一层气体对另一层相邻的气体作相对移动时，由于分子的热运动，一部分气体分子由较快的一层进入较慢的一层；也有一部分气体

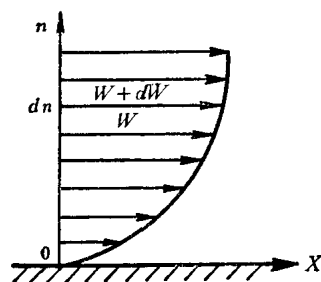


图 1-1 速度梯度图

分子由较慢的一层进入较快的一层，在两流层之间发生动量交换。较快的一层显示出一种拉力带动较慢的相邻流层向前移动，较慢的一层则显示出一种大小相等方向相反的阻力，阻止较快的一层前进，这种力称为剪力（切应力）。同时分子之间的内聚力，对相邻两流层也起着带动或阻止流动的相互作用。所以分子热运动和分子之间的内聚力是两层气体间产生剪力的根源。这种剪力称为气体的粘性力或内摩擦力，按照牛顿的粘性定律，粘性力的大小与相邻

两流层的速度梯度 $\frac{dW}{dn}$ （图1-1）和接触面 $A$ 成正比，用公式表示为：

$$F_{\text{粘}} = \mu \frac{dW}{dn} A (\text{公斤}) \quad (1-12)$$

式中  $F_{\text{粘}}$ ——粘性力（内摩擦力），公斤；

$\frac{dW}{dn}$ ——气体的速度梯度；

$\mu$ ——粘性系数或粘度，公斤·秒/米<sup>2</sup>；

$A$ ——相邻两流层之间的接触面积，米<sup>2</sup>。

为了应用方便，还可将 $\mu$ 化为动粘度系数 $\nu$ 和内摩擦系数 $\eta$ 表示，其关系如下：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma} \quad (\text{米}^2/\text{秒})$$

$$\eta = \mu g \quad (\text{公斤}/\text{米} \cdot \text{秒})$$

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，因而粘性力增大。粘度与温度的关系可用下式表示：

$$\mu_t = \mu_0 \left( \frac{273+C}{T+C} \right) \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (1-13)$$

式中  $\mu_t$ ——该温度下气体的粘度，公斤·秒/米<sup>2</sup>；

$\mu_0$ ——0°C时气体的粘度，公斤·秒/米<sup>2</sup>；

$T$ ——气体的绝对温度（热力学温度）， $T = 273 + t$ ；

$C$ ——与气体性质有关的常数。

各种气体的 $\mu_0$ 和 $C$ 值列于表1-3。

表 1-3 各种气体的 $\mu_0$ 和 $C$ 值

| 气 体                           | $\mu_0 \times 10^6, \left( \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} \right)$ | $C$ , 开 | $C$ 值适用的温度范围<br>(°C) |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------|
| 空 气                           | 1.74                                                                            | 114     | 0~300                |
| N <sub>2</sub>                | 1.69                                                                            | 118     | 50~100               |
| O <sub>2</sub>                | 1.91                                                                            | 138     | 17~186               |
| CO <sub>2</sub>               | 1.40                                                                            | 239.7   | -21~302              |
| CO                            | 1.69                                                                            | 118     | 15~100               |
| H <sub>2</sub>                | 0.86                                                                            | 71.7    | -21~302              |
| CH <sub>4</sub>               | 1.22                                                                            | 198     | 17~100               |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0.98                                                                            | 225.9   | -21~302              |
| NH <sub>3</sub>               | 0.98                                                                            | 377     | 15~184               |
| SO <sub>2</sub>               | 1.19                                                                            | 416     | 18~100               |
| H <sub>2</sub> O              | 0.84                                                                            | 673     | —                    |
| 发生炉煤气                         | ~1.48                                                                           | ~150    | —                    |
| 燃烧产物                          | ~1.5                                                                            | ~170    | —                    |

自然界中存在的气体都是具有粘性的，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，往往假设气体的粘性系数为零（即 $\mu=0$ ），这种粘性系数为零的气体称为“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，如氮、氢、氧、氦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。冶金炉内很多气体（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”。

## 第二章 气体静力学基础

### 第一节 作用在气体上的力

气体平衡或运动的规律除决定于其物理性质外，还与作用在气体上的力有密切关系。因此研究气体平衡和运动的规律，必须先研究作用在气体上的力，即表面力和质量力。

#### 一、表面力

作用在气体表面上的力称为表面力。它与表面积的大小成正比。表面力通常用应力（单位面积所受的力）来计算。单位面积上所受的切向力（ $\delta T$ ）称为切应力，以 $\delta T/\delta f$ 表示，又称为 $\delta f$ 上的平均切应力，当 $\delta f$ 趋近于零时，则：

$$\tau = \lim_{\delta f \rightarrow 0} \frac{\delta T}{\delta f}$$

$\tau$ 称为气体中某一点的切应力，单位为公斤/米<sup>2</sup>。切应力是由于气体的粘性作用所产生的。

同样，在单位面积上所受的法向力（ $\delta P$ ）称为法应力， $\delta P/\delta f$ 为 $\delta f$ 上的平均正应力。当 $\delta f$ 趋近于零时，则：

$$\sigma = \lim_{\delta f \rightarrow 0} \frac{\delta P}{\delta f}$$

$\sigma$ 为某一点上的正应力，它的单位也是公斤/米<sup>2</sup>。

由于气体是连续介质，因此气体中的 $\tau$ 及 $\sigma$ 也一定是连续分布的。

#### 二、质量力

作用在气体内部每一质点上并与质量成正比的力，称为质量力。质量力主要有两种：一种是外界物质对气体的吸引力，如地心引力、万有引力等；另一种是气体作加速运动时产生的惯性力，如作直线加速运动时的直线惯性力和作圆周运动时的离心力等。

质量力是以单位质量力来度量的。单位质量的气体所受的质量力称为单位质量力。由 $F = ma$ 知单位质量气体所受的力为 $\frac{F}{m} = a$ ，故单位质量力就是加速度。如重力为 $G$ ，则在重力方向的单位质量力为：

$$\frac{G}{m} = \frac{mg}{m} = g$$

即重力加速度。若气体同时受几个方向质量力的作用，则以各方向单位质量力的合力表示所受总的单位质量力。

在气体力学的研究中，都是从物质机械运动的普遍规律出发，根据表面力与质量力的平衡与否得出气体平衡和运动的规律。而作用在气体上的表面力和质量力的特性及由此引起的气体运动特性，又是和气体本身的物理性质和边界条件密切相关的。因此气体的物理性质和边界条件直接影响着气体平衡和运动规律的特点。



## 第二节 静止气体具有的能量

### 一、气体的压力、静压能、静压头

气体的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

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{公斤/米}^2) \quad (2-1)$$

式中  $F$ ——总压力，公斤；

$A$ ——总作用面积，米<sup>2</sup>。

气体的压力单位，一般用大气压、毫米水柱、毫米汞柱、公斤/米<sup>2</sup>、公斤/厘米<sup>2</sup>、帕斯卡表示。各单位之间的变换关系是：

1 物理大气压 = 760 毫米汞柱 = 10333 毫米水柱 = 10333 公斤/米<sup>2</sup> = 1.0333 公斤/厘米<sup>2</sup>；

1 工程大气压 = 736 毫米汞柱 = 10000 毫米水柱 = 10000 公斤/米<sup>2</sup> = 1 公斤/厘米<sup>2</sup>；

1 公斤/米<sup>2</sup> = 9.8 帕斯卡。

压力按所取标准不同，有两种表示方法：一种是绝对压力，用  $P_{\text{绝}}$  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  $P_{\text{表}}$  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：

$$P_{\text{表}} = P_{\text{绝}} - P_{\text{大气}}$$

$$\text{或} \quad P = P_{\text{绝}} - P_{\text{大气}} \quad (2-2)$$

式中  $P$ ——气体表压力；

$P_{\text{大气}}$ ——大气压力。

气体不仅具有压力，而且这种压力可以作功，作功的能力称为压力能（单位为公斤·米）<sup>①</sup>。

设一管道内充满绝对压力  $P_0 = P_{\text{大气}}$  的气体（图 2-1），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  $dx$  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：

$$dL = P_1 A dx = P_1 dV \quad (\text{公斤} \cdot \text{米})$$

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：

$$\text{静压能} = \frac{dL}{dV} = \frac{P_1 dV}{dV} = P_1 \quad (\text{公斤/米}^2 \text{ 或 毫米水柱})$$

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，但数值相等，单位相同。

在熔炼炉的炉门附近，经常发现炉膛内的高温气体从炉门向外“冒火”，或者是炉外

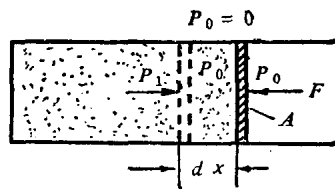


图 2-1 压力做功示意图

① 按国际单位制规定，能的单位采用焦耳，代号为焦（J）。1 公斤·米 = 9.8 焦耳。