



高职高专“十一五”规划教材

冶金炉 热工基础

YEJINLU REGONG JICHU

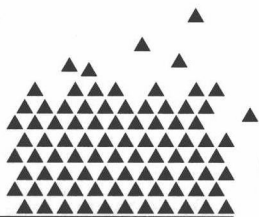
王鸿雁 主编
王庆春 主审



化学工业出版社



高职高专“十一五”规划教材



冶金炉 热工基础

YEJINLU REGONG JICHU

王鸿雁 主 编
王 禄 李明福 副主编
王庆春 主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本教材主要包括气体力学、燃料及燃烧、传热过程、耐火材料、冶金炉热能的合理利用等。主要围绕冶金生产中炉内气体流体流动、燃料燃烧、热量传递、耐火材料以及冶金炉热能的合理应用五个方面进行编写,注重理论联系实际,突出节约能源、提高能源利用效率,可持续发展等节能理念,理论性较强,并且在内容中列举了大量的实例,在结构上设置了“本章导读”、课后习题与复习思考题,便于学生更好地学习,掌握核心内容。

本教材可作为高职高专冶金技术、材料成型与控制技术专业的教学用书,也可供中等职业学校相关专业作教学参考书,还可作为企业职工培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

冶金炉热工基础/王鸿雁主编. —北京:化学工业出版社, 2009. 8

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-06018-1

I. 冶… II. 王… III. 冶金炉-热工学-高等学校: 技术学院-教材 IV. TF061.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 102266 号

责任编辑:高钰

文字编辑:张绪瑞

责任校对:郑捷

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 字数 438 千字 2009 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是依照 2008 年高职高专规划教材大纲的审定要求，根据技术领域和职业岗位的任职要求，参照相关的职业资格标准，改革课程体系和教学内容，建立突出职业能力培养的课程标准，积极与冶金行业合作编写而成的，是一本适合于高职高专冶金技术、材料成型与控制技术专业的教学用书，是与山东省精品课程《冶金炉热工基础》配套而编写的一本教材。

随着国家“十一五”规划的实施，用高新技术改造传统的冶金产业进入一个提速阶段，建立以企业为主体、以市场为导向、产学研相结合的技术创新体系，已是经济发展的必然趋势。因此，本书主要围绕冶金生产中炉内气体流体流动、燃料燃烧、热量传递、耐火材料以及冶金炉热能的合理应用五个方面进行编写，并注重理论联系实际，倡导全社会节约能源，提高能源利用效率，保护和改善环境，促进经济社会全面协调可持续发展等理念。

本教材由王鸿雁担任主编，王庆春担任主审，王禄和张店钢铁总厂李明福担任副主编。参加本教材编写的有：王厚山（第 1 章）、王禄（第 2 章）、王鸿雁（第 3 章）、张花（第 4 章），张店钢铁总厂李明福（第 5 章），王玉玲（附录），全书由王鸿雁统稿。

本教材可作为高职高专冶金技术、材料成型与控制技术专业的教学用书，也可供中等职业学校相关专业作教学参考书，还可作为企业职工培训用书。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中不妥与疏漏之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

编者
2009 年 4 月

目 录

1 气体力学原理	1
1.1 气体的主要物理性质	1
1.1.1 气体的温度	2
1.1.2 气体的压力	2
1.1.3 气体的体积	3
1.1.4 理想气体状态方程式	4
1.1.5 气体的密度	4
习题 1-1	5
1.2 静力学基本定律	6
1.2.1 阿基米德原理	6
1.2.2 气体平衡方程式	7
习题 1-2	9
复习思考题	9
1.3 气体流动的动力学	10
1.3.1 流体流动的状态	10
1.3.2 运动气体的连续方程	14
1.3.3 气体的能量	16
1.3.4 柏努利方程式	18
1.3.5 柏努利方程式和连续方程式应用实例	21
习题 1-3	24
复习思考题	25
1.4 压头损失与气体输送	25
1.4.1 压头损失	25
1.4.2 烟囱排烟	34
1.4.3 炉子的供气系统	39
1.4.4 喷射器	47
习题 1-4	51
复习思考题	52
1.5 压缩性气体的流出	52
1.5.1 压缩性气体流出的基本规律	52
1.5.2 管嘴的设计和计算	59
1.6 炉内气体流动	63
1.6.1 火焰炉内的气体流动	63
1.6.2 转炉内的气体流动	72
1.6.3 竖炉内的气体流动	74
习题 1-5	78

复习思考题	78
2 燃料及燃烧	80
2.1 燃料特性	80
2.1.1 燃料的化学组成及其成分换算	81
2.1.2 燃料的发热量	86
2.1.3 冶金工业常用燃料	87
习题 2-1	91
复习思考题	91
2.2 燃烧计算	92
2.2.1 概述	92
2.2.2 燃料燃烧的分析计算法	94
2.2.3 燃烧温度	101
2.2.4 空气消耗系数的计算	107
习题 2-2	108
复习思考题	109
2.3 燃料燃烧	109
2.3.1 燃料燃烧过程的基本理论	109
2.3.2 气体燃料的燃烧技术	112
2.3.3 液体燃料的燃烧技术	117
2.3.4 固体燃料的燃烧技术	127
2.3.5 燃烧的污染及防治	138
2.3.6 燃料燃烧的节能	141
复习思考题	142
3 传热原理	144
3.1 概述	144
3.1.1 传热过程的分类	144
3.1.2 传热过程的性质	145
3.1.3 传热的表示形式	145
3.1.4 传热学的任务	146
3.1.5 传热系数	146
3.1.6 与传热有关的几个名词	146
3.2 传导传热	148
3.2.1 稳定态下的传导传热	148
3.2.2 稳定态下的传导传热量的计算	151
习题 3-1	158
复习思考题	158
3.3 对流换热	159
3.3.1 对流换热的基本概念	159
3.3.2 对流换热的基本定律(牛顿冷却定律)	160
3.3.3 相似理论在对流换热中的应用以及对流给热系数的确定	161
3.3.4 对流给热系数的确定	164
习题 3-2	172
复习思考题	172

3.4 辐射传热	173
3.4.1 辐射传热的基本概念	173
3.4.2 辐射传热的基本定律	175
3.4.3 两个固体间的辐射热交换	179
3.4.4 气体与固体间的辐射热交换	184
习题 3-3	189
复习思考题	190
3.5 综合传热	190
3.5.1 传热的统一计算公式	190
3.5.2 对流和辐射同时存在的综合传热	191
3.5.3 一种流体通过平壁传热给另一种流体	192
3.5.4 一种流体通过圆筒壁传热给另一种流体	193
3.5.5 火焰炉内传热	194
3.5.6 竖炉内热交换	196
习题 3-4	198
复习思考题	199
4 耐火材料	200
4.1 耐火材料的种类和性能	200
4.1.1 耐火材料的定义和分类	200
4.1.2 耐火材料的主要性能	201
复习思考题	206
4.2 硅质耐火材料	206
4.2.1 硅砖	206
4.2.2 石英玻璃及其制品	208
复习思考题	209
4.3 硅酸铝质耐火材料	209
4.3.1 黏土质耐火材料	209
4.3.2 半硅质耐火材料	211
4.3.3 高铝质耐火材料	211
复习思考题	213
4.4 镁质耐火材料	213
4.4.1 镁砖	214
4.4.2 镁铝砖	215
4.4.3 镁铬砖	216
4.4.4 镁碳砖	216
复习思考题	217
4.5 白云石质耐火材料	217
4.5.1 焦油白云石砖	217
4.5.2 镁质白云石砖	218
复习思考题	218
4.6 碳质耐火材料	219
4.6.1 碳质制品	219
4.6.2 石墨黏土质制品	219

4.6.3 碳化硅质制品	220
复习思考题	220
4.7 不定形耐火材料	220
4.7.1 耐火浇注料（耐火混凝土）	221
4.7.2 耐火可塑料	222
4.7.3 耐火捣打料	222
4.7.4 耐火喷射料	223
4.7.5 耐火泥	223
4.7.6 耐火涂料	224
复习思考题	224
4.8 隔热耐火材料	224
4.8.1 低温隔热材料	224
4.8.2 中温隔热材料	224
4.8.3 高温隔热材料	225
4.9 耐火材料的选用	226
复习思考题	226
5 冶金炉热能的合理利用	227
5.1 炉子能源的合理选择	227
5.1.1 高炉燃料的选用	228
5.1.2 熔炼冰铜的反射炉燃料的选用	228
5.2 节约燃料的途径	229
5.2.1 热平衡和燃料消耗	229
5.2.2 燃料的节约	231
复习思考题	234
5.3 余热利用	234
5.3.1 余热利用的原则	234
5.3.2 余热利用的方法	234
5.3.3 气体余压能的回收	235
5.3.4 余热回收系统	235
5.4 余热回收设备	236
5.4.1 余热回收换热设备概述	236
5.4.2 高温余热回收装置	236
5.4.3 余热锅炉	238
5.4.4 蓄热室	240
5.4.5 汽化冷却	242
复习思考题	244
附录	245
参考文献	261

1 气体力学原理

【本章导读】

本章主要讨论气体流动过程中的基本原理以及气体在管道内的流动规律、气体在流动过程中的压头损失、压缩性气体流动过程中的规律以及炉内气体各种流动方式的规律。在学习过程中要求掌握流体静力学平衡方程式（绝对压力和表压力平衡方程式）、流体流动的动力学规律（连续方程和柏努利方程式）、压缩性气体流出的基本规律。

冶金与化工生产过程很多都是在流体中进行的，如散装物料的干燥、焙烧、熔炼、燃料的燃烧、浸出、萃取与蒸馏等过程中，无一不与流体流动有着密切的关系。因此深入了解和掌握流体力学的基本知识和基本理论对于冶金炉和化工设备的设计、计算和操作等方面都具有十分重要的意义。由于流体包括液体和气体，因而流体力学也就包括水力学和气体力学。水力学的规律，对于平衡的或运动时速度远低于声速的气体，也是适用的。由于在工作中，所遇到的流体既有液体也有气体，但考虑到热工设备中气体居多，因此本篇在介绍它们的共同规律时侧重于气体力学基本知识。

气体力学是从宏观角度研究气体平衡及其流动规律的一门科学，而窑炉气体力学则研究窑炉工作过程中气体的宏观物理与化学行为（运动与静止，生成与消失）。在冶金工业中所涉及的窑炉大多数以燃料燃烧产生的气体作为载热介质。窑炉气体有许多种，而主要的是烟气和空气。为此，气体的输送、气体在窑炉空间的运动、废气的排出等对窑炉操作都很重要。

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（让炉内气体流动）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

气体与液体统称流体，它们的共同特性是流体质点间的引力很小，以致对拉力，对形状的缓慢改变都不显示阻力，因而很容易流动。气体与液体相比，气体容易膨胀或者被压缩，它没有自由表面，总是完全地充满所占容器的空间。由于气体分子之间的距离很大，引力很弱，因此，它既不能保持一定的形状，也不能保持一定的体积。由于气体分子之间的斥力很弱，因而很容易被压缩。而液体则有一定的自由表面和比较固定的体积，不易膨胀和压缩。

在实际情况下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的影响,通过这些物理参数的变化反映了气体物理性质随气体的存在的变化。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 气体的温度

气体的温度常用各种测温仪来测量。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。

① 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表示 0°C 以下和 100°C 以上的刻度。

② 绝对温标 即热力学温标,又称开尔文温标,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 0K ,并以水的三相点温度为基本定点,定为 273.16K ,于是 1K 就是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

绝对温标 1K 与摄氏温标 1°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 0.01K ,水的沸点为 373.15K 。绝对温标与摄氏温标的关系

$$T = 273.15 + t \text{ (K)}$$

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

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

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

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

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。

(1) 压力的单位

在国际单位制中,压力的单位是帕斯卡,简称帕,其代号 Pa 。

1帕斯卡是指1平方米表面上作用1牛顿(N)的力,即1标准大气压(atm)= $101325\text{Pa}=760\text{mmHg}=1.0332\text{kgf/cm}^2$ (工程大气压, at)= $10332\text{mmH}_2\text{O}=101.325\text{kPa}$ 。

(2) 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 $t^{\circ}\text{C}$ 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近似地等于 $1/273$ 。

(3) 绝对压力和表压力

气体的压力有绝对压力和表压力两种方法。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 $P_{\text{绝}}$ 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）都是指大气压的绝对压力。

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 $P_{\text{表}}$ 表示。

显然表压力和绝对压力的关系为

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

式中 $P_{\text{绝}}$ ——设备内气体的绝对压力；

$P_{\text{大气}}$ ——设备外同高度的实际大气压；

$P_{\text{表}}$ ——设备内气体的表压力。

当气体的表压力为正值时，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，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。

表压为正值时，通常称为正压；为负值时，则称为负压。通常把其负值改为正值，称为真空度，常用符号 $P_{\text{真}}$ 表示。真空度与绝对压力的关系

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

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。用公式表示

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad (\text{m}^3) \quad (1-5)$$

式中符号 $\beta = 1/273$ ，称为气体的温度膨胀系数。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。

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

解：由公式 (1-4) 得

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

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

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

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

【例 1-2】 在一煤气表上读得煤气的消耗量是 683.7m^3 。在使用期间煤气表的平均表压力是 44mmH₂O，其温度平均为 17℃。大气压力平均为 100249Pa。求：

(1) 相当于消耗了多少标准 m^3 的煤气？

(2) 如煤气压力降低至 30mmH₂O, 问此时同一煤气耗用量的读数相当于多少标准 m³?

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

$$(1) V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_0} \times \frac{T_0}{T_1} = 683.7 \times \frac{(100249 + 44 \times 9.81)}{101325} \times \frac{273}{303} = 612.09 \text{ (m}^3\text{)}$$

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

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

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

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

1.1.4 理想气体状态方程

冶金炉系统中的气体主要是空气和烟气, 其特点是低压、常温或高温, 可近似看成理想气体, 理想气体状态方程式表明了温度、压强和体积的关系, 方程式为

$$PV = nRT$$

式中 P ——气体的绝对压强, Pa (N/m^2);

V ——气体的体积, m³;

n ——气体物质的量, mol;

T ——气体的绝对温度, K;

R ——气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

1.1.5 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 kg/m^3 。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 , 其体积为 V , 则气体在标准状态下的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

式中 ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

m ——气体的质量, kg;

V ——气体的体积, m³。

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

$$\rho_{\text{混}} = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \cdots + \rho_n \varphi_n \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1-7)$$

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

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ ——各组成物在混合气体中的百分数, %。

【例 1-3】 某煤气的成分为: $\varphi(\text{CO}) = 27.4\%$; $\varphi(\text{CO}_2) = 10\%$; $\varphi(\text{H}_2) = 3.2\%$; $\varphi(\text{N}_2) = 59.4\%$ 。试求此煤气在标准状态下的密度。已知 $\rho_{\text{CO}} = 1.251 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{CO}_2} = 1.997 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{H}_2} = 0.0899 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{N}_2} = 1.251 \text{ kg/m}^3$ 。

解: 将已知条件数值及各组成物成分代入式 (1-7), 则得此煤气在标准状态下的密度为

$$\begin{aligned} \rho_{\text{煤气}} &= \rho_{\text{CO}} \varphi(\text{CO}) + \rho_{\text{CO}_2} \varphi(\text{CO}_2) + \rho_{\text{H}_2} \varphi(\text{H}_2) + \rho_{\text{N}_2} \varphi(\text{N}_2) \\ &= 1.251 \times 0.274 + 1.997 \times 0.10 + 0.0899 \times 0.032 + 1.251 \times 0.594 \\ &= 1.286 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

前面已经指出, 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。

(1) 气体密度随温度的变化

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

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1-8)$$

将式 (1-5) 和式 (1-7) 代入式 (1-8) 可得

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1-9)$$

应当指出, 此式也可用于低压气体。

显然, 对一定 ρ_0 的气体而言, 其密度 ρ_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。

(2) 气体密度随压力的变化

在恒温条件下气体密度与气体绝对压力的关系式为

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} = \dots = \frac{P}{\rho} \quad (1-10)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——在各相应压力下的气体密度, kg/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。

(3) 气体密度随气体温度和压力的变化

气体密度随温度和压力的变化关系式为

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2} = \dots = \frac{P}{\rho T} = R \quad (1-11)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——在各相应温度和相应压力下的气体密度, kg/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殊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 9810Pa, 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化, 气体密度只随温度按式 (1-9) 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 9810Pa, 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 (1-11) 的关系变化。

【例 1-4】 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

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

按式 (1-11) 可得压缩空气在实际温度和实际压力下的密度为

$$\rho = \frac{P}{TR} = \frac{784800}{303 \times 287} = 9.03 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

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 $\varphi(\text{CO}) = 70\%$,

$\varphi(\text{CO}_2)=13\%$, $\varphi(\text{N}_2)=17\%$ 。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帕?
- (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°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 760mmHg、温度为 20°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°C 和大气压力为 745mmHg 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 4m^3 的容器充有绝对压力 1 个工程大气压、温度为 20°C 的空气, 抽气后容器的真空度为 700mmHg, 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帕?
- (2) 抽气后容器内空气的质量为多少千克?
- (3) 必须抽走多少千克的空气, 才能保证容器中真空度为 700mmHg?

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 768mmHg 时, 它的读数只有 748mmHg, 此时管内水银面到管顶的距离为 80mm, 若气压的读数为 734mmHg 时, 求实际气压。设空气的温度保持不变。

6. 质量为 1.2kg 的空气, 在 30 个工程大气压下其体积为 0.08m^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 300m^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 760mmHg, 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千克?

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 300mmH₂O, 烟气的温度为 130°C , 试求此烟气量在标准状态下的体积 (当地大气压力为 755mmHg)。

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立方米?

1.2 静力学基本定律

1.2.1 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。此原理同样适用于气体。

设有一倒置的容器, 如图 1-1 所示, 高为 H , 截面积为 f , 容器内盛满热气体 (密度为 ρ), 四周皆为冷空气 (密度为 ρ'), 热气的重量为

$$G_{\text{气}} = Hfg\rho$$

同体积空气的重量为

$$G_{\text{空}} = Hfg\rho'$$

热气在空气中的重力应为 $G_{\text{气}} - G_{\text{空}}$

$$G = G_{\text{气}} - G_{\text{空}} = Hfg(\rho - \rho')$$

因为 ρ 小于 ρ' ，所以热气在空气中的重力必是负值，也就是说热气在冷气中实际上具有一种上升力。

若上式的两边各除以 f ，则单位面积上的气柱所具有的上升力可写成下面的形式

$$h = Hg(\rho' - \rho) \quad (1-12)$$

上式说明，单位面积上气柱所具有的上升力决定于气柱的高度和冷、热气体的密度差。

1.2.2 气体平衡方程式

气体平衡方程式是研究静止气体压力变化规律的方程式。

自然界内不存在绝对静止的气体。但是可认为某些气体（如大气、煤气罐内的煤气、炉内非流动方向上的气体等）是处于相对静止的状态。下面分析相对静止气体的压力变化规律。

(1) 气体绝对压力的变化规律

如图 1-2 所示，在静止的大气中取一个底面积为 f 、高度为 H 的长方体气柱。如果气体处于静止状态，则此气柱的水平方向和垂直方向的力都应该分别处于平衡状态。

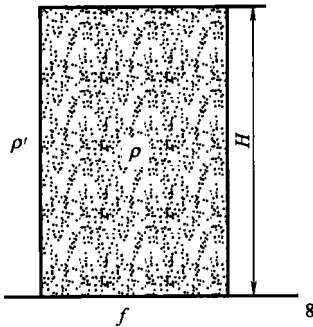


图 1-1 阿基米德原理

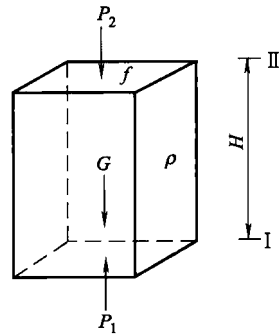


图 1-2 气体绝对压力的分布

在水平方向上，气柱只受到其外部大气的压力作用，气柱在同一水平面上受到的是大小相等方向相反的压力。这些互相抵消的压力使气柱在水平方向上保持力的平衡而处于静止状态。

① 向上的 I 面处大气的总压力 $P_1 f$ ，N；

② 向下的 II 面处大气的总压力 $P_2 f$ ，N；

③ 向下的气柱总重量 $G = Hfg\rho$ ，N。

气体静止时，这些力应保持平衡，即

$$P_1 f = P_2 f + Hfg\rho$$

当 $f = 1\text{m}^2$ 时，则得

$$P_1 = P_2 + Hg\rho \quad (1-13)$$

式中 P_1 ——气体下部的绝对压力，Pa；

P_2 ——气体上部的绝对压力，Pa；

H ——I 面和 II 面间的高度差，m；

ρ ——气体的密度， kg/m^3 ；

g ——重力加速度， $9.81\text{m}/\text{s}^2$ 。

式 (1-13) 为气体绝对压力变化规律的气体平衡方程式。

上式说明：静止气体沿高度方向上绝对压力的变化规律是下部气体的绝对压力大于上部气体的绝对压力，上下两点间的绝对压力差等于此两点间的高度差乘以气体在实际状态下的

平均密度与重力加速度之积。

气体平衡方程式不仅适用于大气，而且适用于任何静止气体或液体。

【例 1-5】 某地平面为标准大气压。当该处平均气温为 20°C ，大气密度均匀一致时，距地平面 100m 的空中的实际大气压为多少？

解：当认为大气为不可压缩性气体时，按式 (1-9) 计算大气的实际密度为

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} = \frac{1.293}{1 + \frac{20}{273}} = 1.21 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

根据 (1-13) 计算 100m 处的实际大气压为

$$P_2 = P_1 - Hg\rho_1 = 101325 - 100 \times 9.81 \times 1.21 = 100138 \text{ (Pa)}$$

计算表明，空中的大气压低于地面的大气压，高山顶上的气压低即为此道理。

(2) 气体表压力的变化规律

生产中多用表压力表示气体的压力。下面分析静止气体内表压力的变化关系。

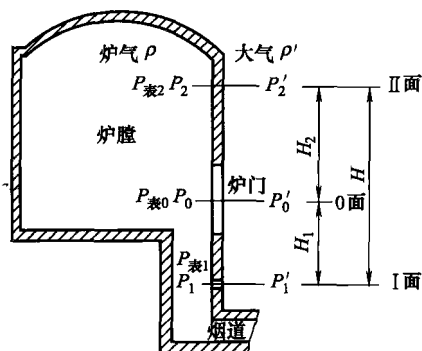


图 1-3 气体表压力的分布

如图 1-3 所示，炉内是实际密度为 ρ 的静止炉气，炉外是实际密度为 ρ' 的大气。炉气在各面处的绝对压力分别为 P_1 、 P_2 和 P_3 ，表压力分别为 $P_{表1}$ 、 $P_{表2}$ 和 $P_{表3}$ 。下面分析炉气表压力沿高度方向上的变化情况。

根据式 (1-4) 的关系可知，炉气在 I 面和 II 面处的表压力分别为

$$P_{表1} = P_1 - P'_1 \quad (a)$$

$$P_{表2} = P_2 - P'_2 \quad (b)$$

因此，I 面与 II 面的表压差应为

$$P_{表2} - P_{表1} = (P_2 - P_1) + (P'_1 - P'_2) \quad (c)$$

根据式 (1-13) 可得 I 面和 II 面的炉气和大气绝对压力差分别为

$$P_2 - P_1 = -Hg\rho \quad (d)$$

$$P'_1 - P'_2 = Hg\rho' \quad (e)$$

将式 (d) 和式 (e) 代入式 (c) 则得

$$P_{表2} - P_{表1} = Hg(\rho' - \rho) \quad (1-14a)$$

或

$$P_{表2} = P_{表1} + Hg(\rho' - \rho) \quad (1-14b)$$

式中 $P_{表2}$ ——上部炉气的表压力，Pa；

$P_{表1}$ ——下部炉气的表压力，Pa；

ρ' ——大气的实际密度， kg/m^3 ；

H ——两点之间的高度差，m。

式 (1-14) 是气体平衡方程式的又一种形式。此式适用于任何与大气同时存在的静止气体。

此气体平衡方程式表明：当气体密度 ρ 小于大气密度 ρ' （热气体皆如此）时，静止气体沿高度方向上，表压力的变化是上部气体的表压力大于下部气体的表压力，上下两点间的表压力差等于此两点间的高度差乘以大气与气体的实际密度差与重力加速度之积。此两点间的表压力差等于气柱的上升力。

由图 1-3 看出，如果炉门中心线 0 面处的炉气表压力为零（生产中常这样控制），则按式 (1-14) 的关系可得 II 面和 I 面的表压力分别为

$$P_{\text{表}_2} = P_{\text{表}_0} + H_2 g(\rho' - \rho) = H_2 g(\rho' - \rho)$$

$$P_{\text{表}_1} = P_{\text{表}_0} + H_1 g(\rho' - \rho) = H_1 g(\rho' - \rho)$$

如果炉内是高温的热气体，其实际密度 ρ 小于大气密度 ρ' ，则由上式不难看出：①零压面以上各点的表压力 $P_{\text{表}_2}$ 为正压，当该点有孔洞时会发生炉气向大气中的溢气现象；②零压面以下各点的表压力 $P_{\text{表}_1}$ 为负压，当该点有孔洞存在时，会发生将大气吸入的吸气现象。这个规律存在于任何与大气同时存在的密度小于大气的静止气体中。炉墙的缝隙处经常向外冒火，烟道和烟囱的缝隙处经常吸入冷风就是这个规律的具体表现。

【例 1-6】某加热炉炉气温度为 1300°C ，由燃烧计算得知该炉气在标准状态下的密度为 $\rho_0 = 1.3\text{kg/m}^3$ 。车间温度为 15°C ，零压线在炉底水平面上。求炉底以上 1m 高度处的炉膛压力（指表压 ΔP 值）是多少？

解：炉气密度 $\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} = \frac{1.3}{1 + \frac{1300}{273}} = 0.225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

空气密度 $\rho'_t = \frac{\rho'_0}{1 + \beta t} = \frac{1.293}{1 + \frac{15}{273}} = 1.225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

把基准面取在炉底水平面上，则 1m 高度处的炉膛压力为

$$\Delta P = -H g(\rho'_t - \rho_t) = 9.81 \times (1.225 - 0.225) = 9.81\text{Pa}$$

这一例题大体上符合于高温炉的实际条件。它说明，在不考虑气体流动的影响时，在高温炉内，每 1m 高度上 ΔP 值的变化约为 10Pa 左右。这一数值概念对估计炉内上下炉压的分布是有帮助的。

习题 1-2

1. 设有一个热气柱，其高度为 100m ，在 100m 高处气柱上部所受的压力是 100100Pa ，若它的密度是 0.4kg/m^3 ，求热气柱下部地面上所受的压力是多少？

2. 某炉膛内的炉气温度为 $t = 1638^\circ\text{C}$ ，炉气在标准状态下的密度 $\rho_0 = 1.3\text{kg/m}^3$ ，炉外大气温度 $t' = 27^\circ\text{C}$ 。试求当炉门中心线为零压力时，距离炉门中心线 2m 高处炉顶下部炉气的表压力为多少帕？

3. 某连续加热炉均热段炉气温度为 1250°C ，炉气在标准状态下的密度 $\rho_0 = 1.3\text{kg/m}^3$ ，炉外大气的温度 $t = 30^\circ\text{C}$ ，试求当距炉门槛 1.5m 高处炉膛压力为 9.8Pa 时，炉门槛处是冒火还是吸冷风？

4. 某炉子的烟囱高为 50m ，烟囱内的平均烟气温度为 450°C ，大气温度为 30°C ，试估算烟囱底部抽力（负表压力）约为多少帕。设烟气在标准状态下的密度 $\rho_0 = 1.3\text{kg/m}^3$ 。

5. 某钢厂的钢水包盛满钢水，钢水高度为 2m ，密度 $\rho = 7800\text{kg/m}^3$ ，当车间大气压力 1 工程大气压时，问钢水包底部注口处的钢水压力是多少帕？

复习思考题

1. 气体的温度升高时，是否气体的压力都升高？为何大气中的气体温度升高时，气压反而降低？为何冶金炉气体温度升高时，气体压力可增大？

2. 密度小于大气的静止气体在高度方向上表压力变化规律如何？这些规律有何现实意义？