冶金炉热工及构造

第　一　册

东北工学院冶金炉教研室编

一九七七年二月

本书共分三册：第一册为炉子热工基础，包括气体力学、燃料燃烧、传热学；第二册包括耐火材料、炉子生产率和燃料消耗、余热利用、金属加热工艺；第三册包括各种加热炉及热处理炉、工业电炉、大气污染及其防治等内容。本书为冶金炉专业课试用教材，并可供有关专业工人和工程技术人员参考。

毛主席语录

千万不要忘记阶级斗争。

阶级斗争是纲，其余都是目。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

我们的教育方针，应该使受教育者在德育、智育、体育几方面都得到发展，成为有社会主义觉悟的有文化的劳动者。

学制要缩短，教育要革命

教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

要把精力集中在培养分析问题和解决问题的能力上。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

第一册　目　录

第一章 气体力学

第一节 概述

毛主席指出：**“自然科学是人们争取自由的一种武器。”**气体力学是研究气体的平衡和运动规律的科学，对本专业来说，它是帮助我们在解决冶金炉设计和操作等问题上争取自由的武器。

在冶金炉设计和操作中，会遇到很多气体力学问题。如供热、供风、排烟、调节炉压和炉温等热工操作，燃烧器设计、管道计算、予热器计算、风机选择、烟囱计算、炉型结构的确定等设计和计算，都与气体力学问题密切相关。能否正确地处理和解决这些问题，对于炉子的产量、产品的质量、产品的成本和炉子的寿命有着很大的影响。所以，了解并掌握气体力学的知识是十分必要的。

气体本身的性质是决定气体平衡和运动的规律的内因，因此有必要了解气体的性质。但气体的一般物理化学性质在有关课程中都已讲过，不须全面叙述。这里只重复地提示一下和气体力学密切相关的必须加以说明的气体性质。

气体和液体有着共同性，即流动性，它们二者统称为“流体”。所以在多数情况下可借助于水力学的规律来研究气体力学。但是气体和液体也有着一些重要的区别。这些区别和炉子气体流动有关的主要在于：

① 气体体积随压力而变化，液体则基本上是不可压缩的。这一特性影响到气体流动的一些基本规律，因而必须给予注意。这一点下面还要谈到。

② 气体体积随温度变化而显著变化，液体则基本不变。

③ 液体粘度随温度升高而降低（比如油，一加热就“稀”了），气体则相反。

此外，还有一个重要区别，就是：液体在大气中易于形成固定的表面，而气体则将与大气相混合，不易形成固定的表面；气体常能充满容器或管路，液体则未必充满容器或管路。这一特点将影响到气体喷出的流股和炉内气体流动的特性。但它不影响到本章头几节所讲的基本规律，在后面第八节中予以注意就是了。

下面，我们根据上述三个特点，讲一下有关的气体性质和规律。

气体体积与温度之间的关系

气体体积随温度变化很大，而炉子是高温的热设备，所以这一性质很重要，在有关的计算中必须予以考虑。

在压力一定时，一定量气体的体积与绝对温度成正比。即：

$$\frac{V}{V_0}=\frac{T}{T_0}=\frac{273+t}{273}=1+\frac{t}{273},$$

通常写成：

$$V=V_0(1+\beta t)。$$

式中，　V—t℃时的气体体积，米^3；

V_0—0℃时的气体体积，米^3；

β—气体的体积膨胀系数，对理想气体，

$$\beta=\frac{1}{273}, \ 1/℃。$$

如果这一定量的气体是1公斤，则上式中的体积V将代表气体的比容，单位是米^3/公斤，上式仍然成立。而比容的倒数是气体的重度；用γ代表，单位是公斤/米^3。不难看出，气体重度与温度之间的关系为：

$$\boxed{\gamma=\gamma_0\frac{1}{1+\beta t}, \ 公斤/米^3} \qquad (1\text{-}1\text{-}1)$$

式中，　γ—t℃ 时的气体重度，公斤/米^3；

γ_0—0℃ 时的气体重度，公斤/标米^3（此式通常都是应用在常压下，故可按标准状态下考虑）；

$\beta=\frac{1}{273}$，体膨胀系数，1/℃。

式 1-1-1 在进行气体力学计算时要经常用到。因为我们已知的常是气体在标准性状态下的重度，在高温下的气体重度须按式 1-1-1 进行换算。几种常用的气体在标准状态下的重度 γ_0 可由表 1-1-1 中查得。

气体在标准状态下的重度　　　**表 1-1-1**

气　　体	γ_0（公斤/标米^3）	气　　体	γ_0（公斤/标米^3）
空　　气	1.293	CO	1.250
O_2	1.429	CO_2	1.963
N_2	1.250	H_2O	0.804
H_2	0.090	SO_2	2.858
CH_4	0.716	H_2S	1.521

如果这一定量的气体是指单位时间内流过某管路断面的气体重量（公斤/秒），则流过该断面气体的体积，即体积流量V（米^3/秒）和V_0（标米^3/秒）之间的关系仍为：

$$\boxed{V=V_0(1+\beta t), \ 米^3/秒。} \qquad (1\text{-}1\text{-}2)$$

式中，　V—在该温度(t℃)下气体的体积流量，米^3/秒；

V_0—换算成 0℃ 下的体积流量，标米^3/秒。

这一公式说明，如果流过气体的重量未变，则其体积流量与绝对温度成正比。这一公式在换算时常常应用。因为在冶金炉上，按燃料燃烧的物质平衡，供煤气量，供风量和排烟量都是用标准状态下的体积来表示的，所以常须和该温度下的体积流量进行换算。

如果V及V_0是指单位时间流过单位截面积的体积流量，则这一数值就是流速，它的单位是 米/秒（相当于$\frac{米^3/秒}{米^2}$）。显然，当重量流量不变时，流速和温度之间的关系是：

$$\boxed{W = W_0(1+\beta t)} \qquad (1\text{-}1\text{-}3)$$

式中，W——气体流速，米/秒；

W_0——换算成 0℃ 的气体流速，标米/秒，叫做“标速”，或称“零速”。通常并不能直接测得，只在换算时应用。

气体体积与压力之间的关系

在温度一定的条件下，一定量气体的体积与压力成反比。即：

$$\boxed{V = V_0 \frac{P_0}{P}} \qquad (1\text{-}1\text{-}4)$$

重度与压力的关系则为：

$$\boxed{\gamma = \gamma_0 \frac{P}{P_0}} \qquad (1\text{-}1\text{-}5)$$

式中，V或V_0——该压力下或标准压力下的气体体积，米^{3}或标米^3，这一体积也可以是体积流量，米^3/秒或标米^3/秒；

γ 或 γ_0——该压力下或标准压力下的气体重度，公斤/米^{3}或公斤/标米^3；

P或P_0——压力或标准大气压力，单位是公斤/米^{2}或表示为毫米水柱。

气体压力是气体作用在单位面积上的力，单位是公斤/米^2。这一单位和毫米水柱在数值上是相等的，因为在 1 米^2 平面上铺 1 毫米高的水，其重量恰好是 1 公斤。在冶金炉上应用时通常使用毫米水柱，因为它是由液柱压力计上直接读出的。此外，在工程上还常用到的压力单位是公斤/厘米^2，显然，1 公斤/厘米^2 = 10000公斤/米^2 = 10000毫米水柱，这一数值与一个物理大气压（10333 毫米水柱）很相近，所以，1 公斤/厘米^{2}也叫做 1 工程大气压。

由式 1-1-4 和 1-1-5 可明显地看出，当压力增加时，气体体积缩小，重度增大，这是千真万确的。但是任何质量都表现为一定的数量，没有数量也就没有质量。气体压力对体积或重度究竟有多大影响？我们必须在一些特定的具体条件下做具体的分析。比如，在通常的应用条件下，火焰炉气体压力的变化在 $P = P_0 \pm 50$ 毫米水柱范围内，而大气压力，$P_0 = 10333$ 毫米水柱，故重度为：

$$\gamma = \gamma_0 \frac{P}{P_0} = \gamma_0 \frac{10333 \pm 50}{10333} \approx \gamma_0$$

所以，在一般炉子的应用范围内，当压力变化不大时，可以认为气体体积或重度是不随压力而变化的，也就是说，把气体当作非压缩性流体来处理。这时流体力学（水力学）

的一般公式都可以近似地应用，使问题大为简化。实际上，即使压力有较大的变化，比如达几百或上千个毫米水柱时，用适于非压缩性流体的公式来近似的计算气体流出时，也不会造成很大的误差。所以，除高压下的气体流动外，一般我们都按非压缩性流体来对待气体的流动，至于高压下的气体流动将在本章第七节《压缩性气体流出》中专门讲述。

气体状态方程式

气体状态方程式表示一定量理想气体在平衡状态下体积、压力、温度三者之间的关系。通用的表达式是：

$$PV = nRT, \tag{1-1-6}$$

式中，P —气体压力，公斤/米^2；

V —气体体积，米^3；

T —温度，K；

n—此一定量气体的公斤分子数，$n=\frac{G}{M}$，G —气体重量，公斤，M—气体的公斤分子量，公斤/公斤分子；

R —气体常数，公斤·米/公斤分子·K。

在标准状态下，即 $P=10333$ 公斤/米^2，$T=273K$ 时，1公斤分子气体的体积为22.4 米^3，故

$$R=\frac{10333\times 22.4}{273}=848 \text{ 公斤·米/公斤分子·}K$$

显然，这一R值不因气体种类而异。

气体状态方程式的另一种形式，是以1公斤气体为研究对象，这时 $G=1$ 公斤，V 是1公斤气体的体积，气体状态方程式将写成：

$$\boxed{PV=RT} \tag{1-1-7}$$

式中，R—因气体种类而异的气体常数，米/K，显然，对公斤分子量为M的气体，$R=\frac{848}{M}$。

各种常用气体的这一气体常数值见于表 1-1-2。

常用气体的气体常数R **表 1-1-2**

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_2	19.27
氧	O_2	26.52	一氧化碳	CO	30.00
氮	N_2	30.13	甲烷	CH_4	53.00
氢	H_2	420.90	水蒸汽	H_2O	47.10

气体状态方程式也可以表示出温度压力同时变化时一定量气体在任意状态下的体积或重度的变化，即

$$V = V_0 \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0},$$

$$\gamma = \gamma_0 \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T},$$

如果尾标“0”代表标准状态，则上面两式也可写成：

$$\boxed{V = V_0(1+\beta t)\frac{P_0}{P}} \qquad (1\text{-}1\text{-}8)$$

$$\boxed{\gamma = \gamma_0 \frac{1}{1+\beta t} \cdot \frac{P}{P_0}} \qquad (1\text{-}1\text{-}9)$$

显然，前述的气体体积单独随温度或压力的变化可以看作是气体状态方程式在等压或等温条件下的特例。而应该注意的是，气体状态方程式也适用于定容过程和绝热过程。

气体的粘性

流体的粘性在一定条件下将影响到流体在流动过程中所产生的阻力，是流体的基本性质之一。

所有的流体都具有一个共同性，即用不大的切力就可以使其连续地变形，这就是“流动性”。和这一流动性相反的性质，即抵抗切力变形的性质，也可以说是产生切应力的性质，是流体的“粘性”。

如图 1-1-1，流体遇到一平行于流速的固体表面时，因为流体质点很小，它不能沿固体表面进行滑动，故在表面上一层流体的速度等于零。挨近表面一层的流体，由于受到表面一层流体的摩擦作用，速度也减慢了。这样，一层摩擦一层，使流体流速分布如图 1-1-1 所示，在法线 y 的方向上形成了速度梯度。

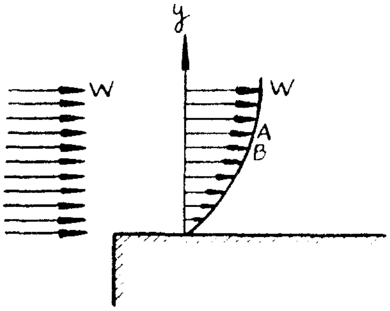

图 1-1-1

实验证明，在各层之间不发生紊乱的情况下，各层之间的摩擦力与流体粘性有下列关系：

$$\boxed{\tau = \mu \frac{dW}{dy}} \qquad (1\text{-}1\text{-}10)$$

式中，　τ——切应力，即沿流动方向上流层之间单位面积上的摩擦力，公斤/米^2；

$\frac{dW}{d\gamma}$——该点的速度梯度，1/秒；

μ——流体的粘度系数，简称粘度，公斤·秒/米^2。

在物理学的“厘米-克-秒”制中，力的单位是达因，长度单位是厘米，则粘度 μ的单位将变成达因·秒/厘米^2，这一单位又叫做“泊”。不难看出，1公斤·秒/米^2 = 98.1泊。用泊来表示粘度，在工程上也得到了广泛的采用，特别是用来表示液体（如油）的粘度。

在流体力学计算中也常用动粘度系数 ν 来表示流体粘性的大小，动粘度 ν 与粘度 μ 的关系为：

$$\boxed{\nu = \frac{\mu g}{\gamma}} \qquad (1\text{-}1\text{-}11)$$

式中，ν——动粘度系数，米^2/秒；

μ——粘度系数（也叫动力粘度系数），公斤·秒/米^2；

γ——流体重度，公斤/米^3；

g——重力加速度，米/秒^2。

气体粘度随温度升高而增大，它与温度的关系为：

$$\boxed{\mu = \mu_0 \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}}} \qquad (1\text{-}1\text{-}12)$$

式中，T——气体的绝对温度，K；

μ_0——0℃时的粘度，可由表 1-1-3 中查得；

C——常数，°K，可由表 1-1-3 中查得。

在 0℃ 1 大气压下气体的粘度 μ_0 和常数 C 　　　　**表 1-1-3**

气体	$\mu_0\times10^6$，公斤秒/米^2	C，°K	C 值适用的温度范围，℃
空气	1.74	114	0～300
N_2	1.69	118	50～100
O_2	1.91	138	17～186
CO_2	1.40	239.7	-21～302
CO	1.69	118	15～100
H_2	0.86	71.7	-21～302
CH_4	1.22	198	17～100
C_2H_4	0.98	225.9	-21～302
NH_3	0.98	377	15～184
SO_2	1.19	416	18－100
H_2O	0.84	673	—
发生炉煤气	～1.48	～150	—
燃烧产物	～1.5	～170	—

为什么气体粘度随温度升高而增加呢？因为产生粘性的内摩擦力是流体的分子力作用的结果，这种分子力有两种：即分子的凝聚力和由于分子的热运动而产生的摩擦力。气体分子间的距离相对于分子体积来说相距很远，故分子的凝聚力很小，可忽略不计。所以气体的粘性只决定于后者。如图 1-1-1，假设 **A**、**B** 两层气体的运动速度本来不同，如果两层的气体质点完全平行运动，互不相扰，分子间又无引力，则无论两层的流速差别有多大，在两层间也不会产生摩擦力。但实际上气体分子有热运动，**A**、**B** 两层间的气体分子互相扩散。**A** 层气体分子跑向 **B** 层，则促进 **B** 层的流动；**B** 层气体分子跑向 **A** 层，则阻滞 **A** 层的流动。这样，两层气体间由于分子的热运动而进行动量和质量的交换，产生了摩擦力。这就是气体流动时粘性内摩擦力产生的根源。而气体分子的热运动速度决定于分子所具有的热能，即决定于温度。温度升高时，气体分子的热运动速度增快，扩散加快，因而气体的粘度增加。

液体的粘性内摩擦力决定于分子间的凝聚力，所以温度升高时粘度降低。

温度对气体粘度的影响是很显著的，一般高温的炉气比冷空气的粘度 μ 大 4—5 倍；动粘度 ν 则大几十倍，这在研究气体力学时，特别是做炉子模型实验时是必须考虑的。

由于考虑粘性的作用使得流体力学的一些基本方程式的分析和推导变得非常复杂，所以，为了比较容易地得到一些重要而有用的解，常常首先把问题简化成不考虑粘性的作用，然后再把粘度的影响加上去对结果加以修正。这种假定的没有粘性的流体叫做“理想流体”。这一概念在以后将得到应用。应当指出，“理想流体”和通常所说的适合于气体状态方程式($PV' = RT$)的“理想气体”并不是同一概念，而有些书上把理想流体误认为“理想气体”，使二者混淆，是值得注意的。

【例 1】 某加热炉燃料燃烧所需要的风量为 10000 标米³/小时，由风机供入换热器预热 300℃ 后，再由总风管送到炉头。如果考虑热风在总管内的流速最好为 12 米/秒以下，问热风总管内径应取多少为合适？

解： 总管内空气流量是按标准状态下考虑的，即

$$V_0 = 10000\ \text{标米}^3/\text{小时} = 10000/3600 = 2.78\ \text{标米}^3/\text{秒},$$

在 300℃ 时热风的体积流量为：

$$V = V_0(1+\beta t) = 2.78\times\left(1+\frac{300}{273}\right) = 5.84\ \text{米}^3/\text{秒},$$

设管内实际流速为 12 米/秒，则热风总管截面积为：

$$F = \frac{V}{W} = \frac{5.84}{12} = 0.482\ \text{米}^2$$

则热风总管内径为：

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\times 0.48^2}{\pi}} = 0.79\ \text{米}。$$

可取热风总管内径为 800 毫米。

【例 2】 西南高原地区某厂加热炉使用发热量为 1300 千卡/标米³的热煤气。经实测，煤气在内径为 1470 毫米的总管道内的平均流速为 18 米/秒，煤气温度为660℃，

煤气管内压力比外界大气压力高出50毫米水柱。但该地区大气压力只有610毫米汞柱。

求：该加热炉的供热量为多少千卡/小时？

解：按测得煤气流速为18米/秒，则煤气流量为：

$$V = WF = 18\times\frac{\pi}{4}\times 1.47^2 = 27.8\ \text{米}^3/\text{秒} = 27.8\times 3600$$

$$= 100000\ \text{米}^3/\text{小时}$$

为算出供热量，需将煤气流量换算成标准状态。将式1-1-8加以移项，得：

$$V_0 = V\frac{1}{1+\beta t}\cdot\frac{P}{P_0},$$

其中，

$$\frac{1}{1+\beta t} = \frac{1}{1+\dfrac{660}{273}} = 0.292,$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{10333\times\dfrac{610}{760}+50}{10333} = 0.8$$

可见，煤气本身的表压力虽可忽略不计，但地区压力却影响很大，这是高原地区的特点。

炉子煤气供应量为 $V_0 = 100000\times 0.292\times 0.8 = 23400$ 标米^3/小时。

炉子的供热量为：$V_0Q_{\text{低}} = 23400\times 1300 = 30.4\times 10^6$ 千卡/小时。

【思考与练习】

1. 进行压力单位换算：

1工程大气压＝〔　　　　〕物理大气压＝〔　　　　〕公斤/厘米^2

＝〔　　　　〕公斤/米^2＝〔　　　　〕毫米水柱

＝〔　　　　〕毫米汞柱

2. 加压站供给的煤气压力为1900毫米水柱，输送到某厂加热炉前压力降到1800毫米水柱，问由于压力的变化引起的煤气体积的变化如何？

3. 某有色熔炼炉一昼夜处理200吨冰铜，需要鼓风机供入220吨空气。当空气温度为40℃，压力（绝对压力）为740毫米汞柱时，求鼓风机供风量应为多少米^3/小时？

第二节　气体静力学基础

这一节的内容是气体处于静止状态下的力学分析。（1）通过分析，说明静止的气体柱中沿高度上的压力分布——气体平衡方程式，（2）说明重度不同的两个静止气柱中，相对压力沿高度的分布——应用于二气体的平衡方程式。这两个问题之中，前者是基础，后者是引伸。

对于各种冶金炉来说，炉内是一种气体——炉气，炉外是另一种气体——大气。即使这些气体处于静止状态，但是它们各自的压力，以及两者之间的相对压力，都按一定

规律沿高度变化。掌握这些规律，将有助于分析炉子工作中的一些现象和问题。

一、气体平衡方程式

在一个静止的气体柱中，沿高度上的压力分布是：压力从上向下逐渐增大，（由于气体本身重力的作用）。人们熟知的事实是：高空的大气压力小，而地面上的大气压力大，因为地面是在整个大气柱的重力作用下。一桶水。桶底附近的压力，大于桶面附近的压力。如果在桶壁的不同高度上开些小孔，则可发现小孔的位置愈低，水的射程愈远（图 1-2-1）。这也说明，在不同的高度上，桶中水的压力不等。

下面我们来具体讨论这类问题。在讨论中，有两点假定：(1) 气体处于静止状态，其中各处的气体都处于力的平衡之中，(2) 气体的重度 γ 不随高度而变。

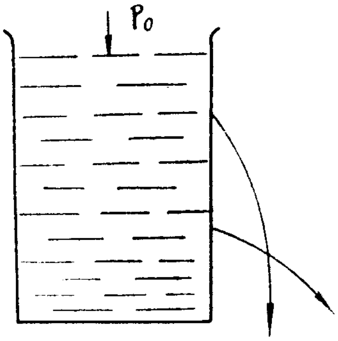

图 1-2-1　水通过小孔的流出

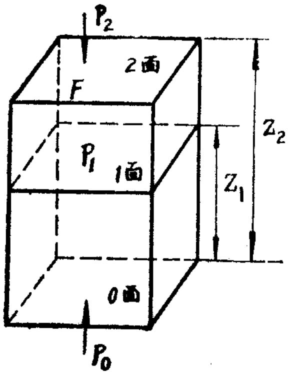

图 1-2-2　气体静力学分析

这样，在静止气体中取一气柱，其横截面为 F，底面上（0—面）压力为 P_0，顶面上（2—面）压力为 P_2，二者之间某平面（1—面）压力为 P_1，如图 1-2-2。

考虑到气体柱本身的重力，可以列出气体平衡方程式：

$$\left.\begin{aligned} &P_1F + Z_1F\gamma = P_0F \\ \text{及}\quad &P_2F + Z_2F\gamma = P_0F \end{aligned}\right\} \qquad (a)$$

将等号两侧同除以 F 得

$$\left.\begin{aligned} P_1 + Z_1\gamma = P_0 \\ P_2 + Z_2\gamma = P_0 \end{aligned}\right\} \qquad (b)$$

其中 P_0, P_1, P_2——各为 0—面、1—面，2—面上的压力，公斤/米^2，

Z_1, Z_2——各为 1—面和 2—面到 0—面的垂直高度，米。

式(b)说明，由于气柱重力的作用，0—面上的压力大于 1 面上的压力，差值为 $Z_1\gamma$；更大于 2—面上的压力，差值为 $Z_2\gamma$。平面的位置愈高，压力愈低，对于这个气柱中的任一平面，可以列出

$$P + Z\gamma = P_0 \qquad (c)$$

其中 P——任意水平上的压力，公斤/米^2，

Z—该水平面到 0—面的垂直高度，米。

由以上三式可见，对静止的气体而言，任一高度上$Z\gamma$与P之和为常数，它等于P_0，即

$$\left.\begin{array}{l} P+Z\gamma=P_0 \\ P_1+Z_1\gamma=P_2+Z_2\gamma=P_0 \end{array}\right\} \quad (1\text{-}2\text{-}1)$$

或

这便是单一气体的平衡方程式的基本形式。

这个关系，也可用图(1-2-3)表示。图中纵座标为高度（Z），横座标为压力（P）。高度为Z_1处的压力为P_1，高度为Z_2处的压力为P_2。由于γ是常数，所以图中气柱中的压力与高度呈直线关系。

应该注意的是平衡方程式不仅说明沿静止流体高度上的压力分布，而且也代表静止流体中的能量平衡关系。压力P代表单位体积流体所具有的压力能；$Z\gamma$一项代表单位体积流体所具有的位能。它们的单位都是压力单位，也是能量单位（公斤/米^{2}即公斤·米/米^3）。式1-2-1 说明在静止流体中的各个高度上压力能和位能之和守恒。

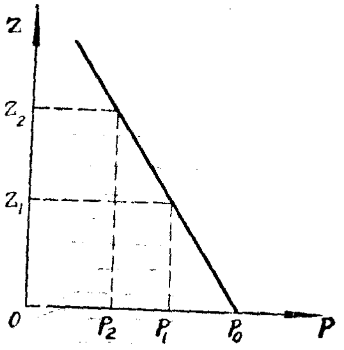

图 1-2-3 压力沿高度的变化

【例 1】 若地面上的大气压力为 10333 毫米水柱，问在高出地面 100 米的水平面上大气的压力是多少，已知大气的重度 $\gamma=1.293$ 公斤/米^3（标准状况下）。

解 由式(1-2-1)知

$$P=P_0-Z\gamma=10333-100\times1.293=10203 \text{ 毫米水柱}$$

即在 100 米的高空处气压比地面上减小 129 毫米水柱。

【例 2】 设地面以上有一静止的热气柱(如烟囱里的气柱)，高度为 100 米，它的重度为 0.4 公斤/米^3。已知在 100 米高处的大气压为 10203 毫米水柱（见上例 1）求热气柱底面上的压力。

解： 设 P_0 为热气柱底面上的压力，则

$$P_0=P+Z\gamma=10203+100\times0.4=10243 \text{ 毫米水柱}$$

可见，此热气柱底部的压力比地面上大气压小 $10333-10243=90$ 毫米水柱，即与地面的大气压相比，它是负压。

上面两例题除了说明式 1-2-1 的应用外，还说明若地面上两气柱的高度相同，则热气柱底面上的压力将小于冷气柱底面上的压力。若使两气柱的底部相通，则由于冷气柱底部的压力大于热气柱底部的压力，前者必向后者流动（请联系烟囱工作原理）。

补充说明

在以上的讨论中，显然是以 0—面作为基准面的（或称参考面），而且使它位于气

柱的最低点。这样的安排，是为了使问题简单明了。但是，实际上不一定把基准面放在气柱的最低点。

如果基准面位于各相关平面之中的某一个位置上，那么气体平衡方程式的一般形式是

$$\boxed{P+Z\gamma=C} \tag{1-2-2}$$

其中 Z —气体柱中任一水平面到基准面的垂直距离。因为 Z 的座标是向上的，故这个水平面在基准面之上，则 Z 为正值；这个水平面在基准面之下，则 Z 为负值。

C —常数，其数值随基准面的位置而异。如果基准面在气体范围以内，则 C 值就等于该基准面上的压力。

二、应用于二气体的平衡方程式

应用于二气体的平衡方程式是研究体系内外的压力差的分布问题。

根据上述气体平衡方程式，气体的压力上小下大（见图 1-2-3）。但为什么用压力管测炉压时，往往会发现炉压的分布是上大下小呢？为什么打开炉门时，常常看到的是上部冒火而下部不冒火或甚至吸风呢？为什么冬季室内上部的气眼往外冒热气，而下部的气眼往里吸冷风呢？为回答这些问题就必须研究容器内外的压力差分布问题，因为“冒气”或“吸气”是决定于内外的压力差，而不决定于绝对压力本身，压力管所测的“炉压”也正是炉内与外界大气压力的差值。这一差值叫做**相对压力，也叫做表压力**。在冶金炉应用范围内，一般人们所称呼的“压力”常常是指这种表压力，即系统内部高出于外界大气压的压力。应用于二气体的平衡方程式就是研究这种表压力在静止气体中的分布。

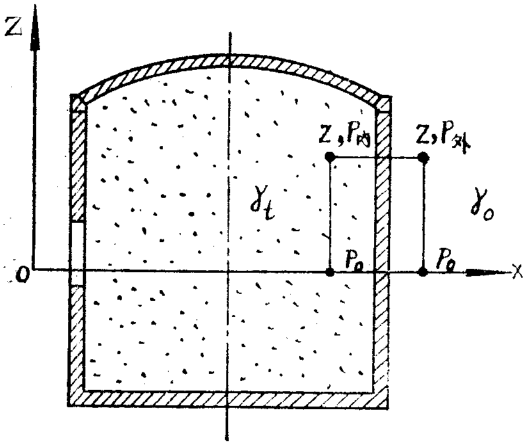

图 1-2-4

如图 1-2-4，设一内外相通的容器内充满重度为 γ_t 的静止的热气体，容器外空气重度为γ_0。我们总可以找到一个平面，在该平面上内外压力相等，同为 P_0。以该平面为基准面，取 Z 的座标向上，分别列 0 面和 Z 面上内外气体的平衡方程式：

内部：　　$P_0=P_{内}+Z\gamma_t$

外部：　　$P_0=P_{外}+Z\gamma_0$

二式相减，移项，并令 $P_{内}-P_{外}=\varDelta P$，则：

$$\boxed{\varDelta P=P_{内}-P_{外}=Z(\gamma_0-\gamma_t)} \tag{1-2-3}$$

这一方程式说明内外压力差 ΔP 与高度 Z 和内外气体重度差的关系。

如果容器为炉膛，内部为较轻的炉气，即 $\gamma_t<\gamma_0$，这时，

在 $Z>0$ 处，$\Delta P=(+)$，炉内为正压，在此处有孔隙时，炉气将由内向外逸出；

在 $Z<0$ 处，$\Delta P=(-)$，炉内为负压，在此处有孔隙时，冷空气将由外向内侵入；

在 $Z=0$ 处，内外压力相等。这一内外压力相等的线，习惯上通常叫做“零压线”，或称“零压面”。

因为炉气逸出，将损失大量热能，影响炉体寿命，并恶化车间操作条件；冷空气侵入炉内，将降低炉温，并增加金属氧化。故设计和操作时，应尽量保持高温区炉膛严密并控制零压线在炉门坎上，以造成最小量的炉气逸出。

上述的“应用于二气体的平衡方程式”（式 1-2-3）只是基准面取在零压线上的一个特例。基准面本来可任意选取，公式的形式虽将有所不同，但说明问题的本质并无变化。而且这一方程式的主要用处在于说明概念，不在于公式本身的应用，因为它将包含在后面讲到的“压头方程式”之中。

【例 3】 某加热炉炉气温度为 1300℃，由燃烧计算得知该炉气在标准状态下的重度为 $\gamma_0=1.3$ 公斤/标米^3。车间温度为 15℃。零压线在炉底水平面上。求炉底以上 1 米高度处的炉膛压力（指表压 ΔP 值）是多少？

解： 炉气重度：
$$\gamma_t=1.3\times\left(\frac{1}{1+\frac{1300}{273}}\right)=0.225\text{ 公斤/米}^3,$$

空气重度：
$$\gamma_0=1.293\times\left(\frac{1}{1+\frac{15}{273}}\right)=1.225\text{ 公斤/米}^3,$$

把基准面取在炉底水平面上，则 1 米高度处的炉压为：

$$\Delta P=1\times(1.225-0.225)=1.0\text{ 毫米水柱。}$$

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 1 米高度上 ΔP 值的变化约为 1 毫米水柱左右。这一数值概念对我们估计炉内上下炉压的分布是有帮助的。

【思考与练习】

1．某钢厂的钢水包盛满钢水，钢水高度为 2 米，重度 $\gamma=7800$ 公斤/米^3，当车间大气压为 1 工程大气压时，问钢水包底部注口处的钢水压力是多少？

2．某厂连续加热炉均热段炉气温度为 1250℃ 炉气在标准状态下的重度 $\gamma_0=1.3$ 公斤/米^3，炉外大气的温度 $t=30$℃，试求当距炉门坎 1.5 米高处炉膛压力为 1.0 毫米水柱时，炉门坎处是冒火还是吸冷风？

3．某厂均热炉的烟囱为 50 米，烟囱内的平均烟气温度为 450℃，大气温度为 30℃，试估算烟囱底部抽力约为多少？（烟气在标准状态下的重度 $\gamma_0=1.30$ 公斤/米^3）

第三节　气体动力学基础

在这一节里将介绍关于气体动力学的几个基本问题，其中包括连续性方程式、白奴里方程式、压头方程式，流动性质和阻力损失等。首先应说明，我们只涉及稳定流动时气体流动的规律。

什么是稳定流呢？

如果气流中任一座标点上的各物理量（如速度W、压力P、重度 γ、温度 t 等）都不随时间 τ 而变化，那么这种流动就叫做稳定流。用数学形式表示，即是：

$$\frac{\partial W}{\partial \tau}=0,\quad \frac{\partial P}{\partial \tau}=0,\quad \frac{\partial \gamma}{\partial \tau}=0,\quad \frac{\partial t}{\partial \tau}=0。$$

在一般正常操作的过程中，炉子系统内任一点的物理量随时间变化不大，可以把这种流动看作稳定流，按稳定流来处理，使问题简化得多。当开闭风机、调节管路阀门、调节烟道闸板等过程的暂短时刻，任一点气流的物理量随时间而变化，这一调节时刻的流动属于不稳定流动。不稳定流动的规律非常复杂，在一般的气体力学中均不涉及。

下面介绍稳定流的几个基本方程式。

一、连续性方程式

在气体输送管道或炉子系统中，截面沿长度变化是常见的。例如，烟囱的直径上小下大，煤气喷出口做成收缩形等等。在这样的通道中，各截上气体流速与截面积之间是什么关系呢？连续性方程式回答了这个问题。

连续性方程式乃是物质不灭定律的一种形式。

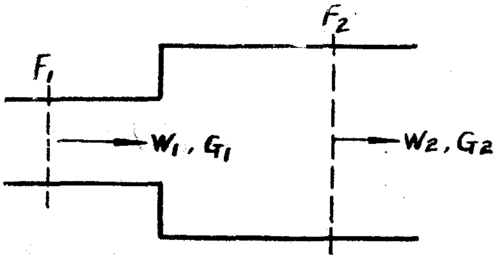

图 1-3-1

当流体在管路内作稳定流动时，如图 1-3-1，单位时间内流过断面 F_1 的重量流量 G_1 必然等于流过断面 F_2 的重量流量 G_2。因为如果 G_1 大于 G_2，则在 F_1 到 F_2 一段管路内的流体重量将增加，使得该段内流体的重度、压力都将增大；相反，如果 $G_1 < G_2$，则 F_1 到 F_2 段管路内流体重量将减小，使得重度、压力等参数也将减小。这就是非稳定流动了。所以，在稳定流动的情况下，二者必然相等，即：

$$G_1 = G_2 = \text{常数}$$

因为 $G=W\gamma F$，故上式可变为：

$$\boxed{W_1\gamma_1 F_1 = W_2\gamma_2 F_2 = \text{常数（公斤/秒）}} \qquad (1\text{-}3\text{-}1)$$

式中，W_1, W_2——流过 F_1 和 F_2 断面的气体平均流速，米/秒；

γ_1, γ_2——在 F_1 处和 F_2 处气体的重度，公斤/米^3。