

# 工程热力学及矿山压气设备

中国矿业学院机电系

一九八〇年七月

# 目 录

绪 论 .....	1
第一篇 工程热力学	
引 言 .....	4
第一章 理想气体的性质 .....	4
§ 1 工质及其热力学状态变数 .....	4
§ 2 理想气体的状态方程式 .....	8
§ 3 理想气体的比热 .....	12
§ 4 工质的膨胀功和压缩功 .....	14
第二章 热力学第一定律 .....	16
§ 1 热力学第一定律 .....	16
§ 2 简单能量方程式, 内能 .....	17
§ 3 稳定流动方程式 .....	20
§ 4 稳定流动方程式的应用* .....	25
第三章 气体的热力比程 .....	27
§ 1 可逆比程与不可逆过程 .....	27
§ 2 热力过程的分析 .....	28
第四章 气体的热力循环及热力学第二定律 .....	38
§ 1 热力循环及热效率 .....	38
§ 2 加诺循环 .....	39
§ 3 热力学第二定律 .....	41
§ 4 熵 .....	42

第五章	水蒸汽 .....	50
§ 1	实际气体 .....	50
§ 2	蒸汽的发生过程及其压容图和温熵图 .....	50
§ 3	蒸汽状态变数的确定 .....	53
§ 4	蒸汽的焓熵图 ( $i-s$ 图) .....	57
§ 5	蒸汽的热力过程 .....	60
§ 6	蒸汽的节流过程 * .....	63
§ 7	蒸汽的动力厂循环 * .....	65
第六章	湿空气 * .....	72
§ 1	湿空气的概念 .....	72
§ 2	湿空气的基本性质 .....	73
§ 3	湿空气的焓湿量图 ( $i-d$ 图) .....	77

## 第二篇 传热学

引    言 .....	80
第一章    导    热 .....	81
§ 1    温度场 * .....	81
§ 2    导热基本规律 .....	83
§ 3    平壁导热 .....	85
§ 4    圆管壁导热 .....	90
第二章    对流换热 .....	96
§ 1    基本概念 .....	96
§ 2    相似的概念 * .....	98
§ 3    一个重要而简单的实例 * .....	100
§ 4    对流换热中的准则等式和准则方程式 .....	103
§ 5    相似理论三定理 * .....	107

§ 6	准则形式的经验公式 .....	109
第三章	辐射换热 .....	117
§ 1	基本概念 .....	117
§ 2	辐射的计算公式 .....	118
§ 3	机电、电器外壳的辐射换热 * .....	119
第四章	传热和换热器 .....	121
§ 1	基本概念 .....	121
§ 2	通过壁的传热 .....	121
§ 3	换热器计算的基本原理 .....	124
§ 4	制冷机的冷凝器和汽化器的设计 * .....	125

### 第三篇 矿山压气设备

第一章	矿山压气设备概论 .....	133
§ 1	压缩空气在矿山上的应用 .....	133
§ 2	压气机的分类 .....	134
§ 3	矿山压气设备主要系统及压气机动作原理 .....	137
§ 4	我国压气机生产和使用现状 .....	139
第二章	压气机工作的基本原理 .....	142
§ 1	压气机的工作循环 .....	142
§ 2	压气机的排气量 .....	149
§ 3	两级压缩 .....	165
§ 4	压气机的功率及比功率 .....	178
第三章	往复式压气机的构造和调节 .....	184
§ 1	往复式压气机的分类 .....	184
§ 2	直筒式压气机 .....	186
§ 3	其他型式的矿用压气机 .....	192

§ 4	压气机的重要部件 .....	197
§ 5	压气机的调节 .....	203
第四章	压气机的冷却 .....	211
§ 1	概 论 .....	211
§ 2	冷却塔和冷却池 .....	217
§ 3	冷却器 .....	224
*§ 4	冷却塔及冷却池的计算 .....	231
*§ 5	冷却器的计算 .....	240
第五章	压气机的运转、维护与检修 .....	247
§ 1	压气机的润滑 .....	247
*§ 2	压气机的起动、运转、停车和试运转 .....	252
§ 3	压气机的重大事故及预防性检修 .....	254
*§ 4	压气机的故障及排出办法 .....	257
§ 5	压气机的安全及检视 .....	261
第六章	压气机站及压气管网 .....	264
§ 1	压气机站 .....	264
§ 2	压气机的附属设备 .....	270
§ 3	压气设备管网的结构及敷设 .....	275
§ 4	管路的计算和测定 .....	280

#### 第 四 篇 矿 山 供 暖 设 备

第七章	矿山供暖设备 .....	290
§ 1	供暖系统 .....	290
§ 2	锅炉设备的工作原理和基本结构 .....	291
§ 3	矿用采暖锅炉 .....	297
§ 4	锅炉的运行和维护 .....	302
§ 5	井筒保护 .....	305
§ 6	水的软化 .....	312

## 绪 论

热工学研究的主要内容是工程热力学和传热学的理论，热力设备的原理、构造、使用条件和提高效率的方法。工程热力学是研究热能和机械能互相转化的规律。例如，研究内燃机气缸内的燃料经过燃烧后，发出的热能如何通过机械设备变为机械能，有多少热能转变为机械能等。传热学是研究热量传递规律的科学。例如，研究锅炉内的水在炉膛内通过高温烟气的加热过程以及压气机和电机的冷却等问题。所以工程热力学和传热学是热工学的理论基础。热力设备包括内燃机、蒸汽机、汽轮机、压气机、制冷机、锅炉设备和暖风设备等。热工学的理论和热力设备在矿山中有着广泛的应用。

矿山上应用的风镐和风钻的动力是压缩空气。产生压缩空气的压气机的工作原理是以热力过程和热力学定律为基础的。要研究压气机的原理必须具备工程热力学的知识。要提高压气机的效率和压气的产量，必须对压气机进行很好的冷却。这就需要具备传热学的知识。

露天矿常采用蒸汽机车和汽车运输煤和矿石。蒸汽机车的原动机是蒸汽机，汽车的发动机是内燃机。因此，为了很好的选择和使用这些机械，需要具备蒸汽机和内燃机的理论知识。

矿区供暖和动力用的蒸汽是由锅炉产生的，在设计矿井时，需要考虑锅炉设备的选择以及运转期间节省煤耗量。而有一些老矿井仍然采用蒸汽机作为提升机和扇风机的动力，所以也要求我们具备锅炉设备和蒸汽机的原理和构造的知识。

东北和华北有些矿区，冬天气温远低于零度，进入井筒内的冷空气常使井壁、提升机罐道和罐道梁结冰，影响到提升能力及人身、设

备的安全，所以要采用暖风设备加热空气。

在深部开采时，井下空气温度过高（高于 $25^{\circ}\text{C}$ ），影响工人的身体健康和劳动生产率，需要采取降温设备，使井下空气的温度降低。而在建井工程中，遇到较厚的含水层时，常用冻结法凿井，在这种情况下，除了工程热力学、传热学的知识之外，还要了解制冷机的原理。

此外，在硬岩石掘进时，有时采用热力钻机，在金属焊接时，需要考虑温度变化对焊接后金属性质的影响，在金属铸造中，需要计算铸件的凝结时间和温度分布，在设计电机时，要考虑电机的发热和散热，所有这一切，都需要具备传热学的知识。

从以上热工学在矿山上的应用的简单叙述，可以清楚地看到，热工学是采矿工程技术干部必须具备的知识。

解放以前，我国人民长期受封建制度、帝国主义和国民党反动派的统治，工业十分落后。那时，我国仅有的一些热机设备，如热力发电设备、蒸汽机车、汽车等绝大多数都是从外国输入的，容量稍大的或稍为精密的热机都不能制造。解放后，在党的正确领导下，各种热机的制造和使用有了飞跃的发展。例如，在热力发电方面，1949年全国解放时，全部发电设备容量只有185万千瓦，全国的电能产量只有43亿度，而到1958年底，全国发电设备容量就达到了640万千瓦，电能产量达到了275亿度，而1959年又增加到415亿度。1955年，我国第一次制成了6000千瓦的锅炉、汽轮机和发电机的全套发电设备。而在1956年和1958年，又先后制成了12,000和25,000千瓦的汽轮机。现在50,000千瓦的整套发电设备已经试制成功。在热力机械方面，解放前我国不能制造汽车，连汽车零件也大多数是从国外输入的而现在已成批生产了“解放牌”汽车；“红旗牌”高级小轿车也开始生产了。1957年开始制成2960马力的蒸汽机车和2400马力的单流式船用蒸汽机；到1959年又试制成功2000马力的内燃机。

和2800马力的船用内燃机。功率很大的船用汽轮机也正在制造。同时，大家都知道，我们还建立了自己的飞机制造业。

当然，由于旧中国工业水平十分落后，热力工程和热机设备的基础都很薄弱，虽然我们已获得了上述巨大成就，但仍须作更大的努力，才能适应国民经济不断发展的需要。我们坚信，在党中央和毛主席的正确领导下，一定能够很快地从现有的基础上，继续前进，赶上世界的先进水平。



# 第一篇 工程热力学

## 引 言

工程热力学是劳动人民在长期实践中所积累的系统的理性知识。它是专门研究热能与机械能互相转化的规律，便于掌握热机的循环原理和经济的利用热能。

因为热机的循环是由热力过程组成，而热力过程又由热力状态的连续变化所组成，所以工程热力学的研究顺序是由状态——过程——循环。在热机中，热能转变为机械能需要通过一种媒介物，此种媒介物叫作工质，以气体为最好。因此，在研究工质的状态时，必须先懂得气体的性质和规律。

## 第一章 理想气体的性质

### §1 工质及其热力学状态变数

所谓工质就是由热能转化为机械能的媒介物。一般用空气和水蒸汽作为工质。

为了研究的方便，常假想一种理想气体，即分子本身体积为零（与分子间距离比较而言），分子之间没有内聚力（互相吸引力）分子为完全弹性体，实际上没有一种实际气体完全符合这种条件。它是实际气体的极限状态。对于空气在压力不高于100大气压和温度不很低时，由理想气体推出的一些公式完全适用于空气，因此在热工学中研究理想气体的规律，不但方便而且有实际的意义。另外由于水蒸气

分子之间的吸引力较大，不能当作理想气体。

由以上所述热能变为机械能时，需要通过工质的状态改变，描写工质状态的基本物理量有温度  $t$ 、压力  $p$  和比容  $v$ ，这三个变数称为热力学状态变数，或称为具体的状态变数。这些变数可用仪表来直接测量。分别叙述如下：

1. 温度 是表示物体的冷热程度。测量时利用百度温度表  $t^{\circ}C$ ，但是在热工学计算时应用绝对温度  $T^{\circ}K$ ，其变化关系如下式所示

$$T = t + 273^{\circ} \quad (1-1)$$

2. 比容 是指单位重量的物质所占有的容积。如有  $G$  “公斤” 气体其占有的总容积为  $V$  “立方米” 其比容  $v$  如下式所示。

$$v = \frac{V}{G} \text{ 立方米/公斤} \quad (1-2)$$

比容的倒数称为物质的比重量  $\gamma$  即

$$\gamma = \frac{1}{v} \text{ 公斤/立方米} \quad (1-3)$$

3. 压力 容器内气体分子对于器壁单位面积的作用力称为压力。测量其大小用压力计，压力表和真空表。压力计的原理表示如下图所示。图 1-1 (a) 表示容器内气体的压力高于当时当地的大气压力  $B$ 。而 (b) 图表示容器内气体的压力小于大气压力  $B$ 。其计算方法分述下：

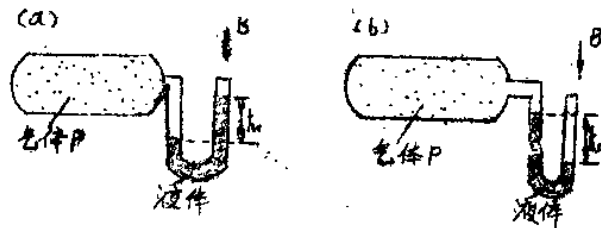


图 1-1 压力计算意图

在 (a) 种情况下  $p - B = \gamma h_1$

$$p = \gamma h_1 + B \quad (1-14)$$

在 (b) 种情况:  $B - p = \gamma h_2$

$$p = B - \gamma h_2 \quad (1-5)$$

式中  $p$  —— 气体的绝对压力;

$B$  —— 当时当地的大气压;

$\gamma h_1$  —— 表压力或称过压;

$\gamma h_2$  —— 真空度或称负压。

式中压力单位的变换如下式:

$$p = \gamma h. \quad (1-6)$$

$p$  —— 公斤/平方米;  $\gamma$  —— 公斤/立方米;  $h$  —— 米。

$h$  表示液柱的高度, 其单位常用毫米。  $\gamma$  表示液体的比重。  $B$  的单位也常用毫米汞柱高。因此在运用以上公式计算压力时, 需变成统一的单位。绝对压力  $p$  的单位为公斤/平方米。在工程上应用由于其数值较小, 常用公斤/平方厘米表示工程大气压, 其值表示如下:

1 工程大气压 = 1 大气压 = 1 公斤/平方厘米 = 10 000 公斤/平方米 = 735.6 毫米汞柱。

物理学中常用的 1 物理大气压其数值如下:

1 物理大气压 = 1.0333 公斤/平方厘米 = 10333 公斤/平方米 = 760 毫米汞柱。

故得

$$1 \text{ 物理大气压 (1 Atm)} = 1.0333 \text{ 工程大气压}$$

由以上分析得到以下两点结论:

- (1) 工程大气压和物理大气压是人为假定的数值, 不因地而异。而当时当地的大气压  $B$  的数值是随地而异。
- (2)  $h$ 、 $B$  是辅助值, 而  $p$  才是代表气体的真正压力, 是我们需

要的数值，因此  $p$  称为绝对压力而  $\gamma h$  称为相对压力。

为了熟习压力的计算和单位的变化，举以下例题供参考：

例 1-1 一蒸汽锅炉压力表指示 8 公斤/平方米（表压力），当时当地大气压  $B$  为 700 毫米汞柱，求汽锅内蒸汽的绝对压力  $p$  为多少？

由公式 (1-4) 知

$$p = B + \gamma h_1 = \frac{700}{735.6} + 8 = 8.952 \text{ 公斤/平方厘米}$$

例 1-2 压力为 10000 公斤/平方米相当于多少水柱高？

由公式 (1-6) 知

$$p = \gamma h$$

$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{10000}{1000} = 10 \text{ 米水柱} = 10000 \text{ 毫米水柱}$$

故得 1 工程大气压 = 10<sup>4</sup> 毫米水柱高，1 公斤/平方米 = 1 毫米水柱高。

例 1-3 用真空表测得汽轮机冷凝器的真空度为 625 毫米汞柱，当地大气压  $B$  为 740 毫米汞柱，求冷凝器内气体的绝对压力是多少。

由公式 (1-5) 知

$$p = B - \gamma h_2 = 740 - 625 = 115 \text{ 毫米汞柱} = \frac{115}{735.6}$$

$$p = 0.152 \text{ 工程大气压 (公斤/平方厘米)}$$

压力表构造原理：弹簧管压力表是工程上常用的压力表，其构造如图 1-2 所示。

蒸汽进入弹性的金属管 1，管子断面为椭圆形，当蒸汽压力  $P$  大于大气压力  $B$  时，椭圆形断面要变成圆形，因此管端 3 发生位移，使扇形齿轮 4 向左下方移动，经小齿轮 8 而使指针 2 移动指出数值。螺旋形游丝 5 是使齿轮 4 和 8 保持紧密的接触。

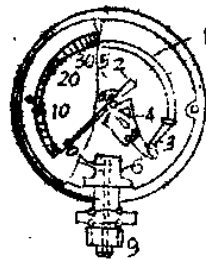


图 1-2 弹簧管压力表 — 7 —

由此得到气体的绝对压力  $p$  如下式所示:

$$p = B + p(\text{表})$$

式中  $p(\text{表})$ ——压力表上指示的压力。

## §2. 理想气体的状态方程式

在热机中由热能转变为机械能时需要通过工质的状态变化, 描写工质的状态用  $p, v, T$  三个物理量, 因此工质在某一状态存在时这三个物理量必然存在着一定的相依关系。气体状态方程式揭穿了这种相依的关系。此方程式是由理想气体定律推导而来。

波义耳—马略特定律和给吕萨克定律最初是由实验得来, 后来得到分子运动论的证明。只有理想气体才能符合这两个定律, 但是对于低压和高温的空气和由二原子组成的气体也可以近似的应用。因此, 压气机的工质—空气和内燃机气缸中的燃气都可以用此定律导出状态方程式, 而汽轮机、蒸汽机的工质—水蒸汽则不能应用。

波义耳—马略特定律是: 在恒定温度下, 一定量的气体的体积与压力成反比。即:

$$G = \text{定数} \quad T = \text{定数}$$

$$\frac{p}{p_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

即:  $p_1 v_1 = p_2 v_2 = p v = \text{定数}$

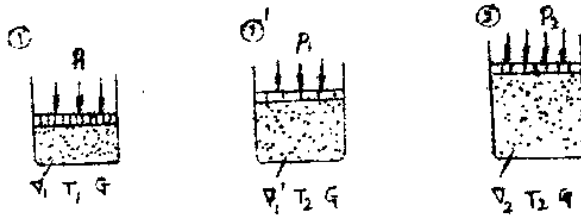
给吕萨克定律是: 在恒定压力下, 一定量的气体的体积与绝对温度成正比。即

$$G = \text{定数} \quad p = \text{定数}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

将二定律合并在一起,  $G$  公斤气体先由状态①变为状态①', 保持

其压力  $P_1$  不变，然后由状态①' 保持其温度不变，变为状态②。如图所 1—3 所示



由状态①变为①' 时，根据给吕萨克定律得出：

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_1'} ;$$

$$V_1' = \frac{T_2}{T_1} V_1. \quad (a)$$

由状态①' 变为状态②时

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1'}$$

$$V_1' = \frac{P_2}{P_1} V_2 \quad (b)$$

公式(a)等于公式(b)，即：

$$\frac{P_2 V_2}{P_1} = \frac{T_2 V_1}{T_1}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{PV}{T} = \text{定数}$$

如气体重量  $G = 1$  公斤，上式则为

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{Pv}{T} = \text{定数}$$

上式说明一定量的理想气体由状态 1 变 2 或者任一状态时， $P, V, T$  总保持以上的关系。如果用  $R$  表示定数，上式则变成如下的形式：

$$\frac{pv}{T} = R$$

$$pv = RT \quad (1-7)$$

公式(1-7)称为1公斤气体的“状态方程式”。式中R称为气体常数\*，随气体性质不同而改变。不因气体的p、v、T的变化而改变。例如空气的R=29.27而氧气的R=26.5。无论在何种压力和温度时都为此值。

对于G公斤气体的状态方程式，则变成如下的形式：

$$pGv = GRT$$

$$pV = GRT \quad (1-8)$$

以上二式各物理量的单位表示如下：

p—公斤/平方米；G—公斤；v—立方米/公斤

V—立方米；T—°K；R—公斤·米/公斤·度。

常用的几种气体常数见者1-1：

表11 气体常数表

空气	氧气	氢气	二氧化碳	一氧化碳	氮气	氨气
R	R <sub>O<sub>2</sub></sub>	R <sub>H<sub>2</sub></sub>	R <sub>CO<sub>2</sub></sub>	R <sub>CO</sub>	R <sub>N<sub>2</sub></sub>	R <sub>NH<sub>3</sub></sub>
29.27	26.5	4.24	19.25	30.3	30.3	49.79

状态方程式(1-7)或(1-8)表示了气体呈一状态存在时，R、v、T的内在规律。如果知道G、R和p、v、T三个变数中的任意两个变数，即可求出第三个变数。在工程上常用此式求得气体的重量G。

例1-4. 压气机的风包容积为10立方米，压力表指示压力为8工程大气压，当时当地大气压B=1工程大气压，风包内压气的温度为60°C，求风包内压气的重量为多少？

由公式(1-8)得:

$$pV = GRT$$

$$G = \frac{pV}{RT} = \frac{(8+1) \times 10^4 \times 10}{29.27 \times (273+60)} = 92.4 \text{ 公斤.}$$

\* 附注: 气体常数  $R$  的求法可用下式:

$$R = \frac{848}{\mu}$$

式中  $\mu$  —— 气体的公斤分子量。

根据实验知道在同温同压下不同气体的 1 公斤分子体积  $\mu_0$  是一个常数。在 760 毫米汞柱和  $0^\circ \text{C}$  时  $\mu_0 = 22.4$  立方米代入公式(1-8)中如得:

$$P = GRT$$

$$P(\mu_0) = \mu RT$$

$$\mu R = \frac{P\mu_0}{T} = \frac{10333 \times 22.4}{273}$$

$$\mu R = 848$$

$$R = \frac{848}{\mu} \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度}$$

$\mu R$  —— 称为气体的通用常数, 其值不随气体的性质压力, 温度比容而改变, 总保持一定值 848

例 1-5. 当压气机停止运转时, 风包内压气的绝对压力  $p = 7$  大气压, 温度  $t_1 = 80^\circ \text{C}$  到夜晚温度降为  $t_2 = 15^\circ \text{C}$  压力变为  $p_2 = 5.2$  大气压(绝对)风包的容积为 3 立方米, 试求由于风包和阀门不严密而漏失的空气量为多少?

由会式(1-8)知:

$$pV = GRT$$

漏气前风包内空气量:



$$G_1 = \frac{P_1 V}{RT_1} = \frac{7 \times 10^4 \times 3}{29.27 \times (273+80)} = 20.3 \text{ 公斤}$$

漏气后风包内的空气量:

$$G_2 = \frac{P_2 V}{RT_2} = \frac{5.2 \times 10^4 \times 3}{29.27 \times (273+15)} = 18.5 \text{ 公斤}$$

漏失的空气重量:

$$G_1 - G_2 = 20.3 - 18.5 = 1.8 \text{ 公斤.}$$

### § 3. 理想气体的比热

在热机中主要是研究把热量如何转变为功量。因此需要计算热量和功量。计算热量的方法通常应用比热。所谓理想气体的比热是指单位数量的气体温度上升或下降一度时，所吸收或放出的热量。

实验证明：同一种气体的比热与温度有关，不同的温度范围比热值就不同，其关系为曲线关系，但在温度不高时可作直线关系，表示如下式

$$C = a + bt$$

式中  $C$  —— 比热；

$a, b$  —— 表示系数；因气体性质不同而异，由实验测得。

$t$  —— 温度 $^{\circ}C$ 。

将公式(1-9)可画成(图1-4)

由1-4图知，在温度 $t_1$ 时其比热为 $C_1$ ， $t_2$ 时为 $C_2$ 。 $C_1$ 或 $C_2$ 称为气体的真实比热。

表示成公式如下：

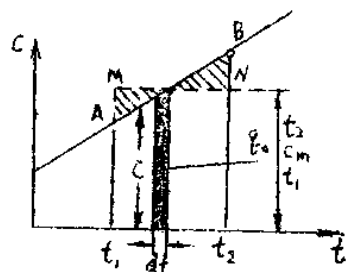


图1-4 比热与温度的关系

$$C_1 = a + bt_1$$

$$C_2 = a + bt_2$$

可以用真实比热计算从 $t_1$ 至 $t_2$ 加热量如下式