

高压断路器

下 册

清华大学高压教研组编

电力工业出版社

内 容 提 要

本书内容讲述高压断路器及其操动机构的基本理论和工作原理。工作原理包括产品的原理、性能、运行中的一些问题和结构分析等。本书分上、下册出版。

下册内容有：气体动力学基础、气吹断路器、特殊断路器、操动机构、气动操动机构、液压操动机构、连杆机构的静特性、连杆机构的动特性与缓冲问题、电磁铁等。

本书供从事高压断路器的设计、运行、试验、维修的工程技术人员和工人阅读，也可作为高等院校有关专业的教学参考书。

参加本书编写的有：钱家骊、张节容、王伯翰、吉嘉琴、徐国政。

高 压 断 路 器

下 册

清华大学高压教研组编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 11.375印张 300千字

1980年7月第一版 1980年7月北京第一次印刷

印数 00001—14650册 定价 1.25元

书号 15036·4074

主要符号意义

A —— 常数, 热功当量, 能量, 机械利益	n —— 气体的多变系数, 转速
a —— 音速, 加速度	p —— 压力
B —— 常数, 磁感应强度	Q —— 热量, 体积流量
C —— 电容, 传动比	q —— 单位重量的热量
c —— 比热, 回路系数	R —— 气体常数, 半径, 磁阻
D —— 直径	r —— 半径
d —— 直径	S —— 面积
E —— 体积弹性模数, 电弧电压梯度, 恩格拉粘度	T —— 绝对温度, 时间常数
F —— 力	t —— 摄氏温度, 时间
f —— 摩擦系数	U —— 气体内能, 电压
G —— 重量, 磁导	u —— 单位重量气体的内能, 速度, 电压
g —— 单位磁导, 重力加速度	V —— 体积, 容积
H —— 磁场强度	v —— 气体比容, 刚体速度
h —— 行程, 距离, 深度	W —— 重量, 机械功
I —— 电流	w —— 流体速度
i —— 电流 (瞬时值), 热焓	x —— 距离
J —— 转动惯量	z —— 长度
j —— 电流密度	α —— 液体体积膨胀系数, 转角, 系数
K —— 常数	β —— 液体体积压缩率, 系数
k —— 绝热系数	γ —— 重度
L —— 气体作的机械功, 长度	δ —— 厚度, 间隙长度
M —— 马赫数, 互感, 力矩	ε —— 压力比
m —— 质量	η —— 机械效率, 液体内摩擦系数, 绝对粘度
N —— 匝数, 气体克分子数, 正压力	μ —— 气体分子量, 截面系

数, 导磁率

ν —— 运动粘度

ξ —— 液流摩擦损失系数

ρ —— 密度, 电阻率

ϕ —— 磁通

φ —— 角度

Ψ —— 磁链

ω —— 角速度

τ —— 温升, 液体表面摩擦力

ζ —— 液流局部损失系数

目 录

第十一章	气体动力学基础	1
第一节	气体的状态参数与状态方程式	1
第二节	气体变化的过程	7
第三节	流动气体的能量平衡	17
第四节	气体中的音速	24
第五节	喷口的气流参数	30
第十二章	气吹断路器	44
第一节	气体的灭弧和绝缘性能	44
第二节	气吹灭弧原理	58
第三节	压缩空气断路器	74
第四节	六氟化硫断路器	81
第十三章	特殊断路器	92
第一节	直流高压断路器	92
第二节	半导体交流高压断路器	100
第十四章	操动机构	105
第一节	概述	105
第二节	对操动机构的要求	107
第三节	操动机构分类	112
第四节	断路器操动机构的特点	117
第十五章	气动操动机构	119
第一节	概述	119
第二节	气动操动机构中的阀门	122
第三节	容器充放气时间的计算	128
第四节	气阀动作时间的计算	136
第五节	气阀结构参数的确定	142
第六节	气动操动机构设计要点	146

第十六章	液压操纵机构	149
第一节	液压操纵机构的特点	149
第二节	液压油的基本性质	152
第三节	静止液体和流动液体	163
第四节	液流的压力损失	171
第五节	瞬变液流的冲击现象	193
第六节	液压操纵机构的组成	200
第十七章	连杆机构的静特性	227
第一节	连杆机构	227
第二节	连杆机构的机械利益和死点	239
第三节	连杆机构中的摩擦、机械效率和死区	249
第四节	连杆式脱扣机构	267
第十八章	连杆机构的动特性与缓冲问题	275
第一节	概述	275
第二节	断路器触头运动速度的计算	277
第三节	替代质量和等效质量	281
第四节	断路器速度计算举例	287
第五节	断路器结构参数对刚分速度的影响	297
第六节	缓冲器	299
第十九章	电磁铁	311
第一节	磁通、磁阻和磁路	312
第二节	电磁铁的能量、机械功和吸力	322
第三节	电磁铁的动特性和动作时间	331
第四节	极化电磁铁	340
第五节	推力电磁机构	347
第六节	电磁线圈的计算	354

第十一章 气体动力学基础

第一节 气体的状态参数与状态方程式

一、状态参数

气体是由大量分子组成的，每个分子都处于不停息的无规则运动状态，在分子之间以及分子与容器器壁之间不断产生碰撞。大量微观粒子的运动现象可以用气体的状态参数来描绘。

气体的状态参数有三个：压力、重度和温度。下面分别进行介绍。

1. 压力 (p)

压力是气体分子对器壁的碰撞造成的，可以表示为 $p = F/S$ ， F 为作用在表面积 S 上的作用力，其方向与表面垂直。压力 p 在物理学中称为“压强”，而在工程上通称“压力”。

压力的单位，在工程技术上使用公斤/厘米²，也称“工程大气压”，有时也用公斤/米²计算。

在实用单位中，压力的单位是“巴” (bar)，1 巴 = 10⁵ 牛顿/米²，而 1 牛顿 = 0.102 公斤，故 1 巴 = 1.02 公斤/厘米²。

在物理学中，压力以 0°C 时 760 毫米高的水银柱在单位底面积上的作用力为单位，称为“标准大气压” (ata)，它比工程大气压略大一些，即：1 标准大气压 = 1.033 公斤/厘米²。

在英制系统，压力单位是磅/英寸² (psi)，1 磅/英寸² = 0.07 公斤/厘米²。

几种压力单位之间的换算关系如表 11-1。

气体的压力有两种不同的表示方法：一种是气体作用在器壁上的实际作用力数值，称为“绝对压力”；一种是用压力表测量时的读数，称为“表压力”。例如把压力表置于大气中，表没有偏

表 11-1

压力单位换算表

工程大气压 (kg/cm ²)	标准大气压 (ata)	毫米水银柱 (mmHg)	巴 (bar)	磅/英寸 ² (psi)
1	0.968	736	0.981	14.22
1.033	1	760	1.013	14.7
0.00135	0.00131	1	0.00133	0.0193
1.02	0.987	750	1	14.5
0.07	0.0681	51.72	0.0689	1

转，也就是表压力等于零，而实际压力约为 1 大气压，因此，绝对压力 = 表压力 + 大气压力。表压力的工程单位表示为公斤/厘米²·表(kg/cm²·g)，或“表压”。在实际测量中常用表压力，而在气体状态参数计算中应该用绝对压力。

2. 重度 (γ)

重度表示单位体积气体的重量，可以表示为

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

式中 G —— 气体的重量 (公斤)；

V —— 气体占有的体积 (米³)。

重度的大小体现了单位体积中气体分子的数目。重度的倒数称为“比容” (v)

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

3. 温度 (T)

气体的温度代表气体分子无规则热运动的激烈程度，温度越高，就说明分子动能越大，也就是气体的内能越大。

在热力学计算中通常用绝对温度，记为 T (°K)，在生活中常使用摄氏温度，记为 t (°C)。两者的关系为 $T = 273 + t$ 。例如当 $t = 20^\circ\text{C}$ 时， $T = 293^\circ\text{K}$ 。在计算温度差时，这两种温度单

位的计算值是相等的，即 $\Delta t = \Delta T$ 。

二、理想气体的状态方程式

一般气体分子之间的距离比分子本身的大小要大得多，分子之间的相互作用力很小，可以忽略不计。分子运动中除了与器壁碰撞或分子之间相互碰撞之外没有其它相互作用，而且分子的重力也可忽略，因此气体分子可以看成是在广阔空间中自由运动的无限小的小球。这样的模型就是理想气体模型。理想气体模型是总结了大量气体所表现的主要特征而提出的，它排除了复杂现象中的个别特殊性，反映了气体运动的许多重要特性，对分析各种气体现象有很大的指导意义。

理想气体的三个状态参数之间存在着简单的关系式，这个关系式就是理想气体状态方程式

$$\text{或} \quad \left. \begin{aligned} \frac{p}{\gamma T} &= R \\ \frac{pv}{T} &= R \end{aligned} \right\} \quad (11-1)$$

式中各量的单位为： p （公斤/米²）， γ （公斤/米³）， v （米³/公斤）， T （°K）， R （公斤·米/公斤·°K）。 R 称为气体常数，与气体的分子量 μ 有关

$$R = \frac{848}{\mu} \quad (11-2)$$

各种气体都有各自的气体常数。

理想气体状态方程式表明，在任何状态下气体的压力 p ，重度 γ 与温度 T 之间存在着确定的关系。对于 G 公斤的气体，其体积为 V 立方米，则式（11-1）变为

$$\frac{pV}{T} = GR \quad (11-3)$$

由状态方程式可知，在三个状态参数（ p 、 γ 、 T ）中，只要知道其中两个参数，就可以决定第三个参数。因此，表示气体的状态只需给出两个参数就可以了。

对于空气来说，当压力在几百个大气压以内，温度在摄氏零下几十度以上，与理想气体模型的差别是不大的。因此，工程中使用理想气体状态方程式来分析空气的特性基本上是准确的。

断路器中常见气体的参数见表11-2。

表 11-2 常见气体参数

气 体	参 数	μ	$R \left(\frac{\text{公斤} \cdot \text{米}}{\text{公斤} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$	γ (公斤/米 ³) (在0°C, 1ata时)
空 气		约29	29.27	1.252
氮(N ₂)		28.02	30.26	1.215
氢(H ₂)		2.016	420.6	0.0875
六氟化硫(SF ₆)		146.07	5.81(0°C, 1ata)	6.45
水蒸汽(H ₂ O)		18.02	47.06	0.78
氧(O ₂)		32	26.5	1.40

三、六氟化硫的状态参数

六氟化硫(SF₆)是优良的灭弧和绝缘气体介质，它是一种分子量很大的重气体，容易液化，与理想气体的模型有较大差异，用理想气体状态方程式来计算六氟化硫的参数，特别是在高压与低温度时，会产生较大误差。例如，在293°K时六氟化硫气体的压力随重度的变化与按理想气体状态方程式计算结果的差异如图11-1。当重度增加时，六氟化硫的实际压力值要比按理想气体计算的压力值低。出现这个差异的原因在于六氟化硫气体分子体积较大，当空间容积缩小时，分子之间距离减小，分子之间的吸力逐渐起作用，使分子对容器器壁的撞击作用减弱，因此宏观上压力值就低了。

六氟化硫气体的三个状态参数之间的关系可用经验公式来表示，比较简单的一种经验公式如下

$$\left. \begin{aligned} p &= 0.58 \times 10^{-3} \gamma T (1 + B) - \gamma^2 A \\ A &= 0.764 \times 10^{-3} (1 - 0.727 \times 10^{-3} \gamma) \\ B &= 2.51 \times 10^{-3} \gamma (1 - 0.846 \times 10^{-3} \gamma) \end{aligned} \right\} \quad (11-4)$$

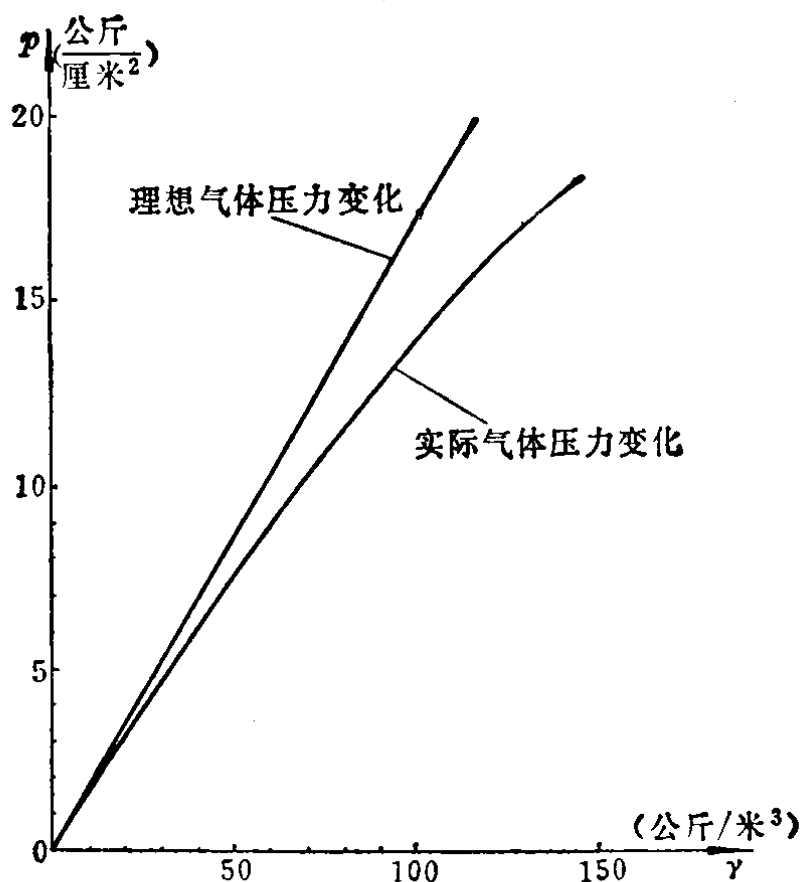


图 11-1 SF_6 的 $p-\gamma$ 变化与理想气体比较
($T = 293^\circ\text{K}$)

式中各量的单位为：重度 γ (公斤/米³或克/升)；温度 T ($^\circ\text{K}$)；压力 p (公斤/厘米²)。

在工程上，应用图 11-2 状态参数曲线更为方便。图中曲线 AFB 为六氟化硫的饱和蒸汽压力曲线，其右侧是气态区域， AF 是液态区域， FFB 是固态区域。 F 点是六氟化硫的熔点(凝点)，其参数为 $T_F = -50.8^\circ\text{C}$ ， $p_F = 2.28$ 标准大气压 (2.36 公斤/厘米²)。 B 点是六氟化硫的沸点，即饱和蒸汽压力为 1 大气压时的温度， $T_B = -63.8^\circ\text{C}$ 。

在气态区域中的斜直线簇对应着不同的气体重度 γ 。应用这些曲线可以计算六氟化硫气体某一参数发生变化时其他状态参数的变化。

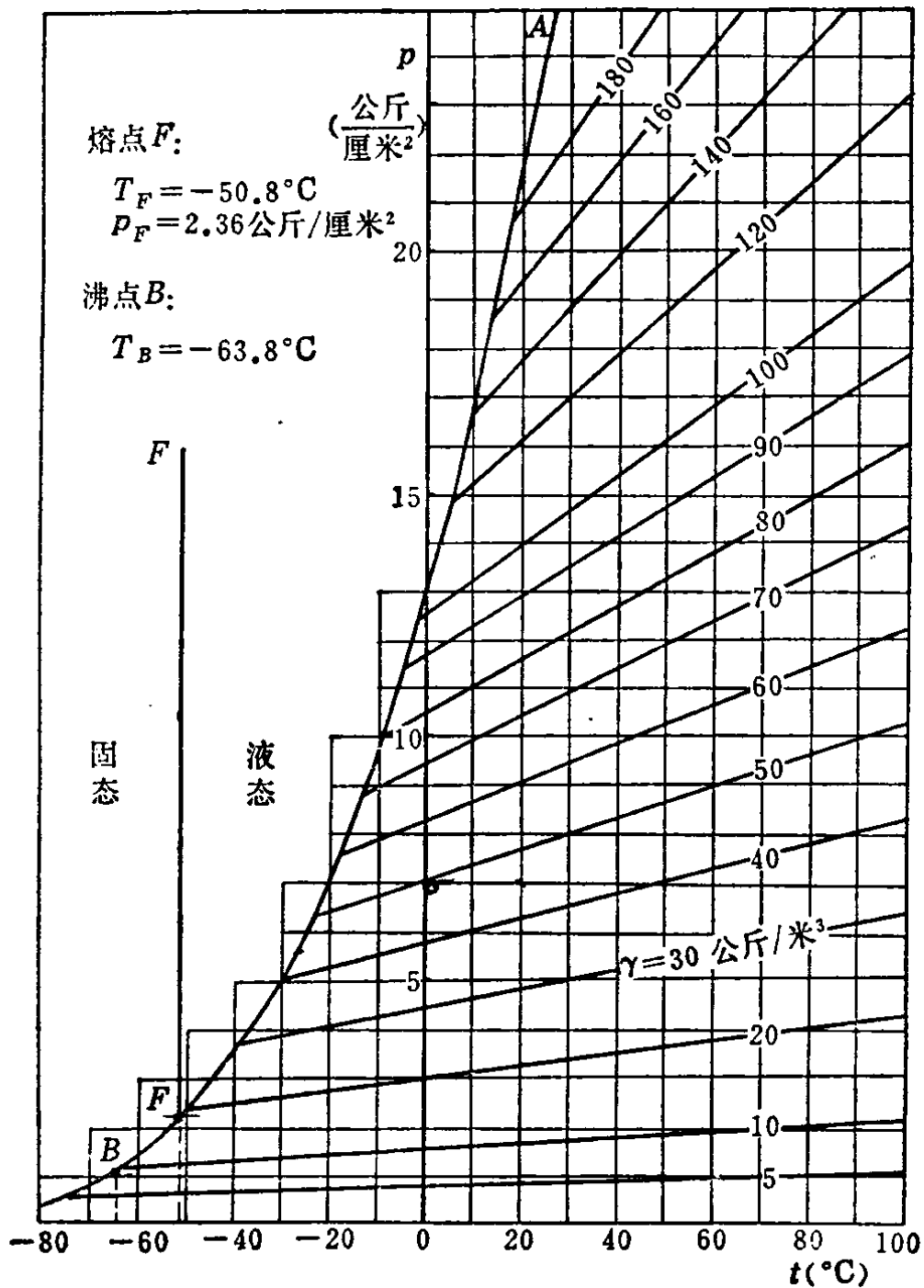


图 11-2 SF_6 的状态参数曲线

【例题】 某六氟化硫断路器工作压力在 20°C 时为 7.0 公斤/厘米^2 ，求气体的重度 γ 及出现液化时的温度。

【解】 从图11-2查出， $t = 20^\circ\text{C}$ 、 $p = 7 \text{ 公斤/厘米}^2$ 时， $\gamma = 45 \text{ 公斤/米}^3$ 。

当温度变化时，气体的重量及体积不变，即 γ 保持为常数。沿着 $\gamma = 45 \text{ 公斤/米}^3$ 的斜直线，查出与曲线 AF 相交的横坐标就

是液化时的温度，由图中可得 $t = -25^{\circ}\text{C}$ 。因此，该断路器应在环境温度高于 -25°C 的条件下工作。

第二节 气体变化的过程

状态方程式确定了气体处于某一状态下三个状态参数 p 、 γ 、 T 之间的关系。如果气体的状态发生了变化，两种状态之间参数应符合什么关系？这就要看过程条件的变化，即过程的能量关系。在下面的分析中我们仍然用理想气体的模型。如前所述，对于空气（或氮、氧）按理想气体模型所导出的结论在工程实际使用中基本是准确的，而对六氟化硫气体只是近似的，但可以看出变化的大致情况。

一、气体变化过程的能量守恒关系

（热力学第一定律）

例如，图11-3所示容器中充有气体，其压力与活塞重量（ W 公斤）相平衡，设活塞与器壁之间无摩擦。当气体受热，从外界获得热量 dQ ，体积膨胀，活塞向上推移了 Δh 的距离。在变化过程中总的能量是守恒的，这里有三种能量起了变化：

- （1）外界供给气体热量 dQ ；
- （2）气体对外做了机械功 dL ；
- （3）气体温度升高了，即内能增加了 ΔU 。

这三个能量之间的平衡关系为

$$\left. \begin{aligned} dQ &= dU + AdL \text{ (千卡)} \\ dL &= W dh \text{ (公斤} \cdot \text{米)} \end{aligned} \right\} \quad (11-5)$$

式中能量单位都用热量单位千卡表

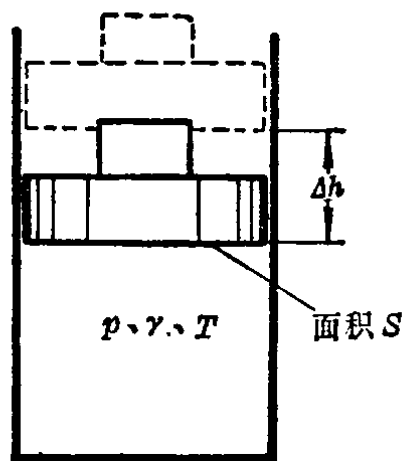


图 11-3 气体定压加热

示, A 为机械功 (公斤·米) 与热量单位 (千卡) 之间的换算系数, 称为“热功当量”, 其数值为 $A=1/427$ 千卡/公斤·米。

若气体重量是 G 公斤, 对于 1 公斤的气体进行计算, 则有

$$\frac{dQ}{G} = \frac{dU}{G} + A \frac{dL}{G}$$

或写成

$$dq = du + Adl \quad (\text{千卡/公斤}) \quad (11-6)$$

字母 dq 、 du 及 dl 分别代表 1 公斤气体吸收的热量、内能增量及对外做的机械功。

应注意式 (11-5)、(11-6) 中各量正负号的意义。 $dQ(dq)$ 表示气体从外界获得的热量, $dU(du)$ 表示内能的增加, $dL(dl)$ 表示气体对外做的机械功。如果气体对外散热, 内能减少, 或外界给气体做了机械功, 则相应各量取负号, 即 $-dQ(-dq)$, $-dU(-du)$ 及 $-dL(-dl)$ 。例如, 气体吸收了外界机械功 (受压缩), 使气体内能增加, 而且向外散热, 则能量平衡关系写为

$$-dQ = dU - AdL \quad (\text{千卡})$$

$$AdL = dU + dQ \quad (\text{千卡})$$

或

$$Adl = du + dq \quad (\text{千卡/公斤})$$

这些气体能量平衡关系式 (11-5)、(11-6) 也称为热力学第一定律。应用这个关系加上状态方程式, 就可以确定气体在状态变化时各参数之间的关系。下面我们讨论几种典型的变化过程。

二、定容变化过程

定容变化过程就是在变化过程中气体的体积维持不变, 也就是气体与外界没有机械功的交换 ($dl=0$)。因此能量平衡式 (11-6) 变为 $dq=du$ 。气体从外界吸收的热量全部转变为气体的内能, 使气体温度升高。

在物理学中, 物体温度每升高 1°C 所需要的热量称为物体的

“热容量”，而单位重量(1公斤)物体的热容量叫做“比热”。在气体定容变化过程中，1公斤气体温度升高1℃所需要的热量称为气体的“定容比热”，记为 c_v 。

$$\left. \begin{aligned} c_v &= \frac{dq}{dT} \Big|_{V=\text{常数}} \quad (\text{千卡/公斤}\cdot^\circ\text{K}) \\ c_v &= \frac{du}{dT} \quad (\text{千卡/公斤}\cdot^\circ\text{K}) \\ du &= c_v dT \quad (\text{千卡/公斤}) \end{aligned} \right\} \quad (11-7)$$

对于理想气体，定容比热 c_v 是个常数，因此，气体内能也可写成

$$u = c_v T \quad (11-8)$$

从式(11-8)可见，当气体的绝对温度等于零时，气体的内能也等于零，从物理意义上来说，就是气体分子的热运动停止了。当然这只是一种理论上的极限情况。定容比热就是标志气体内能大小的一个参数。

定容变化过程气体状态参数的变化可以直接从状态方程中导出，由式(11-3)对于一定量的气体在 $V = \text{常数}$ 的条件下则有

$$\frac{p}{T} = \text{常数} \quad (11-9)$$

【例题】 某液压机构的气体储压器，在20℃(293°K)时气体压力为201公斤/厘米²。若环境最高温度为+40℃，最低为-20℃时，求相应的工作压力变化。

【解】 储压器中气体重量及体积在温度变化时是保持不变的，因此是个定容变化过程。

在20℃时气体的状态参数为

$$p_1 = 201 \text{ 公斤/厘米}^2, \quad T_1 = 293^\circ\text{K}$$

在最高温度时， $T_2 = 273 + 40 = 313^\circ\text{K}$ ，其工作压力由式(11-9)计算

$$p_2 = \frac{p_1}{T_1} T_2 = \frac{201}{293} \times 313 = 215 \text{ 公斤/厘米}^2$$

在最低温度时， $T_3 = 273 - 20 = 253^\circ\text{K}$ ，其工作压力为

$$p_3 = \frac{p_1}{T_1} T_3 = \frac{201}{293} \times 253 = 173.5 \text{ 公斤/厘米}^2$$

储压器在这两种极限温度下的工作压力差为

$$p_2 - p_3 = 215 - 173.5 = 41.5 \text{ 公斤/厘米}^2$$

这个压力差达到常温（20℃）时工作压力的百分之二十以上。

三、定压变化过程

定压变化过程中气体的压力保持不变，前面图11-3的例子就是定压变化过程，所以式（11-5）就是定压变化过程的能量平衡关系。设气体的重量为 G 公斤，体积为 V 米³，由于体积膨胀，气体对外做的机械功为

$$dL = pSdh = pdV \text{ (公斤·米)}$$

或
$$dl = \frac{pSdh}{G} = pdv \text{ (公斤·米/公斤)} \quad (11-10)$$

式中 S —— 被气体推动的活塞的面积（承压面积）；

dh —— 活塞位移。

由气体状态方程式（11-1），当 $p = \text{常数}$ 时， $pdv = RdT$ ，因此，定压过程中气体对外做的机械功为

$$dl = RdT \quad (11-11)$$

在整个变化过程中，气体从 p_1 、 v_1 、 T_1 状态变化到 p_1 、 v_2 、 T_2 状态，对外做的机械功为

$$l = \int_{v_1}^{v_2} dl = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \text{ (公斤·米/公斤)}$$

(11-12)

从这里我们看到气体常数 R 的实际物理意义，即 R 代表 1 公斤气体在定压变化过程中温度升高 1°K 对外所做的机械功的数值。

在定压变化过程中，1 公斤气体温度升高 1°K 所需要的热量称为“定压比热”，记为 c_p

$$c_p = \left. \frac{dq}{dT} \right|_{p-\text{常数}}$$

将式(11-6)、(11-11)代入则得

$$c_p = \frac{du + Adl}{dT} = \frac{du}{dT} + AR \text{ (千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{K)}$$

式中 $\frac{du}{dT}$ 表示气体内能的变化。

将式(11-7)代入, 则

$$c_p = c_v + AR \text{ (千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{K)} \quad (11-13)$$

由此可见, 气体的定压比热 c_p 比定容比热 c_v 要大些, 相差的数值就是定压变化过程对外做的机械功, 这在物理意义上也是容易理解的。

对于理想气体, 定压比热 c_p 也是个常数。定压比热与绝对温度的乘积 $c_p T$ 在热力学中称为“焓”, 记为 i

$$\left. \begin{aligned} i &= c_p T \text{ (千卡)} \\ \text{或 } i &= c_v T + A p v \text{ (千卡)} \end{aligned} \right\} \quad (11-14)$$

焓也是气体状态的一个参数, 关于它的物理意义及实际应用, 在后面流动气体中再来讨论。

定压比热与定容比热的比值称为气体的绝热系数 k , 即

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (11-15)$$

绝热系数是气体的一个非常重要的参数, 它决定于气体的分子构造。对于理想气体, c_p 、 c_v 都是常量, 所以 k 是个常数。而实际气体的 c_p 、 c_v 及 k 都是随温度而变化的。空气及六氟化硫的 c_p 及 k 的数据见表11-3、11-4。

在300~1000°K范围内, 六氟化硫气体的绝热系数 $k=1.088$

表 11-3 空气的定压比热与绝热系数

t ($^{\circ}\text{C}$)	0	200	600	1000	2000
c_p (千卡/公斤 \cdot °K)	0.240	0.242	0.248	0.257	0.295
k	1.403	1.398	1.385	1.365	1.330