

活 塞 式 压 缩 机

(試 用 教 材)

上 册

華 中 工 學 院 压 缩 机 教 研 組 編

一 九 七 四 年 八 月

前 言

毛主席教导我们：“**不破不立。破，就是批判，就是革命。破，就要讲道理，讲道理就是立，破字当头，立也就在其中了。**”

旧工科院校所用的活塞式压缩机教材，照搬或基本照搬苏修过去一套，从理论到理论，内容繁琐，故弄玄虚，严重脱离我国社会主义革命和社会主义建设的实际。通过无产阶级文化大革命，证明旧教材已极不适应教育革命形势发展的需要。

为此，我们深入三大革命运动实践，到有关工厂单位进行调查研究，在政治上接受再教育，在业务上进行再学习。以毛主席的“**实践论**”和“**矛盾论**”为指针，力图试编出一本活塞式压缩机的新教材。

新教材中，在顾及教学特点的基础上，基本上按照我国目前所采用的设计步序进行内容编排；注意了理论联系实际，特别是我国的生产实际；考虑了一些典型机器和典型零部件带动一般的问题。

根据“**教材要彻底改革，有的首先删繁就简。**”的原则，新教材中有的内容系在原有基础上进行删繁就简，力求做到“**少而精**”。

毛主席教导我们：**洋为中用，古为今用。**新教材在内容上反映了一些国外新资料，对过去一些有用的东西，本着批判接受的精神，仍给予了一定程度的引用。

编写过程中，曾得到无锡压缩机厂、上海压缩机厂、上海第一压缩机厂、上海第二压缩机厂、上海第三压缩机厂、上海大隆机器厂、沈阳气体压缩机厂、江西气体压缩机厂和通用机械研究所等许多单位的大力支持。在此，我们表示感谢。

由于我们马列主义、毛泽东思想水平和业务水平不高，本教材中一定存在不少缺点和错误，望批评指正。

华中工学院压缩机教研组

一九七三年十二月

目 录

前 言

第一章 压缩机的理论循环	1
第一节 压缩过程状态参数的变化	1
第二节 理论循环功的计算	14
第三节 热力参数图及其应用	16
第二章 压缩机的工作过程	19
第一节 级的实际工作过程	19
第二节 多级压缩	36
第三章 压缩机的性能和结构参数	45
第一节 排气量与行程容积	45
第二节 结构参数和结构尺寸	54
第三节 排气温度	62
第四节 功率和效率	64
第四章 压缩机中的力与力矩	69
第一节 往复运动中的作用力	69
第二节 总活塞力的分析	79
第三节 旋转运动中的作用力	81
第五章 飞轮矩确定与惯性力平衡	83
第一节 总切向力图	83
第二节 飞轮矩的确定	84
第三节 惯性力的平衡	86
第六章 压缩机总体结构方案	96
第一节 压缩机型式特点及适用场合	96
第二节 压缩机列数的选择和级在列中的配置	103
第三节 压缩机的驱动	108
压缩机热力和动力计算例题	112
一、H22—140/320 氮氢气压缩机的热力计算	112
二、4M16—65/220 二氧化碳压缩机的动力计算	121
附录	130

第一章 压缩机的理论循环

往复式活塞式压缩机工作的最基本特点是活塞在气缸内来回移动，活塞端面与气缸的壁和盖组成密闭的可变容积。当活塞向缸盖移动，使气缸容积缩小，缸内气体受到压缩，气体压力升高。我们将发现，随着气体容积的缩小和压力的提高，气体的温度也相应升高。“我们必须要看它的实质，而把它的现象只看作入门的向导，一入门就要抓住它的实质，这才是可靠的科学的分析方法。”这一现象说明气体的压力 p 、比容 v 与温度 T 之间存在着一定关系，也正是这些参数之间的变化关系，给我们提供了压缩机热力计算的依据。

本着由浅入深的原则，我们假设气缸没有余隙容积；进排气时没有阻力，没有压力波动，没有热交换；气缸绝对严密，没有洩漏；气体被压缩时按不变的多方压缩指数进行。在这些假设条件下的理想压缩机，曲轴旋转一周，活塞回到原来的位置，气缸内所完成的工作过程称为理论循环。压缩机的理论循环如图1—1所示，图下方为压缩机的示意图，上方为活塞运动时气缸内气体压力随活塞运动的变化规律。4—1表示在不变压力 p_1 下的进气过程；1—2表示多方压缩指数不变的压缩过程，过程曲线上各点，表示压缩过程气体的状态变化，压缩终了压力由 p_1 升高到 p_2 ；2—3表示在不变压力 p_2 下的排气过程。活塞从止点4到止点1所走的距离，称为一个行程。在进气压力 p_1 下，活塞一个行程所吸进的气体容积为

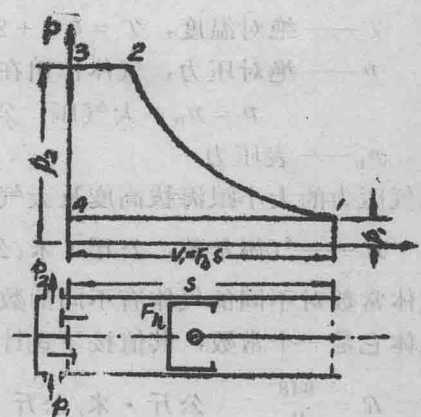


图1—1 压缩机的理论循环

$$V_1 = F_h S \text{ 米}^3 \tag{1-1}$$

式中 F_h ——活塞面积，米²；
 S ——活塞行程，米。

研究压缩机的循环，目的是分析其热力参数间的关系，并确定不同循环的经济性。

第一节 压缩过程状态参数的变化

从压缩机理论循环中可以明了，它与热力学中的循环是不相同的。因为理论循环进气和排气不涉及状态参数的变化，只有气量方面的迁移，唯压缩过程具有热力过程的性质。因此研究压缩机循环时，不能用气体的比容作为坐标，就是这个道理。在压缩机中通过曲柄连杆机构，使机械能变为气体的压能是借助于压缩过程气体状态参数的变化。

所谓气体的状态参数是指在一定条件下，表示其物理特性的参数。最常用的气体状态参数是压力、温度和比容。表示它们互相关系的式子叫状态方程。由于气体性质和所处状态不同，气体状态方程也不同。

1. 理想气体状态方程：

分子之间不存在引力和分子本身不占有体积的气体称为理想气体。其实际上是不存在的。但在压缩机中，压缩气体的温度通常都比临界温度高，而压力 $p \leq 100$ 气压以下，应用理想气体状态方程进行热力计算，已足够精确。例如，压缩气体的临界温度低于环境温度，而工作压力 $p_2 \leq 30$ 气压时，应用理想气体状态方程的误差实际上是不会超过1—2%。

理想气体状态方程：

$$pv = RT \quad (1-2)$$

或

$$pV = GRT \quad (1-3)$$

式中： v ——比容，即单位重量气体所占的容积，米³/公斤

V —— G 公斤气体的容积， $V = Gv$ ，米³；

T ——绝对温度， $T = t^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}$ ， $^{\circ}\text{K}$ ；

p ——绝对压力，气体作用在单位缸壁面积上的力，

$$p = p_b + \text{大气压，公斤/米}^2；$$

p_b ——表压力

大气压力的大小跟海拔高度及大气温度有关，其变化关系如图1—2所示。

R ——气体常数，公斤·米/公斤·度。

气体常数对不同的气体有不同的数值，对某一指定的气体它是一个常数，其值按下式计算：

$$R = \frac{848}{\mu} \quad \text{公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度} \quad (1-4)$$

式中： μ ——气体的分子量。

常用气体的气体常数 R 见表1—1。

混合气的气体常数按下式计算：

$$R_h = \frac{848}{\mu_h} \quad \text{公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度} \quad (1-5)$$

式中： μ_h ——混合气的平均分子量，按下式计算

$$\mu_h = \sum r_i \mu_i$$

式中： r_i ——混合气中各组分的容积百分数；

μ_i ——混合气中各组分的分子量。

理想混合气体的容积百分数，莫尔百分数和分压百分数存在以下关系

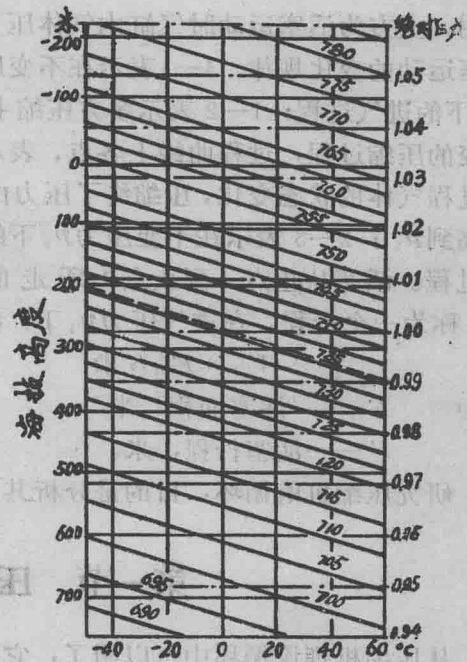


图1—2 不同海拔高度(米)时，大气压力和大气温度(°C)间的关系

$$r_i = \frac{V_i}{V} = \frac{p_i}{p} = \frac{M_i}{\sum M_i} \quad (1-6)$$

式中： M_i 、 $\sum M_i$ ——混合气中各组分的莫尔数和莫尔总数。

例：合成氨原料气成分如下表，求混合气的气体常数。

气体成分	H_2	N_2	CO	CO_2	$CH_4 + A_r$
体积百分数 $r_i(\%)$	72.0	24.0	3.3	0.2	0.5

解：按表 1—1 和表 1—2 查得各组分的分子量，其中‘ $CH_4 + A_r$ ’一项按其平均分子量计，则

$$\mu_h = \sum r_i \mu_i = 0.72 \times 2 + 0.24 \times 28 + 0.033 \times 28 + 0.002 \times 44 + 0.005 \times 28 = 9.312$$

$$R_h = \frac{848}{\mu_h} = \frac{848}{9.312} = 91 \text{ 公斤} \cdot \text{米/公斤} \cdot \text{度}$$

2. 实际气体状态方程：

随着生产的发展，压缩气体的种类之多和压力提高到几百上千个压力时，使人们发现，对于临界温度低的气体，如 N_2 、 H_2 、 O_2 等气体，当压力超过100公斤/厘米²时；以及临界温度高的气体，如 NH_3 、 CO_2 以及大量的碳氢气，既使在中低压力下，使用理想气体状态方程计算，误差很大。这是因为前者在高压之下，气体体积缩小到气体分子本身的体积将显示其影响，使相同压力温度下实际气体的容积比理想气体所占的容积大；后者则由于气体临界温度高，在常温和压力不太高时，气体接近液化区，分子之间的引力发生影响，促使相同压力温度下实际气体比理想气体所占的容积小。在这两种情况下，应用理想气体的状态方程所产生的误差超过计算所要求的精确度时，必须予以修正。

根据人们对实际气体的试验研究，提出许多修正公式，其中范德瓦尔方程为

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (1-7)$$

式中 a —— 表示气体分子引力大小的系数；
 b —— 表示与气体本身分子体积有关的系数。

范德瓦尔方程改造以后的实际气体状态方程为

$$p(v - b) = RT \quad (1-8)$$

式中： $b = v - v_{id}$ ——表示在相同压力和温度下，实际气体的比容 v 与理想气体比容 v_{id} 之间的差值。它不仅考虑了气体分子本身体积的影响，而且也计入了分子间引力的作用。由试验得知，不同物理性质的气体， b 值不同。图1—3表示温度 $t = 0^\circ C$ 时，氢气、氮气和甲烷的 b 值与压力的关系。

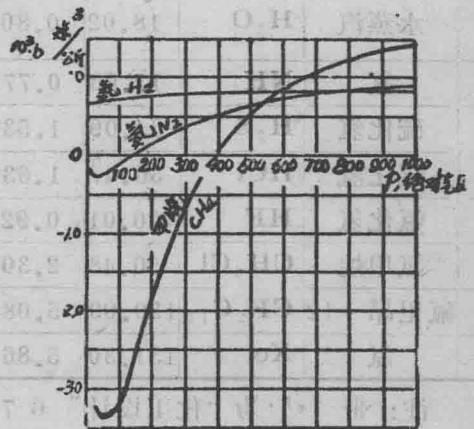


图1—3 $t = 0^\circ C$ 时，各种气体的 b 值与压力的关系

$$V_i = \frac{RT}{P_i}$$

$$V = \frac{RT}{P}$$

表1—1 常用气体的主要理化性质

序号	名称	化学式	分子式	标准状态 密度 公斤/米 ³	气体常数 R 公斤·米/公斤·°C	临界性质		
						温度 °C	压力 大气压	密度 公斤/米 ³
1	氦	He	4.00	0.179	212	-267.9	2.26	69.3
2	氩	Ar	39.94	1.784	21.23	-122.4	48.00	526.3
3	氢	H ₂	2.02	0.090	420.6	-239.9	12.8	31
4	氧	O ₂	32	1.429	26.5	-118.8	49.71	429.9
5	氮	N ₂	28.02	1.251	30.26	-147.3	33.49	310.96
6	空气		28.95	1.293	29.27	140.8	37.25	310~350
7	氯	Cl ₂	70.91	3.217	11.95	-144.0	76.1	573
8	氖	Ne	20.18	0.901	42	-228.7	26.9	484*
9	氪	Kr	83.80	3.742	10.2	-63.8	54.2	908*
10	氟	F ₂	38.00	1.635	22.32	-129	55	
11	氧化氮	NO	30.01	1.340	28.26	-94	67.2	519.5
12	一氧化碳	CO	28	1.250	30.28	-140.2	34.53	311
13	二氧化碳	CO ₂	44	1.977	19.27	31.1	72.9	460
14	二氧化硫	SO ₂	64.06	2.927	13.24	157.5	77.78	520
15	二氧化氮	NO ₂	46.01	1.49	18.43	158.2	100.0	570
16	氧化亚氮 (笑气)	N ₂ O	44.02	1.978	19.26	36.5	74.2	450.45
17	水蒸汽	H ₂ O	18.02	0.804	47.11	374.1	225.4	318.4
18	氨	NH ₃	17.03	0.771	49.79	132.4	115	235.8
19	硫化氢	H ₂ S	34.09	1.539	24.88	100.4	88.9	349
20	氯化氢	HCl	36.47	1.639	23.25	51.5	81.5	42.2
21	氟化氢	HF	20.01	0.922	42.4	230.2		
22	氯甲烷	CH ₃ Cl	50.48	2.308	16.80	148	66	370
23	氟里昂—12	CF ₂ C ₁₂	120.09	5.083	7.01	75.7	39.6	
24	氙	Xe	131.30	5.86	6.46	16.59	58.0	1.11

注：带“*”为“化工设计”67年增刊（一）表1—60中的数据。

常压20°C			相对密度 $K = \frac{C_p}{C_v}$	标准状态粘度 厘 厘 泊	标准状态 导热系数 千卡/米·小时·°C	爆炸极限 %(体)	
比热 千卡/公斤·°C	C_p	C_v				上 限	下 限
1.24	0.75	1.66			0.123		
0.124	0.075	1.66					
3.408	2.42	1.41		0.84×10^{-2}	0.140	74.2	4.1
0.218	0.156	1.40		2.03×10^{-2}	0.021		
0.250	0.178	1.40		1.7×10^{-2}	0.020		
0.241	0.172	1.40		1.73×10^{-2}	0.021		
0.115	0.085	1.36		$1.29 \times 10^{-2} (16^\circ C)$	0.006		
0.247(°C)	1.88	1.67					
		1.68					
0.238	0.172	1.4					
0.250	0.180	1.40		1.66×10^{-2}	0.019	74.2	12.5
0.200	0.156	1.30		1.37×10^{-2}	0.012		
0.151	0.120	1.26		1.17×10^{-2}	0.007		
0.192	0.147	1.31			0.034		
0.209	0.164	1.28					
0.444	0.333	1.2(热蒸汽) 1.135(饱和蒸汽)					
0.530	0.40	1.33		0.92×10^{-2}	0.019	27	15.5
0.233	0.192	1.32		1.17×10^{-2}	0.011	45.5	4.3
0.194	0.138	1.41					
0.177	0.139	1.27		0.99×10^{-2}	0.007	20	8
		1.14					

前页改进“*”带：

表1-2 单体烃的主要理化性质

序 号	名 称	化 学 式	分 子 量	标准状态 密 度 公斤/米 ³	气体常规 R 公斤·米 公斤·°K	临 界 性 质		
						温 度 °C	压 力 大气压	密 度 克/毫升
1	甲烷	CH ₄	16.04	0.716	52.86	-82.5	45.80	0.161
2	乙烷	C ₂ H ₆	30.07	1.342	28.20	32.27	48.19	0.204
3	丙烷	C ₃ H ₈	44.09	1.968	19.23	96.81	42.01	0.219
4	丁烷	C ₄ H ₁₀	58.12	2.595	14.59	152.01	37.47	0.228
5	戊烷	C ₅ H ₁₂	72.15	3.221	11.75	196.62	33.31	0.231
6	己烷	C ₆ H ₁₄	86.17	3.846	9.84	234.7	29.92	0.234
7	异丁烷	C ₄ H ₁₀	58.12	2.594	14.59	134.98	36.00	0.221
8	异戊烷	C ₅ H ₁₂	72.15	3.22	11.75	187.8	32.8	0.234
9	新戊烷	C ₅ H ₁₂	72.15	3.22	11.75	160.56	31.57	0.239
10	环丙烷	C ₃ H ₆	42.08	1.879	20.15	124.6	54.22	0.243*
11	环丁烷	C ₄ H ₈	56.10	2.505	15.11	196	50.0	0.258*
12	环戊烷	C ₅ H ₁₀	70.13	3.131	12.09	233.6	44.55	0.270
13	苯	C ₆ H ₆	78.11	3.487	10.86	289.5	48.7	0.304
14	甲苯	C ₇ H ₈	92.13	4.113	9.20	320.8	41.6	0.280
15	乙苯	C ₈ H ₁₀	106.16	4.739	7.99	346.4	38.1	0.29
16	乙烯	C ₂ H ₄	28.05	1.252	30.23	9.9	50.49	0.227
17	丙烯	C ₃ H ₆	42.08	1.878	20.15	91.89	45.4	0.232
18	丁烯-1	C ₄ H ₈	56.10	2.505	15.11	146.4	39.7	0.232
19	顺丁烯-2	C ₄ H ₈	56.10	2.505	15.11	163	41	0.239
20	反丁烯-2	C ₄ H ₈	56.10	2.505	15.11	155	41	0.239
21	异丁烯	C ₄ H ₈	56.10	3.131	15.11	144.7	39.45	0.234
22	戊烯-1	C ₅ H ₁₀	70.13	3.131	12.09	201	39.9	0.238
23	顺戊烯-2	C ₅ H ₁₀	70.13	3.131	12.09	208	35.3	0.238
24	反戊烯-2	C ₅ H ₁₀	70.13	3.131	12.09	206	35.1	0.238
25	2-甲基丁烯-1	C ₅ H ₁₀	70.13	3.131	12.09	199	35.0	0.238
26	3-甲基丁烯-2	C ₅ H ₁₀	70.13	3.131	12.09	188	34.5	0.242
27	2-甲基丁烯-2	C ₅ H ₁₀	70.13	3.131	12.09	210	35.9	0.238
28	丙二烯	C ₃ H ₄	40.06	1.88	21.17	120	54.0	0.247
29	丁二烯-1,2	C ₄ H ₆	54.09	2.415	15.60	171	44.4	0.247
30	丁二烯-1,3	C ₄ H ₆	54.09	2.415	15.60	152	42.7	0.246
31	戊二烯-1,2	C ₅ H ₈	68.11	3.041	12.45	230	40.2	0.247
32	顺戊二烯-1,3	C ₅ H ₈	68.11	3.041	12.45	226	39.6	0.246
33	反戊二烯-1,3	C ₅ H ₈	68.11	3.041	12.45	223	39.4	0.246
34	戊二烯-1,4	C ₅ H ₈	68.11	3.041	12.45	204	37.39	0.246
35	3-甲基丁二烯-1,2	C ₅ H ₈	68.11	3.041	12.45	223	39.4	0.247
36	2-甲基丁二烯-1,3	C ₅ H ₈	68.11	3.041	12.45	211	37.99	0.246
37	乙炔	C ₂ H ₂	26.04	1.162	32.57	36.3	61.6	0.242
38	丙炔	C ₃ H ₄	40.06	1.788	21.17	121.7	51	0.244
39	丁炔-1	C ₄ H ₆	54.09	2.415	15.60	201.7	46.5	0.245
40	丁炔-2	C ₄ H ₆	54.09	2.415	15.60	215	50.17	0.245
41	戊炔-1	C ₅ H ₈	68.11	3.041	12.45	220	39.99	0.245
42	戊炔-2	C ₅ H ₈	68.11	3.041	12.45	250	41.5	0.245

注：带“*”者为估算值

比 常压15.6°C 热 千卡/公斤·°C		$K = \frac{C_p}{C_v}$ 常压15.6°C	粘 度 20°C		沸 点 °C	熔 点 °C	爆 炸 极 限 % (体)	
C_p	C_v		厘 施	厘 泊			上 限	下 限
0.527	0.402	1.308		0.010(气)	161.49	-182.48	5.0	15.0
0.410	0.343	1.193		0.009(气)	-88.63	-183.27	3.22	12.45
0.389	0.342	1.133	0.246(10°C)	0.125(10°C)	42.07	-187.69	2.37	9.50
0.397	0.363	1.094	0.300	0.174	-0.50	-138.35	1.86	8.41
0.397	0.370	1.074	0.366	0.229	36.07	-129.72	1.40	7.80
0.398	0.375	1.062	0.475	0.313	68.74	-95.34	1.25	6.90
0.387	0.352	1.097	0.34	0.194	-11.27	-159.6	1.8	8.44
0.388	0.361	1.076	0.363	0.225	27.85	-159.89	1.32	8.3
0.391	0.364	1.076			9.5	-16.55	1.32	8.3
					-32.8	-127.42	2.4	10.4
					11.15	-50	1.8	
0.271	0.243	1.117	0.588	0.438	49.26	-93.83	1.4	
0.240	0.215	1.118	0.737	0.648	80.10	-5.53	1.41	6.75
0.260	0.238	1.091	0.675	0.585	110.63	-94.99	1.27	6.75
0.280	0.261	1.072	0.769	0.667	136.19	-94.98	0.99	6.7
0.362	0.291	1.243		0.009(气)	-103.71	-169.15	3.05	28.6
0.354	0.307	1.154		0.008(气)	-47.7	-185.25	2.0	11.1
0.330	0.335	1.105		0.007(气)	-6.26	-185.35	1.6	9.3
0.324	0.292	1.121			3.72	-138.91	1.75	9.7
0.365	0.330	1.107		0.007(气)	0.88	-105.55	1.75	9.7
0.370	0.335	1.106		0.007(气)	-6.90	-140.35	1.75	9.7
0.382	0.353	1.080		0.239	29.97	-165.22	1.4	8.7
0.337	0.308	1.092			37.1	-151.37		
0.373	0.344	1.082			36.36	-140.23		
0.371	0.342	1.082			31.10	-137.56	1.4	
0.394	0.365	1.078			20.06	-168.50		
0.354	0.326	1.087			38.52	-133.78		
0.344	0.294	1.17			-34.5	-136		
0.346	0.309	1.12			10.3	-136.3	2	12
0.341	0.305	1.12			-4.41	-108.92		
0.360	0.331	1.09			44.9	-65	1.5	
0.321	0.292	1.09			44.2	-88.9		
0.354	0.325	1.09			42.3	-88.9		
0.359	0.330	1.09			26.05	-148		
0.361	0.332	1.09			40	-120		
0.357	0.328	1.09			34.08	-146	1.5	
0.397	0.320	1.238		0.010(气)	-84	-81	2.5	8.0
0.355	0.305	1.163		0.173(°C)	-23.2	-102.7		
0.351	0.315	1.117		0.00(气)	8.06	-126.2		
0.337	0.301	1.122		0.007(气)	26.99	-32.23		
0.367	0.338	1.086			40.2	-106		
0.338	0.309	1.094			56.07	-109.3		

： 奥 瑞 製 造 商 依 据 各 中 产 合 册
： 式 製 製 商 依 据 各 中 产 合 册

实际应用中，比较简便的方法是用压缩性系数 ξ 修正，即

$$pv = \xi RT \quad (1-9)$$

$$pV = \xi GR T \quad (1-10)$$

式中，实际气体压缩性系数 $\xi = \frac{pv}{RT}$ ，其数值大小，表示在相同的压力和温度下，实际气体比容与理想气体比容的偏差。若 $\xi < 1$ ，说明实际气体比容较理想气体的比容小； $\xi > 1$ ，实际气体比容较理想气体比容大。

图1-4是 CO_2 气体的压缩性系数曲线，根据气体的压力和温度，可从图上查得 ξ 值。例如压力为 220 公斤/厘米²，温度为 130°C 时，用内插法查得 CO_2 的 $\xi = 0.70$ 。

工业上常用气体，在不同状态下的 ξ 值，见附录。

各种气体当其对比压力 P_r (气体压力与其临界压力之比： $\frac{p}{p_k}$) 及对比温度 T_r (气体温度与其临界温度之比： $\frac{T}{T_k}$) 相同时，压缩性系数将近相等。图1-5列出了各对比压力及对比温度的压缩性系数 ξ 值。

当有些气体没有专门的 ξ 值实验曲线时，可按图1-5通用曲线求取，各种气体的临界压力 p_k 和临界温度 T_k 值见表1-1和表1-2。另外，氢、氦对比压力 and 对比温度计算见图1-5(a)。

实际混合气体的 ξ 值，同样可以从图1-5的通用曲线由对比压力和对比温度查得，混合气的对比压力和对比温度的计算方法同单组分气体相同；但其临界温度和临界压力按下面公式计算，并称之为假临界温度 T_{jk} 和假临界压力 p_{jk}

$$T_{jk} = \sum r_i T_{ik} \quad (1-11)$$

$$p_{jk} = \sum r_i p_{ik} \quad (1-12)$$

式中： r_i ——混合气中各组分的容积百分数；

T_{ik} ——混合气中各组分的临界温度；

p_{ik} ——混合气中各组分的临界压力。

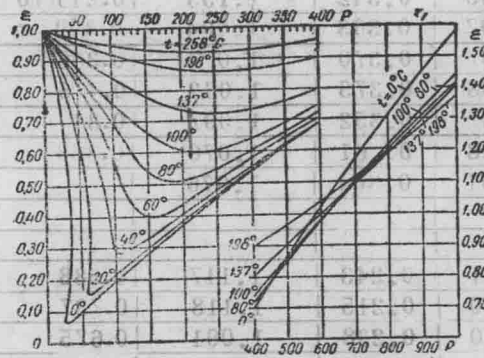


图1-4 二氧化碳的 ξ 值

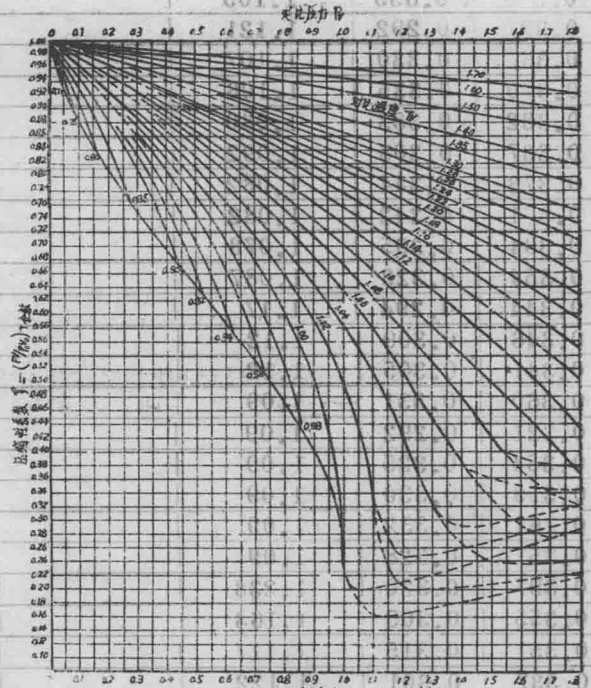


图 1-5 通用曲线

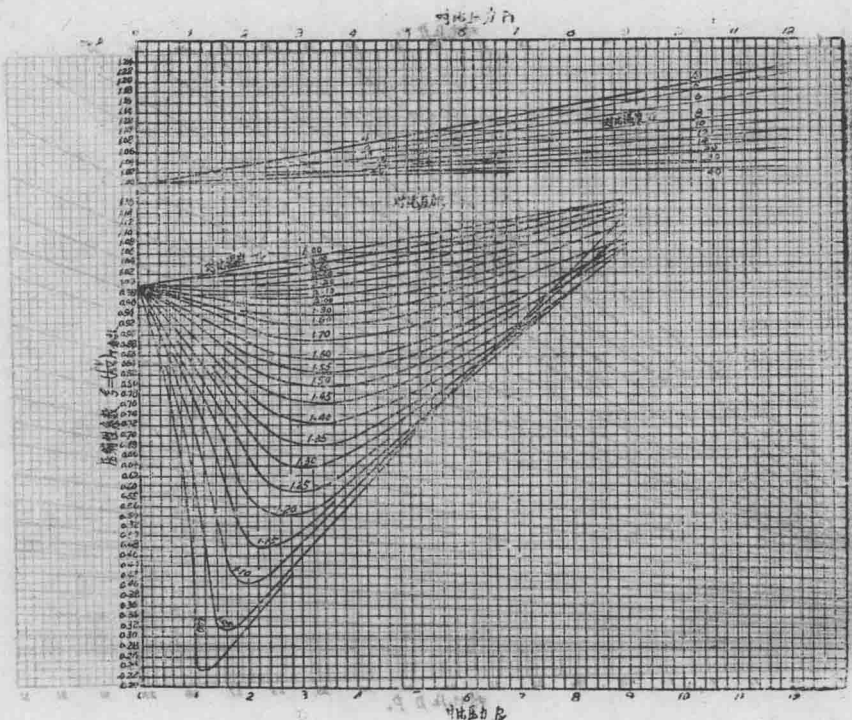


图1-5 b

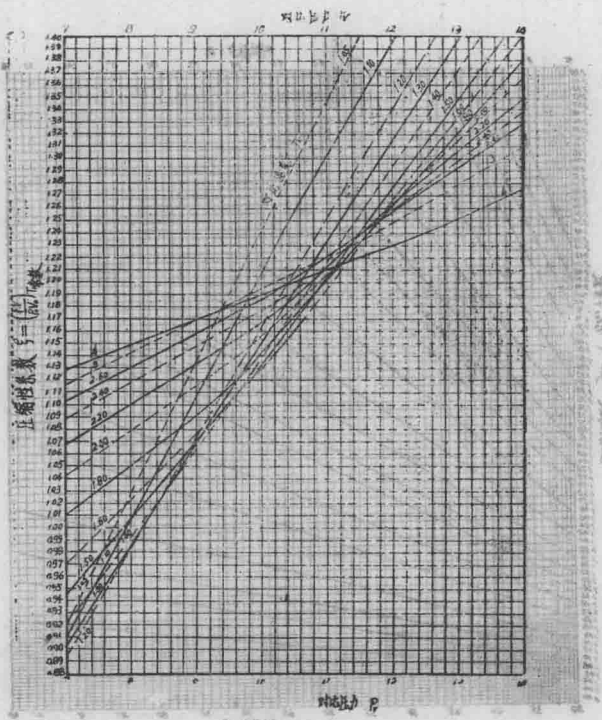


图1-5 c

素因用版前数系封除祖 图一五

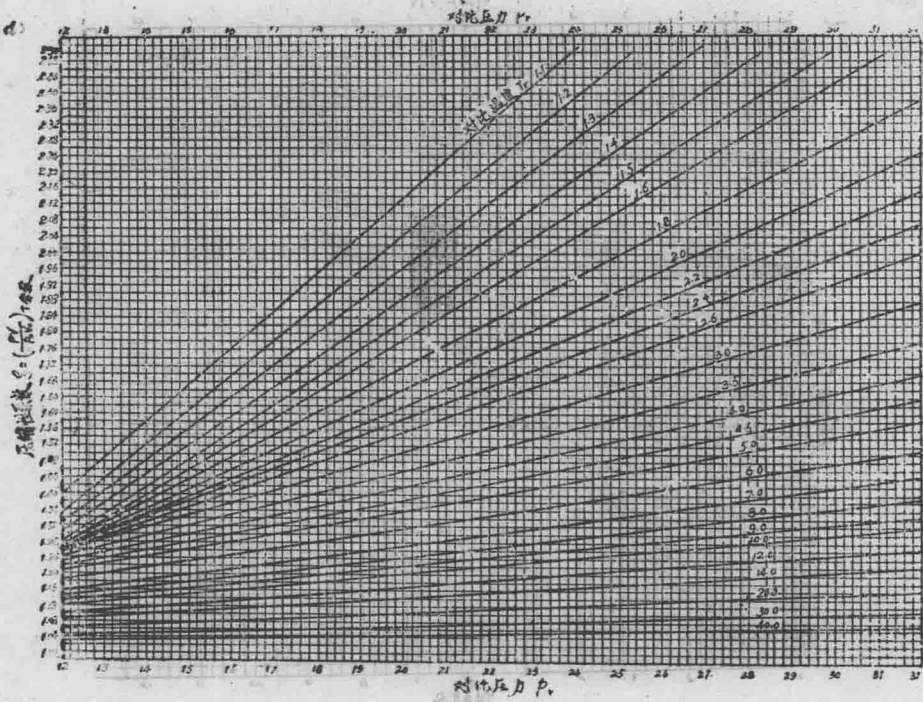


图1—5 d

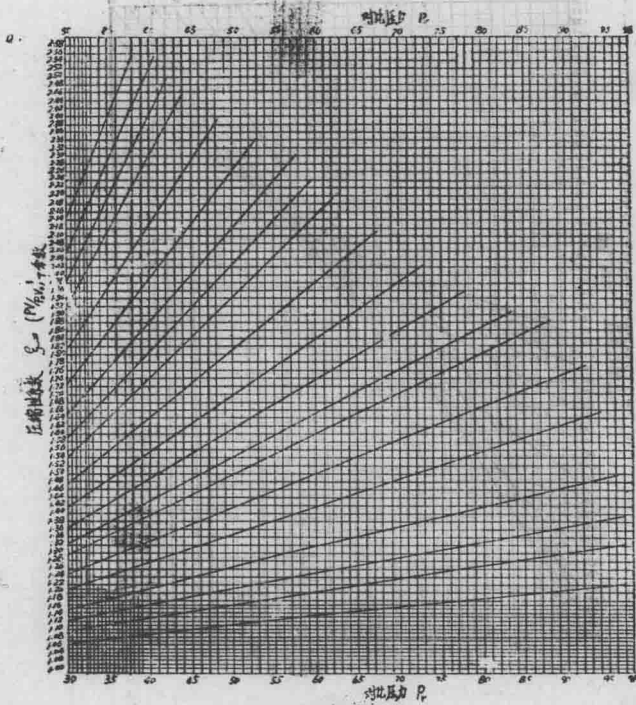


图1—5e 压缩性系数的通用图表

气体从一个给定的初态，由初始压力 p_1 提高到排气压力 p_2 ，可以通过无数的过程。我们用概括一切压缩过程的多变方程来表示过程中状态参数的变化关系，即

$$pv^n = \text{常数} \quad (1-13)$$

式中 n —— 多变过程指数或称多方指数。

从理想气体的多变方程及状态方程得：

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \quad (1-14)$$

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1-15)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \quad (1-16)$$

过程多方指数 n 取决于压缩过程中气体与外界进行热交换的情况。若压缩过程中气体的热量全部由外界导走，气体温度保持不变，此时 $n = 1$ ，称之为等温过程。

在压缩过程中气体与外界没有热量的传递，即意味着气缸为绝缘体，活塞与缸壁没有摩擦，或者摩擦产生的热量恰好被缸壁导走。这样的过程称为绝热过程， $n = K$ ， K 为绝热指数， $K = \frac{c_p}{c_v}$ 。理想气体的 K 值从表 1-1 中看出，原子数相同的气体， K 值大致相等。可近似取单原子气体 $K = 1.667$ ；两原子气体 $K = 1.40$ ，三原子气体 $K = 1.333$ ，单体烃的 K 值见表 1-2。混合气体的 K 值按下式计算

$$\frac{1}{K-1} = \sum \frac{r_i}{K_i-1} \quad (1-17)$$

式中 r_i —— 混合气体中某组分的容积百分比；

K_i —— 混合气体中某组分的绝热指数。

若压缩过程中，气体有部分热量传出，其过程指数 n 为： $1 < n < K$ 。

若压缩过程中，外界传给气体热量，则 $n > K$ 。

考虑实际气体的影响，压缩过程气体状态的变化，其参数间关系由实际气体状态方程得

$$\frac{p_1 v_1}{\xi_1 T_1} = \frac{p_2 v_2}{\xi_2 T_2} \quad (1-18)$$

式中 ξ_1, ξ_2 —— 相应于 p_1, T_1 及 p_2, T_2 时的压缩性系数。

在压缩机中，特别是高压级的压缩过程接近于绝热过程，按绝热过程计算。因此对实际气体的绝热压缩过程，不同状态下其参数间的关系，予以介绍。根据实验，实际气体表现在压力与温度的关系上，其绝热指数是随压力和温度的变化而有所变化，称之为温度绝热指数，用 K_T 表示。若干工业上常用的气体 K_T 值列于表 1-3 中，从表中可以看出，在广泛的压力和温度范围内，各种气体 K_T 的变化都不太大，在一般计算中可用理想气体的 K 值代替。至少在一个级的压力范围内看作是个常数，且等于过程中点的瞬时值是足够精确的。实际气体表现在压力与比容的关系上则用所谓容积绝热指数 K_v 。氮气在 25℃ 时，其 K_v 值随压力变化有下列数据：

p (绝对压力)	1	300	600	800	1000	3000	6000
与 p 对应的 K_v 值	1.41	2.39	3.30	3.38	3.90	5.30	5.65

表1-3 不同压力和不同温度的绝热指数

气 (体)	温度 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$	压 通常 = "力						
		1	100	200	300	600	800	1000
氮 N_2	20	1.410	1.416	1.400	1.379	1.345	1.340	1.346
	100	1.406	1.419	1.426	1.419	1.377	1.372	1.373
	200	1.400	1.409	1.409	1.408	1.387	1.380	1.374
氢 H_2	25	1.404	1.407	1.408	1.407	1.402	1.394	1.390
	100	1.398	1.399	1.400	1.401	1.396	1.393	1.388
	200	1.396	1.397	1.398	1.399	1.396	1.393	1.392
一氧化碳 CO	25	1.400	1.433	1.414	1.394	1.349	1.344	1.341
	100	1.400	1.422	1.424	1.422	1.395	1.390	1.390
	200	1.399	1.407	1.415	1.422	1.408	1.403	1.398
甲烷 CH_4	25	1.32	1.36	1.28	1.24	1.22	1.21	1.21
	100	1.27	1.30	1.30	1.28	1.25	1.23	1.22
	200	1.23	1.26	1.25	1.25	1.24	1.24	1.23
氨 NH_3	150	1.271	1.335	1.086	1.079	1.079	1.083	1.094
	300	1.234	1.252	1.286	1.216	1.216	1.187	1.179
混合气 ($N_2 + 3H_2$)	25	1.405	1.407	1.406	1.397	1.397	1.393	1.395
	100	1.399	1.397	1.402	1.400	1.400	1.396	1.395
	200	1.398	1.400	1.402	1.403	1.403	1.398	1.395
二氧化碳 CO_2	0	1.343						
	20	1.316						
	50	1.295						
	100	1.265						
	150	1.250						

从所得的数据中看出, K_v 值在不同压力下差别很大, 用它来求绝热压缩过程中气体的容积很不方便。因此计算绝热压缩过程终了或任何一点状态参数时, 须先求出过程上各点的温度, 然后根据实际气体的状态方程式, 算出压缩终了或任何一点的比容或容积, 即:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K_T - 1}{K_T}} \quad (1-19)$$

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2} \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{K_T}} \quad (1-20)$$

实际混合气体在不同温度和压力时, 按以下步骤求得 K_T :

(1) 按式(1-11)和式(1-12)计算气体的假临界温度和假临界压力。

(2) 求在常压下混合气体的定压比热 c_p^0 。

$$c_p^0 = \sum g_i c_{p_i} = g_1 c_{p_1} + g_2 c_{p_2} + \dots + g_i c_{p_i} \quad (1-21)$$

式中 c_{p_i} —— 各组分在常压下的定压比热 (千卡/公斤·°C)

g_1, g_2, \dots, g_i —— 混合气中各组分的重量百分数。已知气体的容积百分数 r_i 可用下式算得重量百分数 g_i

$$g_i = r_i \frac{\mu_i}{\mu_h} \quad (1-22)$$

(3) 由图1—6根据混合气体的对比压力和对比温度求出 Δc_p 及该压力下混合气体的定压比热 $c_p = c_p^0 + \Delta c_p$ 。

(4) 由图1—7根据混合气体的对比压力和对比温度求出 $c_p - c_v$ 。从图1—6、1—7查得比热, 单位为 (卡/克分子·°C) 应除以分子量方为 (千卡/公斤·°C)

(5) 按下式求 K_T

$$K_T = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - (c_p - c_v)}$$

式中 c_p^0 —— 常压下混合气体的定压比热 (千卡/公斤·°C)

Δc_p —— 某压力下气体的定压比热同常压下定压比热的差值 (千卡/公斤·°C)

c_p —— 某压力下气体的定压比热 (千卡/公斤·°C)

c_v —— 某压力下气体的定容比热 (千卡/公斤·°C)

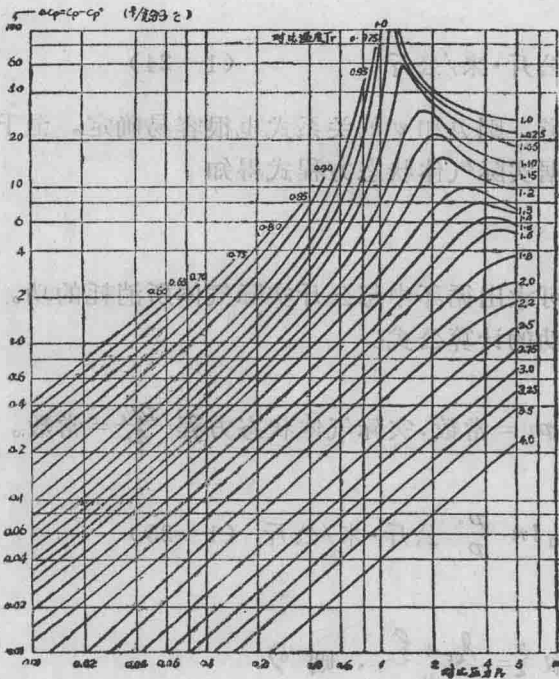


图1—6 从 $p_r \cdot T_r$ 求 Δc_p

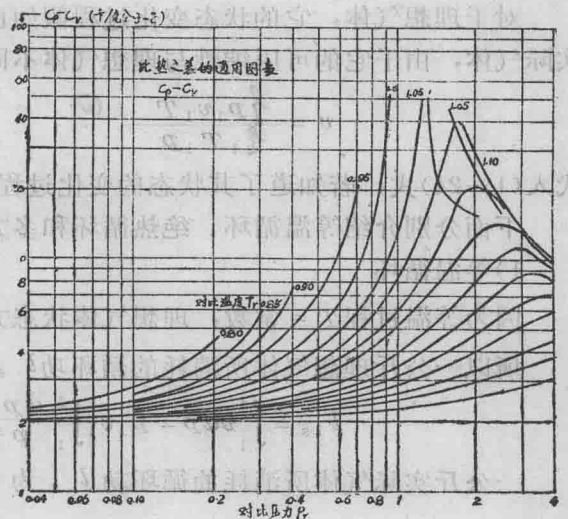


图1—7 从 $p_r \cdot T_r$ 求 $c_p - c_v$

第二节 理论循环功的计算

理论循环中所消耗的功，取决于压缩过程的性质。图1—8为理论循环示功图。从图上可以看出， $n=1$ 的等温过程曲线最平坦， $n=k$ 的绝热过程曲线较陡； $1 < n < k$ 的多方过程曲线因有热量传出介于等温和绝热过程曲线之中，而 $n > k$ 的多方过程曲线因为气体接受外界热量，曲线最陡。循环所包围的面积1—2—3—4以等温过程最小，以 $n > k$ 的多方过程最大。其面积值既表示理论循环耗功的大小，它为吸入、压缩、排出三个过程功的代数和。

在压缩机中、通常假定活塞对气体做功为正，而气体对活塞做功为负。因此吸入过程功 $L_s = p_1 V_1$ —— 相当于面积4'—1'—1—4。排出过程功 $L_r = p_2 V_2$ —— 相当于面积4'—5—2—3，压缩过程功 $L_c = -\int_1^2 p dV$ 。三者之和为

$$L = -p_1 V_1 - \int_1^2 p dV + p_2 V_2$$

而
$$p_2 V_2 - p_1 V_1 = \int_1^2 d(pV) = \int_1^2 p dV + \int_1^2 V dp$$

所以
$$L = \int_1^2 V dp \quad (\text{公斤} \cdot \text{米}^3 / \text{公斤}) \quad (1-23)$$

压缩每一公斤气体所消耗的循环功为

$$l = \frac{L}{G} = \int_1^2 \frac{V}{G} dp = \int_1^2 v dp \quad \text{公斤} \cdot \text{米}^3 / \text{公斤} \quad (1-24)$$

对于理想气体，它的状态变化过程假如已经知道，则 p 和 v 的关系式也很容易确定。至于实际气体，由于它的可压缩性与理想气体不同，根据实际气体状态方程式得知

$$v = \frac{p_1 v_1 T}{p_1 T_1 p}$$

代入(1—24)式，若知道了其状态的变化过程，同样可求出循环中每公斤实际气体所消耗的功。

下面分别介绍等温循环、绝热循环和多方循环功的计算公式。

1) 等温循环

因为等温过程 $T = \text{常数}$ ，理想气体状态方程为 $pv = \text{常数}$ ，实际气体状态方程 $\frac{pv}{p} = \text{常数}$ 。

所以一公斤理想气体所消耗的循环功 l_{is} 为

$$l_{is} = \int_1^2 v dp = p_1 v_1 \int_1^2 \frac{dp}{p} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{公斤} \cdot \text{米}^3 / \text{公斤} \quad (1-25)$$

一公斤实际气体所消耗的循环功 l_{is} 为

$$l_{is} = \int_1^2 v dp = \int_1^2 \frac{p_1 v_1}{p} dp \quad \text{取 } \xi = \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ 则}$$

$$l_{is} = \frac{\xi_1 + \xi_2}{2 \xi_1} p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{公斤} \cdot \text{米}^3 / \text{公斤} \quad (1-26)$$

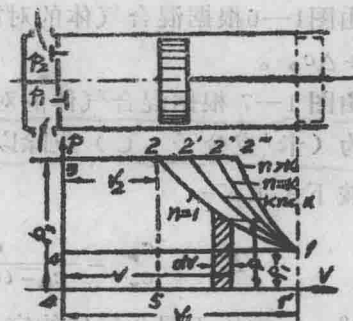


图1—8 理论循环所消耗的功