

中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材

发生炉煤气的 生产原理与使用

科学普及出版社

科学普及出版社
PDG

81.655
535
C2

中华人民共和国机械工业部统编

机械工人技术培训教材

发生炉煤气的生产原理与使用

(中 级 本)

科学普及出版社

科学普及出版社

PDG

本书是中华人民共和国机械工业部统编的机械工人技术培训教材。它是根据原一机部《工人技术等级标准》和教学大纲编写的。本书对煤炭气化原理、煤气生产的热工基础知识、煤气发生炉的分类与构造以及煤气输送管网与气化计算等作了比较详细介绍。

本书是4~6级煤气技术培训的教材，也可供有关技术人员和工人学习参考。

本书由曹从慎编写，由钱笑公、章鼎臣、王自强同志审查。

中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材
发生炉煤气的生产原理与使用

(中 级 本)

责任编辑：罗秀文

科学普及出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
密云县卫新综合印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 $1/16$ 印张：16 $1/2$ 字数：382千字

1985年1月第1版 1985年1月第1次印刷

印数：1—25,300册 定价：2.40元

统一书号：15051·1139 本社书号：0647

对广大工人进行比较系统的技术培训教育，是智力开发方面的一件大事，是一项战略性的任务。有计划地展开这项工作，教材是关键。有了教材才能统一培训目标，统一教学内容，才能逐步建立起比较正规的工人技术教育制度。

教材既是关键，编写教材就是一件功德无量的事。在教材行将出版之际，谨向为编写这套教材付出辛勤劳动的同志们致以敬意！

机械工业部第一副部长 杨 铎

一九八二年五月

38673

前 言

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，对工人特别是青壮年工人进行系统的技术理论培训，以适应四化建设的需要，现确定按初级、中级、高级三个培训阶段，逐步地建立工人培训体系，使工人培训走向制度化、正规化的轨道，以期进一步改善和提高机械工人队伍的素质。我们组织了四川省、江苏省、上海市机械厅（局）和第一汽车厂、太原重型机器厂、沈阳鼓风机厂、湘潭电机厂，编写了三十个通用工种的初级、中级的工人技术培训教学计划、教学大纲及其教材，作为这些工种工人技术理论培训的统一教学内容。

编写教学计划、教学大纲及其教材的依据，是原一机部颁发的《工人技术等级标准》和当前机械工人队伍的构成、文化状况及培训的重点。初级技术理论以二、三级工“应知”部分为依据，是建立在初中文化基础上的。它的任务是为在职的初级工人提供必备的基础技术知识，指导他们正确地使用设备、工夹具、量具，按图纸和工艺要求进行正常生产。中级以四、五、六级工“应知”部分为依据，并开设相应的高中文化课，在学完了初级技术理论并具有一定实践经验的工人中进行。它的任务是加强基础理论教学，使学员在设备、工夹具、量具、结构原理、工艺理论、解决实际问题 and 从事技术革新的能力上有所提高（高级以七、八级工“应知”部分为依据。这次未编）。编写的教材计有：车工、铣工、刨工、磨工、齿轮工、镗工、钳工、工具钳工、修理钳工、造型工、化铁工、热处理工、锻工、模锻工、木模工、内外线电工、维修电工、电机修理工、电焊工、气焊工、起重工、煤气工、工业化学分析工、热工仪表工、锅炉工、电镀工、油漆工、冲压工、天车工、铆工等工艺学教材和热加工的六门基础理论教材：数学、化学、金属材料及其加工工艺、机械制图、机械基础、电工基础。

在编写过程中，注意了工人培训的特点，坚持了“少而精”的原则。既要理论联系生产实际，学以致用，又要有理论的高度和深度；既要少而精，又要注意知识的科学性、系统性、完整性；既要短期速成，又要循序渐进。在教学计划中对每个工种的培养目标，各门课程的授课目的，都提出了明确的要求，贯彻了以技术培训为主的原则。文化课和技术基础课的安排、从专业需要出发，适当地考虑今后发展和提高的要求，相近工种的基础课尽量统一。

这套教材的出版，得到了有关省、市机械厅（局）、企业、学校、研究单位和科学普及出版社的大力支持，在此特致以衷心的感谢。

编写在职工人培训的统一教材，是建国三十年来第一次。由于时间仓促，加上编写经验不足，教材中还难免存在不少缺点和错误，我们恳切地希望同志们在试行中提出批评和指正，以便进一步修改、完善。

机械工业部工人技术培训教材编审领导小组

一九八二年五月

目 录

第一篇 基本概念

第一章 热工基本知识	1
第一节 实际气体状态方程式	1
第二节 混合气体分压定律	6
第三节 热力学第一定律、焓	8
第四节 热力学第二定律、熵	15
第五节 层流与紊流、雷诺准数	17
第六节 传热	19
第七节 传质基本原理	24

第二篇 煤炭气化原理及煤气生产

概述	27
第二章 煤炭的性质	29
第一节 燃料的分类	29
第二节 煤炭的分类	37
第三节 煤炭的分析及燃料基	39
第四节 煤炭的物理性质	45
第三章 煤炭的燃烧与气化原理	53
第一节 煤炭的气化概述	53
第二节 固定床发生炉气化原理	56
第三节 燃烧与气化机理	57
第四节 热化学反应、盖斯定律	58
第五节 化学反应式的平衡	60
第六节 煤炭的燃烧、气化动力学	66
第四章 煤炭的干馏	72
第一节 煤炭的干馏原理	72
第二节 半炼焦的生产过程	76
第三节 半炼焦生产工艺流程	82
第四节 高温干馏	84
第五章 空气煤气的生产	86
第一节 空气煤气的生产原理	86
第二节 理想空气煤气的计算	87
第三节 实际空气煤气及其优缺点	88
第六章 水煤气的生产	89
第一节 水煤气的生产原理	89

第二节 水煤气的生产过程	95
第三节 半水煤气的生产过程	102
第四节 水煤气、半水煤气站的附属设备	104
第七章 混合发生炉煤气的生产	113
第一节 混合发生炉煤气的生产原理	113
第二节 混合发生炉煤气的生产工艺	119
第三节 混合发生炉煤气的生产参数	130
第八章 煤气净化	136
第一节 概述	136
第二节 清洗净化的方法及设备	136
第九章 现代完全气化	145
第一节 加压气化	145
第二节 流化床气化基本原理	154
第三节 气流床气化基本原理	163

第三篇 煤气发生炉构造

第十章 煤气发生炉的构造	169
第一节 煤气发生炉分类	169
第二节 固定床常压小型混合发生炉	172
第三节 固定床常压大、中型混合煤气发生炉	186
第四节 固定床常压水煤气发生炉	197
第五节 固定床加压气化炉	203
第十一章 煤气站水系统及煤气含杂物的脱除	207
第一节 水系统概述	207
第二节 水循环系统及水平衡	208
第三节 冷却系统主要构筑物及冷却原理	210
第四节 冷煤气站循环水质概况	218
第五节 煤气中氨、萘、硫、苯的脱除	219
第六节 焦油的利用	226

第四篇 煤气输送管网及用户

第十二章 煤气输送管网及附属设备	228
第一节 工厂煤气输送管网	228
第二节 城市煤气输配	230
第三节 煤气的储存	232
第四节 液化石油气及钢瓶供应	235
第五节 工业炉窑	240
第十三章 煤炭的气化计算	246
第一节 固定床气化的计算	246
第二节 加压炉气化计算	255

第一篇 基本概念

第一章 热工基本知识

第一节 实际气体状态方程式

一、分子间的作用力

在研究气体状态方程式时，常常规定气体为理想气体。理想气体是一种假想气体，即认为它的分子不占有体积，分子间无作用力（吸引力或排斥力）。在工程上，为了简化计算，将一些受压较小、容积较大的气体，近似地认为是理想气体。这些气体假想地认为分子本身所占体积很小，与其总体积相比可略而不计，并且分子之间距离很大，可视为无作用力。但这是一种假设条件，事实上自然界的气体均为实际气体，理想气体在自然界并不存在。但是，可以把某些气体当做理想气体，如在自然条件下存在的氧气、氢气、氮气、一氧化碳、二氧化碳、空气、烟气、低压煤气等。但是当这些气体受压较高、温度较低时，则分子本身的体积和作用力就不能略而不计，在计算时就应有一个校正偏差的方程式来代替理想气体状态方程式。如高压水蒸气、制冷介质、石油气等均属此类。

物质是由分子构成的。分子在不停地运动着，分子间存在着作用力，这种作用力是物质能量的一种形式，称为势能。作用力由于分子之间的距离不同而改变方向。如图1-1所示，两分子之间的距离在0到 d_0 之间，势能为正值；在距离由 d_0 到无限大时势能为负值。当分子间距离由0到 d_{min} 时，分子之间的作用力相斥；而由 d_{min} 到无限大时，分子之间的作用力相吸。实际上当分子间距离增大到 10^{-7} 厘米时，相互之间的作用力近似为零。对容积较大而受压较小的气体，分子之间的作用力可以略而不计。因此这种气体可近似作为理想气体。

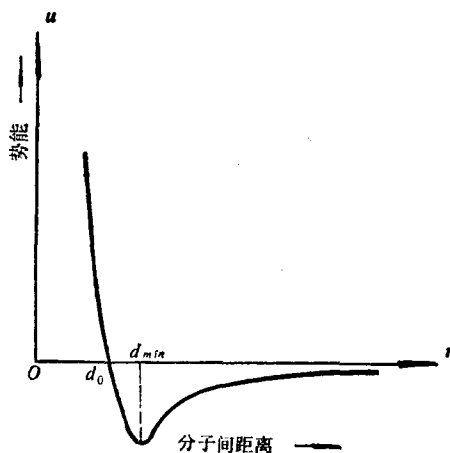


图 1-1 分子能量变化与相互之间距离的关系

二、理想气体状态方程式

对于理想气体，其绝对压力（压强）、绝对温度和容积之间的关系可用下式表示：

$$pV = mRT \quad (1-1)$$

式中 p ——绝对压力, 公斤力/米²;

V ——气体占有的体积, 米³;

m ——气体的质量, 公斤;

R ——气体常数, 公斤·米/公斤·度。它与气体性质有关, 见表 1-1;

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{848}{\mu}, \quad (1-2)$$

T ——绝对温度, K ;

μ ——气体分子量;

R_0 ——气体通用常数(其值为 848 公斤·米/公斤·度)。

在工程上计算近似理想气体的状态时可用此式, 其结果误差不大。

几种常见气体的气体常数

表 1-1

物 质 名 称	化 学 式	分 子 量	R (公斤·米/公斤·度)
氢	H ₂	2.016	420.635
氦	He	4.003	211.841
甲烷	CH ₄	16.043	52.858
氨	NH ₃	17.031	49.792
水蒸气	H ₂ O	18.015	47.072
氮	N ₂	28.013	30.272
一氧化碳	CO	28.011	30.274
二氧化碳	CO ₂	44.010	19.268
氧	O ₂	32.0	26.50
空气	—	28.97	29.272
乙 烯	C ₂ H ₄	28.054	30.227

三、实际气体状态方程式

理想气体状态方程式, 只适用于距临界状态甚远的气体的计算。在高压、低温下, 用其计算时, 则误差较大。因为未考虑分子本身的体积和分子之间的作用力。

能比较相对准确地反应实际气体的状态方程式是范德瓦尔方程式。

范德瓦尔方程式与理想状态方程式的区别在于它用两个修正项来考虑分子间的作用力和分子本身的体积因素。第一个修正项考虑了分子之间的作用力对压力的影响。前已知道, 压力与分子向容器壁碰撞的次数和强度有关。其分子作用力与分子本身体积对压力的影响用其密度的平方 (ρ^2) 或比容的平方的倒数 ($\frac{1}{v^2}$) 来表示, 即:

$$p = p' - \frac{a}{v^2} \quad (1-3)$$

式中 p' ——理想气体的压力;

p ——实际气体的压力;

a ——范德瓦尔常数。

上式说明, 实际气体的压力比理想气体的压力小 $\frac{a}{v^2}$ 。若 v 值增大, 即气体的比容很大, 则 $\frac{a}{v^2}$ 项之值很小, 近似于零。此时的压力即接近于理想气体的压力。

第二个修正项即 b , 称范德瓦尔常数。它反应分子本身的体积, 又称不可压缩体积。所以 $v-b$ 即除去分子本身体积的自由空间。若 b 略而不计, 即实际气体的自由空间已接近于理想气体的自由空间。

因此, 对实际气体, 当考虑到分子之间的作用力与分子本身的体积时, 则状态方程式即为范德瓦尔方程式:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (1-4)$$

式中 a 、 b —— 范德瓦尔常数, 其值随气体种类而不同, 常见的一些气体的范德瓦尔常数见表 1-2。

四、临界参数

取二氧化碳气体, 测定其压力 p 与比容 v 的关系时, 可得出图 1-2。

当作 $p-v$ 曲线时, 若取不同的温度, 则得出各自对应的曲线。在较低的温度下, $p-v$ 曲线在中间一段为水平线, 称等压线。随着温度的提高, 水平线段缩短, 到一定温度时, $p-v$ 线的水平线段即变为一点, 此点定为 c , 称为二氧化碳气体的临界点, 此点对应的温度为临界温度, 对应的压力为临界压力。此临界点的状态参数称为临界参数。

各种气体一般均有自己的临界参数, 若达不到临界参数, 则不能产生相态的变化。表 1-3 列出了一些气体的临界参数和其他物理化学量。

在液化技术中, 经常将临界参数作为选择液化温度和压力的依据。例如液化石油气, 其主要成分为丙烷和丙烯, 它们的临界压力分别为 43.4 公斤/厘米² 和 45.3 公斤/厘米², 而临界温度为 96.8°C 和 92.0°C。若将温度降低到临界温度以下,

则可相应地降低液化压力, 故液化石油气技术, 在工业上的应用比较容易实现。同样在制冷工业中, 利用氨蒸气的液化温度不太低而相应压力不太高的特点, 经压缩、节流、冷凝和蒸发后, 将热量由被冷却物质传递给冷却介质。

经过数学运算, 得出临界参数与范德瓦尔常数的关系式为

$$v_c = 3b \quad (1-5)$$

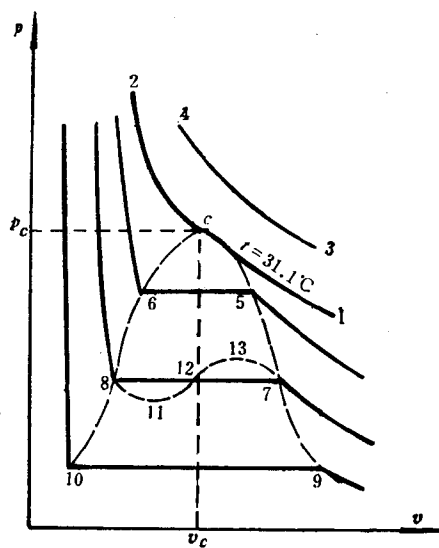


图 1-2 二氧化碳气体的 $p-v$ 图

一些气体范德瓦耳常数 a 与 b 值

表1-2

名 称	代 号	a (绝对压力·米 ⁶)	b (米 ³)
氩	Ar	1.35×10^{-6}	32.3×10^{-6}
乙 炔	C ₂ H ₂	4.37×10^{-6}	51.2×10^{-6}
空 气	—	1.33×10^{-6}	36.6×10^{-6}
氨	NH ₃	4.19×10^{-6}	37.3×10^{-6}
一氧化碳	CO	1.46×10^{-6}	39.4×10^{-6}
二氧化碳	CO ₂	3.6×10^{-6}	42.8×10^{-6}
甲 烷	CH ₄	2.25×10^{-6}	42.8×10^{-6}
乙 烷	C ₂ H ₆	4.48×10^{-6}	57.2×10^{-6}
氢	H ₂	0.245×10^{-6}	26.6×10^{-6}
氮	N ₂	1.347×10^{-6}	38.6×10^{-6}
氧	O ₂	1.36×10^{-6}	31.9×10^{-6}
二氧化硫	SO ₂	6.8×10^{-6}	57.2×10^{-6}
水蒸气	H ₂ O	5.48×10^{-6}	30.6×10^{-6}

一些气体的临界参数及物理量

表1-3

名 称	代 号	分子量	密 度 (公斤/米 ³)	与空气 重量比	气化温度 (°C)	溶化温度 (°C)	临界温度 (°C)	临界压力 (公斤力/厘米 ²)
氦	He	4.002	0.1785	0.1381	-288.93	—	-267.9	2.33
氖	Ne	20.183	0.8999	0.6961	-246.1	-248.60	-228.3	27.8
氩	Ar	39.944	1.7839	1.3799	-185.9	-189.3	-122.4	49.6
氢	H ₂	2.0156	0.08987	0.06952	-252.78	-259.20	-239.9	13.2
氧	O ₂	32.000	1.4289	1.1053	-182.97	-218.83	-118.8	51.3
臭 氧	O ₃	48.000	2.22	1.71	-112	-252	-5	95.3
水蒸气	H ₂ O	18.0156	0.768	0.5941	+100.00	0.000	374.2	224.67
二氧化硫	SO ₂	64.06	2.9263	2.2635	-10.0	-75.3	157.3	80.4
三氧化硫	SO ₃	80.06	—	—	+46	-16.8	218.3	86.8
氮	N ₂	28.016	1.2505	0.9673	-195.81	-210.02	-147.2	34.6
氨	NH ₃	17.031	0.7714	0.5967	-33.4	-77.7	132.4	115.2
氧化亚氮	N ₂ O	44.016	1.9780	1.5300	-88.7	-90.8	36.5	74.0
一氧化氮	NO	30.008	1.3402	1.0367	-152	-163.5	-92.9	66.9
一氧化碳	CO	28.01	1.2500	0.9669	-191.5	-205	-140.2	35.7
二氧化碳	CO ₂	44.01	1.9768	1.5291	-78.48	-56	31.1	75.4
甲 烷	CH ₄	16.04	0.7168	0.5545	-116.7	-182.5	-82.1	47.3
乙 烷	C ₂ H ₆	30.07	1.356	1.049	-88.6	-183.6	35.0	49.0
乙 炔	C ₂ H ₂	26.04	1.1709	0.9057	-83.6	-81	35.7	63.6
乙 烯	C ₂ H ₄	28.05	1.2605	0.9750	-103.5	-169.4	9.5	52.4
丙 烷	C ₃ H ₈	44.09	2.0037	1.550	-42.6	-189.9	96.8	43.4
丙 烯	C ₃ H ₆	42.08	1.915	1.481	-47	-185.2	92.0	46.8
丁 烷	C ₄ H ₁₀	58.12	2.703	2.091	+0.5	-135	152	37.7
丁 烯	C ₄ H ₈	56.10	—	—	-6.1	—	144	—

$$T_c = \frac{8a}{27Rb} \quad (1-6)$$

$$p_c = \frac{a}{27b^2} \quad (1-7)$$

式中 v_c 、 T_c 、 p_c ——为临界状态下的比容、绝对温度和压力。

若将各条 $p-v$ 线 (如图 1-2) 的转折点连起来, 可划出三个区域: 在 c 点以左的 $c-6-8-10$ 线称饱和液线, 线左为液态; c 点往右的 $c-5-7-9$ 线称干饱和蒸气线, 线右为气体; 在两曲线的中间部分为气、液共存区, 称二氧化碳湿蒸气区。

当温度高于 31.1°C 时, 由于无论加多大的压力, 也不能使二氧化碳变成液体, 所以 31.1°C 是使其液化的最高温度; 若低于此温度, 则所需压力相应降低。此温度称二氧化碳的临界温度。与 31.1°C 对应的压力 p_c 称二氧化碳的临界压力。

其他气体的液化过程的原理与此相似。液化石油气即利用此特性, 将主要成分为 C_3 、 C_4 的高热值气体 (丙烷、丙烯、丁烷、丁烯) 加压降温液化, 用钢瓶储存供作民用燃料。

五、对比态方程和压缩系数

(一) 对比态方程

由上述得知, 表示物质处于临界状态的参数有临界压力 (p_c)、临界比容 (v_c) 及临界绝对温度 (T_c)。自然界物质所处状态参数与其临界状态参数有一定的差值。为反应物质所处状态与临界状态对比的数值, 引入了对比参数。对比参数是物质实际上所处状态的参数 (p 、 v 、与 T) 与临界状态同名参数的比值, 即:

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad (1-8)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (1-9)$$

$$v_r = \frac{v}{v_c} \quad (1-10)$$

式中: p_r 、 T_r 及 v_r 分别为对比压力、对比绝对温度及对比比容。对比参数均是无因次量。

对比参数表示物质所处状态离其本身的临界状态的程度。如果两种或几种物质的状态具有相同的对比参数, 则这些物质处于对应状态, 它们离各自的临界状态的程度相同。

式 (1-8)、(1-9)、(1-10) 表明, 若 $p = p_c$, $T = T_c$, $v = v_c$, 则各个对比参数等于 1。

用对比参数表述的状态方程式称为对比态方程式。它对各种物质是通用的, 其中不包含与物性有关的数值, 通式为

$$pV_m = ZR_0T \quad (1-11)$$

式中 V_m ——1 公斤分子的容积;

R_0 ——通用气体常数 ($R_0 = \mu R = 848 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度}$);

Z ——压缩系数 (又称压缩因子), 由式 (1-11) 可见, Z 值为

$$Z = \frac{pV_m}{R_0T}$$

此式是适用于任何气体的通用式, 具有普遍的意义。现讨论两种情形:

若 $pV_m = R_0 T$, 则 $Z = 1$, 这是理想气体;

若 $pV_m \neq R_0 T$, 则 $Z \neq 1$, 这是实际气体。

一般物质所处压力小于其临界压力时, 则 Z 值小于 1, 分子间吸引力起作用; 若物质所处压力大于临界压力, 则 Z 值大于 1, 分子间的相斥力起作用。

若物质处于临界状态, 则其压缩系数为:

$$Z_c = \frac{p_c V_c}{R_0 T_c} \quad (1-12)$$

式中 Z_c ——临界状态的压缩系数;

p_c, V_c, T_c ——临界状态参数。

一些气体的临界压缩系数, 见表 1-4。

一些气体临界压缩系数

表 1-4

物质名称	He	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	NH ₃	H ₂ O	CO	CH ₄
Z_c	0.300	0.304	0.297	0.292	0.274	0.238	0.230	0.294	0.290

第二节 混合气体分压定律

在工程上常遇到的气体往往是由几种单一气体混合而成的。例如自然界的空气主要是由氮气、氧气、少量的水蒸气以及其他惰性气体等混合而成。煤气也是由一些可燃气体和不可燃气体组成的混合气体。因此了解混合气体的主要性质十分必要。

一、混合气体的表示法

混合气体的各组分常用重量法、容积法和摩尔法等三种方法表示。

(一) 重量法

重量组分是指混合气体中各组分的重量与混合气体总重量的比值 (百分比)。用 g 表示。例如干空气各组分之重量比为

$$g_{N_2} = \frac{G_{N_2}}{G} \times 100\%,$$

$$g_{O_2} = \frac{G_{O_2}}{G} \times 100\%,$$

$$g_{N_2} + g_{O_2} = 100\%,$$

式中:

测出干空气的 $g_{N_2} = 76.8\%$, $g_{O_2} = 23.2\%$ 。

(二) 容积法

在一定温度和压力下, 混合气体中某一组分的容积占混合气体的总容积之百分比称容积组分, 用 r 来表示。

各单一组分占有的容积称为百分容积，混合气体占有的容积称总容积。例如对于空气：

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V} \times 100\%,$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V} \times 100\%,$$

$$r_{N_2} + r_{O_2} = 100\%$$

测出干空气的 $r_{N_2} = 79\%$, $r_{O_2} = 21\%$ 。

(三) 摩尔法

摩尔组分是指混合气体中各组分的摩尔数与混合气体的总摩尔数的百分比，用 m 表示，例如干空气摩尔组分为：

$$m_{N_2} = \frac{M_{N_2}}{M} \times 100\%,$$

$$m_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{M} \times 100\%,$$

$$m_{N_2} + m_{O_2} = 100\%$$

式中 G ——气体的重量，公斤；

μ ——气体的分子量；

M ——气体的重量与气体的分子量之比 (G/μ)，公斤/摩尔。

根据上述表示方法，对有数个（如 n 个）组分的混合气体的三种表示法可用下列公式：

重量法：

$$g_i = \frac{G_i}{G},$$

$$g_1 + g_2 + \cdots + g_n = \sum_{i=1}^n g_i = 100\% \quad (1-13)$$

容积法：

$$r_i = \frac{V_i}{V},$$

$$r_1 + r_2 + \cdots + r_n = \sum_{i=1}^n r_i = 100\% \quad (1-14)$$

摩尔法：

$$m_i = \frac{M_i}{M},$$

$$m_1 + m_2 + \cdots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i = 100\% \quad (1-15)$$

二、气体分压定律

气体由数种组分组成。它们各自拥有一定的平均动能，分子对容器壁碰撞而形成对容器壁的压力。例如对干空气，容器受的压力模型，见图 1-3。

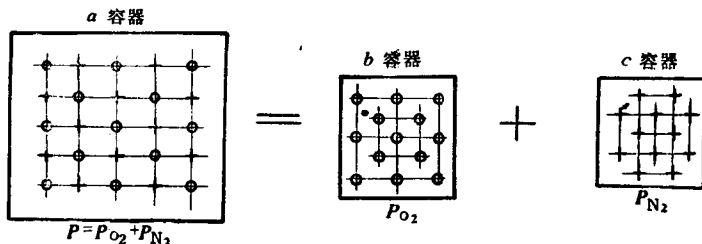


图 1-3 分压力与总压力模型图

设 a 容器中，干空气在总压力 p 和温度 T 状态下，分子具有一定的平均动能，对器壁碰撞而产生的压力为 p 。在 b 容器中，装有和 a 容器同体积的单一氧气，在温度 T 状态下，氧分子有一定的平均动能，对器壁碰撞产生的压力为 p_{O_2} 。在 c 容器中，装有和 a 容器同体积的单一氮气，在温度 T 状态下，氮分子有一定的平均动能，对器壁碰撞产生的压力为 p_{N_2} 。设气体为理想气体，即受压不太大，分子之间没有吸引力，分子本身不占有体积，则测得总压力等于其他两个容器的压力之和。

$$p = p_{N_2} + p_{O_2} \quad (1-16)$$

同样，若容器中装有 n 种单一气体的混合气体时，则其总压力与分压力的关系是总压力等于混合组分各分压力之和，即：

$$p = p_1 + p_2 + \cdots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1-17)$$

此式即理想气体分压定律通用数学表达式，又称道尔顿定律。

第三节 热力学第一定律、焓

热力学第一定律是能量守恒和转换定律在热力学中的应用。它确定热力学过程中各种能量间的相互关系。

运动是物质存在的形式，而能量是物质运动的度量。由于运动的形式在不断地相互转换，所以能量亦相互转换。

例如电是物质存在的一种形式，它有波、粒二重性，而光是电磁波，也有波、粒二重性，它们之间各以不同的运动形式而存在，并相互转换。

一、热力过程

热力过程是热力系统从一个平衡状态到另一个平衡状态的连续变化过程。

热力过程是十分复杂的,它与许多因素有关。目前研究热力过程主要有两种方法:宏观方法与微观方法。

将热力过程限定在某一个范围内,称此范围为系统。热力系统在初平衡状态具有一定的状态参数(基本状态参数和导出状态参数如 p_1 、 V_1 、 T_1 ...,经过一定的连续的热力过程,不论其如何复杂,当达到最终平衡状态时,它的状态参数亦有一定的数值(p_2 、 V_2 、 T_2 ...))

宏观方法就是取热力系统的初、终平衡状态来研究热力过程的方法。

实际上热力系统在变化过程中,虽然中间状态一般不是平衡的,但是并不影响用宏观的方法研究热力过程。

微观方法研究热力过程,是指采用量子力学、统计力学等方法来研究热力系统的原子及分子运动过程的变化情形,它是更细致、更深刻地研究能量转换过程的一种方法,这种方法又称统计热力学。它可以从物质结构出发来解释微观现象,并由此来推断物质的宏观特性。

在实际生产中主要用宏观方法来研究热力过程的变化规律。

二、内 能

内能是物质内部具有的分子动能与分子位能的总和。

1. 分子动能 它包括分子直线运动的动能、分子旋转运动的动能及分子内部的振动动能。

2. 分子位能 它是由分子间的作用力所产生的,也称势能。分子间位能的大小与分子间距离有关,亦与物质的属性有关。

内能是热力学导出参数之一,用 u 表示,单位是千卡/公斤或千焦/公斤(kCal/kg或kJ/kg)。

内能的大小与物质的温度、压力、比容有关。因为温度的高低决定物质分子平均动能的大小,而压力和比容决定分子间的距离大小。

三、热力学第一定律的表达式

(一) 热力学第一定律的基本表达式

在研究热力学第一定律之前,应先了解用热力系统的方法来研究热力学的概念。如研究活塞式气缸中气体的热力状况,即可设想它的周围有一个完全闭合的边界,将边界内部包括的称为热力系统,边界外部的称外界或环境,边界可以是实际存在的,也可以是假想的。例如某真空容器,若打开与外界连接的阀门时,则外界空气在大气压力的作用下流入容器中,直到压力与外界平衡为止。现将流入容器中而达到压力平衡时的那部分空气假想地与大气界划分出来,将此部分空气与真空容器共同组成一个系统,此即闭口系统。所以某热力系统,只有热量或功量的传递,没有物质穿过边界,系统的质量始终保持恒定值时的系统称为闭口系统。

若某物质恒定的穿过边界从热力设备流过,同时有热量或功量的传递时,则称开口

系统。

若热力系统不与外界发生能量传递，称为绝热系统。若热力系统既不与外界有质量交换，也没有能量的传递，称为孤立系统。

对某闭口热力系统，进入系统能量减去离开系统的能量等于系统储存能量的增加，即

$$Q = \Delta U + AW \quad (1-18)$$

式中 Q ——进入闭口热力系统的能量；

ΔU ——闭口热力系统的内能变化量；

W ——闭口热力系统对外做的功量；

A ——功热当量， $A = \frac{1}{427}$ [千卡/公斤·米]

此即热力学第一定律基本表达式。

(二) 不稳定流动能量方程

对于开口热力系统，系统与外界不但有能量的交换，同时物质穿过边界流动，若其能量和质量不随时间变化，称为稳定流动过程。若流过系统物质的量随时间而改变，则此种流动过程称不稳定流动过程，例如气瓶和贮气罐的充气和排气过程等。不稳定流动过程是带有普遍性的热力过程。

现用热力学第一定律来分析不稳定的流动能量变化过程，因为它具有一般性、普遍性。而稳定流动过程是特殊的、局限的情形。

研究时引入微量变化量的概念。

设时间用 τ 表示，在某一瞬间系统质量和能量发生变化，其时间的微变量用 $d\tau$ 表示。而流入系统和流出系统的微量质量变化量用 dm_1 和 dm_2 表示，而热量的微量变化量用 dQ 表示，功量的微量变化量用 dW 表示。其质量平衡式可写为：

$$dm_1 - dm_2 = dm_{\text{系统}} \quad (1-19)$$

即流入系统的质量的微量变化量减去流出系统的质量的微量变化量等于系统内的质量微量变化量。

若不仅有质量变化，同时伴随着能量变化，流入能量密度用 e_1 表示，流出能量密度用 e_2 表示，则能量平衡式写为

$$e_1 dm_1 + Ap_1 v_1 dm_1 + dQ - e_2 dm_2 - Ap_2 v_2 dm_2 - AdW = d(e \cdot m)_{\text{系统}} \quad (1-20)$$

此式是开口系统质量和能量变化时的平衡方程式。其物理意义是， $e_1 dm_1 + Ap_1 v_1 dm_1$ 和 $e_2 dm_2 + Ap_2 v_2 dm_2$ 是系统中流入和流出的质量、能量变化量。而 dQ 是传入系统的微热量， dW 是系统向外做的微功量。

经整理得下式：

$$(e_1 + Ap_1 v_1) dm_1 - (e_2 + Ap_2 v_2) dm_2 + dQ - Adw = d(e \cdot m)_{\text{系统}} \quad (1-21)$$

若不计系统的位能时，则物质的能量密度可用下式表示：

$$e = u + A \frac{c^2}{2g}, \quad (1-22)$$

式中 u ——单位工质的内能；

$\frac{c^2}{2g}$ ——单位工质的动能；