

高等学校教学用书

# 热 工 学

REGONGXUE

同济大学热工教研组编

人民教育出版社

72.54  
195  
02

高等学校教学用书



热 工 学

REGONGXUE

同济大学热工教研组编

3/16/18

人民教育出版社



本书可作为高等工业学校土建类各专业的“热工学”课程的教材,也可供非动力类其他各专业参考之用。在内容上力求简练,以适应土建各专业热工学课程学时較少的特点;同时在結合专业需要的前提下,仍保持着热工学原有的完整性和系統性。

本书在取材方面,尽可能遵循基础技术課应結合专业的原則。在傳热学部分中引入了建筑热工的概念,鍋炉設備部分,則以建筑工地和工业上常用的鍋炉为主。在热机部分,則以小功率的动力机械为主,同时还簡要地介紹了现代热能动力方面的成就,如原子能动力厂及自由活塞燃气輪机的基本原理。压气机一章的内容,考虑到建筑工地的需要,比之一般热工学的内容有所增加。

本书除緒論外,包括:工程热力学、傳热学基础、鍋炉設備、蒸汽机、汽輪机、內燃机、燃气輪机及压气机等八章。

本书也可供一般工程技术人員参考。

## 热 工 学

同濟大学热工教研組編

人民教育出版社出版 高等学校教材編輯部  
北京宣武門內承恩寺7号  
(北京市书刊出版业营业許可証出字第2号)

上海市印刷六厂印刷  
新华书店上海发行所发行  
各地新华书店經售

統一书号15010·940 开本787×1092 1/16 印張13 1/8 插頁2  
字数 275,000 印数 1—16,000 定价(4) 1.50  
1960年10月第1版 1960年10月上海第1次印刷



## 序

这本热工学是为高等工业学校土建类各专业所写的教本,也可作非动力类其他专业的参考之用。全书由同济大学热工教研组的教师在原来自编讲义的基础上,结合大跃进及教育革命中的新情况,采用了个人负责与集体讨论相结合的方式,进行编写而成。

在写作过程中,得到了学校党委和行政的重视和鼓励,被列入为同济大学1959年度主要科学研究项目之一。

各专业所确定的本课程教学总时数为50学时左右,基本内容上的要求也是一致的,但结合各专业的实际情况,对具体章节的份量轻重则要求各有所不同。因而,要使这本教材恰如其份地适应每一专业是有困难的。我们只有在其共同性的基础上,注意到不使篇幅过份增加而在内容上力求全面完整。这样,在使用本书时,只需要进行适当的增删,通过讲授和实验等教学环节的适当配合,便可以基本上满足各专业的要求了。

为使学科本身的系统性及完整性与实际需要结合起来,本书在总的编排和内容上仍保持了“普通热工学”的特色,但在取材上,则以专业实际需要为前提:适当地加重了压气机一章;在传热学部分,则引入了建筑热工的一些基本知识;在锅炉设备部分,则以工地和工业上常用的锅炉为主,并引入了低压铸铁锅炉和热水锅炉的知识;在内燃机、蒸汽机部分,取材则以小功率的作为主要对象,与施工机械用原动机有所衔接;至于汽轮机、燃气轮机、喷射推进机等则介绍的较为精简扼要;在汽轮机的一章中,也同时引入了蒸汽动力厂方面的一些概念。自由活塞燃气轮机的引入,估计今后应用于施工机械方面,特别是空气压缩机站,将有广阔的前途。

在主观愿望上,我们力求教材内容能反映国内生产实际,文字措辞也能浅显通顺。但由于业务水平和实践经验的限制,愿望与实际效果间一定会存在很大的距离,谬误和不正确的见解也在所难免,恳切希望使用者惠予宝贵的批评和指教。

編者

# 目 录

序	
緒論	1
<b>第一章 工程热力学</b>	
1-1. 工程热力学研究的对象和它的任务	3
1-2. 工质及其基本状态参数	3
1-3. 理想气体的基本定律	6
1-4. 混合气体	10
1-5. 气体的比热	14
1-6. 气体的内能	20
1-7. 膨胀功及压缩功	21
1-8. 热力学第一定律	22
1-9. 气体的热力过程	23
1-10. 气体的焓	32
1-11. 循环及卡诺循环	33
1-12. 热力学第二定律	36
1-13. 熵	37
1-14. 水蒸汽的形成	41
1-15. 水蒸汽参数的计算	43
1-16. 水蒸汽表、温熵图及焓熵图	45
1-17. 水蒸汽的热力过程	47
1-18. 气体及水蒸汽的流动过程	50
1-19. 气体及水蒸汽的节流过程	52
<b>第二章 传热学基础</b>	
2-1. 传热的方式	53
2-2. 傅立叶定律	53
2-3. 导热系数	54
2-4. 稳定导热的计算	55
2-5. 对流换热	58
2-6. 热辐射的概念	61
2-7. 热辐射的基本定律	62
2-8. 辐射换热的计算	65
2-9. 复杂换热的概念	67
2-10. 传热	67
2-11. 换热器计算	69
2-12. 建筑物热损耗计算的概念	71
<b>第三章 锅炉设备</b>	
3-1. 锅炉设备的一般知识	77
3-2. 锅炉的燃料	79
3-3. 燃料的燃烧	82
3-4. 燃烧设备——炉子	83
3-5. 锅炉的型式	89
3-6. 锅炉辅助设备	100
3-7. 锅炉设备的热平衡	103
3-8. 锅炉设备的运行和安全	105
<b>第四章 蒸汽机</b>	
4-1. 蒸汽机发展简史	107
4-2. 最简单的蒸汽动力厂循环——郎肯循环	108
4-3. 蒸汽机的基本构造及工作原理	112
4-4. 蒸汽机的示功图	113
4-5. 蒸汽机的功率	116
4-6. 蒸汽机的效率及汽耗率	117
4-7. 单流机和复胀机	119
4-8. 蒸汽机的配汽机构	121
4-9. 蒸汽机的调节	123
4-10. 蒸汽机的操作和维护	124
4-11. 锅驼机	127
<b>第五章 汽轮机</b>	
5-1. 汽轮机的一般概念及基本工作原理	129
5-2. 冲击式汽轮机与反击式汽轮机	130
5-3. 多级式汽轮机	132
5-4. 汽轮机的效率、功率及汽耗	133
5-5. 汽轮机的凝汽设备	136
5-6. 蒸汽动力厂的主要类型与设备	138
5-7. 原子能动力厂简述	141
5-8. 蒸汽动力厂的主要技术经济指标	142
<b>第六章 内燃机</b>	
6-1. 内燃机的发展简史及其应用范围	145
6-2. 四冲程内燃机的工作原理和构造概要	146
6-3. 内燃机的示功图	148
6-4. 内燃机的理论工作循环	148
6-5. 二冲程内燃机的工作原理	153
6-6. 二冲程内燃机与四冲程内燃机的比较	155
6-7. 内燃机的功率及效率	156
6-8. 内燃机的燃料消耗率及性能曲线	158
6-9. 内燃机的热平衡	159
6-10. 内燃机的燃料	160
6-11. 点燃式内燃机的燃料供应	162
6-12. 内燃机的点火系统	163
6-13. 压燃式内燃机的燃料供应	164
6-14. 内燃机的润滑与冷却	167
6-15. 汽油机与柴油机的比较	168

6-16. 内燃机的启动方法与操作维护 .....169

### 第七章 燃气轮机

7-1. 燃气轮机的一般概念及其特征 .....171

7-2. 燃气轮机装置的主要设备 .....171

7-3. 闭式燃气轮机装置 .....173

7-4. 燃气轮机的工业应用及其发展前途 .....174

7-5. 自由活塞燃气轮机 .....175

7-6. 喷射推进机 .....177

### 第八章 压气机

8-1. 压气机概论 .....179

8-2. 往复式压气机的工作原理、构造及设备 .....180

8-3. 往复式压气机的理想工作循环和实际工作循环 .....181

8-4. 往复式压气机的功率和效率 .....184

8-5. 多级压缩及级间冷却 多级往复式压气机 .....186

8-6. 往复式压气机的气阀 .....189

8-7. 往复式压气机的调节及安全操作的概念 .....190

8-8. 离心式压气机的构造及工作原理 .....192

8-9. 离心式压气机的性能 .....195

8-10. 离心式压气机的调节 .....196

8-11. 离心式压气机与往复式压气机的比较 .....197

8-12. 转子式压气机 .....198

### 附 录

表 1 饱和蒸汽(变数为温度)

表 2 饱和蒸汽(变数为压力)

表 3 过热蒸汽与水

水蒸汽的  $is$  图



## 緒 論

在热工学里,我們研究的主要对象为热能与机械能轉換的客观規律,以及利用这些規律以获得热能动力的热力原动机,因此,在內容上包括着两个基本組成部分:第一部分是热工理論基础,它由工程热力学和傳热学二章所組成;第二部分即通常所謂的热机,它由鍋炉設備,蒸汽机,汽輪机,內燃机,燃气輪机和压气机等六章所組成。結合专业上的需要在傳热学一章中特別引入了建筑热工的一些基本知識,在鍋炉設備一章中則引入了采暖上常用的低压鑄鉄鍋炉和热水鍋炉,并适当地加重了压气机方面的內容。

在原始公社时,我們的祖先利用简单的生产工具完全依靠体力劳动来取得生活資料,生产力水平非常低。随着生产的发展,人們逐渐学会利用畜力来代替比較繁重的体力劳动,虽然提高了生产力,但这种原动力(畜力)来源不多,畜养費事,远不能滿足人們对提高生产的要求。随着人們生产实践經驗的不断丰富,于是又逐渐利用自然界的能源使之变为机械能,如利用风的动能、水的位能、燃料的热能等。由于客观环境的限制和技术条件等一系列的原因,到目前为止,热能的利用一直在各种能源利用中占广泛和首要的地位。

热能是自然界客观存在的能源之一,人类通过了长期的認識和实践过程,才逐渐发现与掌握了它的基本規律,得以有效地利用它来为人类造福。相傳的燧人氏钻木取火,也就是我們祖先利用“摩擦生热”的启始。随后,有文字記載的如物原中即有“祝融作炭”的記述(公元前2400年左右);前汉书地理志(公元前200年)則載有对煤、石油、天然气等燃料的发现与应用,这說明我們的祖先已掌握了一些燃料及燃燒方法方面的知識。而西汉时所发明的火葯,不仅在化学等工程上有划时代的意义,也为利用固体燃料所产生气体反动力显著地做出功来提出了明确的方向。进而在公元605~615年(隋煬帝时),我国民間已有可作为近代噴射推进机雛型的“流星焰火”;公元1150年前(南宋时)則又有了可作为燃气輪机鼻祖的“走馬灯”……。这些事实說明:人类对热能規律的发现及利用,是逐步由低到高、由淺入深地发展着。

但是任何一門学科的发展,它必然与当时客观环境和其他学科的发展相联系。因此,人类真正从本質上認識热能,以及有效地使热能变为机械能而作为原动力,还只是十八世紀以后的事。在公元1744~1747年偉大的科学家米·华·罗蒙諾索夫創立了热分子运动理論,打破了西欧盛行的“热素”学說,树立了人們对热能本質的正确認識。当时工艺技术和科学已有了相当的发展,而体力、畜力等已完全不能胜任生产上日益发展的要求。从而,俄国机械师伊·伊·波尔宗諾夫于1763~1765年創造了世界上第一台工业用蒸汽动力装置;稍后20年,英国机械师瓦特于1784年又发明了第一台蒸汽机,使人类获得了史无前例的新原动力,大大地提高了生产力,这就引起了所謂“西方的产业革命”。此后,內燃机、汽輪机也先

后于十九世紀后期及二十世紀初期发明問世,使热力原动机得到了广闊的发展和使用。

二十世紀五十年代以来,除燃气輪机、噴射推进机等新型的原动机又有了很大的发展外,苏联繼 1954 年建成了世界上第一座原子能发电站后,于 1958 年、1959 年又成功地发射了人造地球卫星和太阳系行星,这些巨大的新成就,把热力工程推向了更高的阶段,而进展的速度更是資本主义国家所望尘莫及的。

同样,解放十年来,我国热工事业在原来“一穷二白”的基础上,在苏联及兄弟国家的无私援助下,也得到了很大的跃进。1954 年国庆时,就自制了第一套国产 6000 瓩汽輪机发电設備。同时在上海、哈尔滨等地也先后建立了大型的鍋炉、汽輪机、柴油机等制造厂。在大跃进高潮的鼓舞下,已一跃而制成了配合 25000 瓩和 50000 瓩发电机用的汽輪机、鍋炉等热力設備,国家并設立了一系列的动力机械專門的研究机关和专业。1958 年,我国在动力机械及与其有关的发电設備、机車、汽車等产量方面比 1957 年都有了成倍的增长,而 1959 年又在大跃进的基础上再增长 50% 以上。現在我国非但很快地在燃气輪机、噴射推进机等方面取得了一定的成就,而且在苏联协助下建成了第一座試驗型原子反应堆,这使我国热工事业也步入了利用核子裂变热的新时代。

热工学是一門基础技术課,我們学习它具有两方面的意义:(一)由于技术科学本身是相互紧密联系的,热工技术的成就正广泛地服务于土建工程,而它的发展又依賴着土建科学的协作,如鍋炉設備广泛地服务于基本建設中的热力供应,而其构架及安装等一系列的技术問題却依賴于土建科学的解决。因此,通过这門課的学习,可使我們对热工知識有一个比較全面的了解,从而可作为学科間相互沟通发展的基础。(二)由于施工技术方面不断发展,必然要使用各种热力設備及原动机,以加快施工速度,提高劳动生产率,适应社会主义建設高速度发展的要求。因此,这門課也承担了“承上启下”的作用,为施工等专业課的学习作了一些必要的准备。同时还将化学、物理等基础知識的一部分具体地应用到本課程中来。

毛主席說:“中国只有在社会經濟制度方面彻底地完成社会主义改造,又在技术方面,在一切能够使用机器的部門和地方,統統使用机器操作,才能使經濟面貌全部改觀”。面向着更大跃进中的經濟建設高潮和文化技术革命高潮,形势要求我們,必須逐步而迅速地运用机械以代替土建施工和制品中的繁重体力劳动。因此,学习和掌握热工学更是迫切需要的了!



# 第一章 工程热力学

## 1-1. 工程热力学研究的对象和它的任务

热力学是一门研究热能与其他各种能量之间相互转换的科学,也就是研究热能与机械能、电能及化学能等相互关系的科学。工程热力学是热力学的一部分,它研究的对象仅限于热能与机械能(功)之间的转换规律。

在现代动力工程中普遍采用的蒸汽机、内燃机、汽轮机、燃气轮机及喷射推进机等类机器,都是利用燃料中的热能转变为机械能的原动机,这一类机器叫做热力发动机或热力原动机(简称热机)。虽然各种热机的工作原理和构造各不相同,但是它们的理论基础都是工程热力学。因此,为了最完善地利用燃料中的热能,还必须了解由热变功的最有利条件。工程热力学的任务就是指出这些规律和条件。它除了研究参与由热变功的气体(或蒸汽)的性质、研究这些转变过程的客观规律以外,还研究怎样改善热机的工作条件以及如何使这些热变功的过程在最有利的情况下进行。

随着社会发展的日益进步,机器将更多地代替人类的劳动而为我们创造财富。因而作为原动机理论基础的工程热力学就成为现代工程技术人员所不可缺少的理论知识了。

## 1-2. 工质及其基本状态参数

在热机中要实现热能转变成机械能的过程,必须借助于某种媒介物,这种媒介物称为工质。我们知道在热机中热变功的过程是利用工质受热膨胀做功来实现的,要符合这种特性,气体或蒸汽是最适合的,因为它们具有最大的膨胀能力。事实上,目前在热机中用以携带热能起媒介作用的工质不外乎下列两种,即内燃机及燃气轮机中的燃烧气体与蒸汽机及汽轮机中的水蒸汽。因此,通常工程热力学所研究的工质也就限于气体和水蒸汽两种。

气体是由大量的分子和原子所组成,而这些分子和原子又是处在不断的无规律的运动中,它的状态随时都可能改变。因此,为了研究这些热变功过程的规律、描述气体在各种状态下的特征,必须采用某些物理量来确定与描述气体的性质,这些物理量就叫做气体的状态参数。

气体的状态一般用温度、压力和比容这三个基本参数来描写,这三个量就叫做气体的基本状态参数。

**1. 温度** 根据气体分子运动理论,温度是物质分子运动平均动能的度量,这种关系是完全符合于通常所观察到的热现象,并且也符合于传热现象。如有两个具有不同的分子运动平均动能的物体相接触,则由于接触面分子互相碰撞的结果,能量就由具有分子运动平均

动能較大的物体傳給平均动能較小的物体,直到两物体的平均动能相等时为止。換句話說,就是高温物体把热量(能量)傳給低温物体,直到两者的温度相等时傳热才停止。因此可以認為温度乃是物体內部分子运动平均动能的另一种表現。

在工程上温度用国际百度温标( $^{\circ}\text{C}$ )来度量,百度温标的 $0^{\circ}\text{C}$ 是指在一个物理大气压下的冰的融点;而 $100^{\circ}\text{C}$ 是指在相同气压下,水的沸点。在热力学的研究中,則采用絕對温标( $^{\circ}\text{K}$ ),絕對温标和百度温标之間每一度的大小完全一样,但絕對零度系在冰点下 $273.16$ 度。不过,在工程計算中一般取 $0^{\circ}\text{C}=273^{\circ}\text{K}$ 已足够准确。以 $T$ 表示絕對温度, $t$ 表示百度温度,則得

$$T=t+273, \quad (1-1)$$

因为两种温标的每一度都相等,所以

$$0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}; 0^{\circ}\text{C} = 273^{\circ}\text{K}; 100^{\circ}\text{C} = 373^{\circ}\text{K}。$$

**2. 比容** 在工程热力学中每一公斤气体所占有的容积叫比容,以符号 $v$ 表示,比容的单位是米<sup>3</sup>/公斤。用大写的 $V$ 表示 $G$ 公斤重量气体的容积,則得到

$$v = \frac{V}{G} \text{ 米}^3/\text{公斤}。 \quad (1-2)$$

每一立方米气体的重量叫做重度,以符号 $\gamma$ 表示,由此

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

根据上面两式的关系得出

$$\gamma = \frac{1}{v} \text{ 或 } \gamma v = 1。$$

因此, $\gamma$ 和 $v$ 互为倒数,对气体的任何状态來說,比容和重度的乘积恒等于1。

**3. 压力** 容器中大量的气体分子总是充滿着整个容器,并且处于不断的混乱运动中,大量分子撞击器壁的结果就形成了气体对器壁的压力。但是分子数目是如此之多,以致我們无法知道每次撞击的情况,而只能观察全部撞击的总结果。在工程热力学中测量气体压力的单位是公斤/米<sup>2</sup>或公斤/厘米<sup>2</sup>,并称一公斤/厘米<sup>2</sup>的压力为一个工程大气压。因此

$$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10000 \text{ 公斤/米}^2。$$

在物理学上一个大气压是指海平面上大气的平均压力,它等于 $1.0333$ 公斤/厘米<sup>2</sup>。因此

$$1 \text{ 物理大气压} = 1.0333 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10333 \text{ 公斤/米}^2。$$

物理大气压略大于工程大气压,而工程大气压是为了在工程上应用簡便起見而制定的。在本教程中除非特別指明外,一般所用的大气压均指工程大气压而言。

測量气体的压力也可以用水柱或汞柱的高度来表示,如用 $F$ 表示作用在面积 $f$ 上的力,以 $h$ 表示液柱的高度,以 $\gamma$ 表示其重度,則得

$$F = pf = hf\gamma$$

移項整理后

$$p = h\gamma \quad \text{或} \quad h = \frac{p}{\gamma} \quad (1-4)$$

取水的重度为 1000 公斤/米<sup>3</sup>, 汞的重度为 13595 公斤/米<sup>3</sup>, 相当于一个工程大气压的水柱和汞柱的高度则为

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= \frac{10000}{1000} = 10 \text{ 米水柱} \\ &= \frac{10000}{13595} = 0.736 \text{ 米汞柱} = 736 \text{ 毫米汞柱} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 物理大气压} &= \frac{10333}{1000} = 10.333 \text{ 米水柱} \\ &= \frac{10333}{13595} = 0.76 \text{ 米汞柱} = 760 \text{ 毫米汞柱} \end{aligned}$$

假如我们需要测量容器中气体的压力, 可以用一根两端开口的弯管連結在容器上, 弯管内的液体在两侧压力差的作用下, 能显示出容器中压力的相对值, 如图 1-1 和 1-2 所示。很显然在第一种情况下, 容器中气体的压力比外界的大气压力  $B$  大  $h_1$  液柱高, 这高出部分叫表压力, 用  $p_m$  来表示。在第二种情况下, 容器中气体的压力比外界大气压力  $B$  低  $h_2$  液柱高, 这段液柱高叫做真空度, 用  $p_v$  来表示。容器中气体压力的绝对数值叫做绝对压力, 用  $p$  来表示。则从图 1-1 所示的情况, 可得压力的平衡方程式

$$p - p_m + B \quad (1-5)$$

再根据图 1-2 可得

$$p + p_v = B \quad \text{或} \quad p = B - p_v \quad (1-6)$$

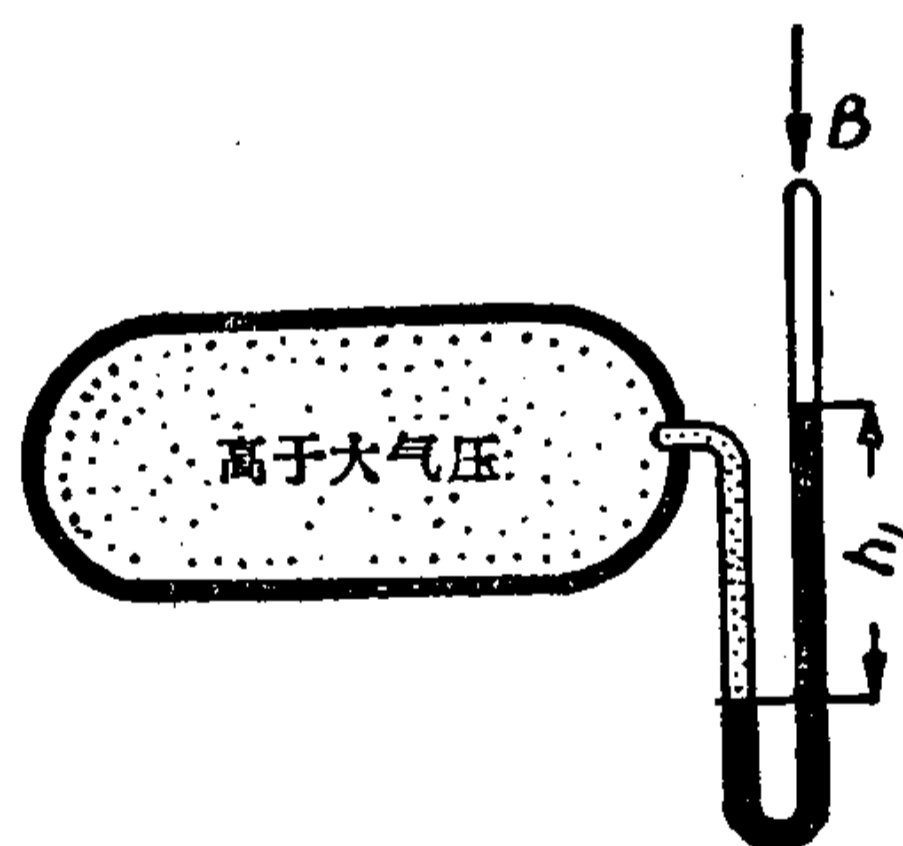


图 1-1. 当容器中压力高于外界大气压时的情况。

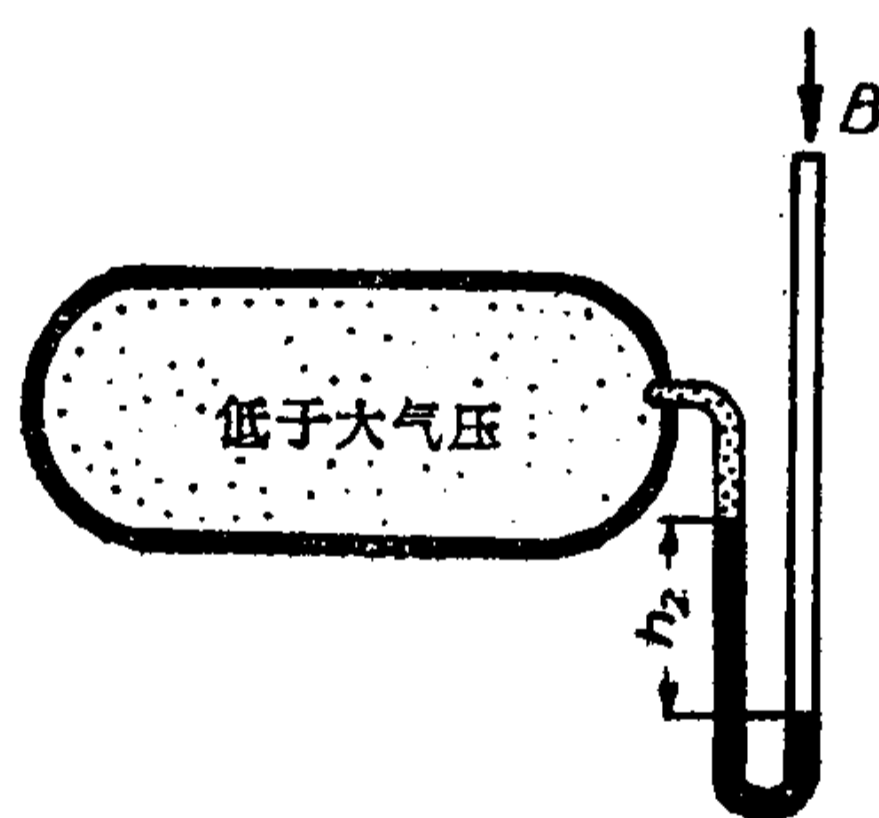


图 1-2. 当容器中压力低于外界大气压时的情况。

从上列公式中可以看出表压力及真空度的大小都是相对值, 也是一种辅助值, 它们不能说明容器中气体压力的真正大小。因为容器中的气体在同一状况下, 只要外界的大气压力  $B$  有所变动, 则得到的表压力或真空度也就不同。因此, 只有绝对压力才表示气体状态的参数, 而表压力仅表示容器中气体的压力比外界大气压力高出多少, 真空度仅表示容器中气体的压力比外界大气压力低了多少。因此, 以表压力或真空度来表示气体的状态时, 还必须给出当时的大气压力  $B$  值, 这样才能根据 (1-5) 或 (1-6) 式确定气体的绝对压力。这里应该指出的是在实际测量中绝对压力是无法取得的, 所取得的数值均是相对值; 而在工程计算中,



当压力较高时，则往往把大气压力  $B$  值取为 1 工程大气压，因为这样假定的结果在工程计算中所引起的误差是微不足道的，但是在计算较低的压力时则会引起较大的误差。

**例题 1-1.** 汽锅中的压力由压力表量得为 5.2 大气压，当时大气的压力为 780 毫米汞柱。问汽锅中蒸汽的绝对压力应为多少？

**解** 根据公式(1-5)汽锅中的绝对压力为

$$p_m = p + B = 5.2 + \frac{780}{736} = 6.26 \text{ 绝对大气压。}$$

**例题 1-2.** 某烟道的通风表(真空表)指示出烟道中烟气的真空度为 60 毫米水柱，当时的大气压是 770 毫米汞柱。问烟道中的绝对压力为多少汞柱高？

**解** 汞的比重等于水的 13.59 倍，把烟道中烟气的真空度换算成汞柱，则为

$$p_v = \frac{60}{13.59} = 4.4 \text{ 毫米汞柱。}$$

根据公式(1-6)烟道中的绝对压力为

$$p = B - p_v = 770 - 4.4 = 765.6 \text{ 毫米汞柱。}$$

### 1-3. 理想气体的基本定律

在热力学中研究气体的性质时，我们通常提出理想气体的概念。所谓理想气体乃是指这样一种假想的气体，它由完全弹性的分子所组成；而分子本身则是不占有容积的质点；同时分子之间又没有吸引力，每一个分子的运动都是自由的而不受到牵制。提出理想气体的概念是为了便于研究自然界的客观规律，从复杂的现象中抓住主要环节而忽略某些枝节问题，以便使问题合理地简化。虽然自然界中并不存在真正的理想气体，但这些对理想气体的假定也不是凭空臆造出来的，而是长期研究自然界现象的结果。一般在工程中常用的气体，如氧、氮、氢、一氧化碳、二氧化碳及由这些气体所混合组成的空气或燃气(燃料与空气燃烧的产物)等的性质都是非常符合上述假定的，因此在工程应用所要求的精确度内，完全可以把上述气体当作理想气体看待，而不致引起太大的误差。

在十七至十八世纪之间有许物理学对气体的状态变化作了详细的观察，并且建立了一系列的经验公式——理想气体定律。但是自从罗蒙诺索夫发现了热分子运动的本质，从而建立了分子运动学说以后，理想气体定律就不再是纯经验的关系，而可以根据所谓气体分子运动学说的基本方程式推演出来，同时也证实了经验关系的正确性。现在将理想气体的基本定律逐一分述如下：

**气体分子运动学说的基本方程式** 从物理学教程中所得到的关于气体分子运动的结论，理想气体作用在器壁上的压力可以由下式求得

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \omega^2}{2}, \quad (1-7)$$

式中  $p$ —气体对容器壁的绝对压力；

$n$ —分子浓度，即每一立方米容积内分子的数目；

$m$ —分子的质量，对同一种气体而言所有的分子质量都相同；

$\omega$ —分子直线运动的均方根速度。

在同一容器内,在一定的状态下气体各个分子运动的速度是不同的,而且气体分子数又是那么多,因而无法求得各个分子的速度,只好采用平均值。公式(1-7)中的均方根速度为

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \cdots + \omega_n^2}{n}}, \quad (1-8)$$

式中  $\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n$  是各个分子的运动速度。

方程式(1-7)指明,气体对容器壁所产生的绝对压力在数值上等于单位容积中全部分子直线运动动能的三分之二。

根据气体分子运动学说的假定,气体分子直线运动的平均动能与绝对温度成正比,即

$$\frac{m\omega^2}{2} = BT, \quad (1-9)$$

式中  $B$ —比例常数,对所有气体都是一样。

从上式中可以看出,凡是分子直线运动动能大的气体,其绝对温度高,动能小的气体则其绝对温度低。当  $\omega=0$  时,则  $T=0$ 。这个状态相当于绝对零度,此时气体分子停止了运动,这当然是不可能的事实,因此绝对温度  $T \leq 0$  是不可能的。

**气体状态方程式** 将公式(1-7)的左右两边乘以比容  $v$  则得

$$pv = \frac{2}{3} nv \frac{m\omega^2}{2} = \frac{2}{3} N' \frac{m\omega^2}{2},$$

式中  $N'$ —1公斤气体中分子的数目,利用关系式(1-9),则

$$pv = \frac{2}{3} N' BT,$$

对于一定的气体来说,1公斤气体内的分子数目是一个不变的常数,而  $B$  也是一个常数,因此可将上式改写成

$$pv = RT. \quad (1-10)$$

上式称为理想气体状态方程式。式中的  $R$  称为气体常数,对于一定的气体来说它是一个不变的数值,但不同的气体则是不同的。从这一方程式中可以说明,理想气体的三个基本参数之间是存在着一定的关系的,当任意改变其中二个参数的值时,第三个参数就受到了约束。换句话说,已知两个参数,则第三个参数就完全肯定了。

在这里应该指出,方程式(1-10)是针对1公斤气体而言的,如把方程式两边乘以气体重量  $G$ ,则得重量为  $G$  公斤的气体状态方程式

$$pV = GRT, \quad (1-11)$$

公式(1-10)及(1-11)中的各物理量必须用同一种单位制的单位,在工程热力学中是采用工程制单位,即  $p$  [公斤/米<sup>2</sup>];  $v$  [米<sup>3</sup>/公斤];  $T$  [°K];  $G$  [公斤];  $R$  [公斤·米/公斤·°K]。

**理想气体定律** 如将气体状态方程式应用到同一种气体的两个状态上去,并用注脚1表示初态、注脚2表示终态,则可得

$$p_1 v_1 = RT_1$$

及

$$p_2 v_2 = RT_2.$$

两式相除,移項整理得

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} \quad (1-12)$$

这一方程式叫做波义耳-馬略特-盖呂薩克联合定律。如已知初态参数及終态的两个参数,則終态的第三个参数就可以求得,实际上公式(1-12)左右两边的数值均等于該气体的气体常数  $R$  值。

如在方程式(1-12)中,令  $T_1 = T_2$ , 則得到下面的关系

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad \text{或} \quad pv = \text{常数}, \quad (1-13)$$

上式即为波义耳-馬略特定律,这一定律說明当气体的温度不变时,其絕對压力与比容的乘积为常数。

在方程式(1-12)中,如令  $p_1 = p_2$ , 則

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{或} \quad \frac{T}{v} = \text{常数}. \quad (1-14)$$

如令  $v_1 = v_2$ , 則

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{或} \quad \frac{T}{p} = \text{常数}. \quad (1-15)$$

上列两式叫做盖呂薩克定律。这一定律說明当气体的压力不变时,其比容与絕對温度成正比;如气体的比容不变时,則絕對压力与絕對温度成正比。

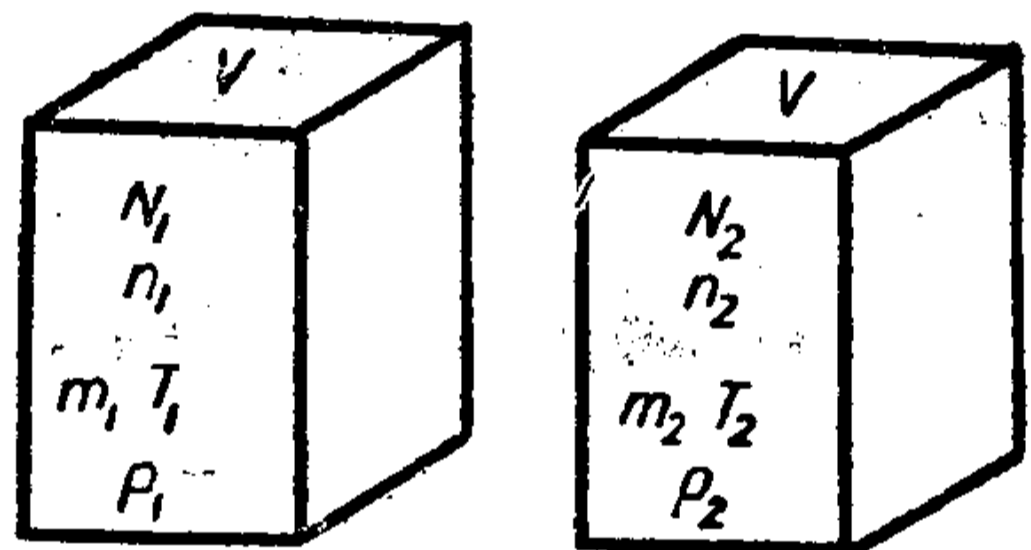


图 1-3. 同容积的不同气体。

**阿佛加得罗定律** 設有两种不同的气体,容积同为  $V$ , 如图 1-3 所示。第一种气体含有  $N_1$  个分子,分子浓度为  $n_1$ , 每一分子的质量为  $m_1$ , 压力为  $p_1$ , 温度为  $T_1$ 。第二种气体的各个对应量为  $N_2, n_2, m_2, p_2$  及  $T_2$ 。

再假定两容积中气体的压力与温度相等,首先根据分子运动学說的基本方程式(1-7)可得

$$p_1 = \frac{1}{3} n_1 m_1 \omega_1^2,$$

$$p_2 = \frac{1}{3} n_2 m_2 \omega_2^2.$$

如果  $p_1 = p_2$ , 則

$$\frac{1}{3} n_1 m_1 \omega_1^2 = \frac{1}{3} n_2 m_2 \omega_2^2,$$

又因  $T_1 = T_2$ , 即  $\frac{m_1 \omega_1^2}{2} = \frac{m_2 \omega_2^2}{2}$ , 則最后可得

$$n_1 = n_2,$$

左右两边各乘以容积  $V$  得

$$n_1 V = n_2 V$$

或

$$N_1 = N_2, \quad (1-16)$$



这就是阿佛加德罗定律。这一定律说明在同温同压下，同容积的任何气体所含有的分子数目都相等。

根据阿佛加得罗定律，很容易得出另一结论：容积相同的任何两种气体，在同温同压下，其重量之比等于其分子量之比。看下面的证明就可以了解这一结论。设两种气体具有同温同压同容积，并令  $\mu$  代表其分子量，则第一种气体的重量

$$G_1 = N_1 m_1 g = K \mu_1 N_1,$$

第二种气体的重量

$$G_2 = N_2 m_2 g = K \mu_2 N_2,$$

上列两式中  $g$  是重力加速度； $K$  是比例常数，按阿佛加得罗定律  $N_1 = N_2$ ，因此可得

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad \text{或} \quad \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (1-17)$$

即此时两种气体的重量之比等于其分子量之比。它的相反的意义也是正确的，即在同温同压下，如两种气体的重量之比等于其分子量之比，则此两种气体的容积必相等。

譬如：氢的分子量是  $\mu_{H_2} = 2$ ，氮是  $\mu_{N_2} = 28$ ，氧是  $\mu_{O_2} = 32$ ，则 2 公斤的氢，28 公斤的氮，32 公斤的氧，在同温同压下，三者的容积都应相等。改变一下份量，譬如 6 公斤的氢，84 公斤的氮，96 公斤的氧，在同一温度及同一压力下，它们的容积也应相等，这是因为这些气体的重量与各该气体的分子量相比较具有相同的倍数。

在化学上我们已学过分子量这个名称，它原是一个没有单位的比值。不过为了计算方便起见在化学中常以克为分子量的单位，叫做克分子量（或称“克莫尔”），它的大小是指与分子量数相等的气体重量的克数。例如氧的分子量是 32，则 1 个克分子量的氧就等于 32 克。同样在工程热力学中常采用“公斤莫尔”（习惯上简称“莫尔”）作为一种特殊的重量单位。当气体重量的公斤数等于其分子量时称为一“莫尔”或一个“公斤分子量”。例如 1 莫尔的氧是 32 公斤，1 莫尔的氢是 2 公斤等。采用莫尔作为计算的单位有时在应用中是很方便的。

根据阿佛加得罗定律的结论，可知在同温同压下每 1 莫尔的不同气体的容积应相等，即

$$\mu_1 v_1 = \mu_2 v_2 \quad \text{或} \quad \mu v = \text{常数}, \quad (1-18)$$

式中  $\mu$  乃表示 1 莫尔气体的重量，单位是公斤/莫尔； $\mu v$  则表示 1 个莫尔气体的容积。

根据已经测得的数据，在标准状态下（0°C 及 760 毫米汞柱），各种气体每 1 莫尔的容积为

$$\text{氢：} \quad \mu v = 2 \times 11.2 = 22.4 \text{ 标准米}^3/\text{莫尔}$$

$$\text{氧：} \quad \mu v = 32 \times 0.7 = 22.4 \text{ 标准米}^3/\text{莫尔}$$

$$\text{氮：} \quad \mu v = 28 \times 0.8 = 22.4 \text{ 标准米}^3/\text{莫尔}$$

由此可以看出阿佛加得罗定律的正确性。

从气体状态方程式可得

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

根据波义耳-马略特-盖吕萨克联合定律，综合量  $\frac{pv}{T}$  在任何状态下都保持不变。现取标准

状态下的值, 即  $p=10333$  公斤/米<sup>2</sup>,  $T=273^\circ\text{K}$  及  $v=\frac{22.4}{\mu}$  米<sup>3</sup>/公斤, 代入上式则得

$$R = \frac{10333 \times 22.4}{273\mu} = \frac{848}{\mu} \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot ^\circ\text{K}。 \quad (1-19)$$

这个公式在计算中被广泛地采用, 因为它只要知道气体的分子量  $\mu$ , 就可以很方便地求得各种气体的气体常数  $R$ 。

用  $\mu$  乘气体状态方程的两边, 并以公式(1-19)的结果  $\mu R=848$  代入, 则得

$$p\mu v = 848T, \quad (1-20)$$

此式叫做气体的莫尔状态方程式, 即 1 莫尔气体的状态方程式。式中  $\mu v$  为气体在任意状态下的莫尔容积, 方程式(1-20)中的常数  $\mu R=848$  称为通用气体常数, 对所有的理想气体而言其值都相同。

**例题 1-3.** 二氧化碳的表压力  $p_n=6$  个大气压, 当其重度  $\gamma=4$  公斤/米<sup>3</sup> 时, 问此时它的温度为多少?

**解** 假定大气压力为 1 个工程大气压, 则二氧化碳的绝对压力是

$$p=6+1=7 \text{ 绝对大气压。}$$

根据公式(1-19)得二氧化碳的气体常数

$$R = \frac{848}{\mu} = \frac{848}{44}。$$

最后根据状态方程式可得二氧化碳的温度

$$T = \frac{pv}{R} = \frac{P}{\gamma R} = \frac{7 \times 10^4 \times 44}{4 \times 848} = 908^\circ\text{K},$$

$$t = 908 - 273 = 635^\circ\text{C}。$$

**例题 1-4.** 把某种气体加热, 使其容积增为原来的 1.3 倍, 而且温度由  $t_1=100^\circ\text{C}$  变为  $t_2=150^\circ\text{C}$ 。问气体压力变化怎样?

**解** 已知  $V_2=1.3V_1$ ;  $T_1=273+100=373^\circ\text{K}$ ;  $T_2=273+150=423^\circ\text{K}$ 。则由公式(1-12)得

$$p_2 = \frac{V_1 T_2}{T_1 V_2} p_1 = \frac{423 V_1}{373 \times 1.3 V_1} p_1 = 0.875 p_1,$$

即压力降低到原来的 0.875 倍。

#### 1-4. 混合气体

在热工中应用的工质, 通常并不是一种单纯的气体, 而是由若干气体混合而组成的, 我们把这些单纯气体所组成的混合物叫做混合气体。如空气就是主要由氮及氧所组成的混合气体, 再如锅炉设备烟道内或内燃机气缸中的燃烧产物也都是几种气体所组成的混合气体。

本节所研究的混合气体是指由各种理想气体所组成, 并且它们相互之间不起任何化学反应的气体混合物。因此, 这种由理想气体所组成的混合气体和单纯的理想气体具有相同的性质, 凡是适用于理想气体的有关定律也都适用于混合气体。

**道尔顿定律** 根据气体分子运动学说, 气体的压力乃是气体分子撞击器壁的结果。既然混合气体是由好几种单纯气体所组成, 因此, 每一种组成气体的分子都对器壁产生一定的压力, 这个压力就叫做分压力, 很显然混合气体总的压力应该是这些分压力的总和。可以写

成下列关系式

$$p = p_1 + p_2 + \cdots + p_n = \sum p_i, \quad (1-21)$$

式中  $p_1, p_2, \cdots, p_n$  表示各组成气体的分压力;  $p$  表示混合气体的压力。上式即所谓道尔顿定律, 它可表述为: 在同一温度下, 混合气体的压力等于各组成气体的分压力之和。

**混合气体的成分** 单知混合气体的两个状态参数, 则混合气体的全貌仍然不够了解, 必须另外给出混合气体的成分。具体地讲, 为了使气体状态方程式不仅适用于单纯气体也能应用于混合气体, 则必须给出混合气体的成分。否则混合气体的气体常数不得而知, 从而气体状态方程式  $pv = RT$  也就无从用起。表达混合气体中各组成气体的成分, 基本上有两种方法: 重量表示法和容积表示法。

第一种所谓重量表示法也就是用各组成气体的重量百分数或相对重量来表示混合气体的成分。如已知  $G_1, G_2, \cdots, G_n$  分别为各组成气体的重量, 则混合气体的总重量  $G$  将为各组成气体重量之和, 如下式所示:

$$G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n = \sum G_i,$$

以  $G$  通除上式, 则得

$$\frac{G_1}{G} + \frac{G_2}{G} + \cdots + \frac{G_n}{G} = 1$$

或改写成

$$g_1 + g_2 + \cdots + g_n = \sum g_i = 1,$$

上式中的  $g_1, g_2, \cdots, g_n$  就是混合气体中各组成气体的重量百分数, 其中

$$g_1 = \frac{G_1}{G}, \quad g_2 = \frac{G_2}{G}, \quad \cdots, \quad g_n = \frac{G_n}{G}.$$

在实际的热工问题中, 我们经常所遇到的混合气体的组成往往不是重量组成而是容积组成, 如烟气的分析中所得的结果, 总是用容积百分数来表达的。

为了说明第二种按容积来表示混合气体成分的方法, 必须探讨以下的情况: 如图 1-4, *a* 所示由两种气体所组成的混合气体, 其中 + 号代表第一种气体的分子, ○ 号代表第二种气体的分子。该混合气体组成的成分可以人为地以两种方法来分开: (1) 分别使每一组成气体保持原来的容积  $V$  (如图 1-4 的 *b* 及 *c*)。此时, 组成气体具有分压力  $p_1$  及  $p_2$ ; (2) 分别使每一组成气体具有原来的同一压力  $p$ , 则组成气体的容积将折合成为  $V_1$  及  $V_2$ , 这些容积就称为分容积或折合容积 (如图 1-4 的 *d* 及 *e*)。

从图 1-4, *d* 及 *b* 可以看出, 当温度相同时, 根据波义耳-马略特定律

$$pV_1 = p_1V \quad \text{或} \quad V_1 = V \frac{p_1}{p}.$$

同样从图 1-4, *e* 及 *c* 可得

$$pV_2 = p_2V \quad \text{或} \quad V_2 = V \frac{p_2}{p}.$$

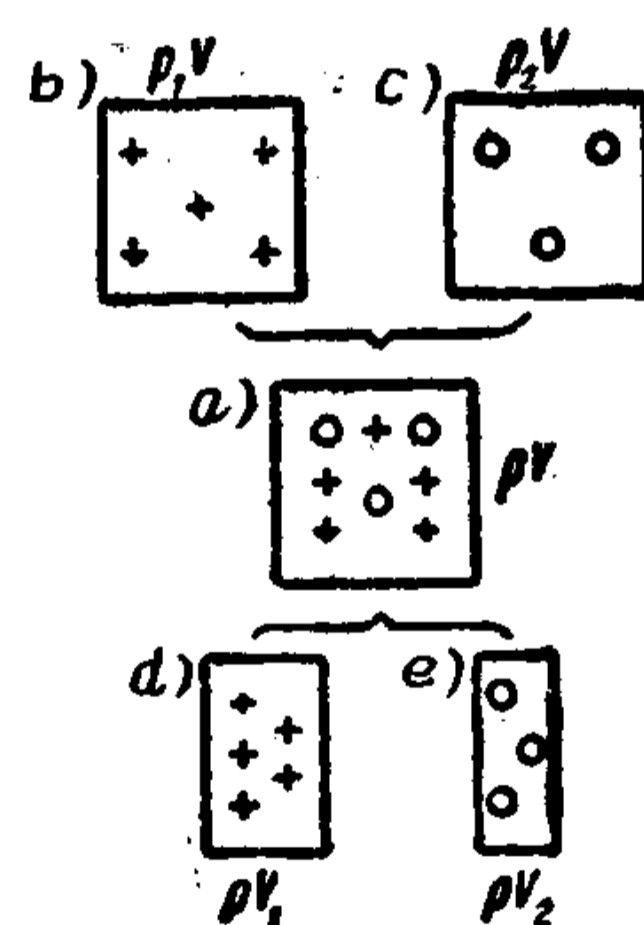


图 1-4. 两种划分混合气体组成方法的图解。