

■ 高等学校理工科规划教材

热工基础实验教程

Fundamental Experiments of Heat Engineering

主 编 刘晓华 刘宏升 刘 红

副主编 李 河 王庆国



大连理工大学出版社

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

T/K 122-33
1

■ 高等学校理工科规划教材

热工基础实验教程

Fundamental Experiments of Heat Engineering

主 编 刘晓华 刘宏升 刘 红

副主编 李 河 王庆国



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

热工基础实验教程 / 刘晓华, 刘宏升, 刘红主编
—大连: 大连理工大学出版社, 2012. 11
ISBN 978-7-5611-7458-6

I. ①热… II. ①刘… ②刘… ③刘… III. ①热工学—高等学校—教材 IV. ①TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281182 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 邮购: 0411-84703636 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连力佳印务有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm 印张: 7 字数: 160 千字
2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 王伟 责任校对: 庞丽
封面设计: 季强

ISBN 978-7-5611-7458-6

定 价: 15.00 元

前 言

实验教学是高等教育人才培养体系中的重要环节,是培养基础实、能力强的创新型人才的重要途径。本书是为配合高等学校能源动力类学科本科生的专业基础课程的教学而编写的,旨在通过对实验理论、实验操作及实验数据处理全过程的详细论述,使学生在理解基本理论的基础上,掌握基本的测试技术和方法,具备基本的实验技能,为进一步的理论学习和实践打下良好基础。

本书是在编者多年的工程热力学、传热学和流体力学的教学实践基础上,参考热工基础实验讲义和《水力学实验教程》,结合实验教学经验编写而成的。本书具有以下特点:

(1)在教材结构上,综合考虑了能源动力类专业基础课程对实验教学的需求,体现了热工基础实验教学的系统性和完整性。

(2)在实验内容上,充分考虑了各专业基础课教学内容的侧重点,有针对性地节选了部分实验及相关原理,力求做到理论与实践有机结合。

全书有选择地编录了 23 个实验,对实验目的、实验原理、实验步骤及实验报告等进行了系统的归纳和整合,为学生的自学自用创造了有利条件。

限于作者学识水平和实践经验,书中不全面及不当之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2012 年 11 月

于大连理工大学

目 录

第一篇 工程热力学实验

第 1 章 工程热力学基础.....	1	第 3 章 气体与蒸汽的流动	16
1.1 基本概念	1	3.1 概 述.....	16
1.2 热力学第一定律	3	3.1.1 喷管中稳定流动基本方程	16
1.3 热力学第二定律	5	3.1.2 喷管计算.....	17
第 2 章 理想气体与实际气体.....	7	3.2 喷管实验.....	19
2.1 概 述	7	第 4 章 活塞式压气机的热力过程	23
2.1.1 理想气体	7	4.1 概 述.....	23
2.1.2 实际气体	8	4.1.1 活塞式压气机工作原理.....	23
2.1.3 临界状态	9	4.1.2 活塞式压气机理论耗功.....	23
2.2 CO ₂ 的 p - v - t 关系测定实验	10	4.1.3 余隙容积.....	24
2.3 空气比定压热容测定实验.....	12	4.2 活塞式压气机特性实验.....	26

第二篇 传热学实验

第 5 章 导 热	29	6.1 概 述.....	36
5.1 概 述.....	29	6.1.1 对流换热的理论基础.....	36
5.1.1 稳态导热.....	29	6.1.2 强制对流换热.....	38
5.1.2 非稳态导热.....	31	6.1.3 自然对流换热.....	39
5.2 圆管法测定颗粒状、散状绝缘材料 导热系数实验.....	32	6.1.4 相变换热.....	41
5.3 瞬态热线法测定流体 导热系数实验.....	33	6.2 空气纵掠平板时局部换热系数 测定实验.....	42
第 6 章 对流换热	36	6.3 空气掠过平板时边界层内速度 与温度分布的测量实验.....	46

6.4 空气沿横管表面自然对流 换热实验.....	48	7.1.3 辐射换热的计算.....	57
6.5 水的自然对流换热系数 测定实验.....	50	7.2 稳态卡计法测材料表面半球 总发射率实验.....	58
6.6 大容器内水沸腾换热实验.....	53	第8章 换热器的热计算	60
第7章 辐射换热	56	8.1 概 述.....	60
7.1 概 述.....	56	8.1.1 传热过程.....	60
7.1.1 基本概念.....	56	8.1.2 换热器热计算基本原理.....	60
7.1.2 基本定律.....	56	8.2 换热器综合性能实验.....	62

第三篇 流体力学实验

第9章 流体静力学基本原理	65	11.1.1 黏性流体管内流动状态	80
9.1 概 述.....	65	11.1.2 黏性流体管内流动 能量损失	82
9.1.1 静止流体压强特性.....	65	11.1.3 带泵的管道内流动	86
9.1.2 静力学基本方程.....	65	11.2 流动形态实验	86
9.2 水静力学基本方程验证.....	67	11.3 管流沿程阻力实验	89
第10章 流体动力学基本原理	70	11.4 管路局部阻力实验	91
10.1 概 述	70	11.5 文丘里流量计实验	93
10.1.1 描述流体运动的方法	70	11.6 泵特性曲线实验	95
10.1.2 流体运动的类型	70	第12章 孔口出流和管嘴出流	99
10.1.3 流体流动的基本概念	71	12.1 概 述	99
10.1.4 连续方程	72	12.1.1 基本概念	99
10.1.5 能量方程	72	12.1.2 孔口出流和管嘴出流的 流量计算.....	100
10.2 水流的能量转换实验	73	12.2 孔口出流和管嘴出流实验.....	102
10.3 毕托管测流速实验	75	参考文献	105
10.4 自循环虹吸原理演示实验	77		
第11章 黏性流体管内流动基本原理	80		
11.1 概 述	80		

第一篇 工程热力学实验

第 1 章 工程热力学基础

1.1 基本概念

1. 工质与系统

工程热力学中能够实现热能和机械能转化的媒介物质叫作工质,与工质进行热量交换的物质系统叫作热源。按温度高低,可以将热源分为高温热源(热源)和低温热源(冷源);按温度是否变化,可以将热源分为恒温热源和变温热源。

在热力学中,常把研究对象与周围物体人为分割出来,该研究对象称为热力系统,与其发生质量或能量交换的周围物体称为外界。根据热力系统与外界有无质量交换分为闭口系统和开口系统。热力系统若与外界无热量的交换,则称为绝热系统;若与外界既无质量交换又无能量交换,则称为孤立系统。若热力系统与外界交换的功量只有体积变化功时,则该系统被称为简单可压缩系统。

2. 热力状态及状态参数

工质在热力变化过程中某一瞬时呈现的宏观物理状态叫作工质的热力学状态,表示工质宏观物理量的参数叫作状态参数,状态参数是热力系统状态的单值函数,与如何达到该状态的途径无关,表现在数学上是点函数,微元差是全微分。

热力过程中常用的状态参数有温度 T 、压力 p 、比体积 v 、热力学能 U 、焓 H 和熵 S 。基本状态参数是指可直接用仪器测量的参数,包括温度 T 、压力 p 、体积 V 。

温度是表示物体冷热程度的物理量,从微观上,温度标志物质分子热运动的激烈程度。温度的数值表示法叫作温标,常用的温标有热力学温标和摄氏温标。只有热力学温度才是工质的状态参数。热力学温度 T (国际标准单位是 K,读作开)和摄氏温度 t (国际标准单位是 $^{\circ}\text{C}$,读作摄氏度)之间的关系满足

$$t = T - 273.15 \text{ K} \quad (1-1-1)$$

工程热力学中的压力表示单位面积上所受的垂直作用力,即物理上的压强。压力的测量仪器是压力计,测得的结果是表压力 p_a 或真空度 p_v 。状态参数 p 是指绝对压力,当压力计所处环境的压力为 p_b 时,若绝对压力 $p >$ 环境压力 p_b ,则

$$p = p_e + p_b \quad (1-1-2)$$

若绝对压力 $p <$ 环境压力 p_b , 则

$$p = p_b - p_v \quad (1-1-3)$$

我国法定的压力单位是帕斯卡(Pa)。

比体积是指单位质量物质的体积,用 v 表示,单位为 m^3/kg ,即

$$v = V/m \quad (1-1-4)$$

比体积和密度互为倒数,不是互相独立的状态参数。

热力学能又叫内热能,用 U 表示,是分子运动所具有的内动能、内位能、维持分子结构的化学能、原子核内部的原子能,以及电磁场作用下的电磁能。在无化学反应及原子核反应过程中,化学能、原子能都不变化,故内热能的变化只是内动能和内位能的变化。

焓是指工质移动时随工质移动而转移的能量,其定义式为

$$H = U + pV \quad (1-1-5)$$

热工计算中焓的应用比热力学能更加广泛。热力学能和焓的单位都是焦耳(J)。

由于简单可压缩系统中气体的热力状态可由两个独立的状态参数决定,故热力学能和焓一定是两个独立的状态参数的函数,如

$$U = f(T, v) \quad (1-1-6)$$

$$H = f(T, v) \quad (1-1-7)$$

状态参数熵是研究热力学第二定律得出的,其定义式为

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} \quad (1-1-8)$$

即熵为微元可逆过程中工质与热源交换的热量与工质热力学温度的比值,单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。值得注意的是该公式只有在可逆过程才成立。

以上介绍了常见的状态参数,其中温度、压力与工质的质量无关,其他四种均与工质质量成正比,单位质量的上述参数分别叫作比体积 v , 比热力学能 u , 比焓 h , 比熵 s , 用相应的小写字母表示。对于简单可压缩系统,只有两个独立的状态参数。

3. 功和热量

与上述状态参数不同,功和热量与经历的过程有关,是过程量。

在热力学中,功定义为热力系统通过边界的能量,且其全部效果表现为举起重物。由工质体积膨胀所交换的能量叫作膨胀功,用 W 表示。技术上可资利用的功叫作技术功,包括工质的动能、位能及工质对机械所做的内部功,用 W_i 表示。膨胀功和技术功之间满足

$$W_i = W - \Delta(pV) \quad (1-1-9)$$

在热工计算中规定,系统对外界做功为正,外界对系统做功为负。

热量在热力学中定义为系统与外界之间由于温度不同通过边界而交换的能量,用 Q 表示。热工计算中规定,系统吸热为正,放热为负。

功和热量的单位为焦耳(J)。单位质量工质所做的膨胀功和技术功,分别叫作比膨胀功 w 和比技术功 w_i 。交换的热量叫作比热量 q , 即

$$w = W/m \quad (1-1-10)$$

$$w_i = W_i/m \quad (1-1-11)$$

$$q = Q/m \quad (1-1-12)$$

w, w_i 和 q 的单位都为 J/kg。

单位时间完成的功定义为功率,单位为瓦(W), $1\text{ W} = 1\text{ J/s}$ 。我们常用到的是千瓦(kW), $1\text{ kW} = 1\text{ kJ/s}$ 。

4. 准平衡过程和可逆过程

热能和机械能的相互转化需要通过工质的状态变化来实现,状态变化过程即平衡被破坏的过程,故实际过程都是非平衡过程。若工质在状态变化过程中,能够保证系统和外界之间的压力差和温差都无限小,即满足力的平衡和热的平衡,即该过程在平衡被破坏后能够迅速回复到平衡状态,则该过程称为准平衡过程。

没有任何耗散效应的准平衡过程为可逆过程,即工质完成某一过程后,能够沿原来的路径逆行回复到原来的状态,同时相应的外界也回复到原来的状态,而不留下任何改变。

可逆过程是不引起任何热力学损失的理想过程,是一切实际过程理想极限,是热工过程力求接近的目标。

对于可逆过程,有

$$\delta W = p dV \quad (1-1-13)$$

$$\delta W_i = -V dp \quad (1-1-14)$$

1.2 热力学第一定律

热力学第一定律即能量守恒与转换定律,其表述为:在热能与其他形式的能量相互转换过程中,总的能量保持不变。热力学第一定律也可表述为第一类永动机不可能实现。

热力学第一定律分析系统变化过程的基本能量平衡方程式如下:

$$\text{进入系统的能量} - \text{离开系统的能量} = \text{系统中储存的能量增加量} \quad (1-1-15)$$

该方程适用于任何系统、任何过程。

1. 总能

工质的总能包括两种,一种与工质的热力学状态相关,叫作内部储存能;另一种与宏观参考系相关,叫作外部储存能。内部储存能是工质的热力学能,外部储存能包括宏观动能和宏观位能。对质量为 m 的工质,其速度为 c_i ,在重力场中的高度为 z ,则总能 E 为

$$E = U + \frac{1}{2}mc_i^2 + mgz \quad (1-1-16)$$

单位质量工质的总能是

$$e = u + \frac{1}{2}c_i^2 + gz \quad (1-1-17)$$

2. 能量的传递与转化

热力学第一定律是能量守恒与转换定律,能量的传递和转化有两种方式,即做功和热传递。做功和热传递都是系统和外界通过边界传递能量,都是过程量;其不同在于做功改变的是宏观的运动状态,做功过程中往往还伴随着能量形态的转化;热传递改变的是微观的运动状态,不需要有物体的宏观运动。

3. 闭口系统能量守恒

对于闭口系统,系统与外界交换的能量只有热量和膨胀功,热力学第一定律的形式为

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

在分析与应用过程中比较常用的有热力学第一定律的微分形式:

$$\delta Q = dU + \delta W$$

对于可逆过程, $\delta W = p dV$, 则有

$$\delta Q = dU + p dV \quad (1-1-19)$$

$$Q = \Delta U + \int_1^2 p dV \quad (1-1-20)$$

或

$$\delta q = du + p dv \quad (1-1-21)$$

$$q = \Delta u + \int_1^2 p dv \quad (1-1-22)$$

对于循环系统

$$\oint \delta Q = \oint dU + \oint \delta W \quad (1-1-23)$$

完成一个循环之后, 工质回复到原来状态, 状态参数不变 $\oint dU = 0$, 则有

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (1-1-24)$$

该式表明闭口系统完成一个循环之后, 它在循环中与外界交换的净热量等于与外界交换的净功量。用 Q_{net} 和 W_{net} 分别表示循环净热量和循环净功量, 则有

$$Q_{\text{net}} = W_{\text{net}} \quad (1-1-25)$$

$$q_{\text{net}} = w_{\text{net}} \quad (1-1-26)$$

4. 开口系统能量方程

对于开口系统, 除热量和功之外, 系统与外界交换的能量还包括工质流入系统和流出系统所带入和带出的能量。在 $d\tau$ 时间内,

$$\delta Q = dE_{\text{cv}} + (h_2 + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2)dm_2 - (h_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1)dm_1 + \delta W_i \quad (1-1-27)$$

单位时间内,

$$\Phi = \frac{dE_{\text{cv}}}{d\tau} + (h_2 + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2)q_{m2} - (h_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1)q_{m1} + P_i \quad (1-1-28)$$

5. 稳定流动开口系统

稳定流动是指流动过程中开口系统内部及其边界上各点工质的热力参数及运动参数都不随时间而变化。其满足的条件要求进出口工质热力状态不变 $dE_{\text{cv}}/d\tau = 0$, 进出口流量相等且不变 $q_{m1} = q_{m2} = \text{常数}$, 功和热量也不随时间而变化。代入式(1-2-28)得到

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2}mc_f^2 + mgz + W_i \quad (1-1-29)$$

考虑到 $w_i = w_i + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1)$ 是系统可利用的功, 定义为技术功, 则热力学第一定律还可以表示为

$$Q = \Delta H + W_i \quad (1-1-30)$$

1.3 热力学第二定律

1. 热力学第二定律的表述

实际自然过程都具有明显的方向性,如功热转化、有限温差传热、自由膨胀、混合过程等,这些过程都能够独立、无条件地自动进行,称为自发过程。自发过程的反过程是非自发过程,需要外界帮助作为补充条件才能发生,所以自发过程是不可逆过程。

热力学第二定律实质上解释了与热现象有关的各种过程进行的方向、条件及限度。由于热现象普遍存在,故热力学第二定律也有多种不同的表述形式。其中克劳修斯说法:热不能自发地、不付代价地从低温物体传递至高温物体。开尔文-普朗克说法:不可能制造出从单一热源吸热、使之全部转化为功而不留下其他任何变化的热力发动机。

2. 卡诺循环和卡诺定理

要使热能连续不断地做功,工质必须在经历一系列过程后回复到原来状态,使其重新具有做功的能力,该过程叫作热力循环,也叫作正向循环、动力循环或热机循环。反之,实现将热量从低温热源传递给高温热源的循环叫逆向循环,逆向循环根据目的不同又分为制冷循环和热泵循环。全部由可逆过程组成的循环叫作可逆循环,循环中如果出现不可逆过程,则称为不可逆循环。

正向循环的经济性指标是循环热效率 η :

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1-1-31)$$

卡诺循环是工作于两个热源之间的正向循环,由两个可逆定温过程和两个可逆绝热过程组成。卡诺循环热效率

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-1-32)$$

卡诺定理一:在相同温度的高温热源和相同温度的低温热源之间工作的一切可逆循环,其热效率都相等,与可逆循环的种类无关,与采用哪种工质也无关。

卡诺定理二:在温度同为 T_1 的热源和温度同为 T_2 的冷源之间工作的一切不可逆循环,其热效率必小于可逆循环。

卡诺定理的重要结论:

(1) 在两个热源之间工作的一切可逆循环,它们的热效率都相同,与工质的性质无关,只取决于热源和冷源的温度,热效率都可以表示为 $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ 。

(2) 温度界限相同,但具有两个以上热源的可逆循环,其热效率低于卡诺循环。

(3) 不可逆循环的热效率必定小于相同条件下可逆循环的热效率。

3. 热力学第二定律的数学表达式

如前所述,状态参数熵的定义式 $dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$,对应的过程是可逆过程;若过程不可逆,则满足克劳修斯积分不等式,即

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (1-1-33)$$

工质经过热力过程后的熵的变化

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_r} \quad (1-1-34)$$

绝热过程中, $\delta Q = 0$, 无论过程是否可逆, 根据上式, 则有

$$\Delta S_{ad} \geq 0 \quad \text{或} \quad dS_{ad} \geq 0 \quad (1-1-35)$$

过程中存在不可逆因素而引起的耗散效应, 是损失的机械能重新转化为热能(耗散热)而被工质吸收, 使不可逆绝热过程中熵增大, 这部分就是熵产, 记为 S_g 。所以绝热闭口系统熵增大的原因就是内部存在着不可逆耗散效应, 即

$$dS_{ad} = \delta S_g \quad \text{或} \quad \Delta S_{ad} = S_g \quad (1-1-36)$$

不可逆损失越大, 耗散越多, 所以熵产是不可逆程度的度量。

4. 熵增原理

对于孤立系统, 因其与外界没有任何能量与物质的交换, 可得出

$$\Delta S_{iso} \geq 0 \quad \text{或} \quad dS_{iso} \geq 0 \quad (1-1-37)$$

从式(1-1-37)可以看出, 绝热系统或孤立系统的熵只能增加(不可逆过程)或不变(可逆过程), 但是绝对不会减少, 在现实工程中任何实际过程均是不可逆的, 所以只能沿着使孤立系统熵增加的方向进行, 这就是熵增原理。

熵增原理的意义:

- (1) 可通过孤立系统熵增原理判断过程进行的方向;
- (2) 熵增原理可作为系统平衡的判据 —— 当孤立系统的熵达到最大时, 系统处于平衡状态;
- (3) 熵增原理与过程的不可逆性密切相关, 不可逆程度越大, 熵增也越大, 所以此原理可以判断过程热力学的完善性。

第 2 章 理想气体与实际气体

工程热力学主要研究热能向机械能的转变。要实现热能向机械能的转变,必须借助工质的体积变化来实现。由于气态物质具有明显的体积变化特性,所以热力学工质通常采用气态物质。气态物质视其距液态远近又分为理想气体和实际气体两大类。

2.1 概 述

2.1.1 理想气体

理想气体是实际上不存在的假想气体,是对实际气体的一种简化假设,其满足以下简化条件:气体分子之间的平均距离相当大,分子体积与气体的总体积相比可忽略不计;分子之间无作用力;分子之间的相互碰撞以及分子与容器壁的碰撞都是弹性碰撞。

1. 理想气体状态方程

理想气体的三个基本状态参数(压力 p 、温度 T 和比体积 v) 之间满足理想气体状态方程式:

$$pv = R_g T \quad (2-1-1)$$

式中 p ——气体的绝对压力;

T ——气体的热力学温度;

R_g ——气体常数,其数值只与气体的种类有关,而与气体的状态无关。

2. 理想气体的热力过程

热能与机械能之间的相互转化,必须通过工质的状态变化来实现,即通过工质的压缩、膨胀、吸热、放热等一系列的热力状态的变化过程来实现。工质的实际变化过程很复杂,其中某些过程近似具有某些简单的特征,如过程中压力近似不变,接近定压过程,类似的还有定温过程、定容过程、绝热过程(系统与外界没有热量交换)等,如果该过程可逆,则绝热过程中熵变为零,即定熵过程。

3. 理想气体比热容

为计算气体状态变化过程中吸收或放出的热量,引入比热容的概念。比热容用 c 表示,定义式为 $c = \frac{\delta q}{dT}$ 或 $c = \frac{\delta q}{dt}$,单位为 $J/(kg \cdot K)$ 。

因为热量是过程量,比热容也与过程特性有关,工程中常用的比热容是体积不变时或压力接近不变时的比热容,称为比定容热容 c_v 和比定压热容 c_p 。对于可逆过程有

$$c_v = \left(\frac{\delta q}{dT} \right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (2-1-2)$$

$$c_p = \left(\frac{\delta q}{dT} \right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (2-1-3)$$

以上两式适用于一切工质,不限于理想气体,并且满足 $c_p - c_v = R_g$ 。

理想气体比热容是温度的复杂函数,利用比热容计算热量时,工程热力学书中给出了真实比热容多项式及不同温度下的平均比热容表,近似计算时也可以应用定值比热容。

4. 理想气体的比热力学能、比焓和比熵

理想气体的热力学能和焓都只是温度的单值函数,由式(2-1-2)和式(2-1-3)得

$$c_v = \frac{du}{dT}, \quad c_p = \frac{dh}{dT} \quad (2-1-4)$$

理想气体的熵也是状态参数,根据熵的定义式及热力学第一定律表达式,可得

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p} \quad (2-1-5)$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v} \quad (2-1-6)$$

$$ds = c_v \frac{dp}{p} + c_p \frac{dv}{v} \quad (2-1-7)$$

2.1.2 实际气体

不符合理想气体假设的气态物质称为实际气体,对于理想气体来说, $\frac{pv}{R_g T}$ 是常数,在 $\frac{pv}{R_g T} - p$ 图像上是一条斜线。实际气体在通常的工作温度和压力下离液态不远,其 p, v, T 不满足理想气体的状态方程。

1. 压缩因子

实际气体的这种偏离通常用压缩因子(或压缩系数) Z 来表示:

$$Z = \frac{pv}{R_g T} = \frac{pV_m}{RT} \quad \text{或} \quad pV_m = ZRT \quad (2-1-8)$$

其中, V_m 为摩尔体积,单位为 m^3/mol 。

Z 偏离 1 的多少反映了实际气体对理想气体性质的偏离程度。 Z 的大小不仅与气体种类有关,同种气体的 Z 还会随着压力和温度的变化而变化,在高压低温状态下偏离 1 更多。

$$Z = \frac{pv}{R_g T} = \frac{v}{R_g T/p} = \frac{v}{v_i} \quad (2-1-9)$$

式中 v —— 在 p, T 下实际气体的比体积;

v_i —— 相同 p, T 下理想气体的比体积。

由式(2-1-9)可以看出:压缩因子 Z 为温度、压力相同时的实际气体的比体积与理想气体的比体积之比。产生这种偏离的原因是,理想气体模型中忽略了气体分子间的作用力和气体分子占据的体积。

2. 范德瓦尔方程

范德瓦尔方程是针对理想气体的两个假定,考虑到气体分子具有一定的体积和气体分子间的相互作用力,对理想气体状态方程进行的修正。

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT \quad \text{或} \quad p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2} \quad (2-1-10)$$

式中 a, b ——范德瓦耳常数。(与气体种类有关的正常数,根据实验数据确定。)

不论工质是理想气体还是实际气体,当简单可压缩系统处于平衡状态时,只有两个独立的状态参数,即压力、比体积和温度之间的关系可表示为

$$f(p, v, t) = 0 \quad \text{或} \quad v = f(p, t)$$

维持温度不变测定比体积与压力的对应值,就可以得到等温线的数据。图 2-1 为 CO_2 的 $p-v-t$ 关系的标准曲线。

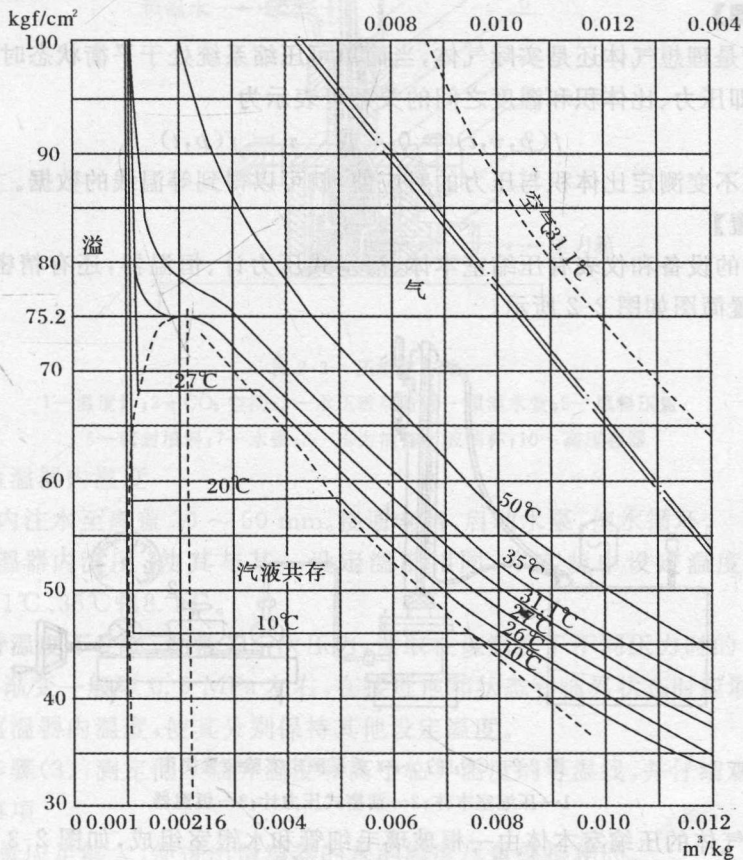


图 2-1 CO_2 的 $p-v-t$ 关系的标准曲线

2.1.3 临界状态

对于实际气体,维持温度不变,使压力和比体积变化时,等温线会有不同的变化规律,即存在临界状态,低于临界温度时实际气体的等温线有气液相变的水平直线段,即凝结过程保持压力不变。当温度等于或大于临界温度时,等温线不再有水平直线段,意味着压力再高,气体也不能液化,等于临界温度时汽化或凝结过程瞬时完成。

2.2 CO₂的 $p-v-t$ 关系测定实验

【实验目的】

- (1) 学会正确使用压力计、恒温器等热工仪器。
- (2) 通过观察 CO₂ 气体液化过程的状态变化,了解 CO₂ 临界状态的观测方法,增加对临界状态基本概念的感性认识。
- (3) 掌握 CO₂ 的 $p-v-t$ 关系测定方法,了解实际气体状态变化规律,增加对工质热力状态、饱和状态以及凝结、汽化等基本概念的理解。

【实验原理】

不论工质是理想气体还是实际气体,当简单可压缩系统处于平衡状态时,只有两个独立的状态参数,即压力、比体积和温度之间的关系可表示为

$$f(p, v, t) = 0 \quad \text{或} \quad v = f(p, t)$$

维持温度不变测定比体积与压力的对应值,就可以得到等温线的数据。

【实验装置】

实验所用的设备和仪表有压缩室本体、活塞式压力计、恒温器,还有精密压力表和温度计等,实验装置简图如图 2-2 所示。

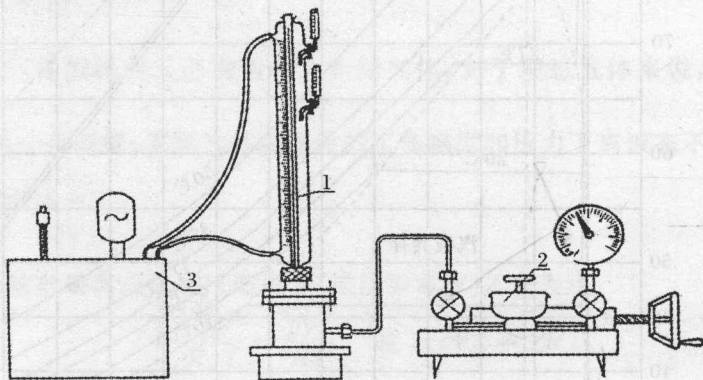


图 2-2 CO₂ 的 $p-v-t$ 关系测定实验装置简图

1—压缩室本体;2—活塞式压力计;3—恒温器

- (1) 压缩气体的压缩室本体由一根玻璃毛细管和水银室组成,如图 2-3 所示。预先充气的玻璃毛细管插入水银室,并由法兰盘固定在压缩室本体上。
- (2) 气体的温度由恒温器维持在一定值,并由水套内的温度计读出。
- (3) 气体压力由活塞式压力计的手轮进行调节,压缩气体时,缓慢转动手轮以提高油压。
- (4) 水套上刻有指示刻度,以读出 CO₂ 压缩尺寸。

实验时缓慢转动活塞式压力计的手轮,逐渐增大压缩室油压,使毛细管上的水银面缓缓上升,压缩毛细管内的 CO₂ 气体,气体的压缩高度由水套上的刻度读出。玻璃恒温水套用以维持毛细管内气体温度不变,并且可透过它观察气体的压缩过程。

【实验步骤】

- (1) 按图 2-2 安装好实验装置,为便于观察,开启压缩室本体上方的日光灯。

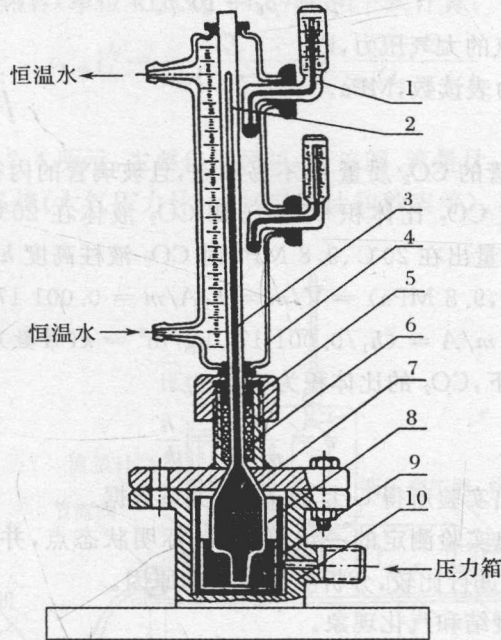


图 2-3 压缩室本体

1—温度计;2—CO₂ 空间;3—承压玻璃管;4—恒温水管;5—填料盖;
6—密封填料;7—水银;8—压力油;9—玻璃杯;10—高压容器

(2) 调节恒温器内温度

① 恒温器内注水至离盖 30 ~ 50 mm。接通电路,启动水泵,使水循环。

② 调整恒温器内温度,使其与某一设定温度相同,本实验中设定温度分别为 10℃、20℃、27℃、31.1℃、35℃、48.1℃。

(3) 在维持温度不变时,调整若干次压力,读取在该温度下不同压力时的 CO₂ 比体积值并作记录。压力渐变一般取 0.5 MPa 左右,在接近饱和状态和临界状态时应取 0.05 MPa。

(4) 改变恒温器内温度,使其分别保持其他设定温度。

(5) 重复步骤(3),测定低于临界温度和高于临界温度的等温线,并仔细观察临界现象。

(6) 注意事项

① 恒温水量应足够大,使进出恒温器的水的温度尽量保持相同。

② 改变恒温读数后应稳定足够长的时间,使毛细管内外水银均衡后再开始测定。

③ 在测量干饱和蒸汽、饱和液和临界点状态时,尤应仔细调节压力和观察毛细管内 CO₂ 状态变化情况。

④ 严格遵守活塞式压力计的操作规程,特别是降低压力时,不应使毛细管内的 CO₂ 突然膨胀以至于窜入油室。

⑤ 为得到等温线和观察相变过程,实验中应特别注意凝结与汽化的起点和结束点。

【实验报告】

(1) 数据处理方法

① 压力 p

CO₂ 的压力由精密压力表读出,单位 Pa。