

中等专业学校教材

客车空调装置

沈阳铁路机械学校
詹耀立 主编

KECHE KONGTIAO
ZHUANGZHI



中国铁道出版社

中等专业学校教材

客车空调装置

沈阳铁路机械学校 詹耀立 主编
北京铁路机械学校 马汉纶 主审

中国铁道出版社

2005年·北京

内 容 简 介

本书主要阐述铁路客车空调装置的结构、使用、调试、维修、故障判断处理等方面的知识。内容包括:空调与制冷的基础理论,典型的客车空调装置的制冷系统、通风系统、采暖系统和电气控制系统的组成、工作过程、控制原理,各主要部件的结构原理以及客车空调装置的操作、调试、保养、维修、常见故障判断处理等。此外,对铁路餐车冰箱、民用冰箱和空调器的结构作了简单介绍。

本书除作为铁路中专铁道车辆专业的教材外,也可供职工教育和有关现场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

客车空调装置/詹耀立主编. —北京:中国铁道出版社,1999

中等专业学校教材

ISBN 7-113-03368-7

I. 客… II. 詹… III. 铁路车辆-客车-空调调节设备-专业学校-教材 IV. U271.038

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 14947 号

书 名:客车空调装置

著作责任者:沈阳铁路机械学校 詹耀立

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:赵 静

封面设计:薛小卉

印 刷:北京市彩桥印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:15.25 插页:3 字数:381 千

版 本:1999 年 9 月第 1 版 2005 年 1 月第 5 次印刷

印 数:14 001 ~ 17 000 册

书 号:ISBN 7-113-03368-7/U · 933

定 价:25.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

近几年,随着我国经济的发展,全列空调旅客客车正在以每年 1 000 辆左右的速度迅猛发展。面对这样的形势,尽快培养铁路客车空调装置运用、维修方面的技术人才是我们铁路中专学校的当务之急。为此,根据铁道部中专铁道车辆与空调制冷专业教学指导委员会的意见,特编写本教材。

根据部中专铁道车辆与空调制冷专业教学指导委员会颁布的“CBE”教改大纲精神,我们将空调与制冷的基础理论融入在本教材中。全书共分三篇:空调与制冷基础理论、客车空调装置、客车空调装置的运用与维修,形成了先知识后技能的体系。我们在取材上以目前正在运用的客车空调装置为主体,在理论知识的介绍上以简化理论推导、计算,注重实际应用为原则,在技能点的介绍上密切结合现场实际,以达到对客车空调装置的运用、维修起到切实的指导作用为目的。书中采用的单位均为我国法定计量单位。

本教材由沈阳铁路机械学校高级讲师詹耀立主编,北京铁路机械学校高级讲师马汉纶主审。参加编写的有詹耀立(第一、二、三、四、五章)、济南铁路机械学校讲师徐国礼(第六、七、八、九章)、兰州铁路机械学校高级讲师韦思源(第十、十一章)。

本教材有不妥之处,敬请读者指正。

编者
1999.5

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 空调与制冷基础理论

第一章 热力学基本定律	3
第一节 基本状态参数及气体状态方程式	3
第二节 功量、热量及导出状态参数	6
第三节 热力学第一定律	12
第四节 热力学第二定律	14
第二章 制冷原理	19
第一节 蒸气压缩式制冷的工作原理	19
第二节 蒸气压缩式制冷的理论循环	20
第三节 蒸气压缩式制冷机的实际循环	25
第四节 双级压缩	29
第五节 制冷剂	30
第六节 半导体制冷原理	34
第七节 吸收式制冷	35
第八节 其他制冷方法	37
第三章 空气调节基础理论	39
第一节 湿空气的组成及物理性质	39
第二节 湿空气的 $H-d$ 图	43
第三节 空气处理过程在 $H-d$ 图上的表示	46

第二篇 客车空调装置

第四章 客车空调装置的类型和负荷计算	49
第一节 客车空调装置的组成和类型	49
第二节 空调客列车内外空气参数的确定	52
第三节 车内热、湿负荷的确定	54
第四节 客车空调装置送风量及制冷量的确定	56
第五章 客车空调装置制冷系统及其结构	59
第一节 制冷压缩机的类型	59
第二节 活塞式制冷压缩机的工作过程及输气量	61
第三节 活塞式制冷压缩机的功率和实际制冷量	64
第四节 影响蒸气压缩式制冷机性能的主要因素	67
第五节 活塞式制冷压缩机的结构	70

第六节	滚动转子式压缩机	83
第七节	换热器及其他辅助设备	84
第八节	制冷自动控制器件	90
第九节	客车空调装置制冷系统	97
第六章	客车空调装置通风系统	102
第一节	通风系统的组成及通风过程	102
第二节	通风系统的结构	104
第七章	客车空调装置采暖系统	108
第一节	采暖装置的形式	108
第二节	电热采暖装置	108
第三节	温水采暖装置	112
第四节	RW ₂₄ 型空调客车采暖系统	115
第五节	热泵与空气加湿	119
第八章	客车空调装置电气控制系统	123
第一节	单元式空调装置电气控制系统	123
第二节	MAB II 型空调装置电气控制系统	130
第九章	小型制冷、空调设备	139
第一节	电冰箱	139
第二节	其他制冷设备	149
第三节	房间空调器	150

第三篇 空调与制冷装置的安装调试及故障处理

第十章	空调与制冷装置的安装与调试	160
第一节	单元式空调装置的安装与调试	160
第二节	制冷装置的安装和管路连接	165
第三节	制冷装置的检漏及气密性试验	173
第四节	制冷系统中制冷剂的充注与回收	178
第五节	制冷系统中润滑油的充注与更换	184
第六节	制冷系统中水分和空气的排除	187
第七节	通风系统的安装调试	188
第十一章	空调与制冷装置的检修与常见故障处理	190
第一节	空调与制冷装置运行中的检查方法与常用检测仪表	190
第二节	空调与制冷装置的日常维护与检修	197
第三节	单元式空调装置故障处理	201
第四节	全封闭式压缩机的故障分析及修理	205
第五节	MAB II 型空调机组制冷系统故障分析与处理	217
第六节	开启式压缩机制冷系统的故障分析及处理	218
第七节	通风系统常见故障及处理	226
附 录		228
主要参考文献		237

绪 论

用一定的方法使物体或空间的温度低于周围环境介质的温度,并且使其维持在某一范围内,这个过程称为制冷。

人工制冷的方法有很多种,但比较常见的有:利用液体汽化的相变过程要吸收汽化潜热的特性来制冷的蒸气压缩式制冷和吸收式制冷以及利用温差电效应的半导体制冷。其中蒸气压缩式制冷机结构紧凑,制冷温度低,制冷量大,便于自动控制和调节,目前应用最广泛。客车空调装置中,普遍采用蒸气压缩式制冷。

制冷技术发展到今天,不但广泛应用于食品储藏运输业、工农业生产、医疗卫生、国防及空调技术中,而且随着家用冰箱和空调器逐渐进入家庭,已与人们的日常生活密切相关。在铁路的机械冷藏车和空调客车中,都利用了制冷技术。

空调即空气调节的简称。空气调节就是对流入室内的空气以一定的方式进行处理,使室内空气的温度、湿度、洁净度和流动速度控制在一定的范围内。简单地说,空气调节的实质就是调节和控制室内空气的“四度”,是调节和控制空气品质的一门技术。

随着经济的发展和科学技术的不断进步,空调技术已被越来越多地应用在工业、农业、交通运输、国防以及人们的日常生活等各个领域。

空调按其用途不同可分为生产性空调(或称工艺性空调)和舒适性空调。

为生产、实验等过程提供必要的环境条件的空调,称为生产性空调。如在一些电子、纺织、光学仪器、国防科研等行业以及一些实验室、电子计算机房、机械化养殖场和图书馆内,为满足对空气参数的不同要求而安装的空调装置,都属于此种空调。

为人们生活、工作、休息提供舒适的环境条件的空调,称为舒适性空调。如在住宅、宾馆、商场、候车室、候机室及各种车辆上安装的空调装置,都属于此种空调。

铁路客车安装空调装置的目的是为旅客提供既卫生又舒适的旅途环境,以保证旅客的身体健康,减少旅途中的疲劳。随着我国改革开放的进一步深化,经济的快速发展,人民生活水平的不断提高,外贸和旅游业的兴旺发达,铁路客运量不断增加,旅客对客车内的空气条件,提出了越来越高的要求。因此,大力发展铁路空调客车势在必行。

我国自行设计、制造空调客车始于 50 年代。1958 年四方机车车辆厂设计制造出第一辆空调客车,填补了我国空调车制造业的空白。到 70 年代,相继由四方、长春、浦镇等厂设计制造了 18 型空调客车、“广九”空调客车及 25.5 m 干线空调客车。这个时期主要采用分装式空调装置、半封闭式压缩机。1980~1988 年我国从原民主德国进口了一批 24 型空调客车,采用 MAB II 型分装式空调装置,其压缩机为开启式;从 1981 年开始陆续从日本引进单元式空调装置,如 RPU-9008V 型、CU792 型、CU794 型、RPU-6005V 型等等,单元式空调机组全部采用全封闭式压缩机。

我国 80 年代初开始自行制造单元式空调装置,并把它确定为我国空调客车的主导型式,此后生产的空调客车均采用此种型式。到 90 年代我国空调客车得到了突飞猛进的发展。

1989 年我国利用日元贷款生产了由 RW_{25A}、YW_{25A}、YZ₂₅、CA_{25A}和 TZ₂₅五种车型组成,20

辆为一列的全列空调客车,被视为 25.5 m 新型集中供电空调列车生产发展的里程碑。由于第一批生产的车辆总和为 168 辆,故有“168”车之称。“168”车是新型的旅客空调列车,在生产过程中采用了大量的新材料、新技术、新工艺及新结构,因而成为我国当时档次较高的旅客列车。它由长春客车厂、唐山机车车辆厂和浦镇车辆厂联合设计、制造,已于 1990 年 9 月起陆续投入运行,运用效果良好。

继“168”车之后,1991 年我国又生产了 140 辆 25G 型集中供电空调列车,与 25A 型车的设计技术条件基本相同,但在保证质量及性能前提下,材料的档次稍作调整,以降低成本,适应国情。

1994 年左右根据国家“八·五”科技项目合同又开发研制了广深准高速铁路 25Z 型全列空调客车,这是一种高档、舒适、快捷的新型铁路空调客车。它的单元式空调装置与其他车型相比略有不同。目前 25K 型全列空调快速车也发展较快。

截止 1998 年 10 月,全路拥有空调列车约 400 组、6 500 辆,其中 25K 型快速空调列车约 80 组、1 600 辆左右。目前全路基本上每年新造空调列车 1 000 辆左右。随着经济的不断发展、技术的不断进步,相信必有更新、更好的空调客车产生。

第一篇 空调与制冷基础理论

第一章 热力学基本定律

第一节 基本状态参数及气体状态方程式

一、基本状态参数

在热力学中,将实现能量转换的物质称为工质。工质在某瞬间所表现的宏观物理状况,称为热力状态,简称状态。工程热力学所讨论的状态,均指平衡状态。所谓平衡状态,是指在没有任何外界作用的情况下,工质的宏观状况不随时间而改变的状态。

描写工质宏观状态的物理量,称为工质的状态参数。状态参数的数值仅仅取决于状态,状态变了,状态参数也将全部或部分地变化,而与状态变化过程无关。

常用的状态参数有六个:温度 T 、压力 p 、比容 v 和比内能 u 、比焓 h 、比熵 s 等。其中 p 、 T 和 v 可以通过仪器测定,且其物理意义较易理解,故称为基本状态参数;其他状态参数 u 、 h 、 s 等,是通过它们与基本状态参数之间的函数关系求得的,故称为导出状态参数。

1. 压力

压力是指单位面积上所承受的垂直作用力,以 p 表示。

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{Pa}) \quad (1-1)$$

式中 F ——垂直作用力(N);

A ——承压面积(m^2)。

分子运动学把气体的压力看作是大量气体分子热运动时对容器壁面撞击的结果。由于气体数目极多,撞击频繁,所以压力是标志大量分子在一段时间内撞击容器壁的平均总结果。压力的方向总是垂直于容器内壁的。

工质对容器壁的实际压力,称为绝对压力,以符号 p 表示。工质的压力通常都是借助测压计测得,而测压计测得的压力都是以当时当地大气压力 p_b 作为测量参考点(即以大气压力作为自身读数的零点),这样测出的压力就不是绝对压力,而是绝对压力与当时当地大气压力的差值,称为表压力。表压力以 p_g 表示。绝对压力与表压力之间的关系为

$$p = p_g + p_b \quad (\text{Pa}) \quad (1-2)$$

或

$$p_g = p - p_b \quad (\text{Pa})$$

由上式可见:当绝对压力大于大气压力时,表压力为正;当绝对压力小于大气压力时,表压力为负。当表压力出现负值时,称为出现真空。真空的程度用真空度表示,符号为 p_v 。

$$p_v = p_b - p \quad (\text{Pa}) \quad (1-3)$$

显然,绝对压力愈低,真空度愈高。反之,则愈低。

图 1-1 是表压力、真空度和绝对压力之间关系示意图。

工质基本状态参数之一的压力是指“绝对压力”，因为只有绝对压力才能真正反应工质的热力状态。“表压力”和“真空度”都只是相对当时当地大气压力而言的压力，不是工质的真实压力，故不能作为工质的状态参数。在制冷工程计算中，均采用绝对压力。

国际单位制中，压力单位以 N/m^2 计算，称帕斯卡(Pa)，简称帕。因帕单位太小，通常用兆帕(MPa)、千帕(kPa)作为实用单位，并以巴(bar)和物理大气压(atm)为暂时并用单位。其换算关系为：

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bar}$$

在工程单位制中，压力单位常采用工程大气压(at)、毫米汞柱(mmHg)等。各种压力单位的换算关系参看附表 1。

例 1-1 锅炉汽锅里的表压力 p_g 是 3.1 MPa，汽轮机凝汽器里维持 710 mmHg 的真空压力。如果当时当地的实际大气压力 p_b 为 765 mmHg，求汽锅和凝汽器里的绝对压力。倘若大气压力变动到 735 mmHg，汽锅和凝汽器的压力计的读数又各为多少？

解：(1) 已知当时当地大气压力 $p_b = 765 \text{ mmHg}$ 时，汽锅里的表压力 $p_{g\text{汽}} = 3.1 \text{ MPa}$ ，凝汽器里真空压力 $p_{v\text{凝}} = 710 \text{ mmHg}$ ，由公式(1-2)得汽锅里的绝对压力

$$\begin{aligned} p_{\text{汽}} &= p_b + p_{g\text{汽}} = (1.013 \times 10^5 \times \frac{765}{760}) + 3.1 \times 10^6 \\ &= 3.202 \times 10^6 \text{ (Pa)} = 3.202 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

由公式(1-3)得凝汽器里绝对压力

$$p_{\text{凝}} = p_b - p_{v\text{凝}} = 765 - 710 = 55 \text{ (mmHg)}$$

(2) 当大气压力 $p'_b = 735 \text{ mmHg}$ 时，汽锅里的表压力

$$\begin{aligned} p'_{g\text{汽}} &= p_{\text{汽}} - p'_b \\ &= 3.202 \times 10^6 - (1.013 \times 10^5 \times \frac{735}{760}) \\ &= 3.202 \times 10^6 - 0.98 \times 10^5 \\ &= 3.104 \times 10^6 \text{ (Pa)} \\ &= 3.104 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

$$\text{凝汽器里真空压力 } p'_{v\text{凝}} = p'_b - p_{\text{凝}} = 735 - 55 = 680 \text{ (mmHg)}$$

由上例可以看到，大气压力的变化将影响到压力表和真空表的读数，其中对真空表的影响更为明显，而对压力表的影响较小，且压力越高，影响越小。因此在计算高压系统中的绝对压力时，如未给出大气压力数值，这时可将大气压力作为 0.1 MPa，即 1 bar 计算，其误差很小。

2. 温度

温度是表示工质冷热程度的参数。气体分子运动论认为：温度是气体内部大量分子热运动平均动能的度量。气体温度愈高，表明分子平均动能愈大。

温度也是判别工质与外界或两个物体间是否有热量传递的依据。当工质与外界或两物体之间相接触时，如有热量自 A 方传向 B 方，则说明 A 方的温度高于 B 方的温度；反之，如没有

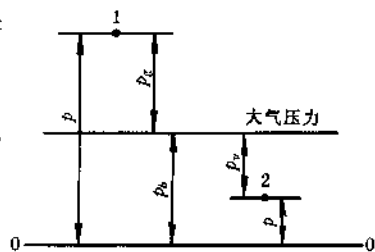


图 1-1 表压力、真空度和绝对压力之间关系示意图

热量传递,则说明两者温度相同,即两者处于热平衡状态。温度测量就是利用了热平衡原理。当温度计与被测物体达到热平衡时,温度计指示的温度值就等于被测物体的温度。

温度的数值表示方法称温标。常用的温标有三种:摄氏温度、绝对温度、华氏温度。

摄氏温度用符号 t 表示,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。在我国常用的温度计和测试仪器仪表中使用最多的是此种温标。

绝对温度也称热力学温度,用符号 T 表示,单位为 K (开尔文)。绝对温度与摄氏温度间的关系为:

$$T = t + 273.15 \quad (\text{K}) \quad (1-4)$$

工程上为了简化计算,常把式(1-4)改写为

$$T = t + 273 \quad (\text{K}) \quad (1-5)$$

由上式可见,绝对温度与摄氏温度每度的间隔在数值上是相等的,只是摄氏温度的零点比绝对温度的零点高出 273°C 。

华氏温度用符号 t_{F} 表示,单位为 $^{\circ}\text{F}$ 。华氏温度是欧美一些国家习惯用的一种温标,它与摄氏温度之间的关系为

$$t = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32) \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (1-6)$$

注意:工质的状态参数中,温度是指绝对温度。在国际单位制中采用绝对温度作温标。

3. 比容

单位质量工质所占有的容积称为比容。用符号 v 表示,单位为 m^3/kg 。

$$v = \frac{V}{M} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-7)$$

式中 M ——工质的质量(kg);

V ——工质的总容积(m^3)。

反之,单位容积工质的质量称为密度,用符号 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。显然,比容和密度互为倒数。

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-8)$$

二、气体状态方程式

在平衡状态时,气体的温度、压力、比容三者之间的关系式称为气体状态方程式。

对 1 kg 理想气体,其状态方程式为

$$\frac{pv}{T} = R \quad (1-9)$$

或

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

对质量为 M 的理想气体

$$pV = MRT \quad (1-11)$$

式中 p ——气体的绝对压力(kPa);

T ——气体的绝对温度(K);

v ——气体的比容(m^3/kg);

R ——气体常数($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$);

M ——气体的质量(kg);

V ——气体的容积(m^3), $V = Mv$ 。

对 1 kmol 的理想气体

$$pv_m = R_0 T \quad (1-12)$$

式中 v_m ——1 kmol 气体的容积, 又称千摩尔容积(m^3/kmol);

$$v_m = \mu v$$

其中 μ ——气体的千摩尔质量, 数值上等于其分子量(kg/kmol);

R_0 ——通用气体常数 [$\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$], $R_0 = \mu R$ 。

气体常数 R 与气体的状态无关, 但与气体的性质有关, 对同一种气体 R 是一定的。通用气体常数 $R_0 = \mu R = \frac{pv_m}{T}$, 根据阿佛加得罗定律可以推得在相同的压力和温度下, 任何理想气体的 v_m 在数值上都是相同的。故对于任何理想气体, R_0 的数值都相同, 且求得 $R_0 = 8.3144 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。可见, 通用气体常数是和气体的性质和状态均无关的一个常数。

利用通用气体常数和各种气体的千摩尔质量可求得各相应气体的气体常数为

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8.3144}{\mu} \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (1-13)$$

几种常见气体的 μ 、 R 值见附表 2。

所谓理想气体是指气体的分子是不占体积的弹性质点且分子间没有相互作用力的气体, 是实际上并不存在的假想气体。引入理想气体的概念, 可以大大简化热力分析及计算, 在工程上有很大的实用意义。在常温常压下, 空气、燃气、烟气, 以及氢、氧、氮、一氧化碳等气体离液态较远, 可忽略它们的体积及分子间的作用力, 把它们当作理想气体来处理, 按理想气体状态方程式进行计算。但对于压力很高、温度很低、比容较小即离液态较近的气体, 则不能当作理想气体来处理, 否则将引起较大误差。如锅炉中的水蒸气、制冷机中的制冷剂蒸气等都属于此种气体。能否当作理想气体处理, 主要根据气体远离液态的程度和工程所允许的误差来决定。

第二节 功量、热量及导出状态参数

一、功量、热量及比热

在制冷设备中工质与外界之间的能量传递是通过做功和传热的形式实现的, 因此功量和热量就是能量传递的度量, 是非常重要的物理量。

(一) 功量

功是指物体在力的推动下, 通过宏观运动的方式传递的能量。功的形式有多种, 但与制冷密切相关的有容积功和推动功两种。

1. 容积功

在工程热力学中为了便于分析问题, 通常将所要研究的对象用某些边界与其周围环境分隔开, 这个被人为分离出来的研究对象称为热力系统, 简称为系统。由定量气态工质组成的系统, 称为闭口系统。在闭口系统中, 当其工质进行膨胀或被压缩时, 与外界交换的功, 称为膨胀功或压缩功, 并统称为容积功。容积功用符号 W 表示, 单位为 J 或 kJ。对 1 kg 工质所作的功, 以符号 w 表示, 单位为 J/kg 或 kJ/kg。

对工程热力学来说,容积功非常重要,因为热能转换为机械能是通过工质膨胀来实现的。在介绍容积功之前,先介绍一个重要的概念——可逆过程的概念。

所谓可逆过程是指当系统由始态变化到终态,又由终态沿原来路径返回到始态时,若参与该变化的系统及外界均能完全返回到原来的状态,则该变化过程为可逆过程。实现可逆过程从理论上讲,是在没有摩擦的前提下,使系统与外界保持力平衡(没有压力差)时,所作的机械运动过程;使系统与外界保持热平衡(没有温差)时,所进行的传热过程。但是没有温差、压力差就没有传热和机械运动,所以可逆过程可以理解为在无限小的温差下进行的传热过程和无限小的压力差下进行的机械运动过程。事实上,一切实际存在的过程都是不可逆过程,即可逆过程是不可能实现的。但可逆过程中没有能量损耗,在理论上是热变功最有效的过程。因此,它是实际过程努力接近的方向。

如图 1-2 所示,1 kg 工质在气缸里由状态 1 膨胀到状态 2,工质反抗外力推动活塞对外界做功。如果系统进行的过程是可逆过程,则外界作用的压力将等于工质的压力。

设工质的压力和比容的关系为 $p = f(v)$, 则 1—2 的膨胀过程在图 1-2 所示的压容图上可用过程线 1—2 表示。对微元过程而言,可以认为气缸内工质压力 p 为定值。设活塞截面积为 A , 移动微元距离为 dx , 则工质比容变化为 $dv = A dx$, 工质在微元过程中所作的膨胀功为

$$dw = p A dx = p dv$$

工质在全过程中作的膨胀功为

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (1-14a)$$

式中 p ——工质的绝对压力;

v_1, v_2 ——工质初、终态的比容。

对质量为 M 的工质所作的总功为

$$W = Mw = M \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (1-14b)$$

式(1-14a)与(1-14b)虽然是从膨胀过程推导出来的,但对压缩过程同样适用。由式(1-14)可知,当工质进行膨胀时,工质对外界做功,此时 $dv > 0, w > 0$, 即膨胀功是正功;当工质被压缩时,工质接受外界功,此时 $dv < 0, w < 0$, 即压缩功是负功;如果工质的容积不变(定容过程),则 $dv = 0, w = 0$, 即容积功等于零。

应该指出,只有当过程是可逆过程时,才能应用式(1-14)来进行容积功计算。对于实际过程,通常先将它们理想化为可逆过程,算出工质在过程中所作的功,然后再考虑摩擦等不可逆因素,对计算结果加以修正。

在压容图($p-v$ 图)上,任意一点表示一个平衡状态,任何一条线表示一个可逆过程(如曲线 1—2 表示一个膨胀过程),而过程线下而围成的面积表示过程中容积功的大小(如面积 $12v_2v_1$ 表示 1—2 过程中膨胀功的大小),因此压容图又叫示功图。

由图可以看出:功的大小不仅与过程的始、终状态有关,而且还与过程中间经过的途径有关。从相同的状态 1 膨胀到状态 2,可以经过不同的途径,但所作的功是不同的。因此说,功量不是状态参数,而是与过程性质有关的过程函数,是过程量。

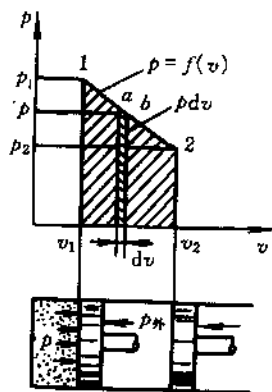


图 1-2 膨胀功示意图

2. 推动功

在许多热力设备中,为了实现热功转换,工质要不断地流进和流出设备,这种有物质流进、流出的系统,称为开口系统。将工质推进或推出开口系统时,为克服系统边界上原有工质的阻挡所付出的功,称为推动功。推动功以符号 W_f 表示,单位为 J 或 kJ。

如图 1-3 所示,虚线所围成的空间为开口系统。若要把入口处质量为 1 kg、压力为 p_1 、比容为 v_1 的工质 B 经入口推入系统,我们假想把 B 左面的工质当成一面积为 A 的活塞,这样活塞上所受的作用力为 pA ;把 B 推入系统需移动的距离为 x ,则外界克服系统内工质压力对系统所作的推动功为

$$w_{f1} = p_1 A x = p_1 v_1$$

同样,要把 1 kg 压力为 p_2 、比容为 v_2 的工质从出口推出系统,系统对外界所作的推动功为

$$w_{f2} = p_2 v_2$$

可见,每千克工质流进或流出系统时带入或带出系统的推动功等于其状态参数压力 p 和比容 v 的乘积,即

$$w_f = p v \quad (1-15)$$

如果工质的质量为 M ,则推动功为

$$W_f = M w_f = p V \quad (1-16)$$

热力学中规定:系统对外界所作的推动功为正;外界对系统所作的推动功为负。

必须注意:不管工质是否流动, p 、 v 总是工质的状态参数,但代表推动功的 p 与 v 的乘积是只有在工质流动时才存在的推动功,它是随工质的流动而向前转移的能量,不是状态参数。

(二) 热量

在热力学中,系统与外界之间仅仅由于温度不同而传递的能量,称为热量。具体地说,传递的能量是指热能。热量以符号 Q 表示,单位为 J 或 kJ。对 1 kg 工质来说,热量用符号 q 表示,单位为 J/kg 或 kJ/kg。当温度不同的系统和外界相互接触时,温度高的一方总是把一部分热能传给温度低的一方。从微观讲,这种能量传递是通过相互接触处的分子碰撞或以热辐射的形式完成的。

热量和热能是两个不同的概念。热能是指工质内部分子热运动所具有的能量,它可储存于工质内部;而热量是系统与外界传递的那部分热能,它和功量一样,都是能量传递的量度,只在能量传递过程中才有意义。热量决定于始、终状态及状态变化过程,是过程函数,不是状态参数。在给定状态下,能说系统具有多少热能,而不能说系统具有多少热量或多少功量。

热力学中规定:工质从外界吸热时,热量为正;工质向外界放热时,热量为负。有关热量的计算我们在后面介绍。

(三) 比热

计算热量时常用到比热的概念。使单位物量的物质,温度每升高(或降低)1℃所需要吸收(或放出)的热量,称为比热。对不同的物质,不同的物量单位,不同的热力过程及温度变化范围,比热的数值是不同的。比热通常用实验方法测定。

1. 质量比热、容积比热、摩尔比热

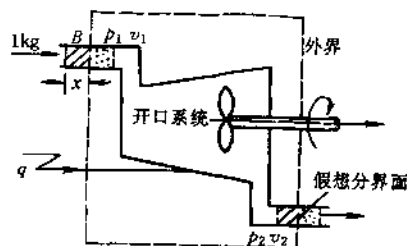


图 1-3 开口系统示意图

质量比热是以 1 kg 作为物量单位时所得的比热,其单位为 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,用符号 c 表示。其定义式为

$$c = \frac{dq}{dT} \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (1-17)$$

式中 dq 是指在一个微元过程中,温度变化 dT 时吸收的热量。对一个有限的热交换过程,其热量

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c dT \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad (1-18)$$

容积比热是以 1 Nm^3 (1 标准立方米) 作为物量单位时所得的比热,其单位为 $\text{kJ}/(\text{Nm}^3\cdot\text{K})$,用符号 c' 表示。

摩尔比热是以 1 mol 或 1 kmol 作为物量单位时所得的比热,其单位为 $\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$,用符号 c_m 表示。

因为 1 kmol 气体的质量为 $\mu \text{ kg}$,它在标准状态下所占的容积为 22.4 Nm^3 ,所以

$$c_m = \mu c \quad (1-19)$$

$$c_m = 22.4 c' \quad (1-20)$$

2. 定容比热、定压比热

在热力装置中,工质的加热和放热一般都是在接近定容(容积不变)或定压(压力不变)的条件下进行的,如在制冷机的蒸发器和冷凝器中的汽化吸热和冷凝放热过程就是在接近定压的条件下进行的。热量是过程量,而在不同的加热过程中比热的数值是不同的,因此在热量计算中常用的是定容和定压过程中的比热,称为定容比热和定压比热。同样,相应地也有定压质量比热 c_p 、定压摩尔比热 c_{mp} 、定压容积比热 c_p' 和定容质量比热 c_v 、定容摩尔比热 c_{mv} 、定容容积比热 c_v' 。

对于理想气体,定压比热和定容比热之间有如下关系:

$$c_p - c_v = R \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (1-21a)$$

$$c_{mp} - c_{mv} = R_0 = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K}) \quad (1-21b)$$

式(1-21)叫做迈耶公式,它说明若使气体温度同样升高 1°C ,在定压条件下加热比在定容条件下加热需要更多的热量。

3. 用比热计算热量

实验证明,理想气体的比热是温度的单值函数,即 $c = f(T)$ 。如果按照定义式 $q = \int_{T_1}^{T_2} c dT$ 计算热量,比较繁杂。因此,在不需要很精确的初步计算中,常把比热看作定值。采用定值比热计算热量,使公式大为简化

$$q_p = c_p (T_2 - T_1) \quad (1-22)$$

$$q_v = c_v (T_2 - T_1) \quad (1-23)$$

式中 q_p ——定压过程的热量;

q_v ——定容过程的热量。

通常以温度为 25°C 时的实验数据作为定值比热值。几种常见气体的定值比热见附表 2。

二、导出状态参数

内能、焓、熵三个导出状态参数在制冷机的能量计算中,起着非常重要的作用。

1. 内能

工质内部所具有的各种能量,总称为“内能”。按照分子运动论的观点,工质的内能就是工质的分子作不规则运动所具有的能量。在热能和机械能转换的热力状态变化过程中,一般不涉及工质的化学变化和原子反应,因此在工程热力学中,通常只考虑内动能和内位能两部分。内动能是分子移动动能、分子绕中心旋转的转动动能以及分子内部原子在其平衡位置附近振动的振动能的总称。气体的温度越高,其内动能越大,所以说,内动能仅是温度的函数。内位能是分子间相互作用的分子间位能。内位能与分子间的平均距离有关,它是比容的函数。

内能的符号用 U 表示,单位为 J 或 kJ。1 kg 工质的内能称比内能,用符号 u 表示,单位为 J/kg 或 kJ/kg。通常把比内能简称为内能。

$$U = Mu \quad (\text{kJ}) \quad (1-24)$$

综上所述,实际气体的内能取决于气体的温度和比容,即

$$u = f(T, v) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-25)$$

由此可见,当工质的状态被确定之后,其内能必然就有确定的数值。内能是工质的状态参数。

物质的运动是永恒的,要想找到一个停止运动而内能等于零的状态点是不可能的,因此说内能的绝对值是无法确定的。但在热工计算中,通常只需要计算某一过程中内能的变化值,所以在有关的图表中,都是人为地选取某一状态点的内能为零,从而给出各种状态下内能的数值。工质内能的变化量为:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-26)$$

式中 u_1 ——工质初态的比内能;

u_2 ——工质终态的比内能。

工质内能增加, $\Delta u > 0$; 工质内能减少, $\Delta u < 0$ 。

对于理想气体,因为分子间无作用力,所以内位能不存在,因而理想气体的内能只包括内动能。它是温度的单值函数,即

$$u = f(T) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-27)$$

此式说明在温度变化范围相同的任何过程中,理想气体内能的变化值都一样,从后面第三节热力学第一定律能量方程式可推得,理想气体内能的变化量 $\Delta u = c_v \Delta T$ 。

必须注意:内能、功量和热量都表示能量,但是它们有着本质的区别。内能是工质内部储存的能量,是工质的状态参数;对应于任一个平衡状态,都有一个确定的数值。在状态变化过程中,内能的变化量仅取决于工质初、终态的状态,而与状态变化的过程毫无关系。而功量和热量都是工质在状态变化过程中与外界间交换的能量,与状态变化过程有着密切的关系,是过程量而不是状态参数。对应于工质的任一平衡状态不存在功量和热量。

2. 焓

对于开口系统,当工质流进(或流出)系统时,不仅把它所具有的内能带入(或带出)系统,而且还把它从后面工质处获得的推动功也带入(或带出)系统,就是说对于开口系统,当工质流进(或流出)系统时,它的内能和推动功总是同时出现。为计算方便就把工质的内能和推动功的和定义为焓。从后面“稳定流动能量方程式”的内容中可知,当工质的宏观动能和位能忽略不计时,焓是流动工质带人(或带出)系统的总能量,亦即随工质流动而转移的总能量。

1 kg 工质的焓称比焓,有时也简称为焓,以符号 h 表示,单位为 J/kg 或 kJ/kg。一定质量

(M)工质的焓以符号 H 表示,单位为 J 或 kJ。

$$h = u + pv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-28)$$

$$H = U + pV \quad (\text{kJ}) \quad (1-29)$$

$$H = Mh \quad (\text{kJ}) \quad (1-30)$$

显然对应于工质的任一平衡状态,因为 u 、 p 和 v 都有确定的数值,所以焓也有相应确定的数值,因此焓是个只与状态有关而与过程无关的状态参数。在制冷与空调等工程中,焓是个非常重要的状态参数,使用非常广泛。

焓和内能一样,通常只需要计算它的变化值。在有关的图表中也是人为地规定某状态的焓为零,从而标出其它状态下焓的数值。

对理想气体,因为 $\Delta h = \Delta u + \Delta(pv) = \Delta u + R\Delta T$, $\Delta u = c_v\Delta T$, 所以 $\Delta h = c_p\Delta T$ 。此式说明理想气体的焓是温度的单值函数,在温度变化范围相同的任何过程中,理想气体焓的变化量相同。

3. 熵^①

热量和功量都是过程中系统和外界之间所传递的能量,所以两者具有某些共同特征。在作功过程中,压差是作功的动力,状态参数比容 v 的变化是衡量是否作功的尺度。同样,在传热过程中,温差是传热的动力,一定也有一个参数,它的变化是衡量是否传热的尺度,这个参数就定义为熵,用 S 表示。1 kg 工质的熵,称比熵,用 s 表示。 $S = Ms$ 。熵的定义式为

$$ds = \frac{dq}{T} \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (1-31)$$

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (\text{kJ/K}) \quad (1-32)$$

在可逆过程中,1 kg 工质与外界交换的微小功量可表示为 $dw = pdv$;对可逆的传热过程,通过边界的微小传热量 dq 可表示为

$$dq = Tds$$

如对可逆的 1—2 过程的传热量可表示为

$$q = \int_{s_1}^{s_2} Tds \quad (1-33)$$

$$Q = \int_{S_1}^{S_2} TdS \quad (1-34)$$

上两式中的 T 为工质在传递热量时的绝对温度。

功的大小可在 $p-v$ 图上表示,热量的大小也可在温熵图 $T-s$ 上表示,所以 $T-s$ 图又称示热图,如图 1-4。在 $T-s$ 图上,任意一点表示一个平衡状态,任何一条线表示一个可逆过程,而过程线下面的面积则表示该过程中传递热量的大小。

由式(1-31)可知,熵增加 $ds > 0$, $q > 0$,为吸热过程;熵减小, $ds < 0$, $q < 0$,为放热过程;熵不变 $ds = 0$, $q = 0$,为绝热(系统与外界没有热量交换)过程也叫等熵过程。因此,对可逆过程,熵变 ds 是判断系统与外界有无热量交换的依据,这是熵的一个

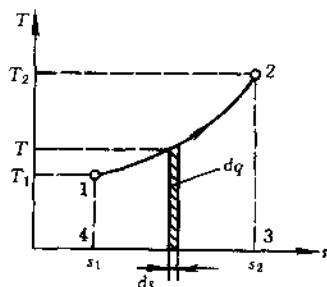


图 1-4 热量在温熵图上的表示

^① 熵是一个重要的状态参数,它可用热力学第二定律的经典方法严格导出,本节仅介绍熵的应用。