

铁路职业教育铁道部规划教材

客车空调装置

KECHEKONGTIAOZHUAANGZHI

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

卢毓俊 / 主编 刘涛 / 副主编

高职

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

(高职)

客车空调装置

卢毓俊 主 编

刘 涛 副主编

钟国才 赵令忠 主 审

中国铁道出版社

2007年·北京

内 容 简 介

本书为铁路职业教育铁道部规划教材。主要内容包括:热力学基本定律,湿空气,制冷装置工作原理,热量传递的基本知识,客车空调装置的热负荷计算,制冷压缩机,换热器、自动控制器件及辅助设备,客车空调通风系统,客车空调装置的采暖系统,客车空调装置电气控制系统,客车空调电气控制系统的维修,空调与制冷装置的安装与调试,空调与制冷装置的检修及常见故障处理。

本书可作为高等职业教育教材,也可作为复退军人学历教育用教材,还可作为职业培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

客车空调装置/卢毓俊主编. —北京:中国铁道出版社,
2007.10

铁路职业教育铁道部规划教材·高职

ISBN 978-7-113-08340-3

I. 客… II. 卢… III. 旅客列车-空气调节设备-高等学校:技术学校-教材 IV. U271.038

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 152457 号

书 名: 客车空调装置

作 者: 卢毓俊 主编 刘涛 副主编

责任编辑: 程东海

电话: (010)51873135

封面设计: 陈东山

责任校对: 张玉华

责任印制: 金洪泽

出版发行: 中国铁道出版社

地 址: 北京市宣武区右安门西街 8 号

邮政编码: 100054

网 址: www.tdpress.com

电子信箱: 发行部 ywk@tdpress.com

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

总编办 zbb@tdpress.com

开 本: 787mm×1 092mm 1/16 印张: 17.75 插页: 5 字数: 436 千

版 本: 2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-113-08340-3/U·2120

定 价: 30.00 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,请与本社读者服务部调换。

电 话:(市电)010-51873171 (路电)021-73171

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前言

20 世纪 90 年代以来,我国铁路进入了一个快速的发展时期,铁道车辆制冷与空气调节技术也取得了较快的发展。近几年,全列空调旅客列车正以每年 1 000 辆左右的速度迅猛增长,车辆空调技术采用的新技术和新装备也越来越多。为了适应车辆空调制冷技术的发展,及时反映铁路车辆制冷与空调技术的最新发展动态,根据铁道部铁道车辆专业职业教学指导委员会的意见,编写本教材,以供铁道车辆专业和车辆空调专业职业技术教育教学使用。本教材共分 13 章,具有以下几个特点:

1. 在理论知识方面突出“必需、够用”的原则,根据职业技术教育毕业生就业岗位的知识和技能要求来安排内容。在理论知识的介绍方面,简化了繁琐的理论分析和部分理论计算,注重理论结论的实际应用。

2. 强调教学内容与实际应用相结合。以目前铁路正在应用的客车空调装置为主体,介绍空调装置的结构、工作原理、安装调试、检修和常见故障处理。

3. 考虑到车辆空调装置的电气装置的原理较为复杂,电气故障的处理也较麻烦,因此将电气控制原理和电气故障处理的内容进行了较为详细的介绍。

4. 本书在内容的编排上尽量体现理论知识的讲解与相关的实践相结合。在安装调试、检修和常见故障处理等内容的编写中,尽量与现场作业的规范和标准相一致。

5. 按照由浅入深、由易到难、由简到繁的原则编写内容,力求图文并茂,以便于学习。

本教材由华东交通大学卢毓俊担任主编,华东交通大学刘涛任副主编。南昌铁路局车辆处钟国才高级工程师、赵令忠高级工程师主审。参加编写的有:华东交通大学卢毓俊(绪论、第一章)、罗世民(第二章)、刘涛(第三章、部分附表)、李津(第四章),郑州铁路职业技术学院时蕾(第五章),昆明铁路机械学校胡鹏(第七章),苏州机电高等职业技术学院杨胤保(第六章)、徐仁(第八章)、黄远丰(第九章),浙江师范大学吴建军(第十、十一章),兰州交通大学刘岩(第十二章),太原铁路机械学校段荣寿(第十三章)。全书由卢毓俊统稿。

本书的编写过程中,参考了大量的有关资料和教材,在此谨向各位著作者表示感谢。

但由于编者的水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评、指正。

编 者
2007 年 6 月

主要符号

- a 热扩散率, m^2/s
 A 面积, m^2
 b 宽度, m
 c 比热(质量比热), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 声速、光速, m/s
 c_f 流速, m/s
 c_p 定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 c_v 定容比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 C_m 摩尔比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 d 含湿量, kg/kg (干空气); 直径, m
 D 直径, m
 e 单位总能量, J/kg
 E 总能量, J
 E_k 宏观动能, J
 E_p 宏观位能, J
 f 阻力系数; 频率, Hz
 F 作用力, N
 g 重力加速度, m/s^2
 h 比焓, J/kg ; 高度, m ; 表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 H 焓, J ; 高度, m
 k 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 l 长度, m ; 特征长度, m
 m 质量, kg
 M 摩尔质量, kg/mol
 n 物质的量, mol ; 多变系数; 折射率
 p 绝对压力, Pa
 p_b 大气压力, Pa
 p_c 表压力, Pa
 p_i 混合物组元 i 的分压力, Pa
 p_v 真空度, Pa ; 水蒸气分压力, Pa
 p_s 饱和压力, Pa
 p_k 冷凝压力, Pa
 P 功率, W
 q 单位质量热量, J/kg ; 热流密度, W/m^2
 q_m 质量流量, kg/s
 Q 热量, J
 r 汽化潜热, J/kg ; 半径, m
 R 摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 热阻, K/W
 R_g 气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 s 比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 管间距, m
 S 熵, J/K ; 形状因子
 t 摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_d 露点温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_w 湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_s 饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
 T 热力学温度, K ; 周期, s
 T_k 冷凝温度, K 或 $^{\circ}\text{C}$
 u 比内能, J/kg ; 速度, m/s
 U 内能, J
 v 比容, m^3/kg ; 速度, m/s
 V 容积(体积), m^3
 V_m 摩尔容积(体积), m^3/mol
 V_c 余隙容积, m^3
 w 单位膨胀功, J/kg
 w_i 混合物组元 i 的质量分数
 w_s 单位轴功, J/kg
 w_t 单位技术功, J/kg
 w_f 单位流动功, J/kg
 w_{net} 单位循环净功, J/kg
 W 膨胀功, J
 W_s 轴功, J
 W_t 技术功, J
 W_f 流动功, J
 W_{net} 循环净功, J
 x 干度
 x_i 混合物组元 i 的摩尔分数
 α 抽气量; 体胀系数, K^{-1} ; 吸收比

- | | |
|------------------------------|--|
| β 肋化系数 | λ 升压比;波长,m;热导率, $W/(m \cdot K)$;压缩机输气系数 |
| γ 比热比 | π 增压比 |
| δ 厚度,m | ν 运动黏度, m^2/s |
| ε 制冷系数;压缩比;发射率 | ρ 密度, kg/m^3 ; |
| ε' 供热系数 | φ 相对湿度 |
| η 效率;动力黏度, $Pa \cdot s$ | φ_i 混合物组元 i 的体积分数 |
| κ 绝热指数 | |

目 录

绪 论	1
第一章 热力学基本定律	3
第一节 气体的基本参数及气体状态方程	3
第二节 功量、热量	10
第三节 热力学第一定律	12
第四节 热力学第二定律	21
复习思考题	26
第二章 湿 空 气	28
第一节 湿空气的状态参数	28
第二节 湿空气的焓湿图	32
第三节 湿空气焓湿图的应用	35
复习思考题	40
第三章 制冷装置工作原理	41
第一节 蒸气压缩式制冷的工作原理	41
第二节 蒸气压缩式制冷的理论循环	43
第三节 蒸气压缩式制冷的实际循环	46
第四节 双级压缩制冷	51
第五节 制冷剂 and 润滑油	52
第六节 热泵的工作原理	58
第七节 其他制冷方法	60
复习思考题	64
第四章 热量传递的基本知识	67
第一节 热量传递的基本方式	67
第二节 稳态导热	68
第三节 对流换热	73
第四节 辐射换热	75
第五节 传热过程	77
复习思考题	80
第五章 客车空调装置的热负荷计算	82
第一节 客车空调装置的组成	82
第二节 空调客车车外空气参数的确定	85
第三节 车内热、湿负荷的确定	87

第四节 客车空调装置送风量及制冷量的确定	90
复习思考题	92
第六章 制冷压缩机	93
第一节 制冷压缩机的类型	93
第二节 活塞式制冷压缩机的工作原理	95
第三节 影响蒸气压缩式制冷机性能的主要因素	98
第四节 活塞式制冷压缩机的结构	104
第五节 涡旋式压缩机	107
第六节 滚动转子式制冷压缩机	108
复习思考题	110
第七章 换热器、自动控制器件及辅助设备	112
第一节 冷凝器	112
第二节 蒸发器	115
第三节 制冷装置自动控制器件	117
第四节 空调制冷装置的辅助设备	126
复习思考题	130
第八章 客车空调通风系统	131
第一节 通风系统的组成及通风过程	131
第二节 25G 型客车通风系统的结构	136
第三节 25K 型客车通风系统的结构	137
第四节 25T 型客车通风系统的结构	137
复习思考题	140
第九章 客车空调装置的采暖系统	141
第一节 采暖装置的形式	141
第二节 电热采暖装置	142
第三节 空调客车采暖装置	146
第四节 热泵与空气加湿	148
复习思考题	151
第十章 客车空调装置电气控制系统	152
第一节 25G 型客车空调电气控制系统	152
第二节 25T 型客车空调电气控制系统	164
第三节 BSP 型客车空调电气控制系统	172
复习思考题	182
第十一章 客车空调电气控制系统的维修	184
第一节 操作过程	184
第二节 检查过程	185
第三节 常见故障	187
第四节 疑难分析和应急处理等	190
复习思考题	193
第十二章 空调与制冷装置的安装与调试	194

第一节	单元式空调装置的安装与调试	194
第二节	制冷装置的安装和管路连接	197
第三节	制冷装置的检漏及气密性试验	204
第四节	制冷系统中制冷剂的充注与回收	208
第五节	制冷系统中润滑油的充注与更换	212
第六节	制冷系统中水分和空气的排除	214
第七节	通风系统的安装调试	216
第八节	车顶单元式空调机组安装调试实作训练指导书	216
	复习思考题	228
第十三章	空调与制冷装置的检修及常见故障处理	229
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	229
第二节	空调与制冷装置的日常维护与检修	235
第三节	单元式空调装置故障处理	239
第四节	压缩机的常见故障处理	244
第五节	通风系统的常见故障处理	250
	复习思考题	251
附表一	R12 饱和热力性质表	252
附表二	R22 饱和热力性质表	253
附表三	R123 饱和热力性质表	255
附表四	R134a 饱和热力性质表	256
附表五	R407C 沸腾状态液体与结露状态气体热力性质表	257
附表六	R410A 沸腾状态液体与结露状态气体热力性质表	258
附表七	R717 饱和热力性质表	260
附表八	氯化钠水溶液的热物理性质表	262
附表九	氯化钙水溶液的热物理性质表	263
附表十	乙二醇水溶液的热物理性质表	265
	参考文献	267
附图一	R12 压-焓图	268
附图二	R22 压-焓图	269
附图三	R123 压-焓图	270
附图四	R134a 压-焓图	271
附图五	R407C 压-焓图	272

绪 论

随着国民经济的不断发展,制冷和空调装置的应用越来越广泛,对经济发展和人民的物质文化生活水平的提高起着重要的作用。

一、制冷与空调

制冷是指用一定的人工方法在一定的时间和一定的空间内将物体或空间内的流体冷却,使其温度低于周围环境介质的温度,并且维持在某一低温范围内的过程。所谓的环境介质就是指自然界的空气和水。

这里所说的“冷却”是相对于环境而言的。灼热的铁块放在空气中,通过辐射和对流向环境传热,可以逐渐冷却到环境温度;一桶热水放置在自然环境中,经过一段时间后,也可以变成常温水,类似这样的过程都是自发的传热过程,属于自然冷却,不是制冷。只有通过一定的人工方法将铁块或水冷却到低于环境温度,才可称为制冷。因此,可以说制冷就是从物体或空间内的流体中取出热量,并将热量排放到环境介质中去,以产生低于环境温度的过程。

人工制冷的方法有很多种,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征来制冷的蒸气压缩式制冷、吸收式制冷和利用温差电效应的半导体制冷。其中蒸气压缩式制冷装置具有结构紧凑,制冷温度低,制冷量大,便于自动控制和调节等优点,目前应用最广泛。铁路客车空调装置中,普遍采用蒸气压缩式制冷方式。

机械制冷中所需要的机器和设备的总和,称为制冷机。

制冷机中使用的工作介质称为制冷剂。制冷剂在制冷机中循环流动,同时与外界发生能量交换,即不断从被冷却对象中吸收热量,向环境排放热量。制冷机一系列状态变化过程的综合称为制冷循环。为了实现制冷循环,必须消耗能量。所消耗的能量形式可以是机械能、电能、热能、太阳能或其他形式的能量。

空调即空气调节的简称。为了满足生活和生产科研活动对环境的要求,人们往往采用制冷空调装置对某一空间的空气进行适当的处理,使该空间的温度、相对湿度、压力、洁净度和气流速度等多项参数保持在一定的范围内。可以简单地说,空气调节的实质就是调节和控制某一空间内空气的“温度、相对湿度、压力、洁净度和气流速度等参数”,是一门调节和控制空气品质的技术。

空调按其用途分为生产性空调(也称为工艺性空调)和舒适性空调。

为满足生产和科学研究过程中工艺过程和设备的需要而进行的空气调节,称为生产性空调。如在一些电子工业、纺织工业、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,都属于生产性空调。

为人们生活、工作、休息提供舒适的环境条件的空调,成为舒适性空调。如在商场、宾馆、住宅、候车室、候机厅及各种车辆上安装的空调,多属于舒适性空调。

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,减少旅途的疲劳。随着我国现代化建设的进一步深入,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,铁路旅客运输量不断增加,旅客对客车内的空气条件的要求也越来越高。因此,铁路空调旅客列车也得到了空前的发展。

二、铁路车辆制冷与空调技术的发展概况

1949年以前,我国没有自己的铁路客车制造业,在铁路线上运行的客车均是从国外进口的。解放后的半个多世纪,我国铁路客车制造也取得了长足发展,先后研制、开发生产了21型、22型、25型客车和25型双层客车、25型空调客车、时速达160 km的快速(准高速)客车以及最高运营时速达270 km的高速列车。近两年,开生产了CRH系列中国高速动车组,运营时速可达250 km。

从20世纪90年代开始,我国铁路客车进行更新换代,技术上取得了可喜的进步,从车辆结构、运行速度、安全性能、车内设备及舒适性等方面都有较大的提高,旅客的旅行环境有了很大的改善。全路各主要干线相继开行了全列空调客车,取得了良好的经济和社会效益。目前,高速化、舒适化、高安全性已经成为旅客列车的发展方向。

20世纪90年代以来,随着经济发展和生活水平的提高,人们对乘坐铁路列车的舒适性要求也越来越高,这也促进了铁路空调列车的快速发展。今天,外观大方、立面流畅、色彩多样的“25型”客车基本取代了当年的主流产品“22型”客车(绿皮车),25型客车也从普通的“25型”、“25A型”发展到“25Z型”、“25K型”、“25T型”。列车空调装置也经历了对“22型”客车的改装、“分体式空调装置”到“单元式空调装置”的发展过程,其技术和性能也日趋成熟。

铁路客车空调机组的用途是对空气进行热湿处理,再以一定的方式送入客车的客室,使车内的空气的温度、湿度、流速和洁净度等参数达到旅客舒适的要求。

目前我国铁路客车空调机组一般采用蒸汽压缩式制冷机组,由制冷剂直接在空气冷却器内蒸发吸热实现对空气的冷却、去湿处理,实现夏季客车的空调工况。客车冬季运行时,多采用专门的电加热装置或专用的热水循环锅炉对客室内的空气进行加热处理,完成冬季客车的空气调节工况。

铁路客车空调机组主要分为两类:一类为车顶单元式空调机组(也称为独立式空调机组),另一类为分体式空调机组(也称为集中式空调机组)。两类机组均设有空调制冷系统、通风系统、空气加热系统和自动调节控制系统。

分体式客车空调机组分成两个部分,一部分安装在车上,包括对空气进行冷、热处理和输送、分配单元,置于客车的端部,空气通过风管、送风器送入车内,一般结构为上送风、下回风,从车端墙的新风口引入新风。而另一部分安装在车下,包括空调装置的压缩机、冷凝器等部分。分体式空调机组是我国传统型和前民主德国进口客车的空调装置。

单元式空调机组将制冷压缩机、冷凝器、蒸发器、节流阀和冷凝风机等部件组装在一起,相当于家用的窗式空调装置。安装在客车顶部,也称为车顶单元式空调机组。这种空调机组适用于铁路长途硬座车、硬卧车、软卧车等。一般在每节客车的车顶两端安装两台相同的单元式空调机组。

(2)开口系统:系统与外界有物质交换,如图 1-2 所示。运行中的汽轮机就可视为开口系统,因在运行过程中有蒸汽不断地流进流出。由于开口系统是一个划定的空间范围,所以开口系统也称为控制容量系统。

(4)绝热系统:系统与外界没有热量交换。

(5)孤立系统:系统与外界既无能量(功、热量)交换又无物质交换。

严格地讲,自然界中不存在完全的绝热系统和孤立系统。但工程上却存在着接近于绝热或孤立的系统,用工程观点来处理问题时,只要抓住事物的本质,突出主要因素,就可以将这样的系统看成是绝热系统或孤立系统。

二、平衡状态和气体的基本状态参数

(一)平衡状态

工质在膨胀或被压缩的过程中,它的压力、温度、体积等物理量会发生变化,或者说工质本身的状态会发生变化。工质在某瞬间所表现的宏观物理状况,称为热力状态,简称为状态。

在没有外界作用的情况下,工质(或系统)的宏观性质不随时间而变化的状态称为平衡状态。当系统各部分的温度和压力不一致时,各部分间将存在着能量的传递和相对位移,其状态将随时间而变化,这种状态称为非平衡状态。如果没有外界的影响,非平衡状态最后将过渡到平衡状态。

描述工质宏观状态的物理量,称为工质的状态参数。状态参数具有点函数的性质,状态参数的数值仅仅取决于平衡状态,状态变了,状态参数也将全部或部分地变化,而与状态变化的过程无关。如果工质或系统处于非平衡状态,则其状态参数难以确定。

(二)基本状态参数

常用的气体状态参数有温度、压力、比容、内能、比焓、比熵等。其中温度、压力、比容可以通过仪器直接测量,且其物理意义较易于理解,故称为基本状态参数。其他参数是通过它们与基本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(即压强),以符号 p 表示,即

$$p = \frac{F}{A}$$

式中, F 为垂直作用于承压面积 A 上的力。根据分子运动理论,气体的压力是大量分子与容器壁面碰撞作用力的统计平均值。

在国际单位制中,压力的单位为 Pa(帕), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。工程上,因单位 Pa 太小,常采用 kPa(千帕)和 MPa(兆帕)作为压力的单位,它们之间的关系为

$$1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

工程上常用弹簧管式压力表和测量微小压力的 U 形管压力表(如图 1-3 所示)测量工质的压力。由于压力表本身总是处在某种环境(通常是大气环境)中,因此,由压力表测得的压力是被测工质的压力与当地环境压力之间的差值。它是一个相对值,并非工质的实际压力。

工质对容器壁的实际压力,称为绝对压力,以符号 p 表示。当工质的绝对压力高于大气压力 p_b 时,压力表指示的数值称为表压力,表压力用 p_e 表示,如图 1-3(a)所示。绝对压力与表压力之间的关系为

$$p = p_b + p_e \quad \text{或} \quad p_e = p - p_b \quad (1-1)$$

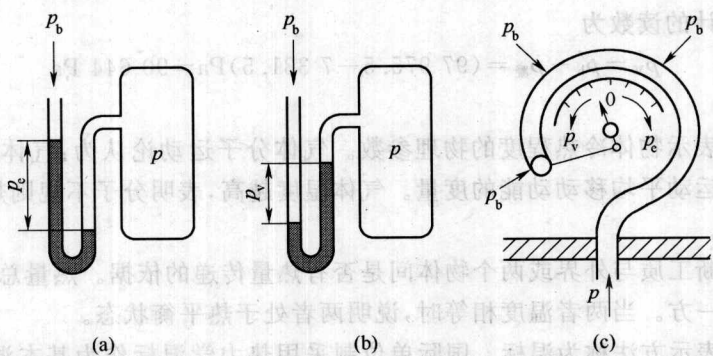


图 1-3 压力测量示意图

由此可见,当绝对压力大于大气压力时,表压力为正;当绝对压力小于表压力时,表压力为负。当表压力出现负值时,称为出现真空。

当工质的绝对压力低于大气压力时,如图 1-3(b)所示,测压仪表指示的读数称为真空度,用符号 p_v 表示。可以看出

$$p = p_b - p_v \quad \text{或} \quad p_v = p_b - p \quad (1-2)$$

显然,绝对压力越低,真空度越高。反之,绝对相压力越接近大气压力,则真空度就越低。

图 1-4 是表压力、真空度和绝对压力之间的关系示意图。

大气压力随测量的时间、地点不同而不同,可用大气压力计测定。工程计算中,如被测工质的压力很高,可将大气压力视为常数,一般近似地取为 0.1 MPa。如被测工质的压力较低,则须按当地大气压力的具体数值计算。总之,即使绝对压力不变,由于大气压力变化,表压力和真空度也会变化。只有绝对压力才能真正反映工质的热力状态,才是状态参数。工质的基本状态参数之一的压力指的就是工质或系统“绝对压力”。

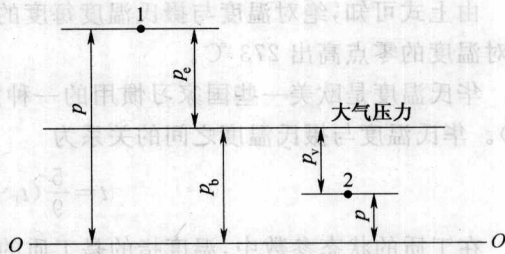


图 1-4 表压力、真空度和绝对压力之间的关系示意图

例 1-1 锅炉汽锅内的蒸汽的表压力 p_e 是 3.1 MPa,汽轮机凝汽器内维持 94 643 Pa 的真空压力。如果当时当地的实际大气压力 p_b 为 101 974.5 Pa,求汽锅和凝汽器内的绝对压力。如果大气压力变动到 97 975.5 Pa,汽锅和凝汽器的压力表的读数又各为多少?

解 (1)依题意可知,当时当地的大气压力为

$$p_b = 101\,974.5 \text{ Pa}$$

汽锅内的绝对压力为

$$p_{\text{汽}} = p_b + p_e = (101\,974.5 + 3.1 \times 10^6) \text{ Pa} = 3.202 \text{ MPa}$$

凝汽器内的绝对压力为

$$p_{\text{凝}} = p_b - p_v = (101\,974.5 - 94\,643) \text{ Pa} = 7\,331.5 \text{ Pa}$$

(2)当大气压力为 97 975.5 Pa 时

汽锅内的压力计的读数为

$$p'_e = p_{汽} - p'_b = (3.1 \times 10^6 - 97\,975.5) \text{ Pa} = 3.104 \text{ MPa}$$

凝汽器内的压力计的读数为

$$p'_v = p'_b - p_{凝} = (97\,975.5 - 7\,331.5) \text{ Pa} = 90\,644 \text{ Pa}$$

2. 温度

温度是用来表示物体冷热程度的物理参数。气体分子运动论认为：气体的温度是组成气体的大量分子热运动平均移动动能的度量。气体温度越高，表明分子不规则热运动越剧烈，分子平均动能越大。

温度也是判断工质与外界或两个物体间是否有热量传递的依据。热量总是从温度高的一方传向温度低的一方。当两者温度相等时，说明两者处于热平衡状态。

温度的数值表示方法称为温标。国际单位制采用热力学温标作为基本温标，用这种温标确定的温度称为热力学温度，也称为绝对温度，用符号 T 表示，单位为 K（开尔文，简称开）。热力学温标取水的三相点（纯水的固、液、汽三相平衡共存的状态点）为基准点，并定义其温度为 273.15 K。

与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标，简称摄氏温标。用这种温标确定的温度称为摄氏温度，用符号 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ （摄氏度），并定义为

$$t = T - 273.15(^{\circ}\text{C}) \quad (1-3)$$

在工程应用时，为了简化计算，常把式(1-3)改写为

$$t = T - 273(^{\circ}\text{C}) \quad \text{或} \quad T = t + 273(\text{K}) \quad (1-4)$$

由上式可知，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 $^{\circ}\text{C}$ 。

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

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

在工质的状态参数中，温度指的是工质的绝对温度。

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 。如果质量为 m 的工质占有的容积为 V ，则工质的比容为

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-6)$$

单位容积工质的质量称为密度，用符号表示，单位是 kg/m^3 。很明显，工质的密度与比容互为倒数，即

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad (1-7)$$

比容和密度都是说明工质在某一状态下分子疏密程度的物理量，其中任一个都可以作为工质的状态参数，二者互不独立，通常用比容作为状态参数。

三、气体状态方程与状态参数坐标图

热力系统的平衡状态可以用状态参数来描述。系统有多个状态参数，它们各自从不同的角度描述系统的某一宏观特性，并且互有联系。状态公理指出，对于和外界只有热量交换和容积功（膨胀功或压缩功）变化的简单压缩系统，只需两个独立的参数便可以确定它的平衡状态。

例如:在工质的基本状态参数 p 、 v 、 T 中,只要其中任意两个确定,另一个也随之确定,如

$$p=f(v, T)$$

表示成隐函数形式为

$$F(p, v, T)=0 \quad (1-8)$$

这种表示状态参数之间关系的方程称为状态方程。

由于两个独立的状态参数就可以确定简单可压缩系统的状态,所以,在以两个独立参数为坐标的平面坐标图上,每一点都代表系统的一个平衡状态。如图 1-5 所示,

1、2 两点都分别代表由独立状态参数 p_1 、 v_1 和 p_1 、 v_2 所

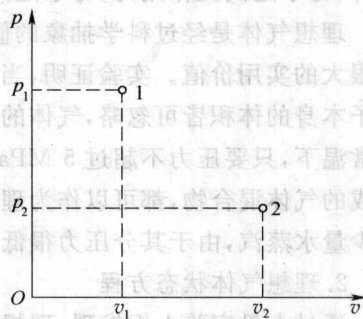


图 1-5 平衡状态在 p - v 图上的表示

确定的两个平衡状态。显然,非平衡状态因其没有确定的状态参数,无法在图中表示。

四、平衡过程和可逆过程

1. 平衡过程

系统由一个状态到达另一个状态的变化过程称为热力过程,简称过程。状态改变意味着系统原平衡状态被破坏。实际热工设备中进行的热力过程,都是由于系统内部各处的温度、压力和比容的不平衡而引起的,所以热力过程所经历的中间状态是不平衡的。

为了便于对实际热力过程进行分析和研究,假设热力过程中系统所经历的每一个状态都无限地接近平衡状态,这种过程称为准平衡过程,又称为准静态过程。在状态参数坐标图上可以用连续的实线表示。而非平衡过程由于它所经历的不平衡状态没有确定的状态参数,因而不能表示在状态参数坐标图上。

2. 可逆过程

如果系统由始态变化到终态完成了某一热力过程之后,再由终态沿着原来的路径逆行返回到始态时,参与该变化的系统和外界也随之返回到原来的状态,而不留下任何变化,则这一过程称为可逆过程。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。事实上,一切实际存在的热力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。

可逆过程是一个理想过程,是一切热力设备工作过程力求接近的目标。可逆过程的概念为热力学分析问题提供了很大的方便。利用这一概念可以将复杂的实际热力过程近似简化为一个可逆过程加以研究,然后再加以修正,所以研究可逆过程在理论上具有十分重要的意义。

五、理想气体状态方程式

1. 理想气体

在工质的热力性质中,压力、比容、温度之间的关系具有特别重要的意义。对于实际气体,这种关系一般比较复杂。但是,通过大量实验发现,当密度比较小,也就是比容比较大的时候,处于平衡状态的气态物质的基本状态参数之间将近似地保持一种简单的关系。为此,人们提出了理想气体的模型:气体分子之间的平均距离相当大,分子体积与气体的总容积相比可忽略

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。

理想气体是经过科学抽象的假想气体,尽管自然界中并不存在,但引进理想气体的概念仍有很大的实用价值。实验证明,当气体的压力不太高,温度不太低时,气体分子间的作用力及分子本身的体积皆可忽略,气体的性质就接近理想气体,气体可以作为理想气体处理。例如,在常温下,只要压力不超过 5 MPa,工程上常用的 O_2 、 N_2 、 H_2 、 CO 等气体以及主要由这些气体组成的气体混合物,都可以作为理想气体处理,不会产生很大误差。另外,大气或燃气中所含的少量水蒸汽,由于其分压力很低,比容很大,也可作为理想气体处理。

2. 理想气体状态方程

通过大量实验人们发现,理想气体在平衡状态下,气体的温度、压力、比容三者之间存在一定的函数关系,这就是物理学中的波义耳-马略特定律、盖-吕萨克定律和查理定律所表达的内容。这三条定律可以综合表达为

$$pv = R_g T \quad (1-9)$$

式(1-9)称为理想气体状态方程式,1834年由克拉伯龙首先导出,因此也称为克拉伯龙方程式。对于质量为 m (kg) 的理想气体,状态方程式的形式为

$$pV = mR_g T \quad (1-10)$$

式中 p ——气体的绝对压力(Pa);

v ——气体的比容(m^3/kg);

V ——质量为 m 的气体的容积(m^3);

T ——气体的热力学温度(K);

R_g ——气体常数[J/(kg·K)]。

R_g 称为气体常数,它与气体的状态无关,但与气体的种类有关,对于同一种气体,气体常数是一定的。

在国际单位制中,物质的量以 mol(摩尔)为单位。1 mol 物质的质量称为摩尔质量,用 M 表示,单位为 kg/mol。1 mol 物质的质量的数值与气体的相对分子质量相同。例如,氧、氮和空气的摩尔质量分别为 32.00×10^{-3} kg/mol, 28.2×10^{-3} kg/mol 和 28.96×10^{-3} kg/mol。1 mol 物质的体积称为摩尔体积,用 V_m 表示, $V_m = Mv$ 。

对于理想气体,由式(1-9)可得

$$pV_m = MR_g T$$

令 $R = MR_g$, 则得

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

根据阿伏伽德罗定律,在相同的温度和压力下,所有气体的摩尔体积 V_m 都相等。由式(3-3)可知,所有气体的 R 都相等,并且其数值与气体所处的具体状态无关。 R 称为摩尔气体常数,其值可由气体在任意一状态下的参数确定,如在标准状态($p_0 = 101\,325$ Pa, $T_0 = 273.15$ K)下,1 mol 任何气体所占的体积皆为 $22.414\,10$ m³,代入上式可得

$$R = \frac{p_0 V_{m0}}{T_0} = \frac{101\,325 \times 22.414\,10}{273.15 \times 1\,000} = 8.314 \text{ [J/(mol·K)]}$$

有了摩尔气体常数,只要知道气体的摩尔质量(或相对分子质量),任何一种气体的气体常数 R_g 就可以按下式确定:

$$R_g = \frac{R}{M} \quad (1-12)$$