

空调用离心式制冷机

(结构 操作 维护)

周邦宁 周颖 刘宪英 编著

中国建筑工业出版社

空调用离心式制冷机

(结构 操作 维护)

周邦宁 周颖 刘宪英 编著

中国建筑工业出版社

离心式制冷机由于设备紧凑、占地面积小，在需冷量较大的大型公共建筑采用较多，随着四化建设的发展，数量还在迅速增长。尽快提高管理、操作和维修人员的素质，已迫在眉睫。

本书着重叙述有关空调用离心式制冷机的基本工作原理、结构特性、操作运行、故障排除及维护保养方面的知识。简要介绍了空调制冷系统和设备，并以节能为中心介绍了离心式制冷压缩机的发展趋势。

本书可供从事离心式制冷机设计、安装、使用、维修人员参考。

空调用离心式制冷机

(结构 操作 维护)

周邦宁 周颖 刘宪英 编著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 18 $\frac{3}{4}$ 插页: 1 字数: 453 千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷

印数: 1—8,680 册 定价: 6.70元

ISBN7—112—00154—4/TU·103

统一书号: 15040·5466

前 言

在空调制冷工程中采用离心式制冷机作为冷源，目前在世界范围内各个领域中得到巨大发展。

随着我国国民经济的进步和对外开放事业的蓬勃兴起，空调用离心式制冷机以它具有供冷量大、结构紧凑、气动性能完善、单机调节范围宽广、运转安全稳定、操作维护方便等一系列突出特点，而受到广大使用部门的重视和关注。

基于我国近年来大、中型空调工程与日俱增，如宾馆、影剧院、医院、大型饭店、纺织、化工、电子仪表、科研中心以至军工等部门、行业、单位，对大、中供冷量的空调用离心式制冷机的需求和使用日益广泛，其势头方兴未艾。因此，对于从事管理、操作和维护这类机器的技术人员、工人的知识传授和技术培训工作显得十分迫切。目前，国内对这样一种将实用知识较为系统介绍的书籍似乎还没有。根据使用者的要求和希望，我们编著了这本《空调用离心式制冷机（结构、操作、维护）》。

本书立足于国产空调用离心式制冷机的实际状况，参照国外先进技术，尽可能以通俗易懂、简明浅显的方式，着重阐述有关空调用离心式制冷机的基本工作原理、结构特点、操作运行、故障排除及维护保养方面的知识和必要的理论概念。为说明空调用离心式制冷机组在整个空调系统中的地位和作用，特地安排了一章有关空调供冷系统和设备的概述，我们认为，这将有益于读者对系统全貌的了解。

从1958年我国生产第一台空调用离心式制冷机起至今，近三十年间，特别是近十年间，在广泛吸收国外先进技术的同时，依靠我国有关高等院校、科研部门、设计和制造单位的雄厚力量，已初步形成了符合我国国情的较为完善的空调用离心式制冷机组系列产品，积累了较为丰富的经验。本书希望在初步总结和概括这些经验和成果方面做一次尝试，尽我们微薄的力量。更希望能对我国空调用离心式制冷机产品以及整个空调制冷工业尽快提高到新的先进水平，起铺路垫石的作用。

本书由周邦宁、周颖、刘宪英共同拟订了《编写提纲》。参加本书编写工作的有刘宪英、杨富贵、周邦宁。本书共十一章，其中第一、二、十章由刘宪英编写，第五章由杨富贵编写，其余各章由周邦宁编写。

本书由周邦宁担任主编，周颖、刘宪英负责审稿。

在本书编写过程中，先后得到西安交通大学常鸿寿副教授、清华大学陈雨田老师等的宝贵帮助和支持。重庆通用机器厂及张源泉、鄢儒纯、刘彦碧、王文辉、康来伟、傅远渝、王新出、罗松保、唐朝斗、牟红等对编写工作提供了宝贵资料和各种帮助。唐录秀担任全书大部分描图工作。吴自钦、邓祥玉完成部分誉稿工作。谨在此对他们热情支持表示衷心的感谢。由于编者水平有限，不当之处，欢迎各界读者批评赐教。

编 者

一九八六年九月于重庆

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 制冷及其设备	1
1.2 离心式制冷机的分类及其应用	2
1.3 空调用离心式制冷机的发展概况	3
第二章 制冷技术的基础知识.....	5
2.1 基本状态参数及气体状态方程	5
2.2 热量、比热、显热和潜热	7
2.3 焓与熵	9
2.4 物质聚集的形态和变化	9
2.5 湿空气性质	11
第三章 离心式压缩制冷循环的基本原理	14
3.1 概述	14
3.2 单级离心式压缩制冷循环	17
3.3 双级离心式压缩制冷循环	23
3.4 离心式压缩热泵循环	27
3.5 空调用离心式制冷压缩机的基本原理	30
3.6 制冷剂与载冷剂	37
3.7 冷凝器的基本工作原理	46
3.8 蒸发器的基本工作原理	52
第四章 空调用离心式制冷机组的结构	58
4.1 空调用离心式制冷机组的结构型式分类	58
4.2 空调用离心式制冷压缩机的结构	62
4.3 冷凝器和蒸发器的结构	77
4.4 润滑油系统的组成	85
4.5 抽气回收装置的组成	90
第五章 空调用离心式制冷机组的电控系统	100
5.1 控制系统的作用及原理概述	100
5.2 调节和保护项目	104
5.3 延时项目	108
5.4 离心式制冷机组的检测	109
5.5 电控系统的检查和整定	119
5.6 空调用离心式制冷机组的电力拖动	126
5.7 电控系统及元件的维护和保养	128
5.8 空调用离心式制冷机组的微机控制	129
第六章 空调用离心式制冷机组的拆装	131
6.1 机组的机械安装	131

6.2 离心式制冷压缩机组的机械组装	134
第七章 空调用离心式制冷机组的运行和调节	146
7.1 机械运转试验	146
7.2 制冷运转	148
7.2.1 制冷运转前机组的准备试验	149
7.2.2 制冷运转的操作规程	157
7.2.3 机组串联和并联的制冷运转	180
第八章 空调用离心式制冷机组的故障和排除	186
8.1 空调用离心式制冷机组运行中常见故障分析	187
8.1.1 离心式制冷压缩机运行中常见故障分析	187
8.1.2 主电动机运行中常见故障分析	189
8.1.3 润滑油系统和油站运行中常见故障分析	190
8.1.4 冷凝器运行中常见故障分析	193
8.1.5 蒸发器运行中常见故障分析	194
8.1.6 抽气回收装置运行中常见故障分析	195
8.1.7 机组内部腐蚀现象	195
8.2 压缩机、冷凝器、蒸发器运行中常见故障排除一览表	196
8.2.1 离心式制冷压缩机运行中常见故障排除一览表	196
8.2.2 冷凝器运行中常见故障排除一览表	197
8.2.3 蒸发器运行中常见故障排除一览表	198
第九章 空调用离心式制冷机组的维护和保养	199
9.1 空调用离心式制冷机组日常的维护和保养(规程)	199
9.2 空调用离心式制冷机组停车后的维护和保养	213
第十章 集中式空调系统及设备概述	224
10.1 空调系统分类	224
10.2 集中式空调系统的主要设备概述	226
10.3 变风量空调系统	235
10.4 冷水(冷冻水)和冷却水系统设备	237
10.5 集中式空调系统的控制	243
第十一章 空调用离心式制冷机组的发展趋势	247
11.1 离心式制冷压缩机的改进及发展趋势	247
11.2 蒸发器—冷凝器传热效果的强化和改进	258
11.3 空调用离心式制冷机的节能方向	261
附表	266
附表1 力的单位换算表	266
附表2 压力的单位换算表	266
附表3 功、能和热量的单位换算表	266
附表4 功率的单位换算表	267
附表5 导热系数的单位换算表	267
附表6 运动粘度的单位换算表	267
附表7 动力粘度的单位换算表	268
附表8 冷冻吨的换算表	268

附表 9	传热系数的单位换算表	268
附表10	比热的单位换算表	268
附表11	制冷工质的基本特性	269
附表12	R-11饱和状态下的热力性质.....	270
附表13	R-12饱和状态下的热力性质.....	274
附表14	R-22饱和状态下的热力性质.....	278
附表15	R-113饱和状态下的热力性质	281
附表16	R-114饱和状态下的热力性质	283
附表17	R-11的单位容积制冷量 q_v (kJ/m ³)	286
附表18	R-12的单位容积制冷量 q_v (kJ/m ³)	286
附表19	R-11饱和蒸气热物理性质.....	287
附表20	R-12饱和蒸气热物理性质.....	287
附表21	R-11饱和液体热物理性质.....	287
附表22	R-12饱和液体热物理性质.....	288
附表23	水和水蒸汽在饱和状态下的热物理性质	288
附表24	氯化钠水溶液的热物理性质	289
附表25	氯化钙水溶液的热物理性质	290
参考文献		291

第一章 绪 论

1.1 制 冷 及 其 设 备

在日常生活中，冷和热是相比较而存在的一种人体对温度高低感觉的反应。其本质上均属于同一范畴的物理概念，都是物质分子运动平均动能的表现。

所谓“制冷”，就是使某一空间内物体的温度低于周围环境介质的温度，并连续维持这样一个温度的过程。实现制冷有两种途径：天然冷源与人工制冷。

人工制冷必须采用各种类型的机器设备来实现。其中应用最为广泛的是利用液体气化来实现的人工制冷，称为蒸气制冷。

实现蒸气制冷的设备有三种类型：

蒸气压缩式制冷设备（消耗电能）；

蒸汽喷射式制冷设备（消耗热能）；

吸收式制冷设备（消耗热能）。

结合在空调系统中的应用情况，常用的蒸气压缩式制冷设备有三种：

离心式制冷机；

活塞式制冷机；

螺杆式制冷机。

三种蒸气压缩式制冷机比较 表 1-1

制冷机型式	使用主机	优 点	缺 点
活塞式制冷机	活塞式制冷压缩机	这种制冷机出现最早，使用最广泛；运行管理经验成熟，运行可靠，使用方便；冷量范围大，热效率高，单位冷量耗电少；加工比较容易，造价比较低廉	压缩机体积大，耗金属多，占地面积大；易损部件多，维护费用高；单机产冷量不能太大；能量无级调节比较困难
螺杆式制冷机	螺杆式制冷压缩机	压缩机结构简单，体积小，重量轻；易损部件少，振动小；容积效率高，对湿压缩不敏感，能实现无级调节	单位冷量耗电比活塞式稍高；喷油冷却螺杆式压缩机润滑油系统复杂而庞大，耗油高；噪声高，螺杆的加工精度要求高
离心式制冷机	离心式制冷压缩机	单机制冷能力大（国外空调用离心式制冷机单机制冷量达到28000kW）；结构紧凑、质量轻、占地面积小；没有磨损部件，维护费用低；运行平稳，振动小，噪声较低，能经济地进行无级调节和合理地使用能源	离心式压缩机的转数高，所以对材质、加工精度和制造质量均要求严格。小型离心式制冷机热效率低于活塞式

它是以实现压缩过程中所采用不同型式的压缩机来区别的。
其各自优缺点比较见表1-1。

目前在大、中供冷量使用范围（蒸发温度 $t_e = 0^{\circ}\text{C}$ ，制冷量 $Q_0 \geq 350\text{kW}$ ）内，离心式制冷机占有独特的优势。尤其是作为离心式热泵装置（既能供冷又能供热）的运用，在各种供热温度下的制热系数 e_h 远高于吸收式热泵装置。

国产中、小型活塞式制冷机其标准制冷量为 $3.5 \sim 465\text{kW}$ ，制冷剂为R-12、R-22、R-717。国产螺杆式制冷机单机制冷量为 580kW 以下，并正在发展单机制冷量达 1163kW 的产品。

1.2 离心式制冷机的分类及其应用

离心式制冷机一般按照其用途、结构型式以及所采用的制冷剂或载冷剂来进行分类。
从使用观点出发，这里主要介绍离心式制冷机按照其使用工况来分类的情况。一般分为冷水机组和低温机组。

蒸发温度 $t_e \geq 0^{\circ}\text{C}$ 、载冷剂采用冷水、一般用于空调流程的机组称为离心式冷水机组，亦称空调用离心式制冷机组。即本书叙及的内容和范围。

空调用离心式制冷机组是当今世界上年产量最大、运用范围最广、结构和系统方面最为完善、品种系列最为齐全的机组。

我国生产的空调用离心式制冷机组（离心式冷水机组）的主要产品规格和型号见表1-2。

国产离心式冷水机组的主要规格型号 表 1-2

型 号	制冷剂	额定制冷量 (kW)	蒸发温度 ($^{\circ}\text{C}$)	冷凝温度 ($^{\circ}\text{C}$)	转 速 (r/min)	主电动机功率 (kW)	机组型式
FLZ-500	R-11	580	5	32	11300	125	组装式
FLZ-1000	R-11	1163	4	38	7820	300	组装式
FLL120-11	R-11	1395	10	40	7500	350	分散式
FLL120-21	R-11	1395	4	40	4980	360	分散式
BF30×0	R-11	350	0	40	12200	100	组装式
BF40×0	R-11	465	0	40	12200	130	组装式
BF25×10	R-11	290	10	40	12200	100	组装式
BF50×10	R-11	580	10	40	12200	140	组装式
ΠBF50×0	R-11	580	0	40	13000	180	组装式
BF60×0	R-11	700	0	40	11766	220	组装式
BF60×0(A)	R-11	814	6	40	11766	220	组装式
ΠBF75×0	R-11	872	0	40	10800	250	组装式
ΠBF100×0	R-11	1163	0	40	9350	320	组装式
ΠBF120×3.3	R-11	1395	3.3	40	9200	320	组装式
ΠBF140×9.1	R-11	1628	9.1	40	8500	320	组装式
ΠBF120×0	R-11	1395	0	40	8500	400	组装式
BF150×0	R-11	1744	0	40	7650	500	组装式
KF240×0	R-12	2800	0	40	11500	800	组装式
KF190×0	R-12	2210	0	40	11500	630	组装式
KF150×0	R-12	1744	0	40	11500	500	组装式

国产空调用离心式制冷机组除用于宾馆、影剧院、医院、大型饭店、纺织、化工、电子仪表、船舶、矿井降温、科研中心等一般舒适性的大型空调场所之外，近年在各种工业的工艺流程方面也得到越来越多的应用，如电缆生产工艺、高炉送风除湿、焦化循环水等方面，单台机组制冷量已达5120kW，制冷剂为R-11。

蒸发温度 $t_0 = -5 \sim -160^{\circ}\text{C}$ （常用 $-5 \sim -60^{\circ}\text{C}$ ）、载冷剂采用盐水或甲醇等水溶液、一般用于化工流程的机组称为低温离心式制冷机组。其规格参数和应用范围见表1-3。

低温离心式制冷机规格及应用范围 表 1-3

冷量范围 (kW)	制 冷 剂	蒸发温度 ($^{\circ}\text{C}$)	载 冷 剂	应 用 范 围
350~3500	R-11 R-12 R-22 R-717(氨) R-500(共沸)	-5~-25	氯化钙水溶液 甲醇水溶液 乙二醇水溶液	气体和液体冷却；工业蒸汽 液化；纺织工业；印刷工业； 石油化工工业；食品工业；饮 食业；冷库等
350~2326	R-12 R-22 R-717(氨) 丙 烷	-25~-40	氯化钙水溶液 甲醇水溶液 乙二醇水溶液 二氯甲烷 三氯乙烯 R-11	石油化工工业；化学工业； 食品工业；制 药 业；盐水冷 却；低温环境试验室；冷库等
350~1395	R-12 R-22 R-502(共沸) 乙 烯 丙 烯	-40~-60	二氯甲烷 三氯乙烯 R-11	液化气的结晶和贮藏；气体 液化和冷却；制药业；食品深 冷深藏设备；石化工业；低 温环境试验室等

随着我国石油、天然气、化工工业的迅速发展，为各种大型炼油脱蜡、合成纤维、高压聚乙烯等设备配套的大型低温离心式制冷机组也相继问世。国产的低温离心式制冷机组中，采用的制冷剂有氨、乙烯、丙烯、R-11、R-12等，蒸发温度为 $-10 \sim -42^{\circ}\text{C}$ 之间，单机额定制冷量为756~7270kW。

离心式制冷机按结构型式分类的内容参见本书第四章。

1.3 空调用离心式制冷机的发展概况

空调用离心式制冷机的发展与空调制冷技术及离心式制冷机本身的发展息息相关。其中最根本的促成因素，还在于现代工业和技术的进步。

二十年代初期，美国开利公司生产了世界上第一台离心式制冷机，并用于空调系统。它采用二氯乙烯(CH_2Cl_2)作为制冷剂，不久被二氯甲烷(CH_2Cl_2)代替，具有四个焊接叶轮，转速3000r/min。稍后一些，由瑞士勃朗一波弗利公司生产了世界上第一台氨离心式制冷机，制冷量7000kW，蒸发温度为 $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ ，具有三缸十五个叶轮。三十年代，氟利昂制冷剂研制成功，为空调用离心式制冷机的发展创造了极为有利的条件。

1934年,美国开利公司制造出以R-11为制冷剂的新型的空调用离心式制冷机。继后至1938年美国清凉(Trane)公司制造出以R-113为制冷剂的封闭型空调用离心式制冷机。发展成至今的高速、单级悬臂、封闭型组装式的空调用离心式制冷机组。

空调用离心式制冷机历经半个世纪的实践和完善,目前在技术上已达到相当成熟的地步。由于大型高层建筑物以及室内现代化设施的迫切需求,为空调用离心式制冷机系列产品的发展提供了广阔的市场。据1980年的统计,世界上所需制冷量为350kW以上的大型制冷机6500台以上,其中所需离心式制冷机约5000台以上,占77%。1980年美国生产了离心式制冷机2800台,日本生产1400台,远不能满足使用者的需要量。我国国内对近几年兴建的数十座高级宾馆做过调查统计,采用的空调用离心式制冷机产品约占空调用制冷机产品总数的80%以上。

目前世界上生产离心式制冷机(包括空调用机组)的主要国家是美国和日本。美国占总产量的50%,日本占25%,苏联为第三位,英国为第四位,再次为联邦德国、法国、丹麦等。

我国设计和生产离心式制冷机的时间,从1958年上海第一冷冻机厂生产第一台以R-11为制冷剂的空调用离心式制冷机至今,已有近三十年的历史。特别是近十年间,我国国产的空调用离心式制冷机产品系列日臻完善,技术上日趋成熟,运行上积累了较丰富的经验。1976年起,我国有关单位共同设计和制订了R-12空调用离心式制冷机组系列,其中制冷量为2800kW($240 \times 10^4 \text{kcal/h}$)的KF240×0典型产品在重庆通用机器厂试制成功,为国产化的组装式机组开创了新的局面。上海第一冷冻机厂生产的制冷量为1163kW($100 \times 10^4 \text{kcal/h}$)的空调用离心式制冷机组已出口东南亚,进入国际市场。仿照R-12空调用离心式制冷机组系列型谱,并参照国外先进的技术资料,重庆通用机器厂在1979年至1985年间先后设计和制造了制冷量为1163kW($100 \times 10^4 \text{kcal/h}$)等单台机组的基础上,逐步形成了目前较完善、产量最大的R-11空调用离心式制冷机组系列产品,并已出口尼泊尔、罗马尼亚。由重庆通用机器厂与西安交通大学合作的“离心式制冷机三元叶轮气动特性研究”课题取得了新的重要进展;国内最大的离心式制冷机试验基地——850kW开闭式循环试验台已在重庆通用机器厂建成;由重庆通用机器厂与天津大学合作的高效传热管试验研究已展示了良好的前景。单机采用微机控制技术已完成课题鉴定。全国有三所高等院校设有制冷机专业,成为输送离心式制冷机专业技术力量的重要基地。全国制冷机械行业的归口所——国家机械工业委员会合肥通用机械研究所在指导和推动我国离心式制冷机的技术进步方面发挥了重要作用。

应该承认,尽管我国的空调用离心式制冷机产品已取得了可喜的进步,但与世界上的先进技术水平比较,差距尚不小。在基本理论的研究、结构上的改进、生产工艺手段的完善、“三化”工作、产品质量与节约能源、降低消耗和成本、提高管理水平等方面还有待艰苦努力。

第二章 制冷技术的基础知识

2.1 基本状态参数及气体状态方程

2.1.1 密度、比容和容重

1. 密度 单位体积流体（液体和气体的总称）的质量称做密度，以符号 ρ 表示。常用单位为 kg/m^3 。

2. 比容 单位质量的流体所占有的体积称做比容，以符号 v 表示。常用单位为 m^3/kg 。

比容与密度的关系是互为倒数，即

$$v\rho = 1 \quad (2-1)$$

3. 容重 作用于单位体积流体的重力称做容重，以符号 γ 表示。常用单位为 N/m^3 。
[N]——牛顿。

密度、比容和容重的大小与外界压力和温度有关。因此，当指出某流体的密度、比容和容重时，必须指明其所处的外界压力和温度条件。例如：

在标准大气压（1.013bar）和温度为4°C时的水，其密度、比容和容重分别是。

$$\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3,$$

$$v = \frac{1}{\rho} = 0.001 \text{ m}^3/\text{kg} = 1 \text{ L}/\text{kg},$$

$$\gamma = 9800 \text{ N}/\text{m}^3 = 9.8 \text{ kN}/\text{m}^3.$$

2.1.2 温度

温度是表征物体冷热程度的一个状态参数，亦可认为是物体冷热程度的一种度量。衡量温度的标准有摄氏温度、绝对温度和华氏温度三种。我国法定计量单位规定的温标是：

摄氏温标 在标准大气压下，把水的结冰温度作为0°C，沸腾温度作为100°C，中间分成100等分，以符号°C表示，用 t 代表其读数。

绝对温标 把水的结冰点作为273K，水的沸点作为373K，把物质中的分子全部停止运动之点作为0K的温度标准，称为绝对温标，以符号K表示，用 T 代表其读数。

欧美常用的一种称为华氏温标。在标准大气压下，把水的结冰温度作为32°C，沸腾温度作为212°C，中间分成180等分，以符号°F表示，用 t_* 代表其读数。

摄氏温度与华氏温度之间换算关系为

$$t_* = \frac{9}{5}t + 32 \quad ^\circ\text{F} \quad (2-2)$$

$$t = \frac{5}{9}(t_* - 32) \quad ^\circ\text{C} \quad (2-2a)$$

绝对温度与摄氏温度之间换算关系为

$$T = 273 + t \quad \text{K} \quad (2-3)$$

$$t = T - 273 \quad ^\circ\text{C} \quad (2-3a)$$

2.1.3 压力

无论是气体或液体，由于分子的运动，气体或液体分子对容器或管道壁会造成碰撞，对容器或管道壁产生力的作用，称为压力。在工程中，压力的大小是以作用于单位面积上的力来表示，因此，压力的常用单位有Pa (N/m²) 或bar (巴)，1bar = 10⁵Pa。以符号 P 表示。

表示较小压力时，过去也有用水银柱高度即毫米汞柱 (mmHg) 或水柱高度即毫米水柱 (mmH₂O) 来表示。

1. 大气压力 地球表面上的空气也有压力，由地面上几百公里高的空气层的重力所形成，称为大气压力，我国法定计量单位用bar (巴) 或mbar (毫巴) 来表示，符号为 B 。

大气压力随地理区域、海拔高度以及气候条件等不同而有所变化。通常以纬度45°的海平面上大气的常年平均压力作为标准大气压，又称物理大气压。其值为760mmHg或1013mbar。

2. 绝对压力和表压力 (工作压力) 制冷设备上采用的压力表一般为弹簧管式，根据弹簧管受到压力时的变形程度，就能测出压力大小。弹簧管发生变形是因为管内工质压力 P 和管外大气压力 B 的差值所造成。该差值在压力表上显示出来，以 P_g 表示，称为表压力 (或工作压力)。工质压力 P 称为绝对压力。绝对压力 P 与表压力 P_g 之间关系为

$$P = P_g + B \quad \text{bar} \quad (2-4)$$

本书中未特别注明“表压”时，均指绝对压力。

需要指出，对一般平原，或海拔高度不大的地区，大气压力一般均可近似取为1bar来换算，即

$$P = P_g + 1 \quad \text{bar} \quad (2-5)$$

过去在工程上还常用一种称作“工程大气压”的压力单位，即kg/cm²，其换算关系为

$$\begin{aligned} 1\text{kg/cm}^2 &= 10^4\text{kg/m}^2 = 10^4\text{mmH}_2\text{O} = 735.6\text{mmHg} = 0.968B_{\text{标}} \\ &= 0.98\text{bar} = 98000\text{Pa} \end{aligned}$$

3. 真空度 (负压力) 当装有流体的容器压力比大气压力低时，表压就为负值，称作真空。衡量真空的程度称为真空度，其值是指某处的绝对压力不足于1个大气压力的部分，以 $P_{\text{真}}$ 表示，即

$$P_{\text{真}} = B - P \text{ 或 } P = B - P_{\text{真}} \quad (2-6)$$

某处的真空度 $P_{\text{真}}$ 越大，说明该处的绝对压力 P 越小。真空度 $P_{\text{真}}$ 的最大值为 $P_{\text{真}} = B$ ，即绝对压力 P 为零，处于绝对真空状态；真空度 $P_{\text{真}}$ 的最小值为零， $P_{\text{真}} = 0$ ，即 $P = B$ 。故真空度 $P_{\text{真}}$ 是介于0~ B 的范围内变化的。

上述三种压力之间的关系如图2-1所示。

2.1.4 气体状态方程

流体作为理想气体对待时，其绝对压力 P 、温度 t 或绝对温度 T 和比容 v 之间存在一定的关系，以理想气体状态方程式来表示，对于1kg流体而言，其状态方程式为

$$Pv = RT \tag{2-7}$$

对于Mkg流体而言，其状态方程式为

$$MPv = MRT \tag{2-8}$$

或

$$PV = MRT \tag{2-8a}$$

式中 P ——绝对压力，Pa；
 v ——比容， m^3/kg ；
 R ——气体常数， $\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ；

$$R = \frac{8314.4}{\mu}$$

μ ——气体分子量；
 V ——气体所占容积， m^3 ；
 T ——绝对温度，K。

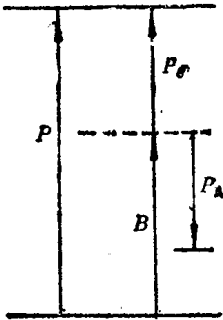


图 2-1 P 、 P_g 和 B 的关系
 P —绝对压力， B —大气压力，
 P_g —表压力(工作压力)， P_v —
 真空度(负压力)

实际气体与理想气体之间，对实际气体采用式(2-7)和式(2-8)是有偏差的。该偏差值随压力升高、温度降低而增大。但在空调制冷工程中，压力不很高及温度不很低时，可采用上述方程式近似计算。

2.2 热量、比热、显热和潜热

1.热量 物质的分子运动所具有的能量称为热量，一般采用符号 Q 或 q 表示。计算热量的单位用J(焦耳)或kJ(千焦耳)表示。

1焦耳(J)的热相当于1牛顿(N)的力移动1米(m)的距离所作的功，即

$$1\text{J} = 1\text{N}\cdot\text{m} \text{ 或 } 1\text{kJ} = 1\text{kN}\cdot\text{m}$$

有时也用 $\text{W}\cdot\text{s}$ (瓦特秒)或 $\text{kW}\cdot\text{h}$ (千瓦小时)作为热量和功的单位。

$$1\text{J} = 2.778 \times 10^{-7} \text{kW}\cdot\text{h}$$

在公制单位中，热量常用千卡(kcal)来表示，1千卡(kcal)就是使1公斤(kg)纯水升高或降低 1°C 所吸收或放出的热量。

$$1\text{J} = 0.2389\text{cal} \text{ 或 } 1\text{kJ} = 0.2389\text{kcal}$$

功、能和热量之间可以相互转换，其单位换算表见表2-1。

功、能和热量的单位换算表

表 2-1

单 位 名 称	千 焦 (kJ)	千 卡 (kcal)	公斤力·米 (kgf·m)	千瓦·时 (kW·h)	马力·时 (ps·h)	英热单位 (Btu)
千 焦 (kJ)	1	0.2389	101.97	2.778×10^{-4}	3.777×10^{-4}	0.9478
千 卡 (kcal)	4.1868	1	426.94	1.163×10^{-3}	1.581×10^{-3}	3.968
公斤·米(kgf·m)	9.81×10^{-3}	2.341×10^{-3}	1	2.724×10^{-6}	3.704×10^{-6}	9.295×10^{-3}
千瓦·时 (kW·h)	3600.65	859.9	3.671×10^5	1	1.36	3412
马力·时 (ps·h)	2648	632.5	2.702×10^5	0.7355	1	2509
英热单位 (Btu)	1.055	0.252	107.6	2.93×10^{-4}	3.985×10^{-4}	1

2.比热 使单位物量的物体温度升高(或降低)一度所吸收(或放出)的热量称为比热。单位物量如果是质量(公斤),便称为质量比热,以符号 c 表示,单位是 $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 。

物体的比热除与物体性质有关外，还与物体所处的温度有关。在制冷技术中，温度变化范围不大，可近似把比热看作是定值。

质量为 $G\text{kg}$ 、其比热为 c 的物体，温度由 t_1 升高到 t_2 时所吸收的热量 Q 为

$$Q = Gc(t_2 - t_1) \qquad \text{kJ} \qquad (2-9)$$

气体比热的大小与热力过程的特性有关。定压加热过程气体的比热称为定压比热，以符号 c_p 表示；定容加热过程气体的比热称为定容比热，以符号 c_v 表示。

定压加热是保持气体压力不变的加热过程。制冷与空调过程中，空气的加热或冷却，一般都看作定压过程。由于定压加热过程时气体要对外作膨胀功，故单位质量的气体温度升高一度，要比定容加热吸收更多的热量。因此，定压比热要比定容比热大。

气体的定压比热 c_p 与定容比热 c_v 的比值，称为绝热指数，以符号 k 表示，即 $k = \frac{c_p}{c_v}$ 。某些气体的比热与绝热指数见表2-2。

对理想气体的可逆绝热过程（绝热过程是气体与外界没有热交换的情况下，进行的压缩或膨胀过程），可得出下列关系式：

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad (2-10)$$

或

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad \text{K} \qquad (2-10a)$$

式中 T_1 、 T_2 ——气体的初始和终了时的绝对温度，K；

P_1 、 P_2 ——气体的初始和终了时的压力，bar；

$k = \frac{c_p}{c_v}$ ——气体的绝热指数。

某些气体的比热(c_p 、 c_v)与绝热指数 k ($t = 20^\circ\text{C}$ ， $P = 10^5\text{Pa}$) 表 2-2

参 数 气体名称	c_p (kJ/kg·K)	c_v (kJ/kg·K)	$k = \frac{c_p}{c_v}$	参 数 气体名称	c_p (kJ/kg·K)	c_v (kJ/kg·K)	$k = \frac{c_p}{c_v}$
R-11	0.62	0.54	1.135	R-717(氨)	2.16	1.63	1.32
R-12	0.62	0.54	1.135	R-113	0.67	0.62	1.08
R-22	0.62	0.52	1.194	空 气	1.01	0.71	1.40

3.显热 物质被 加热或被 冷却时，内部分子运动的平均动能引起物质温度上升或下降，这时物质吸收或放出的热称为显热（也称感热），可由式（2-9）算出来。

4.潜热 物质发生物态变化而温度维持不变，所需要吸收或放出的热量称为潜热。此时，液体的汽化温度即为沸点，固体的溶解温度即为熔点。

潜热的大小可用改变1kg物质的状态所需要的热量表示，其单位为 kJ/kg。如潜热以 r 表示，那么改变 $G\text{kg}$ 物质的状态所需的热量 Q 用下式表示，即

$$Q = Gr \qquad \text{kJ} \qquad (2-11)$$

在制冷技术中，正是利用这种潜热来达到制冷的目的。

2.3 焓 与 熵

1. 焓 物质具有的内能与压力位能之和称为焓, 以符号*i*表示。对于每1kg的物质, 其焓(*i*)为

$$i = u + pv \times 10^{-3} \quad \text{kJ/kg} \quad (2-12)$$

式中 *u* ——物质内能, kJ/kg;

p ——物质压力, Pa;

v ——物质比容, m³/kg;

pv ——压力位能(移动功), J/kg。

焓是一个很重要的状态参数。它和温度、压力、比容一样, 说明工质所处状态的特征。

制冷剂大多在蒸气状态下使用, 并不遵循理想气体法则。在制冷工程中, 广泛利用焓作为能量交换的计算, 使计算大大简化。焓的绝对值很难求出, 通常只需了解工质由某一状态变化到另一状态时焓值的增减即可。

2. 熵 熵和焓一样, 也是一个状态参数。它是表征制冷剂状态变化时, 其热量传递的程度。每1kg工质的熵以符号*s*表示, 单位是kJ/kg·K。

熵和热量及温度关系如下:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad \text{kJ/kg} \cdot \text{K} \quad (2-13)$$

式中 *dq* ——1kg工质在可逆过程中的微小换热量, kJ/kg;

T ——换热当时工质的绝对温度, K。

熵不能用实测的方法求得, 只能从数学计算中得到。熵在热力计算中, 一般不需求出它的绝对值, 而只要求出它的相对值就可以了。

2.4 物质聚集的形态和变化

物质的分子可以聚集成固体、液体和气体三种形态, 简称物质的三态。

在一定的外界条件下, 物质的三种形态可以互相转化, 称为物态变化。以水为例: 在常温常压下, 水是一种液体, 当温度降低到0℃以下, 就会冻结成冰, 成为固体。反之, 水加热到100℃以上, 就会变成水蒸汽, 成为气体。温度和压力是影响物态变化的主要因素。

在制冷工程中, 研究并利用这种物态变化有重要意义。例如, 在冷凝器中, 制冷剂在较高压力和较高温度下放出热量, 由冷却水带走, 使制冷剂气体液化。在蒸发器中, 液态制冷剂在低温低压下, 从载冷剂或周围介质中吸热, 而达到气化。

1. 饱和蒸气、饱和压力和饱和温度

当装在密闭容器里的液体被加热时, 蒸气分子的密度不断增加, 故使得回到液体中去的分子数也增多。当达到在同一时间内从液体里出来的分子数等于回到液体中的分子数。就是说液体的气化速度与蒸气的液化速度相等, 处于动平衡状态, 蒸气的密度不能再增加,

就达到了饱和状态。这时容器中的蒸气称作饱和蒸气，相应的压力称作饱和压力，而相应的温度称作饱和温度。

饱和蒸气的温度和压力之间有对应的一定关系，压力越高对应的温度也越高，或说温度越高对应的压力也越高。反之亦然。只要容器中还有液体存在时，饱和蒸气压力与体积无关，此时温度不变。

空调用离心式制冷机组中常用氟利昂制冷剂的饱和蒸气压力与温度对应值见附表。

2. 湿饱和蒸气、干饱和蒸气和过热蒸气

如果在定压下对液体进行加热，当达到饱和温度时，液体沸腾变成蒸气，继续加热则比容增加，温度不变，仍为饱和温度，这时容器内存在着饱和液体和饱和蒸气的混合物，此时称为湿饱和蒸气状态。再继续加热，液体全部气化变为饱和蒸气，此时称为干饱和蒸气状态。如再继续加热，则干蒸气的温度升高并超过该饱和压力下对应的饱和温度，比容也将增加，这种状态称为过热蒸气。氟利昂制冷剂在空调用离心式制冷压缩机中即为过热蒸气状态。过热蒸气的温度与饱和温度之差称为过热度。

3. 蒸发、蒸发温度和蒸发压力

蒸发是指在某种温度下，液体的表面上不断气化的过程。液体的蒸发是在气体侧蒸气分压力低于饱和蒸气压力时在饱和温度下进行的。

1kg的液体制冷剂在蒸发过程中，在饱和温度下转变为同温度下的蒸气时所吸收的热量，即为该温度下的蒸发潜热，单位为kJ/kg。

在沸点温度下，液体的气化过程称为沸腾。沸腾是在蒸气侧蒸气分压力等于饱和蒸气压力时进行的。沸腾与蒸发的不同是：在一定温度下沸腾时，蒸气的形成不仅由液体表面产生，而大部分来自液体的内部。在制冷工程中，由于制冷剂的沸腾温度（一定压力下）较低，通常把沸腾称为蒸发。例如空调用离心式制冷机中，制冷剂在蒸发器中的工作状态即是（详见3.8节内容）。

蒸发时的饱和温度称为蒸发温度。与蒸发温度对应的饱和压力称为蒸发压力。如蒸发器中，蒸发温度0℃的R-11制冷剂，其对应的饱和压力为0.40178bar。

4. 饱和液体和过冷液体

在饱和状态下，全部蒸气均凝结为液体，此时的液体称为饱和液体。

冷却饱和液体，使其液体温度低于饱和温度，这种液体称为过冷液体。该饱和液体压力下的饱和液体温度，与过冷液体温度的差值称为过冷度。如冷凝器与蒸发器（浮球室）之间制冷剂液体的过冷。

5. 冷凝、冷凝温度和冷凝压力

物质从气态变成液态过程称为冷凝（或凝结）。冷凝是在饱和温度下进行的。蒸气冷凝时要放出热量。1kg蒸气冷凝时放出的热量，等于同温度下液体的蒸发潜热。

冷凝时的温度称为冷凝温度。与冷凝温度相对应的压力称为冷凝压力。

空调用离心式制冷机中，制冷剂在冷凝器中的工作状态即是（详见3.7节内容）。

6. 临界温度、临界压力和临界比容

能够实现物态变化的极限状态称为临界状态。每种气体都有一个一定的温度值，高于这个温度，无论压力如何变化，气态都无法转化为液态，这个极限温度称为临界温度。在临界温度下，气体液化所需要的压力称为临界压力。在临界压力下，单位质量的工质所占