

109

TB 66-1
Z73b

空调用螺杆式制冷机

(结构 操作 维护)

周邦宁 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空调用螺杆式制冷机: 结构、操作、维护/周邦宁主编.
—北京: 中国建筑工业出版社, 2002

ISBN 7-112-04931-8

I. 空… II. 周… III. 空气调节器—螺杆式制
冷机 IV. TB651

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 090084 号

螺杆式制冷机以其能耗低, 结构紧凑、易损件少、可靠性高、寿命长、操作维护方便等突出优点, 被广泛用于空调工程中。由于使用清洁能源——电力, 已被众多使用者认定为发展“绿色空调”工程中的优选产品之一。而且随着全国各地区电力供应的进一步缓和, 其市场将更加广阔。

本书重点阐述了有关螺杆式制冷机的工作原理、结构特点、自动控制系统及机组安装、运行管理、故障处理、维护保养等方面的知识。并简要介绍了机组的选型、各项经济技术指标等内容。

本书可供有关工程技术人员、生产厂家、运行管理人员及大专院校的师生参考。

空调用螺杆式制冷机

(结构 操作 维护)

周邦宁 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国科学院印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 28 字数: 678 千字

2002 年 5 月第一版 2002 年 5 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 35.00 元

ISBN 7-112-04931-8

TU·4393 (10434)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

在空调用电制冷（离心式、螺杆式、活塞式、涡旋式）和热制冷（溴化锂吸收式）机组中，空调用螺杆式制冷机组以其能耗低、结构紧凑、易损件少、可靠性高、寿命长、操作维护方便等突出优点，在用于空调工况的中、小冷量段（单机制冷量 $\leq 1162\text{kW}$ ）范围内，具有强劲的竞争能力和广阔的市场优势。

近十年间，国内外的空调用螺杆式制冷机产品获得了飞跃的技术进步和结构完善，其主要原因是采用了先进螺杆齿形和齿数比（5:6 或 5:7）、高精度专用螺杆转子加工和检测设备、油系统及卸载装置的改进、高效换热器及微电脑控制等多项最新成就并付诸生产实施，使其自身的各项技术经济指标跻身于各种空调用冷、热源设备的前列，且大有逐步取代传统的空调用活塞式制冷机产品之势。

空调用螺杆式制冷机在使用功能上，可分为螺杆式冷水机组（单供冷）和螺杆式热泵机组（夏供冷、冬供暖）。其采用的制冷剂主要是 R22，另有少量的 R134a、R717（ NH_3 ）机组。其制冷压缩机型式主要有半封闭式和开启式，半封闭式又分为水冷式和风冷式。目前整个机组已完全紧凑化（多机头）设计，其制冷压缩机、换热容器、油系统、电控柜等组装成一体，共用同一底座，在使用现场仅需接通水管、电源，即可运行。

我国用于空调工况的螺杆式制冷机产品生产稳定于 70 年代中期，如大连冷冻机厂、武汉冷冻机厂、烟台冷冻机厂等生产的开启式氨螺杆式制冷机（如 KA20C 等）系列，起点高，品种齐全。70 年代末期，我国已研制鉴定成功半封闭式 R22 螺杆式冷水机组（如 BF12.5D），开辟了螺杆式机组用于中央空调工程的广阔道路。

我国实行改革开放以来，大量吸收和采用世界上先进的螺杆式制冷机技术及加工手段，或采用国外各家名牌空调用螺杆式制冷压缩机主机进行组装，大大缩小了我国空调用螺杆式制冷机产品与国际先进水平的差距，成为空调用电制冷机组产品队列中最有朝气的一支生力军。

现代空调用螺杆式制冷机组每年正以 20% 的产量速度在增长，其 COP（能效比）已达到 4.5~5.0，接近于离心式产品，大大高于活塞式（4.0）产品。

我们是在总结国内生产制造和使用经验的基础上，吸收和借鉴国外的先进技术应用特点，从实际使用需要出发，来编写此书的。

本书由周邦宁担任主编，姚荣华担任责任编辑。

在本书的编写过程中，曾得到众多同行的帮助和支持，在此向他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限，不当之处，欢迎各界读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 空调用螺杆式制冷机的分类型式及特点	1
1.2 空调用电制冷机组的特点比较	4

第 2 章 空调用螺杆式压缩制冷循环的基本原理

2.1 空调用螺杆式压缩制冷循环和系统	7
2.1.1 理想制冷循环	7
2.1.2 单级螺杆式压缩制冷的理论循环	9
2.1.3 单级螺杆式压缩制冷的实际循环	12
2.1.4 单级螺杆式压缩制冷系统	15
2.2 空调用螺杆式压缩、热泵循环和系统	19
2.2.1 热泵及热泵循环的概念	19
2.2.2 单级螺杆式压缩热泵系统	24

第 3 章 空调用螺杆式制冷机的工作原理

3.1 空调用双螺杆式制冷压缩机的工作原理	29
3.1.1 概述	29
3.1.2 空调用双螺杆式制冷压缩机的工作过程	32
3.1.3 空调用双螺杆式制冷压缩机的热力过程	34
3.2 空调用单螺杆式制冷压缩机的工作原理	63
3.2.1 空调用单螺杆式制冷压缩机概述	63
3.2.2 空调用单螺杆式制冷压缩机的工作过程	65
3.2.3 空调用单螺杆式制冷压缩机的热力过程	66
3.3 制冷剂、载冷剂与润滑油	68
3.3.1 制冷剂	68
3.3.2 载冷剂	80
3.3.3 润滑油	88
3.4 空调用螺杆式制冷机的型号、基本参数和技术要求	92
3.4.1 空调用螺杆式制冷机的型号规定	92
3.4.2 空调用螺杆式制冷机的基本参数	92

3.4.3 空调用螺杆式制冷机的主要技术要求	96
------------------------	----

第4章 空调用螺杆式制冷机的结构

4.1 空调用螺杆式制冷机的总体结构型式	101
4.1.1 空调用螺杆式制冷机总体结构型式的分类方法	101
4.1.2 空调用螺杆式制冷机总体结构型式特点	103
4.2 空调用双螺杆式制冷压缩机的结构型式	124
4.2.1 开启式双螺杆式制冷压缩机的结构型式	124
4.2.2 半封闭式双螺杆式制冷压缩机的结构型式	128
4.2.3 全封闭式立式双螺杆式制冷压缩机的总体结构型式	130
4.2.4 空调用双螺杆式制冷压缩机的转子齿形	130
4.3 空调用单螺杆式制冷压缩机的结构型式	146
4.3.1 空调用单螺杆式制冷压缩机的总体结构型式	146
4.3.2 空调用单螺杆式制冷压缩机主要零部件的结构特点和作用	148
4.4 冷凝器的结构型式及选用特点	153
4.4.1 冷凝器的结构型式分类概述	154
4.4.2 水冷式冷凝器的结构及特点	154
4.4.3 风冷式冷凝器的结构及特点	162
4.4.4 空气与水联合冷却式冷凝器的结构及特点	165
4.4.5 冷凝器的选型核算	167
4.5 蒸发器的结构型式及选用特点	172
4.5.1 蒸发器的结构型式分类概述	172
4.5.2 冷却液体载冷剂的蒸发器的结构及特点	174
4.5.3 冷却空气的蒸发器的结构及特点	182
4.5.4 钎焊板式蒸发器的结构及特点	187
4.5.5 蒸发器的选型核算	189
4.6 热力膨胀阀的结构及特点	193
4.6.1 热力膨胀阀的结构和工作特点	193
4.6.2 热力膨胀阀的选用特点	193
4.7 其他辅助设备(器件)的结构和特点	203

第5章 空调用螺杆式制冷机的电气控制

5.1 空调用螺杆式制冷机的自动控制器件	214
5.1.1 液位自动控制器件	214
5.1.2 压力和温度控制器件	216
5.1.3 空调用螺杆式制冷机常用保护控制器	223
5.2 空调用螺杆式制冷机组的自动控制	231
5.2.1 自动控制概述	231
5.2.2 蒸发器供液量的自动控制	234

5.2.3 制冷机组运转参数的自动控制	235
5.2.4 制冷压缩机的自动控制	238
5.3 空调微型计算机控制系统	240

第6章 空调用螺杆式制冷机组及其系统的安装

6.1 安装前的准备及注意事项	245
6.1.1 对制冷机站房的要求	245
6.1.2 施工技术资料的准备	246
6.1.3 施工验收及质量评定依据	251
6.1.4 施工机具及材料的准备	251
6.2 空调用螺杆式制冷机组的安装	259
6.2.1 对基础的要求	259
6.2.2 机组的上位、找正和初平	261
6.2.3 对中和基础抹面	263
6.3 制冷管道及测量仪表的安装	264
6.3.1 常用的管材、管件及阀门	264
6.3.2 制冷管道的安装	272
6.3.3 测量仪表的安装	280
6.4 制冷机组及管道的防腐与绝热	282
6.4.1 制冷机组及管道的防护与涂漆	282
6.4.2 制冷机组及管道的绝热材料	285
6.4.3 制冷机组及管道的绝热结构	289
6.5 电气设备的安装	293
6.5.1 电气配线	293
6.5.2 电动机与控制设备的安装	298

第7章 空调用螺杆式制冷机组的运行管理

7.1 机组制冷运行前的准备试验	303
7.1.1 机组水系统的冲洗、设施及水质要求	303
7.1.2 机组制冷系统的清洁和气密性试验	306
7.1.3 机组制冷系统的真空试验和检漏方法	309
7.1.4 机组制冷系统的干燥除湿处理	311
7.1.5 机组制冷系统的制冷剂、润滑油的充灌与排出	312
7.2 制冷运转的操作规程	315
7.2.1 制冷运转前的检查和注意事项	315
7.2.2 制冷运转的启动程序	320
7.2.3 制冷运转的正常操作	333
7.2.4 制冷运转的停机程序	363

第8章 空调用螺杆式制冷机组的故障和排除

8.1 水冷式螺杆式冷水机组运行中的常见故障和排除	365
8.1.1 空调用螺杆式制冷压缩机运行中的常见故障和排除	365
8.1.2 水冷式螺杆式冷水机组系统运行中的常见故障和排除	365
8.2 风冷式螺杆式冷(热)水机组运行中的常见故障和排除	371
8.2.1 热泵用螺杆式制冷压缩机运行中的常见故障和排除	371
8.2.2 风冷式螺杆式冷(热)水机组系统运行中的常见故障和排除	373
8.3 TRANE 公司 RTHB 水冷式螺杆式冷水机组运行中的常见故障和排除	374
8.3.1 RTHB 水冷式螺杆式冷水机组运行中仅可本控复位的常见故障和处理建议	375
8.3.2 RTHB 水冷式螺杆式冷水机组运行中可遥远复位的常见故障和处理建议	377

第9章 空调用螺杆式制冷机组的维护和保养

9.1 空调用螺杆式制冷机组运行中的维护和保养	282
9.1.1 机组运行中的一般维护和保养	382
9.1.2 机组运行中的专项维护和保养	385
9.2 空调用螺杆式制冷机组停机后的维护和保养	393
9.2.1 机组停机后机械系统的维护和保养	393
9.2.2 机组停机后电气控制系统的维护和保养	400

第10章 空调用螺杆式制冷机组的选型

10.1 中央空调用冷(热)水机组的一般选型原则	403
10.1.1 重视能源背景和能耗指标	403
10.1.2 考核产品使用寿命及可靠性	408
10.1.3 对比产品的投资和运行费用	412
10.1.4 符合环境保护要求	416
10.2 中央空调用冷(热)水机组的价值工程分析示例	421
10.2.1 功能评价指数的计算	422
10.2.2 各冷热源方案的成本指数 C_i 及价值指数 V_i 的计算	437
主要参考文献	439

第 1 章 绪 论

1.1 空调用螺杆式制冷机的分类型式及特点

目前，用于空调工程的空调用螺杆式制冷机产品的品种规格、标准化、系列化等已日趋完善，发展迅速，获得广泛的应用。由于历史的原因，我国国产的空调用螺杆式制冷机产品系列的形成，历经了由仿制到独创的艰苦过程，目前已进入较为稳定的发展时期，与世界上先进产品的差距已大大缩小。产品的标准化工作已向国际先进标准迈进了一大步。产品的主要性能指标、结构型式和电气控制方式等方面已与国际先进水平接轨和揉和，体现出强大的竞争能力和技术优势。

空调用螺杆式制冷机的分类是建立在不断的技术进步和运行使用经验不断丰富成熟的基础上的。空调用螺杆式制冷机的分类方式有多种，但作为机组的分类型式，主要有冷水机组和热泵机组两种型式，这是以不同的使用功能来划分的。其他尚有按制冷压缩机型式（开启式、半封闭式、全封闭式）分类；按制冷压缩机类型（单螺杆式、双螺杆式）分类；按热源侧（放热侧）热交换方式〔水冷式（水热源）、风冷式——空气热源〕分类；按制冷剂种类（R22、R134a、R717——氨制冷剂）分类。

将上述不同分类方式和型式的产品特点和应用列于表 1.1-1。

空调用螺杆式制冷机的分类型式及特点

表 1.1-1

分类方式	分类型式	型 式 特 点	单机制冷(制热)能力(kW)		应 用	
			制冷量范围	制热量范围	冷水机组	热泵机组
按制冷压缩机型式分类	开启式	驱动电动机置于制冷压缩机之外，电动机与压缩机的阳转子伸出端之间采用联轴器连接（见图 4.2-1） 优点：拆卸、维修方便；电动机自带风机冷却 缺点：压缩机阳转子伸出端必须采用可靠的轴封装置，外泄漏难以避免；润滑油系统较复杂	115~2200		有	
	半封闭式	驱动电动机与制冷压缩机共用一根转动轴，封于同一整体机体之内；压缩机进、排气端设可拆卸的端盖和壳体（见图 4.2-7） 优点：无需轴封，压缩机—电动机气密性好；同轴度好；端部可拆卸，维修方便；油系统大多为“内置式”，结构十分紧凑 缺点：电动机检修必须拆卸压缩机、电动机冷却必须靠制冷剂建立压差	115~2200	132~808	有	有

续表

分类方式	分类型式	型 式 特 点	单机制冷(制热)能力(kW)		应 用	
			制冷量范围	制热量范围	冷水机组	热泵机组
按制冷压缩机型式分类	全封闭式(立式)	空调工程中常采用的是立式全封闭式制冷压缩机, 螺杆转子、内置式电动机、滑阀、油系统、轴承等组成的开式机体全部封闭在一个罩壳之内, 仅吸气口(中下部)和排气口(顶部)与外界相通(见图 4.2-8) 优点: 立式结构十分紧凑, 占有空间面积小; 气密性极好 缺点: 密闭罩壳不能拆卸, 维修不便; 转子轴向力朝下方, 对止推轴承承载能力要求高	140~1736	240~692	有	有
	单螺杆式	单螺杆式制冷压缩机又称作蜗杆式制冷压缩机, 分有开启式、半封闭式两种, 由一根螺杆与两侧对称布置的星轮平滑啮合而成, 形成两个工作腔, 各自完成压缩过程(见图 4.3-2 和图 4.3-3) 优点: 结构简单, 重量轻; 功耗低, 效率高; 振动小, 噪声低; 寿命高于双螺杆式两倍以上 缺点: 加工精度高, 装配要求严格	118~760		有	有
按压缩机类型分类	双螺杆式	阳、阴转子端面具有相互啮合的齿形, 由相等数量的多段曲线——对应的共轭曲线组成。阳转子与阴转子的齿数比可为 4:6、5:6、5:7 等。由电动机驱动阳转子, 阳转子带动阴转子转动, 完成吸气、压缩、排气的容积式压缩过程。双螺杆转子的齿形是一种非对称齿形, 由旋转时在前的齿形前段和旋转时在后的齿形背段组成一个齿形。现代常采用的齿形有: (1) 单边非对称摆线包络线齿形 (2) 双边非对称摆线包络线齿形 (3) Sigma 非对称齿形(见图 4.2-14) (4) CF 非对称齿形(见图 4.2-16) 优点: 漏气三角区小, 容积效率较高, 齿形发展快, 有成熟的加工制造和运行经验 缺点: 阳螺杆轴向远比阴螺杆轴向力大, 故必须在阳螺杆增设油压平衡活塞; 结构不及单螺杆简单	115~2200	132~808	有	有

续表

分类方式	分类型式	型 式 特 点	单机制冷(制热)能力(kW)		应 用	
			制冷量范围	制热量范围	冷水机组	热泵机组
按热源侧 (放热侧)热交 换方式分类	水冷式 (单冷)	水冷式是指冷水机组的放热侧采用的是水冷式冷凝器(壳管式),冷却水走管程,制冷剂走壳程;机组总热负荷通过冷却塔排向大气,其结构图可见图4.1-3(半封闭式)和图4.1-4(开启式) 优点:技术成熟,运行经验丰富,冷量范围宽,冷却效果好 缺点:目前仅用于单制冷,要求水源充足,必须设置室外冷却塔	115~2200		有	
	风冷式	风冷式是指冷水(热泵)机组的热源侧(放热侧)采用风冷式热交换器(铜管套铝翅片),置于室外。冬季供热时,空气热交换器吸取空气热源;夏季供冷时,空气热交换器靠风扇排热至大气中,靠系统中的四通阀转换制冷与热泵循环。也可用于单制冷的冷水机组。风冷式冷(热)水循环见图4.1-5 优点:冷、热交换供应,应用范围广;机组置于室外,不占机房面积;节约水源,省去冷却水水泵和冷却塔 缺点:制冷(制热)量受环境温度影响大,北方寒冷地带需加辅助热源	112~693	132~808	有	有
按制冷剂种 类分类	R22	《蒙特利尔协定书》和我国《国家方案》均指定R22(HCFC22)为替代R12(CFC12)的过渡性工质,用于空调为高压制冷剂(机组内为正压系统),使用极其普遍 优点:作为制冷剂特性好,安全,单位容积制冷量(q_v)大,我国过渡期可用至2030年 缺点:机组少量外漏不易发现,面临新的替代和受限,全球变暖潜能值(GWP)较高	115~2200	132~808	有	有

续表

分类方式	分类型式	型 式 特 点	单机制冷(制热)能力(kW)		应 用	
			制冷量范围	制热量范围	冷水机组	热泵机组
按制冷剂种类分类	R134a	《蒙特利尔协定书》和我国《国家方案》均指定 R134a (HFC134a) 为永久性工质, 用于空调为中压制冷剂 (机组为正压系统), 目前使用较少 优点: 不含氯 (Cl) 原子, 对大气臭氧层破坏潜能值 (ODP) 为零, 安全, 替代 R12 较为理想, 可永久使用 缺点: 全球变暖潜能值 (GWP) 较高, 亲油性差, 对铜材有腐蚀, 代用 R12 时必须改造制冷设备方能使用, 目前价格昂贵	530~1814		有	
	R717 (氨)	是一种传统广泛使用的制冷剂, 多用于开启式机组 优点: 单位容积制冷量 (q_v) 大; 泄漏有味, 易被发现; 不破坏大气臭氧层; 安全; 易于获得, 价格低廉; 不受限, 不禁用 缺点: 氨 (R717) 有刺激浓味; 对锌、铜有腐蚀; 有可燃性; 含水量要严格控制 (含水量不得超过 0.2%); 油溶解度小	115~2200		有	

1.2 空调用电制冷机组的特点比较

空调用电制冷机组主要包括有活塞式、螺杆式和离心式三类产品。涡旋式冷水 (热泵) 机组由于目前应用较少, 我国尚缺乏此类产品的技术标准, 故暂未列入。

由于近年来我国电力 (火电、水电、核电) 工业的迅速发展, 在中央空调工程项目中采用电制冷机组产品已呈急剧上升趋势。对上海地区 100 余幢高层建筑空调冷 (热) 方式的调查统计表明, 电制冷机组的市场占有率, 已达 80.8%, 占有不可取代的优势和生命力。见表 1.2-1。

上海地区高层建筑空调冷 (热) 源方式统计

表 1.2-1

统计项目 能源	冷 (热) 源方式	空调项目 数量	占有比例 (%)
电力	单冷式制冷机组	45.5	80.8
	空气热源热泵	26.5	
	变冷剂系统与分体式空调	1.5	

续表

能源	统计项目	冷(热)源方式	空调项目数量	占有比例(%)
油		燃油锅炉→蒸汽型吸收式	6	12.1
		集中供热→蒸汽型吸收式	1.5	
		直燃型吸收式	2.5	
		热电联产	1	
燃气		直燃型吸收式	6	7.1
		热电联产	0.5	

注：有的空调项目采用两种能源方式（如电动式和直燃型吸收式搭配），则分项数量取0.5。

长期用于中央空调系统的活塞式、螺杆式、离心式三类电制冷机组，以明显的技术进步和运转经验的积累，在市场竞争中已确立了各自的产品优势和地位。而市场的选择和产品的占有率，永远是一个比较复杂的变数。这里仅定性地、相对地并立足于国内市场的使用状况，对电制冷机组的特点做一比较，见表1.2-2。

空调用电制冷机组特点比较表

表 1.2-2

指标类别	产品类别 比较项目		螺杆式制冷机组	活塞式制冷机组	离心式制冷机组
工况与循环	执行的现行国家行业标准		JB/T 4329—1997	JB/T 4329—1997	JB/T 3355—1998
	标准(名义) 工况	夏供冷	冷水出水温度：7℃，环境温度：35℃		
		冬供热	热水出水温度：45℃，环境温度：7℃		
	制冷循环类别		蒸气压缩式制冷循环		
	压缩机使用能源		电 力		
	压缩机压缩原理		回转容积式	往复容积式	回转离心式
机组特性指标	采用制冷剂		R22、R134a、R717	R22、R717	R22、R134a、R123
	单机制冷(热) 量范围(kW)	制冷量	115~2200	61~1240	703~4222
		制热量	132~1119	67~1360	
	转动件转速范围(r/min)		2960	≤1800	4800~8490
	机组噪声和振动		较 低	较 高	较 高
	负荷调节方式		移动滑阀 无级调节	改变工作缸数 分档调节	改变导叶角度 无级调节
生产制造和运行指标	变工况适应能力		最 好	较 好	较 好
	加工精度和加工成本		较 高	较 低	最 高
	对加工设备要求		最高(专用)	较 低	较 高
	压缩机带(制冷剂)液工作		少量允许	不允许	不允许
	制冷剂带油工作 (有无分离器)		允许(有)	不允许(有)	不允许(有)
	油中带制冷剂工作		少量油允许	允 许	不允许
	对润滑油质要求		较 高	较 高	最 高
	制冷剂泄漏 方式及制冷剂 压力等级	R22	高压，漏出	高压，漏出	高压，漏出
		R134a	中压，漏出	—	中压，漏出
		R123	—	—	低压，空气渗入
	机组易损件多少		最 少	最 多	较 少
	机组维修管理难易		最 易	较 易	较 易

续表

指标类别	比 较 项 目 产 品 类 别	螺杆式制冷机组	活塞式制冷机组	离心式制冷机组
产品选型指标	最佳使用冷量范围 (kW)	≤ 1160	< 580	> 1160
	冷/热供应方式	热 泵	热 泵	单 冷
	一次能源能效比 (OEER) ^①	1.16 (较佳)	1.12 (较差)	1.26 (最佳)
	二次能源能效比 (EER) ^② (kW/kW)	4.0 (较佳)	3.4 (较差)	4.4 (最佳)
	机组运行可靠性统计	较 高	较 低	最 高
	无故障运行周期	较 长	较 短	最 长
	机组使用寿命 ^③	较 长	较 短	最 长
	国产产品 (冷水机组) 单价比 (元/kW)	较高 (进口压缩机)	较高 (进口压缩机)	较 低
	运行费用 ^④ (年·月计)	较 低	较 高	最 低

①数据取自井上宇市《空气调节手册》。

②数据参照陆耀庆主编《实用供热空调设计手册》。

③“机组使用寿命”的定义是：用户所使用的产品在不更换主要零（部）件条件下，能够确保正常运行，并确保使用性能指标要求，所能维持的最长使用周期。产品的正常检修在允许之列。

④年供冷运行周期统计为 3000h。

第2章 空调用螺杆式压缩制冷循环的基本原理

2.1 空调用螺杆式压缩制冷循环和系统

众所周知，逆卡诺循环和热力学第二定律奠定了实现制冷循环的基本理论。热力学第二定律告诉我们，热量从一个较低温度的物体流向较高温度的物体是一种不能自发实现的过程。为了实现这一过程，必须同时采取补偿过程。在人工制冷过程中，所采取的补偿方式，因制冷剂和制冷设备的不同而分成蒸气压缩式、吸收式及蒸汽喷射式等制冷方法。

螺杆式压缩制冷循环属于蒸气压缩制冷循环（其他尚有活塞式、离心式、涡旋式等）之中一种。由于制冷剂在上述的设备中的压缩过程处于过热蒸气状态，故统称为蒸气压缩制冷循环。

螺杆式压缩制冷循环系统由螺杆式制冷压缩机、冷凝器、蒸发器及节流装置四大部件组成。空调用螺杆式压缩制冷系统一般采用单级螺杆式制冷压缩机，它属于回转式中的容积式制冷压缩机。其循环原理图如图 2.1-1。

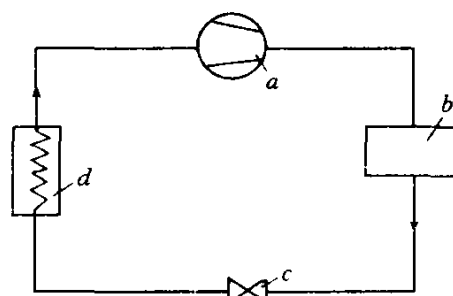


图 2.1-1 单级螺杆式压缩制冷循环原理图

a—单级螺杆式制冷压缩机；
b—冷凝器；c—节流阀；d—蒸发器

本节中先简要介绍制冷循环原理中的必备基本知识。

2.1.1 理想制冷循环

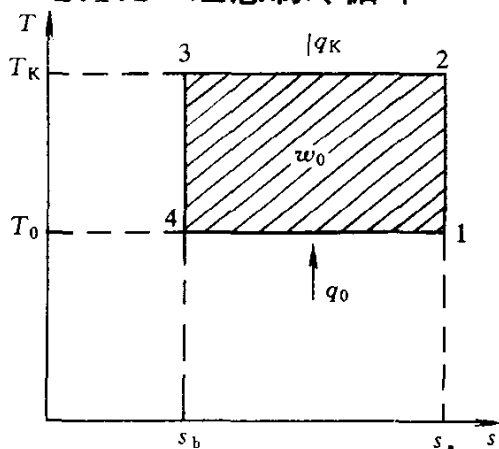


图 2.1-2 逆卡诺循环在 $T-s$ 图上的表示

- 1-2 为绝热压缩过程；
- 2-3 为等温放热过程；
- 3-4 为绝热膨胀过程；
- 4-1 为等温吸热过程。

1. 理想循环工作过程

能够获得最大制冷系数的制冷循环，称为理想制冷循环。其循环过程的方向与热机的理想卡诺循环过程的方向相反，故又称为逆卡诺循环（图 2.1-2）。了解逆卡诺循环，可用来判断实际制冷循环优劣的一种准绳。

应用热力学第二定律，描述为：在制冷循环中，为了将低温热源（ T_0 ）中吸取的热量（ q_0 ）连续地传向高温热源（ T_K ），必须从外界不断地加入该系统一定的能量，即循环功（ w_0 ）。这样，上述制冷循环方能连续进行下去。

连续制冷这种情况，与把低位水提高到高水位时，必须采用水泵对水施以外界能量的原理是相似的（图 2.1-3）。

图 2.1-2 的逆卡诺循环中可描述为：1kg 工质（制

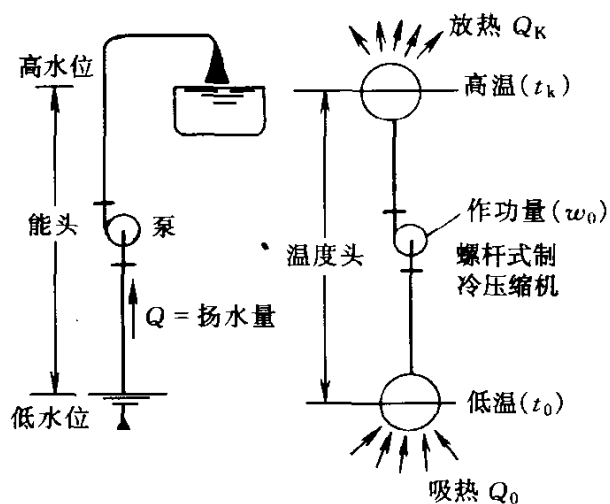


图 2.1-3 水泵与螺杆式制冷压缩机的类似作用

冷剂) 从低温热源吸取 q_0 的热量, 然后将它和所消耗的循环净功 w_0 所转换的热量, 一齐排给高温热源 (环境介质, 如空气), 它的热量为 q_k 。故, 单位质量工质的热平衡式为

$$q_k = q_0 + w_0 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.1-1)$$

对任意质量的工质 (制冷剂), 则式 (2.1-1) 写成

$$Q_k = Q_0 + w_0 \quad (\text{kJ}) \quad (2.1-2)$$

2. 逆卡诺循环的制冷系数与热力完善度

逆卡诺循环的制冷系数。如图 2.1-2 中, 制冷剂在蒸发过程 (4-1) 产生的制冷量 q_0 , 与压缩过程 (1-2) 所消耗功的热当量 w_0 之比, 称为

逆卡诺循环的理论制冷系数, 以符号 ϵ_0 表示。对每 1kg 制冷剂而言, 可表示成

$$\epsilon_0 = \frac{q_0}{w_0} \quad (2.1-3)$$

式中 q_0 ——每 1kg 制冷剂所制取的制冷量, kJ/kg;

w_0 ——压缩 1kg 制冷剂所消耗的循环净功, kJ/kg。

从工程热力学知道, 在图 2.1-2 上, 每一过程曲线下的面积大小即表示热量的多少。对制冷剂而言, 熵增加的过程 (4-1) 即为吸热过程, 熵减少的过程 (2-3) 即为放热过程。

在 4-1 过程中, 制冷剂的熵由 s_b 增加到 s_a , 过程曲线下的面积为 4-1- s_a - s_b -4, 所吸收热量为 q_0 (即单位制冷量):

$$q_0 = T_0(s_a - s_b)$$

在 2-3 过程中, 制冷剂所放出的热量 q_k 用过程曲线下的面积 2-3- s_b - s_a -2 表示, 则

$$q_k = T_K(s_a - s_b)$$

q_k 与 q_0 两者的差值用面积 1-2-3-4-1 表示, 即压缩 1kg 制冷剂所消耗的循环净功 w_0 为

$$w_0 = q_k - q_0 = (T_K - T_0)(s_a - s_b)$$

故逆卡诺循环的理论制冷系数 ϵ_0 可表示为

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{q_0}{w_0} = \frac{q_0}{q_k - q_0} = \frac{T_0(s_a - s_b)}{(T_K - T_0)(s_a - s_b)} \\ &= \frac{T_0}{T_K - T_0} \end{aligned} \quad (2.1-4)$$

式 (2.1-4) 所表达的制冷系数 ϵ_0 即为该理想循环中的最大制冷系数。

热力完善度。在实际制冷循环中, 制冷剂在蒸发器中的吸热过程 (4-1) 和在冷凝器中的放热过程 (2-3), 总是存在一定的传热温差; 在螺杆式制冷压缩机的压缩过程 (1-2), 存在机械摩擦、气动力学等的不可逆过程损失。在相同的高、低温热源温度情况下, 实际制冷循环的制冷系数 ϵ , 与逆卡诺循环的制冷系数 ϵ_0 之比称为热力完善度 η :

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.1-5)$$

制冷循环的热力完善度 η ，反映了实际制冷循环接近逆卡诺循环的程度。因此， η 也是实际制冷循环中的一个技术经济指标。

2.1.2 单级螺杆式压缩制冷的理论循环

1. 理论循环系统的组成及工作过程

如图 2.1-1 所示，单级螺杆式压缩制冷循环系统由单级螺杆式制冷压缩机、冷凝器、节流阀、蒸发器及其管道依次连接成一个封闭系统。其循环工作原理是：单级螺杆式制冷压缩机 a 将蒸发器 d 内产生的低压制冷剂蒸气吸入，经容积型的螺杆式（双螺杆或单螺杆）压缩，压力升高（包括温度）到稍大于冷凝压力时，将高压制冷剂蒸气排至冷凝器 b 。在冷凝器内，温度和压力较高的制冷剂蒸气与冷却介质（空气或水）进行热交换而冷凝成制冷剂液体。制冷剂液体经节流阀 c 节流降压（同时降温）后进入蒸发器 d 。在蒸发器 d 内，制冷剂液体吸收被冷却物体（水或空气）的热量而气化。被冷却物体又称为载冷剂（水或空气），以达到制冷的目的。制冷剂在压缩、冷凝、节流、蒸发四个工作过程中，产生压力、温度、相态等的循环变化，便完成了连续循环、连续制冷的任务。这就是空调用螺杆式制冷机组中所完成的封闭式制冷循环过程，称为单级螺杆式压缩蒸气制冷循环。双级或多级螺杆式压缩蒸气制冷循环仅用于制取低温载冷剂（如氯化钙、甲醇、乙二醇等水溶液），其温度范围是 $-5 \sim -40^\circ\text{C}$ ，在空调工程中，可担负蓄冰蓄冷的任务，但大多用于冷冻、冷藏工程中，不在本书讨论内容之中。

所谓“理论循环”，是指整个循环是在没有任何实际损失的条件下实现的。其假设条件是：①无传热温差；②制冷剂在压缩机中的压缩过程为可逆绝热过程，即等熵过程；③制冷剂在流动过程中无任何损耗，仅在节流膨胀过程存在压力下降。

显然上述假定条件是不符合实际循环的过程的，但这种简化的理论循环作为讨论实际循环的一种基点或参照点，是非常方便的。

理论循环的 $T-s$ 图和工作过程。

将理论循环过程表示在 $T-s$ 图上如图 2.1-4 所示。

上图中点 1 为螺杆式制冷压缩机的吸气状态。

1-2 为制冷剂在压缩机中的等熵压缩过程。在此过程中，制冷剂的压力由蒸发压力 p_0 升高至冷凝压力 p_k ，温度由蒸发温度 T_0 升高至压缩机的排气温度 T_2 ，此时制冷剂蒸气为 p_k 压力下的过热蒸气，以状态点 2 表示。

2-3 为制冷剂在冷凝器中的定压（ $p_k = \text{const}$ ）放热过程。其中 2-2' 为放出过热热量过程；2'-3 为放出气化热、凝结成饱和液体的过程。点 3 为制冷剂液体流出冷凝器进入节流阀的状态。

3-4 为制冷剂液体在节流阀中的节流过程。节流前后焓值不变，即 $h_4 = h_3$ ，但制冷剂压力由 p_k 降至 p_0 ，温度由 T_k 降至 T_0 ，并进入气液两相区，有部分液体制冷剂闪发成饱和蒸气。节流过程为不可逆过程（图 2.1-4 中以虚线表示）。点 4 为节流后制冷剂进入

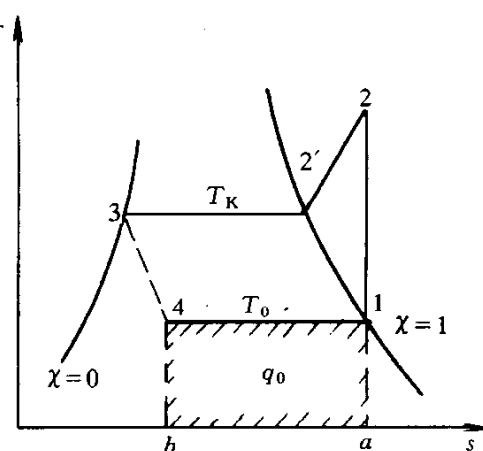


图 2.1-4 单级螺杆式压缩制冷理论循环的 $T-s$ 图和工作过程图

蒸发器时的状态。

4-1 为制冷剂在蒸发器中的定压气化过程。在此过程中，制冷剂温度 (T_0) 不变，利用制冷剂液体的沸腾气化吸收被冷却物质 (水或空气) 的热量，使被冷却物质温度降低，输送出去，达到制冷的目的。

2. 理论循环的热力计算

理论循环的热力计算是对制冷机进行分析和计算的基础。理论循环的热力分析与计算通常采用 $\lg p-h$ (压-焓) 图进行 (其他尚有 $h-s$ 和 $T-s$ 图)。该图的优点在于不仅可以简便地确定制冷剂的状态参数，并能用线段的长短来反映制冷循环中能量变化的多少。 $\lg p-h$ 图的结构如图 2.1-5 所示。

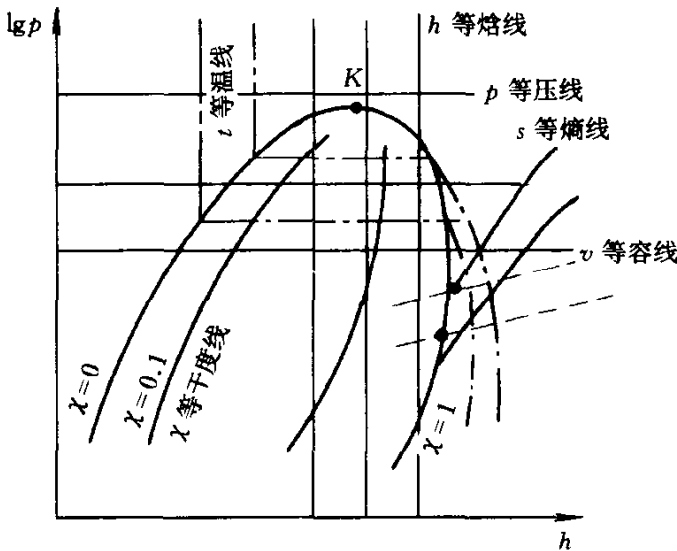


图 2.1-5 $\lg p-h$ 图的结构示意图

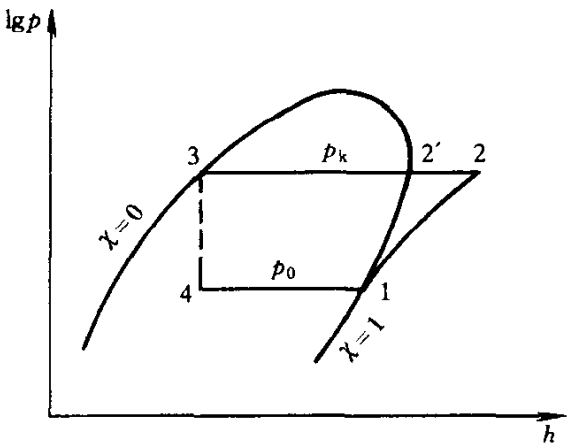


图 2.1-6 理论循环在 $\lg p-h$ (压-焓) 图上的表示

(1) 理论制冷循环过程在 $\lg p-h$ 图上的确定

首先在 $\lg p-h$ 图上确定循环过程各点的状态参数值，绘出循环过程，如图 2.1-6 所示。

点 1：为制冷剂蒸气进入压缩机的状态。如不考虑管路的冷量损失，则压缩机的吸气温度 t_1 即为蒸发器的蒸发温度 t_0 ($t_0 = t_1$)。在理论情况下，进入压缩机的制冷剂蒸气为饱和状态，即在 $\chi = 1$ 状态线上。若已知蒸发温度 t_0 ，便可从饱和蒸气表上查到其对应的饱和蒸发压力 p_0 ，便根据 p_0 为定值的等压线和 $\chi = 1$ 的等干度线的交点得出点 1。

1-2 过程线：为制冷剂在压缩机中的绝热压缩过程，该过程沿过点 1 的等熵线进行。

点 2：为制冷剂蒸气出压缩机的状态，即进入冷凝器的状态。点 2 可由已知的冷凝压力 p_k 为定值的等压线与 $s_1 = s_2$ 的等熵线的交点求得。

2-3 过程线：为制冷剂蒸气在冷凝器中由过热蒸气冷却并冷凝成饱和液体的过程。在此过程中，冷凝压力 p_k 保持不变，在冷却过程 (2-2') 中温度不断降低，在冷凝过程 (2'-3) 中冷凝温度 t_k 保持不变。

点 3：为制冷剂在冷凝器中凝结成饱和液体的状态。它由 p_k 为定值的等压线和 $\chi = 0$ 的等干线相交得到。

3-4 过程线：为制冷剂液体在节流阀中的节流过程。节流后制冷剂压力由 p_k 降至 p_0 ，温度由 t_k 降至 t_0 ，但节流前后的焓值不变，即 $h_3 = h_4$ 。