

节 能 与 环 境 保 护 丛 书

空调蓄冷 技术与设计

于 航 编 著



化学工业出版社



节 能 与 环 境 保 护 丛 书

强化传热技术

烟气热能梯级利用

蒸汽凝结水的回收及利用

建筑环境与建筑节能

热泵技术

城市垃圾的处理与利用技术

冷热电联产技术

热管技术

洁净燃烧技术

空调蓄冷技术与设计



www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

ISBN 978-7-122-00971-5



9 787122 009715 >

销售分类建议：能源 / 动力
定价：26.00元

节能与环境保护丛书

空调蓄冷技术与设计

于 航 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书为《节能与环境保护丛书》之一。本书系统阐述了空调蓄冷技术及其在工程中的应用。重点讲述了水蓄冷、冰蓄冷技术原理,较详细地分析了蓄冷装置特性,介绍了蓄冷空调系统的设计及运行控制方法。为了方便工程技术人员,书中还介绍了蓄冷装置的设计、选用、运行管理及维护保养等内容。此外,本书还介绍了相变材料及其在建筑物中的应用,特别是相变材料微胶囊的基本制备方法及其研究现状等。

本书内容丰富,通俗易懂,可以作为高等院校相关专业的教学参考书,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空调蓄冷技术与设计/于航编著. —北京:化学工业出版社,1905.6
(节能与环境保护丛书)
ISBN 978-7-122-00971-5

I. 空… II. 于… III. 空气调节器-制冷技术 IV. TM925.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第123149号

责任编辑:戴燕红

文字编辑:陈元

责任校对:李林

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张8 字数187千字 2007年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

序

为了全面建设小康社会、不断开创中国特色社会主义事业的新局面，必须大力推进科技进步和创新，进一步发挥科学技术对经济社会全面发展的关键性作用。要大力发展高新技术和先进适用技术。要大力加强能源领域的科技进步和创新，提高我国资源特别是能源和水资源的使用率，减少资源浪费。要大力加强生态、环境领域的科技进步和创新，降低污染物的排放，加强对废弃物的再次利用，发展循环经济。这些都是中央当前对我国广大科技人员提出的殷切希望和要求。

我国虽然资源不少，但人口众多，人均能源资源十分有限。人均化石燃料仅为世界均值的56%，石油天然气人均可采储量仅为世界均值的8%。水力资源可开发量虽达3.79亿千瓦，但人均不到0.3千瓦。且一次能源消耗中主要为煤炭，约占总能源消耗的70%，即使到2050年，煤炭耗量预计也将占一次能源总耗量的50%，因此环境污染严重。我国三分之一以上国土受到酸雨危害，如不采取措施，二氧化碳排放量预计将从2000年占全球总量的12.7%增加到2020年的16.7%。此外，空气中的粉尘、二氧化硫和氮氧化物的污染也很严重。因此，加强节能、提高能源利用率和改善能量利用中的环境保护已成为我国经济持续发展中的一个重要课题。

随着我国国民经济发展和人民生活水平的提高，家用电器的大量使用和建筑业的迅速发展不仅使能耗进一步增大，并且引起新的环境保护问题。

为了促进和推动节能工作，改善能量利用中的环境保护，特编辑出版了这一套丛书。这套丛书共10本，书名分别为：《强化传热技术》，《烟气热能的梯级利用》，《蒸汽凝结水的回收及利用》，《建筑环境与建筑节能》，《热泵技术》，《城市垃圾的处理与利用技术》，《冷热电联产技术》，《热管技术》，《空调蓄冷技术与设计》和《洁净燃烧技术》。每本著作均由知名专家根据国内外近期科研成果和工程实践执笔编著，可供大专院校师生、科研院所和工矿企业相关科技人员应用和参考。希望这套丛书能对我国的节能和环保事业的发展有所裨益。

中国工程院院士 林宗虎

前 言

能源和环境问题已经成为当今世界经济发展中的焦点问题之一。中国传统的以煤炭为主的能源结构决定了能源消费活动要排放大量污染物，造成城市环境质量恶化。中国目前发电设施的70%以上是使用煤炭的火力发电，不仅环境压力巨大，近年来电煤供需矛盾也十分突出。2004年国家发改委和电监会联合发布了《加强电力需求侧管理工作的指导意见》，要求“大力推广蓄能，包括蓄冷、蓄热等转移负荷类技术措施”。

空调蓄能技术是在夜间电力负荷低时，采用电制冷机制冷，并将冷量储存起来，在白天电力负荷较高时，即用电高峰期，把储存的冷量释放出来，满足建筑物空调或生产工艺的需要。20世纪70年代，世界范围的能源危机促使空调蓄冷技术成为电力负荷调峰的重要手段，目前在许多国家和地区均得到广泛应用。

我国20世纪70年代开始在体育馆建筑中采用水蓄冷空调技术，90年代在一些工程中应用冰蓄冷空调技术，目前，空调蓄冷技术已分布于全国20多个省市。但是，从总体上来看，无论工程数量和技术水平方面与美国、日本等发达国家都还存在差距，设计单位和用户对蓄冷技术尚缺乏系统的了解和运行管理经验。因此，迫切需要及时总结空调蓄冷技术在我国应用的经验或教训，增强政策扶持力度，使之在我国的经济发展中发挥出更大的作用。

为了配合高等院校相关专业的教学和工程技术人员实际工作的需要，我们编著了《空调蓄冷技术与设计》一书。参加本书编写工作的还有邓育涌、刘淑娟、李祎曦、王小林等。在本书的编写过程中，得到同济大学空气调节及燃气研究所诸位教授的关心与指导，还得到设计院和企业同行的支持并提供资料，在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平和时间的限制，书中疏漏及不当之处敬请广大读者批评指正。

作者

2007年8月于同济大学

目 录

1 绪论	1	6.3 动态制冰蓄冰装置.....	69
1.1 清洁能源与环境协调型能源系统.....	1	6.4 工程应用举例.....	71
1.2 电力供需状况和电力需求侧管理.....	2	6.5 低温送风系统.....	75
1.3 蓄冷技术的发展与现状.....	2	7 蓄冷系统运行及控制策略	78
1.4 蓄冷空调系统的组成和特点.....	4	7.1 蓄冷系统的运行策略.....	78
2 蓄冷技术基础	6	7.2 蓄冷系统的控制策略.....	80
2.1 热力学基本概念.....	6	7.3 流程配置.....	81
2.2 传热学基本概念.....	7	8 自动控制和优化控制方法	84
2.3 流体力学基本概念.....	9	8.1 蓄冷自动控制系统的构成.....	84
2.4 蓄冷介质与蓄冷方式.....	10	8.2 蓄冷系统自动控制的主要内容.....	85
2.5 制冷剂 and 载冷剂.....	11	8.3 优化控制方法.....	88
2.6 蓄冷空调系统的冷负荷分布图.....	12	9 制冷设备及系统调试	91
3 水蓄冷系统概要	14	9.1 制冷机组的选择.....	91
3.1 概述.....	14	9.2 板式热交换器.....	94
3.2 混合型水蓄冷槽.....	16	9.3 水泵的设置及选用.....	96
3.3 温度分层型水蓄冷槽.....	18	9.4 系统调试.....	98
3.4 槽内水的混合特性.....	20	9.5 蓄冷系统的维护和保养.....	101
3.5 相关定义.....	23	10 相变蓄能技术	103
4 水蓄冷系统设计	25	10.1 相变材料的筛选.....	103
4.1 多槽混合型水蓄冷装置的设计.....	25	10.2 相变材料的工作性能.....	104
4.2 温度分层型水蓄冷槽的设计.....	28	10.3 相变材料微胶囊.....	105
4.3 布水器设计.....	29	10.4 定形相变材料.....	107
4.4 水蓄冷槽设计.....	32	10.5 相变材料在建筑中的应用.....	107
4.5 隔热保温和防水设计.....	33	参考文献	111
4.6 与空调系统的连接方式.....	34	附录	113
4.7 工程应用举例.....	36	附录 1 我国已建成和在建水蓄冷工程	
5 冰蓄冷技术概要	42	项目.....	113
5.1 冰蓄冷装置的种类和特点.....	42	附录 2 乙二醇水溶液密度表.....	114
5.2 制冰和融冰.....	42	附录 3 乙二醇水溶液凝固点和沸点表.....	115
5.3 有关概念.....	48	附录 4 乙二醇水溶液比热容表.....	115
5.4 蓄冰槽的热力特性分析.....	49	附录 5 乙二醇水溶液热导率表.....	115
5.5 制冰量测定.....	52	附录 6 乙二醇水溶液动力黏度表.....	116
5.6 乙二醇水溶液.....	53	附录 7 乙二醇水溶液的热物理性质表.....	116
6 冰蓄冷装置及工程应用	61	附录 8 水和乙二醇水溶液 (25%) 的物	
6.1 盘管蓄冰装置.....	61	理性性质表.....	117
6.2 封装冰蓄冰装置.....	66		

1 绪 论

能源和环境问题已经成为当今世界经济发展中的焦点问题之一。中国传统的以煤炭为主的能源结构决定了能源消费活动要排放大量污染物，造成城市环境质量恶化，不仅带来经济运行成本的增加，而且严重威胁人民群众的身体健康。2001年世界银行发展报告列举的世界污染最严重的20个城市中，中国占了16个。能源活动对环境与健康的影响将是未来中国社会和经济发展的突出问题之一，能源与环境可持续发展问题将对中国经济发展产生深远影响。

1.1 清洁能源与环境协调型能源系统

走经济、社会、环境相互协调的可持续发展道路，以人为本、加强环境保护和生态建设，是中国实现全面小康目标的重要组成部分。能源环境战略将从两个方面影响能源的发展方向：其一是环境因素会极大地影响终端能源需求的发展变化，在城市化进程中，环境保护要求终端能源清洁化，这将引起能源技术和一次能源供应结构的转变；另一方面，要求解决能源生产、转换、消费过程中的环境保护和社会问题，中国可持续发展的能源环境战略对煤炭生产的污染排放、水资源和土地资源破坏等问题提出严峻挑战。《中国能源发展报告》中指出，解决中国能源环境问题的指导思想是：从国情出发，以能源和环境的协调发展为主线，坚持不懈地全面推进中国能源可持续发展战略，建立清洁、高效、有利于环保的能源系统，在能源开发和利用的各个方面制定并完善有利于改善生态和环境的法规、技术与经济政策，切实落实并加快污染治理设施和生态环境保护项目建设，采取多种手段有效解决能源环境问题。

到目前为止，化石能源——煤炭、石油和天然气仍然是世界能源的三大支柱，它们在推动经济发展和社会进步的同时，也日益显著地威胁着人类社会的安全和发展，迫使人们寻求新的、可持续使用的、不危害环境的能源。开发利用新能源和可再生能源，是能源可持续发展战略的必然选择。可再生能源包括太阳能、风能、水能、生物质能、地热能和海洋能（潮汐能、波浪能、温差能）等多种形式。

我国新能源和可再生能源资源丰富。据统计，水能理论蕴藏量6.76亿千瓦，技术可开发资源量3.79亿千瓦，经济可开发资源量2.90亿千瓦；风能理论储量32.26亿千瓦，可开发2.53亿千瓦；太阳能年辐射总量大于502万kJ/m²，年日照时数在2200h以上的地区约占中国国土面积的2/3以上；地热资源远景储量相当于2000亿吨标（准）煤以上，地热水可采资源量18.54亿吨标（准）煤；农作物秸秆产量每年约7亿吨，可用作能源的约为2.8~3.5亿吨；生物质能还包括城市垃圾，年产量1.2亿吨，并以每年8%的速度增长；可开发潮汐能21.8GW，波浪能12.9GW，潮流能14GW，温差能1320~1480GW。

新能源和可再生能源利用技术包括两大类：电利用技术和热利用技术。电利用技术有水电、风电、光伏发电、地热发电、生物质能发电和潮汐发电等。热利用技术有被动式太阳房、地热采暖、沼气等。

1.2 电力供需状况和电力需求侧管理

“十五”期间，国家调整了电力投资规划，加大电力投资力度，新增装机 2 亿多千瓦，2005 年新开工电站规模超过 1 亿千瓦。截止 2005 年 9 月底，全国发电装机容量已达到 4.8 亿千瓦。2005 年 1~9 月份，全国发电总量 17739.83 亿千瓦时，比 2004 年同期增长 13.4%，其中，水电 2736.03 亿千瓦时，同比增长 21%，火电 14505.93 亿千瓦时，同比增长 12.2%，核电 405.73 亿千瓦时，同比增长 9.7%。中国目前发电设施的 70% 以上是使用煤炭的火力发电，环境压力巨大，电煤供需矛盾突出。水电项目虽然具有成本低，不排放有害气体、烟尘和灰渣，属清洁能源等优点，但是建设周期长、一次性投资大，火电的建设周期一般为 3 年，而水电则需要 5~7 年。按单位造价测算，30~60 万千瓦的国产火电机组每千瓦 6000 元左右，水电每千瓦 7000~10000 元。另外，水电发电量受自然条件和季节性影响较大。

连续大规模发电项目的投产，缓解了电力供应紧张局面，但是区域性、季节性、时段性缺电的特点愈发明显，矛盾仍然突出。电力供需矛盾逐渐由持续性、全国性缺电转变为区域性、季节性、时段性缺电，特别是空调用电所占比重越来越大，加剧了尖峰期的电力供需矛盾。我国自 20 世纪 90 年代初从美国引进电力需求侧管理 DSM(demand side management) 和综合资源规划的理论，经过十多年的实践，在削峰填谷方面起到了重要作用，但由于在制度、资金、技术等方面都尚未建立长效机制，需求侧管理方面还有较大潜力可挖。为了缓解部分地区电力紧张的矛盾，2004 年国家发改委和电监会联合发布了《加强电力需求侧管理工作的指导意见》，指出：“电力需求侧管理，是指通过采取有效的激励和强制措施，引导电力用户改变用电方式，提高终端用电效率，优化资源配置，改善和保护环境，实现最小成本电力服务所进行的用电管理活动，是由政府主导，行业协会协助，监管机构监督，电力企业、电力用户和能源中介组织积极参与，促进电力工业与国民经济、社会协调发展的一项系统工程。”“制定积极的经济激励政策，引导用户移峰填谷、合理用电。”“制定电力需求侧管理错峰方案，按照‘先错峰、后避峰、再限电’的实施原则，采取科学、合理、有效措施，实现有序用电、有序限电。”《指导意见》要求“大力推广蓄能，包括蓄冷、蓄热等转移负荷类技术措施”。

1.3 蓄冷技术的发展与现状

空调蓄能技术是在电力负荷低的夜间，采用电制冷机制冷，并将冷量储存起来，在电力负荷较高的白天，即用电高峰期，把储存的冷量释放出来，满足建筑物空调或生产工艺的需要。最早的蓄冷空调出现在 20 世纪 30 年代，当时“蓄冷”是为了节省设备投资而设法减少制冷机容量。20 世纪 70 年代，世界范围的能源危机促使蓄冷技术作为电力负荷的调峰手段应用于空调。目前在许多国家和地区均得到广泛应用。

20 世纪 30 年代，美国的一些教堂、剧场、乳制品厂等用冷时间短、负荷集中的场所就已经使用天然的冰蓄冷进行供冷。70 年代初期，由于能源危机的出现，美国开始研究蓄冷技术并制定了发展规划。40 多家电力公司实行奖励措施鼓励用户使用蓄冷技术进行移峰填谷，制定分时计费的电价结构，对采用蓄冷技术的用户给予资助或奖励，数十家企业为用户

提供蓄冷技术产品，初步形成了蓄冷技术市场。1986年在美国圣地亚哥州立大学建立了能源工程研究所（Energy Engineering Institute），1990年起，开始对蓄冷系统的优化设计、控制和计算机模拟以及节能问题进行研究。1990年5月开始的一项三年计划进一步推动了冰蓄冷空调技术的发展，同时成立了国际蓄热咨询委员会（International Thermal Storage Advisory Council, ITSAC）和蓄热应用研究中心（Thermal Storage Application Research Center, TSARC）。美国电力研究院（EPRI）和美国采暖制冷空调工程师协会（American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE）先后出版了《商业蓄冷设计指南》（Commercial Cool Storage Design Guide, 1987）和《蓄冷设计指南》（Design Guide for Cool Thermal Storage, 1993），为蓄冷系统应用提供技术指导。

蓄冷工程项目快速增长。ASHRAE的一项调查表明，20世纪90年代初期美国已建成大约1500~2000个蓄冷系统，其中80%~85%采用冰蓄冷方式，另外10%~15%采用水蓄冷方式，其余采用共晶盐蓄冷系统。这些蓄冷系统主要应用于写字楼、学校、零售商店、教堂、冷库、医院等。冰蓄冷系统大部分应用在相对较小的建筑物中，与其他蓄冷方式比较，每千瓦时制冷成本最高。近几年，水蓄冷系统正朝着大型化发展，出现了超大型水蓄冷空调系统。据美国电力研究院（EPRI）估计，1992年蓄冷系统为美国削减峰值电力负荷300MW。

日本在1990年以前主要发展水蓄冷和水蓄热技术。1938年，在东京的东日会馆设置了水蓄冷槽。1956年，东京海上火灾保险公司在日本建成第一个水蓄冷空调系统。1966年，日本NHK广播中心建成9000m³的水蓄冷槽空调系统。1981年，鹿岛建设四国支社建成了第一个冰蓄冷空调系统。1990年以后冰蓄冷空调系统在日本大中城市发展迅速，约有30多家公司的40余种冰蓄冷装置和系统进入市场。日本政府对蓄冷空调的鼓励体现在税收和融资利率方面，采取的措施有：电价优惠措施、蓄冷空调系统奖励制度、蓄冷空调系统的租赁制度。1984年各电力公司开始实施夜间蓄热调整契约和昼夜电价制度。20世纪90年代，日本把节能和负荷平均化措施作为基本国策加以确定，鼓励和促进蓄能空调技术的发展。1997年4月，日本通产省将所属财团法人“日本热泵中心”更名为“日本热泵·蓄热中心”，一方面加强对蓄冷工作的指导，另一方面促进蓄冷空调系统的发展。在这些优惠措施和激励制度的影响下，蓄冷空调工程项目增长迅速。根据不完全统计，至1990年日本国内水蓄冷工程项目累计1246个，冰蓄冷项目累计209个，而到2001年，水蓄冷项目达2474个，冰蓄

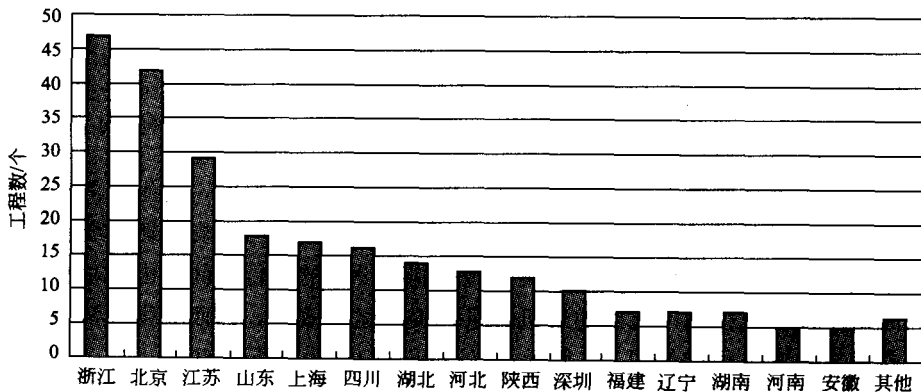


图 1-1 冰蓄冷工程在我国部分省市的分布情况

冷项目达 1849 个，呈快速增长趋势。

我国 20 世纪 70 年代在体育馆建筑中采用了水蓄冷空调系统。90 年代开始在一些工程中的应用逐渐增加。1993 年 5 月建成投入运行的深圳电子科技大厦采用法国 Cristopia 冰球蓄冷系统，是我国大陆第一幢采用冰蓄冷空调技术的高层建筑。目前，蓄冷技术已在全国 20 多个地区推广应用，各地区蓄冷系统项目分布见图 1-1(截至 2003 年的不完全统计)。但是，从总体上来看，无论数量和技术方面与美国、日本等国家都还存在差距，设计单位和用户对蓄冷技术尚缺乏系统的了解和运行管理经验，因此迫切需要及时总结空调蓄冷技术在我国的应用情况，增大扶持和推广力度，使之在我国的经济发展中发挥出更大的作用。

1.4 蓄冷空调系统的组成和特点

空气调节的任务是采用技术手段创造并保持满足一定要求的空气环境。常规空调系统由空调冷热源、空气处理、输送与分配及自动控制和调节等部分组成，如图 1-2 所示。

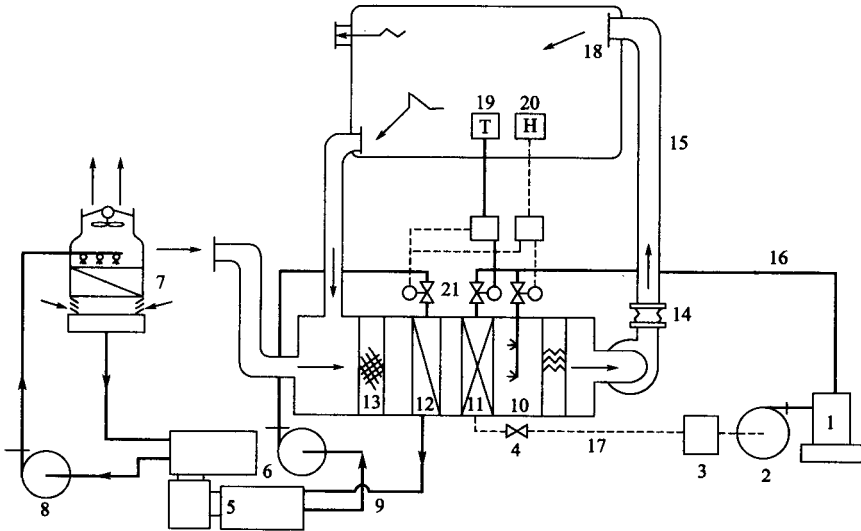


图 1-2 常规空调系统图

冷热源系统：1—锅炉；2—给水泵；3—回水过滤器；4—疏水器；5—制冷机组；

6—冷水循环泵；7—冷却塔；8—冷却水循环泵；9—冷水管系

空气处理系统：10—空气加湿器；11—空气加热器；12—空气冷却器；13—空气过滤器

空气能量输送与分配系统：14—风机；15—送风管道；16—蒸汽管；17—凝水管；18—空气分配器

自动控制系统：19—温度控制器；20—湿度控制器；21—冷、热能量自动调节阀

空调蓄冷技术就是在电力负荷的低谷期，采用电动制冷机制冷，将生产的冷量储存在蓄冷介质中，在空调时段释放出来满足空调或生产工艺的需要。与常规空调系统比较，蓄冷空调增加的蓄冷装置作为一种缓冲装置，实现转移制冷设备的运行时间、电力负荷移峰填谷等目的，同时由于能够减少制冷机组的装机容量、提高运行效率，因而获得经济效益。

蓄冷空调系统基本构成如图 1-3 所示，优点可以归纳为以下几点。

(1) 实现电力负荷的移峰填谷

蓄冷系统通过转移制冷设备的运行时间，充分利用夜间低谷电力，减少白天峰值用电

量，成为电力移峰填谷最有潜力的途径，兼具经济效益和社会效益。

(2) 减小空调冷热源设备的安装容量

诸如体育场馆、影剧院、音乐厅等使用时间短暂、负荷集中而且非常大的场合，常规空调的设备容量必须与负荷相对应，导致投资大量增加。采用蓄冷技术是解决这一问题的有效办法。由于蓄冷空调系统将一部分（或全部）冷量储存在蓄冷装置中，所需的制冷机组安装容量可在不同程度上有所减少。特别是当冰蓄冷空调系统采用低温送风系统时，风机和水泵等容量也随之减小。减小设备安装容量还有利于减小电力增容和节省设备安装场地。

(3) 作为备用冷源在供电不足的情况下满足建筑物的空调要求。

(4) 扩大原有空调系统的供冷能力。

(5) 采用风冷热泵型制冷机组的蓄冷系统，由于夜间环境温度降低，冷凝温度下降，制冷机组的性能系数（COP）提高。

蓄冷空调系统适用于以下场合：

(1) 使用时间内空调负荷大、其余时间内空调负荷小的场所，如办公楼、学校、银行、百货商场、宾馆、饭店等；

(2) 周期性使用、空调时间短、空调负荷大的场所，如影剧院、体育馆、大会堂、教堂、餐厅等；

(3) 空调负荷变化大、需要减少高峰负荷用电的场所，如某些工厂、企业等；

(4) 作为特殊工程的应急备用冷源；

(5) 空调负荷变化在一天内变化不大，但绝对值较大的场所。

蓄冷空调系统也存在一些缺点，如制冰工况蒸发温度降低导致制冷机组的性能系数降低，制冷能力下降；蓄冷设备除增加投资外，还必须占用一定的空间。

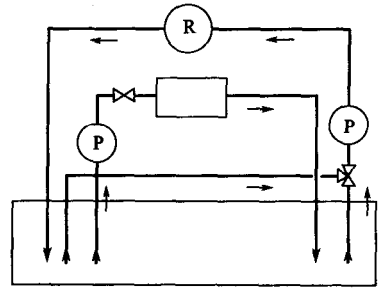


图 1-3 蓄冷空调系统基本构成

2 蓄冷技术基础

广义地说，蓄能技术就是将化学能、水能、热能、电能等不同形式的能根据需要储存起来，在需要时释放出来提供使用的技术。以空调为目的的热能储存及利用技术包括蓄热和蓄冷技术，本书以蓄冷技术作为讨论的对象。蓄冷系统可以看作空调冷热源的组成部分，利用蓄冷装置实现制冷设备运行时间与用冷时间分开，使制冷装置配置及运行更加合理，实现电力削峰填谷，均衡用电负荷。蓄冷技术涉及热力学、传热学、流体力学、材料科学等方面的综合知识，经过半个多世纪的研究取得了很大进展，但是仍有不少重要问题至今尚未解决。

2.1 热力学基本概念

2.1.1 温度

温度表示物质内部大量分子热运动的强烈程度，是确定物质状态的基本参数之一。温度的度量采用热力学温度，物理符号为 T ，单位为开尔文 (K)。水的三相点（冰、水和水蒸气三相平衡共存状态）的温度为 273.16K。与热力学温度并用的还有摄氏温度，物理符号为 t ，单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)。摄氏温度每 1°C 与热力学温度 1K 是相等的，但两种温度的起始点不同，摄氏温度规定标准大气压下水的冰点为 0°C ，其热力学温度则为 273.15K。热力学温度 T 和摄氏温度 t 之间的换算关系为

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (2-1)$$

2.1.2 热量

当热力系统与外界之间存在温差时，系统通过边界与外界之间相互传递的非功形式能量，称为热量。热力学中规定：当热力系统吸热时，热量取正值；放热时取负值。热量用 Q 表示，单位为焦耳 (J) 或千焦耳 (kJ)。

2.1.3 比热容

比热容又分为质量热容、体积热容和摩尔热容。

质量热容（又称比热容）是单位质量工质在温度每变化 1K 时所吸收或放出的热量，用符号 c 表示，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

体积热容表示单位体积的工质温度每变化 1K 时吸收或放出的热量，用符号 c_v 表示，单位为 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

摩尔热容表示单位摩尔工质温度每变化 1K 所吸收或放出的热量，用符号 c_m 表示，单位为 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

c 、 c_v 、 c_m 三者之间的换算关系为

$$c_v = c\rho_0 = c_m/22.4 \quad (2-2)$$

式中 ρ_0 ——气体在标准状态下的密度， kg/m^3 。

一般在工程中，当温度变化不大或对计算要求不十分严格时，可不考虑比热容随温度的变化，将热容当作常数，即定值比热容。

质量为 m 的物质从温度 t_1 加热到 t_2 所需热量为

$$Q = mc(t_2 - t_1) \quad (2-3)$$

2.1.4 物质的存在状态和相变

自然界的常见物质以三种状态存在，即气态、液态和固态。

气态：既没有一定形状，也没有一定体积的物体。分子处于不规则运动状态，能均匀地充满整个容器，很容易被压缩。

液态：具有一定的体积，但没有一定的形状，不容易被压缩，能够流动的物体。分子较气态密集，分子间具有相对位移的趋势，具有自由界面。

固态：有固定的形状和体积，不能流动的物体。分子按一定规则周期性、对称性地排列。

物质的三种状态在一定条件下可以相互转化。气体变成液体的过程称为冷凝（或液化）；液体变成固体的过程称为凝固；固体变成液体的过程称为融解，液体变成气体的过程称为气化；固体直接变成气体的过程称为升华，反之称为凝华。物质在状态变化过程中，伴随着吸热或放热现象。

2.2 传热学基本概念

自然界中热量的传递有三种方式，即导热、对流换热和辐射换热。

2.2.1 导热

导热又称热传导。温度不同的物体直接接触或同一物体内部不同温度的各部分之间依靠物质的分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而引起的一种能量传递现象，称为导热。各向同性的介质中，任意点的热流沿着温度降低方向传递。傅立叶定律指出：单位时间内传递的热量，与温度梯度及垂直于导热方向的截面积成正比，即

$$Q = -\lambda A \text{grad} T \quad (2-4)$$

式中 Q ——热流量，J；

λ ——热导率，W/(m·K)；

A ——导热面积，m²。

热导率 λ 是物体中单位温度梯度、单位时间内通过单位面积的热量，它表征物体导热能力的大小。热导率由实验测定，一些常用物质的热导率见表 2-1。一般金属的热导率最大，

表 2-1 273K 时常用物质的热导率 λ

物质名称	热导率/[W/(m·K)]	物质名称	热导率/[W/(m·K)]	物质名称	热导率/[W/(m·K)]
银	427	石英	19.1	软木板	0.044~0.079
碳钢	45	大理石	2.78	膨胀蛭石	0.051~0.07
镍铬钢	17	红砖	0.7~0.8	石棉板	0.10~0.14
黄铜	109	水泥	0.3	木丝纤维板	0.048
纯铜	387	黄沙	0.28~0.34	棉花	0.049
铁	73	冰	2.22	聚氯乙烯泡沫	0.041~0.048
铝	204	新霜层	0.106	聚苯乙烯泡沫	0.043~0.056
锡	66	老霜层	0.489	水	0.552
铅	35	玻璃	0.794	空气	0.0243
锌	113	玻璃棉	0.036	氢气	0.175

液体次之，气体最小。热导率小于 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的材料可用作工程上的绝热保温材料。

2.2.2 对流换热

对流是流动的流体与固体壁面直接接触，当两者温度不同时相互间所发生的热量传递过程。对流换热的基本公式为

$$Q = \alpha A (t_f - t_w) \quad (2-5)$$

或

$$q = \alpha (t_f - t_w) \quad (2-6)$$

$$\alpha = \frac{q}{t_f - t_w} \quad (2-7)$$

式中 α ——表面传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；

Q ——换热量， W ；

q ——单位面积换热量， W/m^2 ；

t_f ——流体温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_w ——壁面温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

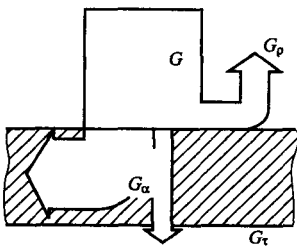


图 2-1 物体对热辐射的反射、吸收和穿透

α 是表征对流换热强度的量，等于流体与壁面温差为 1°C 时每单位时间、单位壁面积的对流换热量。

2.2.3 辐射换热

热辐射是物体因其本身温度而发射电磁波传递能量的现象。任何物体在向外发射辐射能的同时，还不断地吸收周围其他物体发出的辐射能，并转换成热能。辐射换热是指物体之间相互辐射和吸收的总效果。

当热辐射投射到物体表面上时，有吸收、反射和透射现象发生，如图 2-1 所示，投射到物体表面上的辐射总能量为

G ，吸收部分为 G_a ，反射部分为 G_p ，穿透部分为 G_t 。根据能量守恒定律有：

$$G = G_a + G_p + G_t$$

或

$$\frac{G_a}{G} + \frac{G_p}{G} + \frac{G_t}{G} = 1 \quad (2-8)$$

式中 α ——物体的吸收率， $\alpha=1$ ，黑体；

ρ ——物体的发射率， $\rho=1$ ，白体；

τ ——物体的穿透率， $\tau=1$ ，绝对透热体。

2.2.4 传热过程和传质过程

(1) 传热

热量经固体壁面由高温流体传给低温流体，称为传热过程。例如室外空气经墙壁散热给室内空气、表面冷却器的传热，制冷装置中蒸发器的吸热和冷凝器的放热，以及管道热损失等都是传热过程。

(2) 传质

质交换有两种基本方式：分子扩散和对流扩散。在静止的流体或垂直于浓度梯度方向作层流运动的流体，以及固体中的扩散，是由微观分子运动所引起，称为分子扩散，它的机理类似于导热；在流体中由于对流运动引起的物质传递，称为对流扩散；当流体既作对流运动又存在浓度差时，则对流扩散和分子扩散同时存在，称为对流质交换，与对流换热机理类似。

2.3 流体力学基本概念

液体和气体，统称为流体。流体力学研究流体静止和运动的力学规律及其在工程技术中的应用。供热工程、空气调节、工业通风等均以流体为工作介质，通过对流体流动有效地加以组织来实现环境控制目的。

2.3.1 流体的性质

流体具有流动性、连续性、压缩性、膨胀性、黏滞性等特征。流体的流动性是它与固体的根本区别。流体具有流动性，没有固定的形状，随其容器形状的不同而改变。液体形状随着容器改变时其体积不发生变化，气体总是充满整个容器，其体积随容器的体积而改变。流体的流动性使它便于用管道进行输送，这是它适合用作供热、供冷工作介质的主要原因。流体受压力作用时体积缩小、密度增大的性质称为流体的压缩性。流体随着温度的升高体积膨胀、密度减小的性质称为流体的膨胀性。流体内部质点间或层流间，由于相对运动而产生内摩擦力，阻止其相对运动的性质，称为流体的黏滞性。

2.3.2 流态和阻力

流体的流动可以分为层流和湍流、均匀流和非均匀流等。当流体质点无横向运动、沿着流动轴线在各自的流层中做无相互混杂的直线运动的流动状态称为层流。当流体质点处于无规则运动时称为湍流。

流线相互平行，过流断面上流速分布沿程不变的流动称为均匀流，反之为非均匀流。均匀流出现在过流断面大小、形状及壁面粗糙度沿程不变的长直管道，非均匀流出现在断面收缩或扩大、管道转弯等处。

流体流动存在阻力，克服流动阻力需要消耗机械能，该机械能转化为热能，成为能量损失。流动阻力由沿程阻力和局部阻力两部分组成。沿程阻力是流体与壁面、流体相互之间存在摩擦产生的；局部阻力是由于流动断面大小变化、流动方向改变以及流经局部装置，如阀门、过滤网等阻碍而造成的。流体流动的总能量损失为：

$$H_w = \sum H_f + \sum H_m \quad (2-9)$$

沿程阻力损失：

$$H_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (2-10)$$

局部阻力损失：

$$H_m = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (2-11)$$

式中 l ——管长，m；

d ——管径，m；

u ——管断面平均流速，m/s；

g ——重力加速度，m/s²；

λ ——沿程阻力系数；

ζ ——局部阻力系数。

2.3.3 与蓄冷技术有关的相似特征数

相似特征数描述流体在黏性力、压力、重力、惯性力、弹性力等作用下的动力学特征，与蓄冷技术有关的相似特征数包括雷诺数、弗劳德数、理查德数和阿基米德数等。

(1) 雷诺数 (Re)

雷诺数是黏性力的相似特征数，是流体惯性力和黏性力的比值。

$$Re = \frac{ud\rho}{\mu} = \frac{ud}{\nu} \quad (2-12)$$

式中 ρ ——流体密度， kg/m^3 ；
 ν ——运动黏滞系数， m^2/s ；
 μ ——动力黏滞系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

Re 数越大，流动越容易成湍流； Re 数越小，越不容易成为湍流。对应于临界流速的雷诺数称为临界雷诺数 Re_k ，其值约为 2300。

当 $Re < 2300$ 时，流动处于层流区。

当 $2300 \leq Re < 4000$ 时，流动处于层流向湍流转变的过渡区。

当 $Re > 4000$ 时，流动处于湍流区。

(2) 弗劳德数 (Fr)

弗劳德数是流体惯性力与重力的比值。

$$Fr = \frac{u^2}{gl} \quad (2-13)$$

当 $Fr \leq 1$ ，浮力大于惯性力，形成重力流；

当 $1 \leq Fr \leq 2$ ，重力流依然可以维持；

当 $Fr > 2$ ，惯性流占主导作用，惯性力增大会产生明显的混合现象。

(3) 理查森数 (Ri)

在蓄冷过程中，不同的蓄冷温差表示水槽内冷温水的密度差异可以用理查森数来表示。

$$Ri = \frac{g\beta\Delta TL}{u^2} \quad (2-14)$$

式中 β ——流体的体积膨胀系数， K^{-1} ；水的体积膨胀系数见表 2-2；
 ΔT ——蓄冷温差， $^{\circ}\text{C}$ 。

表 2-2 水在标准大气压下的膨胀系数

温度/ K	1~10	10~20	40~50
β	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}

(4) 阿基米德数 (Ar)

$$Ar = \frac{gd\Delta T}{u^2 T} \quad (2-15)$$

式中各参数意义同上。

2.4 蓄冷介质与蓄冷方式

2.4.1 蓄冷介质

蓄冷介质是用来蓄存冷量的物质。常用的蓄冷介质有水、冰和相变材料，不同蓄冷介质的单位体积蓄冷量不同，蓄冷温度也不同。水的比热容为 $4.18\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，以水为蓄冷介质时蓄冷量取决于蓄冷槽的进、出水温差，一般为 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ ，增加进、出水温差能够增大蓄冷量和蓄冷槽的利用程度。冰融化成水的潜热为 $335\text{kJ}/\text{kg}$ ，以冰为蓄冷介质时蓄冷量取决于蓄冰槽内冰与水的比例。冰蓄冷可以获得较低的出水温度，获得较大的温差。具有热能储