

“十二五”国家重点图书
新能源与建筑一体化技术丛书

蓄冷技术与系统设计

Thermal Energy Storage: Technologies and System Design



赵庆珠 ○ 等著

“十二五”国家重点图书
新能源与建筑一体化技术丛书

蓄冷技术与系统设计

赵庆珠 等著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

蓄冷技术与系统设计 / 赵庆珠等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 5
(“十二五”国家重点图书·新能源与建筑一体化技术丛书)
ISBN 978-7-112-14069-5
I. ①蓄… II. ①赵… III. ①蓄冷系统—建筑设计
IV. ①TU831.3
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 028933 号

本书是清华大学赵庆珠教授 20 多年来从事研究、教学和工程实践的成果结晶。书中从蓄冷设备、蓄冷系统以及工程安装与调试三个方面, 详细地介绍了蓄冷技术的最新研究成果、蓄冷设备的最新进展以及工程实例中普遍遇到的难题解决办法。本书具有以下特色: 1) 注重理论基础, 更重视工程应用。既有一定理论深度、又紧密结合工程应用。2) 设计、自控与安装调试面面俱到。使读者非常容易理解如何设计出良好的蓄冷工程以及如何与自控工程师相结合完成蓄冷工程的自动控制。3) 实际工程案例全面展示蓄冷工程设计过程。读者可以很容易地学会蓄冷工程的设计方法。

* * *

责任编辑: 张文胜 姚荣华
责任设计: 李志立
责任校对: 姜小莲 陈晶晶

“十二五”国家重点图书
新能源与建筑一体化技术丛书
蓄冷技术与系统设计
赵庆珠 等著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西城百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
华鲁印联 (北京) 科贸有限公司制版
北京世知印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11 字数: 265千字
2012 年 5 月第一版 2012 年 5 月第一次印刷
定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-14069-5
(22108)

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)

出版说明

能源是我国经济社会发展的基础。“十二五”期间我国经济结构战略性调整将迈出更大步伐，迈向更宽广的领域。作为重要基础的能源产业在其中无疑会扮演举足轻重的角色。而当前能源需求快速增长和节能减排指标的迅速提高不仅是经济社会发展的双重压力，更是新能源发展的巨大动力。建筑能源消耗在全社会能源消耗中占有很大比重，新能源与建筑的结合是建设领域实施节能减排战略的重要手段，是落实科学发展观的具体体现，也是实现建设领域可持续发展的必由之路。

“十二五”期间，国家将加大对新能源领域的支持力度。为贯彻落实国家“十二五”能源发展规划和“新兴能源产业发展规划”，实现建设领域“十二五”节能减排目标，并对今后的建设领域节能减排工作提供技术支持，特组织编写了“新能源与建筑一体化技术丛书”。本丛书由业内众多知名专家编写，内容既涵盖了低碳城市的区域建筑能源规划等宏观技术，又包括太阳能、风能、地热能、水能等新能源与建筑一体化的单项技术，体现了新能源与建筑一体化的最新研究成果和实践经验。

本套丛书注重理论与实践的结合，突出实用性，强调可读性。书中首先介绍新能源技术，以便读者更好地理解、掌握相关理论知识；然后详细论述新能源技术与建筑物的结合，并用典型的工程实例加以说明，以便读者借鉴相关工程经验，快速掌握新能源技术与建筑物相结合的实用技术。

本套丛书包括：《低碳城市的区域建筑能源规划》、《地表水源热泵理论及应用》、《光伏建筑一体化工程》、《风-光互补发电与建筑一体化技术》、《蓄冷技术与系统设计》、《太阳能空调工程设计与实践》、《太阳能热利用与建筑一体化》、《热泵与建筑一体化应用技术》以及《村镇太阳能及住宅设备标准化设计技术》等。

本套丛书可供能源领域、建筑领域的工程技术研究人员、设计工程师、施工技术人员等参考，也可作为高等学校能源专业、土木建筑专业的教材。

中国建筑工业出版社
2011年2月

序

赵庆珠教授向我提及中国建筑工业出版社邀请她撰写一本有关蓄冷的著作，我觉得这是一件非常好的事。一来赵老师从事蓄冷方向的研究、教学和工程实践已有二十多年，有非常丰富的经验；二来赵老师近年来在行业会议上露面时间越来越少，许多人很难有机会当面请教。因此这样一本蓄冷的书既是赵老师二十多年研究和工程实践的总结，也可能是赵老师的封山之作，对于从事蓄冷研究和工程实践的同行而言，无疑是一份非常难得的礼物。赵老师请我为该书写个序，作为赵老师的学生，我深感荣幸，也是我义不容辞的责任。

赵庆珠老师 1959 年毕业于清华大学土建系后留校任教，我则于 1985 年考入清华大学，赵老师是我大学后四年的班主任。研究生阶段，我虽师从彦启森教授，由于赵老师与彦老师同在一个课题组，自然也就有很多机会得到赵老师的指点。博士毕业留校后，彦老师安排我除继续进行 CFD 方向研究外，还让我积极参与赵老师负责的蓄冷方向研究。其后，在赵老师的指导下参与了一系列蓄冷方面的研究与工程实践，包括冰蓄冷实验台的搭建、冰球蓄冷与取冷特性研究、冰盘管蓄冷与取冷特性研究、水蓄冷与冰蓄冷设计软件、冰蓄冷优化控制软件、金属蓄冰盘管设备开发、闭式冰槽开发与特性研究等研究开发内容，以及多个蓄冷工程项目。蓄冷方向的科研工作不仅让我接触了大量实际工程，也提高了我的科研组织与协调能力，为我以后的科研工作打下了良好基础。

在参与赵庆珠老师负责的蓄冷技术方向的项目研究和工程实践过程中，我深深地感受到赵老师对蓄冷技术的热爱与执着，以及对我国发展蓄冷技术的高度责任心。20 世纪 90 年代，大量工程师还不知道冰蓄冷为何物时，赵老师为了推广冰蓄冷技术，与彦老师编写了《冰蓄冷系统设计》，在各大设计院和行业会议上宣讲冰蓄冷技术的设计方法，为我国培养了大量从事冰蓄冷设计的工程师；为了检验实际的蓄冷工程是否真正实现了高峰用电负荷向夜间低谷负荷的转移，在国家电力调度中心的支持下，赵老师带领学生对全国十多个冰蓄冷工程的实际运行效果进行了测试，积累了大量的一手资料，进而向国家提出了科学发展蓄冷工程的建议措施；为了探究蓄冷和释冷过程的机理，赵老师经常与研究生一起做实验，共同分析实验结果，帮助同学解决研究中面临的一个个困难，赵老师的身体力行极大地激发了研究生的工作热情，也为他们以后的成长树立了榜样。

如今赵庆珠老师将其二十多年的研究和工程实践的经验汇编成书，我有幸先睹为快。该书与其他蓄冷方向的书籍相比，有如下显著特点：

(1) 注重理论基础，更重视工程应用

目前市面上有专门介绍蓄冷材料和技术的理论专著，也有面向蓄冷应用的著述，但既有一定理论深度、又紧密结合工程应用的著作则很少。由于赵老师带领大量研究生在蓄冷方向开展了二十多年的研究工作，对于蓄冷技术的基础理论理解得非常透彻；另一方面，赵老师主持了大量的蓄冷工程，具有丰富的实践经验。这两方面相结合，使得本书与以前

的著述具有显著不同的特点，既适合从事蓄冷技术研究的学生、科技工作者阅读，又能指导蓄冷工程设计、安装与运行管理。

(2) 设计、自控与安装调试面面俱到

面向应用的蓄冷著述一般主要关注蓄冷工程的设计与自控，本书结合赵老师二十多年参与的各种类型的蓄冷工程，将蓄冷工程设计与自控的核心加以梳理，使读者非常容易理解如何设计出良好的蓄冷工程以及如何与自控工程师相结合完成蓄冷工程的自动控制。此外，本书还非常重视蓄冷工程的安装与调试，这一方面得益于清华同方公司提供的大量工程实践机会；另一方面也体现了赵老师对蓄冷技术发展的责任心。由于看到很多蓄冷工程并没有达到设计目标，很大一部分原因在于安装与调试，从而促使赵老师花更大精力关注蓄冷工程的安装与调试，并希望借助该书普及提高蓄冷工程的安装与调试技术。

(3) 实际工程案例全面展示蓄冷工程设计过程

本书有多个实际工程案例的介绍，内容非常详尽。一方面是因为这些工程都是赵老师直接参与和负责的，赵老师非常熟悉所有情况；另一方面也体现了赵老师教书育人的本色，总希望将所有知识传授给他人。通过这些工程案例的学习，读者可以非常容易地学会蓄冷工程的设计方法，对于普及蓄冷工程的设计技术将具有重要的意义。

本书的合作作者王宝龙博士是彦启森教授的关门弟子，在制冷设备与蓄冷系统方面也颇有建树。他曾获清华大学优秀博士论文、优秀博士毕业生、优秀博士后等荣誉，现就职于清华大学建筑技术科学系，并兼任国际标准化组织/制冷与空调技术委员会/制冷压缩机的测试与评定分委员会（ISO/TC86/SC4）专家组成员。而王琳硕士与刘同宇硕士则直接从事蓄冷工程设计、安装、调试工作十多年，具有相关专业方面的丰富经验。

衷心希望本书能够让读者更好地了解蓄冷技术的现状，更快地进入蓄冷技术研究和工程实践的行列中。同时，更希望书中的内容能够像赵庆珠老师的歌声一样，余音绕梁，三日不绝。

李先庭
2011年11月

致 谢

在二十多年从事自己很感兴趣的蓄冷工作中，虽有不少感悟和心得，但由于本人一贯手懒，总是疏于总结和提高，这次受邀能够有机会将这本书完成，首先感谢中国建筑工业出版社同志的提醒，更要感谢清华大学建筑学院建筑环境与设备研究所李先庭教授及其研究团队的大力支持，不单王宝龙副教授直接参与了第一部分的编写内容，而且不少在读研究生们也参与了工作，尤其是江岸同学细心地直接帮助编排和整理，小小年纪更显难能可贵。清华同方公司的王琳与刘同宇无私地将自己十多年的工作经验编写入本书第 8 章的内容，赵晓宇博士和徐珍喜等更是千方百计地提供多方帮助，都为本书增添了精彩的一笔，在此一并衷心的感谢！

赵庆珠
2011 年 12 月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	我国电力供应与蓄冷技术发展趋势	1
1.2	蓄冷技术的原理与发展历程	3
1.2.1	蓄冷技术的原理	3
1.2.2	国外发展状况	5
1.2.3	国内发展状况	6
1.3	本书的内容与结构	8

第 1 部分 蓄冷设备

第 2 章	封装式蓄冷装置	13
2.1	种类与特征	13
2.1.1	蓄冷相变材料	13
2.1.2	封装体	14
2.1.3	载冷流体	14
2.2	单个蓄冰体的蓄冷过程及其影响因素	16
2.2.1	冰球的蓄冷特性	16
2.2.2	影响冰球蓄冷的因素	18
2.3	单个蓄冰体的释冷过程及其影响因素	19
2.4	封装式蓄冷槽的蓄冷性能	21
2.4.1	开式冰球池	22
2.4.2	闭式冰球罐设备	22
2.5	封装式蓄冷槽的释冷性能	25

第 3 章	盘管式蓄冷装置	28
3.1	种类与特征	28
3.1.1	冰盘管的材质与种类	28
3.1.2	不同类型冰盘管的蓄冷共性	30
3.2	蛇形冰盘管的蓄冷取冷特性	33
3.2.1	蓄冷特性	33
3.2.2	蛇形冰盘管的内融冰取冷特性	33
3.2.3	U形和圆形冰盘管的内融冰特性	40

3.2.4 蛇形冰盘管蓄冷装置的外融冰释冷特性	42
-------------------------------	----

第4章	水蓄冷(热)设备	50
------------	-----------------	-----------

4.1 水蓄冷(热)系统的特点	50
4.1.1 水蓄冷(热)系统的构成与影响因素	50
4.1.2 水蓄冷系统的适用范围	51
4.1.3 常用水蓄冷系统的形式	51
4.2 利用水温自然分层蓄冷(热)罐的设计原理	54
4.2.1 斜温层	54
4.2.2 水蓄冷(热)系统的基础设计计算	55
4.2.3 分层蓄冷水槽效率的影响因素	58
4.3 影响蓄冷(热)水槽效率的因素	59
4.3.1 蓄冷槽体形状	59
4.3.2 高径比 H/D	59
4.3.3 保温性能	62
4.3.4 布水器	63
4.3.5 蓄冷温差	63
4.3.6 蓄冷/取冷流量	64
4.4 小结	65

第2部分 蓄冷系统

第5章	蓄冷系统的特点与匹配	69
------------	-------------------	-----------

5.1 蓄冷(热)系统的特点及影响因素	69
5.1.1 蓄冷系统的基本方式	69
5.1.2 蓄冷系统的特点	69
5.1.3 蓄冷(热)系统的影响因素	70
5.2 蓄冷系统的设计与设备匹配	71
5.2.1 典型设计日逐时冷负荷	72
5.2.2 部分负荷蓄冰系统制冷机与蓄冰设备的基本平衡	74
5.2.3 冰蓄冷系统中各有关设备的匹配	75
5.2.4 双工况冷机	82
5.3 蓄冷(热)系统的形式	86
5.3.1 冰蓄冷系统常用形式	86
5.3.2 水蓄冷(热)系统常用形式	94

第6章	蓄冷系统的控制	97
------------	----------------	-----------

6.1 蓄冷(热)系统控制的基本要求	97
--------------------------	----

6.1.1	运行控制的必要性	97
6.1.2	不同运行工况的基本控制方法	98
6.1.3	蓄冷冷站典型系统的控制内容	99
6.1.4	蓄冷空调冷站的运行控制	100
6.2	运行优化控制的内容与原理简介	102
6.2.1	优化的基本依据	102
6.2.2	工程中常用优化控制方法的简介	106

第3部分 典型工程实例及工程安装与调试

第7章	典型工程实例	117
------------	---------------	------------

7.1	冰蓄冷工程实例	117
7.1.1	工程概况资料	117
7.1.2	设备选择计算	118
7.1.3	系统组成与运行方案初步分析	121
7.1.4	对冰蓄冷系统的各种评价指标	129
7.2	水蓄冷(热)工程实例	130
7.2.1	工程概况资料	130
7.2.2	冷水机组与蓄冷水池容量匹配验算	133
7.2.3	蓄冷水池布水器选择计算	134
7.2.4	优化运行控制方案的初步考虑	136
7.2.5	削峰量与节省运行费的初步估算	141

第8章	蓄冰空调工程的安装、调试与验收	143
------------	------------------------	------------

8.1	蓄冰空调系统的安装	143
8.1.1	整体式蓄冰装置安装	143
8.1.2	现场组装式蓄冰装置安装	145
8.1.3	蓄冰装置及配套管路系统的处理	146
8.1.4	蓄冰空调系统中的特殊附件	149
8.1.5	其他安装要点	150
8.2	蓄冰空调系统的调试	150
8.2.1	分步调试	151
8.2.2	联合运行调试	151
8.3	蓄冰空调系统的验收	153
8.3.1	选定验收工况	154
8.3.2	安装工艺的验收	154
8.3.3	运行工况的验收	154
8.3.4	自控系统验收	157

8.3.5 经济性验收	158
8.4 蓄冰空调系统的维护	159
8.4.1 制冷机不启动	159
8.4.2 制冷机突然停机或异响	159
8.4.3 乙二醇系统持续补液	160
8.4.4 蓄冰量不足	160
8.4.5 供水温度过高（低）	160
8.4.6 板式换热器冻结	161
8.4.7 水泵的故障处理	161
8.4.8 乙二醇系统定压	161
8.4.9 自控方面常见故障及处理方法	162
参考文献	163

第 1 章 绪论

1.1 我国电力供应与蓄冷技术发展趋势

近年来，随着经济社会持续发展和人民生活水平的不断提高，社会电力消费量呈现逐年上升趋势。图 1-1 为 1987 年改革开放以来我国人均生活能源消费量增长情况，图中显示，我国人均电力消费量从 1987 年的年人均 26.4kWh 增长到 2008 年的年人均 331.9kWh，年均增长率高达 25%，且持续增长趋势还很明显。

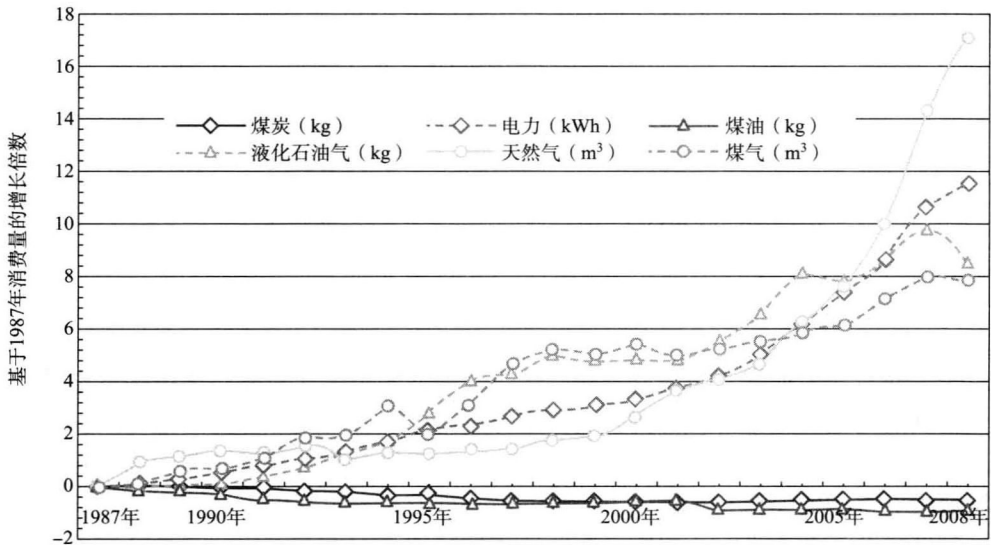


图 1-1 1987~2008 年我国人均生活能源消费量基于 1987 年的增长率^[1]

电力消费构成主要由工业、农业、建筑、交通及批发零售、餐饮产业等用电组成。从表 1-1 中可以看出，建筑、交通及批发零售、餐饮产业等的用电在总电力消费所占的比重越来越大，从 1990 年的 15% 增长到 2008 年的 24%。

中国电力平衡表^[1]

表 1-1

电力消费构成 (单位: 10 ⁸ kWh)	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2008 年
农林牧渔水利业	426.8	582.4	533.0	776.3	887.1
工业	4873.3	7659.8	10004.6	18521.7	25388.6
建筑业	65.0	159.6	159.8	233.9	367.3
交通运输、仓储和邮政业	105.9	182.3	281.2	430.3	571.8

续表

电力消费构成 (单位: 10^4 kWh)	1990年	1995年	2000年	2005年	2008年
批发、零售业和住宿、餐饮业	76.2	199.5	418.7	752.3	1017.4
其他行业	202.4	234.2	623.2	1340.9	1913.0
生活消费	480.8	1005.6	1452.0	2884.8	4396.1
总消费量	6230.4	10023.4	13472.4	24940.3	34541.4
可供量	6230.4	10023.4	13472.7	24940.8	34540.8
建筑、交通、第三产业等用电所占比重	0.15	0.18	0.22	0.23	0.24

近年来,办公、商场、宾馆(饭店)、住宅等建筑及其附带的第三产业发展迅速,用电量直线上升。图1-2所示为某典型商场(左)和某星级酒店(右)各设备分项耗电量比例,其中空调系统的能耗占总建筑能耗的40%以上。结合这些建筑的负荷特性,其空调负荷分布极不均匀:对于办公、商场等建筑,空调运行时间主要集中在9:00~20:00,而对于居民用户,用户较多,负荷相对较大,空调运行时间主要集中在14:00~21:00。夏天白天温度较高,空调负荷大,耗电量大,大量的空调用电直接加剧了高峰期用电。

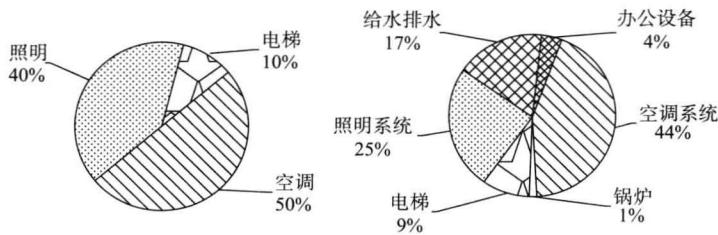


图1-2 某典型商场(左)和某星级酒店(右)各设备分项耗电量比例^[2]

对于尖端负荷的处理,通常有三种方式:一种方式是建立新电站或增加发电装备的装机容量来满足用电尖峰负荷的需要,然而尖峰负荷持续时间通常较短,电站大部分运行在低谷时期,运行效率低,投资回报率低。同时,由于发电装备容量调节较为困难,尖峰负荷的增加也对电网的安全运行构成了威胁。另一种方式是拉闸限电,即在特定的用电环境无法达到满负荷承载需求时,中断一个区域或部分地方的电力供应,这种方式以强制手段限电违背了节能的初衷,极大地影响了居民生活和工农业生产,对安全用电也造成隐患。第三种方式便是储能,即采用储能手段将低谷期盈余的电量储存起来,补充给高峰期用电,从而实现电网“削峰填谷”。

目前大规模电能蓄存较为困难,冰蓄冷空调系统成为夏季解决空调期峰谷差的有效方法之一。2010年11月,发展改革委、电监会等六部委联合印发《电力需求侧管理办法》^[3](2011年1月1日实施),针对电力需求侧提出了16项定性或定量的管理和激励措施,其中提到“将推动并完善峰谷电价制度,鼓励低谷蓄能”等内容。这些政策的提出对于冰蓄冷的发展是非常有利的。

所以业界人士普遍公认“蓄能空调是为国节能、为用户节资”的最佳技术之一,蓄冷技术从长远来看具有较好的发展和应用前景。

1.2 蓄冷技术的原理与发展历程

1.2.1 蓄冷技术的原理

介质在吸热或放热过程中，会引起介质的温度或物性状态发生变化。蓄冷就是利用工质状态变化过程中所具有的显热、潜热效应或化学反应中的反应热来进行冷量的储存。所谓蓄冷空调技术，就是在不需要冷量或需冷量很少的时间段（夜间电网低谷时，同时也是空调负荷低谷时），利用制冷设备将蓄冷介质中的热量移出，进行冷量储存，然后将此冷量用在空调用冷或工艺用冷高峰期（白天电网高峰时，通常也可能是空调负荷高峰期），以满足需求。因此，其特点是：转移制冷设备的运行时间，一方面可以利用夜间的廉价电；另一方面也减少了白天的峰值电负荷，达到电力移峰填谷的目的^[4]。

蓄冷技术有很多分类方法，按照蓄冷的工作原理可分为显热蓄冷、潜热蓄冷和热化学蓄冷；按照蓄冷持续时间可分为昼夜蓄冷和季节性蓄冷；按照用于蓄冷的介质可分为水蓄冷、冰蓄冷、共晶盐蓄冷、气体水合物蓄冷；按照蓄冷时制冷剂与蓄冷罐内介质是否接触可分为直接接触式蓄冷和间接接触式蓄冷^[5]。

而空调用蓄冷方式主要可分为两种：显热蓄冷和潜热蓄冷。

空调用显热蓄冷主要是指水蓄冷，通过水温在 4~12℃ 之间的变化来蓄存显热。水蓄冷系统在蓄冷工况和制冷机供冷工况下对制冷机的要求相差无几，所以不需要设置双工况的制冷机组，并且能够保持较高的冷机效率。水蓄冷的容量和效率取决于贮槽的供、回水温度差，以及供、回水流体温度有效的分层间隔。水蓄冷系统的主要缺点是蓄冷密度低，占用空间大。水蓄冷系统应用的技术难点在于冷温水的有效隔离，避免能量掺混，常用的贮槽结构和配管设计有几种方案：分层化、迷宫曲径与挡板、复合贮槽、隔膜或隔板。

潜热蓄冷则包括冰蓄冷和其他相变材料蓄冷。由于相变过程具有等温性好、蓄冷密度高等优点，相比于水蓄冷，相变蓄冷具有其独特的优势。由于冰的相变热大，本身无毒性，可与冷水直接接触，因此冰蓄冷系统得以广泛的应用。同时还有其他的相变材料作为蓄冷材料，如共晶盐蓄冷。

由于潜热蓄冷的诸多优点，在工程中的应用最为广泛。冰蓄冷技术的研究核心在于新型蓄冷方法和装置的研究。冰盘管是空调工程中常用的一种冰蓄冷方式，其结冰原理是由沉浸在充满水的贮槽中的金属或塑料盘管作为蓄冷介质的换热表面，盘管的融冰方式可以由温度较高的水直接进入结满冰的盘管外贮槽内循环流动，使盘管外表面的冰层自外向内逐渐融化，融冰的方式也可以是由温度较高的载冷剂（乙二醇水溶液等）在盘管内循环，通过管壁将热量传给冰层，使盘管表面的冰层自内向外融化；封装冰蓄冷是将封闭在一定形状的塑料容器内的水制成固态冰的过程，按容器的形状可以分为球形、板形、椭圆形。共晶盐是一种相变材料，将其封装在塑料容器内，沉浸在充满空调循环水或溶液的贮槽中，随着水温度的变化，共晶盐结冰或融化，其过程与封装冰相类似。还有一些其他的蓄冷技术，包括动态冰片滑落式和冰晶式等。

综上所述，蓄冷系统的分类如图 1-3 所示。

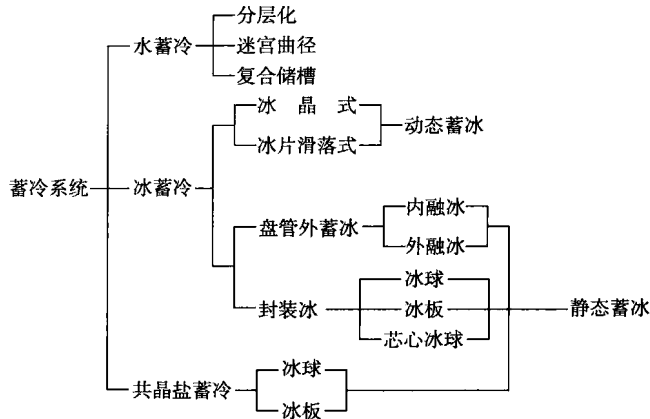


图 1-3 蓄冷系统的分类

蓄冷空调系统的主要特点是比常规空调系统多了一套蓄冷设备和复杂的控制策略。它主要是由制冷机组、蓄冰槽、控制系统以及其他附属元件所组成。大部分蓄冷系统，用以制冷或蓄冰的制冷机组为成套组装的制冷机组，如完全冻结式、冰球式等系统；有些系统采用组合的冷冻系统，蓄冰槽本身为冷冻系统的一部分，如制冰滑落式和冰盘管外融式系统。蓄冷空调制冷机组的选用首先要考虑其制冷能力，运行在空调模式时与正常制冷机组没有不同，但是在蓄冰模式时，机组的制冷能力会显著降低，具体变化程度与制出载冷剂的温度范围有关^[6]。

蓄冷系统中另一重要技术为蓄冰槽。冰蓄冷空调技术中制冰是一个不可或缺的重要环节，现在已有各类制冰法。静态制冰法中包括管内制冰、管外制冰和封装式制冰；而动态制冰法，包括收获制冰法、液态制冰法以及冰晶制冰法等。但这些制冰法中还存在一定的技术性问题，例如无法统一评价各种制冰法的效率的方法；但蓄冰空调的最终目的是如何从储存的冰中保质保量地取出满足用户的冷量，因此，如何避免制冰后形成的堵塞和粘连、提高取冰效率也是很重要的环节；蓄冰槽的容量直接影响到高峰时冷量的需求以及初投资的费用，蓄冷槽的形状和隔热则是决定了冰槽内部换热和外部隔热的性能。蓄冷空调运行策略的选择需要考虑的因素很多，主要有建筑物空调负荷分布、电力负荷分布、电费计价结构、设备容量及储存空间，具体需要以实际情况为依据，因此蓄冷策略的选择是整个蓄冷系统中最关键的部分。蓄冷系统以设计循环周期的负荷及特点为基础，参考电费结构等条件对系统的蓄冷容量、放冷供冷或连同制冷剂共同制冷做出最优的运行安排。根据蓄冷系统是否承担所有的空调冷量，一般包括全部蓄冷策略和部分蓄冷策略^[7]。

蓄冷空调会给国家和用户带来巨大的社会效益和经济效益，具体表现在以下三个方面：

1. 移峰填谷，改善了国家的电力状况。高峰时电力不足、被迫拉闸限电，低谷时电又用不了、被迫关停部分发电机组，如果不采用蓄冷空调来改善境况，为了满足用户对高峰负荷的需求，电网就要加大容量，国家就需要新建电站，耗用巨大的物力和财力；低谷时被迫停用的发电机组启动比较麻烦，若是待机，更是浪费了电力资源。蓄冷空调将白天高峰期的部分用电负荷转移到了低谷期，缓解了日益增长的电力生产和供应的矛盾，避免了新建电站的投资，对电力供应和国民生产也产生了显著的效益。

2. 蓄冷释冷,改善了制冷机组的运行情况。蓄冷空调的冷机容量不用承担白天最大负荷,在夜晚采用蓄冷技术可以减少制冷机组的装机容量,使机组初始投资费用减少。当然,蓄冷空调系统增添了蓄冷设备费用。另外在非高峰期使用时也可以使机组在高负荷率下运行,提高了机组的效率,蓄冷系统可使制冷机在稳定的、效率高的经济负荷下运行,而且,夜间环境温度的降低会使制冷设备的制冷量有所提高、能耗有所降低。因此,具有蓄冷的空调系统,不仅能够减小空调设备的容量,减少投资,而且可以根据空调负荷的大小使机组处在最佳的效率下运行。

3. 峰谷电价,改善了用户的空调境况。空调用户的电力花费一为增容费;二为相应配电装置的初投资;三为运行费用。采用了蓄冷系统,制冷空调制冷机组的容量减小,可明显降低制冷设备的初投资,减小用户的设备投入费用。另外,按电力公司制定的分时峰谷电价,还可大大节省电费。由此,用户可获得很大的经济效益。同时,蓄冷系统的投入使用,大大降低了燃煤电站的烟尘和 CO₂ 的排放,也降低了制冷机组的运行噪声和隔声设备投资,给用户提供了良好的工作和生存环境。

1.2.2 国外发展状况

冰蓄冷空调最早出现于 20 世纪 30 年代,最初主要用于教堂、影剧院等建筑。后来由于蓄冷装置成本高以及耗电量大使得蓄冷技术停滞了一段时期。20 世纪 70 年代,全球性能源危机爆发,并且发达国家电力负荷增长和峰谷差拉大的速度惊人,不得不增建发电站来满足高峰负荷,于是冰蓄冷技术再度崛起,并在 20 世纪 80 年代以后得到快速的普及与提高。首先是直接蒸发式管外结冰为基础的冰蓄冷空调,然后积极开发其他形式的冰蓄冷设备和系统,实际用于工程项目的冰蓄冷空调系统也越来越多。到 1989 年,美国、日本、加拿大等国从事冰蓄冷系统开发和冰蓄冷专用制冷机生产的公司多达 49 家^[8]。

1. 美国^[8]

美国采暖制冷空调工程师协会 (ASHRAE) 在 1985 年出版了《蓄冷空调》的技术资料手册,1987 年将其列入 Handbook 手册中,1991 年再版时作了修正,1993 年 ASHRAE 保留版权,1994 年 10 月再次出版新的《蓄冷设备指南》。1996 出版了《低温送风系统设计指南》,1997 年出版了《成功蓄冷工程——从设计到运行》。

美国制冷空调协会 (ARI) 1993 年拟定 Guideline-T 作为蓄冷设备性能规范之标准,并于 1998 年制定了 Standard 900《蓄热冷却设备》。

1994 年底,美国约有 4000 多个蓄冷空调系统用于不同的建筑物,其中水蓄冷占 10%,共晶盐蓄冷占 3.3%,冰蓄冷占 86.7%。美国不仅冰蓄冷工程数量占大多数,而且在蓄冷设备的发展也很迅速。Calmac 蓄冰筒、Fafco 蓄冰槽等日趋完善,Bac 外融冰蓄冰槽向内融冰蓄冰槽扩展,MaximICE 动态蓄冰系统也广泛应用。目前,Bac 在全球已有 2200 个成功运行的冰蓄冷案例,为这些工程分别提供 90~125000 冷吨蓄冰设备。美国 Mueller 公司动态制冰设备在美国、日本、韩国、中国等地有 100 多个工程在运行。

2. 日本^[8,9]

日本的蓄冷技术起步也很早,1990 年以前主要发展水蓄冷和水蓄热,之后冰蓄冷空调系统迅速发展。1938 年,日本在东日会馆设置了蓄冷槽;1956 年,东京海上火灾保险公司建立了日本第一个采用水蓄冷槽的空调系统;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立了日本第一个冰蓄冷空调系统；1984年，日本各电力公司开始实行夜间减少电费的制度。日本政府和电力部门通过税收和融资优惠、电价优惠、奖励制度来大力鼓励冰蓄冷空调的普及和发展。

日本在冰蓄冷开发研制阶段，约有30多家公司的40余种不同的装置和系统进入市场，有些技术是从美国Bac、Fafco、Calmac、Transphase，法国Cristopia-Stl，加拿大Sunwell引进的。

为了提供市场的需要，电力公司与空调设备公司联合开发新的系统和装置，以适应冰蓄冷空调在不同建筑中的需要。1988年，日本9家电力公司与大金工业、日立制作所、三菱重工业、三菱电机四家空调公司共同开发了5~10马力小型冰蓄冷式空调机；大金开发出冰蓄冷式VRV系统；九州电力公司与大金、荏原合作开发出整体式冰蓄冷式空调机组，并由九州电力公司购买，然后租给用户使用。日本Nihon Spindle公司采用Calmac蓄冰桶制成了整体式冰蓄冷空调机组。

近年来日本的蓄冷工程和装置数量如表1-2所示。

日本蓄冷工程及装置累计数

表 1-2

	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
水蓄冷	1576	1757	1884	1981	2083	2172	2265	2343	2412	2474	2548	2596	2625
冰蓄冷	2009	2335	2582	2854	3492	4480	6213	9402	13142	16454	19400	21320	23128

蓄冷移峰电力负荷如表1-3所示。

日本蓄冷移峰电力数 (单位: 10⁴kWh)

表 1-3

	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
年度移峰数	5	7	5	5	8	7	10	13	15	14	10	9	8
累积移峰数	42	49	54	59	67	74	84	97	112	126	136	145	153

1.2.3 国内发展状况

1. 中国台湾

由于台湾的能源几乎全部要从岛外购进，合理利用电力就显得更加迫切。自1984年从国外引进蓄冷技术建成第一个空调蓄冷系统以来，蓄冷空调系统在台湾发展很快，到1995年已建成253个冰蓄冷系统，总蓄冷量高达2482750kWh，1998年超过600个^[10]。

2. 中国大陆^[11]

我国在开始发展蓄冷技术时，就引进、吸收、消化国外先进技术，同时发挥我们中国人的聪明智慧，虽然我们只经历十几年的工程实际，但是有不少规模较大的工程，蓄冷量也比较大，已进入世界先进行列。我国自20世纪90年代初开始引进和研制蓄冷空调设备，至1999年各式蓄冰系统都建有工程实例，如水蓄冷、直接蒸发式冰盘管、机械制冰、外融冰盘管、完全冻结式塑料盘管、不完全冻结式盘管、冰球、冰板式等。从事研究开发与生产的机构主要有清华大学、浙江大学、上海交大、同济大学、天津大学、国家电力公