

# 蓄冷节能技术发展综述

(上海交通大学动力与能源工程学院, 上海 200030) 谷波 孙涛 田树波

**摘要:** 阐述了国内外蓄冷式空调技术的发展情况以及主要的蓄冷技术, 分析了不同形式蓄冷技术的优缺点, 介绍了与蓄冷技术相适应的低温送风系统, 提出了当前国内外蓄冷技术的研究特点。

**关键词:** 集中空调; 蓄冷技术; 低温送风系统

## 1 国内外蓄冷技术应用研究发展概况

集中空调是重要的用电大户, 也是造成电网峰谷负荷差的主要原因。而蓄冷空调则是解决这个问题一个有效办法。在 70 年代初, 由于能源危机的出现, 美国开始了现代蓄热技术的研究工作, 制定了蓄热技术研究与发展规划。其中, 就包括昼夜蓄热、蓄冷技术的研究项目。1987 年美国的一些研究人员开始呼吁在空调行业推广应用蓄冷技术来满足移峰填谷的要求。有 40 多家电力公司实行奖励措施来鼓励用户使用蓄冷技术进行移峰。从 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。1986 年在美国圣地亚哥州立大学建立了能源工程研究所, 并于 1990 年 5 月开始了一个 3 年计划进行蓄热技术的研究、设计和测试工作, 这极大地推动了冰蓄冷空调技术的发展。为了推进蓄热技术的发展, 还成立了国际蓄热咨询应用研究中心。现在, 蓄冷技术作为一种电力负荷的调峰手段, 已较为广泛地应用于建筑物的空调和其它工业工艺用冷上。

在推广应用蓄冷技术的进程中, 美国电力研究院 (EPRI) 和美国采暖制冷空调工程师协会 (ASHRAE) 先后出版了《商业蓄冷设计指南》和《蓄冷设计指南》。除了积极推广应用蓄冷技术外, ASHRAE 和 EPRI 正在进行低温送风系统的新型冷却盘管和末端高诱导比散流器的设计和应用研究, 进一步提高冰蓄冷技术

的应用效率。EPRI 进行的一些研究有力地说明了从能源研究和环境效益角度讲, 蓄冷技术确实是一种系统节能方法。另外, 美国的一些国家实验室和大学也在积极进行相关技术的研究和产品的开发工作, 不断地提高和改善蓄冷技术应用的可靠性, 并为用户提供广泛的技术任务。

日本是在 80 年代初开始蓄冷技术研究工作的, 到了 1985 年就已有 22 项工程中应用了冰蓄冷技术。日本于 1988 年实行了电力费用大幅度改动, 这极大地促进了蓄冷技术的发展, 特别是冰蓄冷技术。冰蓄冷技术已成功地应用在建筑物的空调、水产品的加工和储藏及商品加工行业。至 1993 年东京电力区域内采用冰蓄冷系统的项目已达到 316 项。在英国、加拿大、德国、澳大利亚等国, 蓄冷技术也得到了应用。至 1988 年, 在北美、欧洲、澳大利亚和日本已有 720 多套冰蓄冷设备在运行, 其中用于空调的占 61%。

在我国, 对于水蓄冷特别是利用地下蓄水层蓄冷的研究已经有较长的历史。从 80 年代中期, 我国的科技人员就在积极倡导使用冰蓄冷空调技术。在台湾省, 蓄冷空调技术应用得较早, 发展也比较快, 1992 年有 33 个蓄冷空调系统, 到 1994 年底发展到 225 个。

为推进蓄冷空调计算的发展, 1995 年中国节能协会成立了蓄冷空调研究中心。一些大专院校也在积极从事蓄冷空调技术的研究工作。这对于促进我国新型空调设备的国产化进程,

推进蓄冷技术的发展和进步将起到积极的作用。

## 2 蓄冷的主要技术

### 2.1 水蓄冷技术

#### (1) 水蓄冷技术简介

水蓄冷是利用价格低廉、使用方便的水作为蓄冷介质,利用水的显热进行冷量储存的。它具有投资少、系统简单、维修方便、技术要求低、可以使用常规空调系统等优点,以及在冬季还可以用于蓄热。在蓄冷技术应用中,水蓄冷技术的应用比较广泛,概括地讲,水蓄冷技术具有以下特点:① 可以使用常规的冷水机组,也可以使用吸收式制冷机组,并使其在经济状态下运行。② 适用于常规供冷系统的扩容和改造,可以通过不增加制冷机组容量而达到增加供冷容量的目的。③ 可以利用消防水池、原有的蓄水设施或建筑物地下室等作为蓄冷容器来降低初投资。④ 可以实现蓄热和蓄冷的双重用途。⑤ 技术要求低,维修方便,无需特殊的技术培训。

水蓄冷技术也有一些缺点,如所需的蓄冷池体积较大,蓄冷温差较小,所需负荷不宜太大等。典型的间接水蓄冷系统如图1所示。

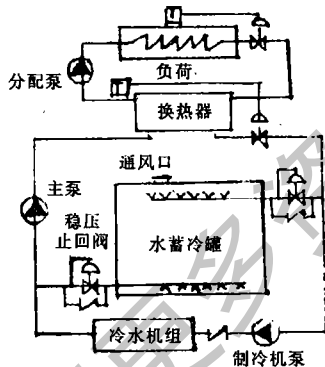


图1 间接供冷的分层水蓄冷系统

为了提高蓄冷罐的蓄冷能力并满足供冷时的要求,提高水蓄冷系统蓄冷效率,应当维持尽可能大的蓄冷温差并防止储存冷水与回流热水的混合。为了实现这一目的,蓄冷槽的形式可以采用多种方法,如自然分层法、多蓄水罐法、迷宫法、隔膜法等。

### 2.2 冰蓄冷技术

#### (1) 冰蓄冷技术简介

冰蓄冷就是将水制成冰的方式,利用冰的相变潜热进行冷量的储存。冰蓄冷的体积将比水蓄冷所需的体积小得多,且由于冰水温度低,在相同的空调负荷下可减少冰水供应量。同样,也可减少空调送风量,节省送风机容量和降低噪音。由于送冰水量和送风量均减少,故可使供水管道和风管尺寸也相应减少。低温冰水的另一特点是除湿能力强,使空调区域内相对湿度低,具有更好的舒适性,从而提高了空调品质。

冰蓄冷系统也存在缺点:冰蓄冷的制冷主机要求在冰水出口端的温度低至 $-5^{\circ}\text{C}$ ,故使制冷剂的蒸发温度降低。与一般主机出水温度 $7^{\circ}\text{C}$ 相比,制冷量将降至60%左右,但由于制冰过程中冰水温度是逐渐降低的,若制冰开始至结束,冰水平均温度均为 $-3^{\circ}\text{C}$ ,则制冷量约为一般机组的68%。另外,制冰运转时其COP也有所下降,与制水主机相比,其电耗净增加19%。而且由于制冰槽及冰水管路温度常低于 $0^{\circ}\text{C}$ ,须增加绝热层厚度,以免发生外部结露和减少漏热。常用制冰率来表示冰槽中冰的体积份额。蓄冰系统的技术水平要求较高,而且冰蓄冷系统的设计和控制比水蓄冷系统复杂得多。

#### (2) 冰蓄冷系统的分类及其基本特性

冰蓄冷系统及其制冰方式有很多种,根据制冰方法分类,可以将冰蓄冷系统分成静态制冰和动态制冰。

**静态制冰:**冰的制备和融化在同一位置进行,蓄冰设备和制冰部件为一体结构。具体形式有冰盘管式(外融冰式管外蓄冰)、完全冻结式(内融冰式管外蓄冰)、密封件蓄冰。

**完全冻结式蓄冰系统**结构比较简单,在蓄冰罐内按一定方式分布PVC管。蓄冷时的控制采用制冰时间、载冷剂温度、蓄冰槽水位三种控制方式或其中的两种组合控制方式。在融冰过程中,主要靠紧贴PVC管外已融化的水与未融化的冰之间的对流或已融化水的导热来进行传热。由于水的热传导系数较低,形成相当大的热阻,使得融冰较为缓慢,特别是在释冷末期,冷量不易释放,使载冷剂出口温度上

升。由于完全冻结式系统具有体积比较小、结构简单、效率较高等优点,使其应用非常普遍,如美国的 Fafco 公司以及 Calmac 公司等都是生产完全冻结式蓄冰系统的著名厂家。

动态制冰:冰的制备和储存不在同一位置,制冰机和蓄冰槽相对独立。如制冰滑落式、冰晶式等。

制冰滑落式蓄冰系统通过一特制的垂直板片蒸发器(制冰器)与蓄冰槽联系起来,构成冰蓄冷系统。冰水供应管路在蒸发器上方将冷水喷淋在蒸发器表面上,再落入到蓄冰槽内,部分冷水在蒸发器上冻结,当冻结至相当厚度之后,即被剥下,落入蓄冰槽中。

从制冷系统构成上考虑,有直接蒸发式和间接冷媒式。所谓直接蒸发式,是指制冷系统的蒸发器直接用作制冰元件,如盘管外蓄冰、制冰滑落式等;而间接冷媒式是指利用制冷系统的蒸发器冷却冷媒,再用冷媒来制冰。

### 2.3 共晶盐蓄冷技术

#### (1) 共晶盐蓄冷技术简介

除水以外,用于蓄冷蓄热装置的其他固液相变材料是一些能在一定温度下凝固的无机盐或一些盐类混合物的水溶液,一般称之为共晶盐。1973年 Telkes 博士在特拉华学院的节能研究所设计建造了太阳能实验室,建成了太阳能一号实验用太阳能暖房。Telkes 选用硫酸钠无水化合物作为蓄热相变材料。在 70、80 年代,许多厂家开始生产太阳能蓄热材料。80 年代,用于蓄冷的相变材料也相继出现,它们是含有多种添加剂的  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  溶液的多元系统。自从 1982 年 Transphase System Inc. 安装了第一台共晶盐蓄冷系统用于商业和工业大楼的空调系统以来,截至 1990 年底,全美已经安装了 80 多套相变材料蓄能系统(简称 PCM- TES 系统),占各种空调蓄冷系统的 4%。

#### (2) 共晶盐蓄冷系统的特点

由于共晶盐蓄冷系统蓄冷材料的特殊性,使其具有与其它蓄冷系统无法比拟的特点:①适用于传统空调改建为蓄冷空调系统;适合于旧楼房空调系统的改建。②共晶盐蓄冷材料的

相变温度较高,与冰蓄冷系统相比主机效率可以提高 30%。③因蓄冷系统工作在  $0^\circ\text{C}$  以上,所以冷水侧可采用一般常规冷水机组系统设计方法,且与现有空调系统极易耦合。④由于相变材料的凝固温度较高,系统的压降较低,因此设计是无需考虑管线的冻结问题,给设计带来许多方便。

### 3 与冰蓄冷结合的低温送风技术

#### 3.1 低温送风技术发展简述

50 年代,有人提出过低温送风概念,即在送风系统中,主风道从传统的  $12 \sim 14^\circ\text{C}$  送风温度改为  $3 \sim 11^\circ\text{C}$  的低温风送至风口,再采用引射或其他的引风诱导方式,使送风温度上升。这样,可有效地减少通风管道的截面积尺寸,降低房屋的层高,节省建筑费用或增加有效利用的空间。但长期以来,受低温冷源的限制,低温送风技术的发展一直停滞不前。只有在旧建筑的改建中,在空间狭小、送风管道布置困难的情况下,才不得已采用低温冷源。70 年代以来,一些发达国家和地区在发展电力建设的同时,开展了移峰填谷的用电管理,冰蓄冷技术和低温送风技术为人们所重视。1983 年,在美国能源部支持召开的“蓄冷在制冷工程中的应用”专题大型研讨会上,重新提出了在冰蓄冷应用的前提下低温送风空调系统的研究和应用。1988 年 EPRI 出版了低温送风设计手册,书中涉及到低温条件下空调系统的通风、传热机理以至工程设计的应用技术。ASHARE 的学术年鉴 (ASHARE Trans.) 中关于低温送风系统的研究论文也大为增加。低温送风正逐渐成为空调领域中研究的一个热点。

#### 3.2 与冰蓄冷结合的低温送风技术的特点

采用冰蓄冷空调系统,主机出水温度从  $7 \sim 12^\circ\text{C}$  下降为  $1 \sim 4^\circ\text{C}$ ,这就使空调系统的空气处理装置如空调箱、风机盘管、变风量空调器等也会发生较大变化。随着送风温度的降低,去湿量也会相应增加,末端装置所含的风机也会因送风温差及送风焓差的增加而减少其送风量。同时,与之相应的通风管路、空气散流器也会随风量的减少而变化。

在低温送风系统中,冷冻水温度的下降,使送风口温差由常规空气调节系统的8~10℃提高至12~18℃。相应地由于换热器冷水管表面温度的下降使其去湿量大大增加。送风焓差由常规空调的14~20kJ/kg,增加至18~26kJ/kg。若设计得当,在一定程度上弥补因设置冰蓄冷系统而增加的投资。低温送风系统具有如下几个特点:

(1)低温送风系统减少了通风电耗。在低温送风情况下,当一次风量下降为常规空调系统送风量的70%左右时,风机功率下降14%~28%。

(2)低温送风系统节省房内空间,降低建筑物造价。

(3)低温送风系统降低了空气处理设备和通风系统的初投资。在同样的风速下,风管截面减少约30%,空气处理设备外形尺寸相应减少20%,风机外形尺寸减少40%。

(4)低温送风系统的末端装置变得复杂化。低温的出风直接吹至人体会引起不适,在送风口前设置混合箱或诱导箱。

(5)低温送风系统使空调房间相对湿度下降,提高了舒适性。

诚然,由于送风温度低,会增加风机风道温升和风道热损失,但由于送风量减少,所以实际的风道热损失仍比常规系统小。

低温送风系统最大的问题是防止空调器、风道、末端装置和风口的结露,评价保温性能常用隔热系数及温度表面系数确定。

$$R = (T_R - T_D) / (T_R - T_C)$$

式中  $T_R$ —周围空气干球温度,℃;

$T_D$ —周围空气露点温度,℃;

$T_C$ —空调器盘管出口空气干球温度,℃。

表面温度系数

$$Rm = (1/\alpha) / (1/K) = (T_R - T_D) / (T_R - T_C)$$

式中  $\alpha$ —保温层内表面换热系数, W/(m<sup>2</sup>K);

$K$ —保温层传热系数, W/(m<sup>2</sup>K);

$T_S$ —管壁表面温度,℃。

因此,在低温送风系统中,保温施工是很重要的环节,必须确保保温层无渗漏、无冷桥。

另外,如何防止室内空气和温度的分布不均匀而引起的冷风感,也是一个不容忽视的问题。

#### 4 当前蓄冷技术研究的热点及展望

当前,蓄冷技术研究主要有如下几个方向:

(1)高效压缩机,使其在制冰和制冷水的工况下,均有较高的COP值。

(2)丰富和完善蓄冷空调技术理论和系统设计方法,从发展和优化单元式蓄冷槽角度出发,加强对现有蓄冷槽性能的试验研究;应用数值方法建立静态和动态蓄冷槽的数值模型研究或预测蓄冷槽的性能。

(3)蓄冷技术的系统节能和经济性的宏观评价和预测方法。

(4)冰蓄冷和低温送风系统中所需解决的问题研究,对强化制冰技术的研究;高效低温送风系统的研究;对应用低温送风系统所带来的其他问题的研究。

(5)蓄冷空调节能技术的研究。通过进行负荷的预测,合理优化系统运行模式,实现系统的经济性运行;充分进行系统能耗的分析,找出空调系统节能的潜力等。

(6)研究开发新型蓄冷技术。目前新型蓄冷技术的研究工作有水合物蓄冷技术和冰蓄冷技术。如CFC替代和水合物蓄冷技术;直接接触式制冰晶技术的研究;冰水两相流输送技术的研究;利用多孔性材料强化密封件蓄冷技术等。

随着蓄冷节能技术研究的深入,技术先进、运行可靠的蓄冷设备必将会得到广泛应用,蓄冷式空调系统将成为21世纪世界集中空调的“主流”系统。

#### 参考文献

- [1] 华泽钊等.蓄冷技术及其在空调工程中的应用[M].科学出版社,1997.
- [2] 李克欣.冰蓄能空调系统.制冷学报[J].1987,(2).
- [3] G.Meckler. Cold Air Distribution Options with Ice Storage [J]. ASHRAE Trans, Vol,95,Pt.1,1989.
- [4] J.C.E.Dorgan, J.S.Elleson. Design of Cold Air Distribution Systems with Ice Storage[J]. ASHRAE Trans, Vol, 95, Pt. 1,1989.

**Energy Conservation (Monthly)**

Sponsor: Liao Ning Province Scientific and Technical Information Institute

Publisher: «Energy Conservation»Magazine Publishing House

Chief Editor: ZHANG Wei-hua

Address: No.274 Qing Nian Da Street Shenyang City Liao Ning Province, China

Post Code: 110016

**Key words:** circulatory pump; speed governor through frequency changer; rational match; energy-efficiency

12

**Optimization of water chiller sizing**

XIAO Fu, XIA Qing, JIN Xin-qiao, YU Hang

Using advanced special software, HVACSIM<sup>+</sup>, this paper compares the Season Energy Efficiency Rate(SEER) of two AC systems to meet the same load demand. Evident effect in energy saving is proved in optimally matching system.

**Key words:** water chiller sizing; season energy efficiency rate; simulating test

15

**ABSTRACTS**

February 2001 No. 2 Total Issue No.223

**Summarizing of cooling-storage energy-saving technology**

GU Bo, SUN Tao, TIAN Shu-bo

Discusses the development status of cooling storage technology and leading cooling storage technology in China and overseas. Analyzes advantage and disadvantage of different cooling storage technology. Introduces cold air distribution system connected with cooling storage technology. Puts forward current research hot-point of cooling storage system in China and overseas.

**Key words:** cooling storage system; cold air distribution system

6

**The development skeleton of energy in shenyang district**

WANG Yun-ge, HU Jun-sheng et al

Development skeleton of energy in shenyang district is extending electric power and natural gas, suppressing coal, realizing industry of nuclear energy, spreading solar energy and bioenergy.

**Key words:** transition of energy; development skeleton

10

**Research on saving energy & arrange system of water system of air-conditioning**

ZHAO Xian-bing, LI Fang-qin

Based on the motion function and characteristic in different modes of water system of air-conditioning, the differential of circulatory water volume pump and elevation of pump were analyzed. Proposed circulatory pump rational matching in portion of load in winter or summer. Analyzed project living example compared to the operating trait and energy cost of different scheme.

**Some energy-saving analyses in the planning and design of the heating system**

ZHOU Guo-bing, HOU Fang

With some optimal exergy theories the paper preliminarily analyzes some problems in heating system such as the heating style, medium parameters, heating equipment, the pipeline network and the control method of it; then some energy-saving methods and measures of heating system are given.

**Key words:** heating system; planning and design; energy-saving analysis

18

**The optimization of the preparation of fuel equipment used in various types of boilers**

PENG Bin

This paper describes the optimal measures applied in preparation of fuel equipment used in various types of boiler. Developing and researching adjustable combination riddle, improving the structure of the ring hammer crushing machine will pave the way for widely using the Cycling Floating Boiler(CFB).

**Key words:** various types of boilers; the preparation of fuel equipment; adjustable combination riddle; CFB

22

**New method of energy conservation and environmental protection**

— study on small steam turbine generator for low vacuum heating

YANG Wei-hua

The paper discusses some problems on small steam turbine generator unit for low vacuum heating. It is showed by the practice that the method is a new way for saving water, power and coal, and that it has high benefits to energy conservation and environmental protection.

**Key words:** steam turbine; low vacuum heating; circulation water for heating

28