

# 流态化动态冰蓄冷技术 及其先进性

文 | 中国科学院广州能源研究所 冯自平

**【摘要】**从电力能源系统的峰谷差矛盾现状出发,分析了在我国普遍实施冰蓄冷空调系统的必要性。介绍了包括传统的冰球、盘管式冰蓄冷以及新兴的流态化动态冰蓄冷技术的特点。阐述了先进的流态化动态冰蓄冷技术的原理及其应用优势,并介绍了该技术在国内外的研究发展状况。

**【关键词】**冰蓄冷 冰浆 流态化 动态 空调

**电**力负荷峰谷差是现代电网的一大特点,随着我国国民经济的高速发展,电力负荷峰谷差矛盾越来越大,由此造成巨大的能源浪费。解决电力负荷峰谷差矛盾的一个重要手段就是用户侧调峰,即尽量减少高峰用电负荷、尽量增加低谷用电负荷。

在我国的电力消耗中,空调耗电是造成电力负荷峰谷差的重要因素之一。据统计,在我国许多经济发达的大城市,各种空调系统的耗电量占去夏季峰值电力的30%~40%。而且大多数空调系统的负荷峰谷时段与电网负荷的峰谷时段几乎重合,从而加重了电力供应的峰谷矛盾。因此,如何减小用电高峰期空调负荷成为用户侧调峰的主要思路。

冰蓄冷空调是实现用户侧调峰的最佳技术之一。如图1所示,冰蓄冷空调系统运行的基本原理是:利用夜间的低谷电力制冰蓄冷,在白天空调负荷高峰时段则利用蓄存的冰来释放冷量,从而避免了用电高峰时段的主机耗电。由此不仅实现了电力负荷的移峰填谷,而且大大降低了空调主机的装机容量,

为用户节约可观的初投资及运行费用。冰蓄冷技术的应用为空调用户和电力公司都将产生可观的经济收益,是合理化利用电力能源的有效手段,具有巨大的社会和经济效益。

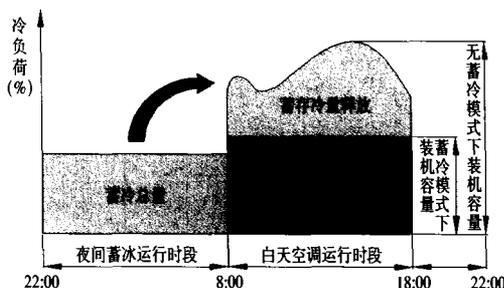


图1 冰蓄冷空调运行示意图

在美国和日本,从80年代初期即开始应用冰蓄冷,到80年代末期已经得到广泛普及。我国的冰蓄冷应用起步较晚,从1993年深圳电子科技大厦的国内第一个冰蓄冷工程应用开始,一直到90年代末期才开始出现明显增长。然而,近几年来冰蓄冷空调在我国的

发展速度却又逐渐放缓，这与日益增大的电力负荷峰谷差极不相称。出现这种现象的主要原因有两个方面：一是缺乏具有足够吸引力的来自政府和电力公司的各项鼓励政策，如峰谷分时电价政策的实施；二是由于现有冰蓄冷技术本身的缺陷造成的。由于起步较晚，目前我国冰蓄冷技术几乎完全是以冰球和盘管为主的传统静态冰蓄冷技术。这种传统静态冰蓄冷技术存在占地空间大、制冰效率低、能耗高等技术缺陷。

## 1 冰蓄冷技术分类及其特点

按照制冰原理的不同，冰蓄冷技术可分为静态和动态两大类。在静态冰蓄冷中，水在传热壁面上通过自然对流和固体导热的方式静态的被冻结成冰并附着在传热壁面上，随着蓄冷量的增加，冰层厚度逐渐加大。根据具体的制冰和融冰形式不同，静态冰蓄冷又分为冰球式和盘管式等。

所谓动态冰蓄冷，则具有与静态冰蓄冷完全不同的制冰原理。在动态冰蓄冷中，水通过强制对流方式与传热壁面发生热交换，但冰的形成并不在传热壁面上发生，因而避免了因冰层附着在传热壁面上而阻碍传热的不利情形。动态冰蓄冷也有多种具体的形式，主要包括过冷水式和刮刀扰动式两大类。表1列出了各种不同类型的冰蓄冷技术。

以盘管和冰球为主的静态冰蓄冷技术是最先发展并得到广泛应用的，属于第一代冰蓄冷技术。目前我国已建成的冰蓄冷工程全部属于此类。静态冰蓄冷技术虽然已经得到广泛应用，但其自身固有的技术缺点随着用户要求的不断提高而日益凸现。不管冰球式还是盘管式，其主要缺点都包括：(1) 传热效率低、制冰速度慢；(2) 制冰温度低，导致制冷系统COP低；(3) 蓄冰槽空间利用率低，且场地适应性差；(4) 融冰速度慢，负荷响应慢。

表1 各种冰蓄冷技术分类

类别	形式	制冰介质	冰的形态	关键设备
静态冰蓄冷	盘管(内融冰)	水	块冰	盘管
	盘管(外融冰)	水	块冰	盘管
	冰球	水 + 过冷却抑制剂	封装块冰	塑料冰球
动态冰蓄冷	过冷水式	水	冰浆 (Ice slurry)	过冷却热交换器
	刮刀扰动式	稀乙二醇水溶液	冰浆 (Ice slurry)	刮刀热交换器

## 2 流态化动态冰蓄冷技术原理

流态化动态冰蓄冷技术的先进之处在于改进了传统制冰过程中的主要缺点，而且制出的冰以流态化冰浆的形式存在。传统静态制冰过程中，水通过自然对流换热，冰层首先在换热壁面上形成，然后逐渐变厚。这样就导致形成新的冰层所需的热量传递必须以导热的形式穿过越积越厚的原有冰层，从而严重的恶化了传热效率，致使结冰越来越困难，制冷剂提供的冷却温度也必须越来越低。

流态化动态冰蓄冷技术制冰过程的最大特点在于首先在传热壁面附近制取过冷水，然后把过冷水转移到远离传热壁面的空间里解除过冷，生成冰浆。这样就彻底避免了冰在传热壁面上形成的可能性，既消除了固态冰层导热热阻的存在，同时在液体和传热壁面之间又始终保持着强制对流的高效率换热模式，因此整个制冰环节的传热系数得到大幅度提高。

另一方面，制冰过程中的换热温差、流量等参数都保持稳态，并不因时间而变化，从而保证了出水速度的恒定，也便于系统的控制。

流态化动态冰蓄冷主要包括两种形式，即以高砂热学为代表的过冷水式和以 Sunwell (日本) 为代表的刮刀扰动式。两种技术在基本原理上是一致的，但形式差别较大，下面分别说明。

### 2.1 过冷水式动态制冰技术

过冷水式动态制冰技术的基本原理是：首先把水在过冷却热交换器中冷却至低于0°C的过冷状态，然后把过冷水输送至特殊的过冷却解除器中解除过冷，生成大量细小的冰晶颗粒，与剩余的液态水一起形成0°C下的冰浆，如图2所示。这种制冰过程中最关键的技术在于确保流过过冷却热交换器的液态水具有尽可能大的过冷度，但同时又必须保证过冷水不能

在流出热交换器之前生成冰晶,否则换热器将被堵塞甚至破坏。此外,还应有高效率的过冷却解除技术,以确保过冷水能够连续快速结晶。

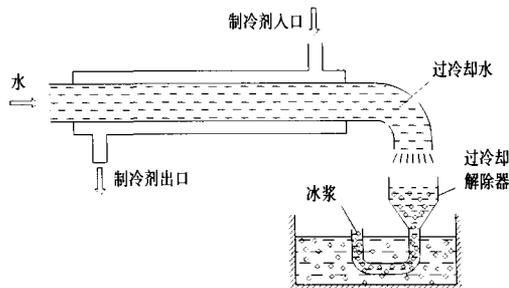


图2 过冷水式动态制冰原理

过冷却热交换器可以采用壳管式、套管式、板式等多种形式的换热器。为了防止过冷水在换热器内结冰,换热器内表面需要进行特殊涂层处理,同时对换热器内部的流场特性也有很高的要求,否则很难获得足够大的过冷度,以及避免堵塞。过冷却解除技术也包括多种,如机械方法、热方法、超声波方法等。过冷水式动态制冰技术的系统控制要求非常高,这也是该技术走向实用化所面临的一大技术难点。

由于冰浆中固液两相存在密度差,在蓄冰槽中可以循环抽取冰浆中分离出来的液态水,再送回制冰系统中生成冰浆,由此可使蓄冰槽内的冰浆固相含量(IPF)达到60%以上。

## 2.2 刮刀扰动式动态制冰技术

刮刀扰动式动态制冰技术的基本原理是:水(溶液)在换热器内部通过换热壁面被冷却到低于冰点的过冷状态,由于刮刀以较快的回转速度旋转,靠近换热器换热壁面的过冷水被及时刮离壁面,从而确保了换热器壁面上不会生成冰晶,如图3所示。从壁面附近被刮出的过冷水随即进入水侧的中心主流区,并在主流区中经已经存在的冰晶颗粒促晶解除过冷,生成冰浆。与过冷水式相比,刮刀扰动式动态制冰系统无需过冷却解除装置。

需要指出的是,这种刮刀扰动式动态制冰技术中的刮刀所起的作用是及时清除换热壁面附近的过冷

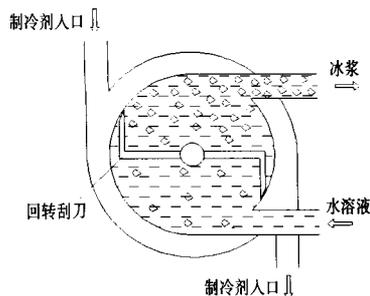


图3 刮刀扰动式动态制冰原理

水,而非像一些传统制冰机那样用于刮除已经生长在换热壁面上的冰层。因此这种制冰方式也避免了因冰层热阻引起的传热恶化,而且还因为刮刀叶片的强烈扰动而大幅强化了对流换热效果。

刮刀扰动式动态制冰技术中最核心的技术仍然是防堵塞技术。由于刮刀扰动十分强烈,过冷状态下的水溶液非常容易在换热壁面上结晶,一旦在壁面上结晶,刮刀叶片就面临被堵塞甚至被打碎的可能。因此,刮刀式换热器的内表面(刮刀叶片接触面)处理要求非常光滑,而且刮刀叶片与换热壁面之间的接触必须紧密。

另一方面,由于由纯水生成的冰晶颗粒较粗,而且容易聚集硬化,更容易导致堵塞,因此此种制冰方法中往往需要在水中添加一定浓度的冰点抑制剂,如乙二醇、NaCl等。由此又引入了对设备材料的防腐问题。换热器内表面和整个刮刀组件都是长期浸泡在乙二醇(或NaCl等其他盐类)水溶液中,并且处于高流速的不利腐蚀条件下,因此金属材料必须具有特殊的耐腐蚀性能。刮刀叶片一般采用塑料材料,在与金属换热避免长期高速摩擦的情况下,必须具有高耐磨的性能。

由稀浓度的乙二醇(或其他盐类)水溶液制出的冰晶颗粒十分细腻,粒径可低于 $500\mu\text{m}$ ,蓄冰槽冰浆固相含量(IPF)可达50%以上。

## 3 流态化动态冰蓄冷技术的先进性及应用前景

流态化动态冰蓄冷技术克服了传统冰球、盘管式冰蓄冷技术中的最主要缺陷,因此一经推出即显示出巨大的应用前景。从原理上和应用上出发,可以归

纳出流态化动态冰蓄冷技术相对于传统的冰球、盘管式静态冰蓄冷技术的如下一些技术优势:

(1) 传热效率高、制冰速度快。动态制冰过程中不但避免了因冰层聚集而引起的导热热阻,还通过强制对流大幅度提高了系统的整体换热性能,从而提高了制冰速度。

(2) 制冷系统COP高、能耗降低。制冷蒸发温度可以保持在 $-5^{\circ}\text{C} \sim -8^{\circ}\text{C}$ 之间,而且在整个蓄冰过程中保持稳定不下降。相对于冰球、盘管式冰蓄冷中 $-10^{\circ}\text{C}$ 以下的蒸发温度(而且随着蓄冰量的增加逐渐下降)可以显著提高系统COP。

(3) 融冰速度快、负荷响应灵敏。由于动态冰蓄冷制出的冰以冰浆形式存在,因此在融冰释冷时冰晶与水之间接触面积大,融化速度快,可以快速响应空调末端负荷的变动。

(4) 占地面积小、场地适应性强。动态冰蓄冷无需盘管、冰球等预制设备,因此蓄冰槽有效利用率提高,占地空间减小,而且对空间形状要求降低,场地适应性增强。

(5) 热交换系统简单、节省设备和材料费用。动态冰蓄冷技术中的冰浆生成热交换器可以采用制冷剂直接蒸发,省去了冰球、盘管式冰蓄冷中必须采用的不冻液换热循环,因此带来换热设备和材料费用的节省,降低了初投资费用。

无论从能效还是经济角度出发,动态冰蓄冷技术均有优于传统冰球、盘管式冰蓄冷的显著优势。在各类大中型中央空调系统、区域供冷、化工工艺、土建等行业和领域都有动态冰蓄冷的广阔应用前景。当前,我国已经有许多省市实行了针对冰蓄冷空调的分时电价政策,如浙江、江苏、上海、北京、深圳等,其他地方也都在相继制定之中。因此,动态冰蓄冷实用技术的突破必将为我国的蓄冷空调行业产生深远的影响。

#### 4 国内外技术研究现状

流态化动态冰蓄冷技术从上世纪90年代末开始在日本展开研究。到目前为止,已经有包括高砂热学、Sunwell(日本)等公司成功研发出新型的动态冰蓄冷技术。其中高砂热学最早掌握过冷水式动态冰蓄冷的商业化实用技术,而Sunwell(日本)则最早掌

握了刮刀扰动式动态冰蓄冷的商业化实用技术。目前两种技术都已在日本大量应用。

然而,在我国不但没有动态冰蓄冷空调的应用实例,就连基础研究也非常少见。清华同方在过冷水动态制冰方面做了一定程度的基础性研究。迄今为止,仅中国科学院广州能源研究所对此技术进行了系统深入的研究。从2003年起,中国科学院广州能源研究所在“引进国外杰出人才”基金以及广东省科技计划项目的大力支持下,开始了对流态化动态冰蓄冷技术的全面研究。成功突破热交换器堵塞、超声波促晶、以及动态解冰等关键技术,建立了流态化动态制冰示范系统,研制成功我国拥有自主知识产权的动态冰蓄冷技术,使我国的第二代流态化动态蓄冷技术基本达到国际先进水平,打破了国际技术壁垒。

如今,动态冰蓄冷已成为国际上冰蓄冷技术的主要发展方向,而且在发达国家普及迅速。随着动态冰蓄冷技术在我国的成功研发,将大大推动动态冰蓄冷技术在我国推广利用,必将对我国的电力负荷移峰填谷产生深远影响。

#### 参考文献

- 1 曲凯阳,江亿.日本过冷水动态制冰研究开发现状.暖通空调,1998,Vol.28(3):31~36
- 2 E.Stamatiou, J.W.Meewisse, M.Kawajia.Ice slurry generation involving moving parts.Int. J. of Refrigeration, vol.28(2005):60~72
- 3 曲凯阳,江亿.具有较低最低不结冰温度的结冰基体的选择.水利电力施工机械(冷冻与空调节能专辑),2000,vol.21(1):23~26
- 4 Matthieu Fauchaux, Guillaume Muller, Michel Havet, Alain LeBail.Influence of surface roughness on the supercooling degree: Case of selected water/ethanol solutions frozen on aluminium surfaces.Int. J. of Refrigeration, vol.29(2006):1218~1224
- 5 M.J. Wang, V. Goldstein.Ice Slurry Based Thermal Storage Technology.IEA-Annex 17: 7th Expert Meeting and Work Shop.Beijing, October 11~12, 2004
- 6 于震,曲凯阳,江亿.二次冷媒式过冷水动态蓄冰空调系统的实验研究.暖通空调,2003,Vol.33(4) [B]