

空调蓄冷技术在我国的研究进展^{*}

清华大学 王宝龙[☆] 石文星 李先庭

摘要 简要综述了国内空调用蓄冷技术在基础研究和应用研究方面的进展。冰蓄冷装置的发展和完善为空调蓄冷技术的大规模应用奠定了基础,高温相变材料的阶段性研究成果使得蓄冷系统整体效率的提高成为可能,蓄冷技术在应用方向的长足进步为空调蓄冷的发展提供了新的方向和思路。

关键词 冰蓄冷 相变材料 季节性蓄冷 被动蓄冷

Progress in research of cool storage technologies for air conditioning in China

By Wang Baolong[★], Shi Wenxing and Li Xianting

Abstract Summarizes the domestic technical progress of fundamental and applied research in this field. Development and maturation of the ice storage equipments has largely promoted the application of cool storage in air conditioning. Research on high temperature phase change materials (PCM) has made progress in the phase sense, which will enhance the total energy efficiency of the cool storage system. Major achievements in application of cool storage provide new directions and ideas for development of cool storage in air conditioning.

Keywords ice storage, PCM, seasonal cool storage, passive cool storage

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

0 背景

高效的能源系统除了包括高效的能源生产和能量使用环节外,还需要高效的能源输配和蓄存体系。能源蓄存是缓解能量供求双方不匹配的有效方式,这种不匹配包括时间上的、空间上的和强度上的。在实际的应用中,能源的生产往往是受到时间、空间和强度的限制。譬如,太阳能电力只能在白天获得,具有明显的间歇性;水电厂均建设在水力资源丰富的地区;太阳能发电和风力发电的强度受到当时当地日照强度和风速的影响。另一方面,对于能源的使用往往在空间上是分散的,时间和强度上是随机的。因此,很难实现能源生产和使用在空间上的一致性和在时间、强度上的完全匹配。为解决能源生产和使用的空间差异,则需要建立连续性的能源输配网络(如电网和输气/输油管路),或采用先蓄存后将蓄存体转移的方式实现能源的空

间转移。而对于能源生产和使用在时间和强度上的差异,则一方面需要通过增强能源生产的调节能力(如建立调峰电站/气站),同时引导和推动能源使用时间和强度向与生产一致方向转移,另一方面就是要使用能源蓄存技术,缓解甚至消除两者在时间和强度上的差异。

对于我国电网,用电负荷在时间和强度上的差别明显,我国部分城市和地区在夏季和冬季用电的峰谷差已达到 40%。这一方面增加了发电装备的装机容量,降低了发电装备的平均效率,同时由于发电装备容量调节较为困难,也对电网的安全运行构成了威胁。由于大规模电能蓄存困难,需求侧管理(DSM)技术成为解决这一问题的重要努力方向。对于直接使用电力的生产过程,通过电价等手

①☆ 王宝龙,男,1976 年 8 月生,博士,讲师
100084 北京清华大学建筑学院建筑技术科学系
(010) 62786571
E-mail: wangbl@tsinghua.edu.cn
收稿日期:2010-04-25

^{*} 国家重点基础研究发展计划资助项目(编号:2010CB227305)

段鼓励其错峰用电;而对于需要将电力转化为其他能源使用的生产和过程,则要考虑转化能源的储存。对于空调系统,需要考虑冷、热能量的储存。

在我国,建筑能耗占国家总商品能耗的 20% 以上,空调供暖用能则占公共建筑总能耗的 40% 以上,空调设备间歇性用电是导致电网负荷峰谷差巨大的主要原因,因此,发展空调用蓄冷、蓄热技术有其显著的社会和经济意义。概括起来,空调蓄冷的主要优点包括:降低发电设备装机容量,提高发电设备平均效率,提高电网运行的安全性;降低制冷机的装机容量,提高设备的运行效率;降低用户电费支出等。

此外,利用蓄冷技术可实现将非供冷时段的自然冷能蓄存后在供冷时段使用,降低建筑供冷能耗。

1 蓄冷技术研究进展

空调用蓄冷方式主要可分为两种:显热蓄冷和相变蓄冷。

空调用显热蓄冷主要是指水蓄冷,通过水温在 4~12 °C 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制冷机效率。水蓄冷系统的主要缺点是蓄冷密度小,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,常用的隔离方式包括:自然分层式、槽组式、空槽式和隔膜式等。由于水蓄冷的蓄冷密度的限制,相对于冰蓄冷而言,近期对水蓄冷的研究和应用均较少。

相变蓄冷则包括冰蓄冷和其他高温相变材料(相变温度为 6~10 °C 之间)蓄冷。由于相变过程具有等温性好、蓄冷密度大等优点,相比于水蓄冷,相变蓄冷具有更为广阔的应用前景。由于冰的相变潜热大,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。国内外建成的蓄冷工程中,75% 以上采用冰蓄冷。冰蓄冷技术的研究核心在于新型蓄冷方法和装置的研究。

1.1 冰蓄冷系统

自 20 世纪 90 年代中期以来,包括中国科学院广州能源所、清华大学、浙江大学、西安建筑科技大学等在内的众多大专院校、科研机构和企业对冰蓄冷技术展开了大量的研究。研究的方向大体可分

为:1) 结冰/融冰过程的机理及过冷消除技术;2) 蓄冷装置及其蓄冷/释冷特性;3) 冰蓄冷系统的设计;4) 冰蓄冷系统的评价等。对于冰蓄冷系统的基础性研究更多地集中在蓄冷装置蓄冷/释冷特性方面,以期提高冰槽的蓄冰率和蓄冷/释冷速率。按照制冰和释冷方式的不同,空调用冰蓄冷系统可分为:冰球/冰板蓄冷系统、内融冰系统、外融冰系统和动态冰系统。

1.1.1 冰球/冰板蓄冷系统

将去离子水或者其他具有高凝固-融化潜热的蓄能溶液注入由高密度聚合烯烃材料制成的球或者板内,并将其堆积于槽体内就构成了冰球/冰板蓄冷冰槽。冰球/冰板蓄冷系统的蓄冷和释冷均需要通过载冷剂在冰槽内的流通实现。冰球/冰板蓄冷系统是出现较早并且到现在还在较大规模使用的冰蓄冷系统。其主要优点是:系统结构相对简单,易调整蓄冷容量,易隔离蓄能溶液与载冷剂。冰球/冰板蓄冷系统的主要缺点是:堆积空隙可能降低单位容积蓄冷量,球壳或者板壳增加了换热热阻,取冷过程冰与壳体的接触面积小,取冷速率低。国内对该系统的研究多集中于单个冰球及其堆积冰槽的蓄冰和融冰特性研究^[1-4]。冰球蓄冷槽的代表性生产厂家有 Cristopia, CRYOGEL, Reaction, 杭州华电华源环境工程有限公司等。

1.1.2 内融冰系统

蓄冷时,将冷水机组制出的低温载冷剂送入蓄冰槽(桶)中的塑料管或金属管内,使管外的水结成冰;释冷时,将温热的载冷剂送入塑料管或金属管内取出冷量,而后通过换热器转换给冷水,这种系统形式即为内融冰系统。与冰球系统相同,其蓄冷/释冷过程均需要载冷剂参与。内融冰系统的主要特点是:1) 冰槽蓄冰率(IPF)高(对于完全冻结式,IPF>90%);2) 盘管外冻结和融冰均匀,无冻坏的危险;3) 由于要经过多次换热,释冷速率受限,释冷温度(冷水)较高。国内对于内融冰系统的研究集中在内融冰冰槽的蓄冷/释冷特性模拟和实验上^[5-9]。提高内融冰冰槽的取冷速率、降低释冷热阻是内融冰研究的一个重要方向。由于高 IPF 和控制的简便性,生产内融冰冰槽的厂家较多,包括 Calmac, FAFCO, BAC, DUNHAM-BUSH, 同方股份有限公司和杭州华电华源环境工程有限公司等。

1.1.3 外融冰系统

外融冰的蓄冷过程与内融冰完全相同,只是在释冷过程中通过管外水的流动实现取冷。因此,外融冰系统能获得较大的取冷速率和较低的释冷温度。为防止管冰搭接(ice-bridging)损坏盘管并留出融冰水流通道,外融冰的蓄冰率一般小于 70%。冰槽蓄冷/取冷特性,尤其是取冷特性,是外融冰系统的重点研究内容^[10-14]。外融冰冰槽的典型生产厂家为 BAC,同方股份有限公司和杭州华电华源环境工程有限公司等。

对于高层建筑,开式的外融冰冰槽(一般与制冷机一起设置在地下室或者地面)直接与冷水系统连接存在冷水倒灌问题,所以需要将融冰水与冷水隔离。部分外融冰冰槽通过在冰槽内设置换热器实现两者的隔离,但增加换热器提高了冷水的温度,削弱了外融冰相对于内融冰的优势。闭式外融冰冰槽是解决这一问题的较好方法^[15-16]。对于开式外融冰和内融冰系统,蓄冰率一般通过冰槽液位的变化来检测,但对于闭式外融冰系统,无法检测液位的变化,则需要新型的 IPF/冰厚检测方法^[17]。

1.1.4 动态冰系统

动态冰系统是指冰在制取和融解过程中发生了空间位置变化的冰蓄冷系统形式,主要包括:冰片滑落式(热气脱冰和机械刮冰)、过冷水制冰、直接接触式制冰等。大、中型空调系统有望采用的动态冰系统主要包括冰片滑落式和过冷水制冰等。冰片滑落式蓄冷系统通过在板式蒸发器表面或者套筒式蒸发器内壁喷洒冷水结冰,当冰厚达到设定厚度时,采用热气脱冰或者机械刮冰方式使冰片脱落到冰槽中。过冷水制冰则是指通过对水成分和换热器/管道表面的处理,使水在换热器中被冷却至低于凝固点时并不发生凝结,当被输送到冰槽中时,在促晶表面和过冷释放板的引导下发生部分凝结,冰堆积在冰槽中,水则返回换热器再次进行过冷制冰。动态冰蓄冷系统的显著优点在于:制冰过程由于冰层厚度小(冰片滑落式)或者为流体(过冷水制冰),蓄冷效率高;相对于外融冰系统,可获得更大的融冰速率,取冷温度可更低;可将冰浆直接输送到用户端用于供冷,极大地降低了输配能耗。动态冰蓄冷系统的主要缺点是:热气脱冰会融化部分冰量,整体蓄冷效率下降 10% 左右,机械脱冰系

统较易发生故障,冰浆稳定性和防堵塞技术有待于进一步提高。清华大学、中国科学院广州能源研究所等单位对过冷水制冰系统有较为全面的研究^[18-21],广州能源所研发出了较为接近实用的过冷水制冰系统。

1.2 高温相变蓄冷材料

由于冰的凝固点为 0℃,所以冰蓄冷过程中制冷机的蒸发温度较低(-10~-3℃),导致能效水平较低。同时由于制冰蓄冷工况与直接供冷工况有较大差别,所以一般需要使用双工况制冷机,增加了初投资和控制复杂性,因此,寻找、研制相变温度为 6~10℃ 的相变材料成为空调蓄冷技术基础研究的另外一个重点方向。

1.2.1 优态盐

优态盐为传统相变材料的一种。根据成分的不同,优态盐的相变温度可以在-114~164℃ 之间调整,能满足各种范围的蓄冷蓄热要求。用于常规空调系统的优态盐一般要求其相变温度为 6~10℃。常用优态盐的主要成分为十水硫酸钠,辅助成分包括 NH₄Cl, NH₄Br 和 NaCl 等。优态盐蓄冷的主要特点为:1) 相变温度与普通空调系统冷水温度相近,所以可使用普通冷水机组实现蓄冷;2) 初次相变潜热较大,但多次循环后有较大幅度的下降;3) 多次运行后存在层化现象。但随着技术的发展^[22-24],性能衰减和层化问题基本得到有效解决。优态盐在蓄冷中的应用方式基本与冰蓄冷中的冰球和冰板相似,即通过封装后放置于蓄冷槽内使用。美国的蓄冷工程中 3% 左右采用优态盐蓄冷,国内的实际应用案例则较少。

1.2.2 气体水合物

气体水合物是一种新型的蓄冷相变材料,它是一种特殊的包含化合物,其基本结构为水分子的刚性笼形晶格中包孕着一个气体分子。通过气体水合物的溶解和生成,实现冷量的释放和蓄存。对于空调蓄冷用的气体水合物,水分子内包含的气体一般为合适的制冷剂,如 HFC-134a, HFC-152a, HCFC-141b 以及 HFC-134a/HCFC-141b 和 HFC-152a/HCFC-141b 的混合气体。制冷剂水合物一般能在 5~12℃ 条件下形成,且结晶相变潜热大(HCFC-141b 水合物的熔解热为 330 kJ/kg),同时在蓄冷、释冷过程中具有很高的传热效率(HCFC-141b 水合物的导热系数为 0.506 4 W/

($\text{m} \cdot \text{K}$)), 因此是一种非常有前途的空调用蓄冷介质。目前, 中国科学院广州能源研究所等多家研究机构已经对空调蓄冷用气体水合物相平衡、结晶过程以及蓄冷装置和系统开展了全面、深入的研究^[25-33], 并且已进行初步试用。

1.2.3 水/油蓄冷材料

水/油蓄冷系统中, 水作为传热流体, 油(一般采用石蜡)作为相变蓄冷介质。蓄冷时, 冷水流入蓄冷槽, 液态石蜡也被喷入蓄冷槽并迅速凝固, 由于石蜡密度比水小, 石蜡颗粒漂浮在水面上; 释冷时, 热水与石蜡接触换热, 石蜡融化同时吸收热水放出的热量, 由于液态石蜡与水的密度不同, 因此可方便地将水与液态石蜡分离, 冷水供空调系统使用, 液态石蜡回储存罐, 供再次喷射使用。空调蓄冷较常采用的石蜡为十四烷, 其熔点为 5.8°C , 相变潜热为 229.1 kJ/kg 。油、水分离是影响该蓄冷技术成功与否的关键。日本冈山大学对采用该技术蓄冷有较为系统的研究, 而国内对于该技术的研究则较少。

1.2.4 功能热流体

在普通传热流体中混入性能稳定的细微相变材料就构成了功能热流体。与水/油蓄冷系统相比, 功能热流体将传热流体和储热流体合二为一, 因此输配管路可作为蓄冷槽的一部分, 同时由于流体表观比热变大, 输配管道尺寸可相应减小。按照相变材料颗粒的制作方式, 功能热流体可分为: 潜热型微乳剂和潜热型微封装材料。潜热型微乳剂是在石蜡(一般为十四烷)中加入表面活性剂后制成石蜡微粒, 将其混入水中构成的微乳剂, 性能较为稳定。在溶液中将悬浮的细微相变材料用薄膜包裹则构成了潜热型微封装材料。与其他高温相变蓄冷方式不同, 功能热流体需要在冷量输配系统中运行, 因此, 长期的碰撞、摩擦和热胀冷缩有可能导致包裹的薄膜破裂, 使流体黏度增加, 引起输运能耗的增加和换热效率的降低。清华大学、天津大学和华中理工大学等院校在该方向有较为全面深入的研究^[34-45]。

在实际应用中, 水蓄冷和静态冰蓄冷依然占据了空调蓄冷系统的绝大多数, 动态冰和高温相变蓄冷技术还未在空调蓄冷系统中大范围使用。

2 蓄冷技术的应用研究进展

与冰蓄冷配套的低温送风空调系统研究一直

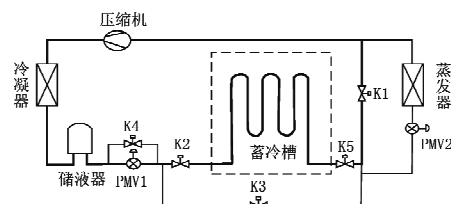
是应用研究的热点, 但由于存在风管保温要求高、室内舒适性不佳和全空气系统能耗高等问题, 低温送风空调系统一直未大规模应用。近期一些应用研究为蓄冷技术在空调系统的发展拓展了思路。

2.1 负荷预测方法

负荷预测和冰槽制冷机优化控制方法一直是影响冰蓄冷系统性能的最主要因素之一。合理的负荷预测是确定下一时段运行策略的基础。简单的制冷机优先控制不能实现蓄冷系统效能的最大化, 而直接的冰槽优先控制有可能导致不能全时段满足系统的供冷需求。因此, 基于合理负荷预测的优化控制方法是空调蓄冷系统实现能效最大化的必由之路。模糊理论、神经网络和专家系统等优化控制理论在室外环境参数和负荷预测上的应用^[46-50]一定程度上提高了负荷预测的准确程度和冰蓄冷系统的总体性能。

2.2 带蓄冷功能的小型制冷空调装置

中小型空调制冷装置数量巨大, 因此, 在中小型空调制冷装置中使用蓄冷技术是电力移峰填谷的一项重要技术手段。此外, 在小型空调装置中采用蓄冷技术将在保证制冷快速性的同时降低装机容量并提高负荷率, 对提高装置的全年能效系数非常有利。对于负荷侧为空气的中小型空调制冷系统, 采用与大型制冷系统相同的蓄冷技术将在很大程度上增加系统的复杂程度并降低技术的经济性。现阶段, 较常采用的技术为蓄冷增加过冷的技术方式^[51-54](见图 1)。即在系统中设置蓄冷槽, 非供冷时段蓄冷槽作为蒸发器, 系统向蓄冷槽内蓄存冷量, 而在需要大容量制冷时则将冷凝器出口制冷剂先通入蓄冷槽中过冷后再进入膨胀节流装置, 快速提高系统的制冷容量和能效水平。可以看出, 这一系统的结构比较简单, 如果采用相变蓄冷材料, 空调制冷装置的体积也不会大幅增加, 因此具有很好



K1~K5 为截止阀 PMV1, PMV2 为膨胀阀

图 1 带蓄冷功能的空调制冷装置^[54]

的应用前景。此外,需要注意的是,就增加制冷剂过冷度而言,并不需要采用冰蓄冷,采用相变温度更高的相变材料可能取得更高的整机能效^[62]。

2.3 模块化蓄冷装置

冰蓄冷系统的实际负荷转移能力和性能不但与蓄冰槽和制冷机的设计性能、蓄冷系统的控制方法有关,而且直接受到容量匹配和系统安装情况的影响。冰蓄冷系统中需要协调配置容量并安装的部件较多,主要包括:制冷机组、冰槽、主循环泵、蓄冷泵、冷水泵、换热器和多个切换阀门等。不合理的部件形式选择、容量配置和安装方式将导致整个蓄冷系统的实际蓄冷能力和释冷性能与设计情况有较大差异。模块化蓄冷装置^[55-57]将上述部件的选型、容量配置和安装在生产工厂一次完成,构成模块化的蓄冷装置,这不但有利于降低蓄冷系统设计和安装的难度(与普通冷水机组相同),而且可以在很大程度上提高冰蓄冷系统的整体性能。

2.4 季节性蓄冷

普通的蓄冷系统以 1 天为单位,实现白天制冷负荷向夜间的转移,最大程度实现电力的移峰填谷。而以数天或者一周为单位的蓄冷系统,譬如用于体育馆和教堂等,蓄冷的主要功用在于减小制冷设备的装机容量^[58]。此外,也可以以年为单位蓄存冷量,称之为季节性蓄冷。季节性蓄冷指在冬季时将室外的免费冷量蓄存起来而夏季使用的蓄冷方式^[59-61]。出于蓄冷密度和投资考虑,一般采用冰作为蓄冷介质。可以看出,季节性蓄冷应该更多地作为一种节能技术考虑。北京奥运村幼儿园已经有季节性蓄冷系统的初步应用实践^[62]。

2.5 蓄冷技术在热电冷联供系统中的应用

热电冷联供由于能使用热能生产电、冷和热,所以具有很高的综合能源效率。但由于以下原因,需要考虑冷和热的蓄存:1) 建筑物的电、冷和热需求在时间上难以一致;2) 建筑物电、冷和热的需求比例与三联供系统的电、冷和热的生产比例不同;3) 现阶段,三联供系统生产的电力上网困难;4) 电力大量蓄存困难。因此,在热电冷联供系统中采用蓄冷/蓄热技术是进一步提高该技术优势的必然。三联供系统制冷采用溴化锂吸收式制冷机的较多,所以,蓄冷一般采用水蓄冷方式。已有部分

高校在该方向开展研究工作^[63-67]。

2.6 相变蓄冷材料在建筑围护结构中的直接使用

对于昼夜温差较大的地区,可以在围护结构中使用合适温度的相变材料,通过夜间通风的方式实现夜间冷能在围护结构中的蓄存并在白天向室内释放,降低甚至消除建筑的冷负荷。另外,在一些冬、夏温差大且跨越舒适温度区的地区,可以通过在围护结构中增加相变蓄冷材料的方式实现跨季节的蓄冷和蓄热,实现“理想节能建筑”^[68]。研究显示,被动蓄能式相变建筑围护结构的使用能一定程度缩短该建筑的供冷和供暖时间^[69-74],是建筑节能的一个重要发展方向。

3 结语

蓄冷技术在建筑空调系统中的应用不但有助于电力需求的移峰填谷,降低发电设备和制冷机组的装机容量,提高设备的运行效率,降低用户电费支出,同时可以实现免费冷能的利用,降低建筑的空调能耗。在蓄冰槽、高温蓄冷相变材料、蓄冷负荷预测、蓄冷装置小型化、季节性蓄冷、蓄冷装置模块化、在热电冷联供领域的应用和在建筑围护结构中直接使用等方向的研究,必将推动蓄冷技术在空调领域的进一步发展。

参考文献:

- [1] 李先庭,赵庆珠,李吉生,等. 冰球式蓄冷罐的数学模型[J]. 暖通空调,1996,26(4):19-22
- [2] 张华,孙毅刚. 冰球结冰蓄冷过程的研究[J]. 流体机械,1999,27(10):47-49
- [3] 管建春,朱华,阿迪尔 M S,等. 储冰球相变传热数值计算及分析[J]. 浙江大学学报,1999,33(1):85-89
- [4] 康艳兵,张寅平,江亿,等. 相变蓄热球体堆积床传热模型及热性能分析[J]. 清华大学学报,2000,40(2):106-109
- [5] 方贵银. 内融式冰盘管融冰放冷动态模型研究[J]. 制冷学报,1998,19(4):25-29
- [6] 朱颖心,张雁. 内融冰式冰盘管蓄冷槽传热性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报,1999,7(3):298-307
- [7] 赵龙,范林,黄兴华. 内融冰盘管式蓄冰槽结构参数优化及其对性能的影响[J]. 流体机械,2000,28(1):54-56
- [8] 谷波,裴勇华,郑钢. 基于内融冰的蓄冰槽蓄冰和融冰模型[J]. 暖通空调,2002,32(4):82-84
- [9] 李铁华. 内融式盘管蓄冰系统实验研究[J]. 华北电力大学学报,2009,36(2):64-68

- [10] 方贵银. 外融冰盘管蓄冷动态特性研究[J]. 制冷, 1998, 17(3): 15-19
- [11] 张茂勇, 李先庭, 赵庆珠. 外融式冰盘管取冷特性的实验研究[J]. 暖通空调, 2002, 32(4): 6-9
- [12] 王宝龙, 李先庭, 吕先志, 等. 盘管式外融冰槽融冰过程试验研究(I)——取冷特性[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 611-614
- [13] 王宝龙, 李先庭, 吕先志, 等. 盘管式外融冰槽融冰过程试验研究(II)——温度分布[J]. 太阳能学报, 2003, 24(6): 745-749
- [14] 朱煜, 陈国邦. 外融式冰盘管取冷特性实验研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(3): 86-89
- [15] 石文星, 赵彬, 王宝龙, 等. 一种闭式外融冰蓄冰槽: 中国, CN1464281 [P]. 2003-12-31
- [16] 吕晓燕. 壳管式外融冰槽热工性能及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2004
- [17] Shi Wenxing, Wang Baolong, Li Xianting. A measurement method of ice layer thickness based on resistance-capacitance circuit for closed loop external melt ice storage tank [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25 (11/12): 1697-1707
- [18] 曲凯阳, 江亿. 日本过冷水动态制冰研究开发现状[J]. 暖通空调, 1998, 28(3): 31-36
- [19] 曲凯阳, 江亿. 过冷水动态制冰的研究[J]. 暖通空调, 2001, 31(2): 1-4
- [20] 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[J]. 暖通空调, 2003, 33(4): 44-47
- [21] 肖睿, 黄冲, 宋文吉, 等. 动态冰蓄冷系统的无预热制冰运行研究[C]//第9届海峡两岸制冷空调技术交流会论文集, 2009: 43-45
- [22] 谢全安, 郑丹星, 武向红. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 共晶盐的热化学研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(1): 70-75
- [23] 陈胜立, 童明伟. 空调共晶盐高温相变蓄冷技术的分析[J]. 制冷空调与电力机械, 2007, 113(28): 27-29
- [24] 李兴仁, 童明伟, 吴碧容. 共晶盐低温蓄冷材料的实验[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(8): 113-115
- [25] 郭开华, 舒碧芬, 张奔, 等. HFC134a/HFC141b 混合气体水合物相平衡特性[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(4): 406-409
- [26] 曾丽, 郭开华, 赵永利, 等. 制冷剂简单气体水合物相平衡计算[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(1): 13-16
- [27] 陈光进, 马庆兰, 郭开民. 气体水合物生成机理和热力学模型的建立[J]. 化工学报, 2000, 51(5): 626-631
- [28] 赵永利, 郭开华, 樊栓狮, 等. 气体水合物结晶引导时间和结晶区域的实验研究[J]. 制冷, 2001, 20(2): 1-5
- [29] 刘勇, 郭开华, 梁德青, 等. 在磁场作用下 HCFC-141b 制冷剂水合物的生成过程[J]. 中国科学(B 辑), 2003, 33(1): 89-96
- [30] 刘永红, 郭开华, 梁德青, 等. 超声波作用下的制冷剂水合物结晶过程研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 385-387
- [31] 刘勇, 郭开华, 梁德青, 等. 混合制冷剂水合物晶体生成和分解过程研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(2): 242-245
- [32] 吕昶, 郭廷玮, 朱庭英, 等. 气体水合物蓄冷实验研究[J]. 制冷学报, 2000, 21(2): 14-18
- [33] 毕月虹, 郭廷玮, 朱庭英, 等. 促晶器流量对气体水合物蓄冷过程影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(1): 1-8
- [34] 胡先旭, 张寅平. 等壁温条件下潜热型功能热流体换热强化机理的理论研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(5): 626-633
- [35] 胡先旭, 张寅平. 等热流条件下潜热型功能热流体换热强化机理研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(2): 224-226
- [36] 张寅平, 胡先旭, 郝磐, 等. 等热流圆管内潜热型功能热流体层流换热的内热源模型及应用[J]. 中国科学(E 辑): 技术科学, 2003, 33(3): 237-244
- [37] 张寅平, 王馨, 陈斌娇, 等. 潜热型功能热流体的制备及其传热和流动特性研究进展[J]. 高技术通讯, 2006, 16(5): 485-491
- [38] Yang R, Xu H, Zhang Y P. Physical property and thermal physical property of phase change microcapsule slurry and phase change emulsion [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2003, 80(4): 405-416
- [39] Zhang Y P, Hu X X, Wang X. Theoretical analysis of convective heat transfer enhancement of microencapsulated phase change material slurries [J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 40(1/2): 59-66
- [40] Hu X X, Zhang Y P. Novel insight and numerical analysis of convective heat transfer enhancement with microencapsulated phase change material slurries: laminar flow in a circular tube with constant heat flow [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45: 3163-3172
- [41] Chen B J, Wang X, Zeng R L, et. al. An experimental study of convective heat transfer with microencapsulated phase change material suspension;

- laminar flow in a circular tube under constant heat flux [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008, 32(8): 1638–1646
- [42] 赵镇南, 吴挺, 时雨荃, 等. 相变乳状液的流变和传热性能研究[J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(5): 589–592
- [43] 赵镇南, 时雨荃, 张毅, 等. 相变乳状液在蛇形管中的流动和传热特性[J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(6): 730–732
- [44] 方玉堂, 匡胜严, 张正国, 等. 纳米胶囊相变材料的制备[J]. *化工学报*, 2007, 58(3): 771–775
- [45] 方玉堂, 匡胜严, 张正国, 等. 纳米胶囊相变材料研究[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(3): 295–298
- [46] 王勇. 蓄冰系统优化控制研究[D]. 北京: 清华大学, 1997
- [47] 杨自强, 陆亚俊. 利用神经网络预测空调负荷[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 2000, 33(1): 51–54
- [48] 骆维军, 李吉生, 赵庆珠. 蓄冰系统优化控制算法[J]. *暖通空调*, 2002, 32(2): 82–84
- [49] 吴杰. 冰蓄冷空调系统负荷预测模型和系统优化控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002
- [50] 石磊. 基于负荷预测在线修正的冰蓄冷空调系统优化运行研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2002
- [51] 周晓棠, 李吉生, 赵庆珠. 家用空调中冰蓄冷的应用及实验研究[J]. *制冷学报*, 2001, 22(3): 1–4
- [52] 方贵银, 徐锡斌. 小型蓄冷空调系统研究[J]. *制冷*, 2003, 22(1): 5–8
- [53] 王美. 小型冰蓄冷空调系统特性分析与实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2006
- [54] 杜艳利, 何世辉, 肖睿, 等. 直接蒸发内融式冰蓄冷空调的蓄冷和释冷特性[J]. *制冷学报*, 2007, 28(3): 31–35
- [55] 李先庭, 邵双全, 王宝龙, 等. 一种集成化冰蓄冷机组: 中国, CN1380522 [P]. 2002–11–20
- [56] 李先庭, 石文星, 邵双全, 等. 一种冰蓄冷用冰槽与换热器集成装置: 中国, CN1380521 [P]. 2002–11–20
- [57] 张建筑. 模块组装式冰蓄冷空调装置: 中国, CN201285129 [P]. 2009–08–05
- [58] 李先庭, 李寒春, 石文星. 基于设计周期负荷的冰蓄冷系统设计[J]. *暖通空调*, 2007, 37(5): 83–88
- [59] 余延顺, 李迪, 李先庭, 等. 季节性冰雪蓄冷技术的研究现状与技术展望[J]. *暖通空调*, 2005, 35(3): 24–30
- [60] 姜益强, 姚杨, 马最良, 等. 季节性天然蓄冷技术初步探讨[J]. *低温建筑技术*, 2005(6): 110–111
- [61] 郑茂余, 刘威, 韩宗伟, 等. 土壤季节性蓄存自然冷量的实验研究[J]. *暖通空调*, 2005, 35(10): 5–8
- [62] 石文星, 颜承初, 李先庭, 等. 跨季节与夜间复合蓄冷系统设计与实践[J]. *暖通空调*, 2008, 38(增刊): 125–131
- [63] 付林, 杜敬三. 蓄冷装置在天然气热电冷联供系统中的应用[J]. *区域供热*, 2003(2): 1–5
- [64] 胡文斌, 华贲, 郭荷清. 蓄冷模式下楼宇热电冷联供系统的分析[J]. *煤气与热力*, 2004, 24(12): 670–674
- [65] 李永红. 蓄能模式下楼宇热电冷联供系统优化运行和设计分析[D]. 北京: 清华大学, 2005
- [66] 张莉, 徐士鸣. 潜能蓄能技术在分布式热电冷联供系统中的应用[C]//第4届全国制冷空调新技术研讨会论文集. 南京, 2006
- [67] 李永红, 付林. 蓄能模式下楼宇热电冷联供系统的优化运行研究[J]. *暖通空调*, 2008, 38(增刊): 87–91
- [68] Zhang Y P, Lin K P, Zhang Q L, et al. Ideal thermal physical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermal physical property material [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(10): 1164–1170
- [69] 林坤平, 张寅平, 江亿. 我国不同气候地区夏季相变墙房间热性能模拟和评价[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(1): 46–52
- [70] 林坤平, 张寅平, 江亿. 夏季“空调”型相变墙热设计方法[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(2): 145–151
- [71] Xu X, Zhang Y P, Lin K P, et al. Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(10): 1084–1091
- [72] Zhou G B, Zhang Y P, Wang X, et al. An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar applications [J]. *Sol Energy*, 2007, 81(11): 1351–1360
- [73] Zhou G B, Zhang Y P, Lin K P, et al. Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(6): 1228–1236
- [74] 闫全英, 王威, 于丹. 相变储能材料应用于建筑围护结构中的研究[J]. *材料导报*, 2005, 19(8): 102–105