

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-558-07

# 相变蓄冷技术在小型设备的应用和研究进展

宣子杰 江燕涛 王路路

(广东海洋大学机械与动力工程学院 湛江 524088)

**【摘要】** 相变蓄冷技术是一种非常重要的储能, 保温手段。相变蓄冷技术利用蓄冷剂在相变过程中所具有的潜热来储能, 并通过发生相变释放热, 可以有效的在需要时储能, 达到节约能源, 保持低温等效果。目前, 相变蓄冷技术已经广泛应用于各个行业。主要介绍了技术的基本工作原理, 以及该技术在一些小型设备领域上的应用, 并总结了部分相关的成果, 从该技术在空调、冰箱、冷却服、集成化电子模块的散热、保温箱五个方面的应用以及研究进展进行了总结和介绍。也对归纳了一些依然存在的问题并对该技术未来的发展进行了展望, 并且对新型蓄冷剂的开发研究的问题以及方向进行了总结和论述。

**【关键词】** 相变; 蓄冷, 小型化; 应用研究  
中图分类号 TB65 文献标识码 A

## Application and Research Progress of Phase Change Cold Storage Technology in Small Equipment

Xuan ZiJie Jiang Yantao Wang Lulu

(School of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, 524088)

**【Abstract】** Phase change cold storage technology is a very important means of energy storage and heat preservation. Phase change cold storage technology uses the latent heat of the refrigerant in the process of phase change to store energy, and release heat through phase change, which can effectively store energy when needed, achieve energy saving, keep low temperature and other effects. At present, phase change cold storage technology has been widely used in various industries. The article mainly introduces the basic working principle of the technology, and the application of the technology in some small equipment fields, and summarizes some related achievements. It also summarizes and introduces the application and research progress of the technology in five aspects: air conditioning, refrigerator, cooling suit, heat dissipation of integrated electronic module and heat preservation box. It also sums up some existing problems and prospects the future development of the technology, and summarizes and discusses the problems and directions of the development and research of new refrigerant storage.

**【Keywords】** Phase change; cold storage; miniaturization; Application Research

作者简介: 宣子杰 (1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为智能产品的创新设计, E-mail: 845377234@qq.com

通讯作者: 江燕涛 (1967-), 女, 教授, E-mail: jiang238@163.com

收稿日期: 2020-01-02

## 0 引言

蓄冷是一项将低于环境温度的冷量进行储存起来留待以后应用的技术, 它是制冷技术的补充和调整, 是协调冷能在时间和强度上供需不匹配的一种经济可行的方法<sup>[1]</sup>。蓄冷装置的使用能够起到移

峰填谷、节能降耗的作用<sup>[2]</sup>。

相变蓄冷技术与传统的蓄冷方式相比, 相变蓄冷中采用了相变式蓄冷剂, 与非相变蓄冷剂相比, 相变蓄冷剂的储能能力强、操作简单、易于应用和管理, 在相变过程中温度变化不大, 温度滑移较

小<sup>[3,4]</sup>, 国外的一些学者通过实验对比热泵在水蓄冷和相变蓄冷两种蓄冷方法下的蓄冷特性, 实验结果表明, 相变材料可以提供的冷量比水蓄冷多出 14.5%<sup>[5]</sup>。因此相变蓄冷技术能起到较好的节能环保效果以及为系统提供优良的稳定性。相变蓄冷技术可应用于太阳能存储<sup>[6]</sup>, 保护电子元件<sup>[7]</sup>, 建筑节能<sup>[8]</sup>, 建筑节能围护<sup>[9]</sup>等方面。由于相变材料 (PCM) 的相变潜热一般比显热要大得多, 故采用 PCM 的蓄冷系统一般可储存的能量密度更大; 而且吸热和放热过程可以在非常均匀的温度情况下进行<sup>[10]</sup>。

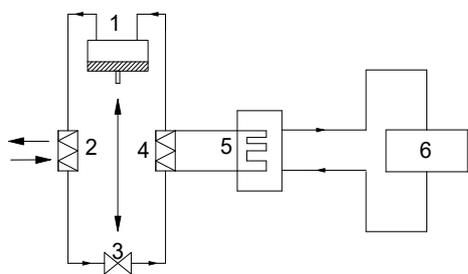
目前, 相变蓄冷技术应用于很多大型设施如中央空调集中蓄冷, 水轮发电机冷却等方面<sup>[11]</sup>已经十分常见, 并且技术的应用在不断地向小型化设备靠拢, 许多小型设备中也开始应用到了相变蓄冷技术进行保温, 散热等。本文主要简单介绍了相变蓄冷技术的原理, 并且列举了一些相变蓄冷技术在小型设备中的应用实例。

## 1 工作原理

物质在固态, 液态, 气态三态变化的过程, 称之为相变过程, 相变过程需要同外界进行能量交换, 在发生相变的过程所吸收的热量称之为该物质的潜热。这种在相变时把冷量储存起来, 而在需要时又能把冷量释放出来的方法, 就是相变蓄冷<sup>[12]</sup>。

物质的潜热所具有的能量非常巨大, 采用合适的相变材料来蓄冷可以获得较高的储能密度, 因此采用相变蓄冷技术的蓄冷系统在能源高效利用和节能等方面有着广阔的应用前景<sup>[13]</sup>。

一个典型的相变蓄冷系统一般包括用户热源排热部分和制冷部分两个循环分别交替工作。下图是一个简单的相变蓄冷系统。



1—压缩机; 2—冷凝器; 3—节流阀; 4—蒸发器;  
5—蓄冷器; 6—用户

图 1 相变蓄冷系统示意图<sup>[14]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of phase change cool storage system

如图所示, 在一个工作的循环周期内, 在所需要的降温的用户部分没有工作时, 左侧的制冷循环会开始工作, 使蓄冷剂开始存储冷量, 并相变凝固。当用户开始工作后, 开始释放热量, 固态的蓄冷材料开始吸收热量释放冷量, 并发生熔化, 达到给用户提供冷量, 降温或维持低温的效果。当用户又一次停止工作后, 制冷系统重新开始给蓄冷剂提供冷量。

## 2 技术现状及相关应用

相变蓄冷技术的小型化应用正在逐渐广泛起来, 为了适应特殊行业设备小型化的需求, 近年来相变蓄冷系统相继采用微通道换热器, 以小型化、间歇工作为特点, 用微通道平流式换热器作为冷凝器、蒸发器, 蒸发器直接与相变材料相接触而构成一个新型蓄冷器<sup>[15]</sup>。对该系统进行模拟研究发现, 增加冷凝器的进口风温可以提高压缩机功率、降低系统的 COP (性能系数); 增加冷凝器的迎面风速对于系统性能的提升存在上限; 增加压缩机转数是提高制冷量、缩短蓄冷时间的最有效方法<sup>[15]</sup>。

关于相变蓄冷材料的研究也在不断发展, 对于小型化设备其相变蓄冷材料的使用要求会更加高。对于纯石蜡系 PCM, 其热导率较低, 加膨胀石墨可以使得热导率越高, 但相变潜热会减少, 调节石蜡热导率, 对改变其融化深度, 降低换热器体型有巨大意义<sup>[10]</sup>。对于气体水合物的研究, 日本的 Tanni 等研究人员试验证实 HCFC-141b 为 CFC-11 的合适替代物<sup>[16]</sup>。对于潜热型功能热流体, 徐慧等研究以正十四烷为相变材料的相变乳状液, 30%浓度有较好的潜热值, 且用十四烷和十六烷混合的二元混合材料可以改善其热性能<sup>[17]</sup>。郝英立等研究发现流体中加入相变微胶囊可降低壁面, 流体温度, 增强对流换热<sup>[18]</sup>。

这些相关方面的研究都为相变蓄热技术提供了技术支持, 与应用发展方向, 相变蓄冷技术在小型设备的应用也越来越广泛。

### (1) 小型空调

为了减少电力白天的负荷, 达到“移峰填谷”以及能源综合利用的效果<sup>[19]</sup>, 相变蓄冷技术也越来越多地应用于小型家用空调之中。与传统空调相比,

蓄冷空调增加了储能罐, 储能罐与蒸发器和换热器并联<sup>[20]</sup>。在小型相变空调的研究上, 日本三菱公司已经研制出设有制冷机自然循环蓄冷装置的落地式冷气空调器, 日本大金工业、日立制作所、三菱重工以及三菱电机还联合开发了一种利用夜间电力将冰和热水蓄存在蓄热槽中的小型冰蓄热式组合空调机<sup>[21]</sup>。

西安科技大学的王美搭建了由空调系统和测控系统构成的小型冰蓄冷空调系统实验台, 根据实验得到了蓄冰槽温度分布等重要数据, 实验结果显示小型冰蓄冷空调系统可靠性高, 取冷方式灵活, 传热性质好<sup>[22]</sup>。

在空调蓄冷剂的研究上, Zibiao Wang 提出了一种  $\text{CO}_2\text{-g-h}$  浆液作为蓄冷剂, 非常适合空调系统<sup>[23]</sup>。基于相关学者关于利用脂肪酸作为相变材料的研究, 发现的两种及以上脂肪酸混合形成的共晶混合物可以有更低的相变温度的结论<sup>[24]</sup>, Zhao Wang 等用辛酸和壬酸组成的二元脂肪酸 PCMs 体系作为空调相变蓄冷剂, 找到摩尔分数为 0.814 时能满足温度范围要求, 熔点为  $7.6^\circ\text{C}$ , 潜热为  $123\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ , 且热性能较好, 对比其余同温度范围的脂肪酸 PCMs, 辛酸和壬酸体系所具有的性能比较高<sup>[25]</sup>。

方贵银等通过实验确定了一种蓄冷材料可以在小型蓄冷空调上使用, 其凝固温度为  $5.7\sim 3.9^\circ\text{C}$ , 溶解温度为  $5.3\sim 8.4^\circ\text{C}$ , 溶解热为  $222.5\text{kJ/kg}$ <sup>[26]</sup>。魏玲等将采用高温相变材料和冰混合蓄冷的方式与普通冰蓄冷对比, 发现采用高温相变蓄冷材料的空调方案将使系统 COP 值大大提高并使增蓄冷槽蓄冷量及释冷量大大提高<sup>[27]</sup>。

由于小型相变蓄冷装置中无储液器, 制冷剂将直接分布于系统, 因此蓄冷剂充注量对系统的影响很大<sup>[28,29]</sup>, 吴东波等就不同充注量对小型相变蓄冷空调性能的影响做了实验, 发现存在最优充注量, 可以具体分析以达到最优制冷量, 制冷速率以及最优 COP<sup>[30]</sup>。

针对空调中相变储冷球壳体易破裂的问题, 许家潭<sup>[31]</sup>等提出了一种相变蓄冷模块, 可以对相变蓄冷球实现固定。郑毅<sup>[32]</sup>提出了一种空调上的相变蓄冷装置, 很好地实现了间歇性工作。

## (2) 小型家用冰箱

同时, 相变蓄冷技术也越来越多的应用到了冰

箱上, 使冰箱有更好的冷冻效果, 且蓄冷冰箱比普通冰箱温度更均匀, 压缩机启停频率少, 冰箱更加节能<sup>[33]</sup>。王会等对于相变冰箱的冷冻系统提出了一种快速热交换结构, 可使食品快速降温, 尽可能短的时间内度过其最大冰晶生成带, 比普通冰箱所需要的时间大大减少, 达到速冻的效果。王会等还通过研究得出, 采用蓄冷材料可以通过冷冻室和冷藏室之间的能量转移, 改善冰箱制冷系统的不足, 可以实现更好的节能<sup>[34]</sup>。

为了实现蓄冷部件和冷藏室之间的精确冷量输运及温度控制, 曹静宇提出了一种分离式热管技术, 实验证实了该技术有较快的传热速率, 较好的传热调节能力<sup>[35]</sup>。陈楚雄研究了将分离式热管技术在蓄冷冰箱中的实际应用, 通过实验成功实现了降温, 并让相变蓄冷空调有更好的温度控制性能<sup>[36]</sup>。

张伟配制出一种适用于冰箱冷藏室蓄冷的二元低共熔有机复合相变蓄冷材料, 并通过将其与孔隙率为 95%, 孔密度为 20PPI, 孔径为 1mm 的泡沫铜复合, 极大地改善了蓄冷材料的热传导性能<sup>[37]</sup>。王梦凯等利用 DSC 仪器实验研制出由质量分数为 15%丙三醇、10%氯化钠和 70%水组成的冰箱冷冻室的蓄冷材料, 无毒无污染, 易于获得, 且相变温度  $-21^\circ\text{C}$  左右较为合适, 无相分离现象<sup>[38]</sup>。陈英姿等提出了一种采用组合式相变材料蓄冷的方法, 可以有效延长冰箱保冷时间<sup>[39]</sup>。

针对冰箱的优化设计, Cofré-Toledo Jonathan 等利用两种共晶盐相变蓄冷剂对冰箱蒸发器进行了改进实验, 将其中的水平管平行布置且在平行管中有少量相变蓄冷剂。最后实验结果证实两种共晶盐相变材料改性蒸发器都能有效降低压缩机的功耗、运行时间、运行周期, 为相变蓄冷冰箱的优化设计提供了很好的思路<sup>[40]</sup>。并且有相关研究指出, 将 PCM 与蒸发器直接接触可以增大蒸发器传热能力, 实现更快地传热, 且也可以在 PCM 中存储系统过剩冷却能力<sup>[41]</sup>。

## (3) IGBT 模块散热装置

随着电动汽车, 高速列车, 新型飞机等技术的不断发展, 大功率电子器件的应用越来越广泛<sup>[42-44]</sup>, 由于损耗的问题, 其控制部分的 IGBT 模块会有严重的发热情况, 会对系统的稳定运行产生危害, 从而会提高设备的故障率<sup>[45]</sup>。相变冷却技术对于热流密度高, 并且间歇工作的系统散热非常适合, 但由

于目前的控制系统高度集成化, 因此体积较小。

李建立等制备了一种板状相变蓄冷单元, 选用膨胀石墨来定型相变材料, 在石墨蠕虫状的微孔的表面张力以及毛细管的吸附力的作用下, 相变材料被锁定于微孔里面, 并且搭建实验台进行了该模块的释冷特性研究<sup>[46]</sup>。

刘海洋对于新型飞机电推进系统控制器中 IGBT 功率模块的散热问题展开研究, 确定了该系统 IGBT 模块的功率损耗情况, 针对模块温度变化对相变蓄冷装置作了优化<sup>[44]</sup>。

#### (4) 蓄冷保温箱

随着食品冷链系统的不断发展, 为了实现长途运输的保温, 相变蓄冷技术在视频冷链中有了极大的应用。其中小型保温箱中应用非常广泛。

保温箱通过在蓄冷板中装蓄冷剂, 运用相变蓄冷技术的保温箱没有冷源, 因此箱内的长时间低温环境依靠不同温度段的蓄冷板来完成<sup>[47]</sup>。

目前蓄冷保温箱的箱体保温材料主要有发泡材料和真空绝热板等<sup>[48]</sup>, 保温材料的选择对于箱体保温以及温度控制都有着重要的作用。

不同的蓄冷材料适用于不同温度段的蓄冷要求, 杨国梁等针对一种保温箱只能储藏一种温度段的物品, 设计出了一种相变蓄冷式双温区保温箱, 箱内设有冷藏区和微冻区两个温度区, 通过实验和模拟, 虽有温度场分布不均的情况, 但是能够满足保鲜要求并实现多种产品共同存储<sup>[49]</sup>。

蓄冷保温箱对于蓄冷剂的选择除了要有合适的相变温度和高潜热之外, 蓄冷材料还应该稳定, 且无毒不易腐蚀, 相变体积变化小等<sup>[50]</sup>。

针对高原野战条件下血液的存储问题, 马艳娟等提出了一种采用相变蓄冷剂与冰袋相结合作为冷源的蓄冷箱, 可以将血液温度 2~6℃, 并且保持血液理化、生物性质稳定, 同时, 采用相变蓄冷剂和冰袋结合的保温箱对于血液存储效果优于仅采用相变蓄冷剂的保温箱<sup>[51]</sup>。

针对保温箱蓄冷剂的研究, 徐笑峰等研发了一种成分为 75.5%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O+3%硼砂+1.25%聚丙烯酸钠 16%NH<sub>4</sub>Cl+4%KCl+0.25%去离子水的蓄冷剂, 相变温度为 6.4℃, 相变潜热为 141J/g, 可用于果蔬保鲜 2℃~8℃运输温区要求, 且研究表明应用于真空绝热板保温箱的保温效果优于发泡聚丙烯保温箱<sup>[52]</sup>。贾蒲悦等制备出一种以质量分数

5%的山梨醇水溶液为基液的相变蓄冷材料, 相变温度在 0℃左右, 且根据实验, 加入纳米材料可有效降低蓄冷剂过冷度并增加热导率, 经优化得蓄冷剂成分为 5%山梨醇水溶液+0.4%TiO<sub>2</sub>+1PAAS, 相变温度为-2.9℃, 潜热为 293.8kJ/kg<sup>[53]</sup>。傅一波等研制出一种成分为 3%KNO<sub>3</sub>+1%乳酸钙+3%羧甲基纤维素钠+水, 该蓄冷剂以相变潜热较高的硝酸钾水溶液为基础, 相变温度为-3.79℃, 相变潜热为 308.2J/g, 稳定性较高, 无明显的过冷及相分离现象<sup>[54]</sup>。Bai Bing 等分别用纯净水、质量分数为 18.8%NaCl、46.3%乙醇和 29%CaCl<sub>2</sub> 溶液对运送农产品的相变蓄冷保温箱进行了测试实验, 实验结果表明冷藏中相变蓄冷剂相变温度越低产品保鲜时间越长, 且 18.8%的氯化钠溶液冰袋和 46.3%的氯化钙溶液冰袋分别能较好适应短距离配送和 5h 中长距离配送, 且冰冻状态下 46.3%的氯化钙溶液冰袋对于农产品保鲜效果最好<sup>[55]</sup>。Tumirah 等利用乳液原位聚合法, 将十八烷作为芯材, 并将苯乙烯——甲醛作为壁材, 制得微胶囊有机相变蓄冷材料, 具有良好的化学稳定性和热稳定性<sup>[56]</sup>。

#### (5) 冷却服

在一些特殊高温工作中比如矿井开采等, 由于采取大面积制冷能耗高成本巨大, 而使用冷却服这一个体降温的方式是一种最为经济实用的降温方式<sup>[57]</sup>。相变冷却服通过相变材料蓄冷, 通过材料的相变吸收热量从而实现了对人体的制冷, 由于相变材料的相变潜热高, 因此比其它如气体冷却服, 液体冷却服等有更好的制冷效果, 且成本更低。

相变冷却服最早于 20 世纪 70 年代的美国以二氧化碳气体相变进行降温<sup>[58]</sup>, 发展至今冷却服的相变蓄冷剂主要有冰、干冰、石蜡、水凝胶、吸水树脂等, 其中以冰、水凝胶和石蜡的应用较为广泛<sup>[57]</sup>。

相关研究指出通过微胶囊技术将相变材料封装或者直接编织到衣服上可以有效降低整体衣服的重量, 且有一定的温度调节作用<sup>[59]</sup>。Geng XiaoYe 等制备了一种可逆热致变色微胶囊相变材料 (TC-MPCMs), 具有优良的蓄热能力和循环耐久性, 可以应用于热防护服<sup>[60]</sup>。

姬长发等提出无机盐可作为良好的降温剂, 并选用 NaCl 和 KCl, 并实验得出添加合适的成核剂可降低其过冷度, 同时选用合适催化剂可制成凝胶,

最终蓄冷剂成分为聚乙烯醇浓度 7%，戊二醛浓度 10%，柠檬酸浓度 2%，以质量配制比例为 20:1.1:1 形成溶液<sup>[61]</sup>。

Almqvist 提出一种将相变材料仅装于四肢的冷却服以便于拆卸，使用者可以根据不同的温度需要选择不同的蓄冷剂更换，且衣服上有一个具有活化物质的便携式容器，将相变材料浸入其中可以使其再次活化<sup>[62]</sup>。

### 3 问题与展望

在对于相变蓄冷技术的小型化应用中，具有高蓄热密度，低成本且温度区间良好的蓄冷剂的制备是最为关键的：

#### (1) 蓄冷剂的研究

小型化设备大多应用于生活中与人体，食品等相关的蓄冷，因此蓄冷剂的研究要向无毒无害，且成本低等方面考虑。且蓄冷剂还存在不易降解和回收机制欠缺等问题，这会对环境产生较大危害<sup>[63]</sup>，因此未来对于相关环保经济的蓄冷剂的制备也十分重要。

过冷水是由于水质过于纯净，水中没有凝结剂，使得水温在 0℃ 以下仍能保持液态，过冷水对蓄冷技术有着重大的意义，可以有着和固液相变一样的蓄冷效果和冷量存储能力，同时在冷量输送上可以和液体一样在管道内直接输送。但是对于过冷水目前尚处在实验室研究阶段，它的液态仍旧不稳定，仍旧无法投入实际的蓄冷工作之中。如果能将过冷水技术应用于小型蓄冷装备中，将会是一个很大的提升。

气体水合物是一种非常好的高温相变材料，其蓄冷能力以及密度与冰相当。在国内外关于气体水和物的研究中，发现在蓄冷槽中气体水合物会有分层的现象，底部层为气体水合物晶粒层，上面的一层是增长速度比较快的固体的泡沫状水合物。且相关研究表明，底部的一层会非常有利于进行高密度蓄冷，而上部的一层当制冷剂流量过大时，就会有可能会冲出蓄冷槽的问题产生。因此可以在对气体水合物的研究中，考虑如何好好利用气体水合物晶粒层，尽量解决固体泡沫状水合物冲出的问题。

滑热型功能流体是一种固液多相流体，相变乳状液的传热性能较好，但易于堵塞管道，而微胶囊乳状液则在传热性能上较相变乳状液差<sup>[64]</sup>，相关研

究表明流体中加入相变微胶囊可以有效改善换热效果<sup>[65]</sup>，在关于相变微胶囊的研究中可以更多突破关于其换热效果以及流动性的问题。

#### (2) 相变蓄冷技术实际应用优化

相变蓄冷技术在实际的小型化应用中仍旧会产生一些问题。

对于相变冷却服，由于其制冷温度完全取决于所封装的蓄冷材料，其相变温度不可调，因此在实际使用于人体时会有一定问题。因此今后可以进一步研究相变微胶囊技术开发其调温能力，或者研究冷却服结构上的优化或者开发具有良好调温效果的相变材料，实现温度的可调。

另外可以尝试相变蓄冷技术与新能源之间的联合使用，例如开展太阳能相变蓄冷空调的研究，研制可以适用于太阳能空调的相变蓄冷材料，实现进一步节能减排。

同时应用相变蓄冷的设备中，有时会出现蓄冷剂腐蚀、泄露等问题产生，因此要除了要考虑开发新型相变蓄冷剂之外，还要提高蓄冷剂的封装技术。而且由于相变蓄冷系统有两个循环，整体较为复杂，因此在小型设备如冷却服、保温箱等设备上所使用相变蓄冷剂需要更换而不能直接用制冷系统补充冷量，因此蓄冷剂的更换较为麻烦，且蓄冷时间不能保证，而且要在小型设备中加入蓄冷系统对于加工工艺要求较高，要制造出小型压缩机、换热器等。因此可以开展对于更高蓄冷能力的相变材料的开发，延长蓄冷时间。也可以尝试在小型设备中加入制冷系统，或是外置蓄冷系统，可以不用更换相变材料而补充冷量。

#### 参考文献：

- [1] 杨天润. 基于相变材料的冷库储能系统设计及优化[D]. 山东: 山东大学, 2018.
- [2] ZHAI X Q, WANG X L, WANG T, et al. A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 108-120.
- [3] A Felix Regin, S C Solanki, J S Saini. An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34: 1765-1773.
- [4] Seong OK Han, Dong Won Lee, Oc Hee Han. Thermal degradation of cross-linked high density polyethylene[J].

- Polymer Degradation and Stability, 1999,63(2):237-243.
- [5] Pere Moreno, Albert Castell, Cristian Sole, et al. PCM thermal energy storage tanks in heat pump system for space cooling[J]. Energy and Buildings, 2014,82:399-405.
- [6] Kenisarin M, Mahkamov K. Solar energy storage using phase change materials[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007,11(9):1913-1965.
- [7] Tan F L, Tso C P. Cooling of Mobile Electronic Devices Using Phase Change Materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2004,24(2-3):159-169.
- [8] Auckaili A, Farid M M. A Review on Energy Conservation in Building Applications With Thermal Storage by Latent Heat Using Phase Change Materials[J]. Energy Conversion and Management, 2004,45(45):263-275.
- [9] 王安琪,孟多,赵康,等.相变材料在建筑围护结构及建筑设备中的节能应用[J].能源与节能,2019,5:64-68.
- [10] 莫冬传,吕树申,何振辉.相变蓄冷换热器的优化设计[J].工程热物理学报,2015(1):175-178.
- [11] 滕启治,谭欣,武紫玉,等.大型水轮发电机冷却方式综合评价方法的研究[J].物理学报,2015,(17):421-427.
- [12] 郑家林,孙晓红.相变蓄冷原理及其应用[J].节能,1995,(6):12-16.
- [13] 杨天润,孙锲,WENNERSTEN Ronald,等.相变蓄冷材料的研究进展[J].工程热物理学报,2018,(3):567-573.
- [14] 吴学红,王春煦,高茂条,等.相变蓄冷技术在食品冷链中的应用进展[J].冷藏技术,2016,(3):5-11.
- [15] 崔焱朝,潘艳秋,俞路,等.带有微通道换热的小型相变蓄冷系统性能研究[J].现代化工,2019,(10):208-211.
- [16] Akiya T,Oowa M, Nakaiwa M, et al. Novel cool storage system using HCFC-141b Gas Clathrate [J]. In: Proc of the 26<sup>th</sup> IECEC, 1991,6:115-119.
- [17] 徐慧,杨睿,张寅平,等.相变材料及相变乳状液的热性能[C].全国暖通空调制冷2004年学术年会资料摘要集(2),2004.
- [18] 郝英立.圆管内潜热型功能流体对流换热的实验研究[J].工程热物理学报,2005,(2):283-285.
- [19] 付长城,谭海阳.广东某粮仓水蓄冷空调系统设计[J].暖通空调,2019,(8):81-84.
- [20] Shuang-Fei Li, Zhen-hua Liu, Xue-jiao Wang. A comprehensive review on positive cold energy storage technologies and applications in air conditioning with phase change materials[J]. Applied Energy, 2019,255(1):113667.
- [21] 刘广海,丁力行,屈睿瑰.蓄冷空调小型化研究[J].制冷与空调,2003,(6):33-37.
- [22] 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.
- [23] Wang Z, Li F, Fan T, et al. Research on the Application of Gas Hydrate in Cool Storage Air Conditioning[J]. Procedia Engineering, 2015,121:1118-1125.
- [24] Yuan Y, Zhang N, Tao W, et al. Fatty acids as phase change materials: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,29:482-498.
- [25] Zhao W, Gui X M, Shang L, et al. A novel binary mixture of caprylic acid/nonanoic acid as latent heat storage for air conditioning and cooling[J]. Energy and Buildings, 2017,145(15):259-266.
- [26] 方贵银,徐锡斌.小型蓄冷空调系统研究[J].制冷,2003,(1):9-12.
- [27] 魏玲,臧润清,李景丽,等.混合蓄冷空调的试验研究[J].制冷与空调,2007,7(2):65-67.
- [28] Woohyun Kim, James E Braun. Evaluation of the impacts of refrigerant charge on air conditioner and heat pump performance[J]. International Journal of Refrigeration, 2012,35(7):1805-1841.
- [29] 张良俊,吴静怡,王如竹.充注量对小型热泵热水器性能影响的实验及分析[J].上海交通大学学报,2006,(8):56-60.
- [30] 吴东波,张泉,陈晓明,等.小型相变蓄冷空调性能的实验研究[J].建筑科学,2017,(6):62-67.
- [31] 许加潭,李国荣.一种相变蓄冷模块蓄能系统[P].中国专利:CN207196774U,2018-04-06.
- [32] 郑毅.一种相变蓄冷装置[P].中国专利:CN107560477A, 2018-01-09.
- [33] 樊栓狮,孙始财,梁德青.一种新型蓄冷冰箱及其运行过程研究[J].制冷,2005,(1):5-8.
- [34] 王会,刘忠宝,陈向峰.相变蓄冷材料在冰箱上应用的研究[J].制冷,2014,(3):26-29.
- [35] 曹静宇.可控型分离式热管及其在蓄冷冰箱中的应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [36] 陈楚雄.可控分离式热管在蓄冷冰箱中的应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2019.

- [37] 张伟. 冰箱冷藏工况下新型复合相变蓄冷材料的制备及热性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [38] 王梦凯, 雷明镜, 韦永钰, 等. 适用于冰箱冷冻室的复合相变蓄冷材料研究[J]. 黑龙江科学, 2018, 9(12): 27-28.
- [39] 陈英姿, 刘益才, 杨智辉. 冰箱组合式相变材料蓄冷的实验研究[J]. 制冷技术, 2006, (2): 19-22.
- [40] Cofré-Toledo Jonathan, Vasco D A, Isaza-Roldán César A, et al. Evaluation of an integrated household refrigerator evaporator with two eutectic phase-change materials[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 93: 29-37.
- [41] Visek M, Joppolo C M, Molinaroli L, et al. Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: System energy optimization[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 43: 71-79.
- [42] 潘政薇, 温传新, 骆健. 电机控制器 IGBT 模块水冷散热设计[J]. 机电信息, 2019, 30: 122-123, 125.
- [43] 许茗宸. 应用于 IGBT 冷却的相变换热实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [44] 刘海洋. 电推进系统的相变储能式散热器性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [45] 赵红璐. 配电网静止同步补偿器散热设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [46] 李建立, 刘孟然, 许明明, 等. 板状相变蓄冷单元快速释冷特性实验研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2019, 27(1): 18-22, 27.
- [47] 李杰瑞, 武吉梅. 蓄冷保温箱技术的应用探讨[J]. 印刷技术, 2018, (1): 49-51.
- [48] 陈海洋, 张建一. 蓄冷型运输保温箱在冷链中的应用[J]. 冷藏技术, 2010, (3): 12-16.
- [49] 杨国梁, 胥义, 辛岩, 等. 相变蓄冷式双温区城市宅配保温箱的研制及测试[J]. 包装工程, 2018, 39(23): 53-60.
- [50] Sidik N A C, Kean T H, Chow H K, et al. Performance enhancement of cold thermal energy storage system using nanofluid phase change materials: A review[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 94: 85-95.
- [51] 马艳娟, 郭鹏涛, 李宏, 等. 相变蓄冷剂结合冰袋用于高原野战条件下血液的储存[J]. 西南国防医药, 2017, (9): 918-921.
- [52] 徐笑峰, 章学来, Jotham Muthoka Munyalo, 等. 十水硫酸钠相变蓄冷保温箱保冷特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 22: 308-314.
- [53] 贾蒲悦, 武卫东, 王益聪. 新型 0°C 相变蓄冷材料制备及蓄冷特性[J]. 化工进展, 2019, (6): 2862-2869.
- [54] 傅一波, 王家俊, 王冬梅. 复合相变蓄冷剂性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, (10): 241-243.
- [55] Bai B, Chen N, Li X. Application Research of Nano-storage Materials in Cold Chain Logistics of E-commerce Fresh Agricultural Products[J]. Results in Physics, 2019, 13: 102049.
- [56] Tumirah K, Hussein M Z, Zulkarnain Z, et al. Nano-encapsulated organic phase change material based on copolymer nanocomposites for thermal energy storage[J]. Energy, 2014, 66: 881-890.
- [57] 邓军, 何骞, 刘长春, 等. 相变冷却服发展趋势[J]. 科技导报, 2017, (21): 107-114.
- [58] Vigo T L, Frost C M. Temperature-Adaptable Fabrics[J]. Textile Research Journal, 1985, 55(12): 737-743.
- [59] 宋文庆, 李毅, 邢建伟, 等. PCM 微胶囊改善纺织品的温度调节性能研究[R]. 北京: 第五届功能性纺织品及纳米技术研讨会, 2005.
- [60] Geng X, Li W, Wang Y, et al. Reversible thermochromic microencapsulated phase change materials for thermal energy storage application in thermal protective clothing[J]. Applied Energy, 2018, 217: 281-294.
- [61] 姬长发, 姬晨阳, 王展荣, 等. 冷却服相变蓄冷填充材料特性实验研究[J]. 煤矿安全, 2019, (7): 21-25.
- [62] Almqvist H O. Cooling garment having phase change material in its extremity portions[P]. US: 8499367, 2013-08-06.
- [63] 王雪松, 谢晶. 蓄冷保温箱的研究进展[J]. 食品与机械, 2019, (8): 232-236.
- [64] 管天. 相变蓄冷技术的研究现状和发展[J]. 冷藏技术, 2007, (3): 54-59.
- [65] 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, (5): 589-592.