

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.07.037

相变蓄冷材料及其在冷库中应用的研究进展

Research progress of phase change cold storage materials and their application in cold storage

孙锦涛^{1,2} 谢晶^{1,2,3}SUN Jin-tao^{1,2} XIE Jing^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 冷链装备性能测试与节能评价公共服务平台, 上海 201306; 3. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心[上海海洋大学], 上海 201306)

(1. College of Food Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Public Service Platform for Cold Chain Equipment Performance Testing and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:采用文献综述及实际案例相结合的方法,分析了相变材料的特点、蓄冷冷库制冷的原理,以及在实际应用中如何充分发挥各自的优点以达到理想的效果。

关键词:蓄冷技术;相变蓄冷材料;冷库;蓄冷冷库;蓄冷板

Abstract: Using a combination of research literature review and actual cases, the characteristics of phase change materials and the refrigeration principle of cold storage with phase change materials were analyzed, and their respective advantages were fully utilized in practical applications to achieve a more ideal effect.

Keywords: cold storage technology; phase change material; cold storage; cold storing cold store; cold storing plate

冷链物流为易腐食品贮藏、运输和销售提供适宜的温湿度,可以极大地降低农产品和食品的腐损率。冷库是食品冷冻加工、贮藏和流通的重要基础设施,是冷链的关键点,目前中国冷库建设正在飞速发展,主要分布在水果、蔬菜基地的主产区和大中型城市郊区的蔬菜基地。根据中国物流与采购联合会 2019 年公布的数据,中国冷库总量达到 6 052.5 万 t(1.51 亿 m³),但是直到现在中国人均冷库的持有量仍然较低,冷库供需仍然不足,伴随着城镇化,生鲜电商以及生鲜食品贸易的发展,冷库市场发

展的前景广阔^[1]。冷库规模和数量还将快速增长,同时冷库的高能耗是不可忽视的问题,冷库的能耗由供冷用能、风机用能、照明用能等多个方面构成,但绝大部分的能源是由供冷的制冷系统消耗(约占冷库总能耗的 70%)^[2]。

日益增长的电力消耗给电力系统带来了巨大的压力,早在 2013 年国家发改委就发布了《关于完善居民阶梯电价制度的通知》,在保持居民用电价格总体水平基本稳定的前提下,全面推行居民用电使用峰谷电价。在中国目前的电价体系中,大部分地区工商业用电分为“一般工商业用电”和“大工业用电”,对于冷库若实行“大工业用电”则可以利用峰谷电价^[3],这也激励了制冷行业使用蓄冷技术,在夜间峰谷电价时运行制冷机组将冷量储存起来,在白天用电高峰时再释放出来,以缓解高峰电力供应紧张的情况。刘金平等^[4]在广州珠江新城核心的集中供冷项目中发现,应用冰蓄冷技术后减少了配电初投资 1 800 万元,运行 10 余年制冷系数(COP)超过 3.3,2019 年仅一个夏季减少了 18 MW 的峰值电力负荷并转移了 3.772×10⁷ kW·h 的峰值时段电力负荷至峰谷时段;并且提出了区域供冷在中国具有良好发展前景。对于比空调系统更加耗能的冷库系统,利用蓄冷技术可带来更加显著的经济效益,缓解电力供给失衡问题。陈放^[5]提出了一种以氨/硝酸锂为工质的潜热储能系统,进行了热力学和经济性计算分析,发现较常规氨双级压缩系统热力性能提高了 10.65%,每年节约电费 44.7 万元。在用电紧张的地方,可应用冰蓄冷技术提高冷库的储存效果同时缓解用电问题。蓄冷技术在中央空调系统的应用已经较为成熟,但在冷库中的应用还非常少,为此文章

基金项目:上海市科委科技创新行动计划(编号:19DZ1207503);上海市科委公共服务平台建设项目(编号:20DZ2292200)

作者简介:孙锦涛,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士。

E-mail:jxie@shou.edu.cn

收稿日期:2021-02-10

拟总结归纳可用于冷库温度区间的相变蓄冷材料的特点,及其在冷库中的应用案例,以期为未来蓄冷冷库的发展提供参考。

1 蓄冷技术概述

由于相变材料(Phase change material, PCM)有很高的储能密度,是当前蓄冷领域的研究热点。相变材料在冷链中的应用有着很大的潜力。适合冷库的相变材料要有适合的相变温度,较大的潜热的热导率;没有过冷,有稳定的可逆融化和凝固的过程,不易燃烧、无毒,对材料无腐蚀性,对环境无污染;应该有较小的体积膨胀率和较低的蒸汽压力,并且价廉易得^[6]。蓄冷技术是先将获得的冷量储存起来,在需要使用的时候再释放出来的技术,是制冷技术的调节和补充。蓄冷技术的研究和应用主要集中在空调相关领域,在食品低温物流和冷库等行业的研究和应用较少,但是这方面的需求也不容忽视。在电力处于低谷的时候制冷机工作制冷,利用储能材料将这部分冷能储存起来,在电力高峰时期再释放出来,缓解用电高峰,提高能源利用率。苏文等^[7]讨论了蓄冷技术在冷库中的可行性,介绍了直接应用于高温冷藏库用于减少制冷机组容量、低温冷藏库冷凝器循环冷却水的降温冷却以及空调低温水的制备 3 个方面。杨天润^[8]搭建了相变蓄冷冷库试验台,采用相变(水凝胶;纯水中添加碘化银、硼砂等成核剂)蓄冷板储存冷能,进行了模拟和试验研究,解析模型、物理模型和数学模型均有较好的一致性,经济性分析表明该冷库回收期短,运行收益优良。相变蓄冷板在冷库中的安装位置也有研究,实际中的安放位置应该优先考虑顶部,可加强冷库下部分的自然对流换热,其次均匀地布置在侧壁上,可使冷库内部温度场分布更加均匀。孙静等^[9]研究了乙二醇蓄冷剂用于冷库的可行性,设计了制冷剂、乙二醇载冷剂循环,试验结果表明乙二醇蓄冷剂用于果蔬冷库可以达到果蔬贮藏保鲜的技术要求。郭伟杰^[10]介绍了多温级蓄能制冷系统在冷库中的应用,能够充分利用峰谷电价达到削峰填谷,并且能量转换效率高,储能时间长,可以适应 0 °C 的高温冷库和 -18 °C 的低温冷库。此外,吴丽媛等^[11]论述了相变蓄冷技术应用于冷库保鲜和低温冷库的广阔应用前景。

1.1 显热蓄冷

显热蓄冷是利用物质的热容在物质不发生相态改变的情况下,随着温度升高或降低所吸收或释放出来的能量,虽然显热蓄冷操作简单、成本低,但是所需蓄冷剂量大、所需空间多,大大地限制了其应用。

Guan 等^[12]提出了使用固体石墨烯材料组为蓄能材料,用来加热水的新型显热储热系统。采用了两种水箱组合系统来提高输出温度的质量,防止显热蓄热系统的温度波动。利用仿真软件模拟,结果表明,采用了单双罐系统

两步调整方法,固体石墨烯的蓄能材料可以满足所需的热热水温度要求。Vigneshwaran 等^[13]利用空气作为蓄能材料,开发了一维动态模型来研究不同模块的显热存储系统,利用动态模型来研究适用于大规模应用的显热存储系统。分析了铸钢、铸铁和混凝土材料作为管壳结构空气在内的储能模块,找出最适合集成到大规模工业应用中的最佳组合,储存的能量可以用来发电,给锅炉加热水等。在冷库蓄冷系统的研究中未见有显热蓄冷的应用。

1.2 潜热蓄冷

潜热蓄冷是利用物质发生相变时吸收或释放出来的能量,远高于利用热容的显热吸收或释放的能量,潜热蓄冷的主要应用有冰蓄冷、共晶盐蓄冷技术等。

冰蓄冷技术也是使制冷机组在夜间峰谷电价时运行,将制成的冰储存起来,利用水的显热和潜热将冷量储存起来,待白天高峰时使用,选用冰作为蓄能材料是因为其相变潜热为 335 kJ/kg,远远高于液态时水的显热蓄冷量,储能密度和水相比较,因此需要的蓄水槽也比蓄水槽小很多。但是也有着一些缺陷,由于冰的温度为零度,导致蒸发温度低以至于 COP 的下降,同时由于温度低,管道系统需要保温防止结露,系统设计及控制复杂。曹琼^[14]将冰蓄冷技术应用于粮食的低温储存中,可以很好地调节温湿度保持粮食的品质,降低粮食的发热同时减少灭害虫的投药量,减少了粮食的化学污染。冰蓄冷技术还可以作为备用冷源,不仅可以缓解电力紧张状况,而且还能降低制冷机组的装机容量,使机组高效率满负荷的运行,提高能源利用率。江燕涛^[15]提出了将动态冰浆(冰浆、片冰)蓄冷技术应用于冷库制冷系统,利用其高湿低温的特性可以提高冷库果蔬的贮藏品质。

1.3 热化学蓄冷

热化学蓄冷是利用某些物质的热化学反应过程会发生吸热或放热这一原理开发的蓄冷技术。目前该技术仍然处于研究中,存在一系列问题需要解决才能用于实际工程中。在一定压力的条件下,将某种气体通入水中发生热化学反应释放热量,并生成气体水合物晶体,反应释放的热量,反过来加热气体水合物时,会发生吸收热量的分解反应,两个过程都是相变过程,有较高的相变潜热。包华汕^[16]利用氯化铵-氨/氯化锰-氨吸附工质的再吸附制冷循环对冰箱保温箱体改造,实现不同环境下(20~35 °C)箱体大空间 0~5 °C 的冷藏和小空间 0 °C 以下的冷冻效果,冷藏空间在 -1~6 °C、冷冻空间在 -10 °C 以下可以维持 3 h。

2 相变蓄冷材料在冷链中应用的研究进展

相变储能材料是冷库蓄冷的基础环节,不过目前相

变材料仍然存在一些缺陷,这主要是由于过冷度大,导热性差,稳定性差等因素造成的。对于相变材料的这些缺陷,可添加成核剂以降低过冷度。成核剂可以在材料的相变过程中促进晶核的形成,加快晶化速率,从而降低过冷度^[17]。添加纳米颗粒增强导热性,例如金属纳米颗粒,非金属纳米颗粒和氧化石墨烯均匀地分散在相变材料中,以增强材料的整体导热率^[18]。添加聚合物材料以提高稳定性,往相变材料中添加高分子量聚合物不仅在某种程度上降低了材料的过冷程度,消除了相分离,而且使材料具有良好的机械性能并增强了材料的热稳定性^[19]。

目前相变材料已经越来越多地用于易腐食品、疫苗和药品的贮运中,具体的蓄冷温度与产品本身的性质有关。Melone等^[20]研制了在4~10℃温度区间用于冷藏包装的不同相变潜热值的相变材料。Leducq等^[21]研究了冰激淋贮运中的相变蓄冷材料,长期贮藏状态下温度波动对冰晶尺寸分布的影响,并与传统聚丙烯的包装材料比较,发现相变蓄冷材料和传统的聚丙烯材料相比可以使冰淇淋的温度保持更加稳定,并且PCM材料的相变温度接近冰激淋的储存温度,可以改善冰淇淋的贮运条件。刘升等^[22]发明了一种混合山梨糖醇、硼砂和水的复合相变蓄冷材料,主要用于水果和蔬菜,以及疫苗的冷藏,该相变材料具有较好的化学稳定性,并且无毒。章学来等^[23]开发了一种用于相变温度为5~15℃的相变储能材料。该材料由月桂酸、单宁酸、十四烷醇和十二烷组成根据 $m_{\text{月桂酸}} : m_{\text{单宁酸}} : m_{\text{十四烷醇}} : m_{\text{十二烷}} = 27.1 : 28.5 : 29.6 : 14.8$ 混合。试验结果表明,这种新的相变储能材料的相变潜热为154 kJ/kg,相变温度为5.13℃,经过600次循环仍显示出良好的热工性能,不发生相分离,适用于生鲜食品的冷链物流。陈嘉杰等^[24]研究并测量了十二烷/膨胀石墨复合相变冷库材料,该相变材料的相变温度为-10.62~-9.82℃,相变潜热为124.8~125.1 kJ/kg。Zhao等^[25]开发了一种适用于冷链物流的复合相变材料,称为TD-LA/EG,相变温度为4.3℃,相变潜热为247.1 kJ/kg,导热系数为0.965 7 W/(m·K),经过400次高温和低温循环稳定性试验后仍保持较好的稳定性,其相变温度仅升高了0.6℃,相变潜热减少了1.9 kJ/kg,在冷库和冷链运输有很好的应用前景。班超方等^[26]研制了一种过冷度较小的低温复合相变材料,可以适用于低温冷库,其相变温度为-25~-23℃,相变潜热在200 kJ/kg以上,经过100次循环稳定性试验后不会出现相分离。

3 相变蓄冷材料在冷库中的应用

相变蓄冷材料在冷库中相当于处于存放能量的仓库,高效率的贮存和释放冷量需要相关设备的帮助^[27]。范国滨等^[28]为相变蓄冷冷库提供了一种技术解决方案,

即利用放热回路、吸热回路和相变材料进行热交换,该装置尺寸小且能耗低。翁立奎等^[29]设计了一种相变冷库系统,以解决冷库温度场分布不均匀的问题,用以防止“冰相变”浮起从而降低传热效率。区自强等^[30]发明了一种相变式蓄冷装置,可以有效地抑制蓄能材料的温度分层问题,提高蓄冷效率和蓄冷效果,并延长蓄能材料的使用寿命。葛磊等^[31]发明了一种高精度的液冷混流温度控制装置,包括相变冷库和储液罐,可以在不同的设定温度范围内使冷库温度稳定。

赵建辉^[32]通过改造集装箱为冷库,用于低温运输血液、疫苗等物资,使用了正十四烷为相变蓄冷材料,相变温度为4.29℃,潜热为216.2 kJ/kg,满足血液(3~6℃)和疫苗(2~8℃)的温度要求,并研制了一种结合泡沫铜材料,进行了配方优化,加快了凝固、融化速度,提高了冷库装备效能。吴丽媛等^[33]将蓄冷系统加入冷库中使用,利用保温箱模拟冷库,验证了在电价高峰的8 h内冷库内温度波动小于0.6℃,最大温差小于1.1℃,可以实现货物保存的要求。Wang等^[34]研究了相变蓄冷材料对冷库性能的影响,在物理尺寸2 000 mm×1 200 mm×1 400 mm,保温墙厚度为100 mm的小型高温冷藏库中进行了试验,测量了冷库不同区域的温度,试验期间冷库内的温度未超过5℃,符合食品保存的温度要求。此外,还评估了其经济性能,该相变蓄冷冷库的投资回收期约为4.1年。

蓄冷剂在使用时常制作成蓄冷板的结构。蓄冷板也称为冷板,在冷冻后,通过释放储存在内部低共熔盐溶液中的冷量来完成冷却过程。冷板的外包装通常由高密度聚乙烯、聚氯乙烯、尼龙复合膜、铝塑复合膜和其他材料制成。在实际应用中,冷板与外界之间的热交换性能制冷系统的制冷性能影响很大。Zhu等^[35]分析了蓄冷剂的类型和质量对冷板的蓄冷量的影响,以及蓄冷剂的类型,环境温度和太阳辐射对释冷时间的影响,并提出了提高蓄冷板的蓄冷容量,减少蓄冷板充时间的方法。Li等^[36]开发了一种新型的曲折结构的蓄冷板,并将该蓄冷板的冷却性能与3种不同尺寸的新型冷板进行了比较,新型曲折结构蓄冷板的冷却速度更快,冷却的时间缩短了39.1%。Zhang等^[37]研究了初始温度为30℃的NaCl蓄冷板冷却到-25,-35,-40℃的冷却和凝固过程,以及在冷库中的释放冷量过程。在冷却凝固过程中,环境温度对共晶液体开始结晶的时间影响很大,当共晶液体开始结晶并至完全冻结时,环境温度对其影响很小。在释放冷量的过程中,当环境温度高于共晶液体的共晶温度时,外部环境对冷藏板的冷却释放时间以及共晶盐融化的过程有很大影响。

蓄冷板尺寸和放置的位置对于冷库温度场的影响。冷板在进行热交换时,环境温度、冷板的尺寸、共晶液体

的类型和制冷剂的量以及冷板的形状都会对冷板的换热过程产生不同程度的影响。邵阳等^[38]提出了顶置蓄冷板的冷库,有霜时库内温度波动比无蓄冷板的冷库减小了 2.49 °C,无霜时温度波动比无蓄冷板的冷库减小了 2.92 °C,有效提高了藏品的质量。杨凤等^[39]基于连续融霜的冷库,研究了顶置蓄冷板对冷库内温度波动的影响,对比无顶置蓄冷板的冷库发现使库内温度波动减小了 2.94 °C。范中阳等^[40]利用保温箱模拟冷库,研究了两种冷板(放在顶部和周围)对冷藏保温箱中的环境温度以及卷心菜的中心温度以及过程中卷心菜质量变化的影响。冷板放置在保温箱四壁周围时比放置在顶部具有更大的优势,箱中的温度上升相对平坦。冷板放置在顶部时箱内温度升高较快,卷心菜的营养指数迅速降低,所以建议在实际冷库配置中尽可能将冷板放置在周围。Zhao 等^[25]同时还开发了一种新型的疫苗冷库,将开发的低温相变材料与冷库设备结合起来进行试验,冷库空载时,疫苗冷库内环境保持在 2~8 °C 的最长时间为 47.73 h,冷库顶板保持在 2~8 °C 的时间最短为 40.78 h。加载试验时,疫苗冷库中维持 2~8 °C 的最长时间为 52.36 h,可以确保疫苗始终处于所需的低温环境中。

4 新型蓄冷技术在冷库中的应用

近年来,水合物蓄冷冷库技术克服了冰蓄冷冷库、水蓄冷冷库和低共熔盐冷库的缺点而受到广泛关注。因为该技术涉及水合物的形成放热和溶解吸热,可以用来制冷和蓄能。水合物包括烷烃水合物、卤代烃水合物、CO₂ 水合物、水溶性有机水合物和混合水合物。还可以通过添加剂(主要是表面活性剂、纳米颗粒、多孔材料和热力学促进剂)等方法优化其热力学性能,因此水合物冷库的工业应用显示出巨大的潜力^[41]。

在水合物中,CO₂ 水合物对环境的影响最小,水合物蓄冷冷库的 COP 可以达到 8.0 或更高^[41]。由于可以采用不同的冷库和冷却方法,因此水合物冷库技术具有很强的竞争力和适应性。不过,在研究新的水合物蓄冷介质,混合水合物介质的使用和相互协同方法,水合物浆液的研究以及商业推广方面,还需要进一步的探索。

Yan 等^[42]介绍了一种新型的冷库系统,该系统由基于热管的天然冰存储子系统 and 用于建筑物的双运行式制冷机组组成,以增强其能源灵活性。在北京的一栋小型冷库建筑中进行了案例研究,研究发现结合热管和冷冻水的冷库系统在性能和配置上显示出极大的互补性,建筑物冷库的负荷系数从季节性的 49.5% 降低到 19.5%,每日的负荷系数从 72.2% 降低到 55.7%。结合了自然冷却和机械冷却系统的优点,用不同的模式运行,以提供季节性冷藏,夜间冷冻水制备存储和特殊情况下的紧急需求,可用于缓解长期,短期和实时的电力不平衡。王俊等^[43]

总结分析了分布式能源系统与蓄能技术结合的应用现状,表示蓄能技术和可再生能源分布式系统耦合是未来的重要发展方向。

5 总结与展望

研究表明:利用相变材料在用电低谷时段蓄冷,在用电高峰时段释放储存的冷量,可缓解电网的负荷,提高电网系统的安全性。同时相变蓄冷材料储存的冷量可以减少冷库内的温度波动并有更好的保冷效果。相变蓄冷材料与冷库结合可以使冷库达到更好的冷藏效果,缓解当下紧张的电力失衡问题。冷库的快速发展给人们生活带来便利的同时也带来了能源的快速消耗问题,目前电能的使用状况并不乐观,电力失衡的问题突出,蓄能技术的推广应用日益受到关注。冷库是耗能大户,蓄冷技术的研发更是迫在眉睫,这将提高能源利用率,缓解电网的峰谷差现象。相变蓄冷材料在今后的研究中需要强化导热,研究成本更低的配方并易于制备,针对不同的温度需求进一步细化温控条件,并拓展其在冷库中的应用,同时要注意相变材料的泄漏问题。在冷库应用中,还需要注意蓄冷板的数量、形状、尺寸以及安装位置对冷库运行的影响,用以达到更加均匀的温度分布、更小的温度波动、更加合理的制冷系统配置以及更加经济的运行效率。

参考文献

- [1] 朱燕媚, 杨伟男. 浅析农产品保鲜冷库发展现状与政策建议[J]. 农机质量与监督, 2020(8): 35-37.
ZHU Yan-mei, YANG Wei-nan. Analysis on the development status and policy recommendations of agricultural products fresh-keeping cold storage[J]. Agricultural Machinery Quality and Supervision, 2020(8): 35-37.
- [2] 孙忠宇, 程有凯. 冷库现状及冷库节能途径[J]. 节能, 2007(7): 53-54, 3.
SUN Zhong-yu, CHENG You-kai. The status quo of cold storage and ways to save energy in cold storage[J]. Energy Saving, 2007(7): 53-54, 3.
- [3] 林卫斌, 周文楠. 商业电价改革政策探讨[J]. 价格理论与实践, 2017(8): 10-14.
LIN Wei-bin, ZHOU Wen-nan. Discussion on commercial electricity price reform policy[J]. Price Theory and Practice, 2017(8): 10-14.
- [4] 刘金平, 滕林, 陈向阳. 区域供冷与蓄冷技术发展动态[J]. 南方能源建设, 2020, 7(3): 1-5.
LIU Jin-ping, TENG Lin, CHEN Xiang-yang. Development trends of district cooling supply and storage technology [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(3): 1-5.
- [5] 陈放. 蓄能技术在水产品冷库制冷系统中应用与分析[C]// 十三省区市机械工程学会第五届科技论坛论文集. 昆明: 海南省机电工程学校, 2009: 427-433.
CHEN Fang. Application and analysis of energy storage technology

- in aquatic product cold storage refrigeration system [C]// Proceedings of the Fifth Science and Technology Forum of Mechanical Engineering Society of Thirteen Provinces, Autonomous Regions and Municipalities. Kunming: Hainan Mechanical and Electrical Engineering School, 2009: 427-433.
- [6] ZHAO Yi, ZHANG Xue-lai, XU Xiao-feng. Application and research progress of cold storage technology in cold chain transportation and distribution[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 139: 1 419-1 434.
- [7] 苏文, 陈汝东. 蓄冷技术在冷库中的应用[J]. 制冷技术, 2002(4): 31-35.
SU Wen, CHEN Ru-dong. Application of cold storage technology in cold storage[J]. Refrigeration Technology, 2002(4): 31-35.
- [8] 杨天润. 基于相变材料的冷库储能系统设计与优化[D]. 济南: 山东大学, 2018: 15-25.
YANG Tian-run. Design and optimization of cold storage energy storage system based on phase change materials [D]. Jinan: Shandong University, 2018: 15-25.
- [9] 孙静, 陈全, 王希卓, 等. 乙二醇蓄冷库的设计和性能[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 66-71.
SUN Jing, CHEN Quan, WANG Xi-zhuo, et al. Design and performance of ethylene glycol cold storage storage[J]. Preservation and Processing, 2020, 20(1): 66-71.
- [10] 郭伟杰. 多温级蓄冷制冷系统在冷库中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 17-30.
GUO Wei-jie. Application research of multi-temperature energy storage refrigeration system in cold storage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 17-30.
- [11] 吴丽媛, 宋文吉, 肖睿, 等. 相变蓄冷技术在低温冷库系统的应用前景[C]// 第七届全国食品冷藏链大会论文集. 青岛: 中国制冷学会, 2010: 130-136.
WU Li-yuan, SONG Wen-ji, XIAO Rui, et al. Application prospects of phase-change cold storage technology in low-temperature cold storage systems[C]// Proceedings of the 7th National Conference on Food Cold Storage Chain. Qingdao: China Institute of Refrigeration, 2010: 130-136.
- [12] GUAN Cheng-yao, LU Hai, ZHANG Liang, et al. Regulation of the output temperature in a novel water heating system using solid graphite as sensible heat thermal energy storage medium: Effects of water tank[J]. Energy Reports, 2020, 6(S7): 160-171.
- [13] VIGNESHWARAN K, SODHI G S, GUHA A, et al. Coupling strategy of multi-module high temperature solid sensible heat storage system for large scale application[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115665.
- [14] 曹琼. 冰蓄冷技术在粮食储存中的应用及发展研究[J]. 中国粮油学报, 2006(3): 345-349.
CAO Qiong. Research on the application and development of ice storage technology in grain storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006(3): 345-349.
- [15] 江燕涛. 动态冰浆蓄冷湿冷技术在果蔬冷藏中的应用前景分析[J]. 制冷与空调, 2015, 15(10): 5-9, 36.
JIANG Yan-tao. Application prospect analysis of dynamic ice slurry cold storage and wet cooling technology in fruit and vegetable cold storage[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2015, 15(10): 5-9, 36.
- [16] 包华汕. 低品位热源驱动的热化学再吸附制冷研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 98-101.
BAO Hua-shan. Research on thermochemical resorption refrigeration driven by low-grade heat sources [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011: 98-101.
- [17] 吴彤. 镁基无机盐低温相变材料的制备及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 2-7.
WU Tong. Preparation and properties of magnesium-based inorganic salt low-temperature phase change materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 2-7.
- [18] ZHAO Yi, ZHANG Xue-lai, XU Xiao-feng, et al. Research progress of phase change cold storage materials used in cold chain transportation and their different cold storage packaging structures[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 319: 114360.
- [19] 张紫恒. 半纤维素树脂复合相变蓄冷剂的研制及性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2017: 46-52.
ZHANG Zi-heng. Development and performance study of hemicellulose resin composite phase change cold storage agent[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2017: 46-52.
- [20] MELONE L, ALTOMARE L, CIGADA A, et al. Phase change material cellulosic composites for the cold storage of perishable products: From material preparation to computational evaluation [J]. Applied Energy, 2012, 89: 339-346.
- [21] LEDUCQ D, NDOYE F T, ALVAREZ G. Phase change material for the thermal protection of ice cream during storage and transportation [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 52: 133-139.
- [22] 刘升, 范中阳. 一种冷藏保鲜用复合相变蓄冷材料: 11222820.0[P]. 2017-05-17.
LIU Sheng, FAN Zhong-yang. A composite phase change cold storage material for cold storage: 11222820.0[P]. 2017-05-17.
- [23] 章学来, 徐蔚雯, 刘田田, 等. 月桂酸-癸酸/十四醇-十二烷复合相变储能材料的制备与性能研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 60-64.
ZHANG Xue-lai, XU Wei-wen, LIU Tian-tian, et al. Preparation and properties of lauric acid-decanoic acid/tetradecanol-dodecane composite phase change energy storage materials[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1): 60-64.
- [24] 陈嘉杰, 徐涛, 方晓明, 等. 膨胀石墨基十二烷复合相变蓄冷材料的性能研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(6): 1 307-1 310.
CHEN Jia-jie, XU Tao, FANG Xiao-ming, et al. Study on properties of expanded graphite-based dodecane composite phase change cold storage material[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(6): 1 307-1 310.

- [25] ZHAO Yi, ZHANG Xue-lai, XU Xiao-feng, et al. Development of composite phase change cold storage material and its application in vaccine cold storage equipment[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101455.
- [26] 班超方, 卢立新, 潘嘹. 冷冻型复合相变蓄冷材料的制备与性能评价[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(5): 218-221, 226. BAN Chao-fang, LU Li-xin, PAN Liao. Preparation and performance evaluation of refrigerated composite phase change cold storage materials[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(5): 218-221, 226.
- [27] 宣子杰, 江燕涛, 王路路. 相变蓄冷技术在小型设备的应用和研究进展[J]. *制冷与空调(四川)*, 2020, 34(5): 558-564. XUAN Zi-jie, JIANG Yan-tao, WANG Lu-lu. Application and research progress of phase change cold storage technology in small equipment[J]. *Refrigeration and Air Conditioning (Sichuan)*, 2020, 34(5): 558-564.
- [28] 范国滨, 张卫, 刘军. 一种相变蓄冷装置: 20344412.7[P]. 2015-10-07. FAN Guo-bin, ZHANG Wei, LIU Jun. A phase change cold storage device: 20344412.7[P]. 2015-10-07.
- [29] 翁立奎, 赵伟杰, 丁玉龙. 一种相变蓄冷系统: 20250748.6[P]. 2017-10-24. WENG Li-kui, ZHAO Wei-jie, DING Yu-long. A phase change cold storage system: 20250748.6[P]. 2017-10-24.
- [30] 区自强, 古育辉, 罗明燕. 相变蓄冷装置及采用其的供冷系统: 10974265.0[P]. 2017-01-25. OU Zi-qiang, GU Yu-hui, LUO Ming-yan. Phase change cold storage device and cooling system using it: 10974265.0[P]. 2017-01-25.
- [31] 葛磊, 余世杰, 陈建辉. 一种基于相变蓄冷机制的高精度液冷渗流控温装置及方法: 10006008.2[P]. 2017-05-24. GE Lei, YU Shi-jie, CHEN Jian-hui. A high-precision liquid-cooled percolation temperature control device and method based on phase change cold storage mechanism: 10006008.2[P]. 2017-05-24.
- [32] 赵建辉. 适用于血液疫苗相变材料的研制以及相变蓄冷技术在部队冷藏库集装箱改造中的应用[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2010: 14-23. ZHAO Jian-hui. Development of phase change materials suitable for blood vaccines and application of phase change energy storage technology in the transformation of military cold storage containers[D]. Beijing: Chinese Academy of Military Medical Sciences, 2010: 14-23.
- [33] 吴丽媛, 宋文吉, 高日新, 等. 基于板式冰蓄冷的冷藏库恒温特性的实验研究[J]. *制冷学报*, 2012, 33(5): 66-69. WU Li-yuan, SONG Wen-ji, GAO Ri-xin, et al. Experimental study on constant temperature characteristics of cold storage based on plate ice storage[J]. *Acta Refrigeration*, 2012, 33(5): 66-69.
- [34] WANG Chang-jiang, HE Zi-tao, LI Hai-long, et al. Evaluation on performance of a phase change material based cold storage house[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 3 947-3 952.
- [35] ZHU Xian-feng, CHEN Huan-xin, LIU Guo-feng. Affecting factors of cold storage capacity and charging time of hold-over plate[J]. *Railway Locomotive and Car*, 2002, 24(2): 37-39.
- [36] LI Xiao-yan, WANG Xue-lei, MIAO Xin-yue, et al. Numerical simulation study on performance optimization of cold chain cold storage incubator[J]. *Energy Saving Technology*, 2019, 37(1): 87-90.
- [37] 张哲, 王飒飒, 李立民, 等. 蓄冷板冻结与释冷的实验研究[J]. *低温工程*, 2015(1): 64-68. ZHANG Zhe, WANG Sa-sa, LI Li, et al. Experimental research on freezing and freezing of cold storage plates[J]. *Low Temperature Engineering*, 2005(1): 64-68.
- [38] 邵阳, 刘清江, 宋瑞亭, 等. 顶置蓄冷板减少融霜热对冷库温度场的试验研究[J]. *流体机械*, 2020, 48(3): 68-72, 78. SHAO Yang, LIU Qing-jiang, SONG Rui-ting, et al. Experimental study on the temperature field of cold storage by reducing the heat of defrost by the top-mounted cold storage plate[J]. *Fluid Machinery*, 2020, 48(3): 68-72, 78.
- [39] 杨凤, 刘清江, 宋瑞亭, 等. 顶置蓄冷板对冷库融霜时库温波动的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(12): 85-89. YANG Feng, LIU Qing-jiang, SONG Rui-ting, et al. The influence of the top-mounted cold storage plate on the temperature fluctuation of the cold storage during defrosting[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(12): 85-89.
- [40] 范中阳, 刘升, 武卫东, 等. 蓄冷板摆放方式对冷链宅配过程的影响[J]. *制冷技术*, 2017, 37(6): 51-54. FAN Zhong-yang, LIU Sheng, WU Wei-dong, et al. The effect of cold storage board placement on the cold chain home delivery process[J]. *Refrigeration Technology*, 2017, 37(6): 51-54.
- [41] CHENG Chuan-xiao, WANG Fang, TIAN Yong-jia, et al. Review and prospects of hydrate cold storage technology[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, 117: 23.
- [42] YAN Cheng-chu, WANG Feng-ling, YAN Pan, et al. A multi-time-scale cold storage system within energy flexible buildings for power balance management of smart grids[J]. *Renewable Energy*, 2020, 161: 626-634.
- [43] 王俊, 曹建军, 张利勇, 等. 基于分布式能源系统的蓄冷蓄热技术应用现状[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(6): 1 847-1 857. WANG Jun, CAO Jian-jun, ZHANG Li-yong, et al. Application status of cold and heat storage technology based on distributed energy system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(6): 1 847-1 857.