

冷库低碳新技术研究进展

Research progress of novel low-carbon technologies in cold storages

杨智康^{1,2}杨大章^{1,2,3,4}谢 晶^{1,2,3,4}霍映琳^{1,2}YANG Zhi-kang^{1,2}YANG Da-zhang^{1,2,3,4}XIE Jing^{1,2,3,4}HUO Yi-lin^{1,2}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台,

上海 201306; 3. 上海海洋大学食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海 201306;

4. 上海水产品加工及贮藏工程技术中心, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation Professional Technical Service Platform, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Aquatic Product Processing and Storage

Engineering Research Center, Shanghai 201306, China; 4. National Experimental Teaching Demonstration Center of Food Science and Engineering of Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:文章对冷库的低碳量化指标及能耗评价标准进行了总结,并从制冷技术、蓄冷技术和气流组织优化 3 个方面,对冷库中广泛应用的低碳新技术进行了系统性的综述,最后对未来冷库的发展进行了展望。

关键词:冷库;低碳;制冷技术;蓄冷技术;气流组织优化

Abstract: This paper introduces the low-carbon quantitative index and energy consumption evaluation standard of cold storages, then systematically summarizes the novel low-carbon technologies and their application in cold storages from three aspects: refrigeration technology, cold thermal energy storage and air distribution optimization and finally prospects the development of cold storages in the future.

Keywords: cold storage; low-carbon; refrigeration technology; cold thermal energy storage; air distribution optimization

冷库在食品行业中承担着食品冷冻保鲜、储藏加工及冷藏运输等重要功能。近年来,中国冷库建设飞速发展,预计在 2021 年总容量将突破 1.95 亿/m³。随着冷库规模的急剧增长,冷库建筑高能耗成为了一个不可忽视的问题。文章介绍冷库的低碳量化指标及能耗评价标准,并归纳应用于冷库的低碳新技术,以期今后新型冷库的建设提供理论依据。

基金项目:上海市冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台项目(编号:20DZ2292200)

作者简介:杨智康,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:2022-03-24 **改回日期:**2022-07-08

1 冷库低碳量化指标及能耗评价标准

为了解决冷库能耗高的问题,在建设冷库时引入了低碳新技术,同时对该技术效果进行检验,制定相关的低碳量化指标和能耗评价标准也是十分必要的。然而目前关于冷库低碳量化指标的研究较少,未形成有效的能耗评价体系,由于中国幅员辽阔,各地区间气候条件差异较大,并且冷库根据贮藏货物的类型及功能不同,分为高温库、低温库和冰温库。因此,应根据不同地区的气候情况及冷库的类型制定相应的评价标准^[1]。以上海为例,按不同的产品与冷加工方式制定了相应的耗电定额^[1](表 1)。另外,可依据产品单位耗电量与产品单位耗电定额之比(η)将冷库能效分为 5 个等级(表 2),其中 5 级为入门级别,2 级以上则代表节能低碳^[2]。

2 冷库低碳制冷新技术

制冷是冷库能源消耗和电网负荷增加的主要因素之一,在冷库中约 70% 的能耗源于制冷系统。在节约能源与保护环境的双重要求下,世界各国的研究人员都在不断地对制冷系统及技术进行改进,研发应用高效能、低污染的制冷方式。

2.1 CO₂ 制冷系统

氨具有良好的热力学性能、天然、零污染等优点,因而被广泛应用于全球冷库的制冷系统中。但是氨具有毒性,氨的泄漏可能会引发重大的安全事故。在环保和安全的双重要求下,CO₂ 制冷剂因无毒、不易燃、价格低廉、单位容积制冷量较高、运动黏度较低,尤其是不会破坏臭氧层等优点,使 CO₂ 制冷剂成为了氨制冷剂的最佳替代

表 1 上海市冷库耗电定额[†]

Table 1 Power consumption quota of cold storages in Shanghai

产品	定额	单位
羊肉、猪肉、兔肉、禽类、冰激凌等冻结	≤120	kW·h/t
快速连续冻结蔬菜	≤200	kW·h/t
牛肉冻结	≤124	kW·h/t
分割肉冻结(含冷却)	≤186	kW·h/t
鱼冻结	≤104	kW·h/t
虾冻结	≤194	kW·h/t
小包装冻结(不含分割肉小包装)	≤143	kW·h/t
羊肉、猪肉、兔肉、禽类、冰激凌等冷藏	≤0.38	kW·h/(t·d)
牛肉冷藏	≤0.4	kW·h/(t·d)
鱼冷藏	≤0.39	kW·h/(t·d)
冷却	≤29	kW·h/t
冷却品冷藏	≤0.05	kW·h/(t·d)
制冰	≤56	kW·h/t
贮冰	≤0.3	kW·h/(t·d)

[†] 适用于公称容积 1 500 m³ 以下的单体冷库。

表 2 冷库能源效率等级

Table 2 Energy efficiency grade of cold storages

能效指数(η)	$\eta \leq 70\%$	$70\% < \eta \leq 75\%$	$75\% < \eta \leq 80\%$	$80\% < \eta \leq 85\%$	$85\% < \eta \leq 90\%$
能效等级	1	2	3	4	5

循环能效。Catalan-Gil 等^[9] 分析比较了带省煤器的不同增压器结构,发现省煤器与附加压缩机的组合能给气候温暖的地区节省高达 8.5% 的能源,其在气候寒冷的地区节省高达 4% 的能源。

2.2 光伏制冷技术

光伏制冷技术是将可再生能源太阳能转换为电能和/或热能从而实现制冷的技术,光伏制冷良好地匹配了太阳能资源与制冷的需求^[10]。李泽宇等^[11] 将太阳能吸收—过冷压缩式复合制冷系统运用于冷库制冷中,利用太阳能直驱吸收子系统为压缩子系统提供冷量,模拟结果表明采用该系统的冷库,单位面积年节约电量可达 63 kW/h,不到 7 年就可回收投资成本。

然而,若想要充分利用光伏制冷技术,就必须解决太阳能固有的间歇性问题。因此,在光伏制冷系统中,能量的存储是不可缺少的一环。目前常见的储存方法是利用电池来储存太阳能板产生的剩余电力,或者利用蓄冷的方式来储存冷水机组产生的过剩冷量。Han 等^[12] 提出了一种光伏直驱冰蓄冷系统,该系统 COP 为 1.028,太阳能利用效率为 7.1%。Lillo-Bravo 等^[13] 介绍了一种独立光伏冷却装置的新型存储系统,该系统在蒸汽压缩冷却循

环中使用饱和混合相氨的隔热储罐,是一种经济可行的替代电池的方案。Sarafoji 等^[14] 对集成相变材料的太阳能光伏冷库进行了性能分析,测试结果表明引入相变材料能使冷库系统保持设定温度的时间增加约 35%,降低了约 16% 的总功耗。

光伏制冷压缩机由于受到间歇性太阳辐射的影响,长期处于不稳定的工作状态,因此需要对其进行控制。Zhou 等^[15] 将最大功率点跟踪与恒频电压相结合的控制方法应用于光伏冷库中,提高了直驱模式下的压缩机利用率,系统性能也提高了 9.18%。周晓艳等^[16] 提出了动态等效阻抗匹配控制方法,该方法控制的系统将光电转换效率、制冰量和制冷系统利用率都分别提升了 41.0%, 64.1%, 63.5%。

但是 CO₂ 的临界温度为 31.1 °C,在大多数制冷系统中处于超临界状态,故当 CO₂ 制冷系统在温暖或炎热的气候区运行时,其性能会下降^[3]。此外,由于 CO₂ 制冷系统高压侧压力较高,需要设计能够承受极高工作压力的部件^[5],并且由于气体冷却过程中 CO₂ 的平均温度较高,膨胀装置前后压差较大,系统会产生较大的热损失和节流损失,因此在相同条件下,CO₂ 制冷系统能效比(COP) 低于传统压缩式制冷循环系统^[6]。

针对上述问题,许多学者对 CO₂ 制冷系统进行了改进。周成君等^[7] 将地源热泵技术运用于冷库的 CO₂ 制冷系统中,让系统始终维持在亚临界范围内运行,提高了系统的稳定性。Belusko 等^[8] 提出了露点冷却技术概念,研究结果表明在高温气候条件下,该技术与 CO₂ 制冷系统耦合可减少 16% 的年能耗和 47% 的峰值需求。使用省煤器能降低气体冷却器后的温度,从而提高跨临界 CO₂

液化天然气(Liquid Natural Gas, LNG)制冷技术是指在大气压力下将天然气脱酸、脱水,并冷却至 -162 °C,利用 LNG 运送至终端后的再汽化过程所释放的冷能实现冷库制冷。每立方米 LNG 含有约 625 m³ 的天然气,具有很高的能量密度^[17],可释放约 830 kJ/kg 的冷能^[18]。利用这部分冷能作为冷库的冷源,则既能节省制冷设备

2.3 液化天然气制冷技术

液化天然气(Liquid Natural Gas, LNG)制冷技术是指在大气压力下将天然气脱酸、脱水,并冷却至 -162 °C,利用 LNG 运送至终端后的再汽化过程所释放的冷能实现冷库制冷。每立方米 LNG 含有约 625 m³ 的天然气,具有很高的能量密度^[17],可释放约 830 kJ/kg 的冷能^[18]。利用这部分冷能作为冷库的冷源,则既能节省制冷设备

的投资,又能降低制冷能耗,有很高的经济和环保收益。但常规冷库无法充分利用 LNG 的全部冷能,为了将 LNG 冷能更有效地应用于冷库系统中,需要对其进行梯级利用^[19](图 1)。董建锴等^[20]在 LNG 换热器端及冷库末端进行了冷能的梯级利用改造,通过 HYSYS 模拟结果表明,该冷库系统 COP 和烟效率分别为 1.82 和 80.2%,有较好的经济收益。张连乙等^[21]将冷库分为-60,-35,<0,0~10℃不同温度带,将系统制冷成本下降 37.5%。同样,汪乘红等^[22]也将冷库划分为低温(-23~-30℃)、中温(-15~-20℃)和高温(0~2℃)3个区域,该系统 COP 为 1.79,烟效率可达 78.04%,年净收益约 31.02 万元。因此,LNG 制冷技术是传统制冷到可再生能源制冷的最佳过渡选择。

3 蓄冷技术

蓄冷技术是指在电力负荷较低时,通过运行制冷机组获得制冷量,并将其储存在蓄冷介质中,然后在电力负荷高峰期间释放制冷量,以满足冷负荷需求,从而达到移峰填谷、节约用电成本的目的。蓄冷技术能够调节冷能供需在时间和强度上的不匹配性,已成为改善中国电力短缺状况的重要措施^[23-24]。

在蓄冷技术中通常选用相变材料作为蓄冷介质。相变材料是一种能通过改变自身相态来释放潜热,对环境

温度产生影响的物质,具有很高的储能密度,是当今蓄冷材料领域的研究热点。一般来说,选择相变材料时需要考虑以下特性:熔化温度在工作温度范围内,熔化潜热高,导热性好,过冷度低,储能密度高,相变体积变化小,腐蚀性小,无毒,不易燃,易获取且成本较低等^[25]。对常见的相变蓄冷材料进行了分类^[23-25],见表 3,对有机、无机、共晶相变蓄冷材料的性能进行了比较^[24-26],见表 4。

然而,目前相变材料在冷库中的应用还存在一些缺陷,主要表现为^[27]:① 过冷度大。过冷会使储能阶段所需的外部温度远远低于蓄冷材料的相变温度,从而增加能耗并降低能量释放阶段的效率。② 导热性差。总体上相变蓄冷材料的导热性能较差,这会导致能量传输缓慢,增加储能时间及成本。③ 稳定性差。主要体现在相分离、过冷、相变温度波动、回收后相变潜热降低等现象中。④ 力学性能差。大多数相变材料在相变前后不能保持一定的形状。

对于这些常见问题,当前有以下解决方案^[28]:① 添加成核剂,促进材料相变期间晶核的形成,加速结晶速率,从而降低过冷度;② 添加高导热性纳米材料,并使其均匀分散在相变材料中,以提高材料整体导热性;③ 加入高分子聚合物,以降低材料的过冷度,消除相分离从而提高材料的力学性能和热稳定性。

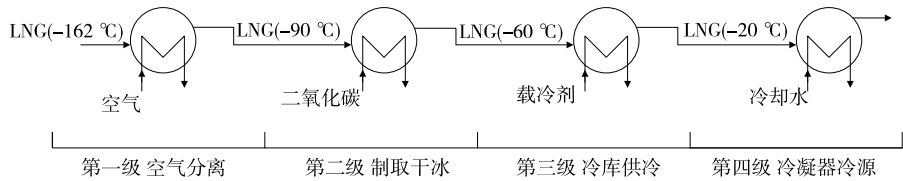


图 1 LNG 冷能梯级利用

Figure 1 Cascade utilization of LNG cold energy

表 3 相变蓄冷材料的分类

Table 3 Classification of phase change cold storage materials

分类依据	分类	举例
相变温度	低温(<100℃)相变材料	水,水合盐等
	中温(100~200℃)相变材料	石蜡,脂肪酸等
	高温(>200℃)相变材料	熔盐,合金等
相变状态	固—固相变材料	多元醇,无机盐等
	固—气相变材料	干冰
	液—气相变材料	水
	固—液相变材料	水,大多数有机、无机相变蓄冷材料
材料成分	有机相变材料	石蜡,脂肪酸,甘氨酸,蔗糖等
	无机相变材料	水,NaCl, CaCl·6H ₂ O, NaSO ₄ ·10H ₂ O 等
	共晶相变材料	C ₆ H ₁₄ O ₆ , KCl, C ₅ H ₇ COOK, KCl 等

表 4 3 类相变蓄冷材料性能比较

Table 4 Performance comparison of three kinds of phase change cold storage materials

性能	有机相变蓄冷材料	无机相变蓄冷材料	共晶相变蓄冷材料
稳定性	稳定	长期使用易变质	稳定
导热系数	低	高	低
储能密度	小	大	小
过冷现象	无	过冷度较大	无
相分离	不容易发生	易产生相分离	无
安全性	腐蚀性和毒性较小,但易燃	可能存在较大的毒性或腐蚀性	需要封装,易泄露
经济性	价格较高	较廉价	价格较高

Xia 等^[29]设计了一种基于相变材料的蓄冷冷凝热回收系统,并开发了一种适用于冷库的新型相变复合材料。Rajan 等^[30]对集成了生物炭纳米颗粒相变材料的冷藏系统进行了性能分析,发现该系统具有较高的节能潜力。De Falco 等^[31]将装有相变材料和水分的储能罐与 HVAC 系统中的循环冷水机耦合,来达到优化性能、减少冷量峰值的目的。Lu 等^[32]提出将相变材料吊顶与地—气热交换器制冷系统耦合,有效降低了冷库的峰值温度。

3.1 液态空气储能技术

液态空气储能是指用驱动压缩机将环境空气压缩成高压空气,再让压缩空气吸收冷能节流液化,使电能以液态空气的形式储存下来。当需要使用冷能时,液态空气释放冷能并在涡轮中加热膨胀,产生的高温高压气体做功带动发电机发电^[33]。与传统的压缩空气储能不同的是液态空气储能不同需要在地下洞室中储存大量的高压空气,而是将液态空气储存在大气压下,从而大幅度提高了空气储能密度且不受地理环境限制^[34]。

蓄冷技术是液态空气储能技术的核心,决定了系统能源利用效率。Chen 等^[35]提出了一种以相变材料为蓄冷介质的液态空气储能系统,并选取 12 种相变材料与乙二醇溶液共同构建了一个完整的冷库。图 2 展示了该装置的系统流程图。She 等^[36]将液态空气储能与 LNG 的再汽化过程通过布雷顿循环进行集成,循环的热源利用液态空气储能的余热,冷源利用 LNG 再汽化的废冷,该系统可将系统焓效率和电气往返率分别提高 14.4% 和 56.5%。白文刚等^[37]提出了基于有机朗肯循环(ORC)的新型液态空气储能系统,该系统通过回收利用放电过程中的冷热能,进一步提升了系统效率。

3.2 冰浆蓄冷技术

冰浆是一种微小的冰颗粒(直径为 10~100 mm)和

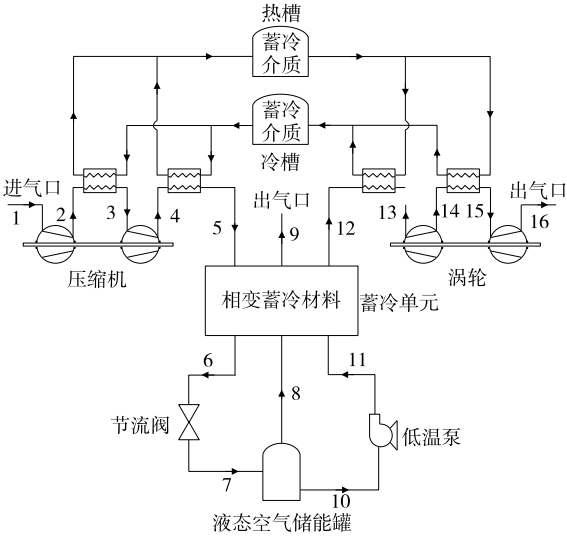


图 2 液态空气储能系统流程图^[35]

Figure 2 Flow chart of liquid air energy storage system

载体溶液的混合物^[38]。冰浆蓄冷系统可以在没有任何辅助设备的条件下直接将冷能从冰浆储罐供应到冷却盘管,不仅降低了系统总成本,减小了运输系统规模,还提高了系统效率。

为了进一步提升系统运行效率和降低运行成本,Tiwari 等^[39]对倾斜空腔内冰浆的产生进行了流场、温度、形态和固相组分分布模拟,确定了腔倾角、溶质初始浓度和 Stefan 数等参数对冰浆生成性能的影响;Kumar 等^[40]对间歇式冰浆发生器中冰浆的形成过程进行了数值研究,并对圆柱形冰浆发生器进行了热力学性能分析,对其 Stefan 数、抑制剂浓度和长径比等进行了优化;Zhang 等^[41]开发了一种新型冰浆蓄冷强化真空冷却系统,该系统集成了一个冷库部分,储存在非高峰用电期间产生的冰浆,之后利用这些冰浆在高峰用电期间进行真空冷却,使运行成本降低了 30.2%。

冰浆蓄冷系统因具有节能环保、响应速度快、布置灵活、安装方便、温湿度控制稳定、运行费用低等优点,有望逐步取代现有的蓄冷技术,成为中国冷库冰蓄冷技术的主流。

4 冷库气流组织优化

若冷库内气流分布不良不仅会对制冷系统的运行产生一定负担,还会对冷库内贮藏的食品品质造成影响。

4.1 冷风机布置

冷风机的布置与风速设定是影响冷库内气流组织分布的关键。冷风机出口风速越大,带走室内的热负荷就越快,可以使冷库温度场分布均匀,但是过大的风速也会增加冷藏食品的干耗,因此需要调整最佳吹风速度。在位置方面,应避免在冷风机前放置货物架,防止空气回流

造成食品干耗。此外,应避免将冷风机布置在出入口附近,以防止开门时热气流的影响。田甜等^[42]对3种摆放位置的冷风机分别进行了模拟(图3),发现当冷风机布置在宽度方向或中间位置时,会有回流涡旋形成,不利于食品冷藏,而在长度方向上布置冷风机,能使气流均匀分布,减少死角区域。

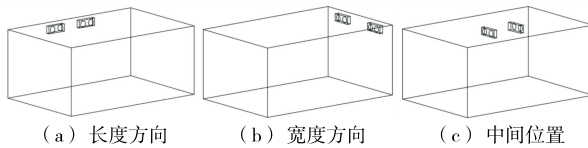


图3 冷风机在不同位置上的布置方式

Figure 3 Layout pattern of air coolers at different positions

4.2 货物堆叠方式

货物的堆叠方式也是影响冷库内气流组织的一个重要因素。不合理的堆叠方式会导致冷库内气流不均匀,出现不同的温度区,导致储存产品的冷却速率不一致,在高温下食品的呼吸率过高,而在低温下食品又会受到霜结伤害,增加货损率。李艺哲等^[43]研究发现在货物堆垛附近的温度与冷库内其他区域之间有着较为明显的温差,通过改变堆垛方式或降低堆垛高度增大货物之间的间隙,可以优化库内空气流动。曾晰^[44]对8垛和4垛两种方式进行对比,发现增加堆垛数量能使空气流通更顺畅,换热效率更高。

4.3 纤维织物风管送风

纤维织物风管作为一种新型送风形式,在冷库中得到了广泛应用。该送风方式利用聚酯纤维制成的管道与风机相连接,使冷空气以纤维渗透或喷孔射流等方式输送到冷库的各个区域。这种新型送风形式有出风均匀、覆盖范围广、温度场均匀、空气流速小、减少干耗等优点,对冷库内食品品质有较大的提升,并能够通过小功率风机进行长距离送风,节能效果显著。刘康佳等^[45]对纤维织物风管送风方式进行研究,发现该送风方式能使货物之间的温差维持在 1.5°C ,且风速衰减幅度小,保证了冷库内温度场和速度场的分布均匀。李爽等^[46]指出在冷库中需要采用大渗透率的纤维材料($40\sim 100\text{ mm/s}$),使渗透风量达到总风量的40%以上,这样既能防止凝露,又能保证均匀送风。

5 总结与展望

传统合成制冷剂会对环境造成不可逆的破坏,制冷行业正在寻找一种在制冷性能、经济性和环保方面都更加优秀的替代品。如今,中国正大力提倡实现“碳中和”的环境保护政策,高能耗的冷库建筑在降低碳排放上有巨大的潜力。在制冷方面, CO_2 作为制冷剂能大幅度降低

碳排放,并且有较好的安全保障,可能成为未来大、中型冷库制冷剂的的首选;而光伏制冷技术和液化天然气制冷技术则是对可再生能源和清洁能源的充分利用,补充了冷库对电量和冷量的需求;在蓄冷方面,液态空气储能和冰浆蓄冷这两类技术可通过介质状态变化存储冷量,达到移峰填谷、节约用电成本的目的;在冷库气流组织优化方面,可以选取冷风机布置、货物堆叠方式、纤维织物风管送风等影响因素进行优化。

冷库的节能减排是长期且艰巨的任务,未来研究的趋势主要包括研发性能更高的制冷系统、对天然环保制冷剂的应用进行开发、合理利用可再生能源、研制更加高效的蓄冷材料及保温材料、对冷库的运营管理进行智能化控制、优化气流组织等。

参考文献

- [1] 郝敬熙, 韩祥民, 唐建国. 对冷库节能的考核标准与考核方法的探讨[J]. 制冷与空调, 2012, 12(5): 1-7.
- [2] 甄欠, 赵明, 樊海月. 冷库能耗评价及能效等级划分的探讨[J]. 黑龙江科技信息, 2016(2): 121-122.
- [3] ZHEN Z, ZHAO Y, FAN H Y. Discussion on energy consumption evaluation and energy efficiency classification of cold storage[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016 (2): 121-122.
- [4] YU B B, YANG J Y, WANG D D, et al. An updated review of recent advances on modified technologies in transcritical CO_2 refrigeration cycle[J]. Energy, 2019, 189: 116147.
- [5] 刘军, 董磊, 全峰. 某大型冷库制冷系统的选择[J]. 冷藏技术, 2019, 42(4): 38-40.
- [6] LIU J, DONG L, QUAN F. Selection of refrigeration system for a large cold storage[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2019, 42 (4): 38-40.
- [7] BRUNO F, BELUSKO M, HALAWA E. CO_2 refrigeration and heat pump systems: A comprehensive review[J]. Energies, 2019, 12(15): 2959.
- [8] LIU X, YU K H, WAN X C, et al. Conventional and advanced exergy analyses of transcritical CO_2 ejector refrigeration system equipped with thermoelectric subcooler[J]. Energy Reports, 2021, 7: 1765-1779.
- [9] 周成君, 申江, 杨建国, 等. 新型 CO_2 冷库制冷系统的理论和实验分析[J]. 低温与超导, 2017, 45(4): 51-54, 71.
- [10] ZHOU C J, SHEN J, YANG J G, et al. Theoretical and experiment analysis of a novel CO_2 cold storage refrigeration system[J]. Cryo & Supercond, 2017, 45(4): 51-54, 71.
- [11] BELUSKO M, LIDDLE R, ALEMU A, et al. Performance evaluation of a CO_2 refrigeration system enhanced with a dew point

- cooler[J]. *Energies*, 2019, 12(6): 1076.
- [9] CATALAN-GIL J, NEBOT-ANDRES L, SANCHEZ D, et al. Improvements in CO₂ booster architectures with different economizer arrangements[J]. *Energies*, 2020, 13(5): 1 271.
- [10] HAN Y H, LI M, WANG Y F, et al. Impedance matching control strategy for a solar cooling system directly driven by distributed photovoltaics[J]. *Energy*, 2019, 168: 953-965.
- [11] 李泽宇, 许永睿, 陈宏铠. 太阳能复合制冷系统用于冷库的热力经济分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 27-33, 81.
- LI Z Y, XU Y R, CHEN H K. Thermodynamic and economic analysis of solar hybrid cooling systems for cold storages [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(12): 27-33, 81.
- [12] HAN K D, JI J, CAI J Y, et al. Experimental and numerical investigation on a novel photovoltaic direct-driven ice storage air-conditioning system[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 514-528.
- [13] LILLO-BRAVO I, BOBADILLA M A, MORENO-TEJERA S, et al. A novel storage system for cooling stand-alone photovoltaic installations[J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 23-37.
- [14] SARAFOJI P, MARIAPPAN V, ANISH R, et al. Performance study of solar photovoltaic cold storage system using phase change materials[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 9 623-9 629.
- [15] ZHOU X Y, ZHANG Y, MA X, et al. Performance characteristics of photovoltaic cold storage under composite control of maximum power tracking and constant voltage per frequency [J]. *Applied Energy*, 2022, 305: 117840.
- [16] 周晓艳, 马逊, 李明, 等. 基于动态阻抗匹配控制下的光伏冷库性能研究[J]. 太阳能学报, 2021: 1-9.
- ZHOU X Y, MA X, LI M, et al. Study on performance of photovoltaic cold storage based on control of dynamic impedance matching[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021: 1-9.
- [17] HE T B, KARIMI I A, JU Y L. Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2018, 132: 89-114.
- [18] HE T B, CHONG Z R, ZHENG J J, et al. LNG cold energy utilization: Prospects and challenges [J]. *Energy*, 2019, 170: 557-568.
- [19] 郝广宇. 梯级利用 LNG 冷能的新型冷热电联供系统及其在冷库中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2021: 30.
- HAO G Y. A new type of combined cooling, heating and power system combined with cascade utilization of LNG cold energy and its application in cold storage [D]. Jinan: Shandong University, 2021: 30.
- [20] 董建锴, 黄顺, 李硕, 等. LNG 冷能用于冷库制冷性能模拟研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 103-108.
- DONG J K, HAUNG S, LI S, et al. Simulation study on performance of the cold storage using LNG cold energy[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 103-108.
- [21] 张连乙, 李小玲, 刘乐, 等. LNG 冷能在冷冻冷藏库中的应用[J]. 当代化工, 2016, 45(10): 2 360-2 362.
- ZHANG L Y, LI X L, LIU L, et al. Application of LNG cold energy in cold storage[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2016, 45(10): 2 360-2 362.
- [22] 汪乘红, 陈叔平, 杨发禄, 等. 基于 LNG 接收站冷量的冷库系统设计与经济分析[J]. 低温与超导, 2018, 46(10): 19-24.
- WANG C H, CHEN S P, YANG F L, et al. Design and economic analysis of cold storage system based on LNG receiving station cooling capacity[J]. *Cryo & Supercond*, 2018, 46(10): 19-24.
- [23] LI S F, LIU Z H, WANG X J. A comprehensive review on positive cold energy storage technologies and applications in air conditioning with phase change materials[J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113667.
- [24] ZHAO Y, ZHANG X L, XU X F, 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.
- [25] 孙锦涛, 谢晶. 相变蓄冷材料及其在冷库中应用的研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 227-232.
- SUN J T, XIE J. Research progress of phase change cold storage materials and their application in cold storage [J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(7): 227-232.
- [26] 黄雪, 崔英德, 尹国强, 等. 相变蓄冷材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(1): 19-22, 30.
- HUANG X, CUI Y D, YI G Q, et al. Research progress of phase change materials[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(1): 19-22, 30.
- [27] XU X F, ZHANG X L, LIU S. Experimental study on cold storage box with nanocomposite phase change material and vacuum insulation panel[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(14): 4 429-4 438.
- [28] XU X F, ZHANG X L, ZHOU S X, et al. Experimental and application study of Na₂SO₄ · 10H₂O with additives for cold storage[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 136(2): 505-512.
- [29] XIA M Z, YUAN Y P, ZHAO X D, et al. Cold storage condensation heat recovery system with a novel composite phase change material[J]. *Applied Energy*, 2016, 175: 259-268.
- [30] RAJAN A B K, ANANDAN S S. Performance analysis of cold storage system with nanofiller phase change material [J/OL]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021. [2022-02-21]. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01648-x>.
- [31] DE FALCO M, SALVATORI M, ZACCAGNINI A. Experimental investigation of a multi-kWh cold storage device based on phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: 102883.
- [32] LU S L, LIANG B, LI X H, et al. Performance analysis of PCM ceiling coupling with earth-air heat exchanger for building cooling [J]. *Materials*, 2020, 13(13): 2 890.
- [33] BORRI E, TAFONE A, ROMAGNOLI A, et al. A review on liquid

- air energy storage: History, state of the art and recent developments[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110572.
- [34] DAMAK C, LEDUCQ D, HONG MINH H, et al. Liquid air energy storage (LAES) as a large-scale storage technology for renewable energy integration: A review of investigation studies and near perspectives of LAES[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 110: 208-218.
- [35] CHEN J X, AN B L, YANG L W, et al. Construction and optimization of the cold storage process based on phase change materials used for liquid air energy storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: 102873.
- [36] SHE X H, ZHANG T T, CONG L, et al. Flexible integration of liquid air energy storage with liquefied natural gas regasification for power generation enhancement [J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113355.
- [37] 白文刚, 张纯, 张磊, 等. 一种联合 ORC 的新型液态空气储能系统热力特性[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(5): 880-885.
- BAI W G, ZHANG C, ZAHNG L, et al. Thermodynamic analysis of novel hybrid liquid air energy storage system combined with ORC[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(5): 880-885.
- [38] ALVA G, LIN Y X, FANG G Y. An overview of thermal energy storage systems[J]. *Energy*, 2018, 144: 341-378.
- [39] TIWARI V K, KUMAR A, KUMAR A. Enhancing ice slurry generation by using inclined cavity for subzero cold thermal energy storage: Simulation, experiment and performance analysis [J]. *Energy*, 2019, 183: 398-414.
- [40] KUMAR A, YADAV S K, MAHATO A, et al. On-demand intermittent ice slurry generation for subzero cold thermal energy storage: Numerical simulation and performance analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114081.
- [41] ZHANG C, YANG L, LIN W, et al. Experimental investigation and life-cycle cost analysis of a cold storage enhanced vacuum cooling system using ice slurry[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 45: 101074.
- [42] 田甜, 李福良, 张雯, 等. 冷风机不同布置位置对冷库气流组织影响的模拟及实验研究[J]. *冷藏技术*, 2019, 42(1): 18-23.
- TIAN T, LI F L, ZHANG W, et al. Simulation and experimental study on influence of cold storage airflow of cooler different arrangement positions [J]. *Journal of Refrigeration Technology*, 2019, 42(1): 18-23.
- [43] 李艺哲, 谢晶. 大型冷库内温度场的数值模拟与优化[J]. *食品与机械*, 2017, 33(6): 139-142, 179.
- LI Y Z, XIE J. Numerical simulation and optimization on temperature field in large cold store[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(6): 139-142, 179.
- [44] 曾晰. 火龙果堆码方式对冷藏库内气体流场分布的影响[J]. *农技服务*, 2019, 36(1): 37-40, 42.
- ZENG X. Effect of pitaya stacking mode on gas flow field distribution in cold storage [J]. *Agricultural Technical Services*, 2019, 36(1): 37-40, 42.
- [45] 刘康佳, 刘广海, 唐海洋, 等. 风机送风和纤维织物风管送风的研究和比较[J]. *制冷与空调*, 2019, 19(2): 19-23.
- LIU K J, LIU G H, TANG H Y, et al. Research and comparison of air supply for fan and fiber fabric [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2019, 19(2): 19-23.
- [46] 李爽, 李大鹏, 周丹. 布袋送风系统在冷库中应用研究[J]. *制冷与空调(四川)*, 2017, 31(1): 34-38.
- LI S, LI D P, ZHOU D. Application research of fabric-duct air supply system in cold storage [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2017, 31(1): 34-38.
-
- (上接第 220 页)
- [39] 王慎苓, 连玉晶, 衣恒磊, 等. 动物性食品中雌激素检测方法研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(16): 5 534-5 539.
- WANG S L, LIAN Y J, YIH L, et al. Research progress in the detection of estrogen in animal food[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(16): 5 534-5 539.
- [40] 童心, 胡柏杨, 陈兴财. 类固醇雌激素的环境暴露及其迁移转化[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43(6): 734-746.
- TONG X, HU B Y, CHEN X C. Environmental exposure and migration of steroid estrogens[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2017, 43(6): 734-746.
- [41] KARIN B M, NADINE B, FRÉDÉRIQUE C. Urinary excretion of sex steroid hormone metabolites after consumption of cow milk: A randomized crossover intervention trial[J]. *Am J Clin Nutr*, 2019, 109(2): 402-410.
- [42] CHO E, SPIEGELMAN D, HUNTER D J, et al. Premenopausal fat intake and risk of breast cancer[J]. *J Natl Cancer Inst*, 2003, 95(14): 1 079-1 085.
- [43] GANMAA D, CUI X, FESKANICH D, et al. Milk, dairy intake and risk of endometrial cancer: A twenty six-year follow-up[J]. *Int J Cancer*, 2012, 130(11): 2 664-2 671.
- [44] 李杰, 许卓妮, 于瑞祥. 动物性食品中磺胺类及雌激素类兽药残留检测用同位素标记标准物质的研制[Z]. 上海: 上海市计量测试技术研究院, 2016.
- LI J, XU Z N, YU R X. Development of isotope labeling Reference Materials for the detection of Sulfa and estrogens residues in animal food [Z]. Shanghai: Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, 2016.
- [45] 牛心宁. 玉米分钟伏马毒素 FB₁与玉米赤霉烯酮 ZEA 基体标准(质控)物质的研制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 34-35.
- NIU X N. Preparation of maize min Fumonaxin FB₁ and zearalenone ZEA matrix standard (quality control) substances[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020: 34-35.