

蓄冷板对冷库保温的影响实验

孙锦涛^{1,2}, 游辉^{1,2}, 谢晶^{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)

摘要: **目的** 为了缓解当下电网的电力失衡问题,提出利用蓄冷材料与冷库相结合的方案,使相变材料在用电低谷时期蓄冷,在用电高峰时期释冷,以缓解电网负荷。**方法** 测量不同材料的热工性能,筛选出适合冷库温度的相变蓄冷材料,制成蓄冷板,并在实际冷库中进行实验。收集安放在库内温度测点的数据,并对数据进行分析。**结果** 放置蓄冷板后,冷库的温度波动值从2℃降至0.5℃。放置蓄冷板后库内温度的不均匀系数在4h后为0.56,而未放置蓄冷板库内温度的不均匀系数在2.5h时已达到1.2。放置蓄冷板后冷库的温度回升时间较对照冷库最高延缓了126min,放置蓄冷板3h后冷库温度上升了8℃,而无蓄冷板的冷库温度上升了13℃。**结论** 蓄冷板可以有效缓解冷库温度的回升,并使库内温度分布得更加均匀。未来可通过提高蓄冷材料和冷板材料的导热系数,以及添加冷板肋片等方法来强化换热,达到更好的释冷、保冷效果。

关键词: 相变蓄冷材料;冷板;冷库;冷链

中图分类号:TB657 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2022)13-0107-010

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.014

Experimental Research on Influence of Cold Storage Plate on Insulation of Cold Storage

SUN Jin-tao^{1,2}, YOU Hui^{1,2}, XIE Jing^{1,2,3}

(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)

ABSTRACT: This paper aims to alleviate the power imbalance problem of the current power grid by proposing a combination of cold storage materials and cold storage. In order to relieve the load of power grid, the phase change material can store cold in the low peak period and release cold in the peak period. The thermal properties of different materials were measured to screen out the phase-change cold storage materials suitable for the temperature of the cold storage, and the cold storage plates were made and tested in the actual cold storage. Temperature data was collected and analyzed through temperature measurement points placed in the cold storage. The temperature fluctuation in the cold storage where the cold storage plate was placed was reduced from 2℃ to 0.5℃. The coefficient of temperature unevenness in the cold storage with cold storage plates was 0.56 after 4 hours, while the coefficient of unevenness without cold storage plates reached 1.2 at 2.5 hours. Compared with the others, the temperature rise of the cold storage with

收稿日期:2021-12-15

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

作者简介:孙锦涛(1999—),男,上海海洋大学硕士生,主攻冷链装备设备优化。

通信作者:谢晶(1968—),女,博士,上海海洋大学教授,主要研究方向为食品冷冻冷藏。

cold storage board was delayed by 126 minutes at the highest. After 3 hours, the temperature of the cold storage with cold storage plates increased by 8 °C, while the temperature of the cold storage without cold storage plates increased by 13 °C. The cold storage plate can effectively alleviate the temperature rise of the cold storage and make the temperature distribution in the cold storage more uniform. In the future, the heat exchange can be enhanced by enhancing the thermal conductivity of the cold storage material and the cold plate material, and adding fins to the cold plate to achieve a better cooling effect.

KEY WORDS: phase change cold storage material; cold plate; cold storage; cold chain

随着人民生活水平的提高,食品行业的发展迅速,对以速冻食品、肉制品、生鲜等为代表的冷链食品的需求量不断增加。目前,我国的冷链物流流通率仅为19%,与发达国家85%的冷链流通率相比,有很大的发展空间^[1]。冷链物流能为易腐食品的贮藏、运输和销售提供适宜的温湿度,从而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,也是冷链物流的关键节点^[2]。冷库的数量随着冷链物流的发展快速增加。由于冷库会消耗大量的电能,因此对当下紧张的电网造成了较大的压力。冷库制冷系统消耗的电能约占冷库总能耗的70%^[3],因此如何优化制冷系统的用电是解决冷库耗能问题的关键步骤。

相变蓄冷技术在能源平衡和资源节约等方面很有潜力,具有“移峰填谷”的作用,可缓解电力系统的压力^[4]。目前,相变蓄冷材料(Phase Change Material, PCM)是蓄冷领域的研究热点。相变蓄冷材料属于潜热蓄冷,是相变蓄冷系统中存储冷量的功能材料,利用它在相变过程中对冷量的存储与释放,达到控制周围环境温度,实现错峰用冷、移峰填谷的目的。蓄冷材料的相变过程是一个等温或近似等温的过程,伴随着大量能量的吸收或释放^[5]。用于空调和工业蓄冷的相变材料在经受无数次的熔化和凝固循环后,其物理、化学性质不应发生变化或只发生极小的变化^[6]。Li等^[7]对相变温度小于15 °C的蓄冷材料进行了分析比较,发现蓄冷冷藏箱可以使用夜间电力,成本较机械式制冷低,使用灵活,可以解决冷链运输中“最后一公里”的配送问题。游辉等^[8]对-18 °C左右的相变材料进行了概述,总结了它在实际冷藏车、冷库中的应用,可以实现电价的峰谷转移,降低温度波动。李艺群等^[9]归纳介绍了乳制品厂、水果冷藏厂和啤酒厂的冰蓄冷系统,对其生产特点和系统工况进行了分析,发现可以利用低谷电价降低制冷系统的运行费用,减小设备的占地面积,送风温度较低,提高了制冷效率(COP, Coefficient of Performance),验证了蓄冷技术具有节能和经济的优势。金云飞等^[10]研制了一种针对-23 °C的相变蓄冷材料,将其应用于保温箱,可以使冷冻肉丸保持在-23 °C下的时间超过20 h,满足冷链运输的要求。同样,在冷库中采用蓄冷技术,不但可以节约电力开支,还可以使冷库温度更加稳定,有

利于食品的贮藏和品质的保持,具有良好的经济性。

文中拟通过在冷库中加装蓄冷板,将冷量储存起来,待冷库制冷设备停机之后,通过蓄冷板释放冷量来维持库内的低温环境,降低温度波动,更好地保障库内食品的品质。为此,首先遴选适合冷库用的蓄冷材料,然后进行有无蓄冷板的冷库停机后温度回升情况的实验,分析加装蓄冷板的冷库设计方案的可行性,并为今后类似冷库运行的数值模拟积累经验。

1 蓄冷冷库实验设计

只有当蓄冷材料释放足够的冷量时,才能维持库内的低温环境,因此选择合适的相变材料是最为关键的步骤。经过检索相关文献资料,遴选出9种有潜力的相变温度在-18 °C左右的冷库用蓄冷材料^[11-17],见表1。

1.1 蓄冷材料相变潜热、温度的测量

采用差示扫描量热仪(Perkin Elmer DSC 8500)测量蓄冷材料的相变潜热和相变温度。程序设置:以速率20 °C/min将材料从室温(10 °C)冷却到-50 °C,再以20 °C/min的速率加热到10 °C,在10 °C下保持2 min,以消除材料的热惯性,再以10 °C/min的速率将材料冷却到-50 °C,在-50 °C下保持3 min,最后以5 °C/min的速率加热到10 °C,完成一个样品的测试。

1.2 蓄冷材料导热系数的测量

采用热常数分析仪(Hot Disk TPS 2500s)测量蓄冷材料的导热系数,测试原理采用瞬态平面热源法^[18]。在室温下,将探头插入装在烧杯中的样品内部,测试时环境温度为25 °C。

1.3 蓄冷材料过冷度的测量

蓄冷材料的实际凝固温度与理论凝固温度的差值称为过冷度。对于蓄冷材料来说,过冷度应该越小越好^[19]。将装有蓄冷材料的离心管放入-40 °C低温冰箱(海尔MDF-U54V)中,在试管内插入2根热电偶探头以测量材料的温度(离心管底部、中部),得到其降温过程中温度随时间变化的情况。每种材料分别进行20次冻融循环实验,以测试多次蓄冷、放冷后其热工性能的稳定性,得到9种材料最终的

过冷度, 见图 1。

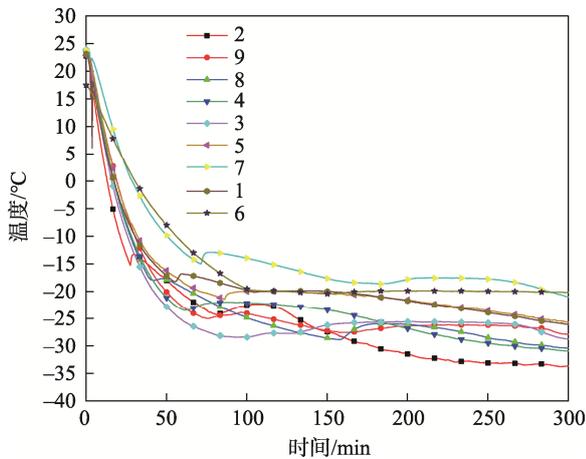


图 1 9 种蓄冷材料过冷度的比较

Fig.1 Comparison of subcooling degrees of 9 kinds of cold storage materials

1.4 蓄冷材料的筛选

通过表 1、图 2 可排除相变温度与冷库运行温度 (-18 °C) 差别较大的 6 种材料, 初步筛选出 3 种可行的蓄冷材料, 即编号 1、5、6 的蓄冷材料, 其冻融循环前后相变温度分别为 -18.26 °C/-17.32 °C、-17.39 °C/-17.72 °C、-19.97 °C/-20.00 °C。

编号 5 蓄冷材料在循环前后的相变潜热变化较大, 循环后的潜热仅为循环前的 68.08%。同时, 实验中可以观察到明显的相分离, 底部出现了较多沉淀, 表现不稳定, 过冷度较大 (见图 1), 因而淘汰 5 号蓄冷材料。

编号 1 和编号 6 蓄冷材料在多次冻融循环前后的相变潜热和相变温度未发生较大变化, 而且其潜热比其他蓄冷材料的潜热大, 有着更好的蓄冷效果。编号 1 和编号 6 蓄冷材料的导热系数在冻融循环前后没有较大变化。进一步比较了 2 种材料的过冷度, 结果见图 3—4。

从图 3 可以看出, 编号 1 蓄冷材料在循环前后均出现了过冷现象。编号 6 蓄冷材料表现出良好的降温曲线, 不存在过冷现象, 见图 4。编号 6 蓄冷材料的导热系数较编号 1 蓄冷材料只低了 0.07 W/(m·K)。经综合考虑后确定编号 6 蓄冷材料, 其相变温度为 -19.97 °C, 拥有较大的相变潜热, 循环前后的潜热和相变温度变化不大且稳定, 不存在过冷现象, 推荐作为 -18 °C 冷库的蓄冷剂。

1.5 负荷计算

低温冷库采用装配式库体, 采用实体模块化, 保温材料为聚氨酯, 厚度为 150 mm。制冷负荷计算参考《冷库制冷设计手册》。

冷藏库内的热负荷 (Q_q) 主要包括围护结构传热量 Q_1 、货物热量 Q_2 、通风换气热量 Q_3 、电动机运转热量 Q_4 、操作热量 Q_5 , 即 $Q_q=Q_1+PQ_2+Q_3+Q_4+Q_5$ 。P 为负荷系数, 冷却间和冻结间的 P 取 1.3, 其他冷间取 1。由于此冷藏间为冻结物冷藏间, 不进行通风换气, 因而 $Q_3=0$ W。

1.5.1 围护结构热负荷

围护结构的热负荷计算见式 (1)。

$$Q_1 = K \cdot A \cdot \partial(t_w - t_n) \tag{1}$$

表 1 不同蓄冷剂循环前后的相变温度、潜热和导热系数

Tab.1 Phase transition temperature, latent heat and thermal conductivity of different cold storage agents before and after cycling

编号	蓄冷剂种类	相变潜热/(J·g ⁻¹)		相变温度/°C		导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	
		循环前	循环后	循环前	循环后	循环前	循环后
1	乙醇(15%)与 NH ₄ Cl(25%)的质量比为 1 : 2	265.07	259	-18.26	-17.32	0.57	0.58
2	甲酸钠(17%)+海藻酸钠(4%)	266.06	240.3	-16.03	-16.18	0.62	0.61
3	NaCl(20%)+KCl(6%)+MgSO ₄ (1%)+黄原胶(1.5%)	237.67	229.5	-22.81	-22.82	0.6	0.55
4	乙二醇(25%)溶液+氯化铵(35%)溶液	256.14	230.3	-23.06	-23.06	0.56	0.56
5	TMP(10%)+NH ₄ Cl(20%)+TiO ₂ (4%)+PASS(1%)	219.15	149.2	-17.39	-17.72	0.76	0.72
6	NH ₄ Br(6%)+NH ₄ Cl(24%)+SrCl ₂ (1%)+黄原胶(5%)	245.2	242	-19.97	-20.00	0.52	0.51
7	NH ₄ Cl (15%)	290.86	263	-15.17	-15.78	0.61	0.62
8	丙三醇(50%)溶液与氯化钠(20%)溶液的质量比为 1.5 : 8.5	245.94	228.3	-24.64	-24.55	0.6	0.61
9	NaCl (20%) +K ₂ CO ₃ (5%) +NaSO ₄ (1.5%) +CMC (2%)	156.57	72.5	-22.92	-22.73	0.61	0.63

注: 蓄冷剂中物质的含量均用质量分数表示。

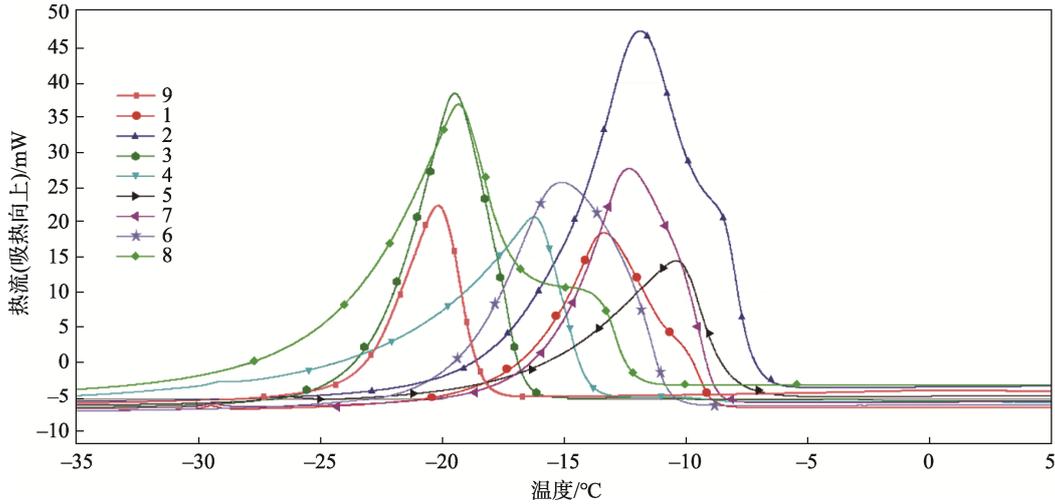


图2 9种蓄冷材料的DSC测试热焓图
Fig.2 DSC test enthalpy diagram of 9 kinds of cold storage materials

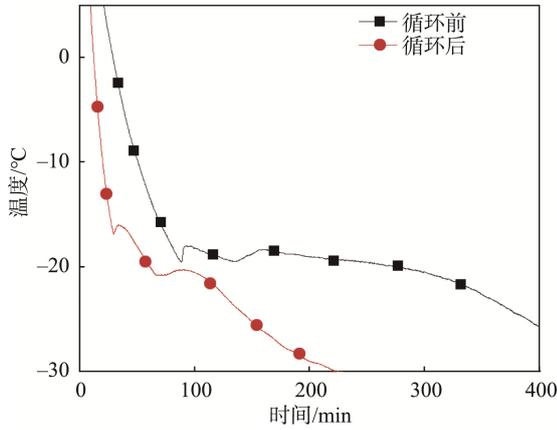


图3 编号1蓄冷剂循环前后过冷度比较
Fig.3 Comparison of subcooling degree before and after cycle of No.1 coolant

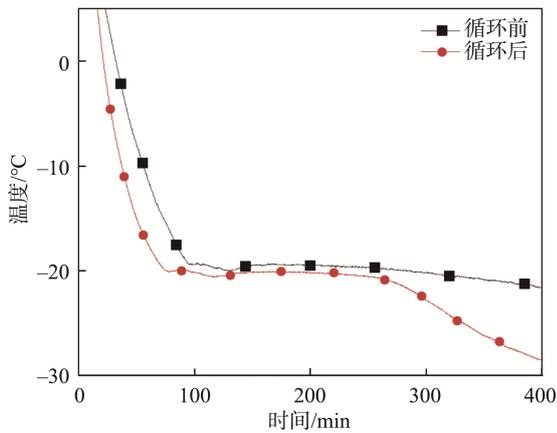


图4 编号6蓄冷剂循环前后过冷度比较
Fig.4 Comparison of subcooling degree before and after cycle of No.6 coolant

式中： Q_1 为围护结构的传热量，W； K 为围护结构的传热系数， $W/(^{\circ}C \cdot m^2)$ ； A 为围护结构的传热面积， m^2 ； δ 为围护结构两侧温差的修正系数； t_w 为围护结

构外侧的环境温度， $^{\circ}C$ ； t_n 为围护结构内侧的库内温度， $^{\circ}C$ 。

围护结构采用厚度为150 mm的聚氨酯板，根据JG/T 314—2012，聚氨酯泡沫的传热系数 $K=0.024 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。金属面板的导热系数较大，厚度较小（仅为0.6 mm），其热阻相对于隔热层可以忽略不计，热阻的构成见表2。围护结构的传热面积 $A=77.6 m^2$ 。根据《冷库制冷设计手册》，查得冷藏间外墙的温度修正系数为1.30，围护多层结构热阻计算见式（2）。

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \quad (2)$$

式中： R_1, R_2, \dots, R_n 为各种材料的热阻， $m^2 \cdot K/W$ ； $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 为各种材料的厚度，mm； $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为各种材料的导热系数， $W/(m \cdot K)$ 。

壁面传热系数 $K=0.158 W/(m^2 \cdot K)$ ，查得上海夏季空气调节室外计算日平均温度为 $30^{\circ}C$ ，室内设定温度为 $-18^{\circ}C$ ，即 $t_n=-18^{\circ}C$ 。通过计算，可知围护结构传热量 $Q_1=770 W$ 。

1.5.2 货物热量

货物热量的计算见式（3）。

$$Q_2 = Q_{2a} + Q_{2b} + Q_{2c} + Q_{2d} = \frac{1}{3.6} \left[\frac{m'(h_1 - h_2)}{t} + m'B \frac{c_b(\theta_1 - \theta_2)}{t} \right] + \frac{m'(q_1 - q_2)}{2} + (m_n - m')q_2 \quad (3)$$

式中： Q_2 为货物热量，W； Q_{2a} 为食品热量，W； Q_{2b} 为包装材料和运载工具热量，W； Q_{2c} 为货物冷却时的呼吸热量，W； Q_{2d} 为货物冷藏时的呼吸热量，W； m' 为冷却间的每日进货量，kg； h_1 为货物进入冷却间初始温度时的含热量，kJ/kg； h_2 为货物在冷却间内终止降温时的含热量，kJ/kg； t 为货物冷却时间，h，对于冷藏间取24 h，对于冷却间、冻结间取设计

表 2 围护结构热阻计算
Tab.2 Thermal resistance calculation table of enclosure structure

隔热层	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	厚度 δ/m	表面传热系数 α/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	热阻 R _i /(m ² ·°C·W ⁻¹)
聚氨酯泡沫	0.024	0.15	—	6.25
库内表面	—	—	12	0.083
库外表面	—	—	—	0
总热阻	—	—	—	6.333

冷却间工作时间; B 为货物包装材料或运载工具的重量系数; c_b 为包装材料或运载工具的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; θ_1 为包装材料或运载工具进入冷却间时的温度, $^\circ\text{C}$; θ_2 为包装材料或运载工具在冷却间内终止降温时的温度, 一般为该冷却间的设计温度, $^\circ\text{C}$; q_1 为货物冷却初始温度时的呼吸热量, W/kg ; q_2 为货物冷却终止温度时的呼吸热量, W/kg ; m_n 为冷却物冷藏间的冷藏量, kg 。

根据《冷库设计规范》查得鱼类冻藏混装密度为 $470 \text{ kg}/\text{m}^3$, 库体为装配式冷库, 查得该冷库容积利用率为 0.5, 该冷藏库内部可储存容积为 50.4 m^3 , 即每日进货量 $m'=587.5 \text{ kg}$ 。根据《冷库制冷设计手册》, 查得经冻结间处理后鱼类出货温度为 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的焓值 $h_1=14.2 \text{ kJ}/\text{kg}$, 终止降温时冷藏间温度为 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$, 在 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 时鱼类的焓值 $h_2=5 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。根据《冷库制冷设计手册》查得肉类、鱼类、冻蛋类的重量系数 B 为 0.3, 包装材料聚苯乙烯的比热容为 $1300 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 包装材料入库与鱼类温度相同为 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冷藏库内可贮藏鱼类质量 $m_n=11.75 \text{ t}$, 因该冷藏库为冻结物冷藏间, 货物无呼吸热, 故 Q_{2c} 和 Q_{2d} 均为 0 W 。

根据式 (3) 计算得到货物的热量为 78.46 W 。

1.5.3 电动机运转热量

电动机运转热量 Q_4 的计算见式 (4)。

$$Q_4 = 1000 \sum P_d \xi b \quad (4)$$

式中: Q_4 为电机运转热量, W ; P_d 为电动机额定功率, kW ; ξ 为热转化系数, 电动机在冷却间内时取 1, 电动机在冷却间外时取 0.75; b 为电动机运转时间系数, 对于空气冷却器配用的电动机取 1, 对于冷却间内其他设备配用的电动机可按实际情况取值。

电动机设备主要为冷风机电机, 冷藏库冷风机的功率按 1170 W 计算, 这里取 1 d 的设备用电时间为 2 h 。根据式 (4) 计算可得 $Q_4=195 \text{ W}$ 。

1.5.4 操作热量

操作热量 Q_5 的计算见式 (5)。

$$Q_5 = Q_{5a} + Q_{5b} + Q_{5c} = q_d A_d + \frac{1}{3.6} + \frac{n'_k n_k V_n (h_w - h_n) M \rho_n}{24} + \frac{3}{24} n_r q_r \quad (5)$$

式中: Q_5 为操作热量, W ; Q_{5a} 为照明热量, W ; Q_{5b} 为开门热量, W , 当每个冷却间冷库门的数量超过 2 时, 应按 2 个门计算; Q_{5c} 为操作人员的热量,

W ; q_d 为每平方米地板面积的照明热量, 冷藏间和储藏间可取 $1.8 \sim 2.3 \text{ W}/\text{m}^2$, 加工间、包装间等可取 $4.7 \sim 5.8 \text{ W}/\text{m}^2$; A_d 为冷却间地面面积, m^2 ; n'_k 为冷库门的数量; n_k 为每日开门换气的次数, 可按《冷库设计规范》图 19-2 取值, 经常开门的冷却间的换气次数可按实际情况取值; V_n 为冷却间内的净体积, m^3 ; h_w 为冷却间外空气的比焓, kJ/kg ; h_n 为冷却间内空气的比焓, kJ/kg ; M 为空气幕效率修正系数, 可取 0.5, 不设空气幕取 1; ρ_n 为冷却间内的空气密度, kg/m^3 ; $3/24$ 为每日操作时间系数, 按每日操作 3 h 计; n_r 为操作人员数量, 如果无法确定实际操作人数, 可按每 250 m^3 冷却间体积 1 人计; q_r 为每个操作人员产生的热量, W , 冷却间设计温度高于或等于 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时取 279 W , 低于 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时取 395 W 。

此次设计的冷藏间 q_d 取 $2 \text{ W}/\text{m}^2$, 面积为 20 m^2 , 冷库门数量为 1, 开门换气次数取 1, 冷却间内空气的比焓为 $-17.1 \text{ kJ}/\text{kg}$, 冷却间外空气的比焓为 $82.5 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。此冷库无空气幕, 空气幕效率修正系数为 1, 冷却间内的空气密度为 $1.385 \text{ kg}/\text{m}^3$, 冷却间的设计温度低于 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, 操作人员产生热量取 395 W , 根据式 (5) 可得 Q_5 为 169.2 W 。将上述计算结果汇总得到 $Q_q=1212.66 \text{ W}$ 。

为了使蓄冷的效果更佳, 将蓄冷剂的质量增加 1.1 倍。根据计算得到冷藏库贮藏总制冷量 $Q_z=1333.9 \text{ W}$, 即冷藏库贮藏区所需总制冷量为 1333.9 W 。

1.6 蓄冷剂的计算

实验选取的冷库为定制装配式冷库, 库内温度为 $-18 \sim -17 \text{ }^\circ\text{C}$, 主要用于水产品等冻品的贮藏。外部尺寸: 长度 5000 mm 、宽度 4000 mm 、高度 3200 mm 。库房侧壁和库门均为聚氨酯泡沫保温材料, 厚度为 150 mm , 库内净体积为 50.4 m^3 。制冷剂采用 R404A, 蒸发器为冷风机, 计算得冷库总制冷量 $Q_z=1333.9 \text{ W}$, 不包括蓄冷剂用冷。相变蓄冷冷藏库制冷机组主要满足低谷电时冷库的工作需求和蓄冷材料用冷, 在峰谷时可以调用蓄冷材料储存的冷量, 缩短制冷系统的运行时间, 以减小电网压力。此外, 相变蓄冷材料还可以满足制冷机组停机时冷库的冷量需求。

此设计方案的蓄冷时间为 6 h , 计算所需储存的冷量, 即 6 h 内的总冷损 $Q_x=1333.9 \text{ W} \times 6 \text{ h}=28812.2 \text{ kJ}$ 。该相变蓄冷冷藏库采用 $(\text{NH}_4\text{Br}+\text{NH}_4\text{Cl})$ (质量分数

30%) + SrCl_2 (质量分数 1%) + 黄原胶 (质量分数 5%) 为相变蓄冷材料, 潜热 $q=245.2 \text{ kJ/kg}$, 密度 $\rho=1417 \text{ kg/m}^3$, 蓄冷剂体积的计算见式 (6)。

$$V = 1.1 \times \frac{Q_x}{q\rho} \quad (6)$$

式中: V 为蓄冷剂的体积, m^3 ; Q_x 为蓄冷时总冷损, kJ ; q 为蓄冷剂的潜热, kJ/kg ; ρ 为蓄冷剂的密度, kg/m^3 。

根据式 (6) 计算得到蓄冷剂的体积 $V=0.091 \text{ m}^3$, 即 91 L, 所需蓄冷剂的质量为 129.3 kg。

2 蓄冷冷库的设计

2.1 蓄冷板的布置

采用顶置蓄冷板方案, 与其他冷板布置方案相比其温度分布更加均匀^[20-22], 蓄冷板的几何尺寸见图 5。在冷风机下底面同一高度放置 24 块蓄冷板 (4×6), 外壳材质为高密度聚乙烯 (HDPE), 每块蓄冷板的容积为 5 L。由于相变材料在相态转变时会发生热胀冷缩, 因而在每块蓄冷板中灌入 4 L 蓄冷材料, 避免因体积变化导致泄漏。制备 24 块蓄冷板, 在冷库中搭建铁架台及铁丝网, 将蓄冷板均匀布置在冷库上部, 见图 6。

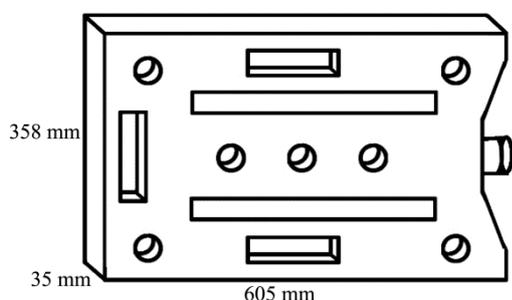


图 5 蓄冷板几何尺寸
Fig.5 Dimensional drawing of cold storage plate

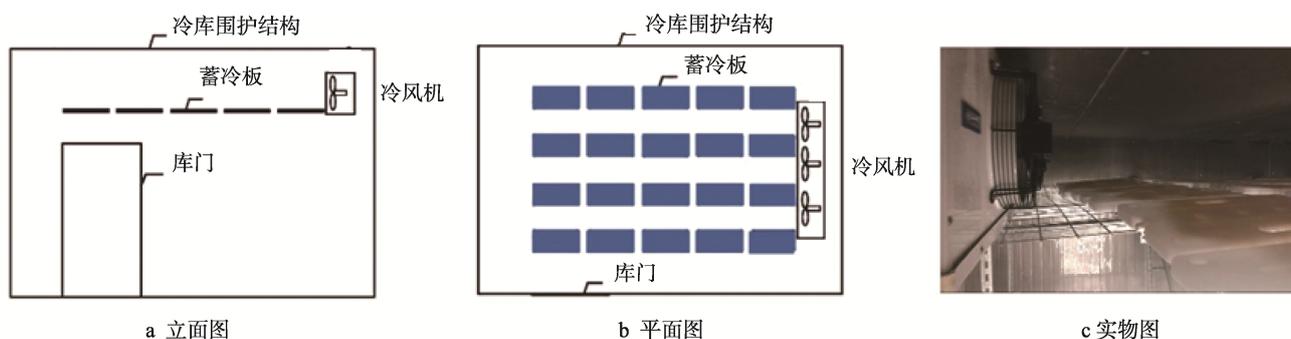


图 6 冷库蓄冷板布置示意图
Fig.6 Schematic diagram of cold storage cold storage board layout

2.2 实验数据的处理及分析

冷库设定温度为 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$, 在放置好蓄冷板后开启制冷机组, 待蓄冷板的温度达到凝固温度后完成蓄冷。在库内温度也达到 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 且稳定后, 关闭制冷机, 让蓄冷板释冷以稳定库温。实验时库外环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

热电偶具有结构简单、制造方便、测量范围广、精度高、惯性小和输出信号便于远传等优点, 因此冷库内温度的测量采用热电偶 (TestWord 3492A)。

为了更好地获得库内的温度分布, 温度测点分为上中下 3 层, 下层高度为 0.2 m, 中层高度为 1.2 m, 上层高度为 2.2 m。每层设有 5 个测温点, 5 个测点分布在 4 个角落和中心, 见图 7。每个测温点采用 2 个热电偶采集温度数据, 除了库内温度的测点, 在 2 块蓄冷板内也放置了测点 (靠近冷风机和库门处), 以了解蓄冷板释冷过程的温度变化情况。在每块蓄冷板内插入 2 根热电偶 (分别位于蓄冷板的底部、中部), 以测量内部温度的变化情况, 每 60 s 记录 1 次热电偶的温度数据。

待 6 h 实验结束后, 通过 Origin 软件处理采集的数据, 得到温度随时间的变化关系。实验库内温度随时间的变化情况见图 8。

从图 8 可知, 当库温从 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 回升到 $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, 有蓄冷板的库温比无蓄冷板的库温最长延缓了 37 min; 当温度上升到 $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 比空库最长延缓了 126 min。这表明蓄冷板需要一定的时间才能更好地释放冷量, 发挥蓄冷效果。另外, 发现蓄冷板上部测点的温度较中部、下部的温度高, 这与上部有充当冷源的蓄冷板, 温度应该上升较慢相违背。分析原因为上部的热电偶测点并没有设置在蓄冷板的正下方, 中间的热电偶探头设置在蓄冷板与蓄冷板的间隔里, 其他 4 个温度探头均设置在蓄冷板的周围。蓄冷板在释冷时产生的冷空气向下流动扩散, 对其下部的空气进行降温, 而中部、下部的热电偶温度探头正处于下部被冷却的空气中, 因而会产生上层的温度比中层、下层温度上升得更快的结果。

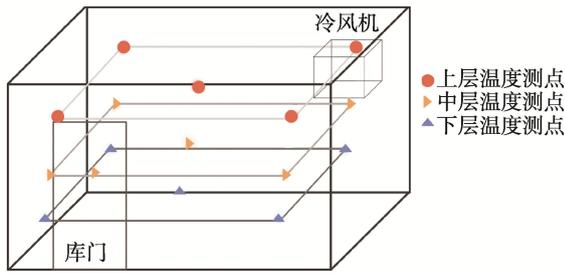


图 7 冷库内温度测点分布
Fig.7 Distribution map of temperature measurement points in cold storage

此外, 添加蓄冷板可以使冷库的温度分布更加均匀。在库内中部温度达到 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 无蓄冷板冷库内上层和下层温度分别为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温差 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 添加了蓄冷板的冷库内上层和下层的温度分别为 $-11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相较于未添加蓄冷板的对照组温度波动减小了 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为了考察冷库温度的不均匀性, 引入温度不均匀系数 S 。温度不均匀系数 S 表示在某一时刻冷库内不同位置与平均温度的偏差程度, S 数值越大表示冷库内温度的均匀性越差, 其计算见式 (7)。

$$S = \sum_{i=1}^n \left| \frac{t_i - \bar{t}}{\bar{t}} \right| \quad (7)$$

式中: t_i 为第 i 个温度测点的温度, $^{\circ}\text{C}$; \bar{t} 为冷库内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; n 为冷库内温度测点的数量。

经过计算, 不同时间段有无蓄冷板冷库的温度不均匀系数见表 3。

可以看出, 有蓄冷板的冷库内温度不均匀系数 S 均小于无蓄冷板冷库的 S 。根据不同位置蓄冷板的温度数据发现 (见图 9), 有蓄冷板的冷库温度分布更加均匀, 且其温度比无蓄冷板冷库的温度低, 在温度上升的过程中温度的均匀性保持得较好, 具有更好的保冷效果。不会出现部分区域温度上升过快的现象, 可以避免贮藏食品因温度变化过快而受到损害。

在前 3 h 内, 靠近风机的蓄冷板温度上升幅度很小, 没能及时地释放出储存的冷量, 靠近库门的蓄冷板的温度上升较快, 可以及时地将冷量释放出来, 延缓了库内温度上升的趋势。

初步分析可能的原因是库门密封性不理想, 导致室外的热空气侵入, 使得靠近库门的库内区域温度上升, 较之靠近风机的蓄冷板有更大的传热温差, 因此储存的冷量更容易释放出来, 延缓了库内温度的上升。通过实验发现, 放置蓄冷板可以解决冷库温度分布不均匀的问题, 并且在冷库关机后能够延迟温度的上升。在制冷机组关闭 2 h 后, 无蓄冷板冷库平均温度为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度波动值为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 有蓄冷板冷库平均温度为 $-14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度波动值为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。验证实验初步设计冷库关机后能够维持 6 h 的保温效果, 库温不发生较大波动, 不会影响库内贮藏品的品质, 从而使制冷机组延迟开机, 缓解了电网负荷, 并利用峰谷电价节省了冷库的运行费用。实验结束后分析发现, 库温在制冷机组关机后的 6 h 内仍有较大回升, 分析后发现主要有如下原因: 蓄冷板的表面换热系数太小, 导致释冷时间过慢, 释放的冷量未能抵消围护结构侵入的热量, 导致库温上升。

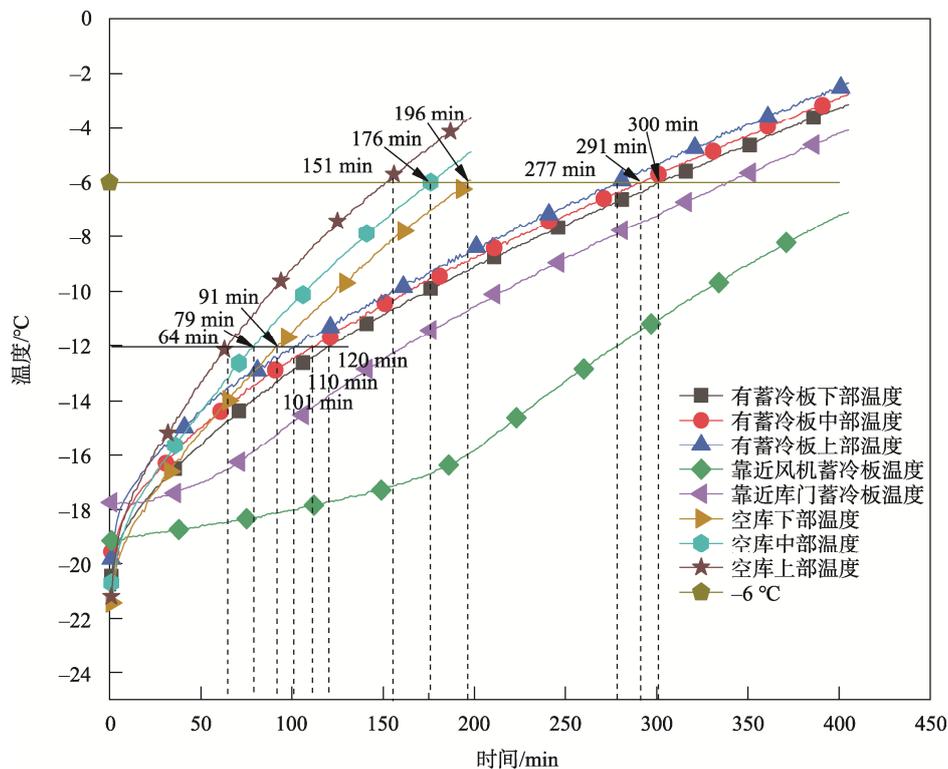


图 8 实验库内温度波动对比
Fig.8 Comparison of temperature fluctuations in the verification experiment library

表3 不同时间冷库内的温度不均匀性
Tab.3 Temperature unevenness in cold storage at different times

时间/h	温度不均匀系数	
	无蓄冷板冷库	有蓄冷板冷库
0.5	0.40	0.34
1.0	0.31	0.21
1.5	0.64	0.29
2.0	0.96	0.39
2.5	1.20	0.43
3.0	—	0.45
3.5	—	0.47
4.0	—	0.56

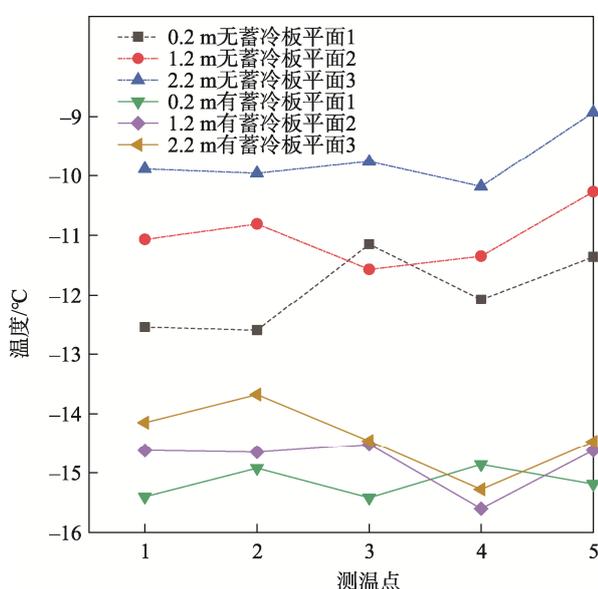


图9 不同平面温度分布

Fig.9 Temperature distribution map of different planes

换热系数受到多种因素的影响,主要有以下几个因素。

1) 蓄冷板的导热系数小。实验采用的商用成品蓄冷板,蓄冷板材料采用的高密度聚乙烯的导热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而蓄冷材料的导热系数为 $0.52 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,蓄冷板导热系数过小。将来可以采用导热系数更高的冷板材料,比如金属材料铜、铝和铁,其外壳的导热系数可达到 400 、 240 、 $80 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。也可以考虑在蓄冷材料中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,使其均匀分散在相变材料中,达到增强材料整体导热率的效果^[21]。

2) 蓄冷板与周围空气的接触面积太小。实验中24块蓄冷板与空气接触的总面积为 12 m^2 ,而整个冷库的围护结构面积为 97.6 m^2 。该实验采用的蓄冷板

为商用成品,无法定制尺寸。若能增加蓄冷板的换热面积,增加蓄冷板的面积,或是在冷板上添加翅片等,均可加快冷量的释放,延缓冷库的温度回升。

3 结语

根据现有的装配式冷库,利用蓄冷材料储存冷量,以缓解电网的负荷,同时延迟了制冷机组开机时间,或在制冷机组停机后能长时间地维持库内低温环境。通过实验研究得出以下结论:加装蓄冷板可以有效地延缓库温的上升,同时降低库内的温度波动。通过分析实验结果,推测蓄冷板的导热系数太小会影响冷量的释放。将来若能提高蓄冷板的导热系数,则可以加速蓄冷板冷量的释放,使库温回升更慢。也可以采用导热系数更高的材料制备蓄冷板,研制导热系数更高的蓄冷剂,从而达到更好的释冷效果,使得库内维持更久的低温环境,保证贮藏食品更好的品质。

参考文献:

- [1] 李肇芳,甘柳文.我国冷链物流行业的发展现状分析[J].内蒙古科技与经济,2021(12):41-42.
LI Zhao-fang, GAN Liu-wen. Analysis on the Development Present Situation of Cold Chain Logistics Industry in China[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2021(12): 41-42.
- [2] 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 Jin-tao, XIE Jing. Research Progress of Phase Change Cold Storage Materials and Their Application in Cold Storage[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 227-232.
- [3] 孙忠宇,程有凯.冷库现状及冷库节能途径[J].节能,2007,26(7):53-54.
SUN Zhong-yu, CHENG You-kai. The Present Conditions of Cold Storage and the Way of Saving Energy in Cold Storage[J]. Energy Conservation, 2007, 26(7): 53-54.
- [4] 秦威南,何强,祝强,等.相变蓄冷材料研究进展[J].化工新型材料,2021,49(5):1-6.
QIN Wei-nan, HE Qiang, ZHU Qiang, et al. Research Progress on Phase Change Cold Storage Material[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(5): 1-6.
- [5] 陈颖,姜庆辉,辛集武,等.相变储能材料及其应用研究进展[J].材料工程,2019,47(7):1-10.
CHEN Ying, JIANG Qing-hui, XIN Ji-wu, et al. Re-

- search Status and Application of Phase Change Materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(7): 1-10.
- [6] 唐娟. 新型低温相变蓄冷材料的热物性及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007: 2-9.
TANG Juan. Thermophysical Properties and Application Research of New Low-Temperature Phase Change Cold Storage Materials[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007: 2-9.
- [7] LI Yang, YANG Da-zhang, XIE Jing, et al. Review on Research and Application of Phase Change Materials in Cold Storage Refrigerator[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 766(1): 012094.
- [8] 游辉, 谢晶. 低温相变蓄冷材料及其应用于冷链的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(18): 287-293.
YOU Hui, XIE Jing. Research Progress of Low Temperature Phase Change Storage Materials and Their Applications in Cold Chain[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(18): 287-293.
- [9] 李艺群, 黄凯良. 冰蓄冷空调系统在工业方面的应用分析[J]. *节能*, 2019, 38(6): 21-23.
LI Yi-qun, HUANG Kai-liang. Application Analysis of Ice-Storage Air Conditioning System in Industry[J]. *Energy Conservation*, 2019, 38(6): 21-23.
- [10] 金云飞, 武卫东, 伏舜宇, 等. 低温冷链物流用相变材料的优化及应用[J]. *制冷学报*, 2021, 42(6): 106-113.
JIN Yun-fei, WU Wei-dong, FU Shun-yu, et al. Optimization and Application of Phase Change Materials for Low-Temperature Cold Chain Logistics[J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(6): 106-113.
- [11] 杨颖, 沈海英. 复合低温相变蓄冷材料的实验研究[J]. *低温物理学报*, 2009, 31(2): 144-147.
YANG Ying, SHEN Hai-ying. Investigation on Cryogenics Cool Thermal Energy Storage Phase Change Composition Material[J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*, 2009, 31(2): 144-147.
- [12] 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.
BAN Chao-fang, LU Li-xin, PAN Liao. Preparation and Performance Evaluation of Freeze Type Composite Phase Change Material[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(5): 218-221.
- [13] 李靖, 谢如鹤, 刘广海, 等. 冷藏运输用新型低温相变材料及装备的研制[J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 32-37.
LI Jing, XIE Ru-he, LIU Guang-hai, et al. Development of New Low-Temperature Phase Change Material and Equipment Used in Refrigerated Transportation[J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(4): 32-37.
- [14] 贾蒲悦, 武卫东, 王益聪, 等. 新型复合低温相变蓄冷材料的研制及热物性优化[J]. *化工学报*, 2019, 70(7): 2758-2765.
JIA Pu-yue, WU Wei-dong, WANG Yi-cong, et al. Preparation and Thermophysical Property Optimization of a New Composite Phase Change Material for Cold Storage[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(7): 2758-2765.
- [15] 戴君, 卢立新, 丘晓琳. 冷冻产品用无机盐相变蓄冷材料的制备及性能研究[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(6): 231-234.
DAI Jun, LU Li-xin, QIU Xiao-lin. Preparation and Performance of Inorganic Salt Phase Change Material for Frozen Product[J]. *New Chemical Materials*, 2018, 46(6): 231-234.
- [16] 唐娟. 低温相变蓄冷材料的热物性及应用研究[C]// 第九届全国空调器、电冰箱(柜)及压缩机学术交流会论文集, 2008: 240-245.
TANG Juan. Thermophysical Properties and Application Research of Low-Temperature Phase-Change Cold Storage Materials[C]// Proceedings of the 9th National Conference on Air Conditioners, Refrigerators (Cabinets) and Compressors, 2008: 240-245.
- [17] 王会, 刘忠宝, 赵洋. 用于冰箱冷冻室的相变蓄冷材料的速冻特性[J]. *制冷与空调*, 2015, 29(1): 6-10.
WANG Hui, LIU Zhong-bao, ZHAO Yang. Frozen Properties of Phase Change Cool Storage Materials in the Refrigerator Freezer[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2015, 29(1): 6-10.
- [18] SULEIMAN B M, GUSTAFSSON S E, BÖRJESSON L. A Practical Cryogenic Resistive Sensor for Thermal Conductivity Measurements[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, 57(1): 15-19.
- [19] 张正飞, 秦紫依, 李勇, 等. 相变材料的过冷现象及其抑制方法的研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(21): 3613-3619.
ZHANG Zheng-fei, QIN Zi-yi, LI Yong, et al. Progress in Supercooling and Suppression Methods of Phase Change Materials[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(21):

- 3613-3619.
- [20] 詹耀立, 冯国会. 不同冷板布置方式的冷板车内温度场模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(5): 859-862.
- ZHAN Yao-li, FENG Guo-hui. The Simulation of Temperature Field Inside Cold-Plate Refrigerator Car Following Different Setting of Cold Plate[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2008, 24(5): 859-862.
- [21] 武小娟, 王忠堂, 梅瑞斌, 等. 冷板的布置方式对冷板车车内温度场的影响[J]. 制冷与空调, 2008, 22(5): 12-15.
- WU Xiao-juan, WANG Zhong-tang, MEI Rui-bin, et al. Temperature Distribution of Refrigerator Truck Influenced by Position of Cooling Source[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2008, 22(5): 12-15.
- [22] 谢如鹤, 唐海洋, 陶文博, 等. 基于空载温度场模拟与试验的冷藏车冷板布置方式优选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 290-298.
- XIE Ru-he, TANG Hai-yang, TAO Wen-bo, et al. Optimization of Cold-Plate Location in Refrigerated Vehicles Based on Simulation and Test of No-Load Temperature Field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 290-298.

责任编辑: 彭颀