

物流保鲜

相变蓄冷式双温区城市宅配保温箱的研制及测试

杨国梁^a, 胥义^a, 辛岩^b, 冯海靠^a

(上海理工大学 a.生物系统热科学研究所 b.制冷技术研究所, 上海 200093)

摘要: **目的** 为了减少保温箱的冷量损耗, 且能够将多种生鲜产品共同贮藏, 设计一种相变蓄冷式双温区保温箱。**方法** 保温箱内设有冷藏区和微冻区, 通过热负荷计算得出各区域所需蓄冷剂用量, 并利用数值模拟和试验验证等 2 种方法来研究保温箱的保温效果, 最后将试验数据与模拟数据进行对比, 验证理论计算和数值模拟的可靠性。**结果** 蓄冷板放置在保温箱顶部时, 保温箱箱体中部的温度最高, 顶部的温度最低, 温度场虽有分布不均的情况出现, 但两区域总体温度在 2 h 内趋于稳定, 并分别维持在适宜生鲜产品保存的温度区间 (1~4 °C 和 -10~0.5 °C)。**结论** 所设计的保温箱可以有效维持保鲜温度, 并满足多种生鲜产品共同贮藏的设计要求。

关键词: 保温箱; 相变蓄冷; 双温区

中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)23-0043-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.008

Development and Test of Cold Storage Phase-change Incubator with Two Temperature Zones for Urban Home Delivery

YANG Guo-liang^a, XU Yi^a, XIN Yan^b, FENG Hai-kao^a

(a. Institute of Biothermal Science and Technology

b. Institute of Refrigeration and Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to design a cold storage phase-change incubator with two temperature zones in order to reduce the loss of cooling capacity of the incubator and store a variety of fresh foods together. The incubator has a cold storage zone and a superchilling storage zone, and the consumption of the cold storage material in each zone was obtained by thermal load calculation. The heat insulation effect of the incubator was studied by numerical simulation and experimental verification. Finally, the test data were compared with the simulated data to verify the reliability of theoretical calculation and numerical simulation. When the cold storage plate was placed at the top of the incubator, the temperature in the middle of the incubator was the highest, and the temperature at the top was the lowest. Although the temperature field was sometimes unevenly distributed, the overall temperature of the two zones tended to be stable within 2 h, and maintained at 1~4 °C and -10~0.5 °C, respectively, which were suitable for fresh foods preservation. The designed incubator can effectively maintain the preservation temperature and meet the design requirements of various fresh foods stored together.

KEY WORDS: incubator; cold storage phase-change; two temperature zones

随着经济的发展, 生鲜产品电子商务以其产品的保鲜性和其提供的城市宅配服务愈来愈受到广大消费者的喜爱^[1-3]。由于生鲜产品其本身的保鲜期较短, 尤其某些对温度条件极为严苛的生鲜产品, 贮运

环境的温度波动会影响到产品的品质, 因此对于配送的要求也相应较高^[4-6]。

宅配保温箱作为贮运生鲜产品的主要工具, 目前有泡沫保温箱、布质保温箱、金属保温箱、塑料保温

收稿日期: 2018-08-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51576132)

作者简介: 杨国梁 (1995—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻低温设备的换热设计与优化。

通信作者: 胥义 (1975—), 男, 上海理工大学教授、博导, 主要研究方向为冷链物流信息化技术、低温生物医学技术。

箱以及新型材料保温箱等。泡沫保温箱使用轻便,多以聚氯乙烯塑料为原料,一般用于常温运输或低温冷藏运输,但不可重复使用,保温效果稍差;布质保温箱由牛津布或尼龙布制成,强韧、耐磨、防水、防滑,但保温性能还有待提升;金属保温箱应用广泛,但稍显笨重,不易拆卸,且棱角容易划伤皮肤;塑料保温箱在生活中的使用频率最高,但某些劣质的塑料材质在不同的温度、湿度等条件下可能会释放出有毒有害物质;新型材料保温箱的材料多是已优化的泡沫和塑料以及一些新型材料,现多以真空绝热板^[7-9]为制造材料,其导热系数极低,可以达到 $0.0024 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,保温效果极好。

蓄冷式保温箱可以长时间维持生鲜产品的保鲜温度,但目前市场上的蓄冷式保温箱还存在几点问题:保温箱分区较少,不能对不同种类的生鲜产品在各自适宜的温度条件下贮藏运输,有可能造成某些产品变质^[10];保温箱一般配备冰袋补充制冷量,但冰袋能达到的制冷量要低于相变材料能够提供的制冷量;冰袋占据保温箱一部分空间,使得保温箱内的有效使用体积较少;保温箱内放置冰袋的方式需要优化,尽可能减少冷量损耗。这些问题都会影响到生鲜农产品宅配过程中的品质保证和消费者的购物体验^[11]。

文中针对保温箱存在的问题,拟研制一种相变蓄冷式双温区宅配保温箱,该箱使用相变蓄冷材料代替传统的冰袋来提供更加充足的冷量,将蓄冷板顶置在箱盖内,使箱体内部的环境实现自然对流换热,一定程度上减少了冷量损耗,且不占用箱体内部的使用空间,而由于箱体内部两区域使用的蓄冷材料不同,因此该箱可以同时满足 0°C 以上的冷藏保鲜^[12]和 0°C 以下的微冻保鲜^[13-14]这 2 种食品保鲜方式。对箱体进行计算设计后,文中拟通过传热数值模拟以及试验来验证宅配保温箱的保温效果。

1 宅配保温箱的设计

1.1 总体结构设计

针对现有保温箱有效使用体积较少的问题,设计时尽量使箱体内容积大,宽度、深度与高度的比例合理^[15]。这里采用新型真空绝热板(简称VIP)作为城市宅配保温箱的箱体保温材料,设计出的相变蓄冷式双温区城市宅配保温箱的平面及立体结构见图1。箱体容积为 34 L,箱体外尺寸为 $51 \text{ cm} \times 31 \text{ cm} \times 31 \text{ cm}$,内尺寸为 $47 \text{ cm} \times 27 \text{ cm} \times 27 \text{ cm}$,箱体内部分为 2 个区域,左侧为冷藏区,右侧为微冻区,分别用 A 和 B 来表示,其体积比为 2:1,区域之间用厚度为 2 cm 的真空绝热板进行分隔。箱体顶部放置着不同型号的蓄冷板,这样的布置方式能够使靠近冷板处的空气温度降低,向箱体下部进行运动,在各自分区内形成自然对流,从而产生不同的温度区间。

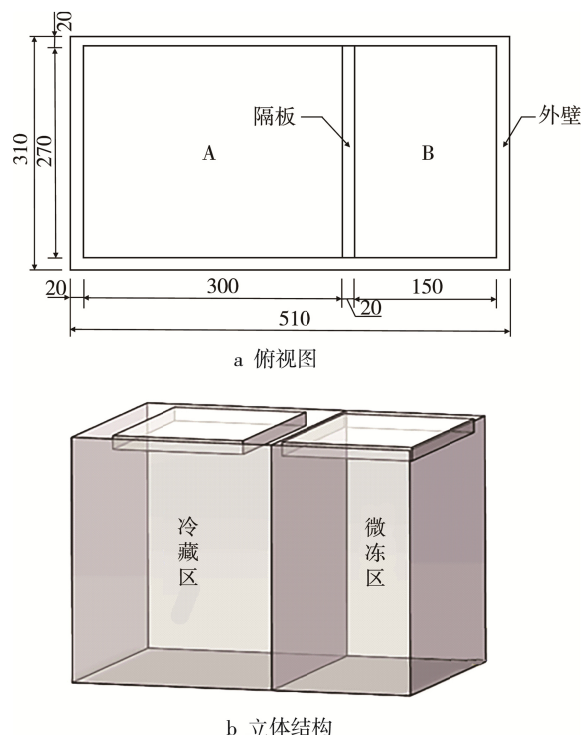


图1 保温箱平面及立体结构

Fig.1 Planar structure and three-dimensional structure of incubator

1.2 热负荷计算

目前,热负荷计算的方法主要有热平衡法和概略算法^[16]。热平衡法根据热量平衡原理,将宅配箱耗散的各种因素都考虑在内,该方法的计算比较精确。概略算法只需考虑车厢外部传入的热量,计算较为便捷。为了保证更好的计算结果,采用热平衡法进行负荷计算。宅配保温箱箱体的冷负荷主要包括 4 个部分,即外部环境传入的热量、开关箱漏热量、贮物呼吸热和其他设备散热量:

$$Q = 1.1(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \quad (1)$$

式中: Q 为保温箱箱体的总负荷 (W); Q_1 为外部环境传入的热量 (W); Q_2 为开关门漏热量 (W); Q_3 为贮物呼吸热 (W); Q_4 为其他设备散热量 (W)。

外部环境传入的热量主要包括箱体壁面传入的热量以及箱体缝隙的漏热量,而在实际的配送过程中,城市宅配箱大部分时间处于车厢内,通过箱体壁面传入的热量可由车厢内箱体的热负荷计算方法^[17]计算得出:

$$Q_a = 3.6KA(t_1 - t_2) \quad (2)$$

式中: Q_a 为通过箱体壁面传入的热量 (W); K 为保温箱体壁面综合传热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); A 为传热表面积 (m^2); t_1 为箱体周围环境空气温度,这里取 30°C ; t_2 为箱体内部空气温度,分别取 0°C 、 -5°C 。

经计算,通过壁面传入箱体不同区域的传热量分别为 Q_{aA} 为 4.711 W, Q_{aB} 为 3.284 W,箱体漏热量一

般根据经验数据给出, 可取为 Q_a 的 10%。最终计算得到冷藏区由外部环境的传入热量 Q_{1A} 为 5.182 W, 微冻区由外部环境的传入热量 Q_{1B} 为 3.612 W。

开关箱漏热量^[18]的计算公式为:

$$Q_2 = fQ_1 \quad (3)$$

式中: f 为开关箱频度系数, 若运输途中不开箱盖, 取 f 为 0.25, 中途开箱 1~5 次, 取 f 为 0.5, 开箱 11~15 次, 取 f 为 1。这里以不开箱盖的情况进行计算, 可得冷藏区漏热量 Q_{2A} 为 1.295 W, 微冻区漏热量 Q_{2B} 为 0.903 W。

货物的呼吸热主要由果蔬类食品产生, 因此只需考虑计算冷藏区的呼吸热, 计算方法为:

$$Q_3 = c \sum m_i v_i \quad (4)$$

式中: c 为呼吸热计算常数^[19], 数值为 2.972×10^{-3} W/kg; m_i 为箱体内货物的质量, 取 2 kg; v_i 为箱体内货物的平均呼吸强度。不同水果蔬菜的呼吸强度都有所不同, 这里以草莓为例进行计算, 草莓在 0~30 °C 贮运环境下的平均呼吸强度^[20]以草莓释放 CO_2 的质量来表示, 约为 134.59 mg/(kg·h)。计算可得冷藏区货物呼吸热 Q_{3A} 约为 0.8 W。

由于宅配箱的容量相对较小, 产品已经过充分预冷, 且宅配箱内无其他散热设备, 故其他热量可忽略不计。由式 (1) 计算可得, 相变蓄冷式双温宅配保温箱冷藏区的总冷负荷 Q_A 为 8.005 W, 微冻区的总冷负荷 Q_B 为 4.605 W。

1.3 蓄冷剂用量计算

蓄冷剂总质量可由以下公式计算得出:

$$m_Y = \frac{Q_f}{q} \quad (5)$$

式中: m_Y 为蓄冷剂总质量 (kg); Q_f 为所需冷量 (kJ); q 为蓄冷材料的相变潜热 (kJ/kg)。

假设宅配保温箱工作时间为 10 h, 则在整个配送过程中宅配保温箱中冷藏区需要的冷量 Q_{fA} 为 288.18 kJ, 微冻区需要的冷量 Q_{fB} 为 165.78 kJ, 而这里采用的蓄冷剂相变温度分别为 -2 和 -8 °C, 相变潜热分别为 333 和 298 kJ/kg。在预计使用时间为 10 h 的情况下, 箱体内冷藏区的蓄冷板所需蓄冷剂的质量应不少于 0.865 kg, 而微冻区所需蓄冷剂的质量应不少于 0.556 kg。

2 流态分析及模拟

2.1 保温箱流动状态分析

在蓄冷保温箱内, 流体在无限接近蓄冷板处的水平方向速度可视为 0, 在竖直方向由于传热温差和重力的作用, 会产生自然对流现象。由温差产生密度差, 使冷的、密度大的流体向箱体下部运动, 热的、密度

小的流体向上部运动。流体的运动状态可以通过瑞利数 Ra 来判断, 在 $Ra \leq 10^8$ 时, 可认为流体流态为层流; 在 $10^8 \leq Ra \leq 10^{10}$ 时, 为层流向湍流过渡阶段; 在 $Ra \geq 10^{10}$ 时, 流体流态为湍流状态。根据所设计的箱体结构可计算瑞利数 Ra 为:

$$Ra = \frac{g\beta_0\Delta T_0 l^3 P_r}{\nu^2} = 4.0448 \times 10^7 < 10^8 \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度 (m/s^2); β_0 为热膨胀系数 (K^{-1}); ΔT_0 为传热温差 (K); l 为封闭腔的特征长度 (m); ν 为运动粘度 (m^2/s); P_r 为普朗特数。由瑞利数数值可以得出, 整个城市宅配箱内空气的流动状态为稳态、有内热 (冷) 源、三维层流的空气流动。为了方便数值模拟, 对模型作出以下假设: 箱内温度场和流场分布都为稳态工况; 箱内空气视为辐射透明介质, 忽略箱体内壁面间的热辐射; 箱内的空气为干空气且为牛顿流体, 定压比热容为定值; 箱内空气的流动形式为稳态的层流和非边界层型流动; 箱体壁面处的空气满足无滑移的边界条件; 箱内空气符合 Boussinesq 假设, 浮力驱动流动受到重力加速度的作用, 箱体气密性良好, 不考虑漏风影响。

2.2 温度场模拟

文中模拟的外界环境为 30 °C, 当温度场达到稳态后, 为了更好地显示保温箱箱体内温度场的分布情况, 这里选择保温箱竖直方向的中部截面, 水平方向上顶部、中部以及底部 3 个位置的截面作为观察截面, 具体温度场分布见图 2。

观察各个截面温度场的分布可以发现, 由于自然对流现象的存在, 宅配箱箱体内温度场在垂直方向上靠近蓄冷板的区域存在明显的温度分层现象, 无论是冷藏区还是微冻区, 靠近冷板处的温度均最低, 且随着冷空气向下的不断流动, 保温箱底部的温度也略低于中部。水平方向上, 温度场近似环状分布, 2 个区域在靠近保温箱内壁处的温度都要略高于箱体中部, 这是由于 2 个区域的箱壁直接与自然环境接触, 一定程度上会受到外部环境传入热量的影响, 故而箱体内壁温度会较高于箱体其他部位温度; 保温箱顶部温度水平分布不均匀性明显高于中部和底部, 这是由于此处空气距离蓄冷板较近, 换热现象更为明显, 空气流速加快, 从而造成温度分布不均匀。总体来看, 冷藏区最低温度接近 274 K (0.85 °C), 最高温度出现在箱体左侧, 接近 276 K (2.85 °C), 绝大部分区域处于 274.5~276 K (1.35~2.85 °C) 的温度范围内, 区域最大温差为 2 °C; 微冻区最低温度接近 269 K (-4.15 °C), 最高温度出现在箱体右侧, 温度接近 272 K (-1.15 °C), 绝大部分区域处于 269.5~271 K (-3.65~-2.15 °C) 的温度范围内, 区域温差为 3 °C。

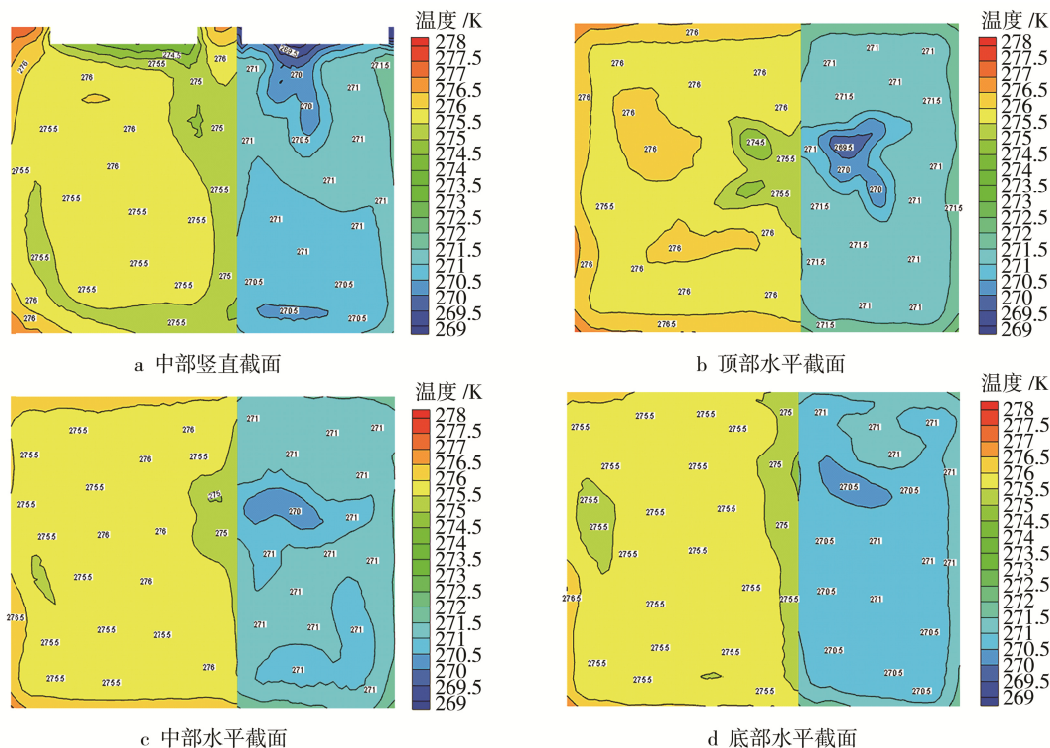


图2 保温箱温度场分布

Fig.2 Distribution of incubator temperature field

3 试验方法及结果

3.1 试验方法

该试验目的是研究实际情况下箱体的保温效果,为了确保试验准确性,试验采用恒温箱维持宅配保温箱的外部环境,且为了增强箱体的机械稳定性,在其外部粘合了一层不锈钢金属外壳,箱体实物结构见图3。为了研究外部环境对保温箱保温效果的影响,恒温箱的温度先后设置为 30 和 40 °C 以进行对比,实验设定保冷时间为 12 h。整个试验过程中,恒温箱箱盖始终处于关闭状态,以防外部环境漏风影响。

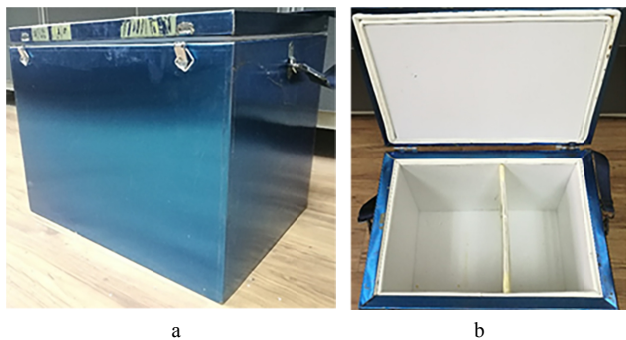


图3 相变蓄冷式保温箱试验装置

Fig.3 Cold storage phase-change incubator tester

首先在保温箱内部均匀布置 18 个温度测点,其中冷藏区布置 9 个温度测点,微冻区布置 9 个温度测点,具体的箱体测点布置见图 4。布置完成温度测点

后立即开启温度记录仪,将完全冻结的相变蓄冷剂放入宅配保温箱盖内,盖上箱盖,同时设定好恒温箱的温度,保冷 12 h 后,取出温度记录仪,将数据导出以及对数据进行分析。

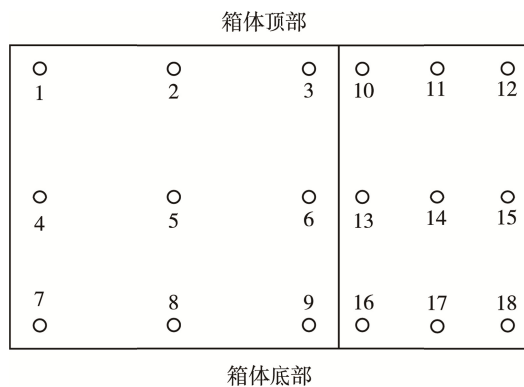


图4 温度测点布置

Fig.4 Layout of temperature measuring points

3.2 试验结果分析

3.2.1 冷藏区不同方向温度分布特点

研究相变蓄冷板顶置时宅配保温箱 2 个温区内在竖直方向和水平方向上温度的变化,首先取 2 号、5 号、8 号测点作为冷藏区在竖直方向上的代表监测点,取 4 号、5 号、6 号测点作为水平方向上的代表监测点,不同工况下各测点温度变化曲线见图 5。

分析图 5 中的数据可得,不论是在 30 或 40 °C 的外界工况条件下,冷藏区内各个测点在初始阶段 2

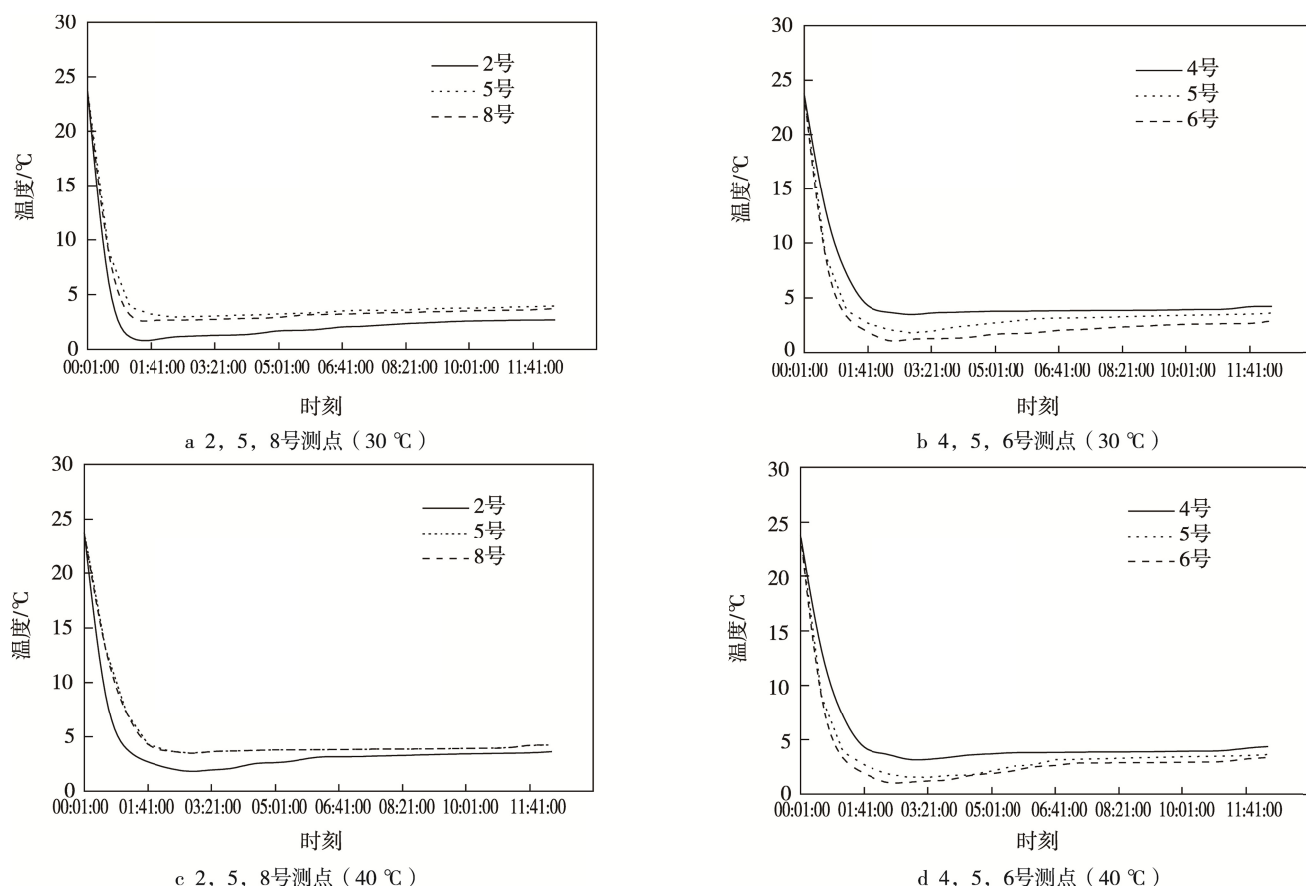


图5 冷藏区测点温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curve of measuring point in cold storage zone

h 内温度逐渐降低,之后趋于稳定,维持在 1~4 °C 之间,是能够满足绝大多数生鲜果蔬的适宜冷藏保鲜温度。冷藏区各个测点的温度呈现一致的变化规律,但彼此之间存在一定的温差。在竖直方向上,2 号测点靠近蓄冷板,温度接近蓄冷板下表面的温度,故其温度最低,而随着冷空气向箱体下部流动,造成冷量在下部汇集,导致 8 号测点的温度稍低于 5 号测点。水平方向上,由于 4 号测点的位置临近外界环境,受外界的传热影响,其温度最高;6 号测点靠近冷藏区和微冻区的分界面,受外部环境的影响较小,其温度最低,5 号测点的温度则介于 4 号与 6 号测点温度之间。

3.2.2 微冻区不同方向上的温度分布特点

与冷藏区相同,选取各个方向上的代表监测点进行分析,11 号、14 号、17 号测点为微冻区在竖直方向上的代表监测点,13 号、14 号、15 号测点为水平方向上的代表监测点,不同工况下温度变化曲线见图 6。

分析图 6 中的数据可得,微冻区内各个测点同样在 2 h 后基本达到稳定,稳定后各测点温度始终维持在 -10~-0.5 °C 之间,同样能够满足大多数肉类生鲜食品的微冻贮藏运输条件。对于微冻区,竖直方向上 11 号测点的温度由于靠近蓄冷板,其温度最低,其他 2 个测点的温度稍高,与冷藏区变化规律一致。水

平方向上 15 号测点的温度最高,其他 2 个测点的温度稍低,这也是因为 15 号测点位于箱体微冻区右侧中部,受外界环境换热影响,导致其温度高于 13 号和 14 号测点。在 10~12 h 时间段内,微冻区的温度受环境温度影响较大,超过 0 °C,有可能会对某些生鲜肉类食品的品质有一定影响,因此若外界环境温度大幅超过设计标准且保存时间较长时,有必要采用更为有效的措施来进一步控制箱体内的温度。

3.2.3 各测点温度实测值与模拟值的对比

在整个试验过程中,温度记录仪每隔 1 min 记录 1 次数据,经过多次试验后发现,宅配箱 2 个温区内各个测点在 2 h 后基本达到稳定,因此选取宅配箱内各个测点达到稳定的 (2~10 h) 600 个测点温度的平均值作为实际监测得到的数值,并与模拟结果进行对比,结果见图 7。

由图 7 可知,在 30 °C 外界工况条件下,宅配箱 2 个温区内实测的各个测点的温度变化规律与模拟结果基本一致,这验证了之前模拟的准确性。与模拟数值相比,宅配箱内各个测点的实测数值比模拟数值普遍偏高 0.5~1 °C,这是由于实测值采取的是各个测点 2~10 h 的温度平均值,在模拟过程中,假定相变蓄冷板在整个放冷过程中下表面温度维持不变,而在相变蓄冷板实际放冷过程中,随着时间的增加,相变蓄冷

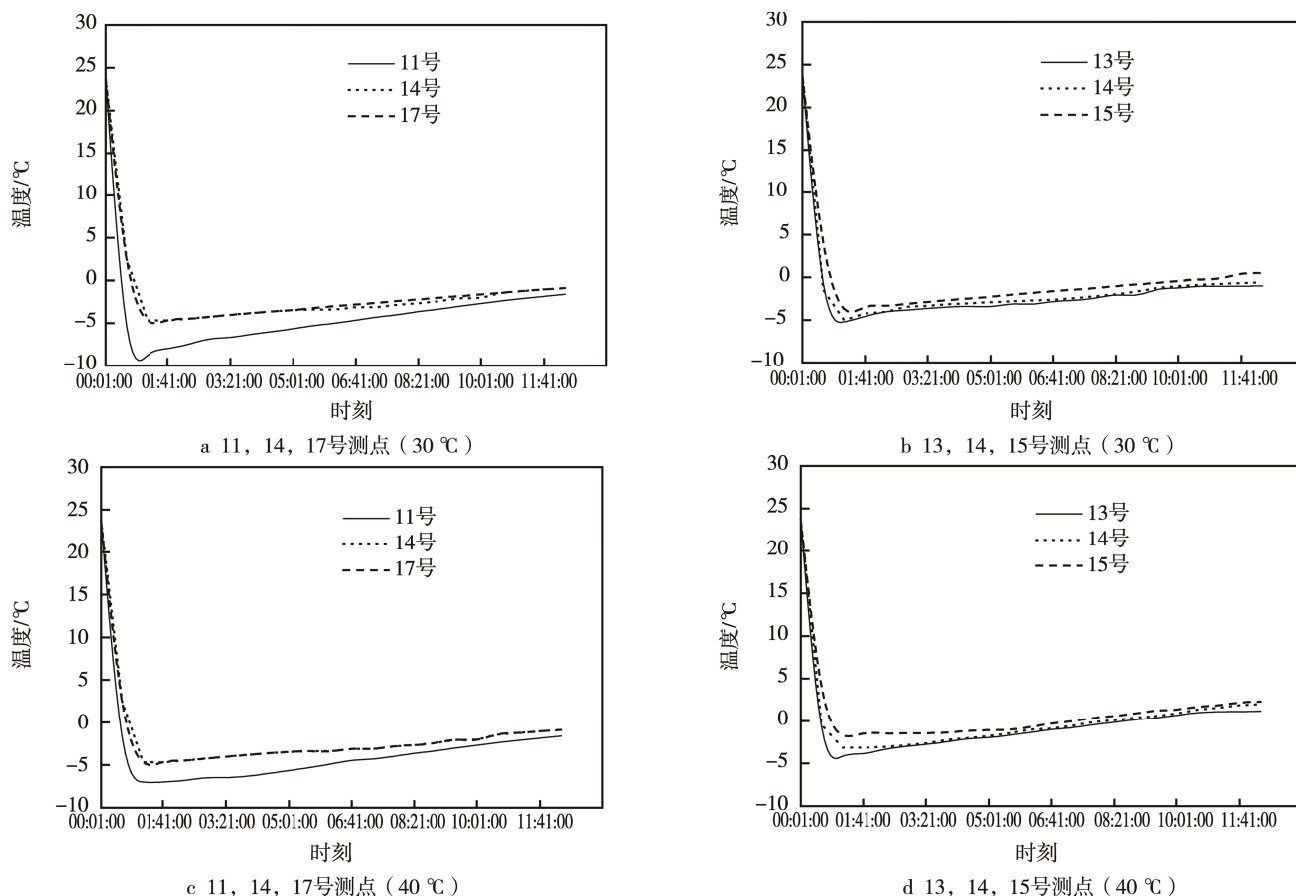


图6 微冻区测点温度变化曲线

Fig.6 Temperature change curve of measuring point in superchilling storage zone

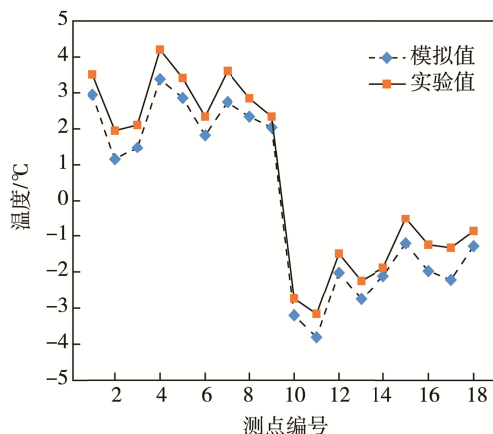


图7 模拟结果与实验结果的对比

Fig.7 Comparison of simulation results with experimental results

板下表面的温度会有小幅度的提升,从而造成了实测的数值比模拟的数值高。

4 实用性及经济性分析

相变蓄冷式双温区宅配箱采用高效的VIP真空绝热材料和相变蓄冷剂,无需机械制冷,能实现长达12 h的保冷时间,并且设有冷藏和微冻2个分区,能够同时配送多种生鲜产品,在配送至顾客家中时省去

了大量的货物分拣时间,箱体适用于普通运输车辆以及电动车等多种运输工具的配送,拥有足够的便携性与高效性。

文中在对生鲜产品城市宅配的调查研究中得知,目前城市宅配方式主要使用冷藏车配送,其通常需要开启车内的冷气来维持生鲜产品的贮存温度,在不考虑行驶速度以及坡度的影响时,通过总结大量的实验数据,得出汽车油耗费用与汽车质量的经验公式^[21]:

$$M = 100n\{a[(m_1 + m_2)x + m] + b\} \quad (7)$$

式中: M 为冷藏车 100 公里的油耗费用(元); n 为当日燃油的单价(元/L); a 为经验系数,约为 8×10^{-5} L/(kg·km); m_1 为每个保温箱的质量(kg); m_2 为保温箱最大载货量(kg); x 为保温箱的数量; m 为汽车空载时的质量(kg); b 为经验系数,其值约为 -0.025 L/km。

在冷藏车开启冷气后,油耗费用会增加到 $1.015M$,假定该情况下使用的是容积为 34 L 且无相变蓄冷板的PU保温箱,其市场售价 w_1 约 250 元;在不开启冷气的条件下,采用蓄冷式保温箱的成本 w_2 为每个 200 元。由于蓄冷板会占用箱体内部体积,因此蓄冷式保温箱的最大载货量要少于 EPP 保温箱,约为 $0.94m_2$,日常情况下,1 辆小型冷藏车每天装载的保温箱数量 x 约为 20~30 箱。

1年内采用PU保温箱配送时,每天100 km的单位运输成本为:

$$F_1 = \frac{1.015M + \frac{w_1 x}{365}}{x} \quad (8)$$

1年内采用蓄冷式保温箱配送时,每天100 km的单位运输成本为:

$$F_2 = \frac{100n\{a[(m_1 + 0.94m_2)x + m] + b\} + \frac{w_2 x}{365}}{x} \quad (9)$$

假定当日燃油价格为7元/升,每个保温箱空箱质量为5 kg且最大可载质量为30 kg,冷藏车空载时质量为1500 kg,通过计算,绘制一辆小型冷藏车每天100 km的单位运输成本随着保温箱数的变化情况,见图8,分别对比PU保温箱、有冷板相变蓄冷保温箱以及无冷板相变蓄冷保温箱对单位运输成本的影响。

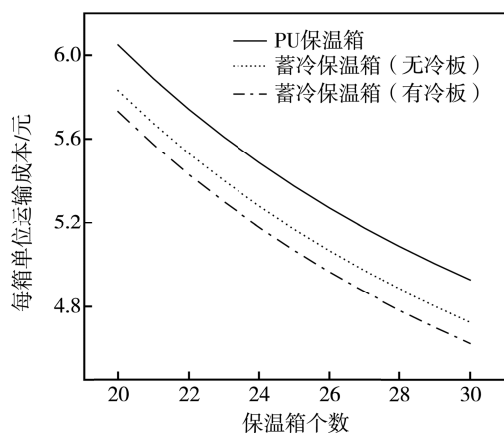


图8 单位运输成本的变化曲线

Fig.8 Change curve of unit transportation cost

由图8可知,宅配过程的单位运输成本与保温箱个数成反比关系,单位运输成本随着保温箱数量的增加而降低,不论保温箱数量的多少,采用蓄冷式保温箱配送的单位运输成本始终低于使用PU保温箱且开启冷气的单位运输成本。虽然含有蓄冷板的蓄冷保温箱的载货量会略微减少,但载货量的减少也使得冷藏车耗油量有所减少,因此当蓄冷保温箱放置冷板后,每100 km的单位运输成本会略低一些。图8中由于使用蓄冷式保温箱而节约的成本多为节约的燃油费用,相应地,冷藏车在配送的过程中就会减少一定的燃油使用量,而燃油燃烧产生的碳排放量也会有所减少。由此可见,采用相变蓄冷式保温箱,不仅能够提高配送的品质和效率,为生鲜电商节省费用,而且也能实现节能减排的作用,为整个社会和自然环境产生良好的环境效益。

5 结语

结合生鲜产品城市宅配的特点,针对市场现有保

温箱的问题设计了一种相变蓄冷式双温区宅配保温箱,并通过模拟及试验研究了宅配保温箱内的温度变化情况和保温性能。结果表明,保温箱内温度场虽有分布不均的情况出现,但总体的温度区间满足日常宅配需求。这里是在假设蓄冷板温度恒定、各温区箱体之间完全密封且不考虑箱体内外辐射换热的基础上进行计算的,实际情况中,宅配箱的换热模型也会受到环境影响,且其中还涉及到蓄冷板的相变过程,后续研究可以考虑更多的影响因素来进行优化,以便更准确地反映保温箱的保温效果。

参考文献:

- [1] 刘刚. 生鲜农产品电子商务的物流服务创新研究[J]. 商业经济与管理, 2017(3): 12—19.
LIU Gang. Research on the Logistics Service Innovation for the Ecommerce of Fresh Agricultural Products[J]. Journal of Business Economics, 2017(3): 12—19.
- [2] 徐广姝, 宋子龙. 生鲜电商与物流服务商的契约协调——基于生鲜宅配模式的分析[J]. 商业研究, 2017, 59(2): 151—159.
XU Guang-shu, SONG Zi-long. Coordinating Contract between Fresh Agricultural Products E-business Enterprise and Logistics Service Provider: an Analysis Based on Fresh Agricultural[J]. Commercial Research, 2017, 59(2): 151—159.
- [3] HSU C I, CHEN W T, WU W J. Optimal Delivery Cycles for Joint Distribution of Multi-temperature Food[J]. Food Control, 2013, 34(1): 106—114.
- [4] 曹武军, 陈志斐, 杨雯水. 不同保鲜模式对生鲜农产品供应链系统利润的影响分析[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(3): 107—115.
CAO Wu-jun, CHEN Zhi-fei, YANG Wen-shui. Analysis of the Impact of Different Preservation Modes on the Profits of Fresh Agricultural Products Supply Chain System[J]. Storage and Process, 2018, 18(3): 107—115.
- [5] 辛岩, 胥义, 刘道平, 等. 冷链运输及相关技术在生鲜农产品城市宅配中的应用及发展[J]. 制冷技术, 2016, 36(3): 49—52.
XIN Yan, XU Yi, LIU Dao-ping, et al. Application and Developments of Cold Chain and Related Technologies in Fresh Agricultural Products for Home Delivery[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2016, 36(3): 49—52.
- [6] 刘浩. 生鲜农产品冷链物流的现状与发展对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(3): 184—186.
LIU Hao. The Present Situation and Development of Fresh Agricultural Products Cold Chain Logistics[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(3): 184—186.
- [7] 陈照峰, 张俊雄, 王伟伟, 等. 真空绝热板技术的研

- 究现状及发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 1—16.
- CHEN Zhao-feng, ZAHNG Jun-xiong, WANG Wei-wei, et al. Review of Vacuum Insulation Panel Technology and Its Development[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 1—16.
- [8] CHEN Z, CHEN Z, YANG Z, et al. Preparation and Characterization of Vacuum Insulation Panels with Super-stratified Glass Fiber Core Material[J]. Energy, 2015, 93: 945—954.
- [9] ZHENG Q R, ZHU Z W, CHEN J, et al. Preparation of Carbon Based Getter for Glass Fiber Core Vacuum Insulation Panels (VIPs) Used on Marine Reefer Containers[J]. Vacuum, 2017, 146: 111—119.
- [10] 蔡宋宋, 韩澄, 廖甜甜, 等. 生鲜电商冷链物流包装技术研究[J]. 北方园艺, 2015(19): 122—125.
- CAI Song-song, HAN Cheng, LIAO Tian-tian, et al. Study on Cold Chain Logistics Packaging of Fresh E-business[J]. Northern Horticulture, 2015(19): 122—125.
- [11] 潘欣艺, 王家俊, 王冬梅. 蓄冷剂摆放位置对保温箱中温度场的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 77—82.
- PAN Xin-yi, WANG Jia-jun, WANG Dong-mei. Influences of Systems Placement on the Temperature Field of Incubator[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 77—82.
- [12] 范文教, 孙俊秀, 陈云川, 等. 茶多酚对鲢鱼微冻冷藏保鲜的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 42.
- FAN Wen-jiao, SUN Jun-xiu, CHEN Yun-chuan, et al. Effects of Tea Polyphenols on Freshness-keeping of Partial-frozen Silver Carp in Cold Storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 42.
- [13] 谢晶, 蓝蔚青. 水产品流通过程中保鲜技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2017, 17(7): 1—8.
- XIE Jing, LAN Wei-qing. Research Progress of Aquatic Products Preservation Technology during Circulation[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(7): 1—8.
- [14] CELADA J D, GONZÁLEZ J, CARRAL J M, et al. Storage and Transport of Embryonated Eggs of the Signal Crayfish *Pacifastacus leniusculus*[J]. North American Journal of Aquaculture, 2000, 62(4): 308—310.
- [15] 余永涛, 潘嘹, 卢立新. 不同结构尺寸对EPP保温箱保温性能的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(9): 114—118.
- YU Yong-tao, PAN Liao, LU Li-xin. Effect of the Structure Size of EPP Boxes on Insulation Performance[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(9): 114—118.
- [16] 郭永刚. 冷板冷藏车内温度场及其对蔬菜品质影响的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2014.
- GUO Yong-gang. Research on Temperature Field Distribution of Cold Plate Refrigerated Truck and Effects on Preservation of Vegetables[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014.
- [17] 陈焕新, 朱先锋, 刘国丰. 冷板内共晶溶液冻结过程数值模拟[J]. 低温工程, 2005(2): 51—56.
- CHEN Huan-xin, ZHU Xian-feng, LIU Guo-feng. Numerical Simulation of Eutectic Solution During Freezing Period in the Holdover Plate[J]. Cryogenics, 2005(2): 51—56.
- [18] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 液氮充注式果蔬气调保鲜运输箱能耗模型建立与验证[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 299—308.
- YANG Song-xia, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Establishment and Verification of Energy Consumption Model of Fruits and Vegetables Fresh-keeping Transportation Container with Controlled Atmosphere by Liquid Nitrogen Injection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 299—308.
- [19] 朱向秋. 果蔬呼吸热计算常数的推导和应用[J]. 河北果树, 1996(3): 32—33.
- ZHU Xiang-qiu. Derivation and Application of Calculation Constant for Respiration Heat of Fruits and Vegetables[J]. Hebei Fruits, 1996(3): 32—33.
- [20] 严灿, 刘升, 贾丽娥, 等. 不同贮藏温度对草莓呼吸强度及品质的影响[J]. 制冷学报, 2015(5): 37—42.
- YAN Can, LIU Sheng, JIA Li-e, et al. Effect of Different Storage Temperature on Respiration Rate and Quality of Strawberry[J]. Journal of Refrigeration, 2015(5): 37—42.
- [21] 张亚楠. 低碳约束下的物流配送车辆路径问题及智能算法研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2016.
- ZHANG Ya-nan. Research on the Vehicle Routing Problem and Intelligent Algorithm of Logistics Distribution under Low Carbon Constraints[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016.