

基于有限元仿真的防冻包装保温性能分析

许合强, 郝发义, 徐邦联, 胡丹, 张自聪

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 考虑到寒冷地区不同的低温气候以及不同温敏产品在 0~8 °C 的保温时长需求, 对防冻保温包装箱箱体以及内部蓄冷剂的工程设计参数进行选择分析, 以完善防冻包装方案。**方法** 首先对防冻保温箱进行有限元建模, 分析在低温环境下其瞬态温度变化以及有效保温时长, 再结合实际的试验去验证其建模的可信度。利用有限元模型模拟低温环境下保温箱保温性能, 先将保温箱箱体基本参数固定, 研究蓄冷剂的相变温度和相变潜热对保温性能的影响, 再将蓄冷剂的基本参数固定, 研究箱体的厚度和导热系数对保温性能的影响。分别拟合出保温箱保温时长的温控图, 讨论在不同保温时长要求下保温箱蓄冷剂以及箱体的参数选择。**结果** 通过仿真和试验的对比, 防冻保温箱模型平均偏差为 4.6%, 符合工程要求; 由仿真数据得出, 在满足外界低温环境和保温时长条件下, 得到所需蓄冷剂和保温箱箱体的工程设计参数合理。**结论** 在各种外界低温环境和冷链物流保温时长要求下, 科学合理地选用蓄冷剂和保温箱箱体的工程设计参数可提高保温箱的控温效率, 这可以为冷链物流运输中防冻包装的优化设计奠定基础。

关键词: 冷链物流; 防冻保温箱; 导热系数; 蓄冷剂; 相变潜热

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)01-0234-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.026

Analysis of Thermal Insulation Performance of Antifreeze Packaging Based on Finite Element Simulation

XU He-Qiang, HAO Fa-yi, XU Bang-Lian, HU Dan, ZHANG Zi-Cong

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to select and analyze the engineering design parameters of the antifreeze insulation packaging box and its internal refrigerant to improve the antifreeze packaging scheme in view of the different low temperature climates in cold regions and the requirements for insulation time of different temperature-sensitive products at 0~8 °C. Firstly, the finite element modeling of antifreeze insulation box was carried out to analyze the transient temperature change and effective insulation time in low temperature environment. Then, combined with the actual test, the model credibility was validated. The finite element model was used to simulate the thermal insulation performance of box in low temperature environment. The basic parameters of the insulation box were fixed and the effect of phase change temperature and latent heat of the refrigerant on thermal insulation performance was studied. Then, the basic parameters of the refrigerant were fixed, and the effect of the thickness and thermal conductivity of the box on thermal insulation performance was studied. The temperature control diagram for the insulation time of box was fitted respectively, and the para-

收稿日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (62005165)

作者简介: 许合强 (1996—), 男, 硕士生, 主攻物流包装技术。

通信作者: 郝发义 (1978—), 男, 博士, 讲师, 硕导, 主要研究方向为包装印刷、食品包装。

meter selection of the refrigerant and the box for different insulation time was discussed. Through the comparison between simulation and test, the average deviation of antifreeze insulation box model was 4.6%, meeting the engineering requirements. According to the simulation data, the engineering design parameters of refrigerant and insulation box were reasonable and could meet the requirements of low temperature environment and insulation time. On the premise of meeting external low temperature environment and insulation time requirements of cold chain logistics, scientific and reasonable selection of engineering design parameters of refrigerant and insulation box can improve the temperature control efficiency of the insulation box, which can lay a foundation for the optimal design of antifreeze packaging in cold chain logistics transportation.

KEY WORDS: cold chain logistics; antifreeze insulation box; thermal conductivity; refrigerant; phase change latent heat

近年来,物流行业对冷链保温保鲜的要求规范逐渐完善,对温敏商品物流需求量迅速上升^[1]。目前,冷链物流长途运输时使用的是冷藏车以及新开通的冷链铁路,使用制冷系统来维持内部温度场的稳定,很好地解决了运输途中的温控问题,可是在运输“最后一公里”时,还是会出现“断链”的问题,而蓄冷保温箱是通过自身良好的隔热性能和蓄冷剂相结合^[2-4],将温敏产品放入含有蓄冷剂(相变材料)的保温箱中,利用蓄冷剂的相变吸热或放热来维持温敏产品所需的保温温度^[5],很好地解决了“最后一公里”冷链中断的问题。

国内外对冷链领域的研究主要关注的是外界高温环境对产品品质的影响,确保产品处于冷藏或冷冻状态更长时间。比如,张莉伟等^[6]研究在不同外界温度和导热系数下保温箱的最佳壁厚。方文康等^[7]将保温箱分为多温区的形式,从蓄冷剂摆放位置、箱体材料、外界环境温度 3 个角度去研究其对保温箱保温性能的影响。江海林等^[8]研究在不同温敏产品冷链物流条件下,对保温箱内蓄冷剂参数进行选择分析。罗大伟等^[9]利用有限元软件建立保温箱和蓄冷剂三维耦合模型,研究不同外界环境下蓄冷剂的最佳预冷温度。余永涛等^[10]研究了 EPP 保温箱在各种长宽比结构下的保温特性,以及 EPP 保温箱内蓄冷剂的相变过程和融化时间。潘欣艺等^[11-12]研究了在不同外界温度环境下,改变保温箱保温材料以及蓄冷剂的摆放位置对保温箱保温性能的影响。Singh 等^[13]明确了温敏产品应当处于合理温度区间内进行贮存与运输,同时研究了各种保温材料及其箱体包装形式对保温箱保温性能影响,并解释了蓄冷剂放吸热原理。Paquette 等^[14]验证了模拟多层箱传热的三维模型,得出对保温箱保温性能影响最大是导热系数及内表面的反射率。

在实际冷链物流中,寒冷季节的低温环境对产品产生的冻害或冻结问题同样不容忽视。对高纬度、高海拔地区的冬季环境来说,温度可以下降到 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至更低,最冷月份日均气温低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温天数通常在 145 d 以上。在冷链运输中,特殊产品需要维持在特定的温度范围,比如,大多数疫苗如白喉、

破伤风和乙型肝炎疫苗,要求保持在 $2\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$,即从生产工厂到患者注射,整个过程都必须保持低温冷藏。如果疫苗遭遇外界环境低温而导致冻结,抗原溶液中的活性成分暴露于冰点以下 1 h 内就会失去效力,这意味着对这类疫苗的防冻保护同样重要^[15-16]。此外,极端低温还导致新鲜水果和蔬菜出现冻害,失去食用价值;某些采用玻璃瓶包装的化妆品因为低温而出现碎瓶;葡萄酒低温环境下冻结后失去原有的风味;水性涂料、黏合剂、电池等因为低温冻结而导致性能下降。针对这类产品在低温环境下运输的需要进行防冻包装,而有关防冻包装的研究目前鲜有报道。

基于此,文中采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics,模拟在不同低温环境下,蓄冷剂相变潜热和相变温度,保温箱的导热系数和厚度等 4 种不同工程设计参数对保温箱保温性能的影响,得出在不同的低温环境下保温箱以及蓄冷剂最优工程设计参数范围,为后续的严寒地区防冻保温箱的设计和应用提供一定的理论支持。

1 有限元模型构建

1.1 防冻保温箱三维模型

由于本课题研究目的是为了解决寒冷地区冷链运输的问题,故经过调研,选用市面上现在在外卖使用频率最高的保温箱,主要适用于城市范围内运输,但若结合普通货车也可以实现中远距离的运输。防冻保温箱主要由两部分组成,分别是保温箱箱体和相变蓄冷剂,前者主要负责降低箱内和环境的冷热交换以及保护内装物,后者通过相变去吸热或放热去维持箱体内温度平衡,其物理模型见图 1。防冻保温箱采用发泡聚丙烯 EPP (Expanded Polypropylene),其密度为 45 kg/m^3 ,导热系数为 $0.041\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。保温箱外部尺寸为 $490\text{ mm}\times 380\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,内部尺寸为 $430\text{ mm}\times 320\text{ mm}\times 330\text{ mm}$,其四周壁厚为 30 mm ,上下底壁厚为 35 mm ,内部容积为 43 L 。根据保温箱内部容积大小,选择尺寸为 $300\text{ mm}\times 180\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的蓄冷剂,采用六面摆放的方式。

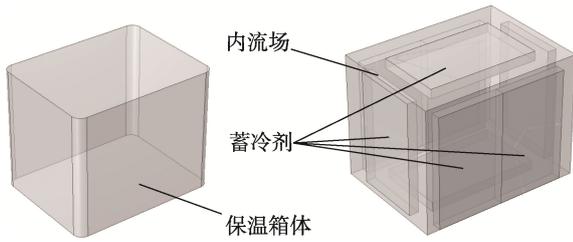


图1 防冻保温箱物理模型
Fig.1 Physical model of antifreeze insulation box

1.2 模型网格划分

使用 COMSOL Multiphysics 自带网格划分, 将需要划分网格的区域分为 3 个部分, 从外到内分别为保温箱箱体、相变蓄冷剂以及内部空气, 根据其区域计算要求合理划分不同密度的网格, 去均衡计算机资源从而提高运算速度。保温箱箱体采用较细化四面体网格, 相变蓄冷剂相对规整, 使用扫略网格并进行加密处理, 网格质量较高, 同时也可以减少网格的数量, 在大大提高运算速率的同时也可以提高相变过程中的仿真精度。对内部空气域进行角细化以及相变蓄冷剂接触的面加上边界层网格, 进一步提高其仿真精度, 遵循相邻区域之间的网格大小差不超过 1.2 mm。分割好的网格数量是 630 688, 并进行网格无关性检验, 网格数量符合计算要求, 计算效率高, 分割好的网格质量是 0.700 4, 网格质量符合要求, 保温箱各部分网格分割见图 2。

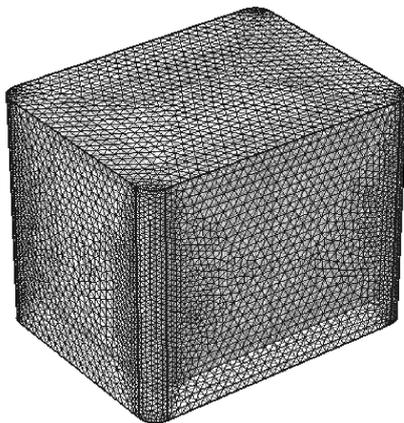


图2 保温箱网格
Fig.2 Mesh generation of insulation box

1.3 材料参数及边界条件设置

在仿真过程中对防冻保温箱模型做如下理想假设: 保温箱完全密闭; 箱内空气环境和保温材料的所有参数不随环境温度改变; 不考虑内外辐射传热影响; 箱体内部空气是不可压缩流体, 其密度系数满足 Boussinesq 假设; 保温箱内的空气在箱体内部壁上的流

动符合无滑移边界条件; 设置保温箱外部边界条件为对流换热, 外界低温环境为 -25 °C, 对流换热系数为 12 W/(m²·K); 保温箱体、蓄冷剂以及内部空气材料参数见表 1。

在自然对流中, 瑞利数 Rayleigh 可以去判断由重力引起的流动强度, 当瑞利数小于 10⁸ 时, 重力驱动的对流为层流; 当瑞利数的范围为 10⁸<Ra<10¹⁰ 时, 重力驱动的对流由层流向湍流转变; 当瑞利数超过 10¹⁰ 时, 重力驱动的对流为湍流^[17]。

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{\nu}{\alpha} \cdot \frac{g \beta L^3 \Delta T}{\nu^2} = 9.6 \times 10^7 < 10^8 \quad (1)$$

式中: Ra 为瑞利数; Pr 为普朗特数; Gr 为格拉晓夫数; ν 为流体的运动黏度; α 为流体的热扩散率; g 为重力加速度; β 为流体热膨胀系数; ΔT 为流体上下面温差值; L 为特征长度。

由式 (1) 可知, 防冻保温箱流体内部空气为层流模型, 在 COMSOL Multiphysics 中选择层流接口进行仿真。

表 1 空气、蓄冷剂及保温材料参数
Tab.1 Parameters of air, refrigerant and insulation material

材料	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
空气	0.021	1.39	1 002
蓄冷剂	0.681	715	2 900
EPP 保温箱体	0.041	45	1 500

1.4 数学模型

任何流体流动和传热都遵循质量、动量和能量三大守恒定律, 其控制方程包括连续方程、动量方程和能量方程。

1.4.1 质量守恒方程

质量守恒方程可以表示为控制体 Ω 内质量的增加等于流入控制体 Ω 的质量, 见式 (2)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \rho d\Omega = - \iint_s dm - \iiint_{\Omega} \nabla \cdot \rho v d\Omega \quad (2)$$

微分表达式为见式 (3)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; m 为质量; v 为速度矢量。

1.4.2 动量守恒方程

动量守恒方程可以表示为流入控制体的动量加上控制体表面的冲量再加上控制体体积力的冲量等于控制体内动量的增加, 见式 (4)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \rho v d\Omega = - \iiint_{\Omega} \nabla \cdot (\rho v v + \rho F + p) d\Omega \quad (4)$$

微分表达式为见式 (5)

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = \rho F + \nabla \cdot p \quad (5)$$

式中: F 为体积力源项; p 为压力。

1.4.3 能量守恒方程

能量守恒方程可以表示为流入控制体内的能量加上控制体表面力的做功加上体积力做功再加上流入控制体内的热量等于控制体内能量的变化, 见式 (6)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} E dv = \iiint_{\Omega} \rho F \cdot v - \nabla \cdot [(E + p)v] dv + \nabla \cdot (\tau \cdot v) + \nabla \cdot (k \nabla T) dv \quad (6)$$

微分表达式见式 (7)。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(E + p)v] = \rho F \cdot v + \nabla \cdot (\tau \cdot v) + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (7)$$

式中: E 为内能; τ 为应力张量; T 为温度; k 为热力系数。

2 试验

2.1 试验材料与仪器

试验所用材料为购自武汉某保温箱公司的 EPP 保温箱, 其容积为 43 L。所选蓄冷剂适宜的保温区域为 0~8 °C, 其相变温度为 5 °C 左右。试验仪器设备的规格及制造商见表 2。

表 2 试验仪器设备的型号及厂家
Tab.2 Model and manufacturer of test equipment

仪器、设备	型号	厂家
多功能导热系数测量仪	DRE-III	湘潭湘冠仪器科技有限公司
MT-X 多路温度记录仪	MT-16	深圳市华轩科技有限公司
恒温恒湿试验箱	MLD-225B	密朗德仪器科技(江苏)有限公司
海尔可控温冰柜	BC/BD-307HEM	海尔集团公司

2.2 验证试验

验证试验的目的是为了证明防冻模型的可靠性, 实物模型见图 3。测量此保温箱控温 0~8 °C 内的保温隔热效果。具体试验步骤: 将 MT-X 多路温度测试仪温度下限设置为 0 °C, 上限设置为 8 °C, 记录时间间隔为 1 min, 总共记录 24 h, 将温度记录仪探头用胶带固定在内部 7 个测温点上, 测温点分布见图 4。

首先将保温箱和蓄冷剂放入设置为 8 °C 的恒温恒湿箱中进行 6 h 的预热处理, 随后按六面摆放的方式固定蓄冷剂并进行密封, 将密封好的保温箱整体再次放入提前设置好 -25 °C 的恒温恒湿箱中, 进行 24 h 的温度检测并导出数据, 为进一步提高试验结果的计算精确度, 重复地完成 3 次同样内容的试验, 最后取出平均值并与仿真结果进行对比, 得出偏差从而验证所建立仿真模型的可靠性。



图 3 防冻模型

Fig.3 Antifreeze insulation model

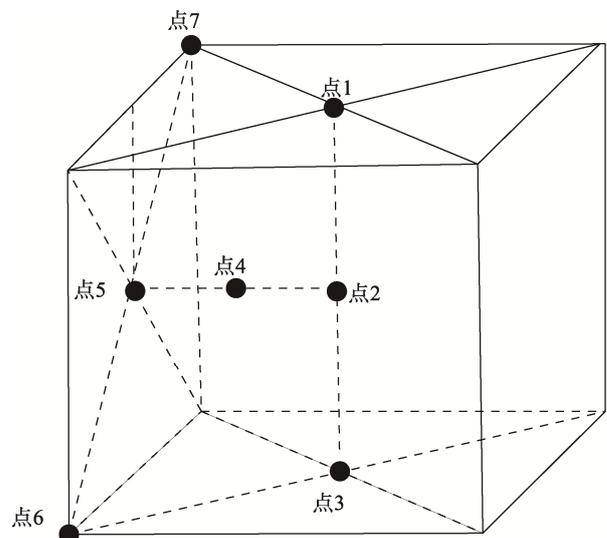


图 4 温度检测点分布

Fig.4 Distribution of temperature detection points

3 结果与分析

3.1 仿真与验证试验对比

为了更有代表性地预测保温箱内温度场的变化, 选取正中心点点 2 和偏心点点 4 的温度变化曲线作为对比。从图 5 中验证曲线可以看出蓄冷剂放热分为 3 个阶段^[18]: 0 min 时蓄冷剂自身工作温度高于其相变

温度,此时蓄冷剂开始逐步降温,到 100 min 左右时,蓄冷剂降温至其相变点,同时箱体里面温度趋于稳定,此时蓄冷剂状态为液态;100~1 000 min 时,随着内外的冷热交换,蓄冷剂自身温度已经达到其相变温度,正处于相的转变阶段,伴有相变潜热的释放,使内部空气温度逐步稳定保持在相变温度左右,蓄冷剂由液态慢慢转为固态,此时蓄冷剂为固液混合态;1 000 min 以后,蓄冷剂的相变潜热已经基本释放结束,蓄冷剂开始释放显热,此时内部环境温度急剧下降,蓄冷剂变为固态,意味着此防冻保温箱失去温控效果。仿真曲线和试验数据虽然有所偏差,但总体趋势基本相同。

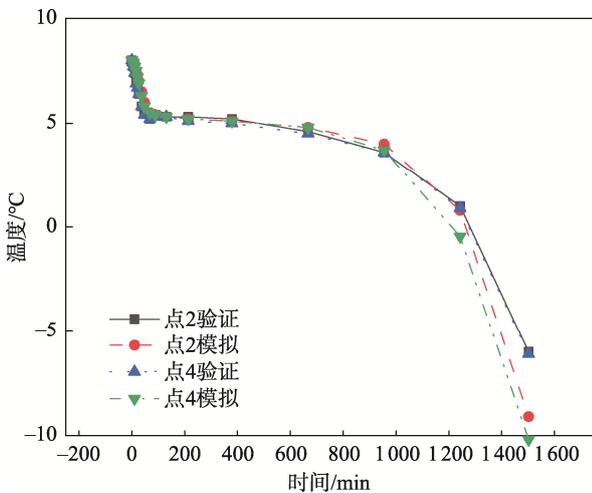


图5 点2和点4验证与仿真温度变化
Fig.5 Change of verified and simulated temperature at point 2 and point 4

由于文中研究在低温环境下各影响因素对保温箱内部防冻保温性能的影响,所以测试试验不只考虑各个点的瞬时温度,保温持续时间的测试还尤为重要。图6为各测试点保温时长的仿真与验证的比较及偏差,能够得出点1的保温时长最长,点6保温时长最短,点4稍稍优于点6,这是由于冷空气会因为重力向下,而下顶角未被蓄冷剂覆盖,防冻保温时长最短,同时点4在整个防冻保温箱中心偏左的位置,温度场分布较均匀,因此选择点4保温效果作为整个保温箱的参考点。所有偏差中,点2处的偏差最小,为0.5%,点3处的偏差最大,为8.2%,整体防冻保温箱保温持续时间平均值偏差为4.6%,在工程问题中,其偏差通常不会超过10%,即模型较可靠。

同时通过数据发现,防冻保温箱内各点的仿真瞬时温度变化较试验要均匀延后20 min左右,因为仿真做了理想假设,忽略了箱体内外的辐射传热以及箱体的气密性等问题,仿真中热交换较少导致延后,但不影响总体趋势。故该防冻保温箱模型可以较准确地反映实际寒冷地区运输中保温箱的保温情况,为后续进行的仿真奠定基础。

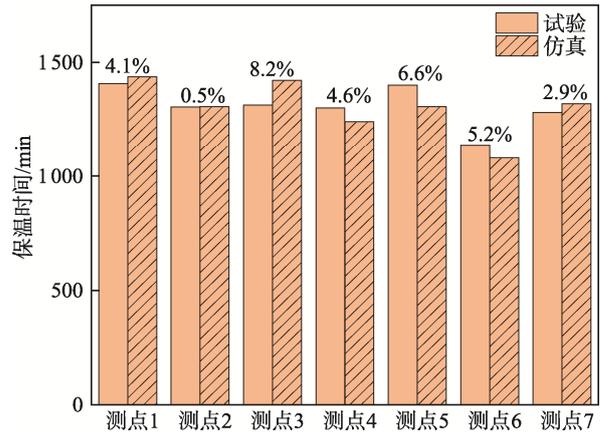


图6 仿真与实际试验保温时长对比
Fig.6 Comparison of insulation time between simulation and actual test

3.2 低温环境下各工程设计参数选择分析

根据我国物流行业技术规范(WB/T 1097—2018)^[19],在0~8 °C温度区间不同温敏商品冷链物流配送所需的保温持续时间是有所不同的,现模拟各种外界低温温度、保温材料、材料厚度以及不同蓄冷剂的保温情况,以分析在不同外界低温环境下达到保温持续时间所需材料厚度、导热系数、相变温度和相变潜热的关系。

对外界温度的选择参照我国气象局制定的寒冷程度等级表,气温从-40 °C以下至9.9 °C,由低到高共分为8级。其中一级为“极寒”,代表-40 °C以下的天气,由于在我国只有内蒙古和黑龙江等地区在一些少数情况下会达到极寒水平,故文中选择的低温范围是从二级的“酷寒”到六级的“轻寒”,其中每个温度等级对应范围为:二级为“酷寒”,-39.9 °C至-30 °C;三级为“严寒”,-29.9 °C至-20 °C;四级为“大寒”,-19.9 °C至-10 °C;五级为“小寒”,六级为“轻寒”,-9.9 °C至0 °C。文中选择4个不同寒冷等级温度范围的中间值,即-5、-15、-25、-35 °C。

图7—14为不同影响因素对保温箱保温性能的影响。当保温时长要求不高时,可以选用高相变温度和低相变潜热的蓄冷剂以及低厚度和相对比较高导热系数的保温材料,也可以考虑选用高厚度和低导热系数的保温材料,不使用蓄冷剂;当保温要求较高时,可以选用低相变温度和高相变潜热的蓄冷剂以及高厚度和低导热系数的保温材料。从变化的整体趋势来看,相变温度和导热系数与保温时长成反比,相变潜热和厚度与保温时长成正比。相变温度在2~6 °C变化时对保温时长影响较大,高于6 °C对保温时长影响较小。厚度在大于45 mm之后,对保温时长影响逐步降低。

在实际寒冷地区应用中,可以根据防冻保温需求确定保温箱箱体和蓄冷剂参数的合理范围,为冷链物流运输中防冻包装的优化设计奠定基础。

3.2.1 不同外界低温环境对蓄冷剂的选择分析

选择外界温度为-5、-15、-25、-35 °C, 防冻保温箱材料为 EPP, 导热系数为 0.041 W/(m·K), 箱体厚度为 30 mm, 上下盖底厚为 35 mm, 在此条件下选择合适蓄冷剂相变潜热和相变温度范围。

外界温度为-5 °C, 得到保温时长见图 7, 选择分析见表 3。

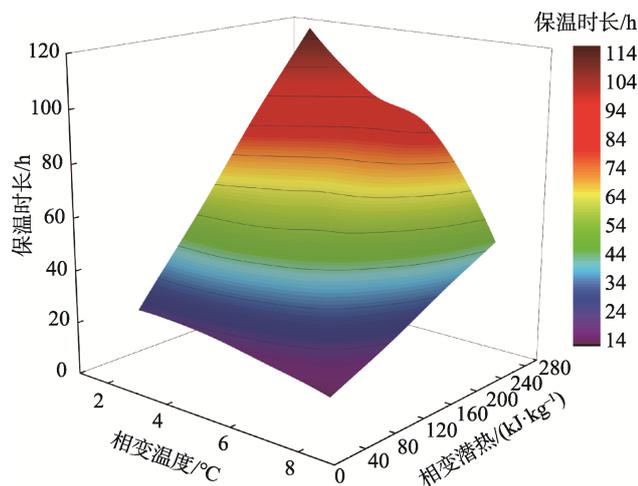


图 7 外界温度-5 °C时蓄冷剂参数对保温时长的影响
Fig.7 Effect of refrigerant parameter on insulation time at -5 °C

表 3 外界温度-5 °C时蓄冷剂参数选择
Tab.3 Parameter selection of refrigerant at -5 °C

保温时长/h	相变温度/°C	相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)
24 ~ 48	2	40 ~ 102
	4	43 ~ 109
	6	57 ~ 141
48 ~ 72	2	102 ~ 162
	4	109 ~ 206

外界温度为-5 °C, 保温时长要求在 24 ~ 48 h 时, 建议选择的蓄冷剂相变温度为 2 ~ 6 °C, 相变潜热为 40 ~ 141 kJ/kg。保温时长要求在 48 ~ 72 h 时, 建议选择的蓄冷剂相变温度为 2 ~ 4 °C, 相变潜热为 102 ~ 206 kJ/kg。

外界温度为-15 °C, 得到保温时长见图 8, 选择分析见表 4。

外界温度为-15 °C, 保温时长要求在 12 ~ 24 h 时, 建议选择的蓄冷剂相变温度为 2 ~ 6 °C, 相变潜热为 54 ~ 154 kJ/kg。保温时长要求在 24 ~ 48 h 时, 建议选择的蓄冷剂相变温度为 2 °C, 相变潜热为 120 ~ 280 kJ/kg。

外界温度为-25 °C, 得到保温时长见图 9, 选择分析见表 5。

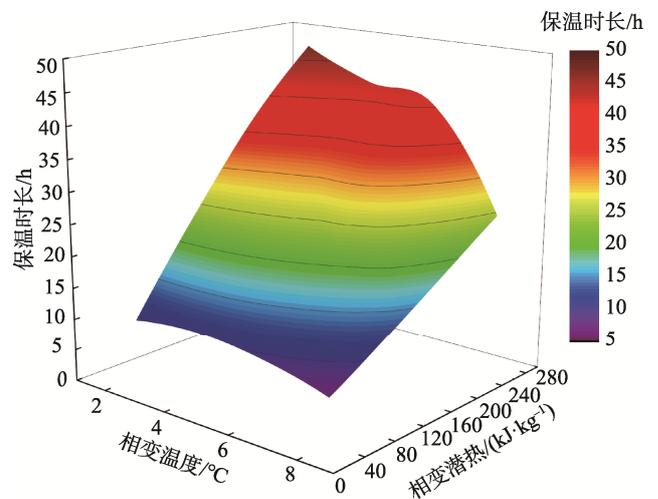


图 8 外界温度-15 °C时蓄冷剂参数对保温时长的影响
Fig.8 Effect of refrigerant parameter on insulation time at -15 °C

表 4 外界温度-15 °C时蓄冷剂参数选择
Tab.4 Parameter selection of refrigerant at -15 °C

保温时长/h	相变温度/°C	相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)
12 ~ 24	2	54 ~ 120
	4	56 ~ 132
	6	61 ~ 154
	8	120 ~ 280
24 ~ 48	2	120 ~ 280

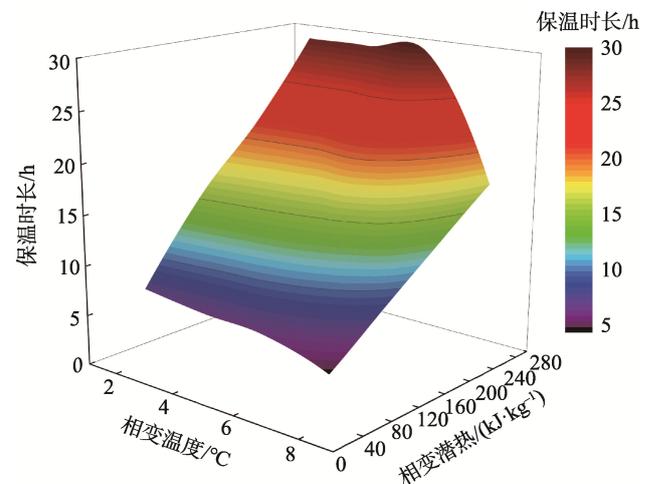


图 9 外界温度-25 °C时蓄冷剂参数对保温时长的影响
Fig.9 Effect of refrigerant parameter on insulation time at -25 °C

表5 外界温度-25℃时蓄冷剂参数选择
Tab.5 Parameter selection of refrigerant at -25℃

保温时长/h	相变温度/℃	相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)
5~10	2	40~70
	4	40~74
	6	40~83
	8	46~142
10~20	2	70~187
	4	74~188
	6	83~199
20~30	2	187~280
	4	188~280
	6	199~280

外界温度为-25℃,保温时长要求在5~10h时,建议选择的蓄冷剂相变温度为2~6℃,相变潜热为40~83kJ/kg;保温时长要求在10~20h时,建议选择的蓄冷剂相变温度为2~4℃,相变潜热为70~188kJ/kg;保温时长要求在20~30h时,建议选择的蓄冷剂相变温度为2~4℃,相变潜热为187~280kJ/kg。

外界温度为-35℃,得到保温时长见图10,选择分析见表6。

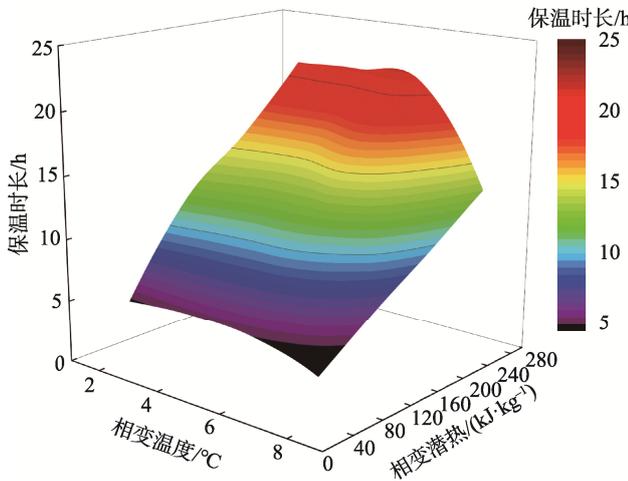


图10 外界温度-35℃时蓄冷剂参数对保温时长的影响

Fig.10 Effect of refrigerant parameter on insulation time at -35℃

外界温度为-35℃,保温时长要求在5~10h时,建议选择的蓄冷剂相变温度为2~6℃,相变潜热为40~120kJ/kg;保温时长要求在10~20h时,建议选择的蓄冷剂相变温度为2~6℃,相变潜热为98~280kJ/kg。

3.2.2 不同外界低温环境对保温箱体的选择分析

选择外界温度为-5、-15、-25、-35℃,选择相

变温度为5℃的防冻蓄冷剂,潜热为182kJ/kg,在此条件下选择合适保温箱厚度以及导热系数范围。

外界温度为-5℃时,得到保温时长见图11,选择分析见表7。

表6 外界温度-35℃时蓄冷剂参数选择
Tab.6 Parameter selection of refrigerant at -35℃

保温时长/h	相变温度/℃	相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)
5~10	2	40~98
	4	40~107
	6	40~120
	8	77~200
10~20	2	98~240
	4	107~280
	6	120~280

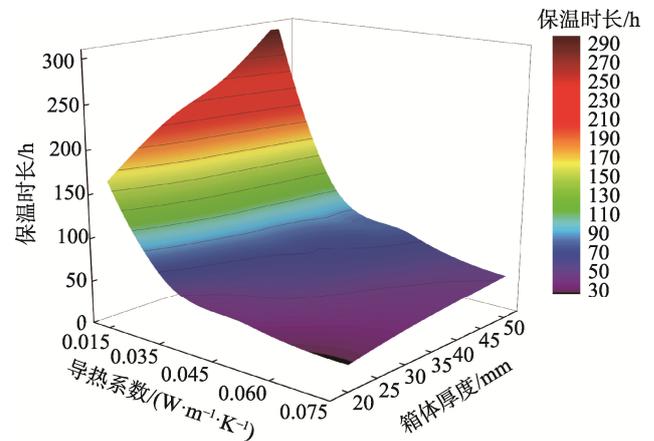


图11 外界温度-5℃时箱体参数对保温时长的影响

Fig.11 Effect of insulation box parameter on insulation time at -5℃

表7 外界温度-5℃时保温箱参数选择
Tab.7 Parameter selection of insulation box at -5℃

保温时长/h	箱体厚度/mm	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
24~48	20	0.041~0.075
	30	0.059~0.075
	35	0.064~0.075
	40	0.071~0.075
	45	0.075
	50	0.075
48~72	20	0.024~0.041
	30	0.039~0.059
	35	0.042~0.065
	40	0.046~0.071
	45	0.049~0.075
	50	0.053~0.075

当外界环境温度为-5 °C时, 保温时长要求在 24 ~ 48 h, 保温箱厚度建议选择 20 mm 左右, 导热系数选择 0.041 ~ 0.075 W/(m·K); 保温时长要求在 48 ~ 72 h 时, 保温箱厚度建议选择 30 mm 左右, 导热系数选择 0.039 ~ 0.059 W/(m·K)。

外界温度为-15 °C时, 得到保温时长见图 12, 选择分析见表 8。

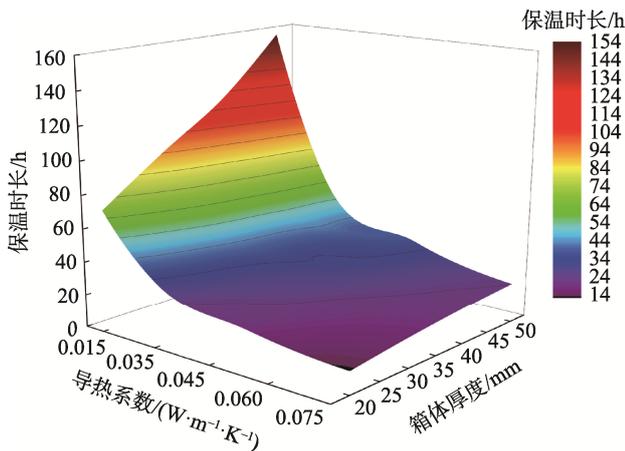


图 12 外界温度-15 °C时箱体参数对保温时长的影响

Fig.12 Effect of insulation box parameter on insulation time at -15 °C

表 8 外界温度-15 °C时保温箱参数选择
Tab.8 Parameter selection of insulation box at -15 °C

保温时长/h	箱体厚度/mm	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
24 ~ 48	20	0.018 ~ 0.041
	30	0.024 ~ 0.050
	35	0.028 ~ 0.059
	40	0.032 ~ 0.068
	45	0.036 ~ 0.071
48 ~ 72	50	0.040 ~ 0.075
	40	0.020 ~ 0.032
	45	0.022 ~ 0.036
	50	0.024 ~ 0.040

当外界温度为-15 °C, 保温时长要求在 24 ~ 48 h 时, 保温箱厚度建议选择 40 mm 左右, 导热系数选择 0.032 ~ 0.068 W/(m·K); 保温时长要求在 48 ~ 72 h 时, 保温箱厚度建议选择 45 mm 左右, 导热系数选择 0.022 ~ 0.036 W/(m·K)。

外界温度为-25 °C, 得到保温时长见图 13, 选择

分析见表 9。

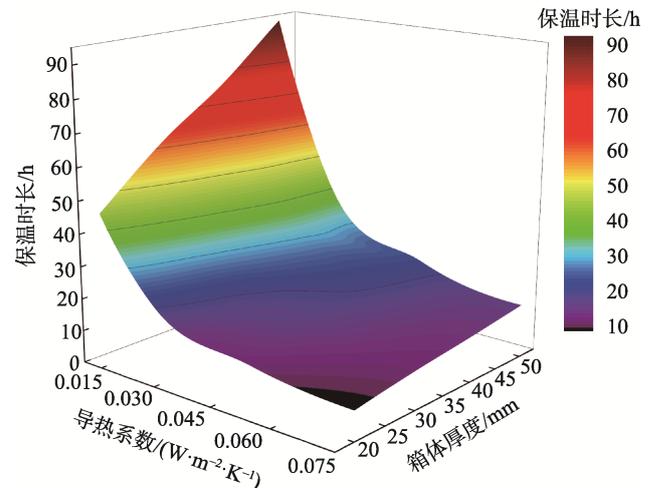


图 13 外界温度-25 °C时箱体参数对保温时长的影响

Fig.13 Effect of insulation box parameter on insulation time at -25 °C

表 9 外界温度-25 °C时保温箱参数选择
Tab.9 Parameter selection of insulation box at -25 °C

保温时长/h	箱体厚度/mm	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
24 ~ 48	30	0.016 ~ 0.034
	35	0.018 ~ 0.039
	40	0.021 ~ 0.044
	45	0.022 ~ 0.046
	50	0.023 ~ 0.048
48 ~ 72	40	0.012 ~ 0.021
	45	0.014 ~ 0.022
	50	0.016 ~ 0.023

当外界温度为-25 °C, 保温时长要求在 24 ~ 48 h 时, 保温箱厚度建议选择 40 mm 左右, 导热系数选择 0.021 ~ 0.044 W/(m·K); 保温时长要求在 48 ~ 72 h 时, 保温箱厚度建议选择 50 mm 左右, 导热系数选择 0.016 ~ 0.023 W/(m·K)。

外界温度为-35 °C时, 得到保温时长见图 14, 选择分析见表 10。

当外界温度为-35 °C, 保温时长要求在 24 ~ 48 h 时, 保温箱厚度建议选择 45 mm 左右, 导热系数选择 0.016 ~ 0.033 W/(m·K); 保温时长要求在 48 ~ 60 h 时, 保温箱厚度建议选择 50 mm 左右, 导热系数选择 0.014 ~ 0.018 W/(m·K)。

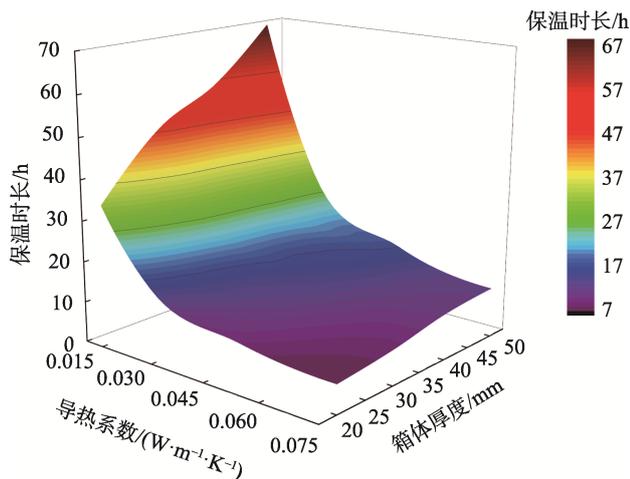


图 14 外界温度-35℃时箱体参数对保温时长的影响

Fig.14 Effect of insulation box parameter on insulation time at -35℃

表 10 外界温度-35℃时保温箱参数选择
Tab.10 Parameter selection of insulation box at -35℃

保温时长/h	箱体厚度/mm	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
	40	0.014 ~ 0.025
24 ~ 48	45	0.016 ~ 0.033
	50	0.018 ~ 0.041
48 ~ 60	50	0.014 ~ 0.018

4 结语

文中利用 COMSOL Multiphysics 建立了防冻保温箱有限元模型,并用试验验证了模型的平均偏差为 4.6%,证明模型可靠。

1) 固定保温箱体的工程设计参数,以蓄冷剂相变温度和相变潜热作为研究对象,给定 4 种不同寒冷等级的低温环境,得到不同的相变温度和相变潜热对保温箱保温性能的影响,给出在满足不同保温时长的要求下,蓄冷剂相变温度和相变潜热的合理选择范围。

2) 固定蓄冷剂的工程设计参数,以保温箱箱体厚度和导热系数作为研究对象,同样给定 4 种不同寒冷等级的低温环境,得到不同的箱体厚度和导热系数对保温箱保温性能的影响,给出在满足不同保温时长要求下,保温箱箱体厚度和导热系数的合理选择范围。

在外界不同寒冷等级的环境下,为冷链物流运输防冻包装的优化设计奠定基础。

参考文献:

[1] 佚名. 2019 年食品冷链企业经营情况分析[J]. 物流技

术与应用, 2020, 25(S1): 58-61.

ANON. Analysis on the Operation of Food Cold Chain Enterprises in 2019[J]. Journal of Logistics Technology and Application, 2020, 25(S1) : 58-61.

[2] 胡非凡, 张婷. 电子商务背景下我国生鲜农产品冷链物流发展研究——以每日优鲜为例[J]. 物流工程与管理, 2019, 41(12): 11-13.

HU Fei-fan, ZHANG Ting. Research on Cold Chain Logistics of Fresh Agriculture Products under the Development of Electronic Commerce: Case Study of Meiriyouxian[J]. Logistics Engineering and Management, 2019, 41(12): 11-13.

[3] 侯法振, 张娜祥, 宋占涛, 等. 相变材料在冷藏车中的应用研究[J]. 节能, 2021 40(7): 78-80.

HOU Fa-zhen, ZHANG Na-xiang, SONG Zhan-tao, et al. Overview of Research on the Application of Phase Change Materials in Refrigerated Vehicles[J]. Energy Conservation, 2021, 40(7): 78-80.

[4] 宁晶. 中国冷藏车市场和产品趋势分析[J]. 公路与汽运, 2021(5): 11-15.

NING Jing. Market and Product Trend Analysis of Refrigerated Trucks in China[J]. Highways & Automotive Applications, 2021(5): 11-15.

[5] 王莉, 陆威, 翟帅楠. 相变蓄冷保温箱的模拟仿真与实验[J]. 建模与仿真, 2021, 10(1): 168-177.

WANG Li, LU Wei, ZHAI Shuai-nan. Numerical Simulation and Experimental Investigation of Storage Box Using Phase Change Materials[J]. Modeling and Simulation, 2021, 10(1): 168-177.

[6] 张莉伟, 付志强, 张蕾, 等. 环境温度和导热系数条件下保温箱壁厚分析[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 97-102.

ZHANG Li-wei, FU Zhi-qiang, ZHANG Lei, et al. Wall Thickness of Incubator at Ambient Temperature and Material Thermal Conductivity[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 97-102.

[7] 方文康, 宋海燕, 吴迪. 基于 Fluent 的多温区保温包装箱温度场仿真分析[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 62-69.

FANG Wen-kang, SONG Hai-yan, WU Di. Temperature Field Simulation of Multi-Temperature Zone Thermal Insulation Box Based on Fluent[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 62-69.

[8] 江海林, 曾台英, 丁逸秋. 基于冷链物流条件下保温箱蓄冷剂的选择分析[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 168-174.

JIANG Hai-lin, ZENG Tai-ying, DING Yi-qiu. Selection and Analysis of Phase Change Material for Incubator

- Based on Cold Chain Logistics Conditions[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 168-174.
- [9] 罗大伟, 宋海燕, 吴迪. EPP 保温箱温度场的数值模拟及试验验证[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(3): 45-50.
LUO Da-wei, SONG Hai-yan, WU Di. Numerical Simulation and Experimental Verification of Temperature Field of EPP Incubator[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(3): 45-50.
- [10] 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.
- [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 Ctesms Placement on the Temperature Field of Incubator[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 77-82.
- [12] 潘欣艺, 王冬梅, 朱宏. 保温材料对保温箱内温度场的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 115-118.
PAN Xin-yi, WANG Dong-mei, ZHU Hong. Study on Temperature Field of Different Materials in Incubator[J]. Food & Machinery, 2018, 34(8): 115-118.
- [13] SINGH S P. Performance Comparison of Thermal Insulated Packaging Boxes, Bags and Refrigerants for Single-Parcel Shipments[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 31(1): 25-35.
- [14] PAQUETTE J, MERCIER S, MARCOS B, et al. Modeling the Thermal Performance of a Multilayer Box for the Transportation of Perishable Food[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 105: 77-85.
- [15] CHEN De-xiang, KRISTENSEN D. Opportunities and Challenges of Developing Thermostable Vaccines[J]. Expert Review of Vaccines, 2009, 8(5): 547-557.
- [16] HANSON C M, GEORGE A M, SAWADOGO A, et al. Is Freezing in the Vaccine Cold Chain an Ongoing Issue? a Literature Review[J]. Vaccine, 2017, 35(17): 2127-2133.
- [17] 李杰瑞. 冷链箱标准化保温系统及保温性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018: 13-22.
LI Jie-rui. Research on Standardization Insulation System and Insulation Performance of Cold Storage Incubator[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018: 13-22.
- [18] KOZAK Y, FARID M, ZISKIND G. Experimental and Comprehensive Theoretical Study of Cold Storage Packages Containing PCM[J]. Applied Thermal Engineering 2017, 115: 899-912.
- [19] WB/T 1097—2018, 药品冷链保温箱通用规范[S].
WB/T 1097—2018, General Specification for Cold Chain Insulated Container of Drug[S].

责任编辑: 曾钰婵