

环境温度和导热系数条件下保温箱壁厚分析

张莉伟, 付志强, 张蕾, 雷鹏, 徐雅, 周传浩
(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 为了优化保温箱壁厚设计, 以保温箱的保温性能为表征, 探究不同环境温度和材料导热系数条件下的最优保温箱壁厚。**方法** 建立有限元模型, 对比实验和有限元结果, 验证有限元模型的准确性; 改变模型中材料的导热系数和外界环境温度, 探究不同壁厚对箱体保温性能的影响。**结果** 在环境温度为 20~50 °C 的条件下, 导热系数为 0.01~0.075 W/(m·K) 的保温箱壁厚从 10 mm 增加到 35 mm 时, 保温性能变化较大; 壁厚从 35 mm 增加到 45 mm 时, 保温性能变化缓慢; 同一温度条件下, 增加相同壁厚, 导热系数越小的保温箱保温性能增加越显著; 同一导热系数的保温箱, 增加相同壁厚, 环境温度越低, 保温性能增加越显著。**结论** 在不同环境温度和材料导热系数下, 保温箱对应的最佳壁厚为 35~40 mm, 为保温箱的优化设计奠定理论基础。

关键词: 导热系数; 环境温度; 保温性能; 壁厚

中图分类号: TB482.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)05-0097-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.05.013

Wall Thickness of Incubator at Ambient Temperature and Material Thermal Conductivity

ZHANG Li-wei, FU Zhi-qiang, ZHANG Lei, LEI Peng, XU Ya, ZHOU Chuan-hao

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The paper aims to optimize the wall thickness design of the incubator, study the optimal wall thickness of the incubator under the conditions of different ambient temperature and material thermal conductivity by characterizing the thermal insulation performance of the incubator. A finite element model was built; the experiments and finite element results were compared; and the reliability of the finite element model was verified by experiments. The thermal conductivity of the material in the model and the ambient temperature conditions were changed to study the influence of wall thickness on insulation performance of incubator. For incubator with a thermal conductivity of 0.01-0.075 W/(m·K) at the ambient temperature of 20-50 °C, the wall thickness increased from 10mm to 35 mm; the thermal insulation performance changed greatly; when the wall thickness increased from 35 mm to 45 mm, and the thermal insulation performance changed slowly. Under the same ambient temperature condition, the increase of wall thickness was the same. The smaller the thermal conductivity was, the more significant the thermal insulation performance was. For incubators of the same thermal conductivity, the increase of wall thickness was the same. The lower the ambient temperature is, the more significant the thermal insulation performance increased. Under different ambient temperatures and thermal conductivity of materials, the optimal wall thickness of the incubator is 35-40 mm. It lays a theoretical foundation for

收稿日期: 2019-09-27

基金项目: 天津科技大学青年创新基金 (2016LG27)

作者简介: 张莉伟 (1992—), 男, 天津科技大学硕士生, 主攻运输包装。

通信作者: 付志强 (1982—), 男, 天津科技大学讲师, 主要研究方向为运输包装数值模拟技术。

the optimal design of the incubator.

KEY WORDS: thermal conductivity; ambient temperature; thermal insulation performance; wall thickness

随着生鲜市场的不断发展,消费者对产品品质的要求越来越高,为了满足消费者和市场需求,冷链物流的发展也不断增加^[1]。当前,应用于冷链物流的主要是冷藏车、冷藏集装箱、保温箱等^[2],冷藏车和冷藏集装箱主要依靠制冷系统来维持内部温度场的稳定,这种制冷方式不仅经济成本高,且还具有一定的局限性。此外,体积小、携带方便的保温箱越来越受到人们的青睐,这种冷链方式有助于解决“最后一公里”冷链中断的问题^[3-4],促进冷链完整。蓄冷式保温箱大多采用导热系数较低的保温材料,然后在箱体内部放置相变蓄冷剂,通过相变过程吸收外界流入的热量维持低温状态,进而保证产品品质。

由于保温箱对小批量产品的冷链运输具有得天独厚的优势,因此国内外都加大了对蓄冷式保温箱的研究,主要包括保温材料研究、保温箱的结构设计和优化、蓄冷剂摆放位置以及运输方式优化等方面^[5-11]。徐笑锋等^[12]设计了2种多温区蓄冷式保温箱,选取2种蓄冷和保温材料,结合真空绝热保温技术,使3个温区的保温时间均能达到14 h以上。朱文娴等^[13]建立了保温箱模型,验证模型结果的准确性后,通过模拟结果发现蓄冷板对保温效果有较大作用,且该食品冷藏保温箱保温性能满足设计要求。朱宏等^[14]用实验模拟了3种外界环境条件下,保温箱保温性能的影响规律,实验表明内外温差越大,保温箱的温度场分布越差,保温性能越差。Matsunaga等^[15]运用2种数学方法分别计算了处于周期性环境中2种不同种类的蓄冷剂使用量,实验验证了该使用量能够满足周期环境的要求,表明这2种数学计算方法具有可行性。上述虽针对保温箱做了大量研究,但目前对于不同导热系数保温材料对应的最佳保温箱壁厚鲜有报道。文中拟建立保温箱有限元模型并通过实验加以验证模型准确性,进而研究不同外界温度、保温材料导热系数条件下不同箱体壁厚保温性能的规律,从而为保温箱的优化奠定基础。

1 保温箱有限元模型

1.1 物理模型

以自制的 XPS 保温箱为研究对象,该物理模型见图1,箱体外尺寸为395 mm×289 mm×333 mm(长×宽×高),内尺寸为335 mm×229 mm×253 mm(长×宽×高),上下壁厚为40 mm,四周壁厚为30 mm,保温材料的导热系数为0.025 W/(m·K)。在保温箱底内部放置蓄冷剂,相变温度为0℃,相变潜热为333 kJ/kg,蓄冷剂的尺寸为265 mm×120 mm×25 mm

(长×宽×高)。此外,在保温箱内部设置温度监测点,监测点见图2。

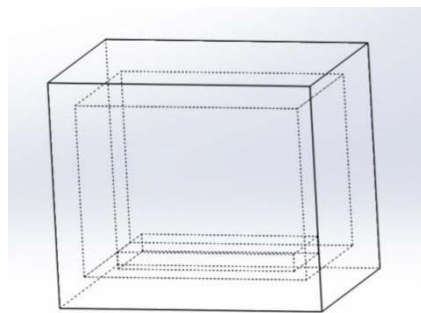


图1 保温箱物理模型

Fig.1 Physical model of incubator

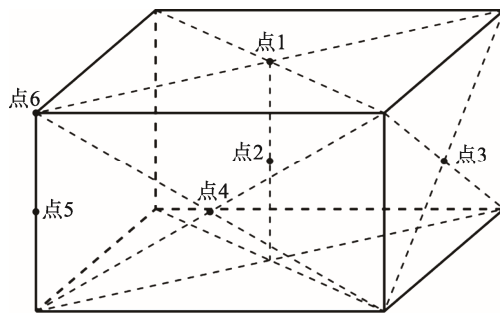


图2 保温箱温度监测点

Fig.2 Temperature monitoring point of incubator

1.2 网格和边界条件

采用有限元前处理软件 ICEM CFD 对保温箱箱体、内部空气和蓄冷剂进行结构化网格划分,箱体、空气和蓄冷剂的网格尺寸分别为5, 2.8, 3 mm,保温箱各部分的网格划分见图3。

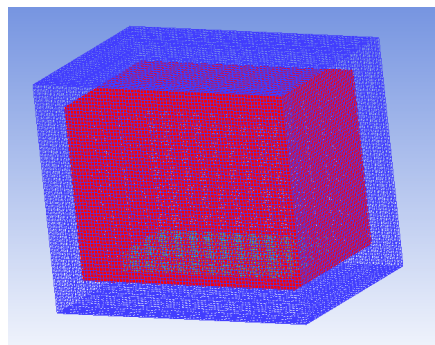


图3 保温箱网格

Fig.3 Grid diagram of incubator

将网格文件导入到 Fluent 中,设置边界条件与实验保持一致,然后进行计算。同时,在进行边界条件设定时还应做出如下简化和假设:默认箱体的各部分

密封性很好，忽略在保温过程中由于漏气产生的影响；空气模型满足 Boussinesq 假设；保温箱内的空气在箱体内壁上的流动满足无滑移边界条件；保温箱内辐射采用 DO 辐射；在保温箱温度变化范围内，认为保温箱及箱体内空气的各项热参数不会发生改变，具体参数见表 1。

表 1 保温箱模型各部分材料参数
Tab.1 Material parameter of each part of the incubator

材料	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)
XPS	0.025	34	1500
蓄冷剂	0.6	900	2100
空气	0.024	1.161	1006

1.3 数学模型

1.3.1 流体模型

保温箱在使用过程中，内部的空气受蓄冷剂影响，密度会发生变化，同时空气由于密度变化产生质量差从而导致保温箱内部空气流动。在纯粹的自然对流问题中，流动强弱和流体模型划分的依据可以使用瑞利数 Ra 来判断，若 $Ra < 10^8$ ，自然对流属于层流；若 $10^8 < Ra < 10^{10}$ ，则处于层流和湍流间的过渡状态；若 $Ra > 10^8$ ，则自然对流属于湍流。根据瑞利数公式判断该保温箱内空气的流动模型，见式 (1)。

$$Ra = P_r \times G_r = \frac{g\beta\Delta T L^3}{\nu\alpha} = 1.34 \times 10^7 < 10^8 \quad (1)$$

式中： G_r 为格拉晓夫数； P_r 为普朗特数； g 为重力加速度 (m/s²)； L 为特征长度 (m)； β 为空气的体积膨胀系数，通常情况下为热力学温度的倒数； ΔT 为温度差 (°C)； ν 为空气的运动粘度 (m²/s)； α 为空气的热扩散系数 (m²/s)。根据式 (1) 的计算结果，该保温箱中的自然对流为层流，因此模拟方法采用 Fluent 中的层流模型。

1.3.2 传热模型

热传导是一个物体的不同部位或者相互接触的 2 种物体间由于存在温度差引起的温度相互交换，热传导遵循傅里叶定律，见式 (2)。

$$q_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

式中： q_x 为 x 方向上单位面积的传热速率 (W/m²)； T_1 为温度较低物体的表面温度 (K)； T_2 为温度较高物体的表面温度 (K)； k 为热导率 (W/(m·K))； L 为材料厚度 (m)。

热对流是当物体与周围的介质存在温度梯度时，两者之间就会发生热交换。无论过程的具体特性如何，对流传热的能量传输速率方程均为式 (3)。

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

式中： q'' 为对流热流密度 (W/m²)； T_s 为表面温度 (K)； T_∞ 为流体温度 (K)； h 为对流换热系数 (W/(m·K))。

1.3.3 相变模型

物质有固、液和气 3 种状态，从一种状态转化为另一种状态的过程称之为相变，此过程中需要的能量为潜在热量，材料的潜在热量定义到材料的焓中为：

$$H = \int \rho c(T) dT$$

式中： H 为焓值 (J/kg)； ρ 为密度 (kg/m³)； $c(T)$ 为随温度变化的比热容 (J/(kg·K))。

2 实验

2.1 材料和设备

主要材料：XPS 保温箱（箱体的结构尺寸与有限元模型保持一致）；蓄冷剂（易获取的冰作为相变材料）。

主要仪器：温度记录仪 (SH-48)，深圳市深华轩科技有限公司；温度传感器探头 (K 型热电偶探头)，深圳市深华轩科技有限公司；恒温恒湿箱 (ETH-408-40-CP-AR)，巨孚仪器 (北京) 有限公司；海尔电冰箱 (BCD-245KA)。

2.2 方法

将温度传感器的探头置于冰水混合物中进行矫正，误差控制在 ±0.5 °C 以内；按图 2 所示将矫正好的温度记录仪探头在保温箱内部进行分布，用来记录保温箱内温度场实时变化情况，然后将保温箱置于 27 °C 的恒温恒湿箱中进行温度预处理；当传感器显示箱内温度为 27 °C 时，将提前在冰箱中冷冻好的冰块放置于保温箱底层中心位置；立即将保温箱密封好，迅速再次放置于 27 °C 的恒温恒湿箱中，实验装置见图 4。

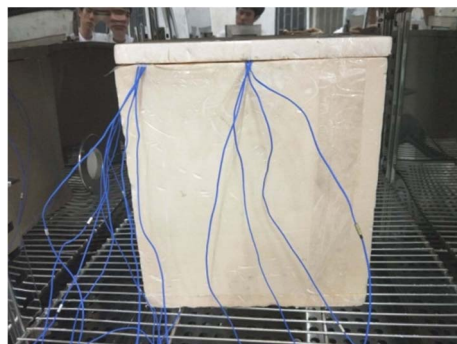


图 4 保温箱实验装置

Fig.4 Experimental device diagram of incubator

3 结果与讨论

3.1 有限元模型的实验验证

保温箱保温过程与箱内蓄冷剂相变释冷的过程密不可分,此研究采用冰作为蓄冷剂,其相变过程是由固态到液态,蓄冷剂在保温箱中经历了2个阶段。

1) 第1阶段。蓄冷剂相变过程,冰从固态变为液态,此阶段蓄冷剂的温度一直维持在相变温度(0°C),且不断从保温箱内吸收热量,从而使保温箱基本维持在一个稳定的温度值保持不变。

2) 第2阶段。蓄冷剂相变结束,温度上升。

从以下两方面检验有限元模型的准确性。

1) 点1、点2、点4的模拟仿真和实验数据对比见图5,可以明显看出,仿真和实验的温度变化趋势基本一致,存在温度平衡和温度上升2个阶段。此外,实验和仿真的最大温度差为 0.8 K ,在工程允许的误差范围内。研究过程中温度开始上升则认定保温失效,如图5所示,之后不计入保温时间。

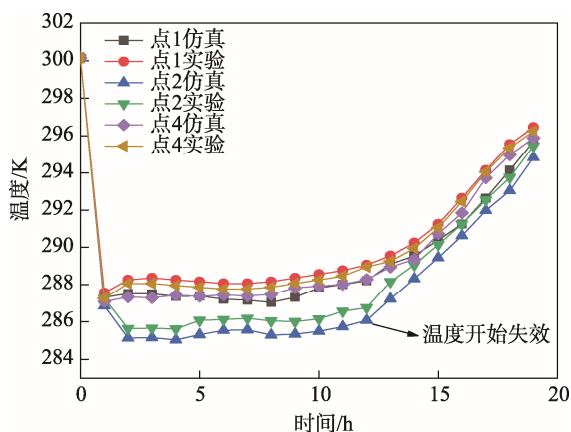


图5 仿真与实验的温度-时间结果对比

Fig.5 Comparison of temperature-time results of simulation and experiment

2) 如图5所示,越靠近蓄冷剂的地方温度相对较低,由此可推断保温箱内存在温度梯度,温度场从下到上温度依次升高,这与采用DO辐射模型的温度场云图(见图6)相吻合。在文献[10]中,保温箱有限元模型采用的P1辐射具有一定局限性,其有限元模型中未加入相变过程,短时间内仿真结果与实验较为符合;在模型加入蓄冷剂,发生相变过程,此时继续采用P1辐射模型,当温度到达平衡阶段时,箱内各部分温度基本一致,见图6b,这与实验研究过程中保温箱处于温度平衡阶段时箱内存在的温度梯度不符。与之相比,DO辐射模型更符合实验结果。对比保温箱温度-时间曲线和温度场梯度,此有限元模型具有可靠性。

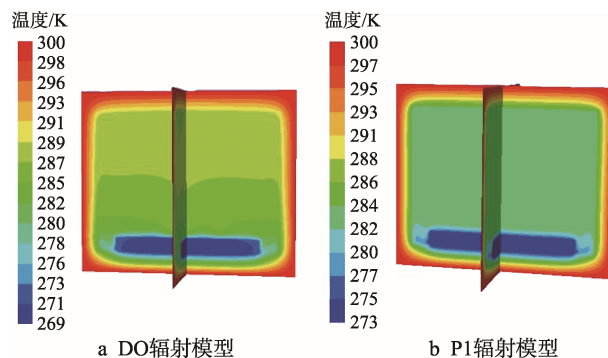


图6 仿真的温度场云图

Fig.6 Temperature field cloud map of simulation

3.2 不同外界温度和导热系数条件下的壁厚分析

应用上述有限元模型,改变材料的导热系数、壁厚和环境温度进行研究,保温箱采用的是低导热系数保温材料,且导热系数范围基本在 $0.01\sim 0.075\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间,因此研究选取材料的导热系数为 $0.01, 0.025, 0.05, 0.075\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;保温箱壁厚根据常见壁厚选取 $10, 20, 30, 35, 40, 45\text{ mm}$;根据保温箱的流通环境选取 $20, 30, 40, 50^{\circ}\text{C}$ 的环境温度进行研究,在改变上述参数的过程中保证保温箱内容积和蓄冷剂质量不变,以保温箱顶点温度为实验数据进行分析(实验和仿真过程中保温箱内温度最先升高的点)。

3.2.1 不同外界温度、同一导热系数条件下的壁厚分析

不同导热系数保温箱的保温时间见图7。由图7a可以明显看出,在外界温度由 20°C 升高到 50°C 的过程中,导热系数为 $0.01\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的保温箱对应的保温箱曲线大致分为2个阶段,当壁厚从 10 mm 增加到 35 mm 时,保温时间分别增加了 $22.4, 13.9, 9.7, 8.5\text{ h}$,其保温性能发生了显著改变;当壁厚从 35 mm 增加到 45 mm 时,保温时间分别增加了 $2, 1.7, 1.2, 0.7\text{ h}$,保温箱的保温性能变化则相对平缓,变化范围大幅度减小。由以上数据可得,在温度为 $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 条件下,导热系数为 $0.01\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的保温箱最佳壁厚为 $35\sim 40\text{ mm}$;当壁厚增加相同厚度时,环境温度越低,保温性能增加的越显著。由图7b—d可知,导热系数为 $0.025, 0.05, 0.075\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的保温箱存在相同的规律。

3.2.2 同一外界温度、不同导热系数条件下的壁厚分析

保温箱在不同环境温度条件下的保温时间见图8。在外界温度为 20°C 的条件下,当导热系数为 $0.01, 0.025, 0.05, 0.075\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的保温箱壁厚从 10 mm 增加到 35 mm 时,保温时间分别增加了 $22.4, 9.8, 6.4, 4.7\text{ h}$,保温性能发生了显著变化;当壁厚从 35 mm 增加到 45 mm 时,保温时间分别增加了 $2, 1.2, 0.8, 0.2\text{ h}$,保温性能变化相对平缓,变化范围大幅度减小。由以上数据可得,在环境温度为 20°C 的条件下,

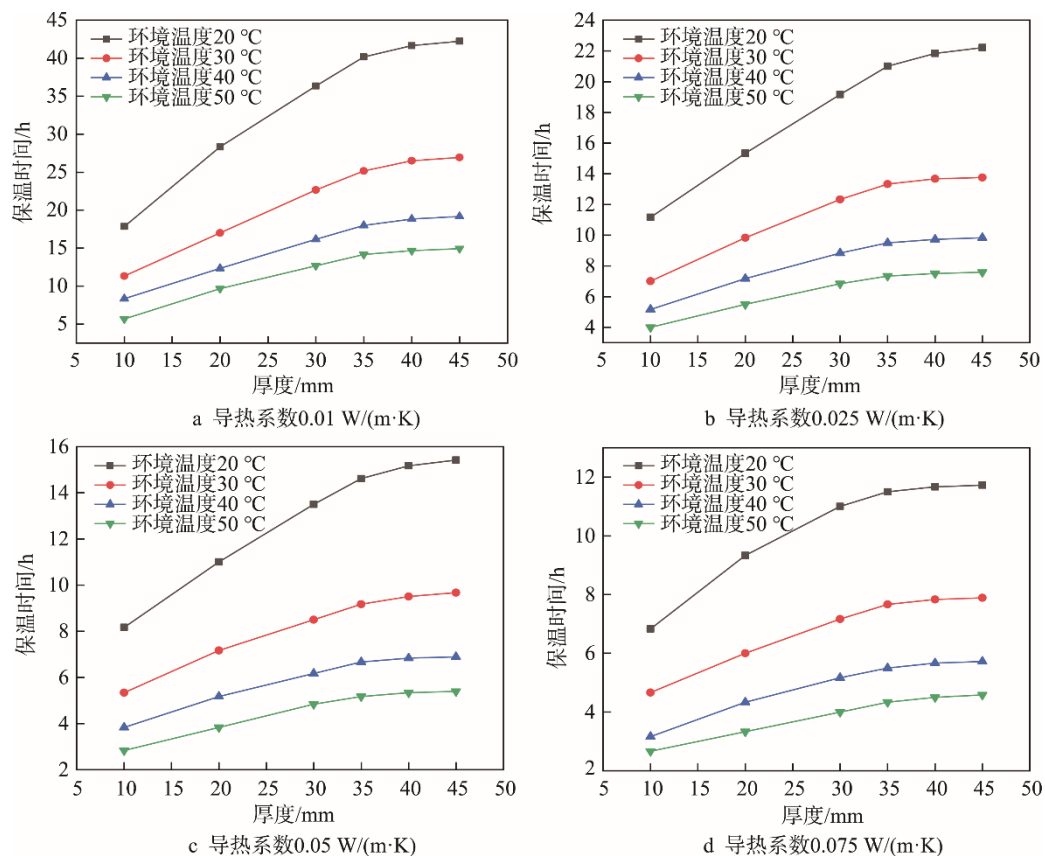


图 7 不同导热系数保温箱的保温时间

Fig.7 Insulation time of different thermal conductivity incubators

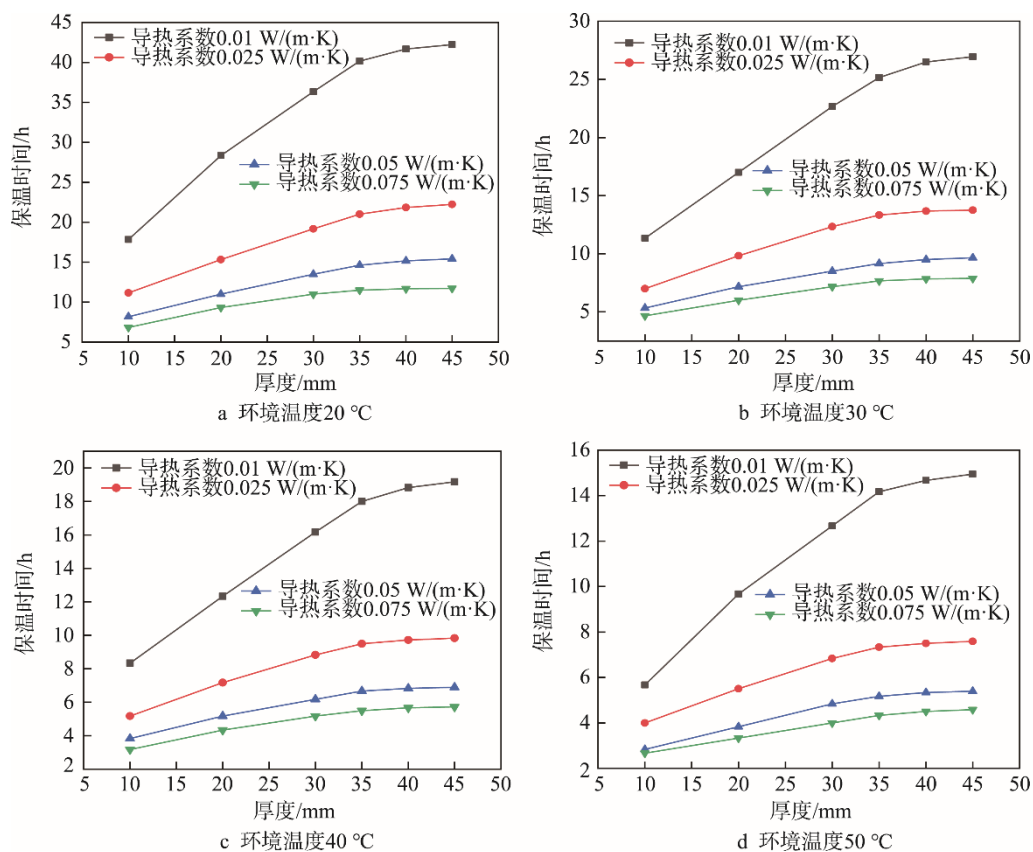


图 8 保温箱在不同环境温度条件下的保温时间

Fig.8 Insulation time of incubator under different ambient temperature conditions

导热系数为 0.01, 0.025, 0.05, 0.075 W/(m·K) 的保温箱最佳壁厚为 35~40 mm。此外, 在相同外界条件下, 保温箱壁厚增加量相同时, 材料导热系数越小, 保温性能增加的越显著。由图 8b—d 可知, 在环境温度为 30, 40, 50 °C 条件下的保温箱存在相同规律。

4 结 语

文中通过建立保温箱有限元模型, 验证了模型的可靠性。然后改变了保温箱材料的壁厚和导热系数, 并将其置于不同的外界环境温度中, 以保温箱内监测点的平衡温度和保温时间来评价保温效果, 得到以下结论。

1) 通过研究实验和仿真的温度-时间曲线、温度场温度梯度对比图, 发现实验和仿真结果基本一致, 表明此模型具有一定的可靠性, 为保温箱数值模拟提供了理论基础。

2) 在不同外界温度和导热系数条件下, 增加保温箱壁厚可以有效地降低箱内平衡温度并延长保温时间, 且壁厚在 35~40 mm 后变化趋势趋于平缓。

参考文献:

- [1] 艾瑞咨询系列研究报告. 中国生鲜电商行业消费洞察报告 2018 年[R]. 上海: 上海艾瑞市场咨询有限公司, 2018: 3—4.
Ai Rui Consulting Series Research Report. China Fresh Electronic Commerce Industry Consumer Insight Report 2018[R]. Shanghai: Shanghai Ai Rui Market Consulting Company, 2018: 3—4.
- [2] 陈镜羽, 黄辉. 我国生鲜农产品电子商务冷链物流现状与发展研究[J]. 科技管理研究, 2015(6): 179—183.
CHEN Jing-yu, HUANG Hui. Study on the Status Quo and Development of E-commerce Cold Chain Logistics of Fresh Agricultural Products in China[J]. Science and Technology Management Research, 2015(6): 179—183.
- [3] 贺廉云. 冷藏车制冷方式分析与研究[J]. 时代农机, 2017(1): 79—80.
HE Lian-yun. Analysis and Research on Refrigeration Mode of Refrigerated Cars[J]. Times Agricultural Machinery, 2017(1): 79—80.
- [4] 赵鑫鑫. 冷藏车多温区分布优化及温度精准调控[D]. 济南: 山东大学, 2014: 1—10.
ZHAO Xin-xin. Optimization of Multi-temperature Zone Distribution and Precise Temperature Regulation of Refrigerated Trucks[D]. Jinan: Shandong University, 2014: 1—10.
- [5] 王达, 吕平, 贾连文, 等. 不同隔热材料对桃子蓄冷保温运输效果及品质影响的研究[J]. 食品科技, 2018, 48(2): 58—63.
WANG Da, LYU Ping, JIA Lian-wen, et al. Study on the Effect of Different Insulation Materials on the Storage and Quality of Peach Cold Storage and Heat Preservation[J]. Food Science and Technology, 2018, 48(2): 58—63.
- [6] 张秋玉, 臧润清, 刘升, 等. 可装卸式蓄冷保温箱冷链运输效果[J]. 制冷学报, 2017(6): 108—113.
ZHANG Qiu-yu, ZANG Run-qing, LIU Sheng, et al. Cold Chain Transportation Effect of Removable Cool Storage Insulation Box[J]. Journal of Refrigeration, 2017(6): 108—113.
- [7] 宋海燕, 成新新. 聚苯乙烯保温箱保温性能及速冻鲜食玉米保温包装效能特性研究[J]. 现代食品科技, 2016(3): 225—231.
SONG Hai-yan, CHENG Xin-xin. Study on Thermal Insulation Performance of Polystyrene Insulation Box and Performance Characteristics of Quick-frozen Fresh Corn Insulation Packaging[J]. Modern Food Science & Technology, 2016(3): 225—231.
- [8] 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): 121—124.
PAN Xin-yi, WANG Dong-mei, ZHU Hong. Effect of Thermal Insulation Material on Temperature Field in Incubator[J]. Food and Machinery, 2018, 34(8): 121—124.
- [9] 张鑫鑫, 陆新宇, 陈建忠, 等. 冷链可折叠保温箱设计及试验研究[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(4): 32—35.
ZHANG Xin-xin, LU Xin-yu, CHEN Jian-zhong, et al. Design and Experimental Study of Cold Chain Foldable Insulation Box[J]. Packaging & Food Machinery, 2016, 34(4): 32—35.
- [10] 赵慧妍, 付志强, 王岩, 等. 基于 Fluent 的 XPS 保温箱温度场数值模拟方法分析[J]. 包装工程, 2018, 39(19): 115—119.
ZHAO Hui-yan, FU Zhi-qiang, WANG Yan, et al. Analysis of Temperature Field Numerical Simulation Method of XPS Incubator Based on Fluent[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(19): 115—119.
- [11] WU W, VERBOVEN P, NICOLAI B, et al. Virtual Cold Chain Method to Model the Postharvest Temperature History and Quality Evolution of Fresh Fruit-A Case Study for Citrus Fruit Packed in a Single Carton[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 199—208.
- [12] 徐笑锋, 章学来, 周孙希, 等. 蓄冷式多温区保温箱系统设计与实验研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 92—98.
XU Xiao-feng, ZHANG Xue-lai, ZHOU Sun-xi, et al. Design and Experimental Study of the Cold Storage Multi-temperature Zone Incubator System[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 92—98.
- [13] 朱文娟, 柯元裕, 卢立新, 等. 食品冷藏保温箱温度场模拟与实验验证[J]. 包装工程, 2018, 39(23): 69—74.
ZHU Wen-xian, KE Yuan-yu, LU Li-xin, et al. Simulation and Experimental Verification of Temperature Field of Food Refrigerated Incubator[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23): 69—74.
- [14] 朱宏, 王冬梅, 潘欣艺. 不同外界环境温度下保温箱保温性能研究[J]. 包装与食品机械, 2018(4): 9—12.
ZHU Hong, WANG Dong-mei, PAN Xin-yi. Study on Thermal Insulation Performance of Insulation Box under Different External Environment Temperatures[J]. Packaging & Food Machinery, 2018(4): 9—12.
- [15] MATSUNAGA K, BURGESS G, LOCKHART H. Two Methods for Calculating the Amount of Refrigerant Required for Cyclic Temperature Testing of Insulated Packages[J]. Packaging Technology & Science, 2010, 20(2): 113—123.