

食品流通与包装

基于 Fluent 的多温区保温包装箱温度场仿真分析

方文康¹, 宋海燕^{1,2}, 吴迪³(1.天津科技大学, 天津 300222; 2.中国轻工业食品包装材料与技术重点实验室, 天津 300222;
3.浙江大学 农业与生物技术学院, 杭州 310058)

摘要:目的 探究多温区保温包装箱在不同条件下保温箱内部温度场及保温效果的影响。方法 以冷藏区(0~8℃)、冷冻区(0℃以下)双温区 EPP 保温箱为研究对象, 采用 Ansys Fluent 工具建立等比模型, 通过实测实验保温时间来验证模型的可靠性。选取蓄冷剂摆放位置、箱体材料、外界环境温度等 3 个因素, 分别进行仿真计算分析其对保温箱内部温度的影响。结果 通过仿真模拟得出蓄冷剂侧面摆放时内部空气温度场最为均匀, 保温效果最好, 保温时间相较于最差的边缘摆放冷藏区提高了 41.37%, 冷冻区提高了 51.59%; 3 种箱体材料中 EPU 材料的保温箱保温效果最好, 保温时间相较于 EPP 材料, 冷藏区提高了 36.84%, 冷冻区提高了 41.24%; 随着外界温度由 23℃升高到 40℃, 箱体保温效果冷藏区降低了 59.73%, 冷冻区降低了 55.04%。结论 通过计算机仿真方法可对多温区保温箱温度场进行数值模拟, 其结果可为多温区箱体实现多温共配提供一定的理论依据。

关键词: 保温包装; 仿真; 多温区; 温度场

中图分类号: TB482.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)03-0062-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.010

Temperature Field Simulation of Multi-Temperature Zone Thermal
Insulation Box Based on FluentFANG Wen-kang¹, SONG Hai-yan^{1,2}, WU Di³

(1.Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2.Key Laboratory of Food Packaging Materials and Technology of China Light Industry, Tianjin 300222, China;

3.College of Agriculture & Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the influence of temperature field and effect of thermal insulation in multi-temperature field insulation box under different conditions. The EPP incubator with the refrigerated area (0-8℃) and frozen area (below 0℃) in the double temperature zone insulation box was taken as the research object, and a geometric model was established by ANSYS FLUENT. The reliability of the model was verified by measuring the experimental holding time. Three factors, including different refrigerant placement, different box materials and different external environment temperature, were selected to carry out simulation calculation and analyze their influences on the internal temperature of the insulation box. Through simulation, it was concluded that the internal air temperature field was the most uniform and the insulation effect was the best when the refrigerant was placed around the sides. The insulation time was

收稿日期: 2019-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0400106); 天津市自然科学基金(17JCTPJC55800)

作者简介: 方文康(1994—), 男, 天津科技大学研究生, 主攻运输包装。

通信作者: 宋海燕(1977—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为物流包装材料、技术与设备; 吴迪(1984—), 男, 浙江大学副教授、博导, 主要研究方向为果蔬品质生物学与贮藏物流。

increased by 41.37% and 51.59% compared with the lowest edge refrigerating area. Among the three kinds of box materials, the insulation box made of EPU material had the best insulation effect, with the insulation time increased by 36.84% and 41.24% compared with the cold storage area of EPP material. With the increase of the external temperature from 23 °C to 40 °C, the insulation effect of the insulation box in the refrigerated area decreased by 59.73%, and that in the frozen area decreased by 55.04%. The numerical simulation of the temperature field of the incubator in the multi-temperature region can be carried out by means of computer simulation. Its result can provide certain theoretical foundation for application of different temperature in the box of multiple temperature zones.

KEY WORDS: thermal insulation packaging; simulation; multiple temperature zones; temperature field

近些年随着生鲜电商的蓬勃发展,人们对于市场上的冷链运输和生鲜产品的需求量也越来越大。生鲜冷链运输配送设备主要有冷藏车、控温箱等^[1]。在面对品种繁多、批量不大的短途需求时,短途冷藏车^[2]往往会处于货不满厢的资源浪费状态,因此蓄冷剂与保温箱^[3-4]的搭配使用在短途运输中较为常见。随着计算机技术的飞速发展,仿真模拟方便了各项实验的开展。在这方面,国内外学者有诸多研究。赵鑫鑫^[5]利用计算机流体仿真软件 Fluent,在车厢处于空载和满仓的 2 种状态情况下,模拟了回风导轨对多温区冷藏车车厢内部温度场分布情况的影响。Singh 等^[6]评价了保温箱体材料、箱体包装形式以及蓄冷剂,确定了温敏产品必须处于合适温度区间内进行保存和运输。Burgess 等^[7]以 2 种数学计算方法研究了外界呈周期性变化的温度下,保温箱内部蓄冷剂含量对其保温效果的影响作用,同时提出了新型的多温区冷链配送理念,得到了业内学者的广泛重视。许多专家和学者^[8-14]运用有限元技术对保温箱内的温度场做了一些研究,取得了一些成果。

在日常冷链运输过程中,在同一区域配送多品种、小批量的产品时,新型的多温区保温箱可以很好地解决不同温需产品的运输问题,大大加强了冷链配送的时效性。文中以 Ansys Fluent 软件为基础,对多温区保温箱箱体内部温度场分布情况进行研究,结合蓄冷剂的摆放位置、不同箱体材料、不同外界环境等因素,研究对多温区保温箱温度场的影响,从而得到多温区箱体最优的属性参照,为后续多温区保温箱的开发研究提供一定的指导。

1 实验

1.1 研究对象

选用一款市场常见保冷配送 EPP 保温箱,见图 1,箱体外尺寸为 500 mm×350 mm×255 mm,内尺寸为 440 mm×290 mm×195 mm,各处壁厚为 30 mm,材料属性见表 1。

1.2 设备

所需设备:恒温恒湿箱,ETH-408-40-CP-AR,巨孚仪器(北京)有限公司;温度记录仪,SH-48,深圳市深华轩科技有限公司;美的冰箱,BC-45M(E),合肥美的电冰箱有限公司。

1.3 方法

将 4 块冷冻室蓄冷剂(相变温度为 -10 °C)放置在 -20 °C 的低温冰箱中预处理 24 h,4 块冷藏室蓄冷剂(相变温度为 0 °C)随保温箱放置于 0 °C 环境下预冷 24 h;将冷藏与冷冻冰盒以侧面摆放的方式迅速放入保温箱内,温度记录仪的探头分别固定在冷藏区和冷冻区的 8 个指定位置,见图 2,迅速封箱放入恒温恒湿箱中;调整恒温恒湿箱内部条件:设置温度为 30 °C,相对湿度为 85%;插入优盘记录数据,每分钟读取一次数据;测温记录设备开始记录数据,冷藏室温度超过 8 °C,冷冻室温度超过 0 °C,则实验结束。

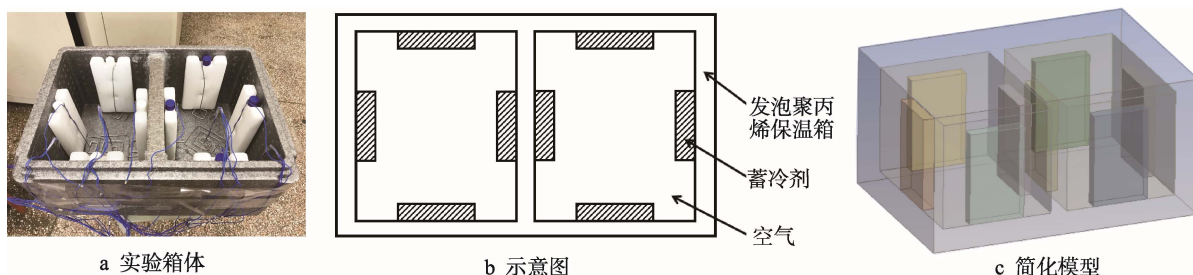


图 1 箱体实体和几何模型
Fig.1 Box body and geometric model

表 1 蓄冷剂属性参数
Tab.1 Attribute parameters of coolant

名称	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	比热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
EPP 箱体	46	0.0341	1680
空气	1.2	0.023	1005
冷藏蓄冷剂	1016	0.6254	4200
冷冻蓄冷剂	1097	0.6085	3800

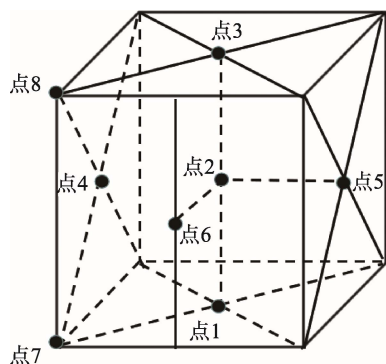


图 2 各温室测温点分布

Fig.2 Distribution of measuring points in each greenhouse

2 仿真模拟与验证

2.1 设置边界条件及初始化

模拟保温情况,保温箱外界温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温箱冷藏室和冷冻室各放置 4 块蓄冷剂进行保温,设置保温箱体外部对流换热壁面条件,对流换热系数为 $10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。保温箱和冷藏室蓄冷剂及内部空气通过预冷处理,因此初始温度设为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷冻室蓄冷剂初始温度设为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。只考虑蓄冷剂正在相变时稳态的温度场,忽略蓄冷剂部分相变导致的温度波动。箱体的气密性很好,内部空气流速较低,设为不可压缩流体,满足 Boussinesq 假设。保温箱保温的整个过

程中,由于温度变化幅度较小,认为箱体及各材料属性参数不发生变化,因此均采用常物性参数值。

2.2 测试实验与仿真验证

仿真温度场分布见图 3,EPP 多温区保温箱起到了很好的隔热作用,箱体与外界空气直接接触形成热传导,并在箱体外部形成隔热层。热量传递至内部与内部空气进行对流换热,由于潜热型蓄冷剂的作用和箱体内部空气的自然对流,保温箱内部各处产生了不同温度差。在外界环境不变,蓄冷剂持续不断向箱体内释放冷量的情况下,使得箱体内大部分范围内的温度形成了稳定环境。在靠近蓄冷剂的附近,温度始终趋于蓄冷剂相变温度,从而保持了箱体内最低的温度;在远离蓄冷剂及靠近箱体内壁的温度场中,由于蓄冷剂释冷有限,且外界空气不断通过热传导将热量传递到内部,使得此处温度相较其他部位明显升高。

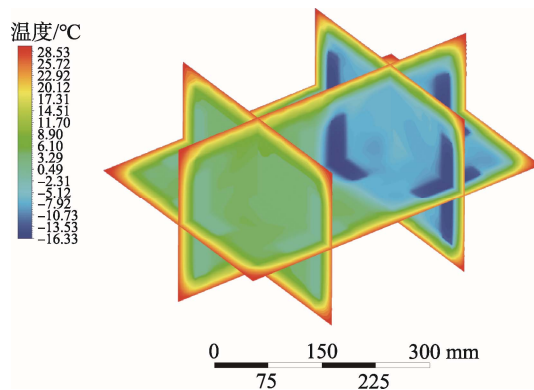


图 3 温度场分布

Fig.3 Temperature field distribution

取 2 个温区的各个测点的保温时间进行对比,见图 4。冷冻室与冷藏室各测点的保温时间较为接近,14 个测点误差均在 10% 以下,最小误差 1.02%;而冷藏室测点 3 和 8,与冷冻室测点 3 和 8,这 4 个位于顶部的测点误差超过 10%,这是由于实验过程中箱盖

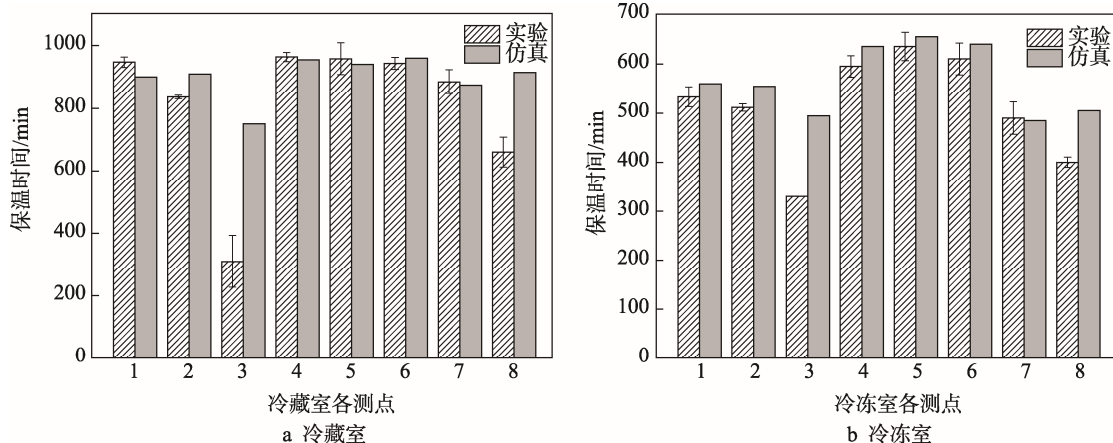


图 4 2 个温区的各个测温点的保温时间对比

Fig.4 Comparison of the holding time of each measuring point in the two temperature zones

与箱体之间存有温度记录仪的数据线,此时的箱盖与箱体之间无法压实,存在缝隙,导致箱体上部的空气会有部分与外界进行了直接热交换,而在仿真建模过程中忽略了箱体的气密性。冷藏室与冷冻室保温时间误差平均值分别为 9.5%和 9.1%,均在 10%以内,处于可接受误差范围。综上所述,该模型可以较为准确地反映多温区保温箱温度场的温度分布及保温时间。

3 结果与讨论

3.1 蓄冷剂摆放位置对箱体内部温度场的影响

蓄冷剂是控温保温箱的重要组成部分之一,各式各样的蓄冷剂为保温箱带来不同的保温温度区间。不同的蓄冷剂摆放位置可以对保温箱内部的温度场带来很大的影响。在多温保温箱箱体空间可充分利用的前提下,选择各温区 4 块蓄冷剂排布使用,蓄冷剂的空间占有率为 13.11%,俯视图见图 5。

选取外界温度为 30 ℃,只改变蓄冷剂摆放位置。初始化箱体、空气、冷藏蓄冷剂温度为 0 ℃,冷冻蓄冷剂温度为 -20 ℃,为直观体现各个摆放位置对多温区保温箱温度场的影响,对边缘摆放、双面摆放、顶底摆放及侧面摆放的模型取 xOy 平面, z=127.5 mm 的截面,对顶底摆放的模型取 yOz 平面, x=132.5, 367.5 mm 的截面,见图 6。考虑保温箱体的空间利用情况,仿真以每 5 min 一步进行计算,得出每种摆放位置的有效保温时间以及蓄冷剂相变阶段的中心点平均温度,见表 2。

从图 6 和表 2 可以看出,4 种摆放位置的保温时间顺序为侧面 (14.25 h/8.08 h) > 顶底 (12.67 h/6.75 h) > 双面 (11.75 h/6.42 h) > 边缘 (10.08 h/5.33 h),侧面摆放的保温时间相较于边缘摆放提高了 41.37%/51.59%,说明边缘摆放方式的保温效果无法对蓄冷剂有效利用。另外,边缘摆放的温度分布极不均匀,该种摆放方式使得箱体其中一角远离蓄冷剂,温度比靠近蓄冷剂的部分温度要高,蓄冷剂的释冷速率远小于内部空气与箱体的热交换速率,因此保温时间最短;而侧面摆放的温度场温度分布最均匀,蓄冷剂释冷稳定,各温室的平均温度与顶底摆放相差不大,小于其他摆放位置,而有效保温时间最长,这

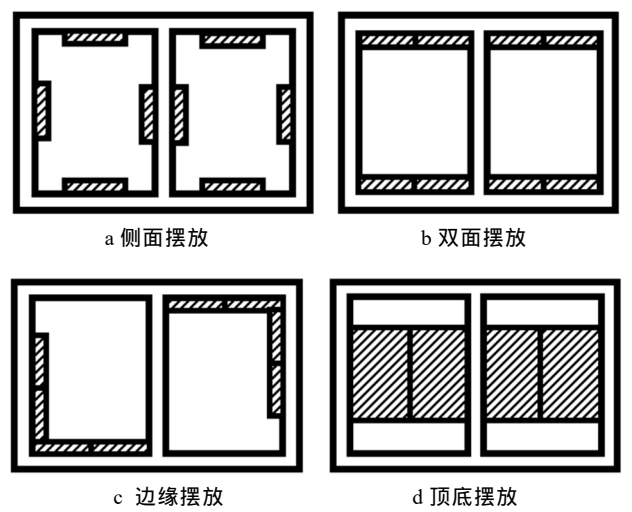


图 5 蓄冷剂摆放位置示意
Fig.5 Schematic diagram of placement of coolant

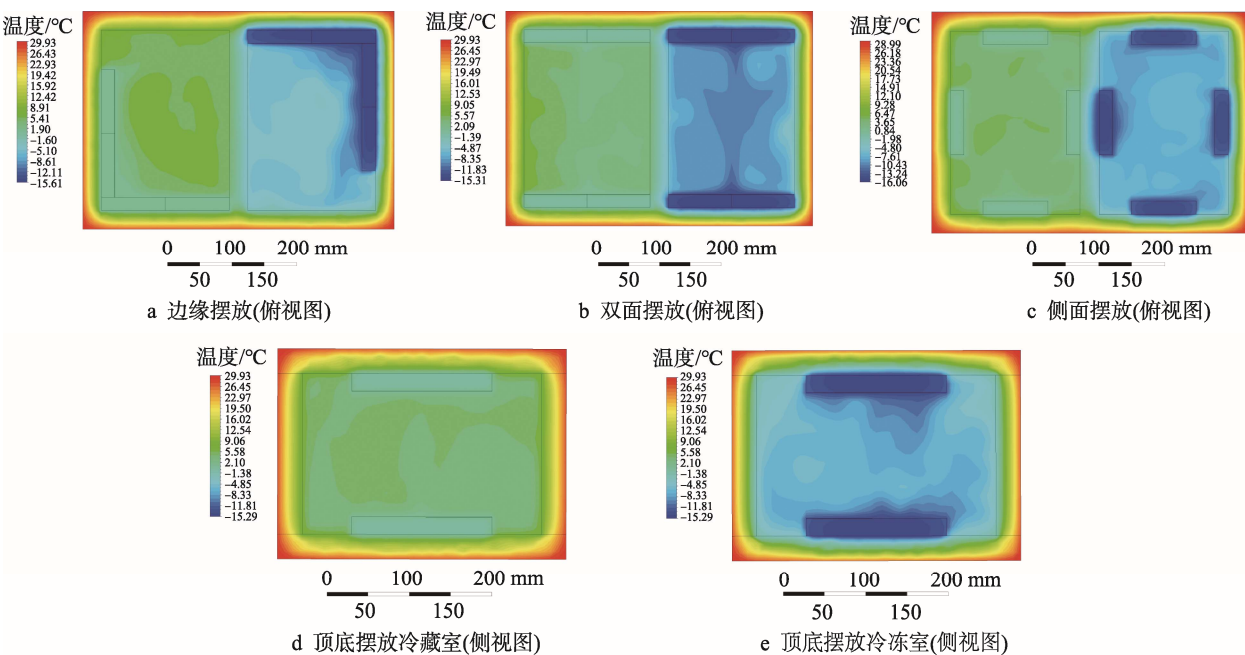


图 6 不同摆放位置的多温区保温箱温度场

Fig.6 Temperature field of multi-temperature zone insulation box at different placement positions

表2 各温室保温时间和中心点平均温度
Tab.2 Average temperature of each greenhouse holding time and central point

温室	摆放位置	中心点平均温度/°C	有效保温时间/min
冷藏室	侧面摆放	4.72	855
	双面摆放	4.83	705
	顶底摆放	4.69	760
	边缘摆放	5.81	605
冷冻室	侧面摆放	-8.75	485
	双面摆放	-7.46	385
	顶底摆放	-8.73	405
	边缘摆放	-6.29	320

是由于箱体四壁都有蓄冷剂贴放,冷量从箱体四壁处散发,使得内部空气维持在恒定温度,箱体内温度场稳定;双面摆放方式保温时间相较侧面来说降低,蓄冷剂释放冷量较为集中在箱体中部,在无蓄冷剂的箱体两端,内部空气箱壁进行直接热传导换热,导致该部分的内部空气温度场波动较大;对于顶底摆放方式的箱体,在箱体的前后两侧温度明显高于其他部位的温度。

3.2 不同箱体材料对箱体保温效果的影响

保温箱的制作材料不同,对保温箱保温效果的影响也不同。对于保温材料来说,导热系数是最重要的

隔热效果指标,选取 EPS, EPP, EPU 等 3 种常见保温箱材料进行研究,其导热系数分别为 0.0360, 0.0341, 0.0240 W/(m·K)。

设置外界温度为 30 °C,蓄冷剂选择侧面摆放的方式,只改变保温箱材料参数。初始化条件:箱体、空气、冷藏蓄冷剂温度为 0 °C,冷冻蓄冷剂温度为 -20 °C,375 min 时的仿真温度场见图 7。同时对 3 种不同材料的保温箱建立沿 x 轴方向的箱体中心轴、沿 y 轴方向的冷藏室中心轴以及冷冻室中心轴作温度曲线,见图 8。仿真以每 5 min 一步进行计算,得出每种摆放位置的有效保温时间:EPS, EPP, EPU 这 3 种箱体材料的冷藏室有效保温时间分别为 675, 855, 1170 min;冷冻室有效保温时间分别为 415, 485, 685 min。

由上可以看出保温时间 EPU(19.50 h/11.42 h) > EPP(14.25 h/8.08 h) > EPS(11.25 h/6.92 h),EPU 的保温效果最好。从温度场可以看出,各材料箱体由外到内层次明显,聚氨酯(EPU)相对来说更好地保持了保温箱内部的温度,可以看出在 375 min 时,箱体内最低温度为 -13.27 °C,而同时发泡聚丙烯(EPP)材料箱体内部最低温度为 -11.42 °C,聚丙烯泡沫塑料(EPS)材料则为 -10.08 °C。从 3 个方向的中心轴线图中可以很好地看出在相同时间段不同材质的多温区保温箱轴线温度差异很大,在保持温度方面显然 EPS 的效果最差,而 EPU 的保温效果最好。这是因为对于多温区保温箱而言,最重要参数指

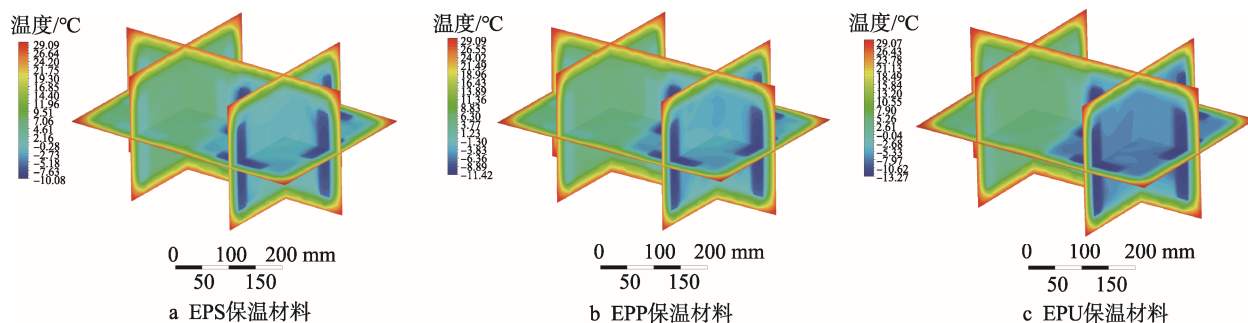


图7 不同保温材料的多温区保温箱温度场

Fig.7 Temperature field of multi-temperature zone insulation box of different insulation materials

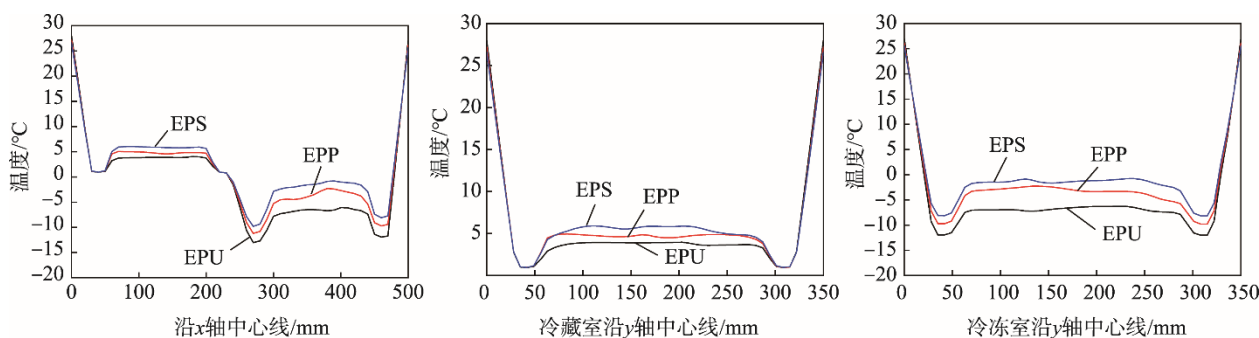


图8 不同保温材料3个方向中心轴的温度曲线

Fig.8 Temperature curves of central axis in three directions of different insulation materials

标是导热系数^[15]。导热系数越低的材料所能表现的隔热性能也就越好，因此 EPS 材料保温箱只适合路程特别短的冷链物流运输^[16]。从保温箱实际生产方面来分析，EPU 材料有着质轻、耐热、防水、环保等优点，但相较于 EPS、EPS 来说价格偏高。一般在医药等温度敏感性较高的物品运输类型保温箱中生产较多。EPS 易制作、价格低，保温效果较好，但同时也具有强度低、不易降解等缺点。EPP 性能卓越，优于 EPS，是可分解回收的绿色环保材料，强度高，价格相对便宜，利于大批量制作保温箱。结合保温效果和实际制作成本的情况下，对于冷链运输市场的大批量商品配送最好选择 EPP 材料的多温区保温箱。

3.3 不同外界温度对箱体保温效果影响

外界环境的改变往往带来保温箱内部温度场的变化，保温箱内外环境的温度差会使外界热量向箱内

低温传递，由于箱体的导热系数低，因此阻隔了部分热传导^[17]。将选取外界温度为 23，30，40 °C 等 3 种不同外界温度对多温区保温箱保温效果及内部温度场均匀分布情况进行仿真研究分析，对之后冷链运输技术所需保温箱研究提供一定参考，对温度敏感型产品用保温箱保温包装设计提出合理建议^[18]。

建立 EPP 多温区保温箱，选择各温区蓄冷剂侧面摆放的方式，确定好原有参数和边界条件不变，仅改变外界环境温度，取 375 min 时的仿真所得温度场见图 9。同时对 3 种不同材料的保温箱建立沿 x 轴方向的箱体中心轴、沿 y 轴方向冷藏室中心轴以及冷冻室中心轴做温度曲线见图 10。同时对各个温室共有可用空间进行保温效果测试，每 5 min 一步进行计算得出 3 种不同外界环境温度的有效保温时间。23，30，40 °C 这 3 种外界温度下，冷藏室有效保温时间分别为 1105，855，445 min，冷冻室有效保温时间分别为 645，485，290 min。

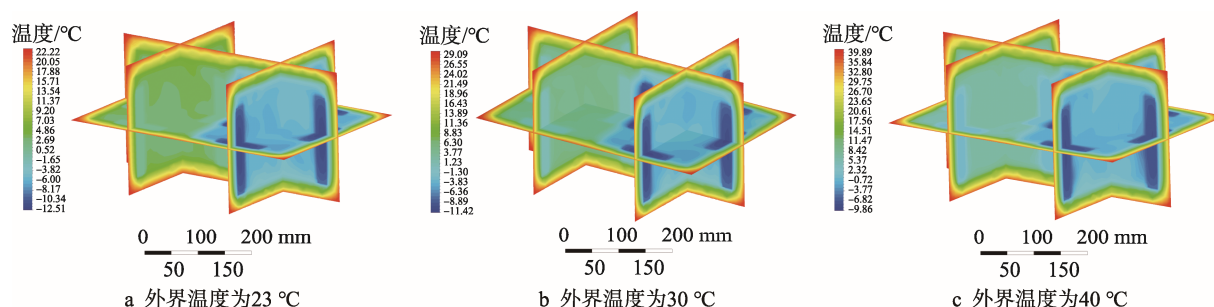


图 9 不同外界环境温度下的多温区保温箱温度场

Fig.9 Temperature field of multi-temperature zone insulation box at different external ambient temperature

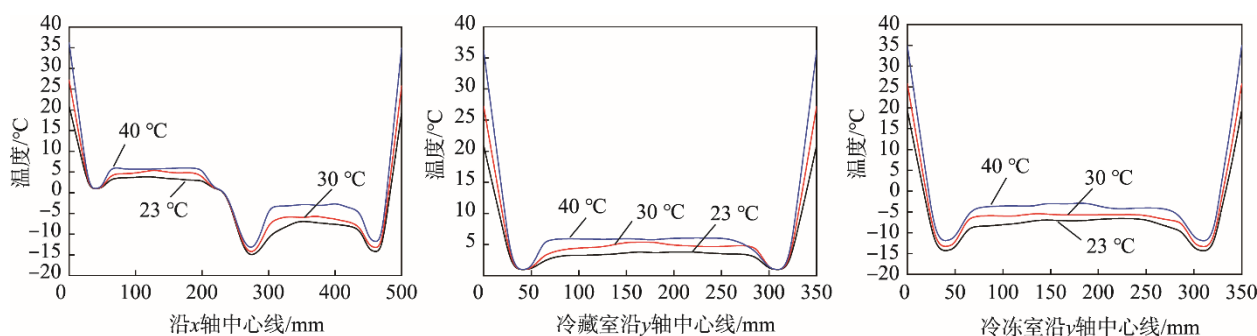


图 10 不同外界环境温度 3 个方向中心轴的温度曲线

Fig.10 Temperature curve of central axis in three directions at different ambient temperature

可以看出，不同外界温度下的保温时间排序为：23 °C (18.42 h/10.75 h) > 30 °C (14.25 h/8.08 h) > 40 °C (7.42 h/4.83 h)。外界温度的差异导致内外温度差不同，在同一时刻，外界温度为 23 °C 时冷藏区温度为 0.52 °C 左右，冷冻区温度为 - 6.00 °C 左右；外界温度为 30 °C 时，冷藏区温度为 3.77 °C 左右，冷冻区温度为 - 3.83 °C 左右；外界温度为 40 °C 时，冷藏区温度为 5.37 °C 左右，冷冻区温度为 - 0.72 °C 左右。

外界温度升高时，保温箱内部温度随之升高^[19]。由于内外温差与总传热量成正比^[20]，因此箱体外部温度升高导致内外温差增大，从而影响了整个保温装置系统的总传热量增加，保温箱箱体内部升温加快，总体温度场温度随之升高。从图 10 可以看出，在同一时间的情况下，外界温度越高，箱体内部相同位置的温度就越高，外界温度的升高导致多温区保温箱冷藏室和冷冻室的有效保温时间变短，说明内外温度差的增加

对保温箱箱体内部温度场的影响增大,使得保温箱内部温度升高。同时保温箱的保温效果也受到了影响,外界温度越低,有效保温时间越长。

4 结语

通过 Ansys Fluent 软件模拟了在恒温恒湿条件下,蓄冷剂摆放位置、箱体材料、外界环境温度对多温区保温箱温度场分布的影响,研究发现:在选取的4种蓄冷剂摆放位置中,侧面摆放的方式可以充分利用蓄冷剂的释冷量,多温区保温箱的各个温室的温度场分布均匀,保温效果最好;所选3种材料中 EPU 的保温效果最佳,相较于 EPP 保温箱的保温时间,冷藏室提高了 36.84%,冷冻室提高了 41.24%,在各温区使用4块蓄冷剂的情况下,能满足 EPU 材料的多温区保温箱体保温 11 h 以上;在设定的3种不同外界环境温度下,该多温区箱体在外界环境温度为 40 °C 的保温时间相较于 23 °C,冷藏室降低了 59.73%,冷冻室降低了 55.04%。

在以保温箱实现多温共配目标的情况下,利用软件的模拟可以得出冷藏室(0~8 °C)和冷冻室(0 °C 以下)的双温区保温箱的温度场及保温效果,计算机仿真的方法为箱体制造与蓄冷剂搭配使用提供了一定的参考,为今后多温区箱体多温共存应用提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 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,2015,35(6):179—183.
CHEN Jing-yu, HUANG Hui. Study on Current Status and Countermeasures of Cold Chain for Fresh Agricultural Products Based on E-commerce[J]. Technology Management Research, 2015, 35(6): 179—183.
- [2] 贺廉云.冷藏车制冷方式分析与研究[J].时代农机,2017,44(1):79—80.
HE Lian-yun. Research of the Refrigeration Method for Refrigerator Trucks[J]. Times Agricultural Machinery, 2017, 44(1): 79—80.
- [3] 胡凡.冷链物流新宠儿——物流保温箱[J].市场周刊(新物流),2008(4):35.
HU Fan. The New Darling of Cold Chain Logistics: Logistics Incubator[J]. Market Weekly (New Logistics), 2008(4): 35.
- [4] 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 and Food Machinery, 2016, 34(4): 32—35.
- [5] 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.
ZHAO Xin-xin. Multi-temperature Distribution Optimization and Precise Temperature Regulation of Refrigerated Truck[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] LAGUERRE O, BEN M F, FLICK D. Methodology of Temperature Prediction in an Insulated Container Equipped with PCM[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(6): 1063—1072.
- [9] 赵秀红,刘宝林.一种新型多温区恒温箱均温性的数值模拟与实验验证[J].制冷学报,2015(2):27—33.
ZHAO Xiu-hong, LIU Bao-lin. Numerical Simulation and Experimental Verification of Temperature Uniformity in a Novel Multi-temperature Thermostat[J]. Journal of Refrigeration, 2015(2): 27—33.
- [10] 程宇,张巨伟.基于ANSYS的管道外自然对流换热系数的确定[J].当代化工,2015,44(11):2720—2722.
CHENG Yu, ZHANG Ju-wei. Determination of Natural Convection Heat Transfer Coefficient Outside the Pipe Based on ANSYS[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(11): 2720—2722.
- [11] 郭晓娟.基于Ansys的保温包装温度场数值模拟[D].无锡:江南大学,2011.
GUO Xiao-juan. Numerical Simulation of Temperature Field of Thermal Insulation Package Based on Ansys[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [12] 郭磊.对FLUENT辐射模型的数值计算与分析[J].制冷与空调(四川),2014,28(3):358—360.
GUO Lei. Numerical Calculation and Analysis of FLUENT Radiation Model[J]. Refrigeration and Air-conditioning(Sichuan), 2014, 28(3): 358—360.
- [13] 潘欣艺,王家俊,王冬梅.蓄冷剂摆放位置对保温箱温度场的影响[J].包装工程,2018,39(3):77—82.
PAN Xin-yi, WANG Jia-jun, WANG Dong-mei. Effect of Placement of Coolant on Temperature Field of Incubator[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 77—82.
- [14] 邱倩倩,王亚会,刘斌,等.保温盖对冷藏展示柜内温度分布的影响[J].流体机械,2017,45(6):61—65.
DI Qian-qian, WANG Ya-hui, LIU Bin, et al. The Effect of Refrigerated Display Cabinet Insulation Cover on the Distribution of Temperature Field[J]. Fluid Machinery, 2017, 45(6): 61—65.
- [15] 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. Influence

- of thermal insulation material on temperature field in thermal insulation box[J]. Food & Machinery, 2018, 34(8): 115—118.
- [16] 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, 43(2): 58—63.
- WANG Da, LYU Ping, JIA Lian-wen, et al. Effects of Different Thermal Insulation Materials on the Effect and Quality of Peach Thermal Storage and Thermal Insulation Transportation[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(2): 58—63.
- [17] 许亚瑞, 董晓芬, 庞明勇. 一种热传导过程的计算机仿真及可视化方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 1064—1070.
- XU Ya-rui, DONG Xiao-fen, PANG Ming-yong. A Computer Simulation and Visualization Method of Heat Conduction Process[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(5): 1064—1070.
- [18] 黄奕斌. 我国医药冷链物流发展现状及建议[J]. 物流技术与应用, 2017, 22(S1): 35—37.
- HUANG Yi-bin. Development Status and Suggestions of China's Pharmaceutical Cold Chain Logistics[J]. Logistics Technology and Application, 2017, 22(S1): 35—37.
- [19] 菅宗昌, 潘嘹, 卢立新. 一种典型潜热型控温包装的有限元分析[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 14—17.
- JIAN Zong-chang, PAN Liao, LU Li-xin. Analysis of a Typical Latent Heat Type Temperature-control Package[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 14—17.
- [20] 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, 36(4): 9—12.
- ZHU Hong, WANG Dong-mei, PAN Xin-yi. Research on Thermal Insulation Performance of Incubator under Different External Environment Temperatures[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(4): 9—12.