

保温材料对保温箱内温度场的影响

Study on temperature field of different materials in incubator

潘欣艺 王冬梅 朱宏

PAN Xin-yi WANG Dong-mei ZHU Hong

(深圳职业技术学院传播工程学院, 广东 深圳 518055)

(School of Communication, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

摘要:通过构建保温箱基本模型,运用有限元法及 Fluent 进行热流耦合分析,得到保温箱内温度场,并通过实验进行验证。选取 3 种常见保温材料[挤塑聚苯乙烯(XPS)、发泡聚氨酯(EPU)与真空隔热板(VIP)],通过模拟仿真研究不同材质保温箱内温度场分布规律。结果表明:保温箱使用的保温材料不同,内部温度场有较大的差异性,其中 VIP 保温箱内温度最接近蓄冷剂相变温度值,且温度场分布最均匀;3 种材料都具有较好的阻热性能,其中 VIP 的阻热性能最好,在保温箱内相同位置的温度比 EPU 和 XPS 要低。

关键词:保温材料;保温箱;Fluent;温度场;蓄冷剂

Abstract: The temperature fields of the incubators were investigated based on the fundamental model of incubator, using finite element method by applying finite elements. Moreover, the Thermal-Fluid Couple by Fluent was analyzed, and the temperature field was validated by experiment. Three common thermal insulation material including XPS, EPU and VIP were selected, and the temperature fields distribution of different materials were studied by the computer simulation. The results showed when using the different insulation materials, the internal temperature field were different, and the internal temperature of VIP incubator were closest to the phase change temperature of cool storage agent and with the temperature distribution uniformity best. The three materials showed excellent thermal barrier properties, and among them VIP had the best thermal barrier performance with lowest temperature comparing to EPU and XPS.

Keywords: thermal insulation material; incubator; Fluent; temperature field; cool storage agent

中国每年有大量的食品在没有冷链保障的情况下运输销售,造成变质腐烂损失严重。中国综合冷链年流通率仅为 19%,每年仅果蔬腐烂就达到 1.4×10^8 t^[1]。当前易腐食品

冷藏运输设备有冷藏车、冷藏集装箱、冷藏船等,这些设备主要利用制冷机来维持内部温度场恒定,但该方法成本高、能耗大、经济效益差,制约了冷链物流的进一步发展。最近几年,搬运及携带便捷的保温箱作为一种食品冷链包装装置越来越受欢迎。保温箱是采用绝热或者导热系数较低的材料做箱体,内部放置蓄冷剂来保持箱内的温度,从而便捷地完成食品冷链运输^[2]。保温箱与蓄冷剂相结合的包装装置不同于冷藏车等主动制冷设备,属于一种无源冷链包装方式,特别适合易腐食品多频次、小批量的运输要求,操作简单灵活、成本低,如杨梅、荔枝等产品的快递运输包装。保温箱的保温效果可通过保温时效及箱内温度分布情况加以评价,国内外都极为重视保温箱保温技术的研究及开发,主要包括对保温材料的选择^[3-4],对蓄冷剂自身物理特性和保冷性能的研究^[5-7],对保温箱保温过程进行模拟^[8-10],对保温箱的结构工艺设计^[11-13]。然而上述研究大都针对保温箱保温时长进行改进,并未考虑保温箱内部温度场的分布情况,而实际冷运过程中保温箱内部温度的分布很不均匀,从而影响食品品质。温度场是评价冷藏运输设备性能的重要指标,均匀、稳定的温度场有利于保温箱内食品的运输安全。

目前国内外对保温材料的选择以低导热系数材料为基础,综合考虑材料及加工成本,其中挤塑聚苯乙烯(XPS)、发泡聚氨酯(EPU)与真空隔热板(VIP)等典型保温材料应用广泛。对于冷链保温箱而言,保温材料的选用,一方面可以有效地维持内部易腐食品处于所需的低温环境中;另一方面,保温材料的使用也对外界的物质进行了阻隔,减少了外界因素对易腐食品的影响,提升了冷链运输的安全性。由此可见,保温箱保温材料的正确选择,对于冷链运输保温包装至关重要^[14]。

本试验拟以典型的冷链保温箱为研究对象,建立其基本传热模型,利用专业流体仿真软件 Fluent 求得保温箱内部温度场分布,进一步研究保温材料对保温箱内部温度场的影响,得出不同材质保温箱的温度场分布规律,为易腐食品的冷链包装保温箱选择及包装优化设计提供参考依据。

基金项目:国家自然科学基金(编号:51675349)

作者简介:潘欣艺,男,硕士。

通信作者:王冬梅(1976—),女,深圳职业技术学院教授,博士。

E-mail:394794521@qq.com

收稿日期:2018-05-15

1 试验与仿真

1.1 测试试验

以某款保温箱为研究对象,其箱体材料为密度 45 kg/m^3 、导热系数 $0.026\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 的聚氨酯泡沫,箱体尺寸为 $600\text{ mm}\times 440\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),壁厚为 60 mm 。配置 8 块相变温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 的蓄冷剂作为冷媒维持箱内温度,蓄冷剂尺寸为 $300\text{ mm}\times 160\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),保温箱试验装置见图 1。保温性能试验参考 ASTM D3103《运输包装件保温性能标准测试方法》^[15],按照图 2 所示布置温度探头测试点,将保温箱放置于 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温恒湿箱中进行保温试验,多探头温度记录仪记录不同测试点温度,分析保温箱保温性能。

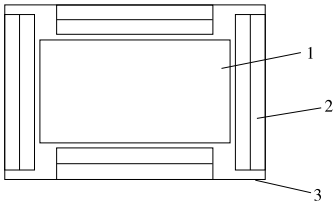


图 1 保温箱试验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of incubator experiment

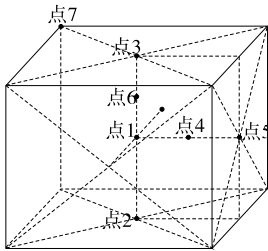


图 2 温度测试点位置

Figure 2 The distribution of temperature test points in the box

1.2 模拟仿真

采用有限元法对试验保温箱内温度场进行数值模拟,首先利用 ICMCFD 程序按照保温箱和蓄冷剂尺寸建立等比例模型,之后采用结构化网络,将模型分区划分成六面体网格,见图 3。这种网格划分方法既确保了计算精度,又减少了网格数量,节省了计算成本。

将网络文件导入到 Fluent 程序中进行计算,除其他各项参数需要与实际试验相同外,计算之前需要对保温过程的实际情况进行一定的假设和简化处理:

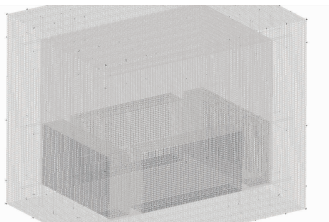


图 3 保温箱网格图

Figure 3 Mash of incubator

① 由于温差较小,辐射换热处于平衡状态,忽略内外表面热辐射的影响;

② 认为保温箱箱体的气密性很好,不考虑保温过程中由于漏气所产生的影响;

③ 内部空气流速较低,设为不可压缩流体,满足 Boussinesq 假设^[16];

④ 保温箱保温的整个过程中,由于温度变化幅度较小,认为箱体内部空气的热物性参数以及保温箱材质的各项参数是不发生改变的,因此均采用常物性参数值,具体参数见表 1。

表 1 保温箱模型各部分材料参数

Table 1 Material parameter of each part of the incubator

材料	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
EPU 箱体	0.026	45.0	2 400
蓄冷剂	0.135	763.0	2 200
空气	0.023	1.2	1 005

在纯粹的自然对流问题中,当流体受热并且其密度随温度变化时,密度变化引起的重力差异将会引发流体的流动,流动强弱可以用瑞利数 Ra 来衡量,如果 $Ra<10^8$,自然对流属于层流;如果 $10^8<Ra<10^{10}$,自然对流属于层流与湍流的过渡阶段; $Ra>10^{10}$,自然对流属于湍流^[16]。

判别自然对流中流体状态公式:

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} = 2.73 \times 10^{10} > 10^{10}, \quad (5)$$

式中:

Pr —— 格拉晓夫数;

Gr —— 普朗特数;

g —— 重力加速度, m/s^2 ;

L —— 定性长度, m ;

β —— 流体的体积膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$;

ΔT —— 温度差, $^\circ\text{C}$;

ν —— 流体的运动黏度, m^2/s ;

α —— 流体的热扩散系数, m^2/s 。

可见,本研究涉及的自然对流属于湍流,即保温箱内部气流的流动方式属于三维空间的湍流流动方式,据此模拟方法采用 Fluent 中的标准 $k-\epsilon$ 模型对箱内气体进行仿真计算。

2 结果与分析

2.1 试验与模拟仿真分析

根据蓄冷剂相变原理,蓄冷剂在保温箱中经历 2 个阶段:① 蓄冷剂相变释冷阶段:蓄冷剂发生相变,从固态变为液态,此阶段蓄冷剂温度始终维持在相变温度 $5\text{ }^\circ\text{C}$;② 蓄冷剂显冷释放阶段:蓄冷剂融化完全,温度开始大幅上升。图 4 为保温箱内部各测点温度变化曲线,可以明显看出保温过程经历了蓄冷剂相变释冷(平台区域)与显冷释放(快速上升区域)2 个阶段。由于实际保温过程需要考虑到蓄冷剂内部传热以及在蓄冷剂内部存在着部分相变的情况,所以在蓄冷剂相变释冷阶段,保温箱内部的温度会随时间缓慢上升,但上

升幅度很小。在蓄冷剂显冷释放阶段,由于蓄冷剂潜热已经释放完全,保温箱内部温度迅速上升。本试验结果显示在前 1 500 min 内保温箱内部温度变化小,为蓄冷剂相变释冷阶段,并分别对保温试验前 500,1 000,1 500 min 的时间段取温度平均值,将该 3 个时间段的保温箱内部温度平均值与模拟仿真结果进行对比,见图 5。

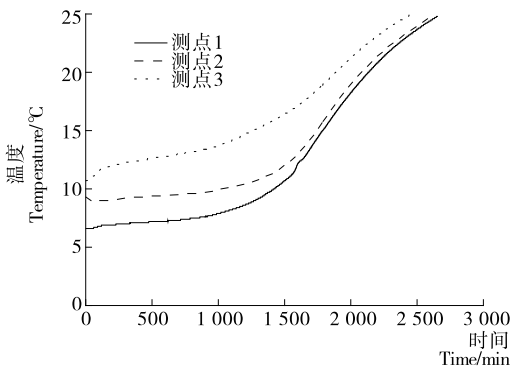


图 4 温度变化曲线

Figure 4 Curve of changing temperature

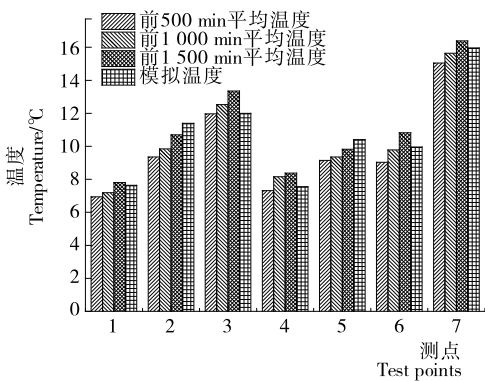


图 5 测试温度与模拟温度比较

Figure 5 Temperature comparison between test and simulation

由图 5 可知,在前 1 500 min 蓄冷剂相变释冷阶段时,选取的 3 个时间段测试温度与模拟温度差距较小,且模拟得出的各个测点温度分布与测试情况基本接近,同时考虑到箱体气密性等不可预测因素对温度场分布的影响,各测点模拟偏差在 10% 以内,处于可接受范围。因此,该计算模型可较为准确地预测保温箱内的温度分布。下文采用该计算机模拟技术分析不同材质保温箱内部温度场情况,以降低试验成本。

2.2 不同材质保温箱的温度场分析

选择保温箱材料的重要参数指标是导热系数及隔热性能,依据上述计算机仿真模型,对目前使用最广泛的 3 种保温材料的保温箱温度场进行比较与探讨,分别是挤塑聚苯乙烯(XPS)、发泡聚氨酯(EPU)和真空隔热板(VIP)。XPS 是聚苯乙烯经加热挤塑形成的一种发泡硬质塑料板,不同于发泡聚苯乙烯(EPS),XPS 的导热系数小于 EPS;EPU 的导热系数略小于 XPS,环保可降解,但相对于 XPS,价格较高;VIP 利用填充芯材与真空保护层复合而成,制造出接近真空的环境,有着极低的导热系数,是目前世界上最先进的高

效保温材料,一般不单独使用,常与 EPU 配合使用,由于 VIP 制成箱体形状粘接困难且生产技术高,导致 VIP 价格达到 EPU 的 10 倍甚至几十倍。

本研究假设保温箱尺寸以及各项参数和模型一致,XPS、EPU 和 VIP 的导热系数分别取 0.036,0.026,0.004 W/(m·K),将建立好的模型导入到 Fluent 进行计算。

为了分析保温箱内温度场分布情况,选取 x 轴坐标分别为 0.1,0.3,0.5 m 时的 3 个 yOz 平面的温度场截图,见图 6。从图 6 可以看出,由于有保温层的原因,在靠近壁面处的温度最大,远离壁面越靠近蓄冷剂温度越低。当保温材料为 XPS 时,温度变化的趋势与 EPU 基本相似,温度场截面图看不出明显的差别。与此形成鲜明对比的是 VIP 保温箱的温度场截面图,可以看到保温箱内部相同区域温度明显低于 XPS 和 EPU 保温箱,热量传递到箱体中间时,温度下降速度明显,箱体部分的传热区域对外界温度阻隔效应显著,证明了 VIP 的优良阻热效果。EPU 和 XPS 的导热系数分别是 VIP 的 6.5 倍和 9.0 倍,VIP 对保温箱的阻热保温效果远远大于传统发泡保温材料,从而可以延长保温时间。另外,对 3 种材料保温箱内部温度场分布进行比较,VIP 保温箱内部温度场分布接近蓄冷剂相变温度区域更加广泛,温度分布均匀性更好。

以保温箱中心点分别做 x 轴、 y 轴和 z 轴方向的直线,得到 3 个方向的温度曲线,见图 7。可以看出,随着材料导热系数的增大(导热系数 $VIP < EPU < XPS$),保温箱内相同位置的温度也随之增大,这是由于材料的导热系数越高,材料

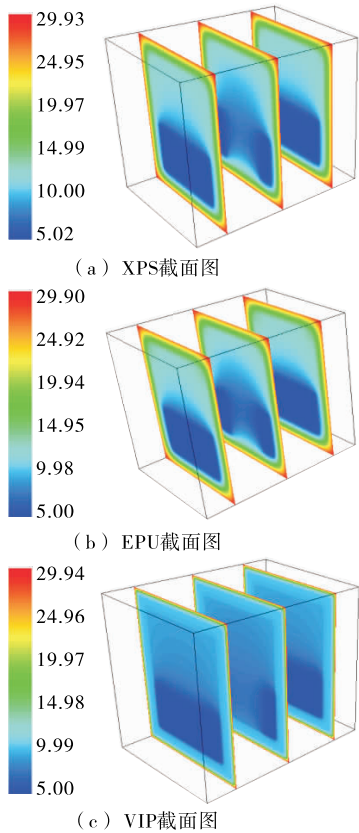


图 6 温度场截面图

Figure 6 Section of temperature field

的导热性能越好,但是隔热效果越差,从而导致温度场温度整体的上升。同样可以看到虽然 VIP 的导热系数远远小于 XPS 和 EPU,但是保温箱内相同位置的温度并未比 EPU 保温箱小很多,优势并非特别明显。对于保温箱来说,VIP 的保温效果最佳,温度场最接近蓄冷剂的温度,考虑到 VIP 保温箱价格昂贵,实际情况还需要具体分析。针对具体的产品保温时长需求,可以选取最优的保温材料,满足冷链运输要求。

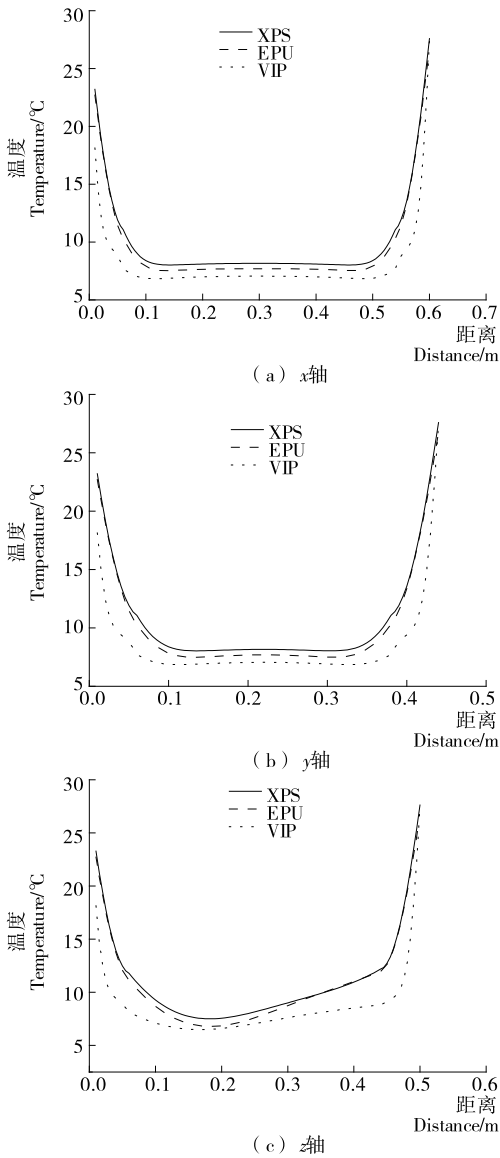


图 7 不同保温材料在 3 个方向上的温度分布

Figure 7 The temperature distribution of different Thermal insulation material in the three directions

3 结论

本试验建立了保温箱保温基本模型,利用 Fluent 软件模拟了保温箱保温过程中的温度场分布情况,并用实验验证了模型的准确性。结果表明保温箱保温过程中内部温度场分布十分不均匀,对 3 种保温材料进行模拟发现,保温材料对内部温度场有较大的影响,其中 VIP 材料导热系数最低,VIP 保温箱内部各个区域温度最低,最接近蓄冷剂相变

温度值,且温度场分布最均匀。XPS 保温箱内部各个区域温度最高,温度场分布均匀性最差。相同区域 VIP 保温箱并未比 EPU 保温箱隔热性能优越很多,而 VIP 的价格远远高于 EPU 和 XPS,故根据保温产品的具体要求选择合适的保温材料。

易腐食品对温度要求高,采用保温箱包装方式可以解决产品温控需求,操作方便、成本可控。不同材质保温箱内温度场分析为易腐食品保温包装性能评价提供依据。由于蓄冷剂摆放位置因素也会影响保温箱内温度场分布情况,可以进一步对保温箱内温度场分布展开深入研究,为易腐食品保温箱包装优化设计提供科学依据。

参考文献

- [1] 傅一波,王家俊,王冬梅. 复合相变蓄冷剂的性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(10): 235-237.
- [2] 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.
- [3] 黄国平. 真空保温技术在保温箱上的应用[J]. 制冷与空调, 2016, 16(5): 40-42.
- [4] 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.
- [5] 陈文朴,章学来,黄艳,等. 甲酸钠低温相变材料的研制及其在蓄冷箱中的应用[J]. 制冷学报, 2017, 38(1): 68-72.
- [6] 傅一波,王冬梅,朱宏. 果蔬保温包装中蓄冷剂的实验研究[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 23-27.
- [7] KRZYSZTOF Pielichowski, KINGA Flejtuch. Recent developments in polymeric phase change materials for energy storage: poly(ethylene oxide)/stearic acid blends[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2005(16): 127-132.
- [8] 菅崇昌. 典型潜热型控温包装热传递过程模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 20-30.
- [9] 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): 1 063-1 072.
- [10] MOUREH J, DERENS E. Numerical modeling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets in the distribution chain[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(7): 540-552.
- [11] 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, 38(6): 105-110.
- [12] 刘翠娜,张双喜,周恒勤,等. 便携式蓄冷保温箱结构优化[J]. 吉林化工学院学报, 2011(1): 29-33.
- [13] NAVARANJAN N, FLETCHER G C, SUMMERS G, et al. Thermal insulation requirements and new cardboard packaging for chilled seafood exports[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(3): 395-403.
- [14] 王娟,石芳录,朱贤,等. 聚氨酯真空隔热板芯材的研制[J]. 聚氨酯工业, 2001(1): 19-22.
- [15] ASTM International. ASTM D3103-07 Standard test method for thermal insulation performance of distribution packages[S]. West Conshohocken: [s.n.], 2014.
- [16] 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.