

食品冷藏保温箱温度场模拟与实验验证

朱文娴¹, 柯元裕¹, 卢立新², 王力¹, 贾代涛²

(1.空军勤务学院, 徐州 221000; 2.江南大学, 无锡 214000)

摘要: **目的** 研究食品冷藏保温箱在冷食冷藏工况下内部温度场的分布情况, 验证保温箱温度的分布以及保温性能是否达到设计要求。**方法** 采用有限元方法, 使用 COMSOL Multiphysics 构建食品冷藏保温箱热分析模型, 按照冷食冷藏的工况进行温度场模拟仿真, 再通过实验验证模拟结果的准确性。**结果** 模拟结果显示, 食品冷藏保温箱内部餐盒装满 0 °C 食品时, 在外界环境温度为 46 °C 的高温条件下贮存 4 h 后, 食物温度由上至下递增, 食物平均温度为 5.55 °C。实验结果显示, 食物平均温度为 6.65 °C, 均低于 10 °C。模拟结果与实验结果的平均误差为 1.1 °C。**结论** 食品冷藏保温箱餐盒内食物温度实验数据与模拟数据变化趋势基本一致, 用数值模拟方法分析保温箱温度场可行有效。蓄冷板对提高食品冷藏保温箱保温效果有较大作用, 保温性能可满足设计要求。

关键词: 冷藏保温箱; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TB489; TS206.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)23-0069-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.012

Temperature Field Simulation and Experimental Verification of Food Refrigerated Incubator

ZHU Wen-xian¹, KE Yuan-yu¹, LU Li-xin², WANG Li¹, JIA Dai-tao²

(1. Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, China; 2. Jiangnan University, Wuxi 214000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the internal temperature field distribution of food refrigerated incubators under the condition of food in cold storage to verify whether the distribution and thermal insulation performance of incubator temperature field meet the design requirements. The finite element method was used to construct the thermal analysis model of the food refrigerated incubator with COMSOL Multiphysics. The simulation on the temperature field was carried out according to the condition of food in cold storage, and the accuracy of the simulation results was verified by the experiment. The simulation results showed that, when the food container inside food refrigerated incubator was filled with 0 °C food, and the food was stored for 4 h when the external environment temperature was at 46 °C, the food temperature increased from top to bottom, and the average food temperature was 5.55 °C. The experimental results showed that, the average food temperature was 6.65 °C, which was lower than 10 °C. The average error between the simulation results and the experimental results was 1.1 °C. The change trend of experimental data of food temperature in the food refrigerated incubator is basically consistent with the simulated data. It is feasible and effective to analyze the temperature field of the incubator by numerical simulation. The cold storage plate has a great effect on improving the thermal insulation effect of the food refrigerated incubator, and the thermal insulation performance meets the design requirements.

KEY WORDS: refrigerated incubator; temperature field; numerical simulation

食品冷链储运设备分为有源和无源 2 种类型, 有源储运设备依靠电源为制冷机供能, 以维持箱内温度, 无源储运设备通过内置冷板来实现温度控制。蓄冷保温箱是无源冷链储运设备, 由于无需外接电源,

使用时较有源保温箱更加灵活机动, 广泛应用于商场、超市乃至航空冷链物流^[1-5]。保温性能是保温箱最重要的指标, 在储运过程中, 保温箱内部温度对于食品品质有着很大影响, 保温性能的研究通常需要分

收稿日期: 2018-08-17

作者简介: 朱文娴 (1966—), 女, 博士, 空军勤务学院教授, 主要研究方向为军事装备。

析温度场的分布^[6-7]。

近年来利用数值模拟软件研究保温箱温度场的方法已得到广泛应用。孙小峰^[8]等采用 COMSOL 模拟软件对卧式冷藏陈列柜进行数值模拟计算, 研究不同风速下冷藏柜内速度场和温度场的分布。郭小娟^[9]等通过构建球壳模型来简化保温箱传热过程, 并使用 Ansys 软件进行模拟计算。王安冉^[10]等运用 Fluent 软件, 对冷藏车空载和装载生物制品时的降温性能以及降温结束后内部的温度分布情况进行计算分析。魏建仓^[11]采用 Floefd 软件对折叠冰箱的风场和温度场分布进行了数值模拟, 针对模拟结果进行了优化设计仿真。

数值模拟结果一般还需要实验数据作为支撑, 以验证计算的准确性。王瑞星^[12]等在预冷和添加冷藏材料的情况下, 使用 COMSOL 软件模拟花椰菜的温度变化, 并与实验进行对照, 结果证明蓄冷运输包装箱能有效地延长贮存时间。刘杰坤^[13]等建立了基于圆热流法理论的箱体传热分析模型, 并通过漏热实验比较 PU 箱体和真空隔热板 (VIP) 箱体保温效果, 结果表明, 嵌入式 VIP 箱体的保温性能更好。泮国荣^[14]等设计了医药产品保温箱的包装结构, 利用 Ansys Workbench 软件对保温箱进行热分析, 与实验数据比较后, 表明了模型和计算结果的合理性。吕传超^[15]等利用 CFD 工具计算了现有冰箱的温度场和速度场, 并通过实验验证了数值计算模型的准确性。

文中以某型食品冷藏保温箱为研究对象, 建立保温过程中箱体与内部食物传热的数学模型, 在设计阶段利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 分析保温箱内部温度场分布的情况, 最后通过实验验证保温箱的保温性能。

1 食品冷藏保温箱结构设计

食品冷藏保温箱主要用于大飞机机组成员长航时飞行期间的膳食贮存, 主要结构包括箱体、箱门、蓄冷板、隔板、餐盒。冷藏保温箱的箱体、箱门为双层结构, 中间为隔热发泡材料, 箱壁起到保温隔热作

用。蓄冷板放置于箱内上层, 蓄冷板内装相变蓄冷材料, 利用材料相变时蓄冷与放热的原理, 用以延长冷藏的时间。餐盒共有 6 层, 主要用于盛放食品, 各层餐盒以隔板相隔。

根据设计, 对食品冷藏保温箱构建三维模型并导入 COMSOL Multiphysics 中。食品冷藏保温箱外尺寸为 405 mm×335 mm×560 mm, 内尺寸为 302 mm×249 mm×429 mm; 餐盒厚度为 0.001 m, 容积为 1.6 L。为方便有限元模拟, 对导入的模型进行网格划分。内部域设置为自由四面体网格, 边界上采用三角形网格, 对整个食品冷藏保温箱模型构建网格。经过计算, 共计生成 1 509 233 个四面体单元以及 288 931 个三角形单元, 网格划分结果见图 1。

箱体和箱门外壳采用线性低密度聚乙烯滚塑成型, 中间填充泡沫保温材料; 餐盒为 304 不锈钢材质, 隔板及餐盒盖为聚丙烯材料, 蓄冷板内装有相变蓄冷材料。经过测量计算, 箱体导热系数为 0.0455 W/(m·K), 箱体平均密度为 263.16 kg/m³, 恒压热容为 1000 J/(kg·K); 蓄冷剂导热系数为 1.005 W/(m·K), 密度为 752 kg/m³, 恒压热容为 4180 J/(kg·K); 不锈钢餐盒导热系数为 16.3 W/(m·K), 密度为 7930 kg/m³, 恒压热容为 500 J/(kg·K)。

2 食品冷藏保温箱温度场数值模拟

2.1 数学模型

按照设计指标, 食品冷藏保温箱需要满足自然环境温度下贮存冷链食品的要求, 故对食品冷藏保温箱在外界高温环境下贮存冷食的工况进行模拟。参照 GJB 150.3A—2009 军用装备实验室环境试验方法中的要求, 确定食品冷藏保温箱内部餐盒装满 0 ℃ 食物, 外界环境温度参考夏季最高气温设定为 46 ℃, 要求贮存 4 h 后保温箱箱内食物温度不应高于 10 ℃, 因为微生物在 10 ℃ 以下生长受到抑制。

为简化计算, 进行如下假设: 保温箱材料分布均匀, 视为各向同性; 忽略门缝处的漏热, 将箱体与箱门合并为一个整体; 箱内部空气视为不可压缩流体,

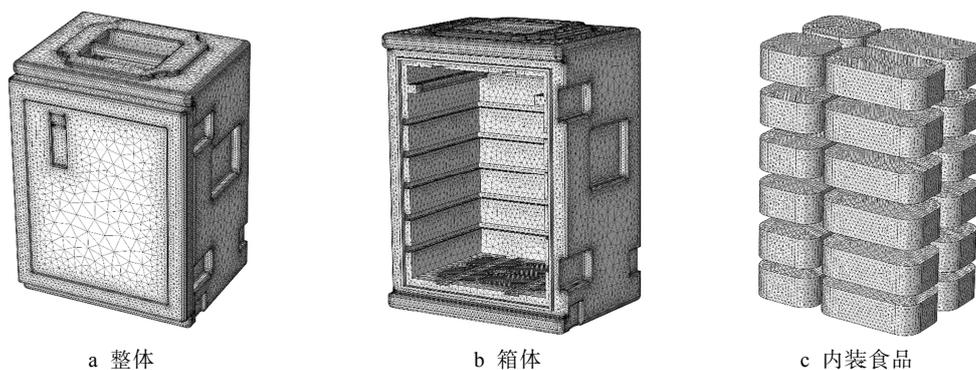


图 1 食品冷藏保温箱网格划分
Fig.1 Mesh generation of food refrigerated incubator

空气流动为自然对流；餐盒内充满食物，餐盒盖密封性良好，不与箱内空气发生对流换热；箱内空气满足布辛尼斯克假设，即空气的密度只受温度变化的影响；忽略辐射带来的影响。

对食品冷藏保温箱在储运过程中的传热过程进行分析，保温箱主要的传热方式包括食品冷藏保温箱外表面与空气的自然对流、保温箱内部空气的自然对流以及内部各部分间的热传导。在冷食贮存条件下，还要考虑蓄冷板的相变潜热。

食品冷藏保温箱内部热传导与对流方程为：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q + \rho C_p u \cdot \nabla T = Q$$

$$q = -k \nabla T$$

式中： ρ 为研究对象的密度； C_p 为物体的恒压热容； Q 为内部产生的热流； k 为材料导热系数； q 为热流密度； ∇T 为温度的梯度； u 为对流项中的外场因变量，如速度等。

食品冷藏保温箱外表面与外部空气的对流属于外部自然对流，其热对流方程为：

$$-n \cdot q = q_0$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T)$$

式中： q_0 为边界上的热通量； h 为传热系数； T_{ext} 为外部温度； T 为物体温度。

在食品冷藏保温箱上表面与下表面上：

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} 0.54 Ra^{1/4} & \text{如果 } T > T_{\text{ext}}, 10^4 \leq Ra < 10^7 \\ \frac{k}{L} 0.15 Ra^{1/3} & \text{如果 } T > T_{\text{ext}}, 10^7 \leq Ra < 10^{11} \\ \frac{k}{L} 0.27 Ra^{1/4} & \text{如果 } T \leq T_{\text{ext}}, 10^5 \leq Ra < 10^{10} \end{cases}$$

在食品冷藏保温箱侧壁上：

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0.68 + \frac{0.67 Ra^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492 k}{u C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) & \text{如果 } Ra \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} \left(0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492 k}{u C_p} \right)^{9/16} \right)^{9/27}} \right) & \text{如果 } Ra > 10^9 \end{cases}$$

Ra 为瑞利数，由以下公式求得：

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha}$$

$$\alpha = \frac{k_1}{\rho c}$$

式中： g 为重力加速度； β 为流体的体积膨胀系数； ΔT 为温度差； L 为特性长度； ν 为流体运动粘度； α 为热扩散系数； ρ 为流体密度； c 为流体比热容； k_1 为流体导热系数。

2.2 初始值及边界条件的设定

在 COMSOL 软件中对有关参数进行设定，按照

设定的工况，餐盒的初始温度设置为 273.15 K，保温箱箱体初始温度设置为 296.15 K。食品冷藏保温箱外表面的边界条件选用第 3 类边界条件，食品冷藏保温箱外表面热通量设置为对流热通量，传热方式为外部自然对流换热。外界环境温度设置为 319.15 K。

蓄冷板需要在冰柜中预先冷冻 24 h，在使用时放入保温箱中起到延长冷藏时间的作用。冷板内蓄冷剂的初始温度与冷柜设定温度一致，设定为 255.15 K (-18 °C)。蓄冷剂还涉及到相变换热，通过测量计算，蓄冷剂的相变温度 $T_{PC,1-2}$ 为 278.12 K (4.97 °C)，相变温度间隔 ΔT_{1-2} 为 6 K，相变潜热 L_{1-2} 为 209.2 kJ/kg。

2.3 数值模拟结果及分析

经过计算，得到了食品冷藏保温箱内装 0 °C 食物在 46 °C 环境下贮藏 4 h 后的温度场分布，见图 2。由图 2 可知，在 6 层餐盒中，上方 5 层餐盒的温度要明显低于最下层餐盒。食物温度最低点位于上层餐盒的中心处，最低温度为 4.26 °C，温度最高点位于下层餐盒的底面顶角处，最高温度为 9.3 °C。贮藏结束后，6 人餐盒箱从上至下各层平均温度分别为 4.87, 5.20, 5.20, 5.12, 5.26, 7.65 °C，均低于设计要求所规定的 10 °C。

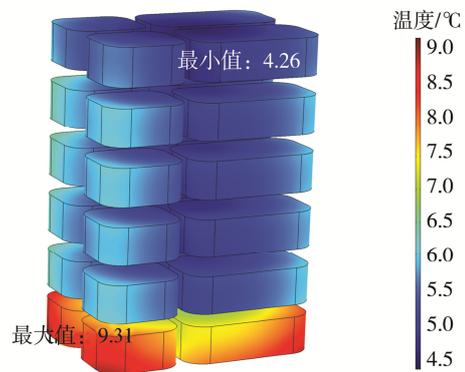


图 2 食物温度场分布
Fig.2 Temperature field distribution of food

对温度场分布结果进行分析，首先对食物区域进行剖分，得到 4 h 时餐盒内部食物切面的温度分布见图 3。各层餐盒的温度在水平面上由中心向外递增，这是因为传热从餐盒外侧开始进行。在竖直面上，上方 5 层餐盒温度相差不大，最顶层餐盒温度最低。这是因蓄冷板在相变过程中持续吸收外界的热量，温度保持在相变温度，故箱内冷空气从蓄冷板处下降。食物温度由上至下递增，越靠近冷板的餐盒温度越低，最底层餐盒温度要明显高于其他餐盒，因为该餐盒距冷板最远，且与箱体接触。

箱体在 4 h 时的表面温度分布见图 4，箱体内外壁面的温差很大，可见箱体保温材料起到了较好的保温作用。在箱体内部上下 2 层内表面的温度明显低于

其他部分,最低温度为 4.48 ℃,位于上层内表面与蓄冷板直接接触的部分。下层内表面与箱体接触的部分同样出现温度变化剧烈的情况,可见最下层餐盒的直接接触对冷保温效果也有影响。

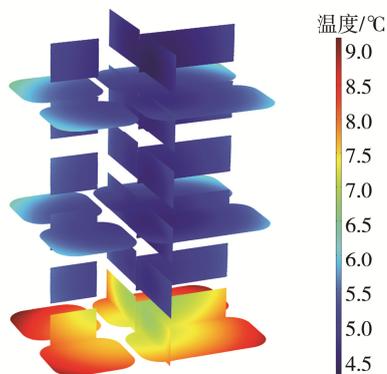


图3 食物温度分布三切面

Fig.3 Three sections of food temperature distribution

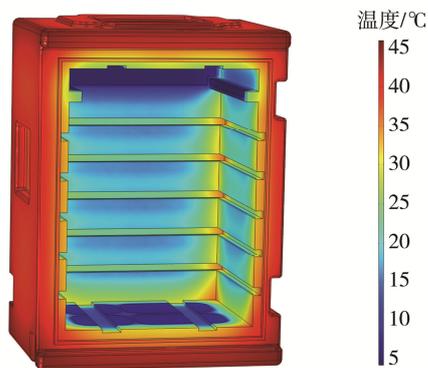


图4 箱体温度分布

Fig.4 Temperature distribution of incubator

虽然底层餐盒温度偏高,但所有餐盒的平均温度都在 10 ℃ 以下,可见食品冷藏保温箱的温度场数值模拟结果比较理想,这说明现有的设计方案是合理的,根据现方案制造食品冷藏保温箱样箱,并通过实验做进一步验证。

3 保温效果实验验证

3.1 实验材料及设备

实验材料包括食品冷藏保温样箱 1 台(箱内包括餐盒 6 个,塑料隔板 6 个,相变蓄冷板 1 块),另外需要准备足量的去离子水。因为米饭及蔬菜类食物存在空隙,不易装满餐盒,且食物含水量较高,所以这里用水作为食材样品。

实验设备主要包括 JHHZ-485T 型恒温恒湿箱(温度范围为-45~85 ℃,相对湿度范围为 20%~95%,温度稳定度为±0.2 ℃)、DS1922L 微型防水温度记录仪(采样速率为 1 s~27 h,温度范围为-40~85 ℃,精度为±0.5 ℃,分辨率为 0.0625 ℃)。

温度传感器的分布见图 5。温度传感器共有 6 个,分别摆放在每个餐盒大空腔内的中心点处,温度记录仪由上至下依次编号为 1—6 号。

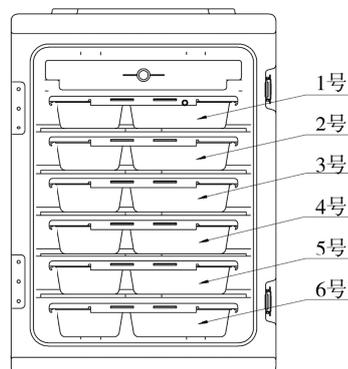


图5 温度记录仪摆放位置

Fig.5 Position of temperature recorder

3.2 实验步骤

预先将恒温恒湿箱的温度设定为 46 ℃,并开始预热。对温度记录仪参数进行设定,记录间隔设置为 1 min。准备足量的去离子水放入冰柜进行冰冻,制取冰块,蓄冷板提前 24 h 放入冰柜中冰冻。实验开始前取出冰块放入碎冰机中制取碎冰,加入去离子水,形成冰水混合物,将 6 个温度记录仪分别放置于每个餐盒右下方空腔的中心处并固定好。将冰水混合物倒入餐盒装满,盖上餐盒盖,将餐盒与冷冻过的蓄冷板放入食品冷藏保温箱中。关闭保温箱盖,将箱体移至恒温恒湿箱内,进行实验。超过 4 h 后停止实验,取出餐盒内的温度记录仪,读取内部记录的温度数据并整理。

3.3 实验结果及分析

食品冷藏保温箱内 6 个餐盒温度实验与模拟的结果见表 1。低温区域位于第 5 层餐盒,而不是第 1 层餐盒。分析原因为模拟时条件假设比较理想,蓄冷剂在 4 h 后还在相变过程中,温度保持不变,持续吸收热量,由于第 1 层餐盒距冷板最近,所以温度最低。在实验的过程中,4 h 后冷板内的蓄冷剂已经完成相变,箱内冷空气下沉,热空气上升。这时下层餐盒温度上升变慢。第 6 层餐盒虽然位置最低,但因为先前温度高于其他餐盒,所以温度仍最高。

贮存 4 h 后,各层餐盒平均温度为 6.65 ℃,第 6 层餐盒温度最高,为 8.58 ℃,第 5 层餐盒温度最低,为 5.71 ℃。实验温度要略高于模拟温度,分析原因为门缝处存在漏热,而模拟时忽略了门缝漏热。另外,恒温恒湿箱内部空气假设为自然对流,但在风机运转时是属于强迫对流,因此保温箱外表面对流换热强度要高于模拟值。与模拟结果对比发现,最大误差为 1.42 ℃,最小误差为 0.45 ℃,平均误差为 1.1 ℃。误差在可接受范围内,实验可以证实模拟结果的准确性。

表 1 4 h 后实验与模拟结果对比
Tab.1 Comparison of experimental and simulated results after 4 h

餐盒	模拟值	实验值	误差
第1层	4.87	6.03	1.16
第2层	5.2	6.51	1.31
第3层	5.2	6.53	1.33
第4层	5.12	6.54	1.42
第5层	5.26	5.71	0.45
第6层	7.65	8.58	0.93
平均值	5.55	6.65	1.1

各层餐盒模拟与实验温度变化对比见图 6，由于温度记录仪的分辨率为 0.5 °C，而实验中材料的温度

变化幅度较小，所以实验数据呈现阶梯状上升。从整体趋势上看，实验数据与模拟数据变化趋势一致，在 4 h 的时间段里，餐盒温度变化可以分为 3 个阶段。0~10 min 为第 1 阶段，这个时期由于保温箱内部初始温度分布不均，在箱内引起了较强的热传导，温度变化比较剧烈。10~140 min 为第 2 阶段，这个时期温度上升幅度变得平缓，主要是箱体外表面的热对流引起传热，同时箱内冷板内的蓄冷剂开始相变吸热，使得升温曲线变得更加平缓。140 min 后为第 3 阶段，这个时期冷板内蓄冷剂完成相变，冷板周围的冷空气由于密度较大开始下降，下层餐盒的升温曲线变缓，上层餐盒的曲线先变陡再变缓，第 6 层餐盒由于跟箱体接触，受热传导影响的程度高于热对流，故没有体现这个趋势。

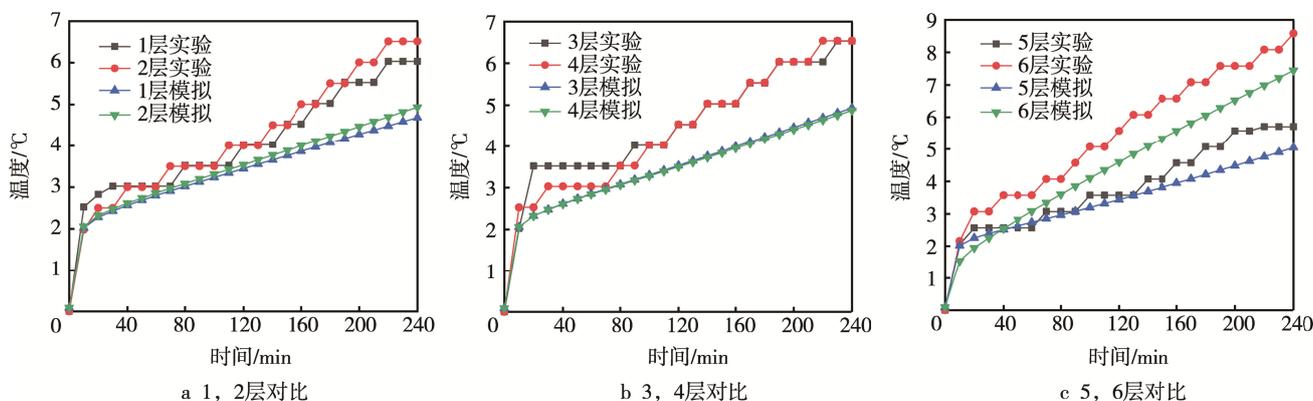


图 6 模拟与实验温度变化对比

Fig.6 Comparison of temperature changes between simulation and experiment

4 结语

1) 利用 COMSOL Multiphysics 对食品冷藏保温箱进行了温度场模拟分析，得到了保温箱内部餐盒装满 0 °C 食品时，在外界环境温度为 46 °C 的高温条件下贮存 4 h 工况下的内部温度场分布情况。

2) 对温度场模拟结果分析发现，蓄冷板对于食品冷藏保温箱的保冷效果起到了很好的效果。餐盒温度由上至下递增，模拟结果比较理想。

3) 按照模拟的方案生产样箱并进行实验验证，结果表明，食品冷藏保温箱的保温性能满足设计要求。餐盒温度实验数据与模拟数据趋势基本一致，误差在允许范围内，证明软件数值模拟方法的可靠性。

参考文献：

[1] 刘秀娟, 贺可太, 冯爱兰. 蓄冷箱在疫苗运输中的应用研究[J]. 物流技术, 2008(6): 116—118.
LIU Xiu-juan, HE Ke-tai, FENG Ai-lan. Application of Cold Box Technology in Vaccine Transportation[J]. Logistics Technology, 2008(6): 116—118.

[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.
HU Fan. Cold Chain Logistics New Favorite: Logistics Incubator[J]. Market Weekly (New Logistics), 2008(4): 35.

[3] 黄艳, 章学来. 蓄冷技术在食品冷链物流中的研究进展[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 23—29.
HUANG Yan, ZHANG Xue-lai. Research Progress of the Application of Cold Storage Technology in Food Cold Chain Logistics[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 23—29.

[4] 李建东. 蓄冷箱有效回收航空冷链空降厦门[N]. 中国食品报, 2013-04-11(005).
LI Jian-dong. Cold Storage Tank Effective Recovery, Air Cold Chain Airborne Xiamen[N]. China Food News, 2013-04-11(005).

[5] 马冰奇. 相变蓄冷技术在食品冷链中的应用与进展[J]. 制冷, 2016, 35(3): 79—83.
MA Bing-qi. Review of Development of Phase Change Cold Storage Technology for Food Cold Chain Application[J]. Refrigeration, 2016, 35(3): 79—83.

[6] 李成祥, 陈建东, 李娜, 等. 冷藏箱温度场的数值模拟及其优化[J]. 制冷技术, 2015, 35(3): 39—43.
LI Cheng-xiang, CHEN Jian-dong, LI Na, et al. Numerical Simulation and Optimization of Temperature

- Field inside a Freezer[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2015, 35(3): 39—43.
- [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, 32(3): 225—231.
SONG Hai-yan, CHENG Xin-xin. Thermal Insulation Efficiency of a Polystyrene Box for Thermal Insulation Packaging of Quick-frozen Fresh Corn[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(3): 225—231.
- [8] 孙小峰. 冷藏柜温度场影响因素的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2015.
SUN Xiao-feng. The Study on the Influence Factors of the Temperature Field in the Cold Storage Cabinet[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2015.
- [9] 郭晓娟, 钱静. 基于 Ansys 保温包装球壳模型的建立[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 43—48.
GUO Xiao-juan, QIAN Jing. Spherical Shell Models for Insulating Packages Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 43—48.
- [10] 王安冉. 基于 CFD 的冷藏车内流场及温度场的数值研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
WANG An-ran. Numerical Study of Flow Field and Temperature Field in the Refrigerated Truck Based on CFD[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [11] 魏建仓, 孙建军, 吴太虎. 野外折叠冰箱温度场仿真设计[J]. 医疗卫生装备, 2012, 33(7): 7—9.
WEI Jian-cang, SUN Jian-jun, WU Tai-hu. Simulation Design for Temperature Field of Folding Fridge[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2012, 33(7): 7—9.
- [12] 王瑞星, 刘斌, 邸倩倩, 等. 菜花在纳米蓄冷运输包装箱里的温度变化研究[J]. 食品工业, 2014, 35(11): 110—114.
WANG Rui-xing, LIU Bin, DI Qian-qian, et al. Study on Cauliflowers Temperature Change in Nano Cold Storage Shipping Container[J]. The Food Industry, 2014, 35(11): 110—114.
- [13] 刘杰坤, 陆华忠, 李君, 等. 嵌套真空板冷藏箱体保温性能的建模分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(8): 226—234.
LIU Jie-kun, LU Hua-zhong, LI Jun, et al. Thermal Insulation Model for Refrigerated Box with Embedded Vacuum Insulation Panels[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(8): 226—234.
- [14] 泮国荣, 徐国峰, 胡桂林, 等. 医疗保温箱的包装结构设计和有限元分析[J]. 浙江科技学院学报, 2013, 25(5): 335—339.
PAN Guo-rong, XU Guo-feng, HU Gui-lin, et al. Packaging Structure Design and Finite Element Analysis of Medical Insulating Box[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2013, 25(5): 335—339.
- [15] 吕传超, 崔振科, 王乐. 冰箱冷藏室温度场和流场的数值模拟与结构优化[J]. 制冷技术, 2015, 35(5): 56—61.
LYU Chuan-chao, CUI Zhen-ke, WANG Le. Numerical Simulation of Temperature and Velocity Fields in Fresh Food Storage Compartment and Structure Optimization for Refrigerator[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2015, 35(5): 56—61.