

基于参数化建模的控温包装传热仿真系统开发

方伟¹, 潘嘹^{1,2*}, 王军^{1,2}, 周厚晨³, 卢立新^{1,2}, 陈曦⁴

(1.江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3.苏州丸子软件科技有限公司, 江苏 苏州 215125; 4.无锡太湖学院, 江苏 无锡 214063)

摘要: **目的** 开发控温包装传热仿真系统 Tpackage, 通过参数化建模和传热仿真, 对控温包装的保温效果进行有效分析。**方法** 以典型控温包装为研究对象, 基于 OpenCASCADE、QT 与 VTK 设计控温包装参数化建模模块; 分析包装内外热量传递规律, 开发控温包装传热求解器模块。集成 2 个模块实现控温包装的参数化建模和传热过程的数值模拟。**结果** 使用 Tpackage 在 30、40 °C 2 个环境温度下对 2 套控温包装系统 (TC1、TC2) 进行传热仿真, 并采用 Comsol 进行同条件模拟, 产品测温点到达 8 °C 所经过时间的最大误差分别为 7.04% (TC1-30 °C)、9.87% (TC1-40 °C)、8.82% (TC2-30 °C)、9.73% (TC2-40 °C); 在 30 °C 条件下进行实际验证实验, 通过 Tpackage 进行同条件对比验证, 产品测温点到达 8 °C 所用时间的最大误差为 9.47%。**结论** Tpackage 能够实现典型控温包装的参数化建模, 并有效评估控温包装的温度场分布。该研究可为控温包装优化设计提供参考, 提高控温包装设计效率。

关键词: 控温包装; 参数化建模; 数值模拟

中图分类号: TB485.3; TB482.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)07-0089-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.07.012

Development of Numerical Simulation System for Heat Transfer in Insulating Packaging Based on Parametric Modeling

FANG Wei¹, PAN Liao^{1,2*}, WANG Jun^{1,2}, ZHOU Houchen³, LU Lixin^{1,2}, CHEN Xi⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China; 3. Suzhou Wanzi Software Technology Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215125, China; 4. Wuxi Taihu University, Jiangsu Wuxi 214063, China)

ABSTRACT: The work aims to develop a heat transfer simulation system for insulating packaging and effectively analyze the heat insulation effect of insulating packaging. With typical insulating packaging as the research object, a parametric modeling module of insulating packaging was designed based on OpenCASCADE, QT and VTK. The law of heat transfer inside and outside the packaging was analyzed, and the module of heat transfer solver for insulating package was developed. Two modules were integrated to realize the parametric modeling of insulating packaging and the numerical simulation of the heat transfer. Tpackage was used to conduct heat transfer simulation for two sets of insulating packaging (TC1 and TC2) at two ambient temperature of 30 °C and 40°C. Comsol was used for simulation under the same conditions. The maximum error of the time when the temperature measuring point reached 8 °C was as follows: 7.04%

收稿日期: 2023-12-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFA1203604)

*通信作者

(TC1-30 °C), 9.87% (TC1-40 °C), 8.82% (TC2-30 °C), and 9.73% (TC2-40 °C). The actual experiment was carried out at 30°C, and the comparison and verification under the same conditions by Tpackage showed that the maximum error of the time when the temperature measuring point of the product reached 8 °C was 9.47%. Therefore, Tpackage can realize the parametric modeling of typical insulating packaging and effectively evaluate the temperature field distribution in insulating packaging. The research can provide a reference for optimizing the design of insulating packaging and improving the design efficiency.

KEY WORDS: insulating packaging; parametric modeling; numerical simulation

在物流过程中,保证生鲜和试剂等温度敏感产品的品质与功效至关重要。然而,带有制冷设备的有源冷链存在使用限制并且价格昂贵。相比之下,以控温包装为主的无源冷链技术,具备小巧灵活、稳定可靠的特点,在各个领域得到广泛应用。特别值得一提的是,在乡村振兴的大背景下,生鲜电商迅速崛起,成为快递物流的重要组成部分,因此对控温包装的需求也随之不断增加^[1-2]。

随着控温包装的广泛应用,学者们通过一系列实验、建模和有限元软件的利用来评估这些包装的保温效果。Burgess^[3]提出了一种采用融冰法间接测量保温容器系统热阻的方法,由于这种方法周期长、条件复杂,无法进行大规模验证。另外,罗大伟等^[4]构建了保温箱与蓄冷剂的三维耦合模型,研究了不同外界温度下蓄冷剂的最佳预冷温度。潘嘹等^[5-6]制定了一个控温包装时间预测模型,为设计提供了理论依据。杨佳文等^[7]则利用人工神经网络算法评估了保温箱的性能,但这些算法模型需要进行软件化才能应用于包装设计流程。另一方面,余永涛等^[8]运用 Comsol 研究了传热过程中不同结构尺寸 EPP 保温箱的性能,江海林等^[9]则利用 ANSYS 分析了蓄冷剂设计参数对保温箱的温控效果影响。胡时发等^[10]设计了环形热管保温箱,并采用 FLUENT 和实验 2 种方法验证了该保温箱的保温效果,模拟结果与实验偏差较小。潘欣艺等^[11]通过 ICMCFD 与 FLUENT 分析了蓄冷剂摆放位置对保温箱保温效果的影响。然而,Comsol、ANSYS 等商业有限元软件公司使用需要支付高昂的版权费用。

上述研究主要集中于控温包装传热模型的建立与商用仿真软件的使用。对包装公司与快递电商公司而言,理论模型无法实际应用,商用软件版权费高昂。为此,本文基于三维几何内核 OpenCASCADE,图形库 VTK 与自研传热求解器开发一款集合参数化建模与温度场仿真的控温包装传热仿真系统(Tpackage),为控温包装结构优化设计,材料选用提供参考。

1 控温包装传热数值模拟系统设计

Tpackage 核心部分由典型控温包装参数化建模系统与控温包装传热求解器两部分组成,软件采用三层架构,软件使用流程遵循常规有限元仿真软件,并

进行了简化,减小设计人员的使用门槛。

1.1 Tpackage 整体框架

控温包装传热数值模拟系统参考 FlowStar 软件整体框架结构^[12],采用三层架构(如图 1 所示),最底层包括三维图形库 VTK,界面开发语言 QT,网格划分库 NETGEN,三维建模内核 OpenCASCADE 与矩阵运算库 Eigen 等开源协议宽松的 C++类库,底层类库均具有面向对象特点。本文主要通过对底层库 API 的调用,进行核心 CFD 模块(中间层)与用户界面(顶层)开发。核心 CFD 模块在对底层库进行整合设计,通过界面用户信息传入进行建模与求解控温包装内温度场。用户图形界面采用 QT 进行开发,包括信息输入,渲染可视等界面,用户仅需在界面进行简单的信息输入即可进行运算得到最终的控温包装仿真结果。

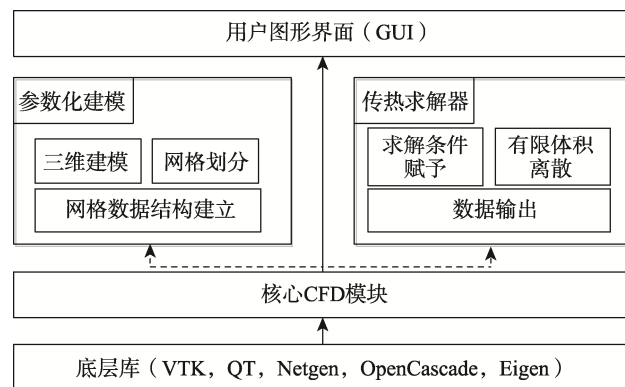


图 1 系统分层架构设计

Fig.1 Design for system layered architecture

1.2 典型控温包装参数化建模系统

OpenCASCADE 是三维建模的几何内核,通过 API 封装各种建模方法,建立模型速度快、质量高。Agostino 在 OpenCASCADE 基础上开发 JPADCAD 用于参数化飞机几何模型建立,模型具有高保真度^[13]。此外,已有学者通过 OpenCASCADE 参数化建模机翼模型并进行空气动力学研究^[14]。参数化建模流程如下:

- 1) 确定模板。用户根据产品形状、蓄冷剂摆放位置和保温箱结构确定控温包装设计模板。
- 2) 参数设置。根据包装结构示意图输入产品、

蓄冷剂、保温箱的具体参数。

3) 模型建立。系统在确定参数输入后进行判断参数是否合理, 合理则建立模型。

4) 文件输出与模型可视化。模型建立后导出所需格式的文件 (stp、brep、iges), 并通过 VTK 可视化管线进行渲染可视化。软件界面见图 2。

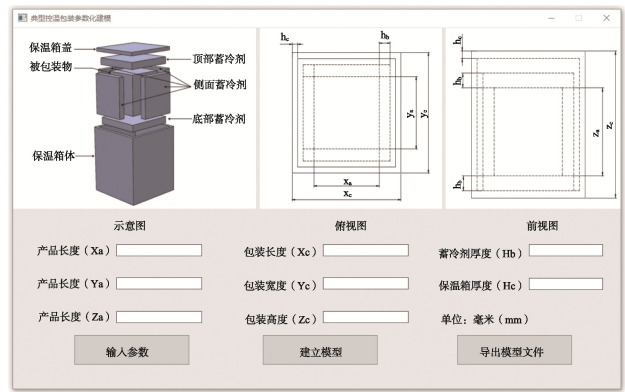


图 2 控温包装参数化建模界面
Fig.2 Parametric modeling interface
for insulating packaging

1.3 网格划分与网格数据结构

NETGEN 是由 Joachim Schoberl 编写的网格划分程序, 其核心思想是前沿推进法^[15]。该库可读取 OpenCASCADE 导出的 step 等格式数据。You 等^[16]通过使用 OpenCASCADE 与 NETGEN 实现了导弹的建模与网格划分, 并采用 OpenFOAM 进行空气动力学模拟得到较好的仿真结果。Tpackage 在参数化建模模块集成 NETGEN 进行网格划分, 为求解器计算提供几何数据。由 NETGEN 导出的网格数据结构简单, 因此以该部分数据为基础重新建立网格数据结构 (见表 1)。求解器根据计算需要从表 1 所示调用相关网格数据。

表 1 网格基本数据结构
Tab.1 Basic data structure of grid

几何信息	变量名	连接信息	变量名
体心坐标	Xc, Yc, Zc	单元-面	Link_cell_to_face
面心坐标	Xf, Yf, Zf	单元-点	Link_cell_to_node
节点坐标	Xv, Yv, Zv	面-单元	Link_face_to_cell
面法向量	Sn(allfaces, 3)	面-点	Link_face_to_node
单元体积	Vol(Allcells)	点-单元	Link_node_to_cell
面的面积	Area(Allfaces)		

1.4 控温包装传热求解器

1.4.1 控温包装传热数学模型

控温包装内外热量传递主要包括不同材料导热、空气间隙对流换热和相变材料存在相变潜热 (由于保

温箱内温度变化幅度较小, 辐射处于平衡状态, 保温箱体吸收的辐射能远远小于对流换热吸收的能量, 忽略保温箱的辐射现象^[17])。控温包装内空气间隙通常较小, 且热对流影响远远小于热传导, 为提高软件计算效率, 本软件忽略空气间隙的热对流影响。

控温包装内部材料热传导方程为:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q$$
 (1)

式中: ρ 为材料密度; c 为材料比热容; k 为材料导热系数; Q 为源项。

采用显热容法^[18]描述蓄冷剂相变过程, 其基本原理是在小温度范围把物质的相变潜热看作在足够厚的相变区域内存在一个很大的显热容量, 将相变过程转化为“单相”非线性导热问题。依据显热容法修改能量守恒方程如下:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t}$$
 (2)

$$k = f_s k_s + (1 - f_s) k_l$$
 (3)

$$c = f_s c_s + (1 - f_s) c_l$$
 (4)

式中: f_s 为固相率的无因次量 (固相率减小与相变潜热的吸收量成正比), 相变前为 1, 相变后为 0; L 为相变材料的相变潜热; k_s 与 c_s 为相变材料固相导热系数与比热容; k_l 与 c_l 为相变材料液相导热系数与比热容。

方程离散化采用有限体积法 (Finite Volume Method)^[19], 将待解控制方程对每一个单元积分, 从而得出一组离散方程。将方程组改写为系数矩阵形式, 利用矩阵运算库 Eigen 库中对该矩阵进行求解。

1.4.2 边界条件

控温包装保温过程中, 保温箱通过保温箱箱体与外部环境进行热交换, 选用第三类边界条件 (对流换热边界), 表示为:

$$q_n = h(T_0 - T_a)$$
 (5)

式中: q_n 为边界法向热流密度; h 为对流换热系数; T_0 为当前时刻边界温度; T_a 为环境温度。

1.4.3 求解器计算流程

求解器计算流程如图 3 所示, 其中, dt 为时间步推进的时间步长; e 为判断迭代是否收敛的收敛容差; t_i 为设定的求解总时间。基本流程如下:

1) 求解器依据初始条件得到 $t=0$ 时刻包装温度场 $T(t)$ 。

2) 通过迭代得到下一时刻 ($t+dt$) 包装温度场 $T(t+dt)$: 假定第 1 次迭代 ($n=0$) 初始温度场 $Ta(0)=T(t)$, 根据该温度场计算所有单元导热系数、比热容; 通过有限体积法建立离散方程组; 计算该方程组得到当次迭代温度场 $Ta(n+1)$ 。进行收敛判断: 计算 $|Ta(n+1)-Ta(n)|$ 并与收敛容差 e 进行比较, 如果 $|Ta(n+1)-Ta(n)|<e$, 则表明迭代收敛, 输出 $t+dt$ 时刻

包装温度场 $T(t+dt)$; 反之则迭代还未收敛, 以 $Ta(n+1)$ 作为下一次迭代初始温度场进行迭代, 直到收敛后输出 $t+dt$ 时刻包装温度场 $T(t+dt)$ 。

3) 进行时间步推进, 当时间推进至求解总时间, 即 $(t+dt) \geq t_i$ 后, 求解器计算完成, 输出 $t+dt$ 时刻包装温度场, 并记录所有单元温度变化。

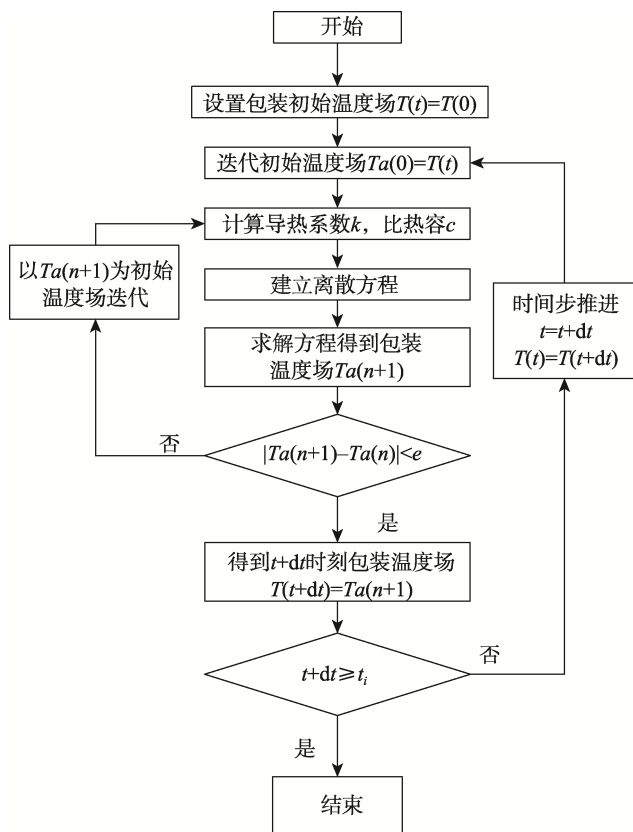


图 3 求解器求解计算流程
Fig.3 Calculation process by solver

2 软件可靠性验证

2.1 材料与仪器

主要材料: EPP 保温箱 (中国邮政), 保温箱外尺寸为 $0.41 \text{ m} \times 0.27 \text{ m} \times 0.21 \text{ m}$, 壁厚为 0.02 m ; 产品模拟物, 选用外尺寸为 $0.28 \text{ m} \times 0.14 \text{ m} \times 0.07 \text{ m}$ 的瓦楞纸箱, 内部放置质量分数为 35% 的乙醇溶液 (相变温度为 248 K); 蓄冷剂选用蓄水冰袋。材料热力学参数见表 2。

表 2 材料热力学参数
Tab.2 Thermodynamic parameters of materials

材料名称	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
EPP	0.036	19	1 680
冰	2.22	900	2 100
水	0.6	1 000	4 200
乙醇	0.17	789	2 360

主要仪器: VISION JHHZ-485T 人工气候箱, 昆山锦宏中环仪器设备; Agilent34792A 数据采集器配 K 型热电偶, 测温范围为 $263 \sim 473 \text{ K}$, 测量精度为 $\pm 0.5 \text{ K}$, 美国安捷伦。

2.2 Tpackage 与 Comsol 仿真对比

设置 2 套控温包装系统, TC1: 保温箱外尺寸为 $0.38 \text{ m} \times 0.24 \text{ m} \times 0.16 \text{ m}$, 壁厚为 0.02 m , 产品尺寸为 $0.24 \text{ m} \times 0.08 \text{ m} \times 0.04 \text{ m}$; TC2: 保温箱外尺寸为 $0.40 \text{ m} \times 0.26 \text{ m} \times 0.18 \text{ m}$, 壁厚为 0.01 m , 产品尺寸为 $0.26 \text{ m} \times 0.10 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}$ 。

使用 Tpackage 与 Comsol 进行相同条件模拟, 材料参数见表 2, 环境温度设计 303.15 K 与 313.15 K 这 2 个环境条件。其他条件如下: 设置初始温度为 269.15 K , 设置相变材料相变区间为 $0 \sim 2 ^\circ\text{C}$, 相变潜热为 333 kJ/kg , 容差控制选择为 0.001 。设置初始温度为 269.15 K , 边界条件采用第三类边界条件, 对流换热系数 h 取 $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。温度取样点见图 4。

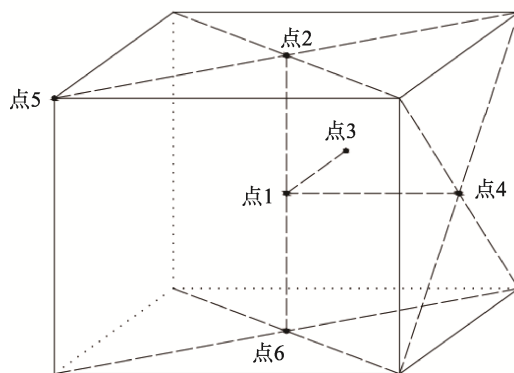


图 4 包装内部模拟物测温点分布
Fig.4 Distribution of temperature measuring points for simulated objects inside the packaging

2.3 控温包装实际验证方法

将产品模拟物、保温箱、蓄冷剂放置在 253 K 的条件下预冷 48 h , 设置温度记录仪采样时间为 10 min/次 , 在产品模拟物不同位置固定传感器探头, 测试点位置见图 4。上调恒温恒湿箱温度至 269.15 K , 至少保持 24 h 。开启温度记录仪监控产品当前温度。所有温度测试点温度保持 269.15 K (误差不超过 $\pm 0.5 \text{ K}$), 开始实验, 封闭保温箱, 上调恒温恒湿箱温度至 303.15 K , 保持 3 d 。重复上述实验过程 3 次, 取均值。实验用控温包装系统见图 5。同时, 采用 Tpackage 对该控温包装系统进行模拟, 材料参数见表 2, 设置相变材料相变区间为 $0 \sim 2 ^\circ\text{C}$, 相变潜热为 333 kJ/kg , 设置环境温度为 303.15 K , 初始温度为 269.15 K , 选取边界条件为第三类边界条件, 对流换热系数 h 取 $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 收敛容差设置为 0.001 。

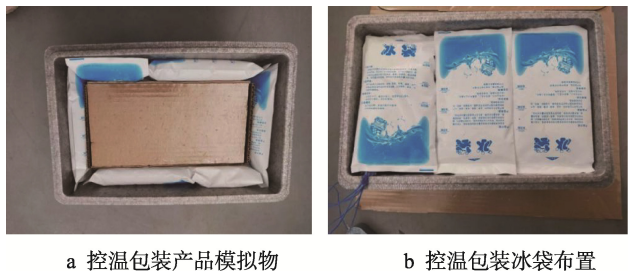


图 5 控温包装系统 (实验)
Fig.5 System of insulating packaging (experiment)

3 结果

3.1 Tpackage 仿真与 Comsol 验证

对 Tpackage 与 Comsol 进行了 2 种环境温度下 2 套控温包装系统的仿真。各产品中心点 (点 1) 的温度变化仿真结果如图 6 所示。根据图 6, 控温包装内产品的温度变化主要经历 3 个阶段: 首先是第 1 阶段, 相变材料未融化, 导致控温包装内产品温度上升, 系统温度变化主要受环境温度和材料参数影响。其次是

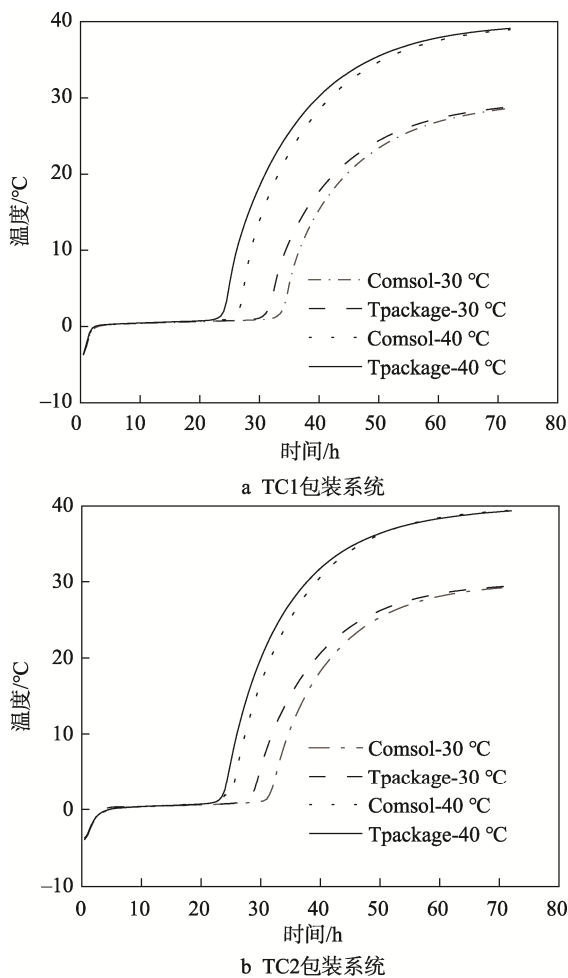


图 6 包装系统产品中心点 (点 1) 温度变化
Fig.6 Temperature change at the center point (point 1) of the product

第 2 阶段, 相变材料开始由固体转变为液态, 吸收大量热量。在此阶段, 产品温度上升速度减缓, 在温度变化上表现为出现上升平台期。最后是第 3 阶段, 相变材料完全转化后产品温度迅速提升, 并趋近于环境温度。在所有案例中, Tpackage 的仿真结果与 Comsol 的仿真结果展现了一致的变化趋势, 且在仿真开始和结束阶段高度吻合。这是因为 Tpackage 求解器使用的热传导方程与描述相变的显热容法控制方程与 Comsol 相同。

产品的最佳储藏温度与时间通常也是冷链物流重要关注点之一。常见温敏性产品如生鲜、果蔬、疫苗等均有 0~8 °C 的物流条件要求^[9], 本研究选取 8 °C 为产品储藏临界温度。Tpackage 系统会捕捉当温度超出最佳储藏温度时仿真经过的时间, 作为该点的保温时间。Tpackage 与 Comsol 预测的保温时间相对误差见表 3。

表 3 保温时间误差						
Tab.3 Error of holding time						%
包装系统	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6
TC1-30 °C	6.94	7.04	5.80	5.45	3.77	7.04
TC1-40 °C	8.93	8.93	9.87	9.52	7.50	7.27
TC2-30 °C	8.82	7.58	7.69	5.88	6.12	7.58
TC2-40 °C	5.56	3.85	3.92	7.14	9.73	3.85

由表 3 可知, 在 2 个环境条件下, 2 套控温包装系统 Tpackage 仿真到达 8 °C 的最大误差为 9.87%, 各测温点误差小于 10%。说明 Tpackage 与 Comsol 对控温包装温度场的分析接近, 误差在安全范围内, Tpackage 仿真具有一定可靠性。

图 6 与表 3 显示, Tpackage 与 Comsol 仿真结果呈现出一致的温度变化趋势, 但在相同时间点, 所有测温点的温度均高于 Comsol 仿真结果, 存在一定误差。这一误差主要源于两者使用的数值模拟方法的差异。Comsol 采用有限元法, 而 Tpackage 则使用有限体积法设计开发传热求解器, 因此在离散方法上存在明显区别。此外, 在求解器细节方面, 例如插值方式以及代数方程组的求解方法等也存在一定的差异。

3.2 Tpackage 仿真与实验验证

通过实验方法得到控温包装内产品模拟物各测温点随时间变化的温度曲线。选取产品中心点 (点 1) 和产品顶点 (点 5) 作为比较点位, 与 Tpackage 模拟结果进行对比分析。根据图 7 的数据可知, 实验组中测温点的温度变化曲线没有明显的上升平台期, 而 Tpackage 模拟结果在相变阶段则显示出明显的温度变化平台期。这种差异的产生可以归因于几个因素: 首先, 在进行控温包装实验验证时, 冰袋与冰袋之间可能存在少许空隙, 这些空隙会导致空气对流换热的

发生,从而影响整体控温包装的温度场分布;其次,冰袋在蓄水冷冻后的厚度可能会存在一定差异,这也会导致 Tpackage 模拟结果与实验结果之间产生误差。同时,蓄冷剂在部分相变后会产生流体流动,出现对流换热现象,导致在相变阶段,实验结果的温度高于 Tpackage 仿真结果。尽管如此,图 7 中 Tpackage 计算的点 1 与点 5 的温度变化趋势与实验结果基本一致,表明 Tpackage 能够大致描述控温包装内的温度场变化。

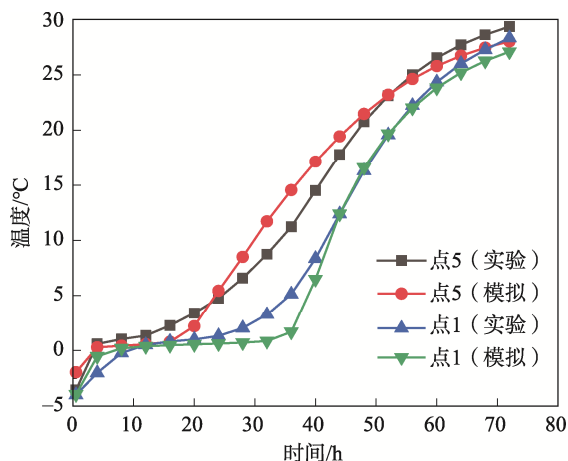


图 7 点 1 与点 5 温度变化
Fig.7 Temperature change at points 1 and 5

由于 72 h 后控温包装整体温度均接近环境温度,因此选取实验开始后经过 48 h 时温度进行对比,结果见图 8。产品平均温度为 18 °C,误差控制在 10% 以下,基本符合实际情况。误差最大出现在产品侧面点 3 处,为 9.24%,最小出现在产品中心点,为 1.79%。侧面顶点温度最高,这是由于该点处于产品模拟物尖角处,受外界温度影响最大。顶面中点点 2 高于底面中点点 6 和产品中心点点 1,这是由于蓄冷剂与少许空

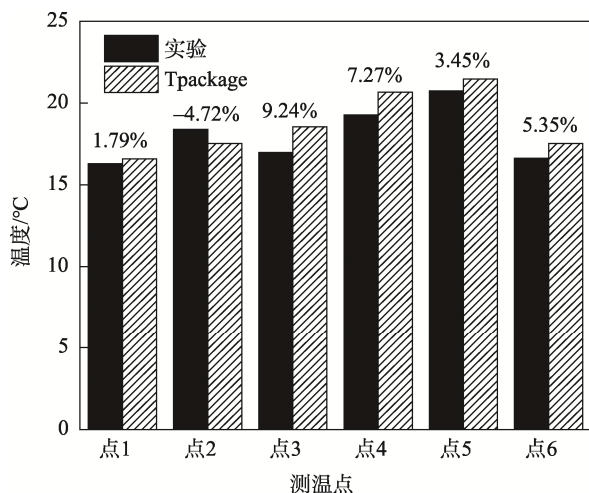


图 8 48 h 各测温点温度分布
Fig.8 Temperature distribution at each temperature measuring point within 48 hours

气间隙流体流动出现对流换热现象,控温包装内温度场出现“上层温度偏高,下层温度偏低”的现象。

本例中产品模拟物最佳储存温度区间设为 0~8 °C,各测温点达到 8 °C 的时间见图 9。软件计算结果与实验结果误差小于 10%。大部分测温点软件计算结果比实验结果要提前到达 8 °C,这与图 8 经过 48 h 后大部分对应点温度模拟值高于实验值的结果相符合。表明软件基本可以模拟控温包装系统产品温度变化,温度预测与实验相比偏高,但在安全范围内。

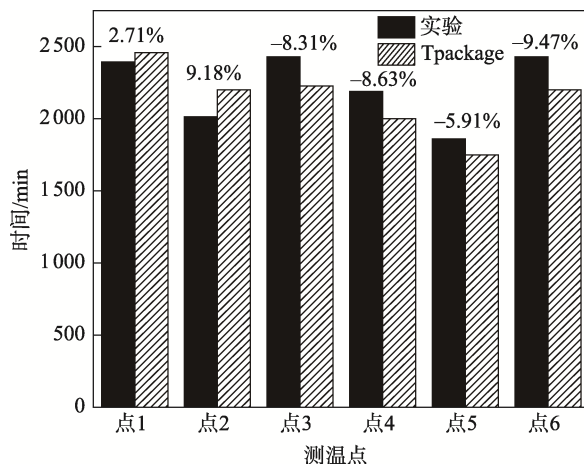


图 9 各测温点到达 8 °C 经过的时间
Fig.9 Time for each temperature measuring point to reach 8 °C

4 结语

本文基于 VTK、OpenCASCADE、NETGEN 等开源库开发了一款控温包装传热数值模拟系统 Tpackage,系统包括控温包装参数化建模系统和传热求解器。

1) 控温包装参数化建模系统内置典型控温包装建模方法,用户输入尺寸参数即可完成建模,提高控温包装建模效率,输出文件可导入其他建模软件、仿真软件使用。

2) 开发网格数据结构与传热求解器,建立了完整的控温包装仿真系统,通过典型控温包装储存实验和商用有限元软件 COMSOL 仿真验证了该系统的可靠性。取包装内产品到达 8 °C 经过的时间作为产品保温时间,结果表明 Tpackage 仿真结果与 Comsol 对比,最大误差为 9.87%,与实验对比最大误差为 9.47%,误差均小于 10%。开发的数值模拟系统能够准确地模拟控温包装温度场。

参考文献:

- [1] 罗正飞. 乡村振兴背景下顺丰生鲜农产品物流业务发展研究[J]. 中国航务周刊, 2023, 1511(7): 49-51.
LUO Z F. Research on SF Express Fresh Agricultural

- Products Logistics Business Development under the Background of Rural Revitalization[J]. China Aviation Weekly, 2023, 1511(7): 49-51.
- [2] 向明月. 生鲜农产品冷链物流包装技术研究及应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 103-109.
XIANG M Y. Research and Application Progress of Cold-Chain Logistics Packaging Technology of Fresh Agricultural Products[J]. Food & Machinery, 2023, 39(8): 103-109.
- [3] BURGESS G. Practical Thermal Resistance and Ice Requirement Calculations for Insulating Packages[J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(2): 75-80.
- [4] 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 D W, SONG H Y, WU D. Numerical Simulation and Experimental Verification of Temperature Field of EPP Incubator[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(3): 45-50.
- [5] 潘嘹, 卢立新, 王军. 控温包装控温时间预测模型研究[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 27-30.
PAN L, LU L X, WANG J. Prediction Model for the Shelf Life of Insulating Package[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 27-30.
- [6] LIAO P, XI C A, LLA B, et al. A Prediction Model of Surface Heat Transfer Coefficient in Insulating Packaging with Phase Change Materials - ScienceDirect[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100474.
- [7] 杨佳文, 曾台英. 人工神经网络在不同蓄冷剂参数下保温性能评估的应用[J]. 包装工程, 2023, 44(15): 175-183.
YANG J W, ZENG T Y. Application of Artificial Neural Network in Evaluation of Thermal Insulation Performance under Different Parameters of Cool Storage Agent[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(15): 175-183.
- [8] 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 Y T, PAN L, LU L X. Effect of the Structure Size of EPP Boxes on Insulation Performance[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(9): 114-118.
- [9] 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 H L, ZENG T Y, DING Y Q. Selection and Analysis of Phase Change Material for Incubator Based on Cold Chain Logistics Conditions[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 168-174.
- [10] 胡时发, 王达, 杨相政, 等. 环形热管蓄冷保温箱的模拟优化与实验研究[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 216-224.
HU S F, WANG D, YANG X Z, et al. Simulation Optimization and Experimental Study on Cold Storage Incubator with Annular Heat Pipe[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 216-224.
- [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 X Y, WANG J J, WANG D M. Influences of Ctesms Placement on the Temperature Field of Incubator[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 77-82.
- [12] 张健, 周乃春, 李明, 等. 面向航空航天领域的工业 CFD 软件研发设计[J]. 软件学报, 2022, 33(5): 1529-1550.
ZHANG J, ZHOU N C, LI M, et al. R & D and Design of Industrial CFD Software for Aeronautics and Astronautics[J]. Journal of Software, 2022, 33(5): 1529-1550.
- [13] DE MARCO A, DI STASIO M, DELLA VECCHIA P, et al. Automatic Modeling of Aircraft External Geometries for Preliminary Design Workflows[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 98: 105667.
- [14] RODRÍGUEZ S, CASATI C, BARDERA M, et al. Rapid Parametric CAx Tools for Modelling Morphing Wings of Micro Air Vehicles (MAVs)[J]. Aerospace, 2023, 10: 5.
- [15] 魏斌, 徐华. 基于 Netgen 的四面体网格剖分算法及其应用[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(2): 368-373.
WEI B, XU H. Generation and Application of Tetrahedron Meshing Algorithm Based on Netgen[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(2): 368-373.
- [16] YOU K K, HA J H, LEE S C. An Automated Aerodynamic Analysis System in Missile Based on Open-Source Software[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2023, 24(3): 592-605.
- [17] 杨坤, 张翔戈, 何谿波, 等. 冷链无源蓄冷保温包装温度场研究[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(24): 87-89.
YANG K, ZHANG X G, HE R B, et al. Research on Temperature Field of Passive Cold Storage and Insulation Packaging in Cold Chain[J]. Heilongjiang Science, 2022, 13(24): 87-89.
- [18] 党昕, 孟多, 高慧. 焓法与显热容法在建筑相变蓄热技术数值模拟中的应用[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 188-194.
DANG X, MENG D, GAO H. Application of Enthalpy Method and Apparent Heat Capacity Method in Numerical Simulation for Phase Change Heat Storage Technology in Buildings[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 41(3): 188-194.
- [19] 冯漾漾, 丁浩亮, 严波. 有限体积法注塑稳态模具温度场算法及模拟[J]. 模具技术, 2023(3): 23-28.
FENG Y Y, DING H L, YAN B. Algorithm and Simulation of Temperature Field of Steady-State Injection Mold by Finite Volume Method[J]. Die and Mould Technology, 2023(3): 23-28.