

蓄冷剂摆放位置对保温箱中温度场的影响

潘欣艺^{1,2}, 王家俊¹, 王冬梅²

(1.浙江理工大学, 杭州 310000; 2.深圳职业技术学院, 深圳 518000)

摘要:目的 探讨蓄冷剂摆放位置不同时,保温箱保温过程中内部温度场的分布情况和变化规律。方法 应用有限元法,以 ICEMCFD 建立保温箱基本模型,并通过改变模型内部蓄冷剂的摆放位置建立侧面摆放(2种)、顶部摆放和边缘摆放共 4 种摆放方式。将内部空气的对流换热与箱体的热传导过程统一成一个整体,通过 Fluent 进行热流耦合分析。结果 得到了保温箱内部温度场分布一般规律,蓄冷剂摆放位置不同时温度场分布情况有很大差异,其中边缘摆差异性最大,侧摆次之,顶摆温度场分布最均匀。结论 针对可利用体积、温度场均匀程度、箱内平均温度来说,顶摆方式无疑是最佳的蓄冷剂摆放位置。

关键词:蓄冷剂;摆放位置;保温箱;Fluent;温度场

中图分类号:TB487 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2018)03-0077-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.015

Influences of Ctesms Placement on the Temperature Field of Incubator

PAN Xin-yi^{1,2}, WANG Jia-jun¹, WANG Dong-mei²

(1.Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310000, China; 2.Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the distribution and change law of the temperature field inside the incubator during its thermal insulation when the ctesms is placed at different positions. The fundamental model of incubator was established in the finite element method by ICEMCFD, and four kinds of layouts were built by changing the placement of the ctesms inside the model, including the side placement (two kinds), top placement and edge placement. The convective heat transfer of internal air and heat conduction of box were unified as a whole to carry out the thermal-fluid coupling analysis by Fluent. The general rule of temperature field distribution inside the incubator was obtained. With the different positions of the ctesms, temperature field distribution was very different when the edge placement was of the biggest difference, followed by the side placement. The temperature field of top placement was distributed the most uniformly. In terms of available volume, temperature field uniformity and average temperature inside the incubator, it is no doubt that the top placement is the best choice for the ctesms.

KEY WORDS: ctesms; placement; incubator; Fluent; temperature field

20 世纪 80 年代初,保温箱在发达国家发展迅速,作为一种高效冷链物流设备,其箱体使用导热系数极低的保温材料,箱体内部则使用蓄冷剂维持箱内的低温状态,保温箱无需在运输过程中使用制冷机就可以维持长时间的保冷,使冷链运输过程更为便捷^[1]。国内外关于保温箱保温情况的研究最早是采用实验的方法,但该方法成本较高且实验烦琐,有的无法进行实验研究。随着计算机技术的发展,采用数值模拟方

法进行保温箱保温情况的研究成为首选,国内外学者运用各类软件进行了许多研究^[2]。营宗昌等利用 Ansys 软件对常见的保温箱进行了有限元分析,探讨了保温箱的材料厚度、材料导热系数、内外温度差对保温时间的影响^[3]。Singh 等对保温包装材料、复合包装形式、蓄冷剂等进行了综合评价,指出产品的包装方案必须保持在一个特定的温度范围内^[4]。Laguerre 等使用 CFD 软件开发了一种冷链物流运输

收稿日期:2017-07-24

作者简介:潘欣艺(1992—),男,浙江理工大学硕士生,主攻包装材料。

通信作者:王家俊(1963—),男,博士,浙江理工大学教授、博导,主要研究方向为可降解包装材料、高分子与复合材料。

保温箱内部温度预测模型^[5]。上述研究并未考虑保温箱内部空气流动情况对保温效果的影响,所使用的模拟软件也无法模拟复杂的流体传热模型,因此,使用专业流体仿真软件 Fluent 对保温箱的内部传热情况进行分析,则可以得到保温箱内部温度场的分布情况,进一步探讨蓄冷剂摆放位置对温度场的影响。

在冷链运输过程中,保障货物的质量需要保温箱内部具有合适的温度场,因此,为了提升运输过程中的货物质量,保温箱内不能只保证低温环境,还要考虑箱内部温度场的均匀性。实际上,保温箱内部温度的分布是很不均匀的,稳定均匀的温度场对于运输疫苗等对温度要求极高的物品至关重要^[6]。通过文献检索和研究证实,保温箱内部传热介质空气的流动状态和温度变化决定了保温箱内部的温度场^[7-12]。然而,目前保温箱蓄冷剂摆放位置并无统一的规范,使用者极有可能在使用过程中随意摆放蓄冷剂,导致实际货物运输温度并不在所需要的温度范围内。文中以冷链运输过程中典型的保温箱为研究对象,建立其保温段内空气流动与换热的物理模型与数学模型,利用专业流体仿真软件 Fluent 求得保温箱内部温度场的分布情况,进一步研究不同蓄冷剂摆放位置对保温箱内部温度场的影响,从而得到保温效果最好的摆放方式。

1 模型的建立与网络划分

1.1 保温箱物理模型

物理模型以冷链运输常见的保温箱为研究对象,建立一般保温箱保温模型,物理模型见图 1^[13]。

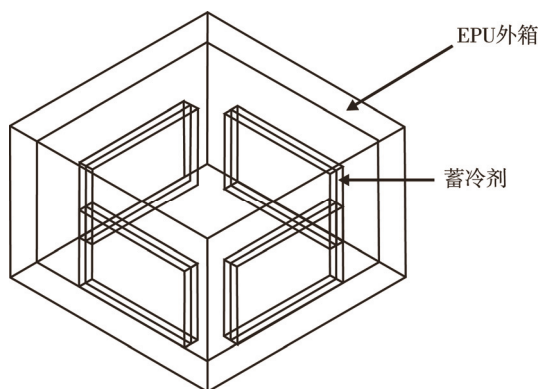


图1 保温箱的物理模型
Fig.1 Physical model of incubator

保温箱箱体材料为发泡聚氨酯(EPU),蓄冷剂使用潜热为335 kJ/kg的盒型蓄冷剂。保温箱外箱尺寸为600 mm×600 mm×400 mm,内箱尺寸为520 mm×520 mm×320 mm,蓄冷剂尺寸为320 mm×20 mm×200 mm,所需材料属性见表1。按照研究对象的真实尺寸,利用ICEMCFD软件建立计算机模型,为确保数值模拟的准确性,采用结构化网络划分。

表1 保温箱各部分材料参数
Tab.1 Parameters of each part of the incubator

参数	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
EPU箱体	0.026	45.0	2400
蓄冷剂	2.2	918	2100
空气	0.023	1.2	1005

1.2 不同蓄冷剂摆放位置模型

依据冷链运输过程中保温箱体积与蓄冷剂的使用量比率,充分考虑箱内可利用体积,保证供货物放置的最大空间,同时也考虑蓄冷量对温度场的影响,为保持蓄冷量的统一,选择同样的8块蓄冷剂在保温箱中摆放4种可行的位置,见图2,摆放方式分别为侧面摆放(2种)、顶部摆放和边缘摆放。

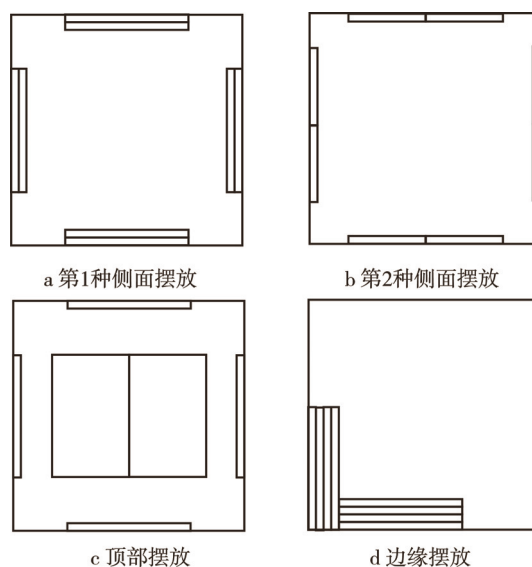


图2 保温箱的4种摆放位置
Fig.2 Four kinds of placement of incubator

2 数值模拟方法

2.1 数学模型

将划分好的网络文件导入 Fluent,并将保温箱外壁与外部空气的对流、保温箱体的导热和保温箱内壁与箱内空气的对流作为一个统一问题同时进行求解^[14-15]。在纯粹的自然对流问题中,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; $Ra > 10^{10}$ 时,自然对流属于湍流。根据模型参数可以计算出内部空气的瑞利数:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho}{v\alpha} = 3.57 \times 10^{10} > 10^{10}$$

式中: L 为定性长度; β 为流体的体积膨胀系数; ΔT 为温度差; v , α 分别为流体的运动粘度和热扩散系

数。可见，模型涉及的自然对流属于湍流，为方便计算，对模型作如下假设：保温箱内部空气视为不可压缩流体，空气流动为自然对流，流动类型为稳态、湍流；由于内部空气流速较低，满足 Boussinesq 假设，即只考虑温度变化引起的密度变化，忽略压强变化引起的密度变化；箱体完全密封，忽略缝隙处的漏气影响；忽略箱体内外壁面的热辐射情况；保温箱与空气的物性参数不随温度的变化而改变。在保温箱内部，笛卡尔坐标下，空气为不可压缩流体，质量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

式中： t 为单位时间； ρ 为流体密度； u, v, w 为 3 个坐标方向的速度分量。该方程表示在单位时间内某个微小单元中，流体质量的增加和在这段时间内流进该微小单元的净质量相等。

动量守恒方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \operatorname{div} U + 2\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \\ & \rho F_x \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \operatorname{div} U + 2\eta \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \rho F_y \\ & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \operatorname{div} U + 2\eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \rho F_z \end{aligned}$$

式中： η 为流体的动力粘度； μ 为流体第 2 分子粘度； p 为作用在单位体积上的面应力； $\operatorname{div} U$ 为二阶对称应力张量的散度； $\rho F_x, \rho F_y, \rho F_z$ 分别为 3 个方向单位体积上的质量力。该方程表示单元中流体动量的增加速率与该单元上所有作用力之和相等。

能量守恒方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} = \\ & -p \operatorname{div} U + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \Phi + S_h \end{aligned}$$

式中： h 为流体比焓； λ 为流体导热系数； $\operatorname{grad} T$ 为传热面法向温度梯度； S_h 为流体内部热源； Φ 为耗散函数，表示因粘性作用，一部分机械能向热能进行

转化。能量守恒方程表示单元内部热力学能的增加等于进入该单元内部的热流量和表面力与体积力做功之和。

对于保温箱体的传热过程，在分析时，可将保温箱体以及蓄冷剂壁面近似认为是一个平滑的壁面，则保温箱的传热量可表示为：

$$\Phi = \frac{\Delta T_b}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{A \Delta T_b}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$$

式中： δ_1, δ_2 为保温箱和蓄冷剂的厚度； A 为保温箱的表面积； λ_1, λ_2 为保温箱的热导率和蓄冷剂热导率； R_i 为总热阻； ΔT_b 为保温箱内外温度差； h_1 为保温箱外部气体对流换热系数； h_2 为保温箱内部气体对流换热系数。

2.2 边界条件的设定

在保温过程中，保温箱不停地与外部环境进行热交换。保温箱内部蓄冷剂发生相变，放出潜热，通过内部空气自然对流形成温度场。根据保温箱实际保温情况采用以下边界条件：保温箱外表面设置为对流换热壁面条件，环境温度设置为 30°C ，对流换热系数为 $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；箱体材料为 EPU，导热系数为 $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；蓄冷剂相变温度为 0°C ；保温箱经过打冷，初始温度设为 10°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。

2.3 测试实验和模拟实验

以第 1 种侧摆为例，将模拟所用保温箱进行实际测试，使用温度记录仪记录保温箱内部 7 个测试点的温度变化情况，实验步骤如下：在电脑上对温度记录仪进行配置，设置记录仪的参数，时间间隔为 1 min ；将温度记录仪的探头固定在相对应的 7 个测试点并密封保温箱，测试点位置见图 3；将密封好的保温箱放入设定温度为 10°C 的恒温恒湿箱中，维持 5 h ；将蓄冷剂放入保温箱，设定恒温恒湿箱温度为 30°C ；当测试实验结束时，关闭温度记录仪和恒温恒湿箱，结束实验并导出数据。

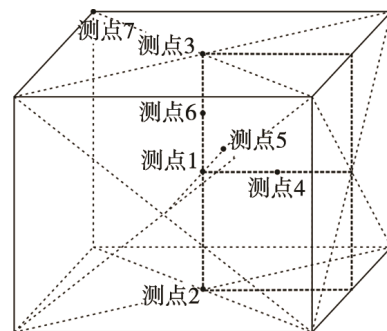


图 3 温度测试点位置

Fig.3 The positions of temperature test points

对建立好的计算机模型按照设定进行计算,根据建立的数学模型,用动量方程、能量方程等描述气体的流动及温度场分布,模型采用稳态不可压缩 N-S 时均方程及标准 *k-e* 模型,将计算结果与测试实验进行比较,之后通过后处理模块对 4 种蓄冷剂不同摆放位置模型的温度场情况进行观察。

3 数值模拟结果与分析

3.1 测试与模拟温度场的对比及分析

测点 1、测点 2 和测点 3 的温度变化曲线见图 4,根据蓄冷剂相变原理,可将保温过程分为 2 个阶段:蓄冷剂相变释冷阶段,即蓄冷剂发生相变,从固态变为液态,该阶段蓄冷剂温度始终维持在 0℃;蓄冷剂显冷释放阶段,即蓄冷剂融化完全,温度开始大幅上升。

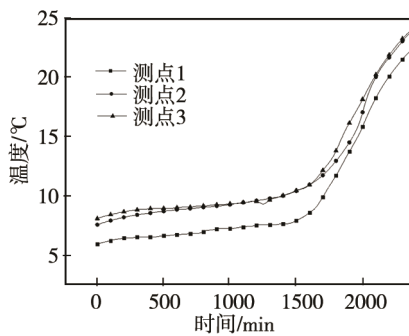


图 4 温度变化曲线
Fig.4 Curve of changing temperatures

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,因此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。据此将蓄冷剂相变释冷阶段 7 个测点位置的温度取平均值与模拟温度进行对比(前 1500 min 为蓄冷剂相变释冷阶段时间),见图 5。

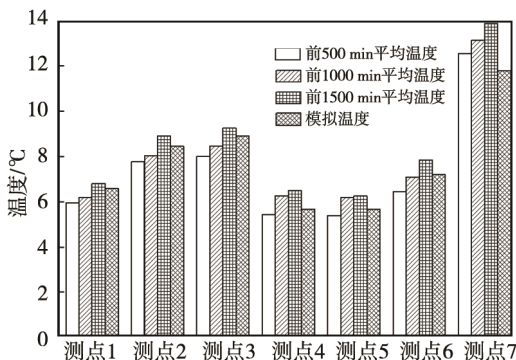


图 5 模拟温度与实际温度对比
Fig.5 Comparison of simulated temperature and actual temperature

由图 5 可知,在前 1500 min 蓄冷剂相变释冷阶段,实际温度与模拟温度差距较小,且模拟时的各个测点位置的温度分布与测试情况基本接近,除测点 7 以外,各测点模拟偏差在 10%之内。测点 7 模拟温度与实际温度差距比其余测点略大,考虑到测点 7 位置在箱盖密封薄弱处,漏热较为严重,偏差处于可接受范围内,因此,可认为该计算模型能较为准确地预测医药保温箱内的温度分布。

温度场分布见图 6,可以看出,外界热空气通过与 EPU 箱壁的热传导与对流换热,将热量传到保温箱内部,并在 EPU 箱体形成极大的温度梯度,证明了 EPU 优良的隔热性能。蓄冷剂与保温箱内壁产生的温差引起了保温箱内部空气的自然对流,使保温箱内部产生不均匀的温度分布,由于内部蓄冷剂释放潜热,蓄冷剂温度始终维持在 0℃,外界施加的热负荷未变,内部温度场稳定,不随时间变化而改变。除去紧邻保温箱内壁的温度边界层,大部分范围内温度呈层状分布,蓄冷剂附近的温度在整个流场内总是最低的,最低温度接近蓄冷剂表面温度 0℃,温度较高的区域位于靠近保温箱内壁且远离蓄冷剂的地方。蓄冷剂附近的温度梯度较大,这是因为空气受到蓄冷剂冷却作用最强,蓄冷剂与周围的热空气存在较大温差,不断进行换热,流速相对较大,换热剧烈,因而形成较大的温度梯度。

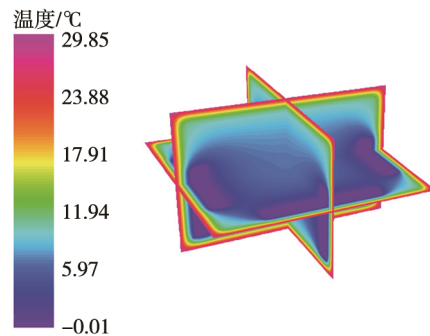


图 6 温度场分布

Fig.6 Distribution of temperature field

3.2 不同蓄冷剂摆放位置对温度场的影响

由于蓄冷剂摆放位置的不同,内部空气与蓄冷剂和保温箱内壁的换热情况大不相同,导致保温箱内部温度场分布情况有较大差异。这里仅选取 4 种摆放位置,即 *x* 轴坐标分别为 0.1, 0.3 和 0.5 m 的 3 个 *yOz* 平面的温度场截面,见图 7。

其他条件一样的情况下,蓄冷剂的摆放位置对温度场具有极大程度的影响。在边缘摆放的情况下,由图 7a 可以清晰地看到温度场分布极不均匀,远离蓄冷剂的区域温度急剧上升。这是因为边缘摆放时,内部空气大部分接触面积与内壁的高温区域直接进行换热;与蓄冷剂直接接触的空气面积小,且与接触内

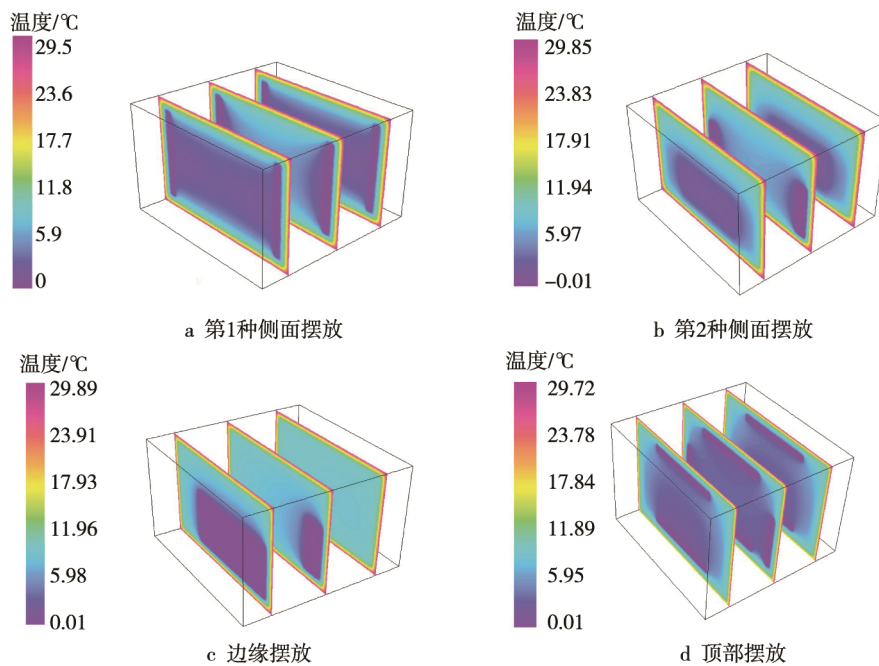


图 7 温度场截面

Fig.7 Section of temperature field

壁的空气距离过于遥远。可以看到，2 种侧面摆放的情况较为相似，温度场相对于边缘摆放较为均匀，但在顶部与底部由于没有蓄冷剂，导致顶部与底部温度较高。顶部摆放的情况下，温度场温度极为均匀，且温度最接近蓄冷剂本身的温度，这是由于保温箱 6 个内壁大部分都被蓄冷剂所覆盖，避免了内部空气与高温内壁直接接触。

考虑到充分利用保温箱内的有限空间，将不包括保温箱体和蓄冷剂的六面体方腔视为可利用体积，坐标 (0.3 m, 0.3 m, 0.2 m) 视为中心点，在可利用体积范围内，通过垂直于中心点的 x 轴、 y

轴和 z 轴 3 个方向观察平均温度分布。不同摆放位置时温度分布情况见表 2，结果表明，第 2 种侧面摆放可利用体积最大，其余 3 种方式可利用体积大致相等。顶部摆放时，其中心点温度远远小于边缘摆放和侧面摆放；3 个坐标方向的平均温度中，顶部摆放的平均温度小于侧面摆放，边缘摆放的平均温度最高；顶部摆放的温度场均匀程度最高，侧面摆放次之，边缘摆放温度梯度极大。蓄冷剂温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，从 3 个方向上都可以观察到顶部摆放的温度最低，最接近蓄冷剂自身的温度，可以使货物保持更低的温度。

表 2 不同摆放位置时温度分布情况
Tab.2 Temperature distribution at different positions

位置	可利用体积/ dm^3	中心点温度/ $^{\circ}\text{C}$	x 轴平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	y 轴平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	z 轴平均温度/ $^{\circ}\text{C}$
边缘摆放	62	7.71	7.53	7.51	8.11
第 1 种侧面摆放	62	6.59	5.16	5.16	7.45
顶部摆放	64.5	3.34	3.16	3.16	2.81
第 2 种侧面摆放	73.7	6.02	4.34	4.34	6.76

4 结语

建立了保温箱保温基本模型，利用了 Fluent 软件基于整体模拟了保温箱保温过程中的温度场分布情况，并对 4 种蓄冷剂不同位置的摆放方式进行了探讨。研究发现，保温箱保温过程中内部温度场分布十分不均匀，蓄冷剂摆放方式对内部温度场影响极大，

从温度场均匀程度和箱内平均温度来说，顶摆方式都是最佳的摆放方式。对于运输医药疫苗等重要货物时，温度段范围要求极高，均匀且接近蓄冷剂温度的温度场十分重要。实际情况下，保温箱不可能完全密封，保温箱顶部承受着巨大的热负荷，此时顶摆方式显得尤为重要。文中讨论的是空箱温度场的模拟，且未考虑实际运输过程中各类复杂的因素以及运载货物的情况，然而，这种基于整体的模拟方法对了解保

温箱的温度场分布有一定的指导意义,4种摆放方式的研究也给保温箱使用者提供了参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 费祥麟. 高等流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.
FEI Xiang-lin. Higher Fluid Mechanics[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1993.
- [3] 菅宗昌, 潘瞭, 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 阎海燕, 买合苏旦·沙迪克, 热西丹·买买提, 等. 医用药品冷藏箱内温度均匀性考察[J]. 中国药房, 2012, 37: 3545—3546.
YAN Hai-yan, MEHESUDAN S, REXIDAN M, et al. Temperature Uniformity Test of Medical Deepfreeze Case[J]. China Pharmacy, 2012, 37: 3545—3546.
- [7] ERSIN A, MEHMET A E, NURI K, et al. Flow and Heat Transfer Characteristics of an Empty Refrigerated Container[J]. Progress in Energy, 2014, 62(1): 641—652.
- [8] MOUREH J, TAPSOBA S. Air Velocity Characteristics within Vented Pallets Loaded in a Refrigerated Vehicle with and without Air Ducts[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 641—652.
- [9] 田津津, 王飒飒, 张哲, 等. 冷藏集装箱内部流场的动态数值模拟与验证[J]. 食品与机械, 2016(4): 136—142.
TIAN Jin-jin, WANG Sa-sa, ZHANG Zhe, et al. Dynamic Numerical Simulation and Experimental Research on Internal Flow Field of Refrigerated Containers[J]. Food & Machinery, 2016(4): 136—142.
- [10] 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 Cabins[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2015.
- [11] RODRIGUEZBERMEJO J, BARREIRO P, ROBLA J I, et al. Thermal Study of a Transport Container[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 17—527.
- [12] 张哲, 郭永刚, 田津津, 等. 冷板冷藏汽车箱体温度场的数值模拟及试验[J]. 农业工程学报, 2013(S1): 18—24.
ZHANG Zhe, GUO Yong-gang, TIAN Jin-jin, et al. Numerical Simulation and Experiment of Temperature Field Distribution in Box of Cold Plate Refrigerated Truck[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013(S1): 18—24.
- [13] 陈志强, 王久龙, 赵新伟. 冷链无源保温箱保温性能试验方法概述[J]. 绿色包装, 2016(2): 56—60.
CHEN Zhi-qiang, WANG Jiu-long, ZHAO Xin-wei. Cold Chain Passive Insulation Packaging Insulation Performance Test Method Overview[J]. Green Packaging, 2016(2): 56—60.
- [14] 杨小川. 复杂热环境中大型薄壳体内的自然对流数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
YANG Xiao-chuan. Numerical Simulation of Natural Convection Inside Huge Thin-skin Enclosures Exposed to Complicated Thermal Environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [15] 李明. 大温差封闭腔体自然对流数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
LI Ming. Numerical Simulation of Large-temperature-difference Natural Convection in the Enclosed Cavity [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.