

基于辐射传热网络法的冷箱贮存时间理论建模与验证

傅志强^A, 刘浩哲^A, 段丽颖^B, 黄丽强^A, 王燕^C

引用本文: 傅志强、刘浩哲、段丽颖、黄立强和王燕 (2024) 在冷箱贮存时间理论建模与验证方面, 基于网络辐射换热方法进行了数值模拟研究 (32 卷 2 期: 203-221 页, DOI: 10.1080/10407782.2023.2181244)。

文章链接: [HTTPS://DOI.ORG/10.1080/10407782.2023.2181244](https://doi.org/10.1080/10407782.2023.2181244)

基于辐射传热网络法的冷箱贮存时间理论建模与验证

傅志强^A, 刘浩哲^A, 段丽颖^B, 黄丽强^A, 王燕^C

^A 天津科技大学轻工业科学与工程学院, 天津中国。 ^B 唐山学院交通与车辆工程系, 河北。 ^C 天津科技大学机械工程学院, 天津

摘要:

冷藏箱的贮存时间是一个重要的课题。目前, 存储时间的研究方法主要是实验, 理论研究不完整。因此, 本文提出了结合辐射传热网络法、热传导形状因子和制冷剂显热的理论建模方法来计算不同环境温度和制冷剂用量下冷箱的贮存时间。实验和仿真结果验证了存储时间的理论模型。分析了冷箱内制冷剂的显热和辐射传热的影响。通过对不同冷箱和制冷剂材料的仿真, 研究了理论模型的稳定性。理论模型的精度结果证实, 理论与实验存储时间的最大误差为 8.45%, 理论与模拟结果的最大误差为 7.51%, 说明制冷剂的显热和辐射传热对存储时间的影响较大。在不同箱体和制冷剂材料、不同制冷剂形状下, 验证了理论模型的稳定性。存储时间模型对不同的箱体材料和制冷剂材料具有稳定性。该理论模型可作为冷箱生产设计的根本指导。

文章历史

2022 年 10 月 13 日

2023 年 2 月 6 日修订

2023 年 2 月 9 日接受

关键字

冷芯盒; 流利的; 网络辐射换热法; 形状系数; 存储时间。

1 光谱学介绍

冷箱可以保证冷链运输的完整性; 因此, 它在冷链运输中起着重要的作用 [1]。根据能量守恒原理, 将制冷剂中热能和机械能的变化与传热过程中热流的比值表示为制冷剂的贮存时间 [2]。冷箱内热能和机械能的变化主要是由制冷剂的吸热决定的。制冷剂所用的材料主要是相变材料。相变材料吸收热量的方式有显热和潜热两种 [3]。显热是制冷剂因环境温度升高而对环境变化的响应, 主要发生在制冷剂的固相或液相 [4]。潜热是由于制冷剂的形态转变和

从周围环境中吸收热量而产生的，发生在相变阶段术语。制冷剂[5]。BAI 等[6]、JIA 等[7]在计算储存时间时采用相变潜热。目前还没有考虑制冷剂显热的冷箱贮存时间的研究。因此，本文将考虑固体感热和不考虑固体感热建立的理论模型与实验结果进行对比，分析制冷剂固体感热对贮存时间的影响。

A_i, A_j, A_k	I, J, K 的表面积	l	内边长
A_{wall}	内表面积	M	制冷剂质量
A_1	制冷剂的区域	$S, S_{corner}, S_{edge}, S_{wall}$	形状因子
A_2	冷箱顶表面积	T_s	相变温度
A_3	冷箱侧翼区域	T_{sur}	环境温度
B, Z	I 和 j 曲面的宽度	T_0	制冷剂初始温度；
c	制冷剂比热	x	墙体厚度
C	两个平面的共同边长，	X, Y	I 面的长度 m 和宽度 m
E_g	额外热能	$X_{i,j}$	视角系数
E_{in}	外界进入冷箱的能量	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	辐射系数
E_{out}	能量从冷箱传递到外部世界	σ	斯蒂芬玻尔兹曼常数
h_{sf}	潜热	ΔE_{st}	冷箱中热能和机械能的变化
k	冷箱导热系数	$\Delta t, \Delta t_0$	存储时间，s
L	两平行平面间的距离	\emptyset	热传导的热流

热传递是通过传导、对流和辐射进行的。SONG 等[5]和 RYMS 和 LEWANDOWSKI[8]由于冷箱内气流不明显，忽略了冷媒放置在底部时冷箱内的对流换热。本文采用不同的流体流动模型对培养箱的温度场分布进行模拟，分析对流换热是否可以忽略。冷箱内的传导主要是由箱体两侧温度分布的变化引起的。DU 等[9]和 ZHAO 等[10]研究了传导传热计算中的有效传热面积。WANG 等[11]利用形状因子将冷箱的三维模型划分为各种二维传热进行计算。冷箱内的导热传热起主导作用[3, 5, 12]。TAN 等[13]和 XIAOFENG 和 XUELAI[14]在计算中只采用了传导传热，忽略了辐射传热，以简化存储时间的计算。然而，SHARMA 等[15]和 PAQUETTE 等[16]发现，当冷箱内外温差较大时，通过在冷箱内壁添加铝箔，冷箱内的辐射换热对箱内温度有显著的影响。因此，本文研究了辐射换热对保温性能的影响。

对冷箱辐射的理论研究主要认为是冷箱内部的黑体辐射[16]。然而，辐射传热与平面之间的距离有很大关系[17, 18]。近似的黑体辐射计算方程有一定的局限性。黑体辐射计算方程没有考虑不同位置的辐射换热计算。因此，在本工作中，在类比电路中通过电流和电压根据温度边界对冷箱进行划分，并引入与两面距离相关的视觉系数建立辐射传热网格。根据基尔霍夫电流定律[19]，在辐射换热网法中，流入各节点的总电流和各节点的总辐射热流密度均为零。

在冷箱模拟中，可以通过软件模拟温度分布和储存时间，可以大大减少

时间、人力、物力。在冷箱中选择计算流体力学(CFD)模型是必要的。AMBAW 等[20]和 ZHANG 等[21]根据总结的不同 CFD 模型,发现冷箱更适合层流模型。辐射模型的选择是辐射传热数值模拟中的一个主要问题[22, 23]。FLUENT 软件中的离散坐标(DO)辐射模型覆盖了整个光学厚度,可以求解表面到表面(S2S)辐射[24]。ZHAO 等[22]和 YU 等[25]发现在 FLUENT 中加入 DO 辐射模式可以更准确地模拟冷箱的保温性能。而 WU 和 ZHANG[26]采用 S2S 辐射模型对冷箱的保温性能进行了分析。不同的辐射模式对冷箱储存时间和温度分布的影响鲜有报道。本文分析了添加 S2S 辐射模型或 DO 辐射模型对冷箱储存时间和温度分布的影响。

在本研究中,建立了储存时间与辐射传热的理论模型,分析了辐射传热和显热对冷箱的影响。引入形状因子、显热和辐射换热网络法来确定冷箱的储存时间。通过实验和数值结果的对比,验证了存储时间理论模型的准确性。通过不同冷箱和制冷剂材料的仿真建模,验证了理论建模的稳定性,为今后的研究提供了理论依据。

2 方法

2.1 存储时间的理论模型

冷箱由箱体和制冷剂组成。冷箱储存时间是指从将制冷剂放入冷箱到制冷剂相变结束的时间[25]。冷箱中的制冷剂从能量平衡的角度描述如下[19]:

$$\Delta E_{st} = E_{in} - E_{out} + E_g \quad (1)$$

式中 ΔE_{st} 为制冷剂在贮存时间内热能和机械能的变化, E_{in} 为外界进入制冷剂的能量, E_{out} 为制冷剂向外界传递的能量, E_g 为生物呼吸热、燃烧热、电热等额外的热能[19]。

ΔE_{st} 由制冷剂相变潜热和从初始温度到相变温度的显热组成[6]:

$$\Delta E_{st} = M\Delta h_{sf} + cM(T_s - T_o) \quad (2)$$

式中, M 为制冷剂的质量; h_{sf} 为熔化潜热,即每质量固体转化为液体所需的能量; c 为比热容, T_s 为相变温度, T_o 为初始温度。

对于制冷剂,外界进入制冷剂的能量包括换热传导和换热对流,冷库冷箱内的对流换热忽略;如式(3)[27]

$$E_{in} = ks(T_{sur} - T_s)\Delta t \quad (3)$$

其中 Δt 是时间, k 是导热系数, T_{sur} 是环境温度, T_s 是制冷剂的相变温度, s 是形状因子。冷箱中 s 的表达式为[11]:

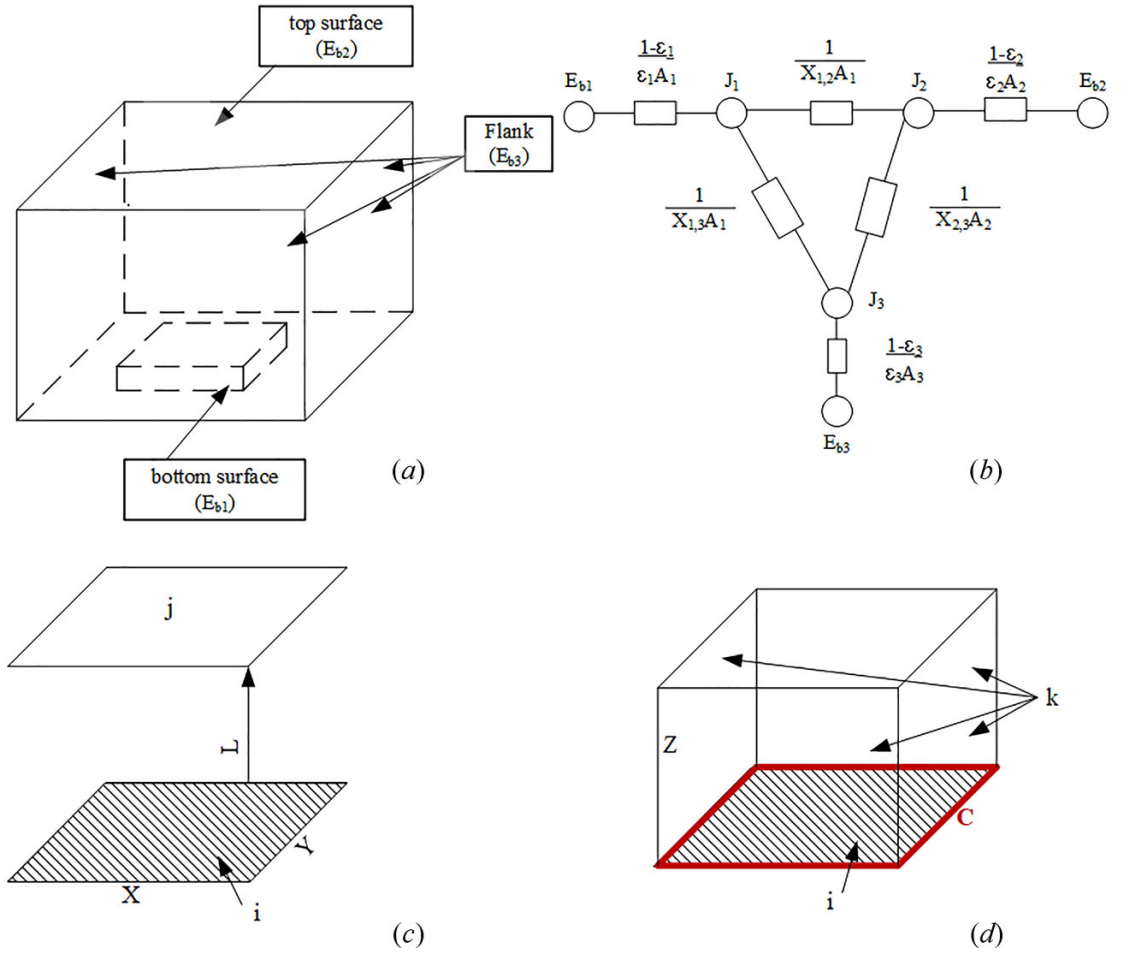


图 1 所示:冷箱辐射换热网络计算方法, (A)冷箱温度边界划分, (B)三面封闭腔等效网络图, (C)两个平行矩形参数, (D)相互垂直的共边矩形参数

$$S = S_{corner} + S_{edge} + S_{wall} \quad (4)$$

$$S_{corner} = \sum 0.15L \quad (4a)$$

$$S_{edge} = \sum 0.54l \quad (4b)$$

$$S_{wall} = \sum \frac{A_{wall}}{L} = \frac{\sum A_{wall}}{L} \quad (4c)$$

式中 L 为壁厚, l 为冷库培养箱内壁长度, A_{wall} 为内表面积。对于制冷剂, 从制冷剂内部向外部释放的能量包括辐射换热和换热对流, 忽略冷库冷箱内的对流换热, 如式 (5) 所示[27]:

$$E_{out} = E_{rad} \quad (5)$$

在辐射计算中, 采用地对地辐射建立理论模型。整个冷箱按温度边界分为三个面, 即底部、顶部、侧面。采用辐射换热网络法进行计算, 如图 1 所示[19]三个表面形成一个封闭的腔。根据基尔霍夫电流定律, 每个节点处的辐射热流为 0, 可以构造三个方程:

$$\begin{cases} \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} + \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{X_{1,2} A_1}} + \frac{J_3 - J_1}{\frac{1}{X_{1,3} A_1}} = 0 \\ \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{X_{2,1} A_2}} + \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} + \frac{J_3 - J_2}{\frac{1}{X_{2,3} A_2}} = 0 \\ \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{X_{3,1} A_3}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{X_{3,2} A_3}} + \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_3}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中： J_1 为有效辐射， ε_1 是冰的发射率， ε_2 是 XPS 的发射率为透视系数[19]， $E_{b1} = T_s^4 \sigma$, $E_{b2} = E_{b3} = T_{sur}^4 \sigma$, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$; $\varepsilon_1 = 0.96$, $\varepsilon_2 = 0.90$ 。式中 $X_{i,j}$ 为透视系数[19]，为*j*面拦截*i*面辐射的比例。两个排列整齐的平行矩形的视觉系数表示为[19]：

$$X_{i,j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \begin{aligned} & \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{\frac{1}{2}} + \\ & \bar{X}^{(1+\bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{X}}{(1+\bar{Y}^2)^{1/2}} \right)} + \\ & \bar{Y}^{(1+\bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{Y}}{(1+\bar{X}^2)^{1/2}} \right)} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\bar{X} = \frac{X}{L}, \bar{Y} = \frac{Y}{L} \quad (7a)$$

其中， X 和 Y 分别为*i*面(图 1A 底面)的长度和宽度； L 为两个平面之间的距离，如图 1C 所示。共边相互垂直矩形的视觉系数如式(8) [19]所示：

$$X_{i,k} = \frac{2}{\pi W} \left\{ \begin{aligned} & W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - \\ & (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \left(\frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} \right) + \\ & \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(1 + H^2)} \right]^{W^2} \times \right. \\ & \left. \left[\frac{H^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(1 + H^2)} \right]^{H^2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$H = \frac{Z}{C}$, $W = 1$ (8A)，其中 Z 为第*k*个面(图 1A 中的侧面)的宽度， C 为第*i*和*k*个面(图 1A 中的底面周长)的共同边长，如图 1D 所示。视觉系数关系有两种重要关系[19]：一种是交换关系，如式(9)，另一种是求和关系，如式(10)：

$$A_i X_{i,j} = A_j X_{j,i} = A_k X_{k,i} \quad (9)$$

其中 A_i 是*i*的表面积， A_j 是*j*的表面积， A_k 是*k*的表面积。

$$\sum_{j=1}^N X_{i,j} = 1 \quad (10)$$

其中 N 是辐射到每个表面的 i 的个数。如果 i 是一个单曲面，那么 $X_{i,j} = 0$ 。

E_{b1} 与 J_1 之间的差值与 $\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}$ 的比值是制冷剂的辐射热流。制冷剂的辐射是辐射热流与储存时间的乘积[19]，如式(11)所示：

$$E_{rad} = \frac{|E_{b1} - J_1|}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} \Delta t \quad (11)$$

式(1)中制冷剂不产热,因此, $E_g = 0$ 。新的存储时间模型结合方程。(1)–(3)及(12)条款如下：

$$\Delta t = \frac{M\Delta h_{sf} + cM(T_s - T_o)}{kS(T_{sur} - T_s) - \frac{|E_{b1} - J_1|}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}}} \quad (12)$$

误差是求和关系，如等式。(13)、(14)：

$$\text{ERROR} = \frac{|\Delta t - \Delta t_0|}{\Delta t_0} \times 100\% \quad (13)$$

式中 Δt 为理论模型的存储时间； Δt_0 为实验保存时间。

$$\text{ERROR} = \frac{|\Delta t - \Delta t_{t1}|}{\Delta t_{t1}} \times 100\% \quad (14)$$

其中 Δt_{t1} 为模拟的存储时间

2.2 有限元仿真模型描述

2.2.1 物理模型

使用 CREO2.0 建立了冷箱的物理模型。所述箱体的三维结构，包括位于外部的箱体、位于箱体底部的制冷剂部件以及围绕制冷剂的空气部件，如图 2 所示。冷箱的内部尺寸为 350MM×250MM×250 MM。壁厚为 30MM。不同尺寸的制冷剂如表 1 所示。

表 1: 不同情况下制冷剂的大小

Refrigerant (piece)	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
24	130	130	25
48	180	180	
72	220	220	
96	275	250	

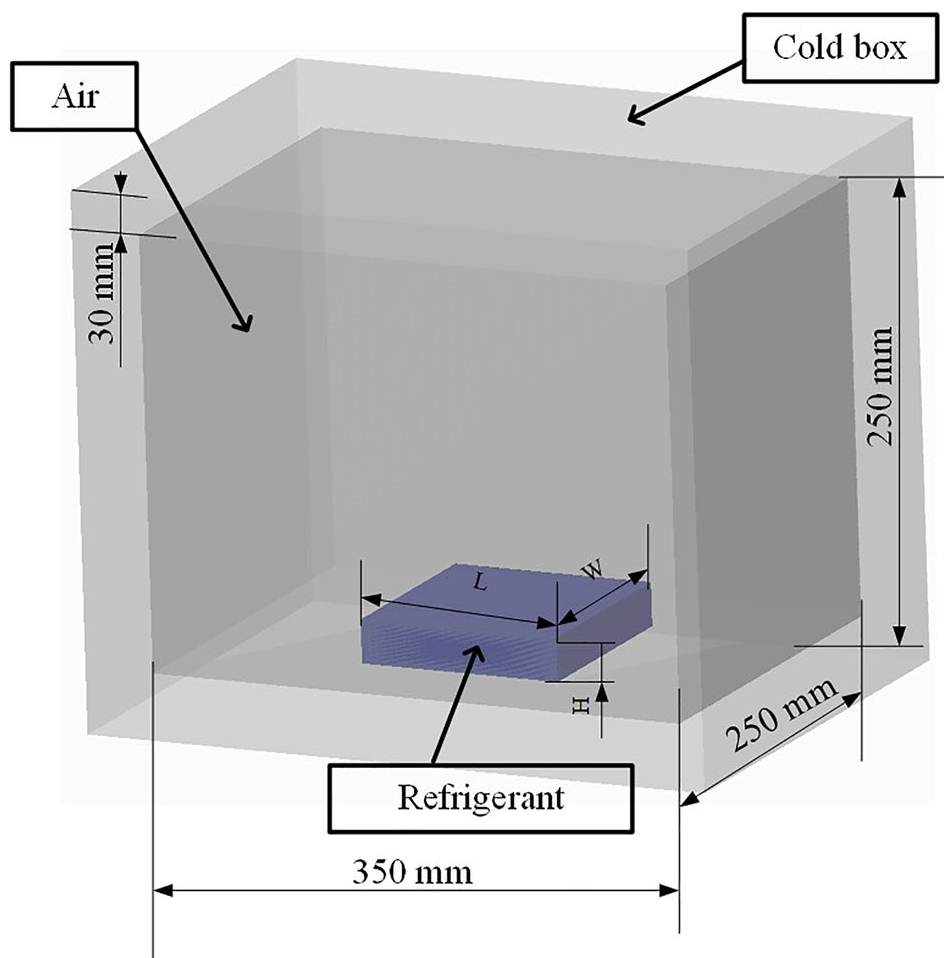


图 2:冷箱模型示意图

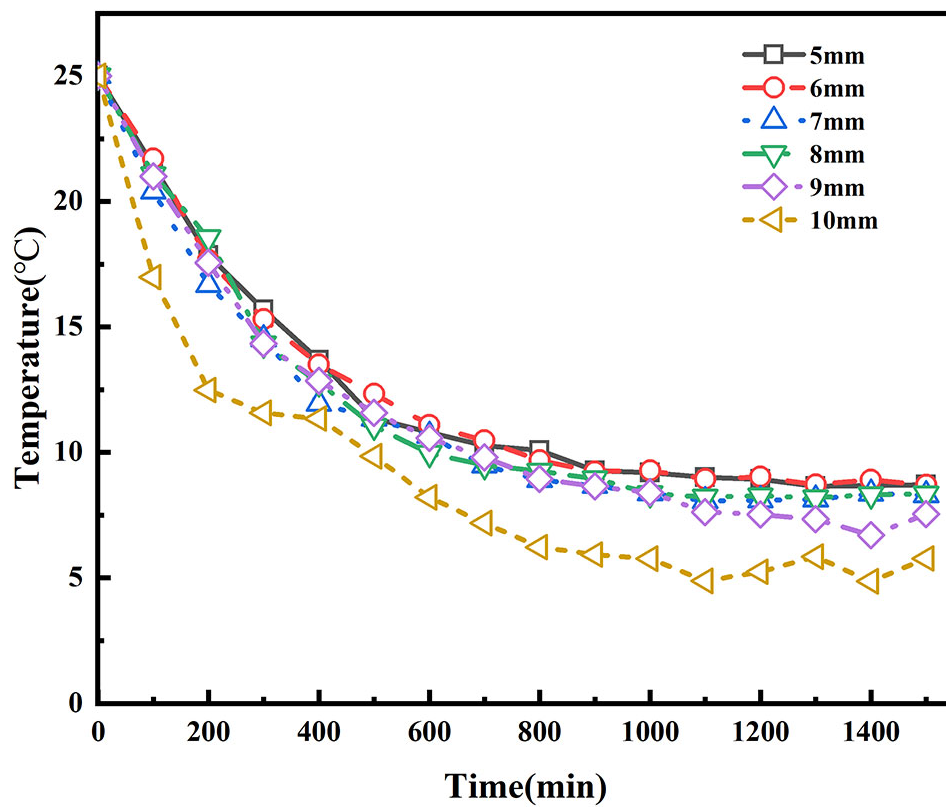


图 3:网格独立性验证

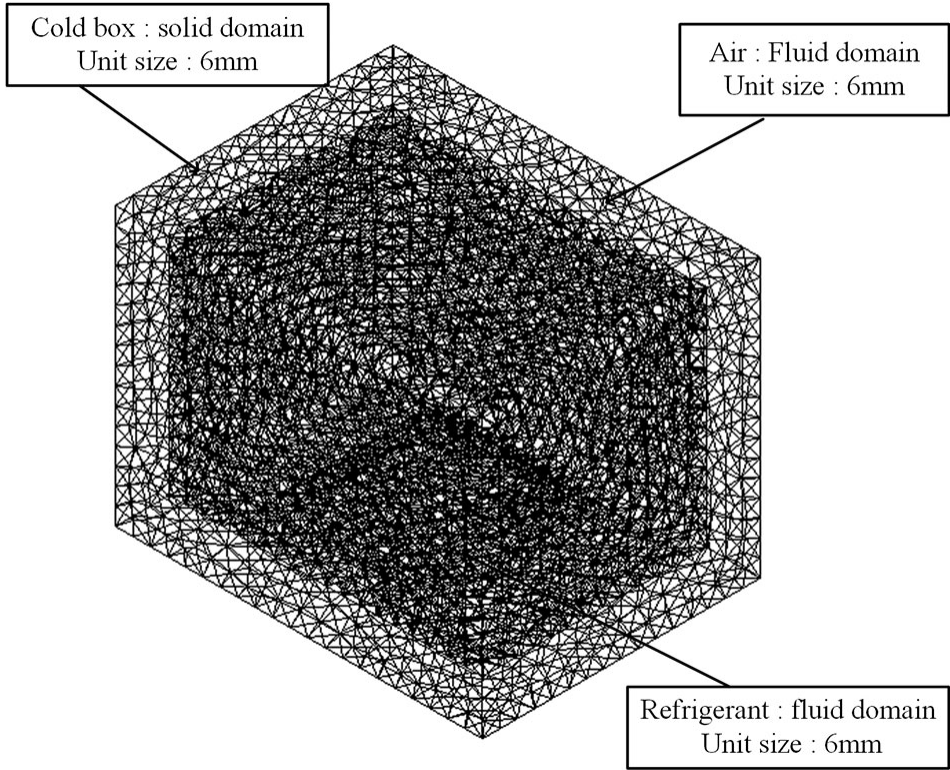


图 4:冷箱的啮合

采用 CFD ICEM 进行网格划分。分网时，冷箱内的空气部分需要仔细隔开。网格独立验证是减少计算量和时间的必要手段。在不同网格尺寸的有限元模拟结果中提取冷箱中点进行结果分析。网格独立性结果如图 3 所示。当网目尺寸减小到 6MM 时，网目尺寸继续缩小。此时，有限元模拟结果的波动较小，且较小生成的细微差别可以忽略。如图 3 所示，经网格独立性验证，空气部分的网格尺寸为 6MM。为了保证仿真结果的收敛性，另外两个部分的网格尺寸与空气部分的网格尺寸一致。使用六面体网格。冷箱网格划分结果如图 4 所示。

表 2:箱体各部分的材料特性

Materials	Thermal conductivity (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	Density (kgm ⁻³)	Specific heat (Jkg ⁻¹ °C ⁻¹)
XPS	0.03	33	1500
Refrigerant	2.22	900	2100
Air	0.024	1.161	1006

表 3:计算模块设置

Models	Details
Energy equation	Open energy equation, melting, and soilding
Viscous	Laminar
Radiation	S2S model and off solar load
Gravity	9.81 ms ⁻²
Boundary conditions	The no-slip boundary is used on all wall surfaces. The thermal conditions of the outer wall of the cold box are set to temperature, and the values are consistent with the ambient temperature of 25 °C, 35 °C, and 45 °C. The other boundary conditions are coupled.
Monitors	Temperature monitoring points are set in the middle of the cold box, the middle of the cold box and the middle of the top surface of the cold box, and the recording frequency is the length of each step
Time step size	60 s
Maximum number of iterations	20

2.2.2 仿真模型的设置

建立了描述箱体内部温度的有限元模型。盒子内的每个项目都被视为一个连续体。该模型考虑了箱体三维传热的复杂性。该模型的主要假设如下:1. 冷箱被认为是完全密封的, 墙壁之间的缝隙被忽略。2. 计算采用 BOUSSINESQ 假设[28]。每一种物理性质都被视为一个常数, 在这个过程中不会改变。3. 在相变过程中制冷剂的体积变化被忽略。

数值模型采用 ANSYS FLUENT19.2 实现。动量方程和体积分数采用二阶迎风方法进行空间离散, 时间项采用隐式格式进行离散。采用相耦合 SIMPLEC 算法推导了压力-速度耦合方程。压力的解决方法是“标准的”。其他设置的细节如表 3 所示。

2.3 实验分布

2.3.1 实验材料及设备

冷箱材质、空气材质、制冷剂材质如表 2 所示。温度对 XPS 导热系数的影响不显著[29]。

表 4: 设备的信息和使用

Equipment	Serial number	Manufactures	Use
Multichannel temperature tester	AT4508-128	Changzhou Anbai Precision Instrument, China	Record the temperature change inside the cold box in real time.
Constant temperature and humidity chamber	ETH-408-40-CP-AR	Jufu Instrument, China	Simulate the environmental temperature and humidity during transport
Refrigerator	MDF-339-C	Dalian Sanyang Cold Chain, China	Freeze the refrigerant
Sawing machine	BSM-400	Tianjin Zhihua Mechanical Electronics, China	Cut XPS plates

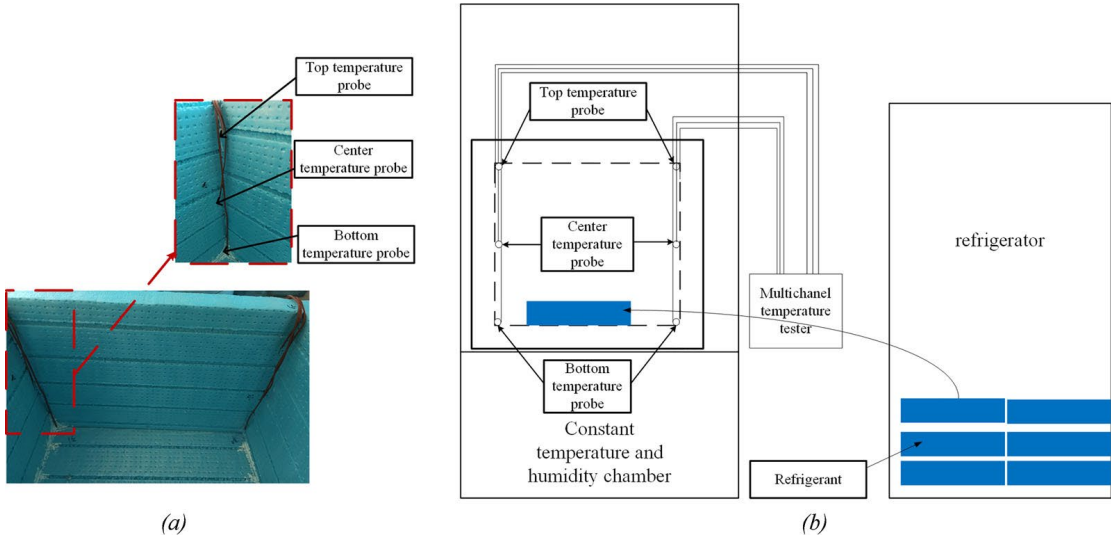


图 5: 温度探头在冰箱内的固定位置: (A) 实验图, (B) 实验示意图

冷藏箱的尺寸是 350MM×250MM × 250 MM, 壁厚为 30MM。制冷剂规格如表 1 所示。实验设备及使用情况见表 4。多通道温度测试仪的温度为 0.1℃。

2.3.2 实验方法

2.3.2.1 预处理

- 1. 将 XPS 冷箱放置在设定环境下的恒温恒湿箱内温度 24 小时。将制冷剂置于 25 摄氏度的冰箱中 24 小时。
- 2. 多路温度测试仪的探头固定在盒子的底部、中央和顶部，如图 5 所示。

2.3.2.2 实验步骤

- 1. 多通道温度测试仪的 12 个探头固定在箱内。四个探头放置在制冷剂中，然后放置在恒温（25 摄氏度）和湿度箱中（50%）持续 24 小时。将 24 种边长为 25MM 的制冷剂放在 25℃ 的温度下冰箱，预处理 24 小时，冷冻。
- 2. 连接多通道温度测试仪，并记录数据。
- 3. 恒温恒湿箱打开，温湿度分别为 25℃ 和 50%。将经过预处理的制冷剂放置在冰箱中，并且使用保鲜膜和胶带来密封冰箱。密封冰箱然后放置在恒温恒湿箱中。
- 4. 当多通道温度测试仪显示箱内温度接近时到设定的环境温度，实验完成，数据导出在计算机中处理。
- 5. 根据步骤（1）-（4），通过改变制冷剂，如表 1 所示。
- 6. 在完成四组 25℃ 和 50%湿度的实验后，温度值变为 35 摄氏度和 45 摄氏度。重复步骤（1）-（5），继续实验直到最后。

表 5 所示:理论和模拟存储时间之间的错误

Ambient temperature (°C)	Refrigerant (piece)	Storage time (min)		Error (%)
		Theory	Simulation	
25	24	221.7	233	4.38
	48	444.53	456	2.38
	72	667.1	632	5.36
	96	889.67	870	2.30
35	24	158.27	166	4.11
	48	317.48	317	0.30
	72	476.46	460	3.66
	96	635.45	647	1.74
45	24	123.03	123	0.67
	48	246.89	237	4.35
	72	370.55	345	8.45
	96	494.21	486	1.74

表 6 所示:理论和实验存储时间不一致

Ambient temperature (°C)	Refrigerant (piece)	Storage time (min)		Error (%)
		Theory	Experiment	
25	24	221.7	234	4.79
	48	444.53	432	30.4
	72	667.1	670	0.36
	96	889.67	854	4.22
35	24	158.27	156	2.04
	48	317.48	314	1.26
	72	476.46	456	4.57
	96	635.45	603	5.43
45	24	123.03	116	6.75
	48	246.89	235	5.24
	72	370.55	342	7.51
	96	494.21	473	4.54

3 结果

3.1 通过有限元仿真验证理论模型的精度

将理论模型的存储时间与仿真结果进行对比, 如表 5 所示。从仿真结果与理论模型对比表 4 可知, 存储时间的最小误差为 0.30%, 最大误差为 8.45%。数值结果与理论结果之间的误差是由于模拟模型中考虑了对流换热和重力对换热的影响, 而理论模型中没有考虑对流换热和重力对换热的影响。仿真结果得到的时间比理论模型要长得得多。因此, 理论模型比仿真模型具有更好的计算速度。

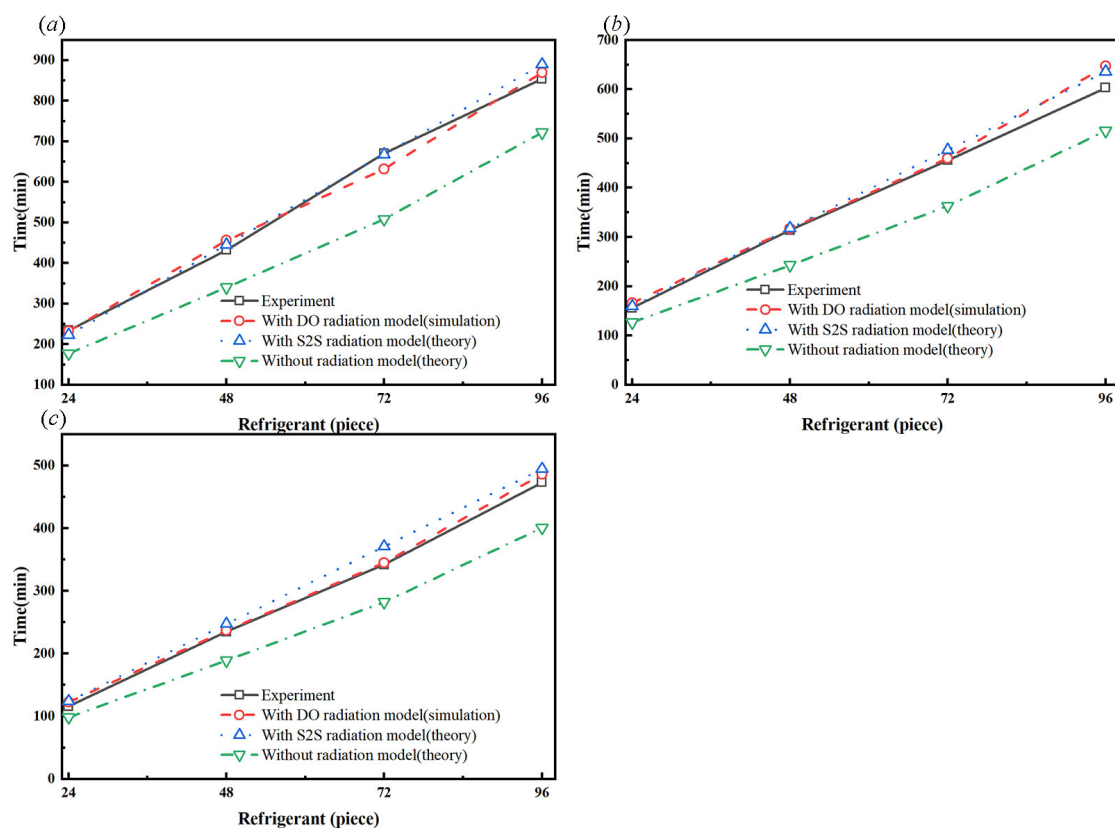


图 6: 辐射传热对冷箱在 (A) 25℃、(B) 35℃和 (C) 45℃下储存时间的影响

3.2 通过实验验证了理论模型的准确性

将理论建模的存储时间与实验结果进行对比, 如表 6 所示。根据表 6 中实验结果与理论模型计算结果的对比, 贮藏时间的最小误差为 0.36%, 最大误差为 7.51%。实验和理论结果的误差是由于温度对材料导热性的影响以及生产过程中冷箱没有绝对密封影响实验结果。

综上所述, 理论模型计算的储热时间与实验储热时间是一致的。

4 讨论

4.1 辐射传热对冷箱的影响

4.1.1 冷藏箱的存放时间

冰的相变温度为 0°C 。由于实验准确性的影响设备，实验的储存时间是制冷剂达到 0.1°C 的时间[25]。为了分析辐射传热对冷藏箱储存时间的影响将不同辐射传热模型的时间结果与实验结果进行了比较在图 6 中的不同制冷剂量和不同环境温度下。存储器没有辐射传热的时间结果与实验结果有很大不同。然而，考虑辐射传热的储存时间结果与实验结果一致，表明辐射传热对冷藏箱储存时间的影响不能被忽略。

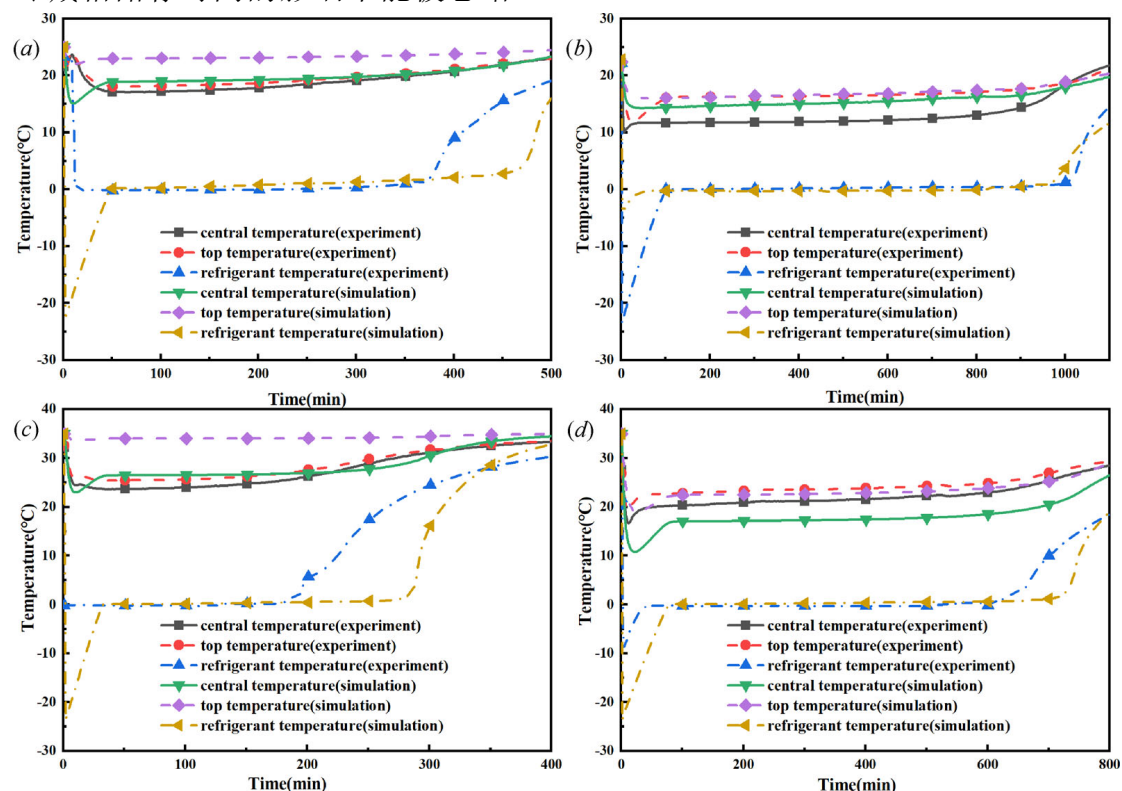


图 7: 模拟温度和实验温度的比较: (A) 25°C 下的 24 种制冷剂、(B) 25°C 时的 96 种制冷剂，
(C) 24 种 35°C 下的制冷剂和 (D) 96 种 35°C 的制冷剂。

4.1.2 温度分布

使用二十四种和九十六种制冷剂来获得的模拟温度结果制冷剂、冷箱顶部和冷箱中心温度分别为 25°C 和 35°C 。模拟结果和实验结果进行了比较，如图 7 所示。中间和模拟结果中冷箱的最高温度与实验结果相同结果，以及模拟数据与实验数据之间的一致程度良好，表明在模拟模型中加入 DO 辐射模型可以准确预测冷箱内的温度分布。

制冷剂温度曲线的模拟结果与实验结果相反结果，并且模拟显示了过冷现象[30]，因为模拟可以更完全地呈现从 25°C 到 0°C 的温度变化。事实上，这需要时间从冰箱中取出并放入冷藏箱内的制冷剂，用于温度传感器要连接，冷箱要密封，所以实验结果不能达到 25°C ，实验制冷剂的初始温度为 5°C 。这个模拟中冷箱顶部和中部的温度结果小于实验结果。这是因为实验冷箱壁之间的间隙增加了环境和冷箱之间的热传递。

采用数值模拟对冷箱内温度变化进行数值分析，分析 S2S 辐射模型和 DO 辐射模型对冷箱温度的影响。得到温度分布云图，如图 8 所示。研究了辐射对冷箱内温度场分布的影响如图 8A 所示，在不同位置和温度下，冷箱底部聚

集的冷箱低温在图 7 中没有出现。加入 D0 辐射后的温度场分布如图 8B 所示。由于辐射传热向周围扩散，冷箱内的温度场呈现分层现象。当冷媒放置在冷箱底部时，辐射传热是不可忽视的。结合图 7，加入 D0 辐射模型

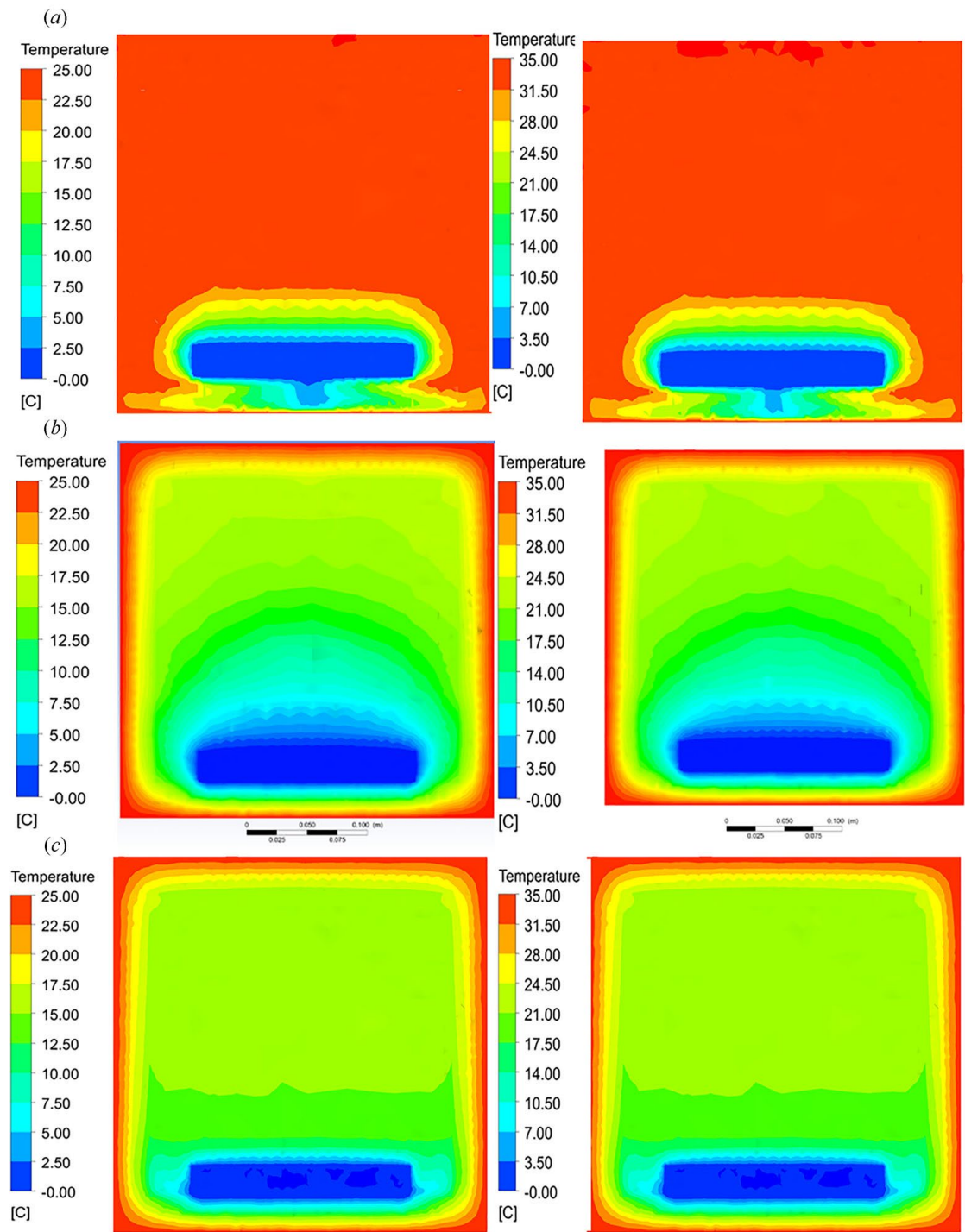


图 8: 温度场云图: (A) 左边没有 25 摄氏度下 96 种制冷剂的辐射模型, 右边没有 35℃下 96 种制冷剂的辐射模型 (B) 左为 25℃下 96 份制冷剂的 D 辐射模型, 右为 D035 摄氏度下 96 种制冷剂的辐射模型, (C) 左边是 25 摄氏度下的 S2S 辐射模型, 右边是 35℃下 96 种制冷剂的 S2S 辐射模型。结合图 7, 加入 D0 辐射模型, 该仿真模型能够准确地预测冷箱内的温度分布。

的加入 S2SRADIATION 模型后，温度分布分层不明显，如图所示如图 8C 所示。带 S2S 的冷箱中部与顶部的温差辐射模型温度为 0.4°C ，顶部温度低于中心温度，分别为与实验结果大相径庭。因此，对于温度分布的添加 DO 辐射模型比添加 S2S 辐射模型分布更准确模型。

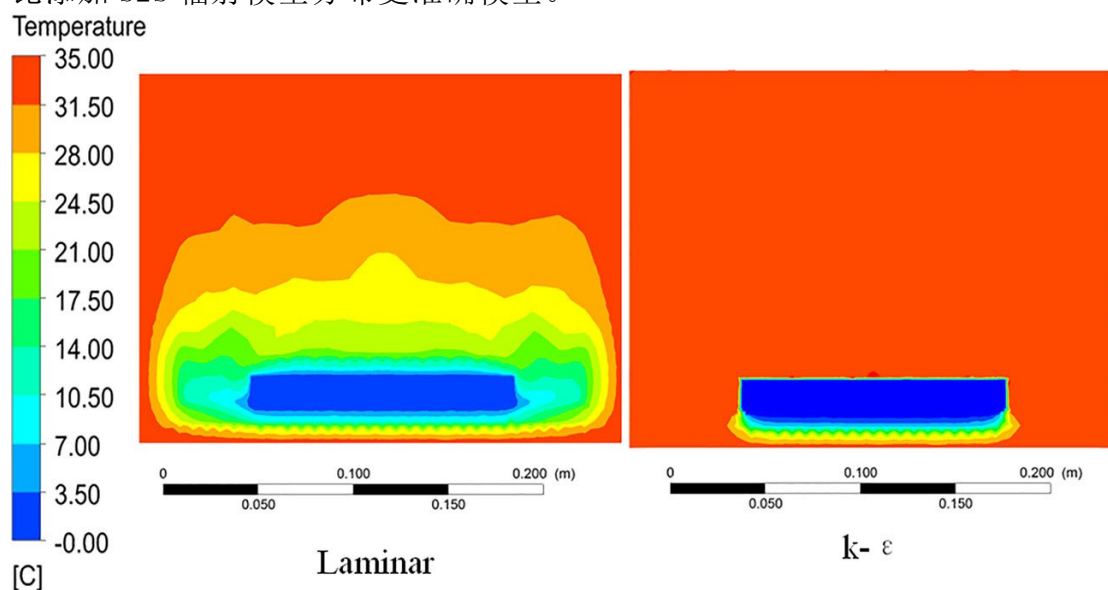


图 9: 35°C 时不同流体流动模型的温度分布

综上所述，辐射换热对冷箱保温性能的影响不容忽视。对于存储时间，加入 S2S 辐射模型和加入 DO 辐射模型均能较好地预测实验结果。在温度分布方面，DO 辐射模型比 S2S 辐射模型能更准确地分布。

4.2 对流换热对冷箱的影响

如图 8A 所示，如果不考虑辐射传热，则温度分布在冷箱中应通过对流引起热传递。分析的影响当制冷剂用量为 72 时对流换热对温度分布的影响并将这些放置在 35°C 以下的冷箱底部，流体流动模型设置为模拟中的层流和 K - E 模型。温度分布如图 9 所示。箱体内空气温度分布受温差和温度的双重影响重力。箱内冷空气以不同的流体流动模式聚集在底部，说明当冷媒放置在冷媒位置时，可以忽略对流换热底部。

4.3 固体感热对贮存时间理论建模的影响

计算箱体储存时间时，必须用 DEST 研究固体显热，如如图 10 所示。在图 10 中，箱体的理论结果明显低于为不加入固体感热时的实验结果，计算结果为在理论计算中加入固体感热，与实验结果吻合较好建设。因此，在构造理论模型时必须加入固体显热存储时间模型。

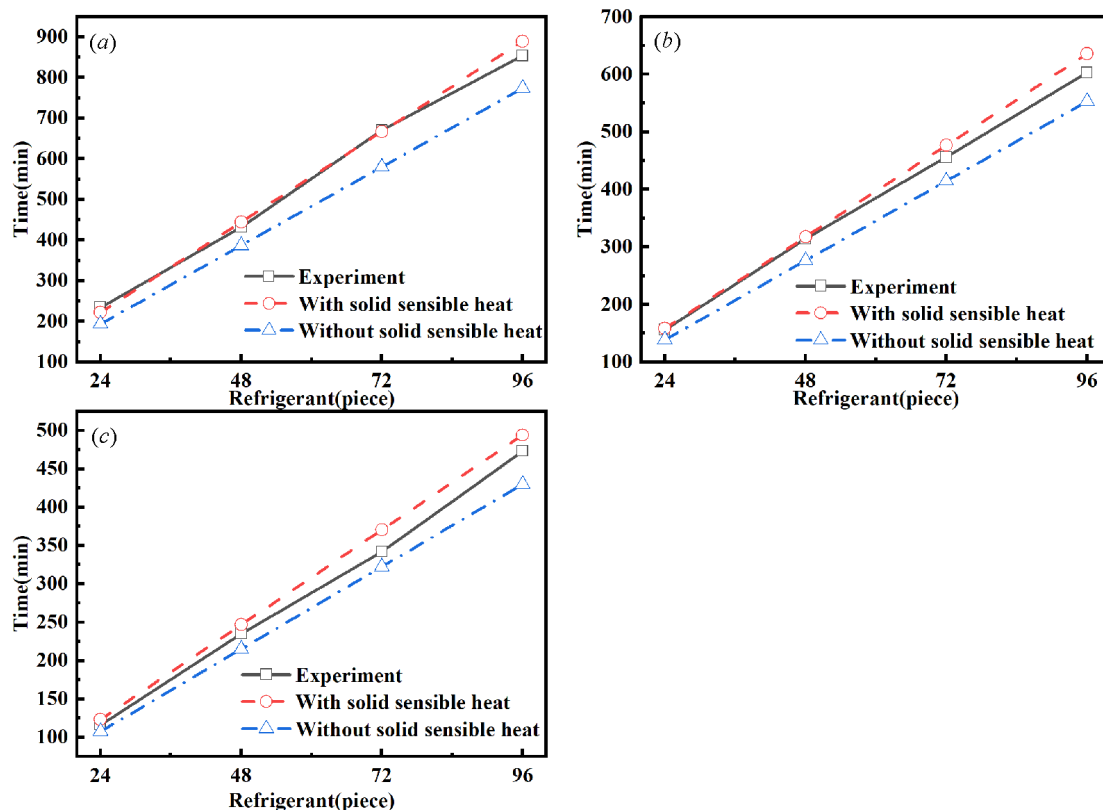


图 10:有或没有固体感热的实验模型和理论模型的保存时间:(A) 25℃, (B) 35℃, 和 45℃

表 7 所示:不同材料的导热系数和储存时间

Materials	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Theoretical modeling (min)	Simulation modeling (min)	Error (%)
VIP [9]	0.004	1114.18	1084	2.78
EPU [9]	0.026	171.41	166	3.26
EPS [31]	0.04	111.42	114	2.26

4.4 理论建模的稳定性

从图 6 可以看出,该数值模型也可以有效地预测实验结果。因此,采用数值模型对理论模型的稳定性进行了研究。通过对不同冷箱和不同制冷剂材料下的仿真和理论建模结果的比较,研究了理论模型的稳定性。

4.4.1 不同的冷箱材料

对三种冷箱材料的导热系数进行了理论和仿真验证模型如表 6 所示。冰仍被用作制冷剂。制冷剂初始温度温度为 5℃,环境温度为 25℃。计算存储时间的结果两个模型如表 7 所示。

理论模型与仿真模型的最大误差为 3.26%理论模型可以有效地预测不同冷箱条件下的贮藏时间材料,如表 7 所示。

表 8 所示:不同制冷剂材料的热物理特性

Materials	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Latent heat ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)	Freezing temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Specific heat ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
$\text{H}_2\text{O} + 1\%\text{PAAS}$ [1]	0.7570	335.4	-0.037	2562
$\text{H}_2\text{O} + 1\%\text{PAAS} + 0.1\%\text{MWCNT}$ [1]	0.9021	334.4	-0.294	2311
SP-50 [27]	0.6	190	-55.15	2000

表 9 所示:对不同制冷剂材料的存储时间进行了仿真和理论建模

Materials	Theoretical modeling (min)	Simulation modeling (min)	Error (%)
$\text{H}_2\text{O} + 1\%\text{PAAS}$ [1]	183.83	184	0.09
$\text{H}_2\text{O} + 1\%\text{PAAS} + 0.1\%\text{MWCNT}$ [11]	182.33	183	0.37
SP-50 [27]	81.86	82	0.17

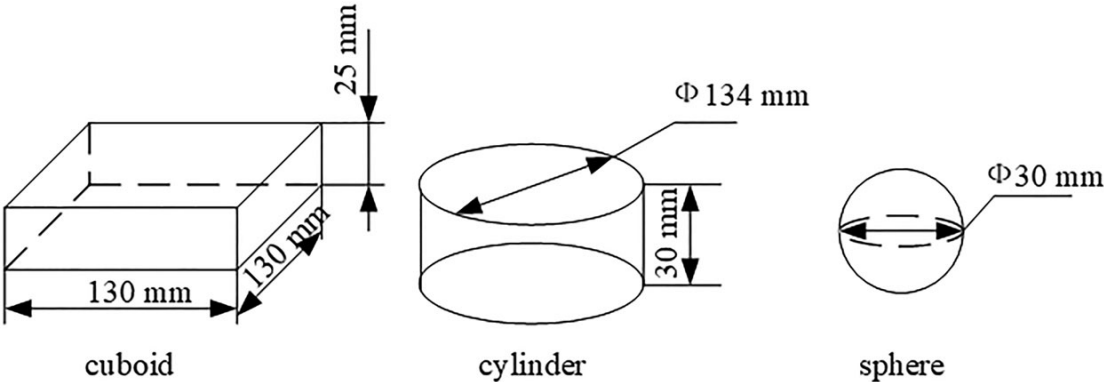


图 11:不同形状的制冷剂

表 10:对不同制冷剂形状下的理论模型和仿真模型进行了比较

Shape of refrigerant	Theoretical model (min)	Simulation model (min)	Error (%)
Cuboid	222.8	233	4.38
Cylinder	235.6	245	3.84
Sphere	346.8	358	3.13

4. 4. 2 不同的制冷剂材料

对三种制冷剂材料的热物理性质进行了理论和实验验证仿真模型如表 8 所示。制冷剂 and 冷箱材料的质量应该和以前一样。环境温度与相的变化制冷剂设置为 25°C 。两种模型的存储时间计算结果如图所示表 9 所示。由表 9 可知，理论模型与仿真模型的最大误差为 0.37%，说明理论模型可以有效地预测不同制冷剂材料下的储存时间。综上所述，理论模型的储存时间在不同的冷箱和制冷剂材料下具有稳定性。

4. 4. 3 不同形状的制冷剂

为探讨该理论模型在不同形状制冷剂中的适用性在保证制冷剂质量的基础上，改变制冷剂的形状不变，如图 11 所示。冷媒被放置在冷盒的底部环境温度为 25°C ，蓄电池初始温度为 5°C 。仿真理论模型结果如表 10 所示。最大误差为 4.38%，说明该理论模型可用于计算不同形状材料的存储时间制冷剂。

5 结论

本文研究了辐射换热对冷箱的影响以及添加不同的辐射模型对冷箱的影

响。结果表明,加入辐射模型后,保温时间和温度分布与实验结果基本一致,说明辐射换热对冷箱的影响不容忽视。可以得到以下结论:

1. 对于存储时间,加入 S2S 辐射模型和加入 D0 辐射模型均能较好地预测实验结果。在温度分布方面,D0 辐射模型比 S2S 辐射模型能更准确地分布。
2. 利用辐射传热和热传导形状因子的网络方法,建立了存储时间的理论模型。将带显热和不带显热的理论模型与实验结果进行了比较,表明带显热的理论模型能更好地预测实验结果。
3. 将理论模型与基于显热和辐射传热的仿真模型和实验结果进行了比较。理论模型与实验模型结果的最大误差为 8.45%,仿真模型与理论模型结果的最大误差为 7.51%,表明理论模型可以有效地预测实验和仿真结果。
4. 通过对不同冷箱、不同冷媒材料、不同冷媒形状的模拟,研究了理论模型的稳定性。结果表明,在不同箱体和制冷剂材料下,模拟结果与理论结果的最大误差为 4.38%,表明理论模型具有稳定性。

本文采用辐射换热的网络方法进行计算,利用感热、形状因子和辐射换热建立冷箱的储存时间模型,为三维封闭环境下的换热计算提供了一种方法。冷箱生产对储存时间的影响将在以后进行分析。

声明

伦理审查已经获得批准并且参与者已经同意。然而,这项工作在本节中不适用

发表同意书

所有作者都同意最终稿件并将其提交给本刊。

利益

所有作者证明,他们没有隶属关系或参与任何组织或实体与任何经济利益或非经济利益在这篇论文中讨论的主题或材料。

作者的贡献

付志强:概念化、方法论、写作评审与编辑、可视化、监督。刘浩哲:概念化、方法论、软件、验证、数据策展、形式分析、调查、写作-原稿、写作-审查编辑、可视化。段丽颖:调查,可视化。黄立强:写作-审编,监督。王燕:软件,监管。所有作者都审阅了这份手稿。

感谢

本工作感谢天津科技大学包装创新实验室提供的实验设备和现场支持。

资金

本研究由天津市教委资助(批准号 NO. 11)。2019 kj209)。

作者 ID

付志强 [HTTP://ORCID.ORG/0000-0003-4198-4539](http://ORCID.ORG/0000-0003-4198-4539)

数据和材料的可用性

本研究期间产生和分析的数据集不公开，但应通讯作者的合理要求，可以从通讯作者处获得。

参考文献

- [1] X. XU, X. ZHANG, AND S. LIU, “EXPERIMENTAL STUDY ON COLD STORAGE BOX WITH NANOCOMPOSITE PHASE CHANGE MATERIAL AND VACUUM INSULATION PANEL,” INT. J. ENERGY RES., VOL. 42, NO. 14, PP. 4429–4438, 2018. DOI: [10.1002/ER.4187](https://doi.org/10.1002/ER.4187).
- [2] A. ASHOK, M. BRISON, AND Y. LETALLEC, “IMPROVING COLD CHAIN SYSTEMS: CHALLENGES AND SOLUTIONS,” VACCINE, VOL. 35, NO. 17, PP. 2217–2223, 2017. DOI: [10.1016/J.VACCINE.2016.08.045](https://doi.org/10.1016/J.VACCINE.2016.08.045).
- [3] X. ZHANG, “MODELLING OF THE THERMAL CONDUCTIVITY IN COLD CHAIN LOGISTICS BASED ON MICRO-PCMS,” IJHT, VOL. 36, NO. 3, PP. 1075–1080, 2018. DOI: [10.18280/IJHT.360339](https://doi.org/10.18280/IJHT.360339).
- [4] Y. ZHAO, X. ZHANG, X. XU, AND S. ZHANG, “DEVELOPMENT OF COMPOSITE PHASE CHANGE COLD STORAGE MATERIAL AND ITS APPLICATION IN VACCINE COLD STORAGE EQUIPMENT,” J. ENERGY STORAGE, VOL. 30, NO. 2020, PP. 101455–101466, 2020. DOI: [10.1016/J.EST.2020.101455](https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101455).
- [5] Y. SONG ET AL., “EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON DODECANE/EXPANDED GRAPHITE SHAPE-STABILIZED PHASE CHANGE MATERIAL FOR COLD ENERGY STORAGE,” ENERGY, VOL. 189, NO. 2019, PP. 116175–116182, 2019. DOI: [10.1016/J.ENERGY.2019.116175](https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116175).
- [6] B. BAI, K. ZHAO, AND X. LI, “APPLICATION RESEARCH OF NANO-STORAGE MATERIALS IN COLD CHAIN LOGISTICS OF E-COMMERCE FRESH AGRICULTURAL PRODUCTS,” RES. PHYS., VOL. 13, NO. 2019, PP. 102049–102056, 2019. DOI: [10.1016/J.RINP.2019.01.083](https://doi.org/10.1016/J.RINP.2019.01.083).
- [7] P. JIA, W. WU, AND Y. WANG, “PREPARATION OF 0 °C PHASE CHANGE MATERIAL AND ITS COLD STORAGE PERFORMANCE IN COLD-CHAIN LOGISTICS,” CHEM. IND. ENG. PROG., VOL. 38, NO. 6, PP. 2862–2869, 2019. DOI: [10.16085/J.ISSN.1000-6613.2018-1611](https://doi.org/10.16085/J.ISSN.1000-6613.2018-1611).
- [8] M. RYMS AND W. M. LEWANDOWSKI, “EVALUATING THE INFLUENCE OF RADIATIVE HEAT FLUX ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER FROM A VERTICAL PLATE IN AIR USING AN IMPROVED HEATING PLATE,” INT. J. HEAT MASS TRANSF., VOL. 173, PP. 121232–121247, 2021. DOI: [10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121232](https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121232).
- [9] J. DU ET AL., “COOLING PERFORMANCE OF A THERMAL ENERGY STORAGE-BASED PORTABLE BOX FOR COLD CHAIN APPLICATIONS,” J. ENERGY STORAGE, VOL. 28, NO. 2020, PP. 101238–101247, 2020. DOI: [10.1016/J.EST.2020.101238](https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101238).

[10.1016/J.EST.2020.101238](https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101238).

- [10]J. ZHAO ET AL., “RECYCLABLE LOW-TEMPERATURE PHASE CHANGE MICROCAPSULES FOR COLD STORAGE,” J. COLLOID INTERFACE SCI., VOL. 564, NO. 2020, PP. 286–295, 2020. DOI: [10.1016/J.JCIS.2019.12.037](https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2019.12.037).
- [11]D. WANG ET AL., “INVESTIGATION ON THE STORAGE EFFECT AND NUTRITIONAL QUALITY OF PEACH IN COLD STORAGE CONTAINERS TRANSPORTATION WITH DIFFERENT INSULATION MATERIALS,” FOOD SCI. TECHNOL., VOL. 43, NO. 2, PP. 58–63, 2018.DOI: [10.13684/J.CNKI.SPKJ.2018.02.011](https://doi.org/10.13684/J.CNKI.SPKJ.2018.02.011).
- [12]T. WU ET AL., “PREPARATION OF A LOW-TEMPERATURE NANOFLUID PHASE CHANGE MATERIAL: MGCL₂–H₂O EUTECTIC SALT SOLUTION SYSTEM WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES (MWCNTS),” INT. J. REFRIG., VOL. 113, NO. 2020, PP.136–144, 2020. DOI: [10.1016/J.IJREFRIG.2020.02.008](https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2020.02.008).
- [13]H. TAN, N. WEN, AND Z. DING, “NUMERICAL STUDY ON HEAT AND MASS TRANSFER CHARACTERISTICS IN A RANDOMLY PACKED AIR COOLING TOWER FOR LARGE-SCALE AIR SEPARATION SYSTEMS,” INT. J. HEAT MASS TRANSF., VOL. 178, NO.2021, PP. 121556–121567, 2021. DOI: [10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121556](https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121556).
- [14]X. XIAOFENG AND Z. XUELAI, “SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A MULTI-TEMPERATURE INSULATION BOX WITH PHASE CHANGE MATERIALS FOR COLD STORAGE,” J. FOOD ENG., VOL. 292, NO. 2021, PP. 110286–110294,2021. DOI: [10.1016/J.JFOODENG.2020.110286](https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2020.110286).
- [15]A. SHARMA, M. TRIVEDI, K. AGARWAL, AND N. NIRMALKAR, “THERMAL ENERGY STORAGE IN A CONFINED CYLINDRICAL HEAT SOURCE FILLED WITH PHASE CHANGE MATERIALS,” INT. J. HEAT MASS TRANSF., VOL. 178, NO. 2021, PP. 121603–121616, 2021. DOI: [10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121603](https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121603).
- [16]J.-C. PAQUETTE, S. MERCIER, B. MARCOS, AND S. MORASSE, “MODELING THE THERMAL PERFORMANCE OF A MULTILAYER BOX FOR THE TRANSPORTATION OF PERISHABLE FOOD,” FOOD BIOPROD. PROCESS., VOL. 105, NO. 2017, PP. 77–85, 2017.DOI: [10.1016/J.FBP.2017.06.002](https://doi.org/10.1016/J.FBP.2017.06.002).
- [17]M. A. KHAN ET AL., “EXPERIMENTALLY-BENCHMARKED KINETIC SIMULATIONS OF HEAT TRANSFER THROUGH RAREFIED GAS WITH CONSTANT HEAT FLUX AT THE BOUNDARY,” INT. J. HEAT MASS TRANSF., VOL. 176, PP. 121378, 2021. DOI: [10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121378](https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121378).
- [18]H. SHEN ET AL., “3D NUMERICAL INVESTIGATION OF THE HEAT AND FLOW TRANSFER THROUGH COLD PROTECTIVE CLOTHING BASED ON CFD,” INT. J. HEAT MASS TRANSF., VOL. 175, PP. 121305, 2021. DOI: [10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121305](https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121305).

- [19] F. P. INCROPERA, D. P. DEWITT, T. L. BERGMAN, AND A. S. LAVINE, FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER, 6TH ED. NEW YORK: WILEY, 2014.
- [20] A. AMBAW ET AL., “THE USE OF CFD TO CHARACTERIZE AND DESIGN POST-HARVEST STORAGE FACILITIES: PAST, PRESENT AND FUTURE,” COMPUT. ELECTRON. AGRIC., VOL. 93, NO. 2013, PP. 184–194, 2013. DOI: [10.1016/J.COMPAG.2012.05.009](https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2012.05.009).
- [21] L. ZHANG ET AL., “WALL THICKNESS OF INCUBATOR AT AMBIENT TEMPERATURE AND MATERIAL THERMAL CONDUCTIVITY,” PACKAG. ENG., VOL. 41, NO. 5, PP. 97–102, 2020. DOI: [10.19554/J.CNKI.1001-3563.2020.05.013](https://doi.org/10.19554/J.CNKI.1001-3563.2020.05.013).
- [22] H. ZHAO ET AL., “TEMPERATURE FIELD SIMULATION METHOD OF XPS INCUBATOR BASED ON FLUENT,” PACKAG. ENG., VOL. 39, NO. 19, PP. 105–109, 2018. DOI: [10.19554/J.CNKI.1001-3563.2018.19.019](https://doi.org/10.19554/J.CNKI.1001-3563.2018.19.019).
- [23] V. K. MISHRA AND S. CHAUDHURI, “IMPLEMENTATION OF STOCHASTIC OPTIMIZATION METHOD-ASSISTED RADIAL BASIS NEURAL NETWORK FOR TRANSPORT PHENOMENON IN NON-NEWTONIAN THIRD-GRADE FLUIDS: ASSESSMENT OF FIVE OPTIMIZATION TOOLS,” ARAB. J. SCI. ENG., VOL. 46, NO. 12, PP. 11797–11818, 2021. DOI: [10.1007/S13369-021-05702-8](https://doi.org/10.1007/S13369-021-05702-8).
- [24] K. ANAND, A. BHARDWAJ, S. CHAUDHURI, AND V. K. MISHRA, “SELF-ORGANIZING MAP NETWORK FOR THE DECISION MAKING IN COMBINED MODE CONDUCTION-RADIATION HEAT TRANSFER IN POROUS MEDIUM,” ARAB. J. SCI. ENG., VOL. 47, NO. 12, PP. 15175–15194, 2022. DOI: [10.1007/S13369-021-06489-4](https://doi.org/10.1007/S13369-021-06489-4).
- [25] F. YU, Y. LI, AND Y. ZHU, “NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE THERMAL INSULATION PERFORMANCE OF LOW TEMPERATURE COLD BOX,” INT. COMMUN. HEAT MASS TRANSF., VOL. 36, NO. 9, PP. 908–911, 2009. DOI: [10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2009.05.008](https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2009.05.008).
- [26] J. WU AND L. ZHANG, “MODELING AND SIMULATION OF AN INSULATED BOX BASED ON COMSOL AND TEMPERATURE FIELD ANALYSIS,” BULL. SCI. TECHNOL., VOL. 34, NO. 08, PP. 84–89, 2018. DOI: [10.13774/J.CNKI.KJTB.2018.08.016](https://doi.org/10.13774/J.CNKI.KJTB.2018.08.016).
- [27] A. K. RAY, S. SINGH, D. RAKSHIT, AND UDAYRAJ, “COMPARATIVE STUDY OF COOLING PERFORMANCE FOR PORTABLE COLD STORAGE BOX USING PHASE CHANGE MEDIUM,” THERM. SCI. ENG. PROG., VOL. 27, PP. 101146, 2022. DOI: [10.1016/J.TSEP.2021.101146](https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2021.101146).
- [28] M. KRISHNANI AND D. N. BASU, “ON THE VALIDITY OF BOUSSINESQ APPROXIMATION IN TRANSIENT SIMULATION OF SINGLE-PHASE NATURAL CIRCULATION LOOPS,” INT. J. THERM. SCI., VOL. 105, PP. 224–232, 2016. DOI: [10.1016/J.IJTHERMALSCI.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2016.03.004).
- [29] W. JIANG, Q. LIU, AND J. QU, “STUDY ON THERMAL CONDUCTIVITY OF THERMAL INSULATION MATERIALS UNDER NATURAL CLIMATE

SIMULATION,”GREEN ENVIRON. PROT. BUILD. MATER., VOL. 09, PP. 1–2, 2020. DOI: [10.16767/J.CNKI.10-1213/TU.2020.09.001](https://doi.org/10.16767/J.CNKI.10-1213/TU.2020.09.001).

- [30]J. VADHERA, A. SURA, G. NANDAN, AND G. DWIVEDI, “STUDY OF PHASE CHANGE MATERIALS AND ITS DOMESTIC APPLICATION,” MATER. TODAY: PROC., VOL. 5, NO. 2, PP. 3411–3417, 2018. DOI: [10.1016/J.MATPR.2017.11.586](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.586).
- [31]X. PAN, D. WANG, AND H. ZHU, “STUDY ON TEMPERATURE FIELD OF DIFFERENT MATERIALS IN INCUBATOR,” FOOD MACH., VOL. 34, NO. 8, PP. 115–118, 2018. DOI: [10.13652/J.ISSN.1003-5788.2018.08.023](https://doi.org/10.13652/J.ISSN.1003-5788.2018.08.023).