

文章编号:0253-4339(2023)05-0150-10  
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2023.05.150

# 组合蓄冷板式医药冷藏箱的设计与性能实验

陈俊文 王瑜 成峰

(南京工业大学城市建设学院 南京 211816)

**摘要** 本文以组合蓄冷板为研究对象,提出了一种箱内温度场均匀可控的组合蓄冷板式医药冷藏箱的设计方案,以此优化医药冷藏箱的热性能表现。首先搭建了实验平台,依据组合式蓄冷原理设计医药冷藏箱和组合蓄冷板,从等质量方案和等相变潜热方案的角度分别对比蓄冷板中相变材料(正十四烷、 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、水两两组合)内壁温度变化、蓄冷时长的表现,发现蓄冷板内层采用1.5 kg正十四烷、外层采用1.5 kg  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的等质量组合方案性能最优。在此基础上对比了性能最佳的蓄冷板在医药冷藏箱中不同摆放位置(两侧平放、两侧叠放、对角摆放、四周摆放)下,在2~8℃条件下的蓄冷时长、温度平均值、不均匀系数和释冷速率。结果表明:对角摆放的组合蓄冷板蓄冷时长最大;4种摆放方式的温度平均值均在2~8℃工况内;两侧叠放时的不均匀系数最小且箱内蓄冷板释冷速率最快。考虑到温度均匀优先原则,两侧叠放的等质量组合方案的蓄冷板蓄冷效果最好。

**关键词** 医药冷藏箱;相变;组合蓄冷板;温度分布;摆放位置

中图分类号:TB657;TB482.2

文献标识码:A

## Design and Performance of Composite Cold Thermal Energy Storage Plate in Medical Refrigerators

Chen Junwen Wang Yu Cheng Feng

(College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing, 211816, China)

**Abstract** To optimize the thermal performance of a medical refrigerator, a composite cold thermal energy storage plate was considered. A design scheme for a composite cold thermal energy storage plate in a medical refrigerator with a uniform and controllable temperature field was proposed. An experimental platform was developed. A medical refrigerator and the composite cold thermal energy storage plate were designed according to the principle of composite cold thermal energy storage. From the perspective of the equal mass scheme and the equal phase-change latent heat scheme, the inner-wall temperature change and cold thermal energy storage time of the phase-change materials (n-tetradecane,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , and water) in the cold thermal energy storage plate were compared. It was found that an equal mass combination of 1.5 kg n-tetradecane in the inner layer and 1.5 kg  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  in the outer layer of the cold thermal energy storage plate produced the best performance. Further, the cold thermal energy storage duration, average temperature, inhomogeneous coefficient, and the cooling discharge rate of the cold thermal energy storage plate with the best performance at 2~8℃ were compared with different positions in the medical refrigerator (horizontally located on both sides, stacked on both sides, diagonally placed, and perimetrically placed). The results indicated that the composite cold thermal energy storage plate placed diagonally had the longest storage duration; the average temperature for the four placement positions was within 2~8℃. When the two sides were stacked, the inhomogeneous coefficient was the lowest, and the cold discharge rate of the cold thermal energy storage plate was the highest. Considering temperature uniformity as the priority, the cold thermal energy storage effect of an equal-mass combination scheme stacked on both sides was preferred. The experimental results provide a reference for promoting the application of composite cold thermal energy storage plates for medical refrigerators in cold-chain transportation.

**Keywords** medical refrigerator; phase change; composite cold thermal energy storage plate; temperature distribution; placement

随着新冠疫情爆发,我国多地医药物资紧缺,冷链运输药物困难重重<sup>[1]</sup>。为了更好地发展医药冷链,需要认清我国现阶段医药冷链运输水平与国际的差距。一些学者对国内外医药冷链运输现

状进行了研究。李浩楠<sup>[2]</sup>研究了我国医药冷链物流技术发展的进程,调研了发展过程中运输设备、设施、技术存在的问题。喜崇彬<sup>[3]</sup>认为冷链运输是新冠疫苗分发和接种的重要保障,指出在运输

疫苗过程中我国面临的挑战,冷链运输设备、技术升级改造十分重要。陈宁<sup>[4]</sup>研究分析了美国、日本以及西欧等发达国家现代化医药冷链物流发展的模式,再结合我国医药冷链物流发展的现状及制约因素,得出发展我国现代医药冷链物流模式的启示。邓振华<sup>[5]</sup>指出美国、日本等发达国家的医药冷链物流体系较为健全,我国可将现代化技术融入医药冷链物流体系,改造创新原有技术,提升物流效率。

冷链运输设备和技术在冷链运输药物过程中至关重要。现阶段,我国冷链运输设备主要是机械式冷藏车<sup>[6]</sup>,对于运量小的疫苗等药物,易出现“大车送小货”的现象。同时,由于新冠疫苗 2~8℃ 的储存特性<sup>[7]</sup>,常规蓄冷技术在医药冷链领域存在局限性。因此,蓄冷技术与保温箱相结合的组合蓄冷板式冷藏箱备受关注。冯自平<sup>[8]</sup>详细考察了国际现有冷藏配送技术,总结了国内现有配送技术的缺点,介绍了国际常用混装配送设备(低温蓄冷运输箱)的基本原理、使用方法以及配送流程。赵祎等<sup>[9]</sup>研究了冷链运输的相变蓄冷技术,相变机理、释冷速率及冷链运输装备内的温度场分布情况为冷链运输发展提供一定的研究思路。杨天润等<sup>[10]</sup>对比分析了不同种类相变蓄冷材料的热物性和化学性质,得出结论:相变蓄冷材料具有较高的储能密度,多种相变材料组合在能源高效利用和节能等方面应用前景广阔。范中阳等<sup>[11]</sup>对比研究了两种组合蓄冷板摆放形式(即顶部摆放和四周摆放)对箱内环境温度和果蔬中心温度的影响,以及果蔬品质的变化情况,结果表明:组合蓄冷板四周摆放相比顶部摆放具有较大优势,四周摆放时箱内温升较平缓,保持了果蔬较高的营养品质和商品性。刘广海等<sup>[12]</sup>研究发现,组合式蓄冷板的相变蓄冷材料、放置位置以及保温材料均对冷藏箱的温度场和流场产生影响。

由此可知,组合式蓄冷板是常规蓄冷技术改造创新的产物<sup>[13]</sup>,但其在医药冷链领域的深入研究还存在空白,组合蓄冷板摆放位置的研究还不够全面,组合蓄冷板式医药冷藏箱的发展潜力较大。本文对医药冷藏箱和组合式蓄冷板进行了系统的设计,以组合式相变蓄冷取代单一蓄冷剂制冷<sup>[14]</sup>,对组合蓄冷板的性能和蓄冷板在医药冷藏箱中的摆放位置进行实验,研究医药冷藏箱在 2~8℃ 条件下热性能的影响,以此优化医药冷藏箱的热性能,促进组合蓄冷板式冷藏箱在医药冷链领域的发展。

## 1 实验原理与设计

### 1.1 实验原理

组合式相变材料蓄冷原理<sup>[15]</sup>为:在同一相变蓄冷系统中应用相变温度不同的两种或两种以上相变材料,即选择特定的相变材料进行合理组合可提高相变蓄冷系统的效率。

C. Bellecci 等<sup>[15]</sup>的研究表明:采用多种相变材料组合,对于显热蓄冷过程的传热速率无明显改善,但潜热蓄冷过程的传热速率可以提高 15%。若采用纯度更高、相变温度恒定的相变材料,将进一步提高潜热蓄冷过程的效率<sup>[16]</sup>。

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 组合蓄冷板的设计

目前,我国冷链物流设备还未能标准化。对市面上常见的蓄冷板调查发现:单个蓄冷板质量多数约 2 kg,容积适中。本设计的组合蓄冷板采取双层结构,可以灌注两种相变材料,外界环境的热量经过两层蓄冷剂,实现冷量的梯级利用。

为达到两种蓄冷剂充分换热、确保组合蓄冷板整体强度的目的,蓄冷板中间薄层的厚度设为 0.5 cm,组合蓄冷板如图 1 所示。该组合蓄冷板的总质量为 1.98 kg,上侧有两种圆形开孔。灌注入口直径为 0.8 cm,用于灌注相变材料;气压平衡孔直径为 0.3 cm,用于平衡设备内外大气压,利于灌注相变材料。两孔均使用螺纹拧紧密封,蓄冷板表面光滑。

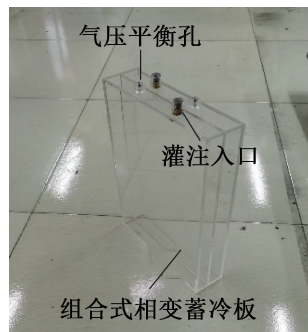


图 1 组合蓄冷板

Fig.1 Combined cold storage plate

#### 1.2.2 利用组合式蓄冷板的医药冷藏箱的设计

##### 1) 尺寸设计

市面上常见的组合蓄冷板长度为 37 cm,宽度为 27 cm,厚度为 5.5 cm。为了便于进行冷藏箱内组合蓄冷板摆放位置的实验,设置箱体宽度为 54 cm;为了呈现对称性,箱体长度和箱体高度也设计为 54 cm。冷藏箱采取上开口箱盖嵌入式,箱盖厚度为 5

cm, 箱盖嵌入箱体 1 cm, 内箱体高度为 53 cm, 盖上箱盖后, 箱体整体高度为 58 cm, 内外均呈白色, 可降低辐射传热的影响。实验设计的冷藏箱如图 2 所示。

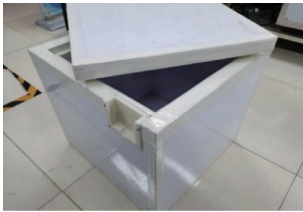


图 2 冷藏箱  
Fig.2 Refrigerator

## 2) 保温材料选型

在冷藏箱运输过程中, 当箱内温度 (2~8 °C) 低于外界环境时, 外界环境通过辐射和对流换热向箱体外壁面传递热量, 热量从箱体外壁面通过热传导传递至箱体内壁面; 当箱内温度高于外界环境时, 箱体内壁面的热量通过冷藏箱各壁面以热传导的方式传递给箱体外壁面, 最后散发至外界环境中<sup>[17]</sup>。由于箱盖难以完全密封、箱体的保温材料热阻不能完全保持一致, 因此箱体内部热量分布不均。无论箱内温度是否高于外界环境温度, 箱体保温材料的选择对于隔绝冷藏箱内外环境的换热至关重要。常见的保温材料性能参数如表 1 所示。

表 1 不同保温材料性能参数

Tab.1 Performance parameters of different thermal insulation materials

种类	容重/ (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数/ [W/(m·K)]	燃烧 性能	参考价格/ (元/m <sup>2</sup> )
真空绝热板	130	0.004	A 级	180
EPS 聚苯板	18	≤0.042	B1 级	30
XPS 挤塑板	45	≤0.029	B1 级	60
聚氨酯泡沫	50	≤0.025	B2 级	160
泡沫玻璃	130~160	0.055~0.058	不燃 A 级	135

医药冷藏箱应更加注重箱体本身性能, 经济性次之, 因此本设计选用真空绝热板作为箱体保温材料<sup>[18]</sup>。真空绝热板主要由芯部材料、表面隔膜材料和气体吸附材料组成。芯部材料一方面起到板支撑结构作用, 另一方面降低真空下材料导热和传热系数, 减少换热。表面隔膜材料起到封装和维持内部真空的作用, 可承担的最大压力为 100 kPa。在内部真空的情况下, 为防止箱体内外热质交换, 隔膜材料中的铝层还承担着降低与外界辐射换热强度的作用<sup>[19]</sup>。

## 2 实验方案

### 2.1 实验测量设备

实验仪器分别为: 测量相变材料质量的电子秤、测量组合蓄冷板表面温度的热电偶、记录实验数据的数据采集仪、测量蓄冷板表面温度的 RAYTEK 红外测温仪。各仪器参数如表 2 所示。

表 2 仪器参数

Tab.2 Instrument parameters

仪器名称	规格
电子秤	量程 0~20 kg, 精度 0.01 g
K 型热电偶	量程 -100~999 °C, 精度 ±0.1 °C
数据采集仪	安捷伦 34970A
RAYTEK 红外测温仪	量程 -50~300 °C, 精度 ±0.2 °C

### 2.2 组合蓄冷板式冷藏箱的热性能实验

#### 2.2.1 冷藏箱热性能评价指标

为了研究医药冷藏箱的性能, 客观评价其热性能, 本实验设计了几组参数, 各参数如下:

1) 蓄冷时长  $T$  (实验测得): 冷藏箱中 1~9 个测点温度同时在 2~8 °C 温度区间内的时长, h。

2) 温度平均值  $M$  (计算获得): 某时刻冷藏箱内温度平均值, °C。

$$M = \sum_{i=1}^9 t_i / 9 \quad (1)$$

式中:  $t_1 \sim t_9$  分别为某一时刻测温点温度, °C。

3) 不均匀系数  $S$  (计算获得): 测温时刻冷藏箱内全部/部分温度波动的大小, 温度场均匀性的表现。

$$S = \sqrt{(t_1 - t_m)^2 + (t_2 - t_m)^2 + \dots + (t_n - t_m)^2} \quad (2)$$

式中: 共设  $n$  个测温点,  $t_1 \sim t_n$  为测温时刻的温度, °C;  $t_m$  为上述所有测温时刻的平均值, °C。

4) 释冷速率  $\eta$  (计算获得): 不同种类蓄冷板给冷藏箱提供冷量的速率。

$$\eta = T_2 / T_1 \quad (3)$$

式中:  $T_1$  为蓄冷板表面温度达到其平均温度的时长, h;  $T_2$  为冷藏箱内温度达到其平均温度的时长, h。

$T$  较为直观的表现了医药冷藏箱能够使用的时间;  $M$  和  $S$  反映了冷藏箱内的温度分布情况, 尤其  $S$  反映了箱内温度场分布是否均匀, 为温度场优化提供参考;  $\eta$  为蓄冷板在冷藏箱内温度达到稳定的时间参数。

#### 2.2.2 蓄冷板相变材料

为了满足药品在 2~8 °C 下的储存条件, 实验选

取了 5 种相变材料:两种 0 °C 以下、一种 0 °C、两种 0 °C 以上,分别为 NaCl、正十四烷<sup>[20]</sup>、CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O、

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O、水,相变材料的热物性如表 3 所示。

表 3 相变材料的热物性

Tab.3 Thermophysical properties of phase change materials

主要材料	相变温度/°C	相变潜热/(kJ/kg)	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	导热系数/[W/(m·K)]
NaCl	-11	153	2 165	0.590 0
正十四烷	-6	285	1 041	0.571 0
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	227	767	0.543 0
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	30	254	1 464	0.753 2
水	0	335	1 000	0.550 8

考虑到组合蓄冷板实验的相变材料应价格适中、易获得,且不同材料的相变温度存在一定的差值,才能够体现多层相变提高释冷效率、延长蓄冷时长的特点。其中,NaCl 的相变潜热值较小,蓄冷能力一般;Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 的相变温度略高,需要与 NaCl、KCl 等无机材料融合才可降低相变温度,但其他材料的加入易影响实验结果。所以后续实验将采用正十四烷、CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和水 3 种相变材料。

### 2.2.3 蓄冷板相变材料的组合方案

#### 1) 方案类型

##### (1) 等质量组合方案

等质量组合方案指在组合蓄冷板中灌注两层蓄冷剂,将表 3 中的材料两两组合,每层灌注相同质量(1.5 kg)的不同相变材料,在不同相变温度下研究组合蓄冷板的蓄冷时长和内壁温度变化。

##### (2) 等相变潜热值方案

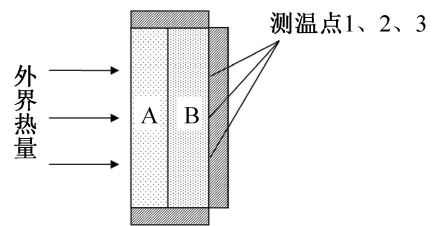
等相变潜热值方案指在组合蓄冷板中灌注两层蓄冷剂,将表 4 中的材料两两组合,每层灌注相同相变潜热值(340.5、427.5、502.5 kJ)的不同相变材料,在不同相变温度下研究组合蓄冷板的蓄冷时长和内壁温度变化。

#### 2) 实验布置

组合蓄冷板为两层结构,内层为模拟储藏层侧,其内壁温度决定着储存物品的环境温度;外层为相变材料与环境空气接触层。组合蓄冷板除 37 cm×27 cm 的一侧与外界环境直接接触外,其余面安装 2 cm 的保温棉,布置如图 3 所示。内层内壁处有 3 根精度为±0.1 °C 的 K 型热电偶等距布置,热电偶均与安捷伦 34970A 数据采集仪连接,记录装置内壁面温度的变化数据。

#### 3) 实验步骤

(1)首先按照实验方案将相变材料灌注至组合蓄冷板中,再将蓄冷板放入设定好相变温度的冰箱中



—蓄冷剂A —蓄冷剂B —2 cm保温棉

图 3 测温点布置

Fig.3 Layout of temperature measuring points

冻结 16 h,冻结完毕后取出蓄冷板,蓄冷板内的相变材料处于过冷状态,待相变材料升温达到相变温度时,进行实验;

(2)将蓄冷板 37 cm×27 cm 的一面与外界环境直接接触,其他外表面安装 2 cm 的保温层,可以视作绝热面,并在另一侧面三点等距布置 K 型热电偶的测温点,如图 4 所示,放在 12 °C 的环境下进行释冷;

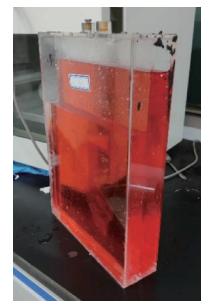


图 4 灌注两层相变材料的组合蓄冷板

Fig.4 Combined cold storage plate filled with two layers of phase change materials

(3)实验对比不同组合模式下,蓄冷板内壁温度维持在相变温度±1 °C 的时长和温度曲线的变化波动,每种组合模式的实验重复 3 次。

#### 4) 组合蓄冷板与常规蓄冷板的对比

以市面上的常规蓄冷板作为对照组,对比等质量

组合方案和等相变潜热值方案的蓄冷时长和蓄冷板 内壁温度变化情况, 详见表 4~表 7。

表 4 等质量组合方案下蓄冷时长  
Tab.4 Cold storage duration under the combination scheme of equal mass

内层				外层				蓄冷时 长/min
材料	相变温度/°C	质量/kg	相变潜热值/kJ	材料	相变温度/°C	质量/kg	相变潜热值/kJ	
水	0	1.5	502.5	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	198
水	0	1.5	502.5	正十四烷	-6	1.5	427.5	151
正十四烷	-6	1.5	427.5	水	0	1.5	502.5	250
正十四烷	-6	1.5	427.5	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	277
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	正十四烷	-6	1.5	427.5	167
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	水	0	1.5	502.5	230

表 5 等相变潜热值组合方案下蓄冷时长  
Tab.5 Cold storage duration under the combination scheme of equal phase change latent heat value

内层				外层				蓄冷时 长/min
材料	相变温度/°C	质量/kg	相变潜热值/kJ	材料	相变温度/°C	质量/kg	相变潜热值/kJ	
水	0	1.5	502.5	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	2.21	502.5	227
水	0	1.5	502.5	正十四烷	-6	1.76	502.5	134
正十四烷	-6	1.5	427.5	水	0	1.28	427.5	200
正十四烷	-6	1.5	427.5	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.88	427.5	249
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	正十四烷	-6	1.19	340.5	234
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	水	0	1.02	340.5	200

表 6 等质量组合方案下温度变化率  
Tab.6 Temperature change rate under the combination scheme of equal mass

内层				外层				蓄冷时 长/min
材料	相变温度/°C	质量/kg	相变潜热值/kJ	材料	相变温度/°C	质量/kg	相变潜热值/kJ	
水	0	1.5	502.5	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	0.002 9
水	0	1.5	502.5	正十四烷	-6	1.5	427.5	0.011 4
正十四烷	-6	1.5	427.5	水	0	1.5	502.5	0.007 6
正十四烷	-6	1.5	427.5	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	0.003 5
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	水	0	1.5	502.5	0.006 9
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	正十四烷	-6	1.5	427.5	0.009 1

由表 4 可知, 等质量组合方案的蓄冷时长最优为: 5 °C CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 -6 °C 正十四烷(简称: 方案一)的组合蓄冷板, 蓄冷时长为 277 min; 由表 5 可知, 等相变潜热值组合方案的蓄冷时长最优为: 5 °C CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 -6 °C 正十四烷(简称: 方案二)的组合蓄冷板, 蓄冷时长为 249 min。总体上, 等质量组合方案的蓄冷时长优于等相变潜热值组合方案的蓄冷

时长, 相差约 10%。

由表 6 可知, 等质量组合方案的温度变化率最优为: 5 °C CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 0 °C 水(简称: 方案三)的组合蓄冷板, 温度变化率为 0.002 9; 由表 7 可知, 等相变潜热值组合方案的温度变化率最优的为: 0 °C 水和 5 °C CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(简称: 方案四)的组合蓄冷板, 温度变化率为 0.004 6。总体上, 等质量组合方案的温度

表 7 等相变潜热值组合方案下温度变化率

Tab.7 Temperature change rate under the combination scheme of equal phase change latent heat value

内层				外层				蓄冷时 长/min
材料	相变温度/°C	质量/kg	相变潜热值/kJ	材料	相变温度/°C	质量/kg	相变潜热值/kJ	
水	0	1.5	502.5	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	2.21	502.5	0.011 9
水	0	1.5	502.5	正十四烷	-6	1.76	502.5	0.016 0
正十四烷	-6	1.5	427.5	水	0	1.28	427.5	0.010 8
正十四烷	-6	1.5	427.5	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.88	427.5	0.005 8
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	水	0	1.02	340.5	0.004 6
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5	1.5	340.5	正十四烷	-6	1.19	340.5	0.006 5

变化率小于等相变潜热值组合方案的温度变化率,相差约一倍。

分别从上述两种等质量和两种等相变潜热值的

方案中,各选择一种方案,再与常规蓄冷板进行对比。4 种组合方案的温度变化如图 5 所示。

等质量组合方案;方案一的蓄冷时长为 277 min,

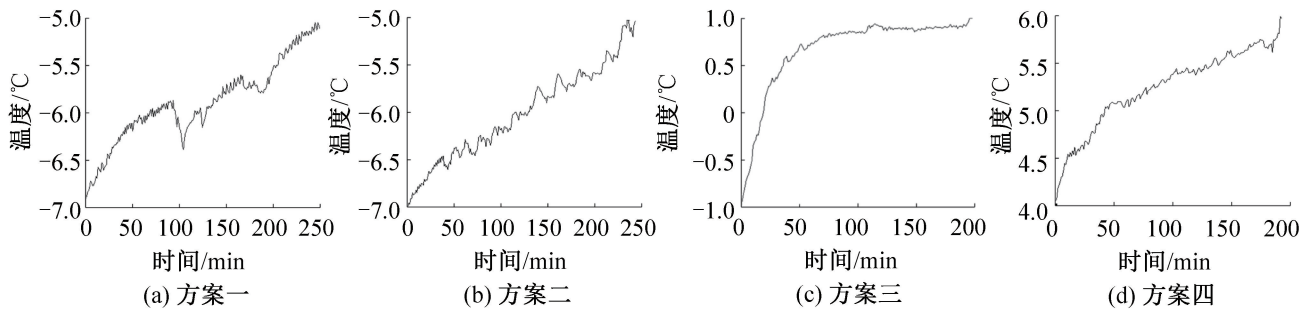


图 5 四种方案的温度变化

Fig.5 Temperature variations of four schemes

温度变化率为 0.003 5;方案三的蓄冷时长为 198 min,温度变化率为 0.002 9。考虑到两者温度变化率仅相差 0.000 6,虽然方案二的温度变化曲线略平稳,但蓄冷时长相差 79 min,蓄冷时长过短会影响 2.3 节实验进行,因此方案三更优。

等相变潜热值组合方案;方案二的蓄冷时长为

249 min,温度变化率为 0.005 8;方案四的蓄冷时长为 200 min,温度变化率为 0.004 6。考虑到温度均匀优先原则,因此方案四更优。

将两种最优方案(方案二和方案四)的组合蓄冷板与常规蓄冷方案对组合蓄冷板效果的影响对比如表 8 所示。

表 8 不同蓄冷方案对组合蓄冷板效果的影响对比

Tab.8 Comparison of effects of different cold storage schemes on combined cold storage plate

方案	蓄冷时长	蓄冷板内壁温度变化情况
等质量组合方案 (实验组)	选用等质量(1.5 kg)组合方案的 5 °C CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O 和 -6 °C 正十四烷的组合蓄冷板蓄冷时长为 277 min	等质量组合方案的组合蓄冷板温度变化率为 0.003 5,变化平稳
等相变潜热值方案 (实验组)	选用等相变潜热值(340.5 kJ)方案的 0 °C 水和 5 °C CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O 的组合蓄冷板,蓄冷时长为 200 min	等相变潜热值方案的组合蓄冷板温度变化率为 0.004 6,变化较平稳
常规蓄冷方案 (对照组)	为维持 2~8 °C,市面上不同品牌(Yoko eva Cool、好乐康等)的蓄冷板蓄冷时长存在差异,短则 5 h,长则 10 h	经过 K 型热电偶的测量,常规蓄冷方案的蓄冷板温度变化率最大超过了 1,温度分布很不均匀

考虑到温度均匀优先原则,本设计不使用常规蓄冷方案。等质量组合方案与等相变潜热值方案相比,

蓄冷时长和蓄冷板内壁温度变化情况更优,因此 2.3 节实验将采用等质量组合方案的 5 °C CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O

和 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 正十四烷的组合蓄冷板。

## 2.3 不同蓄冷板摆放位置对冷藏箱热性能的影响实验

### 2.3.1 实验布置

蓄冷板性能和蓄冷板在冷藏箱内摆放位置是影响冷藏箱蓄冷效果的重要因素。本实验将等质量组合蓄冷板按照 4 种方式摆放于冷藏箱中,蓄冷板中间位置布置 K 型热电偶,测量蓄冷板表面温度;冷藏箱内根据对称性,布置 9 个测温点,如图 6 所示,以此反映箱内的温度变化情况。

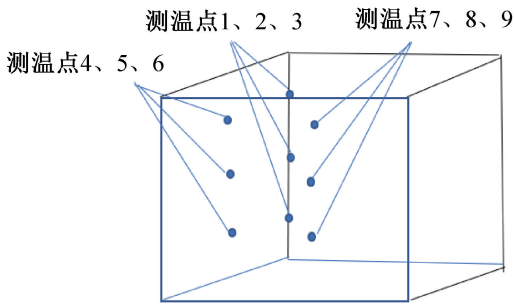


图 6 冷藏箱内 9 个测温点位置

Fig.6 Positions of nine temperature measuring points in the refrigerator

测温点 1、2、3 分别在冷藏箱两壁面交际处的上、中、下等距布置,测温点 4、5、6 分别在冷藏箱一壁面中间位置上、中、下等距布置,测温点 7、8、9 分别在冷藏箱正中间位置上、中、下等距布置。热电偶的探头悬于空气中,便于准确测量冷藏箱内空气温度。测温点 1、4、7 用于测量冷藏箱的上层空间温度,测温点 2、5、8 用于测量冷藏箱的中层空间温度,测温点 3、6、9 用于测量冷藏箱的下层空间温度。

### 2.3.2 不同蓄冷板摆放位置类型

为研究等质量组合方案的组合蓄冷板摆放方式对冷藏箱蓄冷时长和温度分布的影响,将对两侧平放、两侧叠放、对角摆放及四周摆放 4 种方式进行实验,如图 7 所示。

### 2.3.3 实验步骤

1) 在电脑上使用安捷伦数据采集仪,配置采集仪的参数,设定 9 个测温点,设定每 3 min 记录一次数据,温度上下限设置为 $2\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 将蓄冷板放入冰箱中冷冻,设定冷冻温度,当蓄冷板完全冻结后取出分别按照图 7 中 4 种方式布置于冷藏箱中,注意蓄冷板应紧贴冷藏箱的壁面,充分利用箱内空间。

3) 将 9 个 K 型热电偶探头布置在相应位置,注意探头应置于冷藏箱空气中,不能贴近箱壁面,盖上

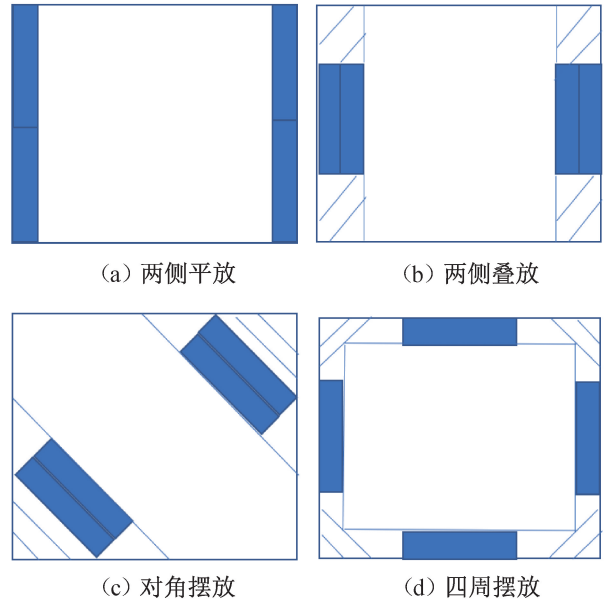


图 7 蓄冷板摆放方式

Fig.7 Laying modes of cold storage plates

冷藏箱的箱盖。

4) 当安捷伦数据采集仪读取的数据显示 9 个测温点任何一点超过 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,则停止记录数据,此次实验完成,生成所有温度变化的表格,将每个小时的各点温度制成点线图。

5) 根据步骤 1)~4),实验记录不同的蓄冷板和蓄冷板不同的摆放位置下的冷藏箱温度时长和温度场分布,每组实验重复 3 次,减小误差。

## 3 组合蓄冷板摆放位置的实验结果分析

### 3.1 组合蓄冷板摆放位置对冷藏箱的影响

本节实验以等质量组合方案的组合蓄冷板( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 正十四烷)作为实验对象,通过蓄冷时长  $T$ 、温度平均值  $M$ 、不均匀系数  $S$  和释冷速率  $\eta$  四个参数,研究组合蓄冷板在 4 种摆放位置下的冷藏箱热性能。

#### 3.1.1 冷藏箱蓄冷时长的对比

不同摆放位置下冷藏箱各点蓄冷时长  $T$  及对比如表 9 所示。箱内各点温度中,最晚达到 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测温点为 3、6、9,这三个点均位于箱内的下层空间,箱内最先达到 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测温点为 4 和 7,可知箱内上层空间的温度最先不满足预期。这是因为冷藏箱的上层空间靠近箱盖,由于箱盖处不可能完全密闭,上层也是最易受到外界环境影响的区域。

对角摆放的组合蓄冷板蓄冷时长最大,达到 21.80 h;两侧叠放的组合蓄冷板蓄冷时长最短,仅为 9.35 h。这是因为固体的导热性能一般强于气体的

表 9 不同摆放位置下冷藏箱各点蓄冷时长及对比

Tab.9 Length and comparison of cold storage at each point of refrigerator under different placement positions

摆放方式	T/h	平均温度/℃					最晚达到 2℃ 的测温点	最先达到 8℃ 的测温点
		冷藏箱内	上层空间	中层空间	下层空间	组合蓄冷板表面		
两侧平放	9.60	4.75	6.32	4.21	3.72	4.96	3	7
两侧叠放	9.35	5.13	5.71	5.26	4.43	6.45	9	4
对角摆放	21.80	6.10	6.88	6.00	5.41	4.74	6	7
四周摆放	13.45	5.22	6.45	5.14	4.07	5.30	3	4

导热性能。在组合蓄冷板对角摆放时,内外侧介质均为空气;两侧叠放时,内侧为箱内空气,外侧为箱体壁面。所以两侧叠放蓄冷时长最短,对角摆放蓄冷时长最长。

### 3.1.2 冷藏箱内温度平均值及蓄冷板表面温度平均值的对比

2~8℃工况下组合蓄冷板表面温度平均值  $M_1$  和冷藏箱内温度平均值  $M_2$  如表 10 所示。对角摆放的  $M_1$  最低,两侧叠放的  $M_1$  最高;对角摆放的  $M_2$  最高,两侧平放的  $M_2$  最低。造成该现象的原因一般为对角摆放时空气传热面积大,冷量流失快,温度平均值相差大,而其它摆放方式传热面积较小。

表 10 组合蓄冷板表面温度平均值及冷藏箱温度平均值

Tab.10 Average surface temperature of combined cold storage plate and inside refrigerator

摆放位置	$M_1/℃$	$M_2/℃$
两侧平放	4.96	4.75
两侧叠放	6.45	5.13
对角摆放	4.74	6.10
四周摆放	5.30	5.22

### 3.1.3 冷藏箱内温度不均匀系数的对比

2~8℃工况下冷藏箱内温度不均匀系数  $S$  的对比如表 11 所示。两侧叠放时  $S$  最小,为 19.90℃;对角叠放时  $S$  最大,为 34.55℃。造成该现象主要是因内部高温组合蓄冷板与外部低温组合蓄冷板侧表面接触,两块组合蓄冷板之间相互影响,使箱内温度

表 11 冷藏箱内不均匀系数

Tab.11 Inhomogeneous coefficient in refrigerator

摆放位置	$S/℃$
两侧平放	33.06
两侧叠放	19.90
对角摆放	34.55
四周摆放	33.45

场均匀性被改变。同时,由于对角摆放时蓄冷板空气传热面积大,在对角摆放时箱内温度波动最大、温度场最不均匀,在两侧叠放时箱内温度波动最小、温度场最均匀。

### 3.1.4 蓄冷板释冷速率的对比

组合蓄冷板在冷藏箱内释冷速率  $\eta$  的对比如表 12 所示。两侧叠放的箱内  $\eta$  最大,达到 1.20;两侧平放的箱内  $\eta$  最小,仅为 0.78。造成该现象的主要原因是蓄冷剂的相变温度不同<sup>[21]</sup>,相变温度较高的蓄冷剂吸收箱内热量,温度升高后又被相变温度较低的蓄冷剂冷却降温,再继续吸收箱内冷负荷;同时相变温度较低的蓄冷剂也在吸收冷藏箱内的冷负荷,从而提高了  $\eta$ 。两侧叠放时的蓄冷板传热介质厚度<sup>[22]</sup>大于其他摆放方式,导致相变温差大,因此在两侧叠放时箱内蓄冷板释放温度最快,而在两侧平放时箱内蓄冷板释放温度最慢。

表 12 冷藏箱内释冷速率

Tab.12 Cold release rate in refrigerator

摆放位置	$\eta$
两侧平放	0.78
两侧叠放	1.20
对角摆放	0.94
四周摆放	0.80

## 3.2 组合蓄冷板式冷藏箱的实验结果分析

本节分析组合蓄冷板构造的冷藏箱热性能,最终将在对角摆放(蓄冷时长优)和两侧叠放(温度场分布优)中选取适合本实验的组合蓄冷板摆放位置,两种摆放方式的热性能对比如表 13 所示。

考虑到疫苗等药品的活性对温度的要求较高,为防止药品失效,本实验以温度均匀优先为原则,则两侧叠放的等质量组合蓄冷板效果最好。

## 4 结论

组合蓄冷板提高了医药冷藏箱的释冷速率,优化

表 13 两侧叠放和对角摆放的热性能对比

Tab.13 Comparison of thermal performance between two side stacking and diagonal placement

摆放方式	$T$	$M$	$S$	$\eta$
两侧叠放	9.35 h, 蓄冷时长最短	组合蓄冷板:6.45 °C;冷藏箱:5.13 °C;满足工况 2~8 °C 的要求	19.90 °C, 箱内温度分布最均匀	1.20, 箱内蓄冷板释放温度最快
对角摆放	21.8 h, 蓄冷时长最长	组合蓄冷板:4.74 °C;冷藏箱:6.10 °C;满足工况 2~8 °C 的要求	34.55 °C, 箱内温度分布最不均匀	0.94, 箱内蓄冷板释放温度较快

了其温度场的分布,促进了我国医药冷链的发展。本文针对医药冷藏箱内的组合蓄冷板搭建了实验台,研究组合蓄冷板的性能及蓄冷板在医药冷藏箱中的摆放位置对冷藏箱在 2~8 °C 工况下热性能的影响,得到如下结论:

1) 总体上,等质量组合方案与等相变潜热值方案相比,蓄冷时长和蓄冷板内壁温度变化情况更优。等质量组合方案的蓄冷时长比等相变潜热值组合方案下的蓄冷时长高 10%,温度变化率小近一倍,温度变化曲线更加平稳。

2) 考虑到温度均匀优先原则,两侧叠放的组合蓄冷板蓄冷效果最好。但该种摆放方式存在明显缺陷,等质量 5 °C 和 -6 °C 组合蓄冷板在两侧叠放时的蓄冷时长仅为 9.35 h,在所有蓄冷方案中时长最短。因此,由两侧叠放的等质量组合蓄冷板构成的医药冷藏箱适合短途高质量药品的运输。后续的改进实验可以考虑采用其他相变蓄冷材料,使温度均匀性和蓄冷时长更加优化。

3) 本文设置的 4 种指标对冷藏箱热性能评价具有重要的作用,有利于医药冷藏箱的创新和发展。其中,不均匀系数(在空间角度上反映医药冷藏箱内的温度分布情况的参数)及释冷速率(在时间角度上体现医药冷藏箱内的平均温度达到稳定时长的参数)最为重要。鉴于 4 种摆放方式的蓄冷时长在 9~22 h 之间、温度平均值在 2~8 °C 工况内,两项参数均在合理范围内。当等质量组合方案的蓄冷板两侧叠放时,冷藏箱内不均匀系数最小,仅为 19.90 °C,箱内温度分布最均匀;同时冷藏箱内释冷速率最大,可达 1.20,箱内蓄冷板释放温度最快。

参考文献

[1] 方爱华. 我国发展冷藏箱运输的瓶颈与对策[J]. 集装箱化, 2010, 21(1): 5-7. (FANG Aihua. Bottleneck and countermeasures of developing refrigerator transportation in China[J]. Containerization, 2010, 21(1): 5-7.)  
 [2] 李浩楠. 我国医药冷链物流研究[J]. 营销界, 2020 (3): 85-87. (LI Haonan. Research on cold chain

logistics of medicine in China [J]. Marketing Circles, 2020(3): 85-87.)  
 [3] 喜崇彬. 新冠疫苗接种启动 物流迎来“世纪级”大考 [J]. 物流技术与应用, 2021, 26(3): 68-71. (XI Chongbin. Challenges in coronavirus vaccine logistics[J]. Logistics & Material Handling, 2021, 26(3): 68-71.)  
 [4] 陈宁. 国外现代医药冷链物流模式对我国的启示[J]. 物流技术, 2014, 33(11): 37-39. (CHEN Ning. Enlightenment of foreign modern medical cold chain logistics mode for China[J]. Logistics Technology, 2014, 33(11): 37-39.)  
 [5] 邓振华. 中外医药冷链物流发展的差异比较及经验借鉴[J]. 对外经贸实务, 2017(6): 89-92. (DENG Zhenhua. Comparison and experience of the development of Chinese and foreign medicine cold chain logistics [J]. Practice in Foreign Economic Relations and Trade, 2017 (6): 89-92.)  
 [6] 童山虎, 聂彬剑, 李子潇, 等. 基于相变蓄冷技术的冷链集装箱性能研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 211-216. (TONG Shanhu, NIE Binjian, LI Zixiao, et al. Investigation of the cold thermal energy storage reefer container for cold chain application [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 211-216.)  
 [7] 白美丽. 疫苗的冷链运输与保存[J]. 中国临床医生, 2006, 34(5): 4-5. (BAI Meili. Cold chain transportation and preservation of vaccines [J]. Journal of Chinese Physician, 2006, 34(5): 4-5.)  
 [8] 冯自平. 采用蓄冷恒温箱实现混装的冷藏配送技术研究[J]. 物流技术, 2005, 24(7): 32-34. (FENG Ziping. Study on mixed cold-storage delivery technology with cold roll box [J]. Logistics Technology, 2005, 24 (7): 32-34.)  
 [9] 赵祎, 章学来, 徐笑锋, 等. 应用于冷链运输相变蓄冷技术研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(21): 117-124. (ZHAO Yi, ZHANG Xuelai, XU Xiaofeng, et al. Research progress of phase change cold storage technology applied to cold chain transportation [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(21): 117-124.)  
 [10] 杨天润, 孙锲, WENNERSTEN R, 等. 相变蓄冷材料的

- 研究进展[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(3): 567-573. (YANG Tianrun, SUN Qie, WENNERSTEN R, et al. Review of phase change materials for cold thermal energy storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(3): 567-573.)
- [11] 范中阳, 刘升, 武卫东, 等. 蓄冷板摆放方式对冷链宅配过程的影响[J]. 制冷技术, 2017, 37(6): 51-54. (FAN Zhongyang, LIU Sheng, WU Weidong, et al. Effect of laying modes of cold plates on cold chain delivery process[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(6): 51-54.)
- [12] 刘广海, 李庆庭, 谢如鹤, 等. 基于辐射制冷技术的冷链保温箱隔热性能测试与能耗分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 318-325. (LIU Guanghai, LI Qingting, XIE Ruhe, et al. Thermal insulation performance test and energy consumption of the cold chain incubator with radiative cooling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 318-325.)
- [13] 许启军, 谢晶. 蓄冷板式冷藏箱的节能优化研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 232-236. (XU Qijun, XIE Jing. Research progress on energy saving optimization of cold storage plate refrigerator[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 232-236.)
- [14] 陈英姿, 刘益才, 杨智辉. 冰箱组合式相变材料蓄冷的实验研究[J]. 制冷技术, 2006, 26(2): 13-16. (CHEN Yingzi, LIU Yicai, YANG Zhihui. Experimental investigation on refrigerator employing phase changeable compound materials[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2006, 26(2): 13-16.)
- [15] BELLECCI C, CONTI M. Phase change thermal storage: heat transfer analysis for a thermodynamic systematization [C]//International Heat Transfer Conference. Brighton, UK, 1994, 10.
- [16] 常杰英. 新型保温箱在医药冷链运输中夏季保温性能研究[J]. 物流工程与管理, 2017, 39(12): 79-80. (CHANG Jieying. Study on thermal insulation performance of new type of incubator in medical cold chain transportation in summer[J]. Logistics Engineering and Management, 2017, 39(12): 79-80.)
- [17] 郭志鹏, 阚安康, 杨帆, 等. 布置真空绝热板的冷藏集装箱内温度分布[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 29-33. (GUO Zhipeng, KAN Ankang, YANG Fan, et al. Temperature distribution inside reefer container equipped with vacuum insulation panels [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 29-33.)
- [18] 张哲, 王飒飒, 李立民, 等. 蓄冷板冻结与释冷的实验研究[J]. 低温工程, 2015(1): 64-68. (ZHANG Zhe, WANG Sasa, LI Limin, et al. Experimental research on freezing and discharging processes of cold plate [J]. Cryogenics, 2015(1): 64-68.)
- [19] 潘欣艺, 王冬梅, 朱宏. 保温材料对保温箱内温度场的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 115-118. (PAN Xinyi, WANG Dongmei, ZHU Hong. Study on temperature field of different materials in incubator [J]. Food & Machinery, 2018, 34(8): 115-118.)
- [20] 龙金领. 正十三烷/聚苯乙烯微胶囊相变材料的制备与表征 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017. (LONG Jinling. Preparation and characterization of n-tridecane/polystyrene microcapsule phase change materials [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.)
- [21] 陶文博, 谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 52-59. (TAO Wenbo, XIE Ruhe. Research and development of organic phase change materials for cool thermal energy storage [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1): 52-59.)
- [22] 杜雁霞, 程宝义, 贾代勇, 等. 相变材料蓄冷板凝固过程的传热研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(2): 44-46. (DU Yanxia, CHENG Baoyi, JIA Daiyong, et al. Study on heat transfer of phase-change cool-storage slab in solidification [J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(2): 44-46.)

#### 通信作者简介

王瑜,男,副教授,南京工业大学城市建设学院,13913808658, E-mail: yu-wang@njtech.edu.cn. 研究方向:高效相变换热技术、特种装备及密闭有限空间环境控制技术、制冷系统设计与优化、数据机房液冷技术。

#### About the corresponding author

Wang Yu, male, associate professor, College of Urban Construction, Nanjing Tech University, 86-13913808658, E-mail: yu-wang@njtech.edu.cn. Research fields: high efficiency phase change heat exchange technology, special equipment and confined space environmental control technology, refrigeration system design and optimization, liquid cooling technology of data room.