

相变蓄冷剂对冷链包装温控效果的影响

黄莉

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

摘要: **目的** 研究不同相变蓄冷剂对冷链运输包装传热性能和温控时间的影响。**方法** 通过采用独特的包装结构设计, 并根据运输环境温度对蓄冷剂进行不同的预处理, 充分利用相变材料在固-液相态转变过程中良好的温控性能。**结果** 在保温箱体性能参数不变的情况下, 其温控时间取决于所用相变材料的相变温度和相变焓值。在极端高温、极端低温和交变温度条件下, 采用熔点为 5 °C 的相变蓄冷剂, 可以将包装的保温时间从 1 h 延长至 80 h 以上, 而且包装内保持了长时间 4~5 °C 的恒温平台; 采用熔点为 0 °C 的水作为蓄冷剂, 包装内则会出现长时间的过冷, 温度平台在 -1~2 °C 范围内。实验测得的包装保温时间与传热计算所得的理论值相吻合, 偏差不大于 ±10%。**结论** 采用合适的相变蓄冷剂可以大大延长温控包装的保温时间, 并通过对蓄冷剂进行有效的预处理, 在各种极端温度环境下均可确保冷藏药品的运输安全。

关键词: 冷藏链; 冷藏单元; 温控; 相变; 潜热; 过冷度

中图分类号: TB61⁺1; TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0072-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.000

Influence of Phase Change Material on Temperature Control Performance of Cold-chain Packaging

HUANG Li

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of different phase change materials on packaging heat transfer and temperature control duration during cold-chain transportation. By adopting a unique packaging structure design and carrying out different pretreatment on the phase change materials according to the transportation environment temperature, the good temperature control performance of the phase change material in the solid-liquid phase transition process was fully utilized. When the performance parameters of the thermal insulation box kept unchanged, the temperature control duration depended on the phase change temperature and phase change enthalpy of the adopted phase change material. The phase change material with melting point of 5 °C at the extremely high temperature, extremely low temperature and alternating temperature can extend the holding time of package from 1 hour to more than 80 hours and the constant temperature platform of 4~5 °C was maintained in the package. When the water with melting point of 0 °C was used as PCM, the package was excessively cooled for long time and the temperature platform was within -1~2 °C. The package holding time experimentally determined agreed well with that theoretically calculated value and the deviation was within ±10%. Thus, suitable PCM can greatly extend the holding time of temperature-controlled package and the effective pretreatment on phase change materials can ensure the transportation safety of refrigerated drugs at all extreme temperature.

收稿日期: 2018-11-19

基金项目: 浙江省公益性技术应用研究计划 (2017C34002)

作者简介: 黄莉 (1978—), 女, 博士, 宁波大学副研究员, 主要研究方向为相变材料的制备及应用。

KEY WORDS: cold chain; cold unit; temperature control; phase change; latent heat; degree of subcooling

2016 年 3 月, 山东爆发了一起震惊全国的非法经营疫苗事件, 引起了公众尤其是家长们的极大恐慌, 造成了极其恶劣的社会影响, 但事实上这类由于运输温度条件不合格而导致的疫苗或者药品事件在我国屡屡发生。以江苏省为例, 在 2012 年, 江苏省食品药品监督管理局查处的近 5000 件药品质量案件中, 30% 左右是由贮存、运输不符合冷链要求导致的^[1]。由此, 医药冷链物流的安全性能问题亟待解决。

当前冷藏药品的运输方式主要有 2 种: 大批量药品的运输, 一般采用配备了传统压缩式制冷机的冷藏车; 小批量药品的运输, 针对不同数量的冷藏药品使用不同容积的冷链运输包装。据统计, 目前国际上有 100 万辆冷藏车与 40 万个冷链运输包装在运行^[2]。然而, 采用传统压缩式制冷机的冷链运输方式并不节能, 由其直接和间接作用所排放的温室气体占全球总量的 2.5%^[3]。

目前, 市场上的医药温控包装按照能源供给方式可以分为电力驱动有源型包装与无源蓄能型包装。有源型包装常见的是自带压缩机组的包装, 其在低温配送的过程中需要消耗大量的能源(燃油), 100 km 油耗能够达到 2~4 L^[4]。基于有源型温控包装配送成本高、效率低等缺点, 以相变材料为基础的无源温控包装配送模式渐渐开始占据主导地位。相变材料(PCMs)是指利用相态转变过程来储存或者释放大热量, 同时保持温度不变的材料。将相变材料应用于冷链运输中, 可以显著延长保温时间, 从而实现冷链运输的节能、环保。比如, Ahmed 等将石蜡作为相变材料放入一辆冷藏车的保温层中, 使得从外界传入冷藏车内的热负荷平均降低了 16.3%^[5]。Liu M 等开发了一种新型相变蓄冷型制冷系统, 装载了该系统的冷藏车质量与采用传统压缩式制冷机的冷藏车质量相当, 但运行时只需要压缩式制冷机一半的能源消耗^[6]。

Fioretti 等在冷链运输包装外部增加了 1 层相变材料, 使得包装的峰值传热率分别降低了 5.55% 与 8.57%^[7]。Copertaro 等对外层加入相变材料的冷链运输包装进行了传热模拟。结果表明, 在夏季高温条件下, 采用熔点为 35 °C 的相变材料包装, 包装的热负荷峰值降低了 20%, 且峰值出现的时间推后了 2~3 h^[8]。

在欧美国家的市场中已经出现了一些相变蓄冷型冷链包装产品。其中, 法国 EMBALL'ISO 公司开发了一次性使用的相变蓄冷型包装, 其箱体为泡沫箱或以 XPS 板为保温层制成的拼接箱^[9]。由于这 2 类包装的保温性能较差, 因此保温时间一般在 48 h 以内。瑞士 SkyCell AG 公司利用相变蓄冷技术开发了药物运输用的大型温控包装。整个包装可以折射 96% 的太

阳光辐射, 而蓄冷层则采用 5 °C 的相变蓄冷材料, 可以吸收 7.8 kW·h 的热量^[10]。

国内的温控包装公司大部分由保温箱厂家发展而来, 箱体主要以滚塑箱体或注塑箱体为主, 采用的蓄冷剂通常为水, 或者通过加入盐类降低水的熔点。这些蓄冷剂的保温范围一般低于 0 °C, 应用在疫苗运输上容易导致过冷, 从而使疫苗失效。另外, 温控的有效控制时间也比较短, 一般在极端温度条件下不超过 24 h。

由于我国地域广阔且气候条件复杂多样, 药品运输往往需要 3 d 或更长的时间, 且在运输过程中往往会遭遇极端温度或者交变温度, 这给冷链物流运输带来了极大的挑战。当前国内外报道的相变蓄冷型保温箱虽然可以有效延长保温时间, 但在极端温度条件下一般不超过 48 h, 同时存在着易过冷的缺点。由此, 针对我国当前药品运输的需求以及现有温控包装存在的问题, 笔者拟设计独特的包装与蓄冷盒结构, 在此基础上采用不同的相变蓄冷剂进行配置, 并研究针对蓄冷剂不同的预处理方法, 以实现最终在极端高温、极端低温以及交变温度条件下 72 h 以上的保温运输功能。

1 实验

1.1 温控包装结构与性能参数

温控包装的结构见图 1, 由外及内分别为保温箱体、保温箱盖、双层蓄冷盒及药品包装箱。箱体采用一体化发泡技术以提高箱体的密封性能, 其外尺寸为 540 mm×420 mm×480 mm, 内尺寸为 420 mm×300 mm×360 mm, 箱体厚度为 60 mm; 保温材料为三明治结构, 由外向内分别为 10 mm 聚氨酯(PU), 10 mm 真空绝热板(VIP)以及 40 mm 聚氨酯, 真空绝热板包覆于聚氨酯中。包装内侧的 6 个面分别放置 2 层蓄冷盒, 共 12 块, 蓄冷盒外尺寸为 350 mm×290 mm×15 mm, 材质为高密度聚乙烯(HDPE)。采用双层蓄冷盒结构并通过相应的预处理方法使温控包装在不同外界温度环境下均可达到 72 h 以上的保温运输。相较于单层蓄冷盒, 双层蓄冷盒结构最主要的优势在于, 在交变温度条件下, 只需将内层蓄冷盒冷藏而外层蓄冷盒冷冻, 即可达到长时间的保温运输, 操作非常简单; 单层蓄冷盒则很难控制盒内相变材料凝固和融化的量, 容易在运输过程中造成药品过冷或过热现象。

蓄冷盒内封装相变材料, 这里分别采用水与熔点为 5 °C 的有机相变材料 RT5HC 作为蓄冷剂。水及

RT5HC 在各个温度点的焓值分布见图 2—3, 可知, 水的相变温度为 0 °C, 在 -2~4 °C 的温度区间内, 其储能容量为 340 kJ/kg; RT5HC 的熔解与凝固温度为

5~6 °C, 在典型的冷藏药品保温区间之内 (2~8 °C), 其储能容量为 235 kJ/kg。水与 RT5HC 的技术参数及其在包装中的使用量^[11]见表 1。

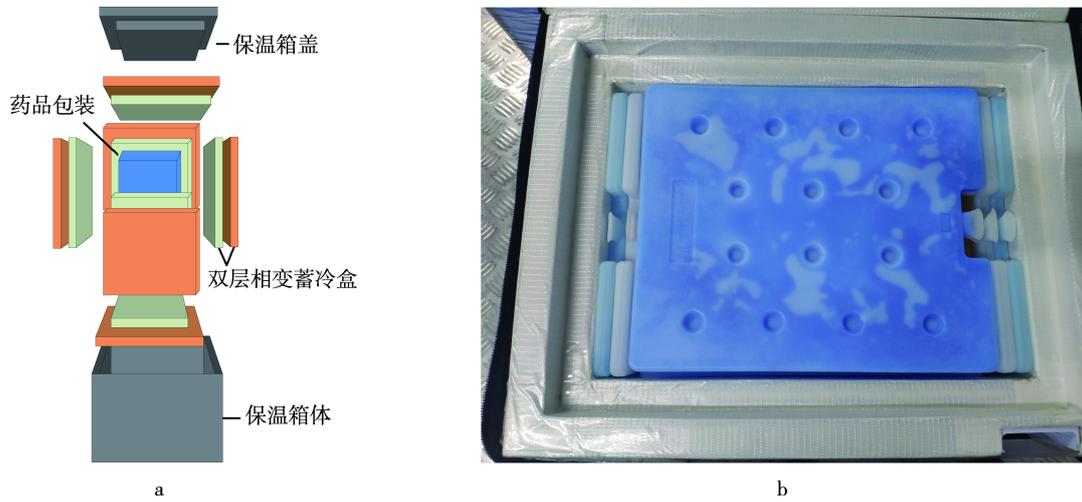


图 1 包装结构与双层蓄冷盒实物
Fig.1 Package structure and double-layer PCM boxes

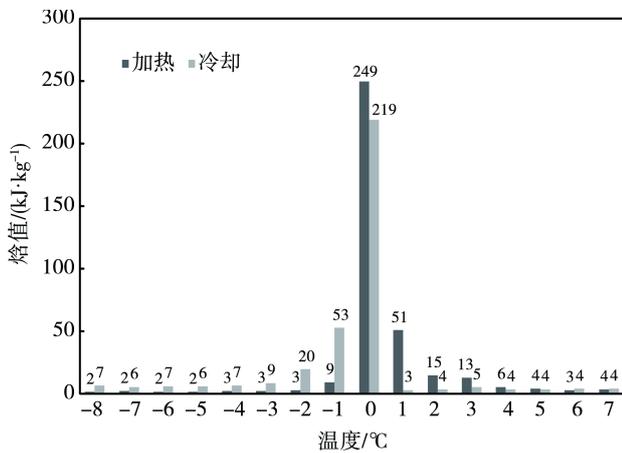


图 2 水的焓值分布
Fig.2 Enthalpy distribution of water

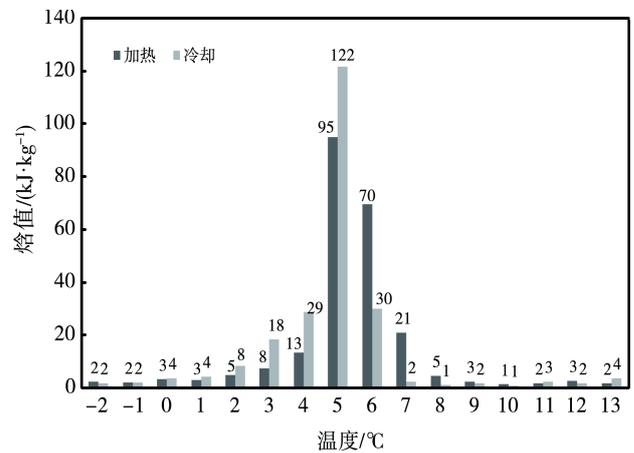


图 3 RT5HC 的焓值分布
Fig.3 Enthalpy distribution of RT5HC

表 1 水与 RT5HC 的技术参数
Tab.1 Technical parameters of water and RT5HC

类型	比热容/ (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	固体密度 (-15 °C)/(kg·L ⁻¹)	液体密度 (20 °C)/(kg·L ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	体积 膨胀率/%	包装 使用量/kg
水	4.2	0.996	0.998	0.56	0.3	10.87
RT5HC	2	0.88	0.76	0.2	13	8.28

1.2 温控包装传热计算

为了简化计算,在温控包装的传热计算中,作出以下 2 个假设:外界环境温度与箱体内空气温度分布均匀;在相变材料的相态转变过程中,材料内部温度保持不变且分布均匀。在包装外环境温度高于包装内温度的情况下,箱体的传热过程见图 4。其中, $\theta_a, \theta_1, \theta_2$ 与 θ_b 分别为包装外界环境温度、VIP 外层温度、

VIP 内层温度与包装内空气温度, Q_t 为外界向箱内传递的热量。

由于箱体的内外表面积不一致,根据式 (1) 可计算箱体的平均传热面积为:

$$A = \sqrt{A_a \cdot A_b} \quad (1)$$

式中: A_a 为箱体的外表面积 (m²); A_b 为箱体的内表面积 (m²)。代入数据计算可得 $A=0.856$ m²。

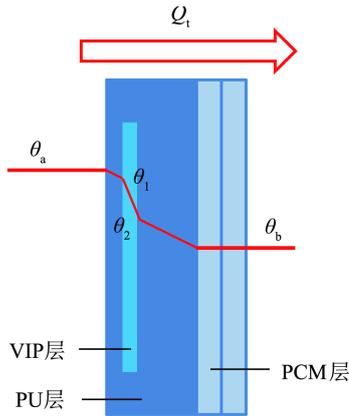


图 4 外界高温条件下温控包装箱体的传热过程
Fig.4 Heat transfer schema of the temperature-controlled package container at high temperature

温控包装的总传热系数 K 为^[11]：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2)$$

式中： α_1 与 α_2 分别为包装外侧与内侧的空气换热系数，一般包装装载在冷藏车或货车中进行运输，在运输过程中车门关闭，因此包装外侧与内侧空气均可视为自然对流，换热系数一般在 $7.0\sim 9.3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 范围内^[13]，取 $\alpha_1=\alpha_2=8.0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； δ_1 ， δ_2 与 δ_3 分别为 PU 层、VIP 层与 PCM 层的厚度 (m^2)； λ_1 ， λ_2 与 λ_3 分别为 PU 层、VIP 层与 PCM 层的导热系数，分别取 $\lambda_1=0.022 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， $\lambda_2=0.005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， $\lambda_3=0.005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

通过保温箱体与蓄冷盒渗入包装内部的热负荷 q_1 的计算为：

$$q_1 = K \cdot A \cdot (\theta_a - \theta_b) \quad (3)$$

式中： θ_a 与 θ_b 分别为包装外界环境温度与包装内空气温度，在计算中 θ_b 取包装内允许达到的最高温度（极端高温条件下取值 8°C ）或最低温度（极端低温条件下取值 2°C ）。

由于包装漏气传入箱体内部热负荷 q_2 的计算为：

$$q_2 = \beta \cdot q_1 \quad (4)$$

式中： β 为包装漏气附加热负荷系数，在计算中取 0.2。

包装总热负荷 q 的计算为：

$$q = q_1 + q_2 \quad (5)$$

相变材料的蓄热（冷）容量 ΔH 为：

$$\Delta H = m \cdot \Delta h \quad (6)$$

式中： m 为相变材料的质量 (kg)； Δh 为相变材料单位质量的熔解（凝固）焓值 (kJ/kg)。

经由包装进入箱内的热负荷由相变材料吸收，在相变材料完全熔解（或凝固）之前，箱内温度可以控制在 $2\sim 8^\circ\text{C}$ 范围内。由此，温控包装的保温时间 t 为：

$$t = \frac{\Delta H}{q} \quad (7)$$

由上述计算可知，在箱体性能参数不变的情况下，其保温时间取决于所用相变材料的相变温度、相变焓值以及用量。

1.3 温控包装性能测试方法

根据 GB/T 34399—2017《医药产品冷链物流温控设施设备验证性能确认技术规范》，保温区间在 $2\sim 8^\circ\text{C}$ 范围内的温控包装应在 3 种条件下分别测试其保温性能^[14]：极端高温条件，温度为 35°C （偏差为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）；极端低温条件，温度为 -20°C （偏差为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）；交变温度条件，前半段时间温度为 35°C （偏差为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ），后半段时间温度为 -20°C （偏差为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）。

笔者采用高低温交变箱模拟上述 3 种温度条件，对包装性能进行检测。为了更好地测试包装内温度并确定在不同温度条件下包装内最易超温点，笔者按照图 5 布置了 9 个温度测点，其中环境温度测点 1 个，箱内温度测点 8 个。

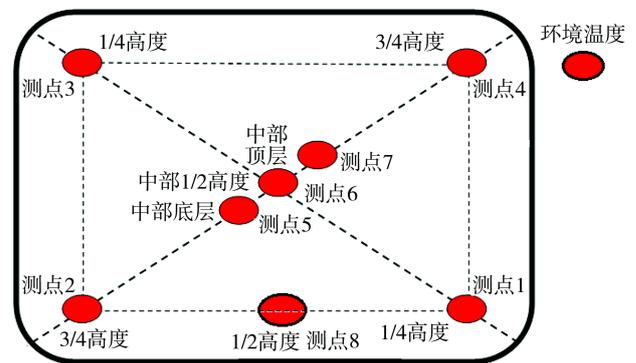


图 5 温控包装内外温度测点分布
Fig.5 Arrangement of inside and outside temperature measuring points of temperature-controlled package

为了充分利用相变材料的吸热或放热过程，在极端高温、极端低温与交变温度条件下相变材料的起始状态要求不同，因此，笔者采用不同的冷冻和回冷步骤对蓄冷盒进行预处理。由于实际应用过程中大多数冷库体积有限，所以在冷冻和回冷过程中蓄冷盒一般都是多块堆叠在容器中（如纸箱或者塑料筐等，见图 6a，使得蓄冷盒之间几乎没有空隙，这就导致中间的蓄冷盒很难接触到作为传热介质的冷空气，只能靠外层蓄冷盒的热传导，因此冷冻和回冷时间较长。如果小批量操作或者冷库体积较大，可以将蓄冷盒平摊或者每盒之间留有足够的空隙（ $\geq 40 \text{ cm}$ ），如采用支架平放方式，见图 6b，则可以将蓄冷和回冷的时间降低至 24 h 以下。以高温模式为例，只需将蓄冷盒依次放入支架内，将支架放入 -20°C 的冷冻库中 18~24 h 后，再置于 $4\sim 5^\circ\text{C}$ 的冷藏库中 2~4 h，即可完成整个蓄冷与回冷过程。这是在冷库条件允许的前提下较为高效与经济的运转方式。



a 采用塑料筐的堆叠方式
b 采用支架的平放方式

图6 蓄冷盒冷冻和回冷的2种操作方式
Fig.6 Two operation modes for freezing and back-cooling of PCM panels

大多数冷库为了节约建造成本以及运行费用,其容积有限。由此,为使研究结果更具有实际应用意义,这里采用的测试步骤为大批量操作时堆叠放置的方式,即图6a的方式。

1.3.1 极端高温条件测试步骤

在极端高温条件下,相变材料的起始状态应为固态,同时应避免箱内温度低于2℃而导致药品或者疫苗被冷冻,因此蓄冷盒需要进行冷冻并回冷,其测试步骤如下所述。

1) 蓄冷盒冷冻。将12盒蓄冷盒置于-20℃的冷冻库中48h以上。

2) 蓄冷盒回冷。水作为蓄冷剂时,将12盒蓄冷盒置于4~5℃的冷藏库中60h,直至蓄冷盒表面温度达到0℃;RT5HC作为蓄冷剂时,将12盒蓄冷盒置于4~5℃的冷藏库中60h,直至蓄冷盒表面温度达到5℃。

3) 装箱。将蓄冷盒装入包装中,放入药品包装箱和温度记录仪并打包。

4) 测试。将打包好的包装置于高低温交变箱中进行测试,高低温交变箱内温度设置为35℃恒温。

1.3.2 极端低温条件测试步骤

在极端低温条件下,相变材料的起始状态应为液态,同时应避免箱内温度高于8℃而影响药品质量,因此蓄冷盒无需冷冻,只需将蓄冷盒和箱体在冷藏库中进行预冷,其测试步骤如下所述。

1) 蓄冷盒冷藏。将12盒蓄冷盒置于5~6℃的冷藏库预冷8h。

2) 箱体预冷。将箱体置于5~6℃的冷藏库预冷8h。

3) 装箱。将蓄冷盒装入包装中,放入药品包装箱和温度记录仪并打包。

4) 测试。将打包好的包装置于高低温交变箱中

进行测试,高低温交变箱内温度设置为-20℃恒温。

1.3.3 交变温度条件测试步骤

在交变温度条件下,相变材料的起始状态应为固-液共存。包装所配置的蓄冷盒为双层结构,因此可以将靠药品包装箱(药品)一侧的蓄冷盒冷藏至5℃左右,使相变材料保持液体状态,而靠保温箱体一侧的蓄冷盒冷冻至全部凝固,其具体测试步骤如下所述。

1) 蓄冷盒冷冻。将6盒蓄冷盒置于-20℃的冷冻库中30h。

2) 蓄冷盒冷藏。将6盒蓄冷盒置于5~6℃的冷藏库8h。

3) 装箱。将12盒蓄冷盒装入包装中,其中冷藏过的6盒蓄冷盒放置于药品包装箱外侧,冷冻过的6盒蓄冷盒放置于保温箱体一侧,再放入温度记录仪并打包。

4) 测试。将打包好的包装置于高低温交变箱中进行测试,高低温交变箱内的温度在前半部分设置为35℃,在后半部分设置为-20℃。

2 实验结果与讨论分析

2.1 极端高温条件下的保温性能测试结果

极端高温条件下,不采用蓄冷剂的温控包装、采用水作为蓄冷剂的温控包装以及采用RT5HC作为蓄冷剂的温控包装的内部空气温度变化曲线见图7—9(其中斜线部分表示温控区间2~8℃,下同),可知不采用蓄冷剂的包装箱内温度上升很快,其保温时间仅54min,采用蓄冷剂可以显著延长保温时间。采用水作为蓄冷剂的包装内温度长时间维持在0~2℃之间,直至70h后箱内温度开始缓慢上升(见图8),但如果药品长时间处于低于2℃的环境,容易出现过

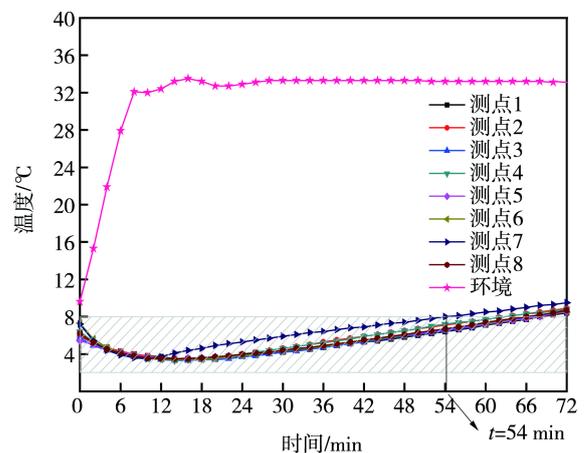


图7 极端高温条件下环境温度与不采用蓄冷剂的温控包装内空气温度变化曲线

Fig.7 Change curves of ambient temperature and air temperature inside the temperature-controlled container without PCM at extremely high temperature

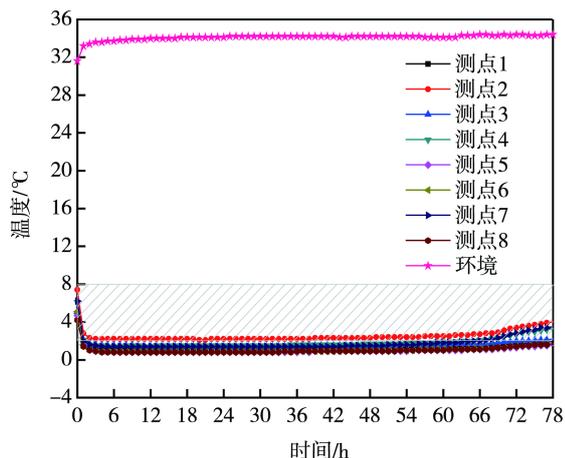


图 8 极端高温条件下环境温度与采用水作为蓄冷剂的温控包装内空气温度变化曲线

Fig.8 Change curves of ambient temperature and air temperature inside the temperature-controlled container with water as PCM at extremely high temperature

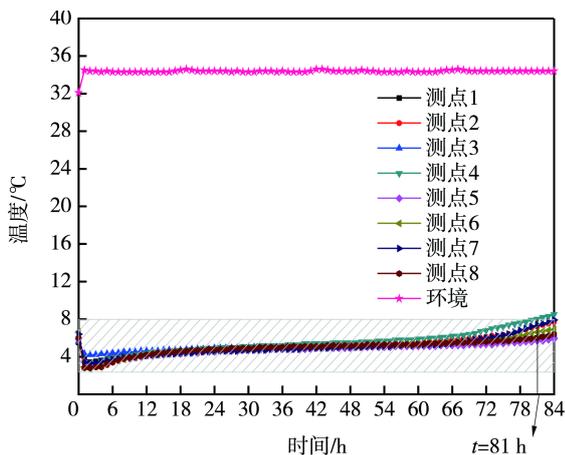


图 9 极端高温条件下环境温度与采用 RT5HC 作为蓄冷剂的温控包装内空气温度变化曲线

Fig.9 Change curves of ambient temperature and air temperature inside the temperature-controlled container with RT5HC as PCM at extremely high temperature

冷和质量受损的现象。采用 RT5HC 作为蓄冷剂，包装的保温时间可以延长至 81 h，且包装内温度始终保持在冷藏药品运输所要求的 2~8 °C 范围内，尤其在 5 °C 的温度点形成了长时间的温度平台（见图 9），正好为所用相变材料 RT5HC 的熔点（凝固点）峰值。

同时发现，在上述 3 种情况下，最先出现超温的均为箱内角落的测点，即测点 1，测点 2，测点 3 或测点 4。这主要是因为箱体与箱盖在角点处的密封性能相对薄弱，使得在角点容易出现漏气现象，从而导致该处的热损失增强，温度上升比其他测点快，因此最容易出现超温现象。

2.2 极端低温条件下的保温性能测试结果

极端低温条件下，不采用蓄冷剂的温控包装、采用水作为蓄冷剂的温控包装以及采用 RT5HC 作为蓄

冷剂的温控包装的内部空气温度变化曲线见图 10—12，可知不采用蓄冷剂的包装内温度迅速下降，其保温时间约 62 min，采用不同蓄冷剂其保温时间相差较大。采用水作为相变蓄冷剂，包装的保温时间仅延长至 10 h，其箱内温度首先呈直线下降至 -6 °C，经过约 50 h 后，温度逐渐回升至 -2~-1 °C 并开始形成温度平台。这个现象出现的主要原因在于水在冷却过程中出现过冷现象，即箱内温度达到 -6 °C 以后水才开始结晶，而一旦形成结晶，冰/水的温度开始上升，最终保持在 0 °C 左右直至全部凝固，而箱内温度也相应地达到 -2~-1 °C 的温度平台。当采用 RT5HC 作为蓄冷剂时，包装的保温时间增加至 102 h，且箱内温度在最初 60 h 内维持在 4~5 °C 范围内，箱内温度始终保持在冷藏药品运输所要求的 2~8 °C 范围内，之后温度缓慢下降直至 102 h 之后出现低于 2 °C 的测试

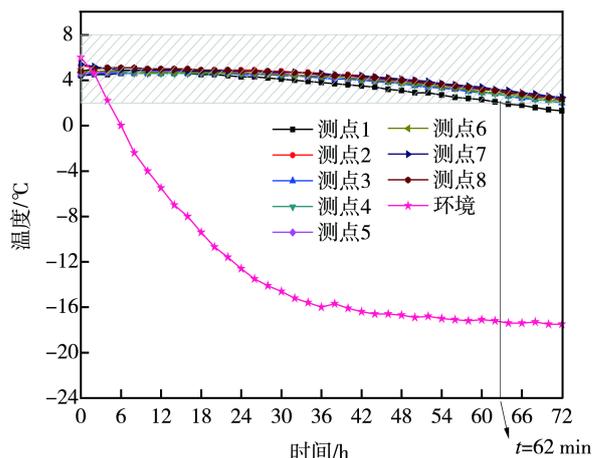


图 10 极端低温条件下环境温度与不采用蓄冷剂的温控包装内空气温度变化曲线

Fig.10 Change curves of ambient temperature and air temperature inside the temperature-controlled container without PCM at extremely low temperature

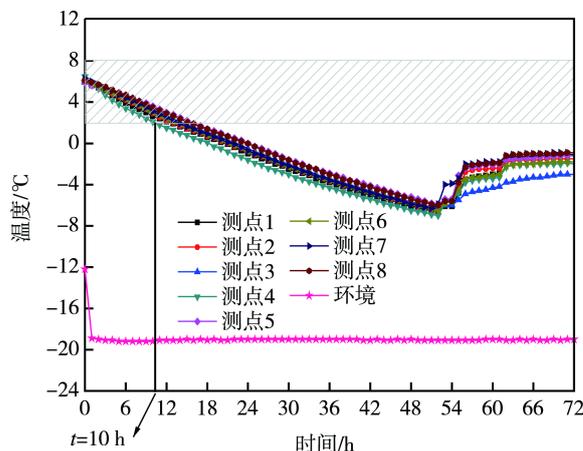


图 11 极端低温条件下环境温度与采用水作为蓄冷剂的温控包装内空气温度变化曲线

Fig.11 Change curves of ambient temperature and air temperature inside the temperature-controlled container with water as PCM at extremely low temperature

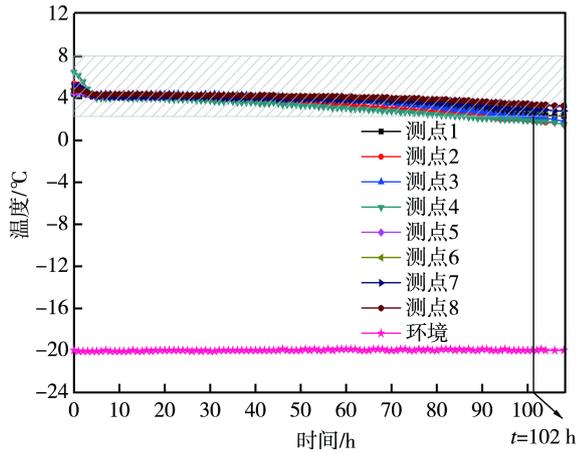


图 12 极端低温条件下环境温度与采用 RT5HC 作为蓄冷剂的温控包装内空气温度变化曲线

Fig.12 Change curves of ambient temperature and air temperature inside the temperature-controlled container with RT5HC as PCM at extremely low temperature

点。另外,在这 3 种情况下,最先出现超温的也是箱体角落测点,即测点 1, 2, 3, 4。

2.3 交变温度条件下的保温性能测试结果

交变温度条件下,采用水作为蓄冷剂的温控包装以及采用 RT5HC 作为蓄冷剂的温控包装的箱内温度变化曲线见图 13—14。由于不采用蓄冷剂的温控包装在极端高温与极端低温条件下的保温时间仅 1 h 左右,这对于交变温度条件至少 72 h 的测试来说意义不大,因此不再对不采用蓄冷剂的包装进行该项测试。由图 13 可以看出,采用水作为蓄冷剂的包装内温度始终保持在 2 °C 以下,其中前 36 h 温度为 0 °C,后 36 h 温度为 -1 °C,这容易导致运输药品的过冷以及质量受损。采用 RT5HC 作为蓄冷剂的包装保温时间为 100 h,而且箱内温度在最初 72 h 之内始终维持在 4~5 °C 之间(见图 14)。

根据上文所述传热计算所得的保温时间与实验测得的数据见表 2,保温时间的实验值取最快超温测点的时间。实验值与计算值吻合度较高,偏差高于 10%,在实验允许误差范围内。理论值与实验值有偏差的主要原因在于,在传热计算中假设的箱内

温度是均匀的,而实际测试中,包装的保温箱盖与保温箱体连接处不可避免地存在漏气现象,尤其是在角部,因此根据不同测点温度计算所得的保温时间是不一致的。

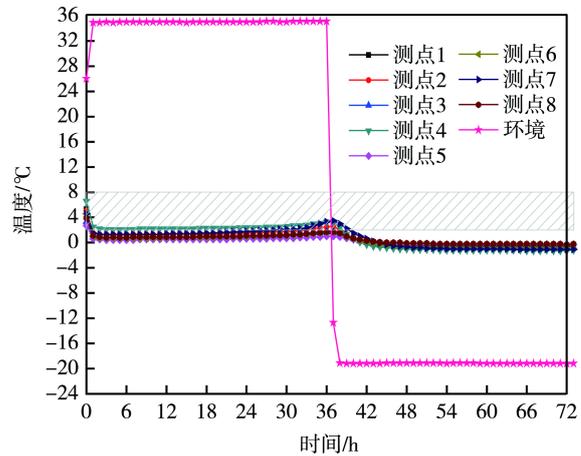


图 13 交变温度条件下环境温度与采用水作为蓄冷剂的温控包装内空气温度变化曲线

Fig.13 Change curves of ambient temperature and air temperature inside the temperature-controlled container with water as PCM at alternating temperature

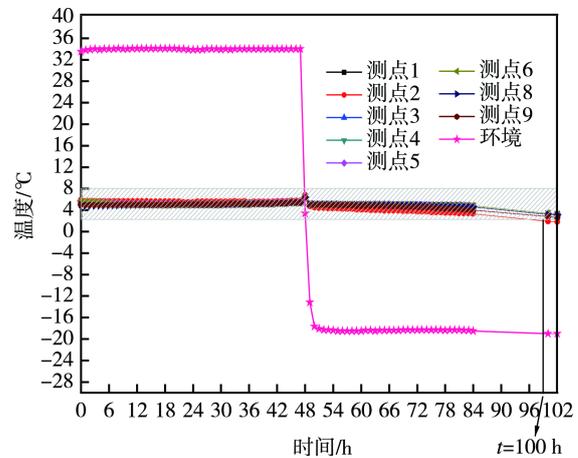


图 14 交变温度条件下环境温度与采用 RT5HC 作为蓄冷剂的温控包装内空气温度变化曲线

Fig.14 Change curves of ambient temperature and air temperature inside the temperature-controlled container with RT5HC as PCM at alternating temperature

表 2 在不同温度条件下温控包装的保温时间实验值与理论计算值的对比

Tab.2 Experimental and theoretical values of the holding time of the temperature-controlled container at different temperature

温度/°C	允许最高温度或最低温度/°C	保温时间/h		偏差/%
		实验测试值	理论计算值	
35	8	81	88	-7.95
-20	2	102	108	-5.56
35 °C (偏差±2 °C, 前36 h), -20 °C (偏差±2 °C, 后36 h)	8 °C (允许最高温度, 前36 h), 2 °C (允许最低温度, 后36 h)	100	98	+2.04

3 结语

针对冷藏药品保温运输的要求,采用一体化发泡技术与双层蓄冷盒结构开发了相变蓄冷型温控包装,并使用不同的蓄冷剂进行配置,根据《医药产品冷链物流温控设施设备验证性能确认技术规范》的要求,对温控包装进行了传热计算与实验验证。

为了充分利用相变材料的吸热或放热过程,针对不同的运输环境温度,笔者采用不同的冷冻和回冷步骤对相变蓄冷剂进行了预处理。实验结果表明,在保温箱体性能参数不变的情况下,其温控时间取决于所用相变材料的相变温度与相变焓值。在极端高温和交变温度条件下,采用熔点为 0°C 的水作为蓄冷剂,包装内温度长时间(约72 h)处于 $-1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 范围内,这容易导致运输药品过冷和质量受损;在低温条件下,采用水作为蓄冷剂的包装保温时间仅为10 h。采用熔点为 5°C 的RT5HC作为蓄冷剂,在极端高温、极端低温和交变温度条件下,包装的保温时间均达到72 h以上,而且箱内温度长期保持在 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 之间,这将有助于延长运输药品的寿命。实验测得的保温时间与传热计算所得的理论值相吻合,偏差不大于10%。由此可见,采用合适的相变蓄冷剂可以大大延长温控包装的保温时间,并通过蓄冷剂有效的预处理,在各种极端温度环境下均可确保冷藏药品的运输安全。

出于对运输成本与操作方式的考虑,这里研究的温控包装所用的相变材料量往往有限,多用于温控时间不超过72 h的冷链运输,且在途中由于不能进行开箱操作而导致不能更换新的蓄冷盒来维持更长时间的运输。由此,下一步的研究方向是将冷链运输包装与可泵送的相变流体有机结合起来,使得温控包装在途中可以随时充冷,其保温时间不再受包装体积的限制,真正实现药品和食品的“无限制”长距离和长时效保温运输。

参考文献:

- [1] 雍佳松, 杨世民. 我国医药冷链体系的现状及其发展建议[J]. 中国药房, 2014(25): 2308—2311.
YONG Jia-song, YANG Shi-min. Current Situation and Suggestions on the Development of Chinese Medical Cold Chain System[J]. China Pharmacy, 2014(25): 2308—2311.
- [2] GAC A. Refrigerated Transport: What's New[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(5): 501—503.
- [3] EVANS A, HAMMOND E C, GIGIEL A J, et al. Assessment of Methods to Reduce the Energy Consumption of Food Cold Stores[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 697—705.
- [4] 中国冷链产业网. 冷链低温配送的三种模式比较分析[EB/OL]. (2009-04-14)[2018-11-20]. <http://www.lenglian.org.cn/news/2009/138.html?page=0&id=138>. China Cold Chain Industry Network. Comparison and Analysis of three Models of Cold Chain Low Temperature Distribution[EB/OL]. (2009-04-14)[2018-11-20]. <http://www.lenglian.org.cn/news/2009/138.html?page=0&id=138>.
- [5] AHMED A, MEADE O, MEDINA M A. Reducing Heat Transfer Across the Insulated Walls of Refrigerated Truck Trailer by Application of Phase Change Materials[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51, 383—392.
- [6] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Development of a Novel Refrigeration System for Refrigerated Trucks Incorporating Phase Change Material[J]. Applied Energy, 2012, 92: 336—342.
- [7] FIORETTI R, PRINCIPI P, OPERTARO B. A Refrigerated Container Envelope with a PCM (Phase Change Material) Layer: Experimental and Theoretical Investigation in a Representative Town in Central Italy[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 122: 131—141.
- [8] COPERTARO B, PRINCIPI P, FIORETTI R. Thermal Performance Analysis of PCM in Refrigerated Container Envelops in the Italian Context-numerical Modeling and Validation[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 873—881.
- [9] EMBALL'ISO Company. Our Products[EB/OL]. (2018-12-03)[2019-01-26]. <https://www.emballiso.com/en/products-packaging-isothermal/packaging-isothermal-big-volume/packaging-high-performance-cold-transport>.
- [10] SkyCell Company. Products[EB/OL]. (2017-02-19)[2018-11-20]. <https://www.skycell.ch/products.html>.
- [11] Rubitherm® Technologies GmbH. Products[EB/OL]. (2016-10-22)[2019-01-26]. <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [13] 任俊生, 李爱民. 蓄冷板冷藏车的特点与制冷量计算[J]. 专用汽车, 2010(8): 47—49.
REN Jun-sheng, LI Ai-min. Characteristics of Cool Storage Plate Refrigerated Truck and Calculation of Cooling Capacity[J]. Special Purpose Vehicle, 2010(8): 47—49.
- [14] GB/T 34399—2017, 医药产品冷链物流温控设施设备验证性能确认技术规范[S].
GB/T 34399—2017, Temperature Control Facilities of Pharmaceutical Products Cold Chain Logistics-specification for Performance Qualification[S].