

可折叠冷链运输保温箱设计与性能分析

纪秋平, 康勇刚, 付志强
(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 设计一款可折叠的冷链运输保温箱, 以减少保温箱空箱运输、贮藏的空间。**方法** 研究接缝热桥处不同路径长度对保温箱保温性能的影响, 选取热桥效应最小处路径的长度结构作为可折叠保温箱连接处结构, 制作可折叠保温箱, 并探究可折叠保温箱与整体保温箱保温性能的差异, 论证可折叠保温箱在运输流通及仓储管理方面的特点。**结果** 接缝热桥处路径越长, 热桥效应就越弱, 保温效果就越好; 可折叠保温箱和整体保温箱保温时间最短的点都出现在楞上侧, 两者保温时间相差 30 min, 仅占总时长的 3.8%。**结论** 该款可折叠保温箱与整体保温箱的保温性能接近, 可满足保温需求。

关键词: 可折叠保温箱; 热桥效应; 热桥路径

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0060-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.011

Design and Performance of Foldable Cold Chain Transport Insulation Container

Ji Qiu-ping, Kang Yong-gang, Fu Zhi-qiang
(Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to design a foldable cold chain transport insulation container in order to reduce the space for empty container transport and storage of the insulation container. The effect of different path lengths at thermal bridge joint on the thermal insulation performance of the insulation container was researched. The structure with the path length at the part subject to the minimum thermal bridge effect was selected as the structure at the joint of foldable container to make the foldable insulation container. The difference of thermal insulation performance between the foldable insulation container and the whole one could be explored. The features of foldable insulation container in both transport distribution and warehouse management were demonstrated. The longer the thermal bridge path at the joint, the weaker the thermal bridge effect, thus the better the thermal insulation. The shortest temperature holding time appeared on the upper corner of the foldable and the whole insulation containers, and the temperature holding time difference between the two types of containers was 30 min, only 3.8% of the total duration. The thermal insulation performance of the foldable insulation container is close to that of the whole one, which can meet the thermal insulation requirements.

KEY WORDS: foldable insulation container; thermal bridge effect; thermal bridge path

2016 年 3 月“山东疫苗事件”暴露了我国医疗冷链行业存在的问题^[1], 医药冷链物流的发展也越来越受到社会的关注。无论在道路运输还是空运, 尤其是针对批量小、批次多的冷链运输, 冷藏箱在其中都扮演着重要的角色^[2-3], 因此, 对于冷藏箱、保温材料的研究, 国内外学者也在不断地加深^[4-12]。

目前市面上使用的冷藏箱主要为整体冷链箱, 体

积固定, 堆垛存放, 这使得其在空箱仓储和空箱运输时所占的空间体积较大, 成本也随之上升。针对该问题, 可折叠保温箱则能在满足基本保温要求的同时, 通过灵活的折叠来降低储运空间, 从而降低储运成本, 成为冷链运输保温箱的一种选择。朱怡馨^[13]等参考盘式折叠纸盒特点, 以塑料中空板为箱体材料, 分别以 EPS 和 EPE 塑料泡沫板作为保温材料, 设计了

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 天津科技大学青年创新基金 (2016LG27)

作者简介: 纪秋平 (1994—), 女, 天津科技大学本科生, 主攻运输包装。

通信作者: 康勇刚 (1957—), 男, 博士, 天津科技大学教授, 主要研究方向为运输包装材料及技术应用。

一款盖和箱体分离式的可折叠水产保温箱,保温箱的抗压强度为 8036~8684 N,可满足强度需求。全衡等^[14]分别采用牛津布、PEP 以及 PEVA 作为保温箱外层、夹层以及里层材料,内部设计独立一体式 U 型隔断蓄冷内胆,满足可折叠、便携的特点。张鑫鑫等^[15]将保温箱保温层分割成 6 个模块,以长方体展开结构作为可折叠结构,热桥处使用橡塑海绵处理。设计的可折叠保温箱保温时长约为整体箱的 90%左右、运输效率提高 87.5%。

对于可折叠保温箱而言,在内外温差作用下,热量从热源端向冷源端不断传递过程中,难免有部分热量通过折叠接缝处结构直接从热源端流向冷源端,由此会形成显著的热桥效应。目前学者主要针对可折叠保温箱的折叠方式进行探索,而对由可折叠保温箱折叠接缝造成的显著热桥效应影响研究甚少。文中则通过探索接缝热桥处不同路径长度对保温箱保温性能的影响,来为可折叠保温箱接缝处设计提供指导依据。

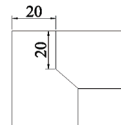
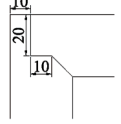
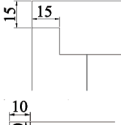
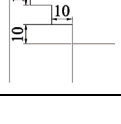
1 可折叠保温箱的设计

文中自行制作 3 款箱体尺寸相同的保温箱用于研究,保温箱内尺寸为 335 mm×229 mm×253 mm,外尺寸为 395 mm×289 mm×333 mm,保温板材质及各对应部位的厚度均相同。

1.1 热桥保温箱（以下简称“热桥箱”）

热桥箱是用于研究热桥处不同路径长度对保温箱保温性能影响所用的测试箱。为保证测试时不同路径结构均处于同样的环境状态下,确保实验数据的有效性,根据箱体的对称性,再结合实际加工的可操作性,确定只在箱体的四楞热桥处设置不同结构,见表 1。

表 1 热桥处不同的路径结构
Tab.1 Different path structures at the thermal bridge

结构示意图	路径长度/mm
	34
	44
	45
	50

热桥箱主要由箱盖、箱体和箱底等部分组成,见图 1。箱盖、箱底厚度为 40 mm,通过硅橡胶由 2 块 20 mm 厚度保温板粘接而成。箱体 4 个侧板采用 30 mm 厚保温板,各侧板间通过铝箔胶带进行连接。铝箔胶带处通过涂抹一层硅橡胶来加强粘合强度,确保板与板之间的连接紧密。成箱时,箱盖、箱底与箱体在封接处通过插合的方式结合。

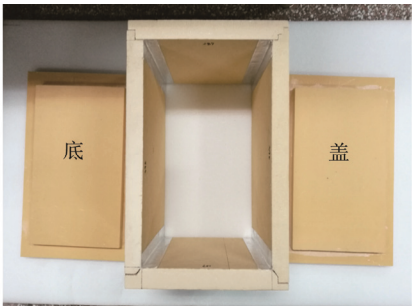


图 1 热桥箱各部分
Fig.1 Parts of the thermal bridge insulation container

1.2 可折叠保温箱（以下简称“可折叠箱”）

可折叠箱主要由箱盖、箱底和可折叠箱体等 3 部分组成。可折叠箱箱盖和箱底制作方式与热桥箱相同。箱体设置 6 处活动铰接用于折叠,铰接处通过铝箔胶带进行连接。根据热桥箱四楞热桥处结构性能测试的结果,选取实验中性能最佳路径长度作为 6 个箱体折叠铰接部位的结构。折叠方式见图 2。

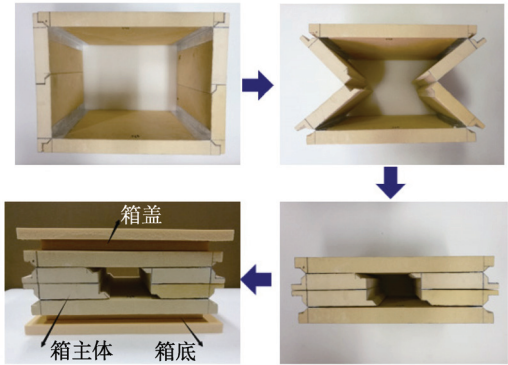


图 2 可折叠箱的折叠成型方式
Fig.2 Folding process of the foldable insulation container

上下盖底与箱体配合成型后,整个保温箱占用的体积 $V_1=38013615\text{ mm}^3\approx38.01\text{ m}^3$; 折叠后,整体的长和宽不发生变化,高度发生变化(4×主体板厚+箱盖厚+箱底厚),此时所占用的体积 $V_2=22831000\text{ mm}^3\approx22.83\text{ m}^3$ 。两者体积相比,得 $V_2/V_1\approx60\%$,表明箱体经折叠后,体积较整体箱可节省约 40% (见图 3)。

1.3 整体保温箱（以下简称“整体箱”）

整体箱为基础箱,是比较可折叠箱保温性能的基础。整体箱由箱盖和箱体 2 部分组成,见图 4。箱盖

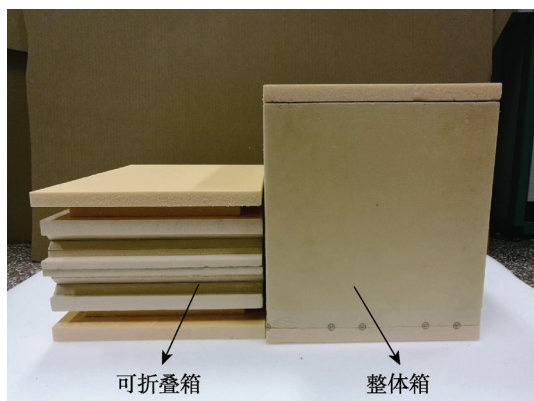


图3 折叠箱与整体箱的对比

Fig.3 The foldable insulation container VS the whole insulation container

的制作方式与热桥箱相同。箱体的4块侧面厚度为30 mm,底部由2块厚度为20 mm的板通过硅橡胶粘成总厚度为40 mm。箱盖与箱体在封接位置通过插合的方式结合。



图4 整体箱

Fig.4 Whole insulation container

2 实验

2.1 材料

1) 保温材料。采用目前市场上最常用的XPS挤塑板作为保温箱材料,由北鹏首豪(天津)新型建材有限公司提供,密度为 34 kg/m^3 ,导热系数为 $0.029 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,选用厚度为30, 20 mm的2种板。

2) 实验药品。以药品模拟液作为实验药品,要求在 $2\sim 8^\circ\text{C}$ 环境中贮藏。药品用e楞瓦楞纸箱封装,尺寸为 $211 \text{ mm}\times 144 \text{ mm}\times 168 \text{ mm}$,整体箱所用药品总质量为2030 g,热桥箱和可折叠箱所用药品质量为2015 g(由于同时进行2款保温箱测试,所以药品质量上存在细微差异,但不影响实验结果)。

3) 蓄冷剂。实验共使用2款蓄冷材料,蓄冷剂都采用冰盒自行罐装,具体参数:冰,相变温度为 0°C ,相变潜热为 334 J/g ,材料来源于实验室过滤水,质量约为4841 g;有机相变材料,相变温度为 $+5^\circ\text{C}$,

相变潜热为 230 J/g ,材料来源于上海力统冷链科技有限公司,质量约为3360 g。

2.2 设备

实验使用的设备主要有:恒温恒湿箱(ETH-408-40-CP-AR 巨孚仪器(苏州)有限公司)、恒温恒湿试验机(ETHV-1000-70-311 巨孚仪器(苏州)有限公司)、电子天平(LQ-C20002 瑞安市安特称重设备有限公司)、带锯(BSM-400 天津芝华机械电子有限公司)、铣床(FF400 普颂德科(上海)贸易有限公司)、医用低温箱(MDF-U339-C 三洋机电(中国)有限公司)、海尔冰箱(BCD-215KA GA 青岛海尔股份有限公司)、温度测试仪(SH-48 深圳市深华轩科技有限公司)。

2.3 方法

2.3.1 药品-蓄冷剂-保温箱排布方式

保温箱内部药品和蓄冷剂的排布方式,见图5,其中蓄冷剂冰盒均匀地紧贴排布在药品的各个面,并用瓦楞纸箱封装成一体。保温箱内通过添加瓦楞纸板来固定内装物位置,保证内装物处于箱体中间。

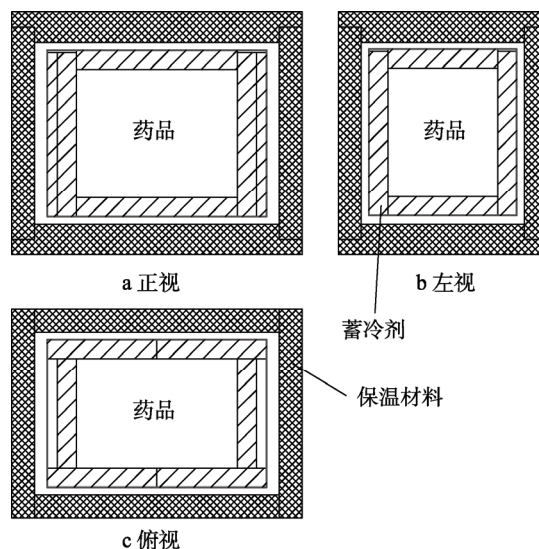


图5 药品-蓄冷剂-保温箱排布方式

Fig.5 Arrangement of medicine-coolant-insulation container

2.3.2 热桥处不同路径长度对保温箱保温性能的影响测试(测试箱为热桥箱)

1) 蓄冷剂的选择。由于该实验的主要目的是为了测试保温箱4个楞边接缝部位、不同路径长度对热桥效应的影响程度,所以在蓄冷剂的选取上,考虑到取材的方便性、材料循环使用的稳定性,确定选取冰作为相变材料。

2) 设置内置药品的目的。以药品温度超过 8°C 作为试验结束,统一试验终点;在实际测试中,药品的初始温度低于 2°C ,此试验中没有完全严格按照药

品的贮藏温度进行,只是取了它的一个上限作为实验终点。

3) 温度测试点的排布:为观测热桥箱四楞处不同路径结构的温度变化,实验在热桥箱箱壁的4条楞,侧面、端面分别设置上、中、下3个测试点来记录温度,见图6。图6中命名方式“路径长度-所处位置”,如34-上侧。在保温箱内药品处设置一个温度测试点,以药品温度点超过8℃视为试验结束,观察热桥箱箱壁温度变化情况。

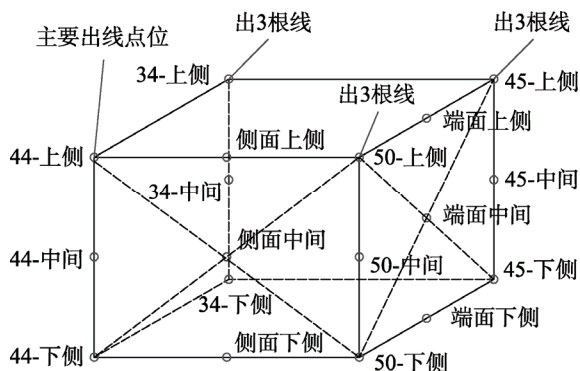


图6 热桥箱箱壁的温度排布

Fig.6 Temperature arrangement of the thermal bridge insulation container wall

4) 实验预处理。蓄冷剂冰盒预先放置在环境温度为-22℃的医用冰箱中预处理24h以上;实验所用药品放在冰箱的冷藏室(温度在2~6℃范围内)中预处理24h以上;热桥箱通过内置冰排的方式降温,使内部温度降至15℃以下。

5) 实验环境。参考ISTA 7D温度测试标准中的最高环境温度,将35℃作为测试环境温度,实际温度在(35±2)℃范围内。测试时,保温箱放置在恒温恒湿箱的铁架上,保证底部透气,四周不与恒温恒湿箱接触。

2.3.3 可折叠箱与整体箱保温性能的对比测试(测试箱为可折叠箱和整体箱)

1) 蓄冷剂的选择。考虑了实验数据的获得及未来可折叠箱在实际药品运输过程中的实用性,实验购置新型相变材料,材料相变温度为+5℃,满足药品在运输及贮藏的温度要求范围,可有效延长运输过程中药品的储存时间,防止出现药品过冷现象。

2) 温度测试点的排布。测试主要观察药品的温度变化,因此温度测试点均布置在贴近药品处,可折叠箱和整体箱药品测试点排布相同,见图7。

3) 实验预处理。蓄冷剂、药品放置在2℃环境中预处理24h以上,确保蓄冷剂均凝固成固态。当药品各温度测试点的温度均达到2℃以上、5℃以下,完成预处理。

实验环境与2.3.2节中条件相同。

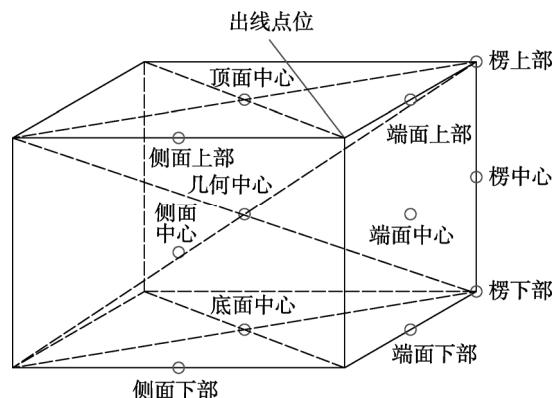


图7 药品测试点排布

Fig.7 Test point arrangement of the medicine

3 结果与分析

3.1 热桥处不同路径长度对保温箱保温性能的影响

从实验开始至保温箱内药品温度超过8℃结束,箱壁在整个过程中的温度分布情况见图8—10。开始时,由于保温箱内外温差梯度较大,箱内不断吸收由外界传导的热量而使箱壁温度急速上升;当达到蓄冷剂相变温度时,蓄冷剂利用自身潜热吸收外界热能,由固态转变为液态但保持箱内整体温度不变,过程中保温箱内外温差恒定不变,表现为一段相变平台期;当蓄冷剂全部转为液态时,蓄冷剂利用显热吸收外界热量,使保温箱内部温度不断升高。由于热桥箱测试温度点位于箱壁上,与外界的热交换更加频繁,并且其与内部蓄冷剂和药品存在一定间隔,所以在试验过程中箱壁上的温度均要高于内部的药品温度。

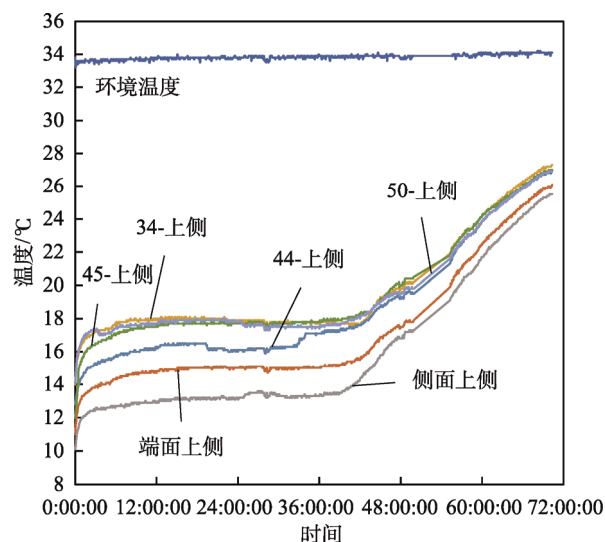


图8 热桥箱箱壁上平面各温度测试点温度分布情况

Fig.8 Temperature distribution of each temperature test point on the top plane of the thermal bridge insulation container wall

热桥箱上平面相变平台期温度分布情况(见图8)。上平面的温度分布呈现:箱体的上平面在4个角处有3个点的温度分布接近,只有上侧的44号点位

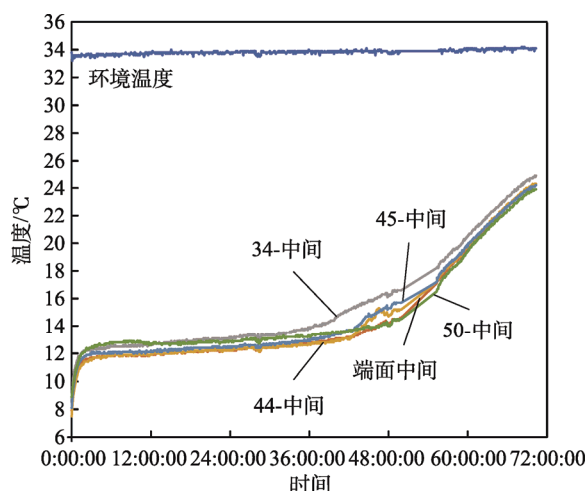


图9 热桥箱箱壁中间面各温度测试点温度分布情况

Fig.9 Temperature distribution of each temperature test point in the middle plane of the thermal bridge insulation container wall

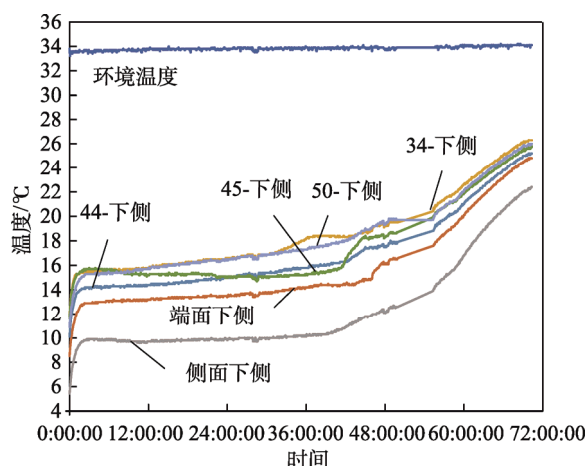


图10 热桥箱箱壁下平面各温度测试点温度分布情况

Fig.10 Temperature distribution of each temperature test point in the bottom plane of the thermal bridge insulation container wall

较上平面其他3个点的温度略低(低于另外3个点温度)。根据温度分布可得,热桥箱由于楞处结构拼接存在间隙加上箱盖与箱体封接接缝,导致分子热交换要比完整平面处频繁,热桥效应显著,所以热桥处的温度测试点温度均要高于两平面的温度。对于4个不同路径长度的热桥结构而言,44-上侧点的温度要明显低于其他三者。

中间面相变平台期温度分布情况(见图9)。中间平面各点的温度分布都比较集中,各点温差在1℃范围内。其中34-中间略高于50-中间,45-中间与44-中间温度较接近要低于前两者,并且和端面中间曲线几乎重合温度。说明仅拼接处存在接缝时,有热桥效应存在,且热桥效应并不明显。在相变平台期中,路径长度为44,45,50 mm平台期维持的时间比34 mm维持的平台期时间均要长,说明在路径长度较长处漏冷速度要慢于路径长度较短处。

下平面相变平台期温度分布情况(见图10)。下平面的温度分布呈现:34-下侧≈50-下侧>44-下侧≈45-下侧>端面下侧>侧面下侧。可以看出44,45 mm路径长度的保温效果要优于34 mm路径长度。

横向比较各平面分析得:结合实验前假设,实验中44 mm和45 mm路径处保温效果要明显优于34 mm路径,说明路径越长对降低热桥效应起到了一定的作用。在实验中,50 mm路径处保温效果却要比44,45 mm路径差,这可能是由于50 mm路径长度结构要较前两者更复杂,手工加工的工序增多,导致加工精度下降,配合精度也随之降低,材料接触面之间可能会产生较大的空隙,使得其在实验中表现不佳。在此次温度测试中,44 mm路径结构性能要优于其他3款路径长度,再结合实际手工加工效果,确定采用44 mm路径结构作为可折叠箱接缝处结构。

3.2 可折叠保温箱与整体保温箱保温性能的对比

由图11—12可知,整体箱和可折叠箱内紧贴药品各测试点的温度随时间的分布情况基本相同。药品上平面的4个点在相变平台期维持的时间最短,温度最先超过8℃这个界限,而药品下平面的4个点则在相变平台期维持的时间最长,温度最后达到8℃,中间平面的4个点则位于这两者之间,符合由于冷空气下沉导致下部温度变化慢于上部温度变化的温度场分布特点。

分别选取整体箱和可折叠箱各个平面中最长维持时间和最短维持时间进行比较,见表2。药物在实际运输过程中,为保证药品的有效性,只要有一个点超温,即认为药品贮藏失败,为无效药。在该次实验中,取最短时间来衡量保温箱的保温性能。发现可折叠箱和整体箱保温时间最短的点都是楞上侧,时间差异上,可折叠箱比整体箱保温时间短了30 min,30 min仅占整体保温时长13 h的3.8%,差异甚小,可以认为该款可折叠箱与整体箱的保温性能接近。

表2 可折叠箱与整体箱各平面保温时长对比

Tab.2 Comparison of the insulation time between each plane of the foldable insulation container and the whole insulation container

位置	最长维持时间			最短维持时间		
	整体箱	可折叠箱	差*/min	整体箱	可折叠箱	差*/min
上平面	17 h 10 min	17 h30 min	-20	13 h 30 min	12 h 30 min	30
中间 平面	25 h 15 min	25 h	15	22 h 55 min	21 h 55 min	5
下平面	30 h 50 min	30 h 30 min	20	29 h 20 min	29 h 10 min	10

注:差=整体箱保温时间-可折叠箱保温时间

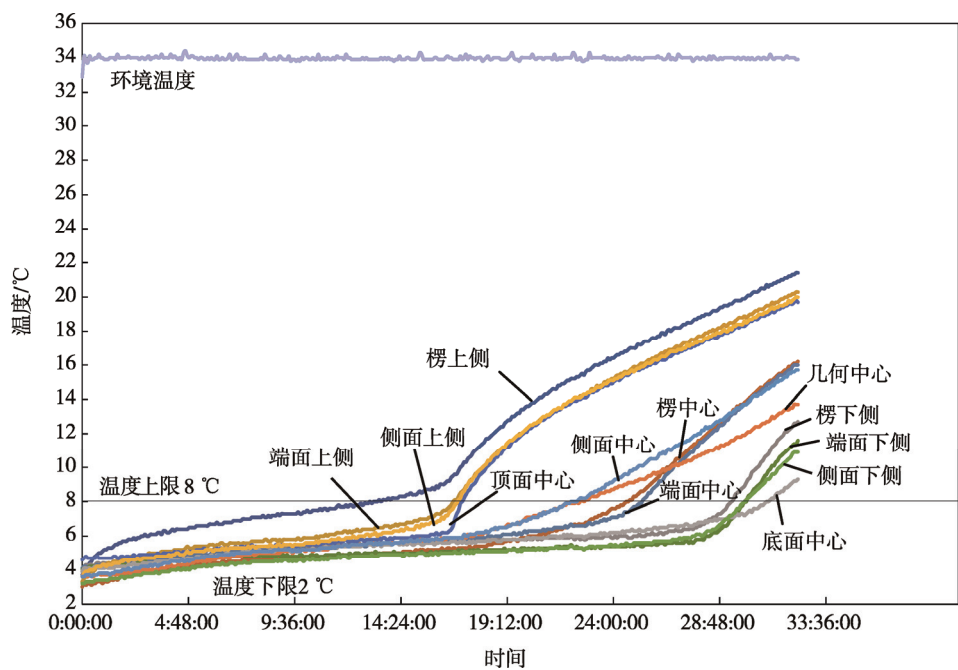


图 11 整体箱紧贴药品温度测试点温度分布情况

Fig.11 Temperature distribution of the temperature test point of the whole insulation container closely against the medicine

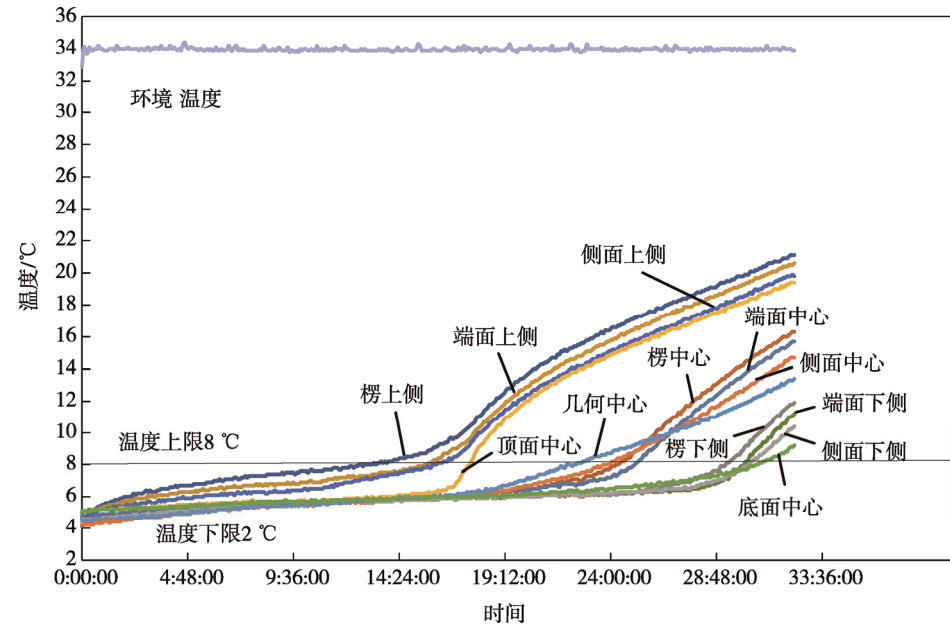


图 12 可折叠箱紧贴药品温度测试点温度分布情况

Fig.12 Temperature distribution of the temperature test point of the foldable insulation container closely against the medicine

4 结语

研究了热桥处不同路径长度对保温箱性能的影响,结果表明规律说明了热桥处路径长度对降低热桥效应能起到一定的作用,可为箱盖密封性、可折叠保温箱的设计提供参考。同时,要结合实际加工条件来选择最适宜的路径长度,避免加工误差带来干扰。文中设计的一款可折叠保温箱,其保温性能基本和整体箱相同。可折叠箱在折叠收纳状态时的体积仅占整

体箱的 60%,可节省仓储和运输空间,给保温箱生产商和用户在成本考虑上提供一种选择。

参考文献:

[1] 颜晓乐. 从“山东疫苗事件”探析我国医药冷链物流发展策略[J]. 重庆科技学院学报(社会科学版), 2016(9): 44—47.
YAN Xiao-ye. Analysis on Development Strategy of Chinese Medicine Cold Chain Logistics from "Shan-

- dong Vaccine Incident"[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2016(9): 44—47.
- [2] 方国良, 辛光成, 王琳, 等. 安全冷链运输箱转移系统在疫苗冷链运输中的应用研究[J]. 中国疫苗和免疫, 2016(5): 582—586.
FANG Guo-liang, XIN Guang-cheng, WANG Lin, et al. Application Study of a Transfer System of Safe Cold Chain Transport Boxes in Cold Chain Transport of Vaccine[J]. Chinese Journal of Vaccines and Immunization, 2016, 22(5): 582—586.
- [3] 郑浩. 疫苗冷藏运输策略的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
ZHENG Hao. Application Research on the Strategy for the Vaccine Refrigerated Transport[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [4] 潘松年. 隔热包装的设计与计算[J]. 中国包装, 2002(3): 94—97.
PAN Song-nian. Design of Heat Insulation Packaging[J]. Technical Frontier, 2002(3): 94—97.
- [5] 纪珺. 高真空低温绝热材料——TLC-VIP的研制[D]. 上海: 上海海事大学, 2007.
JI Jun. Development of High Vacuum Low Temperature Insulation Material-TLC-VIP[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2007.
- [6] SINGH S P, BURGESS G, SINGH J. Performance Comparison of Thermal Insulated Packaging Boxes, Bags and Refrigerants for Single-parcel Shipments[J]. Packaging Technology & Science, 2010, 21(1): 25—35.
- [7] 常僊宇, 张金花, 王小安, 等. 常见保温材料密度与导热系数关系的研究[J]. 工程质量, 2009, 27(2): 66—70.
CHANG Xuan-yu, ZHANG Jin-hua, WANG Xiao-an, et al. Research on Relationship Between Hackneyed Heat Insulator Density and Coefficient of Heat Conductivity[J]. Research & Probe, 2009, 27(2): 66—70.
- [8] 郭晓娟. 基于 ANSYS 的保温包装温度场数值模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
GUO Xiao-juan. Analysis and Simulation for Insulating Package Based on ANSYS[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [9] QIAN J, ZHAO Y. Insulating Packaging Solution Based on Cylinder Model[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(8): 1—5.
- [10] 成新新. 速冻鲜食玉米保温包装研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
CHENG Xin-xin. Study on Insulation Packaging of Quick-frozen Fresh Corn[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2014.
- [11] 田萌萌. 冷藏药品保温包装研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
TIAN Meng-meng. Study on Insulation Packaging of Cold Storage Medicine[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [12] LI Y C M, CHEN Y H A. Assessing the Thermal Performance of Three Cold Energy Storage Materials with Low Eutectic Temperature for Food Cold Chain[J]. Energy, 2016, 115: 238—256.
- [13] 朱怡馨, 陈晨伟, 罗敏成, 等. 可折叠水产品运输保温包装箱结构设计[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 30—33.
ZHU Yi-xin, CHEN Chen-wei, LUO Min-cheng, et al. Structure Design of Foldable Insulation Packaging Container for Aquatic Products[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 30—33.
- [14] 全衡, 智先, 杨枫, 等. 果蔬物流便携蓄冷保温包装的设计与性能测试[J]. 中国南方果树, 2015, 44(4): 30—34.
QUAN Heng, ZHI Xian, YANG Feng, et al. Design and Performance Test of Portable Storage and Insulation Packaging for Fruit and Vegetable Logistics[J]. South China Fruits, 2015, 44(4): 30—34.
- [15] 张鑫鑫, 陆新宇, 陈建忠, 等. 冷链可折叠保温箱设计及试验研究[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(4): 32—35.
ZHANG Xin-xin, LU Xin-yu, CHEN Jian-zhong, et al. Design of Foldable Insulating Container and Experimental Research of the Container[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(4): 32—35.