

文章编号:0253-4339(2019)02-0135-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.02.135

蓄冷箱在疫苗冷链中的研究进展

豆孟柯 刘宝林 宋晓燕 陈州旗

(上海理工大学生物系统热科学研究所 上海 200093)

摘 要 每年疫苗产品损耗的主要因素之一是冷链运输的失效,在运输过程中使用最为普遍的设备是蓄冷箱。影响蓄冷箱保温性能的因素主要包括保温箱体的绝热性能、蓄冷材料的蓄冷能力及保温包装方式的设计。本文综述了蓄冷箱在疫苗冷链中的研究进展,分析了疫苗蓄冷箱常用保温材料及相变蓄冷材料的选择和应用,并讨论了箱体热阻的计算及蓄冷箱温度的监控。在此基础上指出整体包装和开发相变蓄冷材料的研究方向。
关键词 蓄冷箱;相变蓄冷;保温包装;疫苗冷链;综述
中图分类号:TB64; TB658 **文献标识码**: A

Research Progress of Cold Storage Insulation Box in Vaccine Cold Chains

Dou Mengke Liu Baolin Song Xiaoyan Chen Zhouqi

(Institute of Biothermal and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract One of the major factors in the annual loss of vaccine products is the failure of cold-chain transportation, where the most common piece of equipment used during transport is the cold storage box. The main factors that influence the performance of a cold storage box include the heat-insulating property of the thermal insulation material, the cooling capacity of the storage material, and the design of the thermal insulation packaging. This study reviews the research progress on cold storage boxes in the vaccine cold chain. The selection and application of common insulation materials and phase-change cold storage materials for vaccines were analyzed, and calculations related to the thermal resistance of the box and the monitoring of the temperature were studied. The research direction for integrated packing and development of phase-change cold storage materials were also proposed.
Keywords cold storage box; phase change cold storage; thermal insulation packaging; vaccine cold chain; review

疫苗作为一种温度敏感性药品,在运输和贮存过程中,大部分应处于 2~8 ℃ 的恒温环境,少量疫苗贮存于-20~8 ℃^[1]。冷藏温度较高时会影响疫苗的免疫原性,发挥不了原有的效果;而冷藏温度较低时影响其稳定性甚至安全性,易引起注射的副反应。为保证疫苗从生产者到使用者之间安全有效运输,通常采用冷链运输方式来保证运输温度。疫苗作为一种特殊药品,运输又与药品冷链区分开来,且疫苗冷链要求比医药冷链更高^[2],在疫苗冷链运输中,由于环境的多样性,需要借助多种冷链设备:冷藏车、蓄冷箱、冷藏包、冰盒等。

不同冷链设备采取的制冷方式有两种:一种为主动制冷,如冷藏车或冷藏箱,这些设备本身带有可以使温度降低的制冷设备;另一种为被动制冷,如蓄冷

箱、冷藏包、冰盒等,采用蓄冷方式使产品温度在一段时间内保持低温。冷藏车利用发动机制冷、能耗高,采用同一温度运输苗,配载率较低,且中途多次开门带来冷量损失,造成能源浪费。而蓄冷箱利用夜间“低谷”电力蓄冷,成本低、自重轻、无噪音,可实现不同疫苗同车混装,符合疫苗“小批量、多批次”的要求。蓄冷箱主体结构一般包括:保温箱体、蓄冷剂和温度记录仪。作为短途运送和贮存疫苗的工具,蓄冷箱具有经济、高效、灵活、环保、安全的优点,已成为目前使用最为普遍的冷链运输设备^[3-4]。

蓄冷箱属于被动制冷,存在蓄冷时间较短,箱内温度分布不均匀,在冷链运输前期易出现“过冷”的局限性,从而造成部分疫苗产品变性,无法使用。对于疫苗冷链安全运输问题, T. Wirkas 等^[5]发现在连

续运输过程中,紧贴蓄冷剂的疫苗存在“冻结”现象。C. Monton 等^[6]通过连续实时冷链监测证明未调理的冰袋对冷链系统有负面作用,冷链击穿时间与温度具有相关性。对于目前疫苗冷链运输行业,疫苗产品损耗量有 14% 来自物流环节,给疫苗行业造成不容忽视的损失^[8]。世界卫生组织(WHO)及适宜卫生科技组织(PATH)均给予疫苗接种及冷链运输相当的重视^[7]。近年来,随着我国免疫体系不断完善,疫苗种类逐渐增多,在冷链运输过程中保证疫苗的运输温度将成为一个重要挑战^[9-11]。因此,了解蓄冷箱在疫苗冷链中的研究进展,优化蓄冷箱保温性能及整体设计具有重要意义。

本文从保温箱体设计、相变材料、保温包装、温度监控等方面综述国内外对于蓄冷型疫苗运输箱的研究成果,并指出亟待解决的问题和未来发展方向。

1 保温箱体设计

保温箱体的设计是疫苗蓄冷箱设计的重要部分。保温箱体的性能受多种因素的影响和制约,主要包括保温材料物理化学性质、箱体几何形状、箱体热阻等。

1.1 保温材料

保温材料一般是指导热系数 $\leq 0.12\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的材料^[11],主要作用是降低导热系数和传热系数。20 世纪 90 年代,美国国家航空航天局(NASA)为解决航天飞行器传热控制问题,研发了具有隔热反射功能的太空绝热反射瓷层,这种技术随后由航天领域推广到其他领域中。周新法^[13]详细介绍了几种广泛应用于箱体的保冷材料,对比了其优缺点,并对选用原则进行了说明。R. Froese 等^[14]对用于活鱼运输的聚苯乙烯泡沫塑料箱进行了研究,结果表明,设计良好的 EPS 泡沫箱可以有效降低热量损失。此外,真空保温板导热系数低、保温性能优良,但由于真空保温板的工艺与造价相对较高,目前并未大量推广^[15-16]。

目前常用的保温材料有聚苯乙烯(EPS/XPS)、硬质聚氨酯(PU)及某些可以隔绝或降低辐射的材料,如铝箔。选择保温材料时应综合考虑保温材料的导热系数、密度、吸水性、强度、耐腐蚀性、价格等因素,常见的保温材料及导热系数对比如表 1 所示。选用保温材料时,应首先考虑降低导热系数,减少蓄冷箱内与外界的热量传递。在箱体壁两端,热量以传导的方式在箱体壁传递;蓄冷箱与周围环境间的热量传递属于自然对流,而在运输过程中震动所产生的气体流动属于强制对流;任何温度不高于绝对零度的物体,都会产生热辐射,因此箱体本身与周围环境将产生热辐射。S. Devrani 等^[17]通过研究得出当前疫苗

盒 3 种传热方式对总热量的贡献,其中热传导占 51.43%,比例最大,故选用导热系数较小、热阻较大的保温材料。

表 1 常见保温材料的导热系数
Tab.1 Thermal conductivity of common thermal insulation materials

保温材料	导热系数/(W/(m·K))
空气	0.026
瓦楞纸板	0.061
模塑聚苯乙烯(EPS)	0.046
挤塑聚苯乙烯(XPS)	<0.040
聚乙烯(PE)	0.037
聚氨酯(PU)	0.031
聚丙烯(PP)	0.15~0.18
酚醛泡沫	0.022~0.030
真空保温板(VIP)	≤ 0.01
充气保温板(GFP)	内部填充不同气体

1.2 箱体热阻计算

为了设计更高效的绝缘包装,需要能够综合影响热阻的所有因素且较简单的计算模型。优良计算模型可以减少繁琐的实验工作,帮助设计者更高效的开展设计。对于不同的运输要求,箱体设计不同,热阻计算方式略有不同。1984 年 L. J. Stavish^[18]引入总热阻 R_{system} 的概念,认为总热阻包括包装材料热阻 R_i 、包装内空气热阻 R_{material} 及包装外气体热阻 R_o 。单一箱体壁只包含一种材料,热阻的计算较为简单,为获得更大的热阻,很多箱体采用“三明治”结构形式,即多层不同的绝缘材料组合。王教方等^[19]从单一材料的导热系数计算公式得出带附着层的复合材料导热系数的计算公式。实验结果表明:复合结构导热系数小,具有较好的隔热效果,内部温度受外界影响较小^[20]。多层复合结构的箱体已普遍应用于冷链物流运输中。由于空气导热系数较小(见表 1),绝缘材料之间夹带空气可以获得更高的热阻。

研究表明,当空气层厚度 $\ll 13\text{ mm}$ 时, $Gr < 2\ 000$,无论空气层周围温度如何,热量都主要通过热传导进行传递^[21],绝缘材料之间空气层很薄($< 10\text{ mm}$),故在箱体壁内辐射与对流可忽略不计。复合箱体壁简化模型如图 1 所示,热阻 R_w 计算如式(1)所示^[22]:

$$R_w = \sum_{i=1}^n \frac{th_i}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{h_i}$$

(1)

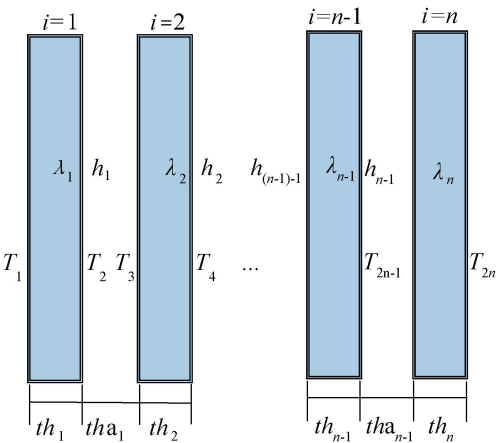


图 1 多层壁结构图^[21]

Fig.1 Diagram of multilayered wall structure

式中： λ_i 为第 i 层的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； th_i 为 i 层的厚度， m ； h_i 为 i 层总的对流和辐射表面传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ 。

随着保温技术的发展,箱体结构朝着复合、多元的方向发展。一种传热模型很难应用于所有箱体设计中,Ge Changfeng 等^[23]使用有限元模拟软件,提出一种等效的热传导系数,并计算了绝缘包装容器内空气的热量传递。利用计算机仿真技术,较直观的反映热传递过程也是未来发展趋势之一^[24-25]。

2 相变材料

物质从固相转变为液相时,需要吸收大量热量(释放冷量),这种在相变时能将冷量储存,在需要时又能将冷量释放的材料称为相变材料^[26]。相变材料(phase change material, PCM)的使用可以有效延长疫苗冷链运输时间。1987 年 G. A. Lane 等^[27]系统的阐述了 PCM 的储能机理及应用于蓄冰空调的相变物质的物性等要求。应铁进等^[28]将杨梅预冷后放入加冰的聚苯乙烯内,证明杨梅加冰包装保鲜时间超过 50 h。此外,为防止相变材料泄漏污染疫苗,通常把蓄冷材料封装在高密度塑料盒中制成冰盒,来保证疫苗产品维持在所需温度范围内,冰盒内蓄冷材料可反复多次使用,相变材料按照组成不同可以分为有机类、无机类和复合相变材料,如表 2 所示,根据使用需求不同选择不同的相变材料。

2.1 相变材料的选择

选择相变材料时应遵循以下要求:合适的相变温度、较高的相变潜热、较大的导热系数、过冷度小、密度大、化学性能稳定、经济无污染^[29]。在实际选择时,同时满足以上所有要求较为困难。为满足基本的冷链运输要求,应首先考虑相变材料的相变温度及相

变潜热性能。相变材料按相变温度分为高温、中温和低温蓄能材料:0℃以下为低温蓄能材料,如大多数有机物;0~120℃为中温蓄能材料,如大部分的无机水合盐和一些有机物;120℃以上为高温蓄能材料,多为利用化学反应蓄能的材料,以及许多碱、盐、混合盐等无机物。常用的相变材料及特点如表 3 所示,疫苗冷链运输所用相变材料属于中低温无机或有机相变材料,目前市场上疫苗蓄冷箱内常用固体凝胶蓄冷剂,以高吸水性树脂类的高分子聚合物为主,与水及助剂制成凝胶,外包装 PE 类材料不易泄漏^[30],凝胶蓄冷剂的优点^[31]:1) 可制成不同形状、富有弹性、强度大;2) 蓄冷量大、传热缓慢、保冷时间长;3) 解冻后可保持原状,可反复使用;4) 无臭、无味、无毒。

表 2 相变材料分类
Tab.2 Classification of PCM

分类	相变材料
无机类	水/冰
	熔融盐类
	结晶水合盐类
	金属/合金
有机类	石蜡
	脂肪酸类
	酯类
	醇类
	高分子化合物
复合相变材料	有机/无机共融

表 3 常见相变材料
Tab.3 Common PCM

PCM	相变温度	优缺点	适用场所
冰	0℃	相变潜热为 335 kJ/kg,安全、过冷度大	超市冷藏保鲜
共晶盐类	零下几十度至一百多度不等	密度低、有腐蚀性、易发生相分离和过冷	中短途冷链、空调蓄冷等
有机物类	一般低于 0℃	固体成型好,不易发生相分离及过冷、腐蚀性较小	疫苗、海产品冷链保温

近几年,各学者不断推进对相变蓄冷剂的研究,蓄冷材料不断朝着新方向发展。包括在蓄冷材料内添加导热系数大、过冷度小的新型纳米颗粒、金属颗

粒等^[32-34],起到增稠剂、成核剂和导热强化剂的作用,解决了相变材料相分离、过冷及导热系数过小的问题;复合相变蓄冷剂也得到较大发展,通过有机-无机复合克服单一的无机物或有机物的缺点,改善蓄冷效果^[35-36]。此外,为使有机相变材料的泄漏得到解决,出现了封装新技术即微胶囊技术。通过分散方法把有机相变材料分散成直径为微米级的小颗粒,再用聚合物薄膜包封,制得的相变材料具有比面积大、储热效率高的优点,同时解决了相变材料本身泄漏、腐蚀、相分离等问题^[37-40]。

2.2 相变蓄冷剂的应用

蓄冷剂的使用量和摆放方式直接影响疫苗蓄冷箱内的温度分布、有效保冷时间长短及箱体容积的有效利用。对此进行研究,不仅有利于提高疫苗的品质、箱体利用率,更重要的是对减少蓄冷剂使用量,对降低贮运成本具有重要意义^[31]。在蓄冷箱包装过程中,应根据疫苗冷链运输时间长短和气温的高低调整蓄冷剂的使用量。即蓄冷剂释冷至完全融化所用的时间为冷链运输时长,蓄冷箱内蓄冷剂用量的计算如式(2)所示^[41]:

$$W = \frac{(T_{0,\infty} - T_i)t}{LR_s}$$

(2)

式中:W 为所需蓄冷剂的质量,kg;T_{0,∞} 为储藏环境温度,K;T_i 为蓄冷箱内部温度(视为与蓄冷剂相变温度相等),K;t 为产品储藏时间,s;L 为蓄冷剂相变潜热,J/kg;R_s 为保温包装系统热阻,(m²·K)/W。

在包装过程中,将冻结好的适量蓄冷剂整齐的放入蓄冷箱内,中部摆放疫苗。实验结果表明,同一水平面上的 3 个测点处温度相同,而同一垂直面上的 3 个测点处温度则存在差异^[42]。当疫苗贴近蓄冷剂时易发生冻结,在蓄冷箱内设有熔点在 5~10℃ 的暖冰模块,可省去冰袋回温步骤,有效防止产品温度低于 2℃^[43]。因此,良好的蓄冷剂摆放方式可以有效提高疫苗冷链运输质量。

蓄冷剂在箱体中的不同摆放方式如图 2 所示^[44],其中侧摆方式(图 2(a))平均有效保冷时间最长,货物易摆放程度最高;顶角方式(图 2(c))同一水平、竖直平面温差最小。目前摆放蓄冷剂普遍采用侧摆方式及顶底方式,为防止疫苗产品被冻结,延长蓄冷时间,市场上部分蓄冷箱设计双层冰盒结构^[45-46],如图 3 所示。内层冰盒温度约为 5~10℃,外层冰盒温度在 0℃ 以上,即外层采用普通蓄冷剂,内层采用高于冰点温度的蓄冷剂组合包装,省去了原来蓄冷剂放入蓄冷箱前的“释冷”步骤,节约时间,且可以避免疫苗的“过冷”问题。但该种包装方式也存

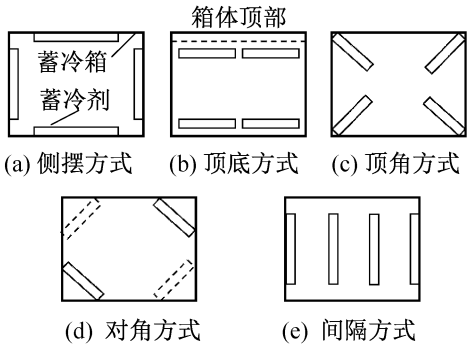


图 2 蓄冷剂不同摆放方式^[44]
Fig.2 Different ways of storage of coolant

在很多问题:一是两种蓄冷剂组合,使包装步骤更加繁琐,同时增加了整体的包装重量与体积,运输成本提高;二是制作高于 0℃ 的蓄冷剂成本较高,且储能能力低下。所以降低蓄冷剂质量,提高蓄冷能力,寻找更合适的高储能相变材料是目前亟待解决的问题。

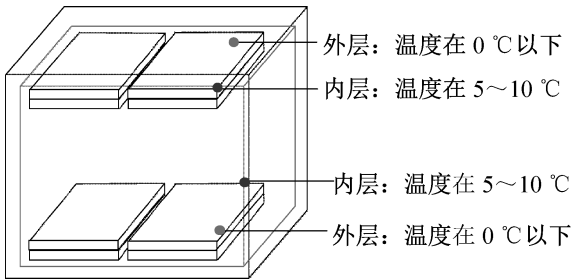


图 3 蓄冷剂组合摆放示意图
Fig.3 Schematic diagram of the combination of storage coolant

3 温度监控技术

根据新版《药品经营质量管理规范》的相关规定,疫苗冷链运输过程要严格控制温度范围。完整的疫苗冷链流程主要由 4 个环节构成:生产、运输、储存、使用。疫苗由专门的疫苗企业生产后运送至各省市级冷库,然后使用冷藏车加蓄冷箱的方式运送至各级疫苗接种中心。无论是在冷库内还是疫苗的冷链运输过程中,实时监控疫苗的温度都十分重要。

冷链温度监控设备主要有时间-温度指示器与温度记录仪^[47]。时间-温度指示器(time-temperature indicator, TTI)是基于物理、化学原理的一种监测冷链温度的有效方式。利用时间温度积累效应,指示产品的温度变化历程及剩余货架信息^[48]。TTI 具有简便有效、体积小巧、价格较适中等特点,但无法详尽记录产品的温度数据。其在国内的制备水平较低,发展受到一定的制约。电子温度记录仪近几年得到了较大发展,如便携式温度记录仪、无线台式温度记录仪、射

频识别 RFID 标签等。为提高冷链运输质量,保证疫苗产品的安全性,在冷链运输过程中实时监控蓄冷箱内温度具有重要意义。

4 结论与展望

本文详细分析了疫苗蓄冷箱设计、保温包装的关键技术及蓄冷箱在冷链运输中的研究进展。主要包括保温材料的分类及选用原则、箱体热阻计算、典型相变材料的优缺点及其适用场所,归纳了适用于疫苗冷链的相变材料,并总结了目前疫苗冷链中不可或缺的冷链温度监控技术。随着我国综合国力的提升,冷链进入快速发展时期,疫苗冷链安全直接影响生命健康。根据 2016 年修订的《疫苗流通和预防接种管理条例》及新版《药品经营质量管理规范》,对于疫苗冷链的流通将进行进一步规范管理。因此,改善疫苗蓄冷箱的保冷性能,延长疫苗冷链运输时间具有重要意义。针对疫苗蓄冷箱的研究结论如下:

- 1) 对于蓄冷箱箱体热阻方面的计算工作已较为完善,包括综合考虑复合材料、空气膜热阻及有无铝箔的综合计算模型,为后续研究提供了很好的基础。
- 2) 通过改进疫苗蓄冷箱的整体包装技术、相变蓄冷剂的摆放方式,对于延长冷链运输时间、解决温度不均匀问题有广阔的应用空间。
- 3) 开发蓄冷能力高、释冷缓慢,且适合不同疫苗运输温度的相变材料具有重要意义。
- 4) 运用计算机仿真技术,降低实验成本,集中探求蓄冷箱内温度均匀性及延长运输时间是将来的研究方向。

参考文献

- [1] World Health Organization. Temperature sensitivity of vaccines[M]. Geneva: WHO Press, 2006.
- [2] LLOYD J, CHEYNE J. The origins of the vaccine cold chain and a glimpse of the future[J]. Vaccine, 2017, 35(17):2115-2120.
- [3] 汤元睿, 谢晶, 徐慧文, 等. 相变蓄冷工艺在金枪鱼冷链物流中的应用研究[J]. 现代食品科技, 2015(1):173-178. (TANG Yuanrui, XIE Jing, XU Huiwen, et al. Application of cold storage phase-change technology in cold chain logistics of tuna (Thunnus Obesus) [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(1):173-178.)
- [4] 张秋玉, 臧润清, 刘升, 等. 可装卸式蓄冷保温箱冷链运输效果[J]. 制冷学报, 2017, 38(6):105-110. (ZHANG Qiuyu, ZANG Ruiqing, LIU Sheng, et al. Effect of cold chain transportation on assemble-able cold-storage incubator[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(6):105-110.)
- [5] WIRKAS T, TOIKILIK S, NAN M, et al. A vaccine cold chain freezing study in PNG highlights technology needs for hot climate countries[J]. Vaccine, 2007, 25(4):691-697.
- [6] MONTON C, SUKSAEREE J, CHAROENCHAI L. Real time cold chain monitoring of simulated vaccine distribution[J]. International Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences, 2014, 6(6):466-468.
- [7] MATTHIAS D M, ROBERTSON J, GARRISON M M, et al. Freezing temperatures in the vaccine cold chain: a systematic literature review[J]. Vaccine, 2007, 25(20):3980-3986.
- [8] 冯彬. 疫苗冷链监管系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014. (FENG Bin. Design and implementation of the vaccine cold chain supervision system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [9] HANSON C M, GEORGE A M, SAWADOGO A, et al. Is freezing in the vaccine cold chain an ongoing issue? A literature review[J]. Vaccine, 2017, 35(17):2127-2133.
- [10] KARTOGLU U, MILSTIEN J. Tools and approaches to ensure quality of vaccines throughout the cold chain[J]. Expert Review of Vaccines, 2014, 13(7):843-854.
- [11] 冯立志, 刘威. 疫苗冷链网络实时监测系统的设计与实现[J]. 信息技术, 2017(11):26-29. (FENG Lizhi, LIU Wei. Design and implementation of cold chain network real-time monitoring system for vaccine [J]. Information Technology, 2017(11):26-29.)
- [12] 设备及管道保温技术通则:GB/T 4272—1992[S].北京: 中国标准出版社, 1992. (Equipment and pipe insulation guidelines: GB/T 4272—1992 [S]. Beijing: Standard Press of China, 1992.)
- [13] 周新法. 保冷材料的选择与保冷设计[J]. 化工设计通讯, 1989, 15(1):55-57. (ZHOU Xinfu. The selection and design of cold insulation materials[J]. Chemical Engineering Design Communications, 1989, 15(1):55-57.)
- [14] FROESE R. Insulating properties of styrofoam boxes used for transporting live fish[J]. Aquaculture, 1998, 159(3/4):283-292.
- [15] 陈海洋, 张建一. 蓄冷型运输保温箱在冷链中的应用[J]. 冷藏技术, 2010(3):12-16. (CHEN Haiyang, ZHANG Jianyi. Applications of cold storage type transport box in cold chain[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2010(3):12-16.)
- [16] 陈若峰, 章学来. 蓄冷保温箱漏热性能实验研究[J]. 发电与空调, 2015(2):43-47. (CHEN Ruofeng, ZHANG Xuelai. Experimental research of heat loss on a cold storage transportation container[J]. Power Generation & Air Condi-

- tion, 2015(2):43-47.)
- [17] DEVRANI S, PANDEY S, Chaturvedi S, et al. Design and analysis of an efficient vaccine cold chain box[C]//ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. US: International Science Press, 2016: V003T04A018.
- [18] STAVISH L J. Designing insulated packaging for perishable in vivo diagnostics, medical device and diagnostic industry [J]. Medical Device and Diagnostic Industry, 1984, 6(18):105-108.
- [19] 王教方, 岳贤军, 宋淑珍, 等. 多层复合材料导热系数测定方法的研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2000, 14(3):258-260. (WANG Jiaofang, YUE Xianjun SONG Shuzhen, et al. The research of determine method for the thermal conductivity of many multiple materials [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2000, 14(3):258-260.)
- [20] 戚燕俐, 方悦韵, 张军. 三明治复合结构保温箱材料导热系数测定与隔热效果验证[J]. 塑料工业, 2015, 43(7):121-124. (QI Yanli, FANG Yueyun, ZHANG Jun. The test of thermal conductivity and the verification of heat insulation effect of the composited heat insulation device [J]. China Plastics Industry, 2015, 43(7):121-124.)
- [21] CHOI S J. Mathematical models to predict the performance of insulating packages and their practical uses [D]. US: Michigan State University, 2004.
- [22] CHOI S J, BURGESS G. Practical mathematical model to predict the performance of insulating packages[J]. Packaging Technology & Science, 2007, 20(6):369-380.
- [23] GE Changfeng, CHENG Yujie, SHEN Yan. Application of the finite elemental analysis to modeling temperature change of the vaccine in an insulated packaging container during transport[J]. PDA Journal of Pharmaceutical Science & Technology, 2013, 67(5):544.
- [24] 田津津, 张哲, 王怀文, 等. 蓄冷板释冷过程的数值模拟和实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(3):29-34. (TIAN Jinjin, ZHANG Zhe, WANG Huaiwen, et al. Numerical simulation and experiment research on cold plate melting process [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3):29-34.)
- [25] 夏全刚, 刘宝林, 宋晓燕. 一种新型冷藏车箱体模型的设计与实验验证[J]. 制冷学报, 2014, 35(4):108-112. (XIA Quangang, LIU Baolin, SONG Xiaoyan, et al. Design and experimental verification of a new type of refrigerated vehicle model [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(4):108-112.)
- [26] LIAO M Y, YAN Z S. The evaluation of coil ice storage air conditioning system[C]//Cryogenics & Refrigeration Proceedings of ICCR'98. Hangzhou: International Academic publishers, 1998: 258-262.
- [27] LANE G A, GEIGER W E, CONNELLY N G. Palladium (I). π radicals. Electrochemical preparation and study of their reaction pathways[J]. Journal of the American Chemical Society, 1987, 109(2):402-407.
- [28] 应铁进, 陈宗良. 杨梅鲜果简易低温运输模拟试验[J]. 食品科学, 1994, 15(4):58-60. (YING Tiejie, CHEN Zongliang. Simulation experiment of fresh fruits of myrica rubra at low temperature transport [J]. Food Science, 1994, 15(4):58-60.)
- [29] ABHAT A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials[J]. Solar Energy, 1983, 30(4):313-332.
- [30] 张芸, 钱静. 可降解凝胶蓄冷剂的制备及性能分析[J]. 包装工程, 2012(23):40-44. (ZHANG Yun, QIAN Jing. Preparation and performance analysis of biodegradable gelatinous refrigerant [J]. Packaging Engineering, 2012(23):40-44.)
- [31] 林晗. 无内热源货物保冷运输的温度管理方法[D]. 北京:清华大学, 2004. (LIN Han. Temperature managing method for cooling transportation of cargo without inner thermal source [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.)
- [32] SEYYEDI S M, DAYYAN M, SOLEIMANI S, et al. Natural convection heat transfer under constant heat flux wall in a nanofluid filled annulus enclosure[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2015, 6(1):267-280.
- [33] KHODADADI J M, HOSSEINIZADEH S F. Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2007, 34(5):534-543.
- [34] 邸倩倩, 杨兆丹, 刘斌, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 纳米蓄冷箱蓄冷效果的影响因素[J]. 制冷学报, 2017, 38(1):73-79. (DI Qianqian, YANG Zhaodan, LIU Bin, et al. The influencing factors of cold storage incubator with $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluids by orthogonal method [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(1):73-79.)
- [35] 陈文朴, 章学来, 黄艳, 等. 甲酸钠低温相变材料的研制及其在蓄冷箱中的应用[J]. 制冷学报, 2017, 38(1):68-72. (CHEN Wenpu, ZHANG Xuelai, HUANG Yan, et al. Sodium formate as low temperature phase change material in cold storage insulation box [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(4):36-43.)
- [36] 陈文朴, 章学来, 丁锦宏, 等. 癸酸-正辛酸低温相变材料的制备和循环性能[J]. 制冷学报, 2016, 37(3):12-16. (CHEN Wenpu, ZHANG Xuelai, DING Jinhong, et al. Preparation and cycling performance of capric acid-caprylic acid as cold storage phase change material [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3):12-16.)

- [37] 李贝, 刘道平, 杨亮, 等. 复合相变蓄热材料研究进展[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 36–43. (LI Bei, LIU Daoping, YANG Liang, et al. Research progress on thermal storage materials with composite phase change[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(4): 36–43.)
- [38] 于强强, 张丽平. 复合相变材料微胶囊的制备及表征[J]. 化工新型材料, 2016(2): 189–191. (YU Qiangqiang, ZHANG Liping. Preparation and characterization of composite phase-change material microcapsule[J]. New Chemical materials, 2016(2): 189–191.)
- [39] 尚建丽, 张浩, 董莉, 等. 双壳微纳米相变胶囊制备影响因素的研究[J]. 材料研究学报, 2015, 29(2): 135–142. (SHANG Jianli, ZHANG Hao, DONG Li, et al. Study of influential factors in double-shell phase change micro-man capsules preparation[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(2): 135–142.)
- [40] 武卫莉, 李江坤. 硅橡胶包覆十八烷/聚(St-MMA)储能微胶囊复合材料制备及热性能[J]. 高分子通报, 2017(1): 71–77. (WU Weili, LI Jiangkun. Preparation and thermal properties of silicone rubber coated octadecane/poly(St-MMA) energy storage microcapsule composites[J]. Polymer Bulletin, 2017(1): 71–77.)
- [41] MATSUNAGA K, BURGESS G, LOCKHART H. Two methods for calculating the amount of refrigerant required for cyclic temperature testing of insulated packages[J]. Packaging Technology & Science, 2007, 20(2): 113–123.
- [42] 杉本昌明. スーパーチルド[J]. 食品流通技术, 1988, 17(14): 40–48. (SUGIMOTO Masahiro. Supermarket refrigeration[J]. Food Circulation Technology, 1988, 17(14): 40–48.)
- [43] 李辉群, 陈媛媛. 冷藏药品防冻包装箱及药品运输过程中的防冻包装方法: CN103818652A [P]. 2014-05-28. (LI Huiqun, CHEN Yuanyuan. Antifreeze packaging for refrigerated medicines and antifreezing packaging method for medicine during transportation; CN103818652A [P]. 2014-05-28.)
- [44] 林晗, 石文星, 赵彬, 等. 蓄冷剂摆放方式对保冷性能影响的实验研究[C]//中国制冷学会第十七次团体会员大会暨第五届全国食品冷藏链大会. 长沙: 中国制冷学会, 2004. (LIN Han, SHI Wenxing, ZHAO Bin, et al. The experimental study of affections on the cooling keeping properties by different stack type of cooling storage agents [C]//The 17th Group Membership Conference and the 5th National Conference on Food Cold Chain of Chinese Association of Refrigeration. Changsha: Chinese Association of Refrigeration, 2004.)
- [45] 廖培忠, 黄洪滔. 冷链运输包装箱: CN203410817U [P]. 2015-10-28. (LIAO Peizhong, HUANG Hongtao. Cold chain packing boxes: CN203410817U [P]. 2015-10-28.)
- [46] 李辉群, 林梦圆. 一种保温箱体: CN206050515U [P]. 2017-03-29. (LI Huiqun, LIN Mengyuan. A kind of insulation box: CN206050515U [P]. 2017-03-29.)
- [47] 吴昭. 用于疫苗冷链系统的 RFID 温度记录仪设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015. (WU Zhao. Design of an RFID temperature recorder for vaccine cold chain systems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.)
- [48] 田秋实, 谢晶. 时间-温度指示器(TTI)的发展现状[J]. 渔业现代化, 2009, 36(6): 50–53. (TIAN Qiushi, XIE Jing. Review on the development of time temperature indicator (TTI) [J]. Fishery Modernization, 2009, 36(6): 50–53.)

通信作者简介

刘宝林, 男, 教授, 博士, 上海理工大学医疗器械与食品学院, (021)55277768, E-mail: blliuk@163.com。研究方向: 食品冷冻冷藏、低温生物医学、制冷及低温工程。

About the corresponding author

Liu Baolin, male, professor, Ph. D., School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 21-55277768, E-mail: blliuk@163.com. Research fields: food freezing and cold store, cryobiology, refrigeration and cryogenic engineering.