绿色包装与循环经济

基于蜂窝纸箱的防冻包装保温性能分析

郝发义,胡丹,许合强^{*},徐邦联

(上海理工大学,上海 200093)

摘要:目的 考虑到寒冷地区的低温气候以及多数温敏产品在 2~8 ℃的保温要求,研究环保型蜂窝纸箱的 保温性能及影响因素,以提供合理的防冻包装方案。方法 首先,对防冻保温箱进行有限元建模,实验测试 蜂窝纸板等不同材料的表面辐射率和导热系数,分析蜂窝纸板厚度、孔径等因素对其导热系数的影响规律。 最后,通过仿真和试验对比的方法,分析厚度以及内附材料对蜂窝纸箱保温性能的影响。结果 蜂窝纸板表 面辐射率为 0.81,导热系数随蜂窝纸板厚度和孔径的增加而略有降低,通过仿真和试验的对比,蜂窝纸板 内附气泡膜相较于没有内附材料的防冻时长提升了 9%,而内附反射箔的防冻时长仅提升了 1%。结论 蜂窝 纸箱在冷链物流领域可以替代传统泡沫材料,为冷链物流的可持续发展提供替代包装方案。

关键词:防冻包装;蜂窝纸箱;冷链;有限元

中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)23-0237-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.23.029

Thermal Insulation Performance of Antifreeze Packaging Based on Honeycomb Cartons

HAO Fa-yi, HU Dan, XU He-qiang^{*}, XU Bang-lian

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

ABSTRACT: Considering the low-temperature climate in cold regions and the insulation requirements of most temperature-sensitive products at 2-8 °C, the work aims to study the insulation performance and influencing factors of environmentally friendly honeycomb cartons to provide a reasonable anti-freeze packaging solution. Firstly, the finite element modeling of the antifreeze insulation box, the experimental testing of the surface emissivity and thermal conductivity of different materials such as honeycomb cardboard, and the analysis of the influence law of the thickness of honeycomb cardboard, pore size and other factors on its thermal conductivity were conducted. Finally, the effect of thickness and the inner attached materials on the thermal insulation performance of honeycomb cartons was analyzed by simulation and experimental comparison. The surface emissivity of honeycomb cardboard was 0.81, and the thermal conductivity decreased slightly with the increase of thickness and aperture of honeycomb cardboard. Through the comparison of simulation and experiment, that of the honeycomb cardboard with bubble films inside was improved by 9% compared with those without inside material, while that of the honeycomb cardboard with reflective foils inside was improved by only 1%. Honeycomb cartons can replace traditional foam materials in cold chain logistics, providing an alternative packaging solution for the sustainable development of cold chain logistics. **KEY WORDS:** antifreeze packaging; honeycomb carton; cold chain; finite element

近年来,冷链物流行业发展迅速,对冷链包装的 要求逐渐规范和完善^[1]。冷链保温包装主要用于运输 温度敏感型产品,如药品、海鲜、肉类、新鲜农产品、 葡萄酒等。冷链包装可以保证产品质量在运输中不受

收稿日期: 2023-05-04 基金项目: 国家自然科学基金委员会青年科学基金项目(62005165) *通信作者: 外界温度的影响。诸多疫苗类产品在实际冷链物流过 程中需要维持在特定的温度范围,如破伤风和乙型肝炎 疫苗,要求运输温度保持在 2~8 ℃,疫苗活性成分暴露 于冰点以下 1 h 内就会失去效力,即从生产工厂到患者 注射,全程必须低温冷藏^[2]。大部分蔬菜和水果的最佳 物流温度均不低于零度,在低温环境下运输容易出现果 蔬冷害现象^[3]。此外,还有很多特殊类产品运输温度也 应保持在零度以上。比如,采用玻璃瓶包装的化妆品, 会因低温而碎瓶;水性涂料、黏合剂、电池等产品也会 因低温冻结而导致性能下降;葡萄酒在低于 10 ℃环境 下储存期会变短,甚至失去原有的风味^[4]。针对这类 产品在低温环境下运输时需要进行防冻包装,而有关防 冻包装的应用在冷链行业中并未得到足够的重视。

从目前冷链物流来看,大多数的情况是为了解决 产品在运输过程中受到外界高温的影响。而事实上, 对高纬度、高海拔地区的冬季环境来说,温度可以下 降到-35 ℃甚至更低,全年的低温天数通常在145 d 以上^[5]。从全国一月份温度分布来看,北方大部分地 区都在零下-20 ℃到-10 ℃的温度范围内。从时间跨 度和区域分布上来说,低温会对冷链运输的影响范围 很广,因此,冷链运输中迫切需要解决的另一个问题 是低温环境对产品造成的冻害。

目前最常用的保温包装是发泡聚苯乙烯,大量的研究集中在评价泡沫包装的保温性能。比如 Wang 等^[6]对发泡聚苯乙烯(EPS)及其他材料的保温性能进行研究,通过实验和瞬态热模型评价了不同材料对保温性能的影响。Ge 等^[7]通过有限元分析模型预测了 EPS 内部温度分布,并给出了不同条件下的保温时间。Zeng 等^[8]建立了一个数学模型,评价了铝箔对 EPS 泡沫包装保温性能的影响。

在冷链包装市场上,可持续包装材料和解决方案 的选择非常有限,相关报道也很少。蜂窝纸板包装作 为一种可持续的冷链包装选择方案,其独特的结构和 性能使其成为行业内备受推崇的选择。蜂窝纸板的内 部是空心立体正六边形结构,这种独特夹层结构给予 其很高的机械强度,它可以负载很大的重量和高弯曲 应力^[9]。同时这种结构赋予了它良好的保温性能。 Yang 等^[10]测量了不同几何尺寸的蜂窝纸板和功能型蜂 窝纸板的等效导热系数,并通过基本理论计算和半定量 传热机理分析。Gray-Stuart 等^[11]测试了瓦楞纸板的导热 性,并创建有限元模型对试验结果进行验证。Paquettea 等[12]建立了冷藏运输过程中易腐食品多层保温箱内传 热的三维模型,同时通过有限元模型验证蜂窝纸板孔径 存在的空气对通过传导进行的热传递有较好的隔绝效 果。Xu 等^[13]研究在不同的条件下蜂窝纸板的传热性 能,并建立了包含对流传热的新理论模型。

本文主要是针对产品防冻保护,采用蜂窝纸板作 为内部保温层,实验研究蜂窝纸板导热系数受厚度和 孔径的影响,蜂窝纸箱内附反射铝箔和气泡材料的防 冻性能,探究蜂窝纸板可以替代泡沫的可能性。

1 仿真模型

1.1 保温箱三维模型

本文选用蜂窝纸板作为内衬为整体包装提供保温 效果。防冻保温箱主要由两部分组成,分别是保温箱箱 体以及相变蓄冷剂,前者主要负责降低箱内和环境的热 交换以及保护内装物,后者通过相变去吸热或放热去维 持箱体内温度平衡,其物理模型见图1。保温箱箱体选 用三层的瓦楞纸箱(B瓦楞,厚约2.5~3 mm)搭配内 嵌式蜂窝纸板,蜂窝纸板密度为89 kg/m³,其蜂窝孔 径分别为6、10和15 mm,厚度选用10、20、30 mm。 保温箱外部尺寸为300 mm×300 mm×300 mm。根据 保温箱内部容积大小,选择尺寸为230 mm×175 mm× 25 mm的蓄冷剂,采用四面摆放的方式让保温箱内部 温度场分布均匀。



Fig. 1 Physical model of honeycomb cardboard insulation box

1.2 模型网格划分

防冻保温箱的网格划分根据计算的需求可以将模型划分为3个部分,分别为保温箱箱体、蓄冷剂和箱内空气。使用 COMSOL Multiphysics 网格划分模块对 其进行分块网格划分,保温箱体和箱内空气使用较细 化四面体网格,而蓄冷剂部分较为规整,对其进行扫 略网格划分,并进行网格加密处理,既可以提高仿真 精度也可以提高运算速度,网格划分示意图如图2所 示。网格单元数量为672428,最小单元质量为0.32287, 平均单元质量为0.7642,符合后续仿真计算要求。



图 2 模型网格划分 Fig.2 Model meshing

1.3 材料参数及边界条件设置

在仿真过程中对防冻保温箱模型做如下理想假 设:保温箱完全密闭;箱内空气环境和保温材料的所 有参数不随环境温度改变;考虑内外辐射传热影响; 箱体内空气是不可压缩流体,其密度系数满足 Boussinesq假设;保温箱内的空气在箱体内壁上的流 动符合无滑移边界条件;设置保温箱外部边界条件为 对流换热,外界低温环境为-15℃,对流换热系数为 12 W/(m²·K);保温箱体、蓄冷剂和内部空气材料参 数如表1所示。

在自然对流中, 瑞利数 Rayleigh 可以去判断由重 力引起的流动强度。当瑞利数小于 10⁸时, 重力驱动 的对流为层流; 当瑞利数的范围满足 10⁸<*Ra*<10¹⁰时, 重力驱动的对流由层流向湍流转变; 当瑞利数超过 10¹⁰时, 重力驱动的对流为湍流。

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{v}{\alpha} \cdot \frac{g\beta L^3 \Delta T}{v^2} = 9.4 \times 10^7 < 10^8$$
(1)

式中: Ra 为瑞利数; Pr 为普朗特数; Gr 为格拉 晓夫数; v 为流体的运动黏度; a 为流体的热扩散率; g 为重力加速度; β 为流体热膨胀系数; ΔT 为流体上 下面温差值; L 为特征长度。

由式(1)可知,防冻保温箱流体内部空气为层 流模型,在 COMSOL Multiphysics 中选择层流接口进 行仿真。

表 1 空气、蓄冷剂及保温材料参数 Tab.1 Parameters of air, PCM and insulation material

材料	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
空气	0.021	1.39	1 002
蓄冷剂	0.681	715	2 900
蜂窝纸板保温箱体	0.067	89	1 500
瓦楞纸箱	0.087	50	900

2 试验

2.1 材料和仪器

试验所用材料为广东东莞某纸板公司的复合蜂 窝纸板和瓦楞纸板。为了满足保温区间 2~8 ℃的需 求,选用了相变温度为 5 ℃的蓄冷剂。试验仪器设备 的规格及制造商如表 2 所示。

2.2 表面热辐射率测量

表面辐射率的测试过程是按照文献[14]所述的 程序进行的。根据 ASTM D3103-20^[15]的测量要求, 保证试件的温度至少比环境温度高或低 10 ℃。在此 过程中,通过增加温差可以提高辐射率的测量精度。 室内温度保持在(22±1)℃,利用热电偶温度计测量 试件表面温度(T_0)和环境温度(T_e)。将热像仪辐 射率 ε 设为 1 来测量试样表面温度(T'_0)。物体表面 辐射率计算见式(2)。

$$\varepsilon = \frac{T_0' - T_{\rm e}}{T_0 - T_{\rm e}}$$
(2)

图 3 显示了瓦楞纸、蜂窝纸板、铝箔的试验设置。 为了保证测量的准确性,可在不同环境温度下,经过 多次测量并计算后得到表面辐射率的平均结果。为了 验证辐射率 ε 是否准确。设定热像仪发射率 ε 作为计 算所得到的辐射率,对比了采用热像仪与热电偶对目 标温度进行测量时的误差情况。图 4 显示了各个材料 的温差结果,可以看到,两者存在较小的温度误差, 其原因如下:

1)热电偶测温探头呈球状,与目标表面接触面 积小。

2) 在加热过程中受温度的影响, 被测目标会鼓起,导致被测目标与加热平台接触不充分。

2.3 蜂窝纸板导热系数的测量

本文所采用的导热系数测量方法^[16]是瞬态平面 热源技术。其探头所采用的材料是具有热阻性质的,

表 2 试验仪器设备的型号及厂家 Tab.2 Model and manufacturer of test equipment

仪器、设备	型号	厂家	
多功能导热系数测量仪	DRE-III	西瓦卡精密量仪(东莞)有限公司	
MT-X 多路温度记录仪	MT-16	深圳市华轩科技有限公司	
恒温恒湿试验箱	MLD-225B	密朗德仪器科技(江苏)有限公司	
海尔可控温冰柜	BC/BD-307HEM	海尔集团公司	
智能加热台	BY3030	邦远	
热电偶温度计	GM1312	标智仪表	
热成像仪	H10	海康威视	



图 3 不同表面辐射率试验 Fig.3 Different surface emissivity tests





其自身可作为热源,又可以当温度传感器来使用。镍 热阻系数会随温度变化,其变化与电阻之间存在线性 关系,从电阻的变化情况可以得出温度的变化情况, 就能得知热量的散失情况,由此体现了试样的导热性 能。由于本文主要探讨保温箱的保温效果,故选择导 热系数为主要参数研究。

 1)厚度对导热性能的影响。图 5 为蜂窝纸板在 其孔径尺寸不变的基础上,不同厚度对其导热系数的 影响。为追求所得数据的精度,全部实验都在同一环 境中(室温(22±1)℃)反复进行 3 次取平均值。 从数据呈现的信息来看,在厚度为 10~30 mm 内, 导热系数随着厚度的增加而减小,随着孔径的增加, 厚度对导热系数的影响在降低。孔径为 15 mm 时, 随着厚度增加,导热系数变化较为平缓。厚度增加导 致蜂窝纸板导热系数下降这是由于厚度增加,气体导 热热阻增加,蜂窝纸板传热由三部分组成:部分靠气体传热;部分穿过骨架,也就是蜂窝壁的固体传热; 也有部分是以气体对流的方式传热,但是在相对狭小 的密闭空间里对流换热影响甚微。气体对流换热和蜂 窝壁的固体传热对蜂窝纸板的传热效果低于增加的 气体对传热阻碍的效果。最终表现出蜂窝纸板隔热性 能上升,导热系数下降。



Fig.5 Effect of thickness on thermal conductivity

2) 孔径尺寸对导热性能的影响。图 6 为蜂窝 纸板在保持厚度不变的基础上,改变孔径大小所测得 的导热系数。从数据呈现的信息来看,孔径尺寸与导 热系数成反比,孔径尺寸越大导热系数越小;孔径为 15 mm 时,厚度对其导热系数影响最小。孔径尺寸与 导热系数成反比的主要原因如下。



①从热阻的角度来看,蜂窝纸板总热阻可看成是 中间气体热阻和外层纸板热阻的总和,蜂窝纸板孔径 尺寸增大并不改变材料本身属性,故不会对外层纸板 的热阻产生影响,反而会因为孔径变大而使单位体积 内气体含量的增加,从而提高气体层的导热热阻和材 料的总热阻。材料热导率和热阻成反比,热阻提高, 那么材料热导率就会下降。

②从传热的角度来看,孔径尺寸的增加,降低单 位体积蜂窝壁的数目,气泡层内固体传热降低,并且 加大孔径,对密闭空间中气体对流传热的作用较小。 因而加大了孔径,在固体导热降低、气体热阻增加的 综合影响下,材料的隔热性能增强,热导率下降。

特别地,蜂窝纸板因其独特的蜂窝结构使其同时 具备优良的力学性能和隔热性能。在蜂窝结构这种密 闭的狭小空间里适当增加蜂窝孔径尺寸可以有效改 善空气间层的热阻作用,从而降低材料的导热系数。 但是蜂窝纸板内部的立体正六边形结构同时也对蜂 窝纸板的整体起着至关重要的支撑作用,其蜂窝孔径 过大会影响其力学性能,因此,在实际应用中,应综 合考虑蜂窝纸板的整体力学性能和隔热性能,选用合 适的蜂窝孔径大小。

2.4 仿真结果分析

保温箱的保温性能的测量是根据标准 ASTM D3103-20^[16]进行的,箱内 8 个温度传感器放置位置。 恒温恒湿箱环境条件控制在(-15±0.5)℃的温度。 将保温箱和蓄冷剂放入 8 ℃的冰柜,预冷处理 6 h 后, 盖上蜂窝纸板并用铝箔胶带对外包装进行密封,防 止漏气。值得注意的是,将保温箱放入恒温恒湿箱 之前,将恒温恒湿箱预冷 2 h 至所需低温条件。保 温时间被定义为温度测点达到 2 ℃的时间, 2 ℃往 往是生鲜运输的下限温度^[17]。不同厚度蜂窝纸板箱 如图 7 所示。



a 厚10 mm蜂窝纸板 b 厚20 mm蜂窝纸板 c 厚30 mm蜂窝纸板



根据图 8 所示的数据,可以清晰地观察到保温箱 内各个测点的温度随时间的变化趋势。由于蓄冷剂采 用四面摆放的方式布置在包装箱内部,包装箱内中部 测点(P3、P4 和 P5)相变时的温度高于包装箱内上 部测点(P7 和 P8)相变时的温度,而下部测点(P1、 P2 和 P3)相变时的温度最低。这是由于热空气比冷 空气密度小,因而热气向上升、冷气向下降。

整个过程可描述为3个不同的阶段。0 min 时蓄 冷剂自身工作温度高于其相变温度,此时蓄冷剂开始 逐步降温,到 90 min 左右时,蓄冷剂降温至其相变 点,同时箱体里面温度趋于稳定,此时蓄冷剂状态为 液态;90~900 min 时,随着内外的冷热交换,蓄冷 剂自身温度已经达到其相变温度,正处于相的转变阶 段,伴有相变潜热的释放,使内部空气温度逐步稳定 保持在相变温度左右,蓄冷剂由液态慢慢转为固态, 此时蓄冷剂为固液混合态;900 min 以后,蓄冷剂的 相变潜热已经基本释放结束,蓄冷剂开始释放显热, 此时内部环境温度会快速下降,蓄冷剂也会彻底转为 固态,意味着此防冻保温箱失去温控效果。很明显, 防冻保温箱的保温时间是由包装中蓄冷剂的第 2 阶 段主导的。由于实际保温箱内的温度分布不均,故将 保温箱的保温时长定义为温度分布最均匀的测量点 (P3 或 P4)的第 2 阶段持续时间。



图 8 各测点温度变化 Fig.8 Temperature variation at each measuring point



根据图9所示,对各个测点进行了试验和仿真,

以比较其保温时长。根据分析结果,8个测点的平均 误差为5.26%,其中有6个测点的误差均未超过10%, 但位于包装内上部位置的测点7和测点8的误差均超 过了10%。分析原因主要是隔热盖用胶带封装时难以 压实,此时隔热盖与下部周围隔热材料之间存在间 隙,导致了外部冷量与包装箱内顶部存在部分的直接 冷交换,而在仿真过程中忽略了包装的气密性。仿真 模型误差低于10%,符合工程应用误差要求,故模型 可靠。

3 蜂窝纸板的防冻性能分析

3.1 蜂窝纸板厚度对防冻性能的影响

如图 10 所示,在外界温度为-15 ℃时,选择孔 径大小为 15 mm 的不同厚度的蜂窝纸板所制成防冻 保温箱,并对比其保温时长。蜂窝纸板厚度从 20 mm 加厚到 30 mm 时曲线变化较为明显,对其数据进行 散点拟合,得到曲线方程 $y=A_1 \cdot \exp(-x/t_1)+y_0$ 可以较好 地反映不同蜂窝纸板厚度对防冻保温箱防冻性能影 响,可决系数 $R^2=0.995$ 8,在以后的实际运用中可以 使用此方法去评估不同厚度蜂窝纸板所制成包装箱 防冻时长。当防冻需求不高时,可以选择小于等于 20 mm 厚度的蜂窝纸板作为防冻箱箱体。当防冻需求 较高时,选择大于 20 mm 厚度的蜂窝纸板作为防冻 箱箱体。





3.2 蜂窝纸板内附不同材料对防冻性能的 影响

为了进一步延长蜂窝纸板所制成的防冻保温箱

的保温时长,如图 11 所示,对其贴附不同的材料, 并将其与传统泡沫材料所制成的防冻保温箱保温时 长进行对比,从而论证蜂窝纸板所制成的防冻保温箱 的可行性。



a 气泡膜



b 反射膜



c XPS泡

d EPP泡沫

图 11 不同材料的防冻保温箱 Fig.11 Antifreeze insulation boxes of different materials

外界温度维持在-15 ℃,防冻箱箱体和蓄冷剂初 始温度为 8 ℃。图 12 为内附不同材料所制成的防冻 保温箱在 10 h 的瞬态温度云图,从数据可得不同内 附材料所制成的防冻保温箱在内部温度场稳定后所 在的温度区间。30 mm 厚蜂窝纸板内附气泡膜所制成 的防冻保温箱的保温性能与 20 mm 厚 XPS 泡沫材料 所制成的防冻保温箱的性能相当,优于 30 mm 厚蜂 窝纸板内附反射膜以及 20 mm 厚 EPP 泡沫材料所制 成的防冻保温箱;30 mm 厚蜂窝纸板内附反射膜所制 的防冻保温箱的保温性能与 20 mm 厚 EPP 所制的防 冻保温箱的保温性能与 20 mm 厚 EPP 所制的防

外界温度设置为-15 ℃,所有试验为了确保准确性 均重复了 3 次并取其平均值。如图 13 所示,蜂窝纸板 内附气泡膜相较于没有内附材料的防冻时长提升了 9%,而内附反射箔的防冻时长仅提升了 1%,30 mm 厚蜂窝纸板内附气泡膜的防冻时长与厚 20 mm XPS 和 厚 30 mm EPS 的防冻时长相差不大,优于厚 20 mm EPP 所制成的防冻保温箱。说明蜂窝纸板内附放射膜对 其防冻性能影响甚微。综上所述,蜂窝纸板内附气泡膜 的防冻性能可以与 EPS 泡沫的防冻性能相当。



图 12 不同材料温度云图 Fig.12 Contour of different material temperature



图 13 不同材料的防冻保温箱保温时长 Fig.13 Insulation duration of anti-freezing insulation boxes of different materials

4 结语

基于蜂窝纸板的防冻包装研究,所建立的仿真模型的8个测点的平均误差为5.26%,其中有6个测点 的误差均未超过10%,仿真模型平均误差低于10%, 符合工程应用误差要求,故模型可靠。文中试验得出, 蜂窝纸板导热系数随孔径及厚度增大而降低;蜂窝纸 板厚度从20mm增加到30mm时,其所制成的防冻 保温箱的防冻性能增长最为明显,曲线方程 y=A1·exp(-x/t1)+y0 可以较好地反映不同蜂窝纸板厚 度对防冻保温箱防冻性能影响,可决系数 R²=0.995 8; 通过仿真和试验对比,蜂窝纸板内附气泡膜的防冻时 长相较于没有内附材料的提升了 9%,而内附反射箔 的防冻时长仅提升了 1%,30 mm 蜂窝纸板内附气泡 膜的防冻性能与 30 mm EPS 泡沫防冻性能相当。采 用蜂窝纸板作为隔热材料,将瓦楞纸箱作为外部包装 材料的组合形式,可以在冷链运输中替代泡沫材料, 并且符合未来的绿色包装发展理念。

参考文献:

- [1] 佚名. 2019 年食品冷链企业经营情况分析[J]. 物流技术与应用, 2020, 25(S1): 58-61.
 Anon. Analysis on the Operation of Food Cold Chain Enterprises in 2019[J]. Journal of Logistics Technology and Application, 2020, 25(S1): 58-61.
- [2] 彭文聪,刘宝林.疫苗冷链发展现状[J].制冷技术, 2021,41(5):83-87.

PENG Wen-cong, LIU Bao-lin. Development Status of Cold Chain of Vaccine[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2021, 41(5): 83-87.

[3] 刘芳卫,杨立颖,徐晓晴. 生鲜农产品冷链包装的研

究思考[J]. 绿色包装, 2021(9): 34-38.

LIU Fang-wei, YANG Li-ying, XU Xiao-qing. Research on Cold Chain Packaging of Fresh Agricultural Products[J]. Green Packaging, 2021(9): 34-38.

[4] 任章成,郭泽美,任伯玲.葡萄酒储藏过程中质量影
 响因素及控制措施[J].食品安全导刊,2022(28):
 53-55.

REN Zhang-cheng, GUO Ze-mei, REN Bo-ling. Wine Quality Influencing Factors and Control Measures in Storage[J]. China Food Safety Magazine, 2022(28): 53-55.

[5] 马锋敏,陈丽娟,李想,等.中国冬季气温不同年代
 际的季节内变化特征及成因分析[J].大气科学,2022,
 46(3): 573-589.

MA Feng-min, CHEN Li-juan, LI Xiang, et al. Characteristics and Causes of Intraseasonal Variation of Winter Temperature in China under Different Interdecadal Scale[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(3): 573-589.

- [6] WANG Kai-bao, YANG Liu, KUCHAREK M. Investigation of the Effect of Thermal Insulation Materials on Packaging Performance[J]. Packaging Technology and Science, 2020, 33(6): 227-236.
- [7] GE C, CHENG Y, SHEN Y. 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 and Technology, 2013, 67(5): 544-552.
- [8] ZENG Tai-ying, JIANG Hai-lin, HAO Fa-yi. Study on the Effect of Aluminium Foil on Packaging Thermal Insulation Performance in Cold Chain Logistics[J]. Packaging Technology and Science, 2022, 35(5): 395-403.
- [9] WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(6): 309-316.

- [10] YANG Jing, GUO Zhen-sheng, CHEN Jin-xiang, et al. Analysis of the Convective Heat Transfer and Equivalent Thermal Conductivity of Functional Paper Honeycomb Wall Plates[J]. Experimental Heat Transfer, 2022, 35(5): 577-590.
- [11] GRAY-STUART E M, BRONLUND J E, NAVARANJAN N, et al. Measurement of Thermal Conductivity of Paper and Corrugated Fibreboard with Prediction of Thermal Performance for Design Applications[J].Cellulose, 2019, 26(9): 5695-5705.
- [12] PAQUETTE J C, MERCIER S, MARCOS B, et al. Modeling the Thermal Performance of a Multilayer Box for the Transportation of Perishable Food[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 105: 77-85.
- [13] XU Zhao-lai, WANG Jun, PAN Liao, et al. Experimental, Numerical and Theoretical Study on Heat Transfer in Paper Honeycomb Structure[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 186: 108108.
- [14] 罗晓春,孙继银.物体表面发射率的测量方法[J]. 兵 工自动化, 2007, 26(8): 72-74.
 LUO Xiao-chun, SUN Ji-yin. Method for Measuring Object Surface Emissivity[J]. Ordnance Industry Automation, 2007, 26(8): 72-74.
- [15] ASTM D3103-20, Standard Test Method for Thermal Insulation Performance of Distribution Packages[S].
- [16] 任佳, 蔡静. 导热系数测量方法及应用综述[J]. 计测 技术, 2018(S1):46-49.
 REN Jia, CAI Jing. Review of Thermal Conductivity Measurement Methods and Applications[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018(S1):46-49.
- [17] 许欣,郑丰,孔俊,等. 冷链运输包装纸板的研究现 状及发展趋势[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 133-142.
 XU Xin, ZHENG Feng, KONG Jun, et al. Research Status and Development Trend of Cold Chain Transport Packaging Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 133-142.

责任编辑:曾钰婵