

可拆冷板式物流箱的设计及保冷效果分析

李细霞, 吕东霖, 王丽, 李长玉
(华南理工大学广州学院, 广州 510800)

摘要: **目的** 研究生鲜食品运输过程中使用的物流箱的结构优化和保冷效果。**方法** 设计一种冷板可拆卸的物流箱, 由冷板、外壳层、保温隔热层、接触层构成, 并且建立物流箱保冷效果的物理模型, 利用有限元方法对其不同情况下的保冷效果进行分析, 通过多项式拟合的方法得到物流箱表面热流密度和保温隔热层厚度的关系。**结果** 发现在物流箱外空气温度为 25 ℃ 时, 采用保温隔热层厚度为 15 mm 时物流箱表面热流密度比 25 mm 时高出约 20 W/m²。**结论** 设计的物流箱可多次重复使用, 便于箱内空间的利用与货物摆放, 分析的结果有助于在设计物流箱时选取合适的保温隔热层厚度。

关键词: 物流箱; 冷板; 保冷效果; 保温隔热层

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0102-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.018

Design of Logistics Box with Detachable Cold Plate and Analysis on the Cooling Effect

LI Xi-xia, LYU Dong-lin, WANG Li, LI Chang-yu
(Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China)

ABSTRACT: The work aims to study the structure optimization and cooling effect of the logistics box used in the transportation of fresh food. A detachable logistics box with cold plate was designed. It consisted of a cold plate, a shell layer, a thermal insulation layer and a contact layer; and the physical model for the cooling effect of the logistics box was set up. The cooling effect under different conditions was analyzed in the finite element method. The relationship between the heat flow density on the surface of logistics box and the thickness of the thermal insulation layer was obtained by the polynomial fitting method. It was found that, when the air temperature outside the logistics box was 25 ℃, if the thickness of thermal insulation layer was 15 mm, the heat flow density of the surface of the box was about 20 W/m² higher than that of 25 mm. The designed logistics box can be reused for many times, convenient for the use of space in the box and the placement of goods. The analyzed results help select the proper thickness of thermal insulation layer at the time of designing the logistics box.

KEY WORDS: logistics box; cold plate; cooling effect; thermal insulation layer

随着电子商务的普及,越来越多的客户选择网上购买生鲜食品、药品等货物,此类货物在运输过程中的保鲜保质问题受到越来越多研究人员的关注^[1-2]。冷藏运输是生鲜物品以及药品运输过程中保鲜保质的一个重要途径,冷藏运输也是冷链物流中的一个重要环节,冷链物流箱是冷藏运输过程中一种重要设备,针对其结构设计和保冷效果分析研究人员做了大量的工作,具体可总结如下所述。

2011 年刘翠娜等^[3]对某便携式蓄冷保温箱进行

了放冷实验跟踪,并且用 Ansys 软件进行了理论计算,对保温箱的结构进行了优化。2013 年廖阳明等^[4]利用半导体制冷的原理设计制造了一种小型的可用于运输药品的保温箱,使该保温箱具有自动调节温度的功能。2014 年罗海波等^[5]针对普通保温箱不能精准控制温度的问题,设计了一种基于 PID 控制的保温箱,使该保温箱具有加热,制冷与线性调节温度的功能。2015 年陈志强等^[6]研究了医用保温箱保温效果的测试方法和标准,陈若峰等^[7]研究了真空绝热板和聚

收稿日期: 2017-12-10

基金项目: 广东省青年创新类人才项目基金(2016KQNCX226); 广东省质量工程项目(51-SC150201)

作者简介: 李细霞(1982—),女,硕士,华南理工大学广州学院讲师,主要研究方向为冷链物流中的关键技术。

聚氨酯隔热结构应用于保温箱时的漏热情况,比较了 2 种隔热方式的优缺点。2016 年宋海燕等^[8]利用实验的方法研究了蓄冷剂的质量对某种材料保温箱温控效果的影响,得到了满足药品短途快速运输的基本条件,张鑫鑫等^[9]设计了一种可运用于冷链物流的可折叠保温箱,并且对该保温箱的保温效果进行了实验研究。2017 年张静荣等^[10]利用实验的方法研究了不同的蓄冷剂对便携式保温箱保温效果的影响。

从对文献分析可看出,目前冷链物流箱主要采用冰袋或其他蓄冷剂与物流箱体方式或者电子制冷设备与保温箱体组合方式进行运输过程中生鲜食品或药品等的保鲜保质。其中蓄冷剂与保温箱体组合形式一般采用袋装蓄冷剂,在装卸货物或者货物堆放时存在诸多不便之处,且袋装蓄冷剂容易破损不利于重复使用。利用电子制冷设备成本较高,对运输过程中温度控制要求不高的货物并不适用。针对这种情况,文中设计一种可拆卸冷板式的冷链物流箱,冷板中以水作为蓄冷剂,可固定在箱体内壁,且可方便拆卸进行充冷。同时为了在设计时选取合适的物流箱厚度,建立物流箱瞬态传热模型,分析物流箱的保冷效果,提出一种确定保温隔热层厚度的方法。

1 物流箱的设计及说明

1.1 结构设计

设计的物流箱主要用于存储运输生鲜物品,要求运输过程中能够方便搬运,且有一定的容量,需具有一定的耐用性,能够重复多次使用;需具有一定的隔热性,能够实现货物的较长距离低温运输。因设计的快递箱内层与食品直接接触需保证内层化学性能安全。为方便施加冷源,需设计与保温箱相匹配的冷板,冷板需通过卡槽固定在箱体内,可拆卸,可多次使用。

针对以上设计要求,设计箱体的总大小为 600 mm×400 mm×400 mm。箱体的结构分为 4 层,分别为外壳层,保温隔热层,接触层,冷板层。其中外壳层起到总体支撑和抵抗运输过程中磨损与碰撞等功能。隔热保温层起到隔绝热量传输保证长时间低温运输的功能。接触层起到保证食品存储安全的作用。设计时为保证箱体有一定强度和保温效果,取外壳层厚度取值为 5 mm,保温隔热层取为 25 mm,接触层厚度取值 2 mm,冷板层厚度取值 15 mm。整个物流箱由 14 个部件组装成,分别为箱盖外壳,箱盖保温隔热层,箱盖接触层,橡胶垫,顶置冷板,侧置冷板,底置冷板,箱体接触层,箱体隔热层,箱体外壳。其中箱盖外壳,箱盖保温隔热层,箱盖接触层,橡胶垫组装成物流箱箱盖。箱体接触层,箱体外壳,箱体隔热层组装成箱体。具体的装配关系见图 1。

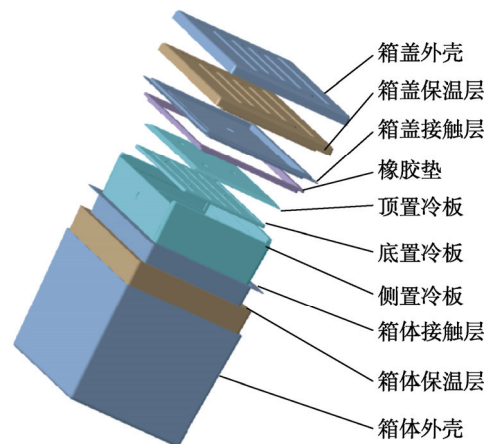


图 1 物流箱的设计结构及装配关系

Fig.1 The design structure and assembly relationship of the logistics box

传统的物流箱一般采用冰袋放置箱内的方式进行冷却,占用箱内空间且不利于重复多次使用。文中设计的物流箱在箱体的 6 个壁面内侧均可放置冷板。冷板可固定在箱壁内侧,且可方便地拆下。在使用时可根据所运输货物对保冷效果的要求选择安装不同数量的冷板数,例如在对保冷效果要求不高时可只使用侧置冷板,在货物对保冷效果要求较高时可同时使用侧置冷板,顶置冷板,底置冷板。物流箱在设计的时候需设计凸起与卡槽起到冷板固定的作用,冷板为厚度为 1 mm 的空心体,冷板中充大约占总体积 90% 的水作为蓄冷剂。具体的箱体外壳与箱体隔热层,接触层以及冷板的装配关系剖面见图 2。

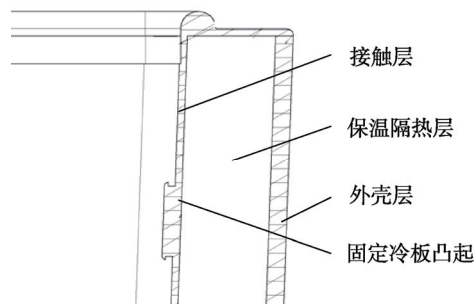


图 2 物流箱箱体装配关系

Fig.2 Assembly relationship of the logistics box body

物流箱的箱盖因为要考虑密封性能所以需要一层橡胶垫。具体的橡胶垫和接触层,外壳层以及隔热层的装配关系见图 3。

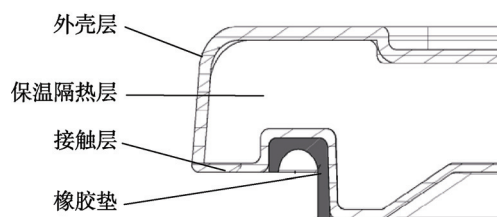


图 3 物流箱箱盖装配关系

Fig.3 Assembly relationship of the logistics box cover

1.2 材料选择工艺要求

物流箱需多次使用,外壳应具有一定的抗冲击性和抗磨损性,化学性能需稳定,查阅材料后选用高密度的聚乙烯材料。考虑到物流箱需轻便且具有较好的隔热效果,保温隔热层需选用密度小且热传导系数较小的材料,查阅资料后选择聚氨酯泡沫或真空隔热材料(VIP)。接触层需选用化学安全性高可与食品直接接触的材料,查阅资料后选用聚丙烯。为使外壳层,接触层,保温层贴合较好,聚氨酯材料采用发泡工艺成型^[11-13]。

外壳层为实现保温隔热层的均匀隔热效果,尽量减少孔槽的数量,设计成圆滑的矩形桶体,下端设置4个高2 mm的圆形防滑突起。为增强保冷效果在冷板表面设置有矩形凹槽以增大接触面积,且设置有3个半圆形突起以防止冷板放于冷柜冷冻时相互粘黏。具体使用时将冷板按同方向堆叠放入冷柜冷藏至结冰后,放入箱体内对应的冷板固定位置,盖上上端盖,装入货物,即可实现保温冷藏效果。另注意若要保证保温冷藏效果,不宜频繁开合。

1.3 物流箱成本与经济效益分析

经厂家询价,生产制造设计的物流箱时材料成本主要根据所用材料的质量估算。聚丙烯塑料价格约为15~18元/kg。聚乙烯塑料价格约为18~20元/kg。聚氨酯泡沫塑料价格为16~18元/kg。文中在设计时采用三维制图软件CATIA制图,具有核算各部件质量及体积功能。通过核算可知:整个物流箱聚丙烯材料用量0.331 kg,大约需要6.0元;聚乙烯用量0.731 kg大约需要14.6元;隔热层厚度取2.5 cm时聚氨酯用量0.945 kg大约需要17元;隔热层厚度每增加1 cm需要增加成本6.5元,可根据货物对保冷效果的要求选择最经济实用的保温隔热层厚度。隔热层厚度取2.5 cm材料成本共34.6元。如批量生产可控制每个物流箱的成本在80元以内。同样容积的泡沫箱和冰袋成本大约在5元左右。可见可重复使用的冷链物流箱可产生一定的经济效益,并且在提高货物运输质量,节省材料,环保等各个方面具有一定的意义。

在货物对保冷效果要求较高时可采用真空隔热板(VIP)进行隔热,因其能够有效地避免空气对流引起的热传递,导热系数可大幅度降低,约为聚氨酯材料导热系数的十分之一。经厂家询价,制造该物流箱时如采用真空隔热板隔热板作为隔热材料,隔热材料成本在150元左右,同时因为采用真空隔热板会导致整个物流箱加工工艺变得复杂,导致制造成本增加。整个物流箱成本在300元左右,因此在保证运输效果的前提下选择运营成本更低的聚氨酯发泡工艺更合适。

2 物流箱的保冷效果分析

2.1 物理模型

在设计物流箱时保温隔热层厚度直接影响到保冷的效果,不同的货物需要不同的保冷效果,需选择不同的保温隔热层厚度,可建立物理模型通过计算的方式分析不同保温隔热层厚度对保冷效果的影响,为保温隔热层的厚度选择提供依据。物流箱的外壳层,保温隔热层和接触层经过简化后见图4。

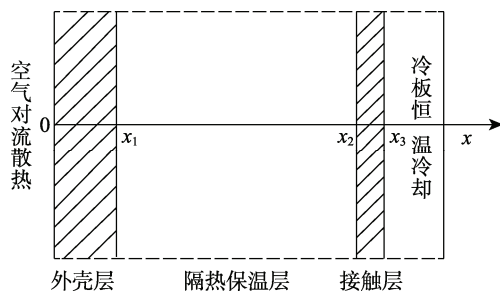


图4 模型示意

Fig.1 Model schematic diagram

结合实际情况,接触层冷板进行冷却,外壳层空气对流散热,可建立物理模型。相应的控制方程为:

$$\rho_n c_n \frac{\partial \theta_n(x,t)}{\partial t} - k_n \frac{\partial^2 \theta_n(x,t)}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq x_3 \quad (1)$$

相应的边界条件为当 $x=0$ 时:

$$k_1 \frac{\partial \theta_1(0,t)}{\partial x} - h_0 \theta_1(0,t) = -h_0 \theta_{\text{air}} \quad (2)$$

当 $x=x_3$ 时:

$$\theta_3(x_3,t) = \theta_{\text{pla}} \quad (3)$$

相应的初始条件为:

$$\theta_n(x,0) = \theta_{\text{ina}} \quad (4)$$

式中: $n=1$ 代表外壳层, $n=2$ 代表保温隔热层, $n=3$ 代表接触层; θ_n 为第 n 层温度分布; ρ_n 为第 n 层密度; c_n 为第 n 层比热容; x 为位置变量; t 为时间变量; k_n 为第 n 层热传导系数; h_0 为对流换热系数。 θ_{air} 为空气温度, θ_{ina} 为初始温度。并令 $l_1=x_1$, $l_2=x_2-x_1$, $l_3=x_3-x_2$,其中 l_1 为外壳层厚度, l_2 为保温层厚度, l_3 为接触层厚度。查阅文献[11]后各参数取值见表1。

表1 各层物理参数
Tab.1 Physical parameters of each layer

n	$\rho_n/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$k_n/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	$c_n/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	L_n/mm
1	100	0.047	1380	5
2	50	—	1460	—
3	90	0.040	1337	2

计算时不考虑空气强制对流,对流换热系数 $h_0=5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,空气温度、隔热层厚度、初始温度等在计算时根据不同的情况取不同的值。

2.2 分析讨论

如前所述的问题为多层结构传热问题,一般采用数值解法进行求解^[14-17],文中利用有限元法,采用Matlab软件编制程序求解。图5表示当保温隔热层厚度为25 mm,冷板温度为0℃,空气温度为25℃时,隔热材料分别采用聚氨酯泡沫塑料和真空隔热板(VIP)时,经过不同时间温度沿着箱壁厚度方向的分布情况,计算中初始温度的取值为25℃,聚氨酯泡沫热传导系数取0.025 W/(m·℃),真空隔热板热传导系数取0.003 W/(m·℃)。从图5中可以看出不论采用何种隔热材料,随着时间的增加,温度整体呈下降趋势,假如采用聚氨酯泡沫材料隔热在1800 s和3600 s时物流箱箱壁温度分别基本不变化,说明此时热量的传输已经达到平衡状态,最终物流箱表面的温度保持在23.4℃,当采用真空隔热材料时在1800 s和3600 s物流箱箱壁温度分布存在较大的差别,说明此时热量流动还未达到平衡状态。在18 000 s和36 000 s时温度分布情况不再变化,此时达到平衡状态物流箱表面温度稳定在24.6℃,非常接近箱外空气温度,和空气的热交换很小,保冷效果很好。

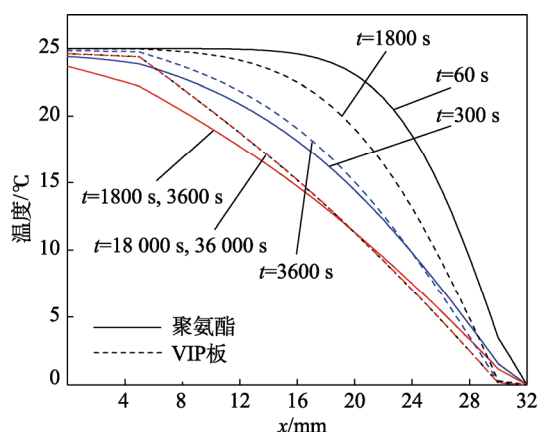


图5 不同时间温度沿x方向的分布

Fig.5 Temperature distribution in the direction of x at different time

取不同隔热层厚度时,物流箱外壳表面,物流箱隔热层和外壳层交界处,物流箱保温隔热层和接触层交界处的温度随着时间的变化关系见图6。其中A线表示保温隔热层为25 mm时物流箱表面的温度变化,D线表示保温层为15 mm是物流箱表面温度变化,对比可发现,随着时间的增加物流箱表面温度趋于恒定,但当保温隔热层厚度增大时,物流箱表面温度较高,隔热保温层厚度为15 mm和25 mm时,物流箱表面恒定温度相差4℃左右,计算时空气温度取25℃,物流箱表面温度越低则与空气温度相差越大,在相同的热对流系数下散热也多,物流箱的保冷效果越差。B线和E线表示在物流箱壳体和保温层交界处温度随时间变化的关系,此时保温隔热层厚度越厚,温度下

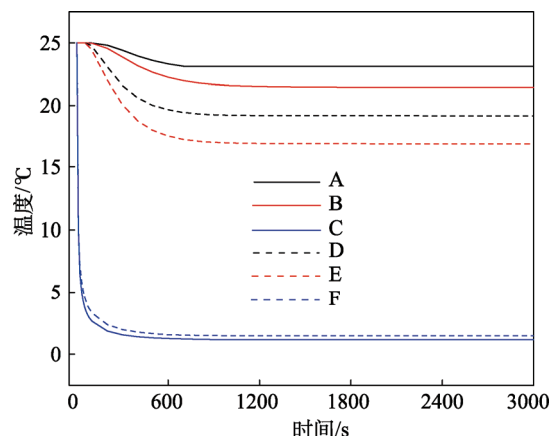


图6 物流箱各位置温度随时间的变化曲线

Fig.6 The curve of each position temperature of the logistics box changing over time

降越缓慢,符合物理常识。C线和F线分别表示了保温隔热层和接触层交界处温度随时间变化的关系,此时保温隔热层越厚,温度下降越快,分析原因是因为此点位置在保温隔热层右侧,保温隔热效果更好,空气热量更不容易传入,此时冷板对该点的冷却效果更好,所以温度下降更快。

研究了不同的保温隔热层厚度和不同的室外空气温度对物流箱外表面温度以及热流密度的影响见图7。其中A线和B线分别表示在箱体外温度为25℃和15℃时经过较长时间之后箱体表面恒定温度随保温隔热层厚度变化的关系。可以看出随着保温隔热层厚度增加,箱体表面恒定温度逐渐增高,当保温隔热层无限增大时箱体表面温度有无限接近箱体外空气温度的趋势。为计算物流箱保冷效果可按式(5)计算物流箱表面的热流密度。

$$q = h_0(\theta_{\text{air}} - \theta_{\text{sur}}) \quad (5)$$

图7中E线和F线分别表示了物流箱外空气温度为15℃和25℃时达到恒定状态时物流箱表面的热流密度,可以看出保温隔热层厚度越大,热流密度越小,保温隔热效果越好。当物流箱外空气温度为25℃

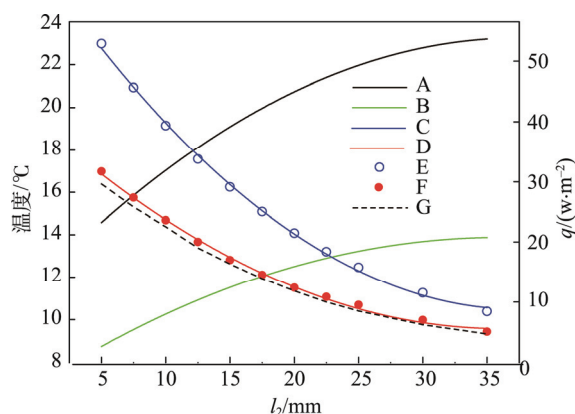


图7 物流箱表面温度和热流密度与保温隔热层厚度的关系

Fig.7 The relationship between the surface temperature and the heat flow density of the logistics box and the thickness of the thermal insulation layer

时,如果采用保温隔热层厚度15 mm物流箱表面热流密度比采用25 mm高出约20 W/m²。同时可看出物流箱外空气温度越低,物流箱表面热流量越小,漏热量越少,符合物理常识。

为了给在设计物流箱时保温隔热层厚度选择提供依据,文中采用了多项式曲线拟合的方式对计算结果E、F中的取值点进行了拟合。拟合曲线为C和D,数学表达式见式(6—7)。

$$q(l_2) = 66.46 - 3.08 \times l_2 + 0.04 \times l_2^2 \quad (6)$$

$$q(l_2) = 40.21 - 1.91 \times l_2 + 0.27 \times l_2^2 \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)在进行物流箱设计时可根据需要运输的货物对保冷效果的要求,选取合适的保温隔热层厚度。图7中G线表示了假如箱体顶部位置不放置冷板时,达到热平衡时箱体外壁热流密度随着隔热层厚度的变化关系。计算时取箱内温度为4℃。因为该侧箱体内壁和冷板并非直接接触,和其接触的是温度稍高的箱内空气或货物,所以此面向空气散热的热流密度较放置冷板的其他面较低。在6个面均放置冷板,虽然每个面散热的热流密度稍高,但是箱体内部冰的总质量增加,冰融化所吸收的热量更多,保冷效果更好,因此在使用时可根据货物对保冷效果的要求选择放置冷板的位置及数量。

图5—7通过有限元计算的方式分析了物流箱在放置冷板时箱壁温度变化与分布情况计算的结果符合物理现象,且温度变化趋势同HE K L及张秋玉等学者的研究结果^[18—19]一致。

3 结语

文中设计的冷板可拆式物流箱,在运输时冷板可固定在箱壁,可方便拆卸,可根据货物对保冷效果的要求选择合适的冷板数量,能够多次重复使用,保证货物运输质量同时降低运输成本,产生一定的经济效益。建立的物流箱传热物理模型可分析物流箱在保冷过程中热量的传输过程,通过多项式拟合得到的物流箱表面热流密度和保温隔热层厚度的关系对物流箱设计中保温隔热层厚度的选择具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 佟金,王亚辉,樊雪梅,等.生鲜农产品冷链物流状态监控信息系统[J].吉林大学学报(工学版),2013,43(6):1707—1711.
TONG Jin, WANG Ya-hui, FAN Xue-mei, et al. Monitoring System of Cold Chain Logistics for Farm Fresh Produce[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2013, 43(6): 1707—1711.
- [2] 刘保政,汪定伟.冷链物品的优化储存策略[J].东北大学学报(自然科学版),2011,32(2):302—304.

- LIU Bao-zheng, WANG Ding-wei. Optimal Decision on Cold-Chain Storage of Goods[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2011, 32(2): 302—304.
- [3] 刘翠娜,张双喜,周恒勤,等.便携式蓄冷保温箱结构优化[J].吉林化工学院学报,2011,28(1):29—33.
LIU Cui-na, ZHANG Shuang-xi, ZHOU Heng-qin, et al. Structure Optimization of Portable Cold Storage Incubator[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2011, 28(1): 29—33.
- [4] 廖阳明.基于半导体制冷的小型保温箱设计[J].广西民族大学学报(自然科学版),2013,19(1):82—85.
LIAO Yang-ming. The Design of Small Incubator Based on Semiconductor Refrigeration[J]. Journal of Guangxi University for Nationalities, 2013, 19(1): 82—85.
- [5] 罗海波.基于PID的高效能食品保温箱设计与实现[J].大众科技,2014,2(11):93—95.
LUO Hai-bo. Design and Realization of high-performance Provisions HEZT Preservation Box Banded on PID[J]. Popular Science and Technology, 2014, 2(11): 93—95.
- [6] 陈志强,王久龙.医药冷链保温箱保温性能测试方法及标准[J].印刷技术,2015,3(4):38—41.
CHEN Zhi-qiang, WANG Jiu-long. Testing Methods and Standards for Medical Incubators[J]. Printing Technology, 2015, 3(4): 38—41.
- [7] 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,2015,4(2):43—47.
CHEN Ruo-feng, ZHANG Xue-lai. Experimental Research of Heat Loss on a Cold Storage Transportation Container[J]. Power Generation and Air Conditioning, 2015, 4(2): 43—47.
- [8] 宋海燕,田萌萌,伍亚云.蓄冷剂质量对挤塑聚苯乙烯保温箱温控效果的影响研究[J].包装工程,2016,37(7):56—60.
SONG Hai-yan, TIAN Meng-meng, WU Ya-yun. Influences of the Coolant Amount on Temperature Control Effect of Extruded Polystyrene Insulation Box[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(7): 56—60.
- [9] 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,2016,3(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, 3(4): 32—35.
- [10] 张静荣,肖云茹,郁小森,等.三种便携式蓄冷保温箱在韭黄保鲜应用中的效果比较[J].食品工业科技,2017,38(17):279—282.
ZHANG Jing-rong, XIAO Yun-ru, YU Xiao-sen, et al. Comparison of Application Effects of Three Kinds of Portable Insulation Incubator in Fresh Keeping of Chives[J]. Food Industry Science and Technology,

- 2017, 38(17): 279—282.
- [11] 赵义平, 阎家建, 陈丁猛, 等. 复配无卤阻燃聚氨酯泡沫塑料的制备与表征[J]. 功能材料, 2013, 16(5): 697—699.
ZHAO Yi-ping, YAN Jia-jian, CHEN Ding-meng, et al. Preparation and Characterization of Compound Halogen-free Flame Retardant Polyurethane Foams[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 16(5): 697—699.
- [12] 杜鹃, 钱作勤, 陈昌, 等. 多种平直开缝翅片换热特性的数值研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(4): 612—617.
DU Juan, QIAN Zuo-qin, CHEN Chang, et al. Numerical Study on Heat Transfer Characteristics of Plate Slit Fins[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(4): 612—617.
- [13] 汪文, 丁宏亮, 张子宽, 等. 石墨烯微片_聚丙烯导热复合材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6): 14—20.
WANG Wen, DING Hong-liang, ZHANG Zi-kuan, et al. Preparation and Properties of Graphene Nanoplatelets/PP Thermal Conductive Composites[J]. ACTA Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6): 14—20.
- [14] RAMADAN K. Semi-analytical Solutions for the Dual Phase LAG Heat Conduction in Multilayered Media[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(1): 14—25.
- [15] KUMAR D, KUMAR P, RAI K N. A Study on DPL Model of Heat Transfer in Bi-layer Tissues During MFH Treatment[J]. Computers in Biology & Medicine, 2016, 75(2): 160—172.
- [16] WANG B L, CUI Y J. Transient Interlaminar Thermal Stress in multi-layered Thermoelectric Materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 26(2): 55—67.
- [17] 刘芳, 施卫平. 用格子 Boltzmann 方法模拟非线性热传导方程[J]. 应用数学和力学, 2015, 36(11): 1158—1166.
LIU Fang, SHI Wei-ping. Simulation of the Nonlinear Heat conduction Equation with the Lattice Boltzmann Method[J]. Application Mathematics and Mechanics, 2015, 36(11): 1158—1166.
- [18] HE K L, CHEN Q, DONG E F, et al. An Improved Unit Circuit Model for Transient Heat Conduction Performance Analysis and Optimization in Multi-layer Materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 149(10): 1551—1562.
- [19] 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, 2014, 38(6): 105—110.
ZHANG Qiu-yu, ZANG Run-Qing, LIU Sheng, et al. Effect of Cold Chain Transportation on Assemble-able Cold-storage Incubator[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 38(6): 105—110.