

用于非冷藏生鲜食品运输过程的 多层瓦楞纸盒热性能模拟

Simulating study on thermal performance of multilayer box for
fresh food transportation

南家莲

NAN Jia-lian

(潍坊工程职业学院, 山东 潍坊 262500)

(Weifang Engineering Vocational College, Weifang, Shandong 262500, China)

摘要:通过建立并验证食品非冷藏运输过程中多层保温盒传热的三维模型,揭示了包装盒内辐射传热是除了传导外的关键作用因素。通过减少辐射,使食品在贮藏的前30 h内表面的铝箔添加量降低10%以上。将最初冷冻的凝胶包放在盒的中心能够明显延迟其融化,使食物的保存时间加倍。结果分析表明:盒壁的导电性和盒内表面的发射率和凝胶袋的发射率是影响性能的关键参数,而对流换热系数的影响则不太显著。

关键词:生鲜食品;包装;热性能;传热模型;发射率

Abstract: In this paper, by establishing and validating a three-dimensional model of heat transfer in multi-layer heat preservation boxes during non-refrigerated food transportation, the key role of radiation heat transfer in packaging boxes is revealed besides conduction. By reducing radiation, the amount of aluminum foil added on the inner surface of food during the first 30 hours of storage was reduced by more than 10%. Putting the initially frozen gel pack in the center of the box can obviously delay its melting and double the storage time of the food. The sensitivity analysis shows that the conductivity of box wall, the emissivity inside the box surface and the emissivity of the gel bag are the key parameters affecting the performance, while the influence of the convection heat transfer coefficient is not very significant.

Keywords: fresh food packaging; thermal performance; heat transfer model; emissivity

近年来,由于人们对方便即食食品需求的不断增长,高效节能的保温盒市场日益扩大,以确保非冷藏食品在运输期间的食品安全和质量^[1]。具体来说,在整个运输

过程中,一个合适的保温盒可将食物保持在所需的温度,为此,必须对盒子进行特别的设计,并适当排列其中的食物^[2-3]。

改进食品运输包装盒的方法通常需要开发、验证和评估传热模型,利用热传递模型对不同环境条件下的食品温度进行模拟,并建立一个基本数值模型。研究者^[4-7]已经开发出热传递模型,描述了不同设计的绝缘盒和用于食品运输的材料,研究表明,盒体内的传导、辐射和相变以及盒外表面的强制对流、自然对流或混合对流和辐射为主要的传热机制。也有研究人员利用发泡聚苯乙烯运输新鲜鱼片,对温度测量结果进行了比较,验证了上述模型的正确性^[8],并开发了一种基于三维传热模型、成本分析和混合遗传算法的保温盒设计优化方法,展示了发泡聚苯乙烯和聚氨酯作为保温材料的良好性能,建立并验证了在稳定和动态条件下,新鲜鱼片的三维传热模型,并说明凝胶袋在食品保鲜中的关键作用^[9-11]。工业界目前正在研制一种由多层纸制成的生鲜食品运输盒,每一层都由一个优化的垂直蜂窝结构隔开,蜂窝状结构的每个孔内都有空气间隙,提供了防止传导传热的隔热措施。此外,多层盒易于回收,较聚苯乙烯或聚氨酯盒更加具有环保特性^[5,12-13]。

对家用冰盒进行的模拟^[14]表明,辐射传热对冷藏食品的保鲜有着重要的作用,表明在保温盒内选择合适的内衬对食品的温度保持有重要作用,然而,低发射率的内衬(如铝箔)在多大程度上能够延缓食品温度升高,目前机理仍不清楚。因此,应进行量化研究,以评估其改善包装盒性能的潜力。另一个关键因素是盒子内物品的堆垛排列方式^[15-16],最初冷冻凝胶包通常被放置于盒子内以延缓温度升高。用凝胶包包围食物的做法是通过增加一层隔热,增加了食物和环境之间的距离。然而,放置在盒

作者简介:南家莲(1966—),女,潍坊工程职业学院实验师。

E-mail: 2433229410@qq.com

收稿日期:2019-12-21

的外部附近凝胶包则会融化得更快。

试验拟研究用于运输生鲜食品的多层盒在不同内表面、食品排列方式及凝胶包条件下的热性能,建立包含肉、蔬菜、罐头和凝胶包盒在内的热传递 3D 模型,并将测量结果与夏季温度条件下储存的结果进行比较。另外,还对食品和凝胶包的数量和铝箔的关系进行研究,以确定与包装盒的设计或使用相关的参数。

1 数学模型

1.1 假设

建立了盒体内温度的传热模型。该模型考虑了传导、对流和辐射的传热以及相变,其主要假设为:

(1) 辐射传热发生在空气分离的各表面之间,作为透明介质处理。

(2) 盒面传热系数局部变化对食品温度的影响可以忽略不计。

(3) 熔化引起的凝胶包的体积变化对食品温度的影响是可以忽略的。

(4) 盒体内自然对流换热不可忽略。

(5) 热性能独立于温度条件。

对于某些包装和环境条件,自然环境会对食品温度产生显著影响。研究中考虑的盒和周围环境条件可忽略自然对流,该假设得到了二维模型的支持^[17],该模拟比较了自然对流和无自然对流的温度。

1.2 热传导模型

盒内的温度可按式(1)求得。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \times (k \nabla T), \quad (1)$$

式中:

ρ ——密度, kg/m^3 ;

C_p ——比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

T ——温度, K ;

t ——时间, s ;

k ——导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

使用热容量法描述凝胶包内的相变,使用表面—表面模型描述了盒子内物品之间的辐射传热^[18]。

关于边界条件,Robin 边界条件用于描述沿盒侧面和顶部表面的热传递^[4]:

$$k \nabla T \times n = h(T_w - T_{ext}), \quad (2)$$

式中:

n ——法向量;

h ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

T_w ——盒外表面温度, K ;

T_{ext} ——环境温度, K 。

Dirichlet 边界条件用于描述沿盒底表面放置于地板上的热传递:

$$T_w = T_{ext}. \quad (3)$$

2 材料和方法

2.1 材料与仪器

瓦楞纸盒、铝箔:北京晨阳包装产品有限责任公司;

热电偶:K 型, ΩHH374 , 上海神光仪器有限公司;

凝胶包:JS-13-10A 型, 东莞市江胜实业有限公司;

肉、罐头、蔬菜包(胡萝卜、西红柿、洋葱、生菜):试验前 2 h, 家乐福超市购买。

2.2 试验方法

采用 12 mm 厚的 428 mm $\times$ 343 mm $\times$ 239 mm 的多层瓦楞纸盒,将多层盒置于 4 mm 厚的 460 mm $\times$ 375 mm $\times$ 263 mm 的波纹盒中,盒顶有 2 个完全重叠的翻板,盒底有 4 个完全重叠的翻板,多层盒与外层波纹盒之间保留有一层厚度为 12 mm 的空气。多层盒的内表面覆盖着铝箔(铝箔厚度 0.5 mm)。

设计 4 组试验,其中一组用于校准,3 组用于模型验证,标定试验旨在估算对流换热系数(h)的数值。对流换热系数与盒子的内容物无关。因此,该系数不必从试验中校准,其中食品和凝胶包放在盒子内。由于水的热性能很好,可以很好地预测温度,因此选择了将烧杯放在盒内的试验来校准对流换热系数,水的热传递通过传导的方式进行^[19],烧杯中心的温度用电偶测量。通过试验和误差分析,估算了对流换热系数的数值。利用水进行了 2 次试验,验证了对流换热系数的准确性^[20]。将 4 个烧杯放在盒子里,4 个角各放置一个。每个烧杯的中心放置在盒子相邻两侧约 110 mm 处。初始温度和环境温度与校准试验相同。

验证食品和凝胶包盒内的传热模型。将以下食品放在盒子里:一个 124 mm $\times$ 124 mm $\times$ 84 mm 的肉;两个 85 mm(外径) $\times$ 115 mm(长) $\times$ 2 mm 厚的罐头;一个 150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 61 mm 的蔬菜包(胡萝卜、西红柿和洋葱组成);一个 234 mm $\times$ 234 mm $\times$ 234 mm 鲜切生菜;如图 1(a)所示,肉被放置在盒子底部的中心,肉的两侧是罐头,肉的顶部是蔬菜,蔬菜的顶部是生菜。凝胶包放在盒子底部,2 个放在肉前面,3 个放在肉后面。盒子内每个物品之间保持 5 mm 的距离,肉的初始温度为 3.5 $^{\circ}\text{C}$,生菜为 5 $^{\circ}\text{C}$,蔬菜和罐头为 4 $^{\circ}\text{C}$,凝胶包为 20 $^{\circ}\text{C}$,盒子为

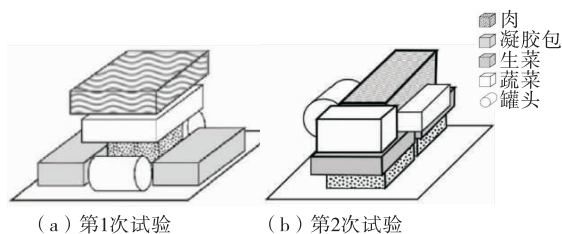


图 1 两次试验的食品排列方式

Figure 1 Food arrangement in the two experiments

20℃。环境温度在24~31℃,代表夏季温度条件。假设肉类是盒子里最容易腐烂的食品,使用热电偶测量其中心温度。第2个热电偶被放置在生菜的中心,因为该产品最远离凝胶包。在第2次试验中,盒子内的每个物品之间保持5 mm的距离,使用热电偶测量温度,该热电偶放置在肉和凝胶包之间的表面中心,见图1(b)。初始温度和环境温度与第1次试验相同。

2.3 传热模型的数值实现

利用 Comsol Multiphysics 5.1 软件实现了传热模型,

选取表面—表面辐射换热模块^[21]。采用后使用微分公式进行时间步进,最小和最大离散阶分别为二阶和三阶。在3.50 GHz的英特尔 Xeon CPU E5-1650 V3 处理器(32 GB的RAM)上进行计算,采用帕迪索解算器求解离散线性方程组。网格独立性通过用一个更细的网格模拟温度来验证。

2.4 热性能

模拟所用的热性能参数汇总于表1中^[22]。凝胶包的相变温度为0℃,熔化潜热为333 J/(kg·K)。

表1 模拟的热性能参数

Table 1 Thermal performance parameters for simulations

材料	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	发射率
瓦楞纸箱	350.00	1 350	0.070	0.8
多层盒	70.00	1 350	0.060	0.2 或 0.8
空气	1.28	1 000	0.026	不适用
凝胶包装(液体)	1 000.00	4 180	0.600	0.9
凝胶包装(固体)	1 000.00	2 000	2.300	0.9
肉	1 050.00	3 000	0.250	0.9
蔬菜	600.00	3 800	0.700	0.9
生菜	210.00	3 500	0.600	0.9
罐头	1 000.00	4 180	0.600	0.6

3 结果与讨论

3.1 试验比较

如图2(a)所示,4组试验之间未观察到明显的差异,表明重复性良好。6 W/(m·K)的对流换热系数(h)是气体自由对流的典型值,与试验测量结果吻合。利用对流换热系数,模型预测与4次重复试验的平均温度差在0.1℃以下,模型的确定效率为 $R^2=0.98$ 。该对流换热系数数值用于之后的模拟。

图2(b)表示第一次验证实验中放置在盒子内的4个烧杯中心处的测量温度和模拟温度。4个烧杯的温度无显著差异,表明盒的4个侧面的传热速率是相似的。4个烧杯的模拟温度与平均温度的绝对差异低于0.1℃,测定系数高于0.95,表明了校准试验估算的对流换热系数的准确性。对4个烧杯试验与定标试验结果比较,4 h后,4个烧杯试验的升温幅度降低了20%,说明在烧杯试验中,通过增加总热惯性,有助于保持其内容物的温度。

食品和凝胶包的测量温度和模拟温度如图3所示。在食品和凝胶包的第1个试验中,对食品和凝胶包的两组试验的温度进行了测定,测定系数分别为0.97和0.87,用于预测肉的中心温度和蒸煮温度。测量温度和模拟温度之间的平均绝对差为:肉1.0℃,生菜1.5℃。平均而言,测量值和模型预测值之间保持较好的一致性,尽管在2~10 h观察到测量值和模型预测值之间存在细微差异。

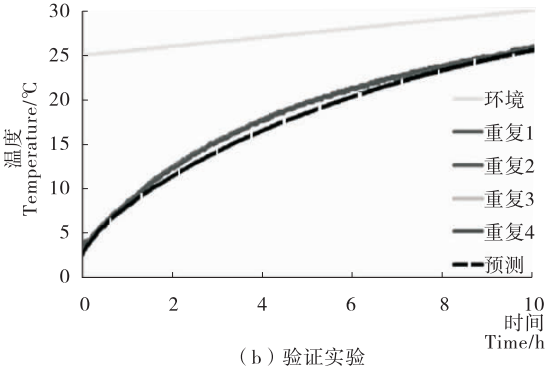
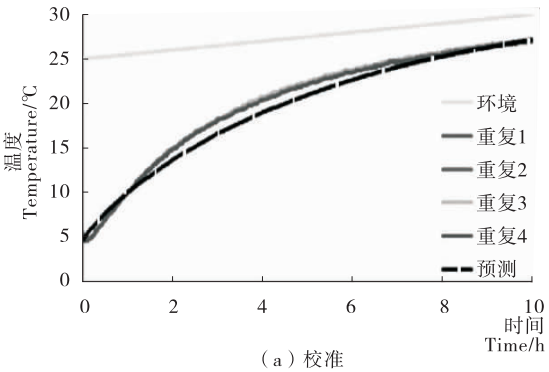


图2 使用校准和验证实验用水的测量和模拟温度比较
Figure 2 Calibration and verification measurement of experimental water for comparison of simulated temperature

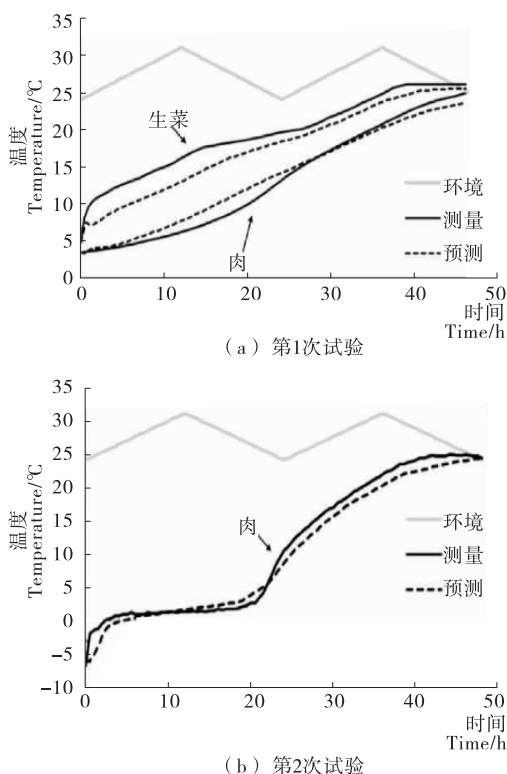


图3 食品和凝胶包的第1次和第2次试验的测量温度和模拟温度

Figure 3 Measured temperature and simulated temperature for the first and second experiments of food and gel packs

这种差异可能归因于模型中使用的模拟分层体。例如,肉的表面比矩形的略圆,而番茄所在的地方的蔬菜袋更厚^[23]。模型没有涉及这些形状不规则的食物;同时,这种差异也可能是由于多层瓦楞纸盒导热系数不确定导致的结果。考虑到纸张的延展性^[24],瓦楞纸盒和多层纸盒的热性能在不同的纸盒之间可能会略有不同,这取决于其在食品包装中的处理方式。在第2次食品和凝胶包试验中,预测肉类表面温度的测定系数为0.98,测量和模拟温度的平均绝对差为1.1℃。根据试验结果,该模型预测在贮藏前3 h内温度迅速升高,随后3℃左右保持稳定的温度,而凝胶包中发生相变。在约20 h后,凝胶包的相变完成,温度再次升高,直到达到环境温度。总体上,4个试验获得的高精度表明了使用该模型表示盒子内部的热传递的有效性。

3.2 铝箔的影响

发射率指物体的辐射能力与相同温度下黑体的辐射能力之比称为该物体的发射率或黑度,也称为辐射率或比辐射率。测定材料表面热发射率,即判定材料表面进行辐射传热的能力,发射率数值越大,与周围的辐射热交换的能力越强。为了确定用铝箔覆盖多层盒的内表面对

辐射传热的影响,考虑内表面发射率分别为0.2(带铝箔)和0.8(不带铝箔)的多层盒的内表面,模拟食品温度。铝箔有助于预先加热食物(图4)。储存30 h后,在铝箔存在下,肉类中心温度从3.5℃上升到17.1℃,而在没有铝箔的条件下,从3.5~19.3℃,相差13%。铝箔将生菜中央的温度从5.0℃提高到20.7℃,在不使用铝箔的情况下降低到22.8℃,相差10%。原因可能是由于铝箔的辐射传热。例如,储存30 h后,多层盒顶面空气中传导的表面平均法向热通量为2.6 W/m²,表面平均辐射法向热通量为2.9 W/m²,表明辐射对传热有显著贡献。对于不使用铝箔的盒子,储存30 h后通过传导产生的平均正常热通量降低至2.1 W/m²,辐射产生的平均热通量增加至3.5 W/m²。由于食品温度更接近环境温度,因此没有铝箔,传导产生的热通量更低,从而通过传导降低传热的驱动力。没有铝箔的盒子的辐射热通量更高,因为即使干燥力(盒子内表面和食物表面温度之间的温差)较低,也可以通过盒子壁的较高发射率来补偿。储存30 h后,移除铝箔的盒子的辐射热通量与传导热通量之比高出50%,表明该盒子的辐射热传递的贡献更大。

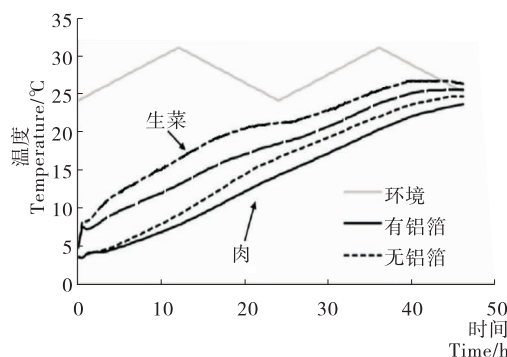


图4 多层盒内表面有或无铝箔的肉类中心温度
Figure 4 Meat center temperature with or without aluminum foil on the inner surface of the multilayer box

3.3 凝胶包数量的影响

为了确定凝胶包的数量对食品温度的影响,用0,2,4,6 kg凝胶包进行了模拟。为模拟2 kg凝胶包,一个128 mm×140 mm×28 mm凝胶包放置在每个底部角落的盒子。为了模拟4,6 kg凝胶包的温度,分别在第1层、第2层和第3层上添加相同的凝胶包。模拟温度时,盒子内没有铝箔。比较不同的凝胶包在肉的中心温度表明,凝胶包对食品保存的影响显著,凝胶包的数量影响空气中的传导和辐射的热传递。凝胶袋的加入减小了盒壁和其内部食物之间的距离,产生较高的局部温度梯度和表面之间的温度差,并降低了暴露于热辐射的食品表面积。当凝胶包的数量增加时,会产生比凝胶包的熔化温度稍高的恒温平台(见图5)。凝胶袋是影响性能的关键

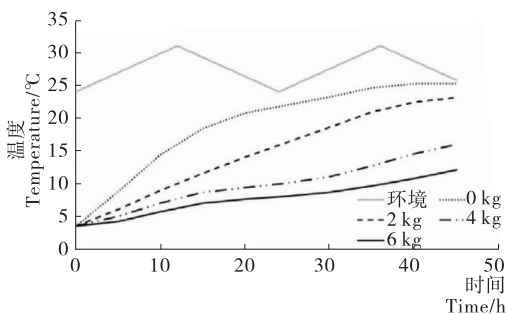


图5 不同凝胶包的数量下肉的中心温度

Figure 5 Center temperature of meat under different number of gel packs

参数,凝胶袋的数量对食品的保存有重要影响,食物和凝胶袋需要适当地放置在盒子内,以保持食物的最佳质量。

4 结论

研究建立了一个描述生鲜食品在非冷藏运输过程中多层盒体内传热的三维模型,通过将模型预测值与代表夏季贮藏条件的食品温度测量值进行比较,验证了该模型的有效性,解释并探究了相关的传热机制,这项工作的主要结论有:

(1) 在多层盒内加入铝箔,降低其发射率,减少辐射传热,提高了食品的保鲜效果。

(2) 将最初冷冻的凝胶包放在盒的中心能够明显延迟其融化,使食物的保存时间加倍。凝胶袋的数量对食品的保存有重要影响,食物和凝胶袋需要适当地放置在盒子内,以保持食物的最佳质量。

(3) 在试验所假设的条件下,食品的温度对盒子外部传热阻力的敏感度比内部传热阻力低,因此盒子周围的气流条件比内部传热阻力的敏感度低。包装盒内辐射传热是除了传导外的关键作用因素,通过减少辐射,使食品在贮藏的前 30 h 内表面的铝箔添加量降低 10% 以上。结果分析表明:盒壁的导电性和盒内表面的发射率和凝胶袋的发射率是影响性能的关键参数,而对流换热系数的影响则不太显著。

参考文献

[1] 李锦,谢如鹤. 冷藏运输装备技术研究进展[J]. 流体机械, 2014(5): 82-87.

[2] 励建荣. 生鲜食品保鲜技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2010, 10(3): 1-12.

[3] 李锦. 易腐食品冷藏运输温度调控及优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 45-61.

[4] 王远辉,陈洁,卞科,等. 微波一对流热处理灭菌对生鲜湿面保鲜作用研究[J]. 食品工业, 2016(7): 117-121.

[5] 徐文达,周冬香. 生鲜食品气调保鲜包装发展趋势[J]. 保鲜与加工, 2004, 4(2): 12-15.

[6] 高立红,郑艳. 可食用膜在冷鲜肉保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(12): 56-59.

[7] 戚晓丽,朱冰清,牟望舒,等. 用于冷链运输的复合相变蓄冷剂主储能剂研制[J]. 中国食品学报, 2015, 15(10): 86-90.

[8] 马青青,曹锦轩,周光宏. 功能性可食用膜在生鲜肉和肉制品保鲜中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 331-335.

[9] 张宁波,许国志,陈宏亮,等. 化学交联影响因素和热性能的研究[J]. 食品科学技术学报, 2005, 23(1): 9-10.

[10] 张一敏,朱立贤,张万刚,等. 生鲜牛肉中的腐败微生物概述[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 296-303.

[11] 马立鹏,孟春玲,张文华,等. 自热米饭传热过程的仿真研究[J]. 食品工业, 2018, 39(5): 244-248.

[12] 吴涛,宋春芳,孟丽媛,等. 黑莓微波真空干燥传热特性[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 54-60.

[13] 王煜超,张克,毕荃,等. 生鲜湿面防腐保鲜技术研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(11): 279-282.

[14] 杨松夏,吕恩利,朱立学,等. 模拟运输条件下保鲜模式对菜心品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 132-136.

[15] 徐超静,任青青,贺群舟. 基于茶叶保鲜技术的海南生鲜冷链配送研究[J]. 福建茶叶, 2018, 40(7): 61.

[16] 李娜,谢晶. 组合保鲜方式应用于水产品保鲜的研究进展[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 204-207, 220.

[17] 张译心,李建立,赵杨,等. 绿茶、洋葱皮水提取物对面团粉质特性、面条保鲜效果、蒸煮特性及抗氧化性能的影响[J]. 食品工业科技, 2018(2): 61-64.

[18] 张菊华,李高阳,王伟,等. UV-C 处理对蓝莓果实低温贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 98-113.

[19] 陈沁雯,叶倩倩,刘斌雄,等. 鲍鱼罐头传热过程数学模型的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(20): 109-114.

[20] 谢业平,刘永泉,张志学,等. 空气中逸散水蒸气传热及相变过程的行为研究[J]. 航空动力学报, 2018, 33(9): 19-27.

[21] 朱宏,王冬梅,潘欣艺. 不同外界环境温度下保温箱保温性能研究[J]. 包装与食品机械, 2018(4): 9-12, 48.

[22] 苏全卫,周航. 连续盘式热风干燥器干燥盘结构与传热分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 97-100, 168.

[23] 孙京超,杜秉健,赵伟,等. 振动防护和涂膜保鲜等不同处理措施对苹果采后贮藏特性的影响[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(1): 7-11.

[24] 姜洋,高悦明,丁秋雷. 苹果快递运输中的保鲜瓦楞纸箱研究[J]. 包装工程, 2018, 39(23): 51-55.