

生鲜食品冷链控温包装设计方法研究

潘 嘹¹, 卢立新^{*1,2}, 王 军^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 控温包装能有效保护生鲜食品在物流过程中不受外界温度变化的影响,防止生鲜食品腐败变质。本文作者基于控温包装控温时间预测模型,建立了控温包装设计模型,得到了控温包装可靠性边界,并提出一套用于冷链物流的控温包装设计方法。同时,以小件类产品为例,设计了一套控温包装,并进行试验验证。结果表明,设计的控温包装能够保持产品物流过程中处于临界温度以下,该控温包装设计方法能够快速有效的设计合理的包装方案,该研究成果为生鲜食品在物流过程中的保鲜提供了技术方法。

关键字: 生鲜食品,控温包装,冷链,设计方法

中图分类号: TS 206; TB 69; TB 61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2017)05—0507—05

Design Method of Insulating Package in Cold Chain Used for Fresh Food

PAN Liao¹, LU Lixin^{*1,2}, WANG JUN^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Insulating package can effectively protect fresh food from the impact of extra temperature during transport. A mathematical model for the design of insulating package was proposed based on the prediction model from the previous study, and a solution boundary of insulating package was also presented according to the design model. Furthermore, a design process was established through the model and solution boundary and its validity was confirmed by storage experiment. Results showed that insulating package can be effectively designed using the design model and process, and the model value had a good great agreement with test data.

Keyword: fresh food, insulating package, cold-chain, design method

生鲜食品作为重要的食物来源,属于典型的温度敏感产品^[1],其营养成分、菌落数量等理化指标均随温度变化而显著变化。为了保持生鲜食品的品质以获得更长的保质期,其整个物流过程都必须严格

控制产品所处环境的温度,否则会直接影响产品品质,造成食物中毒,危害食用者的人身健康。

控温包装可减小产品与外界环境的热传递,并利用蓄冷剂吸收传到至保温容器内部的多余热量,

收稿日期: 2015-10-16

基金项目: 江苏省高等学校研究生创新计划项目(JUDCF13027)。

作者简介: 潘 嘹(1986—),男,江苏苏州人,江南大学博士研究生,研究方向为食品药品包装。E-mail:breath860101@aliyun.com

* 通信作者: 卢立新(1966—),男,江苏宜兴人,工学博士,博士研究生导师,教授,主要从事包装工艺研究。E-mail:lulx@jiangnan.edu.cn

引用本文: 潘嘹,卢立新,王军. 生鲜食品冷链控温包装设计方法研究[J]. 食品与生物技术学报,2017,36(05):507-00.

使产品处于一个的温度环境内,达到控温的目的^[2-3]。

由于控温包装的优良性能以及相对传统冷链的明显优势^[4],控温包装在物流运输中得到广泛应用,关于控温包装的系统研究也越来越受到众多学者的关注。控温包装控温效果的评估主要有试验法和模型法。Burgess^[5]率先提出了一种通过融冰试验测定控温包装系统热阻的简便方法,称为“融冰法”。融冰法虽然能够简单准确的测量控温包装的系统热阻,但试验需要耗费较多的时间。模型法显然在效率和使用便捷性上优于试验法。因此,Burgess 和 Seung-jin Choi^[1]考虑了传热的3种方式,提出了一种考虑包装内空气间隙的系统热阻预测模型。作者前期的研究建立了控温包装控温时间预测模型,并通过试验证实了该模型能够很好的预测控温时间^[6]。此外 Qian、郭晓娟、赵艳冰^[7-9]提出了一种将长方体保温容器简化成球壳模型的计算方法。在控温包装的设计过程中,蓄冷剂用量是一项重要参数。Matsunaga^[10]针对潜热型蓄冷剂和显热型蓄冷剂分别提出了两种模型用于计算蓄冷剂用量。Mehling^[11]将蓄冷剂内部温度场分布近似为线性,通过各界面热量传递的耦合建立了控温包装温度分布模型。该模型不但能计算控温包装内温度场分布还能通过温度场分布间接计算蓄冷剂用量。

然而,融冰试验和上述模型均是建立在包装尺寸已知的基础上预测控温时间,进而评估包装可靠性。而控温包装设计必须基于产品,从内向外设计包装,控温时间预测模型无法直接用于控温包装设计。本文作者旨在建立一种用于控温包装设计的数学模型,并提出控温包装的优化设计方法,从而提高控温包装设计效率和温度敏感产品物流过程中的可靠性,减少或避免产品不必要的损耗,防止生鲜食品在物流过程中腐败变质。

1 材料与方法

1.1 模型建立

根据傅里叶导热定律和牛顿冷却公式^[12-13],结合无限大空间内表面自然对流传热关联式^[14-16],控温包装预测模型的表达式如下^[5]:

$$t = \frac{M_{PCM} L R_s}{\psi} \quad (1)$$

$$\psi = T_o - T_m \quad (2)$$

$$R_s = \frac{1}{\bar{h} \sum_{n=1}^6 \frac{b}{k_w A}} + \frac{b}{k_w A} \quad (3)$$

$$A = \sqrt{A_i A_o} \quad (4)$$

$$\bar{h} = (e^{-1.386b/k_w} + 1.654)(0.5359\sqrt{\psi} - 0.03081\psi) \quad (5)$$

式中, t 为储藏时间,s; T_o 为储藏环境温度,K; T_m 为控温包装内部温度(即蓄冷剂相变温度),K; ψ 为过余温度,K; M_{PCM} 为蓄冷剂质量,kg; L 为蓄冷剂相变潜热,(J/kg); R_s 为控温包装系统热阻,($m^2 \cdot K/W$); A_n 表示长方形保温容器的第 n 个外表面的面积, m^2 ; A 为等效面积, m^2 ; A_i 和 A_o 分别为保温容器内、外表面积, m^2 ; b 为保温容器壁厚,m; k_w 为保温材料导热系数,($W/(m \cdot K)$); $\bar{h}$ 为控温包装平均表面传热系数,($W/(m^2 \cdot K)$)。

以图1所示控温包装结构为例。

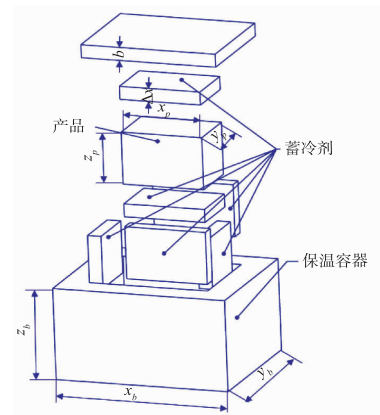


图1 控温包装结构尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of insulating package size

假设蓄冷剂均匀分布于产品各表面(即厚度相同),长宽与产品对应的面相等,保温容器与蓄冷剂之间无间隙,由图1中的几何关系及上式(1)(3)可得:

$$b = k_w \sqrt{A_o A_i} \left[\frac{t\psi}{ML} - \frac{1}{\bar{h} \sum_{n=1}^6 A_n} \right] \quad (6)$$

式中,

$$A_i = 2[(x_p + 2\Delta x)(y_p + 2\Delta x) + (x_p + 2\Delta x)(z_p + 2\Delta x) + (y_p + 2\Delta x)(z_p + 2\Delta x)]$$

$$A_o = 2(x_b y_b + x_b z_b + y_b z_b)$$

$$x_b = x_p + 2(\Delta x + b)$$

$$y_b = y_p + 2(\Delta x + b), z_b = z_p + 2(\Delta x + b)$$

$$\Delta x = \frac{M_{PCM}}{2\rho_{PCM}(x_p y_p + x_p z_p + y_p z_p)}$$

由式(6)可得到任意蓄冷剂量的条件下满足储藏时间要求的保温容器壁厚。进一步结合图 1 中各尺寸间的几何关系便可得到完整的控温包装结构尺寸。

任意蓄冷剂量均能通过式(6)计算得到一个保温容器壁厚以满足储藏要求。每个满足储藏要求的设计方案均可在图 2 上找到相应的点,这些点可构成控温包装可靠边界。边界上方区域的包装方案均可满足储藏要求的可靠区。最后,在多个约束条件的限制下缩小方案区间,便可在方案边界上确定最佳方案。

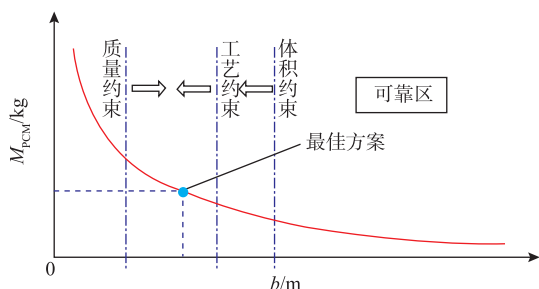


图 2 控温包装可靠边界

Fig. 2 Solution boundary of insulating package

1.2 设计流程

参考缓冲包装 5 步设计法^[17-18],根据上述控温

包装设计模型,提出控温包装 5 步设计法:

1) 确定物流条件及产品特性。物流条件包括物流环境温度及物流时间,产品特性包括最适储藏温度、外形尺寸及其价值等。

2) 根据产品类型选择合适的包装结构,选择合适的蓄冷剂及保温材料,确定制约因素。参考国内外主流温度敏感产品内包装,将其分为小件类、集装类和大型桶类,并参考 EnviroColler 公司提出的 3 种包装结构^[19](见图 3)设计控温包装。根据产品最适储藏温度选择合适的蓄冷剂,根据产品价值及客户需求选择合适的包装材料。制约因素包括成本、总体积、总质量等。

3) 确定保温材料、蓄冷剂各项物理参数。通过相关资料、数据库或试验得到各项物理参数。保温材料相关参数包括:导热系数、密度、比热容;蓄冷剂相关参数包括:导热系数、潜热、相变起始温度、相变结束温度。

4) 设计控温包装。以成本、工艺条件和其他客观制约因素为约束条件,在已知产品外形尺寸、产品最适储藏温度、物流温度、物流时间的条件下,运用式(6)设计控温包装。

5) 试验验证。

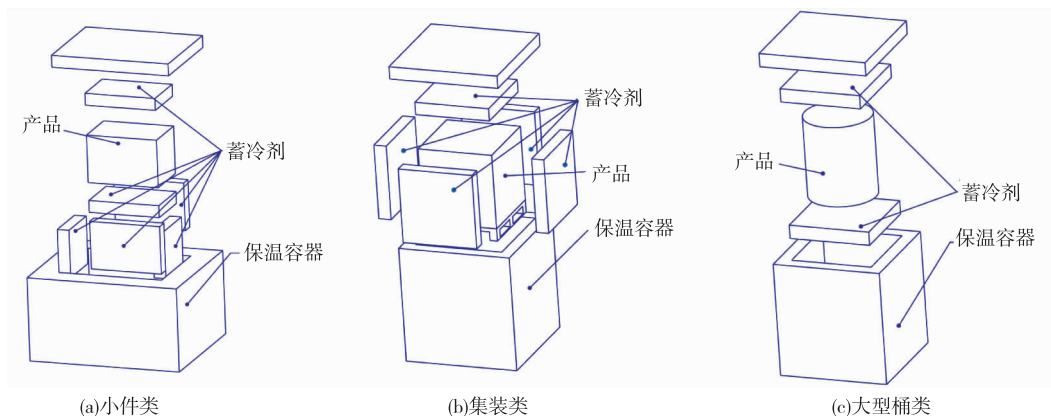


图 3 产品分类

Fig. 3 Category of products

2 设计实例

2.1 控温包装设计

根据上述控温包装设计流程设计控温包装。

1) 确定物流条件及产品特性。生鲜产品(内包装属于小件类,以体积分数为 35%的乙醇溶液作为

生鲜食品模拟物),长 0.35 m、宽 0.17 m、高 0.17 m,最佳储存温度为 270~275 K,物流环境温度为 318 K,物流时间为 72 h。

2) 根据产品类型选择合适的包装结构,选择合适的蓄冷剂及保温材料,确定制约因素。产品属于小件类,选取图 3(a)所示包装结构。选用 EPS 为保

温材料,蓄冷剂为某公司提供的凝胶蓄冷剂。

3) 确定保温材料、蓄冷剂各项物理参数。见表 2 和表 3。

4) 设计控温包装。以成本最低为约束条件,运用式设计控温包装,可得到图 4 所示的控温包装可靠边界,取曲线最低点为最佳方案,其工艺参数如表 1 所示。

单件包装成本可分为材料成本和运输成本。

材料成本:

$$C_1 = M_{PCM}C_{PCM} + M_{EPS}C_{EPS} \quad (7)$$

式中, C_{PCM} 和 C_{EPS} 分别为蓄冷剂成本和保温材料成本, (元/kg)。

运输成本:

$$C_2 = \frac{C_T}{\text{INT}[V/(x_b y_b z_b)]} \quad (8)$$

式中, C_T 为单次整车运输成本, (元/(次·车)), 此处设为 2 000; V 为车厢体积, m^3 。

一般来说, EPS 价格远低于蓄冷剂价格, 然而并不是蓄冷剂用量越少越好。一方面由于 EPS 成型工艺的限制, 保温容器壁厚一般不大于 10 cm; 另一方面, 过厚的保温容器会导致包装体积过大, 单车装载的量减少, 这反而会增加单件包装的运输成本, 从而增加了单件控温包装总成本。

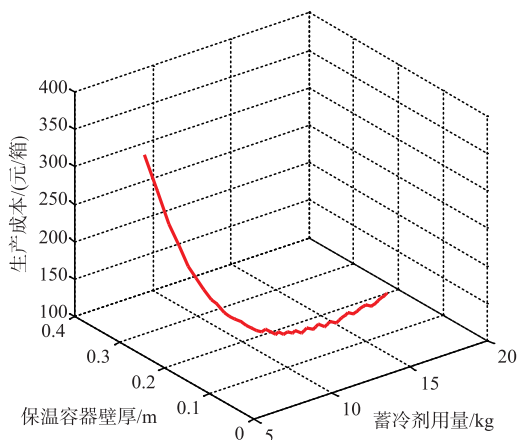


图 4 成本最优控温包装可靠边界

Fig. 4 Solution boundary of insulating package with the optimal cost

表 1 控温包装最优方案

Table 1 Best design of the insulating package

蓄冷剂 用量/kg	保温材料 壁厚/m	保温容器 外形尺寸/m			预计成本/(元/箱)
10.5	0.087	长	宽	高	147.6
		0.59	0.41	0.41	

2.2 验证试验

2.2.1 材料与方法

1) 材料。保温材料各项参数见表 2。

表 2 保温材料参数

Table 2 Parameters of insulating package materials

材料	密度/ (kg/m ³)	导热系数/ (W/(mK))	成本/ (元/kg)
EPS	12.77	0.031	1.50

试验所用蓄冷剂的各项参数见表 3。

表 3 蓄冷剂参数

Table 3 Parameters of refrigerant

相变潜热/ (kJ/kg)	密度/ (kg/m ³)	相变温度/K	成本/ (元/kg)
319	930	272.7	8.00

按表 1 所示方案, 委托苏州市安特实业有限公司制作保温容器并灌装蓄冷剂。将产品、蓄冷剂和保温容器按图 3(a)所示的结构组成控温包装, 如图 5 所示。



图 5 试验中使用的控温包装

Fig. 5 Insulating packages in test

2) 主要仪器设备。分布式光纤测温系统: 加拿大 FISO 公司产品; THS-D7C-100AS 恒温恒湿箱: 台湾庆声科技股份有限公司产品; DW-25W198 冰柜: 中国海尔有限公司产品。

3) 试验方法。将控温包装(不含产品)放置在 253 K 的环境中预冷 48 h; 放入产品后, 将控温包装系统放置在 270 K 的环境中稳定 72 h; 将测温探头固定在产品顶角处(研究表明, 产品顶角处的温度变化最快^[20]), 控温包装系统放置在 318 K 的环境中储藏 72 h; 记录储藏过程中产品顶角处的温度变化。

2.2.2 结果与讨论 储藏试验结果如图 6 所示, 在产品要求防护的 72 h 内, 产品温度稳定在蓄冷剂相变温度附近, 上升非常缓慢, 产品得到了很好的保

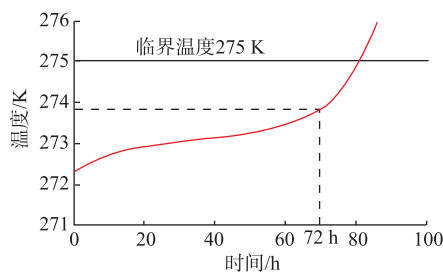


图6 包装内部温度变化曲线

Fig. 6 Time-temperature curves inside the package

护;在此之后,由于蓄冷剂已基本融化完毕,温度开始快速上升,直至产品周围温度超越临界温度。

结果表明,在储藏过程中产品温度的均处于最

佳储藏温度范围内(即 270~275 K),故依照上述方法设计的控温包装能够满足产品在物流过程中的防护要求。

3 结 语

本文作者基于控温包装控温时间预测模型,建立了用于生鲜食品冷链物流的控温包装设计模型和控温包装可靠性边界,提出了适用于冷链物流的控温包装设计 5 步法,并以某具体产品为例,设计了一套控温包装。试验结果表明,设计的控温包装能够满足该产品的防护需求。本文作者的研究成果为设计控温包装,降低生鲜食品的物流损耗提供了可靠方法。

参考文献:

- [1] CHOI S J. Mathematical models of predict the performance of insulating packages and their practical uses[D]. USA:Michigan State University, 2004.
- [2] ZHANG Yun, QIAN Jing. Preparation and performance analysis of biodegradable gelatinous re-frigerant[J]. **Package Engineering**, 2012, 33(23): 40-44. (in Chinese)
- [3] ZHANG Liang, YAN Hua, YU Rongsheng, et al. A review of phase change materials: development and application in building energy saving[J]. **Development and Application of Materials**, 2010, 25(1): 69-73. (in Chinese)
- [4] GAO Si, QIAN Jing. Overall design of insulation packaging and structural analysis[J]. **Package Engineering**, 2010, 31(7): 51-54. (in Chinese)
- [5] BURGESS G. Practical thermal resistance and ice requirement calculations for insulating packages [J]. **Packaging Technology and Science**, 1999, 12(2): 75-80.
- [6] PAN Liao, LU Lixin, WANG Jun. Prediction model for the shelf life of insulating package [J]. **Package Engineering**, 2014, 35(5): 27-30, 136. (in Chinese)
- [7] JING Q. Mathematical models for insulating packages and insulating packaging solutions[D]. USA: University of Memphis, 2009.
- [8] GUO Xiaojuan, QIAN Jing. Spherical shell models for insulating packages based on ANSYS[J]. **Package Engineering**, 2011, 32(5): 43-48. (in Chinese)
- [9] ZHAO Yanbing, QIAN Jing. Establishment of cylinder models for temperature control packages based on ANSYS[J]. **Package Engineering**, 2012, 33(9): 18-22. (in Chinese)
- [10] MATSUNAGA K, BURGESS G, LOCKHART H. Two methods for calculating the amount of refrigerant required for cyclic temperature testing of insulated packages[J]. **Package Technology and Science**, 2007, 20(2): 113-123.
- [11] MEHLING H, CABEZA L. Heat and cold storage with PCM[M]. **Berlin Heidelberg: Springer-Verlag**, 2008.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [13] KREITH F. Principles of Heat Transfer[M]. 3rd ed. New York: Intext Press, 1973.
- [14] YANG S M, ZHANG Z Z. An experimental study of natural convection heat transfer from a horizontal cylinder in high Rayleigh number laminar and turbulent region [C]. Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference. Brighton, 1994, 7: 185-189
- [15] INCROPERA F P, WITT D P D. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. 5th ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 2002.
- [16] HOLMAN J P. Heat transfer[M]. 9th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2002.
- [17] NEWTON R E. Fragility assessment theory and practice[M]. California: Monterey Research Laboratory, Inc. Monterey, 1968.
- [18] FIEDLER R M. 5-Step package development[M]. Virginia: MTS System Corp, 1985: 65-78.
- [19] EnviroCooler. Product portfolio[EB/OL]. [2017-04-22]. <http://www.envirocooler.com/products.html>.
- [20] GOWREESUNKER B L, TASSOU S A, KOLOKOTRONI M. Improved simulation of phase change processes in applications where conduction is the dominant heat transfer mode[J]. **Energy and Buildings**, 2012, 47: 353-359.