



引用格式:袁培,刘键,付云飞,等.立式冷藏陈列柜食品温度预测计算模型[J].轻工学报,2016,31(6):69-73.

中图分类号:TB657;TS205 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2016.6.010

文章编号:2096-1553(2016)06-0069-05

# 立式冷藏陈列柜食品温度预测计算模型

## The computational model of food temperature prediction in a vertical refrigerated display cabinet

袁培,刘键,付云飞,郝亚萍,许旺龙,吕彦力

YUAN Pei, LIU Jian, FU Yun-fei, HAO Ya-ping, XU Wang-long, LYU Yan-li

郑州轻工业学院 能源与动力工程学院,河南 郑州 450002

College of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou  
450002, China

### 关键词:

立式冷藏陈列柜;食品温度预测;食品传热模型;食品品质

### Key words:

vertical refrigerated display cabinet; food temperature prediction; food heat transfer model; food quality

**摘要:**建立了超市立式冷藏陈列柜食品温度变化的瞬态计算模型,利用该模型分析不同冷藏条件下传导、辐射、自然对流3种传热方式对食品温度之影响规律,结果表明:1)陈列柜各个位置的温度分布不同,靠近风幕送风口位置的温度最低,底层前排侧位置的温度最高;2)不同传热方式对食品温度影响不同,依其权重大小可排列为传导>辐射>自然对流,因此强化搁架的热传导能力,能起到较快降低食品温度的作用;3)不同位置降温时间有所不同,靠近风幕送风口位置温度下降速率最快,可放置易变质食品.利用该模型可以用来预测食品包的冷却规律,为食品最佳冷藏提供参考依据.

收稿日期:2015-09-11;修回日期:2016-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51476148);河南省科技攻关项目(152102210144)

作者简介:袁培(1982—),男,河南省南阳市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为节能技术.

**Abstract:** The transient temperature computational model of the change of food temperature was set up. With the established model the influence rule of various heat transfer modes such as conduction, radiation and convection on the temperature of food in different storage conditions was analyzed. The results showed that the temperature distribution of each position of the display cabinet was different. The results showed that the temperature near the air curtain air supply outlet was the lowest and the temperature on the bottom of the front position was the highest. Secondly, the effects of different heat transfer modes on food temperature were different, and the weight size was conduction > radiation > convection. So strengthening the heat conduction ability of the shelf could rapidly reduce the food temperature. Thirdly, the cooling time at different locations was different, and the location near the air curtain air supply output of the fastest temperature decline could be used to place easily spoiled food. This model can be used to predict the cooling rule of food package and provide reference for the best food cold storage.

## 0 引言

能源短缺和能耗大幅增加是我国经济社会发展面临的严峻问题,节能减排刻不容缓.要坚定不移地走可持续发展道路,就要提高能源利用效率,致力于节能技术研究.超市的所有制冷设备中,食品冷冻、立式食品冷藏陈列柜的年使用时间最长、能耗最大,占整个超市电耗的70%左右<sup>[1]</sup>.目前,对陈列柜制冷系统的研究主要是围绕保证食品贮藏温度、陈列柜节能和传热模型等方面展开的.在保证食品贮藏温度方面的研究有降低贮藏温度、改善柜内温度场和速度场分布均匀性<sup>[2]</sup>等,在陈列柜节能方面的研究有改进风幕特性、优化制冷系统、降低室内环境的干球温度和相对湿度<sup>[3]</sup>等,在传热模型方面的研究有 K. Hoke 等<sup>[4]</sup>关于传热方式对陈列柜食品温度分布的影响,吕彦力等<sup>[5]</sup>对简化为二维形式的立式冷藏陈列柜传热模型的分析与修正等.以上研究表明:陈列柜食品温度是影响能耗的一个重要指标,因此快速准确地预测陈列柜能耗对于陈列柜节能具有重要意义. K. Hoke 等<sup>[4-5]</sup>在传热方式对食品包温度分布的影响方面开展的工作,丰富了陈列柜温度预测的手段,但应用范围有限.本文拟从传热学角度建立食品冷藏陈列柜的理论模型,阐明自然对流、传导、辐射3种传热方式对食品温度的综合影响,

以为陈列柜节能研究提供参考依据.

## 1 模型的建立

### 1.1 参数定义

假设食品包为规则的圆柱体,对所需参数进行定义,表1给出了食品包、搁架的几何结构与物性参数标识符号.

表1 食品包、搁架的几何结构与物性参数

Table 1 Geometric structure and physical parameters of food and shelf

名称	半径	长×宽	高度	密度	比热容	导热系数	温度	厚度	热膨胀系数
食品包	$R_f$		$H_f$	$\rho_f$	$C_{pf}$	$\lambda_f$	$T_f$		
搁架	$R_s$	$L \times W$		$\rho_s$	$C_{ps}$	$\lambda_s$	$T_s$	$H_s$	$\alpha_v$

食品包初始温度  $T_f = T_{fo}$ ;食品包周围冷却空气参数:温度  $T_o$ ,导热系数  $\lambda_a$ ,运动黏度  $\nu_a$ ,时间  $\tau$ .食品包的无量纲过余温度定义为

$$\theta_c = \frac{T_f - T_o}{T_{fo} - T_o}$$

### 1.2 食品传热模型

冷藏陈列柜内食品温度主要受自然对流、传导和辐射3种热传递方式的影响.分别针对这3种传热方式进行推导.

**1.2.1 食品热自然对流模型** 在自然对流传热计算时,由于食品包底面和搁架直接接触而无自然对流现象,故仅考虑侧面和上表面的换热.假设食品包传导热阻远小于食品表面和空

气的对流换热热阻,采用集中参数法计算由于对流引起的食品温度随时间的变化,无量纲温度对时间的微分方程为

$$\frac{d\theta_f}{d\tau} = \frac{-\alpha}{\rho_f c_{pf} H_f} \left(1 + \frac{2H_f}{R}\right) \theta_f \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 为表面传热系数。

食品包在柜内的自然对流可以看成均匀壁温边界条件的大空间自然对流,故

$$Nu = \frac{\alpha R_f}{\lambda_a} = CRa^n \quad (2)$$

式中, $Nu$ 为努塞尔数, $C$ 为常数, $Ra$ 为瑞利数。

由于食品包周围空气流动缓慢,流动状态可看成层流,文献[6]指出层流状态下,指数 $n$ 取经验值 $1/4$ , $C$ 取 $0.59$ 。

根据瑞利数定义有

$$Ra = \frac{g\alpha_v(T_{fo} - T_o)H_f^3}{av_a} \quad (3)$$

式中,重力加速度 $g = 9.8 \text{ m}^2/\text{s}$ ,空气导温系数 $a = 18.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

结合式①②③,可得自然对流的数学模型

$$\theta_f(\tau) = e^{M\tau} \quad (4)$$

式中, $M$ 是常数,表达式为

$$M = \left[ \frac{g\alpha_v(T_{fo} - T_o)H_f^3}{av_a} \right]^n \div \frac{C\lambda_a(1 + 2H_f/R_f)}{\rho_f c_{pf} H_f^2}$$

**1.2.2 食品热传导模型** 食品包对搁架的热传导如图1所示,食品包通过传导将热量直接传递给搁架,食品包与搁架之间的热阻相对较小,可忽略不计,因此可以将食品包对搁架的热传导看成与食品包底部直接接触的半径为 $R$ ,

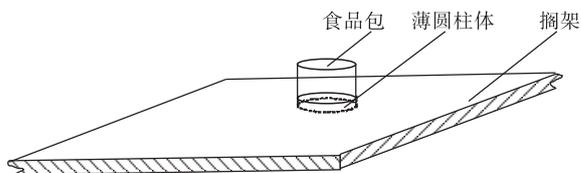


图1 食品包与搁架的肋片热传导模型

Fig.1 Finned heat conduction model of food packages and shelf

厚度为 $h$ 的薄圆柱搁架对与其接触的周围搁架的热传导,将与薄圆柱搁架直接接触的周围搁架看成是肋片.由于食品包的导热系数大,故认为食品包内的温度分布均匀且仅随时间变化,而与食品包的几何结构无关。

由圆柱傅里叶导热定律<sup>[4]</sup>,得微分方程

$$\Phi_v = \rho_f c_{pf} \frac{dT_f}{d\tau}$$

$$\Phi_v = \frac{\Phi_s}{V} = \frac{-\alpha \cdot 2A(T_a - T_o)\eta}{H_s \cdot A}$$

式中, $\Phi_v$ 为单位体积热流量, $\Phi_s$ 为总热流量, $V$ 为薄圆柱搁架体积。

由肋片传热理论,可得导热的数学模型

$$\rho_f c_{pf} \frac{d(T_f - T_o)}{d\tau} = \frac{-\alpha \cdot 2(T_f - T_o)\eta}{H_s} \quad (5)$$

式中, $\eta$ 为肋效率, $T_a$ 为柜内空气平均温度, $A$ 为等效肋片上表面积。

由文献[5]可知,面积相等的矩形套片和环肋的肋效率近似相等,易得出矩形搁架肋片等效环肋的外半径 $R_{eq} = 0.324 \text{ m}$ 。

**1.2.3 食品热辐射模型** 在陈列柜内食品包的辐射传热,可以简化为食品包对大空间的辐射<sup>[4]</sup>,将辐射传热表示成牛顿冷却公式<sup>[4]</sup>形式,根据玻尔兹曼定律和牛顿冷却公式,可得

$$\alpha = \sigma \varepsilon \frac{T_f^4 - T_o^4}{T_f - T_o} = \varepsilon \sigma (T_f + T_o)(T_f^2 + T_o^2) \quad (6)$$

式中,黑体辐射常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4})$ ,黑度 $\varepsilon = 1$ 。

关于自然对流和辐射的复合传热计算,可先将式⑥代入自然对流式①得微分方程

$$\frac{d\theta_f}{d\tau} = \frac{\sigma(T_f + T_o)(T_f^2 + T_o^2)}{\rho_f c_{pf} H_f} \left(1 + \frac{2H_f}{R_f}\right) \theta_f = \frac{m(T_f^4 - T_o^4)}{T_{fo} - T_o}$$

式中, $m$ 是常数,表达式为

$$m = \frac{\sigma(1 + 2H_f/R_f)}{\rho_f c_{pf} H_f}$$

采用 Matlab 软件求解,可得热辐射数学模型

$$\frac{dT_f}{d\tau} = m(T_o^4 - T_f^4) \quad (7)$$

根据热的传导、自然对流、辐射模型,可以计算食品总传热量和3种传热方式对食品传热的贡献的权重.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 陈列柜食品放置方式

利用立式冷藏陈列柜食品传热模型,对陈列柜不同位置食品热量变化过程进行分析.食品包位置的编号规则:1,2,3,4,5 分别表示从上到下的5层搁架;a,b 分别表示1—4层搁架的前、后排食品包位置;对于第5层搁架,a,b,c 分别表示该层的前、中、后排位置.实验测得陈列柜不同位置温度如表2所示.由表2可知,陈列柜各个位置的温度分布不同,靠近风幕送风口位置的温度最低,在底层前排侧位置的温度最高.

表2 食品包周围不同位置冷却空气温度

Table 2 The temperature of ambient cooling

air of food package		℃		
位置	前排(a)	中排(b)	后排(c)	
第一层(1)	2.0	0.0		
第二层(2)	4.0	1.5		
第三层(3)	5.0	2.5		
第四层(4)	6.0	3.5		
第五层(5)	6.5	4.5	5.5	

### 2.2 参数描述

食品包、搁架及柜内空气具体参数如下<sup>[4]</sup>.

食品包计算参数按标准 GB/T 21001.2—2015 取值:半径  $R_f = 0.05$  m,高  $H_f = 0.05$  m,密度  $\rho_f = 2610$  kg/m<sup>3</sup>,比热容  $c_{pf} = 904$  J/(kg · K<sup>-1</sup>),导热系数  $\lambda_f = 105$  W/(m · K<sup>-1</sup>),初始温度  $T_{f0} = 283$  K.

搁架参数:长  $L = 1.1$  m,宽  $W = 0.3$  m,厚  $H_s = 0.003$  m,密度  $\rho_s = 7840$  kg/m<sup>3</sup>,比热容

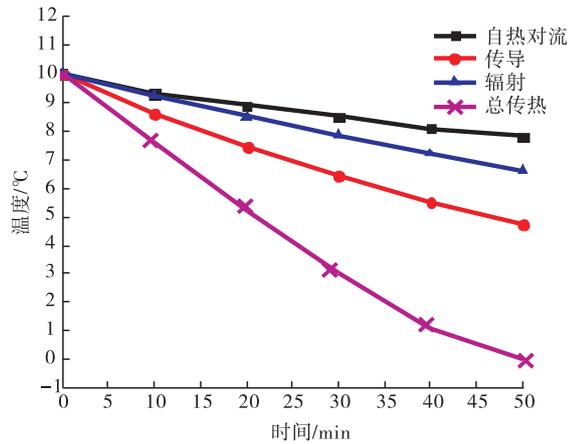
$c_{ps} = 465$  J/(kg · K<sup>-1</sup>),导热系数  $\lambda_s = 50$  W/(m · K<sup>-1</sup>).

柜内空气:导热系数  $\lambda_a = 0.024$  W/(m · K<sup>-1</sup>),运动黏度  $\nu_a = 13 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

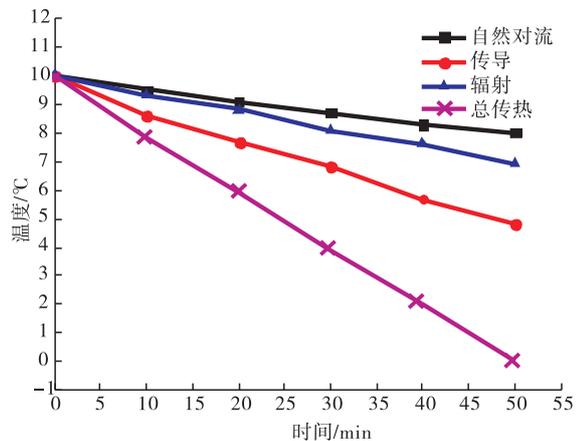
### 2.3 结果分析

将实验数据代入式④⑤⑦,可求得不同位置食品包温度随时间的变化规律.

图2给出了环境温度分别在0℃和2℃时,食品初始温度为10℃的食品温度随时间变化的曲线.传导曲线的食品温度随时间增加而下降速度最快,辐射曲线的食品温度随时间增



a) 环境温度 0℃



b) 环境温度 2℃

图2 不同传热方式对环境温度分别为0℃和2℃时食品包温度的影响

Fig. 2 The respective effect caused by different heat transfer method on food packages' temperature in the surrounding temperature 0℃ and 2℃

加而下降速度次之,自然对流曲线的食品温度随时间增加而下降速度最慢. 3种传热方式对食品影响依其权重大小可排列为:导热 > 辐射 > 自然对流. 因此强化搁架的导热能力,能起到较快降低食品温度效果的作用.

图3给出了不同位置食品包温度随时间变化的规律. 从图3可以看出: $b_1$ 位置食品包温度下降速率最快; $a_5$ 位置食品包温度下降速率最慢. 对于中温陈列柜要求冷藏温度 $\leq 7^\circ\text{C}$ ,经过15 min, $b_1$ 食品包温度已经达到冷藏要求,而其余食品包温度均在 $7^\circ\text{C}$ 以上;30 min时, $a_1, b_2, b_3$ 和 $b_4$ 位置食品包温度 $\leq 7^\circ\text{C}$ ;  $a_5$ 位置食品包60 min时才能冷却到 $7^\circ\text{C}$ . 冷却时间过长会影响食品品质,为保证食品品质,要求陈列柜能迅速地将食品温度降下来,因此将易变质食品放在 $b_1$ 位置最合理,其次是 $b_2$ 和 $a_1$ 位置.

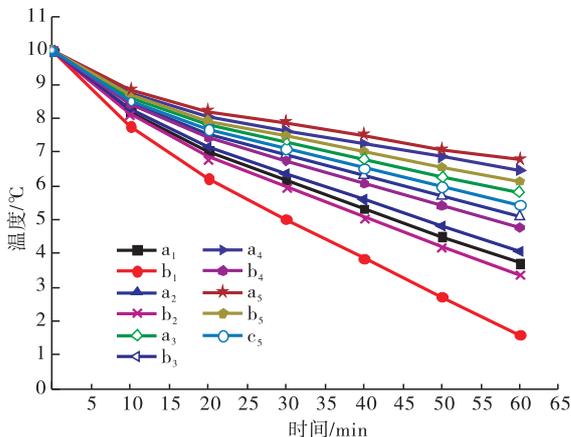


图3 不同位置食品包温度随时间变化曲线

Fig. 3 The change curve of the temperature of the food packages in different positions over time

### 3 结论

本文建立了立式冷藏陈列柜内食品的热自然对流模型、热传导模型和热辐射模型,并利用所建立的模型对食品冷藏特性进行了分析,其结论如下.

1) 陈列柜各个位置的温度分布不同,靠近风幕送风口位置的温度最低,在底层前排侧位

置的温度最高.

2) 在外界条件一定的情况下,传导、辐射和自然对流3种传热方式下,食品温度随时间增加而下降的速度依次降低. 强化搁架的导热能力,能起到较快降低食品温度的作用.

3) 陈列柜不同位置降温时间有所不同, $b_1$ 位置食品包温度下降速率最快, $a_5$ 位置食品包温度下降速率最慢. 为保证食品品质,可将易变质食品放在 $b_1$ 位置,其次是 $b_2$ 和 $a_1$ 等位置. 利用本文所建立的数学模型可以预测食品包的冷却规律,为食品的最佳冷藏提供参考依据.

### 参考文献:

- [1] KOU L, LUO Y, INGRAM D T, et al. Open-refrigerated retail display case temperature profile and its impact on product quality and microbiota of stored baby spinach [J]. Food Control, 2015, 47: 686.
- [2] WU X H, CHANG Z J, ZHAO X L, et al. A multi-scale approach for refrigerated display cabinet coupled with supermarket HVAC system (Part I): Methodology and verification [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 87: 673.
- [3] 王洪宝, 杨宝江, 马聪, 等. 冷藏陈列柜制冷系统的节能对策分析[J]. 华东科技(学术版), 2016(1): 1.
- [4] HOKE K, LANDFELD A, SEVERA J, et al. Prediction of the average surface heat transfer coefficient for model foodstuffs in a vertical display cabinet [J]. Czech Journal Food Sences, 2008, 26(3): 199.
- [5] 吕彦力, 孟志强, 曹秀琴, 等. 立式冷藏陈列柜内食品传热模型研究及温度预测[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2012, 27(5): 59.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.