

立式冷藏陈列柜内食品传热模型 研究及温度预测

吕彦力, 孟志强, 曹秀琴, 马秋阳, 吴学红, 张文慧

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:考虑立式冷藏陈列柜热量传递的导热、对流和辐射3种方式,将柜内食品分为4个区域,对简化为二维形式的立式冷藏陈列柜传热模型进行了分析与修正,并应用此模型对柜内食品温度进行预测.结果显示:不同位置食品温度与试验值基本吻合,柜内下前和上后食品温度值和试验值偏差比较大;与后侧食品相比,前侧食品温度随着环境温度升高幅度更大,与实际情况相符.

关键词:食品传热模型;温度预测;立式冷藏陈列柜

中图分类号:TB657.5 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2012.05.014

Temperature prediction and heat transfer model study of food product in vertical open refrigerated display cabinet

LV Yan-li, MENG Zhi-qiang, CAO Xiu-qin, MA Qiu-yang, WU Xue-hong, ZHANG Wen-hui
(College of Mech. and Electr. Eng., Zhengzhou Univ. of Light Ind., Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Heat transfer by conduction, convection and radiation was taken into account in an open vertical display cabinet. The load positions were divided into four regions for a heat transfer model. The heat transfer model simplified as a two-dimensional problem was analyzed and modified. Then it was used to predict the load temperature in an open vertical display cabinet. The result showed that predicted values basically fitted with the experiment results. The deviation of bottom/front and top/rear load temperature between model and experiment was larger. The front load temperature changed more than the rear with the ambient temperature increase. And the result was coincided with the fact.

Key words: heat transfer model of food product; temperature prediction; vertical open refrigerated display cabinet

0 引言

食品的温度直接关系到食品的质量和安全性.作为食品冷链的末端,冷藏陈列柜主要是使陈列柜内保持合适的温度,维持所陈列商品的温度,从而

保证商品品质^[1].从文献[2]对陈列柜冷负荷分析看,其传热包括导热、对流和辐射3种方式,而食品的温度与环境因素相关^[3].谢堃等^[4]指出合理设定环境条件可以减低陈列柜能耗,提高陈列食品品质.薛牡丹等^[5]通过试验证明了蒸发器结霜对柜内

收稿日期:2012-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(21076200);河南省教育厅项目(2011A470013)

作者简介:吕彦力(1955—),男,河南省确山县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为制冷与低温设备的节能技术.

食品温度有很大影响. O. Laguerre 等^[6]通过对家用冷柜进行传热分析,建立了传热计算模型,以预测冰箱内温度. 本文拟通过对已建立的立式冷藏陈列柜传热模型理论进行分析与修正,实现柜内食品的温度有效预测.

1 立式冷藏陈列柜试验相关数据

试验所用的立式冷藏陈列柜结构如图 1a) 所示,陈列柜为单层风幕,6 层搁架,食品尺寸为 200 mm × 100 mm × 50 mm. 冷藏陈列柜在温度为 25 °C,湿度为 60% 的恒温恒湿室运行 24 h,食品温度达到稳定状态. 食品温度分布如图 1b) 所示.

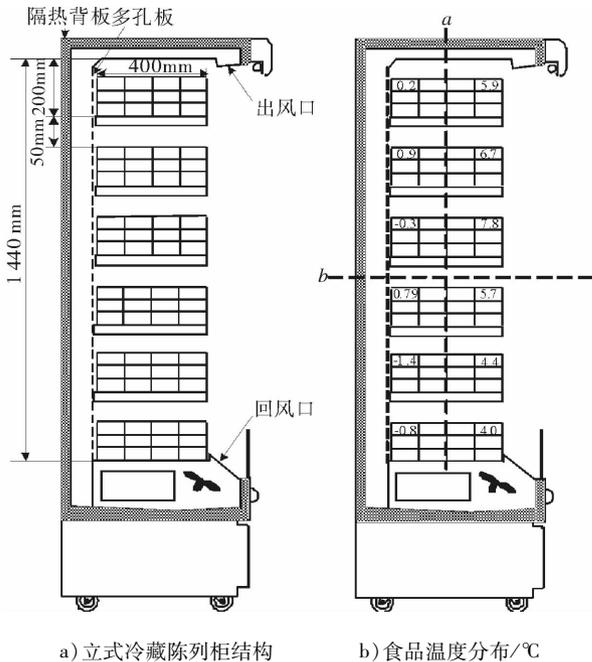


图 1 立式冷藏陈列柜结构图和食品温度分布

2 立式冷藏陈列柜传热模型

从图 1b) 可以看出,立式冷藏陈列柜内不同位置的食品温度有明显差别. 根据位置的不同,笔者用线 a 和 b 将所有食品分成 4 部分,即上前、下前、上后和下后,并将传热模型简化为二维形式.

2.1 传热模型分析及方程的建立

1) 风幕和上前食品换热方程为

$$\begin{aligned} \dot{m}C_p dT_a &= h_{i1}(T_1 - T_a)dA \Rightarrow \\ -\alpha_{i1}T_{a1} + T_{a2} + (\alpha_{i1} - 1)T_1 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\alpha_{i1} = \exp\left(\frac{-(hA)_{i1}}{\dot{m}C_p}\right)$.

2) 风幕中高位置换热方程为

$$\begin{aligned} \dot{m}C_p T_{a2} + 0.5\dot{m}_i C_p T_{a10} + 0.5\dot{m}_i C_p T_{a12} + 0.5\dot{m}_e C_p T_e &= \\ (\dot{m} + \dot{m}_i + \dot{m}_e)C_p T_{a3} \Rightarrow T_{a2} - (1 + \delta_i + \delta_e)T_{a3} + \\ 0.5\delta_i T_{a10} + 0.5\delta_i T_{a12} &= -\delta_e T_e \end{aligned} \quad (2)$$

其中,外部空气渗透率 $\delta_e = \dot{m}_e/\dot{m}$,内部空气渗透率 $\delta_i = \dot{m}_i/\dot{m}$.

3) 风幕和下前食品换热,换热方程整理后为

$$-\alpha_{b1}T_{a3} + T_{a4} + (\alpha_{b1} - 1)T_2 = 0 \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha_{b1} &= \exp\left(\frac{-(hA)_{b1}}{(\dot{m} + \dot{m}_i + \dot{m}_e)C_p}\right) = \\ \exp\left(\frac{-(hA)_{b1}}{(1 + \delta_i + \delta_e)\dot{m}C_p}\right) \end{aligned}$$

4) 风道空气与下后侧食品,通过背板热损失换热,换热方程整理后为

$$T_{a5} + (\alpha_{b3} - 1)T_4 = \alpha_{b3}T_{th} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha_{b3} &= \exp\left(\frac{-(hA)_{b3}}{(\dot{m} + \dot{m}_i)C_p}\right) = \exp\left(\frac{-(hA)_{b3}}{(1 + \delta_i)\dot{m}C_p}\right) \\ T_{th} &= -2 \text{ °C} \end{aligned}$$

5) 风道空气通过背板热损失换热,换热方程整理后为

$$\alpha_{b1}T_{a5} - T_{a6} = (\alpha_{b1} - 1)T_e \quad (5)$$

其中

$$\alpha_{b1} = \exp\left(\frac{-(hA)_{b1}}{(\dot{m} + \dot{m}_i)C_p}\right) = \exp\left(\frac{-(hA)_{b1}}{(1 + \delta_i)\dot{m}C_p}\right)$$

风道空气与上后食品换热、风道空气通过背板二次热损失、风道空气通过顶板热损失的换热方程整理后分别为

$$-\alpha_{i3}T_{a6} + T_{a7} + (\alpha_{i3} - 1)T_3 = 0 \quad (6)$$

$$\alpha_{i1}T_{a7} - T_{a8} = (\alpha_{te} - 1)T_e \quad (7)$$

$$-T_{a1} + \alpha_{ul}T_{a8} = (\alpha_{ul} - 1)T_e \quad (8)$$

其中, $\alpha_{i3} = \exp\left(\frac{-(hA)_{i3}}{\dot{m}C_p}\right)$, $\alpha_{ul} = \exp\left(\frac{-(hA)_{ul}}{\dot{m}C_p}\right)$,

$$\alpha_{ul} = \exp\left(\frac{-(hA)_{ul}}{\dot{m}C_p}\right).$$

6) 上层食品温度分布如图 2 所示,左侧和右侧食品的中心温度分别为 T_3^* , T_1^* ,利用差值法可得

$$T_3^* = 0.25T_1 + 0.75T_3, T_1^* = 0.75T_1 + 0.25T_3.$$



图 2 上层食品温度分布

背风板渗流的部分空气 $0.5\dot{m}_i$ 与上后食品换热,换热方程为

$$\alpha_i T_{a6} - T_{a9} + 0.25(1 - \alpha_i)T_1 + 0.75(1 - \alpha_i)T_3 = 0 \quad (9)$$

其中, $\alpha_i = \exp\left(\frac{-(hA)_i}{0.5\dot{m}_i C_p}\right)$.

背风板渗流的部分空气与上前、下后和下前食品换热,换热方程分别为

$$\alpha_i T_{a9} - T_{a10} + 0.75(1 - \alpha_i)T_1 + 0.25(1 - \alpha_i)T_3 = 0 \quad (10)$$

$$\alpha_i T_{a6} - T_{a11} + 0.25(1 - \alpha_i)T_2 + 0.75(1 - \alpha_i)T_4 = 0 \quad (11)$$

$$\alpha_i T_{a11} - T_{a12} + 0.75(1 - \alpha_i)T_2 + 0.25(1 - \alpha_i)T_4 = 0 \quad (12)$$

7)后侧食品热平衡分析.后侧食品主要与风道空气、背风板射流空气和前侧食品进行换热,对上后食品热平衡分析可得

$$\dot{m}C_p(T_{a6} - T_{a7}) + (hA)_{i2}(T_1 - T_3) + 0.5\dot{m}_i C_p(T_{a6} - T_{a9}) = 0$$

整理后得

$$(1 + 0.5\delta_i)T_{a6} - T_{a7} - 0.5\delta_i T_{a9} + \beta_{i2}T_1 - \beta_{i2}T_3 = 0 \quad (13)$$

其中, $\beta_{i2} = \frac{(hA)_{i2}}{\dot{m}C_p}$.

对下后食品热平衡分析可得

$$T_{a5} - 0.5\delta'_i T_{a6} + 0.5\delta'_i T_{a11} - \beta_{i2}T_2 + \beta_{i2}T_4 = T_{th} \quad (14)$$

其中

$$\beta_{i2} = \left(\frac{(hA)_{i2}}{(\dot{m} + \dot{m}_i)C_p}\right) = \left(\frac{(hA)_{i2}}{(1 + \delta_i)\dot{m}C_p}\right)$$

$$\delta'_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m} + \dot{m}_i} = \frac{\delta_i}{1 + \delta_i}$$

8)前侧食品主要受到风幕空气对流换热、外界环境热辐射和后侧食品的导热,对上前食品热平衡分析可得

$$\dot{m}C_p(T_{a1} - T_{a2}) = 0.5\dot{m}_i C_p(T_{a9} - T_{a10}) + (hA)_{i2}(T_3 - T_1) + (hA)_{ir}(T_r - T_1) + A_{il}q_{li,l} = 0$$

整理得到:

$$T_{a1} - T_{a2} + 0.5\delta_i T_{a9} - 0.5\delta_i T_{a10} - (\beta_{ir} + \beta_{i2})T_1 + \beta_{i2}T_3 = -\beta_{ir}T_r - \Delta T_{li,l} \quad (15)$$

其中, $\beta_{ir} = \frac{(hA)_{ir}}{\dot{m}C_p}$, $\Delta T_{li,l} = \frac{A_{il}q_{li,l}}{\dot{m}C_p}$.

对下前食品热平衡分析可得

$$(\dot{m} + \dot{m}_i + \dot{m}_e)C_p(T_{a3} - T_{a4}) + 0.5\dot{m}_i C_p(T_{a11} - T_{a12}) + (hA)_{b2}(T_4 - T_2) + (hA)_{br}(T_r - T_2) + A_{bl}q_{li,b} = 0$$

整理得到:

$$T_{a3} - T_{a4} + 0.5\delta''_i T_{a11} - 0.5\delta''_i T_{a12} - (\beta_{br} + \beta'_{b2})T_2 + \beta'_{b2}T_4 = -\beta_{br}T_r - \Delta T_{li,b} \quad (16)$$

其中

$$\beta'_{b2} = \left(\frac{(hA)_{b2}}{(\dot{m} + \dot{m}_i + \dot{m}_e)C_p}\right) = \left(\frac{(hA)_{b2}}{(1 + \delta_i + \delta_e)\dot{m}C_p}\right)$$

$$\beta_{br} = \left(\frac{(hA)_{br}}{(\dot{m} + \dot{m}_i + \dot{m}_e)C_p}\right) = \left(\frac{(hA)_{br}}{(1 + \delta_i + \delta_e)\dot{m}C_p}\right)$$

$$\Delta T_{li,b} = \frac{A_{bl}q_{li,b}}{(1 + \delta_i + \delta_e)\dot{m}C_p}$$

$$\delta''_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m} + \dot{m}_i + \dot{m}_e} = \frac{\delta_i}{1 + \delta_i + \delta_e}$$

式①—⑩是求解食品温度所用方程,其中①③④⑥分别是对上前、上后、下前、下后食品温度的预测方程.

2.2 传热模型参数取值

各位置传热模型方程对流换热系数、传热面积等参数见表1.方程①—⑩中, T_{a1-a12} , T_{1-4} 分别是柜内不同位置流动空气温度和食品表面温度,都是待求参数. T_r , T_{th} , T_e 三者由实验获取数据,其他参数已知.由此可以求解方程未知参数食品表面温度 T_{1-4} ,再根据6)中方法即可预测到食品中心温度.

表1 传热模型相关参数

不同位置传热模型	换热系数 / (W · m ⁻² · K ⁻¹)	传热面积 / m ² · m ⁻¹
前侧和中高位置对流	$h_{i1} = h_{b1} = h_i = 22.9$	$A_{i1} = A_{b1} = 0.72$ $A_i = 0.2$
食品导热	$h_{i2} = h_{b2} = 1.2$	$A_{i2} = A_{b2} = 0.72$
前侧食品辐射	$h_{ir} = h_{br} = 4.8$	$A_{ir} = A_{br} = 0.72$
后侧食品对流	$h_{i3} = h_{b3} = 4.8$	$A_{i3} = A_{b3} = 0.72$
背顶板热损失	$h_{il} = h_{bl} = 4.8$	$A_{il} = A_{bl} = 0.72$ $A_{ul} = 0.4$
不同位置传热模型	质量流量 / (kg · s ⁻¹)	光照强度 / (W · m ⁻²)
前侧和中高位置对流	$\dot{m} = 0.0404$	$q_{li,l} = 1.2$
食品导热	$\dot{m}_i = 0.0215$	$q_{li,b} = 0.9$
前侧食品辐射	$\dot{m}_e = 0.0121$	
后侧食品对流		
背顶板热损失		

3 不同环境温度下食品温度预测

3.1 模型结果和试验对比

在图1b)中,立式冷藏陈列柜每个区域食品的温度值按照此区域所有食品温度的平均值选取.由于下前食品包温度受到风机散热影响,将 T_1 数值提高 $1\text{ }^\circ\text{C}$.故笔者对下前食品包温度进行了修正.从修正后模型的计算结果可以看出,此模型可以计算出食品的温度值和不同位置食品温度的差别,与试验结果吻合较好(如图3所示).由图3可以看出,前侧食品温度高于后侧食品温度,上层食品温度高于下层食品温度.

3.2 模型计算结果与分析

上述试验和模型计算的环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,下面利用模型对不同环境温度下食品包温度进行计算,计算结果见表2.

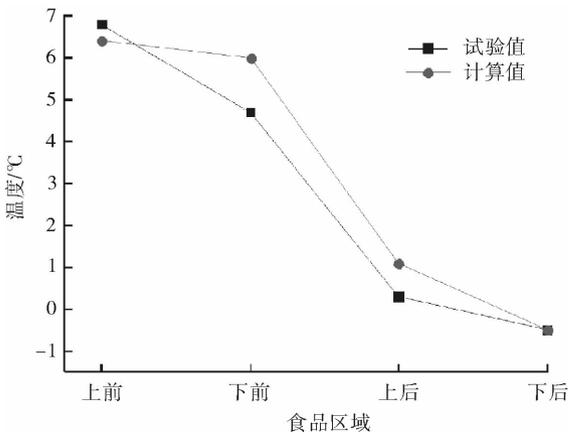


图3 模型结果与试验结果对比

表2 不同环境温度下不同位置食品包温度计算值 / °C

环境温度	不同位置食品包温度			
	上前	下前	上后	下后
21	5.7	4.7	0.8	-0.9
23	6.1	5.3	0.9	-0.7
25	6.4	6.0	1.1	-0.5
27	6.8	6.7	1.2	-0.2
29	7.2	7.3	1.4	0.0

从表2可以看出,随着环境温度的升高,柜内食品包温度都有升高,但不同位置食品温度升高幅度不同.与后侧食品相比,前侧食品受外界辐射影响大,环境温度升高时,前侧食品温度升高幅度大于后侧食品温度升高幅度.

4 结论

本文在考虑食品陈列柜热量传递的3种方式导热、对流与辐射的基础上对现有立式冷藏陈列柜传热模型进行了理论分析和修正.计算中将陈列柜内部的食物划分为4个区域(上前、上后、下前和下后),并与试验的结果进行比较.模型计算结果显示:不同位置食品温度与试验值基本吻合,柜内下前和上后食品温度值和试验值偏差比较大.最后利用该模型预测了不同环境温度下食品包的温度,计算结果表明:与后侧食品相比,前侧食品温度随着环境温度升高幅度更大,与实际情况相符.从以上的分析结果可以看出,修正后的模型可以有效地预测立式冷藏陈列柜内食品包的温度,计算简便且容易实现.

参考文献:

- [1] 孙钟皓.我国商用冷冻冷藏陈列柜的现状与发展[J].制冷技术,2005(1):14.
- [2] Faramarzi R. Efficient display case refrigeration [J]. ASHRAE Trans,1999,41(11):46.
- [3] 袁秀玲.制冷与空调装置[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [4] 谢堃,陈天及,余克志,等.环境温湿度对制冷陈列柜性能影响的实验研究[J].制冷学报,2007,28(2):19.
- [5] 薛牡丹,吕彦力,石海军,等.柜外环境对立式冷藏陈列柜食品温度影响的研究[J].现代食品科技,2007,23(12):13.
- [6] Laguerre O, Flick D. Temperature prediction in domestic refrigerators: Deterministic and stochastic approaches [J]. Int J of Refrigeration, 2010, 33(1):41.