

文章编号: 1671-6612 (2019) 04-388-07

冷风机的布置形式 对冰温库温度分布影响的研究

程花蕊¹ 董生怀¹ 刘群生¹ 李志强²

(1. 河南牧业经济学院能源与动力工程学院 郑州 450011;

2. 中原工学院能源与环境学院 郑州 450007)

【摘要】 冷风机的布置形式对冰温库的温度均匀性有较大的影响, 对实际使用的冰温库温度进行了模拟分析和实际测量。在冷风机分别布置为侧面安装单出风口、吊顶安装双出风口和吊顶安装四个出风口时, 利用流体力学软件模拟了冰温库在不同的冷风机布置形式下的温度分布, 同时实际测量了冷风机侧面安装单出风口和吊顶安装双出风口两种布置形式下不同截面测点的温度, 并与其模拟温度进行了对比。结果表明: 冷风机吊顶安装四个出风口时冰温库的温度分布更均匀。

【关键词】 冷风机; 冰温库; CFD; 温度均匀性

中图分类号 TB69 文献标识码 A

Research on the Influence of the Arrangement of Air Cooler on the Temperature Distribution of Ice Temperature Storage

Cheng Huarui¹ Dong Shenghuai¹ Liu Qunsheng¹ Li Zhiqiang²

(1. School of Energy and Power Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou, 450011;

2. School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, 450007)

【Abstract】 The arrangement of the air cooler has a great influence on the temperature uniformity of the ice temperature storage, and the temperature field of ice temperature storage in the actual use was simulated and measured. When the air cooler has side single air outlet or suspended ceiling double air outlet or suspended ceiling four air outlets respectively, the fluid dynamics software was used to simulate the temperature field distribution of the ice temperature storage in different arrangement form of air cooler, and the temperature of different cross section measuring points is measured, and the temperature then will be compared with the simulated temperature. The results show that the temperature distribution is more uniform in the four air outlets of suspended ceiling.

【Keywords】 Air cooler; Ice temperature storage; CFD; Temperature uniformity

0 引言

冰温贮藏是把易腐食品放置在冰温环境的贮藏方法。冰温贮藏可以高品质地保存食品的新鲜度、口感和风味。随着我国经济的快速发展, 人们

的物质生活品质也在不断提高, 消费者对冰温食品的需求量也越来越大。冰温库作为冷藏冰温食品的固定场所, 须具有较高的温度均匀性和控制精度。目前研究冷库的有效手段是计算流体力学

基金项目: 2014年度河南省重点科技攻关项目(142102210052)

作者简介: 程花蕊(1963.11-), 女, 本科, 副教授, E-mail: zzmzchr@126.com

通讯作者: 董生怀(1965.01-), 男, 本科, 副教授, E-mail: zzmzdsh@126.com

收稿日期: 2018-07-05

(Computational Fluid dynamics, CFD)方法,汤毅等人对风机的摆放形式对冷库的影响进行了CFD模拟分析^[1], Mirosława和Kamil等人对蔬菜保鲜库内部传热传质过程建立了数值模型并进行了模拟分析^[2]; Xie Jing等人基于温度场对冷库设计参数进行了CFD优化分析^[3]; Tian Shen等人采用数值方法分析了冷库空气渗透过程^[4]; Cheng Xiwen等人采用实验和数值方法分析了相变材料对冷库效率的提升^[5]; 李艺哲和谢晶对冷库内温度场进行了数值模拟与优化^[6]; 田绅等人对冷库渗风的动态过程进行了数值模拟分析^[7]。应用CFD可根据不同的目的要求灵活改变模型和条件,模拟理想或复杂过程下的温度分布和速度分布,相比实际试验研究具有节约试验成本等优势。

本文针对目标冰温库,研究库内冷风机分别布置为侧面安装单出风口、吊顶安装双出风口、吊顶安装四个出风口三种形式下库内的温度分布规律。首先建立冷风机三种布置形式下的数值计算模型,模拟其库内固定截面温度的分布;其次,实际测量和分析冷风机分别布置为侧面安装单出风口、吊顶安装双出风口两种形式下库内固定截面温度的分布;通过研究冰温库固定截面的温度分布,得出哪一种风机布置形式下库内的温度分布更均匀,为实际冰温库冷风机的优化布置提供参考。

1 数值计算

1.1 物理模型

本研究设计了一个小型冰温库,其外形尺寸为 $3\text{m} \times 2\text{m} \times 2.8\text{m}$ (长 \times 宽 \times 高),库壁隔热层为厚 0.1m 的聚氨酯泡沫塑料。模型一为侧面安装单面出风的冷风机,尺寸为 $1.56\text{m} \times 0.31\text{m} \times 0.65\text{m}$ (长 \times 宽 \times 高),模型二为吊顶安装双面出风的冷风机,尺寸为 $1.58\text{m} \times 0.35\text{m} \times 0.95\text{m}$ (长 \times 宽 \times 高),模型三为吊顶安装四面出风的冷风机,尺寸为 $1.58\text{m} \times 0.35\text{m} \times 0.95\text{m}$ (长 \times 宽 \times 高),该风机是本文提出的一种新型风机,其进、出风口总面积与模型二的进、出风口总面积相同,回风口为一个正方形回风口,三种模型的示意图如图1所示。

根据研究目标,分别建立了三种数值计算模型。数值模拟主要针对冰温库内的温度场和速度场,对冰温库内区进行几何建模。模型一为侧面安装单面出风的冷风机,模型二为吊顶安装双面出风

的冷风机,模型三为吊顶安装四面出风的冷风机。数值分析计算的几何建模和网格划分在Gambit软件中实现。模型一、模型二和模型三计算域内采用非结构化四面体网格划分,共计生成计算网格单元数分别为806916个、806916个和637250个。

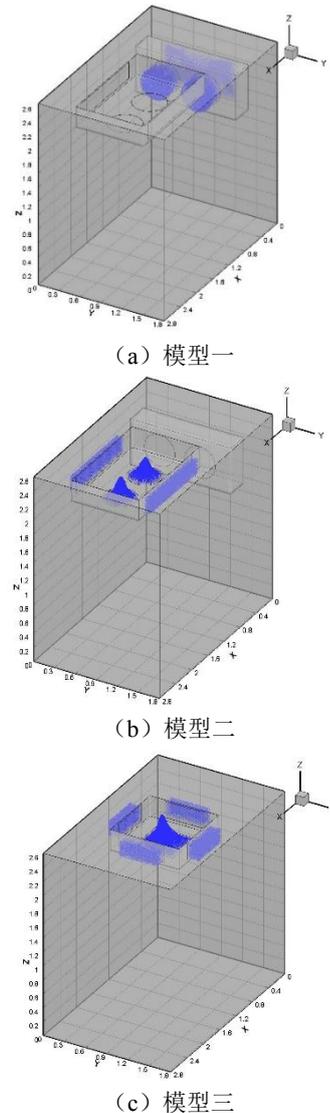


图1 三种模型示意图

Fig.1 The schematic diagram of tree models

1.2 数学模型

针对冰温库,首先建立适合库内空气流动换热的数学模型,并作如下假设:(1)空气不可压缩,且符合Boussinesq假设,即认为流体密度变化仅对浮升力产生影响;(2)冰温库内的空气在风机驱动下的流动属于三维紊流流动,可采用SpaldingDB的紊流流场 $k-\epsilon$ 数学模型^[8],在直角坐标系下,联立连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程、 k 方程

以及ε方程作为计算方程组^[9]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j') + S_i \tag{2}$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_j \bar{T}' \right] + S_T \tag{3}$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \tag{4}$$

ε方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + c_3 G_b) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{5}$$

式中: u_i 为瞬时速度, m/s; ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s; μ 为动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P 为压力, Pa; T 为温度, K; λ 为导热系数, $\text{J} \cdot \text{m}/(\text{s} \cdot \text{K})$; c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; S_i , S_T 为广义源项, G_k 和 G_b 分别是平均速度梯度和浮力引起的 k 的产生项。

1.3 边界条件

(1) 冷风机出风口采用速度型入口 (velocity inlet), 直接指定入口平面法向速度, 速度按照各风口理论风量和风口面积计算; 模型一送风温度采用实测值 -2.5°C 设定, 模型二、模型三送风温度采用实测值 -3.3°C 设定。

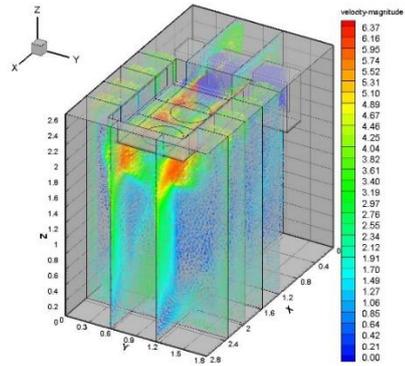
(2) 冷风机回风口采用出流边界条件 (outflow), 按照冰温库内风量平衡和回风口局部压力状态计算回风矢量; 模型一回风口温度按照冰温库内实测平均温度 -1.5°C 设定, 模型二、模型三回风口温度按照冰温库内实测平均温度 -2°C 设定。

(3) 冷风机箱体处于冰温库数值计算域内的部分, 动量边界按照无滑移壁面处理; 热边界条件按照绝热壁面设定。

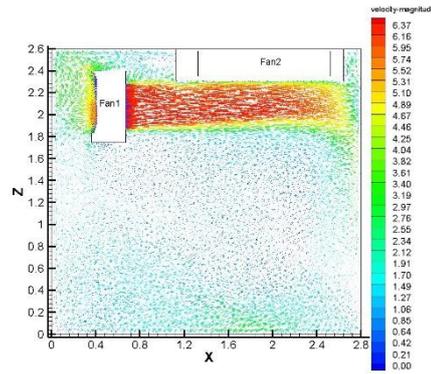
(4) 冰温库壁面动量边界按照无滑移壁面处理; 热边界条件按照复合传热边界设定: 表面传热系数 $0.25\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 壁面材料导热系数 $\lambda=0.031\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 冰温库外环境温度按 20°C 计算。

2 数值模拟结果

为研究目标冰温库在哪种风机布置形式下的温度分布更均匀, 在冷库中沿 y 坐标方向的 0.5m 、 0.9m 、 1.3m 位置处选取三个 XZ 截面作为研究截面, 分别记为截面 1、2、3。冷风机不同布置形式下冰温库内的速度分布如图 2、图 3 和图 4 所示。



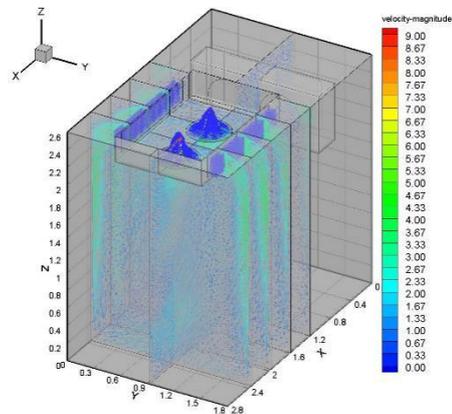
(a) 库内速度分布



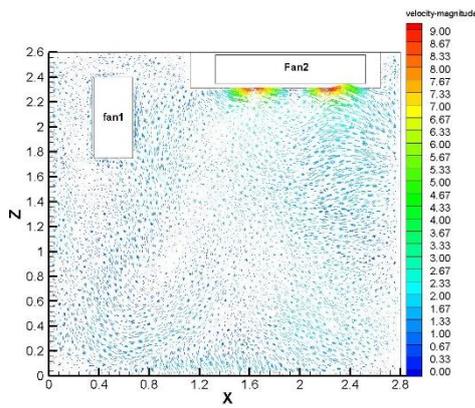
(b) 中心截面 (y=0.9m) 速度分布

图 2 模型一冰温库内速度分布

Fig.2 The velocity distribution of the ice temperature storage in model 1



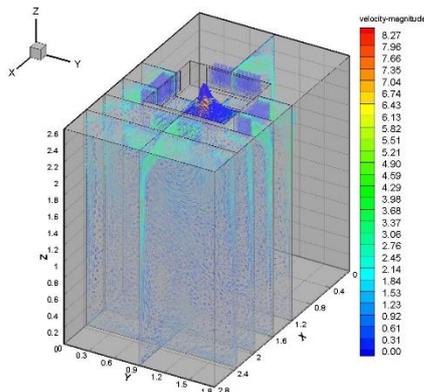
(a) 库内速度分布



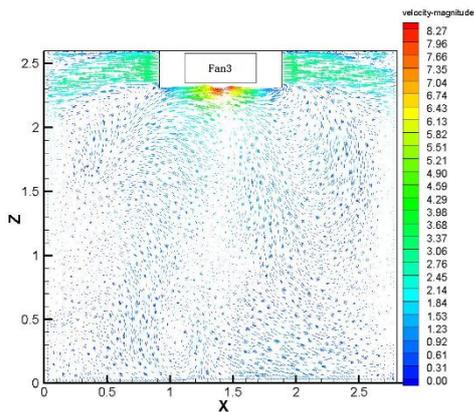
(b) 中心截面 (y=0.9m) 速度分布

图 3 模型二冰温库内速度分布

Fig.3 The velocity distribution of the ice temperature storage in model 2



(a) 库内速度分布



(b) 中心截面 (y=0.9m) 速度分布

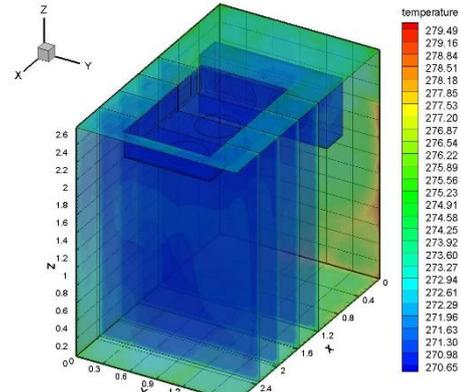
图 4 模型三冰温库内速度分布

Fig.4 The velocity distribution of the ice temperature storage in model 3

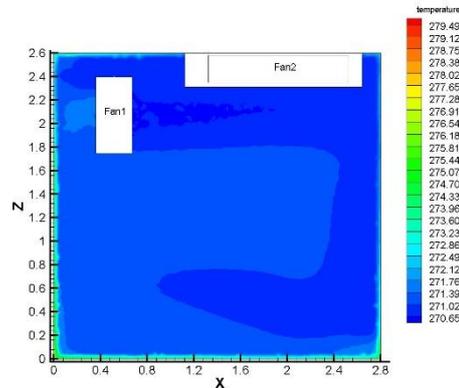
从图 2、图 3 和图 4 可以看出, 模型一中心截面中间速度稍低, 四周速度较高, 速度不均匀性比

较明显; 模型二和模型三 的出风速度相同, 模型二中心截面的速度均匀性高于模型三的速度均匀性, 主要原因是模型二的出风和回风是几何对称, 气流在中心截面的扰动较小, 速度场相对均匀, 模型三 的出风口是四个方向, 气流在中间截面的扰动比较大, 速度场相对不均匀。

冷风机不同布置形式下冰温库内的温度分布如图 5、图 6 和图 7 所示。



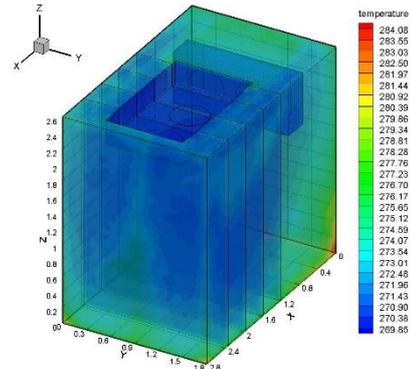
(a) 总体温度分布



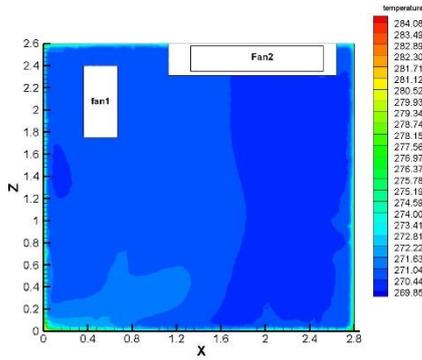
(b) 中心截面 (y=0.9m) 温度分布

图 5 模型一冰温库内温度分布

Fig.5 The temperature distribution of the ice temperature storage in model 1



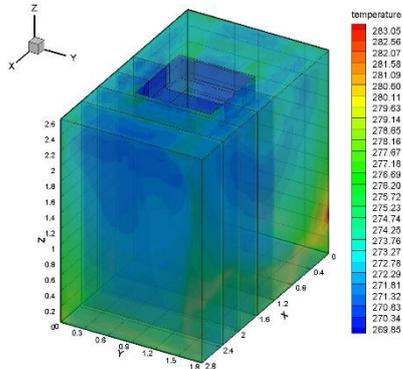
(a) 总体温度分布



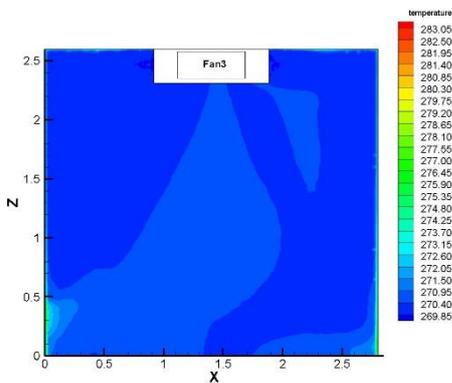
(b) 中心截面 (y=0.9m) 温度分布

图 6 模型二冰温库内温度分布

Fig.6 The temperature distribution of the ice temperature storage in model 2



(a) 库内温度分布



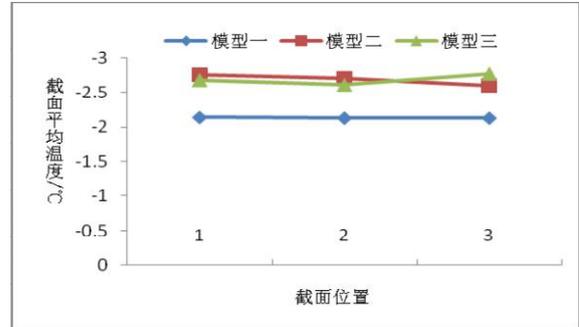
(b) 中心截面 (y=0.9m) 温度分布

图 7 模型三冰温库内温度分布

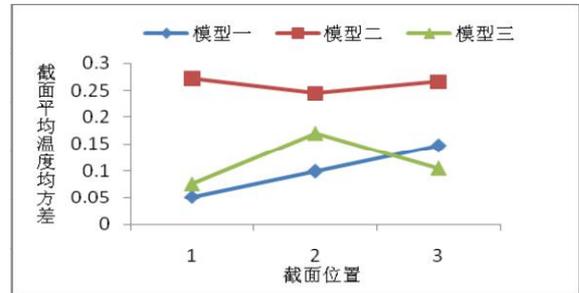
Fig.7 The temperature distribution of the ice temperature storage in model 3

根据模拟结果,将模拟的温度数据全部导出到 Tecplot 图形处理软件中对数据进行处理。处理的方式是分别计算出模型一、模型二和模型三三种风机布置形式下其相应的截面 1、2、3 的模拟温度平

均值和均方差。冷风机三种布置形式下三个截面模拟温度平均值及其均方差结果如图 8 所示。



(a) 截面平均温度



(b) 截面平均温度均方差

图 8 三种冷风机形式下三个截面模拟平均温度及其均方差

Fig.8 The mean temperature and variance of the tree Cross sections under three types of cold fan are simulated

图 8 可看出,冷风机在三种不同的布置形式下,各截面模拟温度的平均值比较稳定,说明风机的布置形式对固定截面平均温度的影响不大,但是各截面的均方差变化比较大,模型一从截面 1 到截面 3 均方差越来越大,模型二和模型三具有相同的出风温度和出风口总面积,模型二各截面的均方差大于模型三各截面的均方差,说明模型三中吊顶冷风机四个出风口时固定截面的平均温度较一致,库内的温度分布较均匀,更利于冰温库内的食品贮藏。

图 8 的模拟结果还显示,模型二吊顶冷风机双面出风时中间截面的均方差较小,说明中间截面的温度更均匀,双面出风,气流在中间面相汇进入回风口,几何对称,气流场较稳定,温度场也较稳定;模型三吊顶冷风机四面出风时中间截面的均方差较大,说明中间截面的温度均匀性差,因为四面出风,气流在中间面相汇时扰动作用较大,气流相互影响不稳定,温度场也不稳定。

3 实验数据与模拟数据分析

3.1 实验方法

为了研究目标冰温库内的温度分布规律,对模型一、模型二的库内实际温度进行了测量。在冰温库内用细钢管作为支架,在库内1、2、3截面的上、中、下固定位置分别布置12个温度传感器检测各点的实际温度。在冷风机出风口和回风口各布置2个温度传感器检测实际出风和回风温度。温度传感器采用铜-康铜热电偶,数据采集用2700 MULTIMETER/DATA ACQUISITION SYSTEM (2700型万用表/数据采集系统)和7702 40 CHANNEL MULTIPLEX (7702型40通道差分输入开关卡),用Kickstart软件实时采集冰温库内的温度数据,获得稳态情况下截面上不同位置的温度实际测量值。

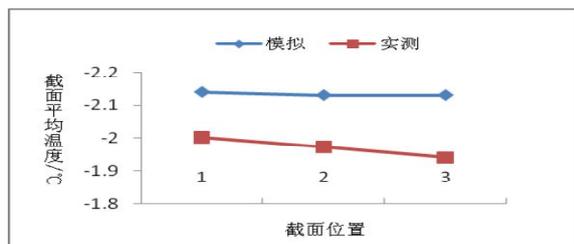
3.2 实验数据处理

模型一根据出风口实际测量最低温度 -2.5°C 进行数据处理,模型二根据出风口实际测量最低温度 -3.3°C 进行数据处理。在两种风机布置形式下,根据出风口实际测量最低温度,对每个测温点取40组数据计算其平均温度,然后再根据截面1、2、3相应温度测点的平均值再计算出各截面的平均温度,使测量值更接近实际值。

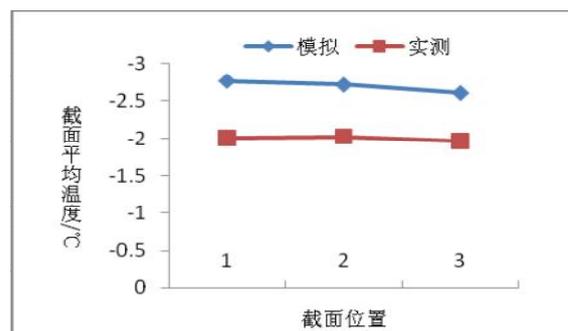
3.3 实验数据与模拟数据比较

根据模型一和模型二的数据处理结果,实测得到的库内三个截面温度平均值和模拟得到的三个截面温度平均值结果如图9所示。图中可看出模拟温度和实测温度的变化趋势是一致的,说明建立的数学模型符合实际情况;各截面的模拟温度低于实测温度,符合一般规律,因为实际运行的冰温库温度场会受到库内外很多因素的影响,而模拟温度相对而言考虑的影响因素较少。

由于条件限制,模型三对冰温库内的温度影响没有进行实际测量,但根据上述两个模型下冰温库内温度的模拟结果,及实测结果和模拟结果的比较,可推广应用到模型三时冰温库的温度变化。



(a) 模型一



(b) 模型二

图9 截面模拟和实测平均温度

Fig.9 The simulated and measured average temperature in the cross section

4 结论

在三种冷风机布置形式下,对于目标冰温库,分别研究了三个固定截面的温度分布,模拟结果显示三种冷风机布置形式下固定截面的平均温度都比较稳定,说明冷风机的布置形式对截面的平均温度影响不大,但是固定截面的平均温度均方差变化比较明显,模型一中截面1的均方差最小、截面3均方差最大,模型二和模型三具有相同的出风温度和出风口总面积,但模型二各截面的均方差大于模型三各截面的均方差,说明模型三中吊顶冷风机四个出风口时固定截面的平均温度一致性较好,库内的温度分布均匀性较好。

对模型一和模型二研究的三个固定截面的实际温度的检测处理,结果显示两种模型的模拟温度和实测温度的变化趋势都一致,说明建立的数学模型符合实际情况;各截面的模拟温度均低于实测温度,符合一般规律,因此研究的结论可推广应用到模型三吊顶式冷风机四面出风的冰温库。结合上述的模拟、实测结果,本文提出的吊顶四面出风的冰温库库内的温度更均匀,更稳定,更有利于冰温食品的贮藏。

参考文献:

- [1] 汤毅,谢晶,王金锋.CFD 预测风机摆放形式对冷库的影响[J].食品与机械,2012,28(1):124-128.
- [2] Mirosława Kolodziejczyk, Kamil Smierciw, Jerzy Gagan, et al. Numerical modelling of heat and mass transfer in vegetables cold storage[J]. Procedia Engineering, 2016,157:279-284.

- [3] Xie Jing, Qu Xiaohua, Shi Junye, et al. Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006,77:355-363.
- [4] Tian Shen, Gao Yuping, Shao Shuangquan, et al. Numerical investigation on the buoyancy-driven infiltration airflow through the opening of the cold store[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017,121:701-711.
- [5] Cheng Xiwen, Zhai Xiaoqiang. Thermal performance analysis of a cascaded cold storage unit using multiple PCMs[J]. *Energy*, 2018,143:448-457.
- [6] 李艺哲,谢晶.大型冷库内温度场的数值模拟与优化[J]. *食品与机械*,2017,33(6):139-142.
- [7] 田绅,邵双全,张坤竹,等.冷库库门的非稳态 RANS 模型渗风研究[J].*制冷学报*,2017,38(3):63-69.
- [8] 张登春,陈焕新,舒信伟,等.空调车内三维紊流流动与传热的模拟研究[J].*铁道学报*,2002,24(6):39-43.
- [9] 吕全立,林金庭,陈效建,等.异质结构的流体动力学输运模型及其在 HBT 一维分析中的应用[J].*固体电子学研究与进展*,1994,14(2):108-115.