

堆垛方式及送风功率对冷库制冷效果的影响

The influence of stacking mode and air supply power on cooling effect of cold storage

徐 竞¹ 王 峰¹ 谭振华¹ 陆秋芳²

XU Jing¹ WANG Feng¹ TAN Zhenhua¹ LU Qiufang²

(1. 西南林业大学, 云南 昆明 650224; 2. 昆明友邦制冷设备有限公司, 云南 昆明 650400)

(1. Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;

2. Kunming Youbang Refrigeration Equipment Limited Company, Kunming, Yunnan 650400, China)

摘要:目的:合理规划移动冷库内货物堆放方式,合理设计风机的送风功率,降低冷库能耗、提高经济效益。方法:以某冷库为研究对象,建立了冷库的三维物理模型和 $k-\epsilon$ 数学模型,采用 Fluent 软件对冷库内货物不同堆垛方式、不同送风功率下的温度场进行模拟。结果:在相同工况下,货物横置时平均库温为 2.014 °C,货物竖置时平均库温为 2.006 °C,均达到设计要求,且货框横置可以堆放 162 个,竖置可以堆放 180 个,竖置堆放可以让空间利用率最大化。在不同送风功率,运行 15 min 后,功率 100% 时平均库温为 2.006 °C;功率 70% 时平均库温为 2.129 °C;功率 50% 时平均库温为 2.410 °C,在 3 种不同风扇功率情况下冷库温度都达到了设计要求。实际选型功率过大,50% 功率即可满足冷库满载运行的设计要求。结论:竖置的堆垛方式可以提高冷库的空间利用率,冷风机选型可以降低运行成本,提高经济效益。

关键词:移动冷库;有限元分析;制冷系统;冷风机;温度场

Abstract: Objective: Reasonable planning of the stacking of goods in the mobile cold storage and reasonable design of the air supply power of the fan, to reduce cold storage energy consumption and improve economic efficiency. Methods: A three-dimensional physical model and $k-\epsilon$ mathematical model of a certain cold storage were established, and the temperature field inside the cold storage under different stacking methods of goods and different air supply power were simulated using Fluent software. Results: The research results showed that under the same

working conditions, the average storage temperature of goods horizontally was 2.014 °C, and the average storage temperature of goods vertically was 2.006 °C, all meet the design requirements. The goods can be stacked horizontally to accommodate 162 and vertically to accommodate 180. Vertical stacking maximizes space utilization. At different airflow powers, after running for 15 minutes, the average cold storage temperature was 2.006 °C at 100% power; The average cold storage temperature was 2.129 °C at 70% power; The average cold storage temperature was 2.410 °C at 50% power. The cold storage temperature met the design requirements for all three different fan power scenarios. The actual selected power was too high, and 50% power was sufficient to meet the design requirements for full-load operation of the cold storage.

Conclusion: Choosing the vertical stacking method can improve the space utilization rate of cold storage. According to the simulation results, the selection of cooler type can reduce the energy consumption, reduce the operating cost and improve the economic benefit.

Keywords: mobile cold storage; finite element analysis; refrigeration system; cold air blower; temperature field

冷库是冷链物流中的一个重要组成部分,它主要用于肉类、果蔬、粮油、海鲜、药品疫苗等商品的贮藏和运输。近年来中国冷库数量不断增多,但冷库技术的发展仍然比较缓慢。如何改进冷库的设计方案,降低能耗,提高冷库的制冷效果和温度均匀性已成为冷库发展的重中之重^[1-2]。近年来,随着计算流体力学在冷库设计中的应用,大大改善了冷库性能,节约了研发时间和成本^[3-4]。目前,大部分冷库的设计、生产厂家,都是按照冷库所存放的货物种类、库容大小、环境温度等参数,来进行冷库的设计,并对制冷设备进行配置。为了达到最快的制冷效果,实际方案中的设备选型功率远大于冷库

基金项目:国家自然科学基金(编号:52165038);云南省教育厅科学研究基金(编号:2023Y0759)

作者简介:徐竞,男,西南林业大学在读硕士研究生。

通信作者:王峰(1983—),男,西南林业大学高级实验师,博士。

E-mail: xiaojinwf@163.com

收稿日期:2023-03-22 **改回日期:**2023-08-31

实际需要,造成了资源浪费以及制造成本的上升。制造企业几乎不会考虑风机的摆放位置以及货物的堆垛方式,以及制冷风机的出风温度对制冷效果的影响。

谢晶等^[5-6]通过 CFD 技术分析冷库内温度场及气流场分布,预测风机不同布置形式对冷库气流的影响。杨磊等^[7]通过对冷库预冷和冷却过程的二维非定常数值模拟,获得了冷库预冷和冷却过程中各瞬间的温度场,并通过试验进行了验证。Nahor 等^[8]利用瞬态三维模型模拟冷库内流场以及货物温度分布。白通通等^[9]模拟冷库内流场验证不同送风方式的冷藏效率,提高送风能量的利用率。汤毅等^[10-11]通过仿真分析来改善冷库内风机分布以及堆码货物的方式来提高制冷效果。韩馨仪等^[12]通过改变冷库风机的风速,送风温度,提高冷库制冷效率。王少鹏等^[13-14]从不同送风形式以及风机的开关机时间探究降低冷库运行能耗,发现合理的送风形式以及开关机时间有利于降低冷库运行成本。研究拟利用 Ansys 软件 Fluent 模块进行分析,以实际货物为对象,模拟不同的堆垛及送风功率下的温度场和气流场分布情况,通过试验对比,找出最佳的堆垛方式以及风机最佳功率,提高经济效益,为冷库生产企业提供参考。

1 移动冷库建模

1.1 移动冷库结构

移动冷库的制冷结构及工作原理见图 1,其主要部分包括了风冷冷凝器、压缩机、储液器、干燥过滤器、液位镜、膨胀阀、电磁阀。工作原理:当冷库开始运行时,蒸发器内的液体制冷剂将被冷藏货物的热量吸收后,气化温度较低的气体,进入压缩机,变成高温高压的蒸气,再将其排放到风冷冷凝器内,在冷凝器中释放出热量并凝结成高压液体,再通过储液器、干燥器、液位器、电磁阀、膨胀阀、冷风机后,就会变成低温、低压的液体,再一次进入到蒸发器中,进行吸热气化,从而达到循环制冷的目的。

1.2 冷库热模型

研究的移动冷库主要用于果蔬的贮藏运输,基本参数:冷库的长宽高分别为 4.5,2.5,2.5 m,设计工作库温 $(2.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,冷库满载初次制冷时间 15 min,冷库的风机位于冷库的一侧。送风口和回风口的风扇运行产生的

气流扰动相比冷库可以忽略不计,故将其简化为截面为 0.5 m 的圆形,送风口位于上方靠近顶部,回风口位于下方。冷库的壁面材料为 0.1 m 厚的聚氨酯泡沫塑料板,送风口和出风口通道材料为钢材,图 2 为可移动冷库的物理模型。

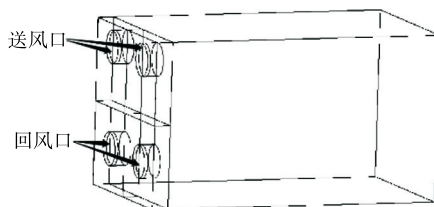


图 2 移动冷库模型

Figure 2 Mobile cold storage model

研究拟对该冷库在不同堆垛方式和不同送风功率的运行工况进行分析。为计算冷库内的流场,根据沈希等^[15]制冷压缩机变工况运行的热力性能研究,对冷库内环境作出以下假设和简化:

- (1) 库房中的物品物理特性参数为常数,不发生变化。
- (2) 在物性参数为常数的情况下,该气体具有不可压缩性。
- (3) 货物区为均一的孔隙介质,其热物性在所考察的温度区间是不变化的。
- (4) 在不考虑空气的辐射换热,只通过热传导和热交换来控制空气与货物的接触。
- (5) 在冷藏过程中,冷库内部是封闭的,冷库中的空气是稳定的紊流状态。

研究拟在此基础上,以 Spalding 标准的 $k-\varepsilon$ 模型为基础,建立连续、动量、能量等多项式的湍流模型。其控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{v}\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S, \quad (1)$$

式中:

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

$\mathbf{v}$ ——速度矢量, m/s ;

ϕ ——通用变量;

T ——温度, $^\circ\text{C}$;

Γ ——广义扩散项系数;

S ——广义源项。

广义源项包含的是瞬态项、对流项、扩散项和源项,具体展开式为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + s, \quad (2)$$

式中:

t ——时间, s ;

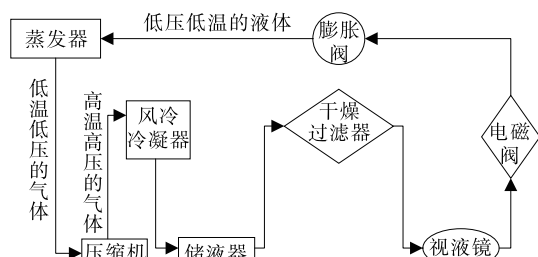


图 1 移动冷库制冷的结构及原理示意图

Figure 1 The structure and principle diagram of mobile cold storage refrigeration

u —— x 方向的流速, m/s;
 v —— y 方向的流速, m/s;
 w —— z 方向的流速, m/s;
 s ——源项。

1.3 冷库满载模型

货物放置于长方形多孔货框内堆放在冷库, 货框尺寸为 0.6, 0.4, 0.35 m, 根据冷库的尺寸和货框的尺寸可知, 冷库最多可以放置 6 层货框, 故货框的尺寸简化为 0.6, 0.4, 2.1 m。由于货框放置方式不同, 因此分别建立不同的模型进行研究。图 3 为货框横置, 货框的间距为 0.05 m, 框距离左右两边壁面的距离为 0.3 m, 距离前后壁面的距离为 0.125 m, 可以放置货框 162 个; 图 4 为货框竖置, 货框的间距为 0.05 m, 距离左右两边壁面的距离为 0.15 m, 距离前后壁面的距离为 0.2 m, 可以放置货框 180 个。

由于将货物放置在镂空货框中, 因此将货物作为多孔介质进行处理和计算。在实际仿真过程中, 由于货物对气流的影响, 必须对货物的阻力进行计算。货物为多孔介质, 由于进口和出口风机的影响, 仓库中的空气渗流到货物上时, 货物内部和表面的空气在风速和压力影响下流动会产生一定的阻力, 该部分的阻力属于流体动量方程中的阻力源项, 该阻力值可由 Forchheimer 非线性渗透率定理确定, 它包含了黏性阻力和惯性阻力, 具体的计算公式见式(3)。

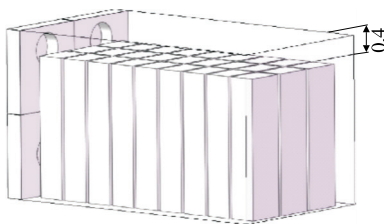
$$F_i = - \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\alpha} \mu_i + C_2 \frac{1}{2} \rho_{\text{eff}} |\mu| \mu_i \right], \quad (3)$$

式中:

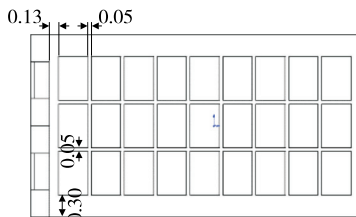
F_i ——多孔介质附加阻力, N;

μ_{eff} ——有效空气黏度, Pa·s;

α ——孔隙度, m^2 ;



(a) 货框横置立体图

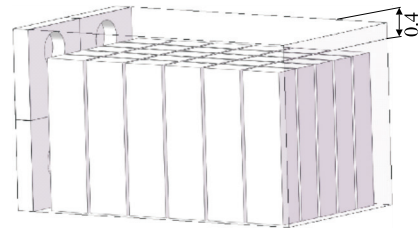


(b) 货框横置俯视图

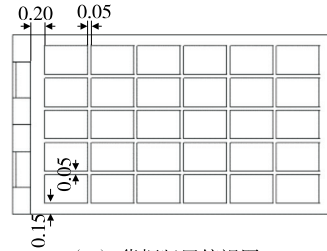
单位: m

图 3 货框横置模型

Figure 3 Transverse model of cargo frame



(a) 货框竖置立体图



(b) 货框竖置俯视图

单位: m

图 4 货框竖置模型

Figure 4 Vertical model of cargo frame

C_2 ——惯性阻力系数, m^{-1} ;

ρ_{eff} ——空气有效密度, kg/m^3 ;

μ_i —— X, Y, Z 方向的速度成分, m/s;

μ ——速度矢量, m/s。

根据 Ergun 方程^[16], 可以分别得出黏性阻力系数和惯性阻力系数计算公式, 如式(4)和式(5)所示。

$$\alpha = \frac{D^2 \epsilon^3}{150(1-\epsilon^2)}, \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\epsilon^2)}{D\epsilon^2}, \quad (5)$$

式中:

ϵ ——多孔媒质区的孔隙率;

D ——货物实际高度, m。

堆垛货物的孔隙率 ϵ 由堆垛货物的直径和占用空间的体积计算得出, 其中对货物进行简化, 单件货物的体积采用球体计算公式[式(6)]计算。空隙率是指在堆放区域中, 没有装载物品时, 每立方米空气所占的比例, 计算公式见式(7)。

$$n = \frac{4}{3} \cdot \pi \left[\frac{d_p}{2} \right]^3, \quad (6)$$

$$\epsilon = 1 - \frac{n \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \left[\frac{d_p}{2} \right]^3}{1}, \quad (7)$$

式中:

n ——每立方米堆码货物的数量;

d_p ——货物的直径, m。

假设存储货物为苹果, 堆垛货物直径约为 0.08 m, 每立方米堆垛货物数为 2 050 个, 则货物孔隙率为 0.45。

1.4 冷库满载模型边界条件设置

在整个系统中, 热量传递包括: 冷库内部空气与堆放

货物的对流换热和热传导、库外空气与冷库表面的对流换热和热传导。在 Fluent 软件中导入网格模型,并设置边界条件,边界条件与壁面边界和流固耦合边界有关。流固耦合边界包含冷库箱壁和空气耦合以及空气与货框的耦合,由于所划分的网格共节点,在 Fluent 模型中将会自动地产生 wall 与 wall-shadow 的自动耦合边界来进行导热。环境温度设置为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,以某冷库目前配备的某品牌冷风机风扇的实际参数进行入口边界条件设置,采用速度入口边界,入口风速为 2.76 m/s ,送风温度为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,以紊动程度与特征粒径作为紊动程度,其中紊动程度取 5% ,水力直径为 0.5 m ,出口边界采用流速加权为 1 m/s 。风机通风道采用的是钢铁材质,冷藏库房墙面材料为聚氨酯,密度为 35 kg/m^3 ,热导率为 $0.024\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$,比热为 $1.38\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。库内堆放货物苹果的密度为 600 kg/m^3 ,比热为 $920\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,热导率为 $0.6\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。边界条件为第一种类型的边界条件,恒定温度为初始条件。

2 制冷效果影响因素

分别取 XY、YZ、XZ 截面来进行数值模拟结果温度场的分析说明。在冷库中央选取一个位置,用来监测温度。具体截面位置如图 5 所示。

2.1 堆垛方式对制冷效果的影响

对不同堆垛方式在功率、送风温度、空冷器运行时间等相同工况下的制冷过程进行数值模拟分析,对比不同堆垛方式的温度分布及空气流动轨迹分布。

堆垛方式对冷库内的流场和温度场有一定的影响。图 6 为货框横置,冷库运行 15 min 后部分区域的最高温度为 $2.030\text{ }^{\circ}\text{C}$,截面的平均温度为 $2.016\text{ }^{\circ}\text{C}$,整体平均库温为 $2.014\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 7 为货框竖置,冷库运行 15 min 后部

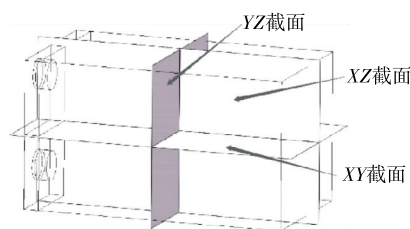


图 5 XY、YZ、XZ 截面示意图

Figure 5 Schematic diagram of XY, YZ, XZ sections

分区域的最高温度为 $2.010\text{ }^{\circ}\text{C}$,截面的平均温度为 $2.007\text{ }^{\circ}\text{C}$,整体平均库温为 $2.006\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在堆垛方式为竖置和横置情况下,冷库制冷后的截面温度和整体库温,部分区域的最高温度都符合冷库工作温度,满足苹果的贮藏条件。通过分析相同截面的温度云图和中心监测点及冷库库温变化曲线如图 8 所示,两种放置情况下冷库中心监测点的温度变化曲线基本一致。竖置堆放可以放置 180 个货框,横置堆放只能放置 162 个货框,为实现冷库空间利用最大化,故选择货框竖置的堆垛方式。

2.2 送风功率对制冷效果的影响

选择竖置堆垛方式的满载模型进行不同功率下的数值模拟,分别取送风功率为 100% 、 70% 、 50% 、 40% 、 30% 进行模拟,冷库的其他条件保持不变,运行 15 min ,对库内的温度场进行数值模拟,并对截面平均温度和冷库整体温度进行分析。

冷库在不同送风功率下制冷 15 min 后的温度分布云图如图 9~图 13 所示。不同送风功率下冷库温度情况如表 1 所示。由温度分布云图可知,库内靠近送风口和出风口的区域温度约为 $2.000\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷库底部和中部温度偏高。送风功率大于 50% ,整体平均温度在 $2.410\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;

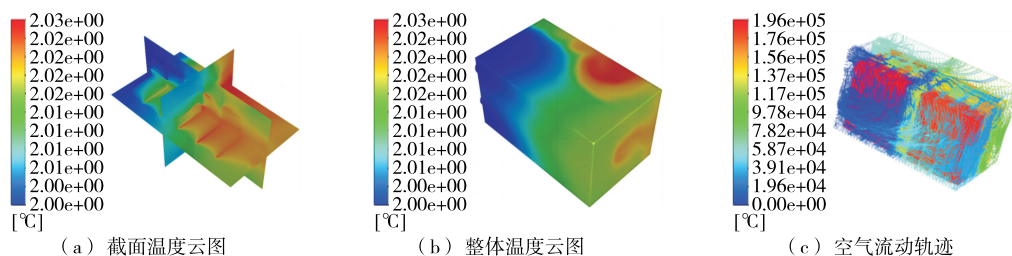


图 6 货物横置下的温度分布及空气流动轨迹分布

Figure 6 Temperature distribution and air flow trajectory distribution under transverse cargo

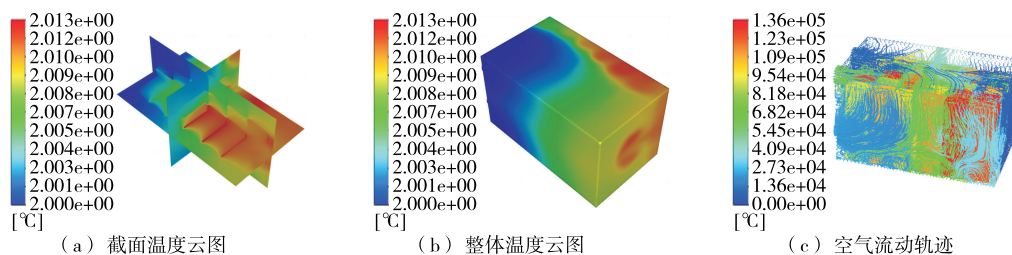


图 7 货物竖置下的温度分布及空气流动轨迹分布

Figure 7 Temperature distribution and air flow trajectory distribution under vertical cargo

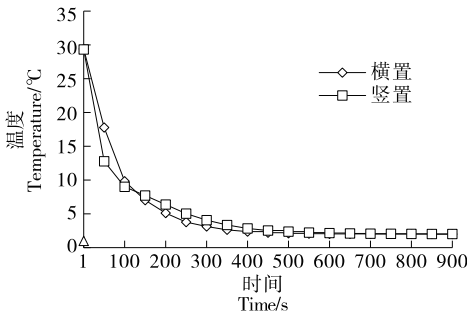


图 8 不同放置形式的温度变化

Figure 8 Temperature change of different placement forms

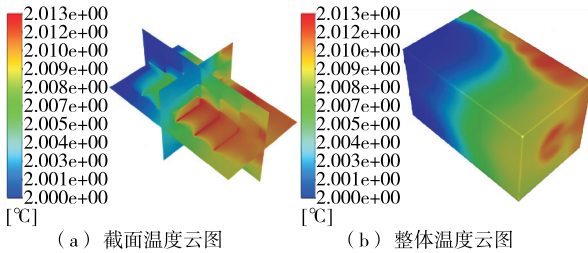


图 9 100%功率时温度分布云图

Figure 9 Cloud chart of temperature distribution at 100% power

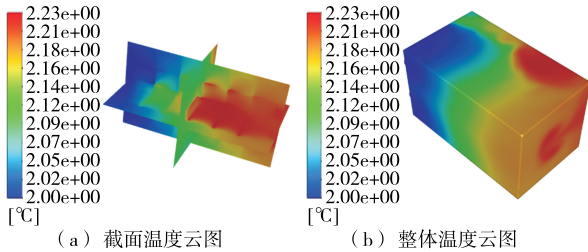


图 10 70%功率时温度分布云图

Figure 10 Cloud chart of temperature distribution at 70% power

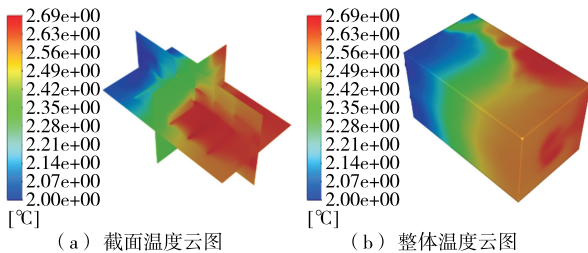


图 11 50%功率时温度分布云图

Figure 11 Cloud chart of temperature distribution at 50% power

送风功率为 40%,30%时,整体平均温度分别为 2.680, 3.136 °C。由表 1 可知,送风功率越大,整体平均温度越低,越接近送风温度。

冷库不同送风功率的温度变化趋势如图 14 所示,运行 15 min 后,100%,70%,50%功率都达到了冷库工作

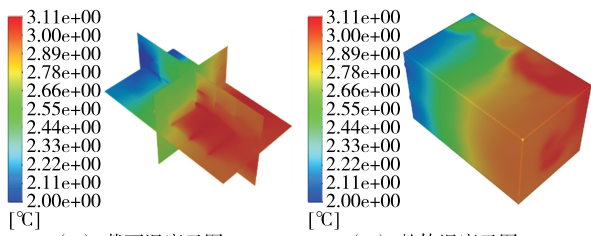


图 12 40%功率时温度分布云图

Figure 12 Cloud chart of temperature distribution at 40% power

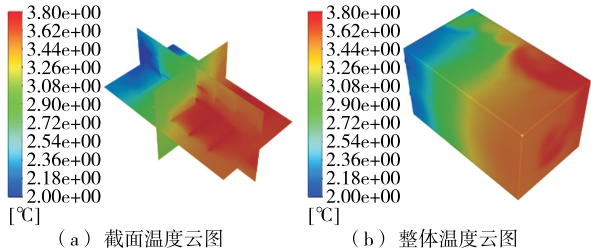


图 13 30%功率时温度分布云图

Figure 13 Cloud chart of temperature distribution at 30% power

表 1 不同送风功率库温

Table 1 Temperature table of different supply air power library

送风风扇 功率/%	截面平均 温度/°C	整体平均 温度/°C	局部最高 温度/°C	是否符合 设计要求
100	2.007	2.006	2.010	是
70	2.136	2.129	2.230	是
50	2.429	2.410	2.690	是
40	2.706	2.680	3.110	否
30	3.170	3.136	3.800	否

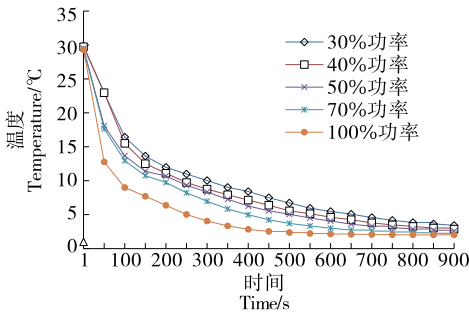


图 14 不同送风功率监测点温度变化趋势

Figure 14 Temperature change trend of central monitoring point under different air supply power

温度在(2.0±0.5) °C 的设计要求,也符合苹果贮藏的温度范围,40%,30%功率下的整体平均温度和局部平均温度与设计要求的相差较大,均未达到设计要求。故选择功率为 50%的风机即可满足设计要求。

3 试验验证

以某移动冷库为对象进行试验验证。该冷库的实际尺寸为 4.5 m×2.5 m×2.5 m,与冷库模型尺寸一致,风机风量为 7 800 m³/h。考虑到试验成本等因素,进行空库试验来验证仿真结果的准确性。

通过冷库内的温度传感器与上位机 PC 端进行串口通信,下位机连接温度传感器进行整个冷库内部的温度实时数据采集,采样频率为 25 s/次。将冷库中心的测试点的真实温度和仿真温度进行对比分析,见图 15。试验时初始库温为 31.8 ℃,实际测量温度和数值模拟温度变化曲线基本呈下降趋势,最大温度误差为 1.7 ℃,数据曲线的拟合度 $R^2=0.76$ 。冷库运行 15 min 后,冷库内实际温度为 2 ℃,数值模拟温度为 2.010 ℃,说明模拟值与试验值相吻合。试验结果表明,运用有限元法可以准确模拟冷库的温度变化情况。

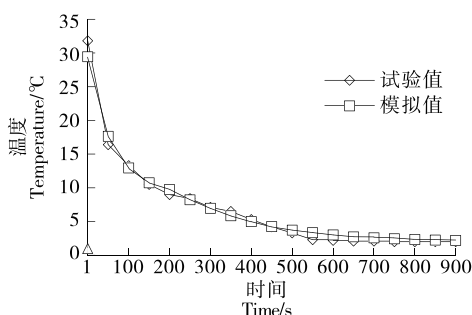


图 15 试验值与模拟值温度变化趋势

Figure 15 Temperature variation trend of experimental value and analog value

4 结论

以移动冷库为研究对象,运用数值模拟仿真与试验相结合的方式研究了冷库的制冷过程,探究了不同堆垛方式和冷风机不同送风功率对货物贮藏温度、制冷时间的影响。结果表明,采用货框竖置的堆垛方式可以实现空间利用最大化。研究对象冷库配备的冷风机功率选型过大,50%功率即可满足设计要求,通过模拟仿真可以准确地反映冷库制冷过程。但研究中,只考虑了冷库制冷过程中的部分因素,未考虑制冷剂的温度、压缩机运行发热的影响,且试验箱型和对象单一,在后续的研究中可以考虑制冷剂温度、压缩机运行热量、不同箱型对不同果蔬制冷的影响。

参考文献

[1] 徐佳梅. 冷链物流园区的现状与发展[J]. 中国储运, 2016(8): 52-53.
XU J M. Current situation and development of cold chain logistics park[J]. China Storage & Transportation, 2016(8): 52-53.
[2] 尹庆珍, 王国华, 韩建会, 等. 我国蔬菜低温冷库的发展现状及

展望[J]. 河北农业科学, 2008(8): 84-85.

YIN Q Z, WANG G H, HAN J H, et al. Development situation and prospect of vegetable low temperature refrigerator in china[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008(8): 84-85.
[3] 谢晶, 瞿晓华, 徐世琼. 冷藏库内气流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2005(2): 11-16.
XIE J, QU X H, XU S Q. Numerical simulation and verification of airflow in cold-store[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005(2): 11-16.
[4] NELSON J, JOHNSON N G, CHINIMILLI P T, et al. Residential cooling using separated and coupled precooling and thermal energy storage strategies[J]. Applied Energy, 2019, 252: 113414.
[5] 谢晶, 汤毅, 王金锋, 等. 三维流体力学预测风机不同布置形式对冷库气流的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(11): 349-351, 419.
XIE J, TANG Y, WANG J F, et al. Computational fluid dynamics simulation of influence of different arrangements of fans to the cold store[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(11): 349-351, 419.
[6] DELELE M A, NGCOBO M, GETAHUN S, et al. Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model Part I: Model development and validation[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 86: 536-545.
[7] 杨磊, 汪小昆. 冷藏库预冷降温过程中温度场的数值模拟与试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008(9): 219-223.
YANG L, WANG X C. Numerical simulation on temperature filed of a mini type cold store[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2008(9): 219-223.
[8] NAHOR H, HOANG M, VERBOVEN P, et al. CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 368-380.
[9] 白通通, 南晓红, 金宝红, 等. 竖壁贴附送风改善冷藏库内流场特性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 331-337.
BAI T T, NAN X H, JIN B H, et al. Improvement on characteristics of air flow field in cold storagewith vertical wall attached ventilation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 331-337.
[10] 汤毅, 谢晶, 王金锋, 等. CFD 预测风机摆设形式对冷库的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 124-128.
TANG Y, XIE J, WANG J F, et al. CFD simulation of airflow distribution with different arrangements of fan though a cold store[J]. Food & Machinery, 2012, 28(1): 124-128.
[11] 张铭, 艾字, 张少杰, 等. 冷库不同布置方案对冷库温度均匀性的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(2): 210-221.
ZHANG M, AI Y, ZHANG S J, et al. Influence of different layout scheme on temperature uniformity of cold storage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(2): 210-221.

(下转第 161 页)

- of Chemical and Pharmaceutical Research, 2016, 8: 46-55.
- [25] BASHMIL Y M, ALI A, BK A, et al. Screening and characterization of phenolic compounds from Australian grown bananas and their antioxidant capacity[J]. Antioxidants, 2021, 10: 1 521.
- [26] LI D N, MENG X J, LI B. Profiling of anthocyanins from blueberries produced in China using HPLC-DAD-MS and exploratory analysis by principal component analysis[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2016, 47: 1-7.
- [27] CASTAGNINI J M, BETORET N, BETORET E, et al. Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 1 289-1 296.
- [28] AXELLE S M, GIOVEDIE S, ELISABETH D, et al. Evaluation of nutritional and antioxidant properties of the tropical fruits banana, litchi, mango, papaya, passion fruit and pineapple cultivated in Réunion French Island[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 225-233.
- [29] 王娟, 谢静, 张伟, 等. 香蕉皮中6种多酚的HPLC检测及制备工艺研究[J]. 食品工业, 2016, 37(3): 187-190.
- WANG J, XIE J, ZHANG W, et al. Determination and preparation of six polyphenols in banana peel by HPLC method and the influence of extraction condition on components' contents[J]. Food Industry, 2016, 37(3): 187-190.
- [30] HAGERMAN A E, RIEDL K M, JONES G A, et al. High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46: 1 887-1 892.
- [31] RICE-EVANS C, MILLER N, PAGANGA G. Antioxidant properties of phenolic compounds [J]. Trends in Plant Science, 1997, 2(4): 152-159.
- [32] CARDULLO N, MUCCILI V, PULVIRENTI L, et al. C-glucosidic ellagitannins and galloylated glucoses as potential functional food ingredients with anti-diabetic properties: A study of α -glucosidase and α -amylase inhibition[J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126099.
- [33] ABDENNACER B, KARIM M, YASSINE M, et al. Determination of phytochemicals and antioxidant activity of methanol extracts obtained from the fruit and leaves of Tunisian *Lycium intricatum* Boiss[J]. Food Chemistry, 2014, 174: 577-584.
- [34] LI H B, WONG C C, CHENG K W, et al. Antioxidant properties in vitro and total phenolic contents in methanol extracts from medicinal plants[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41 (3): 385-390.
- [35] NI M T, HU X, GONG D M, et al. Inhibitory mechanism of vitexin on α -glucosidase and its synergy with acarbose [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105824.
- [36] WU M X, YANG Q X, WU Y W, et al. Inhibitory effects of acorn (*Quercus variabilis* Blume) kernel-derived polyphenols on the activities of α -amylase, α -glucosidase, and dipeptidyl peptidase IV [J]. Food Bioscience, 2021, 43(4): 101224.

(上接第138页)

- [12] 韩馨仪, 赵松松, 刘斌, 等. 分体式空调室内气流组织 CFD 仿真优化[J]. 制冷与空调, 2021, 21(11): 41-45.
- HAN X Y, ZHAO S S, LIU B, et al. CFD simulation and optimization of indoor air flow organization in split air conditioning[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2021, 21(11): 41-45.
- [13] 王少鹏, 张益诚, 罗君, 等. 基于空气制冷系统的高密度冷库降温-维持工况仿真计算特性分析[J]. 船海工程, 2022, 15(5): 37-41.
- WANG S P, ZHANG Y C, LUO J, et al. Simulation calculation of cooling and maintenance condition of high density cold storage based on air refrigeration system[J]. Ship & Ocean Engineering, 2022, 15(5): 37-41.
- [14] 段宇飞, 寿旭日, 童欢, 等. 船用高温冷库气流组织对温度分布的影响[J]. 船舶工程, 2021, 43(12): 126-131, 171.
- DUAN Y F, SHOU X R, TONG H, et al. Effect of air distribution on temperature distribution in marine high temperature cold storage[J]. Ship Engineering, 2021, 43(12): 126-131, 171.
- [15] 沈希, 王晓燕, 黄跃进, 等. 制冷压缩机变工况运行的热力性能研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(6): 15-19.
- SHEN X, WANG X Y, HUANG Y J, et al. Thermodynamic performance of refrigeration compressor running at variable condition[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(6): 15-19.
- [16] 张晟, 张晓虎, 赵亮, 等. 基于 Ergun 方程的菱镁球团填充床层阻力特性实验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 347-352.
- ZHANG S, ZHANG X H, ZHAO L, et al. Experiment of resistance characteristics for magnesite pellets packed bed based on ergun equation[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(3): 347-352.

(上接第152页)

- [31] YI R K, WEI Y X, TAN F G, et al. Antioxidant capacity-related preventive effects of Shoumei (slightly fermented *Camellia sinensis*) polyphenols against hepatic injury [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2020, 2 020(19): 1-17.
- [32] 蒋丽, 殷劲. 当归红花汤对糖酵解供能条件下力竭性游泳训练小鼠耐缺氧能力、抗疲劳能力的影响[J]. 中国老年学杂志, 2013, 33(18): 4 492-4 494.
- JIANG L, YIN Q. Effects of Danggui Honghua decoction on hypoxia tolerance and fatigue resistance of exhaustive swimming training mice under glycolysis energy supply condition[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2013, 33(18): 4 492-4 494.