

大型果蔬高架库数值模拟及试验研究

石林¹ 郭凯¹ 谢晶² 李庆才¹ 乔俊宇¹

(1. 山东省鲁商冰轮建筑设计有限公司, 山东 济南 250013; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: [目的]探究大型果蔬高架库内部气流组织及温度分布情况并剖析其形成机理。[方法]以某一大型果蔬高架库为研究对象,采用试验测量和CFD数值模拟技术分析冷库内部实际气流组织情况。[结果]堆货区域水平面平均温度随堆货高度的降低而下降,上层高度12.3 m处最高均温为3.05℃,中层高度7.3 m处为2.86℃,下层高度2.3 m处为2.31℃,中上层与中下层温差分别为0.19,0.55℃;该冷库采用屋顶式冷风机+织物风道形式,库内气流组织较均匀,但受货箱阻力作用和织物风道送风卷吸影响,堆货越靠近冷库中间,表面温差越大,且在中间过道的中上部(冷风机回风区域)形成高温区。[结论]该织物风道设计在冷库中实现了较为均匀的气流组织情况,但受货箱密集和呼吸热堆积影响,部分区域冷却效果不佳,且升温非线性需通过优化保温层来节能和提高设备寿命。

关键词:大型果蔬高架库;气流组织;温度分布;数值模拟

Numerical simulation and experimental study of a large fruit and vegetable elevated warehouse

SHI Lin¹ GUO Kai¹ XIE Jing² LI Qingcai¹ QIAO Junyu¹

(1. LSBL Commercial Architectural Design Co., Ltd., Jinan, Shandong 250013, China; 2. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: [Objective] To investigate the air flow organization and temperature distribution inside a large fruit and vegetable elevated warehouse and analyze the formation mechanism. [Methods] Experimental measurement and CFD numerical simulation are performed to analyze the actual air distribution inside a large fruit and vegetable elevated warehouse. [Results] The average temperature of the horizontal plane in the loading area decreases with the decrease in height. The maximum average temperatures of the upper ($H=12.3$ m), middle ($H=7.3$ m), and lower ($H=2.3$ m) layers are 3.05 °C, 2.86 °C, and 2.31 °C, respectively. The temperature differences between the upper and middle layers and between the lower and middle layers are 0.19 °C and 0.55 °C, respectively. The warehouse employs a roof-mounted air cooler combined with a fabric air duct system, with uniform air flow organization. Under the influences of the resistance of the container and the air supply and suction of the fabric air duct, the surface temperature difference is larger for the cargo closer to the middle of the warehouse, and a high-temperature zone is formed in the middle and upper part of the middle aisle (the return air area of the chiller). [Conclusion] The fabric air duct design achieves uniform air flow organization in the warehouse, while the cooling effect in some areas is not satisfactory due to the dense containers and respiratory heat accumulation, and the non-linearity of temperature rise requires the optimization of insulation layer to save energy and improve equipment life.

Keywords: large fruit and vegetable elevated warehouse; air flow organization; temperature distribution; numerical simulation

随着全球人口的增长和消费者对高品质、新鲜果蔬需求的不断提升^[1-4],传统的土建多层冷库已难以满足现代冷链物流对于果蔬贮藏容量、效率及品质保障的要求。

因此,大型高架冷库作为现代果蔬贮藏技术的创新代表,正逐渐成为行业发展的新趋势。孙蕾^[5]利用数值模拟技术对比分析了一18℃低温高架库中的冷风机和织物风道

通信作者:郭凯(1996—),男,硕士。E-mail:1656419088@qq.com

收稿日期:2024-11-03 改回日期:2025-06-20

引用格式:石林,郭凯,谢晶,等.大型果蔬高架库数值模拟及试验研究[J].食品与机械,2025,41(9):130-136.

Citation:SHI Lin, GUO Kai, XIE Jing, et al. Numerical simulation and experimental study of a large fruit and vegetable elevated warehouse[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 130-136.

气流组织,得出织物风道送风的气流组织比冷风机送风的更优。管佳佳等^[6]利用数值模拟技术研究了在果蔬高架库的末端采用每组两台冷风机对吹,冷风机间通过布袋连接送风形式的气流组织,并对织物风道开孔方案进行了优化设计。李艺哲等^[7]采用试验和数值模拟相结合的方法分析了库温为 -23°C 、高度为 3.8 m 、末端采用顶排管的大型冷库的库内温度场。胡耀华等^[8]利用数值模拟技术分析了末端采用冷风机的小型猕猴桃冷库的气流组织。孙秋瑾^[9]利用数值模拟技术分析了不同织物风道开孔方案在小型果蔬库中的气流组织情况。徐竞等^[10]、刘泽勤等^[11]采用试验和数值模拟相结合的方法分析了不同货物堆码形式对小型冷库温度的影响。周丹等^[12]利用数值模拟技术分析了末端为冷风机的 -18°C 高架库中,不同堆货方式对气流组织的影响。李斌^[13]利用数值模拟技术分析了不同截面形式送风管道对小站稻冷库内气流组织的影响。刘康佳等^[14]利用数值模拟技术对比分析了在小型果蔬库中,冷风机送风和织物风道送风的气流组织情况。韩思雨^[15]采用数值模拟技术验证了在小型果蔬库中应用局部顶排管的可行性。芮文琴^[16]利用数值模拟技术对比分析了不同冷风机送风形式在小型装配式冷库中的气流组织情况。梁汉威等^[17]、杨风等^[18]探究了相变蓄冷材料在小型冷库中维持库温稳定的积极影响。综上,现有研究仅仅利用数值模拟技术对小、中型冷库气流组织进行研究分析,且限于试验难度,有关大型果蔬高架库的试验测量尚未见报道。

研究拟针对某个大型果蔬高架库,综合运用试验测量和数值模拟技术,深入剖析库内实际的气流组织状况,并验证所构建数值模型的可靠性,以期为数值模拟技术辅助优化制冷系统设计研究提供依据。

1 试验方法与数值模型

1.1 试验方法

该项目冷库为全自动货架的果蔬高架库,冷库内部净尺寸长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $72.6\text{ m}\times 21\text{ m}\times 22.5\text{ m}$,货位数 $6\,696$ 个,设计库温 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$,末端采用屋顶式冷风机+织物风道的形式。制冷系统采用R507A-R744(CO_2)复叠系统,R507A为高温级制冷剂,R744为低温级制冷剂。该果蔬高架库运营时设置库温下限为 1°C ,库温上限为 3°C ,即冷库平均温度达到下限库温 1°C 时,冷风机停机,待冷库平均温度由于果蔬呼吸热升温到上限库温 3°C 时,冷风机开机向库内送风,冷库平均温度升温—降温曲线在 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 循环振荡。

织物风道为半椭圆形织物风管系统,宽度、高度分别为 $3.0, 0.7\text{ m}$,系统送风段长度为 30 m 。送风模式为渗透

送风和孔口送风的方式,风道与冷风机连接部分设计织物静压箱,使系统送风更加稳定、均衡。织物风道送风参数见表1。

表1 织物风道送风参数表[†]
Table 1 Air supply parameters of fabric air duct

送风部位	总风量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	单孔直径/mm	孔口数量/个
织物渗透	16 800		
射流喷口	16 000	160	14
织物孔口	38 000	8	4 760
末端孔口	5 500	25	250

[†] 风管表面积为 255 m^2 。

果蔬高架库模型如图1所示,需对整个货架区域进行温度监测记录,温度传感器使用德图 Testo 174T 自动型温度记录仪,温度测量范围为 $-30\sim +70^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,数据记录时间间隔为 1 min ,持续 24 h 。试验当天冷库内存货量仅存满7层货架,存货高度为 14.25 m ,将存货货架划分为货架A、货架B、货架C和货架D 4个区域。为测量存货区域温度场情况,将水平高度方向分为3个截面,分别为存货区域的低、中、高,截面相距 5 m ,截面高度分别为 $2.3, 7.3, 12.3\text{ m}$;长度方向分为5个截面,截面相距 17 m ,分别为垂直截面1~5,均分整个货架空间;宽度方向分为3个方向,截面相距 9 m ,分别布置在A、B、C 3个过道中,共45个温度测点(见图2)。

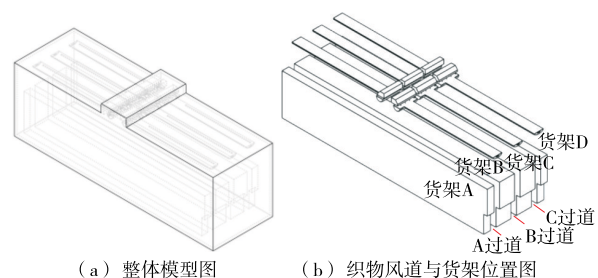


图1 果蔬高架库模型图

Figure 1 Model of the fruit and vegetable elevated warehouse

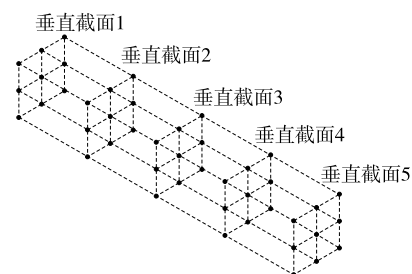


图2 温度测点分布图

Figure 2 Distribution of temperature measuring points

1.2 CFD 数值模型

为计算冷库内气流场,需对模拟对象作出以下假设:

(1) 冷库内空气不可压缩,密度符合 Boussinesq 假设。

(2) 货物物性参数恒定。

(3) 忽略货架结构本身对冷库气流场的影响。

(4) 货架区域按照多孔介质模型处理。

(5) 忽略太阳运动轨迹对冷库壁面传热的影响。

冷库降温—升温过程需遵循以下控制方程。

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0, \tag{1}$$

式中:

ρ ——密度,kg/m³;

$\vec{u}$ ——速度矢量;

t ——时间,s。

(2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = \text{div}(\mu \text{grand}u) - \frac{\partial \rho}{\partial x} + S_u, \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = \text{div}(\mu \text{grand}v) - \frac{\partial \rho}{\partial y} + S_v, \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = \text{div}(\mu \text{grand}w) - \frac{\partial \rho}{\partial z} + S_w, \tag{4}$$

式中:

S_u, S_v, S_w ——动量方程 x, y, z 方向的源项。

该冷库使用货箱堆放在货架上,货箱间存在间隙,由于该冷库货位较多,为了降低数值计算难度,将存货区域使用多孔介质模型进行处理。当冷空气在货箱间流动时会受到箱体的阻力作用,该阻力包括黏性阻力和惯性阻力,并按式(5)进行计算。

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho v' v_i\right), \tag{5}$$

式中:

S_i ——第 i 个动量方程中的源项;

M ——空气有效动力黏度,Pa·s;

v_i —— x, y, z 各方向的速度分量,m/s;

$\frac{1}{\alpha}$ ——黏性阻力系数,m⁻²;

C_2 ——惯性阻力系数,m⁻¹;

P ——空气密度,kg/m³;

v' ——空气速度,m/s。

孔隙率和当量直径分别按式(6)、式(7)进行计算。

$$\epsilon = 1 - \frac{V_p}{V_b}, \tag{6}$$

$$D = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}, \tag{7}$$

式中:

ϵ ——孔隙率;

V_p ——货物实际的体积,m³;

V_b ——整个货物区的体积,m³;

D ——当量直径,m;

V ——颗粒体积(将货箱看成球体体积计算),m³。

根据 Ergun 方程得到黏性阻力系数 $\frac{1}{\alpha}$ 和惯性阻力 C_2

系数:

$$\alpha = \frac{D^2 \epsilon^3}{150(1 - \epsilon)^2}, \tag{8}$$

$$C_2 = \frac{3.5(1 - \epsilon)}{D \epsilon^3}, \tag{9}$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T \vec{u}) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grand}T\right) + S_T, \tag{10}$$

式中:

S_T ——能量方程的源项。

模型主要边界条件见表 2。

表 2 数值模拟参数表

Table 2 Numerical simulation parameters		
类型	单位	数值
壁面传热量	W/m ²	2.1(东墙)、7.1(南墙)、4.5(西墙)、7.1(北墙)、4.1(地面)、8.2(屋面)
热源	W/m ³	3
密度	kg/m ³	500
比热	(J·kg)/K	2 800
热导率	W/(m ² ·K)	0.4
货物初始温度	℃	7
每托质量	kg	800
送风温度	℃	-1

2 验证与分析

2.1 CFD 数值模型可靠性验证

由表 3 和图 3 可知,试验与模拟的周期误差为 20.79%,最高温度误差为 0.95%,最低温度误差为 3.98%,各项误差较小,说明该数值模型具有可靠性,可以较好地描述该项目冷库的气流场。

表 3 误差对比表

Table 3 Error comparison			
项目	周期误差/min	最高温度误差/℃	最低温度误差/℃
模拟值	215	2.707	1.110
试验值	178	2.733	1.156
差值	37	0.026	0.046
百分比/%	20.79	0.95	3.98

各项误差产生的原因有:①果蔬呼吸热波动,库存果蔬种类繁多,不同品类、不同冷却批次呼吸热差异显著且呼吸热随温度实时变化。数值模型虽通过加权平均简化处理,但难以完全复现实测呼吸热的动态波动。②试验过程中,风机再次开启时,机组设计蒸发温度需要一定的运行时间才能达到,造成试验降温速率较慢。③货架操作干扰,试验期间偶有自动货架升降车运行,其电机散热量(约50~100 W/次)及气流扰动未被模型计入。④冷库平均温度通过离散测点(45个)插值得出,而实际温度场存在局部非均匀性,可能导致试验曲线平滑化。冷风机启停阈值(下限库温1℃,上限库温3℃)受控于库内平均温度,但局部高温区(如中间过道)可能提前触发制冷系统响应,加剧试验与模拟的周期差异。

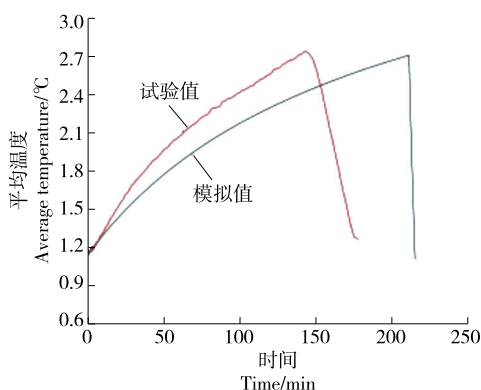


图3 冷库平均温度的试验值与模拟值对比

Figure 3 Comparison between the measured and simulated average temperatures of the warehouse

2.2 试验与模拟结果分析

由图4可知,当库温降至预设的最低阈值时,冷风机停机,由于货物呼吸热以及围护结构传热的影响,冷库温度开始升高,最后达到预设的最高阈值时,冷风机开机,冷库温度开始下降,循环往复。冷库平均温度升温为非线性过程,温度升高过程中斜率逐渐减小,而冷库降温趋近于线性过程,斜率固定不变。这是因为升温过程中,冷库内部与外部环境的温差逐渐减小,通过围护结构的传热速率降低,导致升温曲线越来越平缓,降温过程中风机以固定功率送风,降温速率基本不变。

冷库升温持续时间为140 min,降温持续时间为32 min,在24 h工作时间内,风机需要启停9次,单台风机用电功率为13 kW,共使用6台冷风机,得到该果蔬高架库每日耗电量为348.3 kW·h。因此,可以通过优化冷库保温层厚度来降低围护结构传热,增大冷库平均温度循环曲线的单个周期时间,进一步减少风机启停次数和开启时间,提高风机寿命和节能效果。

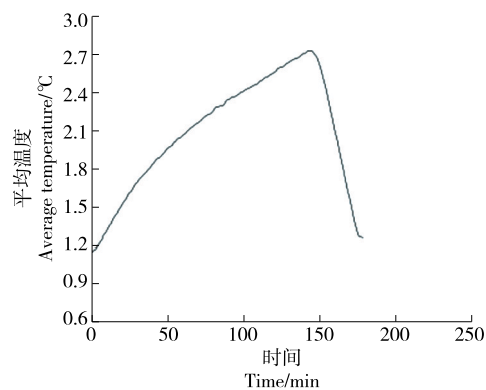


图4 冷库平均温度的升温—降温循环曲线

Figure 4 Rising-declining curve of the average temperature in the warehouse

由图5可知,在果蔬高温库升温—降温循环过程中,货架上、中、下区域平均温度整体随着堆货高度的降低而降低,货架上层12.3 m处水平面最高平均温度为3.05℃,中层7.3 m处水平面最高平均温度为2.86℃,下层2.3 m处水平面最高平均温度为2.31℃,中上层、中下层温差最大分别为0.19、0.55℃,这是因为织物风道上射流喷口、织物孔口和末端孔口3个送风部位的孔径较大、风速较快,织物风道送出的大部分冷风通过货架过道及货架与保温墙之间的间隙到达货架底部,将货物呼吸热经由货架中上部带回风机回风口,货架过道及货架与保温墙之间的间隙阻挡物少,阻力小,底部冷风流速快,降温速度快,货架内部货箱密集,阻力大,中上部冷风流速慢,降温速度低,造成货架区域中上层与中下层温差较大,表明该织物风道射流喷口、织物孔口和末端孔口3个送风部位对堆货区域下部冷却效果较好,而织物渗透送风部位对冷库中上部的辅助降温效果较差。

由图6可知,当水平高度为12.3、7.3、2.3 m时,A过道

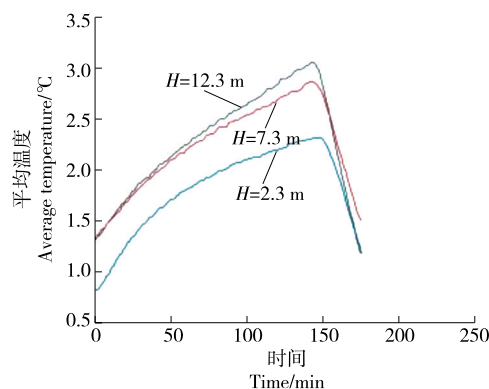


图5 货架区域不同高度水平面平均温度曲线图

Figure 5 Average temperature curves of horizontal planes at different heights of the shelf area

内温度分别为 1.84, 2.13, 1.70 °C, B 过道内温度分别为 2.15, 2.17, 1.53 °C, C 过道内温度分别为 1.85, 2.30, 1.88 °C。3 个过道内, 整体呈现中部温度高、上部温度次之、下部温度最低的特征, 这是因为织物风道上射流喷口、织物孔口和末端孔口 3 个送风部位能够将大部分冷风以较高流速送至货架底部, 底部降温效果最好, 底部温度最低, 织物渗透送风部位对货架上部起到辅助降温功能, 而货架中部由于货箱对冷风有较大阻力, 且由于货物呼吸热的堆积, 造成中部降温效果最差, 温度最高。

在过道 B 内, 底部水平面高度 2.3 m 处温度为 1.53 °C, 为 3 个过道内最低; 上部水平面高度 12.3 m 处温度为 2.15 °C, 为 3 个过道内最高。由图 7 和图 8 可知, 在中间过道 B 内的中上部有明显的高温区域且风速较低, 这是由于货箱对于冷风的阻碍作用, 以及并列排布的织物风道上织物孔口送风相互卷吸的影响, 造成过道 B 内中上部经过的冷风较少, 形成局部高温区。

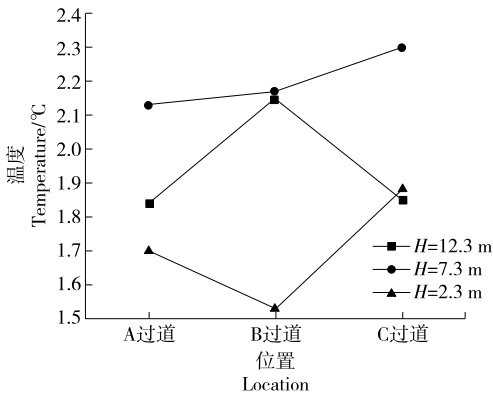


图 6 过道内货架区域不同高度的温度分布图
Figure 6 Temperature distribution in aisles at different shelf heights

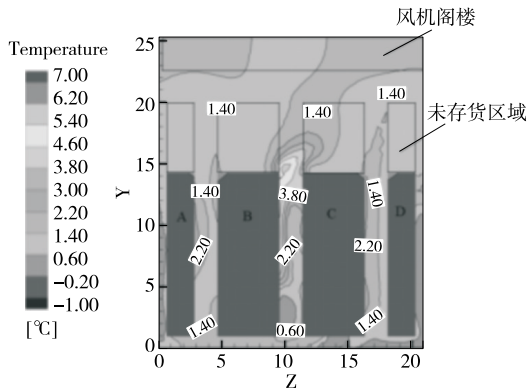


图 7 垂直截面 3 的温度分布云图
Figure 7 Temperature distribution cloud image of vertical cross-section 3

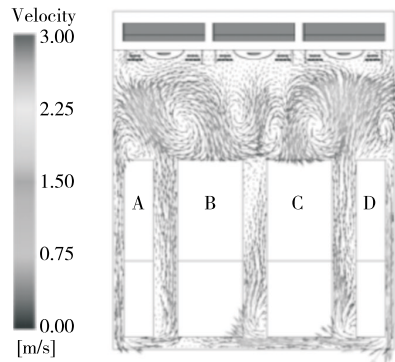


图 8 垂直截面 3 的速度矢量云图
Figure 8 Velocity vector cloud image of vertical cross-section 3

图 9 为冷库平均温度为最低值时, A、B、C 3 个过道及货架外侧狭小空间内的气流场温度分布云图。5 个截面的温度分布整体呈对称分布, 冷库气流场温度分布较均匀, 这是因为该冷库采用的屋顶式冷风机+织物风道设计, 末端对称放置, 织物风道使冷库流场范围更广、更均匀。

5 个截面温度云图中, 越靠近外墙保温层, 平均温度越低; 越靠近冷库中间, 平均温度越高, 直至中间过道的截面 C 中的冷风机回风区域有明显的高温区域。这是因为货架越靠近冷库中间, 货箱越密集, 冷风受到的阻力越大, 风速越低, 降温速度越慢, 且货物呼吸热的堆积范围越大, 造成局部高温, 形成货架越靠近冷库中间平均温度越高的情况。

冷库中间过道的回风区域出现高温区, 是因为冷风机以对称形式放置, 回风区域内织物风道织物渗透送风难以影响到, 只能依靠其他送风部位在冷库内形成的涡旋流场来冷却降温, 涡旋流场受到货箱阻力和呼吸热堆积的影响, 在回风区域很难形成有效的冷却效果, 造成冷风机回风区域高温的形成。

图 10 为冷库平均温度升温—降温循环过程中, 冷库平均温度为最低值时, 货架 A 与货架 C 表面温度分布云图的左、右视图。由图 10 可知, 货架 A 的温度分布较均匀, 最低温度为 2.56 °C, 最高温度为 5.33 °C, 温差为 2.77 °C; 货架 C 的温度分布在过道 B 内的中上部区域出现高温区, 最低温度为 2.56 °C, 最高温度为 6.44 °C, 温差为 3.88 °C。货架 A 比货架 C 更靠近墙体保温层, 织物风道将冷风通过货架与保温间隙送到货架底部, 阻力小、流速快, 货物冷却速度快, 表面温度分布更均匀, 而货架 C 位于冷库中间, 货箱密集, 冷风从货架底部向上部流动时阻力大, 降温速度慢, 且由于货架上部织物风道织物孔口送风的卷吸作用, 造成局部风量少, 导致货架 C 的中上部形成局部高

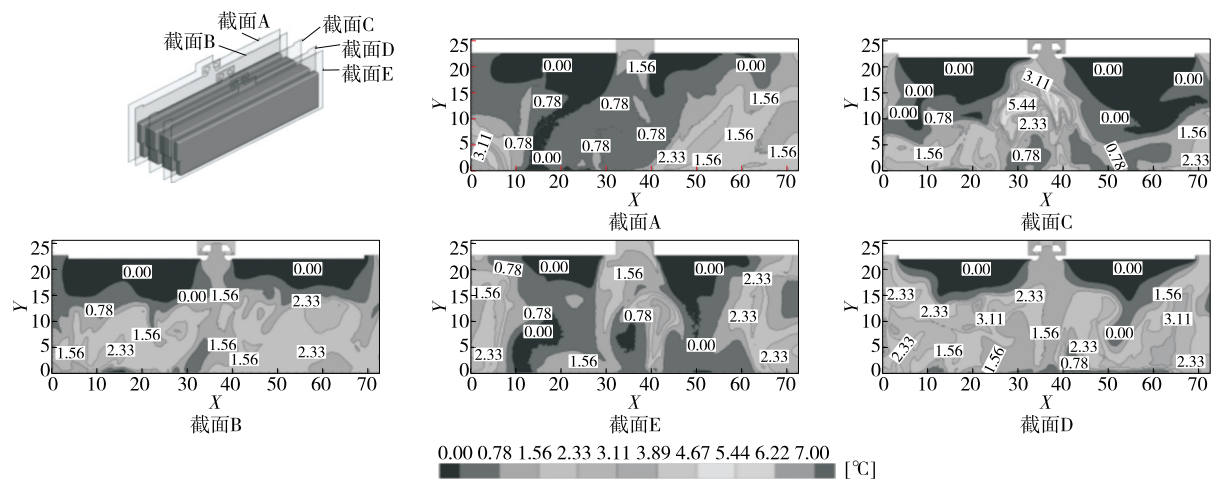


图9 过道内气流场温度分布云图

Figure 9 Cloud images of temperature distribution of the airflow field in aisles

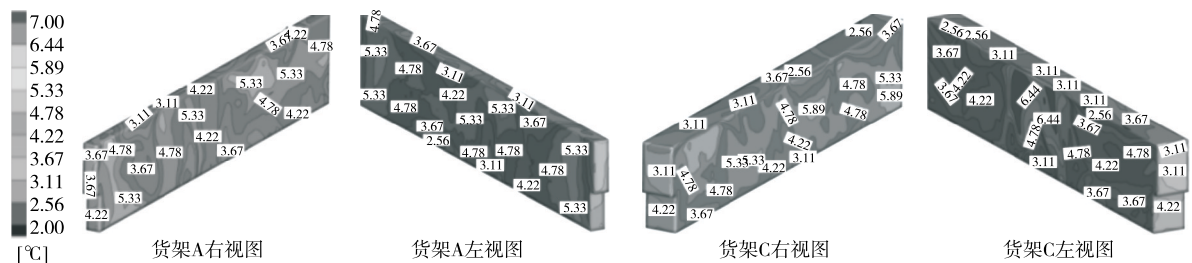


图10 货架A、C表面温度分布云图

Figure 10 Temperature distribution cloud images of shelves A and C

温区。

3 结论

综合运用试验测量和数值模拟技术,剖析了实际运营中的大型果蔬高架库的气流组织情况。结果表明:

- ① 冷库采用屋顶式冷风机+织物风道设计,气流场温度分布较均匀。靠近外墙保温层区域温度较低,而靠近冷库中间区域温度较高,中间过道回风区域出现高温区。
- ② 堆货区域水平面平均温度随着堆货高度的降低而降低,中上层与中下层温差较大。此外,织物风道织物渗透对冷库上部的辅助降温效果较差。
- ③ 冷库在升温过程中表现出非线性特性,降温过程则趋近于线性。通过优化保温层厚度可以降低传热,延长温度循环周期,减少风机启停次数,提高风机寿命并实现节能。
- ④ 试验受限于实际冷库运营中货物种类繁多、自动货架运行散热等复杂因素,数值模型的精度存在一定局限,后续将引入动态呼吸热修正模块和货架操作干扰量化模块,进一步提高模型对实际工况的模拟准确性。

参考文献

[1] 张平,陈绍慧.我国果蔬低温贮藏保鲜发展状况与展望[J].制

冷与空调,2008,8(1):5-10.

ZHANG P, CHEN S H. Prospects and development situation in low temperature storage for fruit and vegetable in China[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2008, 8(1): 5-10.

[2] 袁娇,叶红雨.我国水果产业冷链物流发展的问题分析及优化建议[J].物流科技,2024,47(1):170-173.

YUAN J, YE H Y. Problem analysis and optimization suggestions for the development of cold chain logistics in Chinese fruit industry[J]. Logistics Sci-Tech, 2024, 47(1): 170-173.

[3] 王文生,杨少桢,同师杰.我国果蔬冷链发展现状与节能降耗主要途径[J].保鲜与加工,2016,16(2):1-5.

WANG W S, YANG S H, YAN S J. Development status of fruits and vegetables cold chain and main ways of saving energy and reducing consumption in China[J]. Storage and Process, 2016, 16(2): 1-5.

[4] 杨智康,杨大章,谢晶,等.冷库低碳新技术研究进展[J].食品与机械,2023,39(1):221-227.

YANG Z K, YANG D Z, XIE J, et al. Research progress of novel low-carbon technologies in cold storages[J]. Food & Machinery, 2023, 39(1): 221-227.

[5] 孙蕾.高架冷库气流组织模拟分析[D].沈阳:沈阳工业大学,

- 2021: 27-36.
- SUN L. Study on simulation research on airflow organization of elevated cold storage[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021: 27-36.
- [6] 管佳佳, 王斌. 高架立体冷库 CFD 数值模拟分析及设计优化[J]. 冷藏技术, 2021, 44(3): 45-50.
- GUAN J J, WANG B. Case study of highrise cold storage CFD numerical simulation and design optimization[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2021, 44(3): 45-50.
- [7] 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, 179.
- LI Y Z, XIE J. Numerical simulation and optimization on temperature field in large cold store[J]. Food & Machinery, 2017, 33(6): 139-142, 179.
- [8] 胡耀华, 蒋国振, 熊来怡, 等. 猕猴桃冷库内流场的 CFD 模拟[J]. 农机化研究, 2012, 34(5): 155-159.
- HU Y H, JIANG G Z, XIONG L Y, et al. Flow field simulation of cold storehouse for kiwi fruit based on CFD[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(5): 155-159.
- [9] 孙秋瑾. 纤维织物风管在果蔬冷藏库中应用的优化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022: 49-70.
- SUN Q J. Optimization study on application of fibre air duct in fruit and vegetable cold storage[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022: 49-70.
- [10] 徐竞, 王峰, 谭振华, 等. 堆垛方式及送风功率对冷库制冷效果的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(12): 133-138, 161.
- XU J, WANG F, TAN Z H, et al. The influence of stacking mode and air supply power on cooling effect of cold storage[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 133-138, 161.
- [11] 刘泽勤, 刘丽芳, 徐静. 冷藏库堆码间距对库内温湿度场的影响研究[J]. 低温与超导, 2020, 48(10): 79-84, 95.
- LIU Z Q, LIU L F, XU J. Study on the influence of stacking space on temperature and humidity fields in cylindrical and conical cold storage[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(10): 79-84, 95.
- [12] 周丹, 元爱民, 李爽, 等. 货堆对下吹风式立体库气流组织影响的 CFD 模拟[J]. 制冷与空调, 2016, 16(1): 35-40.
- ZHOU D, YUAN A M, LI S, et al. Numerical simulation on effects of stacks on flow distribution in solid cold storage with down flow air coolers[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2016, 16(1): 35-40.
- [13] 李斌. 冷库内流场的数值模拟与优化研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2021: 28-43.
- LI B. Research on numerical simulation and optimization of flow field in cold storage[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2021: 28-43.
- [14] 刘康佳, 刘广海, 唐海洋, 等. 风机送风和纤维织物风管送风的研究和比较[J]. 制冷与空调, 2019, 19(2): 19-23.
- LIU K J, LIU G H, TANG H Y, et al. Research and comparison of air supply for fan and fiber fabric[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2019, 19(2): 19-23.
- [15] 韩思雨. 局部顶排管恒温果蔬库的气流组织研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2021: 32-42.
- HAN S Y. Research on airflow organization of constant temperature fruit and vegetable cold storage with partial top row pipe[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2021: 32-42.
- [16] 芮文琴. 小型装配式冷库库内气流组织与数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2012: 33-39.
- RUI W Q. Flow field and numerical simulation of the mini-panel assembled cold storage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012: 33-39.
- [17] 梁汉威, 陈观生, 谢健, 等. 不同封装结构相变蓄冷板用于冷藏库数值模拟研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 135-139.
- LIANG H W, CHEN G S, XIE J, et al. Numerical simulation of phase change cold storage plates with different packaging structures used in cold storage[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 135-139.
- [18] 杨凤, 刘清江, 宋瑞亭, 等. 顶置蓄冷板对冷库融霜时库温波动的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(12): 85-89.
- YANG F, LIU Q J, SONG R T, et al. Effect of overhead cool storage plate on the storage temperature fluctuation in the cold storage during defrosting[J]. Food & Machinery, 2020, 36(12): 85-89.