doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.040

冷藏运输厢内流场和温度场协同控制*

翁卫兵[1]　房殿军[2,3]　李　强[1]　曹淼龙[1]　吴　坚[1]　徐　兴[1]

(1.浙江科技学院食品物流装备技术研究省重点实验室,杭州 310023;
2.德国弗劳恩霍夫物流研究院生产物流部,多特蒙德 44227;
3.同济大学中德学院,上海 200092)

摘要:基于杨梅多孔介质特征推导热传导平衡方程,在冷藏车厢物理模型中分析了流场的流动特性,得到了车厢内各横、纵截面的流场和温度场的分布状况。采用协同控制车门右侧顶部隔热气帘风机,使其风向垂直于等温线方向间歇性定速运行,实车温度数据采集显示横截面最高温度由 3.8℃降至 1.67℃,在沿长度方向截面 3 层中温度标准差最大值为 0.387。结果表明,仅调节冷风机转速无法有效改善温度均匀分布,根据等温线梯度方向和流线切线夹角开启隔热气帘风机协同调节风向,能够有效改善温度场均匀性分布程度。

关键词:冷藏运输车厢　温度场　流场　协同控制

中图分类号:U469.6⁺6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)06-0260-06

引言

冷藏运输过程中,环境温度每升高 10℃,杨梅营养成分中蔗糖损失 10.5% 和总酸消耗 25%,糖酸含量的下降使得果实风味变淡[1]。为尽可能保证杨梅口感和品质的一致性,有效降低损耗率,须严格控制冷藏运输车厢内的温度波动和均匀分布程度[2]。目前,冷藏运输车厢体的气流循环流动控制方式、货物堆码布置等不合理因素使得厢内普遍存在温度场不均匀现象,不能较好地满足杨梅的运输要求。因此,必须根据杨梅贮藏特性对冷链运输温度的要求来研究冷藏车厢内流场运动、优化控制设计参数、合理分配厢内冷量和气流组织,以保证厢内温度均匀分布。

近年来,随着计算流体力学(Computational fluid dynamics,CFD)作为数值计算工具在食品行业的广泛应用[3-6],一些学者采用该方法模拟分析冷藏车厢内部流场,并进行车厢内部结构改进设计[7-15]。文献[16]通过正交试验优化设计,引入温度场均匀性评价指标,分析了气流循环风机转速、匀流板孔隙率和货框垂直间距等因素对冷藏运输车厢内温度场的影响。针对温度场中存在的“高峰”区域调节右侧回风口处气帘风机方向来实现均匀性控制。

冷藏车厢左侧进气道和匀流板细孔轴线垂直,货架安装位置相互垂直。冷空气经过匀流板阻尼细孔后进入框架中间通道,存在回弹、分流等现象,自车头至车尾呈递减趋势,且车厢角落区域呈现涡流区,流量分配极不均匀。同时,冷藏车厢左右两侧匀流板进/出气的孔径、货架形状/结构和杨梅的堆码方式等决定厢内冷量的流动和分配,也是影响温度场均匀性的重要因素[7]。本文对温度场和流场进行数值仿真,探讨改善温度梯度和流场两者协同程度使其达到换热性能最优。通过控制气帘转速和角度来控制等温线与流线间夹角变化趋势,优化厢内冷量的流场和温度场的运移,有效降低厢内最高温度以及使温度分布更为均匀。

1　流场和温度场耦合计算

1.1　物理模型

以已研发的冷藏运输车为基体[17],车厢外部尺寸为 5.18 m×2.10 m×2.20 m,内容积 22 m^3。车厢前部布置 4 个轴流式风机,转速 460 rad/s。法国开利制冷机组经过左侧匀流板送风进入货物区,杨梅导热和空气换热,由右侧匀流板回风。杨梅周转箱最小间距 90 mm。车厢内部左右两侧各布置 3 层,每层 7 块匀流板,单块尺寸为 0.6 m×0.6 m,匀流板孔径 1 mm。在长度截面 L1 ~ L8,高度截面 H1 ~ H3 和宽度截面 W1 ~ W4 两两相交处共配置 96 个 WS-

收稿日期:2014-02-10　修回日期:2014-03-19

*国家国际科技合作专项资助项目(2013DFA31920)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101704)和浙江省自然科学基金资助项目(LY13E050023、LY14F020023)

作者简介:翁卫兵,副研究员,博士,主要从事现代物流装备研究,E-mail:wguard@163.com

通讯作者:徐兴,副教授,主要从事现代物流装备研究,E-mail:xuxing3220@163.com

TH01 型温度传感器和 96 个 QDF－6 型风速仪来实时监测厢内温度场和速度场分布情况。温度传感器测量范围为 －40 ~ 100℃，分辨率 0.1℃；记录容量 14 800 ~ 30 900 组；通讯接口 RS－232 或 USB。冷藏车厢结构示意图如图 1 所示。

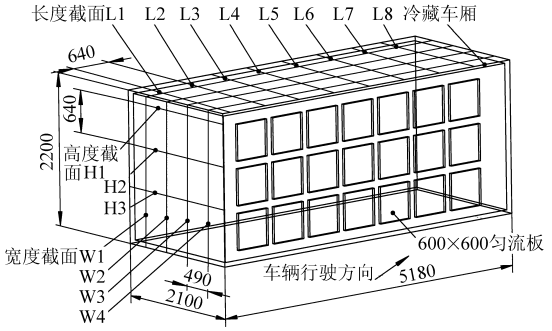


图 1　冷藏车厢结构示意图

Fig. 1　Layout of refrigerated transport carriage

1.2　数学模型

设定厢内空气流动为稳定工况[18]，忽略太阳等辐射换热，传热介质等匀质不可压缩，遵循连续性和能量守恒定律。冷藏车厢经过长时间运行后的稳定流场可视为定常场，属于对流和高雷诺数的湍流混合。

考虑到冷链运输过程中满载杨梅最为经济，模拟和试验过程中均采用满载工况。杨梅具有几何规则形状，可将其看成渗流方式的多孔介质。车厢内主要是杨梅自身的热传导以及杨梅和空气之间的热交换。主要设定参数：杨梅直径 d、有效孔隙度 φ、密度 ρ、导热系数 λ_p、比表面积 $\gamma=6(1-\varphi)/d$、热交换系数 h 和比热容系数 c_p。c_p 近似认为随温度升高线性递增。

考察车厢内温度的变化实质是计算流出、流入匀流板的热量差值。单位时间体积 ∇T_s 内杨梅由于热传导而产生的热流量差值为

$$\Delta Q_{st}=\nabla[\lambda_p(1-\varphi)\nabla T_s] \tag{1}$$

单位时间体积 (T_s-T_l) 内杨梅和空气之间的热量交换为

$$\Delta Q_{ex}=\gamma h(T_s-T_l) \tag{2}$$

单位时间体积 T_s 内杨梅温度变化放出的热量为

$$\Delta Q_{ch}=\frac{\partial}{\partial t}[\rho c_p(1-\varphi)T_s] \tag{3}$$

根据热量平衡可知

$$\nabla[\lambda_p(1-\varphi)\nabla T_s]+\gamma h(T_s-T_l)+\frac{\partial}{\partial t}[\rho c_p(1-\varphi)T_s]=0 \tag{4}$$

在笛卡尔坐标系 x、y 和 z 3 个方向展开，并利用时均化得

$$\frac{\partial(\rho c_p-T_s)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho c_p u-T_s)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho c_p v-T_s)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho c_p-T_s)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda_p\varphi-T_s}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\lambda_p\varphi-T_s}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\lambda_p\varphi-T_s}{\partial z}\right)+S_T \tag{5}$$

式中　S_T——由湍流脉动所引起的附加源项

u——速度在 y 方向的分量

v——速度在 z 方向的分量

2　流场和温度场数值模拟

2.1　网格划分

冷藏车厢内匀流板孔径 1 mm，杨梅周转箱尺寸 480 mm × 340 mm × 160 mm，冷藏车长度为 5.18 m。为优化计算工作量和时间，以整体粗网格和局部匀流板密网格相结合的方式生成六面体网格，如图 2 所示。最小网格尺寸为 0.183 mm，最大网格尺寸为 13.689 mm，厢内网格平均尺寸 7.333 mm，划分的网格总数约为 1 970 万。

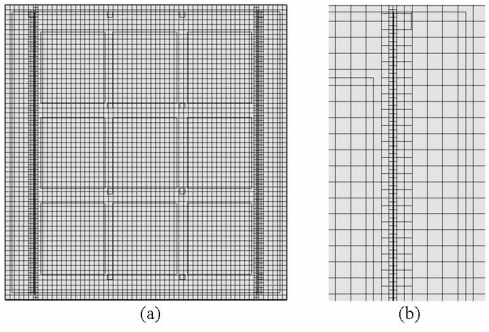


图 2　车厢长度方向截面网格示意图

Fig. 2　Cross section's grid in length direction of transport carriage

(a) 整体匀流板　(b) 右侧(局部)

2.2　数值模拟及分析

应用 Solid Works/Flow Simulation 模块进行数值模拟分析。冷藏车厢内 H1 ~ H3 截面流场和温度场的分布状态如图 3 和图 4 所示。

图 3 中红点处表示最高风速 9.464 m/s，距离 H2 横截面向上 0.111 m，蓝点处表示最低风速 0 m/s，距离 H2 横截面向下 1.320 m。图 4 中红点处表示最高温度 277.52 K(4.37℃)，距离 H2 横截面向上 0.372 m，蓝点处表示最低温度 272.15 K (－1.00℃)，距离 H2 横截面向下 1.099 m。

冷藏车厢内 W1 ~ W4 截面的流场和温度场的分布状态如图 5 和图 6 所示。

图 5 中最高风速和最低风速点分别距离 W2 纵截面往右 0.365 m 和 0.974 m。由于靠近车门中上部回风口处的速度较高，下部布置不通风的蒸发

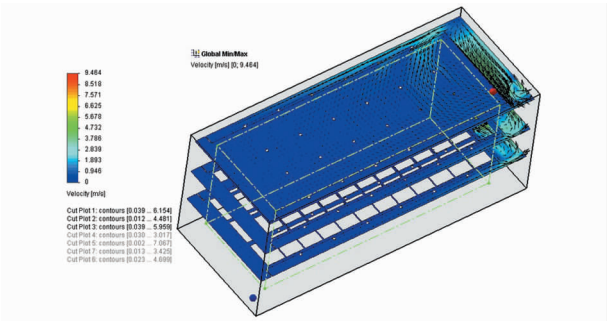


图 3 高度方向 3 个横截面流场分布图

Fig. 3 Layout of three cross sections' flow field in high direction

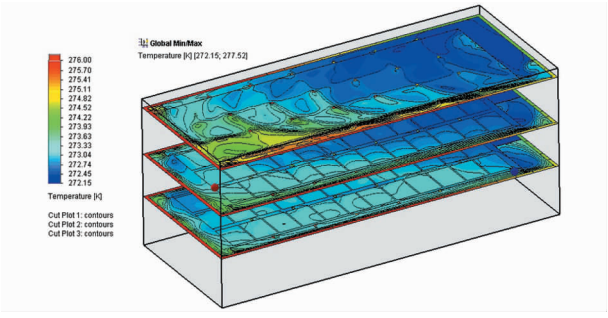


图 4 高度方向 3 个横截面温度分布图

Fig. 4 Layout of three cross sections' temperature field in high direction

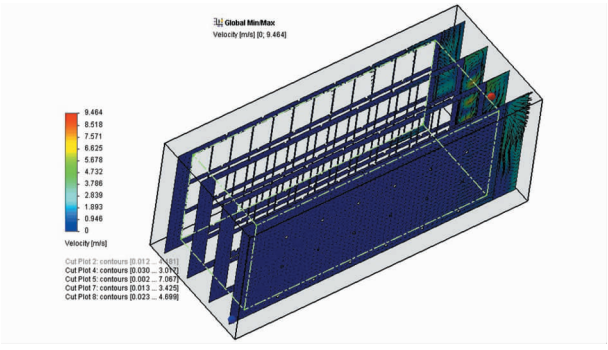


图 5 宽度方向 4 个纵截面流场分布图

Fig. 5 Layouts of four longitudinal sections' flow field in length direction

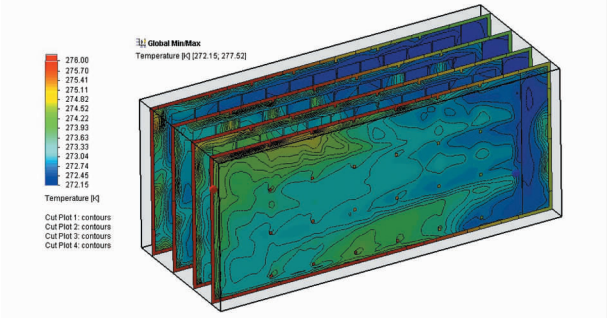


图 6 宽度方向 4 个纵截面温度分布图

Fig. 6 Layouts of four longitudinal sections' temperature field in length direction

器,故在靠近车头进风口处上部的速度较低。杨梅贮藏空间(点划线)内模拟得最高风速为 1.418 m/s,96 处风速仪测点测量到最高风速为 0.945 m/s,位于 L8H2W4,该测点模拟风速为 1.022 m/s,差值为 8%。图 6 中最高温度和最低温度分别为 274.86 K(1.71℃)和 272.28 K(-0.87℃),距离 W2 纵截面往右 1.114 m 和 0.350 m。96 个测点处的最高温度为 274.97 K(1.82℃),最低温度为 272.2 K(-0.95℃),平均温度值为 272.8 K(0.35℃),分布位于 L3H1W4 和 L8H2W1,前者因靠近车门中上部回风口处而温度较高,而后者因靠近车头进风口处上部温度较低。因杨梅比热容设定为随温度的上升而变大,导致自身释放较多的热量,实质加剧影响了车厢内温度分布的均匀性。通过对车厢内流场和温度场的模拟值和测点测量值数值对比分析,差值均低于 10%,由此表明在 96 处布置风速/温度传感器能够较准确描述车厢内温度场和速度场分布特性。

3 流场和温度场协同控制

流体流动存在着一个流体速度矢量场,即速度场或称为流场[19]。文献[19]同时指出,改善速度场和温度场协同程度可以强化湍流换热,推导出的无因次积分为

$$N_u = \int_{\Omega} (|\bar{u}||\nabla \bar{T}|\cos\beta)\,dV \tag{6}$$

式中 N_u——由湍流脉动所引起的附加源项

Ω——流场体积分区域

$\bar{u}$——无量纲时均速度

$\nabla \bar{T}$——无量纲时均温度梯度

β——速度场和温度梯度场夹角

dV——无量纲微元体积

在速度和温度梯度一定条件下,减小两者夹角($\beta < 90°$)可增大 N_u 值,意味着车厢内温度均匀分布程度更好。流线和等温线均为假想曲线。所有流体质点运动方向都相切的曲线为流线。流线族是由若干流线组成。流场为定常状态,质点在流场中运动的轨迹线、流线和脉线在几何上重合[20]。选取杨梅有效贮藏空间内最高温度、流线族和等温线在高度方向截面上的投影如图 7 所示。在温度极值区域的局部放大如图 8 所示。

稳态后等温线变化较为密集,从 273.35 K(0.2℃)到 273.75 K(0.6℃),该处速度矢量近似垂直于温度梯度方向,两者夹角均在 85°以上。冷量流动传导模式和纯导热类似,如果流线沿着等温梯度运动,则对温度场均匀分布贡献甚微。调节冷风机转速也无法有效改善,只有改变速度方向,减小两者夹角才能降低最高温度以及温度场均匀分布。

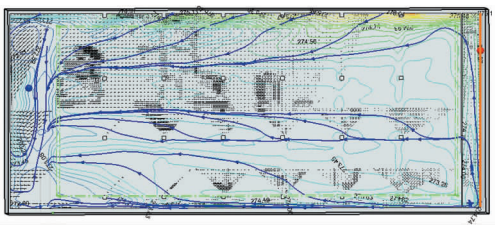


图 7　横截面最高温度和等温线分布

Fig. 7　Layouts of highest temperature and isothermal curves in cross section

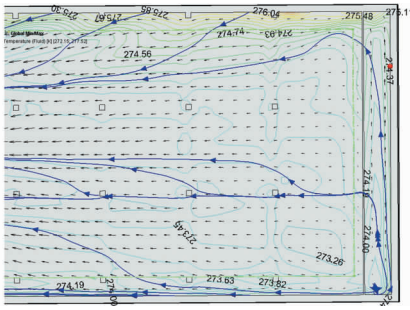


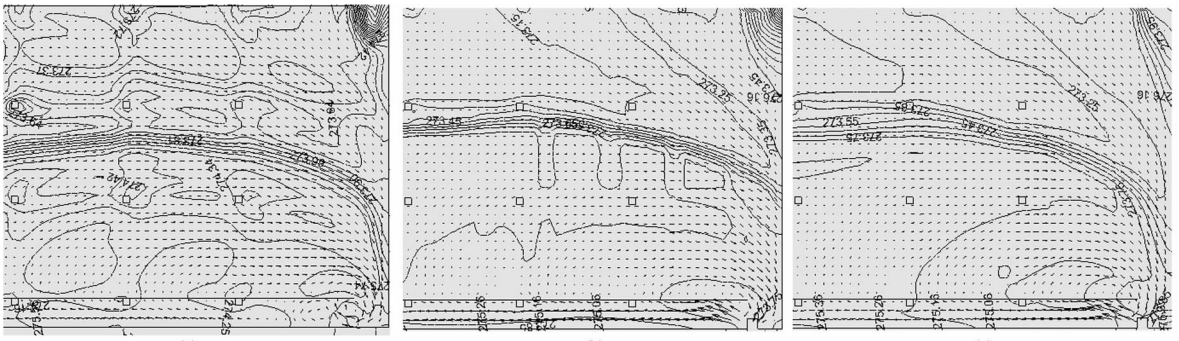
图 8　最高温度截面处局部放大图(无气帘风机)

Fig. 8　Partial enlarged drawing in highest temperature section (without gas curtain fan)

在关闭车门时,利用车门右侧顶部隔热气帘的风罩亦可改变风向。隔热气帘从两侧对吹隔热旋转至 90°,控制风向垂直于等温线方向间歇性定速运行。高度方向 3 个横截面近于隔热气帘(横流风机)区域的温度场和流场的分布图如图 9 所示。

模拟的流场和温度场都是稳态且较理想状态,与实际流动状态存在一定差异。在实际工程应用中,调节其风向沿着温度梯度方向加强换热以获得温度场均匀性的最优分布。设定隔热气帘风向沿着长度方向夹角为 30°,额定转速为 600 r/min。根据杨梅最适宜的贮藏温度为 0 ~ 2℃和车厢内实际制冷功率值,根据车厢内最高温度的上下阈值自动控制气帘风机的启停运行。图 10 和图 11 为有隔热气帘协同控制后横向和纵向截面的温度分布。

图 10 和图 11 中车厢内最高温度为 275.03 K(1.88℃),降幅为 56.98%,最低温度为 272.15 K(-1.00℃)。杨梅贮藏空间(点划线)内的最高温度由 1.71℃变化至 1.34℃,降幅为 21.74%。96 处测温度测点的平均温度则由 0.35℃变化至 0.24℃,降幅为 31.43%。表明在无需过多消耗隔热气帘功率前提下温度分布更为均匀。



(a)　(b)　(c)

图 9　高度方向截面隔热气帘处局部放大图

Fig. 9　Partial enlarged drawing in cross section of adiabatic gas curtain

(a) H1 层　(b) H2 层　(c) H3 层

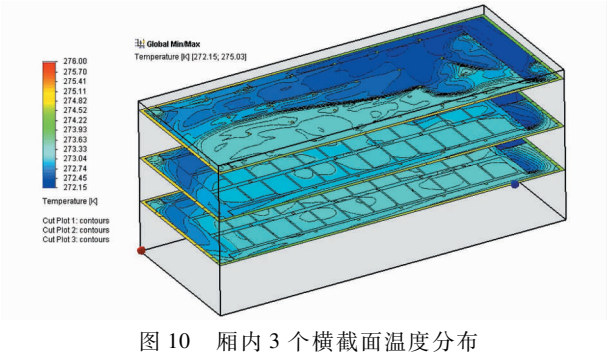


图 10　厢内 3 个横截面温度分布

Fig. 10　Temperature vector in three cross sections

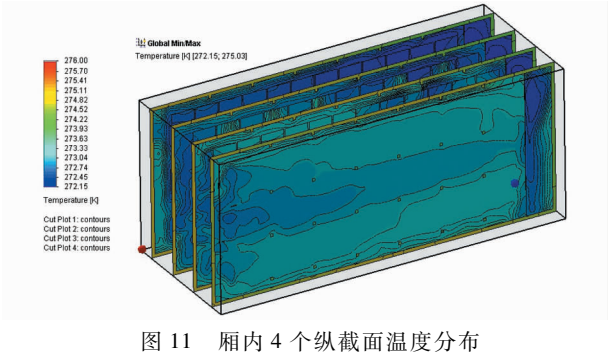


图 11　厢内 4 个纵截面温度分布

Fig. 11　Temperature vector in four longitudinal sections

4　试验结果与分析

2013 年 6 月中旬至 8 月上旬余姚、仙居至杭州等多地往返 26 次。根据冷链运输车正常运输多次后选取 L1H3W1 和 L8H3W1 两个温度采集测点用于试验数据趋势分析,全程温度变化曲线如图 12 所示。

根据图 12 温度采集变化趋势,分为降温段、第 1

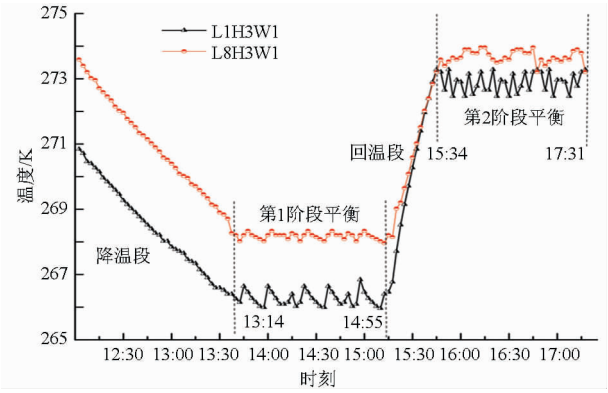


图 12 冷链运输车厢内全程采集温度变化

Fig. 12 Collection variation of temperature with whole-course in refrigerated transport carriage

阶段平衡、回温段和第 2 阶段平衡 4 个阶段。由于 L1H3W1 受外界因素影响稍大,回温段的温度响应较之 L8H3W1 略快。在冷链运输过程中稳态后温度变化较为平缓。由于采集过程中不可避免存在气候和路况等因素影响,选取运输开始 2 h 后采集试验数据。期间交叉地开启关闭隔热气帘协同控制功能,累计采集 13 组数据,考察每组数据内所对相对应的测点温度波动范围均在 ±5% 内。为不失一般性和有利于试验数据对比分析,分别对于各个测点温度取平均值。沿高度方向的 3 个截面温度数据对比分析如图 13 所示。

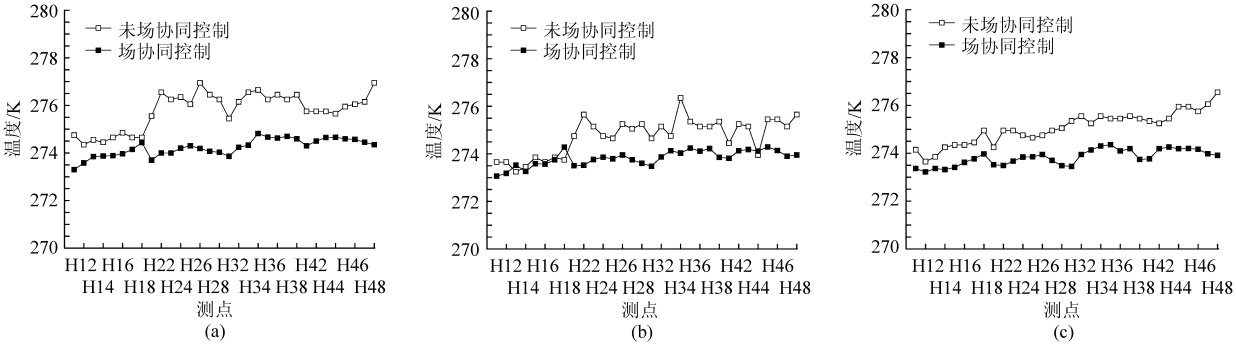


图 13 有无开启隔热气帘的长度方向截面温度对比

Fig. 13 Temperature comparison in cross sections in length direction of adiabatic gas curtain (off/on)

(a) H1 层 (b) H2 层 (c) H3 层

图 13 中通过有无开启隔热气帘的实际测量 3 个横截面温度平均值可知:H1 层为 275.8 K (2.65℃) 和 274.23 K (1.08℃),降幅为 59.25%;H2 层为 274.75 K (1.60℃) 和 273.82 K (0.67℃),降幅为 58.13%;H3 层 275.07 K (1.92℃) 和 273.83 K (0.68℃),降幅为 64.58%。H1 层温度标准差分别为 0.782 和 0.387,H2 层温度标准差分别为 0.775 和 0.328,H3 层温度标准差分别为 0.678 和 0.331,表明开启隔热气帘后温度分布更加均匀。布置在车厢内 96 个温度传感器测量最高温度平均值分别为 276.95 K (3.8℃) 和 274.82 K (1.67℃),降幅为 56.05%。

5 结论

(1) 冷藏运输车厢内在满载的杨梅贮藏空间内最高和最低温度分别为 1.71℃ 和 −0.87℃,布置在 3 个方向截面两两相交处(96 个测点)的最高和最低温度为 1.82℃ 和 −0.95℃,差值均低于 10%。96 测点处的最高风速为 0.945 m/s,模拟风速为 1.022 m/s,差值为 8%。由此表明在车厢内布置 96 个温度传感器和风速仪能够准确描述温度场和流场的分布状态。

(2) 等温线较为密集区域的流线速度矢量基本垂直于温度梯度方向,表明冷量运动对温度场分布贡献较小,仅加快冷风机转速无法有效改善温度均匀分布。

(3) 采用开启隔热气帘并根据等温线梯度方向和流线切线夹角协同控制风向的方法,沿长度方向截面温度平均值由 1.60℃ 降为 0.67℃,最低降幅为 58.13%,温度标准差最大为 0.387,有效降低了最高温度并使温度分布更为均匀。

参 考 文 献

1 席玙芳,郑永华,钱冬梅,等. 温度对杨梅果实采后营养物质变化和腐烂的影响[J]. 科技通报,1993,9(4):254 − 256.
Xi Yufang, Zhen Yonghua, Qian Dongmei, et al. Effects of storage temperature on changes of nutritional composition and decay rate in fruit of red bayberry [J]. Bulletin of Science and Technology, 1993, 9(4): 254 − 256. (in Chinese)

2 赵春江,韩佳伟,杨信廷,等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013,44(11):168 − 173.

Zhao Chunjiang, Han Jiawei, Yang Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):168 – 173. (in Chinese)

3 Xia B, Sun D W. Application of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2002 (34):5 – 24.

4 祁力钧, 赵亚青, 王俊, 等. 基于 CFD 的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 62 – 67.
Qi Lijun, Zhao Yaqing, Wang Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 62 – 67. (in Chinese)

5 李永博, 孙国祥, 楼恩平, 等. 基于 CFD 模型的温室温度多指标 GA 优化控制[J]. 农业机械学报, 2013,44(3):186 – 191.
Li Yongbo, Sun Guoxiang, Lou Enping, et al. Multi-index GA optimal control of greenhouse temperature based on CFD model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 186 – 191. (in Chinese)

6 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 基于 CFD 数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (19):55 – 62.
Han Jiawei, Zhao Chunjiang, Yang Xinting, et al. Comparison of combination mode of energy conservation for refrigerated car based on CFD numerical simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29 (19): 55 – 62. (in Chinese)

7 谢晶,瞿晓华,徐世琼. 冷藏库内气体流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报,2005, 21(2):11 – 16.
Xie Jing,Qu Xiaohua,Xu Shiqiong. Numerical simulation and verification of airflow in cold-store[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(2):11 – 16. (in Chinese)

8 Rodriguez-Bermejo J,Barreiro P,Robla J I,et al. Thermal study of a transport container [J]. Journal of Food Engineering,2007,80: 517 – 527.

9 张哲,郭永刚,田津津. 冷板冷藏汽车箱体内温度场的数值模拟及试验[J]. 农业工程学报,2013,29(增刊 1):18 – 24.
Zhang Zhe,Guo Yonggang,Tian Jinjin. Numerical simulation and experiment of temperature field distribution in box of cold plate refrigerated truck[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(Supp. 1):18 – 24. (in Chinese)

10 吕恩利,陆华忠,杨洲,等. 气调保鲜运输车通风系统阻力特性试验[J]. 农业机械学报,2011,42(3):120 – 124.
Lü Enli,Lu Huazhong,Yang Zhou,et al. Pressure drop characteristics of the ventilation system in fresh-keeping transportation with controlled atmosphere[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42 (3):120 – 124. (in Chinese)

11 Ferrua M J, Singh R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, part I: numerical model[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32: 335 – 348.

12 Vigneault C, Thompson J, Wu S. Designing container for handling fresh horticultural produce [J]. Postharvest Technologies for Horticultural Crops, 2009, 2: 25 – 47.

13 Kan A K, Han H D. Study on temperature field distribution inside reefer containers [C]// International Conference on Cryogenics and Refrigeration Proceedings, 2008: 884 – 887.

14 张娅妮,陈洁,陈蕴光,等. 机械式冷藏汽车厢体内部气流组织模拟研究[J]. 制冷空调与电力机械,2007,28(2):10 – 13.
Zhang Yani, Chen Jie, Chen Yunguang, et al. Simulation study on the air-flow distribution in the inside part of mechanical refrigerated truck[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery,2007,28(2):10 – 13. (in Chinese)

15 Moureh J, Laguerre O, Flick D, et al. Analysis of use of insulating pallet covers for shipping heat-sensitive foodstuffs in ambient conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34:89 – 109.

16 翁卫兵,房殿军,李强, 等. 冷藏运输车厢温度场均匀控制研究[J]. 农业机械学报, 2014,45(1):228 – 235.
Weng Weibing, Fang Dianjun, Li Qiang, et al. Temperature field homogeneity control of refrigerated transport carriage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):228 – 235. (in Chinese)

17 曹淼龙,李强,吴坚. 特色水果冷藏车车厢建模与温度场模拟分析[J]. 企业技术开发, 2013,32(13): 14 – 16.
Cao Miaolong, Li Qiang, Wu Jian. Simulation analysis of temperature field and model of characteristic fruit refrigerator van body structure[J]. Technological Development of Enterprise, 2013,32(13): 14 – 16. (in Chinese)

18 李锦, 谢如鹤, 刘广海, 等. 车外综合温度条件下典型冷藏车厢内热稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2012,43(8):141 – 147.
Li Jin, Xie Ruhe, Liu Guanghai, et al. Thermal stability of typical refrigerated trucks compartment under outdoor sol-air temperature conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (8): 141 – 147. (in Chinese)

19 过增元. 换热器中的场协同原则及其应用[J]. 机械工程学报, 2003,39(12):1 – 9.
Guo Zengyuan. Principle of field coordination in heat exchangers and its applications [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(12):1 – 9. (in Chinese)

20 林建忠,阮晓东,陈邦国,等. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 18 – 21.

(下转第 290 页)

Control Stability of Active Light Source Spectra during Measuring Reflectance of Canopy

Ding Yongqian[1] Li Yang[2] Tan Xingxiang[2] Cao Weixing[1] Zhu Yan[1]
(1. *National Engineering and Technology Center for Information Agriculture*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*
2. *Jiangsu Province Engineering Lab for Modern Facility Agriculture Technology & Equipment*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: With the self-developed measurement equipment of canopy reflection spectrum, the spectral stability of two kinds of narrowband-LEDs, which were used as active light sources and had peak wavelengths of 730nm and 810nm respectively, were studied. The experimental results showed that the junction temperature of the LEDs was significantly increased when the LEDs were pulse-lighted in high frequency based on the request of the measurement. The increased junction temperature resulted in linear red-shift of the light source spectra and linear decrease of luminous intensity of the light source, which seriously affected the stability and reliability of the measuring results. A new method of driving LEDs, named intermittent pulse-driving LED, was proposed. When LEDs were driven in this method, the rise of the junction temperature could be effectively controlled below 2℃, and the red-shift of peak wavelength of light source spectra was less than 1nm. Finally using the self-developed measurement equipment of canopy reflection spectrum, in which this method was embedded, the experiments were implemented both in laboratory and wheat field to measure the reflectance response of the crop canopy. The fluctuation ratio of measured results was less than 5%. The LED-driving method proposed could be applied in developing measuring equipments for detecting reflection spectrum of crop canopy.

Key words: Crop canopy Reflectance Active light source Spectral stability

(上接第 265 页)

Cooperative Control of Flow Field and Temperature Field in Refrigerated Transport Carriage

Weng Weibing[1] Fang Dianjun[2,3] Li Qiang[1] Cao Miaolong[1] Wu Jian[1] Xu Xing[1]
(1. *Provincial Key Laboratory of Food Logistics Equipment and Technology*, *Zhejiang University of Science and Technology*, *Hangzhou* 310023, *China*
2. *Department of Production Logistics*, *Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics*, *Dortmund* 44227, *Germany*
3. *Chinese-German School for Postgraduate Studies*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*)

Abstract: Heat balance formula of red bayberry was developed. The air flow and temperature field heterogeneity's properties of flow field in refrigerated transport carriage's physical model and the distributions of flow field and temperature field in cross sections and longitudinal sections were analyzed. The wind direction of top right adiabatic gas curtain was set perpendicular to isothermal curves to control the gas curtain fan with constant speed intermittently based on coordination principle. The test data of refrigerated transport carriage showed the highest temperature in cross sections dropped from 3.8℃ to 1.67℃, the biggest standard deviation amplitude of temperature values was 0.387 in three cross sections with length direction. The results indicated that only accelerating the gas curtain fan's speed could not improve the temperature distribution homogeneity effectively, opening the adiabatic gas curtain and adjusting the wind direction in included angle of gradient direction of isothermal curves and tangent direction of flow line based on cooperative principle could improve the temperature distribution homogeneity effectively.

Key words: Refrigerated transport carriage Temperature field Flow field Cooperative control