

冷藏集装箱内部流场的动态数值模拟与验证

Dynamic numerical simulation and experimental research on internal flow field of refrigerated containers

田津津 王飒飒 张哲 李曼 俞苏苏 郝俊杰

TIAN Jin-jin WANG Sa-sa ZHANG Zhe LI Man YU Su-su HAO Jun-jie

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

摘要:冷藏集装箱流场的均匀性是影响食品储存质量的重要因素之一。通过 CFD 建立三维非稳态模型,利用 FLUENT 软件对所建立的模型进行不同参数的模拟分析,讨论温度场、速度场以及货物堆码对冷藏集装箱流场的影响,进而得出结论:冷藏集装箱内的流场存在明显的不均匀性,箱体前部与后部的温度存在明显的波动,不利于货物的储存;送风速度以及货物堆码方式的改变都会影响箱内流体的分布情况,进而影响到换热效果;综合温度场与速度场以及食品储存,冷藏集装箱合理送风速度为 5 m/s 左右;四体式堆码方式优于其它两种堆码方式。验证实验中实测温度与模拟温度的平均偏差在 1.1 °C 左右,两者偏差不大,说明所建立的模型适用于冷藏集装箱内流场的模拟。

关键词:冷藏集装箱;流场;数值模拟

Abstract: The flow field uniformity in refrigerated container is one of the important factors that affect the food storage quality. Based on numerical simulation approach, three-dimensional unsteady computational fluid dynamics (CFD) model of refrigerated container has been established to find the air flow characteristics in this paper. A computational fluid dynamics program FLUENT has been used to predict the unsteady air flow and temperature fields inside the refrigerated container. The air flow and temperature fields inside the refrigerated container and the effect of stacking method on the air flow and temperature fields have been discussed. The numerical result shows that the air flow and temperature distribution are very serious for the refrigerated container. And the temperature of the front and the rear portion is obviously different and that is not conducive to storage of goods. It also found that different wind speed and stacking method greatly affects temperature flow field distribution in the cabinet, and the heat transfer performance. Integrated temperature and velocity

field and food storage, the reasonable air supply rate of refrigerated container is about 5 m/s. Four-piece stack is superior to the other two stacking method. Method of contrast verification was used to verify the correctness of the model in this paper. And the average deviation of experimental data and simulated result is about 1.1 °C, which showed that the model was appropriate to the simulation of the flow distribution in refrigerated container.

Keywords: refrigerated container; flow field; numerical simulation

冷藏集装箱作为重要的冷藏运输工具在食品冷链中起着重要作用,具有灵活性好、便于运输的特性^[1-2]。冷藏集装箱内部流场分布会影响到量均匀分布。因此,确保均匀的流场分布是提高冷藏集装箱运输食品品质的关键问题,能够保持食品品质良好,并降低冷藏运输损耗^[3-4]。

目前,计算流体力学在制冷领域中具有广泛的应用^[5-6]。N. Rodriguez-Bermejoa 等^[7]针对冷藏集装箱内的气流流动做了模拟与试验研究,分析论证了冷藏车内空气的流动特性。Ersin Alptekin 等^[8]通过设置 3 种不同几何形状的冷藏集装箱,研究天花板通风槽冷藏集装箱的气流分布格局。汤毅等^[9]采用 CFD 软件对冷藏库内的气流进行了数值模拟计算。J. Moureh 等^[10]针对冷藏车内气流的均匀性进行了数值模拟研究。郭嘉明等^[11]对 3 种不同冷藏运输箱体结构进行数值模拟,分别得出了上进上出、上进下出和差压式箱体结构的流场均匀性程度。可以看出,目前对于冷藏集装箱内部空箱稳态流场研究较多,但缺乏对非稳态、装载流场的研究。本试验拟通过对冷藏集装箱流场特性的分析,讨论非稳态温度场、速度场以及货物堆码对冷藏集装箱流场的影响,研究冷藏集装箱内温度场的不均匀性,为今后冷藏集装箱的研究提供进一步的依据。

1 冷藏集装箱的模型建立与分析

1.1 物理模型

以冷藏集装箱为研究对象,冷藏集装箱的基本外形尺寸

基金项目:国家自然科学基金(编号:11572223);天津市自然科学基金重点项目(编号:14JCZDJC34600,15JCZDJC34200)

作者简介:田津津(1978—),女,天津商业大学实验师,硕士。

E-mail: tianjj@tjcu.edu.cn

收稿日期:2015-11-26

为长×宽×高=6.8 m×2.1 m×2.2 m,冷藏集装箱的箱体均采用玻璃钢板材料,厚度为 2.5 mm,里面夹有厚度为 80 mm 的硬质聚氨酯泡沫板,车箱后面装有带封条的单侧门,冷藏集装箱的送风口设置在车箱的正前上方,送风口尺寸为 1.0 m×0.4 m,侧面有两个回风口,回风口布置在车箱前壁面左右两侧,尺寸分别为 1.25 m×0.15 m。冷藏集装箱的外形结构见图 1。

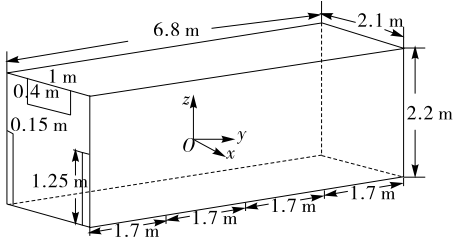


图 1 冷藏集装箱外形结构

Figure 1 Structure diagram of refrigerated container

采用 FLUENT 软件对冷藏集装箱进行流场模拟研究,在 GAMBIT 中建立几何模型及网格划分,采用 Tet Hybrid-TGrid 方法划分网格,为使结果准确,网格步长设为 0.1,共生成约 165 504 个网格,同时进行网格数量与计算结果无关性的验证,目前采用网格数量满足计算要求,而且计算速度较快。在进行装载模拟时,在货物区将网格局部加密,以保证计算效果。GAMBIT 中的网格划分模型如图 2 所示,在网格质量检测中网格最大偏压程度为 $0.157\ 205<0.99$,网格最大纵横比为 $2.857\ 04<5$,网格质量符合要求。

1.2 数学模型

为了更准确和简便地研究冷藏集装箱内流场的分布情况,需建立基本控制方程和相应的假设条件,应用稳态不可压缩 N-S 时均方程及 $k-\epsilon$ 模型,并作如下假设^[12-13]:

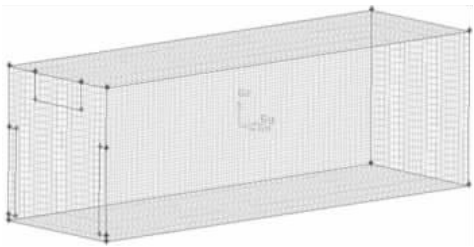


图 2 网格划分模型

Figure 2 The mesh model

- ① 车箱内空气不可压缩且满足 Boussinesq 假设;
- ② 在研究货物堆码的影响时,只考虑货物对流场的分布的影响,不考虑货物的散热问题;
- ③ 车箱内空气在固体表面满足无滑移边界条件;
- ④ 车箱密闭性良好;
- ⑤ 忽略外界热辐射对箱体外侧的影响。

车箱内空气紊流流动和传热控制方程可表示为^[14-17]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho V\varphi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi}\text{grad}\varphi) + S_{\varphi}, \tag{1}$$

式中:

- ρ ——空气密度,kg/m³;
- V ——空气速度矢量, $V=(u,v,w)^T$,m/s;
- φ ——因变量, φ 分别表示 $1,u,v,w,\epsilon,T,k$;
- Γ_{φ} ——对应于 φ 的扩散系数;
- S_{φ} ——源项。
- $\varphi,\Gamma_{\varphi},S_{\varphi}$ 表达式见表 1。

1.3 边界条件

(1) 根据天津地区夏季标准温度,冷藏集装箱所处的环境温度为 35 ℃,箱体内初始温度为 20 ℃,车体与外界环境的传热系数为 0.3 W/(m²·℃)^[18-19]。

表 1 控制方程源项[†]

Table 1 Source terms of each governing equation

方程	φ	Γ_{φ}	S_{φ}
连续	1	0	0
X 方向动量	u	μ_{ϵ}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial w}{\partial x}\right)$
Y 方向动量	v	μ_{ϵ}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial w}{\partial y}\right)$
Z 方向动量	w	μ_{ϵ}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\epsilon}\frac{\partial w}{\partial z}\right)$
能量	T	$\mu_{\epsilon}/Pr + \mu_t/\sigma_T$	q/c_p
紊流动能	k	μ_{ϵ}/σ_k	$G - \rho_{\epsilon}$
紊流动能耗散率	ϵ	$\mu_{\epsilon}/\sigma_{\epsilon}$	$\epsilon(c_1G - c_2\rho\epsilon)/k$

[†] u,v,w 分别表示 X、Y、Z 方向的速度,m/s; $\mu_l,\mu_t,\mu_{\epsilon}$ 分别为层流粘度、紊流粘度和有效粘度,kg/(m·s), $\mu_l=\rho V_{\infty}L/Re(Re$ 为雷诺数), $\mu_{\epsilon}=c_{\mu}\rho k^2/\epsilon,\mu_{\epsilon}=\mu_l+\mu_t$; p 为空气的有效压力,Pa,在物体表面紊流动能 $k=0$, p 即为时均压力; q 为热流密度,W/m²; c_p 为空气的比定压热容,kJ/(kg·K); Pr 为层流普朗特数; G 为紊流动能产生项, $G=\mu_t(\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)(\partial u_i/\partial x_j)$; 方程中经验常数取值为: $c_1=1.44,c_2=1.92,c_{\mu}=0.09,\sigma_T=0.9,\sigma_k=1.0,\sigma_{\epsilon}=1.3$ 。

- (2) 箱体底面设为绝热边界条件^[20]。
- (3) 送风口采用速度边界条件。
- (4) 箱体两侧的回风口简化设置为自由出流边界条件。
- (5) 送风温度为 0℃。

2 冷藏集装箱空箱流场分析

2.1 温度场模拟结果

图 3 分别表示送风口速度为 1,3,5,7 m/s,送风量分别对应为 0.4,1.2,2.0,2.8 m³/s 时,冷藏集装箱运行 30 min 时 X=0 m 截面温度云图。由图 3 可知:送风速度为 1 m/s 时,冷流体射流非常短,整个截面上的温度大于 10.85℃;送风速度为 3 m/s 时,冷流体射流相对增加,整个截面温度更新速度也增加;送风速度为 5 m/s 时,截面温度为 3.85~10.85℃;送风速度为 7 m/s 时,整个截面温度更新速度最快,温度低于 8.85℃。

图 4 是冷藏集装箱运行 60 min 在 X=0 m 截面处的温度云图。由图 4 可知,相比图 3 冷藏集装箱运行 30 min 时,冷藏集装箱内部流场得到一定的发展,其内部流场温度均匀性得到改善。

图 5 分别是冷藏集装箱运行 90 min 时温度云图。由

图 5 可知:各风速下冷藏集装箱的温度逐渐达到设定温度,送风速度为 1 m/s 时,截面温度为 0.85~7.85℃;送风速度为 3 m/s 时截面温度小于 1.75℃;送风速度为 5,7 m/s 时,截面温度小于 0.55℃。

送风速度大小影响箱内温度变化速率,送风速度越大,箱内温度更新速度越快,越容易达到设定温度;回风口处和车体底面温度较高,这是由于冷空气经过循环,与回风口和车体底面接触时间较晚。

2.2 速度场模拟结果

图 6~9 分别表示不同送风速度情况下,冷藏集装箱在 X=0 m,Z=0.9 m 截面的速度云图。由 X=0 m 截面速度云图可知:① 送风风速为 1 m/s 时,在此截面中部形成两个涡流,整个截面速度最低区域为漩涡区,小于 0.1 m/s,故换热效果慢,不利于储存货物;② 送风风速为 3 m/s 时,此截面速度梯度降低,涡旋区为一个涡旋,且速度小于 0.5 m/s;③ 送风风速为 5 m/s 时,相对于 3 m/s,其中间涡旋区减小,有利于货物储存,但其风速分布梯度增大,导致速度波动大;④ 当送风速度增加到 7 m/s 时,涡旋区进一步减小,又分裂成两个涡旋区,速度梯度增加,因此增加了速度的不均匀性。

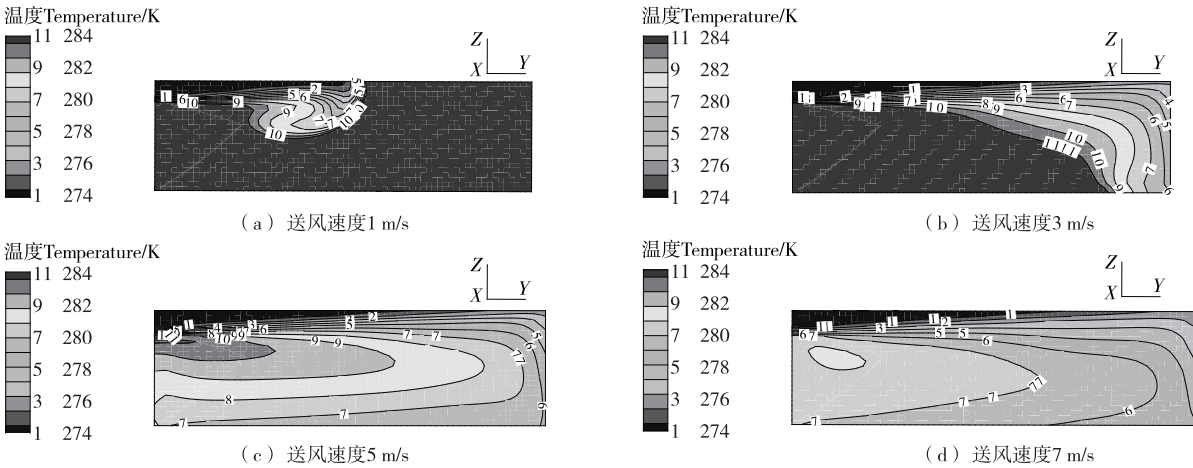


图 3 X=0 截面温度云图
Figure 3 Temperature field at X = 0 section (30 min)

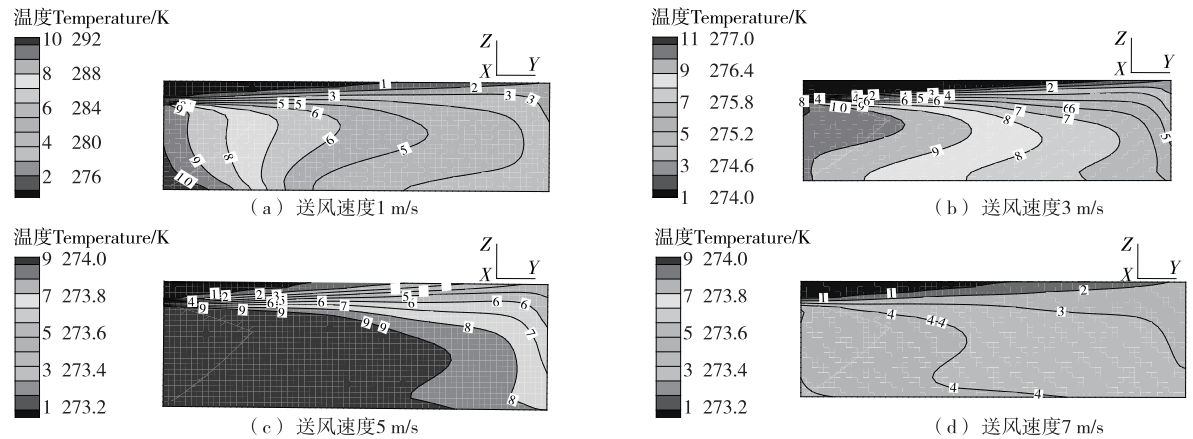


图 4 X=0 截面温度云图
Figure 4 Temperature field at X = 0 section (60 min)

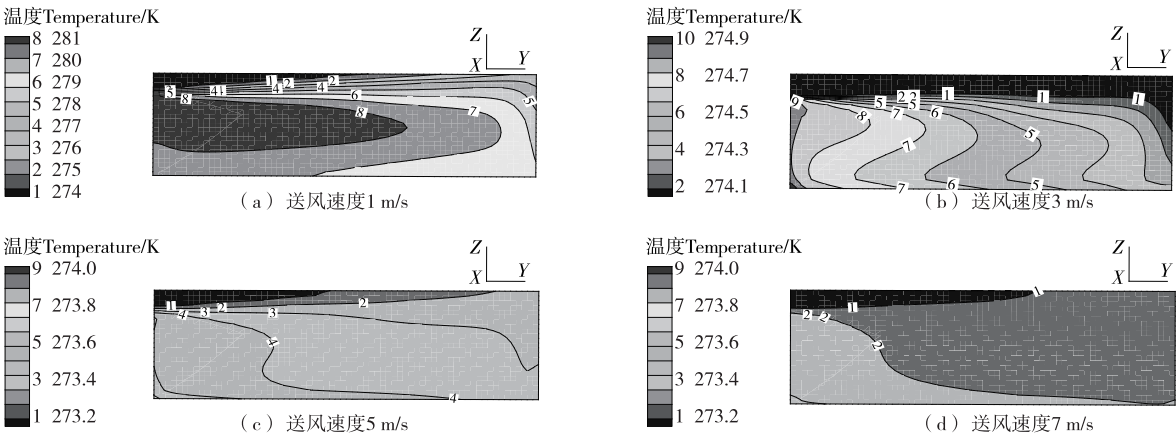


图 5 $X=0$ 截面温度云图
Figure 5 Temperature field at $X=0$ section (90 min)

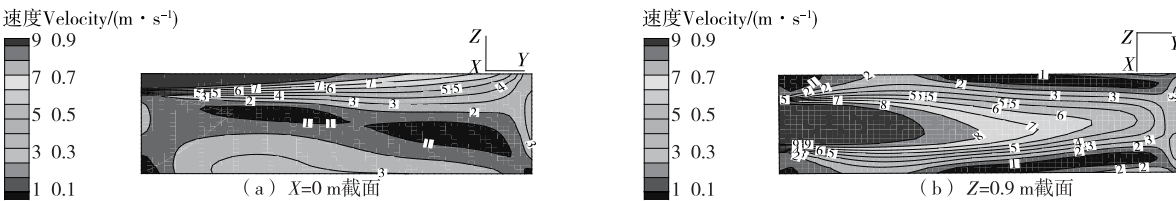


图 6 1 m/s 送风速度 $X=0$ m, $Z=0.9$ m 截面速度云图
Figure 6 Velocity field of 1 m/s air velocity at $X=0$ m, $Z=0.9$ m section

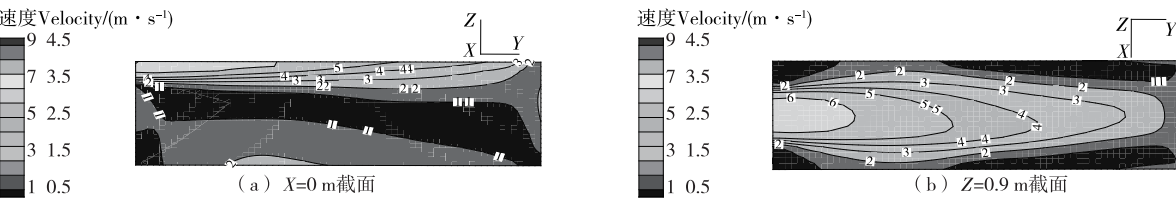


图 7 3 m/s 送风速度 $X=0$ m, $Z=0.9$ m 截面速度云图
Figure 7 Velocity field of 3 m/s air velocity at $X=0$ m, $Z=0.9$ m section

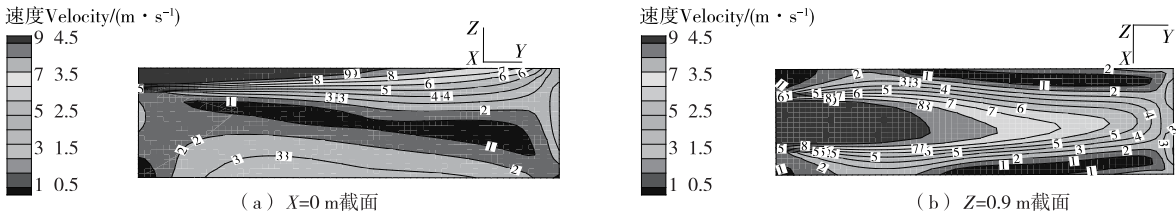


图 8 5 m/s 送风速度 $X=0$ m, $Z=0.9$ m 截面速度云图
Figure 8 Velocity field of 5 m/s air velocity at $X=0$ m, $Z=0.9$ m section

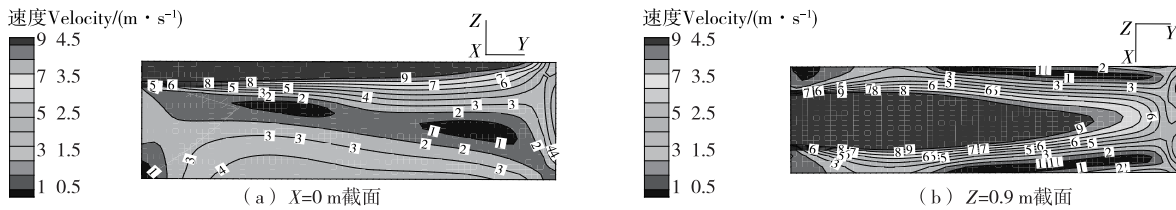


图 9 7 m/s 送风速度 $X=0$ m, $Z=0.9$ m 截面速度云图
Figure 9 Velocity field of 7 m/s air velocity at $X=0$ m, $Z=0.9$ m section

由图 6~9 中 $Z=0.9$ m 截面速度云图得知:冷藏集装箱的速度分布沿着中线方向成对称分布,不同送风速度下速度分布呈现的规律基本相同,即壁面处的风速为整个截面上的最小值,且沿着送风口方向呈抛物线状,随着风速的增加,各

抛物线之间距离逐渐减小,即速度梯度逐渐增加。

送风速度大小会影响箱体内部速度涡旋的大小,送风速度越大,箱体内涡旋越小,箱内换热效果越明显;送风速度的大小还决定了冷气流的送风距离,但同时高的送风速度增大了食品的干耗。综合温度场与速度场以及食品储存要求,冷藏集装箱合理送风速度为 5 m/s 左右。

3 货物堆码对冷藏集装箱流场的影响

3.1 货物堆码模型

货物的堆码方式有以下 3 种:① 紧密式(一体式)堆码,即货物之间没有间隔,货物与车体壁面之间有间隔;② 二体式堆码,即货物与货物纵向方向上有间距,货物与车壁之间

都有间隔;③ 四体式堆码,即货物与货物的横向和纵向方向上都有间隔,货物与车体壁面有间隔。堆货方式(见图 10):一体式堆码方式中整体货物的尺寸为长×宽×高=5.5 m×1.5 m×1.5 m;二体式堆码方式的每堆货物尺寸为长×宽×高=5.5 m×0.7 m×1.5 m;四体式堆码方式每堆货物的长×宽×高=2.5 m×0.7 m×1.5 m。各种堆码形式都是以冷藏集装箱中点为中心放置。

3.2 货物堆码模拟结果分析

图 11~13 分别是送风速度为 5 m/s,送风温度为 0 ℃ 箱内流场处于稳态的温度云图。

由图 11~13 可知,在 X=0 截面上,一体式堆码方式在

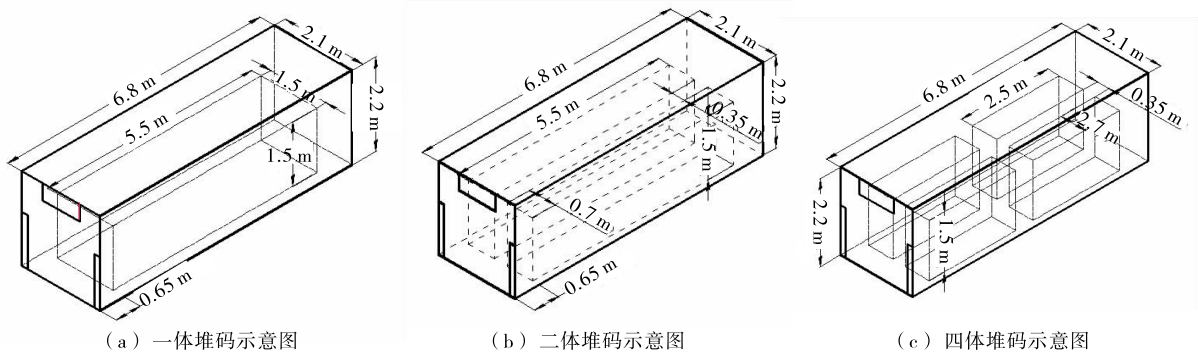


图 10 3 种堆码方式示意图

Figure 10 Schematic diagram of three kinds of stack method

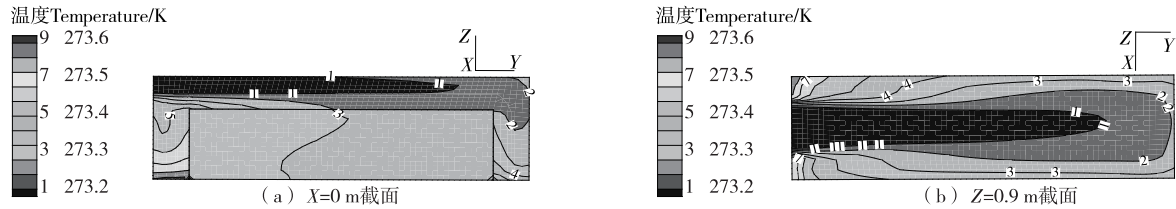


图 11 一体式堆货方式温度云图

Figure 11 Temperature field of integral stack method

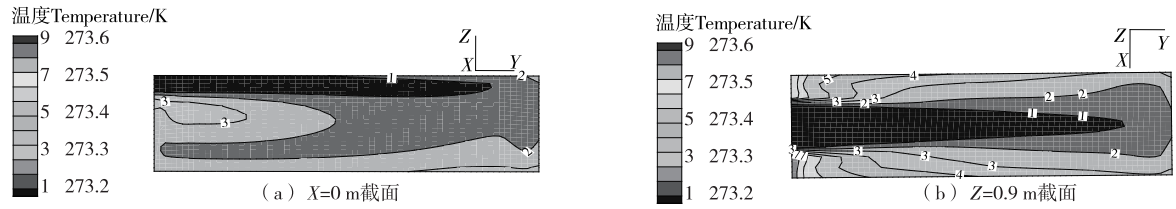


图 12 二体式堆货方式温度云图

Figure 12 Temperature field of two-piece stack method

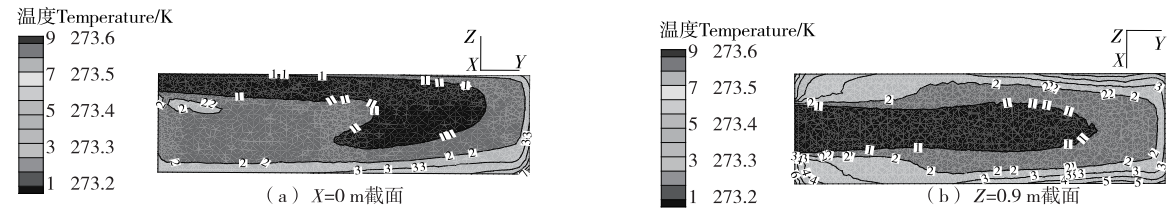


图 13 四体式堆货方式温度云图

Figure 13 Temperature field of four-piece stack method

箱体内部温度场分布极不均匀,箱体前后存在高温区域,且在前后两侧的温度梯度较大,对流换热效果不好,不利于货物贮藏,并且由于送风口在车前部的正前方,货物中间没有间隙,从而阻碍了流体在整个箱体内部的循环流动,气流不容易回到回风口,而流体在送风处的射流明显增大,使得箱体送风方向温度明显低于其它位置的温度。二体式堆货方式明显优于一体式,在 $X=0$ 截面处,由于货物中间的间隔,气流可以容易到达箱体尾部,形成前后的气流循环,使得流体温度分布较均匀,整体温度 $\geq 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,没有明显的高温区域。由此说明货物之间的纵向间隔可以很好地改善箱体内部的温度分布,尤其是箱体前后两侧的温度分布。四分体堆货形式中,由于货物堆放是对称分布,且货物之间的纵向与横向间隙,使得冷流体在箱体内形成了纵向与横向循环流动,箱内的温度横向与纵向分布都比较均匀,箱体内温度基本上 $\geq 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与二体式堆货方式相比,横向缝隙对流体的横向流动起了推动作用,使得箱体中间的气流通,整个截面温度分布均匀。

3 种堆货方式在 $Z=0.9$ 截面上的温度分布形式变化不大,温度梯度相似,都是以中线对称分布,冷气流的射流在此截面上变化不明显。但由于横向与纵向间隙的作用,四体式箱体内温度场较前两者均匀,温度值降低了 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合冷藏运输的要求。

4 实验验证

为了验证冷藏集装箱内部流场动态数值模型以及计算结果的正确性,进行了空箱验证实验。实验测量截面均匀分布在冷藏集装箱长度方向上,截面分别为 $Y=-1.7$ 、 $Y=0.0$ 、 $Y=1.7$,每个截面上均匀布置 9 个测点。图 14 为冷藏集装箱空载时车厢截面上各个测点的布置图。温度数据采集使用横河数据采集器 MX100,最小测量周期为 10 ms ,最大可实现 1 200 个通道的数据采集,选择的温度传感器为 T 型热电偶,热电偶分别固定在各测点上。冷藏集装箱内部初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,送风速度为 5 m/s ,数据采集器每 1 min 记录一次数据,从冷藏集装箱制冷系统启动运行时开始计时。

图 15 为冷藏集装箱温度中心测点 5 在非稳态时的模拟值与实验值对比图。由图 15 可知:截面中心测点 5 的温度,在 $Y=-1.7$ 各个时刻模拟值与实验值平均温度偏差为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

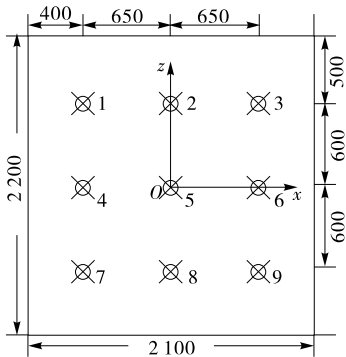


图 14 测点布置(单位:mm)

Figure 14 Arrangement of measuring points

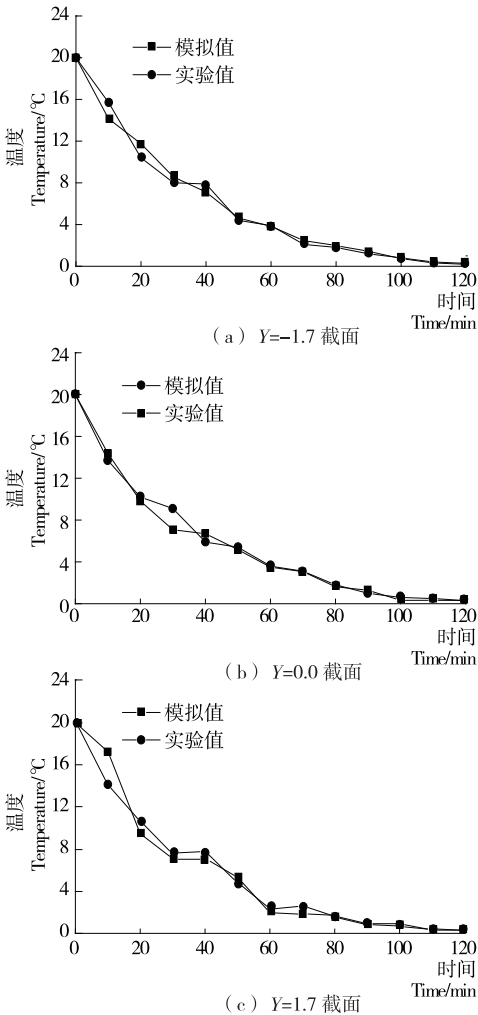


图 15 各截面中心测点 5 非稳态模拟与实测温度对比
Figure 15 Comparison of the midpoint 5 unsteady simulation and measured temperature in each section

在 $Y=0.0$ 平均温度偏差为 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;在 $Y=1.7$ 平均温度偏差为 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,二者差异不大。

5 结论

(1) 送风速度大小影响箱内温度变化速率,送风速度越大,箱内温度更新速度越快,越容易达到设定温度;较大的送风速度下箱体内部的涡旋相对较小,此时箱内的换热效果相对明显,利于换热,但增大送风速度增加了能耗和货物的干耗。综合温度场与速度场以及食品储存要求,冷藏集装箱合理送风速度为 5 m/s 左右。

(2) 堆码方式对流场有较大影响,货物之间缝隙的改变,可以改变流场的分布情况,增加流体与货物的热对流效果,从而使得货物区的温度有所降低。在冷藏运输过程中要适当的设置纵向缝隙与横向缝隙。纵向方向的缝隙对车体上部空间流体的影响不大。四分体式堆码方式优于其它两种堆码方式。

(3) 理论计算值与实验值吻合良好,说明所建立的冷藏集装箱的三维非稳态数学模型的合理性。

参考文献

[1] 黄成洲, 谢如鹤. 我国食品冷链物流的发展与对策[J]. 商品储运与养护, 2007, 29(4): 37-39.

[2] 张连军. 浅析我国食品冷链物流的现状 & 对策[J]. 物流技术, 2006(1): 102-104.

[3] 周俊. 我国铁路冷藏集装箱运输发展 & 运营问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 3-4.

[4] 陈焕新, 蔡敏, 张春安. 冷板冷藏车运输过程中冷冻货物的温度分布[J]. 流体机械, 2005, 33(4): 65-68.

[5] 汤毅, 谢晶, 王金锋, 等. 计算流体力学在冷库优化中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 186-189.

[6] Zertal-Menia N, Moureh J, Flick D. Simplified modelling of air flows in refrigerated vehicles[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(5): 660-672.

[7] Rodriguez-Bermejoa J, Barreirob P, Roblaa J I, et al. Thermal study of a transport container[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 517-527.

[8] Ersin Alptekin, Mehmet Akif Eazn. Flow and heat transfer characteristics an empty refrigerated container[J]. Progress in Energy and the Environment, 2014, 62(1): 641-652.

[9] 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.

[10] Moureh J, Tapsoba S, Derens E, et al. Air velocity character-

istics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts[J]. International Journal of Refrigeration, 2009(32): 220-234.

[11] 郭嘉明, 吕恩利. 冷藏运输厢体结构对流场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊): 74-78.

[12] 孟华, 杨培志. 冷板冷藏车内冷冻板冻结过程数学模型的建立[J]. 制冷与空调, 2004(4): 8-11.

[13] 王以忠, 胡春园, 陈绍慧, 等. 冷藏车内温度场和湿度场的数值模拟研究[J]. 保鲜与加工, 2010, 10(3): 26-28.

[14] 杨磊, 汪小昆. 冷藏库预冷降温过程中温度场的数值模拟 & 试验研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2008, 36(9): 219-223.

[15] 孙海亭, 周轲, 杨艳青, 等. 利用 CFD 模型研究苹果冷藏库内的空气流动[J]. 保鲜与加工, 2014, 14(4): 27-33.

[16] 申江, 李超, 苗惠, 等. 冷藏运输车车内气体流场的数值模拟 & 分析[J]. 低温与超导, 2010, 38(11): 46-52.

[17] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 33-34.

[18] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1998: 88-89.

[19] 季阿敏. 果蔬气调贮藏冷却阶段温度变化的数值模拟 & 验证[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 24-27.

[20] 张哲, 郭永刚, 田津津, 等. 冷板冷藏汽车箱体温度场的数值模拟 & 试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 18-24.

(上接第 79 页)

[10] 张宗绵, 刘睿, 徐敦明, 等. Au@SiO₂ 核壳结构—表面增强拉曼光谱原位检测食品中的酸性橙 II [J]. 化学学报, 2012, 70(16): 1 686-1 689.

[11] 杨昌彪, 宋光林, 包娜, 等. 近红外光谱与表面增强拉曼光谱对红酒中非法添加剂苋菜红的分析研究[J]. 食品科技, 2014, 39(6): 294-298.

[12] 李言, 谢云飞, 钱和, 等. 表面增强拉曼光谱快速检测赤藓红[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 307-309.

[13] Haughey S A, Galvin-King P, Ho Y C, et al. The feasibility of using near infrared and Raman spectroscopic techniques to detect fraudulent adulteration of chili powders with Sudan dye

[J]. Food Control, 2015, 48: 75-83.

[14] Vlastimil P, Martin J. Quantitative SERS analysis of azorubine (E 122) in sweet drinks [J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(5): 2 840-2 844.

[15] 续欣欣. 敢问糖果业的未来在何方[J]. 中外食品, 2007(1): 28-31.

[16] 廖萍坚, 翁小红, 吴文君, 等. 分光光度法测定硬质糖果中诱惑红、柠檬黄、亮蓝的含量[J]. 湛江师范学院学报, 2013, 34(6): 64-68.

[17] 朱自莹, 顾仁敖, 陆天虹. 拉曼光谱在化学中的应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998: 71-158 .

[18] Dollish F R, Fateley W G, Bentley F F. 有机化合物的特征拉曼频率[M]. 朱自莹, 译. 北京: 中国化学会, 1980: 40-145.

(上接第 83 页)

[5] 李峰, 刘浩, 钟媛, 等. 沙棘叶中总多酚和总黄酮的提取工艺[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 128-130.

[6] 牛广财, 朱丹, 王军, 等. 沙棘酒清除自由基作用的研究[J]. 中国食品学报, 2010, 10(1): 36-41.

[7] 李春阳, 许时婴, 王璋. 低浓度香草醛—盐酸法测定葡萄籽中原花青素含量的研究[J]. 食品工业科技, 2004, 25(6): 128-130.

[8] 肖纯, 张凯农, 阳长敏, 等. 铁氰化钾分光光度法测定单宁的适用性[J]. 华北农学报, 1996, 11(2): 127-130.

[9] Silvina B L, Balz F. Relevance of apple polyphenols as antioxidants in human plasma: Contrasting in vitro and in vivo effects [J]. Free Radical Biology & Medicine, 2004, 36(2): 201-211.

[10] Neuza Paixao, Rosa Perestrelo, Jose C Marques, et al. Relationship between antioxidant capacity and total phenolic content of red, rose and white wines[J]. Food Chemistry, 2007, 101(1): 204-214.

[11] 徐佳, 辛立方, 张瑞廷, 等. 改良的 Folin-Ciocalteu 比色法测定核桃外果皮中总多酚含量[J]. 食品工业科技, 2012, 33(6): 60-63.

[12] 李静, 聂继云, 王孝娣, 等. Folin-Ciocalteus 法测定葡萄和葡萄酒中的总多酚[J]. 中国南方果树, 2007, 36(6): 86-87.

[13] 王皎, 高颖, 赵艳敏, 等. 测定不同品种苹果果皮和果肉中总多酚的含量[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(20): 87-89.

[14] 朱霞, 李焕荣, 罗游. Folin-Ciocalteu 比色法测定核桃青皮中多酚含量条件的优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 122-125.

[15] 田桂芝, 李绍明, 王大超, 等. Folin-Ciocalteu 比色法测定板栗总苞提取液中总多酚的含量[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(6): 289-291, 370.

[16] 李颖畅, 吕艳芳, 励建荣. Folin-Ciocalteu 法测定不同品种蓝莓叶中多酚含量[J]. 中国食品学报, 2014, 14(1): 273-278.

[17] 范琼, 周聪, 赵敏, 等. Folin-Ciocalteu 比色法测定树仔菜总多酚[J]. 南方农业学报, 2014, 45(12): 2 230-2 235.