

文章编号 : 1004 - 7271(2006)03 - 0333 - 07

小型冷库开关门过程温度场的数值模拟

谢 晶, 吴 天

(上海水产大学食品学院, 上海 200090)

摘 要 近年来, 计算流体力学(CFD)技术随着计算机科学和流体力学理论的发展而在工业各领域得到广泛使用。用 CFD 技术对冷库开关门过程进行了非稳态数值模拟, 分析了小型冷库开关门过程中门周边温度场的变化, 讨论了外界环境对冷库影响的区域, 研究模拟了开关门各 20 s 过程的温度场变化情况, 发现由冷热空气密度差引起的自然流动是门处空气流动的主要方式。研究表明关门后, 冷库下部的空气温度场恢复较快, 上部恢复较慢(10 s 以后才明显下降) 20 s 后温度可大致恢复至开始状态。研究结果证明数值模拟能较好地反映现实情况。

关键词 冷库; 门; 计算流体力学; 数值模拟

中图分类号 : TB 611 **文献标识码** : A

Numerical simulation on temperature field in the doorway of a minitype cold store

XIE Jing, WU Tian

(College of Food Science, Shanghai Fisheries University, 200090, China)

Abstract Recently, computational fluid dynamics(CFD) has been used extensively in many fields of industry along with the development of the computer science and fluid mechanics theory. In this paper, the unsteady numerical simulation in the doorway was done by CFD, the temperature field in the doorway of a minitype cold store was analyzed. The space of the influence on the cold store by the environment was also discussed. The unsteady temperature field in two 20s' periods of opening and closing door was simulated, it's found that the natural flow caused by the density differences is the major flow of the air around the door. It was also found that the temperature field in the downside recovered quickly, but that in the upside was not as fast as it. It needs 20 seconds to get back the initial condition. The result shows that the simulation can reflect the reality well.

Key words : cold store ; doorway ; computational fluid dynamics (CFD); numerical simulation

冷库内外存在较大的温差, 在库门开启时, 大门处将产生强烈的热、质交换, 热空气渗入库内, 造成库温升高, 对于冻结间而言, 还会由于库门上部出现不同程度的结霜、结冰而受到损坏, 大量的热湿交换也使蒸发器排管结霜严重, 传热恶化, 导致库房温度回升、能耗增加, 更主要的是热负荷的增加会造成不必要的能耗^[1]。为了节能, 很多冷库在门处增设了空气幕或门帘, 但无论是使用门帘或增设空气幕, 都必须充分了解库门处的流场, 才能使这些措施的使用达到最好的效果, 因此对库门处流场进行分析很有

收稿日期: 2005-11-30

基金项目: 上海市教委 2003 年优青项目(03YQHB124); 上海市重点学科建设项目资助(项目编号: T1102)

作者简介: 谢 晶(1968 -) 女, 浙江嵊州市人, 博士, 从事食品冷冻冷藏研究。Tel: 021 - 65710222, E-mail: jxie@shfu.edu.cn

必要。近年来,计算流体力学(CFD)技术随着计算机科学和流体力学理论的发展而在工业各领域得到广泛使用^[2-6]。本文用商用 CFD 软件 GAMBIT、FLUENT 对一冷库开关门过程中,门处的温度场变化情况作了非稳态模拟,希望能提出一个较好的模拟方法,为进一步的研究打下基础。

1 物理、数学模型

1.1 物理模型

由于是研究开关门过程中库内流场将要受到怎样的影响,因此必须考虑时间因素,也就是说,研究必须采用非稳态模型。非稳态模型的运算量非常大,而现有计算机的运算水平有限,因此,在准确模拟的前提下,应尽可能选择较简单的物理模型。本文以建于室内的上海水产大学实验冷库作为研究对象,该库的外型尺寸为 4.5 m(l)×3.3 m(w)×2.5 m(h),冷库采用吊顶式风机,尺寸为 1.75 m(l)×0.46 m(w)×0.5 m(h),风机有两个直径为 0.4 m 的圆形送风口,库壁为 0.15 m 厚的聚苯乙烯预制夹芯板。门在一个长度方向的中间,尺寸为 1.2 m(l)×2 m(h),门的下沿与地距离 0.1 m,上沿距冷库顶 0.4 m,由于要研究门处流场的变化,因此,物理模型中除了包含冷库外,还必须包括门附近的环境空气,本研究在冷库门侧墙外取了一个气体区域,该区域宽度 1 m,与冷库同长同高,它与冷库构成整个物理模型。

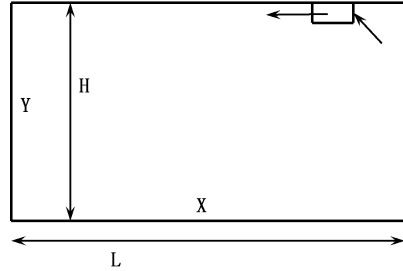


图 1 冷库示意图

Fig.1 Sketch map of the cold store

1.2 数学模型

由于采用冷风机强制空气循环,流场雷诺数约为 10⁶(数量级),属有限大空间紊流流动换热问题。为简化研究,需作如下假设(1)冷库中无货物,且冷藏库内管道和铁架等支承物对流场影响很小,可以忽略(2)冷藏库内空气为不可压缩且符合 Boussinesq 假设(3)认为库体是密闭的,即仅开门时,库内空气与环境空气进行热质交换。

结合上述假设,采用 D. B. Spalding 的紊流流场 K-ε 的数学模型^[7],在直角坐标系下,联立连续性方程、动量方程、K 方程、ε 方程及能量方程作为计算方程组,该方程组可以用下面的通用微分方程形式表示: $div(\rho V\phi) = div(\Gamma grad\phi) + S$

式中:φ - 通用变量;Γ - 与 φ 相对应的广义扩散系数;S - 与 φ 相对应的广义源项。不同方程对应关系见表 1。K - ε 模型中经验常数采用经典推荐值见表 2。

表 1 各控制方程变量、扩散系数及源项

Tab.1 Variables, diffusion coefficients and source terms of each governing equation

方程	φ	Γ	S
X 方向动量方程	u	$\eta + \eta_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\eta_{eff} \frac{\partial w}{\partial x})$
Y 方向动量方程	v	$\eta + \eta_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\eta_{eff} \frac{\partial w}{\partial y})$
Z 方向动量方程	w	$\eta + \eta_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\eta_{eff} \frac{\partial w}{\partial z})$
紊流能量方程	K	$\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}$	$\rho G_k - \rho \epsilon$
紊流能量耗散方程	ε	$\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k}(C_{1p}G_k - C_{2p}\epsilon)$
能量方程	T	$\frac{\eta}{\rho_r} + \frac{\eta_t}{\sigma_T}$	0

$$\text{表中 } G_k = \frac{\eta_i}{\rho} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$\eta_{eff} = \eta + \eta_i ; \eta = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$$

表 2 k-ε 模型中的系数

Tab.2 The coefficients in k-model

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε	σ_T
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.9 ~ 1.0

1.3 边界条件

由上述 物理模型分为冷库和一部分库外空气 边界条件也分两部分来设定：

对于门外的那一部分气体 其边界条件设为绝热及壁面气体无滑移 对于冷库 壁面采用第二类边界条件 需要计算壁面传热系数。冷库墙和顶所用的预制夹芯板完全一样 故可以一起计算。又因彩镀钢板热导率很大 厚度很小 只有 0.6mm 其热阻相对于隔热层可以忽略不计。计算如表 3：

表 3 壁面热阻的计算

Tab.3 The calculation of the wall's heat resistance

隔热层	热导率(W/m·K)	厚度(α m)	表面传热系数 α(W/m²·K)	热阻 R(m²·K)/W
聚苯乙烯泡沫	0.0297	0.150		5.050
库内表面			17.44	0.057
库外表面			11.63	0.086
总热阻(m²·K/W)				5.193

因此 壁面传热系数 $K_w = 1/5.193 = 0.192 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 室外计算温度取 $t_w = 20^\circ\text{C}$ 室内设计温度 $t_n = -5^\circ\text{C}$ 通过壁面的热流密度计算如下：

$$q = K_w \cdot \Delta t = 0.192 \times (20 + 5) = 4.8 \text{ W/m}^2$$

对于冷库与库外空气交界即库门处 关门时 将门设为定热流密度的壁面 开门时 将门处设为内部界面(interior)。在 FLUENT 中 内部界面用在两个区域的界面处 没有任何实质厚度 仅起到将两个区域割开的作用^[7] 正适合开门时的情况。

风机入口边界采用速度进口条件 由于 K, ε 难以测量或计算 采用紊流强度与特性尺寸来定义紊流 紊流强度设为 5%^[8] 由于送风口为圆形 因此水力直径为圆直径 0.4 m 速度、温度按实验测量结果赋值 出口边界采用压力出口条件 出口压力及温度皆设为环境值 即 $P = 101325 \text{ Pa}$, $T = 300 \text{ K}$ 出口风速由软件自行计算得到。

2 计算方法

开关门的过程中 库门处的传质流动是一个自然对流过程 是由门内热空气与门外冷空气的压力差导致的 而这种压力差是由两种不同温度空气的密度差 也就是浮升力造成的^[8]。为了研究这个自然对流过程 引入波兴涅斯克(Boussinesq)假定 它有以下两方面内容 (1)除了引起流体流动的密度差外 方程式中其他的物性参数均可当作常数 (2)密度差和温度差成正比。建模过程在 Gambit 软件中完成 一共生成 23 000 个网格 网格图如图 2 所示 图中左边的大长方体为冷库 右边的小长方体为门外的环境空气。

将网格文件导入 FLUENT 中 按照上述模型及选择的边界条件进行设定 将门处设为壁面 先计算得出冷库稳态运行的结果 将此结果作为非稳态计算的初始条件 即冷库开门时 库内已达到稳态。然后选择非稳态模型 计算中需要加入 Boussinesq 模型 首先在材料面板中 将材料(空气)的密度指定方法设为 Boussinesq 即用 Boussinesq 方案指定密度 然后在热膨胀系数栏中键入合适数值 在热力学中热膨胀系数定义式为 $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)^{[8]}$ 经计算 本算例中热膨胀系数为 0.0034。再在操作条件中 激活重

力选项,根据建模时的坐标设置,在 Z 轴处填上重力加速度 -9.81m/s^2 ,至此,在 FLUENT 里,已完成 Boussinesq 的设定。开门过程是一个瞬态过程,因此采用 PISO 邻近修正算法来求解压力、速度的耦合,设定开门时间为 20 s,则每一秒钟的计算结果都可以被表示出来,以观察开门时温度场的变化,然后再将门的边界条件设为壁面,即将门关上,观察关门后库内温度场的变化情况。

3 计算结果与讨论

本研究中采用的数学模型是在谢晶等人提出的适合冷藏库流场计算的数学模型上发展改进的,其可靠性已由文献 [9] 用实验验证,在此不作赘述。

计算先得到冷库稳态运行后的结果,是一个三维的显示结果,另外,在冷库的中间(也是门的中间)取一个宽度-高度方向的切面,这在以后可以更直接地图示冷库门处温度场的变化。

图 3 中,红色区域为门外空气,此时未开门,门外空气即为环境温度(20℃),蓝色区域为冷风机直吹区域,是整个温度场中温度最低区域,由于门的传热,库内靠近门处的温度比其他处偏高。

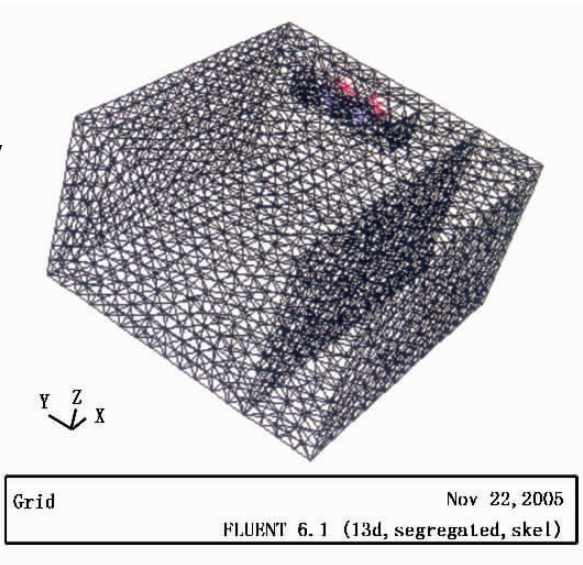


图 2 计算网格图

Fig.2 The mesh map

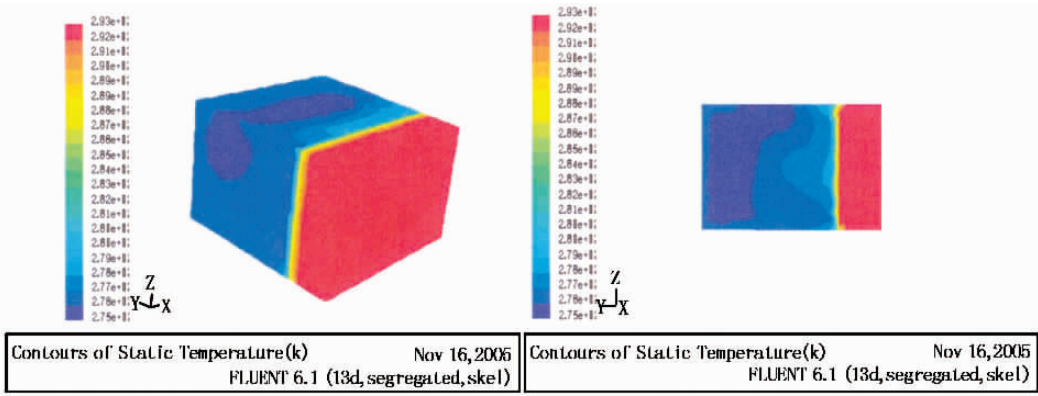


图 3 稳态结果的温度场

Fig.3 Temperature field of the steady result

下面将库门处边界设为 interior,计算 20 s 的开门过程中温度场的变化,取 5 s、10 s、15 s、20 s 的温度场来观察。

由模拟结果(图 4 和图 5)看出,开门后 5 s 时,门处发生剧烈的热、质交换,门附近上部的空气温度升高很快,而下部的空气则得到较好地保持,这是因为,冷空气密度比热空气大,开门后,热空气从门上部进入冷库,而冷空气从门下部流出,所以上部的温度场变化快,而由于冷风机的直吹作用,仍能保持一半的冷库空间有较好的冷却效果;10 s 时,外界空气的影响范围进一步加大,同时,上述保持较好的一半的冷库空间的下部开始受到影响,温度升高,这是由于冷风机位于冷库顶,吹风作用保持了上部的温度场;15 s 时,冷库内温度进一步升高,但外界空气对冷库温度场的影响区域没有多大改变,这说明开门后,外界对冷库的影响区域大概为冷库的 1/2 ~ 2/3 处(以门为起点),且主要影响冷库上部;20 s 时,外界对冷库温度的影响变化不大。

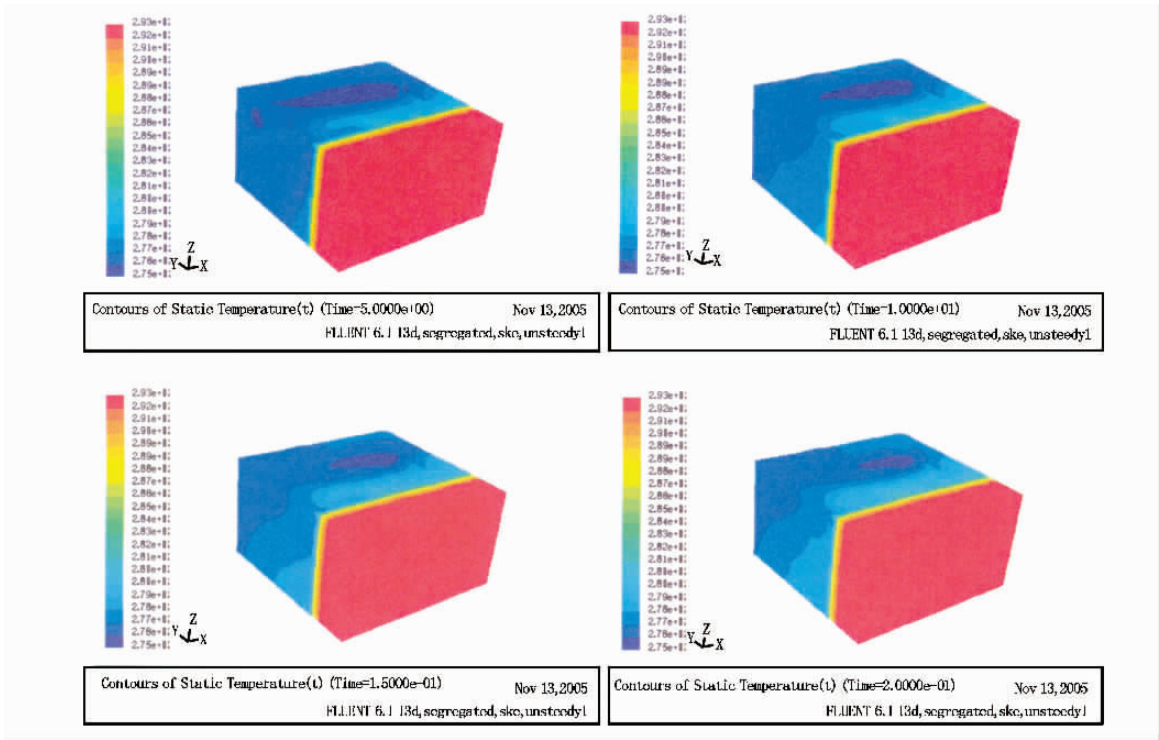


图 4 开门 5 s、10 s、15 s、20 s 的三维温度场
 Fig. 4 Temperature field in the door's opening course

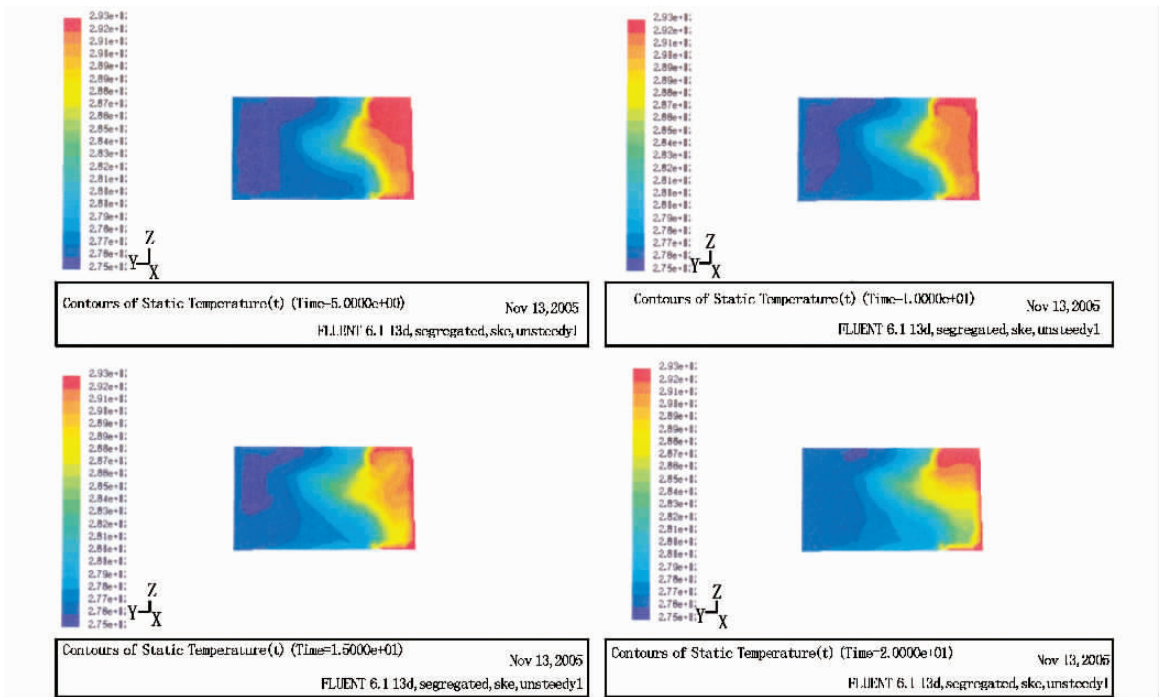


图 5 开门 5 s、10 s、15 s、20 s 的切面温度场
 Fig. 5 Temperature field of the vertical section in the door's opening course

开门过程完成后,将门处边界还原为壁面,即将门关上,再模拟 20 s,得到如下结果:
 由图 6 和图 7 可知,从关门起到 5 s 时,温度场没有什么变化;10 s 时,由于密度的作用,冷空气下

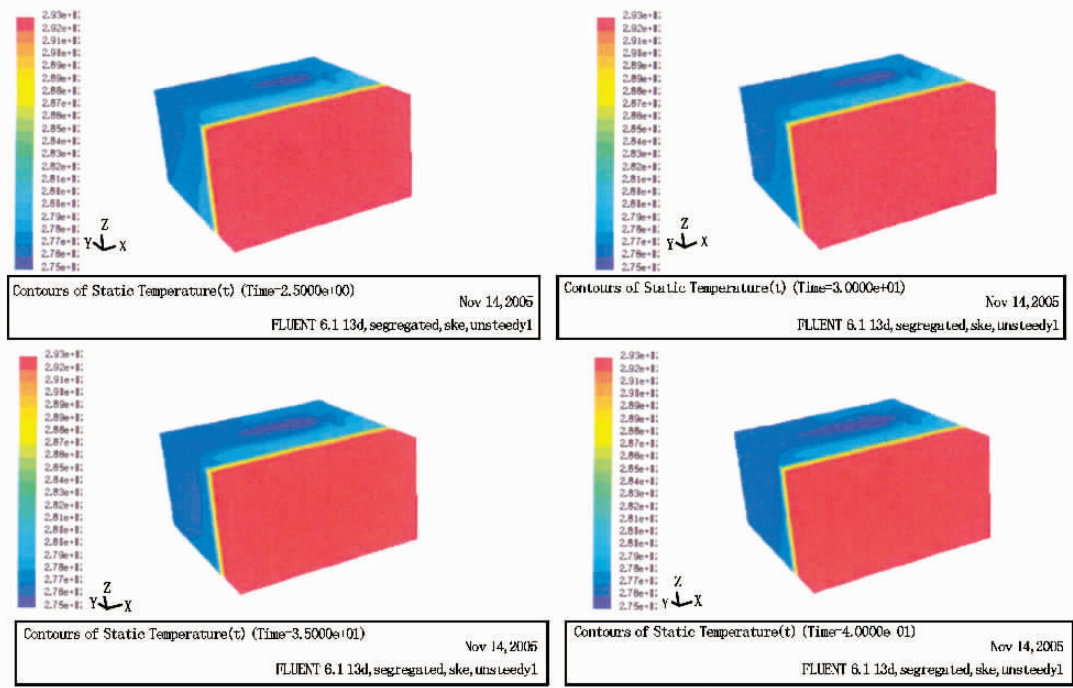


图 6 关门 5 s、10 s、15 s、20 s 的三维温度场
 Fig.6 Temperature field in the door's closing course

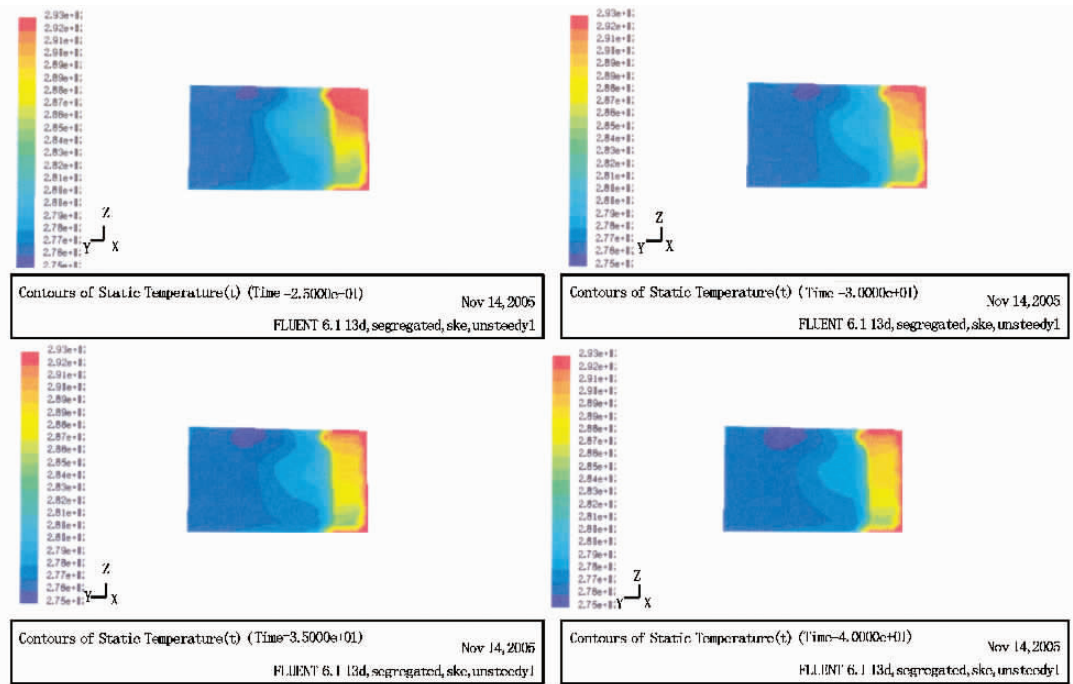


图 7 关门 5 s、10 s、15 s、20 s 的切面温度场
 Fig.7 Temperature field of the vertical section in the door's closing course

沉,下部的空气温度下降较快,上部空气也得到一定温降,但门附近上部一定区域的空气依然没有降温^[10];15 s时,冷库的上下部同时进一步降温,门附近上部的相对高温空气范围很大减少;20 s时,温度场进一步恢复,已比较接近开门前(图3)的状态。

综上所述,开门后5 s的时间内,门附近的温度场受到很大影响,而由于冷风机的作用,近一半的冷库区域没有遭受太大影响,5 s后,冷库内温度场受到影响范围变大,但15 s时温度场的影响范围基本稳定,只是在涉及到的范围内温度会有升高;关门后,冷库下部的空气温度场恢复较快,上部恢复较慢(10 s以后才明显下降)20 s后,温度可大致恢复至开始状态。

4 小结

本文运用CFD工具对一小型装配式冷库开关门的非稳态过程做了分析。分析中,引入了Boussinesq假定,模拟中考虑了浮升力的存在,对于开门研究了20 s内温度场的变化情况,然后关门20 s内的冷库温度场的恢复情况,模拟结果较好地符合了客观物理规律,较准确地反映了开关门时门处空气的温度变化情况。但由于时间及条件所限,本研究只是以空库为对象进行研究,而实际冷库装有货物,必须考虑货物摆放位置、高度和呼吸热对温度场的影响,由此提出降低开门时库外空气对货物贮藏质量的影响的具体措施,相信本研究能为实际冷库门处流场分析及优化设计打下一个很好的基础。

参考文献:

- [1] 何嘉鹏. 冷库大门的流场分析[J]. 冷藏技术, 1994, 4(1): 11-14.
- [2] 谢 晶, 瞿晓华, 施骏业. 计算流体力学在食品工业中的应用[J]. 上海水产大学学报, 2004, (2): 170-175.
- [3] Hu Z H, Sun D W. CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 46(3): 189-197.
- [4] Mirade P S, Daudin J D. A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer[J]. Drying Technology, 2000, 18(1/2): 81-97.
- [5] Havet R, Rouaud R. D. Numerical investigation of the airflow in a food-processing clean room[R]. Proceedings of the 1st International Conference on Simulation in Food and Bio-industries, The Netherlands Society of Computer Simulation International, 2000, 48-51.
- [6] Sahu A K, Kumar P, Patwardhan A W, et al. CFD modeling and mixing in stirred tank[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(13-14): 2285-2293.
- [7] 陶文铨. 数值传热学(第二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 347-353.
- [8] 杨强生, 浦保荣. 高等传热学(第二版)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2001. 247.
- [9] 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(2): 11-16.
- [10] Foster A M, Barrett R, James S J. Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, (25): 1102-1109.