

立式冷藏陈列柜内部结构对冷风幕流动的影响

陈蕴光, 袁秀玲

(西安交通大学制冷与低温工程研究所, 710049, 西安)

摘要: 针对立式冷藏陈列柜内部结构对冷风幕流动的影响进行了数值模拟研究, 分析了表征搁板位置的几何参数 D_v 和 D_h 对温度分布、速度分布与热负荷的影响. 结果表明: 内部搁板的位置和尺寸对于风幕流动和柜内温度分布具有重要影响, 搁板的存在有助于提高风幕流动的稳定性, 可使保证风幕稳定的 Richardson 数范围拓宽; D_v 对柜内温度分布影响较大, 相邻各层搁板之间的温差沿风幕流动方向逐渐增大, 且随着 H/D_v 增大, 柜内温度分布均匀程度增强, 但柜内平均温度差异较小; D_h 则对风幕流动轨迹和空气卷吸量影响显著, 因此对热负荷有较大影响, 但对柜内温度分布影响很小. 将 D_h/b_0 控制在 $0 \sim 0.5$ 范围内可以降低热负荷, 从而改善风幕的性能.

关键词: 立式冷藏陈列柜; 内部结构; 风幕

中图分类号: TB657 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0062-05

Effect of Interior Structure on Refrigerated Air Curtains in Multi-Deck Display Cabinets

CHEN Yunguang, YUAN Xiuling

(Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Numerical simulation was performed to study the effect of interior structure of multi-deck display cabinets on the flow characteristics of refrigerated air curtains. The temperature and velocity distributions as well as the cooling load were analyzed with different interior structures. The results show that the presence of the inside shelves is helpful to the flow stability of the cold air curtains, and the Richardson number that guarantees the flow stability is more extensive. The influences of two geometry dimensions (the vertical distance between the neighboring shelves D_v and the horizontal distance between the discharge grille and the front edge of the shelves D_h) were also studied respectively. The results indicate that D_v affects the inside temperature distribution significantly, and the temperature differences between neighboring shelves increase with the flow direction of the air curtain. As H/D_v increases, the temperature distribution is more uniform but the overall average temperature changes slightly. D_h influences the flow direction and the entrainment of the air curtains greatly, and then it has great effect on the cooling load but affects the inside temperature distribution slightly. It seems that the performance of the air curtains can improve when D_h/b_0 is from 0 to 0.5.

Keywords: multi-deck refrigerated display cabinet; interior structure; air curtain

敞开式冷冻/冷藏陈列柜在保证柜内温度的同时, 由于其开口设计便于顾客自由地取放食品, 因而在超市和零售店中应用十分广泛. 它不仅利用冷风

幕为柜内食品提供所需冷量, 而且还依靠风幕隔离外界热空气, 使柜内保持所需的储存温度. 冷风幕的流动特性非常复杂, 受到多种因素的制约, 如送风口

宽度,开口区长度,送风温度、速度与紊流强度以及送风角度等。

目前,对于冷冻/冷藏陈列柜的研究^[1-3]无论是数值研究还是实验研究,都是对具体的柜体进行的,因此通用性比较差,很难将所得结论推广于不同尺寸和型式柜体的优化设计中。因此,在前期研究中,本文作者将空仓时的立式冷藏陈列柜简化为开口腔体,对冷风幕的流动和换热规律进行了研究,对风幕流动的稳定性进行了探讨,指出每一个垂直冷风幕都有一个临界 Richardson 数(或临界 Reynolds 数),以保证冷风幕的隔热性能^[4]。

在实际应用中,冷藏陈列柜内部根据需要设有不同数目的搁板以及货载,这样的内部构造变化与开口空腔相比,必然会对风幕流动特性造成一定的影响。因此,有必要研究立式冷藏陈列柜内部构造对风幕流动的影响规律。

可以预期的是,风幕的稳定性由于搁板的存在而比空腔时有所提高,保证风幕封闭的临界 Re 会降低,但同时也会由于搁板的存在,使得风幕在向下流动的过程中与其前端碰撞,由此可能造成动量耗散,因此内部搁板的位置和尺寸值得专门研究,以便于陈列柜和风幕的设计。本文在前期工作的基础上,对搁板的位置和尺寸对风幕流动的影响进行了数值模拟研究。

1 物理问题与基本假设

如图 1 所示,表征陈列柜中搁板位置最关键的是 2 个尺寸,即出风口内沿与搁板前端之间的水平距离 D_h 和搁板之间的竖直距离 D_v 。本文假设柜内搁板长度均相同且竖直方向上均等距。实际的陈列柜搁板厚度与风幕长度相比甚小,建模时将搁板假设为无厚度板,这种简化不会对结果带来显著影响。

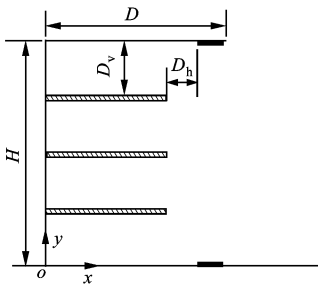


图 1 内部结构尺寸示意图

陈列柜腔体的高度(H)与深度(D)之比(下文简称高深比)为 2:1(为冷冻/冷藏陈列柜的典型几何尺寸),在顶部与底部的外侧有对应宽度相等的冷

风幕射流出口和回风口,腔体内部均为绝热表面。计算采用二维模型,采用 Boussinesq 假设,忽略流体中的黏性耗散,除密度外其他物性为常数,对密度仅考虑动量方程中与体积力有关的项,其余各项中的密度也作为常数处理,忽略外界热辐射。

2 数学模型与求解

以腔体的高度 H (即风幕长度 L)作为定性长度,以环境温度和风幕出口温度之间的温差来定义归一化温度,所用到的归一化量为

$$Gr_H = \frac{g\beta(T_{amb} - T_s)H^3}{\nu_s^2} \quad (1)$$

$$Re_H = \frac{V_s H}{\nu_s} \quad (2)$$

$$Ri_H = \frac{Gr_H}{Re_H^2} = \frac{g\beta(T_{amb} - T_s)H}{V_s^2} \quad (3)$$

归一化温度

$$\Theta = \frac{T - T_s}{T_{amb} - T_s} \quad (4)$$

热卷吸系数

$$\alpha = \frac{T_R - T_s}{T_{amb} - T_s} \quad (5)$$

归一化热负荷

$$Q^* = \alpha Re \quad (6)$$

式中:下标 amb 表示环境;S 表示送风;R 表示回风。

描述空气流动和换热的控制方程组由连续性方程、动量方程和能量方程组成。此外,本文计算流动为紊流,计算采用高雷诺数的 $k-\epsilon$ 模型,近壁区采用壁面函数法。所有变量的雷诺时均方程、 k 方程以及 ϵ 方程均可以如下统一形式表述

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (7)$$

在动量方程中考虑重力的影响,体积力一项采用如下形式

$$(\rho - \rho_0)g = \rho_0 g \beta (T - T_0) \quad (8)$$

本文采用有限体积法的 SIMPLE 算法进行求解,应用 FLUENT 软件计算,对流项采用二阶迎风差分格式。对于冷风幕进、出口区域附近应用较密的计算网格,以便于考察风幕的流动特性。

边界条件如下:风幕出风口为速度入口边界,给定温度和速度,紊流动能 k 和耗散率 ϵ 给定为^[5]

$$k_{inlet} = 1.5(u_{inlet} l)^2, \epsilon_{inlet} = C_\mu^{0.75} \frac{k_{inlet}^{3/2}}{l}$$

$$l = 0.07b_0$$

本文计算中紊流强度 I 均按 5% 计算.

风幕回风口为出流边界条件, 对各变量采用充分发展假定, 各变量的一阶导数为 0.

陈列柜腔体内各壁面为绝热无滑移边界. 外部扩大区域则给定压力边界, 给定环境温度和大气压, 所选取的扩大区域边界足够大, 不会影响风幕的流动和换热特性的计算结果. 在计算时, 对网格无关性进行了考察, 在 4 种不同密度的网格上进行计算, 对风幕出风口至回风口之间的流动区域和柜内空间进行局部加密, 当网格数增加至 20 247 以上时计算结果基本保持不变, 可以得到与网格无关的数值解.

3 结果与讨论

3.1 计算结果的实验验证

首先对不同出风状态时柜内温度与回风温度的计算结果与实验结果进行比较, 如图 2 所示, 计算值与实验结果的偏差基本都在 10% 以内, 说明计算模型是合理的.

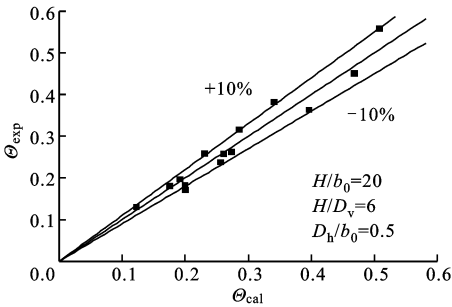


图 2 计算值与实验值的比较

3.2 D_v 的影响

首先考察 $D_h/b_0=1$ 时 (其中 b_0 为风幕初始厚度), 不同 D_v 时的情形, 计算参数取为 $Gr_H=2.7 \times 10^{10}$. 当有搁板存在时, 在腔体内部形成多个回流区, 这些漩涡都对风幕起到了支撑作用, 与文献 [4] 中空腔时的情况相比, 风幕的流动稳定性大大提高, 除非风幕出口流速非常低, 一般情况下都可以形成完整的风幕, 风幕可取的出口参数范围大大拓展, 不会出现空腔时风幕强烈内陷的情况. 图 3 所示为 $H/D_v=5$ 时温度分布随 Ri 的变化情况, 顶部近出风口处的温度基本不随 Ri 而改变, 中部和底部随 Ri 增大, 温度逐渐有所上升, 总体而言变化幅度不大, 而且比空腔时稳定得多. 由此可见, 负浮力射流由于密度差导致两侧压力的不平衡, 但在保证稳定流动的条件下, 重力的影响也有助于保持风幕流动的稳定性. 热负荷在风幕保持稳定流动时, 随出风速度的增大, 回风与出风之间温差减小, 但由于总流量

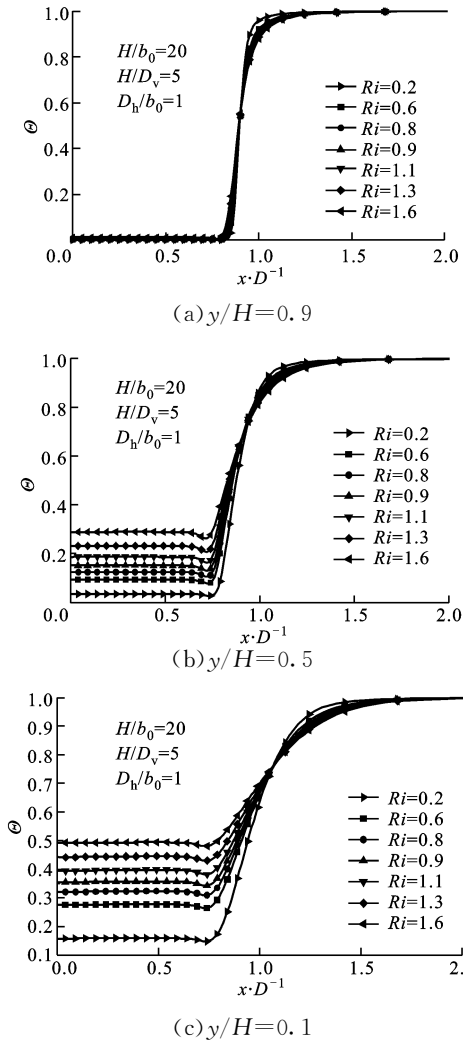


图 3 不同 Ri 时的温度分布

增大而导致热负荷升高. 不同 Ri 时的归一化热负荷如图 4 所示. 增大 Ri (或降低 Re) 可降低热负荷, 但会导致内部温度有所上升.

因此, 综合考虑温度分布和热负荷大小, 在实际应用中应根据所需要的柜内温度范围和热负荷来选取合适的 Ri (或 Re).

图 5 所示的结果显示: 搁板会显著地影响腔体内部的温度分布, 在风幕稳定流动的情况下, 相邻各层搁板之间的温差沿风幕流动方向逐渐增大; 随着搁板数目的增加, 相邻空间之间的温差降低, 柜内温度分布均匀程度增强; 在相同的出风速度和温度情况下, 最底层的温度几乎与搁板数目无关. 腔内平均温度随搁板数目的增加而有所降低, 最显著的是 H/D_v 由 3 增加为 4, 再由 4 增至 5 和 6 时平均温度降幅非常小.

H/D_v 不同时开口区域风幕出风口中心线上的速度分布如图 6 所示. 当搁板数目变化时, 横向与纵

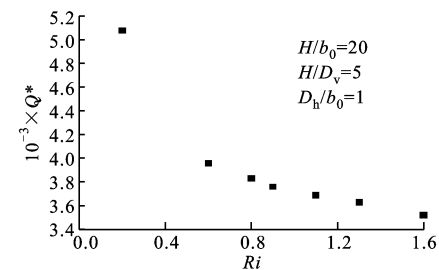


图 4 不同 Ri 时的热负荷

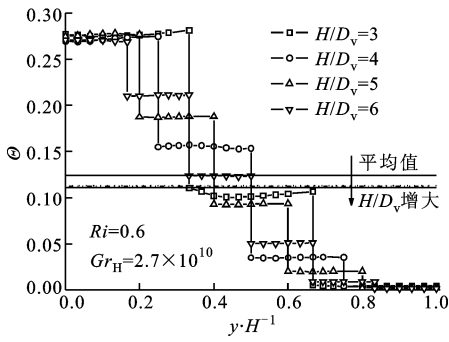
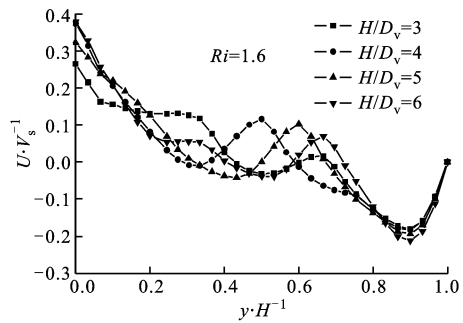
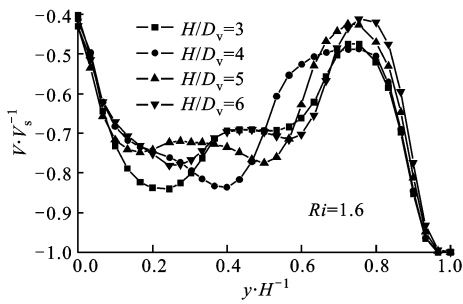


图 5 不同 H/D_v 时的中心线温度分布和腔体内平均温度

向速度变化趋势基本相同,只是由于搁板位置不同,阻碍风幕流动以及风幕发生碰撞的位置也有差异,这会对开口区的速度分布产生一些影响,进而对风幕的卷吸量也会造成一些改变,但从图 6 可见,回风口附近的水平速度分布十分接近,说明 D_v 的变化对卷吸量的影响不大。



(a) 横向速度



(b) 纵向速度

图 6 风幕出口中心线上速度分布

热负荷随搁板数目的变化如图 7 所示,可以看到随搁板数目变化,热负荷有些变化,但变化范围较小.这说明 H/D_v 对柜内温度分布影响明显,但对热负荷的影响则比较有限。

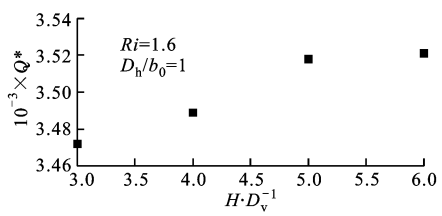
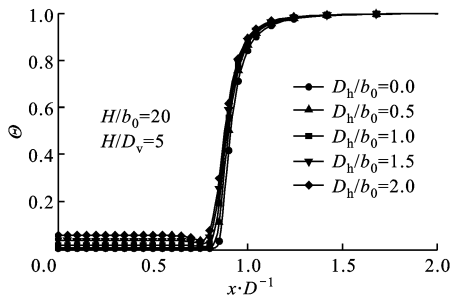


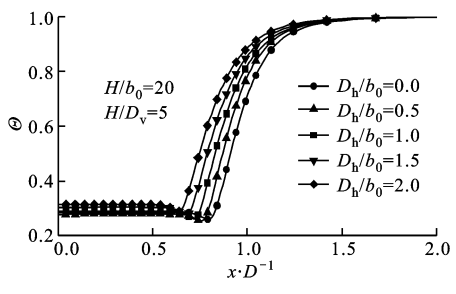
图 7 不同 H/D_v 时的热负荷

3.3 D_h 的影响

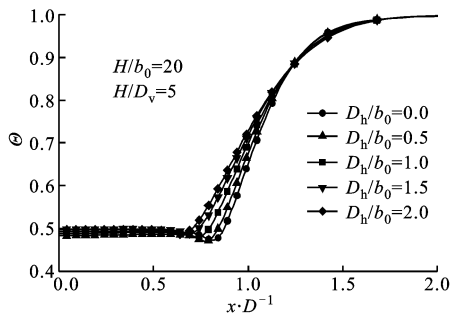
保持 $H/D_v=5$ 以及 Ri 为 1.6 不变,当 D_h 改变时,对内部温度场几乎没有影响,只是随着 D_h 减小,风幕流动轨迹逐渐向外侧推移,如图 8 所示. 此



(a) $y/H=0.9$



(b) $y/H=0.5$



(c) $y/H=0.1$

图 8 不同 D_h/b_0 时的温度分布

时,由于 Coanda 效应的作用^[6],风幕流动轨迹会根据搁板位置的不同而自动进行调整,然后沿搁板前端向下流动.温度变化则是在中部温度差异稍大些,顶部和底部差异都很小.

当 D_h/b_0 不同时,开口区域风幕出口口中心线上的速度分布如图 9 所示:当 D_h 变化时,横向速度变化趋势大体相同, y/H 在 0.6~1.0 之间时,横向速度变化较大,卷吸量也不同;在近回风口区域横向速度变化明显,外溢空气量随 D_h 减小而降低;纵向速度变化比较大,但能够明显看出在 D_h/b_0 较小时,纵向速度变化幅度小,风幕的稳定性较好;当 $D_h/b_0 = 0$ 时,除在搁板设置的位置由于风幕与搁板前端的作用而有速度波动外,沿风幕长度方向总体流动平稳.当 D_h/b_0 增大时,风幕由于压差的作用贴附于搁板向下流动,因而内陷量较大,造成较大的空气卷吸量.

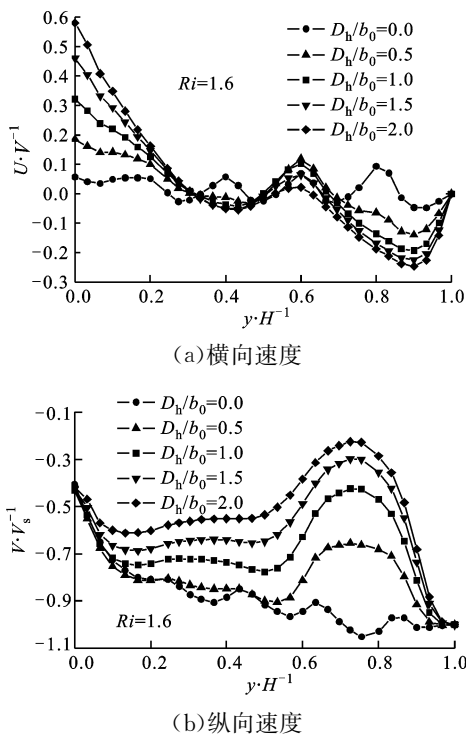


图9 风幕出口中心线上速度分布

卷吸量不同会导致热负荷存在差异,如图 10 所示, D_h/b_0 为 0 时热负荷最低,当 D_h/b_0 在 0.5~1.5 范围变化时负荷变化较快,大于 1.5 时则变化稍见平稳.因此, D_h 对柜内温度分布影响甚微,但会显著影响风幕流动轨迹和空气卷吸量,进而影响热负荷.

4 结 论

本文针对立式冷藏陈列柜中搁板的位置和尺寸

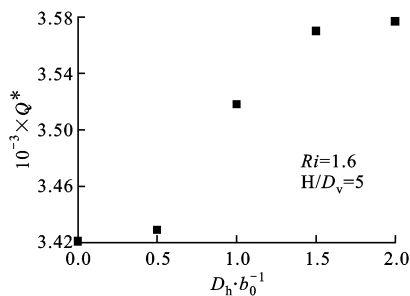


图10 不同 D_h/b_0 时的热负荷

对风幕流动的影响进行了数值模拟研究,结果表明内部搁板有助于提高风幕流动的稳定性,使保证风幕稳定的 Richardson 数范围拓宽.

对表征搁板位置的几何参数 D_v 和 D_h 的影响分别进行分析表明, D_v 与 D_h 对柜内温度分布和热负荷均有重要影响,在风幕设计时应根据温度要求和负荷量综合加以考虑.计算结果显示, D_v 对柜内温度分布影响较大,而 D_h 则对风幕流动轨迹和热负荷影响显著.在实际应用中 D_v 要根据需要而改变,但 D_h/b_0 则可以控制在 0~0.5 范围内,以改善风幕的性能.

参考文献:

- [1] STRIBLING D, TASSOU S A, MARRIOTT D. A two-dimensional computational fluid dynamic model of a refrigerated display case [J]. ASHRAE Transactions, 1997, 103(1):88-94.
- [2] CORTELLA G, MANZAN M, COMINI G. CFD simulation of refrigerated display cabinets [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(3): 250-260.
- [3] NAVAZ H K, FARAMARZI R, GHARIB M, et al. The application of advanced methods in analyzing the performance of the air curtain in a refrigerated display case [J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 2002, 124(3):756-764.
- [4] CHEN Yunguang, YUAN Xiuling. Simulation of a cavity insulated by a vertical single-band cold air curtain [J]. Energy Conversion & Management, 2005, 46(11/12): 1745-1756.
- [5] VERSTEEG H K, MALALSEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. Harlow, England: Longman Scientific & Technical, 1995.
- [6] ASHRAE. ASHRAE fundamental handbook[M]. Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2001.

(编辑 王焕雪)