

冷藏陈列柜风幕卷吸特性的数值分析

陈蕴光, 袁秀玲

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 应用数值方法分别对不同射流速度分布(均匀分布、2 种线性分布和抛物型分布)的垂直冷风幕的卷吸特性进行了研究,对体积卷吸率、温度分布及热卷吸系数进行了分析比较. 结果表明,速度分布对风幕的卷吸特性有着重要影响,内侧较大的线性速度分布是其中性能最优的,对外部空气的卷吸量最小,对柜内空气的卷吸量最大. 因此,在保证柜内温度的前提下,通过在出风口设置合适的整流装置,使外侧速度尽可能减小,可以显著降低对外界空气的卷吸,从而减小冷藏陈列柜的热负荷.

关键词: 风幕;卷吸;冷藏陈列柜

中图分类号: TB657 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)09 - 0943 - 04

Numerical Analyses of Entrainment Characteristics of Air Curtains in Multi-Deck Refrigerated Display Cases

Chen Yunguang, Yuan Xiuling

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Numerical analyses were performed to study the entrainment characteristics of cold air curtains with different initial velocity profiles including uniform profile, linear profile of two kinds, and parabolic profile. Volumetric entrainment rates, temperature differences between returned and discharged air and thermal entrainment factors are compared and analyzed. The results show that the initial velocity profiles have striking influences on the entrainment characteristics of cold air curtains. In all studied the linear profile with higher velocity adjacent to inside case has the best performance, and it has the lowest entrainment rate from ambient and the highest from inside case. Therefore adjusting velocity profiles properly by setting up deflectors at the discharge grille can reduce entrainment from ambient and thus the cooling load of refrigerated display cases can be decreased.

Key words: air curtain; entrainment; refrigerated display case

目前,对陈列柜风幕性能的研究还不是很深入,对于风幕的卷吸特性研究很少.其原因在于风幕的卷吸特性很难凭借普通的实验方法得到准确的结果,而应用计算流体力学(CFD)模拟计算也大多集中于风幕流动的速度场和温度场的研究.然而,风幕卷吸作用是造成陈列柜热负荷的主要来源,要对冷风幕流动机理有准确的认识,就必须对其卷吸特性加以研究.文献[1]采用 $TiCl_4$ 对卧式陈列柜内的空气流动进行了可视化研究,直观地观察到风幕对内、外侧空气的卷吸现象和流动状况,但是这种方法只

能对物理过程进行定性分析,不能得到定量结果.文献[2]使用数值计算和实验相结合的研究方法,利用动态粒子速度成像技术对垂直风幕的流动特性进行了实验研究,并采用 CFD 方法对一台中温立式陈列柜进行模拟计算,得出了不同温度和速度时风幕对外界空气的卷吸率.

此外,已有文献的数值计算常常假定冷风幕出风口速度是均匀分布的,但这在实际上是不可能的.在实际应用中,人们常常在风幕出口处采用一些整流装置来起到抑止紊流的作用,使风幕沿出风

口宽度方向的速度分布得到调整.不同出口速度分布形式的风幕,其卷吸作用是有差异的.

本文研究的对象为立式单层风幕冷藏陈列柜,共有5层搁架,开口区纵向长度约为117 m,如图1所示.针对几种不同的风幕射流速度分布包括均匀分布、线性分布以及抛物型分布等,试图分析各种情况下的风幕卷吸特性,为优化陈列柜设计提供理论指导.

1 数学模型

1.1 基本假设

由于陈列柜长度方向远大于其他方向的尺寸,所以简化为二维模型.假设流动为稳态紊流,在风幕稳定流动时各处的时均量均保持恒定,忽略粘性耗散和热辐射.采用 Boussinesq 假设,除密度外其他物性参数为常数,考虑浮升力的影响,密度变化只考虑动量方程中与体积力有关的项.对于外边界采用足够大的计算区域,使得外边界对于柜内和射流的流动和换热基本没有影响.

1.2 控制方程

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \overline{u'u'} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{u'v'} \right) & \quad (2) \\ \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} - \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \overline{v'v'} \right) + g & \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vT)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial T}{\partial y} \right) & \quad (4) \end{aligned}$$

以上各方程中,除脉动项外均为时均量.紊流模型采用 $k-\epsilon$ 两方程模型,近壁区采用壁面函数法,详见文献[3].

1.3 边界条件

风幕出风口速度和温度给定, k 和 ϵ 按下式给定, $k_{inlet} = \frac{3}{2} (u_{inlet} \Pi)^2$, $\epsilon_{inlet} = C_{\mu}^{0.175} \frac{k_{inlet}^{3/2}}{l}$, $l =$

$0.107b$, b 为出风口宽度.回风口取为出流边界条件,采取局部单向化处理.柜体壁面取为绝热无滑移边界.扩大区域边界取为外界空气温度,压力取为环境大气压,近似认为周围空气静止,速度取为0.

1.4 数值方法

数值计算采用有限容积法,对流项离散格式采用二阶迎风差分,采用压力与速度耦合的 SIMPLE 算法.计算中采用结构化网格,如图2所示,将计算区域分为5个区域,对风幕射流区域加密网格,网格总数为19 763.

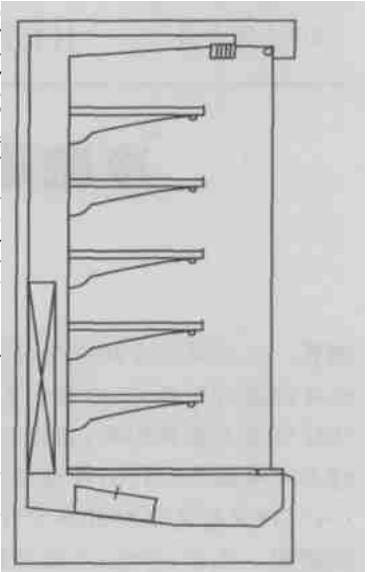


图1 立式多搁架陈列柜示意图

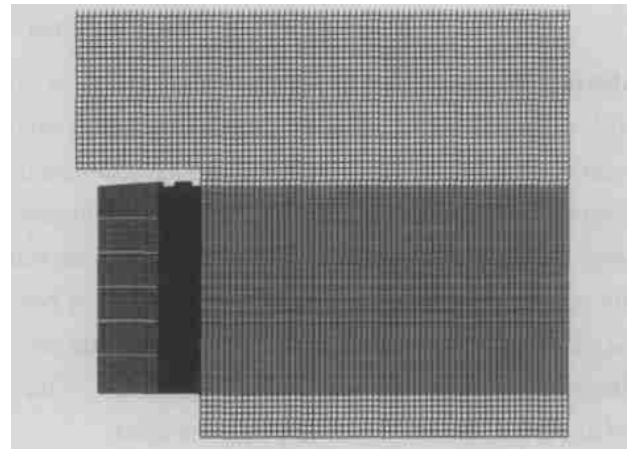


图2 计算区域网格划分示意图

2 实验测试

为了验证计算模型的正确性,作者对一台立式单层风幕冷藏陈列柜进行了实验研究.所研究的立式冷藏陈列柜尺寸(长×宽×高)为214 m×111 m×212 m,共有5层搁架,开口区纵向长度约为117 m.制冷系统采用分体式冷凝机组.整个实验过程在标准恒温恒湿间内进行,室内的温度、湿度和空气流动速度均可调.温度调节由一套独立的制冷系统和电加热系统来实现,湿度调节由加湿除湿装置实现,室内空气流速由若干变频风机来调节.

保持室内环境温度为27℃,相对湿度为70%.

测试参数包括风幕送风速度和温度、各层搁架和底板上特征点的温度。机组开机运行 2 h 达到稳定状态后,开始记录数据,温度值由 T 型热电偶测得,风速采用热线风速仪测量,将各点实验信号统一送入混合记录仪进行处理和显示,每 10 s 记录一次,选取稳定运行 1 h 的数据计算平均值作为最终的实验结果。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

通过对风幕送风速度的测量,得出沿出风口宽度方向速度大致呈均匀分布的结果,在计算中将其作为已知边界条件给定。计算和实验结果的比较如表 1 所示。

表 1 立式陈列柜测试点温度的计算值与实测值比较

测试点	T/	
	计算值	实测值
第 1 层搁板中央	1174	3135
第 2 层搁板中央	3100	5145
第 3 层搁板中央	6176	8159
第 4 层搁板中央	8102	9116
第 5 层搁板中央	10153	8196
底板中央	11178	9129
回风口	12169	11165

从表 1 可以看出,计算值与实测值趋势相符,数值较为接近,说明所建立的计算模型能够基本反映温度场的分布。

3.1.2 不同速度分布的影响

在实际应用中,陈列柜风幕出口常采用蜂巢结构的整流装置抑制过大的紊流度,使出口的流动状态尽可能地处于过渡区或层流区。如果同时采用不同的截面尺寸(图 3 中示出 2 种),还可以起到调节出口速度分布的作用。

本文研究 4 种速度分布(如图 4 所示),揭示不同速度分布时冷风幕的卷吸特性。第 1 种为均匀分布;第 2 种和第 3 种均为线性分布,前者邻近柜内侧速度较大,后者反之;第 4 种为抛物型分布。对于以上 4 种情形,假定空气流量不变,则出风口截面上的平均流速相等。本文在计算中将冷风幕初始平均速度取为 0.19 m/s;对于线性分布,最大速度取为最小速度的 2 倍,而抛物型分布则满足泊肃叶分布。

3.1.2.1 空气体积卷吸率 风幕射流自出风口附近开始就与周围的外部空气和柜内空气掺混,形成内外 2 个混合区,直至 2 个混合区汇合。在汇合点之上为射流初始段,在汇合点以下为射流的充分发展段。当射流到达回风口时分为三部分:中间主体部分进入回风口以形成循环风量;风幕内侧有一部分空气流回柜内,以补充被卷吸的空气流量;风幕外侧也有部分空气溢出,补充被风幕卷吸的空气流量。要得出空气卷吸率,需计算出溢流量,因为二者是相等的。图 5 所示为横向速度分布,从回风口向上引一线段(如图 5 中 AB 线段所示),直至横向速度等于 0 之处,沿这条直线对横向速度积分即可得到总溢流量,也就可以得到风幕对环境空气的体积卷吸率。对于柜内卷吸率的计算方法与此大致相同,只是要将各层搁板以上空间的卷吸率相加,得出内部总卷吸率。

卷吸率计算结果见图 6,不同速度分布包括均匀分布(以下简称 UU),内侧较大的线性分布(以下简称 LUA),外侧较大的线性分布(以下简称 LUB)和抛物型分布(以下简称 PU)。图中所连实线并不具有任何意义,仅仅是为了便于比较。

由图 6 可以看出,对于外界空气的卷吸作用,LUB 最强,LUA 最弱,其他二者介于它们之间。LUB、PU 和 UU 的体积卷吸率分别比 LUA 高 16%、1515% 和 513%。风幕外侧速度梯度大会对环境空气具有较强的卷吸作用,导致风幕与外界传热传质加强,热负荷随之增大。很明显,采用 LUA 可以显著降低卷吸率,在满足柜内温度的前提下,能够降低系统的热负荷。

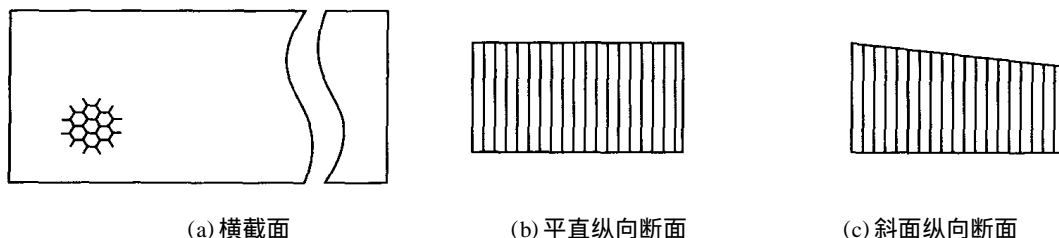


图 3 蜂巢整流器示意图

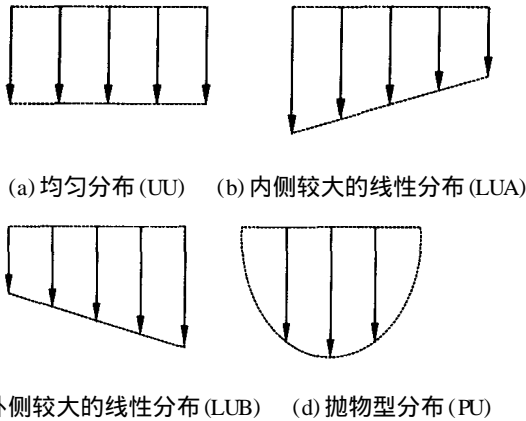


图4 不同速度分布示意图

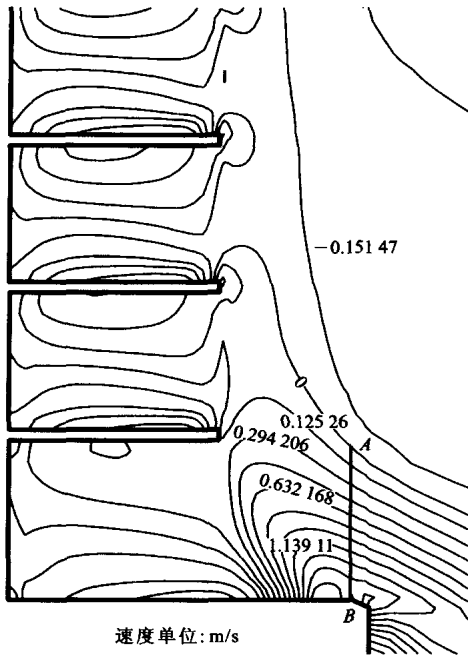


图5 横向速度分布图

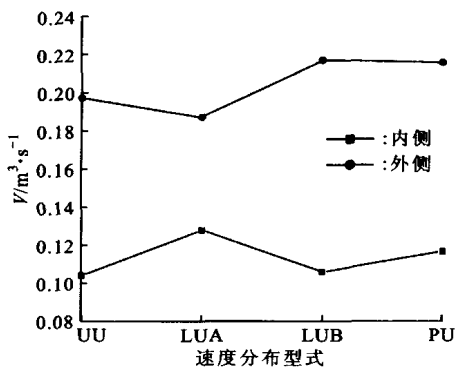


图6 不同速度分布的风幕的空气卷吸率

由图6也可看出,对于柜内空气的卷吸作用则是LUA最强,比UU、LUB和PU分别高2310%、

2017%和914%。对柜内空气的卷吸率高,则冷风幕与柜内空气的热质交换更强烈,因此柜内温度就越均匀。

31212 温度分布 如图7所示,第1、2层搁板温度差异并不大,以下各层随着累积卷吸率增大,柜内温度差异逐渐增大。

送回风温差是衡量陈列柜热负荷的重要指标,温差越大,热负荷就越大。文献[4]研究得出,在温度为25℃,相对湿度为55%的环境中,陈列柜稳定运行时,由于风幕卷吸造成的负荷量大约为总负荷的75%。由图7可以看出,LUA的送回风温差最小,LUB、PU和UU则分别比LUA高2619%、2318%和219%,所以LUA更节能。

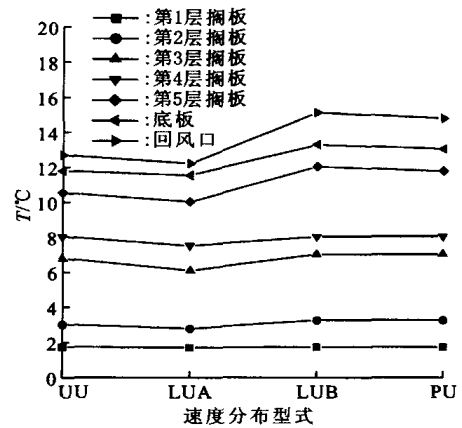


图7 不同速度分布时的柜内温度分布

31213 热卷吸系数 为了便于快速估算风幕卷吸空气的热力影响,定义热卷吸系数 $\eta = \frac{T_{return} - T_{jet}}{T_{amb} - T_{jet}}$ 。其中: T_{return} 为回风平均温度; T_{jet} 为射流出风平均温度; T_{amb} 为环境温度。若风幕没有热量损失,则热卷吸系数为0;随着卷吸量的增大,回风温度升高,在极限情况下回风温度等于环境温度,热卷吸系数为1;在实际应用中介于0~1之间。

4种速度分布对应的热卷吸系数如图8所示。热卷吸系数与空气体积卷吸率的趋势相似,LUA同样是最底的,因此由风幕卷吸带来的热负荷也最小。

4 结论

本文对立式冷藏陈列柜垂直风幕不同速度分布(均匀分布、2种线性分布和抛物型分布4种情况)时的卷吸特性进行了研究,对体积卷吸率、送回风温差和热卷吸系数进行了分析比较。结果表明,速度分布对风幕的卷吸特性有着重要影响,内侧较大的线

(下转第962页)

(2) 在计算物体高度时,不需要对整个测量系统进行几何参数标定,也不需要成对成像平面和实物空间进行复杂的坐标标定,只需要对投影条纹图进行处理,得到变形条纹图的相位值,利用相位值和成像对应关系计算出对应的投影直线方程和成像直线方程,它们的交点就是物体的空间坐标。

(3) 投影系统和成像系统的参数是在系统搭建时一次完成的,不需要重复标定。

(4) 对于不同的测量物体,可以随意调整投影条纹的周期,而且相移步长精确。

(5) 该测量方法存在的不足之处:当系统建立以后,参考平面不能移动;当测量陡度大的物体时,获取的投影条纹图有阴影存在,而该测量方法不能得到阴影区域的相位数据,因此该方法只适合测量陡度小的扁平物体。

参考文献:

- [1] Li J, Su X Y, Gou L R, An improved Fourier transform profilometry for automatic measurement of 3D object shapes[J]. Opt Eng, 1990, 29(12): 1439 - 1444.
- [2] Lin J F, Su X Y. Two-dimensional Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three dimensional object shapes[J]. Opt Eng, 1995, 34(11): 3297 - 3302.
- [3] Tang S, Hung Y Y. Fast profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes [J]. Appl Opt, 1990, 29(20): 3012 - 3018.
- [4] 许庆红,钟约先,由志福.光栅投影轮廓测量的系统标定技术[J].光学技术,2000,26(2):126 - 133.
- [5] Asundi A, Zhou W. Unified calibration technique and its applications in optical triangular profilometry [J]. Appl Opt, 1999, 38(16): 3556 - 3561.
- [6] Zhao Hong, Chen Wenyi, Tan Yushan. Phase unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes[J]. Appl Opt, 1994, 33(20): 4497 - 4500.

(编辑 管咏梅)

(上接第946页)

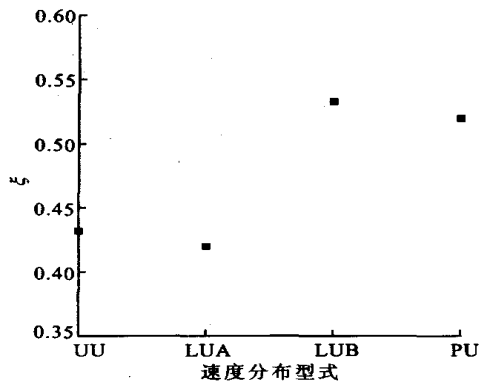


图8 不同速度分布时的热卷吸系数

性速度分布是其中性能最优的,对环境空气的卷吸率最低,对柜内空气的卷吸率最高,送回风温差最小.因此,在保证柜内温度一定的前提下,通过在出风口设置合适的整流装置,使外侧速度尽可能减小,

可以显著降低对外界热空气的卷吸,减小送回风温差,从而降低陈列柜的热负荷,达到优化系统的目的。

参考文献:

- [1] 牛璐琳. 敞开卧式低温陈列柜冷风幕的流动及换热的研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 1996.
- [2] 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 J Fluid Engineering, 2002, 124(3): 756 - 764.
- [3] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 第2版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [4] Adams P. The intereffect of supermarket refrigeration and air conditioning [J]. ASHRAE Trans, 1985, 91(1B): 423 - 433.

(编辑 王焕雪)