

间冷式冰箱冷藏室内流场的粒子图像速度场实验研究

孟祥兆, 俞炳丰

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 以一台 BCD-190W 间冷式冰箱为研究对象, 制作了间冷式冰箱透明模型, 搭建了冰箱模型中空气流场测量的实验系统. 采用数字化粒子图像速度场(DPIV)技术测量了间冷式冰箱模型冷藏室内特征平面区域内的平均速度分布. 实验测量结果表明: 冷藏室顶层间室内送风口流速最大, 底层间室送风口流速略小, 而中间两层间室送风口流速低于 0.1 m/s, 不能满足设计功能要求; 各间室内对称的 2 个送风口流速差别明显, 必将导致冰箱间室内温度分布不均匀. 实验结果验证了 DPIV 技术用于测量间冷式冰箱内流场的可行性, 揭示了冰箱送风口流速和流量设计中存在的不足, 并进一步指明了各间室流量分配的关键在于风道的阻力和流量设计, 可为改进冰箱结构和性能提供参考.

关键词: 间冷式冰箱; 流场; 实验研究

中图分类号: TB657 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1075-05

Digital Particle Image Velocimetry Measurement of Inner Flow Field in Cooling Chamber of Frost-Free Refrigerator

Meng Xiangzhao, Yu Bingfeng

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

Abstract: A transparent model based on a BCD-190W type frost-free refrigerator was constructed with organic glass, and the experiment system for measuring the air flow characters in the cooling chamber of the model was built. Using digital particle image velocimetry (DPIV) technology, the mean velocities distributions on the typical 2-D zones in the cooling chamber of the model were measured. The experiment results show that the air flow velocities and air flow rates at the supply-air openings were non-uniform. The air flow velocities at the openings in the top chest were the largest in the four chests, and those in the fourth chest were somewhat lower. Moreover, the air velocities at the openings in the second and third chests were less than 0.1 m/s, and thus the flow rates could not meet the function requirement of the chests. Through the analysis of the velocities distributions, the practicability of using DPIV system to measure the flow characters in the chests of the model were verified, and the shortages of the air velocities and flow rates design were discovered. The measurement results also indicate that the resistance and flow rates design for the air flow ducts are the key factors for the refrigerator design.

Keywords: frost-free refrigerator; flow field; experimental research

间冷式冰箱依靠冷空气循环风道和送回风口的合理设计, 将经过蒸发器冷却的空气送入各个间室, 形成希望的流场分布特征. 对间冷式冰箱间室内流

场的研究对于提高间冷式冰箱的使用性能和降低能耗都是十分重要的. 现有文献主要集中于温度场和流场的计算模拟和温度场的实验测量^[1-5], 对于流场

的实验研究则刚刚展开^[6]. 间冷式冰箱间室内流场的准确测量一方面可以用来全面验证计算模型的正确性,同时可以为合理设计冰箱的送回风系统结构提供依据. 然而,间冷式冰箱各间室的送回风口布置复杂,必须选择合适的测量手段进行全场测量.

数字化粒子图像速度场(DPIV)技术是一种非接触、瞬时、动态、全流场直接测量的新技术^[7-9],其基本原理是在流场中散布合适的示踪粒子,用脉冲激光片光照射所测流场区域,采用 CCD 相机连续记录粒子图像运动序列,对相继两帧数字图像中的相应区域作互相关处理,取得该区域上粒子图像的平均位移,从而得出该区域内流体质点的平均速度. DPIV 技术已经成为二维全场测速的标准方法.

1 DPIV 模型实验的可行性^[10]

本实验测量在透明的冰箱模型上进行,为了使实验结果准确反映原型流场,必须保证模型和原型流场的相似性,包括几何相似、速度相似、温度相似、普朗特准则相等和雷诺准则相等. 实验中,透明冰箱模型与原冰箱尺寸相同,满足了几何相似. 冰箱模型与原型采用相同的轴流风扇,可保证模型和原型中的空气流量基本相同. 冰箱冷藏室内储藏温度要求在 0~10℃ 范围内,实验中空气温度为 3.4℃,由温度差异造成的普朗特数的最大误差为 2.0%. 合理控制风扇转速,可以使模型和原型中空气流动雷诺数和欧拉数接近. 在模型和原型中,都可以忽略重力对流动的影响,即弗汝德数的影响可以忽略. 以上分析表明,模型与原型流场的相似准则可以保证.

2 间冷式冰箱模型 DPIV 测试系统

本实验在西安交通大学流体机械国家专业实验室进行,二维 DPIV 系统经过实验标定^[11],速度测量误差在 1.0% 以内.

DPIV 测试系统主要由光路系统、图像采集系统、同步控制及图像数据分析系统组成,如图 1 所示. DPIV 系统测量原理见图 2. 采用大功率的集成化双 Nd:YAG 激光器作为光源,可产生每脉冲 300 mJ、持续时间 10 ns、波长 532 nm 的脉冲光束,光束通过光路系统形成厚度约 1 mm 的片光,照亮流场中的示踪粒子. CCD 相机采集粒子图像信号,其分辨率为 1 018 像素×1 008 像素,最大采集速率为 30 帧/s,可连续采集 1 000 帧图像,并可以保证采集一对图像的时间间隔在 1 μs 以内. 同步器控制激光

脉冲的发出和图像采集的顺序,可保证系统中的所有部件按照一定的时间顺序协调运行.

示踪粒子施放是 DPIV 测量的一个关键问题,尤其对于空气流动的测量. 对示踪粒子最重要的要求是可见度高,且流动跟随性好. 本实验采用的示踪粒子是与设备配套提供的,专用于空气流场测量,平均粒径为 1~2 μm,分布范围集中,且流动跟随性好. 在实验中,先将示踪粒子烟雾送到冷冻室中,然后让风扇开始运转,待观察到粒子烟雾分布比较均匀且浓度合适时开始进行图像采集.

为了降低激光通过有机玻璃的强度损失和折射等影响,且保证整个模型的强度,选择了 3 mm 有机玻璃板材料. 以一台 BCD-190W 型间冷式冰箱(上冷冻下冷藏)为基础,简化了对间室内流动影响较小的门上搁架,按照原型尺寸,且送风风扇和蒸发器用原型配件,制作了间冷式冰箱透明模型.



图 1 DPIV 测试系统

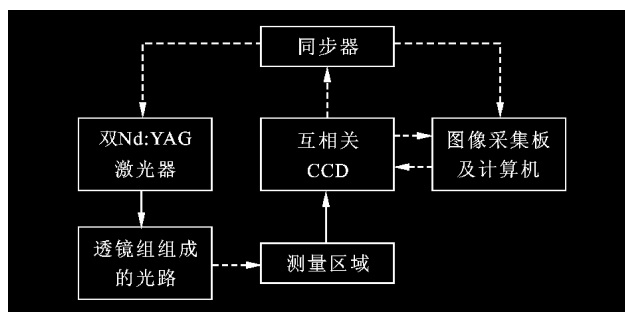


图 2 DPIV 系统测量原理

3 测量结果和分析

3.1 间冷式冰箱模型的结构

间冷式冰箱模型为上冷冻下冷藏结构,如图 3 所示. 冷藏室分为 4 层,尺寸如图 4 所示. 冷藏室总体高度(z 轴方向)为 695 mm,总宽度(x 轴方向)为 450 mm,总深度(y 轴方向)为 440 mm,其中第一层深度为 350 mm,第二层深度为 370 mm,第三层深

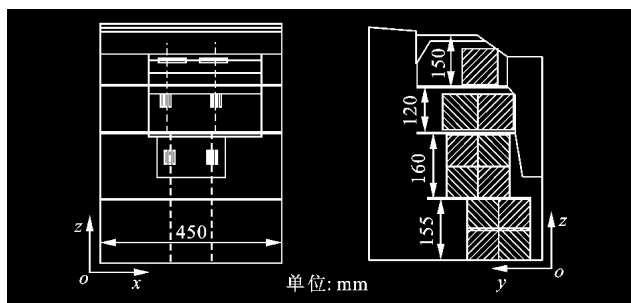


图3 冰箱模型结构示意图

度为 390 mm.

3.2 测量区域的选择

测量区域以能够反映间室内主流特征为主要原则,又要反映出不同风口之间的性能差别.考虑到激光片光照射到壁面时,在 CCD 相机的底片上形成一个亮度极高的区域,不能获得正确的流场信息,且容易对相机芯片造成损坏,需要测量区域离开壁面一定的距离.本实验 DPIV 系统提供激光片光的有效宽度约为 100 mm,对较大的流场区域需要分割进行测量.综合考虑送风口形状和位置因素,确定了图 4 所示的测量区域,图中阴影部分和虚线部分显示了所选择的测量区域的相对位置.



(a)主视图(y方向) (b)左视图(x方向)

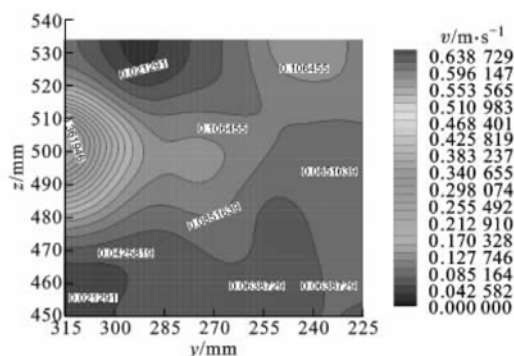
图4 冷藏室待测区域示意图

3.3 测量结果和分析

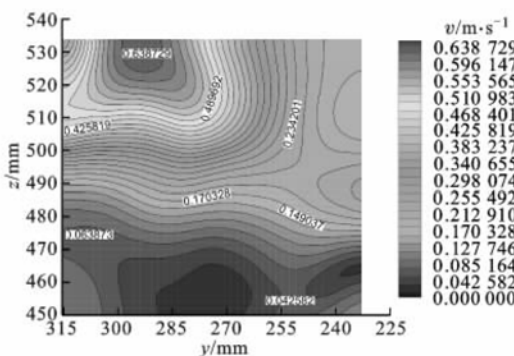
3.3.1 冷藏室顶层测量结果 图 5 表明在测量区域内测得左侧送风口的最大流速为 0.37 m/s,右侧送风口的最大流速为 0.64 m/s,送风射流的影响范围很小.图 6 表明,送风口出口风速有偏向上方的趋势,这是由于送风口的背部风道设计造成的.

3.3.2 冷藏室第二层测量结果 图 7 表明,整个测量区域空气流动速度均很小,左侧送风口测量到的最大流速为 0.073 m/s,右侧送风口测得最大流速为 0.081 m/s,且整个测量区域流速分布均匀.送风

口流动的影响不明显,这是由于与送风口相连的风道阻力过大,使得送风口的风压不足以克服送风口和间室内的流动阻力所致.



(a)顶层左侧送风口

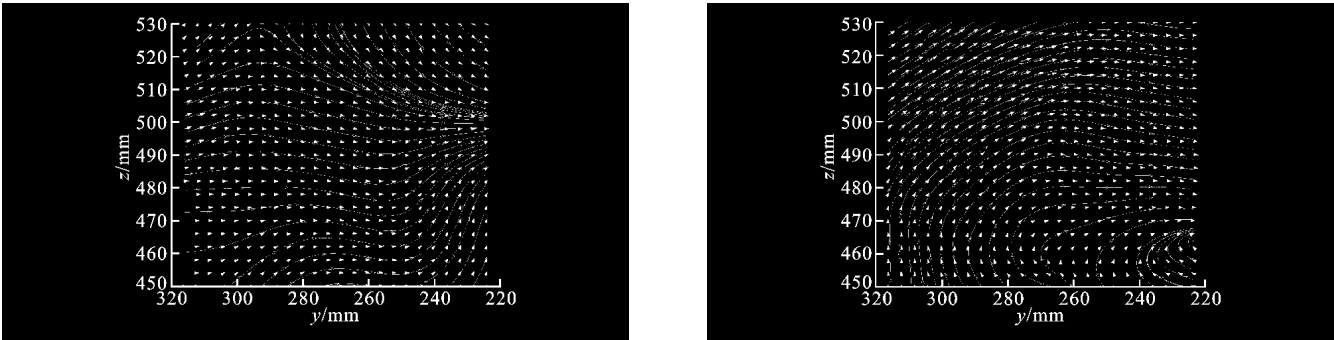


(b)顶层右侧送风口

图5 冷藏室顶层间室送风口中心平面内速度等值线分布图

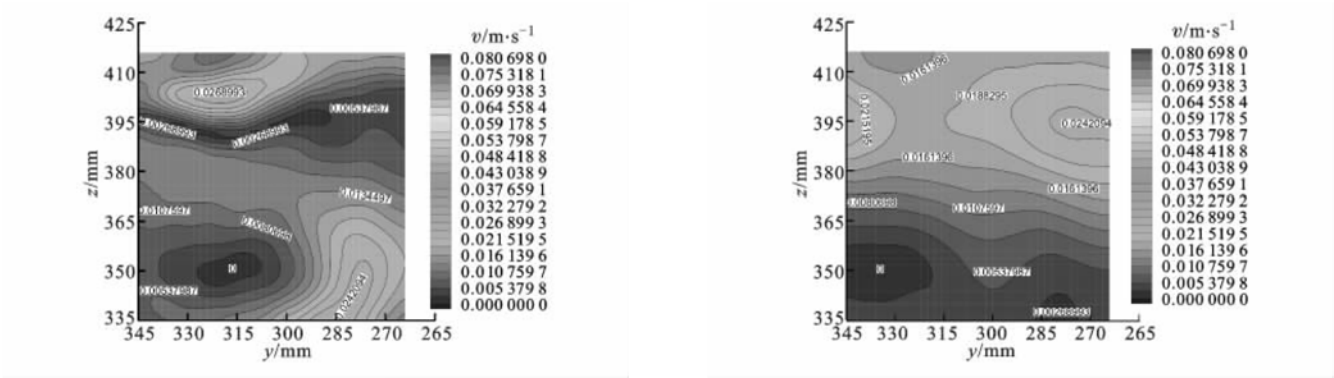
3.3.3 冷藏室第三层测量结果 图 8 表明,在整个测量区域中,空气流动速度值均很小,测得左侧送风口附近区域最大流速为 0.085 m/s,右侧送风口附近区域最大流速为 0.066 m/s,送风口的影响在速度等值线分布图中没有明显反映.从图 9 可以看出,送风口附近的速度矢量均朝向送风口方向,说明送风口没有起到送风作用,这是由于与送风口相连的送风风道阻力较大所致.

3.3.4 冷藏室底层测量结果 图 10 表明,由于送风口出口射流贴附在背部壁面上流动,靠近背部壁面的区域内流速较大.当射流到达间室底部后方向改变,使得间室底部的流速也比较大,而测量区域其他部位的流速相对较小.在测量区域内左侧送风口附近测得的最大流速值约为 0.31 m/s,右侧送风口附近区域测得最大流速值为 0.18 m/s,远远大于第二层和第三层间室内测得的速度最大值.底层间室的2个送风口尺寸相同,左侧送风口冷空气流量大于右侧送风口,将使间室左侧温度低于右侧温度.



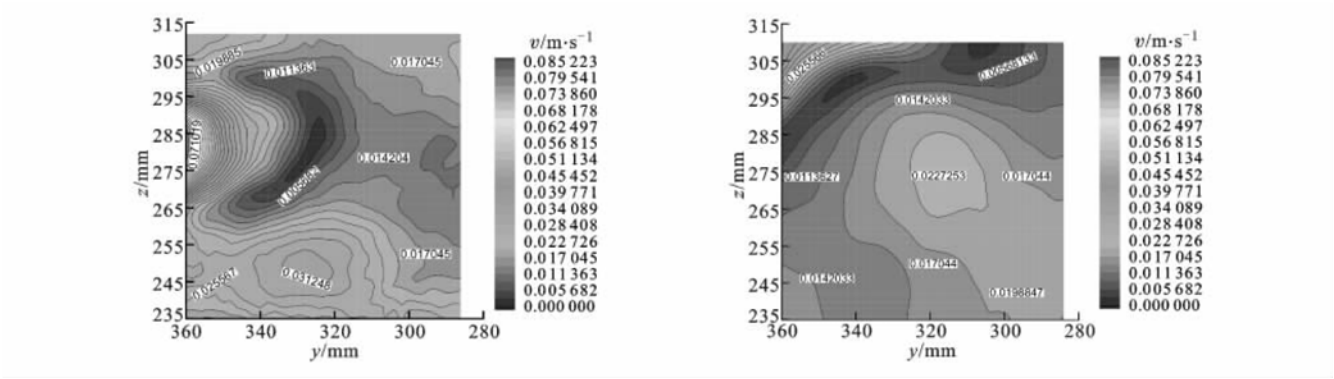
(a)顶层左侧送风口 (b)顶层右侧送风口

图 6 冷藏室顶层间室送风口中心平面内速度矢量及流线分布图



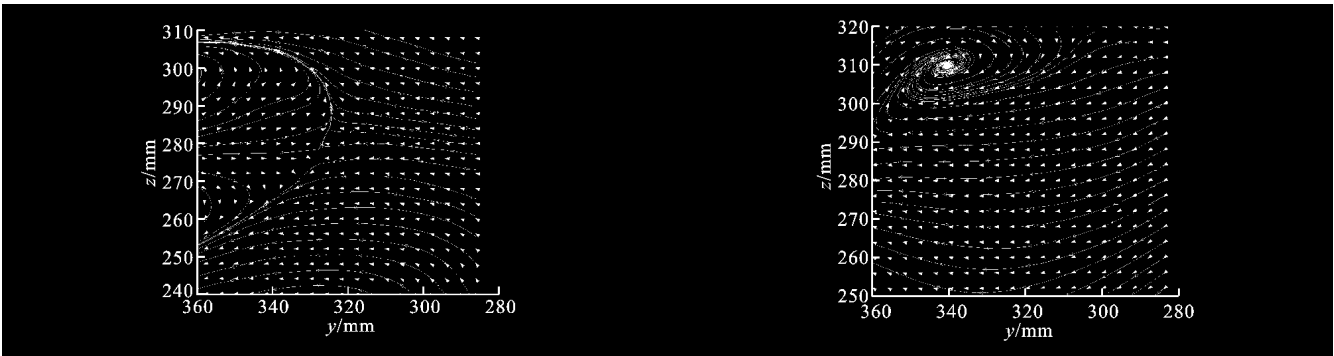
(a)第二层左侧送风口 (b)第二层右侧送风口

图 7 冷藏室第二层间室送风口中心平面内速度等值线分布图



(a)第三层左侧送风口 (b)第三层右侧送风口

图 8 冷藏室第三层间室送风口附近平面内速度等值线分布图



(a)第三层左侧送风口 (b)第三层右侧送风口

图 9 冷藏室第三层间室送风口附近平面内速度矢量及流线分布图

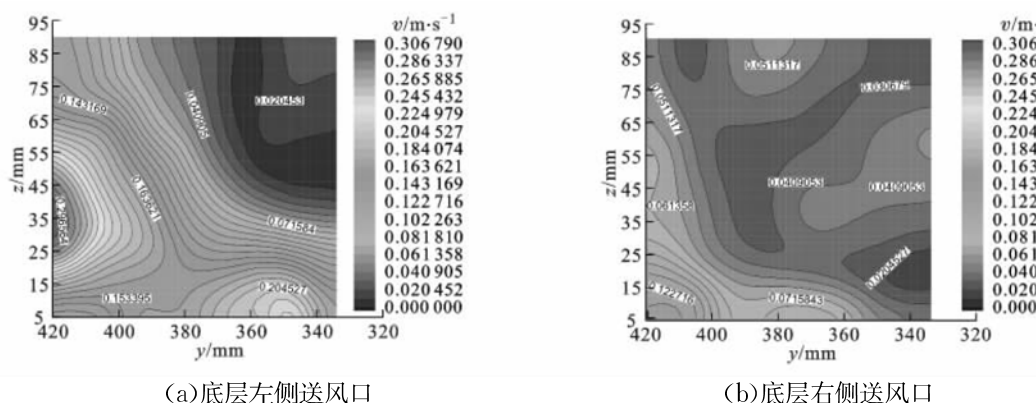


图10 冷藏室第四层间室送风口中心平面内速度等值线分布图

4 结 论

本文以一台间冷式冰箱模型为研究对象,采用DPIV技术测量了模型冷藏室多个特征平面内的二维流动特性,可为间冷式冰箱的设计和结构改进提供参考。

实验测量结果表明:冷藏室顶层和底层间室流量相对较大,中间两层间室的送风口流速均很小,流量难以满足冷量的设计要求。各间室对称分布的2个送风口风速差别明显,顶层间室和底层间室尤为突出,将使间室内温度分布不均匀。

各间室内左侧和右侧送风口分别与左右两条风道相连,通过实验结果可以推断风道的阻力和流量设计不对称,测量结果可以为间冷式冰箱送风口的流量和位置设计改进提供参考。

参考文献:

- [1] Radermacher R, Kin K. Domestic refrigerators: recent developments [J]. International Journal of Refrigeration, 1996, 19(1):61-69.
- [2] Zhou Qin, Pannock J, Radermacher R. Development and testing of a high efficiency refrigerator [J]. ASHRAE Trans, 1994, 100:1351-1358.
- [3] Asano A, Takenaka N, Fujii T, et al. Application of neutron radiography to a diagnosis of refrigerator [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A, 1996, 377:170-173.
- [4] 阙雄才,于兵,陈芝久,等. 间冷式冰箱风道阻力与流量分配特性的探讨[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(3):13-16.
- Que Xiongcai, Yu Bing, Cheng Zhijiu. Study on characteristics of air tunnel resistance vs flow rate distribution in indirect-cool refrigerator [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31(3):13-16.
- [5] 丁国良, Oellrich L R. 冰箱中空气流场和温度场的有限元模拟[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(7):18-22.
- Ding Guoliang, Oellrich L R. Simulation of air flow and temperature field inside a refrigerated chamber with finite element method [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(7):18-22.
- [6] 俞炳丰,费继友,孟祥兆,等. 间冷式冰箱冷冻室内流场的 DPIV 测量和计算模拟[J]. 制冷学报, 2003, 24(2):32-36.
- Yu Bingfeng, Fei Jiyu, Meng Xiangzhao, et al. DPIV measurement and numerical simulation of the inner flow field of freezer chest of frost-free refrigerator [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(2):32-36.
- [7] 俞炳丰. 制冷与空调应用新技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [8] 康琦,申功圻. 全场测速技术进展[J]. 力学进展, 1997, 27(1):106-120.
- Kang Qi, Shen Gongxin. Development of the full flow field measurement [J]. Advances in Mechanics, 1997, 27(1):106-120.
- [9] 盛森之,沈熊,舒玮. 流速测量技术[M]. 北京:北京大学出版社, 1987.
- [10] 徐挺. 相似方法及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1995.
- [11] 张伟,王元,徐忠,等. 应用粒子图像速度场仪对泊肃叶流动及圆柱绕流的测量 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(3):246-251.
- Zhang Wei, Wang Yuan, Xu Zhong, et al. Application of particle image velocimetry to measurement of Poiseuille flow and flow around a circular cylinder [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(3):246-251.

(编辑 王焕雪)