

# 间冷式冰箱冷冻室粒子图像速度场测量和数值模拟

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:** 将BCD-190W型间冷式冰箱冷冻室作为研究对象,采用模型实验的方法并应用粒子图像速度场仪系统对冰箱冷冻室内的流场进行了实验研究.以相似理论为指导建立了间冷式冰箱冷冻室物理模型,采用块结构化网格对计算区域进行了网格划分.选择风扇出口平面作为计算区域入口边界,应用RNG  $k-\epsilon$  模型建立了冷冻室内空气流动的三维紊流数学模型,用SIMPLEC算法对模型进行了求解.数值模拟和实验结果吻合良好,证明所建立的模型是正确的.实验和模拟结果均表明:顶层间室送风射流有利于阻隔环境传入的热量;中间层左右对称的送风口中心流速的差别约为28%,将造成间室内温度分布严重不均匀;底层送风口存在明显的射流短路现象.

**关键词:** 间冷式冰箱;流场;粒子图像速度场仪;数值模拟

**中图分类号:** TB657 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0323-05

## Digital Particle Image Velocimetry Measurement and Numerical Simulation of the Flow Field of Freezer Chamber in Frost-Free Refrigerator

MENG Xiangzhao, YU Bingfeng

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

**Abstract:** The freezer chamber of a BCD-190W type frost-free refrigerator was chosen as a research object, and digital particle image velocimetry (DPIV) technology was adopted to investigate the flow fields in the freezer chamber of a transparent refrigerator model. The physical model of the freezer chamber was constructed based on the similarity theory and the hexahedron grid was applied to discretize the computational domain. The intake fan outlet velocity distribution was regarded as the inlet boundary condition, and the 3-D turbulence RNG  $k-\epsilon$  mathematical model for the inner flow was established. The SIMPLEC algorithm was applied to deal with coupling between velocity and pressure. The numerical simulation results agree well with the DPIV measurement results, which indicates that the present mathematical model is correct. The numerical simulation and experiment results show that the flow field in the first chest was favorable for obstructing the heat transfer though the surrounding walls. The relative difference of center velocity between the two symmetrical supply air opening jets of the second chest approached 28%, leading to a serious non-uniform temperature distribution in the chest. The supply air opening jets had a short circuit in the third chest obviously.

**Keywords:** frost-free refrigerator; flow field; DPIV; numerical simulation

随着冰箱向大容量、多间室、多功能和方便使用的方向发展,间冷式冰箱的节能问题也将日益突出<sup>[1]</sup>.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.冰箱内的温度分布直接影响冰箱的使用性能和整体能耗,而温度分布又是依靠冷空气的流场分布实现的,因此对于间冷式冰箱间室内流场的研究是提高冰箱使用性能和降低能耗的基础性工作.

苏秀平等<sup>[2]</sup>对间冷式冰箱风扇区域的流场进行了数值模拟,发现增大风扇与送风面板的距离有利于消除风扇区域的涡流.于兵等<sup>[3]</sup>则采用层流模型计算了间室内的流场分布,模型的入口边界设置在各送风口,未进行实验验证.最近,Gupta等<sup>[4]</sup>建立了三维热射流模型,发现冷冻室温度场的计算结果略高于实验结果,而冷藏室的计算结果略低于实验结果,并明确指出导致该差异的主要原因是缺乏间室内空气流速的准确测试数据.冰箱间室内流场测量尚处于探索阶段<sup>[5-6]</sup>.

本文以一台BCD-190W型间冷式冰箱为研究对象,采用粒子图像测速(DPIV)技术测量了模型冷冻室内的平均速度分布,并建立了冷冻室内空气流动的物理模型和数学模型,以风扇出口平面流场状态为边界条件,计算了冷冻室内的空气流场.

## 1 间冷式冰箱冷冻室流场 DPIV 系统

在冰箱壁面开透明窗测量流场的方法,可选择的测量平面十分有限,因此本实验在透明的冰箱模型上进行.为了保证模型和原型流场的相似性,必须满足几何相似、速度相似、温度相似、普朗特准则相等和雷诺准则相等.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空气流量基本相同.冰箱冷冻室内储藏温度要求在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,实验中空气温度为 $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,由温度差异造成的普朗特数的误差不超过2%.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.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.模型与原型流场满足了近似相似条件.

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 系统的速度测量误差在1%以内,测试系统如图1所示.采用双Nd:YAG激光器作为光源,产生的脉冲光束通过光路系统形成厚度约为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,可以保证采集一对图像的时间间隔在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 以下.实验过程中,在每个测量平面取50组瞬态速度场,以其平均速度场表示稳态流场特征.

用硅油加热产生示踪粒子,平均粒径为 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ ,分布范围集中,流动跟随性好.选择3 mm厚的有机玻璃板,简化了对间室内流动影响较小的门上搁架,按原型尺寸,制作了间冷式冰箱透明模型,其

中送风风扇和蒸发器用原型配件,如图2所示.



图1 DPIV 系统



图2 间冷式冰箱冷冻室模型

## 2 冰箱间室内空气流动的数学模型

### 2.1 物理模型

物理模型冷冻室分为3层,顶层分为左右两部分,如图3所示.冷冻室总体净高度( $z$ 方向)为400 mm,其中顶层高130 mm,中间层高100 mm,底层高160 mm.冷冻室净宽( $x$ 方向)420 mm,顶层左侧间室宽160 mm,右侧间室宽260 mm.深度( $y$ 方向)为400 mm,其中顶层和中间层搁架深220 mm,底层搁架深290 mm.

采用块结构化网格对计算区域进行离散化,网格数量约为50万.

### 2.2 湍流模型

根据现有文献的计算和实验结果<sup>[4-5]</sup>,间室内空气流动应为湍流流动状态.重整化群(RNG)  $k-\epsilon$  模型有效地改善了流体脉动动能耗散率的计算精度,尤其适合于湍流漩涡的计算.RNG  $k-\epsilon$  模型提供了一个考虑低雷诺数流动黏性的解析公式,使得它比标准  $k-\epsilon$  模型在更广泛的流动中有更高的可信度和精度<sup>[7]</sup>.

现有文献中,给定送风口边界的平均流速或流量作为计算区域入口边界条件<sup>[3-4]</sup>,而冰箱实际运行中,各送风口性能通过风扇出口流场区域内的静压分布变化相互影响.因此,本文将计算区域的入口边

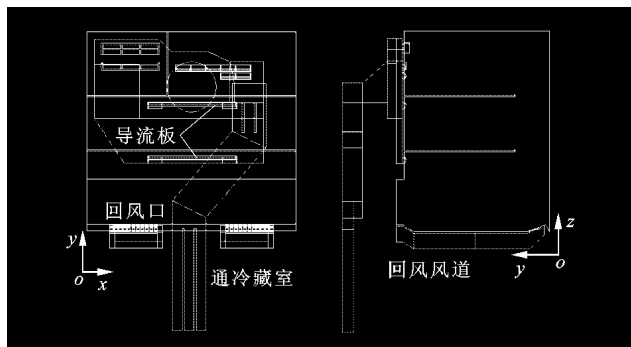


图3 间冷式冰箱冷冻室模型

界选择在风扇的出口平面,给定了风扇出口的流量和静压边界条件,可以更加准确和真实地反映各送风口的工作状态.计算区域的出口边界条件为压力出口。

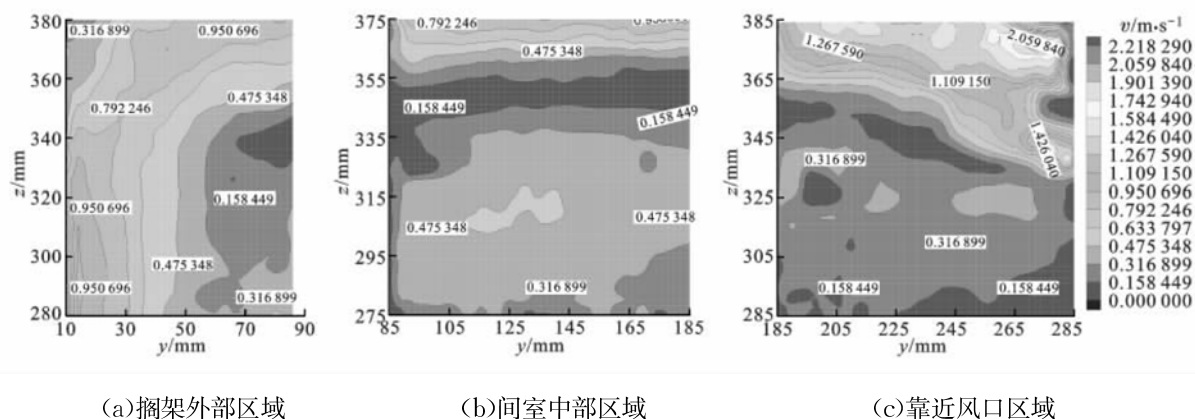
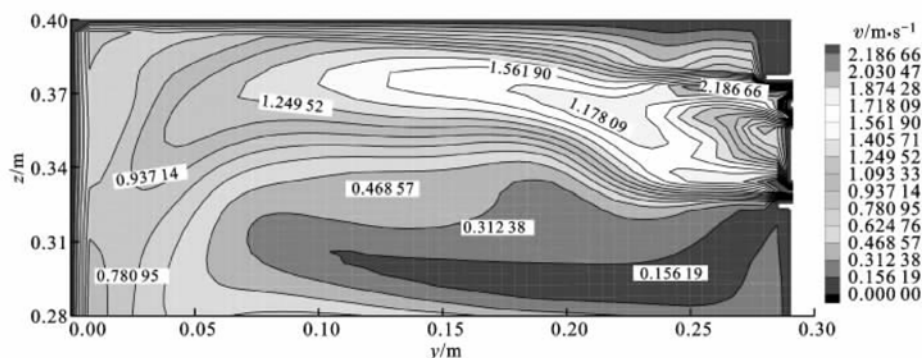
数值模拟采用 Fluent 软件进行.方程进行离散时,压力相关项选用一阶格式,对流项选用二阶迎风格式,扩散项选择中心差分格式,压力速度耦合选用 SIMPLEC 算法,收敛准则为前后两次迭代值的相对误差小于  $10^{-4}$ ,近壁区选用标准壁面函数法<sup>[7]</sup>。

### 3 数值模拟与实验结果的对比分析

#### 3.1 冷冻室顶层间室流场特征分析

3.1.1 冷冻室顶层左侧间室流场特征分析 图4和图5均表明,该间室送风口射流在间室顶部和左侧靠近门的位置形成了流速较高的区域,将冰箱搁架上部区域包围起来,有利于阻隔通过围护结构传入的热量.3层送风口流速随高度降低明显减小,同时下层送风口受到上层送风口的引射作用速度方向向上偏斜.计算模拟结果与实验结果在流型上吻合良好.实验测得送风口最大流速约为  $2.22 \text{ m/s}$ ,在相应位置的计算值约为  $2.19 \text{ m/s}$ ,误差约为  $2\%$ 。

3.1.2 冷冻室顶层右侧间室流场特征分析 图6和图7表明,由于出口导流板的作用,冷冻室顶层右侧间室送风口出口射流向上偏斜并明显冲击到上部搁架,将造成动量损失而增大风扇能耗,需要通过改变送风口设计调整射流出口角度.实验测得最大速度约为  $2.21 \text{ m/s}$ ,相应位置的计算值约为  $2.06 \text{ m/s}$ ,误差约为  $6.8\%$ .图8表明该间室内水平排列的送风

图4 冷冻室顶层左侧间室送风口中心平面内速度实验测量结果等值线( $x=88 \text{ mm}$ )图5 冷冻室顶层左侧间室送风口中心平面内速度计算结果等值线图( $x=88 \text{ mm}$ )

口送风速度由左向右有增大的趋势,且送风方向也偏向右侧,而送风口位置偏向间室左侧,有利于提高间室内气流速度分布的均匀性。

### 3.2 冷冻室中间层间室流场特征分析

图9表明实验测得左侧送风口最大流速为0.93 m/s,右侧送风口最大流速为1.19 m/s,右侧送风口流速比左侧风口约大28%,送风口流量也将有较大差别,最终导致间室左右温度分布不均匀,需要对送风口位置进行调整。

### 3.3 冷冻室底层间室流场特征分析

图10和图11表明,冷冻室底层左侧风口最大流速测量值为1.96 m/s,相应位置计算值为2.07 m/s,与实验值的相对误差为5.6%。计算结果表明,送风口射流长度到达了回风口附近,与回风口共同作用形成送风短路现象,将造成冷量的浪费,同时会造成间室内温度分布不均匀,因此需要适当降低送风射流流速。

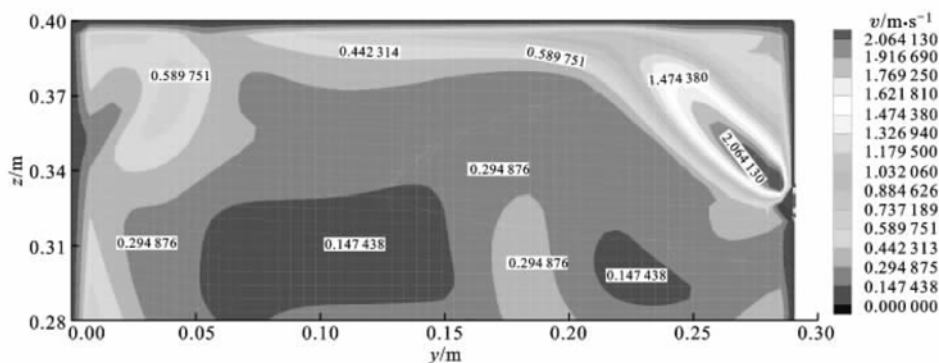


图6 冷冻室顶层右侧间室中间送风口中心平面内速度分布计算结果( $x=254$  mm)

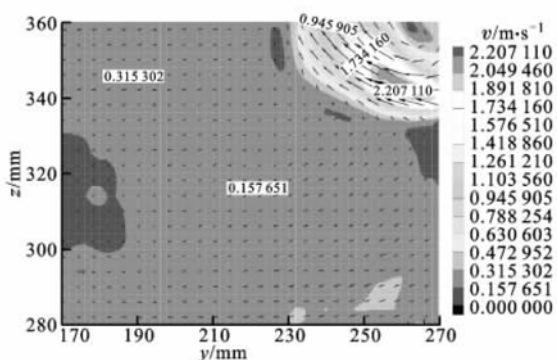


图7 冷冻室顶层右侧间室中间送风口速度分布实验结果( $x=254$  mm)

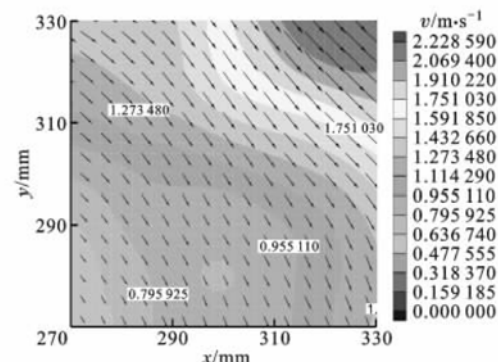
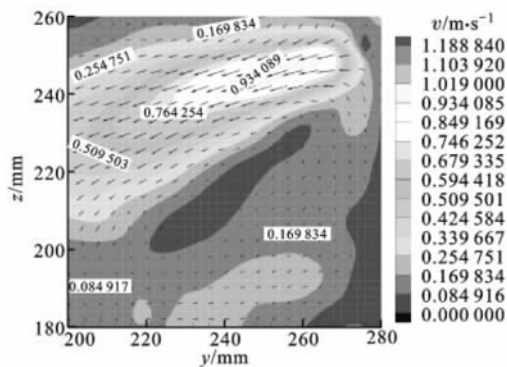
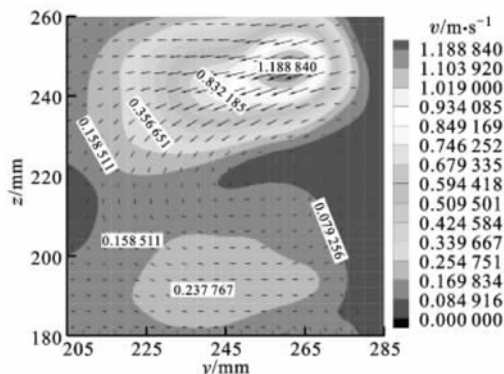


图8 冷冻室顶层右侧间室上层送风口附近水平中心面内速度分布( $z=330$  mm)

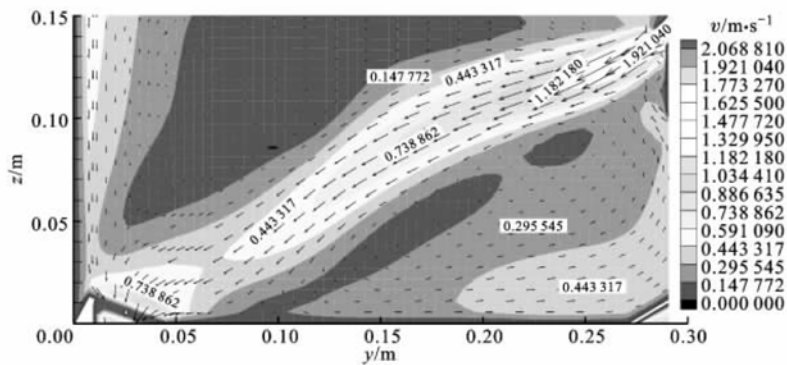
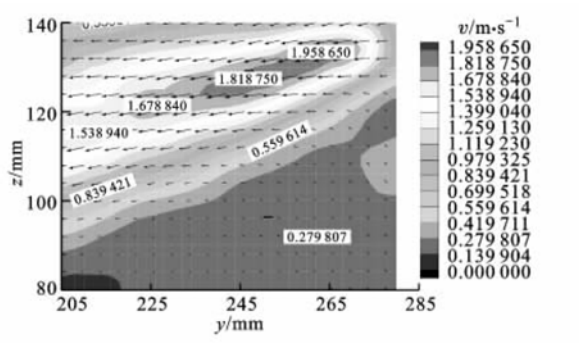


(a)左侧风口速度分布( $x=138$  mm)



(b)右侧风口速度分布( $x=268$  mm)

图9 冷冻室中间层间室送风口流速测量结果比较

图10 冷冻室底层左侧风口中心平面流速分布计算结果( $x=138\text{ mm}$ )图11 冷冻室底层左侧风口中心平面流速分布实验测量结果( $x=138\text{ mm}$ )

## 4 结 论

本文以一台BCD-190W型间冷式冰箱的冷冻室为研究对象,应用DPIV技术测量了间室内特征平面的流场分布.在实验模型的基础上,采用块结构化网格对计算区域进行了离散化,并采用RNG  $k-\epsilon$  湍流模型建立了间冷式冰箱冷冻室内空气流动的三维数学模型,选择了风扇出口作为计算区域边界,采用SIMPLEC算法计算了间室内空气流速分布.计算结果与实验结果吻合良好,证明本文所建立的数学模型是正确的.

计算结果和实验结果表明,冷冻室顶层间室送风口射流可以在间室顶部形成高速气流区域,有利于阻隔由顶部传入的热负荷.冷冻室中间层和底层两个对称分布的送风口流速差别明显,将导致间室内左右温度分布不均匀.同时,底层送风口射流存在短路现象,将造成冷量的浪费,需要改进送风口结构降低流速.

本文研究为分析冷冻室温度场打下了基础,为间冷式冰箱送风口的改进提供了依据.

### 参考文献:

[1] RADERMACHER R, KIN K. Domestic refrigerators;

recent developments [J]. International Journal of Refrigeration, 1996, 19(1):61-69.

[2] 苏秀平,陈江平,陈芝久,等.间冷式冰箱风扇区域流场的数值模拟和优化[J].上海交通大学学报,2003,37(7):1133-1136.

SU Xiuping, CHEN Jiangping, CHEN Zhijiu, et al. Numerical simulation and optimization of fan area flow field in indirect-cool refrigerator[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(7): 1133-1136.

[3] 于兵,童灵,阙雄才,等.间冷式冰箱三维气固耦合传热与流动数值研究[J].上海交通大学学报,1998,32(7):23-27.

YU Bing, TONG Ling, QUE Xiongcai, et al. Numerical researches on 3-D gas-solid coupled heat transfer and flow in indirect-cool refrigerator [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(7):23-27.

[4] GUPTA J K, GOPAL R M, CHAKRABORTY S. Modeling of a domestic frost-free refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(3): 311-317.

[5] LACERDA V T, MELO C, BARBOSA J R, et al. Measurements of the air flow field in the freezer compartment of a top-mount no-frost refrigerator: the effect of temperature[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(6): 774-783.

[6] 孟祥兆,俞炳丰.间冷式冰箱冷藏室内流场的DPIV实验研究[J].西安交通大学学报,2007,41(9):1075-1079.

MENG Xiangzhao, YU Bingfeng. DPIV measurement of the inner flow field of cooling chamber of frost-free refrigerator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(9):1075-1079.

[7] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2001.

(编辑 荆树蓉)