

# 间冷冰箱三维气固耦合传热与流动数值研究

于兵, 童灵, 阙雄才, 陈芝久

(上海交通大学制冷与低温工程系)

**摘要** 间冷式电冰箱通过空气流量分配来调节冷却空间的储藏温度, 与直冷式电冰箱相比, 其冷却空间流场与温度场的分布特性更引人关注。文中以某种间冷式电冰箱为对象, 对其进行适当的几何简化, 建立相应的物理数学模型, 并采用属性标志辨别法来通用化地处理该类问题。以 PHOENICS 软件为数值计算平台, 计算结果与相应的特征点实验相比较, 验证了所建模型的准确性。从数值计算结果中分析发现, 对于间冷式电冰箱, 浮升力的影响可以忽略。该方法可为间冷式电冰箱风道阻力特性的改进提供参考。

**关键词** 间冷冰箱; 传热; 热流动; 数值模拟

**中图法分类号** TK 124

## Numerical Researches on 3-D Gas-Solid Coupled Heat Transfer and Flow in Indirect-Cool Refrigerator

Yu Bing, Tong Ling, Que Xiongcai, Chen Zhijiu

Department of Refrigeration and Cryogenics Engineering, Shanghai Jiaotong University, China

**Abstract** In comparison with direct-cool refrigerator, the distribution characteristics of flow and temperature in cooled rooms of indirect-cool refrigerator have been paid more attention. Numerical calculation on gas-solid coupled heat transfer with complicated geometry is of considerable academic research value. One type of certain brand indirect-cool refrigerator is taken as an illustration. After suitable geometric simplifying as well as physical and mathematical modeling, an attribute flag identification method (AFM) is presented for the numerical calculation on gas-solid coupled heat transfer with complicated geometry. Numerical calculation is performed on the platform of PHOENICS. After the numerical results being compared with the experiment results of typical point, the accuracy of the models is verified. From the analysis on the numerical calculation results, it shows that the influence of buoyancy is negligible for the calculation on indirect-cool refrigerator. This research method can give an instructional suggestion to improve air tunnel resistance characteristics of indirect-cool refrigerator.

**Key words** indirect-cool refrigerator; heat transfer; heat flow; numerical simulation

间冷式电冰箱是通过空气流量分配来调节冷却空间储藏温度的小型制冷装置, 其冷却空间流场与温度场的分布特性与装置中制冷系统和空气循环冷却系统各组成部件的匹配特性密切相关, 直接影响整个电冰箱的储藏温度、耗电量、冷冻能力、冷却速度和负载温度回升时间等宏观指标。为了分析间冷式电冰箱制冷系统和空气循环冷却系统各部件间的匹配特性, 了解该装置影响宏观性能指标的关键, 寻求改进设计的思路, 对间冷式电冰箱制冷装置冷却空间流场与温度场的分布特性展开研究是很有必要的。

将数值计算方法应用于冰箱性能测试实验和热力膨胀阀内部的流场和温度场<sup>[1,2]</sup>得到较好的效果。

收稿日期: 1997-10-24

于兵: 男, 1969年生, 讲师, 工学博士 邮编: 200030



本文以数值计算作为工具,将其引入间冷式电冰箱的流场、温度场的模拟,以了解装置的稳态分布参数的特性。在间冷式电冰箱的长期运行过程中,有相当长一段可以近似为稳定过程。本文对某一稳态边界条件下的流场、温度场作数值模拟,从分布参数的角度对空气强迫对流冷却制冷装置的特性加以分析和了解。作为带有空气强迫对流流动,具有复杂几何形状的家用户冷式电冰箱,采用整体式求解气固耦合传热问题是数值计算中一个较为复杂的问题,而在其数值计算过程中选取比较适合的模型,也是一项值得研究的问题。

本文借助PHOENICS的计算内核<sup>[3]</sup>,增加自己的模型和方法,对间冷式冰箱这一具体对象进行流场和温度场的研究。

## 1 流动与换热模型分析

间冷式电冰箱有许多类型和规格,本文以某品牌的BCD-218WB间冷式电冰箱为例,对其进行简化

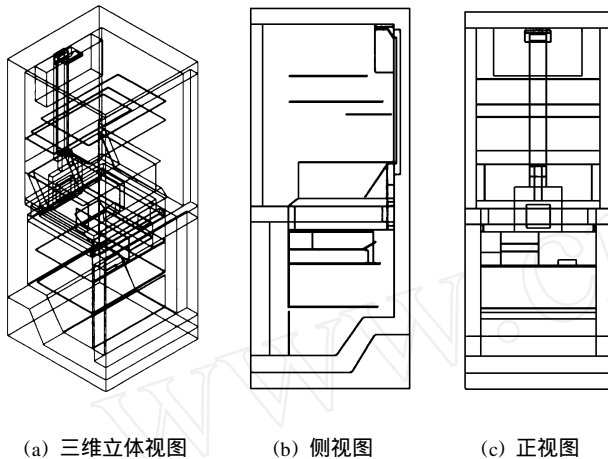


图1 间冷式冰箱简化视图

Fig. 1 Simple view of indirect-cool refrigerator

分析。实际冰箱的结构较复杂,作适当假设并忽略一些无关或影响较弱的部件,得到该冰箱三维几何模型及侧视图和正视图,如图1所示。

对图1所示的复杂几何形状及气固耦合问题的数值求解需满足一系列的控制微分方程。现作如下基本假设:

(1) 采用直角坐标系求解。冰箱实体结构绝大多数为相互垂直形式,求解直角坐标问题在耗费内存空间及计算速度上具有优势,故采用此处理方式。

(2) 整场的流动及换热为稳态。忽略控制微分方程中的时间项。

(3) 计算区域中的流体流动采用层流模型。在整个冰箱计算区域中,冷藏室风道中由于截面

积较小, $Re$ 最大。计算表明,在上间室送风量为 $0.9\text{ g/s}$ 时,冷藏室方形送风管内 $Re=1200$ ;上下间室大空间中是一种强制对流和自然对流并存的混合对流, $Gr^* = GrNu$ 最大不超过 $10^{11}$ ,表明大空间内不会出现紊流自然对流<sup>[4]</sup>,故确定本模型的计算可采用层流的模型研究。

(4) 流体流动满足Boussinesq假设。

(5) 计算区域的空气流体为牛顿流体,空气的比热容为定值。

(6) 流体在固体壁上无滑移。

(7) 冰箱所有外表面温度已知,蒸发器所在区域的空气温度已知。

(8) 忽略间室内部各表面之间的辐射换热。冰箱内部虽然温度很低,但如果各壁面壁温差别较大时,辐射换热量将与对流换热量具有相当的量级。而对于间冷式冰箱,大空间中没有直接蒸发制冷的低温壁面,各壁面的温度较为接近,这样,辐射换热量与强迫对流换热量相比就小得多,为简化起见,忽略辐射的影响。

在以上假设的基础上,可建立其数学模型。整场的流动及换热满足质量、动量及能量守恒方程,由数值传热学的基本原理,这些方程可以归纳为一个统一的方程形式,即

$$\text{div}(\rho V \Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S$$

当 $\Phi$ 取不同的物理量时,上式将对应于相应的控制方程<sup>[5]</sup>。PHOENICS软件的主体部分就是实现对统一方程的统一求解程序。建立相应的数学模型后,可给出计算区域的边界条件,由于所研究过程为稳态,因而初始条件任意。

所有的外表面: $U = V = W = 0$ ,温度已知,为第一类边界条件;整场求解处理计算区域中的固体时,采用对所有固体区域的速度计算附加源项的方法使速度保持 $U = V = W = 0$ 。实践表明,采取该方法来固定固体中的速度,比采用对固体赋大粘性的方法更有效。采取大粘性方法时,固体区域仍然有较大的速度,这在物理意义上与真实情况不相符,同时也将导致所计算的固体区域的速度场不真实。采用附加

源项的方法使得固体中的速度几乎为零,整场求解能量方程时,方程中的对流项得到抑制,导热的特性得到显著的体现。风机稳定运行时的风量可参考风机特性的结果<sup>[6]</sup>。对于蒸发器区域,此处空气的流速较高,若考虑制冷剂的影响将大大增加问题的复杂性,因此,在此区域能量计算时采用附加源项,使温度为定值。

## 2 复杂形状流固耦合问题的通用化处理

针对带有复杂几何形状流固耦合问题,本文提出一种通用化的处理方法——属性标志辨识法,并将其在 PHOENICS 的 GROUND 部件中实现。

本方法应用的背景是处理诸如间冷式电冰箱、冷库以及其他一些采用整体式求解流场和温度场的问题。例如,在间冷式电冰箱中,除了发泡层的固体以外,间室中往往还有许多大小不同、放置方向各异、其物性也不相同的固体搁板。固体搁板的介入导致流场发生很大的变化,从而相应地影响温度场的分布。但如果采用 PL (PHOENICS Input Language) 语言<sup>[3]</sup>对每一固体赋物性,并对固体周边的网格依次加入固体壁面的影响,将使计算的通用性很差,模块化也不好。为此,在 PHOENICS 的 GROUND 子程序组中增添一块属性标志识别子程序,在计算过程中增加一个整场存储的属性标志变量 FLAG。FLAG 的取值满足以下规则: 当某微元为固体时,  $FLAG > 200$ , 一般根据求解区域不同物性的固体类型 FLAG 可取为 210, 220, ...; 当某微元为液体时,  $100 \leq FLAG < 200$ , 用户输入值取 100; 当某微元为气体时,  $FLAG = 0$ , 用户输入值取为 0; 对于微元为流体(气体或液体)状态时,该微元的 FLAG 值的具体大小还与该微元周围有无固体有关。使用者只需输入简单属性值(0, 100 或大于 200 的值),以下的判别由属性标志识别子程序实现。对于无束缚的流体(指周围无固体),其 FLAG 值就是 100 (对液体)或 0 (对气体); 对有束缚的流体,由于讨论三维问题,该微元在其东、南、西、北、上、下六个方向均可能有固体,本文推荐采用二进制识别法,即对二进制的六位数其最高位到最低位依次代表东、南、西、北、上、下六个方向,“1”表明该方向有固体,“0”表明该方向无固体。即

最高位	最低位	十进制
0 0 0 0 0 0	...	0
1 1 1 1 1 1	...	63
东 南 西 北 上 下		

这样气体取值为 0~ 63, 液体取值为 100~ 163。

将固体块和固体板以及需要在固体块中挖出一块气体区域的信息记录在一个数据文件 ATTRB.DAT 中,数据的存储格式依次为区域的 x 轴区间、y 轴区间、z 轴区间、属性标志的用户输入值(即上述的简单标志值)。在属性标志判别子程序中首先将整场的  $FLAG = 0$ ; 然后依次读入 ATTRB.DAT 中的数据,按照读入的属性来对微元定义 FLAG 值,这一步完成后,整场先定义了简单的属性(即某微元是气体、液体或固体); 最后对 FLAG 为流体的微元按前述的识别定义方法,将固体旁的流体刷新为最终的属性标志值。

由于 GROUND 可直接介入 PHOENICS 核心求解部件 EARTH 的运行过程,当存储了最终的 FLAG 属性变量之后,则: 固体的物性和流体的物性仅需在 GROUND 中识别微元的 FLAG 值就可轻松赋值; 固体区域和固体板的增减只要在 ATTRB.DAT 文件中修改即可,而且可轻易地在解决在一大的固体区域中包含一小的流体区域的问题; 整场求解流固耦合问题时,近壁流体往往要考虑固体壁的影响,对于结构十分复杂的问题,采用 FLAG 后能容易地解决。

## 3 计算结果分析

按前述模型对 BCD-218WB 型间冷式冰箱进行计算。在三维区域按照  $44 \times 40 \times 76$  共划分 133 760 个微元。采用气固耦合整场求解的通用化处理方法,对三维空间中复杂的固体区域和气体区域进行了属性及物性的赋值。

由于三维计算获得的结果比较多,本文仅列出一些特征截面上的流场和温度场的结果。经多次计算,对有无浮升力情况下的结果进行了比较。结果发现,浮升力对于空气强迫对流小型制冷装置的流场影响较小,整个流场的流动形状是类似的,速度的最大值有所改变,考虑浮升力的影响时,最大速度的减小量小于 1%; 浮升力对温度场的影响不是很大时,考虑浮升力后温度场在大空间内的分布变化也不会

很大,但浮升力使冷藏室送风管中的温差有所增加 总之,在空气强迫流动冷却的间冷式冰箱系统中,浮升力的影响是比较小的 为与整机特征点试验的结果进行比较,计算环境温度取 25℃. 定义图 1(c)的长度方向为  $x$  方向,其最大值为  $x_m$ ,高为  $z$  方向,最大值为  $z_m$ ;图 1(b)的宽度方向为  $y$  方向,最大值为  $y_m$  (见图 2). 图 3(a)、(b)为  $y$  方向中剖面  $y = y_m/2$  处的流场和温度场的分布图,图 4(a)、(b)为  $y$  方向下室送风口中间位置剖面处的流场和温度场的分布图 图 5(a)、(b)为  $x$  方向中剖面  $x = x_m/2$  处(冷藏室送风道的中剖面)的流场和温度场的分布图

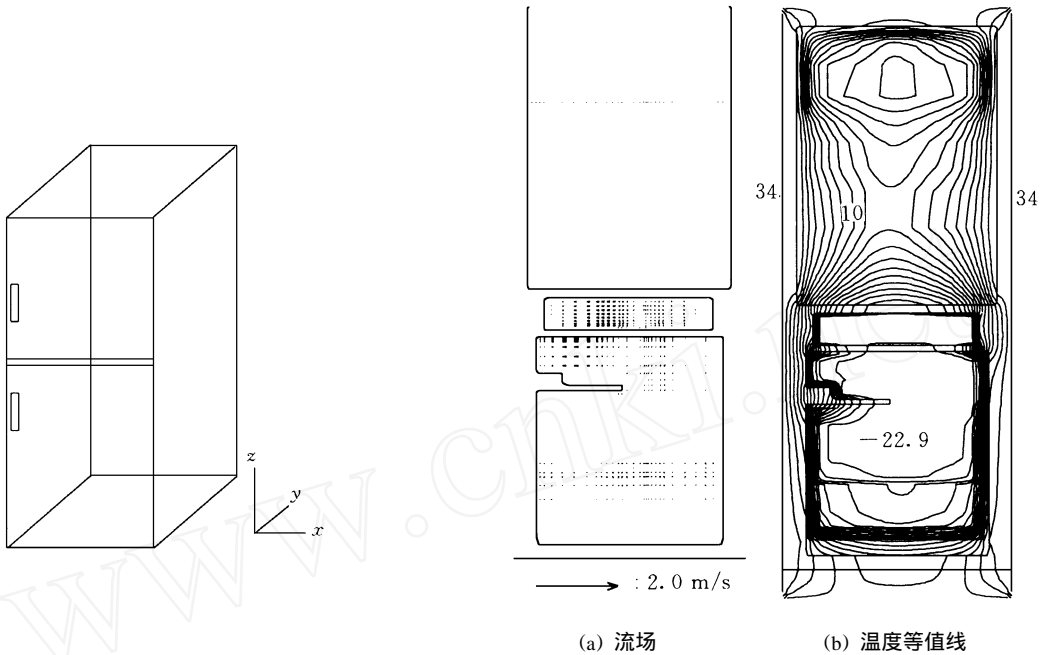


图 2 三维冰箱坐标轴示意图  
Fig 2 Sketch of coordinate of 3-D refrigerator

图 3  $y_m/2$  处流场及温度场分布图(单位:℃)  
Fig 3 Flow and temperature distribution at  $y = y_m/2$ (unit:℃)

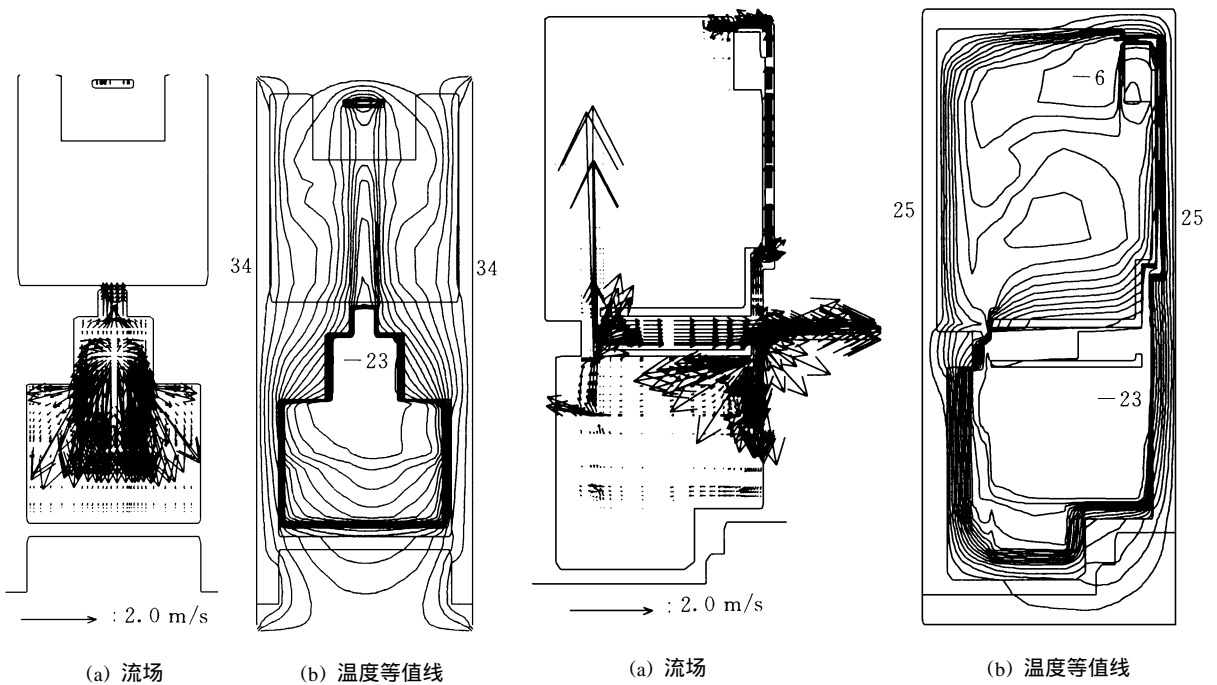


图 4 送风口剖面处流场及温度场分布图(单位:℃)  
Fig 4 Flow and temperature distribution at section of air-charge (unit:℃)

图 5  $x = x_m/2$  处流场及温度场分布图(单位:℃)  
Fig 5 Flow and temperature distribution at  $x = x_m/2$  (unit:℃)

## 4 特征点实验验证

试验对象是BCD-218WB间冷式电冰箱, 试验的环境温度为 $(25 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ , 在恒温室中进行。感温元件采用精度为 $\pm 0.5 ^\circ\text{C}$ 的铜-康铜热电偶, 通过HP3054A数据采集控制系统进行数据采集。因采用热电偶测量温度, 不可能在场中布置太多的测点, 故仅对布置的一些特征点进行了比较。采用本文的模拟计算方法计算的温度和试验的特征点温度比较如表1所示。表中的结果表明, 相对于试验的冷冻室的温差范围 $(-24 \sim 34 ^\circ\text{C})$ 和冷藏室的温度范围 $(2 \sim 34 ^\circ\text{C})$ 而言, 数值计算的方法用于模拟间冷式冰箱的温度场具有一定的可靠性。

表1 特征点温度比较

特征点位置	(试验值/计算值)/ $^\circ\text{C}$	误差/ $^\circ\text{C}$	
冷藏室	送风口前方	- 5/- 4	+ 1
	回风口	4/6	+ 2
	间室中间	7.5/8	+ 0.5
	风道盖板	2/3	+ 1
	果菜盒	8/9	+ 1
冷冻室	送风口	- 24/- 23	+ 1
	回风口	- 21.5/- 20	+ 1.5
	间室中间	- 23.3/- 23	+ 0.3
	后壁	- 22/- 21	+ 1

## 5 结 语

分析了间冷式制冷装置中浮升力的作用, 得出了浮升力对流场和温度场的影响较小的结论。数值计算的结果与特征点的实验结果进行了比较, 吻合较好, 说明对该类间冷式制冷装置, 采用本文的建模方法进行研究的可行, 并可为间冷式制冷装置的风道阻力特性的改进提供参考。

## 参 考 文 献

- 童灵, 于兵, 阙雄才, 等. 冰箱性能测试实验室的三维流场和温度场数值研究. 上海交通大学学报, 1996, 30(增刊): 38~41
- Yu Bing, Que Xiongcai, Liu Weihua, *et al*. Researches on inner flow characteristics to different tev valve head shape. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1996, E-1(1): 21~25
- PHOENICS Reference Manual, CHAM/TR200, V1.4, 1993
- 杨世铭. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1987
- 陶文栓. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- 阙雄才, 于兵, 丁国良, 等. 间冷式电冰箱风道阻力与流量分配特性的探讨. 上海交通大学学报, 1997, 31(3): 13~16

下期发表论文摘要预报

## 16 kb/s 7kHz 宽带语音编码器的研究

赵 滨, 陈 健

(上海交通大学电子工程系)

**摘 要** 分析了宽带语音编解码过程中遇到的特殊问题和解决办法, 并通过改进窄带语音 TCX 算法(主要包括系统合成滤波器的移位和将频域矢量分成高低两个矢量)实现了宽带语音压缩编码。该算法的运算量仅相当于一组 CELP 运算量的 1/2, 降低了对所用 DSP 的速度要求。实验证明重建语音质量有了明显改善, 信噪比提高近 3 dB, 主观听觉质量也有明显改善。同时还分析了频域量化对该系统的编码噪声的影响, 认为 2 bit/sample 来量化相位是比较恰当的, 这样能充分发挥 TCX 算法优越性, 获得较理想的编码效果。