

研究论文

# 丝管式冷凝器周围空气温度分布的实验研究及仿真<sup>\*</sup>

成耀龙 徐明仿 吴业正

(西安交通大学 西安 710049)

**摘要** 用化学试剂  $TiCl_4$  对丝管式冷凝器周围空气的流动进行了可视化研究。实验结果表明, 丝管式冷凝器周围空气的流动属于紊流。据此, 建立了计算冷凝器周围空气温度的数学模型, 采用数值模拟的方法, 对稳定状态下冷凝器周围空气的温度进行了仿真, 并与实验数据进行了对比, 验证了所建立数学模型的正确性。这个新模型对冷凝器的优化设计提高设计精度具有一定的指导价值。

**关键词** 热工学; 丝管式冷凝器; 可视化研究; 数值仿真

## Experimental Investigation and Numerical Simulation on Air Temperature Distribution around Wire and tube Condenser

Cheng Yaolong<sup>☆</sup>, Xu Mingfang and Wu Yezheng

<sup>☆</sup>School of Energy & Power Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China

**Abstract** A visualization experiment was conducted to determine the flow state of the air around a wire and tube condenser, by using reagent chemical  $TiCl_4$ . It was found that the flow state was turbulent. Based on the experiment, a mathematic model was established to calculate the air temperature distribution around the wire and tube condenser. Numerical Heat Transfer software was applied to calculate the air temperature field in the stable state. The calculation results were well in agreement with the experimental data. The present new model can be used to optimize the design of a wire and tube condenser.

**Keywords** Pyrology; Wire and tube condenser; Visualization experiment; Numerical simulation

### 1 引言

冷凝器作为家用电冰箱的主要部件之一, 其换热性能的好坏, 对整个电冰箱的工作性能具有很重要的影响。对于丝管式冷凝器, 热阻主要在空气侧。丝管式冷凝器周围空气的温度分布, 对丝管式冷凝器的换热性能影响很大。国内<sup>[1-3]</sup>外已有不少研究者对丝管式冷凝器的换热性能进行了研究, 研究手段包括实验的方法和数值模拟的方法。H. E. Colliott 等人<sup>[4]</sup>研究了丝管式冷凝器水平放置时空气侧表面传热系数与  $(GrPr)$  和  $(s/d)_T$  的关系, J. L. Hoked 等人<sup>[5]</sup>实验研究了丝管式冷凝器空气侧表面传热系数, G. A. Quadir 等人<sup>[6]</sup>采用有限元法分析了冷凝器的传热特性。前人的这些工作, 为进一步的研究提供了一定的基础。但这些研究没有考虑冰箱实际运行时各种因素对丝管式冷凝器周围空气温度的影响, 均假设冷凝器周围温度流动情况为层流。

对家用冰箱中常用的丝管式冷凝器周围空气的温度分布和流动进行了实验研究, 利用可视化技术,

研究了空气的流动状态, 确认流动为湍流。并提出了根据冷凝器周围空气实际温度场设计冷凝器的思想。结合前人研究成果, 对丝管式冷凝器的传热问题进行了适当的简化, 建立了丝管式冷凝器传热的数值模型, 在此基础上对冷凝器周围空气的温度场进行了求解, 并和实验结果进行了对比。

### 2 可视化实验

丝管式冷凝器周围空气的流动产生的原因有两个: 冷凝器蛇管外壁表面和钢丝外壁表面加热空气, 使空气的密度发生变化, 密度差产生的浮升力驱动空气流动, 这种流动就是自然对流; 由于压缩机外壳对周围空气的加热, 使得空气在到达丝管式冷凝器下端之前已经具有一定的速度。因而冷凝器周围空气的流动并不仅仅是纯自然对流, 而是一种混合对流<sup>[7]</sup>。丝管式冷凝器周围空气的流动受到浮升力和惯性力的叠加影响, 因而和纯自然对流相比, 空气的流动更容易成为湍流。由于目前还缺少判断丝管式冷凝器周围空气流动状态的理论依据, 通过烟可视

\* 收稿日期: 2005 年 4 月 29 日

化实验的方法(利用化学试剂  $TiCl_4$  产生烟雾)确定了空气流动的状态。

图 1 所示为烟可视化实验的结果, 图中左侧为冰箱箱体后壁, 右侧为丝管式冷凝器, 从图中可以看出, 丝管式冷凝器周围空气的流动状态应该为湍流。

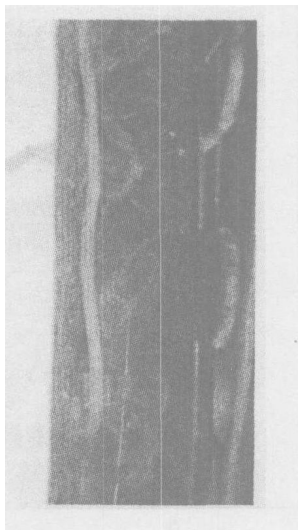


图 1 可视化实验图片

### 3 数学模型的建立

#### 3.1 采用的基本假设

1) 根据文献[7], 丝管式冷凝器的钢丝之间存在一个流动滞止区, 在这个区域内, 空气和冷凝器之间、空气各部分之间的传热以导热为主, 空气的温度和冷凝器表面的温度相差并不是很大。为了计算简便, 假定流动滞止区温度和丝管式冷凝器外表面温度相同。

2) 将冷凝器钢丝之间的流动滞止区看成是固体区域, 进行数值计算时不作为计算区域, 仅仅当成计算边界。

3) 对于一般的家用冰箱, 丝管式冷凝器的宽度远大于冷凝器和冰箱箱体后壁的间距及冷凝器和墙壁的间距, 因而可在上述假设的基础上将丝管式冷凝器周围空气的流动简化为二维流动。

4) 空气密度的变化满足 Boussinesq 假设。

#### 3.2 控制方程<sup>[8]</sup>

质量守恒方程:

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

动量守恒方程:

1)  $x$  方向的动量方程

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \eta \frac{\partial u}{\partial x} - \rho \overline{u'u'} \right] +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[ \eta \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \overline{v'u'} \right] \quad (2)$$

2)  $y$  方向动量方程

$$\frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \eta \frac{\partial v}{\partial x} - \rho \overline{u'v'} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \eta \frac{\partial v}{\partial y} - \rho \overline{v'v'} \right] \quad (3)$$

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Gamma \frac{\partial T}{\partial x} - \rho \overline{u'T'} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \Gamma \frac{\partial T}{\partial y} - \rho \overline{v'T'} \right] + S \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)中的  $u'$ 、 $v'$ 、 $p'$ 、 $T'$  分别对应于相应湍流物理量的脉动值。

式(4)中的  $S$  代表能量方程中的源项。

#### 3.3 湍流模型

采用  $k-\epsilon$  两方程模型处理湍流问题。  $k-\epsilon$  方程如下:

1)  $k$  方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon + S_k \quad (5)$$

2)  $\epsilon$  方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (6)$$

#### 3.4 近壁区域处理

采用“近壁模拟”的方法处理近壁区域 (near-wall modeling), 利用这种方法进行数值计算时, 在包括粘性支层的近壁区域内划分网格, 求解湍流微分方程<sup>[9]</sup>。

#### 3.5 边界条件的设定

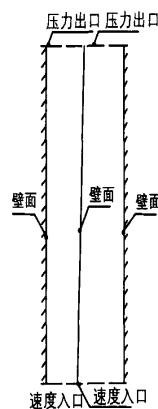


图 2 计算区域及边界类型

传统的设计冷凝器的方法,是把丝管式冷凝器周围空气的温度当作环境温度(按国标为 32℃),这与实际运行条件有较大偏差(例如实验中环境温度为 12.8℃),导致了实际换热性能和设计换热性能的较大偏差。因此,模型中的冰箱壁面、丝管壁面的温度条件,空气入口条件(风速分布、温度)均是通过实验测量的。在今后的工作过程中,将不断的丰富实验数据,拟合出边界条件实测值的经验公式,增强模型的通用性。

### 3.5.1. 速度入口边界

速度入口边界需要设定速度、温度以及湍流脉动动能、湍流脉动动能耗散率的值。

箱体后壁侧空气入口处各个点的速度相差很小,设置为常数值;墙壁侧空气入口各个点的速度值,根据实验结果,利用 Boundary Profile 文件设定。

湍流边界条件根据经验公式赋值。

### 3.5.2. 压力出口边界

压力出口边界需要设置静压力,这里设为 0;另外还要设置回流温度等,在出现“假回流”时需要调用这些参数。

### 3.5.3. 壁面边界

壁面边界动量编辑条件设置为无滑移边界;温度边界条件,当成第一类边界条件进行处理,根据实验测得的各点温度值,利用 C 语言编制 UDF 函数,进行线性插值得到边界上各点的温度值,供数值计算时调用。

## 4 数值模拟

以某家用冰箱为案例,求解其丝管式冷凝器周围空气的温度场,利用 GAMBIT 和 FLUENT 求解这个问题的过程如图 3。

## 5 实验台的搭建及模拟结果的实验验证

### 5.1 实验台的搭建

通过测定环境温度为 12.8℃,箱体后壁和墙壁间隙 63mm 时,冷凝器中部的截面上,冰箱箱体后壁壁面温度、冷凝器表面温度、墙壁表面温度、冷凝器空气入口温度、冷凝器空气出口温度、冷凝器空气入口速度、冷凝器空气出口速度、环境温度,以及其他一些位置的空气温度值,了解冷凝器周围空气温度分布情况,并为数值计算提供边界条件以及验证计算的结果。采用热球风速仪 EY3-2A 型电子微风仪测量流速。采用铜-康铜热电偶对丝管式冷凝器周围空气的温度场进行测量。数据采集/开关单元

采用美国惠普公司生产的 Agilent34970A。

### 5.2 模拟结果的实验验证

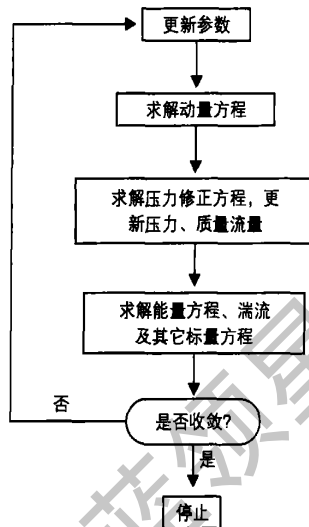


图 3 求解计算流程图

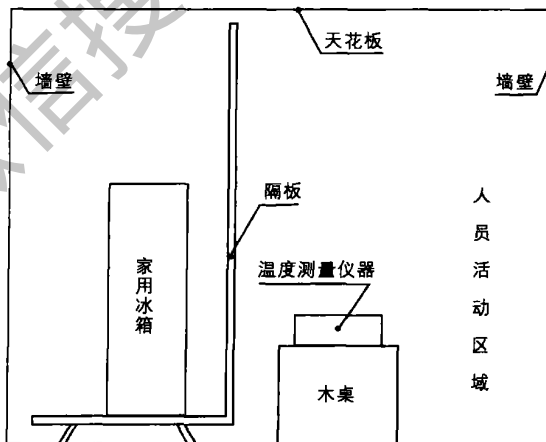


图 4 实验台示意图

为了验证计算模型的准确性,需要将计算结果和实验结果进行比较。实验验证点主要分布在丝管式冷凝器两侧空气间隙的出口,另外在空气间隙的其它位置,也有两个验证点,验证点的位置如图 5 所示。

丝管式冷凝器周围空气等温线的分布计算结果如下图所示:冷凝器空气出口处数值计算结果和实验数据的比较如图 7 所示,图中实线为数值计算结果,黑点为实验数据。由图中可以看出,数值计算结果和实验数据是比较吻合的。空气间隙中的另两个验证点的计算结果分别为 288.6K、291.3K,对应的实验结果为 289.4K、291.6K,两者也比较吻合。

由上述分析可以看出,建立的数学模型的计算

结果在研究截面上实验结果比较吻合,因而可以利用此模型对丝管式冷凝器周围空气的温度分布进行分析。

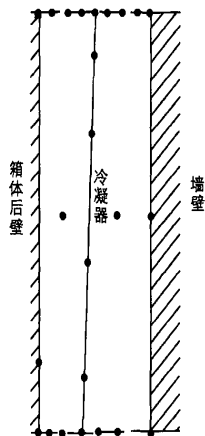


图 5 验证点位置

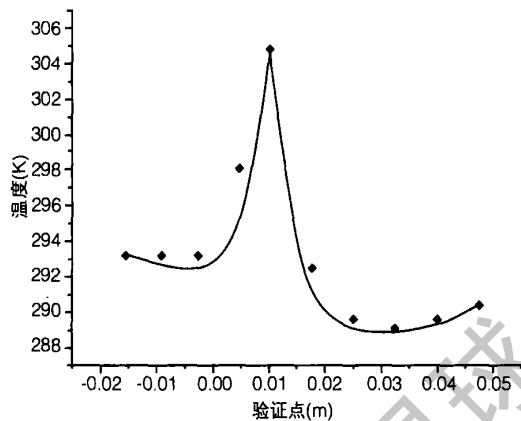


图 7 数值计算结果和实验数据的对比

2)所建立的计算丝管式冷凝器周围空气温度的数学模型是可靠的,具有比较高的准确性,可以用来分析丝管式冷凝器周围空气的温度分布,也可用于丝管式冷凝器的辅助设计。

参考文献

- 1 张琴舜, 邹文进, 沈秀中等. 冷凝器动态数学模型和仿真研究. 计算机工程, 2001, 11(2): 186~187
- 2 谢万蓉. 电冰箱外被式冷凝器的不同安装对整机耗电量的影响. 家电科技, 2002 (9): 63~64
- 3 林兆庄, 胡夏萍. 用红外热像技术研究管线式冷凝器散热. 激光与红外, 1996, 26(2): 139~144
- 4 H E Colliott, W E Fontaina and O W Witzell. Radiation and Free Convection Heat Transfer From Wire and Tube Heat Exchangers. ASHRAME Journal, 1965, 7
- 5 J L Hoke, A M Clausing and T D Swofford. An experimental investigation of convective heat transfer from wire-on-tube heat exchangers Trans ASME J. Heat Transfer, 1997, (119): 348~356
- 6 G A Quadir, G M Krishnan. Modeling of wire-on-tube heat exchangers using finite element method. Finite Elements in Analysis and Design, 2002 (38): 417~434
- 7 罗琦. 冰箱动态漏热数值模拟及管线式冷凝器换热特性实验研究:[硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1992
- 8 陶文铨. 数值传热学. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- 9 M Wolfstein. The Velocity and Temperature Distribution of One-Dimensional Flow with Tubulence Augmentation and Pressure Gradient. Int J of Heat Mass Transfer, 1969, 12

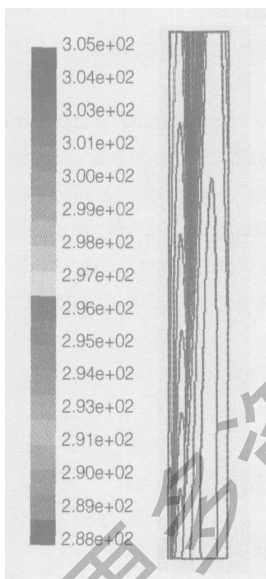


图 6 冷凝器周围空气等温线分布

6 结论

丝管式冷凝器周围空气的温度并不是恒定的,根据周围空气的实际温度分布情况设计冷凝器可以获得更好的精度。通过对家用冰箱中常用的丝管式冷凝器周围空气的温度分布和流动进行的实验研究和数值模拟,得到了如下结论:

1) 丝管式冷凝器两侧的空气流动不是纯自然对流,而是一种混合对流,流动状态为湍流。