

家用电冰箱管线式冷凝器 空气侧换热的研究

Heat Transfer Characteristics from Wire and Tube Condenser to Air

杨小琼 王启杰 罗琦

(西安交通大学动力系, 西安 710049)

王金坤 徐春霏

(万宝冰箱公司, 广州 510280)

本文系统地研究了影响冰箱管线式冷凝器换热的各主要因素。试验表明, $(S/D)_w$ 是影响散热的最重要因素; 冷凝器与垂直平面的倾斜角 θ 对换热有较大影响, 在其它条件不变的情况下, 选用 $\theta \approx 4^\circ$ 时可使冷凝器换热性能提高 15% 左右; $(S/D)_T$ 对冷凝器管外侧换热能力的影响不大, 故设计时宜取较小的值; 在实验范围内 L 对换热的影响并不十分显著, 过小的 L 值会使换热恶化, L 过大则影响冰箱的紧凑性。本文首次关联了影响管线式冷凝器空气侧换热的各主要因素, 提出了供设计用的计算关联式, 对此类冷凝器的设计有指导意义。

An experimental study is conducted for the effect of wire and tube geometry on condenser performance. The experimental results show that $(S/D)_w$ plays the most important role, θ exerts a considerable influence, and $(S/D)_T$ and L produce a weak impact. It is worth notice that the heat transfer performance is increased up to 15% for $\theta = 4^\circ$. A correlation is first presented to predict the heat transfer capability from wire and tube condenser to air. It is believed that the above-mentioned correlation can be used to design this kind of condenser.

一、引言

冷凝器换热情况的好坏对冰箱的工作性能及制冷压缩机的寿命有很大影响。合理地设计冷凝器可以显著减小制冷系统的能耗。目前冰箱冷凝器主要有管线式和百叶窗式两大类。迄今为止对管线式冷凝器

的换热研究还是很不够的。文献 [1, 2] 对冷凝管垂直放置的管线式冷凝器进行了大空间自然对流换热的研究, 研究了冷凝器与垂直平面倾斜角 θ 对换热的影响, 研究的倾角是 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 及 90° 。此外还研究了 $(G_r P_r)$ 及无量钢管

收稿日期: 1992 年 4 月

间距 $(S/D)_T$ 对换热的影响。试验表明, $Nu \propto (Gr \cdot Pr)^{0.176}$ 以及换热随 $(D/S)_T$ 的增加而增强,但增强的趋势逐渐减缓。但是,这些研究与目前使用的管线式冷凝器其冷凝管均为水平放置(图1),而且由于紧凑性的限制,冷凝器对冰箱后壁的距离以及倾角一般均很小。

本文系统地研究了无量纲线间距 $(S/D)_w$, 无量纲管间距 $(S/D)_T$, 冷凝器与垂直平面的倾斜角 θ ($-5^\circ < \theta < 5^\circ$) 以及冷凝器离开冰箱后壁距离 L 等因素对管线式冷凝器换热性能的影响,为正确合理地设计此类冷凝器提供依据。

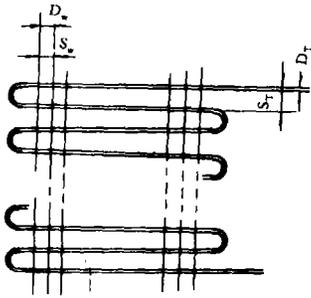


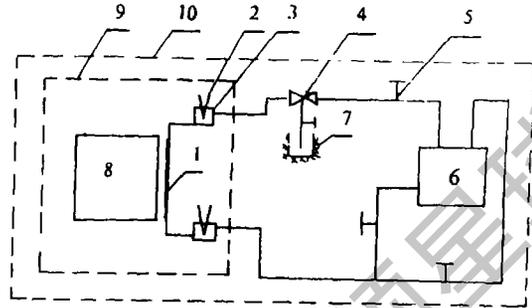
图1 管线式冷凝器结构示意图

二、实验系统和数据处理

1. 实验系统

实验系统见图2,实验中用热水在管内被冷却来模拟制冷剂氟里昂在管内的凝结放热过程。这是由于冷凝器管内凝结热阻与管壁导热热阻所占比例极小,当热水流量足够大时,可模拟管内等温凝结过程而不致引起多大的误差。试验中为了避免环境空气扰动的影响,在实验室中另套设一环境室,整个实验装置安放在环境室内。试验过程中环境室内温度保持恒定。为了系统地研究影响冷凝器管外侧总换热系数的各种因素,共对30个不同结构参数的冷凝器进行了试验,每个冷凝器又进行了改变倾斜角 θ 和改变离冰箱后壁距离 L

的试验。取冷凝器向冰箱背壁方向倾斜时之 θ 为负,反之为正(图3)。冷凝器安置在专用支架上,冷凝器的倾斜角度及离冰箱后壁的距离用连杆机构控制。



- 1. 冷凝器 2. 热电偶 3. 混合室 4. 三通阀
- 5. 阀门 6. 恒温水槽 7. 量筒 8. 冰箱
- 9. 环境室 10. 实验室

图2 实验系统

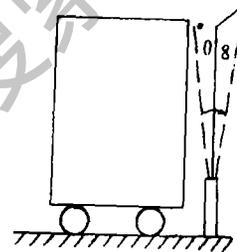


图3 冷凝器离冰箱后壁的倾斜角

2. 数据处理

冷凝器的热负荷由管内热水侧确定。热水流量用称重法测定。热水进出口温差由温差电偶测出,环境室内空气温度用热电偶测定。热电偶及温差电偶均逐对进行标定。由冷凝器管内热水的进出口温度和环境室内的空气温度可求得冷凝器的对数平均温差。由热负荷,对数平均温差及冷凝器的换热面积可计算出总传热系数 K 。冷凝器管外侧总换热系数的确定采用热阻分离法,从测定的总传热系数 K 中分离出管外侧的总换热系数。由于热阻主要在管外侧,管内热水侧的换热系数近似用迪图斯——贝尔特公式计算不致引入较大的误差。

三、实验结果及分析

1. 校核实验

为了检验实验装置和测量系统,在与文献〔1〕相近条件下(将冷凝器水平放置在环境室中夹,作大空间自然对流换热)进行校核试验。校核试验结果示出于图4。由图可见,本文试验数据与文献〔1〕吻合甚好,表明实验装置和测量系统是可靠的。

2. 实验结果和分析

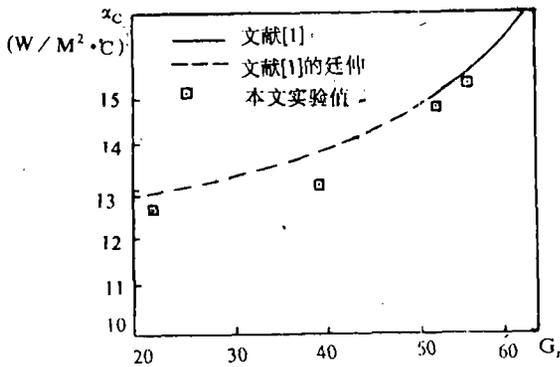


图4 校核试验结果

在完成校核试验后,本文系统地研究了无量纲线间距 $(S/D)_w$ 、无量钢管间距 $(S/D)_T$ 、冷凝器与垂直平面的倾斜角 θ ($-5^\circ < \theta < 5^\circ$) 以及冷凝器离开冰箱后壁距离等主要因素对冷凝器换热能力的影响。由于在冰箱实用参数范围内 $(G_r \cdot P_r)$ 数本身的变化不大,对换热系数的影响也比较小,因此,本文没有在较大的 $(G_r \cdot P_r)$ 数作过多的研究,而近似引用文献〔1, 2〕的结果,即认为 $N_u \propto (G_r \cdot P_r)^{0.176}$ 。

(1) 无量纲线间距 $(S/D)_w$ 的影响
实验表明, $(S/D)_w$ 是影响冷凝器换热的最重要的因素,它对冷凝器管外侧的对流换热系数有着强烈的影响。图5示出本文获得的典型结果。从图可见,当 $(S/D)_w$ 由 2.2 增大到 10 时, $N_u /$

$(G_r \cdot P_r)^{0.176}$ 的值约由 0.46 增大到 1.0。但是,随着 $(S/D)_w$ 的进一步增大它对换热的影响逐渐减弱。从流动和换热机理上看,上述实验结果可作这样的解释,当 $(S/D)_w$ 较小时,即冷凝器的钢丝较密时,相邻钢丝上形成的边界层互相干扰,甚至重叠,有可能形成流动和换热的停滞区。随 $(S/D)_w$ 增大,相邻钢丝上形成的边界层之间的干扰被减弱,停滞区缩小,使得流动和换热均相应增强。当 $(S/D)_w$ 足够大时,相邻钢丝上形成的边界层互相不产生影响。因此, $(S/D)_w$ 对换热的影响也越来越不明显。应该注意的是,随着 $(S/D)_w$ 的增大,尽管冷凝器管外侧换热系数增大了,但冷凝器的换热面积在减小,因此在某个 $(S/D)_w$ 范围内换热系数与面积的乘积有可能出现最佳值。在本文实验范围内, $(S/D)_w = 4.44$ 时,换热系数与面积的乘积出现最大值。

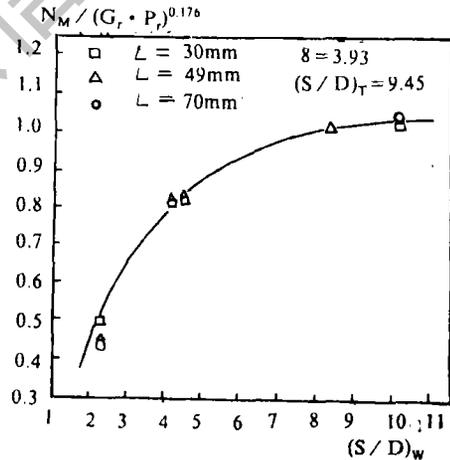


图5 $(S/D)_w$ 对换热的影响

(2) 倾斜角 θ 的影响

图6示出在 $(S/D)_T = 9.45$ 及 $L = 49\text{mm}$ 时, $(S/D)_w$ 对换热的影响与 θ 角有关,对于 $L = 30$ 及 70mm 也有类似的结果。由图可见,在其它条件不变的情况下,随着 θ 角从负向正的增大过程中,冷凝器的换热在逐渐增强。倾斜角 θ 的影

响可以这样来解释；当冷凝器从垂直位置 ($\theta=0^\circ$) 开始向远离冰箱背壁倾斜时，即 θ 由 0° 向正方向增大时，有两方面的因素使换热增强：一方面是随着倾斜角的增加，空气流与冷凝器壁面间的换热温差增大，有利于强化冷凝器换热；另一方面是随着倾斜角的增加，冷凝器对冰箱背壁的辐射角系数减小，而对环境的角系数增大，由于冰箱背壁一般高于环境温度，这样，冷凝器与外界净辐射换热量也会有所增加。

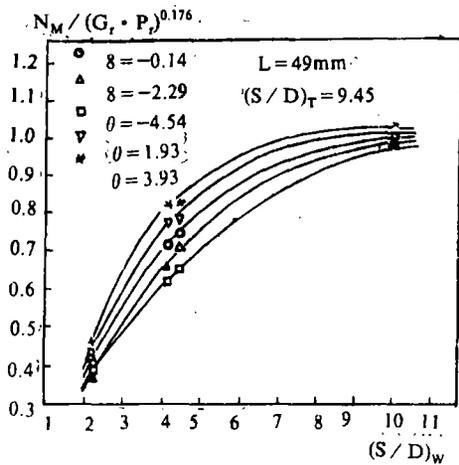


图6 倾斜角 θ 对换热的影响

当冷凝器从垂直位置 ($\theta=0^\circ$) 开始向冰箱背壁倾斜时，即 θ 由 0° 向负方向增大时，也会有两方面的因素影响冷凝器的换热：一是冷凝器对冰箱背壁的辐射角系数增加，而冰箱背壁温度高于环境温度，这样使得冷凝器与外界净辐射换热量减小，恶化了换热；另一方面是冷凝器为负倾角时，冷凝器上部偏向冰箱背壁，有可能处于冰箱背壁面的边界层中，这样使冷凝器上部换热温差减小，恶化了换热。本文的试验表明，冷凝器倾斜角 θ 是影响冷凝器换热的一个重要因素。不难发现，适当改变斜角 θ 是提高冷凝器换热的一个既简单又经济的方法。现有冰箱一般均使用 $(S/D)_w = 4.13$ ， (S/D)

$\tau = 9.4$ ， $L = 49\text{mm}$ ，倾角 $\theta = 0^\circ$ 的冷凝器。只需把 L 变为 30mm ，倾角 θ 变为 3.9° ，即可在既不改变冷凝器的结构及成本，也不改变冰箱占地空间的条件下，就能将冷凝器管外侧的换热系数提高约 15%。显然，这对降低冰箱的能耗具有重大的经济价值。

(3) 无量纲管间距 $(S/D)_T$ 的影响

无量纲管间距 $(S/D)_T$ 对换热影响的典型试验结果示出于图 7。由图可以看出， $(S/D)_T$ 对换热系数的影响并不很大， $(S/D)_T$ 的这种影响可以这样来解释：一方面是由于流经冷凝器下部管排的气流对上部管排有扰动和冲刷作用，使上部管排的换热系数增加，另一方面，空气在自下而上的流动中，温度逐渐升高，使得换热温差减小，换热降低。在这两种因素共同作用下（前者作用略大于后者），随 $(S/D)_T$ 的增大，换热系数略为增加。

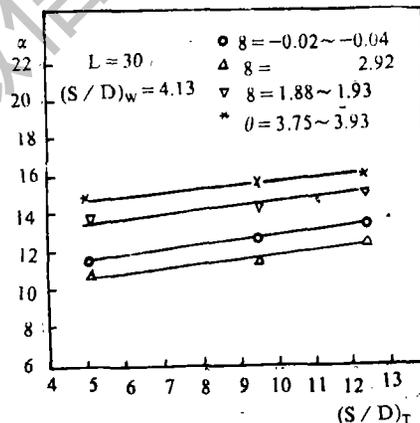


图7 $(S/D)_T$ 对换热的影响

(4) 冷凝器离冰箱背壁距离 L 的影响

图 8、9 分别示出冷凝器离冰箱背壁距离 L 对换热的影响。总体看来，在实验范围内 ($L = 30, 49$ 和 70mm)， L 对冷凝器管外侧换热的影响并不十分显著，并且 L 的影响与 $(S/D)_w$ 、 θ 以及 $(S/D)_T$ 有关。

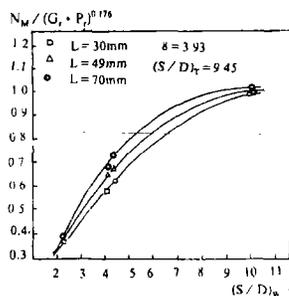


图8 $(S/D)_T$ 和 θ 一定时 L 对换热的影响

3. 管线式冷凝器管外侧总换热系数的实验关联式

试验表明, $(S/D)_w$ 、 $(S/D)_T$ 、 θ 、 L 是影响管线式冷凝器换热性能的主要因素, 其中 $(S/D)_w$ 的影响最大, 而倾斜角 θ 对强化冷凝器的换热具有十分重要的工程价值, 它为冰箱行业提供了一种既简便实用又具有重大经济效益的技术改进措施。在试验范围内, 通过多元函数拟合, 可得到管线式冷凝器管外侧总换热系数的实验关联式

$$N_u = 308.81 [L/H]^{8.51} \cdot [1 + \sin(\theta \cdot \frac{H}{L} \cdot \frac{\pi}{360})]^{0.31} \cdot [(S/D)_w^{0.005} - (S/D)_w^{0.004}]^{0.892} \cdot [(S/D)_T]^{-0.0145} \cdot (G_r \cdot P_r)^{0.176} \quad (1)$$

式中

$$N_u = \frac{\alpha de}{\lambda} \quad (2)$$

α 为包括辐射与自然对流换热的总换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$, de 为当量直径^[2]

$$de = \frac{A_T \cdot D_T + A_w \cdot D_w}{A_T + A_w} \quad (3)$$

其中, A_T : 冷凝管的外表面积, m^2 ;

A_w : 冷凝器上作肋片用的钢丝的

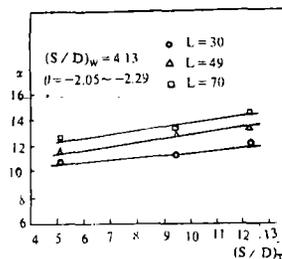


图9 $(S/D)_w$ 和 θ 一定时 L 对换热的影响

表面积, m^2 ;

D_T : 冷凝管的外径,;

D_w : 钢丝的外径,;

式 (1) 的最大相对误差为 $\pm 9.6\%$ 。

式 (1) 首次关联了影响管线式冷凝器外侧换热的各主要因素, 为冰箱管线式冷凝器设计提供了较准确的计算公式。

四、结 论

本文系统地研究了影响冰箱管线式冷凝器管外侧换热的各主要因素, 得出下列结论

1. $(S/D)_w$ 是影响冷凝器换热性能的最重要因素, 在本文试验范围内, $(S/D)_w = 4.44$ 时, 冷凝器换热系数与面积的乘积最大, 即冷凝器的散热量可望最大。

2. 冷凝器与垂直平面的倾斜角 θ 对换热有较大影响。随 θ 由负方向向正方向增加, 换热逐步增大。在成本等其它条件不变的情况下, 选用 $\theta \approx 4^\circ$ 时, 可使换热性能提高 15% 左右。

3. $(S/D)_T$ 对冷凝器换热的影响并不显著, 随 $(S/D)_T$ 增加, 换热略有增大, 但 $(S/D)_T$ 增大将使冷凝器换热面积明显下降, 故设计时 $(S/D)_T$ 应选取较小值。

4. 在实验范围内, L 对冷凝器换热的影响并不十分显著。过小的 L 会使换热恶

化, 过大的 L 将影响冰箱的紧凑性。

5. 本文首次关联了影响管线式冷凝器外侧换热的各主要因素, 提出了供管线式冷凝器设计用的计算关联式, 对指导此类冷凝器的设计有重要价值。

符号表

D_T	冷凝管直径	mm
D_w	钢丝直径	mm
G_r	格拉晓夫准则	
H	冷凝器高度	mm
L	冷凝器离冰箱后壁距离	mm
N_u	努谢尔特准则	
P_r	普朗特准则	
S_T	冷凝管间距	mm
S_w	钢丝间距	mm
$(S/D)_T$	无量纲管间距	

$(S/D)_w$ 无量纲钢丝间距

α 空气侧总换热系数 $W/(m^2.K)$

α_c 空气侧自然对流换热系数 $W/(m^2.K)$

θ 冷凝器与垂直平面的倾斜角

ρ 空气密度 kg/m^3

参 考 文 献

- [1] Witzell, O. W., Fontaine, W.E., and Papanek, W.J., "Convective Films Evaluated for Wire and Tube Heat Exchangers", ASHRAE Journal, Vol.1, June, 1959.
- [2] Colliott, H.E., Fontaine, W.E., and Witzell, O.W., "Radiation and Free Convection Heat Transfer from Wire and Tube Heat Exchangers", ASHRAE Journal, Dec. 1965. ▲

• CFC 动态 •

台湾对十种受控 CFC 物质加税

为适应氟氯碳化物(CFC)提前禁用的冲击, 并促使业者尽早使用 CFC 替代品, 台湾当局已经决定采取适当的关税调整方式, 以拉近 CFC 受控物质和 CFC 替代品的价格, 加速淘汰 CFC。

根据目前的计划, 已经列为受控物质的十种 CFC 产品, 将采取附加税方式, 提高进口成本, 而对 CFC 替代品则采取零关税制度, 该项措施于 1993 年起开始实施。

目前被列为受控物质的十种 CFC 相关产品分别如下: CFC11、CFC12、CFC13、CFC114、CFC115、Halon1211、Halon1301、Halon2402、Carbontetrach、Loribe、1.1.1.trichoroethane 等。

(编摘)