

文章编号: 1005-0329(2004)10-0053-04

家用中央空调机组用蒸发式冷凝器的开发

刘洪胜¹, 孟建军², 陈江平¹, 陈芝久¹

(1. 上海交通大学, 上海 200030; 2. 青岛海信日立空调系统有限公司, 山东青岛 266510)

摘 要: 蒸发式冷凝器是一种高效换热设备, 本文介绍了应用于家用中央空调机组的小型氟里昂蒸发式冷凝器的设计方法、设计参数的选取以及设计时应注意的问题和为了控制结垢需要注意的一些关键因素。

关键词: 家用中央空调; 蒸发式冷凝器; 防垢措施

中图分类号: TB657 文献标识码: A

Design of the Residential-sized Freon Evaporative Condenser

LIU Hong-sheng¹, MENG Jian-jun², CHEN Jiang-ping¹, CHEN Zhi-jiu¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Qingdao Hisense Rili Air Conditioning System Co., Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: The evaporative condenser is an efficient heat exchanger. The design method, attentive problems and selection of design parameters are introduced for the residential-sized Freon evaporative condenser. Many kinds of fouling-prevent measures are introduced and emphasized in the design process.

Key words: household central air conditioning; evaporative condenser; fouling-prevent measure

符 号

 A_c ——最小流通横截面积, m^2 B ——几何物性参数 C_A ——空气的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ d ——直径, m F ——换热面积, m^2 W_A ——空气的质量流量, kg/s G_A ——空气侧质量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$, $G_A = W_A / A_c$ h ——焓, kJ/kg l ——管长, m N ——空气流向的管排数 n ——单排管数 Q ——传热量, W Re_A ——空气雷诺数, $Re_A = W_A d_o / (A_c \mu_A)$ Re_w ——冷却水雷诺数, $Re_w = W_l d_o / (A_c \mu_w)$ t ——温度, $^\circ C$ W_l ——冷却水的质量流量, kg/s X_l ——纵向管间距, mm Z ——管束高度, mm , $Z = NX_l$ α_w ——管外壁与水膜间的换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ Δp ——空气侧压降 α_{wa} ——水膜与流动空气间的换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ α ——换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ Γ ——定义参数, $kg \cdot m / s$, $\Gamma = W_l / (4nl)$ μ ——粘度, $kg/(m \cdot s)$

下 标

 m ——平均 w, a ——水, 空气 o, i ——管外, 管内 k ——冷凝 w_i, w_o ——管内壁, 管外壁

1 前言

蒸发冷却方式广泛应用于流体冷却器^[1,2]、蒸发式冷凝器^[3]、冷却塔^[4]、空气处理、除湿盘管

收稿日期: 2003-10-27

等场合。制冷装置冷凝器的冷却方式主要有水冷却、风冷却和蒸发式冷却。水冷却和蒸发式冷却主要用于中央空调、冷库、制冰等大中型设备^[5~7]，小型机组一般采用风冷方式。

大户多房间建筑物的小型中央空调的冷却方式以前主要采用风冷，随着高层和多层高档公寓楼的建筑，风冷冷凝器的不足之处逐渐显露出来：制冷时，环境温度对COP影响很大，温度越高，COP越低，空调耗能越大，高层住户的空调运行会导致能耗和电费的增加；风冷冷凝器一般用轴流风机，风量大，但风压小，因而需要敞开的排风口和回风口，影响高层或多层建筑的外观。在这种情况下，蒸发式冷凝器的优点体现了出来：蒸发式冷凝器的冷凝温度主要受环境湿球温度的影响，而湿球温度一般比干球温度低 $8\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，因而主机的COP要高于风冷；蒸发式冷凝器采用离心风机，风压大，排风口和回风口可以添加装饰性的百叶窗，不影响建筑外观；蒸发式冷凝器可以直接回收利用空调房间产生的冷凝水。但蒸发式冷凝器也有其缺点：一是易于结垢，需用软化水；二是水箱置于家中，易滋生细菌和绿藻，需经常清洗甚至化学处理。

本文介绍了应用于家用中央空调机组的小型氟里昂蒸发式冷凝器的设计方法、设计参数的选取以及设计时应注意的问题和为了控制结垢需要注意的一些关键因素。

2 工作原理

小型氟里昂蒸发式冷凝器的构造如图1所示，其由蛇形换热盘管、水循环系统和空气流路组成。它主要利用水蒸发时吸收热量而使管内的氟里昂蒸汽冷凝成液体。冷却水储于水箱中，用浮球阀保持一定的水位，水箱中的冷却水用淋水泵送至淋水器，喷淋在蛇形盘管的外表面上，形成水膜，水膜中的部分水吸收氟里昂蒸汽释放的冷凝热蒸发，被空气带走，未蒸发的水流回水箱。淋水器上方装有挡水板，一方面可以防止温度较高的预冷器结垢，另一方面可防止飞散损失。水箱中的水由于不断蒸发而减少，同时水中的含盐浓度也在不断增加，减少的水由浮球阀控制不断补充自来水来补足，部分含盐浓度高的水由接水口经溢流排污管排入下水道，控制含盐浓度，减缓结垢。蛇形换热盘管由预冷器和冷凝盘管两部分组

成。制冷剂蒸汽先流过带有较大片距的翅片式预冷器，冷却至冷凝温度，再流入冷凝盘管释放冷凝热成液体而流出。淋水器和蛇形换热盘管由于暴露于潮湿的空气中，易于结垢或腐蚀，设计蒸发式冷凝器以及日常维护时应高度注意。

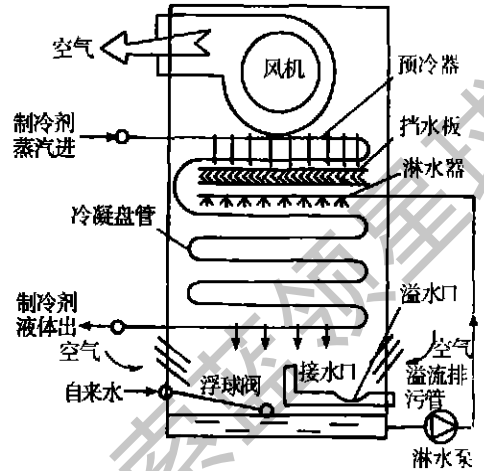


图1 小型氟里昂蒸发式冷凝器结构示意图

3 蒸发式冷凝器的传热和压降计算

在预冷器中，氟里昂蒸汽的换热以及空气侧的换热是显热交换过程，其传热和压降的计算比较简单，本文不予讨论。以下的计算适合于存在显热和潜热过程的冷凝盘管部分的换热和压降计算。

3.1 蒸发式冷凝器的传热计算

3.1.1 流动空气侧平均温度的计算

图2所示为空气在蒸发式冷凝器中的状态变化过程，点1表示空气的入口状态，点w表示水膜表面的饱和空气状态。

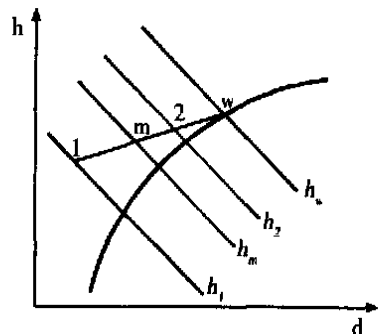


图2 蒸发式冷凝器中空气的状态变化过程示意图

空气的状态变化过程沿连线1-w进行到点2，点2表示空气的出口状态。在这一过程中水膜与流动空气间将发生热量和质量交换，流动空气的平均焓为：

$$h_m = h_w - \frac{h_2 - h_1}{\ln[(h_w - h_1)/(h_w - h_2)]} \quad (1)$$

根据图2中过程线1-w和 h_m 等焓线的交点可确定空气在蒸发式冷凝器中的平均温度 t_m 。

3.1.2 传热过程计算

氟里昂蒸汽在蛇形冷凝盘管内冷凝释放出的热量是通过油膜、管壁传给水垢,由水垢传给管外的水膜,再由水膜传给管外流动的空气。

水平管内 F_{Reon} 冷凝的换热量 $Q = F_i \alpha_i (t_k - t_{wi})$, 换热系数 α_i 可按式(2)计算:

$$\alpha_i = 0.555 B d_i^{-1/4} (t_k - t_{wi})^{-1/4} \quad (2)$$

对于冷凝温度为 40°C 的R22来讲,集合物性参数 $B = 1447.1^{[8]}$ 。

铜管外表面与水膜间的换热量 $Q = F_o \alpha_w (t_{wo} - t_w)$, 换热系数 α_w 可按式(3)计算^[1]:

$$\alpha_w = 704(1.39 + 0.022 t_w) \left(\frac{\Gamma}{d_o}\right)^{1/3} \quad (3)$$

对于氟里昂,油垢的热阻可以忽略,铜管外表面的水垢热阻可取 $r_o = (1.0 \sim 3.0) \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,铜管管壁热阻可以忽略,从而有 $t_{wi} = t_{wo}$ 。

水膜与流动空气间的换热包括显热和传质引起的潜热,换热量 $Q = F_o \alpha_{wa} (t_w - t_m)$, 换热系数 α_{wa} 可按式(4)计算^[1]:

$$\alpha_{wa} = 6.0 \times 10^{-8} Re_d^{0.9} Re_w^{0.15} d_o^{-1.6} C_A \quad (4)$$

3.1.3 传热系数和传热面积的计算

忽略水膜的热阻,蒸发式冷凝器的传热量可以表示为:

$$Q = F_o k_o (t_k - t_m) \quad (5)$$

其中
$$k_o = \frac{1}{\frac{F_o}{F_i \alpha_i} + r_o + \frac{1}{\alpha_w} + \frac{1}{\alpha_{wa}}}$$

从制冷剂蒸汽到冷却水膜的传热量为:

$$Q = F_o k'_o (t_k - t_w) \quad (6)$$

其中
$$k'_o = \frac{1}{\frac{F_o}{\alpha_i F_i} + r_o + \frac{1}{\alpha_w} + \frac{1}{\alpha_{wa}}}$$

由于式(5)和式(6)在已知冷凝温度 t_k 和换热量的情况下, k_o 和 k'_o 均为水膜温度的函数,因而传热面积 F_o 构成关于水膜温度 t_w 的两个隐含数,采用迭代编制计算程序法或图解法均可以求出传热面积 F_o 和水膜温度 t_w 。

3.2 蒸发式冷凝器空气侧的压降计算

蒸发式冷凝器空气侧的压降计算为选择风机提供依据,可以按下式进行计算^[1]:

$$\frac{\Delta p}{Z} = 4.9 G_A^{1.85} \left(\frac{\Gamma}{d_o}\right)^{0.285} \quad (7)$$

4 设计时应注意的问题

4.1 换热盘管选取

为防止结垢和便于清洗,蒸发式冷凝器的换热盘管采用光铜管。由于管内温度超过 50°C 时,管外与水接触的表面易于结垢,因而设计时添加带有较大翅片间距的预冷器,可以将过热的制冷剂蒸汽预冷至冷凝温度,添加预冷翅片管后,蒸发式冷凝器的单位面积热负荷可提高 10% ;可以充分利用出风携带的液滴的蒸发潜热及空气的湿热,并且可以减轻冷凝盘管的结垢现象。蛇形冷凝盘管的设计可以采用悬臂型冷凝盘管,即冷凝盘管的进口分气管和出口集液管与机壳固定,其余部分水平浮动,水平浮动盘管在工作时产生一定频率的振颤,具有防垢作用,如果铜管表面产生垢层,由于铜材和垢质的膨胀系数差别较大,在盘管温度变化或所受的内压变化时,铜管自身产生趋直、伸展作用,使水垢与附着的铜管表面产生剪应力,从而水垢会从光滑的铜管表面自动脱离。

4.2 其它部件

蒸发式冷凝器的主要噪声源是风机和喷淋水落到水箱水面的水声,设计时要注意采取消声措施。实践中,淋水器的堵塞是影响蒸发式冷凝器性能的主要因素,宜采取大口径或旋流防堵设计。淋水泵宜选用干式冷却泵,浮球阀的性能必须可靠,溢流排污管除防止浮球阀损坏和导走水流外,其主要功能是可以连续排走含盐浓度较高的冷却水,控制冷却水的浓度,减缓垢质的析出。

4.3 设计参数的选取

蒸发式冷凝器的主要特点是耗水少(耗水量约为一般水冷冷凝器的 $5\% \sim 10\%$)。蒸发式冷凝器的冷凝能力随蒸发温度、冷凝温度以及进口空气湿球温度的不同有较大差别,其冷凝容量的标准条件各国都按照本国的具体情况进行规定,丹麦、英国规定冷凝温度为 40°C ,进口湿球温度为 20°C ;日本规定冷凝温度为 35°C ,进口湿球温度为 27°C ,中国与日本的规定一样。

由于国内目前还没有小型氟里昂蒸发式冷凝器的技术标准,根据设计经验,对于小型氟里昂蒸发式冷凝式冷水机组($7 \sim 30\text{kW}$),风机宜采用吸入式,冷凝盘管单位面积的排热量取 $3 \sim 4\text{kW}/\text{m}^2$ 为

宜,管排数不宜大于 14,制冷系统的蒸发温度取 $2 \sim 4^{\circ}\text{C}$,冷凝温度取 $35 \sim 40^{\circ}\text{C}$,过热度取 $4 \sim 10^{\circ}\text{C}$,过冷度取 $3 \sim 6^{\circ}\text{C}$,冷凝器配风量宜取小(可降低噪声),为 $60 \sim 90\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{kW})$,配水量宜取大(防淋水器堵塞、防垢),为 $0.08 \sim 0.10\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{kW})$,蒸发器水量取水侧进出口温差为 $5 \sim 8^{\circ}\text{C}$ 时的水量。

4.4 防垢设计

蒸发式冷凝器易于结垢的主要原因:水温上升导致水中的盐类物质发生化学变化产生垢而沉积在管表面;水的蒸发导致水中的不溶物沉积在管表面;有机物的滋生、金属的腐蚀等。采用化学手段除垢的方法^[7],本文不予讨论。为了有效防止或减缓垢质的产生,在设计阶段必须充分注意以下几个方面:

(1) 换热盘管的温度,当换热盘管的表面温度低于 50°C 时,产生的垢质疏松,易于冲洗,当其表面温度高于 50°C 时,产生的垢质坚硬,难以清除;

(2) 循环水量,较大的循环水量易于冲洗掉疏松的垢质;

(3) 管束的几何布置,管束的布置尺寸会影响空气和水的流动分布,对逆流布置方式而言,相邻换热管的间距如果太小,水流有可能会在此处停滞,而且无论采取什么措施,在水质较差的地区使用蒸发式冷凝器,结垢不可避免,故管束的几何布置必须有利于清洗;

(4) 循环水的 pH 值应保持在 $6.5 \sim 8$ 之间。

5 蒸发冷凝式冷水机组

采用上述设计策略,设计的 10kW 的蒸发冷凝式冷水机组的参数如表 1 所示,其结果如图 3 所示。

表 1 10kW 蒸发冷凝式冷水机组参数

项 目	参 数	
蒸发式 冷凝器 参数	循环风量(m^3/h)	800
	循环水量(m^3/h)	1
	补水量(kg/h)	25
	冷凝盘管 几何参数	光铜管 $\Phi 10\text{mm}$,纵向管间距为 32mm ,横向管间距为 11.5mm ,水平管长为 355mm ,总外表面积为 3.5m^2
机组尺寸	长 \times 宽 \times 高 $480\text{mm}\times 820\text{mm}\times 1260\text{mm}$	

6 结语



图 3 10kW 蒸发冷凝式家用中央空调冷水机组

蒸发式冷凝器是一种高效换热设备,比风冷冷凝器节能 20% 以上,其小型化设计用于家用中央空调机组是一个可行的方向。蒸发式冷凝器的主要缺点是易于结垢,在设计阶段充分注意一些关键因素并辅以良好的日常维护可以有效地减缓结垢的产生和发展。

参考文献:

- [1] Finlay I C, Harris D. Evaporative cooling of tube banks [J]. Int. J. of Refrig. 1984, 4(4): 214-224.
- [2] Hasan A, Siren K. Performance investigation of plain and finned tube evaporatively cooled heat exchangers [J]. Applied thermal engineering, 2003, 23: 325-340.
- [3] Peterson D, et al. Predicting the performance of an evaporative condenser [J]. Transactions of the ASME, Journal of heat transfer, 1998, 110: 748-753.
- [4] Milosavljevic N, Heikkila P. A comprehensive approach to cooling tower design [J]. Applied thermal engineering, 2001, 21: 899-915.
- [5] 余江海,陆震,范林. 蒸发式冷凝器应用现状及存在问题探讨 [J]. 制冷技术, 2001, (2): 33-36.
- [6] 王东屏. 蒸发式冷凝器的设计 [J]. 大连铁道学院学报, 1999, 20(1): 45-49.
- [7] 邱嘉昌,刘龙昌. 蒸发式冷凝器的应用与管系设计研究 [J]. 制冷技术, 2003, (2): 28-33.
- [8] 吴业正. 小型制冷装置设计指导 [M]. 北京:机械工业出版社, 1998.

作者简介:刘洪胜(1970-),男,博士生,主要从事制冷剂替代、家用中央空调和 CO_2 汽车空调的研究和开发,通讯地址:200030 上海市上海交通大学机械与动力工程学院制冷与低温工程研究所。