

冰箱用丝管式冷凝器的设计计算

揭基华

(华中理工大学 湖北省 430070)

冰箱用丝管式冷凝器与其它冷凝器型式不同,在冷凝器的设计计算中,必须根据冰箱的结构特点及冷凝器的传热特性,选用适当的换热系数计算式,并考虑有关因素的影响,以求得合理的冷凝器的整体结构尺寸。

一、冰箱用丝管式冷凝器设计计算中的几个问题

1. 结构参数及型式

丝管式冷凝器中通常采用外径 $d_o = 4.5 \sim 6 \text{ mm}$ 的邦迪管(复合钢管),在其蛇管两侧等距离点焊外径 $d_w = 1.2 \sim 1.5 \text{ mm}$ 的镀铜钢丝,钢丝节距一般为 $5 \sim 7 \text{ mm}$,蛇管中上下相邻管中心距为 $S_o = 35 \sim 50 \text{ mm}$,钢丝间距与钢丝直径的比值大多为 $4 \sim 4.2$,钢管间距与钢管外径的比值大多为 $9.1 \sim 9.4$ 。本文计算实例则在上述参数范围内取值。

2. 同时考虑自然对流换热及辐射换热

在冰箱用丝管式冷凝器中,空气侧壁面与空气之间的换热属空气自然对流热交换,在设计及使用条件下,其自然对流换热系数不大,因此辐射换热不能忽视。此外,由于管内制冷剂的凝结换热系数较空气侧换热系数大得多,冷凝器的换热热阻则主要是外侧壁面与空气之间的换热热阻,因此在丝管式冷凝器的设计计算中,可仅考虑计算空气侧的换热系数而不计算管内制冷剂侧的换热系数。

3. 冰箱用冷凝器的热负荷

无疑,冰箱用冷凝器的热负荷大小对冷凝器的结构尺寸有较大影响。由于冰箱的结构特点,其冷凝器的热负荷并非象其它型式的冷凝器那样可直接通过热力计算确定冷凝器热负荷。在冰箱压缩机中,从压缩机汽缸中排出的高温、高压蒸汽首先将热量与压缩机吸入的蒸发压力下的过热蒸汽作热交换,蒸汽在机壳内进一步过热,也就是说,吸入蒸汽的过热必须吸收从压缩机汽缸中排出的高压蒸汽的热量,从而使高压蒸汽的温度降低,同时,压缩机机壳的外表面积与制冷量的单位比值较其它制冷装置中之比值要大得多,也就是说通过压缩机机壳散发的热量实际上使冷凝器的热负荷大大减少,关于冰箱的有关标准规定,压缩机机壳的温度不得高于 80°C ,实际也就是规定了以压缩机外壳排出的蒸汽的温度也不得高于 80°C 。因此,它的冷凝器热负荷可从设计冷凝压力下过热蒸汽温度为 80°C 开始计算。另外,在冰箱中,一般在门框四周都设置防露管,当饱和液态制冷剂通过防露管,必然要放出相当一部分的热量使液体过冷(其放热量所占冷凝热负荷通常在 40% 以上)。在某些冰箱中,在箱体底部机器间

化霜水盘中还设置预冷盘管（蛇管）。这样，最终的结果，使冷凝器的实际负荷仅占总热负荷的一半左右。因此在冰箱用冷凝器设计计算中，必须针对冰箱的特点，区别不同情况确定冷凝器的实际热负荷。

4. 制冷剂过热蒸汽温度对空气侧换热强度的影响

在冰箱中，无论是否设置预冷蛇管，进入冷凝器的制冷剂蒸汽均为过热蒸汽，而空气侧自然对流换热强度及辐射换热强度均与传热温差有较大关系，无疑，在冷凝器中换热的初始阶段（称为过热段），其传热温差比后一阶段（称为饱和段）要大得多。根据计算，过热段的全换热系数要比饱和段的全换热系数大 20% 左右。因此，在冷凝器的设计计算时，必须根据过热段及饱和段的不同传热温差分别计算其换热系数。

5. 空气与壁面之间的自然对流换热关系式

目前适用于冰箱丝管式冷凝器空气侧自然对流换热系数计算的关系式并不多见，已见到的少数关系式经实际计算检验均有一定误差。笔者经反复计算检验，认为下列关系式用于丝管式冷凝器自然对流换热系数计算有一定准确性。

$$\alpha_{\text{air}} = 0.94 \frac{\lambda_{\text{r}}}{d_{\text{e}}} \left[\frac{(s_{\text{b}} - d_{\text{b}})(s_{\text{w}} - d_{\text{w}})}{(s_{\text{b}} - d_{\text{b}})^2 + (s_{\text{w}} - d_{\text{w}})^2} \right]^{0.155} \cdot (P_{\text{r}} G_{\text{r}})^{0.26} \quad (\text{W}/\text{m}^2\text{C}) \quad \dots\dots (1)$$

其中： λ_{r} — 空气导热系数 ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)；

d_{b} — 管外径 (m)；

s_{b} — 蛇管上下相邻管中心距 (m)；

d_{w} — 钢丝外径 (m)；

s_{w} — 钢丝节距 (m)；

P_{r} — 空气的普朗特准数；

G_{r} — 空气的葛拉晓夫准数，由下式计算：

$$G_{\text{r}} = \frac{g \beta \Delta t d_{\text{e}}^3}{\nu^2} \quad \dots\dots (2)$$

其中： g — 重力加速度， $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ；

β — 空气的体积膨胀系数 ($1/^{\circ}\text{C}$)；

Δt — 传热温差；

ν — 空气的运动粘度，(m^2/s)；

d_{e} — 当量直径，由下式计算：

$$d_{\text{e}} = s_{\text{b}} \cdot \left[\frac{1 + 2 \frac{s_{\text{b}}}{s_{\text{w}}} \cdot \frac{d_{\text{w}}}{d_{\text{b}}}}{\left(\frac{s_{\text{b}}}{2.76 d_{\text{b}}} \right)^{0.25} + 2 \frac{s_{\text{b}}}{s_{\text{w}}} \cdot \frac{d_{\text{w}}}{d_{\text{b}}} \eta_{\text{r}}} \right]^4 \quad (\text{m}) \quad \dots\dots (3)$$

其中， η_{r} — 肋效率。对冰箱用丝管式冷凝器，在常用结构参数及温度参数条件下，肋效率变化不大，可取 $\eta_{\text{r}} = 0.85$ 计算。

(1) 式的定性温度为壁面与空气之间的平均温度（注：资料称 (1) 式为全换热系数，笔者反复验证，应不包括辐射换热，系有误）。

二、丝管式冷凝器的设计计算方法

如上所述, 冷凝器过热段和饱和段的传热温度有较大区别, 应分段进行计算, 其分段计算方法及步骤如下:

1. 确定过热段及饱和段热负荷
2. 确定过热段及饱和段传热温差

过热段传热温差:

根据定义, 当考虑肋效率时, 其传热温差为管壁温度与空气温度之差, 忽略管壁热阻, 则传热温差可为管内制冷剂的温度与空气温度之差。在过热段, 制冷剂进口温度高, 在换热过程中温度逐渐下降至冷凝压力下的饱和蒸汽温度即冷凝温度, 因此过热段的传热温差应为对数平均温差, 即:

$$\Delta t' = \frac{t' - t_k}{\ln \frac{t' - t_a}{t_k - t_a}} \quad (^\circ\text{C}) \quad \dots\dots (4)$$

式中: t' — 过热蒸汽温度 ($^\circ\text{C}$);

t_k — 冷凝温度 ($^\circ\text{C}$);

t_a — 空气温度 ($^\circ\text{C}$).

饱和段传热温差:

冷凝器出口制冷剂一般尚未达到过冷状态, 即出口制冷剂温度仍为冷凝温度, 也就是说在饱和段管内制冷剂温度不变, 那么饱和段的传热温差为:

$$\Delta t'' = t_k - t_a \quad (^\circ\text{C}) \quad \dots\dots (5)$$

3. 分别计算过热段和饱和段自然对流换热系数及辐射换热系数

选取传热管及钢丝规格, 确定管间距及钢丝间距, 即可分别计算各段自然对流换热系数及辐射换热系数。

4. 分别计算各段传热面积

过热段传热面积:

$$A' = \frac{Q'}{(\alpha_{nf}' + \alpha_{nr}') \eta_k \Delta t'} \quad (\text{m}^2) \quad \dots\dots (6)$$

饱和段传热面积:

$$A'' = \frac{Q''}{(\alpha_{nf}'' + \alpha_{nr}'') \eta_k \Delta t''} \quad (\text{m}^2) \quad \dots\dots (7)$$

式中: A' 、 A'' — 各段传热面积, 包括管面面积及钢丝外表面积;

α_{nf}' 、 α_{nr}' — 各段自然对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$);

α_{nf}'' 、 α_{nr}'' — 各段辐射换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$);

$\Delta t'$ 、 $\Delta t''$ — 各段传热温差 ($^\circ\text{C}$);

Q' 、 Q'' — 各段热负荷 (W);

η_k — 表面效率, 由下式计算:

$$\eta_k = \frac{A_b + A_w \eta_r}{A_b + A_w} \quad \dots\dots (8)$$

其中: A — 每米管长管面面积 (m^2/m);

A_w —每米管长上钢丝外表面积 (m^2/m)。

5. 确定冷凝器整体尺寸

(1) 传热面积: $A = A' + A''$ (m^2) (9)

(2) 蛇管总长: $L = \frac{A}{A_b + A_w}$ (m) (10)

(3) 蛇管水平根数: 根据冰箱宽度取冷凝器有效宽度为 b (m), 则蛇管水平根数:

$$N = \frac{L}{b} \quad \text{..... (11)}$$

(4) 冷凝器有效高度: 已知管间距 s_b (m), 则

$$H = N \cdot s_b \quad \text{(m)} \quad \text{..... (12)}$$

三、丝管式冷凝器设计计算示例

已知总冷凝热负荷为 180W, 冷凝温度为 50°C , 压缩机机壳出口制冷剂蒸汽温度为 80°C , 不设预冷盘管, 设置门框防露管, 制冷剂出防露管温度 35°C , 空气温度为 32°C 。

1. 过热段及饱和段热负荷:

查制冷剂 (R12) 过热蒸汽焓、饱和蒸汽焓、过冷液体焓, 可求得过热段负荷占总负荷的 15%, 则过热段负荷 $Q' = 27\text{W}$ 。

取防露管中放出的热量占总热负荷的 43%, 则饱和段热负荷占总热负荷的 42%, 饱和段热负荷 $Q'' = 75.6\text{W}$ 。

2. 过热段及饱和段传热温差:

由 (4) 式, 过热段传热温差 $\Delta t' = 30.6^\circ\text{C}$;

由 (5) 式, 饱和段传热温差 $\Delta t'' = 18^\circ\text{C}$ 。

3. 自然对流换热系数:

取管外径 $d_b = 4.5\text{mm}$, 管间距 $s_b = 4.2\text{mm}$, 钢丝外径 $d_w = 1.2\text{mm}$, 钢丝间距 $s_w = 5\text{mm}$, 由 (1) 式分别求得 $\alpha_{or}' = 9.32\text{W}/\text{m}^2\text{C}$, $\alpha_{or}'' = 8.2\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 。

4. 辐射换热系数由下式计算:

$$\alpha_{or} = 5.67 \varepsilon \frac{\left(\frac{T_w}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_a}{100}\right)^4}{\Delta t}$$

其中 $\varepsilon = 0.97$ (黑漆黑度), T_w 为壁面平均绝对温度, T_a 为空气绝对温度, Δt 为传热温差, 则可求得: $\alpha_{or}' = 7.91\text{W}/\text{m}^2\text{C}$; $\alpha_{or}'' = 6.82\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 。

5. 传热面积:

由 (6) (7) 式 $A' = 0.0584\text{m}^2$, $A'' = 0.3188\text{m}^2$ 。由 (9) 式 $A = 0.3772\text{m}^2$ 。

6. 冷凝器整体尺寸:

由 (10) 式传热管总长 $L = 4.869\text{m}$, 取冷凝器有效宽度 $b = 0.4\text{m}$ 。由 (11) 式蛇管水平根数 $N = 12.2$ 根, 若制冷剂从不同侧面进出取 $N = 13$ 根。实际有效长度 $L = 5.2\text{m}$, 冷凝器的实际高度为 0.546m 。

参考文献

1. 《热交换器设计手册》下册 (日) 尾花英朗著 徐中权译 石油工业出版社 1982. 9
2. 《电冰箱设计、使用、维修》 单大可 宇航出版社 1993. 3