

真空式相变传热热水器工作原理 及实用热力计算*

冯鲁英 王恩义

(郑州工学院)

摘 要: 本文讨论了工业炉窑排烟余热回收的最新技术——真空式相变传热热水器的工作原理。具有结构简单、安全可靠、能在小温差下获得较大的传热特点。结合 $2T/H$ 蒸汽锅炉回收其尾部排烟余热实例,给出了热力计算方法。该方法适用于一般真空式相变传热热水器的热力计算,简单实用且可保证精度。

关键词: 余热回收, 热水器, 工作原理, 热力计算。

中图分类号: X706

真空式相变传热热水器是用于工业炉窑及工业锅炉排烟余热回收的最新技术。真空相变热水器是利用中间载热体的汽化和凝结来传递热量的,它与重力式气—液热管换热器在传热机理上是相同的,但它优于气—液式热管换热器,使用寿命是热管换热器的十几倍,最适合于低温烟气余热的回收。

目前,用于烟气余热回收的设备有:余热锅炉、钢管及铸铁省煤器、气—液式热管换热器等。余热锅炉、钢管和铸铁省煤器均属于直接加热式的热水器,使用中在烟气出口处不可避免地要发生结露、硫腐蚀、堵灰及在水侧发生结垢和氧腐蚀现象,严重地影响着设备的使用寿命和传热效果。气—液式热管换热器,虽然在烟气侧加装了肋片、强化了传热、但在低温烟气余热回收中,当烟温及水温较低时仍存在一些待解决的问题:

- ①在烟气出口低温处的最末排管有可能发生硫腐蚀及堵灰现象;
- ②气—液热管换热器的水侧有水垢和氧腐蚀现象;
- ③存在工质与钢质壳壁间的相容性问题,易造成热管失效;
- ④造价较高。

以上问题都影响着气—液热管换热器在低温烟气余热回收中的应用。为充分地回收低温排烟余热,必须解决好以下三个关键性问题:

- ①要有良好的传热元件,如高效传热管、蒸发器、冷凝器等,否则低温余热的回收势必引起设备尺寸庞大,造价高经济上不够合理;
- ②要有良好的防腐蚀措施,否则换热设备难于在使用寿命上过关;

* 收稿日期: 1993-6-22

③要有良好的防结垢和防积灰措施, 否则难于在经久运行及保持高效率上过关。

一般的换热器都难于一并解决以上三个关键性技术问题, 因而造成今日大量低温烟气余热未得到充分回收利用。而真空式相变传热热水器比较成功地克服了上述直接传热热水器及气—液式热管换热器的弊端, 解决了低温烟气回收中的技术难点。一般, 蒸发量 1 吨/时的锅炉每小时可回收余热产生 80℃ 热水 1 吨, 在实际应用中显示出了较高的经济效益。

本文简述真空式相变传热热水器的工作原理及技术特点, 结合 2T/H 蒸汽锅炉采用真空式相变传热热水器回收其尾部排烟余热的实例, 介绍其热力计算方法。本文采用的计算方法也适用于工业炉窑排烟余热回收的热力计算。

1 真空相变热水器的工作原理及技术特点

真空相变热水器是由蒸发器和冷凝器两部分组成的, 在有热媒水的蒸发器中设有螺旋槽烟管受热面, 载有余热的烟气通过烟管时在蒸发器中放热, 使管外热媒水受热沸腾, 所产生的热媒蒸汽进入上部冷凝器中, 在被加热水的管道外表面凝结而放出汽化潜热将流过管内的冷水加热, 而凝结后的热媒水则依靠重力流回到蒸发器内。热媒水的循环工作过程为: 沸腾—凝结—再沸腾, 从而起到热介质的作用, 而冷凝器内铜盘管中流过的冷水被管外蒸汽冷凝而加热, 送至用热设备。

蒸发器和冷凝器内维持低度真空, 使热媒水的饱和温度控制在不低于 90℃, 实际应用时热媒水的饱和压力控制在 0.7—0.85 绝对压力 (即表压 -0.3~-0.15bar), 相应的饱和温度为 90—94.5℃, 表压可以靠变化被加热冷水的流量, 从而改变热媒水汽化吸热量与热媒蒸汽凝结放热量之间的平衡关系。冷凝器上配有自动抽气装置, 以排除器内的不凝结气体。

真空相变热水器热媒水处于 90℃ 以上的沸腾状态, 使烟管壁温始终保持较高的温度, 即使烟气温度降的较低也不致产生低温腐蚀问题。真空式相变热水器在负压下运行, 安全可靠, 不属压力容器。由于蒸发器内热媒水重复使用, 运行中不会出现烧干的现象。

真空式相变热水器不但较好地解决了低温烟气余热回收中的技术难点——硫腐蚀和氧腐蚀问题, 而且采用了高效的传热方式。一般 $\alpha_{\text{对流}} = 4000$; $\alpha_{\text{沸腾}} = 5000 \sim 10000$; 而 $\alpha_{\text{凝结}} = 10000 \sim$ 几万以上。所以相变传热效果比对流传热效果好得多, 能够在小温差下获得较大的传热量, 充分体现了其节约能源, 提高用能设备热效率的作用。

要回收一定量的烟气余热, 如果需要的传热面积过大, 在经济上是无法通过的。为减少烟气与管壁对流换热热阻, 强化传热, 真空式相变热水器的烟管受热面采用螺旋槽管, 一般螺旋槽管的放热系数为光管放热系数的 1.5—3 倍, 从而节省了传热面积, 降低了钢材的消耗量。而且在运动中由于螺旋槽管的热胀冷缩, 减少了粘在管壁上的烟灰和硫化物, 使烟管更加不易积灰和腐蚀。这种管型加工制作方便, 费用较低, 便于推广应用。

2 真空式相变热水器的热力计算方法

以2蒸吨/时锅炉为例, 真空式相变热水器的热力计算方法如下:

原始数据:

烟气进入热水器时的温度: $T_{g_1} = 250^\circ\text{C}$

烟气流出热水器时的温度: $T_{g_2} = 120^\circ\text{C}$

烟气流量(取标准体积): $V_{gH} = 3500 \text{ NM}^3 / \text{h}$

被加热水入口温度: $T_{w_1} = 12^\circ\text{C}$

被加热水出口温度: $T_{w_2} = 82^\circ\text{C}$

2.1 热负荷计算:

①烟气余热(烟气排放到 20°C 环境温度时放出的热量)

$$Q_o = G_g C_{pg} (T_{g_1} - T_{g\text{环境}}) = V_{gH} \rho (C_{pg250^\circ\text{C}} \times T_{g_1} - C_{pg20^\circ\text{C}} \times T_{g\text{环境}})$$

$$= 1162273.5 \text{ KJ} / \text{h}$$

②最终排烟温度为 120°C 时能够回收的热量:

$$Q_g = G_g C_{pg} (T_{g_1} - T_{g_2})$$

求 C_{pg} 时用对数平均温度, 并确定热媒水的平均温度 $t_s = 100^\circ\text{C}$. 则 $\Delta t' = 250 - 100 = 150^\circ\text{C}$. $\Delta t'' = 120 - 100 = 20^\circ\text{C}$

$$\text{则对数平均温差: } \Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = 64.5^\circ\text{C}$$

由于烟气和热媒水平均温差已确定, 热媒水侧温度为常数, 故烟气流经热水器时的平均温度为: $t_{fg} = t_s + \Delta t_m = 164.5 = 165^\circ\text{C}$ $C_{pg165^\circ\text{C}} = 1.08685 \text{ KJ} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

故 $Q_g = 640400 \text{ KJ} / \text{h}$

③热回收率计算: $Q_g / Q_o = 55\%$

④产热量计算:

螺旋槽管烟气有效热量: $Q_{gy} = Q_g$

由于散热损失实际吸收热量: $Q_w = \varphi Q_g$, φ 取 0.95

实际吸收热量则为: $Q_w = G_w C_p (t_{w_2} - t_{w_1})$

t_{w_1} 、 t_{w_2} : 分别表示被加热水的进出口温度。

C_p : 水的比热, 应取被加热水平均温度下的比热值:

被加热水的平均温度:

先求出热媒蒸汽及被加热水两种流体的平均温差: 本课题设计中近似将热水器中压力定为: $P = 1$ 绝对大气压力, 此压力下干饱和蒸汽的饱和温度 $t_s = 100^\circ\text{C}$

$$\Delta t' = t_s - t_{w_1} = 100 - 12 = 88^\circ\text{C}, \quad \Delta t'' = t_s - t_{w_2} = 100 - 82 = 18^\circ\text{C}$$

所以, 对数平均温差: $\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \Delta t' / \Delta t''} = 44.1^\circ\text{C}$

由于被加热水和热媒蒸汽平均温差已确定, 并热媒侧温度为常数, 故水的平均温度: $t_f = t_s - \Delta t_m = 56^\circ\text{C}$

而 $C_{p56^\circ\text{C}} = 4.177 \text{ KJ} / \text{Kg}^\circ\text{C}$ 则单位时间内加热冷水量:

$$G_w = Q_w / C_p (t_{w_2} - t_{w_1}) = \varphi Q_g / C_p (t_{w_2} - t_{w_1}) = 2081 \text{ Kg} / \text{h} = 2 \text{ T} / \text{h}.$$

2.2 沸水器部分设计计算:

2.2.1 烟气侧的传热计算

①烟气物性参数的确定: 用烟气的对数平均温度作为定性温度, 取烟气的物性参数:

$$\lambda_g = 3.702 \times 10^{-2} \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C}), \quad \gamma_g = 28.859 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}, \quad P_{r_g} = 0.677, \quad \rho_g = 0.8187 \text{ Kg} / \text{m}^3, \quad C_{p_g} = 1.08685 \text{ KJ} / \text{Kg}^\circ\text{C}, \quad \mu_{fg} = 23.065 \times 10^{-6} \text{ Kg} / \text{m} \cdot \text{s},$$

并由烟管的假设壁温 $t_w = 105^\circ\text{C}$, 得 $\mu_{w105^\circ\text{C}} = 20.605 \text{ Kg} / \text{ms}$

②确定烟气在平均温度下的流速: $\omega = 15 \text{ M} / \text{s}$

③烟管定性尺寸: 圆管 $\Phi 42 / 38 \text{ mm}$, $d_i = 0.038 \text{ M}$.

④雷诺数的计算: $Re = \frac{\omega d_i}{V} = 19751 > 10^4$

并 P_{r_g} 在 $0.6 - 120$ 范围内、属紊流, 有 $N_{uf} = 0.023 R_{ef}^{0.8} P_{rf}^{0.4} \left[\frac{\mu_f}{\mu_w} \right]^{0.11}$.

⑤ 烟气侧换热系数的计算: 由努塞尔准则 $N_u = \frac{\alpha d_i}{\lambda}$. 得烟气侧基本换热系数 α'_g

$$= \frac{N_{uf} \lambda_g}{d_i}, \text{ 而热水器中烟管采用螺旋槽管, 其放热系数 } \alpha \text{ 比平直管大 } 1.5 - 2.5 \text{ 倍, 应对 } \alpha'_g \text{ 进行修正, 取修正系数 } \varepsilon = 1.7 \text{ 则有: } \alpha_g = \varepsilon \alpha'_g \varepsilon \text{ 取值依据是由实验公式 } \alpha_{\text{螺旋槽}}$$

$$= \alpha_{\text{光管}} (2.5 \times 10^{-1.6 \log \omega_0}) \text{ 得出 } \varepsilon = 2.5 \times 10^{-1.6 \log \omega_0} = 1.7482, \quad \alpha_g = \frac{N_{uf} \lambda_g}{d_i} \varepsilon$$

$$= 90.1 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

2.2.2 沸水侧传热计算:

①烟管外热介质沸腾放热系数 α_w : $\alpha_w = 39.38 \Delta t^{2.33} p^{0.5}$

上式中: p : 换热器内压力, 一般选 $0.7 - 1$ 绝对大气压力, 本设计取 $P = 1 \text{ bar}$

Δt : 过热度 $\Delta t = t_w - t_s$. 考虑到在 1 大气压力下 $\Delta t = 5 - 25^\circ\text{C}$ 范围内进入泡态沸腾 (当 Δt 小于 5 时属自然对流, 大于 25 时是膜态沸腾), 故假设 $t_w = 105^\circ\text{C}$,

$\Delta t = 105 - 100 = 5^\circ\text{C}$, 则沸水侧换热系数: $\alpha_w = 1674.5 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

② 验算壁温 t_{w_1} : 由 $\alpha_g F(t_{fg} - t_w) = \alpha_w F(t_w - t_s)$

$$\text{解出 } t_w = \frac{\alpha_g \bar{t}_{fg} + \alpha_w \bar{t}_s}{\alpha_g + \alpha_w} = 103.3^\circ\text{C}$$

$$\text{相对误差: } \frac{105 - 103.3}{105} = 1.6\% < 2\% \text{ 能满足平衡要求, 故选定 } t_w = 105^\circ\text{C}.$$

2.2.3 求传热系数K:

一般当 $d_2/d_1 < 2$ 的圆筒壁传热计算, 可以近似地按平板壁公式计算, 其误差不大于4%。在一般工程计算中完全能够满足精度要求。

$$K = \frac{1}{1/\alpha_g + \delta/\lambda + 1/\alpha_w + R_g} = 82.7 \text{ W/m}^2\text{C}$$

式中: δ/λ : 壁面导热口阻, 值很小, 忽略不计;

R_g : 烟垢热阻, 取 $R_g = 0.0004$

2.2.4 求烟管换热面积:

$$\text{由 } Q = K \Delta t F \text{ 推得: } F' = \frac{Q_{gy}}{\Delta t_m K},$$

式中: Δt_m 沸水器内两种热流体的对数平均温差 65°C 。

Q_{gy} : 烟气有效热量, 对波纹管 $Q_{gy} = Q_g = 640400 \text{ KJ/h}$ 。

所以: $F' = 33 \text{ M}^2$ 。

加安全系数 $F = 1.1 F' = 36.3 \text{ M}^2$

2.3 冷凝部分设计:

设计参数: 冷水进口温度 $t_{w1} = 12^\circ\text{C}$, 热水出口温度 $t_{w2} = 82^\circ\text{C}$

蒸汽压力: $P = 1$ 绝对大气压力 = 1 bar

饱和温度: $t_s = 100^\circ\text{C}$ 的干饱和蒸汽, 凝结水为饱和水。

2.3.1 计算水侧放热系数 α_w :

① 求取水的物性参数: 把沸水器计算时, 求取的水的对数平均温度 $\bar{t}_f = 56^\circ\text{C}$ 作为定性温度。

取值: $V_f = 0.5092 \times 10^{-6} \text{ Kg/(ms)}$, $\mu_f = 501.7 \times 10^{-6} \text{ Kg/Ms}$ 。

$\lambda_f = 0.6546 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $P_{rf} = 3.204$, $\rho_f = 985.16 \text{ Kg/m}^3$ 。

$C_{pf} = 4.177 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$ 。以假定壁温 $t_w = 84^\circ\text{C}$ 求水的动力粘度:

$$\mu_w = 339.02 \times 10^{-6} / \text{ms}$$

② 定型尺寸: 换热器采用三组紫铜蛇形盘管, 规格 $\Phi 19/17 \text{ mm}$;

③ 确定被加热水在管内流速 ω :

水流速较大时有利于传热, 但消耗功率较多, 一般液体在管内流速应控制在 $0.5 - 2 \text{ M/s}$ 范围内, 故按以下流速选取:

$$\omega = \frac{G_w}{n \rho_f (\pi/4) d_i^2} = 0.862 \text{ m/s}$$

式中: n 盘管根数, 设计中取 $n = 3$

$$\textcircled{4} \text{ 雷诺数计算: } Re = \omega d_i / V_f = 2.88 \times 10^4 > 10^4$$

并 P_{rf} 在 0.6 — 120 范围内, 水在管内流动属紊流

⑤ 计算水侧放热系数 α_w :

$$\text{由受迫运动的放热公式: } N_{uf} = 0.023 R_{ef}^{0.8} P_{rf}^{0.4} \left[\frac{\mu_f}{\mu_w} \right]^{0.11} = 141.325.$$

$$\text{则平直管的放热系数 } \alpha'_w = N_{uf} \frac{\lambda_f}{d_i} = 5442 \text{ W/m}^2$$

本设计中凝水器用蛇形盘管, 其放热系数大于平直管, 修正如下:

$$\text{式中: } \varepsilon_R \text{ 修正系数, } \varepsilon_R \alpha'_w = 1.073 \left(\frac{d}{R} \right)^2 = 5935.5 \text{ W/m}^2 \text{C}.$$

R : 蛇形管的螺旋弯曲半径, R 取 125 mm

2.3.2 计算蒸汽侧放热系数 α_v :

仍假设壁温 $t_w = 84^\circ\text{C}$.

$$\textcircled{1} \text{ 确定定性温度: 液膜的平均温度 } \overline{t_m} = \frac{t_s + t_w}{2} = 92^\circ\text{C}$$

② 由定性温度 $\overline{t_m}$ 值, 查表得凝液的物性参数:

$$\lambda_l = 0.6806 \text{ W/m}^2\text{C}, \quad \rho_l = 963.92 \text{ Kg/m}^3, \quad \mu_l = 308.42 \times 10^{-6} \text{ Kg/ms}$$

由 $t_s = 100^\circ\text{C}$, 得饱和蒸汽的汽化潜热 $\gamma = 2257.1 \text{ KJ/Kg}$

③ 蒸汽侧换热系数:

纯净蒸汽在膜状凝结时的平均对流换热系数为:

$$\alpha'_v = 0.725 \sqrt[4]{\frac{g \gamma \rho^2 \lambda^3}{\mu d_o (t_s - t_w)}} = 11758 \text{ W/m}^2\text{C}$$

热水器运行中漏进的空气属不凝结气体, 当其停留在液面附近时, 蒸汽凝结将受到阻止, 即蒸汽侧实际凝结换热系数 α_v 比理论值要小, 故有修正公式: $\alpha_v = \xi \alpha'_v \xi$ 为不凝结气体修正系数, 其值取决于不凝气体含量, 一般取 $\xi = 0.8$, 以上 α_{v_i} 、 α'_v 均按平直管公式计算的, 而对热水器中应用的蛇形盘管, 则有: $\alpha''_v = \varepsilon \alpha'_v$, ε 称蛇形管修正系数, 与螺距、螺旋半径有关, 一般取 $\varepsilon = 0.9$, 则实际放热系数:

$$\alpha_v = \xi \alpha''_v = \xi \varepsilon \alpha'_v = 8466 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$\textcircled{4} \text{ 校核壁温 } t_w = \frac{\alpha_v t_s + \alpha_w t_f}{\alpha_v + \alpha_w} = 82.52^\circ\text{C} \text{ 计算相对误差: } \frac{84 - 82.52}{84} = 1.77\% < 2\%$$

能满足平衡要求, 合格。

2.3.3 求传热系数 K , 换热面积 F :

① 由于铜管热阻很小, 故略去不计, 管壁 δ 很薄, 可近似按平壁计算:

$$K = \frac{1}{(1/\alpha_w) + (\delta/\lambda) + (1/\alpha_v) + R_w} = 1674.7 \text{ W/m}^2\text{C} = 1675 \text{ W/m}^2\text{C}$$

R_w 附加热阻, 与水质有关, 一般取 $0.0001 \sim 0.0003$.

② 求换热面积 F :

由 $Q = K \Delta t F$, 得 $F = \frac{Q}{\Delta t_m K}$.

换热量: $Q = G_w C_p (t_{w_2} - t_{w_1}) = 169 \text{ KJ/s} = 169000 \text{ W}$

所以 $F = \frac{Q}{\Delta t_m K} = 2.288 \text{ M}^2$

3 结束语

真空相变热水器的设计, 除热力计算外, 还有其结构设计, 以及阻力计算等。本文着重介绍了热力计算方法, 此计算方法同样适用于其他容量的锅炉及各种类型的工业炉窑尾部排烟余热的回收。

Operating Principle of Vacuum Phase Transition Heat Transfer Water Heater and the Heat Calculation Method

Wang Enyi Feng Luying
(Zhenzhou Institute of Technology)

Abstract: This paper has a preliminary analysis to the operating principle of Vacuum Phase Transition Heat Transfer Water Heater (VPHTWH) which is the newest technique of exhaust flue waste heat recovery to be used in the industrial furnace and boiler. VPHTWH has many advantages in comparison with other flue waste heat recovery equipment, such as simple structure, safety, reliable. It can transfer the greater amount of heat with fewer thermal difference. According to the heat recovery example for the trailer flue waste heat of 2T/H steam boiler, the paper shows us a heat calculation method, which is suitable for the general VPHTWH heat calculation. The method is both useful and exact.

Keywords: waste heat recovery, water heater, operating principle, heat calculation