

碳氢化合物催化燃烧反应器废气余热回收装置 的设计计算

林玉书
(轻工系)

提 要 本文论述的废气余热回收装置是采用旋转型蓄热式热交换器,着重介绍该换热器机理与结构、工作特性、设计计算方法及设计时应解决的主要问题。

关键词 碳氢化合物; 反应器; 旋转型蓄热式热交换器; 废气; 空气

含烃(碳氢化合物)废气的处理方法主要有直接燃烧法,吸附法和催化氧化法三种。催化氧化法是在催化剂存在下,用空气将有害物质完全氧化变为无害的水和二氧化碳,此法适用于处理量大,温度为 $150^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$ 下操作的场合,由于不产生二次污染,其优点较为突出。

本文讨论的催化氧化工艺流程,是用鼓风机将新鲜空气送入旋转型蓄热式热交换器的低温空气通道,从热交换器蓄热体中接受热量使空气预热,经预热后的空气与烃类在烃类发生器(污染源)混合后,经加热器加热到催化所需温度,送到催化燃烧反应器中进行完全氧化燃烧。从反应器出来的高温废气经旋转型蓄热式热交换器高温废气通道,将热量放给热交换器蓄热体使废气降温后,经烟道锅炉排空。

1 旋转型蓄热式热交换机理与结构

1.1 机理与结构

旋转型蓄热式热交换器传热机理是把内装蓄热体的旋转体置于低温空气和高温废气通道旋转,蓄热体在高温废气通道内接受热量使废气降温,在低温空气通道内放出热量使空气升温,使二种气体(废气、空气)进行换热。

旋转型蓄热式热交换器结构由五个部分组成,如图1所示,即转子(蓄热体)、外壳、传动装置、密封装置、吹灰装置。

1.2 旋转型蓄热式热交换器的工作特性

旋转型蓄热式热交换器的突出优点是蓄热体由多孔型或板型传热面构成,单位体积传热面大,重量轻,与管式相比可节省钢材 $1/3$ 左右;结构紧凑还可以使设备布置合理;蓄热板虽会发生低温腐蚀,由于它可拆卸,故可更换,不会象管式那样造成严重泄漏影响经济性和安全性;转子不高,易于吹灰,其主要缺点是结构复杂、制造上机加工工作量大、冷热流体有一定的混合,其内部泄漏量一般可达 $10\sim 20\%$ 。如果用旋转型蓄热式热交换器来回收催化燃烧反应器余热,还要解决废气中粉尘对旋转式蓄热式热交换器蓄热体造成堵塞和腐蚀的问题。

2 废气的粉尘造成堵塞与腐蚀及采取的对策

本文1992年1月5日收到

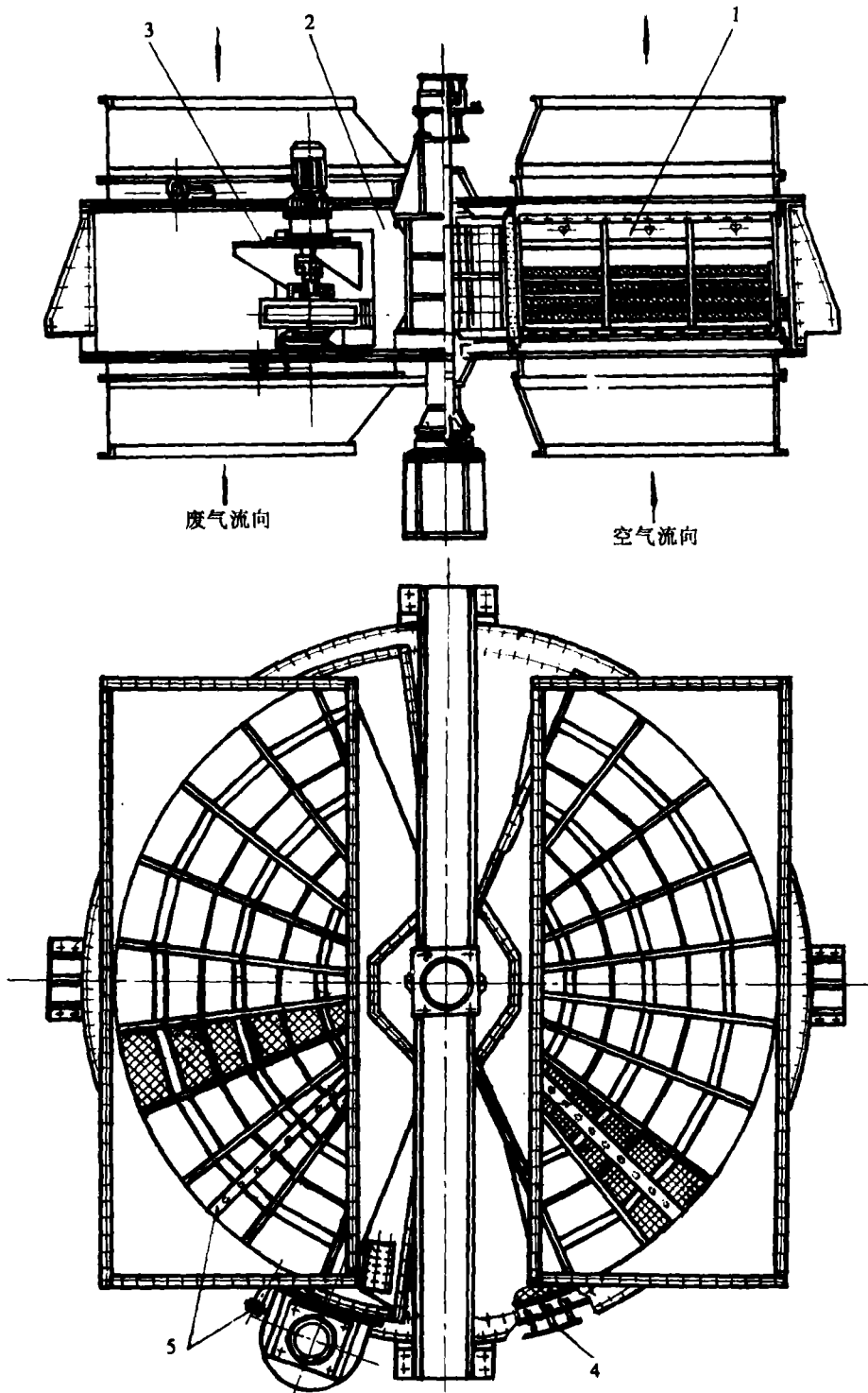


图 1 旋转型蓄热式热交换器

1 转子(蓄热体); 2 外壳; 3 传动装置; 4 轴向密封装置; 5 吹灰装置

如果在旋转型蓄热式热交换器中使废气中的工质达到露点以下温度, 粉尘便会溶解并且在传热板上布满膜层. 该膜层的成长使废气通路阻力增大. 这种现象如进一步发展, 就会造成通道的堵塞. 吸湿后, 粉尘使传热板低温段造成腐蚀.

为防止堵塞与腐蚀, 应采取以下几点措施:

- (1) 废气在进旋转型蓄热式热交换器前, 先经过过滤, 使废气粉尘量进一步降低;
- (2) 在废气通道、传热面上下部设置吹灰装置, 防止受热面积灰或通道的堵塞;
- (3) 设计时应计算换热器内温度分布, 尽量使传热面温度高于露点, 以防粘壁造成低温腐蚀;
- (4) 旋转型蓄热式热交换器冷、热流体经过的地方应采用耐腐蚀材料, 或者在低温段传热面采用塑料材料;
- (5) 加强旋转型蓄热式热交换器卫生方面的维护管理.

3 设计计算

由于旋转型蓄热式热交换器始终在不稳定的传热工况下工作, 介质或传热面的温度随时间和部位变化, 这类热交换器计算较为困难. 传热计算采用两种方法: 一是根据不同的蓄热体, 根据实验获得不同传热计算式子; 另一种是根据传热单元数(NTU)和换热器效能(E)的关系进行传热计算. 这里的计算主要根据后一种方法.

设计条件:

低温气体为室外新鲜空气

入口温度 $T_{n1} = 30^\circ\text{C}$;

出口温度 $T_{n0} = 280^\circ\text{C}$;

入口压力 $P_{n1} = 0.1059\text{MPa}$;

流 量 $W_n = 80.2\text{kg/s}$.

高温气体为催化燃烧反应器废气

入口温度 $T_{x1} = 350^\circ\text{C}$;

入口压力 $P_{x1} = 0.101\text{MPa}$;

流 量 $W_x = 88\text{kg/s}$.

根据以上条件即可进行设计计算.

(1) 由于空气漏失, 流量和温度的修正假定在空气入口端, 空气的 10% 漏入废气中, 则通过蓄热体的空气量作如下修正

$$W_n = 80.2 \times 0.9 = 72.2(\text{kg/s})$$

同理, 通过蓄热体的废气量 $W_x = 88 + 80.2 \times 0.1 = 96(\text{kg/s})$, 由于废气的定压比热 $C'_{px} = 1.0345\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、空气的定压比热 $C'_{pm} = 1.0174\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 则可求得修正后废气定压比热 $C'_{px} = 1.033\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和废气出口温度 $T_{x1} = 344^\circ\text{C}$.

(2) 热量平衡, 传热量 Q

$$Q = C'_{pm} W_n (T_{n0} - T_{n1}) = 18364\text{kJ/s}$$

$$\text{废气出口温度 } T_{x0} = T_{x1} - \frac{Q}{C'_{px} W_x} = 159^\circ\text{C}$$

(3) 界膜导热系数 h

假定采用图2所示尺寸传热板, 则图中斜线所示的流道, 其当量直径 D_e ,

$$D_e = 4(\text{流量断面面积}) / \text{湿周长} = 0.0102\text{m}$$

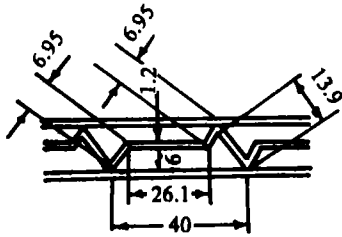


图2 传热板尺寸

① 废气侧界膜导热系数 h_x

假定质量速度 $G_x = 11.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 废气侧粘度 $\mu = 27.56 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (平均温度为 252°C), 雷诺数 $Re = \frac{D_e G_x}{\mu} = 4108$; 流道断面虽然形成复杂的形状, 可以把它认为矩形断面, 适用热交换器设计手册 (图 30-21)^[1], 认为图中 $\frac{L}{D_e} = 100$, 查得热因子 $j_H = 0.0032$, 废气的导热系数 $k = 4.2 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ (平均温度 255°C), 则认为下式中 $\left(\frac{T_w}{T_b}\right)^n = 1$, $h = j_H (G \cdot C) \left(\frac{C\mu}{k}\right)^{-2/3} \left(\frac{T_w}{T_b}\right)^n$, 则 $h_x = 47.66 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

② 空气侧界膜导热系数 h_n

假定废气侧流道面积 A_{cx} 和空气侧流道面积 A_{cn} 相等, $A_{cn} = A_{cx} = \frac{96}{11.1} = 8.65 (\text{m}^2)$, 空气侧的质量速度 $G_n = \frac{72.2}{8.65} = 8.34 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 空气粘度 $\mu = 23.96 \times 10^{-6} (\text{Pa} \cdot \text{s})$ (平均温度 155°C), 空气雷诺数 $Re = \frac{D_e G_n}{\mu} = 3550$. 查得 $j_H = 0.0032$, 空气导热系数 $k = 3.556 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 则可求得 $h_n = 34.78 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

(4) 传热面积 A_t

废气水当量 $(WC)_{max} = W_x C_{px} = 99168 (\text{W}/\text{K})$, 空气水当量 $(WC)_{min} = W_n C_{pn} = 73427.4 (\text{W}/\text{K})$; $(WC)_{min} / (WC)_{max} = 0.74$, 温度效率 $E = \frac{T_{n0} - T_{n1}}{T_{x1} - T_{n1}}$

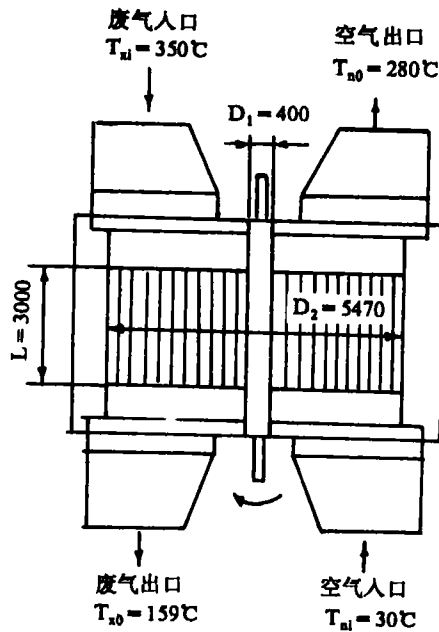


图3 旋转型蓄热式热交换器尺寸

= 0.79

认为 $(WC)_r / (WC)_{min} = 8$ 进行设计. 从图 5-9^[1] 查得总热量传热单元数 $(NTU)_0 = 2.8$

$$(NTU)_0 = \frac{1}{(WC)_{min}} \left(\frac{1}{1/(hA)_n + 1/(hA)_x} \right)$$

假定废气侧传热面积 A_x 等于空气侧传热面积 A_n , 所以旋转型蓄热式热交换器总的有效传热面积: $A_{eff} = 2A_n = 2A_x$

$$(NTU)_0 = \frac{A_{eff}/2}{(WC)_{min}} \left(\frac{1}{1/h_n + 1/h_x} \right)$$

$$A_{eff} = 2(NTU)_0(WC)_{min} \left(\frac{1}{h_n} + \frac{1}{h_x} \right) = 20450.37(\text{m}^2)$$

如果假定旋转体前面的 10% 被防止径向漏失的扇形覆盖, 则由于流体在这部分不流动, 对传热无用, 所以总传热面积 A_t

$$A_t = 1.1A_{eff} = 22495.41(\text{m}^2)$$

(5) 旋转体的转速 N_r

传热板总重量 $M_r = P_r t_r (A_t / 2)(\text{kg})$; P_r 为传热板密度 (kg/m^3): 铁的 $P_r = 7800\text{kg}/\text{m}^3$; t_r 为传热板厚度 (m): 取 $t_r = 0.0012\text{m}$, 则 $M_r = 105278.5\text{kg}$

传热板的水当量 $(WC)_r = 8(WC)_{min} = 587419.2(\text{W}/\text{K})$, $(WC)_r = M_r C_r N_r$.

传热板比热 $C_r = 0.502\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. 因此, $N_r = \frac{(WC)_r}{M_r C_r} = 0.011\text{s}^{-1}$. 通常旋转体的

转速在 $0.0083 \sim 0.066\text{s}^{-1}$ 范围内, 所以这个转速是妥当的.

(6) 旋转体的流动方向长度 L

旋转体中的总流道断面面积 A_{ci} 等于废气侧流道断面面积 A_{cx} 、空气侧流道断面面积 A_{cn} 和扇形板覆盖的流道断面面积 (总流道断面面积的 10%) 之和, 即: $A_{ci} = 1.1(A_{cn} + A_{cx}) = 19.03(\text{m}^2)$

如果研究图 2 中斜线所示流道, 则流道周长和断面面积之比: $r = 392(\frac{1}{\text{m}})$. 因此, 旋转

体的流动方向长度 $L = \frac{A_t}{A_{ci} r} = 3\text{m}$.

(7) 外形尺寸

如果旋转体柱的直径 $D_1 = 0.4\text{m}$ 考虑到图 2 中斜线所示的流道, 经计算迎风面积与流道断面之比为 1.23. 因此, 传热板的总迎风面积:

$$A_{fr} = 1.23 \times A_{ci} = 23.4(\text{m}^2); \quad D_2 = \left(\frac{4}{\pi} A_{fr} + D_1^2 \right)^{1/2} = 5.47(\text{m})$$

整理后其主要尺寸见图 3 所示.

(8) 旋转型蓄热式热交换器热量回收效率 $\eta_{回}$

未装旋转型蓄热式热交换器时, 空气须从 $T_{n1} = 30^\circ\text{C}$ 加热至催化燃烧温度 $T'_{n0} = 350^\circ\text{C}$. 此时, 空气加热器要提供热量为:

$$Q_{总} = W_n C_{pm} (T'_{n0} - T_{n1}) = 23506.0\text{kJ/s}$$

如果系统中装上旋转型蓄热式热交换器从废气中回收的热量:

$$Q_{回} = W_n C_{pm} (T_{n0} - T_{n1}) = 18364.07\text{kJ/s}$$

具有旋转型蓄热式热交换器的催化燃烧系统其旋转型蓄热式热交换器热量回收效率:

$$\eta_{回} = Q_{回} / Q_{总} = 78\%$$

4 小结

(1) 选用旋转型蓄热式热交换器这型式, 其优点是单位体积传热面大、重量轻, 与管式换热器相比节省钢材、占地面积小、另部件(传热板等)可交换、延长装置使用寿命、提高设备的经济效益和安全性. 其存在问题是结构复杂, 机加工量大, 一般漏风量为 10~20%. 由于低温新鲜空气压力大于高温废气, 使新鲜空气向高温废气侧泄漏不会造成环境污染.

(2) 这里采用换热器当 $E=0.8\sim 1$ 时, 可得到与废气温度相当的空气预热温度. 根据理论计算旋转型蓄热式热交换器热量回收效率为 78% 左右.

(3) 设计旋转型蓄热式热交换器时, 应采取措施解决气流通道和传热板的堵塞和腐蚀.

参考文献

- 1 尾花英朗(日). 热交换器设计手册(上、下册). 北京: 轻工业出版社, 1983
- 2 谷应鸣. 热工基础与热力设备. 北京: 电力工业出版社, 1981
- 3 朱聘冠. 换热器原理及计算. 北京: 清华大学出版社, 1987
- 4 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册. 北京: 新时代出版社, 1987
- 5 王文兴. 工业催化. 北京: 化学工业出版社, 1980

On Design Calculation about Device for Reclaiming After-Heat from Waste Gases from Hydrocarbon-Catalytic Combustion Reactor

Lin Yushu

(Department of Light Industry)

Abstract A rotary regenerative heat exchanger is adopted. The mechanism, the structure, the character and the design calculations about this exchanger are introduced. In designing the exchanger the major problems to be solved are also put forward.

Keywords hydrocarbon; reactor; rotary regenerative heat exchanger; waste gas