

3 高效间壁式热交换器

- ❖ 管壳式热交换器具有结构简单、适应范围广、清洗方便等优点，但传热效果较差、体积比较庞大。
- ❖ 而在某些场合下，需要使用在传热性能、体积等方面具有一定优点的其它型式的热交换器如更高效的间壁式热交换器：螺旋板式、板式、板翅式、翅片管式及热管热交换器。

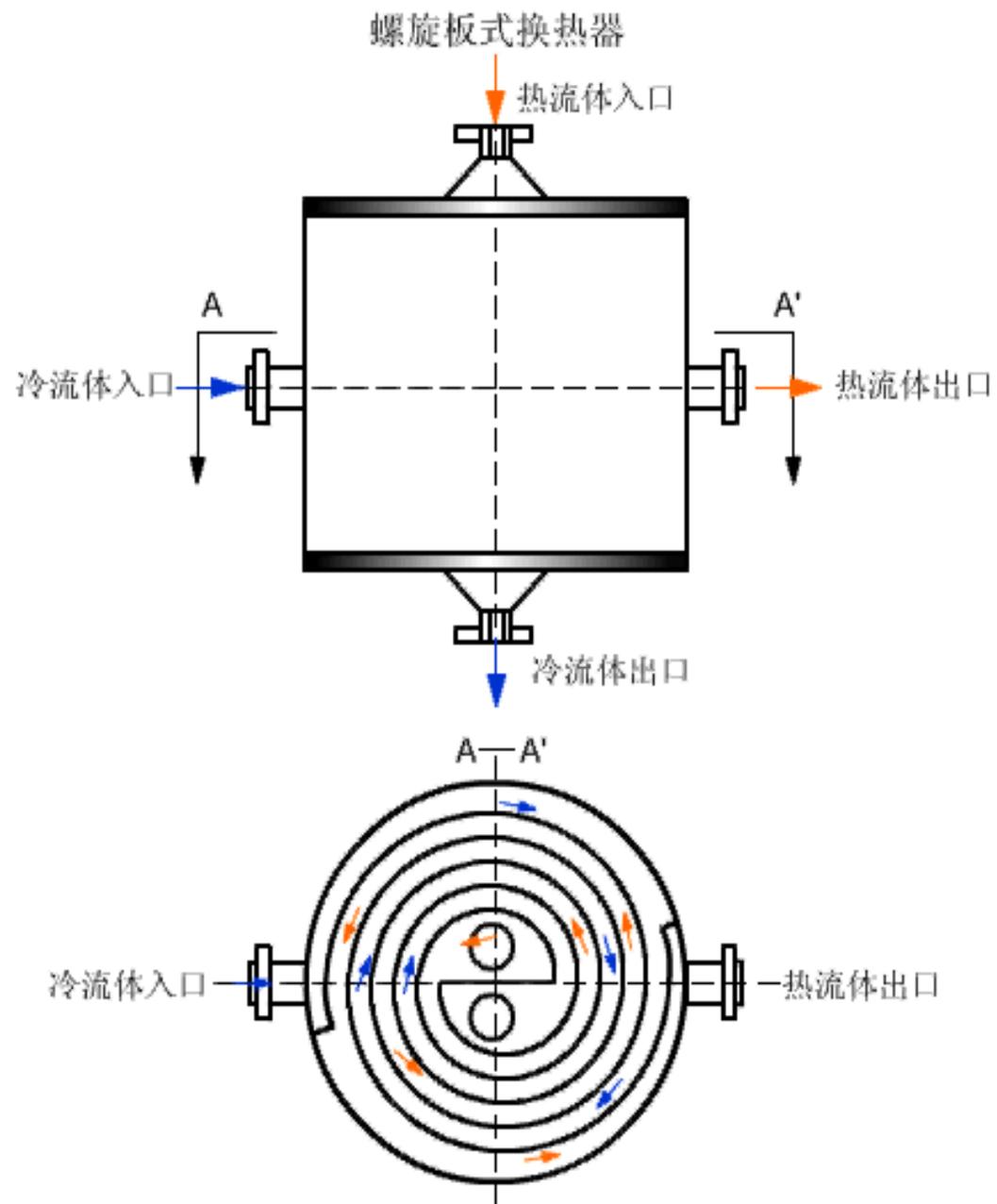
3.1 螺旋板式热交换器

- ❖ 螺旋板式热交换器是一种由螺旋形传热板片构成的热交换器。

❖ 螺旋板换热器应用广泛。在中国，中小型合成氨厂的变换热交换器和合成塔下部的热交换器已先后用螺旋板换热器取代管壳式换热器。烧碱厂的电解液加热器和浓碱液的冷却器，采用螺旋板换热器所用的设备费仅为管壳式换热器的1/3。此外，这种换热器用于塔顶冷凝、淬火油冷却、发烟硫酸冷却和脂肪酸冷却等都有良好的效果。这种设备用于蒸汽的冷凝和无相变的对流传热效果最佳，也可用于沸腾传热。

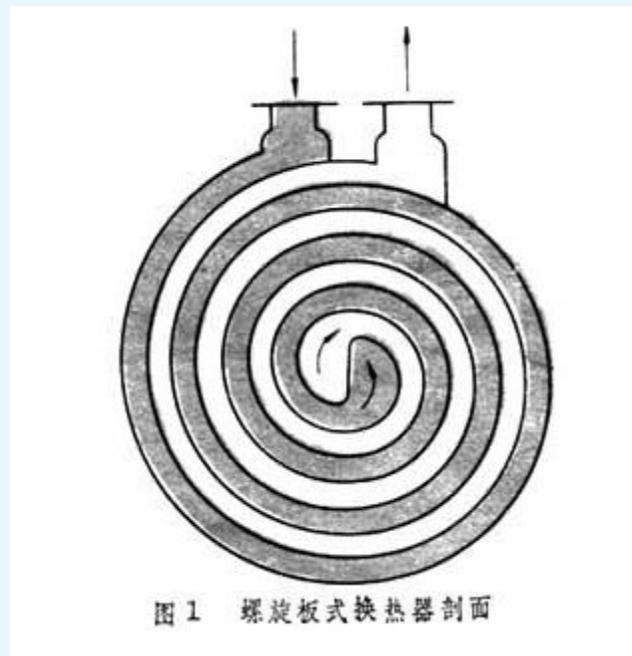
3.1.1 基本构造和工作原理

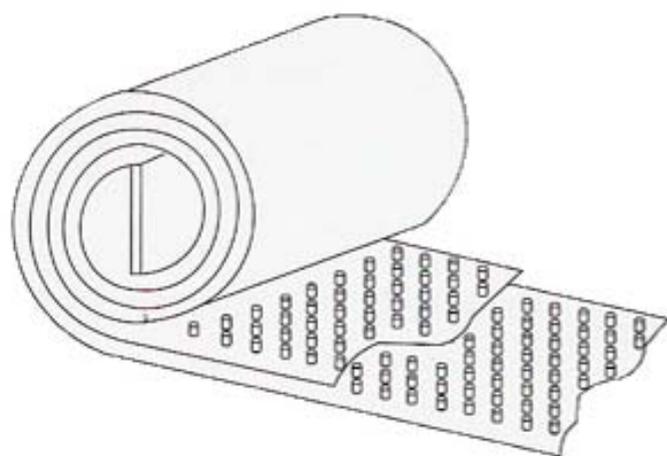
螺旋板式换热器是由两张间隔一定的平行薄金属板卷制而成，在其内部形成两个同心的螺旋形通道。换热器中央设有隔板，将螺旋形通道隔开，两板之间焊有定距柱以维持通道间距。在螺旋板两侧焊有盖板。冷热流体分别通过两条通道，在换热器内流动，通过薄板进行换热。



版权所有 (C)1999 -2002 BESCT

螺旋板式流程



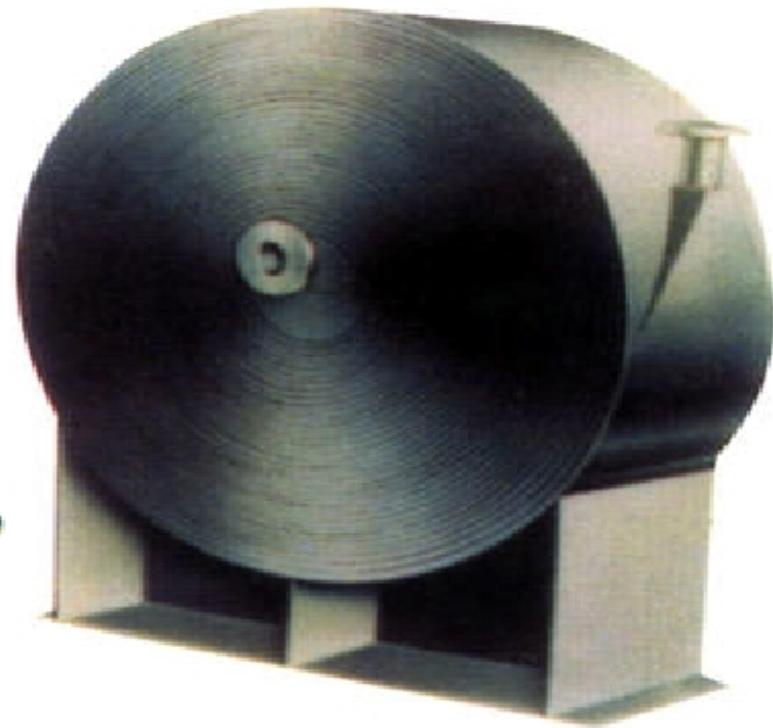
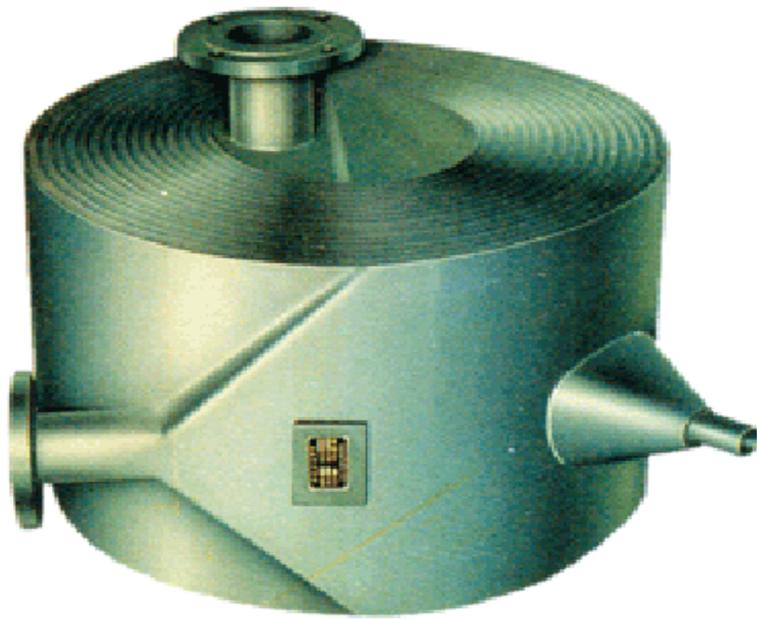


螺旋板式换热器主要设计参数

螺旋板宽 (mm)	螺旋板厚 (mm)	单台换 热面积 (m ²)	螺旋通 道间距 (mm)	中心管 直径 (mm)	螺旋体 外径 (mm)	定距柱 直径 (mm)	设计 压力 (MPa)	设计 温度 (°C)
150- 1900	2-6	0.5- 300	5-40	150- 300	<3000	5-14	<2.5	-90- 45

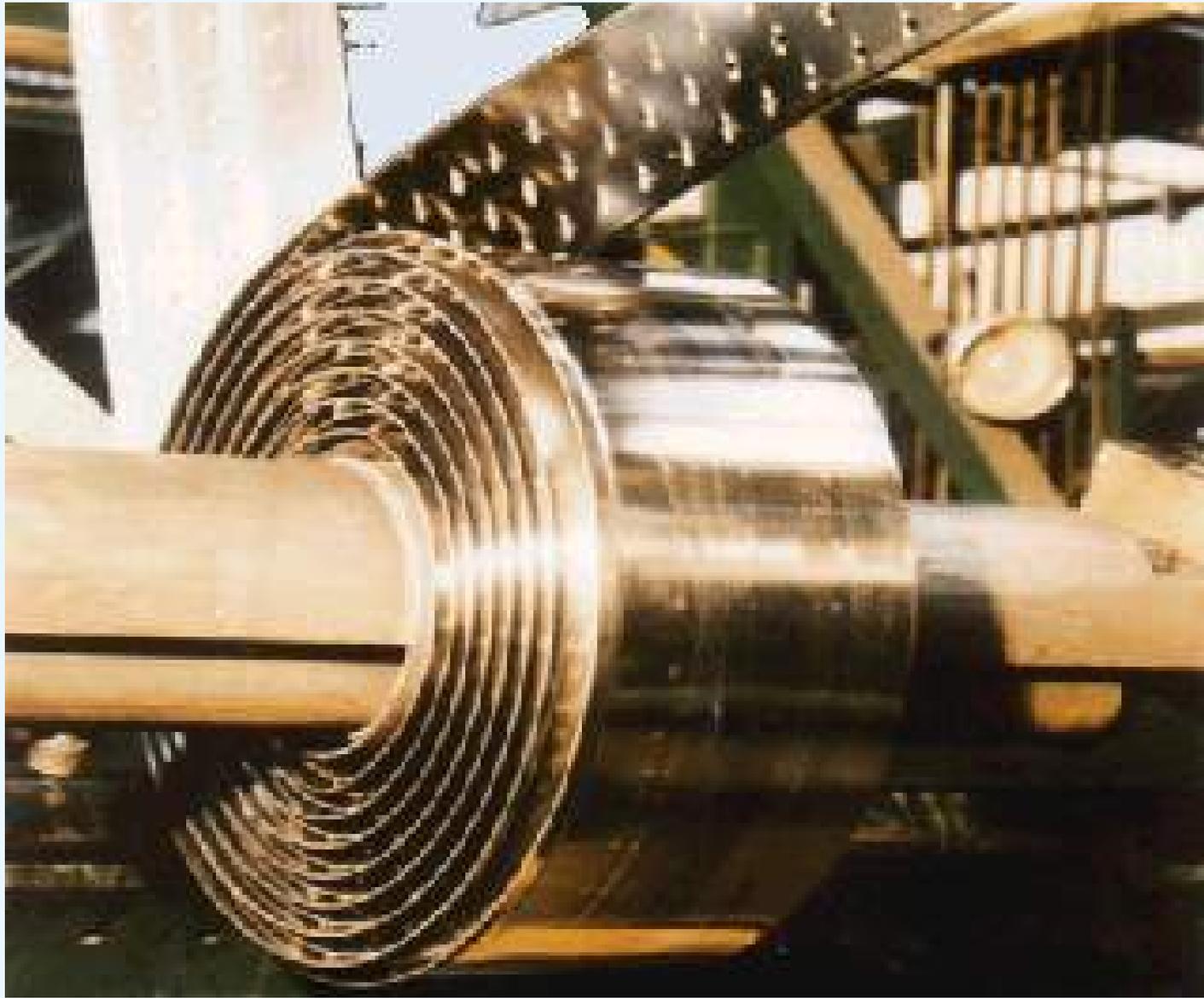
板式换热器

螺旋板式

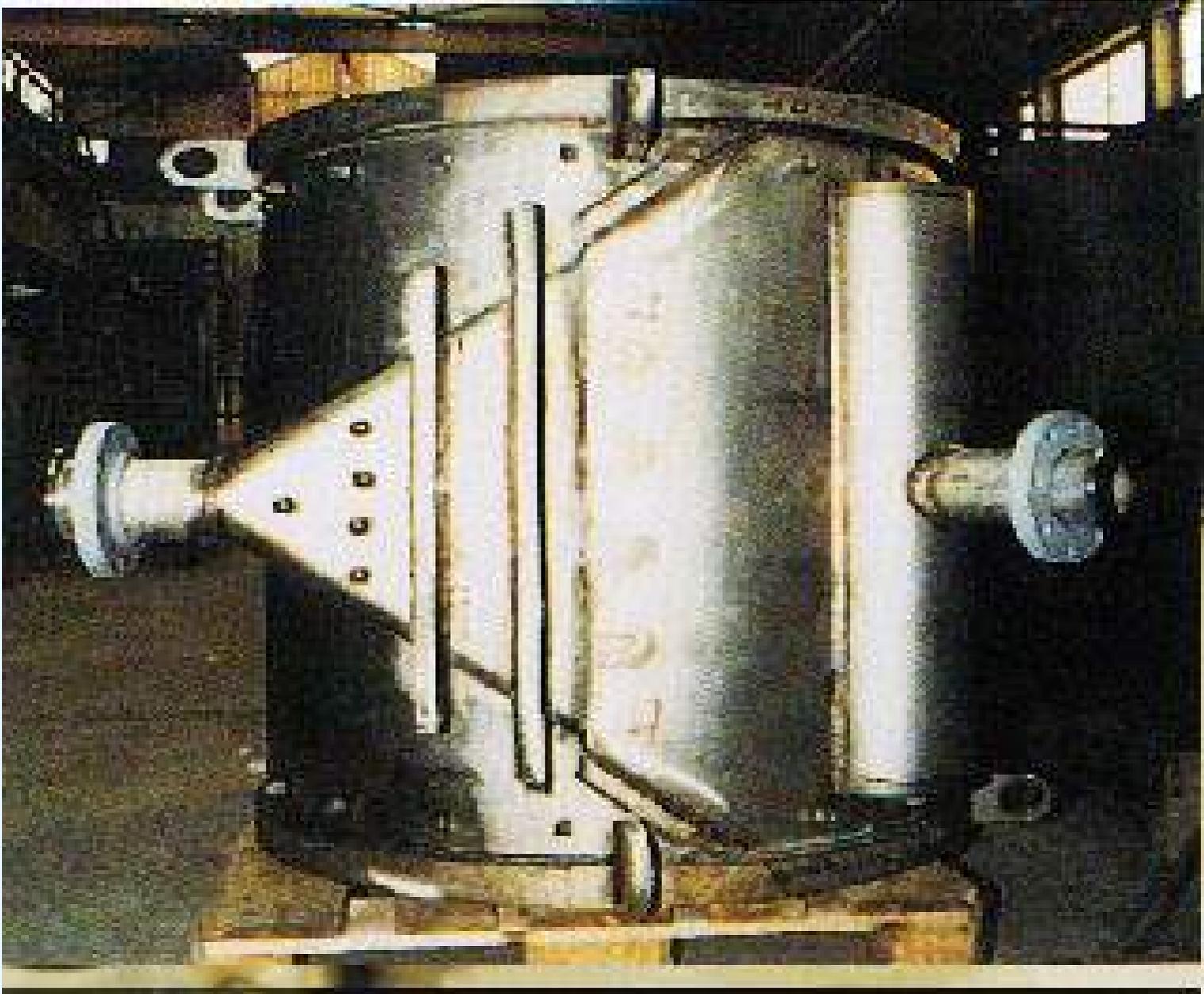


可拆式螺旋板式换热器









螺旋板式换热器的优点：

1) 传热系数高：螺旋流道中的流体由于惯性离心力的作用和定距柱的干扰，在较低的雷诺数（一般 $Re=1400\sim 1800$ 或更低些）下即达到湍流，并且允许选用较高的流速（对液体为 $2m/s$ ，气体为 $20m/s$ ），故传热系数较高， $582-1163W/(m^2.K)$ ，比管壳式换热器高 $0.5-1$ 倍。如水水换热，其传热系数最高可达 $3000W/(m^2.K)$ 。价格也比较低廉

- 2) 结构紧凑：单位体积的传热面积为列管式的3倍，达到面体比100，为管壳式2倍，可节约金属材料。**
- 3) 在同样流速下，阻力相对小，没有大的转向流动，更好利用流体压力损失。**

4) 不易结垢和堵塞：由于流体的速度较高，又有惯性离心力的作用，流体中悬浮的颗粒被抛向螺旋形通道的外缘而受到流体本身的冲刷，故螺旋板换热器不易结垢和堵塞，适合处理悬浮液及粘度较大的介质。

- ❖ **5)** 能利用温度较低的热源：由于流体流动的流道较长和两流体可进行完全逆流，故可在较小的温差下操作，能充分利用温度较低的热源。
- ❖ **6)** 由于螺旋通道本身的弹性自由膨胀，温差应力小。

螺旋板换热器的主要缺点是：

(1) 操作压强和温度不宜太高：目前最高操作压强不超过**2.5Mpa**，温度一般**<250**，最大不超过**400℃**

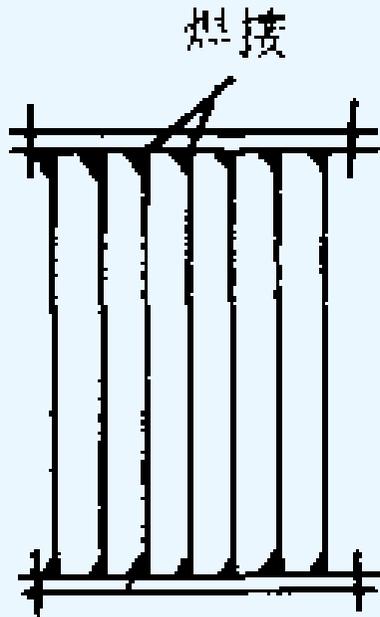
(2) 不易检修：因整个换热器被焊成一体，一旦损坏，修理很困难。

螺旋板式热交换器可分为可拆和不可拆两种。根据流体在流道内的流动方式和使用条件的不同，螺旋板式热交换器可分为 I、II、III 三种型式。图**3.2**，**115**页

I 型：两流体均为螺旋流动。通常是冷流体由外周边流向中心排出，热流体由中心流向外周排出，实现了纯逆流换热。常用于液-液热交换，由于受到通道断面的限制，只能用在流量不大的场合。

通道两端全焊密封，为不可拆结构，公称压力2.5MPa以下，密封性能好，适用于剧毒、易燃、易爆或贵重流体的换热



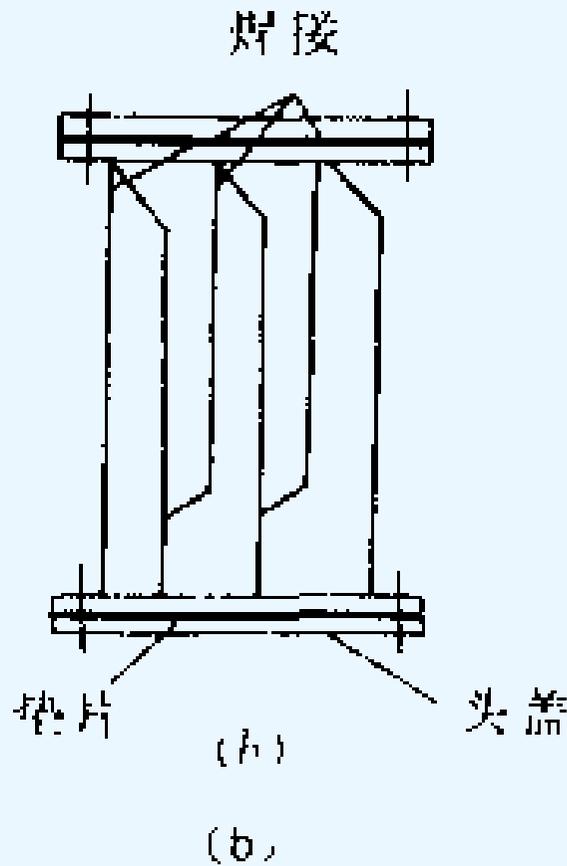


(a)

- ❖ 螺旋断面两端完全密封，这时不会发生两侧流体混合，但拆洗检修困难，只能用化学方法清洗，除清洁流体外很少采用。

II型：流体的流动方式与I型相同，但通道两端交错焊接，两端面的密封采用顶盖加垫片的结构，螺旋体可由内端分别进行机械清洗，故为可拆式，主要用于气—液热交换。工作压力为 **$1.6 \times 10\text{MPa}$** 以下。





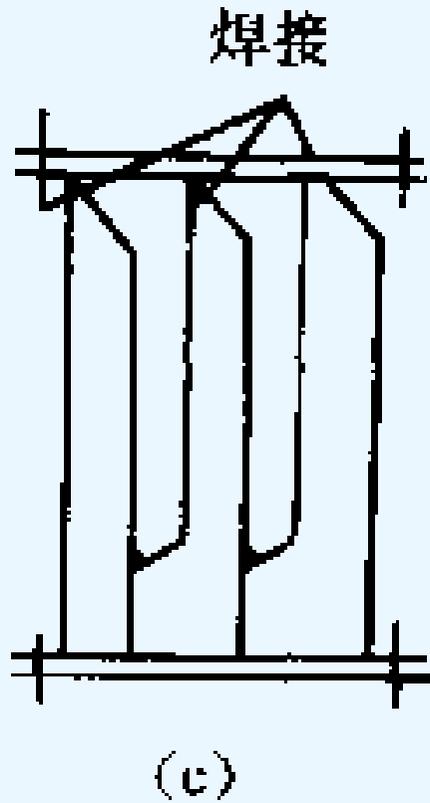
螺旋断面两端交错焊接密封，即每一流道的一端是焊接密封的，另一端依靠头盖和垫片密封。它不会发生两流体的混合，垫片不坏也不会造成同一种流体的短路。打开头盖即可检修或机械清洗流道，为常用密封方式。

III型：一侧流体螺旋流动，流体由周边转到中心。然后再转到另一周边流出。另一侧流体只作轴向流动。

通道的密封结构为一个通道的两端为焊接、另一通道的两端为全敞开。由于它的轴向流通截面比螺旋通道的流通截面大得多，适宜于两流体的体积流量相差大的情况，故常用作冷凝器等气—液热交换。



苏州龙峰钛镍设备有限公司



- ❖ 一个流道两端焊接密封，另一流道两端开放借助头盖垫片密封。它不会造成两种流体的混合，但焊接密封的那一流道检修困难，只能用化学清洗。

此外，还有一些特殊结构，如一侧流体螺旋流动，另一侧先轴向再螺旋流动等结构。

3.1.2 设计计算

❖ 1) 换热系数 α 的计算

(1)湍流时($Re > 6000$)

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d_e} Re^{0.8} Pr^m \left(1 + 3.54 \frac{d_e}{D_m} \right), \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

式中 m ——流体被加热时 $m = 0.4$; 流体被冷却时 $m = 0.3$;

$$d_e \text{ -- 当量直径; } d_e = \frac{2H_e b}{H_e + b}$$

H_e ——螺旋板有效宽度

b ——通道间距

$$D_m \text{ -- 螺旋通道平均直径, } D_m = \frac{D + d}{2}$$

D ——螺旋体外直径; d ——螺旋体内直径

λ ——流体导热系数

工程计算中，液体螺旋流动常用公式为：

$$\alpha = 0.0397 \frac{\lambda}{d_e} \text{Re}^{0.784} \text{Pr}^n$$

n —— 液体被加热为0.4；被冷却为0.3

(2)层流时 ($\text{Re} < 2000$)

$$\alpha = 8.4 \frac{\lambda}{d_e} \left(\frac{M c_p}{\lambda l_t} \right)^{0.2}$$

l_t —— 螺旋通道长； M —— 质量流量

(3) 过渡流至湍流 ($Re > 1000$)

$$Nu = Pr^{0.25} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.17} \left[0.0315 Re^{0.8} - 6.65 \times 10^{-7} \left(\frac{l_t}{b} \right)^{1.3} \right] \left(\frac{\lambda}{d_e} \right)$$

当 $Re > 3000$ 时; $\left(\frac{l_t}{b} \right)$ 的影响可忽略。

(4) 蒸汽冷凝时

$$\alpha = 1.47 \left(\frac{4\Gamma}{\mu_l} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu_l^2}{\lambda_l^3 \rho_l^2 g} \right)^{-1/3}$$

Γ —— 单位通道长的凝液量; ρ_l —— 凝液密度

λ_l —— 凝液导热系数; μ_l —— 凝液动力粘度。

当 $\frac{4\Gamma}{\mu_l} > 2100$ 时, 可用图3.4(118) 来求取凝结换热系数。

(5) 蒸汽冷凝-冷却时，过冷段换热系数：

$$\alpha = 0.67 \left[\left(\frac{\lambda_l^3 r^2 g}{\mu_l^2} \right) \left(\frac{c_{pl} \mu_l^{5/3}}{\lambda_l H_{rl}^{2/3} g^{1/3}} \right) \right]^{1/3} \left(\frac{4\Gamma}{\mu_l} \right)^{1/9}$$

适用 $Re_l > 2100$ 时

(6) 沸腾传热时

核沸腾

$$\alpha = \left[0.225 C_s \left(\frac{c_{pl}}{r} \right)^{0.69} \left(\frac{p \lambda_l}{\sigma} \right)^{0.31} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right)^{0.33} \right]^{3.22} \Delta t^{2.22}$$

C_s —— 传热表面状态参数，铜板1，不锈钢0.7； σ —— 沸腾液体的表面张力。

2) 传热系数 K 的计算

螺旋板式换热器传热板片很薄，在计算传热系数时可不考虑传热板内外侧面积的影响，因此其传热系数 K 的计算式为：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n R_i + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

R_i —— 板片内外侧污垢热阻

3) 流体压降的计算

螺旋板式换热器总阻力包含三部分：弯曲通道的阻力、定距柱的影响和进出口局部阻力，总的压降在介质为液体时其三部分之和为：

$$\Delta P = \left(\frac{l_t}{d_e} \frac{3.58}{\text{Re}^{0.25}} + 0.15l_t \times n_s + 39.23 \right) \frac{\rho w^2}{2}$$

n_s —— 定距柱密度； w —— 通道中的平均流速。

上式适用范围为 $\text{Re} = 5000 \sim 44000$ ， $n_s = 116 \sim 232$

例3.1

- ❖ 试设计一台螺旋板式热交换器，将质量流量 **3000kg/h** 的煤油从 $t_1' = 140^\circ\text{C}$ 冷却到 $t_1'' = 40^\circ\text{C}$ 冷却水入口温度 $t_2' = 30^\circ\text{C}$ ，冷却水量为 **$M_2 = 15\text{m}^3/\text{h}$** .

① 煤油热物性值

煤油平均温度按卡路里温度计算，即

$$t_{1m} = t_1'' + F_c(t_1' - t_1'') = 40 + 0.3(140 - 40) = 70^\circ\text{C}$$

查得煤油在 70°C 时物性参数值：

粘度 $\mu_1 = 10.0 \times 10^{-4} \text{ kg} / \text{m} \cdot \text{s}$ ； 导热系数 $\lambda_1 = 0.14 \text{ W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$

比热 $c_{p1} = 2.22 \times 10^3 \text{ J} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ； 密度 $\rho_1 = 825 \text{ kg} / \text{m}^3$

② 传热量 Q

$$Q = M_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = 3000 \times 2.22 \times 10^3 \times (140 - 40) = 666000 \times 10^3 \text{ J} / \text{h}$$

③ 冷却水出口温度 t_2''

$$Q = M_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') \Rightarrow t_2'' = \frac{Q}{M_2 c_{p2}} + t_2'$$

$$= \frac{666000 \times 10^3}{15 \times 994 \times 4.18 \times 10^3} + 30 = 40.6^\circ\text{C}$$

④ 冷却水的热物性参数值

冷却水的平均温度，

$$t_{2m} = \frac{t_2' + t_2''}{2} = \frac{30 + 40.6}{2} = 35.3^\circ\text{C}$$

查得冷却水在 35.3°C 时物性参数值：

粘度 $\mu_2 = 7.22 \times 10^{-4} \text{ kg} / \text{m} \cdot \text{s}$ ； 导热系数 $\lambda_2 = 0.672 \text{ W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$

比热 $c_{p2} = 4.18 \times 10^3 \text{ J} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ； 密度 $\rho_2 = 994 \text{ kg} / \text{m}^3$

⑤ 选型：由于是液—液热交换，选I型

⑥ 流道的当量直径

选取在流道中的流速，冷却水侧为 $w_2 = 0.5 \text{ m} / \text{s}$ ； 煤油侧为

$w_1 = 0.4 \text{ m} / \text{s}$ ； 设冷却水侧流通截面积为 A_2 ； 煤油侧为 A_1

$$A_2 = \frac{M_2}{3600w_2\rho_2} = \frac{15 \times 994}{3600 \times 0.5 \times 994} = 0.00833m^2$$

$$A_1 = \frac{M_1}{3600w_1\rho_1} = \frac{3000}{3600 \times 0.4 \times 825} = 0.0025m^2$$

取螺旋板宽 $H = 0.6m$ ，则去除封条宽后的有效板宽

$H_e = H - 2 \times 0.01 = 0.58m$ 。通道宽 b_2 (水侧)和 b_1 (煤油侧)为：

$$b_2 = \frac{A_2}{H_e} = \frac{0.00833}{0.58} = 0.014m; \quad b_1 = \frac{A_1}{H_e} = \frac{0.0025}{0.58} = 0.0043m$$

查产品样本取 $b_2 = 15mm$ ； $b_1 = 5mm$

通道的当量直径 d_{e2} (水侧) 和 d_{e1} (煤油侧) 为:

$$d_{e2} = \frac{2H_e b_2}{H_e + b_2} = \frac{2 \times 0.58 \times 0.015}{0.58 + 0.015} = 0.0292 \text{ m}$$

$$d_{e1} = \frac{2H_e b_1}{H_e + b_1} = \frac{2 \times 0.58 \times 0.005}{0.58 + 0.005} = 0.0099 \text{ m}$$

⑦ 雷诺数 Re 及普朗特数 Pr (下标1为煤油侧, 下标2为水侧):

$$w_2 = \frac{M_2}{3600A_2\rho_2} = \frac{15}{3600 \times 0.58 \times 0.015 \times 994} = 0.48m/s$$

$$Re_2 = \frac{w_2 d_{e2} \rho_2}{\mu_2} = \frac{0.48 \times 0.0292 \times 994}{7.22 \times 10^{-4}} = 19296$$

$$Pr_2 = \frac{\mu_2 c_{p2}}{\lambda_2} = \frac{7.22 \times 10^{-4} \times 4.18 \times 10^3}{0.627} = 4.81$$

$$w_1 = \frac{M_1}{3600A_1\rho_1} = \frac{3000}{3600 \times 0.005 \times 0.58 \times 825} = 0.348m/s$$

$$Re_1 = \frac{w_1 d_{e1} \rho_1}{\mu_1} = \frac{0.348 \times 0.0099 \times 825}{10 \times 10^{-4}} = 2842$$

$$Pr_1 = \frac{\mu_1 c_{p1}}{\lambda_1} = \frac{10 \times 10^{-4} \times 2.22 \times 10^3}{0.14} = 15.9$$

⑧ 对流换热系数

由式3.2可得：

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 0.0397 \frac{\lambda_2}{d_{e2}} \text{Re}_2^{0.784} \text{Pr}_2^{0.4} \\ &= 0.0397 \times \frac{0.627}{0.0292} \times 19296^{0.784} \times 48.1^{0.4} = 3658 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0.0397 \frac{\lambda_1}{d_{e1}} \text{Re}_1^{0.784} \text{Pr}_1^{0.3} \\ &= 0.0397 \times \frac{0.14}{0.0099} \times 2842^{0.784} \times 15.9^{0.3} = 656.7 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

⑨ 传热系数 K

因介质是水和煤油，故取材质为 A_3 卷筒钢板，厚 $\delta=4\text{mm}$ ，
其导热系数 $\lambda=46.5\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$

两侧污垢热阻取 $R_1 = R_2 = 0.00017\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$ ；则：

$$\begin{aligned}\frac{1}{K} &= \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + R_1 + R_2 \\ &= \frac{1}{656.7} + \frac{1}{3658} + \frac{0.004}{46.5} + 0.00017 + 0.00017 \Rightarrow K = 450\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}\end{aligned}$$

⑩ 对数平均温差 Δt_{lm}

$$\Delta t_{lm} = \frac{(t'_1 - t''_2) - (t''_1 - t'_2)}{\ln \frac{t'_1 - t''_2}{t''_1 - t'_2}} = \frac{(140 - 40.6) - (40 - 30)}{\ln \frac{140 - 40.6}{40 - 30}} = 39^\circ\text{C}$$

(1) 传热面积 F :

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_m} = \frac{666000 \times 10^3}{450 \times 3600 \times 39} = 10.54 m^2$$

(2) 每块螺旋板有效长度 l_e

$$l_e = \frac{F}{2H_e} = \frac{10.54}{2 \times 0.58} = 9.09 m$$

(3) 螺旋板圈数及下料尺寸:

$$\text{设 } d_2 = 200 mm, \quad c = b_1 + b_2 + 2\delta = 5 + 15 + 2 \times 4 = 28 mm$$

$$\therefore d_1 = d_2 - (b_2 - b_1) = 200 - (15 - 5) = 190 mm$$

由式(3.14)得螺旋体有效圈数 n_e 为:

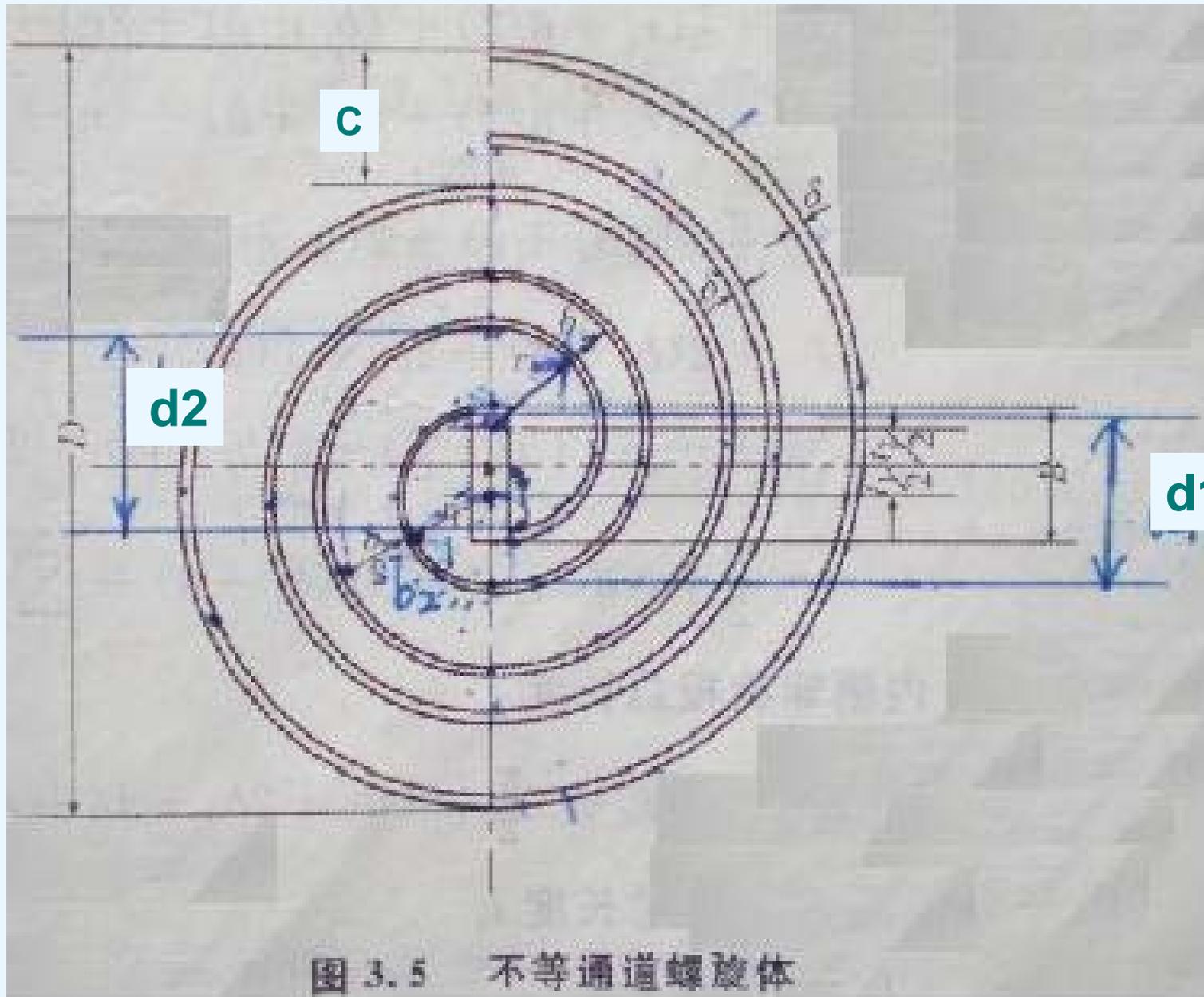


图 3.5 不等通道螺旋体

$$n_e = n = \frac{(2b_2 - d_1 - d_2) + \sqrt{(d_1 + d_2 - 2b_2)^2 + 16c \frac{l_i}{\pi}}}{4c}$$

$$= \frac{(2 \times 15 - 190 - 200) + \sqrt{(190 + 200 - 2 \times 15)^2 + 16 \times 28 \times \frac{9.09 \times 10^3}{\pi}}}{4 \times 28}$$

$$= 7.45$$

取有效圈数 $n_e = 8$ ，即为内侧螺旋板的实际圈数。由式 (3.11) 得内侧螺旋板下料尺寸为：

$$\begin{aligned}
 l_i &= l_{i,l} + l_{i,r} = \frac{\pi}{2} \{n(d_1 + 2b_1 + 4\delta + d_2) + 2(n^2 - n)c\} \\
 &= \frac{3.14}{2} \{8 \times (190 + 25 + 4 \times 4 + 200) + 2(8^2 - 8) \times 28\} = 10.15m
 \end{aligned}$$

由式 (3.12) 得外侧螺旋板下料尺寸为:

$$\begin{aligned}
 l_o &= l_2 = \frac{\pi}{2} \{n(d_1 + 2b_2 + 4\delta + d_2) + (\delta + d_2) + 2n^2c\} \\
 &= \frac{3.14}{2} \{8 \times (190 + 2 \times 15 + 4 \times 4 + 200) + (4 + 200) + 2 \times 8^2 \times 28\} \\
 &= 11.42m
 \end{aligned}$$

(14) 换热器外径 D

$$D = d_2 + 2nc + 2\delta = 200 + 2 \times 8 \times 28 + 2 \times 4 = 656\text{mm}$$

(15) 压将：由式3.9

$$\begin{aligned} \text{煤油侧: } \Delta P_1 &= \left(\frac{l_1}{d_{e1}} \frac{3.58}{\text{Re}_1^{0.25}} + 0.15l_1n_{s1} + 39.23 \right) \times \frac{\rho_1 w_1^2}{2} \\ &= \left(\frac{10.15}{0.0099} \times \frac{3.58}{2842^{0.25}} + 0.15 \times 10.15 \times 200 + 39.23 \right) \times \frac{825 \times 0.348^2}{2} \\ &= 0.042\text{MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{冷却水侧: } \Delta P_2 &= \left(\frac{l_2}{d_{e2}} \frac{3.58}{\text{Re}_2^{0.25}} + 0.15l_2n_{s2} + 39.23 \right) \times \frac{\rho_2 w_2^2}{2} \\ &= \left(\frac{11.42}{0.0292} \times \frac{3.58}{19296^{0.25}} + 0.15 \times 11.42 \times 200 + 39.23 \right) \times \frac{994 \times 0.48^2}{2} \\ &= 0.057\text{MPa} \end{aligned}$$

因两侧压将均不足1工程大气压，在允许范围内，故设计符合要求