

## 第十章教学案例

1. 一顺流布置的套管式换热器，内管中为水，内管外为氟利昂 R12， $t_1' = 40^\circ\text{C}$  的氟利昂 R12 饱和蒸气被水冷却凝结并进一步过冷到  $t_1'' = 30^\circ\text{C}$  的液体。已知 R12 的汽化潜热  $r = 133.33 \text{ kJ/kg}$ ，液态时的比定压热容为  $1 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。冷却水进、出换热器的温度分别为  $t_2' = 20^\circ\text{C}$  与  $t_2'' = 25^\circ\text{C}$ 。壳侧平均表面换热系数为  $1200 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ，内管内径为  $16\text{mm}$ ，换热器的传热量为  $60000 \text{ kJ/h}$ 。请定性画出两侧流体温度沿程变化曲线，并计算换热器的内管管长。（管壁厚度及导热热阻可以忽略）

(1) 冷水的物性可取为：

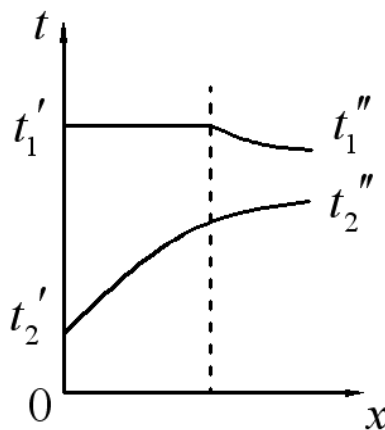
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$c_p \text{ [ kJ/(kg} \cdot \text{K)]}$	$\eta \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$	$Pr$	$\lambda \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$
998.2	4.183	$1.004 \times 10^{-3}$	7.02	0.599

(2) 管槽内强制对流换热实验关联式：

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^n \quad (\text{旺盛湍流，忽略温差修正})$$

$$Nu_f = 1.86 \frac{Re_f Pr_f^{1/3}}{l/d} \quad (\text{层流，不考虑物性修正})$$

**解：**对该问题可分段求解，将壳侧的换热分为有相变和无相变两个阶段，温度变化曲线如图所示：



$$\Phi = \frac{60000 \times 1000}{3600} = 16666.7 = q_{m1} \times 133330 + 1000 \times (40 - 30)$$

$$q_{m1} = 0.1163 \text{ kg/s}$$

$$\Phi = q_{m2} \times 4183 \times (25 - 20) = 16666.7$$

$$q_{m2} = 0.7969 \text{ kg/s}$$

$$\phi_{1,1} = 0.1163 \times 133330 = 0.7969 \times 4183(t_{2,1} - 20)$$

得  $t_{2,1} = 24.65\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t_{m1} = \frac{(40 - 20) - (40 - 24.65)}{\ln \frac{20}{15.35}} = 17.57\text{ }^{\circ}\text{C},$$

管内冷却水的雷诺数为：

$$Re = \frac{ud_i}{\nu} = \frac{\rho u \frac{1}{4} \pi d_i^2}{\frac{1}{4} \pi \rho \nu d} = \frac{4q_{m2}}{\pi \eta d_i} = \frac{4 \times 0.7969}{3.14 \times 1.004 \times 10^{-3} \times 0.016} = 63194.7 > 10^4$$

管内流体被加热，不考虑温差修正，并假设不考虑管长修正：

$$Nu_2 = 0.023 Re_2^{0.8} Pr_2^{0.4} = 0.023 \times (63194.7)^{0.8} \times 7.02^{0.4} = 347.4$$

管侧换热系数：

$$h_2 = \frac{Nu_2 \lambda}{d_i} = \frac{347.4 \times 0.599}{0.016} = 13005.8\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

由于忽略管壁厚度及管壁热阻：

$$\text{总传热系数 } \frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{\frac{1}{1200} + \frac{1}{13005.8}} = 1098.6\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$A_1 = \frac{0.1163 \times 133330}{1098.6 \times 17.57} = 0.8033 \text{ m}^2$$

$$\phi_{1,2} = 0.1163 \times 1000(40 - 30) = 1163 \text{ W}$$

$$\Delta t_{m2} = \frac{(40 - 24.65) - (30 - 25)}{\ln \frac{15.35}{5}} = 9.23\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$A_2 = \frac{1163}{1098.6 \times 9.23} = 0.1147 \text{ m}^2$$

所以  $A = A_1 + A_2 = 0.918 \text{ m}^2$

$$l = \frac{A}{\pi d} = \frac{0.918}{3.14 \times 0.016} = 18.3 \text{ m}$$

$$\frac{l}{d} = \frac{18.3}{0.016} > 60$$

故不需考虑短管修正，管长为 18.3m。

**讨论：**本案例要求学生熟练掌握基于平均温差求解思想的换热器设计方法，对于本题壳侧工质发生凝结相变并过冷到饱和温度一下，须将传热过程分解为饱和相变凝结传热和单相液态过冷传热过程，进行分段分析求解，对两段传热过程分别进行能量守恒分析，对相应的平均温差进行求解，并计算各自所需的传热面积，从而最终得到换热器的传热总面积。