

第七章 凝结与沸腾传热

——有相变的对流传热问题

有相变的对流传热问题的特点

回顾我们最初讨论的无粘性流体对流传热问题的解，可以看出对流传热系数与流体比热的关系，

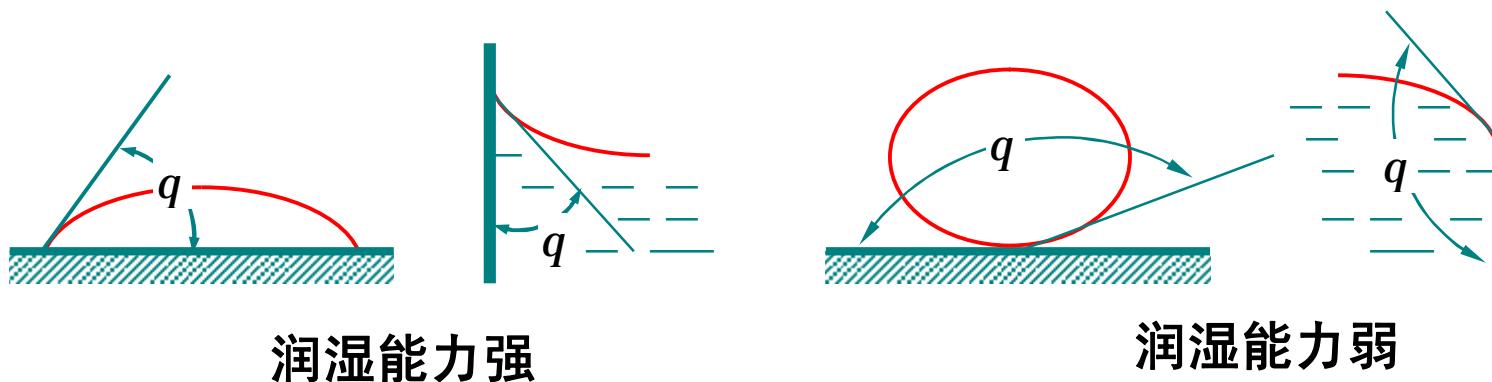
$$h_x = \frac{1}{\sqrt{p}} \sqrt{\frac{l r c_p u_\infty}{x}}$$

从上式，我们可以预期，流体具有相变的对流传热问题可能具有很大的对流传热系数或很高的对流传热强度。？？？

凝结传热

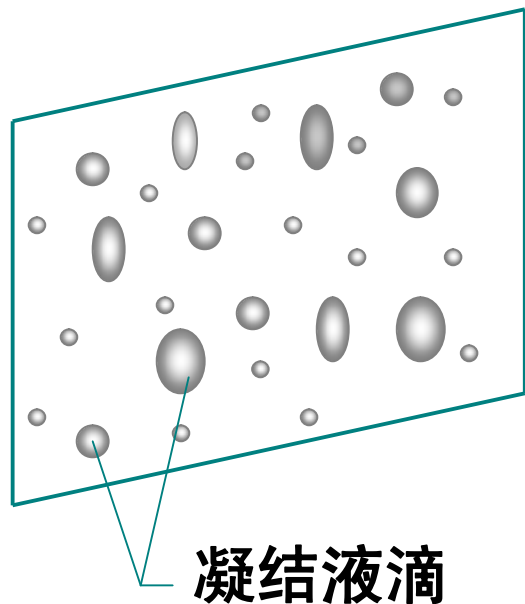
壁面上凝结发生的条件——当蒸汽与低于其相应压力对应的饱和温度的壁面接触时，将发生凝结。

润湿角 θ —液体与壁面的切面经液体到壁面的交角。



珠状凝结

珠状凝结 当凝结液不能润湿壁面时 ($\theta > 90^\circ$) 时, 凝结液在壁面上形成许多液滴, 而不形成连续的液膜。

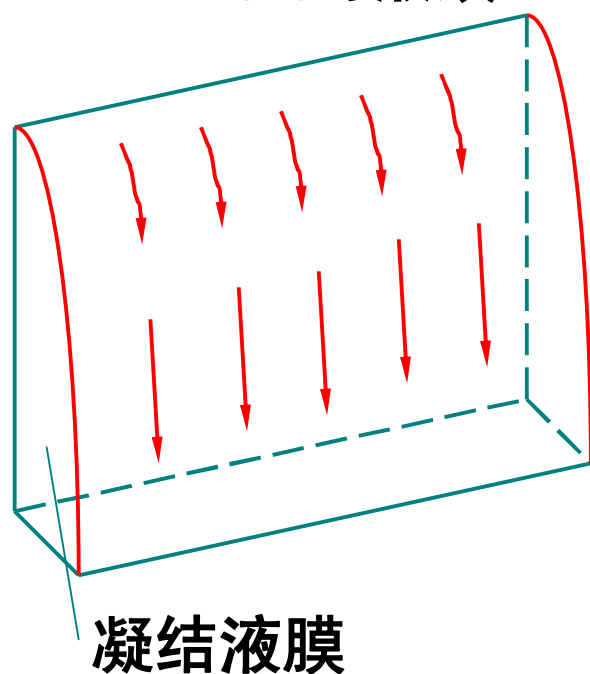


大气压力下水蒸汽珠状凝结时传

热系数约为 $4 \times 10^4 \sim 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

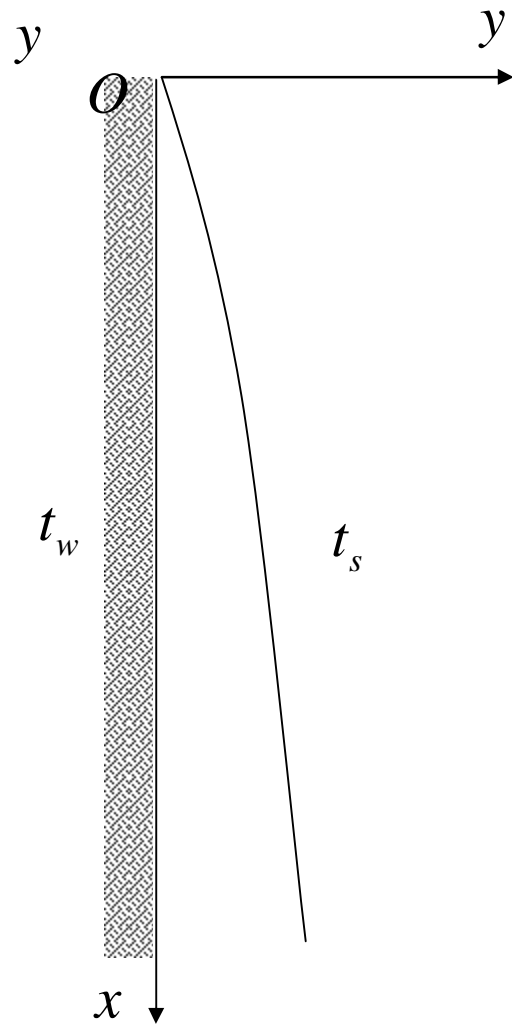
膜状凝结

膜状凝结 当液体能润湿壁面时，凝结液和壁面的润湿角 ($\theta < 90^\circ$) 时凝结液在壁面上形成一个完整的液膜。



大气压力下水蒸汽膜状凝结时传热系数约为 $6 \times 10^3 \sim 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

膜状凝结的理论分析



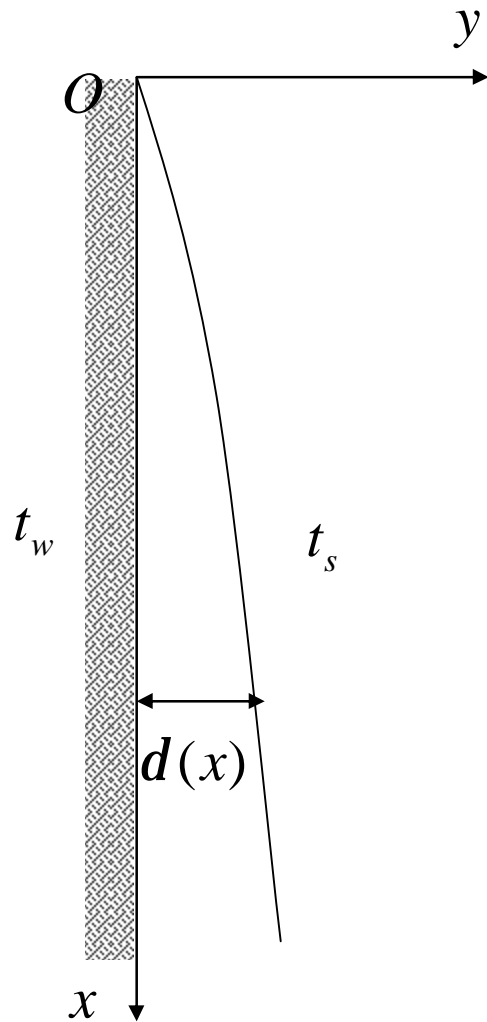
1. 由于液膜内的流速较慢，可忽略惯性力；
 2. 液膜外部的蒸汽压力梯度较小，可忽略压力梯度项；
- 故此，在动量方程中只考虑重力和粘性力。即

$$h_l \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + r_l g = 0$$

由于液膜较薄，忽略能量方程中的对流项

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0$$

膜状凝结的努塞尔分析解



$$h_l \frac{d^2 u}{dy^2} + r_l g = 0$$

$$\frac{d^2 t}{dy^2} = 0$$

由边界条件为 $u|_{y=0} = 0$ $\left. \frac{du}{dy} \right|_{y=d} = 0$

由边界条件对动量方程积分可得

$$u = \frac{r_l g}{h_l} \left(d y - \frac{1}{2} y^2 \right)$$

通过液膜断面上的质量流量为

$$\dot{m} = \int_0^d r_l u dy = \int_0^d \frac{r_l g}{h_l} \left(d y - \frac{1}{2} y^2 \right) dy = \frac{r_l^2 g}{3 h_l} d^3$$

膜状凝结的努塞尔分析的要点

通过液膜断面上的质量流量为

$$\dot{m} = \int_0^d r_l u dy = \int_0^d \frac{r_l g}{h_l} \left(dy - \frac{1}{2} y^2 \right) dy = \frac{r_l^2 g}{3h_l} d^3$$

通过微元液膜断面上的质量流量的增量为

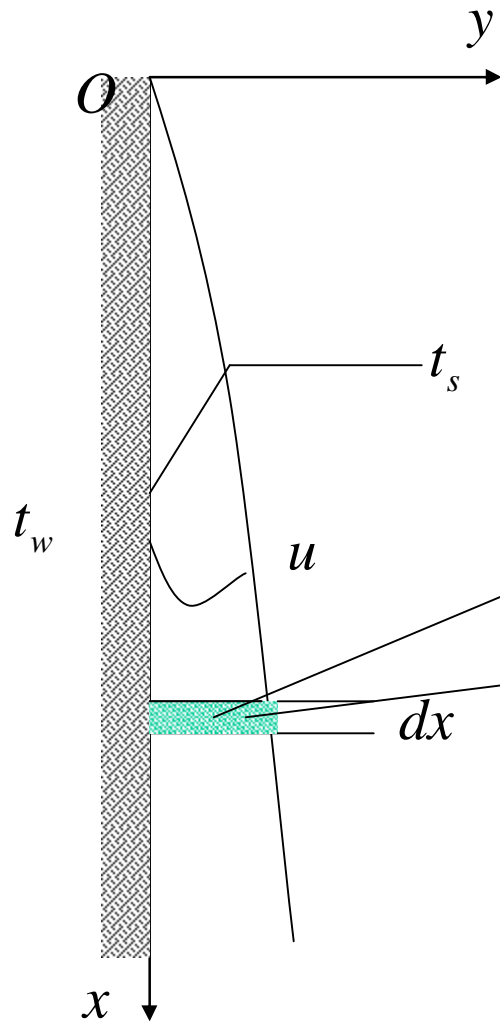
$$d\dot{m} = \frac{r_l^2 g}{h_l} d^2 dd$$

微元段凝结传热量

$$d\Phi_x = g d\dot{m} = \frac{gr_l^2 g}{h_l} d^2 dd = h_x (t_s - t_w) dx$$

g ——汽化潜热, J/(kgK)

热平衡
$$d\Phi_x = g dm = \frac{gr_l^2 g}{h_l} d^2 dd = l_l \frac{t_s - t_w}{d} dx$$



膜状凝结的努塞尔分析结果

$$\frac{gr_l^2 g}{h_l} d^2 dd = l_l \frac{t_s - t_w}{d} dx$$

$$h_x(t_s - t_w) = l_l \frac{t_s - t_w}{d}$$

$$d^3 dd = \frac{l_l h_l (t_s - t_w)}{gr_l^2 g} dx$$

$$h_x = \frac{l_l}{d} = \left(\frac{l_l^3 gr_l^2 g}{4h_l(t_s - t_w)x} \right)^{1/4}$$

$$d(x) = \left(\frac{4l_l h_l (t_s - t_w)x}{gr_l^2 g} \right)^{1/4}$$

$$h = \frac{1}{H} \int_0^H \left(\frac{l_l^3 gr_l^2 g}{4h_l(t_s - t_w)x} \right)^{1/4} dx = 0.943 \left(\frac{l_l^3 gr_l^2 g}{h_l(t_s - t_w)H} \right)^{1/4}$$

膜状凝结的工程计算

壁面位置 和形状	计算公式	特征温度	备注
竖直壁面	$h = 1.13 \left(\frac{g g r_l^2 l_l^3}{h_l H (t_s - t_w)} \right)^{1/4}$	$t_m = \frac{t_s + t_w}{2}$	层流
水平圆柱	$h = 0.728 \left(\frac{g g r_l^2 l_l^3}{h_l d_o (t_s - t_w)} \right)^{1/4}$	$t_m = \frac{t_s + t_w}{2}$	层流
水平管束	$h = 0.728 \left(\frac{g g r_l^2 l_l^3}{h_l n_m d_o (t_s - t_w)} \right)^{1/4}$	$t_m = \frac{t_s + t_w}{2}$	层流
水平管内	$h = 0.555 \left(\frac{g g' (r_l - r_v)^2 l_l^3}{h_l d_i (t_s - t_w)} \right)^{1/4}$	$t_m = \frac{t_s + t_w}{2}$	氟里昂冷剂 $g' = g + \frac{3}{8} c_p (t_s - t_w)$

影响凝结传热的因素

影响因素	结果
不凝结气体	热阻增加
水蒸汽流速	液膜可能增厚或减薄
传热面状况	改变液膜的厚度
蒸汽过热度	对流传热系数大于理论
凝结水过冷度	
液膜的流动状况	湍流增强传热

凝结传热的强化要点

$$h_x(t_s - t_w) = l_l \frac{t_s - t_w}{d}$$

拉薄液膜

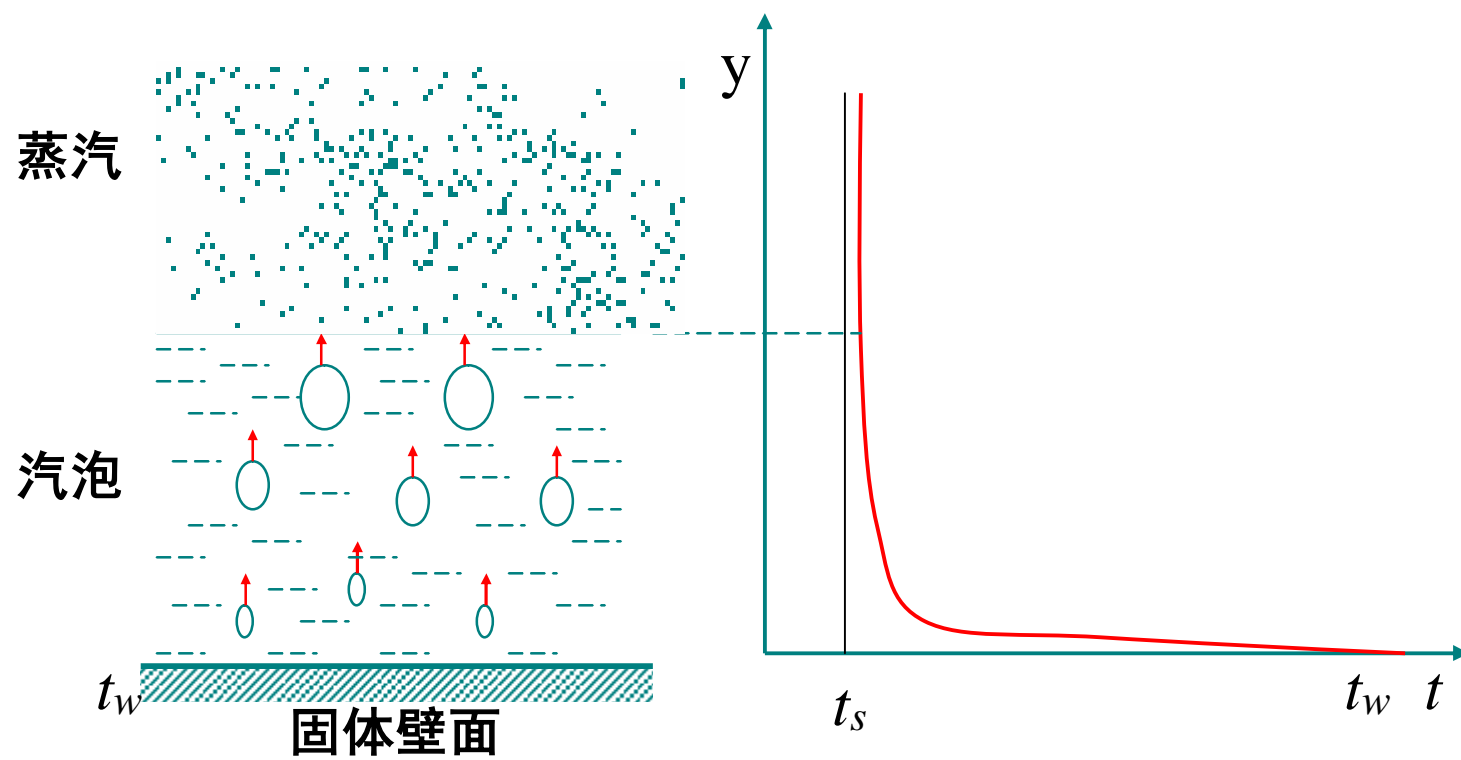
$$h_x = \frac{l_l}{d} = \left(\frac{l_l^3 g r_l^2 g}{4 h_l (t_s - t_w) x} \right)^{1/4}$$

促成珠状凝结的条件

沸腾传热的基本概念

- 蒸发 在液体与气体的交界面上的缓慢汽化过程
- 沸腾 当壁面温度高于其所处压力下的饱和温度时，就会产生汽化，这种汽化发生在液体内部。
- 池内沸腾 加热面处于自由表面之下
- 管内沸腾 加热表面包围流体（有压差驱动）
- 过冷沸腾 液体温度低于饱和温度
- 饱和沸腾 液体温度处于饱和温度

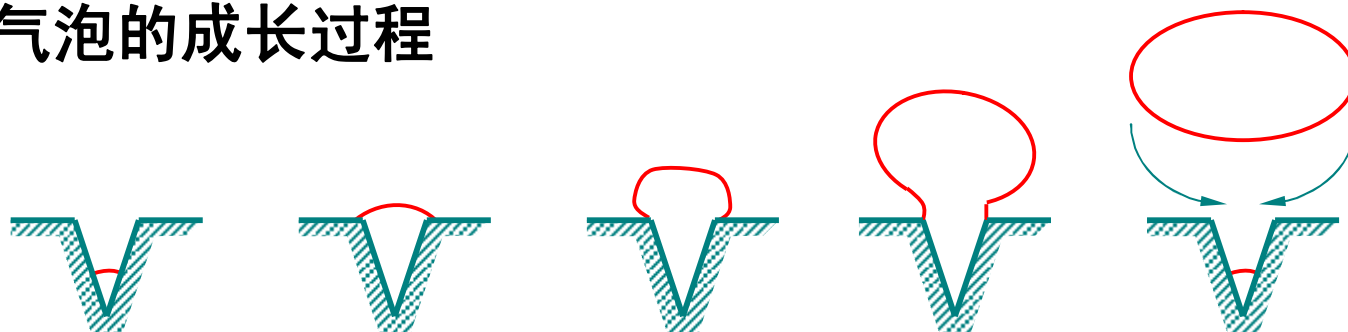
液体—蒸汽分界面的饱和池内沸腾的温度分布图



气泡的生存条件

饱和沸腾指液相、气相温度达到饱和温度 t_s ，壁温 t_w 高于饱和温度 t_s 所发生的沸腾称为饱和沸腾。

11) 气泡的成长过程



2) 气泡存在的条件

通过理论推导，气泡半径 R 必须满足下列条件才能存在

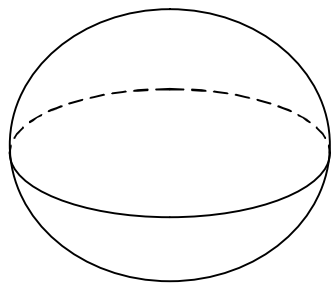
$$R \geq R_{\min} = \frac{2sT_s}{r r_v (t_w - t_s)}$$

式中, s – 表面张力, N/m ; r – 汽化潜热, J/kg ;

r_v – 蒸汽的密度, kg/m^3 ; t_w – 壁面温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_s – 对应压力下的饱和温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

气泡力学理论



$$p r^2 (p_v - p_l) = 2 p r s$$

$$\textbf{Q} \quad p_l > p_s$$

$$\therefore R = \frac{2s}{(p_v - p_l)} \geq \frac{2s}{(p_v - p_s)}$$

气泡生存条件及解释

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_S = \frac{g}{T_S(v''-v')} \approx \frac{r_v g}{T_S}$$

$$p_v - p_s \approx (t_v - t_s) \left(\frac{dp}{dT}\right)_S \approx \frac{r_v g (t_v - t_s)}{T_S}$$

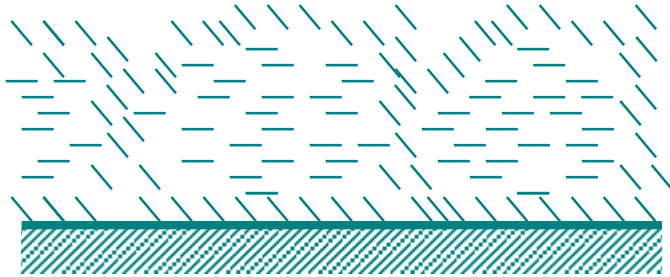
$$R \geq \frac{2sT_S}{r_v g (t_v - t_s)} \quad \text{即} \quad R \geq R_{\min} = \frac{2sT_S}{r_v g (t_w - t_s)}$$

壁面附近的汽化核心

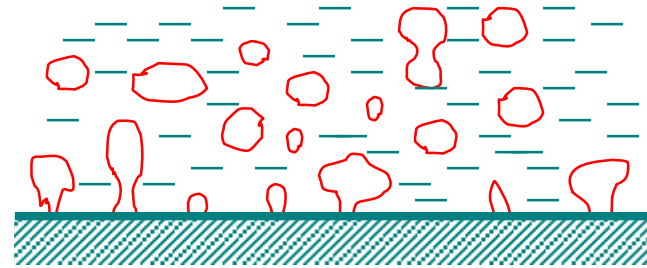
$$R \geq R_{\min} = \frac{2sT_s}{r r_v (t_w - t_s)}$$

从式中可以看出过热度（ $t_w - t_s$ ）增加， R_{\min} 将减小，同一加热面上满足 $R \geq R_{\min}$ 的地方将增多，即汽化核心数增加，产生气泡的密度增加，沸腾传热系数将增大。

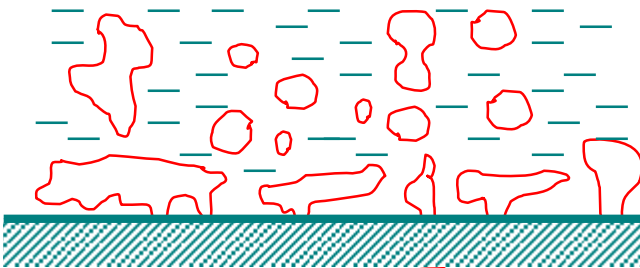
大容器饱和沸腾



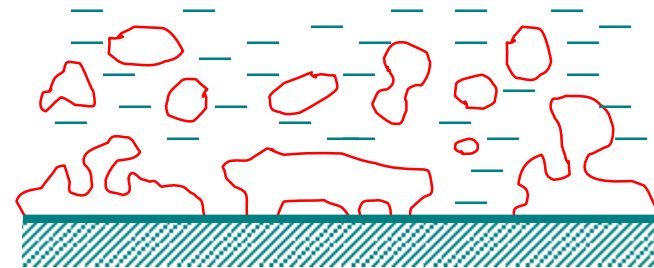
a. 自然对流



b. 核态沸腾



c. 临界点的沸腾

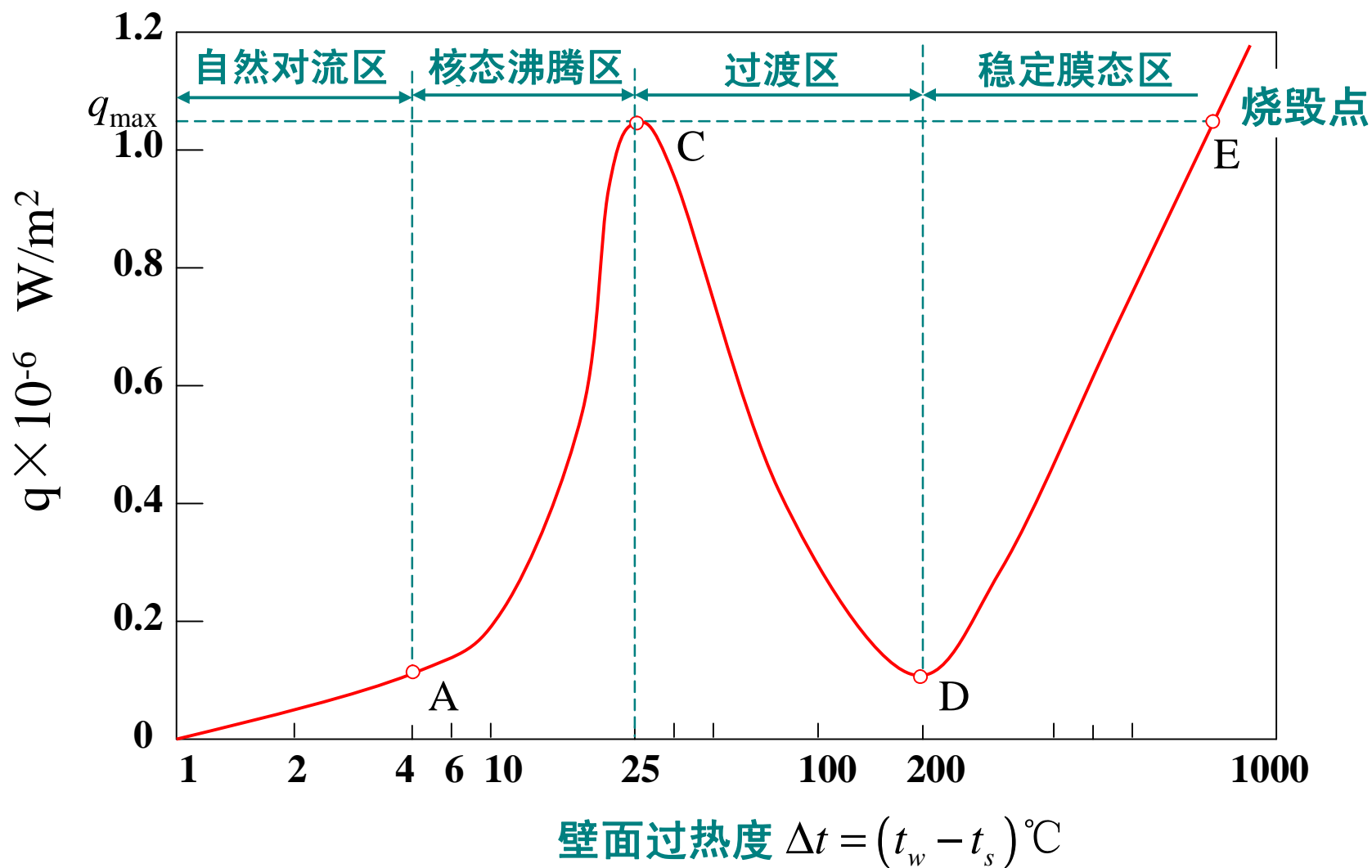


d. 过渡区



e. 稳定膜态沸腾

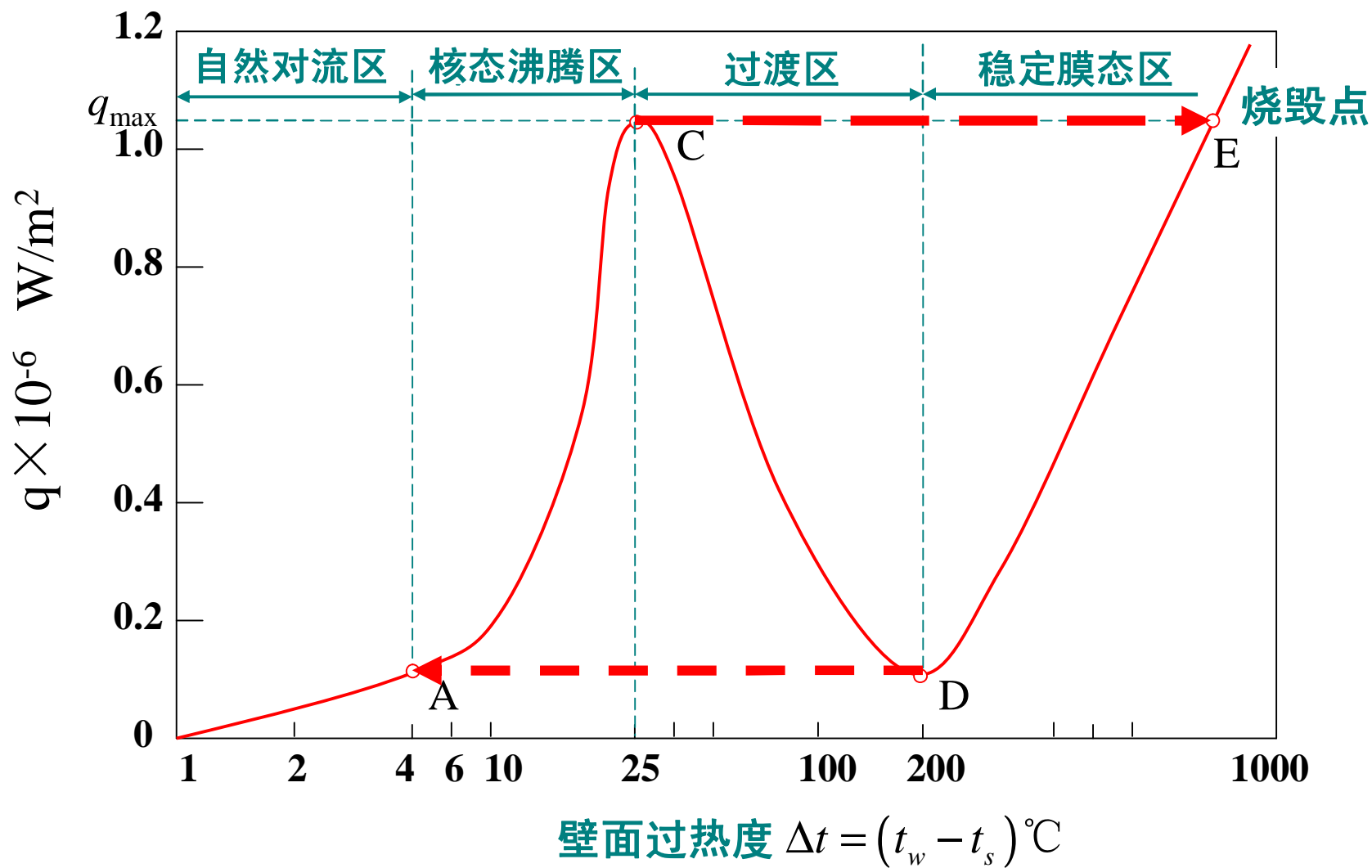
水的饱和沸腾曲线



四个区域的传热特性

- ①**单相自然对流区** 此时 $\Delta t < 4^{\circ}\text{C}$ ，在加热面上没有气泡产生。
- ②**核态沸腾区** 此时 $4^{\circ}\text{C} \leq \Delta t \leq 25^{\circ}\text{C}$ 在加热面上产生气泡，换热温差小于气泡脱离加热表面的速度，气泡的剧烈扰动使表面传热系数和热流密度都急剧增大。
- ③**过渡沸腾区** 此时 $25^{\circ}\text{C} < \Delta t < 200^{\circ}\text{C}$ 加热表面上产生气泡的速度快于气泡脱离表面的速度，在加热表面上形成不稳定汽膜，由于汽膜层的热阻使该区域换热比核态沸腾强度要弱。
- ④**稳定膜态沸腾** 此时 $\Delta t > 200$ ，在加热表面上形成稳定的汽膜，相变过程不是发生在壁面上，而是在汽液界面上，但由于蒸汽的导热系数远小于液体的导热系数，因此表面传热系数大大降低。

临界点的重要性



大容器沸腾传热的计算

米海耶夫公式

$$h = 0.1448 (\Delta t)^{2.33} p^{0.5}$$

$$h = 0.56 q^{0.7} p^{0.15}$$

p —系统的绝对压力, Pa

罗森诺公式

$$\frac{c_{pl}(t_w - t_s)}{g} = C_{wl} \left[\frac{q}{h_l g} \sqrt{\frac{s}{g(r_l - r_v)}} \right]^{0.33} \text{Pr}_f^n$$

对于水, C_{wl} —0.013

沸腾传热的强化

1. 提高过热度
2. 采用汽化潜热高的液体
3. 采用对流沸腾方式
4. 采用人工粗糙表面