

9. 相变对流传热

7.1 凝结传热的模式

凝结的定义：蒸汽与低于其饱和温度的壁面接触时形成液体的过程。 $[t_s < t_w]$

两种存在形式 { 湿润性液体
非湿润性液体

凝结传热的两种模式 { 膜状凝结
珠状凝结

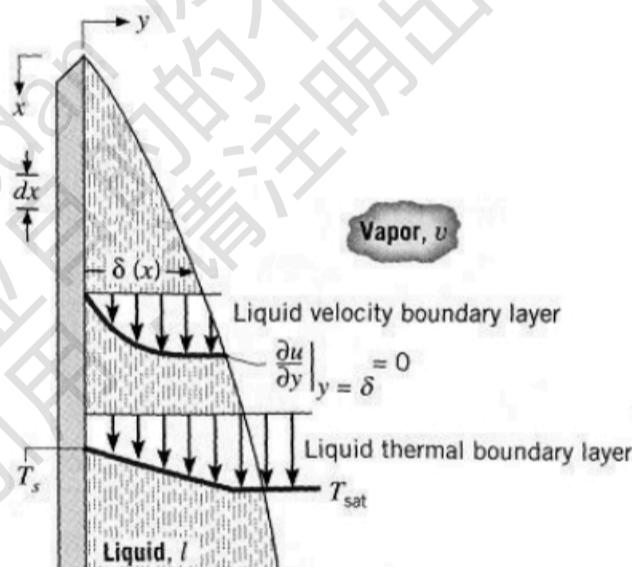
珠状凝结的换热能力更强

$h_{珠} > h_{膜}$, 珠状凝结难以保持, 工程中的大多是膜状凝结

7.2 层流膜状凝结传热分析解及其实验关联式

1. 对实际问题的简化

- (1) 常物性
- (2) 饱和蒸汽总体静止
忽略相界面粘性力
- (3) 液膜流动缓慢
- (4) 汽液界面上无温差
- (5) 膜内温度线性分布
- (6) 液膜的过冷度忽略
- (7) 忽略蒸汽密度
- (8) 液膜表面光滑平整无波动



Nusselt理论分析

13/76

边界层微分方程

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \rho_L (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho_v g + \eta_L \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_L \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \end{cases}$$

(3) 惯性力 $\neq 0$ $\rho_L (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = 0$

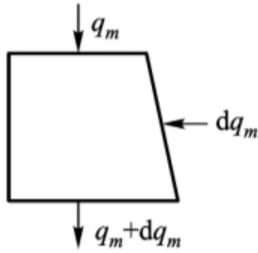
(1) 忽略蒸气密度 $\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_v g = 0$ $\rho_v \ll \rho_L$

$$(5) \text{ 温度分布线性 (层流对流)} \quad W \frac{\partial u}{\partial x} + V \frac{\partial t}{\partial y} = 0$$

简化得 $\begin{cases} \rho_l g + \eta_L \frac{d^2 u}{dy^2} = 0 \\ \alpha_l \frac{dt}{dy^2} = 0 \end{cases}$

边界条件 $\begin{cases} y=0 \text{ 时}, u=0, t=t_w \\ y=\delta \text{ 时}, \frac{du}{dy}|_S = 0, t=t_s \end{cases}$

求解结果 $\begin{cases} u = \frac{\rho_l g}{\eta_L} (sy - \frac{1}{2}y^2) \\ t = t_w + (t_s - t_w) \frac{y}{\delta} \end{cases}$ $S = S(x)$

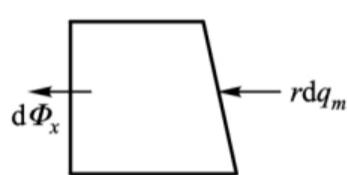


质量守恒 $q_m = \int_0^\delta \rho_i \cdot u \cdot dy = \frac{\rho_i^2 g \delta^3}{3\eta_L}$

$$dq_m = \frac{\rho_i^2 g \delta^2}{\eta_L} ds$$

能量守恒: $r dq_m = \lambda \frac{t_s - t_w}{\delta} dx$

$$\Rightarrow \delta = \left[\frac{4\eta_L \lambda L (t_s - t_w) x}{g \rho_i^2 r} \right]^{1/4}$$



$$h_x (t_s - t_w) dx = \lambda \frac{t_s - t_w}{\delta} dx = r dq_m$$

$$h_x = \frac{1}{\delta(x)}$$

$$\Rightarrow h_x = \left[\frac{gr\rho_i^2 \lambda_i^3}{4\eta_L (t_s - t_w) x} \right]^{1/4}$$

x 越大，液膜越厚，换热系数越小

整个壁的平均表面积换热系数

$$h = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx = \frac{4}{3} h_x |_{x=L}$$

$$= 0.943 \left[\frac{gr\rho_i^2 \lambda_i^3}{\eta_L L (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$$

汽化潜热 J/kg

定性温度: $t_m = \frac{t_s + t_w}{2}$

r 按 t_s 确定。

仰斜平板: $g \approx g \cos \theta$ or $g \sin \theta$ 取决定重力的那个分量对流动起影响。

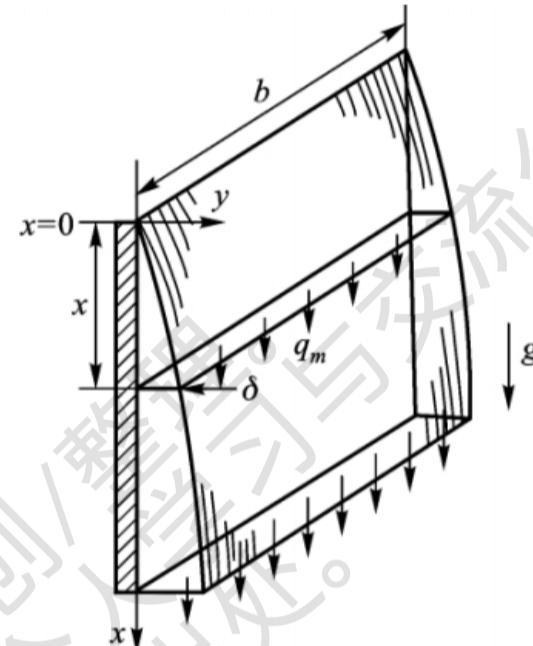
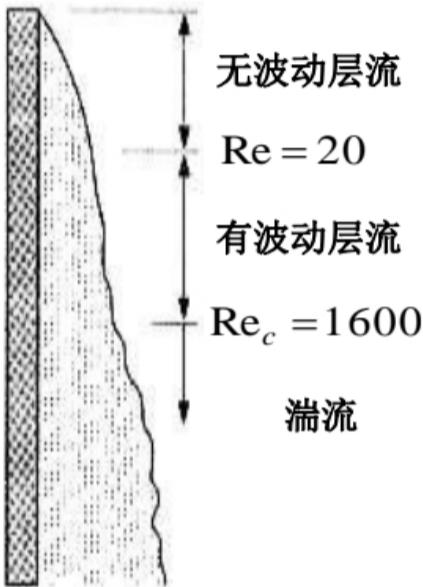
水平圆管外: $h_H = 0.729 \left[\frac{gr\rho_i^2 \lambda_i^3}{\eta_L d (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$

$$\text{球体: } h_H = 0.826 \left[\frac{g \rho \beta^2 \lambda_l^3}{\eta_l d (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$$

水平管与垂直管的对流换热系数之比：

$$\frac{h_H}{h_V} = \frac{0.729}{0.943} \left(\frac{L}{d} \right)^{1/4} = 0.77 \left(\frac{L}{d} \right)^{1/4} \quad \text{If. } \frac{L}{d} = 50, \frac{h_H}{h_V} = 2.0$$

湍流膜状凝结：



$$Re = \frac{\rho_l U_m d_e}{\eta_l}, \quad U_m \rightarrow x=1 \text{ 处液膜的平均流速}, \quad d_e \text{ 为液膜面处液膜的当量直径}$$

$$d_e = 4A_c/\rho = 4b\delta/b = 4\delta$$

$$Re = \frac{4\rho_l U_m \delta}{\eta_l} = \frac{4q_m}{\eta_l}$$

$$\text{热量守恒: } r q_m = h_m (t_s - t_w) l \quad Re = \frac{4h_m l (t_s - t_w)}{\eta_l r}$$

层流向湍流的转换

$$Re_c = 1600$$

$$\text{表面传热系数的计算: } h = h_L \frac{x}{l} + h_T \left(1 - \frac{x}{l} \right)$$

水平管-自然对流

7.3 膜状凝结的影响因素及其强化

- ① 不凝结气体 $\left\{ \begin{array}{l} \text{增加了传递过程的阻力} \\ \text{减小了凝结的驱动力} \end{array} \right.$ 蒸汽要扩散过气膜，形成阻力。
气膜导热系数随蒸汽分压力降低，使 k_p 降低

$$h = 1.13 \left[\frac{rg\pi_l^3 p_l^2}{M_l l (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$$

$$q = h(t_s - t_w) = 1.13 \left[\frac{rg\pi_l^3 p_l^2}{M_l l} \right]^{1/4} (t_s - t_w)^{3/4} \quad t_s \downarrow, q \downarrow$$

- ② 蒸汽流速 $\left\{ \begin{array}{l} \text{使液膜变厚} \\ \text{使液膜变薄} \end{array} \right.$

③ 过热蒸汽

④ 液膜过冷度及其温度分布的非线性

⑤ 汽水排放

⑥ 管内冷凝足

⑦ 凝结表面的几何形状

强化的原则：减薄或破坏液膜；加速液膜排泄。

7.4 沸腾换热简介

液体汽化的两种方式 $\left\{ \begin{array}{l} \text{蒸发} \\ \text{沸腾} \end{array} \right.$

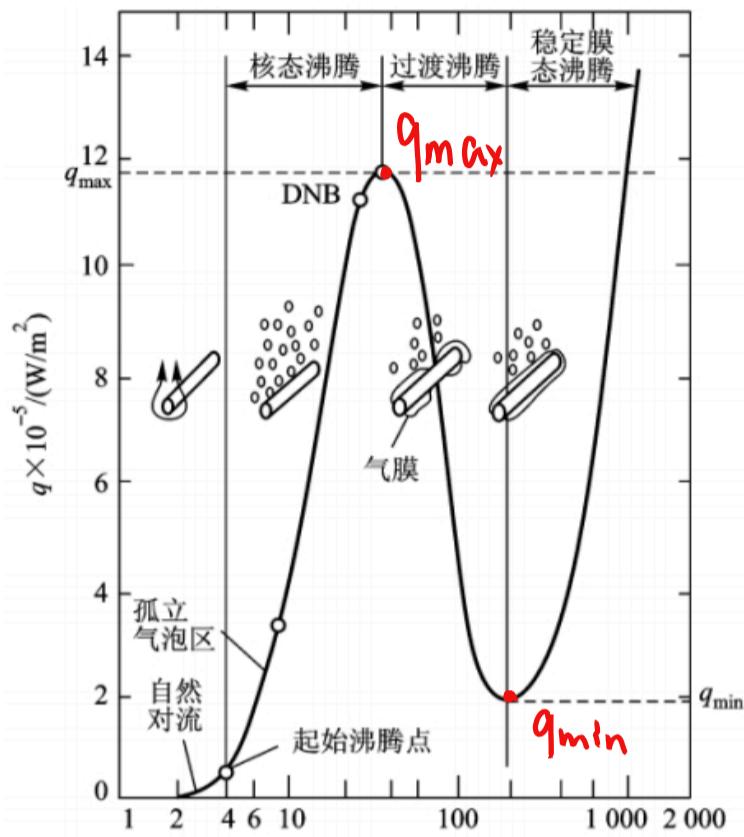
def. 工质内部形成大量气泡并由液态转换到气态的一种剧烈的汽化过程

分类：

按流动动力分 $\left\{ \begin{array}{l} \text{大容积沸腾(池沸腾)} \\ \text{强制对流沸腾} \end{array} \right.$

按主体温度分 { 过冷沸腾
饱和沸腾

大容器饱和沸腾 (拔山曲线, Nukiyama)



(1) 自然对流

(2) 沸腾

{ 孤立汽泡区 } 汽泡可以自由脱落
{ 汽膜区 } 增大扰动，增强换热

(3) 过渡沸腾 形成汽膜，减弱换热

(4) 膜态沸腾

第三类边界条件在 $t \rightarrow \infty$ 时，变为第一类边界条件，即 $t_w = t_f$

汽泡运动学：

① 必须维持一定的过热度

浮升力 = 重力 表面张力 = 气泡内外压强差.

$$2\pi R\gamma = (P_v - P_l)\pi R^2 \quad R = \frac{2\gamma}{P_v - P_l}$$

$$\textcircled{2} \text{ 汽化核心 } \quad R \geq \frac{2\gamma}{P_v - P_l}$$

③ 汽泡脱离直径和频率

$$D \sim \sqrt{\frac{\gamma}{g(P_v - P_l)}} \quad D_f^\alpha = C \quad \alpha = 0.5, 1, 2$$

表面张力越大，越不容易脱离

浮升力越大，越容易脱离

7.5 沸腾传热计算式

沸腾换热也是对流换热的一种，牛顿冷却公式依然适用

$$q = h(t_w - t_s) = h\Delta t$$

1. 大容器饱和和核态沸腾

Rohsenow 公式

$$\frac{C_{pl}\Delta t}{r} = C_{wl} \left[\frac{q}{\eta_l r} \sqrt{\frac{\sigma}{g(p_L - p_v)}} \right]^{0.33} Pr_L^s$$

$$\Delta t = t_w - t_s$$

定性温度为 t_s

r — 汽化潜热

C_{pl} — 饱和液体的比定压热容

g — 重力加速度

η_l — 饱和液体的动力粘度

C_{wl} — 取决于加热表面—液体

组合情况的经验常数(表7-1)

q — 沸腾传热的热流密度

s — 经验指数

水 $s = 1$, 否则 $s=1.7$

一般改写为

$$q = \eta_l r \left[\frac{g(p_L - p_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{C_{pl}\Delta t}{C_{wl} r Pr_L^s} \right]^3$$

2. 列维公式

$$\text{Cooper公式} \quad \left\{ \begin{array}{l} h = C q^{0.67} M_r^{-0.5} Pr^m (-\lg Pr)^{-0.55} \\ C = 90 W^{0.33} / (m^{0.66} \cdot k) \\ m = 0.12 - 0.2 \lg \{ R_p \} \mu m \end{array} \right.$$

M_r — 液体的分子量

C — 常数

p_r — 液体压力与该流体饱和压力之比

R_p — 加热表面粗糙度 μm

3. 大容器沸腾的临界热流密度

$$q_{max} = \frac{\pi}{24} r p_v^{1/2} [g \sigma (p_L - p_v)]^{1/4}$$

7.6 沸腾传热的影响因素及其强化

7.7 热管

热管热阻：① 蒸发段外表面与流体的换热热阻。

$$R_1 = 1 / \pi d \text{ole} h_{oe}$$

② 蒸发段外壁到内壁的热阻

$$R_2 = \frac{1}{2\pi\lambda l_e} \ln \frac{d_o}{d_i}$$

③ 蒸发段内壁与流体换热热阻

$$R_3 = 1 / \pi d_i h_{ie}$$

④ 蒸发段流向冷凝段的压力降引起的热阻

$$R_4 \approx 0$$

⑤ 冷凝段内壁与流体换热热阻

$$R_5 = 1 / \pi d_i l_{ch} h_{ic}$$

⑥ 冷凝段内壁到外壁的热阻

$$R_6 = R_2$$

⑦ 冷凝段外表面与流体的换热热阻

$$R_7 = 1 / \pi d \text{ol} h_{oc}$$

其中 $R_2 \sim R_6$ 为内部热阻