

# 3. 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 { 浸润性液体  
非浸润性液体

凝结传热的两种模式 { 膜状凝结  
珠状凝结

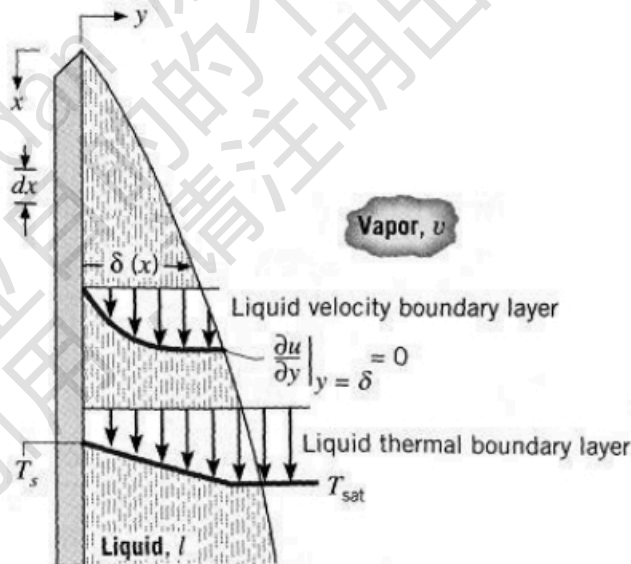
珠状凝结的换热能力更强

$h_{\text{珠}} > h_{\text{膜}}$ ，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

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \rho_l (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho_l g + \eta_l \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = a_l \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \end{cases}$$

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

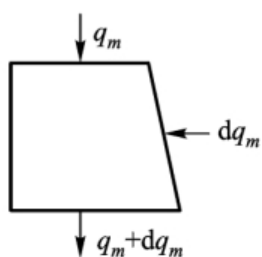
(7) 忽略蒸汽密度  $\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_l g = 0$   $\rho_v \ll \rho_l$

(5) 温度分布线性 (忽略对流)  $w \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + v \frac{\partial t}{\partial y} = 0$

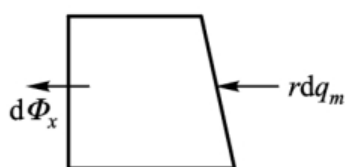
简化得  $\begin{cases} \rho_l g + \eta_l \frac{d^2 u}{dy^2} = 0 \\ \eta_l \frac{d^2 t}{dy^2} = 0 \end{cases}$

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

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



质量守恒  $q_m = \int_0^{\delta} \rho_l u dy = \frac{\rho_l^2 g \delta^3}{3\eta_l}$   
 $dq_m = \frac{\rho_l^2 g \delta^2}{\eta_l} d\delta$



能量守恒:  $r dq_m = \lambda \frac{t_s - t_w}{\delta} dx$   
 $\Rightarrow \delta = \left[ \frac{4\eta_l \lambda_l (t_s - t_w) x}{g \rho_l^2 r} \right]^{1/4}$

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

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

$\Rightarrow h_x = \left[ \frac{g r \rho_l^2 \lambda_l^3}{4\eta_l (t_s - t_w) x} \right]^{1/4}$   $x$  越大, 液膜越厚, 换热系数越小

整个竖壁的平均表面传热系数

$h = \frac{1}{l} \int_0^l h_x dx = \frac{4}{3} h_{x=l}$

$= 0.943 \left[ \frac{g r \rho_l^2 \lambda_l^3}{\eta_l l (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$

定性温度:  $t_m = \frac{t_s + t_w}{2}$

汽化潜热 J/kg  
 $r$  按  $t_s$  确定.

倾斜平板:  $g \sim g \cos \theta$  or  $g \sin \theta$  取决于重力的哪个分量对流动造成影响.

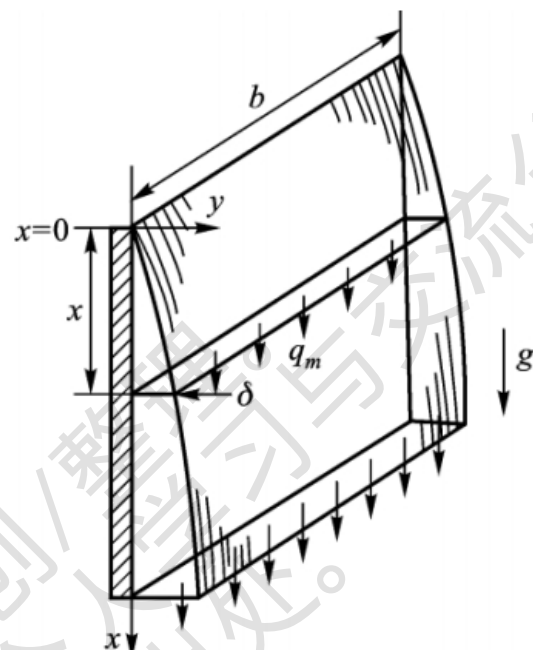
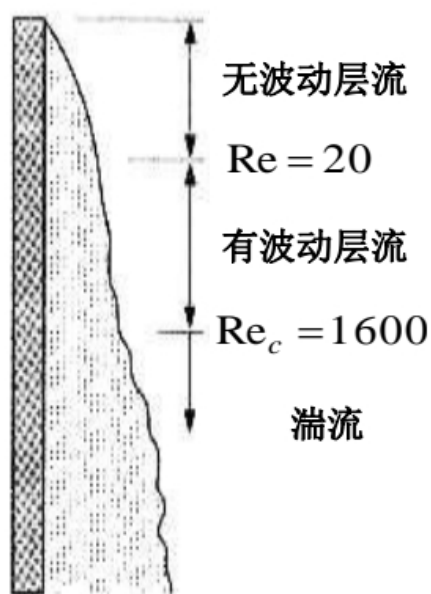
水平圆管外:  $h_H = 0.729 \left[ \frac{g r \rho_l^2 \lambda_l^3}{\eta_l d (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$

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

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:



$Re = \frac{\rho_l u_m d_e}{\eta_l}$ ,  $u_m$  为  $x=l$  处液膜的平均流速,  $d_e$  为该截面处液膜的当量直径

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

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

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

层流向湍流的转捩

$$Re_c = 1600$$

表面传热系数的计算:  $h = h_c \frac{x_c}{L} + h_c \left( 1 - \frac{x_c}{L} \right)$

水平管一般为层流

## 7.3 膜状凝结的影响因素及其强化

- ① 不凝结气体
- 增加了传递过程的阻力
  - 减小了凝结的驱动力
- 蒸汽要扩散过气膜, 形成阻力。  
气膜导致蒸汽分压力降低, 使  $t_s$  降低

$$h = 1.13 \left[ \frac{rg \lambda_l^3 \rho_l^2}{\mu_l (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$$

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

- ② 蒸汽流速
- 使液膜变厚
  - 使液膜变薄

③ 过热蒸汽

④ 液膜过冷度及其温度分布的非线性

⑤ 管子排数

⑥ 管内冷凝

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

- 蒸发
- 沸腾

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:

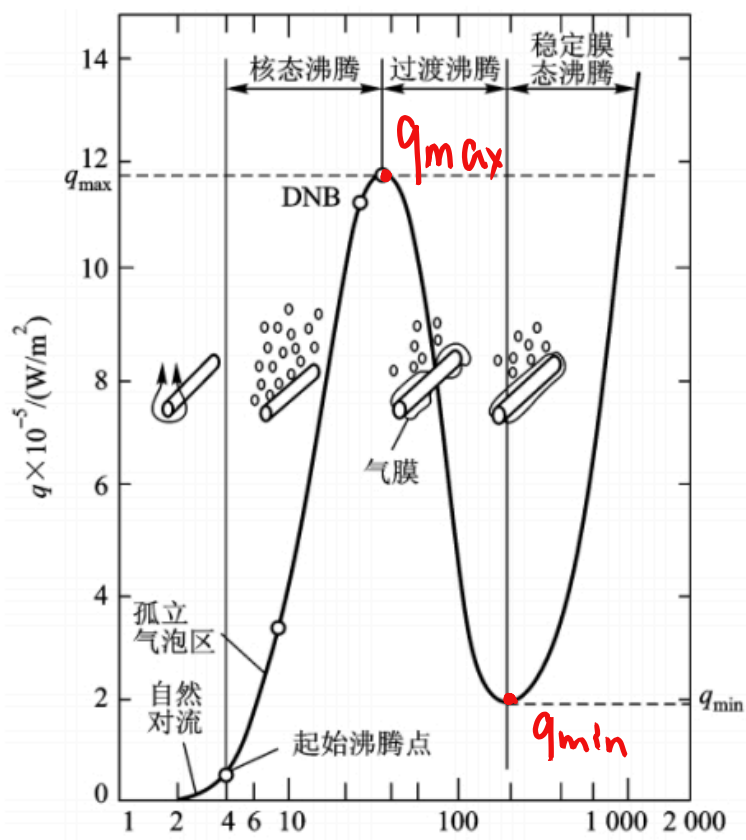
按流动动力分

- 大容器沸腾 (池沸腾)
- 强制对流沸腾



按主体温度分  $\left\{ \begin{array}{l} \text{过冷沸腾} \\ \text{饱和沸腾} \end{array} \right.$

大容器饱和沸腾 (拔山曲线, Nukiyama)



(1) 自然对流

(2) 核态沸腾

$\left\{ \begin{array}{l} \text{孤立气泡区} \\ \text{汽膜区} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{气泡可以自由脱落} \\ \text{增大扰动, 增强换热} \end{array} \right.$

(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  $h \rightarrow 0$  时, 变为第一类边界条件, 即  $t_w = t_f$ .

汽泡动力学:

① 必须维持一定的过热度

浮力 = 重力 表面张力 = 汽泡内外压力差.

$$2\pi R\gamma = (p_v - p_l)\pi R^2 \quad R = \frac{2\gamma}{p_v - p_l}$$

② 汽化核心  $R \geq \frac{2\gamma}{p_v - p_l}$

③ 汽泡脱离直径和频率.

$$D \sim \sqrt{\frac{\gamma}{g(p_v - p_l)}} \quad Df^a = C \quad a = 0.5, 1, 2$$

表面张力越大, 越不容易脱离

浮力越大, 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

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

$$\Delta t = t_w - t_s$$

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

$\eta_l$  — 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

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

### 2. 冷却介质

$$\text{Cooper 公式} \begin{cases} h = C q^{0.67} Mr^{-0.5} Pr^m (-\lg Pr)^{-0.55} \\ C = 90 W^{0.55} / (m^{0.66} \cdot K) \\ m = 0.12 - 0.2 \lg \{ R_p \}_{\mu m} \end{cases}$$

$Mr$  — 液体的分子量

$C$  — 常数

$Pr$  — 液体压力与该流体饱和压力之比

$R_p$  — 加热表面粗糙度  $\mu m$

### 3. 大容器沸腾的临界热流密度

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

## 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

$$R_1 = 1 / \pi d_o l e h_{oe}$$

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

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

④ 蒸发段流向冷凝段的压降引起的热阻

$$R_4 \approx 0$$

⑤ 冷凝段内壁与流体换热热阻

$$R_5 = 1 / \pi d_i l c h_{ic}$$

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

$$R_7 = 1 / \pi d_o l c h_{oc}$$

其中  $R_2 \sim R_6$  为内部热阻