



## 第四节 沸腾给热与冷凝给热

液体沸腾和蒸汽冷凝必然伴有流体的流动，所以沸腾给热和冷凝给热同样属于对流传热。但与前述不同，这两种过程都伴有相变化。

### 一、沸腾给热

对流体加热时，在液相内部伴有由液相变成气相产生气泡的过程称为沸腾，沸腾传热过程是一个非常复杂的过程，到目前为止，对它的研究还不够充分。当前，工业上液体沸腾分两种情况：





(1) 管内沸腾：液体在一定压差下，以一定的流速经加热管时发生的沸腾现象，又称强制对流沸腾。

(2) 大容积沸腾或池内沸腾：是将加热面浸入液体中，液体被壁面加热而引起的无强制对流的沸腾现象。

沸腾传热在工业上被广泛应用，比如化工生产中常用的精馏塔的再沸器，蒸发器，蒸气锅炉等，都是通过沸腾传热产生，本节主要讨论液体在大容器中的饱和沸腾。沸腾可分为：过冷沸腾、饱和沸腾。（P253）



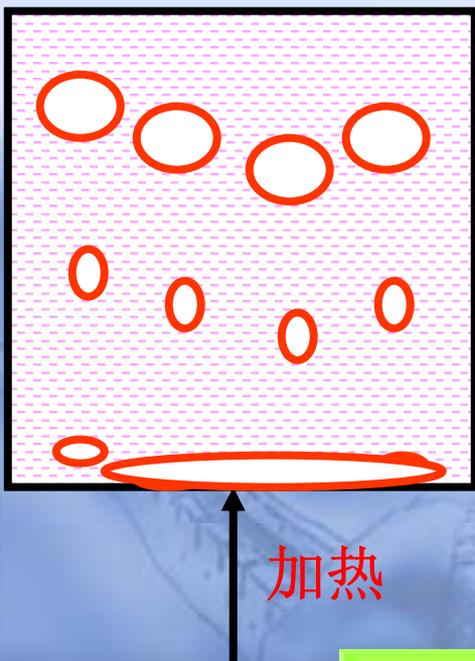
## 1、机理

沸腾给热的主要因素特征是液体内部有汽泡产生。实验发现，汽泡在加热表面上首先生成，气泡存在条件的必然条件：

$$p_{\text{内}} = p_{\text{外}} + \rho gh_{\text{(静压)}}$$

因此， $t_{\text{液}}$ 至少大于等于该蒸汽压对应的饱和温度  $t_s$

但实际上，在该蒸汽对应的饱和蒸汽压下，小汽泡生成还是不可能的。为什么呢？从所学过的物理化学知识看，微小汽泡的生成液体呈现凹面，而凹面上液体的饱和蒸汽压小于平面上液体饱和蒸汽压。由于凹面引起了蒸汽压降低。要使汽泡继续生成，必须提高相应的饱和温度，这种现象称为**液体的过热**。





**新相——小汽泡生成的必要条件是液体要过热。**

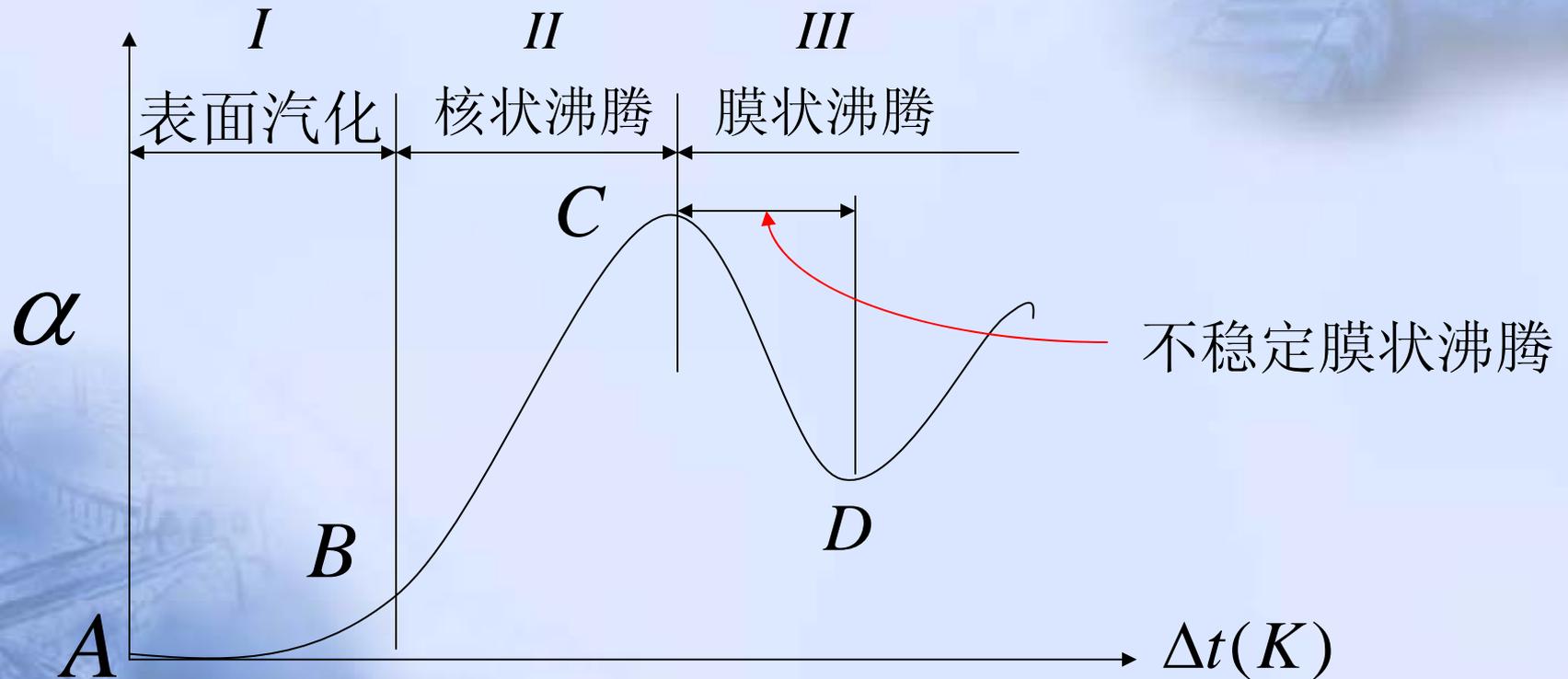
实验发现液体被加热面加热而沸腾时，蒸汽（汽泡）只在加热面上某些粗糙不同的点上产生，这些产生汽泡的点称为**汽化核心或汽化中心**。汽泡生成后，长大到一定程度，则脱离壁面而上升。在上升过程中，汽泡继续迅速增大，或表面破裂，或上升到液面。由于一批批汽泡的形成，长大及脱离加热面，从而引起液体内部尤其是壁面液体薄层内的剧烈扰动，使热阻大为降低。**故液体沸腾时的 $\alpha$ 较无相变化时的 $\alpha$ 要大的多。**

## 2、沸腾曲线

在一定范围内，加热面温度（壁温）与液体饱和温度相差愈大，沸腾越剧烈，沸腾的对流给热系数越大，大容器内的沸腾过程随这温度差 $\Delta t$ （ $\Delta t = t_w - t_s$  ←操作压力下液体的饱和温度）的不同，会出现不同类型的沸腾状态。以常压下水的大容器内沸腾为例，讨论 $\Delta t$ 对 $\alpha$ 的影响。



图6-19为实验测得的 $\alpha$ 与 $\Delta t$ 的关系:



常压下沸腾时 $\alpha$ 与 $\Delta t$ 的关系





(1) 在区域 I 中 AB 段,由于温度差较小,接近加热表面的液体稍微过热,所以只有少量的汽化核心产生。这时汽泡少,汽泡长大速度也较慢,受热面附近液层受到扰动也不大。因此热量的传递以自然对流为主,对流给热系数随着温度差的增加而增大,通常将此区域称为**自然对流区**。

(2) 在区域 II 中 BC 段,随着温度差的加大,汽化核心数目增加,汽泡长大的速度急速增快,这时对液体产生强烈的搅拌作用,从而 $\alpha$  随温度差增加而显著提高。此区域称为**核状沸腾区**。





(3) 区域III中CD段，由于温度差继续增加，使汽泡形成过快，从而充满加热体的表面，汽泡破裂连成一片，形成蒸汽薄膜覆盖在加热体的表面，热量在传导到液体之后，必须经过此薄膜，由于气体的导热系数远小于液体，所以 $\alpha$ 反而急剧下降。此区被称为**膜状沸腾区**。

D点以后温度差 $\Delta t$ 增大，加热面的温度进一步提高，则热辐射的影响愈来愈显著， $\alpha \uparrow$ 。

由核状沸腾转变为膜状沸腾时的温差称为**临界温度差**  $\Delta t_c$ ，对应于此点的热负荷称为**临界热负荷**  $q_c$ 。

工业上的沸腾装置大多维持在核状沸腾状态。（ $\alpha$ 大， $t_w$ 小）， $\therefore$ 应注意温度差  $\Delta t$  不大于临界温度差  $\Delta t_c$ ，否则一旦变为膜状沸腾，将导致传热过程恶化， $\alpha$  急剧下降。





### 3、 $\alpha_{\text{沸}}$ 的计算

$\alpha_{\text{沸}}$ 的计算，到目前为止很不完善。

影响沸腾给热过程的因素主要有：

(1) 液体和蒸汽的性质，主要包括  $\alpha$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $c_p$ ,  $\gamma$ ,  $\rho_l$  和  $\rho_v$ 。一般情况下， $\alpha_{\text{沸}}$  随  $\lambda$ 、 $\rho$  的增加而增大，随  $\mu$ 、 $\alpha$  的增加而减小；

(2) 加热面的影响，加热面清洁且粗糙，液体与表面的润湿性好，就有利于汽泡的生成，有利于沸腾给热；

(3) 操作压力的影响，提高操作压力，相当于提高液体的饱和温度，使液体的  $\alpha$ 、 $\mu$  均降低，有利于汽泡的形成和脱离，强化了沸腾给热，在相同的  $\Delta t$  下， $\alpha$  和  $q$  值较高；





(4) 温度差的影响，从沸腾曲线可知， $\Delta t$  影响沸腾给热的重要参数。沸腾给热系数实验数据可按下列函数形式进行关联：

$$\alpha = A\Delta t^{2.5} B^{t_s}$$

$$\begin{aligned} \text{或 } \lg \alpha &= \lg A + 2.5 \lg \Delta t + t_s \lg B \\ &= a' + 2.5 \lg \Delta t + b' t_s \end{aligned}$$

$t_s$  — 蒸汽的饱和温度， $\text{---}^\circ\text{C}$   $\begin{matrix} \swarrow \\ \rightarrow (t_w - t_s) \end{matrix}$

$a'$ 和 $b'$ —实验参数。

## 4、沸腾给热过程的强化

- (1) 粗糙加热表面。
- (2) 加少量添加剂，改变 $\delta$ 。





## 二、蒸汽冷凝给热

### 1、蒸汽冷凝给热的特点

在蒸汽冷凝给热过程加热介质为饱和蒸汽。当饱和蒸汽遇到了低于饱和蒸汽温度的界面，蒸汽将放出潜热冷凝成液体。对于纯物质饱和蒸汽的冷凝，系统压力一定，温度就一定( $f = \text{组分数} - \text{相数} + 2$ )，也就是说恒压下只有一个气相温度，即气相中不可能存在温度梯度，气相主体不存在温差，意味着汽相中热阻 $R=0$ 。故蒸汽的冷凝只能在冷凝液形成的液膜表面上发生，冷凝时放出的潜热必须通过这层液膜才能传给冷壁。可见，**给热过程的热阻几乎全部集中于冷凝液膜内。**

工业上通常使用饱和蒸汽作为加热介质的原因有两点：

一是饱和蒸汽的温度恒定；

二是有较大的给热系数。





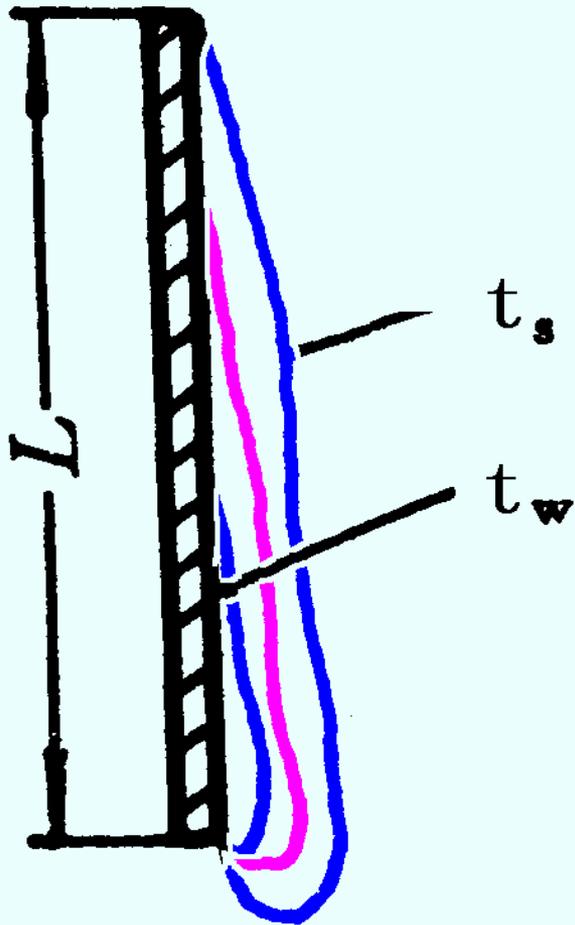
## 2、膜状冷凝和滴状冷凝

集中了主要热阻的冷凝液，它的流动状态对  $\alpha$  有着极大的影响，冷凝液在壁面上的存在和流动方式有两种类型；**膜状和滴状**，膜状是由于冷凝液能润湿壁面，因而在整个冷凝过程中壁面始终覆盖着一层液膜。滴状是由于冷凝壁面上存在着一些油类物质，或蒸汽中混有油类或脂类物质，致使冷凝液不能全部润湿壁面，而聚成液滴，液滴长大后自壁面脱落，重新露出冷面，便可再次生成液滴。

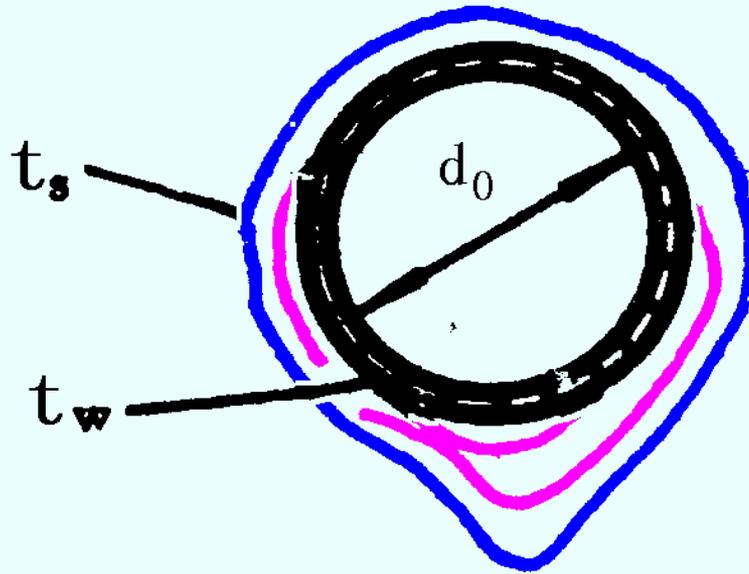
滴状冷凝的  $\alpha$  比膜状冷凝的大五到十倍，生产中所遇到的冷凝过程大多为膜状冷凝。即使在冷凝器中采用促进滴状冷凝的措施，也只能在设备的某一部分成滴状，且不能持久。所以工业上冷凝器的设计都按膜状冷凝考虑。

下面只讨论膜状冷凝时的情况。





膜状冷凝



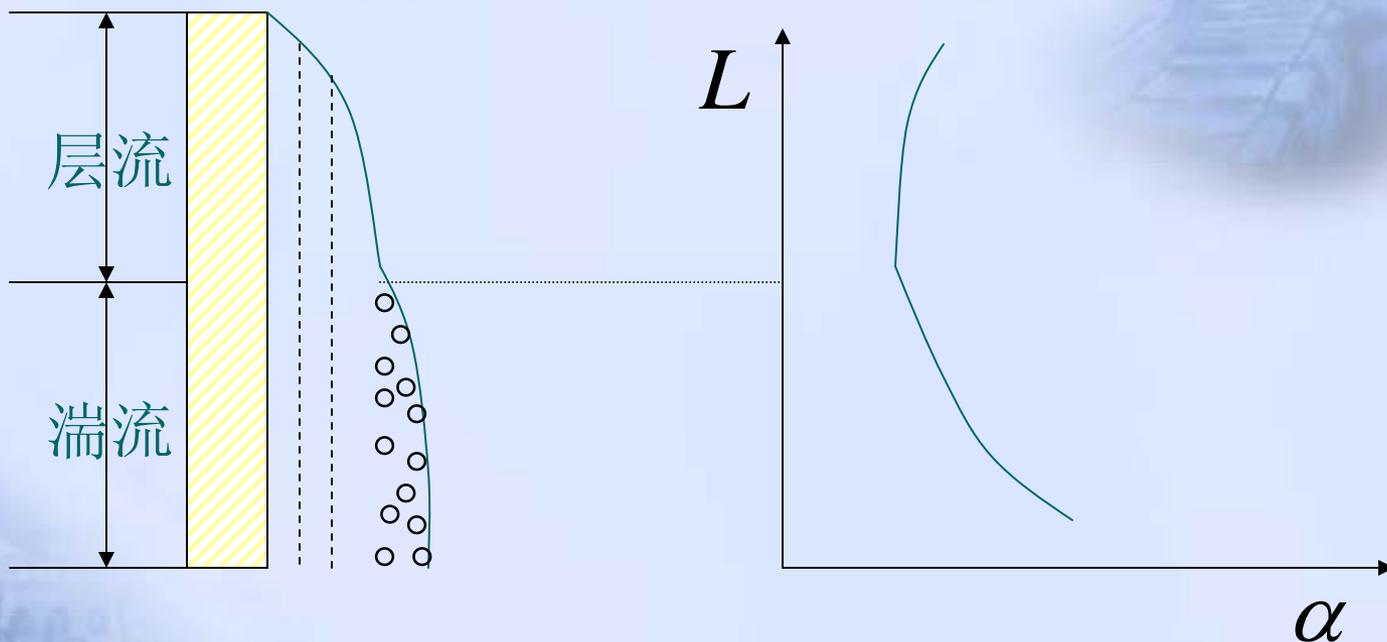
膜状冷凝



滴状冷凝

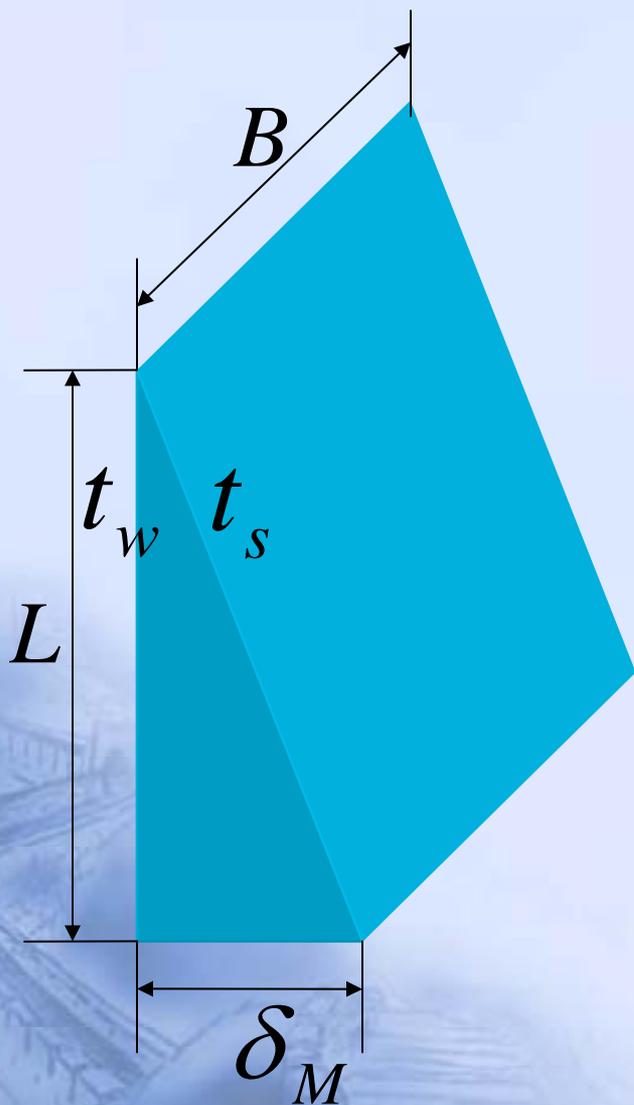


### 3、冷凝给热系数 $\alpha$



液膜厚度沿壁高的变化必然导致热阻或  $\alpha$  沿高度分布的不均匀性。在壁上部液膜成层流，膜厚增加， $\alpha \downarrow$ 。如壁的高度足够高，冷凝液量较大，则壁下部液膜发生湍动，随湍动程度的提高  $\alpha \uparrow$ 。工程上只需知道  $\alpha$ 。





## (1)、层流时:

设有一高度为 $L$ ，宽度 $B$ 的垂直平壁。蒸汽与冷壁冷凝，所生成的液膜以层流状态沿壁流下。以下采用半经验半理论的简化方法来推导 $\bar{\alpha}$ 。总的思路是：首先**假定在层流液膜中只有单纯的热传导**，推导各影响因素之间的关系式，然后再用实验检验并进行修正。





根据冷凝液膜内只有热传导的假定，认为： $\alpha = c \frac{\lambda}{\delta_M}$

$\lambda$ ：液膜导热系数； $\delta_M$ ：壁面下方最大的液膜厚度

参见P81第一章习题24，液膜沿垂直平壁自上而下做匀速层流流动，单位宽度液体的质量流量与液膜厚度的关系为：

$$W = \frac{\rho^2 g \delta^3}{3\mu} \quad \rho, \mu \rightarrow \text{冷凝液的物性} \quad (6-58)$$

当  $\delta = \delta_M$ ， $W$  就为单位宽度壁面上的总凝液量  $W_M$

根据热量衡算求出  $W_M$ ，设整个壁面的热流量为  $Q$ ，则

$$Q = \alpha(BL)(t_s - t_w)$$





$$\frac{Q}{B} = W_M \cdot r = \alpha L(t_s - t_w), \quad r \text{ 为汽化热, } J/kg \quad (6-59)$$

$$\because \alpha = c \frac{\lambda}{\delta_M} \quad \text{由 (6-57) 有: } \delta_M^3 = \left( \frac{c\lambda}{\alpha} \right)^3$$

$$\text{代入 (6-58) 得: } W_M = \frac{\rho^2 g \lambda^3}{3\alpha^3 \mu}$$

饱和蒸汽温度

$$\text{代入 (6-59) 得: } \alpha = \frac{r}{L\Delta t} \quad W_M = \frac{r\rho^2 g c^3 \lambda^3}{L\Delta t \cdot 3\mu\alpha^3}, \Delta t = t_s - t_w$$

$$\text{整理得: } \alpha^4 = \frac{c^3 r \rho^2 g \lambda^3}{3 \mu L \Delta t} \quad (6-60)$$

$$\alpha = c_1 \left( \frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu L \Delta t} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad \text{实验测出: } c_1 = 1.13. \quad (6-61)$$





## 说明:

(1)、上式所含各物性常数应是冷凝液的物性。(因冷凝给热的热阻是凝液造成的。)

(2)、定性温度  $\frac{t_s + t_w}{2}$ , 物性参数可以按定性温度查

$r \Leftrightarrow t_s$ 。把 (6-61) 改写成无因次形式:

$$\alpha^* = \frac{\alpha}{\left(\frac{\rho^2 g \lambda^3}{\mu^2}\right)^{\frac{1}{3}}} = 1.87 \left(\frac{4\alpha L \Delta t}{r \mu}\right)^{-\frac{1}{3}}$$

上式中  $\alpha^*$  为改无因次冷凝给热系数。



在垂直壁的底部，冷凝液膜流动的雷诺数应为：

$$\text{Re}_M = \frac{deG}{\mu} = \frac{4A'}{\Pi} \cdot \frac{W_M}{A' \cdot \mu} = \frac{4W_M}{\Pi\mu}$$

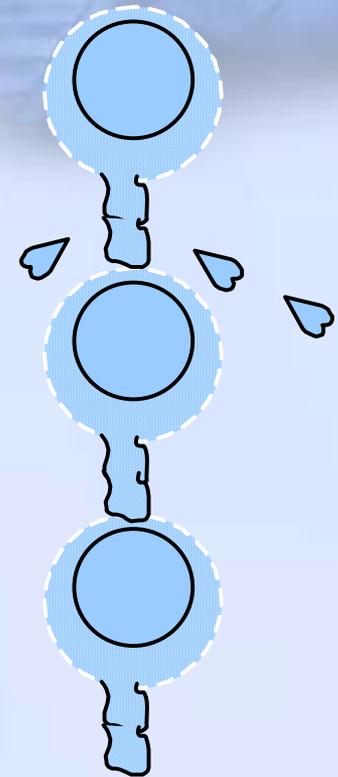
$G$ —质量流速

$W_M$ —通过垂直壁面底部的质量流量

$\Pi$ —单位宽度的垂直壁面， $\Pi = 1$

把  $W_M = \frac{\alpha L \Delta t}{r}$  代如上式，得：

$$\text{Re}_M = \frac{\frac{4\alpha L \Delta t}{r}}{\Pi\mu} = \frac{4\alpha L \Delta t}{\Pi\mu r} = \frac{4\alpha L \Delta t}{r\mu}$$





## (2)、湍流时的冷凝给热系数

当  $Re_M$  (冷凝液膜流动的雷诺数)  $>2000$ 时, 液膜中的流动为湍流。此时的平均给热系数采用下面的经验式进行计算:

$$\alpha^* = 0.0077 Re_M^{0.4}$$

或: 
$$\alpha = 0.0077 \left( \frac{\rho^2 g \lambda^3}{\mu^2} \right)^{1/3} \left( \frac{4\alpha L \Delta t}{r \mu} \right)^{0.4}$$

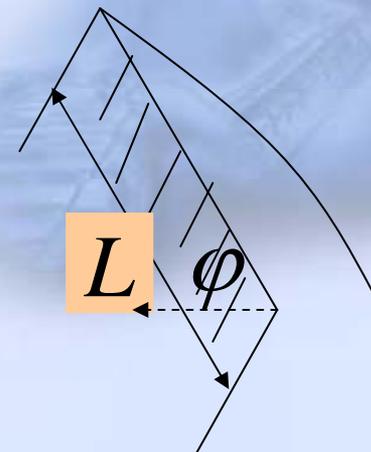
除 $r$ 外, 其余数据均按膜温取。



### (3)、水平圆管外的冷凝给热系数

a、对于和水平方向成夹角  $\varphi$  的倾斜壁面，重力作用方向和液膜流动方向不一样，需要将重力加速度  $g$  以  $g \sin \varphi$  代替：

$$\alpha = 1.13 \left( \frac{\rho^2 g \lambda^3 r \sin \varphi}{L \Delta t \mu} \right)^{1/4}$$



b、对于单根水平圆管，它的外表面可看成是由不同角度的倾斜壁组成的，利用数值积分的方法可求得水平圆管外表面平均给热系数为：

$$\alpha = 0.725 \left( \frac{\rho^2 g \lambda^3 r}{d \Delta t \mu} \right)^{1/4}$$

d为管外径  
定性温度 =  $\frac{t_s + t_w}{2}$

在其它条件均相同时，水平圆管和垂直圆管的  $\alpha$  之比为：

$$\frac{\alpha_{\text{水平}}}{\alpha_{\text{垂直}}} = 0.64 \left( \frac{L}{d} \right)^{1/4}$$





## (4)、蒸汽在水平管束外的冷凝

管子排列有直排和错排两种形式，不论式直排还是错排，除第一排管外，其它各排管的冷凝情况必受到其上各排管流下的冷凝液的影响。若假设从上排管流下的冷凝液只是平稳地流至下排管使液膜增厚，热阻增加，而且各排管温差 $t_s - t_w$ 相同，则水平管束的平均 $\alpha$ 可由下式计算：

$$\alpha = 0.725 \left( \frac{\rho^2 g \lambda^3 r}{n^{2/3} d \Delta t \mu} \right)^{1/4}$$

$n$ 为管束在垂直方向的管排数。若各列管子在垂直方向上数目不等，则用 $\bar{n}$ 代替 $n$ ，

$$\bar{n} = \left( \frac{n_1 + n_2 + n_3 + \dots}{n_1^{0.75} + n_2^{0.75} + n_2^{0.75} + \dots} \right)^4$$





## 4、影响冷凝给热的因素及强化措施

### (1) 影响冷凝给热的因素

#### a、不凝性气体的影响

若蒸汽内含有空气或不凝性气体，就会严重削弱冷凝传热。原因是蒸汽凝结时不凝性气体在液膜表面形成一层汽膜，从而使传热阻力加大，冷凝对流给热系数降低。例如，当蒸气中空气含量达1%时，冷凝对流传热系数可降低60%左右。

因此，设计冷凝器时应考虑在设备上设置不凝气体排放口，定期排放不凝性气体。





## b、蒸汽过热的影响

若壁面温度  $t_w$  高于蒸汽的饱和温度，则壁面上无冷凝现象发生，这时的给热过程即为气体冷却过程。若壁面  $t_w$  低于蒸汽的饱和温度，在壁面附近的过热蒸汽先在气相下冷凝到饱和温度，然后在壁面上冷却。可见**过热蒸汽的冷凝过程是由冷却和冷凝两个过程组成的**。在冷却过程中，在蒸汽内产生温度梯度并向液膜传递热量，但这部分显热与总热量比很小，同时又因蒸汽冷凝时体积急剧缩小，过热蒸汽急速流向液面，对液膜来说，传热的推动力仍是  $t_s - t_w$ 。

因此，**过热蒸汽冷凝与饱和蒸汽冷凝差别很小，所以通常将热蒸汽冷凝按蒸汽冷凝处理**。所以本节推出的公式适用于过热蒸汽。





## c、蒸汽流速和流向的影响

蒸汽流动时，将在汽液界面产生一定的摩擦力，当蒸汽和液膜的相对速度不大时 ( $<10\text{m/s}$ )，可忽略蒸汽流速对  $\alpha$  的影响；若蒸汽和液膜流向一致，液膜流动加快，液膜减薄， $\alpha \uparrow$ ；相反地，汽与膜流向相反，膜增厚， $\alpha \downarrow$ ；若蒸汽速度大到冲破膜层的流动时，即摩擦力超过液膜重力，液膜被蒸汽吹离壁面， $\alpha \uparrow$ 。

所以，当蒸汽速度较大时，应考虑流速对  $\alpha$  的影响。

d、对于水平管束，冷凝液常要从上面各管流到下面各管，使液膜逐渐增厚，平均  $\alpha$  降低。所以，一般应设法减少垂直方向上管子的数目或将管子的排列旋转一定的角度，使冷凝液沿下一根管子的切向流过。





## (2)、强化措施

纯饱和蒸汽冷凝时，汽相温度均匀，没有温度差，所以热阻集中在冷凝液膜内，影响冷凝给热的关键因素有二，一是液膜厚度，二是液膜流动状况。凡有利于减薄液膜厚度的因素，都可提高冷凝给热系数。此外，还需要注意液膜的流动情况。

对饱和蒸汽冷凝而言，恒压下蒸汽温度为一定值，即汽相中不存在温差，汽相中没有热阻， $\alpha = f(\delta, \text{冷凝液的物性})$   
当流体已定， $\alpha = f(\delta)$ 。

可见一切有利于使液膜厚度变薄的因素，都可提高冷凝给热系数。如开沟槽、壁面装金属丝等（P263）



## 5、一般情况下, $\alpha$ 的大致范围

各种情况	范围( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ )
空气中自然对流	1~10
空气中强制对流	10~250
水的强制对流	250~10000
水蒸汽冷凝	5000~15000
水沸腾	1500~45000

本节完

