

## 期中考试成绩段分布

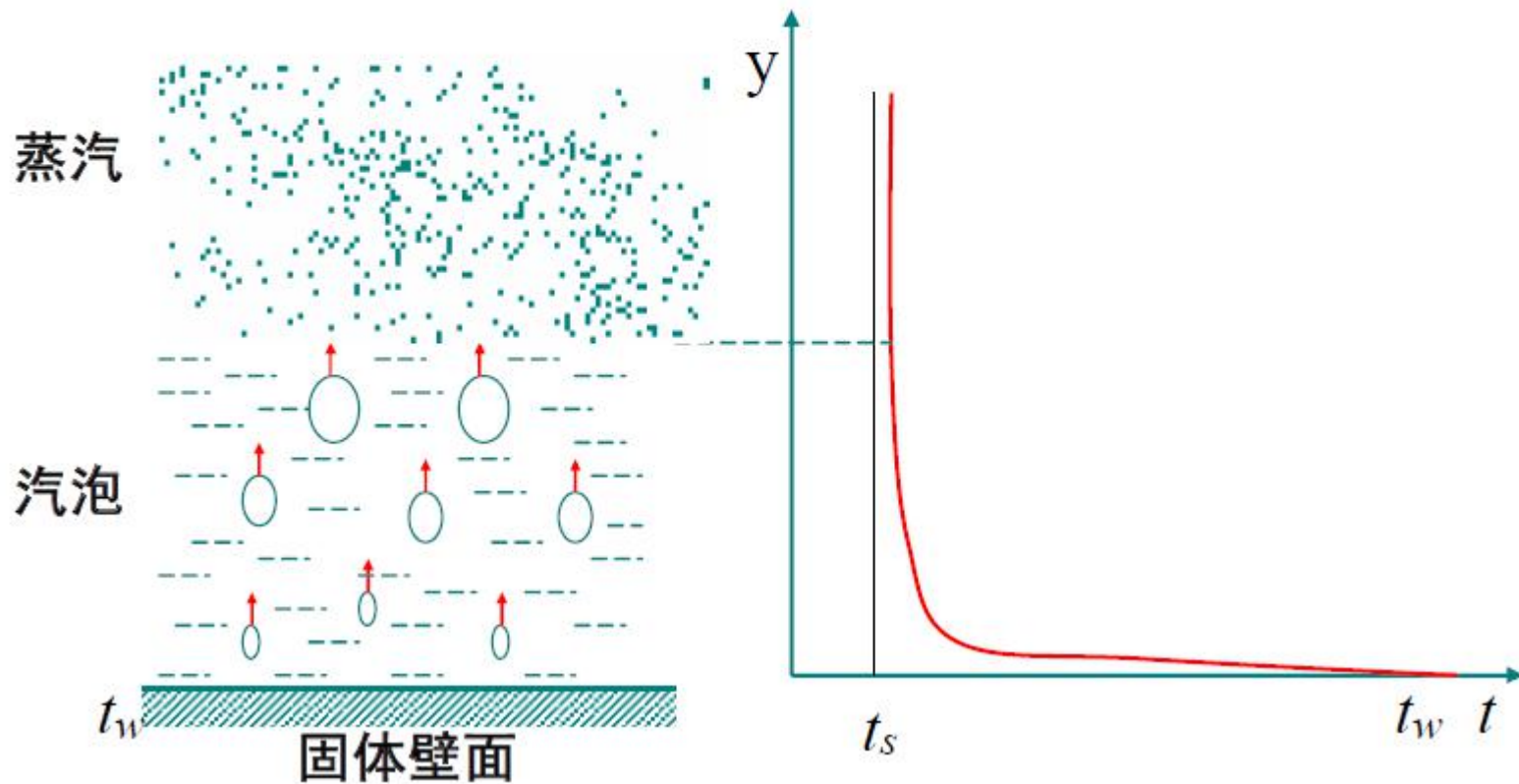
分数	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59
人数	0	4	3	7	3	7
分数	60-69	70-79	80-89	90-99	100	平均分
人数	4	5	1	0	0	46.88

## § 7-4 沸腾换热简介

### 一 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产生的汽化，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



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。

## 1) 气泡的成长过程



## 2) 气泡存在的条件

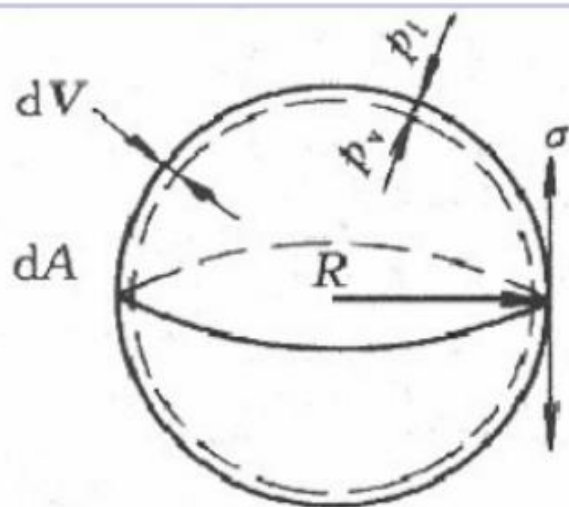
通过理论推导，气泡半径  $R$  必须满足下列条件才能存在

$$R \geq R_{\min} = \frac{2\sigma T_s}{r\rho_v(t_w - t_s)}$$

式中， $\sigma$ —表面张力，N/m； $r$ —汽化潜热，J/kg；

$\rho_v$ —蒸汽的密度，kg/m<sup>3</sup>； $t_w$ —壁面温度，℃；

$t_s$ —对应压力下的饱和温度，℃。



假设：气泡体积膨胀了微元体积 $dV$ ，相应地表面积增加了 $dA$ 。

作功量为：

$$dW = (p_v - p_l)dV - \sigma dA$$

当气泡处于平衡状态时：

$$dW = 0$$

图 7-8 气泡上的作用力

$$\longrightarrow (p_v - p_l)dV = \sigma dA$$

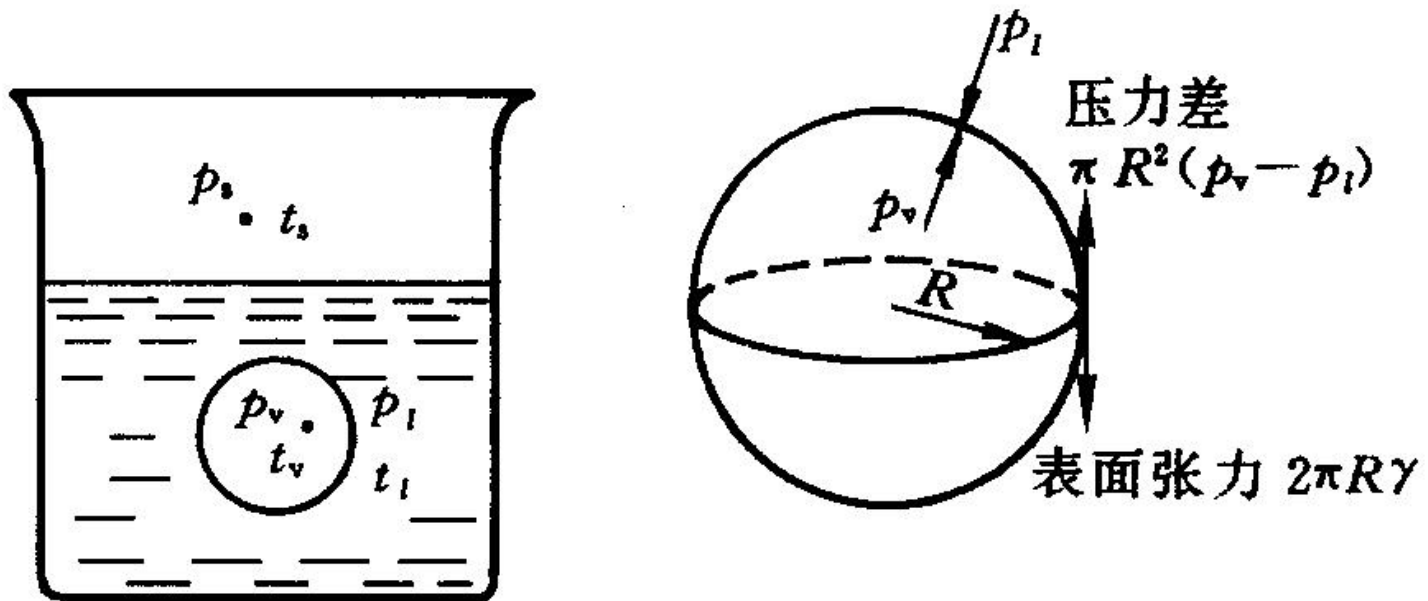
球形气泡：  $V = \frac{4}{3}\pi R^3, A = 4\pi R^2$

$$(p_v - p_l)4\pi R^2 dR = \sigma 8\pi R dR$$

$$\longrightarrow p_v - p_l = \frac{2\sigma}{R}$$

## 二 汽泡动力学简介

汽泡的产生、成长、脱离过程

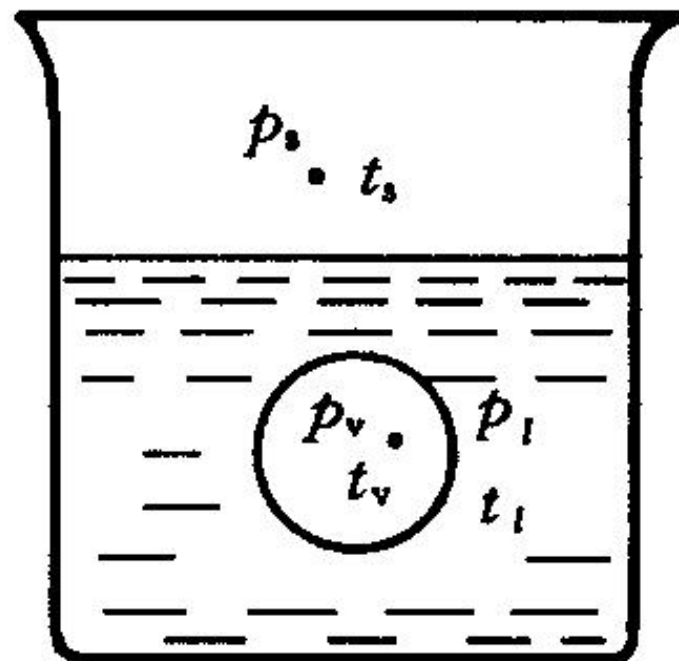


## 1 液体必须过热

表面张力=汽泡内外压力差

$$2\pi R\gamma = (p_v - p_l) \cdot \pi R^2$$

$$R = \frac{2\gamma}{(p_v - p_l)} \quad p_l \approx p_s$$



$$\begin{array}{c} \longrightarrow t_v > t_s \\ t_l = t_v \end{array} \longrightarrow t_l > t_s \quad t_w - t_s$$

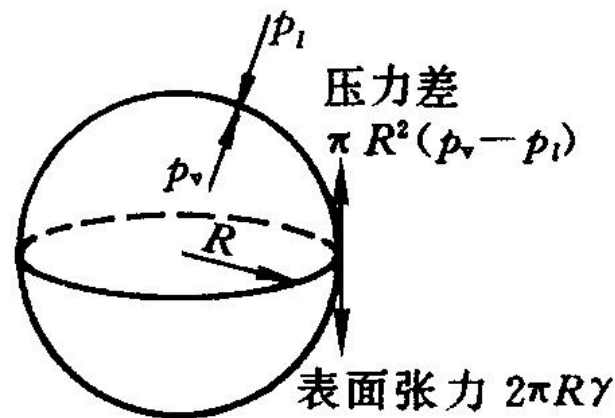
## 2 汽化核心

加热表面上凹坑、裂穴最有可能成为汽化核心

这些地方的过热度要保证

$$2\pi R\gamma = (p_v - p_l) \cdot \pi R^2$$

$$R \geq \frac{2\gamma}{(p_v - p_l)}$$





















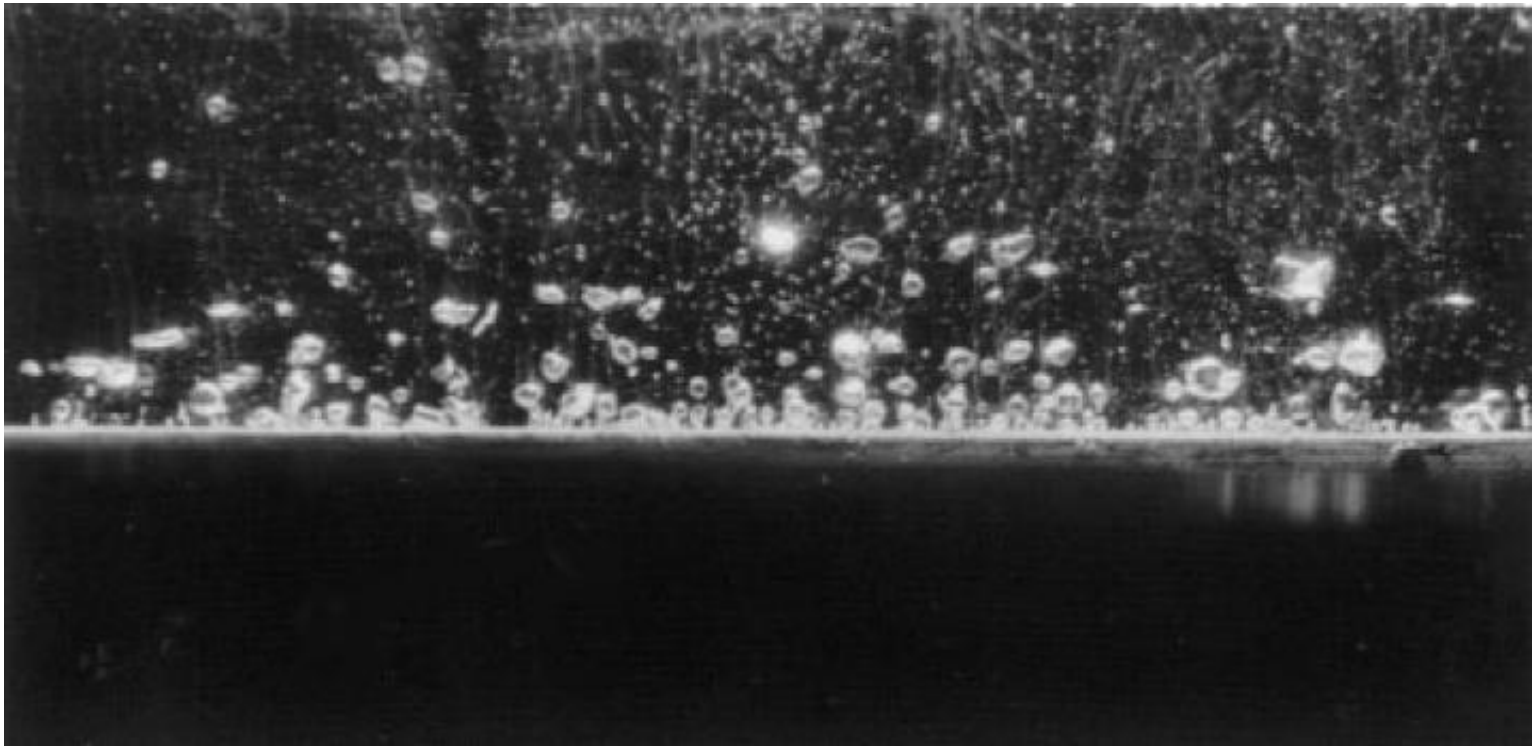






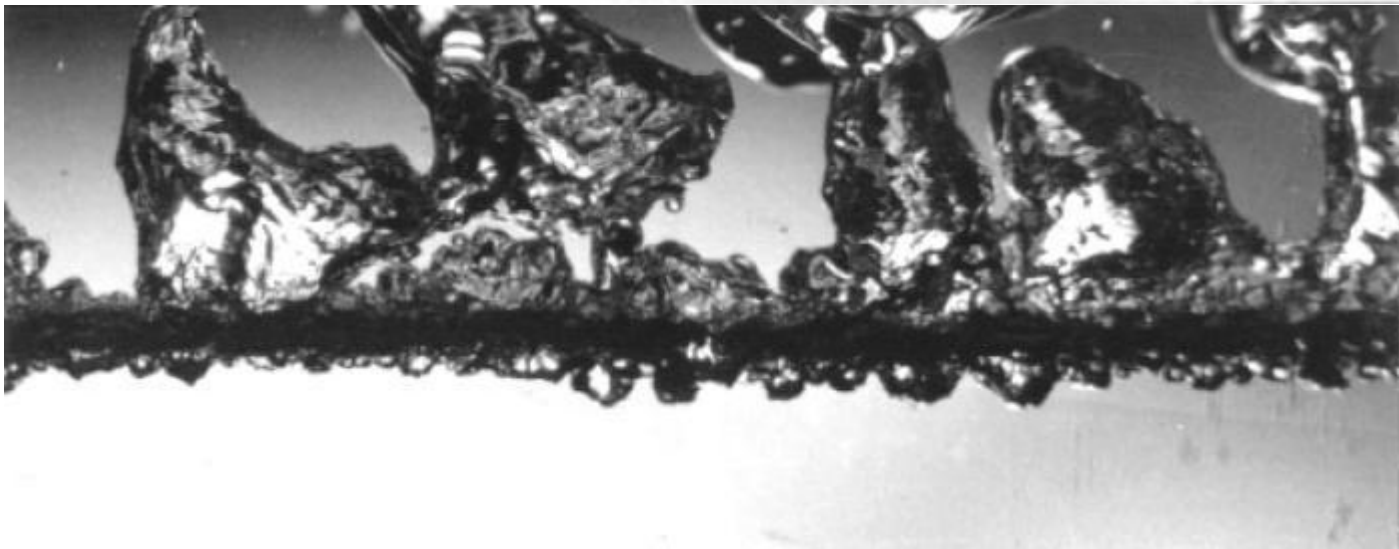
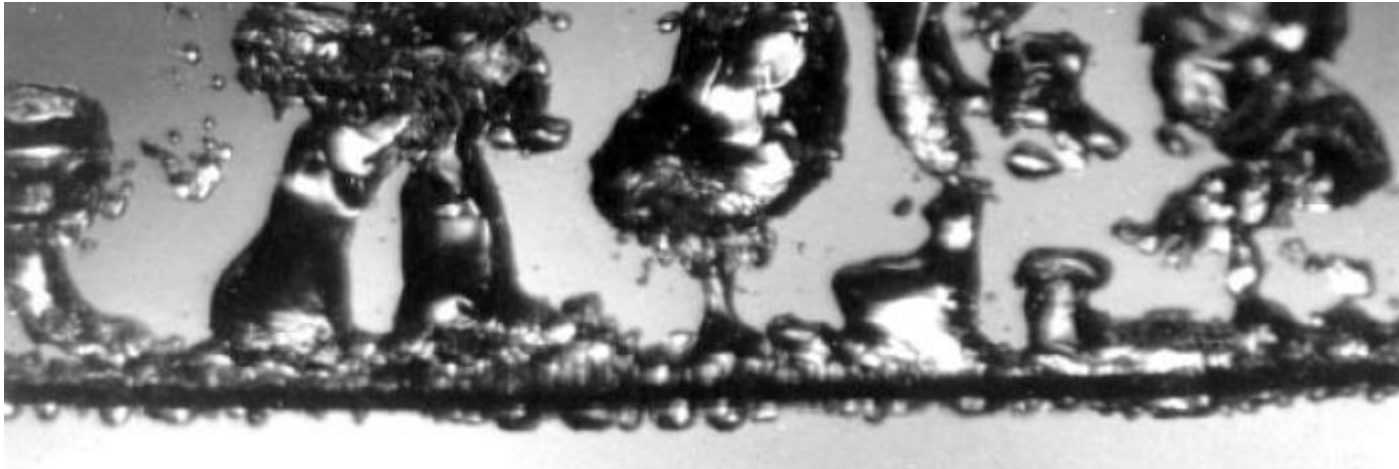
## 二 大容器饱和沸腾

### 控制壁面温度加热



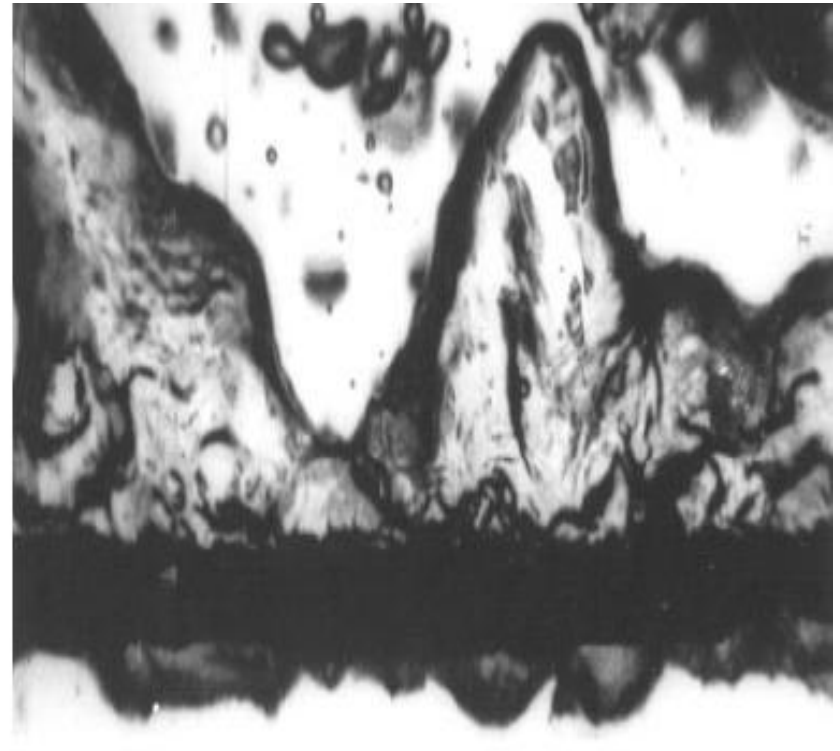
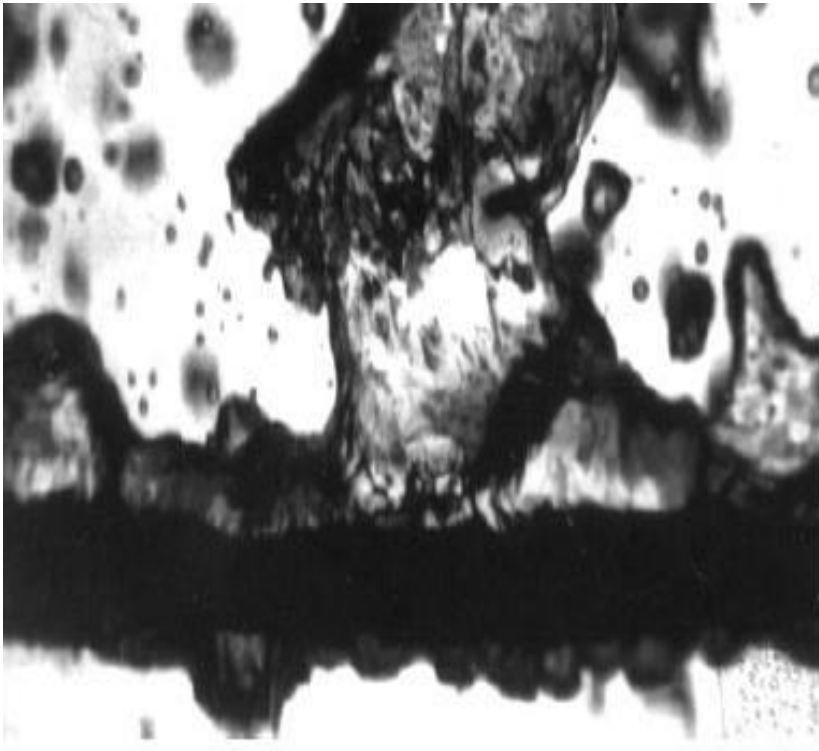
孤立汽泡区

The region of isolated bubbles



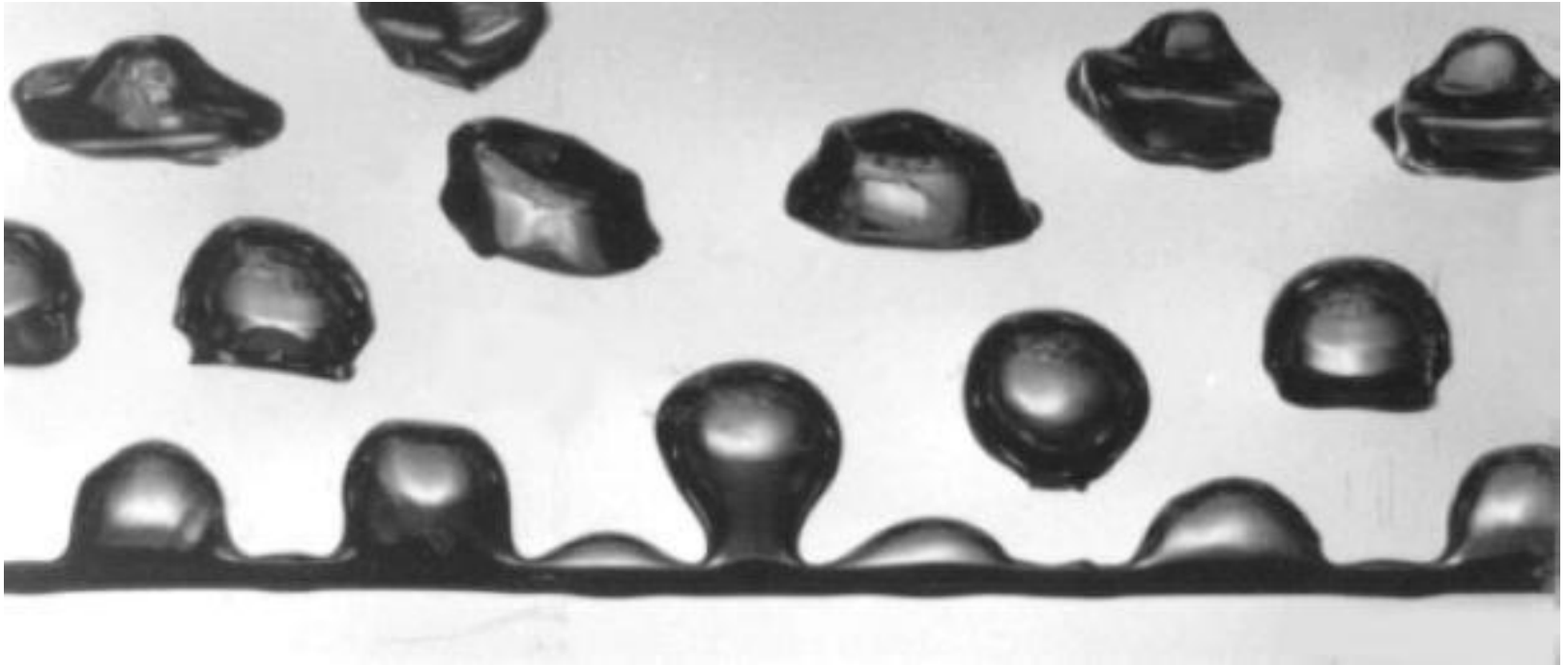
汽块区

The region of slugs and columns

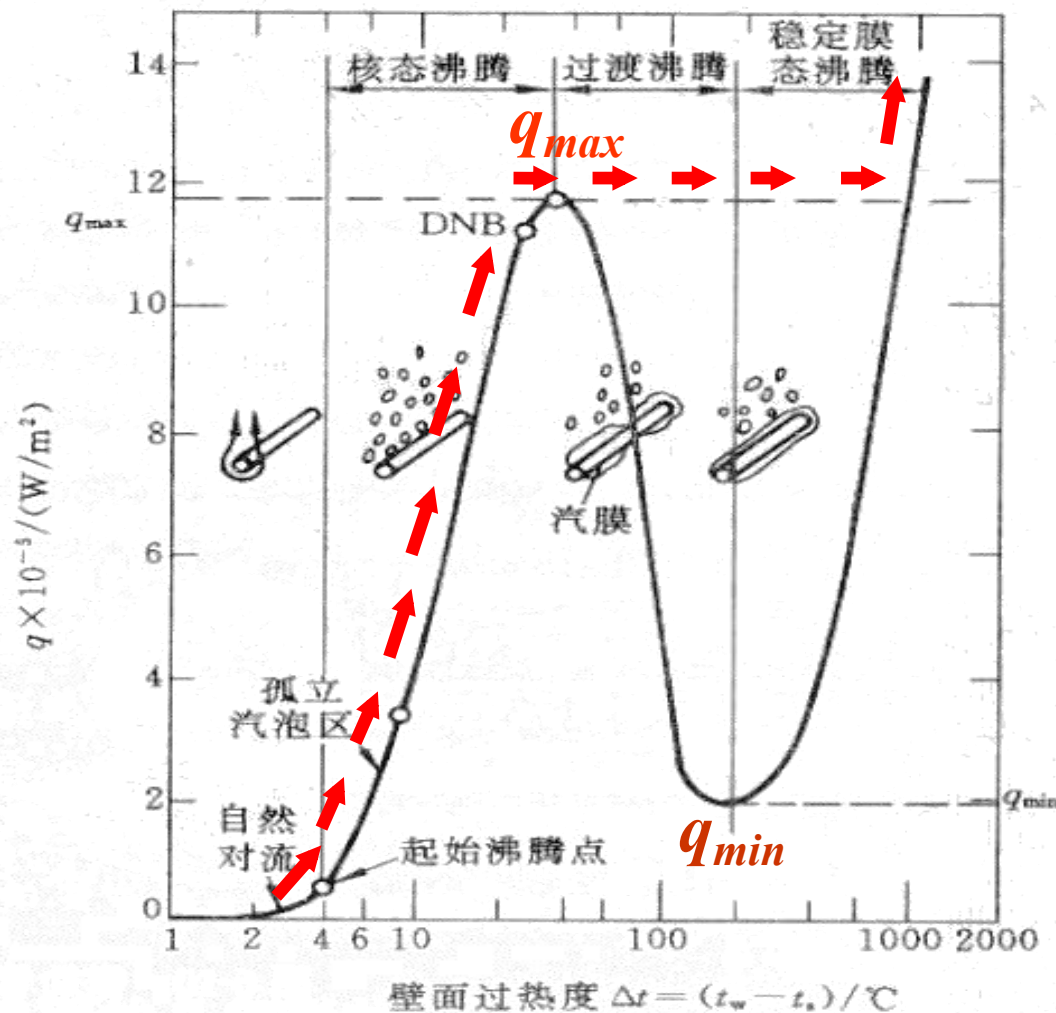


过渡沸腾

Transitional boiling regime



膜态沸腾  
film boiling



## 1 曲线

(1) 自然对流

(2) 核态沸腾

孤立汽泡区

汽块区

(3) 过渡沸腾

(4) 膜态沸腾

## 2 工程指导

临界热流密度(Critical Heat Flux)  $q_{max}$  及相对应的过热度  $\Delta t$  具有重要的意义

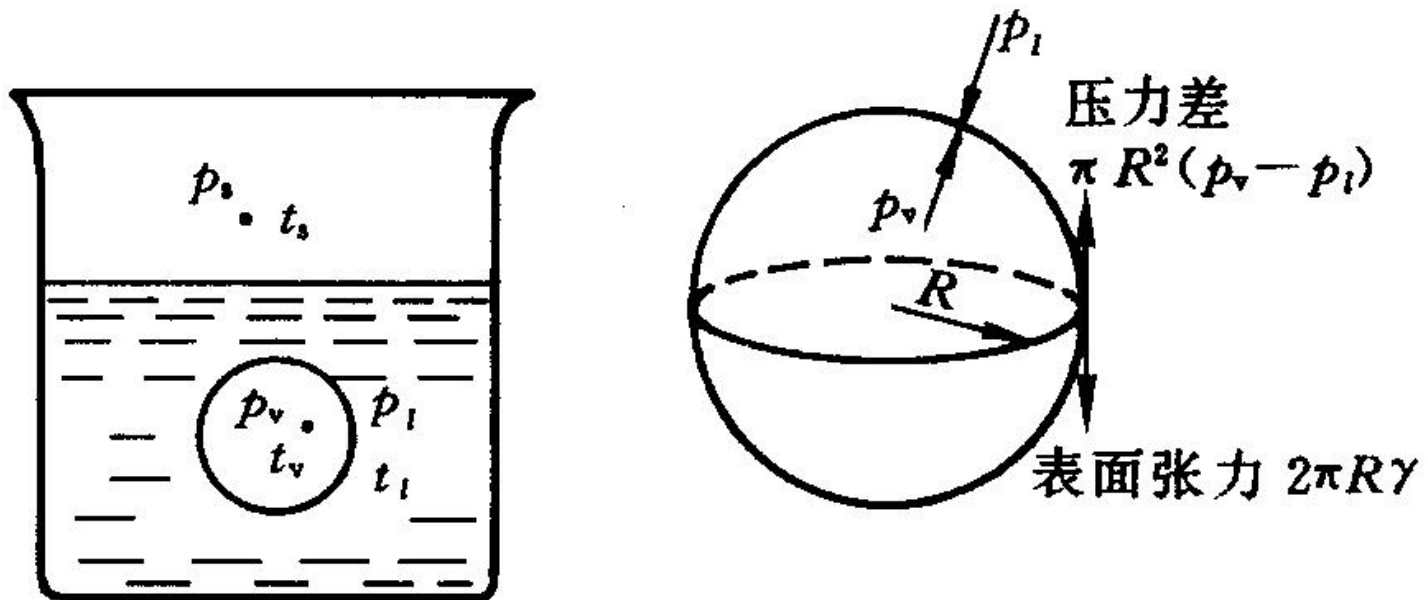
(1) 对于热流密度可以控制的情况

(2) 对于壁温可以控制的情况



### 三 汽泡动力学简介

汽泡的产生、成长、脱离过程

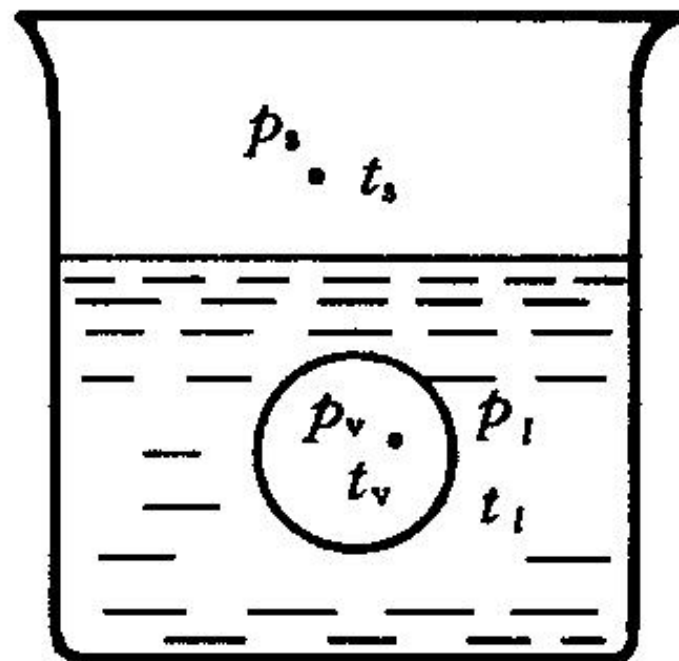


## 1 液体必须过热

表面张力=汽泡内外压力差

$$2\pi R\gamma = (p_v - p_l) \cdot \pi R^2$$

$$R = \frac{2\gamma}{(p_v - p_l)} \quad p_l \approx p_s$$



$$\begin{aligned} \longrightarrow & \quad t_v > t_s \\ & \quad t_l = t_v \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad t_l > t_s \quad t_w - t_s$$

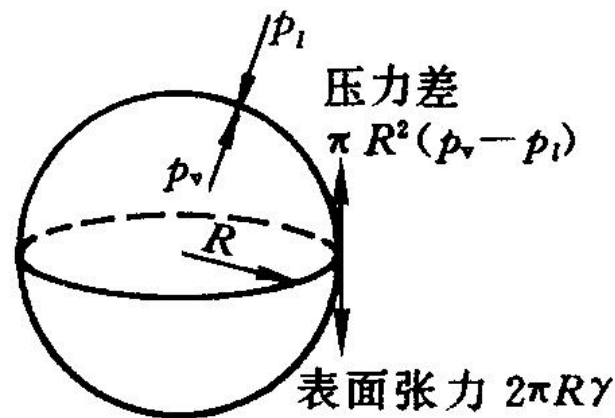
## 2 汽化核心

加热表面上凹坑、裂穴最有可能成为汽化核心

这些地方的过热度要保证

$$2\pi R\gamma = (p_v - p_l) \cdot \pi R^2$$

$$R \geq \frac{2\gamma}{(p_v - p_l)}$$

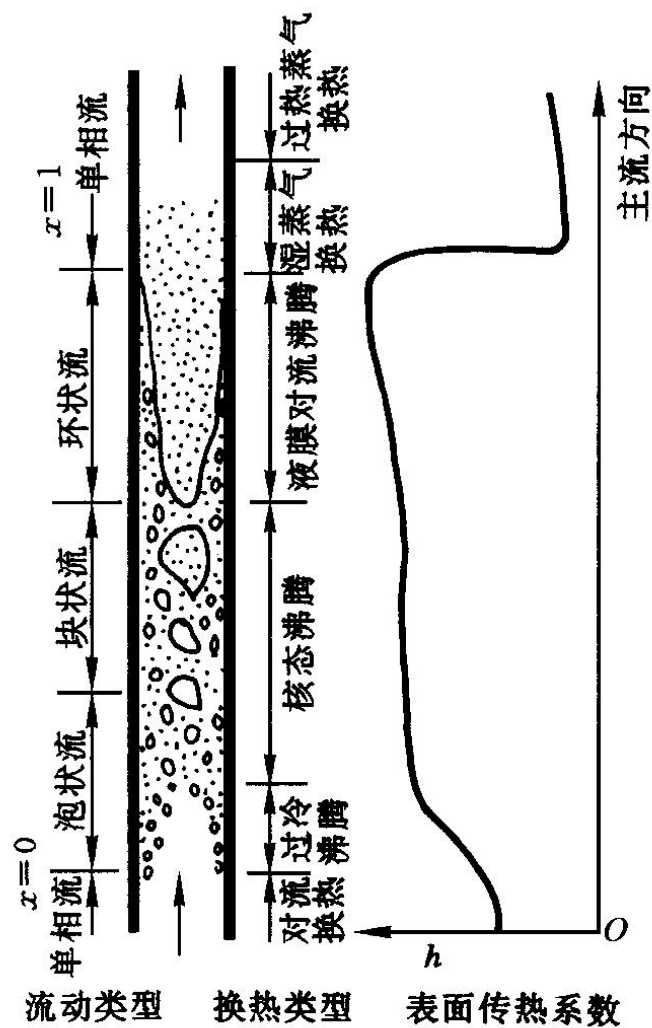


## 4 沸腾传热的数学模型

目前传热学研究的热点之一！

Aggressive      Creative  
Self-motivated

## 四 管内沸腾简介



## § 7-5 沸腾换热计算式

沸腾换热也是对流换热的一种，因此，牛顿冷却公式仍然适用，即

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

影响因素太多！

## Rohsenow公式—适用性广

$$Ja = f(Re, Pr)$$

$$Ja^{-1} = C_{wl} \cdot Re^{0.33} \cdot Pr_l^s$$

$$Ja = \frac{r}{C_{pl} \cdot \Delta t}$$

$$Re = \frac{q}{\eta_l r} \sqrt{\frac{r}{g(\rho_l - \rho_v)}}$$

$$Pr_l = \frac{C_{pl} \eta_l}{\lambda_l}$$

$$\Delta t = t_w - t_s$$

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6)

$q$  — 沸腾传热的热流密度

$s$  — 经验指数

水 $s = 1$ , 否则 $s = 1.7$

上式可以改写为：

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

可见， $q \sim \Delta t^3$ ，因此，尽管有时上述计算公式得到的 $q$ 与实验值的偏差高达 $\pm 100\%$ ，但已知 $q$ 计算 $\Delta t$ 时，则可以将偏差缩小到 $\pm 33\%$ 。



## 3 制冷介质饱和核态沸腾的Cooper公式

$$h = Cq^{0.67} M_r^{-0.5} p_r^m (-\lg p_r)^{-0.55}$$

$$C = 90 W^{0.33} / (m^{0.66} \cdot K)$$

$$m = 0.12 - 0.2 \lg \{R_p\}_{\mu m}$$

$M_r$ —液体的分子量

$C$ —常数

$p_r$ —液体压力与该流体邻界压力之比

$R_p$ —加热表面粗糙度  $\mu m$

## 二 大容器沸腾的临界热流密度

书中推荐适用如下经验公式：

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

## 三 大容器膜态沸腾的关联式

不要求！

## 四 说明

- 1 研究最不彻底！
- 2 实验结果与关联式之间偏差很大！
- 3 研究热点！

## § 7-6 影响沸腾换热的因素

最复杂

影响因素最多

关联式之间、实验结果与关联式之间

只针对大容器沸腾换热

重点：沸腾换热的强化

## 一 不凝结气体

与膜状凝结换热不同，液体中的不凝结气体会使沸腾换热得到某种程度的强化

## 二 过冷度

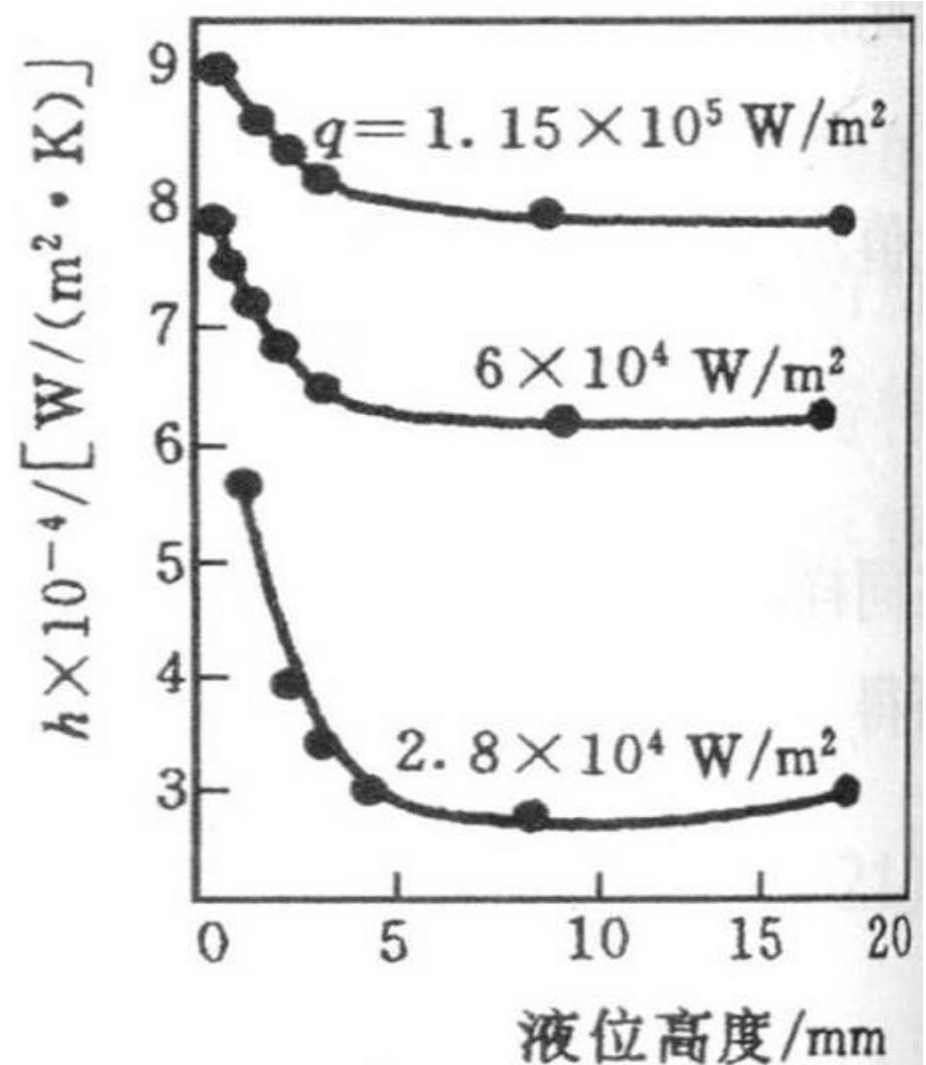
液体平均温度小于饱和温度  $t_s$  时发生的沸腾现象

在核态沸腾的起始阶段，自然对流占主导地位

## 三 液位高度

液位低于一定高度时，表面传热系数会明显地随液位的降低而升高；液位高于此高度时时，沸腾换热表面传热系数与液位高度无关。

### 临界液位



图中介质为一个大气压下的水38

## 四 重力加速度

随着航空航天技术的发展，超重力和微重力条件下的传热规律得到蓬勃发展，但目前还远没到成熟的地步，就现有的成果表明：

从 $0.1 \sim 100 \times 9.8 \text{ m/s}^2$  的范围内， $g$ 对核态沸腾换热规律没有影响，但对自然对流换热有影响。

## 五 沸腾表面的结构 ✓

1 强化换热思路：汽化核心

2 方法

(1) 物理化学手段

用烧结、钎焊、火焰喷涂、电离沉积等

(2) 机械加工方法

3 几种典型的强化表面



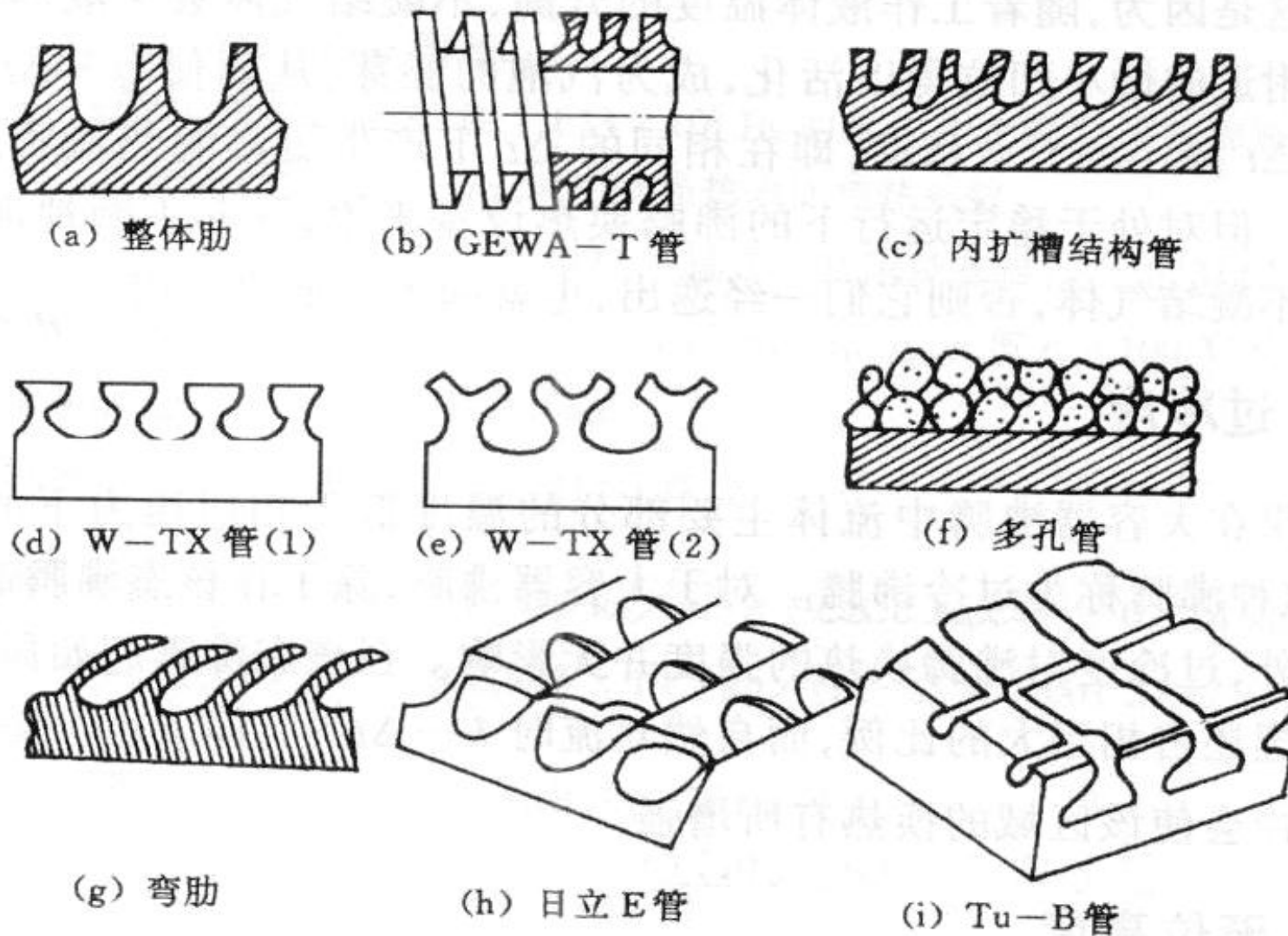
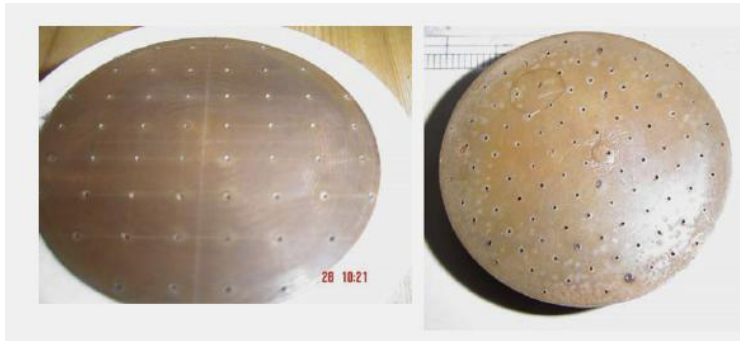
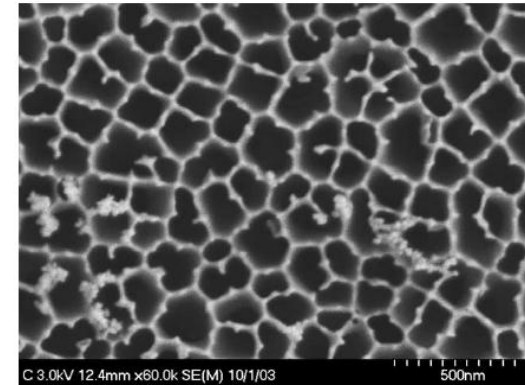


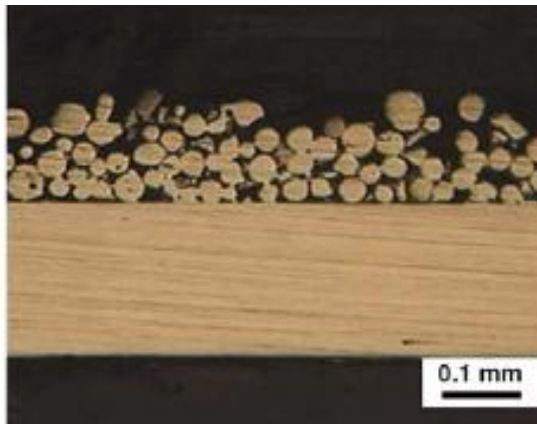
图 6-17 沸腾换热强化管表面结构示意



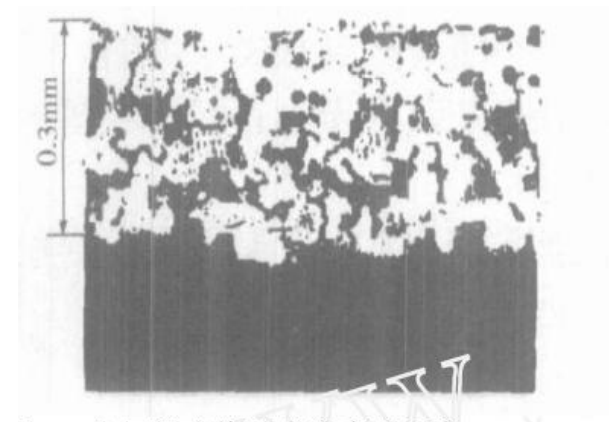
微孔沸腾表面



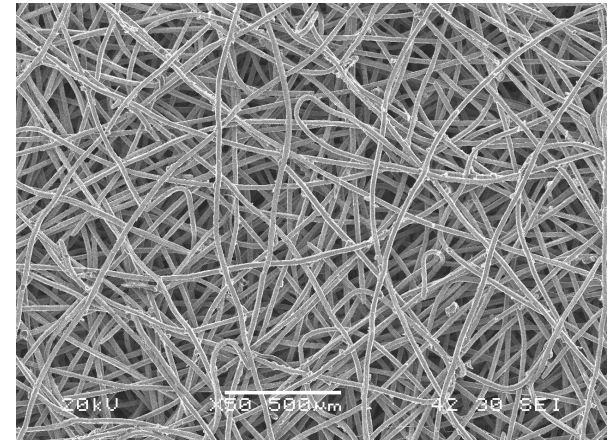
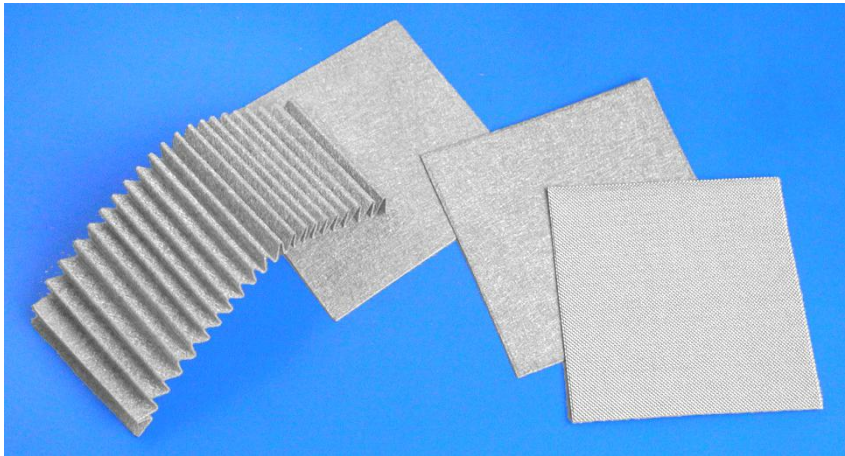
纳米喷涂多孔层



微米喷涂多孔层



金属粉末烧结多孔面



金属纤维毡表面