

## 山西能源学院教案

授课班级\_\_\_\_\_ 授课时间\_\_\_\_\_ 计 2 学时

课题（章节及内容）	7.4 沸腾传热的模式、7.5 大容器沸腾传热的实验关联式
教学目的和要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 了解沸腾换热的种类与特点；</li> <li>2. 理解大空间饱和沸腾过程与沸腾曲线，了解饱和沸腾机理；</li> <li>3. 掌握沸腾换热准则关联式的使用方法；</li> <li>4. 了解影响沸腾及增强换热的措施。</li> </ol>
重点难点	饱和沸腾过程与沸腾曲线。沸腾换热计算公式。
教学进程（含课堂教学内容、教学方法、辅助手段等）	<p>教学内容：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 大空间沸腾、有限空间沸腾、饱和沸腾、过冷沸腾。</li> <li>2. 饱和沸腾过程与沸腾曲线。</li> <li>3. 饱和沸腾机理，沸腾换热计算公式，影响凝结和沸腾换热的各因素及增强换热的措施。</li> <li>4. 管内沸腾换热概述。</li> </ol> <p>教学方法：讲授与练习、启发讨论、诱导式、归纳总结法。</p>
作业布置	习题 7-22 ， 7-23
主要参考资料	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 杨世铭 陶文铨，《传热学》（第四版），高等教育出版社，2006.</li> <li>2. 章熙民、任泽霈等，《传热学》，中国建筑工业出版社，2014.</li> </ol>
课后自我总结分析	<p>在课堂教学中穿插一些生活实例. 用力知学知识进行解释. 使学生从根本上清楚原因，会提高学生的学习兴趣。</p>

# 山西能源学院教案

## 7.4 沸腾传热的模式

沸腾与前面介绍的凝结正好是正反两个过程

实例：蒸汽锅炉、做饭、蒸发器中制冷剂换热过程等

定义：

沸腾：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

沸腾换热：指工质通过气泡运动带走热量，并使其冷却的一种传热方式

### 一、 沸腾换热的分类

#### 1. 按流动动力分

a). 大容器(或池)沸腾(Pool boiling)：加热壁面沉浸在有自由表面液体中所发生的沸腾。

b). 强制对流沸腾(Forced convection boiling)：液体在外力的作用下，以一定的流速流过壁面时所发生的沸腾换热。工业上的沸腾换热多属于此。

例如冰箱的蒸发器。自然循环锅炉蒸发受热面

### 三、大容器饱和沸腾曲线

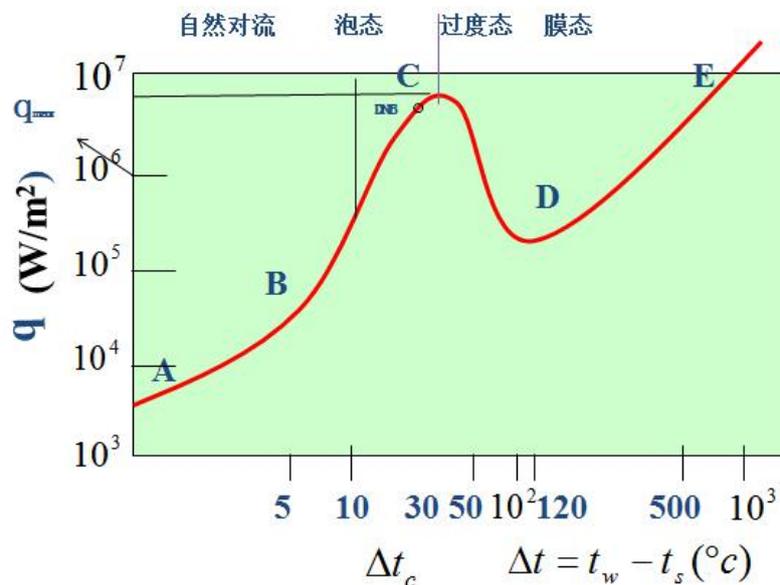


图 7-14 大空间沸腾曲线

#### 1. 四个区域(饱和沸腾曲线)

A-B 区  $\Delta t < 4^\circ\text{C}$  自然对流：过热液体对流到自由液面后蒸发

B-C 核态沸腾区

B 孤立汽泡区：汽泡彼此不干扰, 对液体扰动大, 换热强

C 汽块区：扰动更强  $q$  上升

C-D 过渡沸腾：汽泡迅速形成, 许多汽泡连成一片, 在壁面上形成一层汽膜, 汽膜的导热系数低,  $q$

D-E 稳定膜态沸腾：汽泡的产生和脱离速度几乎不变, 在壁面上形成稳定的汽膜,  $\delta$  和  $h$  几乎是常数;  $q = h \Delta t$ ;  $\Delta t \uparrow \quad q \uparrow$

2. 临界热通量 (热流密度):

恒热流 (加热)  $q = \text{const.}$  如电加热器、对冷却水加热的核反应堆。热流密度与换热条件无关。一旦热流密度超过峰值, 工况将沿  $q_{\text{max}}$  虚线跳至稳定膜态沸腾线,  $\Delta t$  将猛升至近  $1000^\circ\text{C}$ , 可能导致设备的烧毁, 所以亦称烧毁点 (Burnout point)。

在烧毁点附近有个  $q$  上升缓慢的核态沸腾的转折点 DNB (即偏离核态沸腾规律) 点。它作为监视接近  $q_{\text{max}}$  的警戒, 是很可靠的。因为一旦  $q$  超过转折点之值, 就可能导致膜态沸腾, 在相同的壁温下使换热量大大减少。

二、汽泡动力学简介:

在核态沸腾区, 汽泡扰动对换热起支配作用, 汽泡产生在汽化核心, 对汽化核心产生的条件以及汽化核心与壁面过热度的依变关系的分析, 将有助于我们对核态沸腾现象及换热规律的理解。

壁面的凹缝、裂穴最可能成为汽化核心, 这些凹穴中的残留的气体 (包括蒸气), 由于液体表面张力的原因, 很难彻底逐出, 它们就成为孕育新生汽泡的有利场所。

1. 下面对汽化核心的形成作一番分析假设在流体中存在一个球形汽泡, 它与周围液体处于力平衡和热平衡条件下。

①力平衡 由于表面张力的作用, 汽泡内的压力必然大于汽泡外的压力。汽泡内外压差与汽液界面上的表面张力平衡:

②热平衡界面内外的温度相等。即  $t_v(p_v) = t_L$

贴壁处液体具有最大过热度  $t_w - t_s$ , 加上凹穴处有残留气体, 壁面凹处最先能满足汽泡生成的条件。

综上所述: ①在一定壁面过热度条件下, 壁面上只有满足式 (7-15) 条件的那些地方, 才能成为工作的汽化核心。②随着壁面过热度的提高, 压差  $p_v - p_s$  值越来越高, 汽泡的平衡半径  $R$  将递减。因此, 壁温  $t_w$  提高时, 壁面上越来越小

的存气凹穴处将成为工作的汽化核心，从而汽化核心数随壁面过热度的提高而增加。

## 2. 沸腾换热的基本观点

关于加热表面上汽化核心的形成及关于汽泡在液体中的长大与运动规律的研究，无论对于掌握沸腾换热的基本机理以及开发沸腾换热的表面都具有十分重要的意义。在沸腾表面上的微小凹坑最易产生汽化核心是沸腾换热理论的基本观点。近几十年来强化沸腾换热的研究主要是按照这一思路进行的。

## 三、管内沸腾简介

### 锅炉水冷壁

管内强制对流沸腾时，由于产生的蒸气混入液流，出现多种不同形式的两相流结构。换热机理很复杂

在管内沸腾中，最主要的影响参数是蒸气的干度、质量流量和压力。

## 7.5 大容器沸腾传热的实验关联式

### 一、大容器饱和核态沸腾

影响核态沸腾的因素主要是：

壁面过热度

汽化核心数（复杂）：受到壁面材料及其表面状况、压力、物性等影响

1. 对于水，米海耶夫推荐的在  $105-4 \times 10^6$  Pa 压力下大容器饱和沸腾的计算式为： $h = 0.1224 \Delta t^{2.33} p^{0.5}$

由  $q = h \Delta t$ ，消去  $\Delta t$   $h = 0.5335 q^{0.7} p^{0.15}$

2. 基于核态沸腾换热主要是汽泡高度扰动的强制对流换热的设想，推荐以下适用性广的实验关联式罗森诺公式：

$$\frac{c_{pl} \Delta t}{r} = C_{wl} \left[ \frac{q}{\mu_l r \sqrt{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.33} Pr_1^s$$

表 6-1 各种表面-液体组合情况的  $C_{wl}$  值

表面-液体组合情况	$C_{wl}$
水-铜	
烧焦的铜	0.0068
抛光的铜	0.0130
水-黄铜	0.0060
水-铂	0.0130
水-不锈钢	
磨光并抛光的不锈钢	0.0060
化学腐蚀的不锈钢	0.0130
机械抛光的不锈钢	0.0130
苯-铬	0.101
乙醇-铬	0.0027

该式还可以改写成以下便于计算的形式

$$q = \mu_l r \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left( \frac{c_{pl} \Delta t}{C_{wl} r Pr_1^s} \right)^3$$

3. 制冷介质，库珀(Cooper)公式目前用得较多

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

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

$$m = 0.12 - 0.21 \lg \{R_p\}_{\mu m}$$

中：Mr 为液体的分子量；pr 对比压力（液体的压力与其临界压力之比；Rp 为表面粗糙度。

二、大容器沸腾的临界热流密度

应用汽膜的泰勒不稳定性原理导得大容器沸腾的临界热流密度的半经验公式：

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

三、大容器膜态沸腾的关联式

膜态沸腾中，汽膜的流动和换热在许多方面类似于膜状凝结中液膜的流动和换热，适宜用简化的边界层作分析。对于横管的膜态沸腾，有以下公式：

$$h = 0.62 \left[ \frac{gr\rho_v(\rho_l - \rho_v)\lambda_v^3}{\eta_v d(t_w - t_s)} \right]^{1/4}$$