

# 沸 腾 炉 讲 义

劳动总局锅炉局锅炉检验人员学习班

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 前 言 .....                   | 1  |
| 第一章 沸腾炉基本原理 .....           | 3  |
| §1.1 沸腾床的形成 .....           | 3  |
| §1.2 沸腾床的空气动力特性 .....       | 5  |
| §1.3 正常沸腾工况 .....           | 13 |
| §1.4 不正常沸腾工况 .....          | 14 |
| 第二章 沸腾床燃烧机理 .....           | 17 |
| §2.1 点燃过程分析 .....           | 17 |
| §2.2 沸腾床燃烧 .....            | 19 |
| §2.3 沸腾床的气体动力特性 .....       | 27 |
| §2.4 沸腾床燃烧机理 .....          | 30 |
| 第三章 沸腾床传热机理 .....           | 32 |
| §3.1 表面更新——穿透理论 .....       | 32 |
| §3.2 两相流化传热理论 .....         | 33 |
| §3.3 沸腾床传热系数 .....          | 34 |
| §3.4 沸腾床传热计算 .....          | 39 |
| 第四章 沸腾炉的水循环 .....           | 42 |
| §4.1 沸腾炉水循环的特点 .....        | 42 |
| §4.2 沸腾炉倾斜受热面水循环系统的设计 ..... | 42 |
| §4.3 沸腾炉变工况时的水循环特性 .....    | 53 |
| §4.4 高压大容量电站沸腾炉的水循环 .....   | 55 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第五章 沸腾床的结构 .....             | 58  |
| §5.1 配风装置 .....              | 58  |
| §5.2 给煤装置 .....              | 62  |
| §5.3 除渣装置 .....              | 64  |
| §5.4 受热面布置 .....             | 65  |
| 第六章 沸腾炉的启动和运行 .....          | 68  |
| §6.1 沸腾床的点燃 .....            | 68  |
| §6.2 沸腾炉的运行控制 .....          | 73  |
| §6.3 沸腾炉的负荷调节 .....          | 75  |
| §6.4 运行注意事项 .....            | 78  |
| 第七章 沸腾炉的安全和劳动保护问题 .....      | 80  |
| §7.1 磨损问题 .....              | 80  |
| §7.2 沸腾床结构与操作问题 .....        | 84  |
| §7.3 脱硫降 $\text{NO}_x$ ..... | 85  |
| 第八章 国外沸腾炉情况简介 .....          | 89  |
| §8.1 美国沸腾炉发展概况 .....         | 94  |
| §8.2 英国沸腾炉发展概况 .....         | 95  |
| §8.3 西德沸腾炉发展概况 .....         | 98  |
| §8.4 日本沸腾炉发展概况 .....         | 100 |
| 参考文献 .....                   | 101 |

## 前 言

流态化技术是在本世纪初才使用于工业生产的一项新技术。以往只是用于石油化工方面，直到 50 年代以后才把这项技术引用到锅炉燃烧方面来。因其具有强化燃烧，强化传热的优点，并能满足多种煤燃烧的要求，尤其是能燃用其他燃烧方式目前尚无法使用的多灰低热值的各种劣质煤，在能源紧张的今天，已有越来越多的国家开展了此项技术的试验研究工作。

概括地说，沸腾炉有如下一些优缺点：

1. 沸腾燃烧能强化燃烧，其燃烧强度可达  $2.7 \times 10^6$  大卡/米<sup>2</sup> 时以上。

2. 沸腾床中高温固体颗粒与管壁直接接触传热，沉浸在沸腾层中的管子的传热系数可达  $200 \sim 460$  大卡/米<sup>2</sup>·时·°C。

3. 因而所需受热面管子可减少，节省管材、炉膛高度可降低，使设计制造便于组合化和系列化。

4. 有一个高温沸腾床，使进入的煤颗粒易于着火燃烧，且煤颗粒在沸腾床内上下翻腾，停留时间较长。故沸腾锅炉可燃用多种煤，特别是一些发热值低含灰量高的劣质煤，在煤粉炉中难以着火燃烧，而在沸腾炉中仍可正常燃烧。使设计制造便于通用化，标准化。

5. 沸腾炉中烧煤粒而不是煤粉，可减少磨煤费用。但烟风阻力大，风机压头高，故风机电耗增加。

6. 沸腾炉内受热面和炉墙受到灰粒的撞击冲刷磨损严重，若不采取防磨措施，对炉子的安全运行是个威胁。

7. 沸腾床中细颗粒与飞灰易被烟气流带走，造成机械不完全燃烧热损失；沸腾床表面的高温料层颗粒从溢流口排出，造成物理损失。故需要采取飞灰回燃，灰渣余热利用等提高效率的措施。

8. 一般沸腾床运行温度较低（相对常规锅炉而言），约为  $850 \sim 950^\circ\text{C}$  左右，这个温度适应于加石灰石脱硫，且又不易生成氧化氮，对减少大气污染有利。

国外对沸腾炉的试验研究工作投入的人力物力越来越多，从基础理论到实际应用，由实验室研究到工业性试验，兴趣日益浓厚，并且各国相互间开展技术与协作。还定期召开国际会议，以推动试验研究工作。

我国从60年代中期以来，为了充分利用劣质煤资源，各地改建和新建的沸腾炉如雨后春笋，数量极为可观，在工农业生产中发挥了积极作用。

但是各地情况不同，技术水平也相差悬殊，在质量上和安全上暴露出不少问题，应尽快予以解决。

本讲义将扼要地介绍有关沸腾炉的基础知识，包括沸腾炉的基本原理、燃烧机理、传热机理、水循环原理及沸腾炉的运行特点。从而了解其质量问题和安全问题的原因所在，并介绍一些相应的解决措施。最后把国外沸腾炉试验研究的情况作一概括性的介绍，以掌握沸腾炉的发展动向。

本讲义的目的在于使学员了解沸腾炉与一般常规锅炉的不同之处，在安全监察工作中需要注意的特殊方面，从而加强这方面的管理。



## 第一章 沸腾炉基本原理

我们若要掌握沸腾炉，首先要了解沸腾床形成的原理，学习一些基本概念。本章将从分析颗粒的运动入手，说明沸腾床是如何形成的，它有怎样的空气动力特性和阻力特性，进而可知怎样维持正常的沸腾工况和避免异常情况出现。

### § 1.1 沸腾床的形成

#### 1.1.1 燃料在炉膛中的几种运动方式

固体燃料在锅炉中的运动方式是由燃烧方式决定的。即对应于粉状燃烧、沸腾燃烧、层状燃烧而有随风飘动、翻腾运动和固定不动几种状态，也就是气力输送态、沸腾态和固定态。

煤粉炉是把煤磨制成小于 0.1 毫米的煤粉，用一次风把它吹入炉膛，然后再用二次风使煤粉与空气得到更好的混合。煤粉在炉膛内基本上是随风飘动，煤粉与空气之间的相对速度趋近于零。

层燃炉是把几毫米至几十毫米的煤块静置在金属炉排上。煤块之间无相对运动，送入的空气从炉排下吹出，穿过固定不动的煤块提供氧气。

沸腾炉则介于上述两种锅炉之间。把煤块破碎成 6~8 毫米以下的颗粒送入炉内。从布风板向上吹出的空气使煤粒在一定高度的空间内上下翻腾运动，煤粒之间及煤粒与空气间相对运动激烈，且煤粒在沸腾床中停留时间较长。

#### 1.1.2 煤粒在沸腾床中的运动

悬浮在沸腾床中的煤粒受到两个力的作用，一是煤粒自身的重力  $G$ ，另一是气流对它的浮升力  $F$ 。其大小可分别用下式表示：

$$G = V_{\text{煤}} \cdot \gamma_{\text{煤}} \quad \text{公斤} \quad (1-1)$$

$$F = \frac{\xi}{2.9} \gamma_{\text{气}} f_{\text{煤}} (w_{\text{气}} - w_{\text{煤}})^2 \quad \text{公斤} \quad (1-2)$$

式中  $V_{\text{煤}}$  煤粒的体积, 米<sup>3</sup>  
 $\gamma_{\text{煤}}$  煤粒的比重, 公斤/米<sup>3</sup>  
 $\varepsilon$  气流对煤粒的阻力系数  
 $\gamma_{\text{气}}$  气体的比重, 公斤/米<sup>3</sup>  
 $f_{\text{煤}}$  煤粒的迎风面积, 米<sup>2</sup>  
 $w_{\text{气}}$  气体的速度, 米/秒  
 $w_{\text{煤}}$  煤粒运动速度, 米/秒  
 $g$  重力加速度, 9.81 米/秒<sup>2</sup>

若假定煤粒是球形的, 则可得:

$$\frac{G}{F} = \frac{gd_{\text{煤}}}{3\varepsilon} \frac{\gamma_{\text{煤}}}{\gamma_{\text{气}}} (w_{\text{气}} - w_{\text{煤}})^{-2} \quad (1-3)$$

当  $\frac{G}{F} > 1$ , 则煤粒下落或同板上静止不动;  $\frac{G}{F} = 1$ , 则煤粒处于平衡状态, 在气流中浮动, 不下落也不飞走, 在一定的空间内自由运动, 呈沸腾状态; 当  $\frac{G}{F} < 1$ , 则煤粒被风吹走, 成为气力输送。

从 (1-3) 式可知, 煤粒的运动状态是与煤粒的直径和比重、气体的速度和比重及煤粒自身运动速度等因素有关。对某个煤粒而言, 它在床内所处位置不同, 局部气流速度不同, 它本身的运动速度也不同, 则  $\frac{G}{F}$  的数值就不断变化; 而且煤粒形状不规则, 迎风面积改变, 阻力系数  $\varepsilon$  随之变化; 煤粒之间还要互相碰撞造成附加的作用力。这种种复杂因素使得煤粒的受力状态瞬间即变, 煤粒的运动呈现出杂乱无章的“沸腾”状态。

### 1.1.3 固定床向沸腾床转变

在布风板上静置的料层, 随着进风量的增大, 将从固定床转变为沸腾床。

从图 1.1 所示的沸腾床特性曲线可见, 当床截面风速在  $0 \sim \omega'$  之间的范围内, 随着风速增大, 气体通过料层的真实速度  $C$  和料层阻

力  $\Delta P$  都随之增大。但这时气流所造成的浮力尚小于炉料的重量，料层静止不动，料层高度不变，称之为固定床。火床炉就是这种情形。

当床截面风速在  $w' \sim w''$  之间的范围内，即当风速超过临界沸

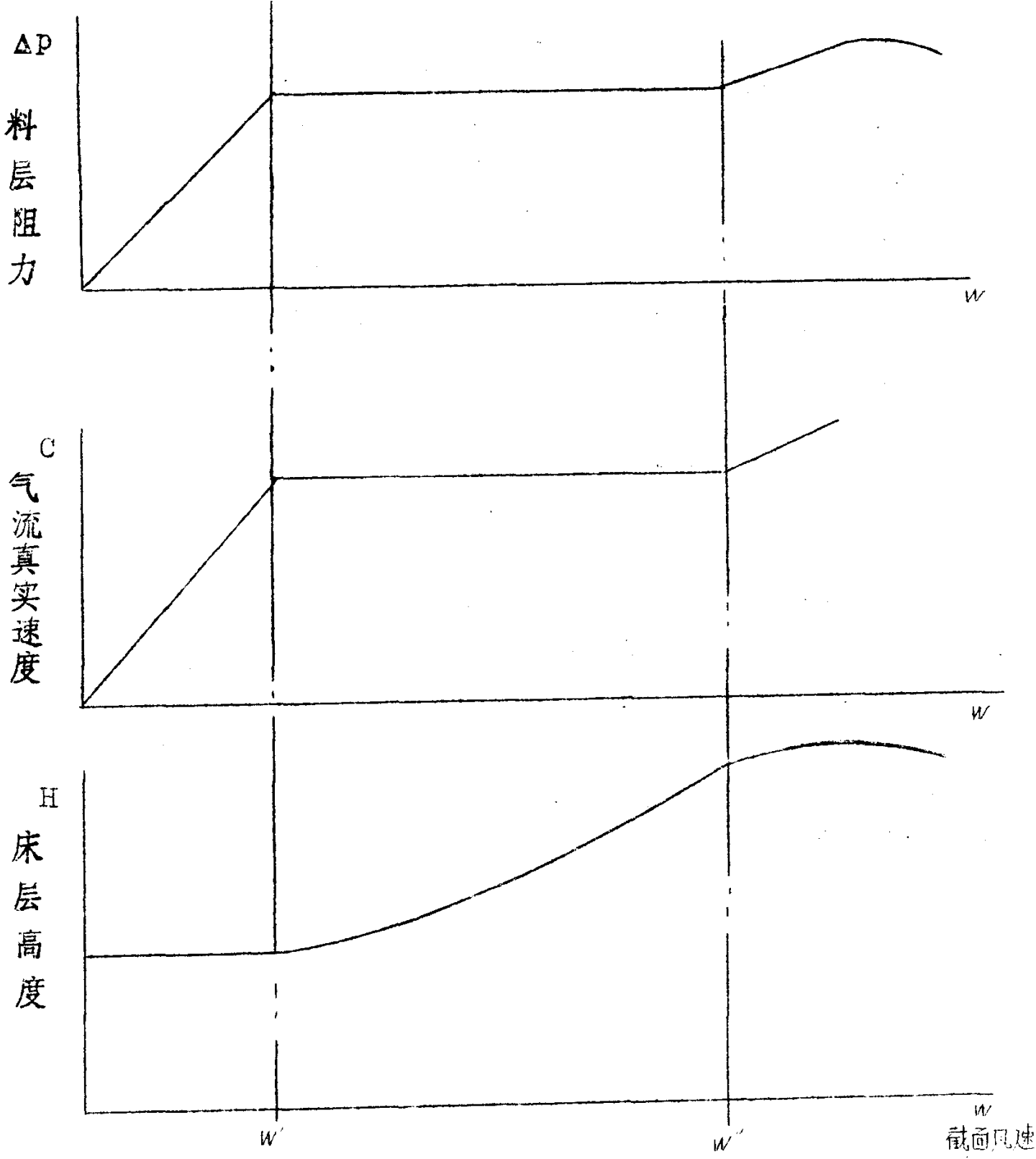


图 1.1 沸腾床特性曲线



騰风速  $\omega'$  之后, 气流的真实速度  $C''$  和料层阻力  $\Delta P$  保持不变, 这时气流的浮力和料层颗粒的重力相平衡, 料层膨胀, 床层高度随之增高。这时料层呈沸腾状态。床层具有液体的流动性並有一个数似液体的清晰的界面。随着风速增大, 料层膨胀, 颗粒之间的间隙增大, 使料层内气流的有效流通截面变大了, 故而颗粒之间气流的真实速度並沒有增大, 料层阻力也就不会增加。多余的空气是以气泡形式逃离床层。在运行时, 司炉就可用此阻力特性 ( $\Delta P$  不随  $\omega$  变化) 来判断料层是否达到沸腾状态。这是沸腾床燃烧的一个重要的空气动力特性。

当截面风速大于飞出速度  $\omega''$  时。料层的沸腾状态遭到破坏, 料层颗粒被风带走, 呈气力输送状态。随着风速增大, 气流真实速度  $C$  和料层高度  $H$  都成比例增大, 而料层阻力则因颗粒被带走而下降。

## § 1.2 沸腾床的空气特性

以上定性地讲了沸腾床的特性曲线, 由此分析了沸腾床的形成过程。本节再对沸腾床的空气动力特性作一定量的分析。

### 1.2.1 颗粒的平均当量直径

我们若使用不同的煤种或不同的破碎方式, 所得到的煤粒的形状和大小就不一样。在沸腾炉中通常用的是 0—8 毫米范围的宽筛分煤粒。而我们在归纳整理试验数据时, 则是用球形颗粒来计算的。故而必须把宽筛分的、大小不同、形状各异的煤粒折算得出一个球形的具有代表性的平衡当量直径。下面试以一组实测数据为例来说明当量直径的计算方法。

---

注: 1) 穿过床料间隙的气流速度

表 1.1 煤碱石筛分特性表

| 筛分范围,毫米                    | 15-10  | 10-7   | 7-4  | 4-2.5  | 2.5-1  | 1-0.5  | 0.5-0.25 | 0.25-0.09 | 0.09-0 |
|----------------------------|--------|--------|------|--------|--------|--------|----------|-----------|--------|
| 平均颗粒直径<br>$\bar{d}_i$ , 毫米 | 12.25  | 8.37   | 5.29 | 3.16   | 1.58   | 0.71   | 0.35     | 0.15      | 0      |
| 筛分比 $X_i$ , %              | 0.38   | 6.62   | 9.83 | 12.64  | 23.60  | 17.40  | 12.24    | 12.03     | 5.26   |
| $X_i d_i$ , 毫米             | 0.0465 | 0.5541 | 0.52 | 0.3994 | 0.3729 | 0.1235 | 0.0428   | 0.018     | 0      |
| 平均当量直径<br>$d_{cp}$ , 毫米    | 2.077  |        |      |        |        |        |          |           |        |

用上述数据可得出其颗粒分布曲线如图 1-2 所示。图中的矩形面积代表筛上残留物的百分数  $X_i$ ，矩形水平部分中点即为筛上残留物的平均直径  $\bar{d}_i$ 。令  $\bar{d}_i = \sqrt{d_i \cdot d_{i+1}}$ ，则煤样的平均颗粒直径  $d_{cp}$  可表示为：

$$R(d_i) \text{ } d_{\text{平均}} = \sum X_i \bar{d}_i$$

毫米

$$(1-4)$$

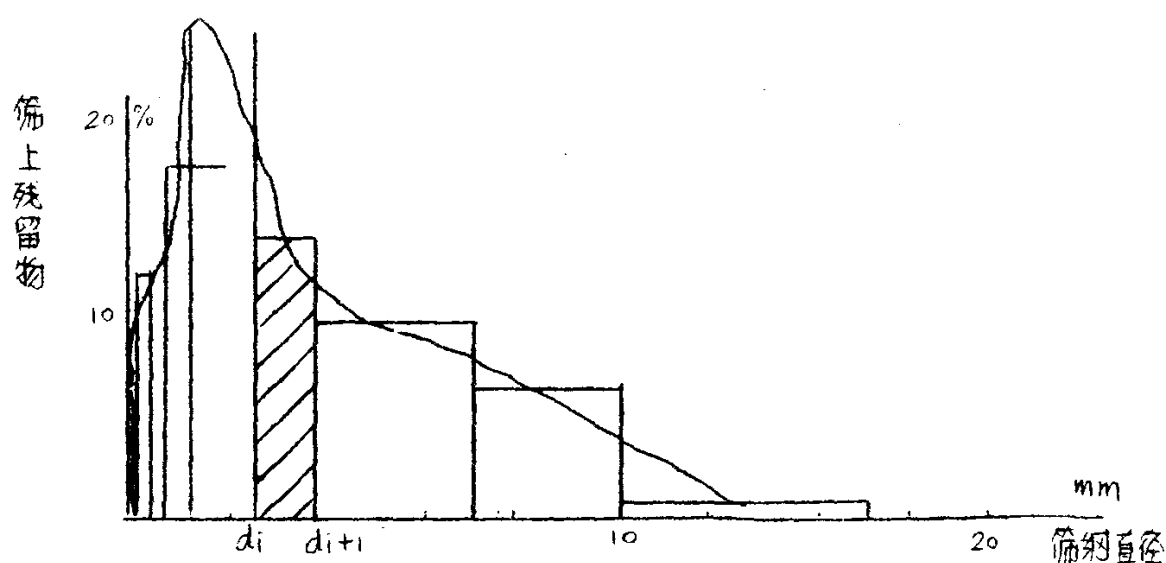


图 1-2 颗粒分布曲线

再把  $d$  平均乘以形状系数  $\phi$  就得到相当于球形颗粒的平均当量直径。

$$d_{\text{当量}} = \phi d_{\text{平均}} \quad \text{毫米} \quad (1-5)$$

形状系数  $\phi$  定义为与形状不规则的颗粒直径相同的球形表面积  $S_{\text{球}}$  与形状不规则颗粒的表面积  $S$  之比的平方根，即为：

$$\phi = \sqrt{\frac{S_{\text{球}}}{S}} \quad (1-6)$$

$\phi$  值小于 1。颗粒越接近球体，则其  $\phi$  值越接近于 1。一般煤粉的  $\phi$  值为 0.63—0.7，煤碱石的  $\phi$  值为 0.58~0.6。

### 1.2.2 临界沸腾速度

当风速增大到一定数值，它对直径  $d$  的颗粒产生的浮力等于颗粒的自重时，该风速称为颗粒的临界沸腾速度  $u'$ 。

对整个沸腾床来说，当床截面平均流速  $\omega_{\text{床}}$  达到某一数值时，料层开始从固定状态转变到沸腾状态。这一速度称为床料的临界沸腾速度  $\omega'$ 。

许多学者在各种条件下得出了计算临界沸腾速度的公式，也可用

实测的办法得出沸腾床的临界沸腾速度。

为了方便地整理大量的试验数据，通常都用无因次准则数及准则方程式来表达。

目前应用较广的是费道罗夫的公式，他是从流体作用在固体颗粒上力的平衡方程式出发，经过试验得出的：

$$R'_e = 0.095 F_e^{1.56} \quad (1-7)$$

式中  $R'_e$  气流速度为临界沸腾速度时的雷诺准则数

$$R'_e = \frac{\omega' \cdot d_{\text{当量}}}{\nu} \quad (1-8)$$

$F_e$  费道罗夫准则，在上式中  $40 \leq F_e \leq 200$ ，

$$F_e = d_{\text{当量}} \sqrt[3]{\frac{4}{3} \frac{g}{\nu^2} \left( \frac{\gamma_{\text{煤}}}{\gamma_{\text{气}}} - 1 \right)} \quad (1-9)$$

$\nu$  空气的运动粘性系数 米<sup>2</sup>/秒

$\gamma_{\text{煤}}$  煤粒的真比重 公斤/米<sup>3</sup>

$\gamma_{\text{气}}$  空气的比重 公斤/米<sup>3</sup>

$g$  重力加速度，9.81米/秒<sup>2</sup>

浙江大学对石煤沸腾炉进行冷态和热态试验，得出如下公式：

$$R_e = 0.0882 A_\gamma^{0.528} \quad (1-10)$$

式中  $A_\gamma$  阿基米德准则数，试验范围为  $A_\gamma = (2 \sim 700) \times 10^4$

$$A_\gamma = \frac{g d_{\text{煤}}^3}{\nu} \cdot \frac{\gamma_{\text{煤}} - \gamma_{\text{气}}}{\gamma_{\text{气}}}$$

求得临界雷诺数  $R'_e$ ，就可求得临界沸腾速度  $\omega'$

$$\omega' = \frac{\nu}{d_{\text{当量}}} \cdot R'_e \quad (1-11)$$

分析以上公式可知，临界沸腾速度与料层的堆积高度无关。我们从冷态试验中也证实这一点。用不同静止高度的料层进行测定，只要保持其他参数条件不变，所得出的临界沸腾速度是非常接近的。静止料层高度越大，只是使其料层阻力越大风室静压越高。据此，我们在沸腾炉运行时要分清这二个概念。当沸腾炉运行过程中料层厚度增加，料层阻力增加，按离心式鼓风机的特性，这时风量自动下降，这时虽然风室静压很高，也要再开大风门以使流速增大。

另外，由于试验条件不同，所得出的计算公式是差别颇大的。但在基本概念上却又是一致的。也就是说，临界沸腾速度的大小是取决于煤粒本身的物理特性和空气的物理特性。煤粒尺寸越大及比重越大的，则其临界沸腾速度越大；随着床温升高，空气的运动粘性系数和比重减小，而使临界沸腾速度减小。

实际上，为了保证料层沸腾状态稳定，沸腾质量良好，床层的空截面速度 $\omega_{床}$ ，要比临界沸腾速度 $\omega'$ 大，这个比值即称为假液化数 $W$ 。

$$W = \frac{\omega_{床}}{\omega'} \quad (1-13)$$

料层从开始沸腾到气力输送之间，还有一个较大的流速范围。故而床层的空截面速度 $\omega_{床}$ 对应于一定的沸腾床结构和床料的筛分特性有一个最佳范围。也就是假液化数有一最佳范围。一般来说此值范围为2—6。

另外要指出一点，热态运行的最低风量仅为冷态时床料临界沸腾风量的一半。因为当温度升高时，临界沸腾风量有所增加，但由于烟气的体积大增而使床截面的运行速度增加更多。这一点已在实际运行时得到证实。

### 1.2.3 沸腾床阻力特性计算

沸腾床的压降就是气流流过沸腾床时的能量损失，即为料层的阻力。沸腾床的阻力特性就是通过沸腾床的风量与沸腾床料层阻力的关系。

从冷态试验可知，当风量不大、料层尚未达到沸腾状态时，料层

—10—

阻力是与风量成正比的，可用下式计算：

$$\Delta P_{\text{料}} = \zeta \frac{\gamma_{\text{气}} W_{\text{床}}^2 h_{\text{料}}}{2g D_{\text{当量}}} \quad (1-14)$$

式中  $\zeta$  阻力系数

$\gamma_{\text{气}}$  空气比重 公斤/米<sup>3</sup>

$W_{\text{床}}$  沸腾床截面平均空气流速 米/秒

$g$  重力加速度，9.81 米/秒<sup>2</sup>

$h_{\text{料}}$  静止料层高度 米

$D_{\text{当量}}$  料层颗粒平均当量直径 米

当料层达到沸腾状态时，料层阻力则仅仅与料层高度、颗粒特性、气流比重有关，而与风量（亦即风速）无关。可用下式计算：

$$\Delta P_{\text{料}} = h_{\text{料}} (\gamma_{\text{粒}} - \gamma_{\text{气}}) (1 - \epsilon_{\text{堆}}) \quad (1-15)$$

式中  $\gamma_{\text{粒}}$  料层颗粒的真比重 公斤/米<sup>3</sup>

$\epsilon_{\text{堆}}$  静止料层的堆积空隙率

$$\epsilon_{\text{堆}} = 1 - \frac{\gamma_{\text{堆}}}{\gamma_{\text{粒}}} \quad (1-16)$$

式中  $\gamma_{\text{堆}}$  静止料层的堆积比重

因为  $\gamma_{\text{气}} \ll \gamma_{\text{粒}}$

则可近似地认为

$$\Delta P_{\text{料}} = h_{\text{料}} \gamma_{\text{粒}} (1 - \epsilon_{\text{堆}}) = h_{\text{料}} \cdot \gamma_{\text{堆}} \quad (1-17)$$

通常的实用公式为

$$\Delta P_{\text{料}} = h_{\text{料}} \gamma_{\text{堆}} \quad (1-18)$$

式中  $A$  系数，随煤种而变。对石煤和煤碱石为  $0.9 \sim 1.0$ ，对无烟煤为  $0.8$ ，对烟煤为  $0.77$ ，对烟煤碱石为  $0.82$ ，对油页岩为  $0.7$ 。

在实际运行中，已知  $\gamma$  堆和测得  $\Delta p$  料就可知道沸腾床料层的高度。由运行经验可知，如果料层阻力太小，即沸腾床料层过薄，会使运行不稳定；反之则消耗风机功率太多。通常料层阻力取用  $400 - 500$  毫米水柱为宜。

#### 1.2.4 膨胀比

沸腾床的膨胀比是它的又一个空气动力特性。这一特性对决定溢流口的高度、沸腾床沉浸受热面的布置、风机压头的选择、沸腾床的燃烧及传热等都有极大影响。

料层从固定床变为沸腾床，体积增大了。我们把沸腾状态下料层的体积  $V_{\text{沸}}$  与静止状态下料层的体积  $V_{\text{静}}$  之比  $R$  称为膨胀比。

$$R = V_{\text{沸}} / V_{\text{静}} \quad (1-19)$$

若沸腾床是等截面的，则

$$R = h_{\text{沸}} / h_{\text{静}} \quad (1-20)$$

沸腾床的膨胀比与空隙率之间的关系为

$$R = \frac{1 - \varepsilon_{\text{堆}}}{1 - \varepsilon_{\text{沸}}} \quad (1-21)$$

式中  $\varepsilon_{\text{堆}}$  静止料层的空隙率

$\varepsilon_{\text{沸}}$  沸腾状态下料层的空隙率

沸腾料层的空隙率与沸腾料层的高度是随着送入气流速度的增大而增大的，因此膨胀比  $R$  也随之增大。

沸腾床的空隙率  $\varepsilon_{\text{沸}}$  是在沸腾床中颗粒之间的空隙所占的体积份额。可用实验方法测得  $R$  和  $\varepsilon_{\text{堆}}$  再由式 (1-21) 求得。

一般沸腾炉运行时  $R$  约为 2 左右， $\varepsilon_{\text{沸}}$  约为  $0.5 \sim 0.8$ 。



### § 1.3 正常沸腾工况

从冷态和热态试验可观察到，颗粒沸腾床是一种气体流化固体的流动。化工中称之为聚式流态化。从观察看，可分为气泡相、云迹相和乳浊相三部分。

所谓气泡相就是指超过颗粒临界沸腾速度所需的其余过剩气体以气泡的形式穿过料层，在布风板形成小气泡，在上升过程中逐步合并变大。

所谓云迹相是指气泡上升时速度增加，其四周有一层微粒形成的气泡云及下拖一个带有小颗粒的尾迹。据冷态观察，云迹相约占气泡相体积的  $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 。

所谓乳浊相就是指料层中大量的固体颗粒与气体均匀混和在一起的部分。

气泡到达沸腾床上部表面时突然迅速爆裂，因其上升速度大而有较大的动能，且气泡内有一定的静压力，到达处于常压的界面时，以很快速度爆裂，把它所携带的颗粒向上抛起而远离沸腾床，这就造成运行中可观的机械不完全燃烧损失。

对于沸腾状态的好坏，通常用沸腾质量来进行描述。在气固两相沸腾床中，气泡的生成、增大及崩裂会引起床层密度分布的不均匀性和压力波动。大气泡的存在和运动破坏了气相和固相的良好接触，並造成气体短路，影响了沸腾燃烧。所以通常用料层压降的波动、局部料层密度的变化、床层表面起伏比等参数来评价沸腾状态的好坏。此外，床内颗粒的分级、温度分布、传热和传质等都在不同情况下用作判断沸腾状态的手段。

一般认为较宽的固体颗粒分布，较低的床层和风速，会出现较好的沸腾状态。

热态运行中判断沸腾质量的指标为：

- 1) 沸腾床中各处温度均匀一致，温度偏差不大于  $50^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 沸腾床中无呆滞的死料。
- 3) 沸腾床运行时料层稳定，风室静压波动幅度不大于  $\pm 5 \sim 10$  毫米水柱。

4) 沸腾床内各处的浓度均匀一致, 在料层表面有清晰的界面, 而无火星放火等现象。

在沸腾床内布置受热面管子, 有改善气相或固相停留时间分布, 抑制和破碎气泡, 强化两相接触, 降低床层压力波动, 减少床层表面的起伏比等良好的作用。

### § 1.4 不正常沸腾工况

在实际的沸腾过程中, 气体和固体颗粒的接触状态是极其复杂的, 有时会出现不正常沸腾状态。沸腾炉若在运行中出现不正常沸腾状态, 就会影响正常燃烧, 甚至会造成结焦而被迫停炉。

#### 1.4.1 沟流

当气流速度低于临界沸腾速度时, 气流在宽筛分料层中的分布是不均匀的, 料层中颗粒大小的分布和空隙率也是不均匀的, 料层阻力小的地方气流速度就大。料层严重不均匀时, 即使风速超过正常时的临界沸腾速度, 料层并不沸腾, 而是大量气体短路穿过料层, 料层内形成一条狭窄通道, 其他部分仍处于固定床状态, 这种现象就称为沟流。如果沟流穿过整个料层, 就称为贯穿沟流, 如图 1-3 (甲) 所示; 如果沟流仅发生在料层局部地区, 就称为局部沟流, 如图 1-3 (乙) 所示。

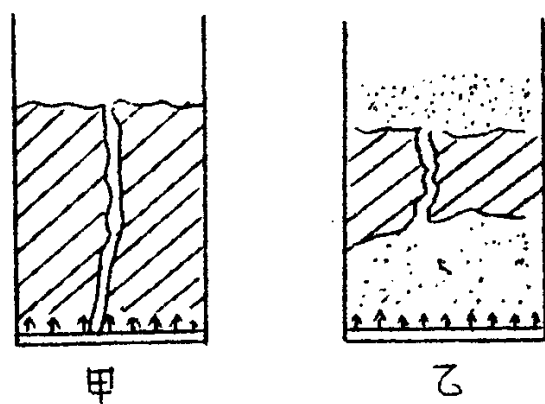


图 1-3 沟流现象

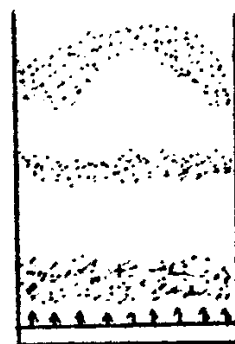


图 1-4 腾涌现象

沸腾炉中发生沟流时, 就会使处于固定状态的料层结渣而不能继