

Tk222
604

电站沸腾床锅炉设计与运行

田子平 朱国桢 编著
黄明达 王介泉
焦国成 审

前 言

沸腾床燃烧是一种新型燃烧技术。沸腾燃烧能够强化燃烧、强化传热，煤种适应性广。它可以燃用各种劣质燃料，如煤矸石、石煤、褐煤、劣质烟煤、高硫煤；还可减少硫和氮的氧化物生成，减轻大气污染；灰渣能综合利用，可以有效利用能源。近20多年来，我国在沸腾床锅炉方面发展很快，在燃用劣质燃料方面积累了经验。

本书简要叙述了沸腾床空气动力学、沸腾燃烧和传热的基本特性，着重总结了电站鼓泡沸腾床锅炉燃用劣质燃料（主要指煤矸石、石煤等）的设计和运行经验。还对电站沸腾床锅炉的上煤、除渣、烟气净化以及国内外沸腾床锅炉的发展概况作了介绍。

循环床燃烧是沸腾燃烧技术的一个新的分枝，本书对国外这方面情况作了简单介绍。它的特点是除了具有鼓泡沸腾床锅炉的优点外，还可以显著提高燃烧效率和脱硫效率等，有利于实现锅炉大型化。近年来世界不少国家和我国有些单位从事循环沸腾床燃烧技术的人员正在积极开发这一技术，并取得了新的进展。

本书共分15章。第7、11、14、15章由上海发电设备成套设计研究所田子平高级工程师编写，第8、9、12、13章由田子平和原上海发电设备成套设计研究所王介泉工程师合作编写，第1、3、4、5、6章由上海锅炉厂朱国楨高级工程师编写，第2章由上海发电设备成套设计研究所黄明达高级工程师编写，第10章由黄明达和王介泉合作编写。最后，由田子平进行全书的整理和修改。

本书由上海发电设备成套设计研究所焦国成高级工程师审阅。

在编写过程中，参考了国内外有关沸腾床锅炉的试验研究、设计、制造和运行方面的资料。

由于编、审者水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

目 录

前言

主要符号说明

第一章 沸腾床空气动力学特性 1

1.1 沸腾床基本原理 1

1.2 沸腾床流动结构 4

1.3 沸腾床空气动力学特性参数 7

1.3.1 临界沸腾速度 w_k^* 的测定和计算 7

1.3.2 极限沸腾速度 w_k^* 14

1.3.3 扬析率 15

1.3.4 沸腾床阻力 ΔP_f 17

1.3.5 沸腾床膨胀高度 H_e 19

1.3.6 宽筛分沸腾床气泡运动特性 23

1.4 合理沸腾工况 26

第二章 沸腾床燃烧特性 32

2.1 沸腾床燃烧的特点 32

2.2 沸腾床燃烧的分类 34

2.2.1 按流动特点分类 34

2.2.2 按流化份额分类 35

2.2.3 按燃烧压力分类 36

2.2.4 按床层高度分类 36

2.3 沸腾床内煤粒燃烧反应 36

2.3.1 单粒碳的燃烧 36

2.3.2 煤粒的扩散燃烧 39

2.3.3 碳粒的燃尽时间 41

2.3.4 浅床的煤粒燃烧 43

2.4 沸腾床内燃烧过程 45

2.4.1 燃烧反应 45

2.4.2 床内燃烧过程 47

2.4.3 床内烟气成分与温度分布 49

2.5 影响沸腾床燃烧反应的因素	51
2.5.1 燃料特性	51
2.5.2 运行工况	55
2.5.3 给煤方式	61
第三章 沸腾床传热特性	64
3.1 沸腾床传热机理	64
3.1.1 薄膜模型	64
3.1.2 表面更新——穿透模型	66
3.1.3 “两相流化”传热模型	67
3.2 沸腾床传热系数 K 的测定方法	69
3.3 影响沸腾床传热的几个因素	71
3.3.1 床料颗粒尺寸的影响	71
3.3.2 床截面烟气平均速度的影响	71
3.3.3 床温的影响	72
3.3.4 受热面位置的影响	73
3.3.5 相对横向和纵向节距的影响	73
3.3.6 沉浸受热面内工质温度的影响	74
3.4 沸腾床传热系数 K 的试验值	76
第四章 电站沸腾床锅炉机组热力计算及应注意的几个问题	78
4.1 热力计算的方法	78
4.2 电站沸腾床锅炉的汽水系统	79
4.3 排烟温度 ϑ_{py} 和热空气温度 t_{ra} 的选取	82
4.3.1 ϑ_{py} 的选取	83
4.3.2 t_{ra} 的选取	84
4.4 沸腾床锅炉机组的空气平衡	85
4.4.1 α_b 和 $\Delta\alpha$ 的选取	85
4.4.2 V^0 的估算	86
4.4.3 烟气体积 V_Y 的估算	88
4.4.4 α_{ra} 的选取	89
4.5 锅炉机组热平衡及燃料消耗量	89
4.5.1 锅炉机组的可支配热量 Q_r	91

VI

4.5.2	锅炉机组排烟热损失 q_2	92
4.5.3	锅炉机组化学未完全燃烧热损失 q_3	92
4.5.4	锅炉机组固体未完全燃烧热损失 q_4	92
4.5.5	锅炉机组散热损失 q_5	94
4.5.6	溢流渣物理热损失 q_6	94
4.5.7	锅炉机组热效率 η	94
4.5.8	锅炉机组总有效利用热量 Q_{gs}	94
4.5.9	锅炉机组燃料消耗量 B 和计算燃料消耗量 B_j	95
4.5.10	保温系数 φ 的计算	95
4.6	烟气侧和工质侧的热平衡	98
第五章 沸腾床热力计算		102
5.1	沸腾床燃烧产物热平衡方程式	102
5.2	悬浮段燃烧产物热平衡方程式	107
5.3	悬浮段之后各段烟道燃烧产物热平衡方程式	109
5.4	沸腾床温 ϑ_b 的选取	110
5.5	沸腾床锅炉对煤种变化的适应性	111
第六章 沸腾床配风装置结构设计		115
6.1	配风装置的结构和作用	115
6.2	风室的设计	116
6.3	布风板的设计	120
6.4	布风板阻力的作用与计算	123
6.5	冷渣排放管的设计	129
6.6	大面积床配风装置的设计问题	130
第七章 沸腾床锅炉的水循环		132
7.1	沸腾床锅炉水循环的特点	132
7.1.1	热负荷对水循环的影响	132
7.1.2	沉浸受热面的布置	134
7.1.3	循环流速和循环倍率	134
7.2	沸腾床锅炉水循环系统设计	135
7.2.1	截面比的确定	136
7.2.2	水循环系统设计步骤	140
7.3	沸腾床锅炉变工况时的水循环特性	141

7.4 高压大容量电站沸腾床锅炉的水循环	143
第八章 点火启动	145
8.1 沸腾床点火启动的特点	145
8.2 几种点火启动方式	146
8.2.1 全床动态启动	146
8.2.2 静态加热分床启动	149
8.2.3 沸腾态加热点火分床启动	151
8.3 点火要素分析	154
8.3.1 底料的影响	154
8.3.2 加热方式的影响	155
8.3.3 配风的影响	156
8.3.4 沸腾床沉浸管的影响	157
8.4 自动程序点火	157
第九章 电站沸腾床锅炉的运行	160
9.1 运行控制	160
9.1.1 床温控制	160
9.1.2 床料控制	162
9.1.3 故障处理	163
9.2 负荷调节	164
9.2.1 能大幅度调节负荷的原因	164
9.2.2 怎样进行负荷调节	165
9.2.3 负荷调节实例	166
9.3 自动控制	167
9.3.1 国内使用状况	167
9.3.2 国外研究情况	168
第十章 提高沸腾床燃烧效率的途径	173
10.1 影响沸腾床燃烧效率的主要因素及其分析	173
10.1.1 细粉扬析的原因及对燃烧效率的影响	173
10.1.2 煤质对燃烧效率的影响	177
10.1.3 设计参数对燃烧效率的影响	177
10.2 国外研究情况	178
10.2.1 循环床	179

目 录

10·2·2 飞灰回收再循环 (飞灰回燃)	180
10·2·3 设置碳燃尽床 (灰床)	183
10·2·4 采用二段燃烧	185
10·2·5 大颗粒煤渣床燃烧	186
10·2·6 沸腾床燃烧与煤粉燃烧相结合	187
10·3 国内研究情况	187
10·3·1 飞灰一次燃尽	187
10·3·2 飞灰二次复燃	188
10·3·3 飞灰多次回燃	190
10·3·4 采用正压给煤及播煤二次风	192
10·3·5 旋风燃尽室	193
10·3·6 采用凹型布风板等新型结构	194
10·4 提高沸腾床燃烧效率的途径	194
10·4·1 改进备煤系统和燃烧方式	194
10·4·2 改进燃烧方式	194
10·4·3 组织好二次燃烧	195
10·4·4 采用飞灰回燃	195
第十一章 沸腾床锅炉的烟气净化	196
11·1 沸腾床脱硫	197
11·1·1 脱硫原理	197
11·1·2 脱硫效率计算	197
11·1·3 影响脱硫效率的因素	199
11·1·4 脱硫剂的利用率及再生	201
11·2 沸腾床减少NO _x	203
11·3 沸腾床锅炉的除尘	205
11·3·1 沸腾床锅炉飞灰的特点	206
11·3·2 沸腾床锅炉除尘的要求	207
11·3·3 沸腾床锅炉除尘装置	208
第十二章 沸腾床锅炉的输煤系统	211
12·1 输煤系统的特点	211
12·2 现有的输煤系统	213
12·2·1 破碎设备	215

12·2·2	筛分设备	216
12·2·3	煤斗和落煤管	218
12·2·4	给煤机	219
12·3	研制中的输煤系统	220
第十三章 除渣系统和灰渣利用		223
13·1	除灰渣系统和设备	223
13·1·1	水力除灰渣方式	224
13·1·2	风力除灰渣方式	225
13·2	冷渣装置	227
13·3	灰渣综合利用	230
第十四章 国内电站沸腾床锅炉概况		232
14·1	改装的电站沸腾床锅炉	232
14·1·1	50t/h沸腾床锅炉	232
14·1·2	19t/h沸腾床锅炉	235
14·2	研制的电站沸腾床锅炉	236
14·2·1	35t/h沸腾床锅炉	237
14·2·2	130t/h沸腾床锅炉	240
第十五章 国外电站沸腾床锅炉概况		247
15·1	日本沸腾床锅炉发展简况	248
15·2	美国沸腾床锅炉发展简况	257
15·3	德国沸腾床锅炉发展简况	265
参考文献		268

第一章 能源利用概论

1-1 能源的概念及其分类

能源是指某些自然资源中存在着某种形式的能，人们可以按需要把它转换成热能、机械能、电能、光能、声能、化学能等形式，这些自然资源，称之为能源。如煤炭、石油、天然气、植物燃料、水能、风能，以及太阳能、原子能、地热能、海洋能、潮汐能等等。自然界自然存在的、即没有经过加工或转换的能源，又称之为一次能源（或天然能源）。由一次能源经过加工或转换而得到的产品，如电能、蒸汽、煤气、焦炭以及各种石油制品、沼气、酒精、氢等，都叫做二次能源（或人工能源）。

图 1-1 表示地球上的能流示意图，它表明一次能源来源于三个方面：

第一方面是来自地球外的太阳辐射能。其中约有30%以短波辐射的形式直接反射和散射到宇宙空间，而大部分被大气、陆地、海洋、生物等所接受；约有47%直接转变成热，在环境温度下以长波辐射形式离开地球；其余的太阳辐射能成为一次能源的来源。例如煤炭、石油、天然气、油页岩等矿物燃料都是由古代生物长久沉积在地下形成的，而古生物的能量都来源于太阳辐射能（通过光化作用等过程）。至于水能、风能、海洋能归根到底也都是来源于太阳辐射能。我们知道，地表水受太阳辐射热慢慢蒸发变成水蒸汽，水蒸汽上升到高空遇到冷空气，凝结变成雨水或雪花降落到地面，

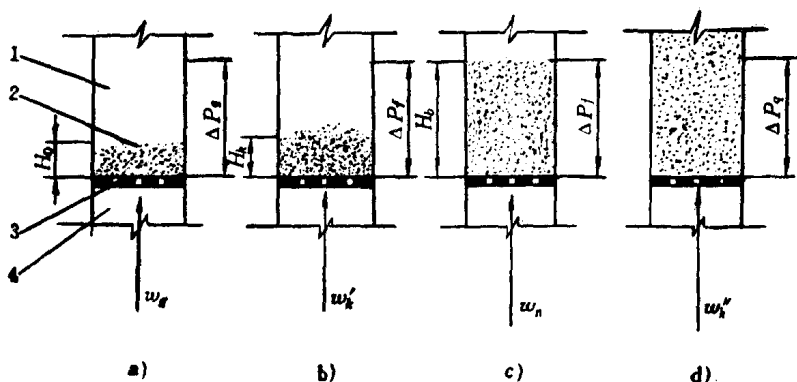
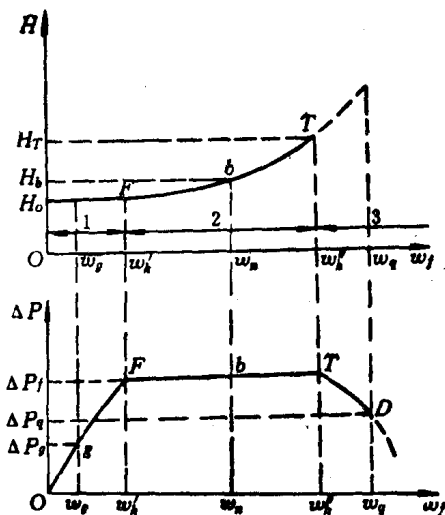


图1-1 各种床的状态

1—床 2—床料 3—配风装置 4—风室

(2) 当 w_f 继续增加, 达到称为临界沸腾速度 w'_k 时, 床料开始松动, 继而被举起, 离开配风装置, 悬浮于搅拌剧烈的气流中, 在一定高度内, 呈上下翻动, 似一壶滚开的水那样。如图 1-1 b 和 1-1 c 所示。 w_f 再增加, 在达到 w''_k 之前仅床料翻滚加剧和床料膨胀高度 H_b 增加, 床料层阻力 ΔP_f 却保持不变, 见图 1-2 中 $F-T$ 。这种状态, 称为沸腾床, 又称流化床、鼓泡床、流动床和假液化层等。

图1-2 各种床的床料层阻力 ΔP 和床高 H 与 w_f 的关系

1—固定床 2—沸腾床 3—物料气力输送

(3) 当 w_f 再继续增加, 达到称为极

限沸腾速度 w''_k 时, 床料开始从床内吹出, 呈物料气力输送状态。

如图 1-1 d 所示。且气流速度越高，带出粒子量越多，床料层阻力 ΔP_r 便越小。当 w_f 从 w_f' 增加到 w_f'' 的情况见图 1-2 中 T-D。这种状态，称为物料气力输送。

床料在床中的各种状态，可用单个颗粒在床中的受力情况来解释。如图 1-3 所示。

单个颗粒受到两个力的作用，一是颗粒的重力 G ，另一是空气流对颗粒的升举力 F_s ，它们的数值为

$$G = \rho_k g V \quad (1-1)$$

$$F_s = \frac{\xi(w_f - w_d)^2 \rho_l g f}{2g} \quad (1-2)$$

式中 G ——颗粒所受重力 (N)；

ρ_k ——颗粒真实密度 (kg/m^3)；

V ——颗粒的体积 (m^3)；

ρ_l ——流化介质密度 (kg/m^3)；

F_s ——气流对颗粒的升举力 (N)；

ξ ——颗粒在气流中的阻力系数；

w_f ——沸腾床床截面气体平均速度 (m/s)；

w_d ——颗粒在重力作用下的沉降速度 (m/s)；

f ——颗粒的迎风面积，即颗粒沿气流运动方向的投影面积 (m^2)；

g ——重力加速度 ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$)。

当 $G > F_s$ ，床料停在配风装置上不动，这就是固定床床料状态。

当 $G = F_s$ ，床料悬浮于气流中，处于随意平衡状态。但由于各颗粒形状的不规则，使迎风面随时在改变，引起 F_s 值在 G 值附近上下波动，于是床料在一定空间内作上下翻滚，既不被气流

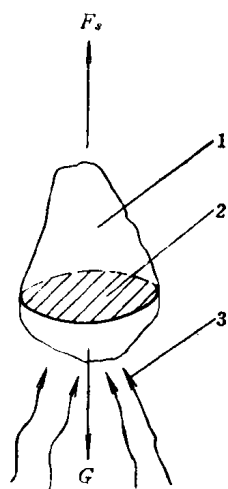


图1-3 单个颗粒
在床中受力情况
1—颗粒 2—迎风面
3—气流

吹走，又不停留在配风装置上，这就是沸腾床床料状态。

当 $G < F_c$ ，床料作加速运动，被气流带走，这就是气力输送床料状态。

由式 (1-2) 知，床料的运动状态与床料的颗粒直径、密度、颗粒运动速度和颗粒在气流中的阻力系数以及气体的密度和速度等因素有关。但对一定颗粒度的床料，升举力 F_c 的大小主要取决于床截面气体平均速度。

为了研究沸腾床空气动力学特性，人们通常把由固定床转化为沸腾床的床截面气体平均速度，定义为临界沸腾速度 w'_i ；把由沸腾床转化为物料气力输送的床截面气体平均速度，定义为极限沸腾速度 w''_i 。由此可见，建立沸腾床的必要和充分条件是

$$w'_i \leq w_j < w''_i \quad (1-3)$$

1.2 沸腾床流动结构

沸腾床的流态化，可分为散式流化和聚式流化。这是由于采用不同的流化介质而造成的。一般说来，用液体（如水）作流化介质所得的流态化为散式流化，称为液-固系统；用气体（如空气）作流化介质所得的流态化为聚式流化，称为气-固系统。

在液-固系统中，当 w_j 增加到 w'_i 以上时，床料平稳而渐增地膨胀，液-固两相接触均匀，总体流动的不稳定性受到阻抑且很小，在正常情况下观察不到大规模的鼓泡或不均一性。

在气-固系统中，随着 w_j 增加到超过 w'_i ，就出现很大的不稳定性，发生鼓泡和气体沟流现象。在更高流速下，搅动变得更激烈且固体颗粒的运动变得更活跃。

但是，必须指出：当用水流化钨矿石时，却得到聚式流化。如果用 ρ_s 表示颗粒的密度 (kg/m^3)； ρ_f 为流化介质的密度 (kg/m^3)； μ_f 为流化介质动力粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)；Morse 分析了用液体和用气体作流化介质之间的差别，得出了这样一个结论：随着比值 $(\rho_s - \rho_f)/\mu_f$ 的增加，流态化是趋向于聚式流化的。

燃煤沸腾床是用空气和烟气作为流化介质的，它属于聚式流化。在热态运行时，由于比值 $(\rho_s - \rho_f)/\mu_f$ 趋于减少，因此，它的流化质量应比冷态时好得多。这与实践观察到的相一致。

沸腾床的流动结构，当为散式流化时，呈流态化的颗粒均匀地分布在流化介质之中；当为聚式流化时，通常难以描绘它们的流动结构；为此，出现了“两相流化”理论。

“两相流化”理论认为：沸腾床的流动结构是由两个不同的“相”组成的，第一“相”为“颗粒相”，又称“乳化相”和“连续相”，由处于流态化的颗粒和支承它们的气体所组成，且这些颗粒均匀地分布在这部分气体中；第二“相”为“气泡相”，又称“气体相”和“断续相”，完全由气体组成，且这些气体以气泡形式流过沸腾床。

“两相流化”理论还认为：“颗粒相”中的气体量，等于床的临界沸腾所需的气体量；“气泡相”中的气体量，即为多于床的临界沸腾所需的“过剩”气体量。

应用“两相流化”理论，便可描述沸腾床流动结构，还可建立沸腾床流动模型、燃烧模型和传热模型。

衡量沸腾床流化质量的指标有：

- (1) 在运行时，沸腾床中温度应均匀一致，上下温度偏差不出 $\pm 30^\circ\text{C}$ ；
- (2) 在运行时，在配风装置上无呆滞的床料；
- (3) 在运行时，有稳定的床料，风室风压波动约在 $\pm(100\sim 200)\text{Pa}$ 之间；

沸腾床中常常也会产生如下不正常沸腾状态：

(1) 沟流

气体通过床料层，其 w_f 虽已超过 w_{f_c} ，但床料并不流化，仅是大量气体短路穿过床料，在床料内形成一条狭窄通道，此时部分床料仍处于固定床状态。这种现象称为沟流，又称为穿孔。

若沟流穿过整个床料，就称为贯穿沟流，如图 1-4 a 所示。若沟流仅发生在床料局部处，就称为局部沟流，如图 1-4 b 所示。

燃煤沸腾床锅炉，在点火启动和运行时，若发生高温结焦，都会形成沟流。这时，整个床的阻力突然降低，之后随着流速增加，床的阻力可能出现回升，但达不到原来的数值。由于沟流又会导致未沸腾部分的床料发生结焦，使床无法运行，因此应当消除产生沟流的因素。

产生沟流的因素大致有：

1) 床料颗粒度相差悬殊，细颗粒过多，造成 w 过低；

2) 床料层太薄，且含水份过多；

3) 床面积较大，且布风装置设计又不当，如无分床、风帽间距太大和风室形状不适当等；

4) 垂直沉浸管束离配风装置太近，或采取的防磨结构不当；

5) 启动时，床料含碳量太高，会发生爆燃，造成结焦；或在运行中，煤种变化，又没有及时调节，会发生整床结焦。

应当在结构上、燃料制备上和运行控制上消除上述因素。

(2) 腾涌

床内气泡合并长大，当气泡直径接近床直径时，床料成活塞状向上运动，到某一高度后崩裂，颗粒雨淋而下，这种现象称为腾涌，又称节涌，如图 1-5 所示。

当发生腾涌时，会使颗粒的机械磨损和扬析量增加，床的阻力骤然增大且脉动剧烈，风机受到冲击，难以维持床正常运行，进而容易损坏床内的零部件。

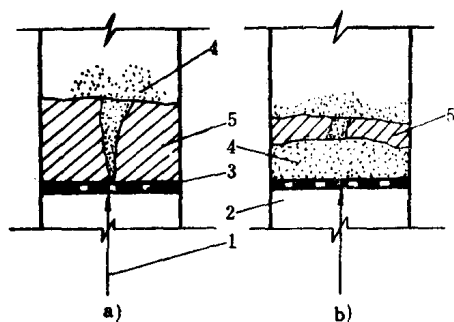


图1-4 沟流示意图

a) 贯穿沟流 b) 局部沟流
1—气流 2—风室 3—配风装置
4—沸腾部分 5—未沸腾部分

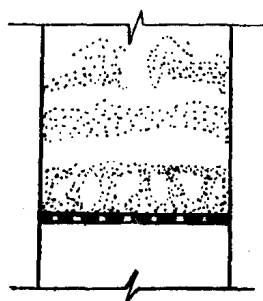


图1-5 腾涌示意图

产生腾涌的因素有：

- 1) 床高与床径比较大；
- 2) 颗粒筛分组成过窄，且大颗粒过多。

燃煤沸腾床锅炉，通常燃用宽筛分煤粒，且床高与床径比较小，一般很少发生腾涌现象。

在设计中，防止小气泡合并成大气泡的一个有效方法是在床中布置水平沉浸管束。

1.3 沸腾床空气动力学特性参数

沸腾床空气动力学特性参数主要有临界沸腾速度 w'_c 、极限沸腾速度 w''_c 、扬析率、沸腾床阻力和沸腾床膨胀高度等。它们是设计和评价燃煤沸腾床的理论基础。

1.3.1 临界沸腾速度 w'_c 的测定和计算

临界沸腾速度 w'_c 是沸腾床空气动力学特性的一个很重要的参数，用它可以确定沸腾床截面积的大小。

尽管许多学者已经提供了不少 w'_c 的计算公式，但把这些公式应用到燃煤沸腾床时，所得的结果相差较大。这是因为化工行业流化床反应器流化的颗粒（如 $60\mu\text{m}$ ）是很小的，而燃煤沸腾床流化的颗粒（如 2mm ）是较大的。由于它们之间在颗粒尺寸上和颗粒均匀性上相差悬殊，因此在空气动力学特性上也存在着较大的差别。前者的气泡速度很快，后者的气泡速度较慢。这意味着对燃煤沸腾床空气动力学特性的研究仍是十分必要的。

(1) 床料颗粒平均直径 D_p 的计算

沸腾床中的物料简称为床料。它是由各种形状和大小的颗粒组成的。为了便于研究和讨论问题，采用床料颗粒平均直径 D_p 的概念。所谓临界沸腾速度 w'_c ，是对床料的颗粒平均直径 D_p 而言的。

对于 D_p 的计算，采用重量几何平均法（保持比表面积不变的重量平均直径）是比较精确的。

设在一定数量的床料中，直径为 d_i 的颗粒占总重量的百分

数为 x_1 ，直径为 d_2 的颗粒占总重量的百分数为 x_2 ，…，直径为 d_n 的颗粒占总重量的百分数为 x_n ，则该床料的颗粒平均直径

$$D_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (1-4)$$

式中 D_p ——床料的颗粒平均直径 (m)；

d_{pi} ——各颗粒的筛分平均直径， $d_{pi} = \sqrt{d'_i d''_i}$ (m)，其中 d'_i 和 d''_i 分别为上、下筛目的尺寸 (m)；

x_i ——颗粒在上、下筛目范围内的筛分重量百分比 (%)。

(2) 临界沸腾速度 w'_k 的测定

由固定床转化为沸腾床，它的床料层阻力 ΔP ，随床截面气体平均速度 w ，变化的特性曲线，如图 1-6 所示。

在图 1-6 中，曲线 $OABCD$ 是在不断增加 w 时测得的，称为上行曲线；曲线 $DCBEO$ 是在床料沸腾后、再逐渐减少 w 时测得的，称为下行曲线。下行曲线与上行曲线不重合的原因是，床料经过沸腾后，颗粒重新排列的结果。

延长 OE 和 DC 交于 F ，与 F 点相应的 w ，即为所测定的 w'_k 。

根据沸腾床床料层阻力 ΔP 与床截面气体平均速度 w 的这一特性，便可测得临界沸腾速度 w'_k 。

(3) w'_k 实验数据的综合方法

燃煤沸腾床属于气-固沸腾床，它的运动现象很复杂，无法建立微分方程式以求得相似准则。但可采用因次分析方法以提供

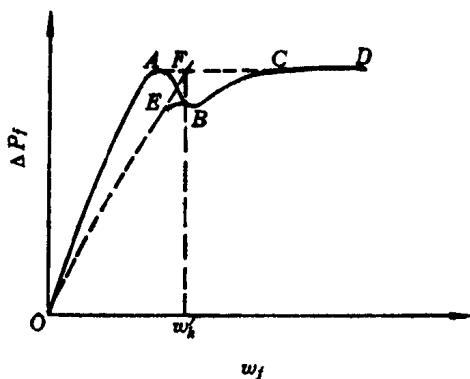


图1-6 ΔP_l 与 w_l 的特性曲线

求解的可能性。

在燃煤沸腾床中， w'_i 是与颗粒的大小、密度以及流化介质的物性有关。描写沸腾床流体流动的物理量有临界沸腾速度 w'_i 、床高尺寸 H_b 、颗粒平均直径 D_p 、颗粒真实密度 ρ_k 、流化介质密度 ρ_l 、流化介质运动粘度 ν 和重力加速度 g 。

由于燃煤沸腾床为两相流体流动，它的 ρ_k 和 ρ_l 相差较大，气泡所受到的浮力为

$$Y = V_B(\rho_k - \rho_l) g \quad (1-5)$$

式中 Y ——气泡所受到的浮力 (N)；

V_B ——气泡的体积 (m^3)；

g ——重力加速度 (m/s^2)。

考虑到气泡相和颗粒相的形状都并非球形，取当量形状系数为 $3/4$ ，则气泡相所受的升力加速度为

$$B = \frac{4g(\rho_k - \rho_l)}{3\rho_l} \quad (\text{m}/\text{s}^2)$$

以此扰动颗粒相。因此，描写沸腾床流体流动时，应用升力加速度 B 取代重力加速度 g 。则

$$f(w'_i, \rho_k, \rho_l, \nu, D_p, H_b, B) = 0 \quad (1-6)$$

此时，一些无因次 Θ 量群可表述为

$$\Pi = (w'_i)^a (\rho_k)^b (\rho_l)^c (\nu)^d (D_p)^e (H_b)^f (B)^g \quad (1-7)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 和 g ——常数。

在物理研究中，取长度、时间和质量作为“基本量”，它们的因次相应地用 $[L]$ 、 $[t]$ 及 $[m]$ 表示，叫“基本因次”。式 (1-7) 中各物理量的因次分别为

$$[w'_i] = [L t^{-1}]$$

$$[\rho_k] = [\rho_l] = [m L^{-3}]$$

$$[D_p] = [H_b] = [L]$$

$$[\nu] = [L^2 t^{-1}]$$

$$[B] = [L t^{-2}]$$

⊖ 相当于通常所说的量纲。