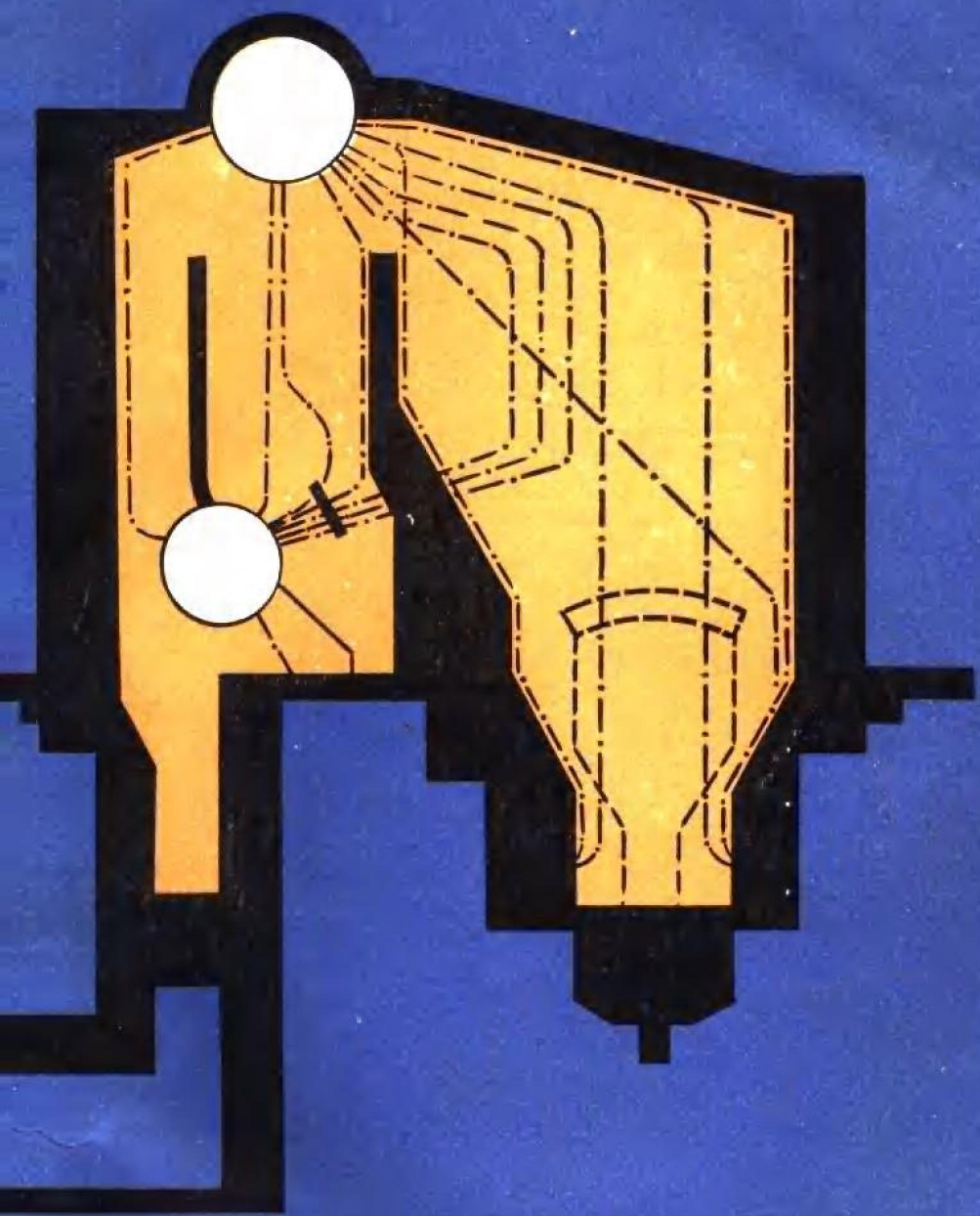


QZ-XZ-K-CUTUBC-QZ-I-TH



沸腾炉的设计与运行

内 容 提 要

沸腾炉是近年发展起来的一种新型节煤锅炉。它对燃料的适应性强，能以煤矸石、劣质煤和其他锅炉的炉渣为燃料。采用这种炉型对降低煤耗、节约能源和保护环境都有极其积极的作用。

本书简单地介绍了沸腾炉的燃烧原理，分析了影响沸腾炉燃烧的因素；着重介绍了沸腾炉的热力计算、阻力计算和强度计算；对提高锅炉效率 and 设计、改装、运行中的问题进行了分析；对附属设备也进行了一般介绍。书后附有运行良好的炉型11种。可供从事沸腾炉设计、改装和运行的技术人员和操作工参阅。

沸腾炉的设计与运行

邓曾禄 唐东生编

责任编辑 刘振杰

河南人民出版社出版

河南第一新华印刷厂印刷

河南省新华书店发行

787×1092毫米16开 13 印张 283千字 插页4

1980年12月第1版 1980年12月第1次印刷

印数1—5,700册

统一书号15105·30 定价1.20元

前 言

沸腾炉是六十年代国内外发展起来的新炉型。它具有强化燃烧、强化传热等特点，并能燃用劣质燃料，有利于大搞综合利用和清除排烟中二氧化硫有害物对环境的污染。与同出力的其他炉型相比，沸腾炉能节省钢材，降低成本，因此受到国内外重视。近年来，我国的沸腾炉，已有很大发展，对国民经济的发展具有重要意义。

沸腾炉在小氮肥厂中也得到很快推广。小氮肥厂中造气炉渣里还含有很多未反应的碳粒，其炉渣发热值可高达3000大卡/公斤。但由于灰分含量高，挥发分含量低，这些炉渣在层燃炉中是很难得到利用的，而在沸腾炉中可继续燃烧，这就能使入厂煤“吃光用尽”，大大降低了吨氨的两煤耗量和成本。旧锅炉改沸腾炉也很简单，机械加工容易，并且沸腾炉操作便于自动化，维修简便，运行可靠，因而受到广大职工的欢迎。目前，推广沸腾炉的工作进展很快。如何把燃烧效率进一步提高，是从事锅炉工作人员的一个极为迫切的课题。为了适应推广沸腾炉的迫切需要，我们吸取了兄弟省市有关单位的先进经验写成此书。

在编写时力求实用简要。取材和图例力求反映10吨/时以下沸腾炉的现状和成果，在内容上做如下处理：

- 1.对沸腾炉的原理作了简要叙述，并对影响沸腾燃烧的因素进行必要分析，以便用这些原理来解决设计和运行中的问题。
- 2.介绍了简化实用的设计方法，以适应各厂对改造沸腾炉的计算需要。
- 3.把如何提高沸腾炉效率、旧炉改造成沸腾炉中常遇到的问题，集中起来编写了一章。
- 4.为满足各厂改造沸腾炉的需要，在附录中将燃烧效率高的沸腾炉炉型、旧锅炉改造炉型和一些沸腾炉的结构参数加以介绍，便于有关人员参考。
- 5.对沸腾炉需要的附属设备也加以说明，以利于设计和改造中选用。

在编写过程中先后得到郑州锅炉厂卖靖楠、杨金平同志和省化工设计院锅炉组全体同志的热情支持和帮助。郑州工学院许秀成同志、湖南化工设计院付勇进同志也提了不少宝贵的修改意见，我们深表感谢。

本书一、二、三、四、七章由邓曾禄同志编写，五、六章由唐东生同志编写。由于水平所限，书中难免有违误和缺点，希望读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 沸腾炉的基本原理	(1)
§1 固定床转化为沸腾床的原因	(1)
§2 表示燃料层的几个物理量	(2)
一、堆积重度、真实重度、堆积空隙率	(2)
二、颗粒平均直径 d_p	(2)
三、颗粒的当量直径 $d_{\text{当}}$ 及形状系数 ψ	(3)
§3 表示沸腾床特征的几个物理量	(3)
一、沸腾床的动力特性	(3)
二、临界沸腾风速和工作风速	(5)
三、飞出速度、细粒飞出率与分离层高度	(11)
四、沸腾层高度	(12)
§4 沸腾床中的燃烧特性	(13)
一、粒料在沸腾层内平均停留时间和粒料在炉膛内平均停留时间	(13)
二、沸腾炉能烧劣质煤的原因	(15)
三、沸腾层内各截面温度分布	(15)
四、低温烧透的炉渣可以综合利用	(16)
§5 沸腾床中传热特性	(17)
一、沸腾床中传热过程的几种假说	(17)
二、影响沸腾床传热系数 $K_{\text{沸}}$ 值的因素	(17)
三、设计时传热系数 $K_{\text{沸}}$ 值的选择	(18)
§6 衡量沸腾床好坏的标准和几种质量恶化的不正常沸腾床	(20)
一、衡量沸腾炉沸腾好坏的标准	(20)
二、几种质量恶化的不正常沸腾床	(21)
§7 小结	(22)
第二章 沸腾炉的设计与计算	(24)
§1 沸腾炉的设计程序	(24)
§2 沸腾炉的燃烧计算	(25)
一、固体燃料的分析	(25)
二、沸腾炉各段过量空气系数的选择	(27)
三、燃烧所需空气量、烟气量和空气烟气热焓的计算	(28)
§3 沸腾炉的热平衡及燃料消耗量计算	(32)
一、热平衡方程式及锅炉热效率	(32)

二、各项热损失的确定方法	(33)
三、燃料消耗量计算	(35)
§4 沸腾炉炉膛设计	(35)
一、炉膛的结构形式	(35)
二、炉膛主要尺寸的确定	(36)
三、炉膛总容积的计算	(40)
§5 沸腾炉的受热面布置和传热计算	(41)
一、沸腾段埋管的布置和传热计算	(41)
二、悬浮段的受热面布置和传热计算	(46)
三、对流排管受热面布置和传热计算	(47)
四、省煤器的布置和传热计算	(54)
五、空气预热器的布置和传热计算	(56)
六、沸腾炉受热面面积估算	(57)
§6 沸腾炉布风装置的结构与设计	(58)
一、布风板的结构与设计	(58)
二、风帽小孔风速与布风板阻力	(61)
三、布风板的开孔率及帽沿流速的意义	(64)
四、风箱结构	(65)
§7 埋管和沸腾段炉墙的防磨措施	(68)
一、埋管和炉墙的磨损原因	(68)
二、针对磨损原因采取防磨措施	(69)
§8 小结	(71)
第三章 设计和改造沸腾炉中的几个问题	(73)
§1 沸腾炉对煤种适应性和负荷可调范围问题	(73)
一、沸腾工作风速、送风量和煤种的关系	(73)
二、锅炉内受热面吸热及煤放热的热量平衡与锅炉出力	(74)
三、煤种改变, 给煤量不变所引起的后果	(74)
四、选用煤种计算值及沸腾炉负荷可调范围	(75)
五、实例分析	(75)
六、结论	(76)
§2 关于提高沸腾炉的效率问题	(76)
一、飞灰燃尽是提高沸腾炉效率的关键	(76)
二、燃尽飞灰的途径	(78)
§3 用K4、K2锅炉改造沸腾炉最大蒸发量的问题	(83)
§4 三种主要炉型的改炉措施	(85)
一、K型锅炉的改装	(85)
二、卧式快装锅炉的改装	(86)
三、DKB型锅炉的改装	(88)

第四章 沸腾炉的辅助设备	(91)
§1 煤的筛分和破碎设备	(91)
一、筛分设备	(91)
二、破碎设备	(91)
§2 给煤设备	(94)
§3 烟气除尘设备	(95)
一、沉降室	(96)
二、CLP型除尘器	(97)
三、麻石水膜除尘器	(101)
四、管式水膜除尘器	(102)
五、冲击水浴式除尘器	(105)
六、除尘器的选择及维护管理	(106)
§4 沸腾炉送风机和引风机的选用	(107)
一、送风机的选择	(107)
二、引风机的选择	(110)
§5 除灰装置	(111)
第五章 沸腾炉阻力计算	(113)
§1 风道与烟道的阻力计算	(113)
一、风烟管道中流速的选用	(113)
二、风烟管道截面积	(114)
三、风烟管道阻力计算	(114)
四、阻力计算修正系数	(123)
§2 烟囱设计	(124)
一、烟囱的计算	(124)
二、烟囱的结构	(128)
第六章 沸腾炉的强度计算	(130)
§1 材料与许用应力	(130)
一、材料	(130)
二、许用应力	(130)
三、计算壁温	(133)
§2 承受内压力的圆形锅筒计算	(134)
一、锅筒的理论计算壁厚	(134)
二、计算压力	(135)
三、锅筒的验算	(135)
四、减弱系数的计算	(136)
五、锅筒的椭圆度	(137)
§3 承受内压力的圆筒形集箱的计算	(138)
一、集箱的理论计算壁厚	(138)

二、集箱的验算	(139)
§4 承受内压力的管子计算	(139)
一、管子的理论计算壁厚	(139)
二、管子的验算	(140)
§5 承受内压力的凸形封头计算	(140)
一、椭球形封头和球形封头的理论计算壁厚	(140)
二、封头的验算	(141)
§6 孔的加强计算	(142)
一、未加强孔的最大允许直径	(142)
二、孔的加强	(143)
第七章 沸腾炉的运行	(152)
§1 沸腾炉的冷态试验	(152)
一、布风均匀性的检查	(152)
二、沸腾层冷态特性的测定	(153)
§2 沸腾炉的点火	(154)
一、固态点火	(154)
二、流态点火	(156)
§3 沸腾炉的正常运行	(156)
一、沸腾层温度	(157)
二、给煤量控制	(158)
三、送风量调整	(158)
四、沸腾层高度控制	(158)
五、压火	(158)
六、清炉	(159)
§4 沸腾炉的主要仪表	(159)
附录 1 水蒸气的性质	(163)
附录 2	(164)
① 我省主要煤质分析资料	(164)
② 工业锅炉燃料分类	(164)
③ 设计用代表性煤种	(165)
④ 煤及其灰渣的重度和堆积空隙率	(166)
⑤ 煤、灰的自然堆积角	(167)
⑥ 锅炉灰渣、烟气和空气的平均重量比热	(167)
附录 3 例题	(167)
附录 4 沸腾炉与其他锅炉金属消耗量的比较	(177)
附录 5 一些沸腾炉的简图	(179)
附图 1 武汉低压锅炉厂 DZF10-13-W2 型沸腾炉	(179)

附图 2	上海红旗锅炉厂 SHF10-13-S 型沸腾炉	(180)
附图 3	梨树县化肥厂 FTL12-13 型沸腾炉	(181)
附图 4	鞍山锅炉厂 SZF10-13 型沸腾炉	(183)
附图 5	福建龙海合成氨厂 10吨/时 沸腾炉(1 号炉).....	(184)
附图 6	灵宝县化肥厂 K2-13 改密孔板4.5吨/时沸腾炉	(185)
附图 7	杭州锅炉厂 SZF4-13 型沸腾炉	(186)
附图 8	博爱县化肥厂 1 号双床10吨/时沸腾炉改型	(187)
附图 9	博爱县化肥厂 2 号双床10吨/时沸腾炉改型	(188)
附图10	煤炭部规划设计院 SZP10/13 锅炉改沸腾炉	(189)
附图11	煤炭部规划设计院 KZL4-13 锅炉改沸腾炉	(190)
附图12	沸腾炉热力系统图	(191)
附图13	沸腾炉带控制点立面图	(191)
附录 6		(192)
①	一些沸腾炉的结构参数	(192)
②	部分小氮肥厂使用沸腾炉简况	(197)

第一章 沸腾炉的基本原理

为了掌握沸腾炉的设计和运行技术，必须了解沸腾状态的形成及破坏的转化条件。为此，就必须先要掌握形成及破坏沸腾状态的有关物理参数。本章从实际现象中找出沸腾燃烧的基本规律，为设计沸腾炉打下理论基础。

§1 固定床转化为沸腾床的原因

按装置图1-1做试验，从固定床下面送风，当送风量小时，风从煤粒之间流过，煤粒间互相并不发生相对运动，这种状态叫固定床。加大送风量后，煤粒间的风速也随之增大，当风速达到某一数值时，煤料层所占的容积开始膨胀。容积增大，煤料层中的颗粒之间的空隙也就加大了。空隙增大后，显然送风量增加，但煤层中颗粒之间的风速却保持不变。因而，在一个较宽的风量范围内，使风向上的吹力与煤粒重量保持相等，颗粒处在悬浮状态，上下翻滚，如水之沸腾，这种状态就是所谓沸腾床。

当料层中颗粒十分均匀时，床层上界面就象液体一样，出现一层清晰的表面。通常将未送风前铺在布风板(即炉篦)上的料层厚度叫料层高($h_{\text{堆}}$)，膨胀后的整个料层统称为沸腾层。此沸腾层占有的高度叫做沸腾层高度($h_{\text{沸}}$)。如果送风量继续增大，沸腾层高度还会随之继续

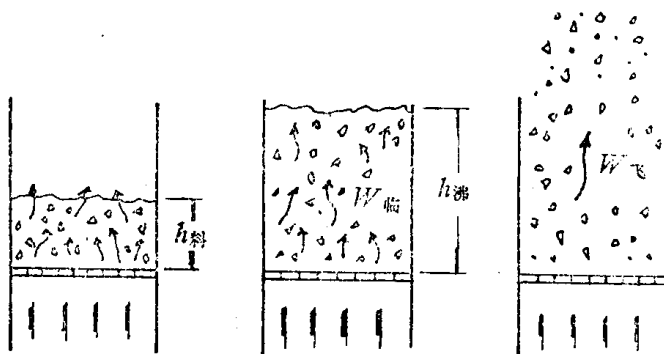


图 1-1 料层在不同气流速度下的三种状态

增高，但当风量大到一定数值后，沸腾层在空间上就失去明显的分界面。此时向上的吹力超过颗粒的重量，气流将煤粒大量带走，这就不再是沸腾层，而变为气力输送。

通过以上试验可以看出：当炉床结构、煤种和粒度不变的情况下，从固定床转化为沸腾床及从沸腾床转化为气力输送，其决定条件是料层颗粒间的风速大小。经过颗粒之间的风速是很难确定的，因而采用了截面平均风速这一概念。

$$W_0 = \frac{G}{F} \quad (\text{米/秒}) \quad (1-1)$$

式中： W_0 ——截面平均风速(米/秒)；

G ——经过该截面处的风量(米³/秒)；

F ——该截面的面积(米²)。

料层开始从固定状态转化到沸腾状态的截面平均风速称为临界沸腾风速 $W_{\text{临}}$ 。

§2 表示燃料层的几个物理量

为了确定临界沸腾风速，必须了解燃料层的以下几个物理量。

一、堆积重度、真实重度、堆积空隙率

煤料自然放置时，单位体积的重量称为堆积重度 $r_{\text{堆}}$ （公斤/米³），也叫容积重度。此时在其体积中还有很多空隙，如使煤粒紧紧密合不留空隙（这一点在实际上是作不到的，但可通过间接方法求得），这时煤料单位体积的重量称为真实重度 $r_{\text{粒}}$ （公斤/米³）。

粒子间空间体积 $V_{\text{间}}$ 与包含空间物料的整个体积 $V_{\text{堆}}$ 之比称为空隙率，用 $\varepsilon_{\text{堆}}$ 表示，

即 $\varepsilon_{\text{堆}}$ 等于 $\frac{V_{\text{间}}}{V_{\text{堆}}}$ 。颗粒所占体积的份额为 $(1 - \varepsilon_{\text{堆}})$ ，即 $1 - \varepsilon_{\text{堆}} = \frac{V_{\text{堆}} - V_{\text{间}}}{V_{\text{堆}}}$ 。于是真实重

度 $r_{\text{粒}}$ 与堆积重度 $r_{\text{堆}}$ 有以下关系：

$$r_{\text{堆}} = r_{\text{粒}}(1 - \varepsilon_{\text{堆}}) \quad (1-2)$$

对于一种燃料，其真实重度 $r_{\text{粒}}$ 是一个定值，所以 $r_{\text{粒}}$ 是燃料本身的重要参数。堆积重度 $r_{\text{堆}}$ 则随空隙率 $\varepsilon_{\text{堆}}$ 而变化，不同煤种的堆积重度可以完全一样，只是空隙率则各有不同。

二、颗粒平均直径 $d_{\text{平}}$

沸腾炉中所烧的固体燃料，经破碎后大小不一，一般是以其中最大颗粒直径不超过某一数值的方法来说明这种固体燃料颗粒大小。如颗粒度为0~8毫米，是指最大颗粒直径不超过8毫米。但是对颗粒均匀程度仍不能表示，因此，用筛分方法，求出不同直径颗粒所占的重量分率的值，然后算出平均直径 $d_{\text{平}}$ 这一反映颗粒细度的参数。其求法如下：

将一定量的煤料（常用100克或500克），在筛孔尺寸为 $d'_1, d'_2, \dots, d'_m, d'_{m+1}$ 的筛网上过筛分级（常用8, 5, 2.5, 2, 1.5, 1, 0.5, 0.3, 0.2, 0.088毫米几种筛孔尺寸），称出各筛网上的残留重量，算出残留重量占筛分试验煤样总重量的百分比 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 。

即： d'_1 至 d'_2 粒级的平均粒径为 d_1 ，其重量占总重量的百分比为 x_1 ；

d'_2 至 d'_3 粒级的平均粒径为 d_2 ，其重量占总重量的百分比为 x_2 ；

.....

d'_m 至 d'_{m+1} 粒级的平均粒径为 d_m ，其重量占总重量的百分比为 x_m 。

则： $d_1 = \sqrt{d'_1 d'_2}$ ， $d_2 = \sqrt{d'_2 d'_3}$ ， $\dots$ ， $d_m = \sqrt{d'_m d'_{m+1}}$

全部粒子的平均粒径 $d_{\text{平}}$ 通常采用调和平均直径，即：

$$d_{\text{平}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{x_i}{d_i}} \quad (1-3)$$

为方便起见，也可采用算术平均粒径代替上式计算，其结果差别不大。即：

$$d_{\text{平}} = \sum_{i=1}^m x_i d_i \quad (1-4)$$

三、颗粒的当量直径 $d_{\text{当}}$ 及形状系数 ψ

煤粒的形状并不规则，几乎都不是球形。平均粒径求出后常乘以粒子群的形状系数 ψ ，折算成相当于球形颗粒的粒径，称为当量直径 $d_{\text{当}}$ 。

$$d_{\text{当}} = \psi d_{\text{平}} \quad (1-5)$$

形状系数 ψ 是根据流体阻力而试验换算出来的，一般自然煤粉的形状系数 $\psi = 0.65$ ，沸腾层粒料的形状系数约为 $\psi = 0.54$ 。

§3 表示沸腾床特征的几个物理量

从研究沸腾炉的设计和运行的需要出发，下面介绍表示沸腾床特征的几个物理量，并予讨论。

一、沸腾床的动力特性

为了确定沸腾炉的临界沸腾风速 $W_{\text{临}}$ ，必须研究沸腾床的动力特性，即在截面平均风速变动时，料层阻力与料层高度相应变化的规律。

试验装置见图 1-2，取煤渣料，颗粒范围为 0~8 毫米，层高 300 毫米。当截面平均风速 W 逐渐增加时，料层阻力也逐渐增加，此时料层高度并无变化。直到截面风速加大到某一数值后再

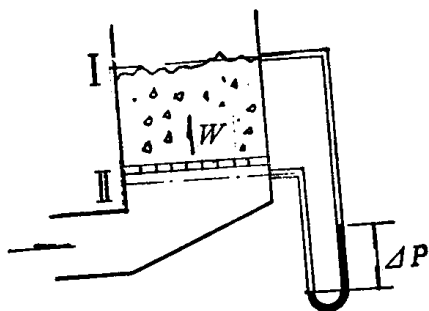


图 1-2 沸腾床动力特性试验装置

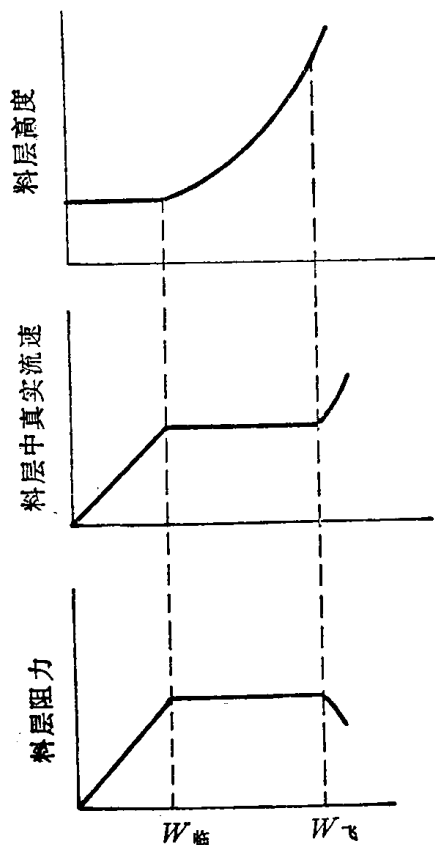


图 1-3 按截面平均风速绘出沸腾床动力曲线

继续增大时,料层高度则显著增高,但料层阻力却不再增大,此截面平均风速即为临界沸腾风速 $W_{临}$ 。当截面平均风速大于临界沸腾风速后,料层高度虽然会再继续增高,但料层阻力仍然不变。如果截面平均风速继续增大至某一风速 $W_{飞}$ 后,物料即被大量吹走,转变成物料气力输送。随着物料被吹走,料层阻力迅速下降。这个特性速度 $W_{飞}$ 称为飞出速度。按截面平均风速绘出的沸腾床动力曲线(图1-3)就清楚地显示了这一变化过程。

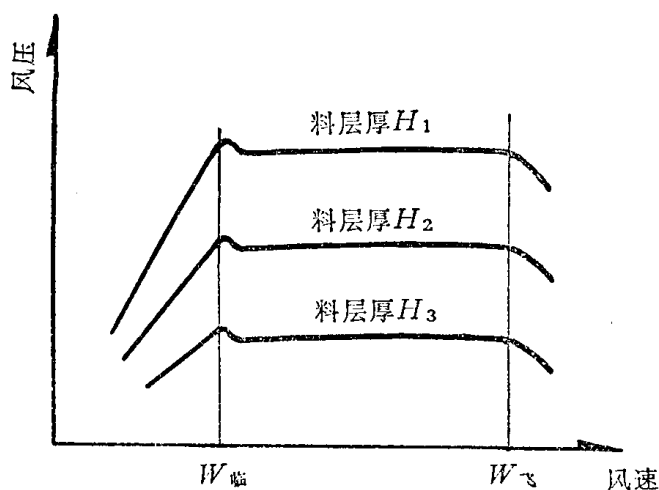


图 1-4 不同料层堆积厚度下风压—风速曲线

再取不同料层厚度作同样试验,求出对于不同料层厚度的压降和风速的关系曲线,见图1-4。

从这些试验中可以看出,料层厚度不同,临界沸腾风速却几乎不变,这是沸腾状态的一个重要特征。因为风向上的吹力与料层颗粒的重量相等时的风速就是临界沸腾风速。只要是同一种燃料,同一种颗粒度,则临界沸腾风速也就一样。料层的厚薄仅对临界沸腾风速下的压降大小有影响。

若料层的颗粒直径增大或改变了燃煤品种,如 $r_{粒}$ 增大,风速就要相应地增大才能托住颗粒,所以临界沸腾风速就必须增大。

试验表明,料层阻力的变化在沸腾层区域为水平线段,说明沸腾阻力与以截面风速表示的流体速度几乎无关,这也反映了截面风速虽有增加,而沸腾床层内颗粒之间的实际风速仍然不变。

经过大量试验统计表明,在沸腾状态下料层阻力与沸腾层的重量有下列关系:沸腾层的阻力同单位面积布风板上的沸腾层重量与流体浮力之差大约相等。这一关系可表示为:

$$\Delta P = \frac{G}{F_{底}} = \frac{F_{底} h_{沸} (r_{粒} - r_{空})(1 - \varepsilon)}{F_{底}} = h_{沸} (r_{粒} - r_{空})(1 - \varepsilon) \quad (1-6)$$

式中: ΔP ——沸腾层的压力降(公斤/米²或毫米水柱);

G ——沸腾层中煤料的重量(公斤);

$h_{沸}$ ——沸腾层高度(米);

$F_{底}$ ——布风板面积(米²);

$r_{粒}$ 和 $r_{空}$ ——煤粒的真实重度与空气的重度(公斤/米³);

ε ——沸腾层的空隙率,由于沸腾层颗粒上下也不均匀,所以此空隙率为平均空隙率。

为了简化计算,由于 $r_{空} \ll r_{粒}$,就可以忽略 $r_{空}$,从而得到 $\Delta P = h_{沸} r_{粒} (1 - \varepsilon)$ 。因

为 $h_{\text{沸}}$ 、 ε 还要测定，所以采用未沸腾前固定床煤粒的堆积重量加以表示。其式如下：

$$\Delta P = Ah_{\text{堆}} r_{\text{堆}} \quad (1-7)$$

式中： $h_{\text{堆}}$ ——料层静止高度（米）；

$r_{\text{堆}}$ ——料层堆积重度（公斤/米³）；

A ——由煤种决定的比例系数。其数值见表1-1。

表 1-1 各种煤的 A 值

煤 种	石 煤	煤矸石	无烟煤	烟 煤	烟煤矸石	造气炉渣	油页岩	褐 煤
A 值	0.76~0.82	0.9~1.0	0.8	0.77	0.82	0.8	0.7	0.5~0.6

应该指出，当料层厚度 $h_{\text{堆}} < 0.3$ 米时，试验数据与公式1-7的计算数据相差较大，试验所得的阻力在料层厚度很小时，只有计算值的80%，其原因是由于沸腾层内一部分粒子还停滞在布风板上未被气流托起，当料层厚度小时，这部分粒子相对影响就大，反之，厚度超过0.3米后，试验数据就和计算数据接近了。在沸腾炉中，料层厚度均超过0.3米，所以能很好地合乎公式(1-7)。

二、临界沸腾风速和工作风速

1. 临界沸腾风速及影响其变化的各种因素。影响临界沸腾风速的因素很多，除颗粒大小（用 $d_{\text{平}}$ 、 $d_{\text{当}}$ 表示）、颗粒与流体（烟气、空气）介质的重度（用真实重度 $r_{\text{粒}}$ 、 $r_{\text{流}}$ 表示）、煤粒间的空隙大小（用 $\varepsilon_{\text{堆}}$ 表示）外，还与煤粒的形状（用 ψ 或 $d_{\text{当}}$ 表示）、煤粒流动时的粘度（用随温度变化的烟气或空气动力粘滞系数 γ 表示）等许多因素有关。综合以上因素，通过大量的模拟实验或实际运行试验，可整理出准则方程式。

上海锅炉研究所得出的准则方程式为：

$$Re_{\text{临}} = 0.142 V^{1.46} \quad (1-8)$$

式中：

$$V = d_{\text{当}} \sqrt[3]{\frac{4}{3} \frac{g}{\gamma^2} \frac{r_{\text{粒}} - r_{\text{流}}}{r_{\text{流}}}}$$

$$Re = \frac{W_{\text{临}} d_{\text{当}}}{\gamma} \quad (\text{雷诺准则})$$

此式应用范围为 $40 \leq V \leq 210$

化简1-8式可得：

$$W_{\text{临}} = 0.497 d_{\text{当}}^{0.46} \gamma^{0.026} \left(\frac{r_{\text{粒}}}{r_{\text{流}}} - 1 \right)^{0.487} \quad (\text{米/秒}) \quad (1-9)$$

浙江大学热工教研组对浙江石煤做了大量试验，总结出下列准则方程式：

$$Re_{\text{临}} = 0.0882 Ar^{0.528} \quad (1-10)$$

式中：

$$Ar = \frac{g d_{\text{当}}^3 r_{\text{粒}}}{\gamma^2 r_{\text{流}}} \quad (\text{阿基米德准则})$$

此式应用范围 $Ar = (2 \sim 700) \times 10^4$

化简1—10式:

$$W_{\text{临}} = 0.289 \frac{d_{\text{当}}^{0.584}}{\gamma^{0.054}} \left(\frac{r_{\text{粒}}}{r_{\text{流}}} - 1 \right)^{0.528} \quad (1-11)$$

清华大学锅炉教研组在《沸腾燃烧锅炉》一书中, 引用苏联拉祖莫夫的准则方程式为:

$$Re_{\text{临}} = \frac{Ar \varepsilon_{\text{堆}}^{4.75}}{1.8 + 0.6 \sqrt{Ar \varepsilon_{\text{堆}}^{4.75}}} \quad (1-12)$$

化简上式

$$W_{\text{临}} = \frac{\gamma}{d_{\text{当}}} \frac{Ar \varepsilon_{\text{堆}}^{4.75}}{1.8 + 0.6 \sqrt{Ar \varepsilon_{\text{堆}}^{4.75}}} \quad (1-13)$$

还有一些总结出的临界沸腾风速准则方程式, 如费道罗夫得出的临界沸腾速度公式为:

$$Re_{\text{临}} = 0.095 Fe^{1.56}$$

式中:

$$Fe = d_{\text{当}} \sqrt[3]{\frac{4}{3} \frac{g}{\gamma^2} \left(\frac{r_{\text{粒}}}{r_{\text{空}}} - 1 \right)}$$

适用于 $40 \leq Fe \leq 200$ 范围。

托杰斯、格罗斯科公式:

$$Re_{\text{临}} = \frac{Ar}{1400 + 5.22 \sqrt{Ar}}$$

以上公式的得来有两种途径。第一种是以流体(液体、气体)绕过各个固体粒子(料层)时, 利用固体粒子的重量应该等于流体向上的托力才能进行沸腾这一平衡概念, 根据相似原理得出来的。第二种是利用在固态床中研究的阻力、流速、摩擦系数、颗粒当量直径与真实比重的关系, 引入某些假定后, 用来研究沸腾层的规律。实践是检验真理的唯一标准, 不论用何种方法得出的定律都要回到实践中去加以证实。对一般煤种的临界沸腾风速, 可用 1—9、1—13 两式计算, 求出的结果相近。而用 1—11 式计算石煤为好。在应用这些准则方程式时, 最重要的是要注意使用条件和适用范围。

下面对影响临界沸腾风速的诸因素进行必要的讨论。

(1) 如果 $d_{\text{当}}$ 、 $r_{\text{粒}}$ 不变(是指同一种燃料, 同一筛分的颗粒而言), 当沸腾床温度改变时, 对临界沸腾风速产生的影响。沸腾炉在常温下(即未燃烧时), 临界沸腾风速称为冷态临界沸腾风速 $W_{\text{临}}^{\text{冷}}$ 。沸腾炉在正常运行时, 沸腾层温度在 $900 \sim 1050^\circ\text{C}$ 范围之内, 此时临界沸腾风速称为热态临界沸腾风速 $W_{\text{临}}^{\text{热}}$ 。这两个速度的关系就是当 $d_{\text{当}}$ 、 $r_{\text{粒}}$ 不变时温度对临界沸腾风速发生的影响。下面以 1—9 式进行讨论。

在 $t=t_1(^{\circ}\text{C})$ 时,

$$W_{\text{临}1} = 0.497 d_{\text{当}}^{0.46} \gamma_1^{0.026} \left(\frac{r_{\text{粒}}}{r_{\text{流}1}} - 1 \right)^{0.487}$$

由于 $r_{\text{粒}} \gg r_{\text{流}1}$ 所以可以简化为:

$$W_{\text{临}1} = 0.497 d_{\text{当}}^{0.46} \gamma_1^{0.026} \left(\frac{r_{\text{粒}}}{r_{\text{流}1}} \right)^{0.487}$$

在 $t=t_2(^{\circ}\text{C})$ 时, 同理:

$$W_{\text{临}2} = 0.497 d_{\text{当}}^{0.46} \gamma_2^{0.026} \left(\frac{r_{\text{粒}}}{r_{\text{流}2}} \right)^{0.487}$$

比较 $W_{\text{临}2}$ 和 $W_{\text{临}1}$, 得:

$$W_{\text{临}2} = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^{0.026} \left(\frac{r_{\text{流}1}}{r_{\text{流}2}} \right)^{0.487} W_{\text{临}1}$$

$$\text{令 } M = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^{0.026} \left(\frac{r_{\text{流}1}}{r_{\text{流}2}} \right)^{0.487}$$

则: $W_{\text{临}2} = MW_{\text{临}1}$

(1-14)

若以 $t_1=0^{\circ}\text{C}$ 为基准, 求出 t_2 为 $100^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 时, 其 M 值如表1-2。

表 1-2 M 值

温 度 $^{\circ}\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
M	1	1.135	1.34	1.49	1.62	1.74	1.85	1.96	2.06	2.17	2.27

注: 温度在 400°C 及 400°C 以下的流体按空气计算, 400°C 以上的流体按烟气计算。

以 0°C 为基准, 不同温度下 M 值与温度的关系用图1-5曲线表明。

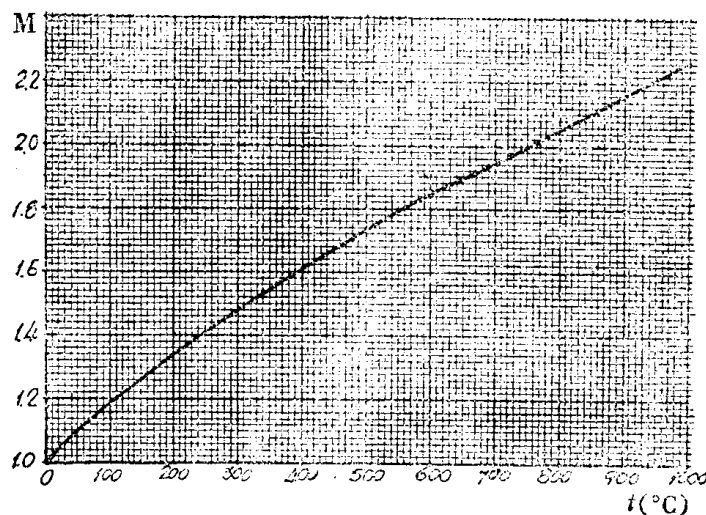


图 1-5 不同温度下临界沸腾风速与 0°C 时临界沸腾风速的比值 M 曲线

从图 1-5 可见，热态临界沸腾风速为冷态临界沸腾风速的 2 倍左右。必须指出，热态临界沸腾风量并不是冷态临界沸腾风量的 2 倍。这是由于热态临界沸腾风速随着沸腾床温度上升而增加了 $\frac{M_2}{M_1}$ 倍，但烟气体积也增加了 $\frac{273+t_2}{273+t_1}$ 倍。下面对热态与冷态临界沸腾风量的关系加以讨论。

热态（或冷态）的临界沸腾风量等于热态（或冷态）的临界沸腾风速乘以沸腾床布风板面积 $F_{底}$ 。

即：热态临界沸腾风量为 $V_{热} = W_{热临} F_{底}$

将此风量化为 0°C 时的体积：

$$V_{热} = W_{热临} F_{底} \frac{273}{273+t}$$

而 $W_{热临} = W_{冷临} M$

所以： $V_{热} = F_{底} W_{冷临} M \frac{273}{273+t}$

而 $F_{底} W_{冷临} = V_{冷}$ 即为冷态时的临界沸腾风量，

所以： $V_{热} = V_{冷} M \frac{273}{273+t}$

$$\frac{V_{热}}{V_{冷}} = M \frac{273}{273+t} = b \quad (1-15)$$

以 0°C 为基准的冷态临界沸腾风量，与热态临界沸腾风量之比，其 b 值计算结果如表 1-3。

表 1-3 b 值

温 度 $^{\circ}\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
b	1	0.867	0.775	0.71	0.656	0.615	0.58	0.552	0.523	0.506	0.481

现画出在不同温度下临界沸腾风量与 0°C 时临界沸腾风量的比值 b 的曲线图。由图

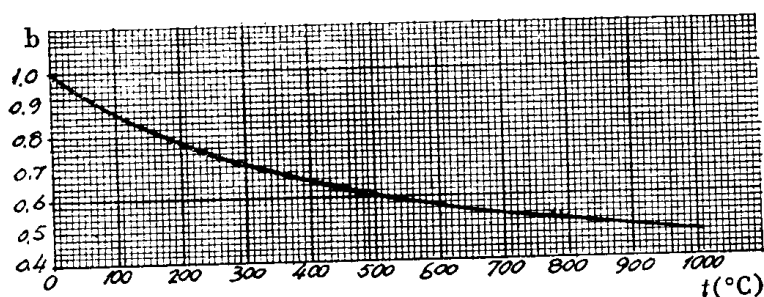


图 1-6 不同温度下临界沸腾风量与 0°C 时临界沸腾风量的比值 b

1-6 可知，在床温为 $900 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 时，这时的临界沸腾风量仅为冷态 (30°C 左右) 临界沸腾风量的 $0.52 \sim 0.49$ 倍。这说明热态运行时的临界沸腾风量仅为冷态临界沸腾风量的一半。因而，在冷态沸腾起来后转入热态运行时，其风量就可以减少。但

总送风量是由燃料特性和燃料燃烧量来决定的（见第二章），因之要保证锅炉出力燃烧所需要的煤量，其送风量是一定的，即为热态时的工作风量。这样容易产生以下疑问，这样的风量用在冷态时是否够用？反之按冷态送风量选风机，其风量是否要比正常需要的送风量大一倍？这只要从冷态到热态的点火起动过程进行分析。原来，点火起动时，在送风机缓缓开动之下，其料层上面碳的小颗粒先被燃烧，在风量不断增大的情况下，炉床的温度也随之不断提高，可知送风机容量的选择并不需要风量达到计算风量的两倍。

(2) 如果煤粒真实重度 $r_{\text{粒}}$ 和沸腾床温度 t 不变，只改变 $d_{\text{当}}$ ，看对沸腾风速的影响。这就是研究在同一种燃料同一沸腾温度下只改变颗粒筛分时，临界沸腾风速出现的变化。

设 $d_{\text{当}} = d_1$ 时，代入公式1—9，

临界沸腾风速为：

$$W_1 = 0.497 d_1^{0.46} \gamma^{0.026} \left(\frac{r_{\text{粒}}}{r_{\text{流}}} - 1 \right)^{0.487}$$

同理 $d_{\text{当}}$ 改变为 d_2 后，

$$W_2 = 0.497 d_2^{0.46} \gamma^{0.026} \left(\frac{r_{\text{粒}}}{r_{\text{流}}} - 1 \right)^{0.487}$$

$$\text{即： } W_2 = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0.46} W_1 \quad (1-16)$$

用对数坐标很容易求出 W_1 W_2 的关系曲线，见图1-7。

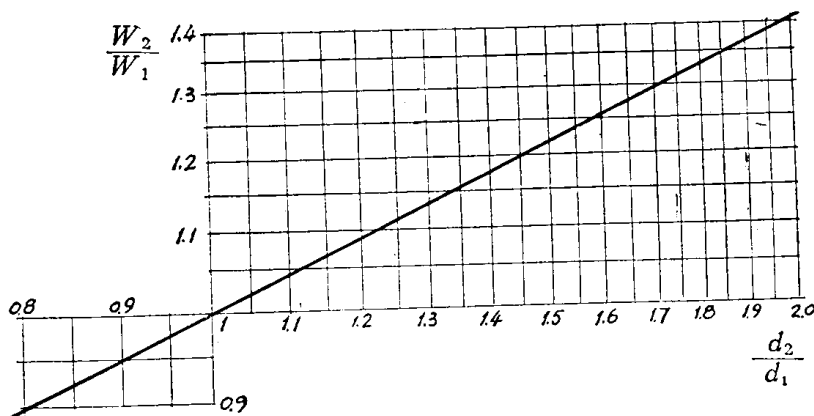


图 1-7 在不同筛分下沸腾临界风速关系

从图1-7可以清楚看出，当 $d_{\text{当}}$ 增大一倍，临界沸腾风速就要增加 40%，这样送风机就要增加电耗。以上计算说明，用减小粒径的办法是可以降低送风机电耗的。目前，不少省、市沸腾炉燃料筛分已由 0~10 毫米或 0~8 毫米降到 0~6 毫米，国外沸腾炉燃料筛分以 4 毫米以下者为多。此外，减小粒径还可改善沸腾质量，提高沸腾段传热系数，降低燃料损失。

(3) 如果燃料的当量直径 $d_{\text{当}}$ 和沸腾层温度不变，只改变其真实重度 $r_{\text{粒}}$ ，看对临界沸腾风速的影响。即研究其他条件不变，只变燃料品种时，临界沸腾风速的变化规