

④ 21-27

# 细颗粒流化床炉衬表面 粗糙度对流态化质量的影响

TK229.66

The Effect of Furnace Surface Roughness in a  
Fine Particle Fluidized Bed on Fluidizing Qualities

卢啸风<sup>①</sup> 王致均<sup>①</sup> 辛明道<sup>①</sup> 肖朝文<sup>①</sup> 尹友中<sup>②</sup> ✓  
Lu Xiaofeng Wang Zhijun Xing Mingdao Xiao Chaowen Yin Youzhong

(① 重庆大学热力工程系, 重庆, 630044; ② 四川省电力工业局计规处; 第一作者 34 岁, 男, 副教授)

**摘 要** 就细颗粒流化床的炉衬表面粗糙度对(准)散式流化状态的影响进行了试验研究。试验采用粒径为 0.076~0.45 mm 的细石墨粒子, 通过变换不同的炉衬和采用自制的炉内电阻网络测量装置, 得到了炉内流化滞区的分布和表面粗糙度与壁面附近流化滞区厚度的关系, 并结合细颗粒与不同炉衬壁面之间的摩擦系数的测量结果, 对炉衬表面粗糙度与流化滞区的关系进行了理论分析。研究表明, 粗糙的炉衬表面会产生较大的流化滞区, 并使流化状态过早地转变为聚式流化。

**关键词** 流化床; 炉衬; 表面粗糙度

中国图书资料分类法分类号 TG155.1

锅炉, 流化滞区

**ABSTRACT** Experimental study on the effect of fine-granular fluidized bed's furnace surface roughness on (quasi) dispersion fluidization properties was included in this paper. The particles of diameter from 0.076 to 0.45 mm were used in the test. With different kinds of furnace liners and a resistant measuring device made by ourselves, the relations among surface roughness, the distribution and the thickness of fluidizing dead zone near the surface were got. Considering measuring results of coefficients of friction between fine particles and different kinds of furnaces, a theoretical analysis on the relation was made. The researching results showed that a rough surface might result in thicker fluidized state deadzone and lead to fluidization change from aggregative fluidization into dispersion fluidization more quickly.

**KEYWORDS** fluidized bed; furnace liner; surface roughness

## 0 引 言

细颗粒(粒径小于 0.45 mm)流化床常作为循环流化床锅炉的回料装置或鼓泡床锅炉的飞灰燃烬装置而应用于燃烧工程领域, 也可用于化学工程(如各种流化床反应器)和金属热

处理(如流化床热处理电炉)领域。由于细颗粒在流化床中除受重力和气流曳力作用外,还受到颗粒之间、颗粒与壁面之间吸附力(其数值可与前两种力达到同一数量级)的作用,因此其流化特性与粗颗粒的流化特性相差很大。国内外许多学者的研究表明:细颗粒气-固流化床可以在一定的操作条件下形成往往只存在于液-固流化床中的(准)散式流化<sup>[1]</sup>。由于(准)散式流化床中几乎不存在有可能引起气体短路的大气泡,并且可以较大幅度提高流化床反应器中的气-固反应率,因此如何在尽可能宽的流化速度范围内形成(准)散式气-固流化床,就成为流态化领域内的一个重要研究课题。近年来,国内外许多学者对影响(准)散式气固流化状态的细颗粒特性、布风装置特性等因素进行了试验和理论研究<sup>[2~7]</sup>。

由于炉衬壁面粗糙度对流化特性的影响问题涉及到气-固两相摩擦因数 $f_m$ ,而 $f_m$ 的影响因素众多,它是13个变量或10个无因次数的函数<sup>[8]</sup>,因此在以前的研究工作中,均采用粗糙度比较小的炉衬材料(如有机玻璃、钢板),以回避壁面摩擦问题。

笔者首次对细颗粒流化床的壁面摩擦问题进行了试验研究。研究表明:炉衬表面粗糙度对细颗粒流化特性有很大的影响。当炉衬表面粗糙不平时,在靠近炉壁附近,会形成一层有一定厚度的流化滞区,同时大量流化气体以大气泡形成从炉膛中心穿过,使流化状态过早地由(准)散式流化转变为聚式流化。与正常流化区域相比,流化滞区内的床料密度较高,传热传质能力较低。由于高温细颗粒流化床常用比较粗糙的耐火材料作炉衬,流化滞区的存在还有可能导致炉壁附近结焦,因此研究炉衬表面粗糙度与流化滞区的关系,是极为必要的。

## 1 试验概况

试验在图1所示的10 kW细颗粒流化床试验台上进行。其炉膛高700 mm,炉膛横截面积等效于一个 $\Phi 200$  mm的圆面积(可采用圆形、椭圆形、三角形及矩形等形状),采用粒径范围为76~450  $\mu\text{m}$ 并呈正态分布的细石墨粒子作床料,所用的炉衬材料分别为:有机玻璃、不锈钢板、锈蚀的普通钢板、普通耐火砖、表面光滑的耐火砖(用粗砂纸打磨然后涂上水玻璃)和耐高温陶瓷炉衬。

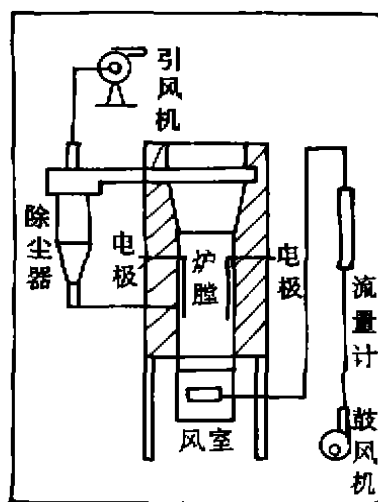


图1 10 kW 细颗粒流化床试验台

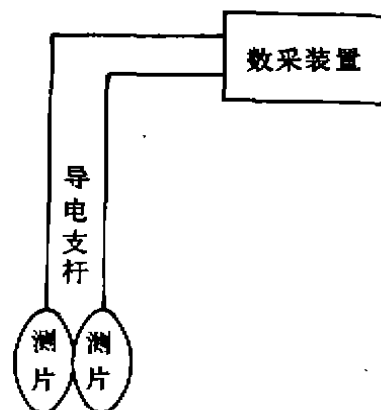


图2 炉内电阻网络测量装置

在风室、布风板、床料的粒度分布、静止料位高度等设计及运行参数不变的条件下,分别对配以不同炉衬时的炉内冷态流态化特性进行了试验。试验中采用自制的炉内电阻网络测量装置(如图 2 所示)测量炉内电阻的分布情况,根据流化区域与流化滞区具有不同的电阻值的关系,确定了炉内流化滞区的位置分布。该电阻网络测量装置由测片、导电支杆及数采装置组成。测片是一个  $\Phi 10$  mm 铁片,两测片相距 10 mm,铁片背面和导电支杆上涂有高温绝缘涂料。数采装置有四个采样通道,可同时测量四点的电阻值。采样频率均为 50 次/秒,并可对连续数秒钟所测的上百个瞬时测量值自动进行平均。

为了定量说明炉衬表面粗糙度对流化质量的影响,笔者对颗粒与不同炉衬表面之间的最大摩擦因数进行了测量,并分析了表面粗糙程度与滞区存在的关系。最大摩擦因数采用下述经典方法测量:

把一块与炉衬材料相同的平板,放置于水平面上,将少量石墨粒子放置于平板上,然后缓慢地使平板倾斜,当平板倾斜到某一位置时,平板上的石墨颗粒开始下滑,记下此时平板与水平面的夹角  $\theta$ ,则  $\operatorname{tg}\theta$  即为颗粒与炉衬表面之间的摩擦因数。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 炉衬表面粗糙度对流化特性曲线的影响

图 3 所示是分别采用耐火砖炉衬和耐高温陶瓷炉衬并配以微孔陶瓷布风板时测得的冷态流化特性曲线。可见,采用耐火砖炉衬时,可得到较小的“临界”流化速度。但流化风速达到此临界速度时,却只在炉膛中心部分出现流化,炉膛边缘存在厚度很大的“流化滞区”;风速继续增大,流化滞区趋于减少,但很快炉膛中心出现大气泡,形成聚式流态化,流化滞区也不再随流化速度增加而减少。

从图中还可看出:流化风速超过临界流化风速后,采用耐火砖炉衬时,床层压降随风速增加而缓慢上升,并且波动很大。当采用耐高温陶瓷炉衬时,则可在较大的风速范围内形成(准)散式流化。由其流化特性曲线可看出,在临界流化风速以后,床层压降非常平稳。

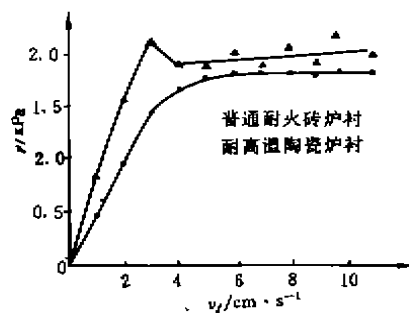


图 3 冷态流化特性曲线

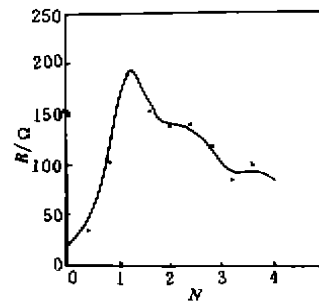


图 4 炉内电阻与流化状态的关系

### 2.2 炉内电阻分布与流化状态的关系

图 4 所示是炉内某点电阻  $R$  与流化数的关系。由图可见,当石墨粒子处于静止状态时,相互接触紧密,电阻值最小。随流化数增加,石墨粒子之间空隙增大,炉内电阻值也逐渐增大。当流化数等于 1 时,炉内处于临界流化状态,但此时炉内电阻值仍未达到最大值,而是随

流化风速增加而继续增大,一直到流化风速略大于临界流化风速时,电阻值才达到最大,表明此时流化风速达到临界鼓泡速度。再继续增大风速,由于炉内产生大量气泡,使炉内扰动增加,电阻值反而有所下降。由此可见,通过测量炉内石墨粒子的电阻变化,可以从量的方面确定炉内的流化状态。

### 2.3 采用不同炉衬时,炉内电阻的水平分布

图5所示是采用不同炉衬时,距布风板150 mm高度处,炉内电阻的典型分布状况。由图可见,在炉膛中间,电阻分布比较平坦。在靠近炉壁附近,对于表面比较光滑的炉衬,电阻值下降不大;对于表面比较粗糙的炉衬,往往存在一个电阻值的突降,其下降幅度很大,大约为炉膛中间电阻值的90%。试验中可以非常直观地观察到此时炉壁附近存在一个流化滞区,在这一流化滞区中,石墨粒子基本不动或只存在脉动。试验中还发现,除不锈钢板、有机玻璃和耐高温陶瓷以外的其它炉衬,在不同的运行条件下,都能观察到一定厚度的流化滞区。流化滞区的区域大小,也随运行条件不同而有所不同。临界流化状态下,流化滞区区域最大;随流化风速升高,其区域逐渐减小,最后趋于一定值。

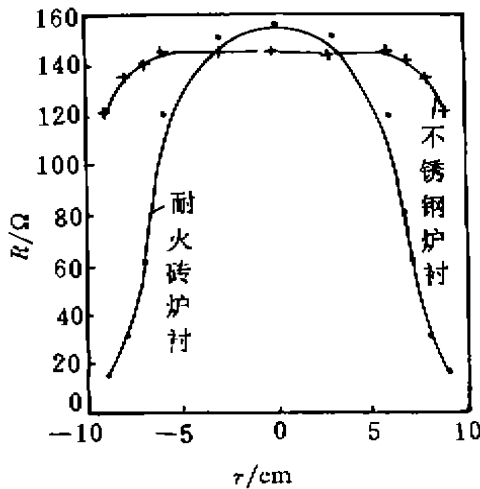


图5 炉内电阻的水平分布

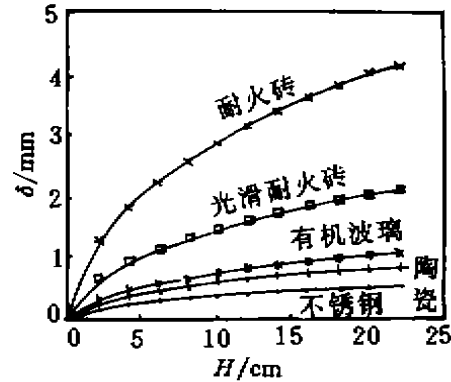


图6 冷态时炉衬表面流化滞区厚度 $\delta$ 与炉膛高度 $H$ 的关系

### 2.4 采用不同炉衬时,流化滞区厚度随炉膛高度的变化曲线

图6所示是采用不同炉衬时在冷态下所测的炉衬表面流化滞区厚度 $\delta$ 随炉膛高度 $H$ 的变化曲线。试验表明,流化滞区厚度随高度的增加而增加;一旦产生较厚的滞区,就很难形成(准)散式流化,流化气体会以大气泡的形式从炉膛中心穿过,在床层表面造成剧烈的波动和飞溅。由图6可知,采用耐火砖炉衬时,厚度增加得最快,最大可达4 cm;并且很难形成(准)散式流化;但对耐火砖炉衬表面进行光滑处理(用砂纸打磨并涂以水玻璃)后,则滞区厚度明显下降,出现了(准)散式流化区域;其它表面较光滑的炉衬的滞区厚度也较小(均在1 cm以内),也能形成(准)散式流化。

表1给出了不同炉衬所能形成(准)散式流化的流化数范围。这再次说明炉衬的表面粗糙度确实对流态化特性有较大的影响。由于流化滞区内传热差,很容易造成局部过热结焦,因此对高温细颗粒流化床,最好采用表面比较光滑的炉衬材料。

表 1 不同炉衬所能形成(准)散式流化的流化数范围

炉衬名称	有机玻璃	普通耐火砖	表面光滑的耐火砖	耐热钢板	耐高温陶瓷
流化数范围	1~2	不存在	1~1.4	1~1.8	1~ $\infty$

### 2.5 流化滞区的形成机理分析

为了弄清流化滞区形成的原因,在试验中曾多次人为地对床层进行搅动,以破坏壁面附近的流化滞区。但一旦停止搅动,流化滞区很快又恢复。这说明流化滞区是能够稳定地存在于流化床中。由于在试验中没有改变除炉衬以外的其它参数,因此滞区的形成既不是由于起始流态化造成的,也不是流化气体向炉膛中心自然汇聚而产生的,而是由炉衬的表面粗糙度引起的。由于存在滞区,导致流化气体向炉膛中心汇聚,并增大了气泡彼此汇合的可能性,从而使床内过早地进入聚式流化状态。

我们对流体滞区的形成提出如下一种假说:

1) 流化床壁面上存在一个层流边界层,固体颗粒不断地进入边界层,并沿壁面下滑,如图 7 所示;

2) 当壁面上存在明显的凹凸时,细颗粒会在流化气体的侧压作用下嵌入到炉壁的凹处,从而在炉衬壁面上聚集,形成一个由固定的细颗粒组成的壁面;

3) 由于细颗粒之间吸附力的作用,颗粒间的内摩擦力一般比颗粒与壁面间的摩擦力大<sup>[9]</sup>,后面的颗粒会继续附着在紧贴壁面的那层颗粒上;颗粒的不断附着,导致流化滞区形成,并使滞区边界向炉膛中心移动;

4) 当流化滞区增加到一定的厚度时,在重力作用下,滞区整体向下移动,滞区边缘的细颗粒被上升气流带走。

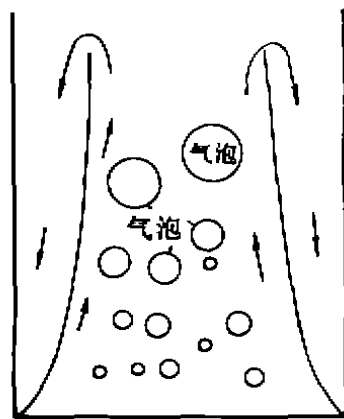


图 7 流化滞区及其附近区域内的流动示意图

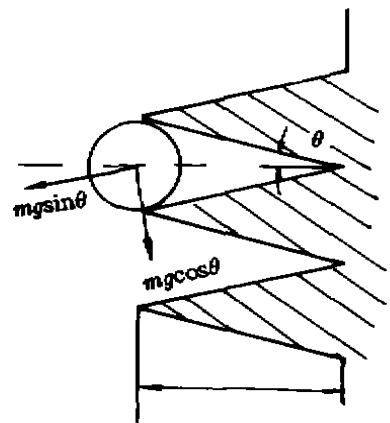


图 8 炉衬表面处的石墨粒子受力示意图

由此可见,滞区形成的关键是要有一部分细颗粒能停留在壁面上。这取决于炉衬壁面上的平均起伏高度  $K$  和表面锯齿形状以及细颗粒的平均粒径。平均起伏高度越大、锯齿越尖锐(锯齿斜边与水平夹角越小,此夹角应小于最大静摩擦角)、颗粒粒径越小,则颗粒越容易

停留在壁面上。将颗粒近似当作圆球体处理,则在壁面上的凹凸之处,存在图 8 所示的受力平衡:

$$F_n = mg \times \sin\theta \quad (1)$$

在最大静摩擦状态下,假使颗粒表面不呈规则球面,故只存在滑动趋势,则有:

$$F_n = mg \times \cos\theta \times \mu, \quad \mu = \operatorname{tg}\theta \quad (1)$$

最大静摩擦因数  $\mu (= \operatorname{tg}\theta)$ 、颗粒直径  $d_p$ 、炉衬壁面起伏平均高度  $K$  之间存在如下关系:

$$K = d_p \times \cos\theta / (2 \cdot \operatorname{tg}\theta) \quad (2)$$

石墨粒子在各种炉衬上的最大静摩擦角见表 2 所示。假设颗粒在锯齿斜面上的最大静摩擦因数即为表 2 中最大静摩擦角的正切值,则由式(2)可算出在不同炉衬表面上,使床料中直径在平均粒径以下的颗粒能停留在炉壁上所必须的壁面最小起伏高度值( $k$ 值),表 2 中列出了按平均颗粒直径  $d_p = 0.263 \text{ mm}$  计算出的  $k$  值。

表 2 石墨粒子在炉衬上的最大静摩擦角度及最小起伏高度

炉衬材料	$\theta/(\circ)$	$K/d_p$	$k/\text{mm}$
有机玻璃	30	0.75	0.195
不锈钢板	25	0.97	0.255
普通耐火砖	40	0.46	0.12
光滑耐火砖	35	0.59	0.15
锈钢板	50	0.27	0.07
耐高温陶瓷	28	0.83	0.22

由表 2 可见,不锈钢板的摩擦角最小,颗粒在其壁面上停留时所必须的壁面最小起伏高度( $k$ 值)最大;锈钢板的摩擦角最大,颗粒在其壁面上停留时所必须的壁面最小起伏高度( $k$ 值)最小。 $k$ 值代表了颗粒停留于炉衬表面的容易程度, $k$ 值越小,颗粒越容易在壁面上停留。另一方面,摩擦角的大小则在一定程度上代表了炉衬表面的粗糙程度;表面越粗糙,颗粒也越容易粘附在壁面上。即炉衬壁面越粗糙,从摩擦角和壁面最小起伏高度两方面都越容易造成流化颗粒在炉衬壁面上停留。

### 3 结 论

1 炉内电阻分布的测量结果表明,炉内电阻及其分布值与炉内的流化状态有直接的关系。当采用表面比较粗糙的炉衬时,炉内电阻值在炉壁附近存在一个幅度很大的突降,证明在炉壁附近存在一个流化滞区。

2 试验结果表明:炉衬表面粗糙程度对细颗粒的流化特性有很大影响。粗糙的炉衬表面会在壁面附近产生较厚的流化滞区;采用普通耐火砖作炉衬时,在距布风板 200 mm 高度处,流化滞区厚度可达 40 mm。

3 炉衬表面越粗糙,床层压降波动越大,越不容易形成(准)散式流化;采用内表面光滑的炉衬(如耐高温陶瓷炉衬),当流化数在 2 以下时,可形成(准)散式流化;而采用内表面粗糙的炉衬(如普通耐火砖炉衬),则根本无法形成(准)散式流化:

4 分析表明:产生流化滞区的主要原因是流化过程中部分细颗粒停留在炉衬表面的凹凸处。影响细颗粒在炉衬壁面上停留的主要因素有炉衬壁面的平均起伏高度  $K$ 、炉衬内表面锯齿形状以及细颗粒的平均粒径。这三者之间存在如下关系:

$$K = d_p \cdot \cos\theta / (2 \cdot \mu g)$$

### 符 号

- $d_p$  颗粒直径,mm  
 $F_n$  单一颗粒与壁面的摩擦力,N  
 $f_w$  两相摩擦因数  
 $K$  壁面平均起伏高度,mm  
 $k$  壁面最小起伏高度,mm  
 $\theta$  炉衬表面锯齿面与水平面夹角  
 $\mu$  单一颗粒与炉衬表面的摩擦因数

### 参 考 文 献

- 1 J F 戴维森, D 哈里森编. 流态化. 北京:科学出版社,1981,18~21
- 2 王中礼. 气体流化床的不稳定性和分布板设计原理,化工冶金,1980,(4):57
- 3 石炎福. 分布板压降对流化状态的影响. 化工学报,1989,40(2):221
- 4 Geldar D. The Effect of Particle Size and Size Distribution on the Behavior of Gas-Fluidized Beds. Powder Technol. 1972,(6),201~215
- 5 王樟茂. 粒度及粒度分布对流化床临界参数及床层膨胀的影响. 化学反应工程与工艺,1985,(1~2):48
- 6 蔡平. 床径对流化床中气-固流化行为影响的研究,清华大学学报,1988,28(3):22
- 7 堀尾正男. 流态化床分布板区、鼓泡区和稀相区颗粒的行为. 化工冶金,1982,(3):35
- 8 盖德·希特斯洛尼编. 多相流动和传热手册. 鲁钟琪等译. 北京:机械工业出版社,1993,460~470
- 9 上濑具贞著. 粉粒体的空气输运. 阮少明等译. 北京:电力工业出版社,1982,93~96