

# 旋涡流化床旋风燃烧的动力学研究

段钰锋 赵长遂 徐益谦

(东南大学)

**〔摘要〕**以旋涡流化床悬浮空间喷入二次风形成一强旋流场和气固悬浮流动为物理模型,试验研究了从床面夹带到悬浮空间颗粒群的运动行为及气固两相浓度场的匹配。指出在气相强旋湍流的作用下,在近壁区形成一稳定的高浓度的颗粒悬浮层,颗粒在炉内的平均停留时间延长,气固滑移速度增大,两相混合强烈并充分接触,良好的空气动力结构对提高炭粒在悬浮空间的燃尽度,降低扬析可燃物损失十分有利。本文研究结果,对降低常规鼓泡床及抛煤机链条炉内的飞灰可燃物损失,提高悬浮空间的气流横向混合速率有重要参考价值。

**关键词** 旋涡流化床 横向混合 旋风燃烧

**分类号** TK224

## 1 前言

常规鼓泡流化床燃煤锅炉存在着燃烧效率不高,颗粒在炉内停留时间短,扬析量大,炭不完全燃烧损失大,有时还可能因床内气流横向混合不佳使部分挥发份逸出炉外。上述缺陷也使得脱硫剂钙利用率低,脱硫效率不高。新近开发的旋涡流化床燃煤新技术<sup>[1,2]</sup>集中体现了流化床燃烧,分级燃烧和悬浮空间旋风燃烧的优点,燃烧强度大,燃烧效率高,烟尘排放少,具有常规鼓泡床无可比拟的优越性。其特点是在悬浮空间以一定方式喷入二次风,其结果一方面利用了分级燃烧的原理抑制了 $\text{NO}_x$ 的大量生成;另一方面,强旋流场强化了气固间的接触与混合;第三,对悬浮空间的颗粒具有较强的分离和燃尽作用。事实上,旋涡流化床燃烧技术体现了强旋流场中气固两相流动、混合、传热及燃烧诸过

程间的相互作用与影响。鉴于此,本文研究了旋涡流化床悬浮空间强旋流场的空气动力学特性、颗粒运动行为及气体横向混合与扩散的规律。试图运用空气动力学原理阐述强旋流场对颗粒分离和燃尽的影响,运用燃烧动力学原理阐述气固相间的传质和浓度场的匹配,从这一新的气流结构和燃烧的组织上指出了旋涡流化床旋风燃烧技术的应用前景。

## 2 流化床内炭粒燃烧特点

流化床燃烧的特点之一是低温燃烧和床内经济脱硫。选择合适的床温需考虑燃烧、脱硫和脱硝的综合影响。炭表面反应生成物CO的着火温度为 $650^\circ\text{C}$ <sup>[3]</sup>,脱硫剂( $\text{CaCO}_3$ )的钙化反应温度为 $771^\circ\text{C}$ <sup>[4]</sup>,这便是流化床燃烧温度的下限。当床温低于 $815^\circ\text{C}$ 时,燃烧和钙化反应均受化学反应动力控制。

收稿日期 1993 04 23 修改定稿 1993 07 19

本文联系人 段钰锋 男 31 副教授 210018 南京市 东南大学热能工程所

床温达  $844^{\circ}\text{C}$  时, 脱硫效率接近最大值<sup>[5]</sup>, 超过此温度, 尽管炭燃烧反应速率加快, 但固硫产物  $\text{CaSO}_4$  的分解使脱硫效率降低。因此, 流化床的最佳温度往往控制在  $815\sim 899^{\circ}\text{C}$  之间<sup>[5]</sup>。由此可见, 在流化床的燃烧条件下炭颗粒的燃烧处于过渡区, 即化学反应和扩散联合控制区<sup>[6]</sup>。所以, 要提高流化床悬浮空间细颗粒的燃烧反应速率和燃尽度, 适当提高其温度水平, 延长其停留时间, 增强气流的扰动, 强化两相间的传质过程并使两相的浓度场相匹配, 便成为使炭粒在悬浮空间燃烧完全的重要因素。

### 3 旋涡流化床悬浮空间的空气动力结构

图1为热线风速仪测得的旋涡流化床悬

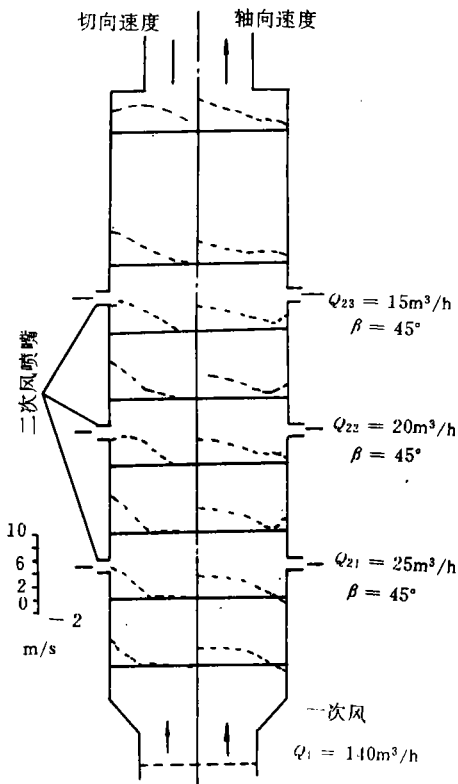


图1 切向和轴向速度分布

浮空间切向和轴向速度的典型二维分布。占总风一定份额 ( $R_2 = 30\%$ ) 的二次风以较高的速度 ( $15\sim 25\text{ m/s}$ ) 沿切向或割向射入, 形成一强旋流场。贴壁流动的向下分流形成了位于悬浮空间下部近壁区的轴向环形回流区。显见, 该流场结构比常规鼓泡床复杂得多, 其夹带和扬析的机理也必然存在着明显的差异, 主要表现在悬浮空间的强旋流场对颗粒的气动分离作用和该作用下颗粒运动轨迹的改变。常规鼓泡床中, 颗粒与气流的分离主要依靠在较高的夹带分离高度 ( $\text{TDH}$ ) 内颗粒重力作用下的自然沉降。但在旋涡流化床中则依靠空气动力学原理, 使颗粒获得了切向速度而产生离心力被“强制分离”到壁面附近, 在回流区返流速度的作用下顺利返回床内形成内循环运动, 或者形成颗粒悬浮层运动<sup>[2]</sup>, 从而使颗粒在悬浮空间有较长的停留时间, 扬析速率降低, 燃尽度提高, 烟尘排放相应减少。将本文采用的二次风喷射技术用于改造某一台  $35\text{ t/h}$  抛煤机链条炉, 通过合理组织悬浮空间的旋风燃烧过程, 已经获得了成功<sup>[7]</sup>。如飞灰重量减少  $40\%$ , 飞灰碳含量降低  $20\%$ , 锅炉效率提高 ( $8\sim 10\%$ ), 其经济和社会效益相当可观。

### 4 旋涡流化床悬浮空间的颗粒运动行为

为合理组织旋涡流化床悬浮空间的旋风燃烧过程, 需探讨颗粒的平均停留时间以及两相浓度场的匹配。用颗粒示踪法测得细颗粒在床内的浓度份额与时间的关系反映在图2中。工况1至4分别表示总风量不变, 二次风流量从零逐渐增大时的变化规律。易见, 对具有相同粒度分布和初始浓度的示踪颗粒, 在鼓泡床的操作条件下 (工况1,  $R_2 = 0$ ), 床内颗粒浓度衰减甚快, 在不到2分钟的时间内, 已降至其初始值的  $4\%$  以下。但在旋涡

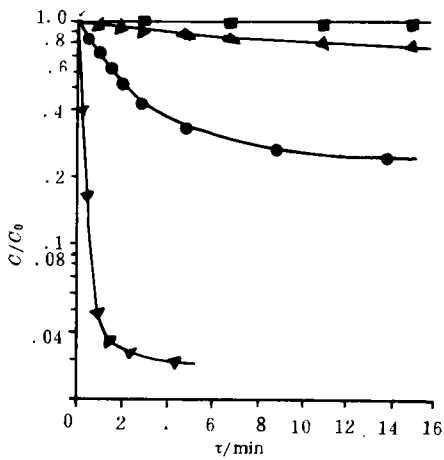


图2 颗粒瞬时浓度与扬析时间的关系

$d_p = 0.20 \sim 0.25 \text{ mm}$ ,  $C_0 = 5\%$

- ▼ 工况1  $Q_1 = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_2 = 0$
- 工况2  $Q_1 = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_2 = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\beta = 0^\circ$
- ▲ 工况3  $Q_1 = 155 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_2 = 45 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\beta = 45^\circ$
- 工况4  $Q_1 = 140 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_2 = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\beta = 60^\circ$

床内,当  $R_2 = 30\%$  的二次风以  $\beta = 60^\circ$  的入射角割向射入悬浮空间时(工况4),虽经20分钟的扬析时间,但床内浓度仍高达初始值的90%以上。颗粒扬析速率减慢,平均停留时间延长,是旋涡流化床的特点之一。

旋涡流化床悬浮空间颗粒质量流率沿径向和轴向上的典型分布示于图3和4中。由

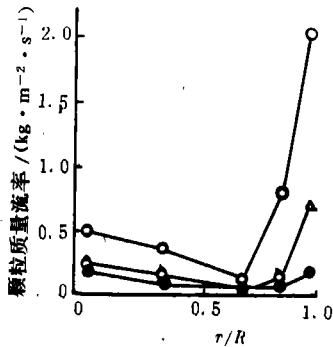


图3 颗粒质量流率的径向分布

○  $H/R = 5.4$  △  $H/R = 7.8$  ●  $H/R = 10.2$

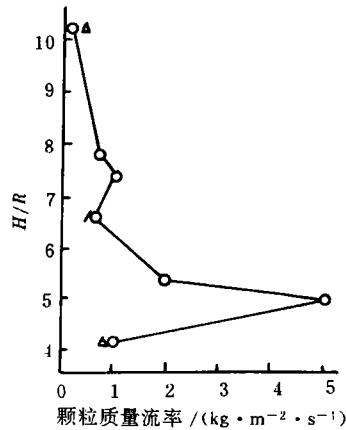


图4 颗粒质量流率的轴向分布

○  $R_2 = 30\%$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $\tau/R = 0.93$   
 △  $R_2 = 0$ ,  $Q_1 = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\tau/R = 0$

前述的空气动力场知道,在中心区切向速度沿半径增大而逐渐增加,颗粒质量流率因此而呈逐渐减少的趋势。至0.65倍半径处,颗粒质量流率达一极小值,此时对应切向速度梯度的极大值点。以后随半径增大,颗粒质量流率迅速增加,颗粒集中于壁面附近形成一高浓度区<sup>[2]</sup>。由于二次风从壁面处喷入,此区内气流切向速度始终是最高的,而颗粒群之间的互磨与碰撞阻止了颗粒速度的增加。因此在该区,气固相间的滑移速度最高,两相间的传质过程也最激烈。

距内壁面6mm处测得的颗粒质量流率沿床高的变化示于图4,同时也示出鼓泡床中心线上测得的相应分布。可见,不同于鼓泡床沿悬浮段高度的夹带率呈指数衰减的规律,旋涡床近壁区内颗粒质量流率沿床高呈锯齿形峰谷交错分布,且沿高度衰减得更快。这一分布特点要求与一定的氧浓度分布相匹配,以满足炭燃烧的物质浓度条件。

### 5 旋涡流化床悬浮空间二次风氧浓度分布

用气体示踪技术研究了二次风喷入悬浮空间后的氧浓度分布。即向二次风中注入纯度为99.99%的气体示踪剂 $\text{CO}_2$ ，通过测量与二次风一同射入悬浮空间的 $\text{CO}_2$ 体积浓度沿径向的分布，来模拟研究二次风中的氧浓度分布及其沿径向的扩散，进而研究二次风

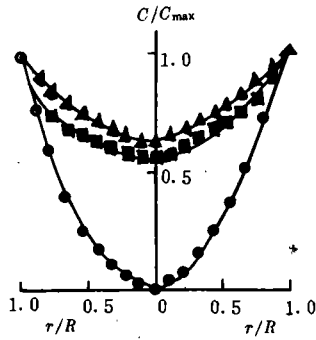


图5 喷射角对 $\text{CO}_2$ 剖面相对浓度的影响

$$R_2 = 34.5\%, \quad H/R = 3.0$$

符号	$\beta$	$D_i$	$\epsilon$
●	$0^\circ$	$D_0$	1.00
■	$45^\circ$	$0.71D_0$	0.47
▲	$60^\circ$	$0.5D_0$	0.38

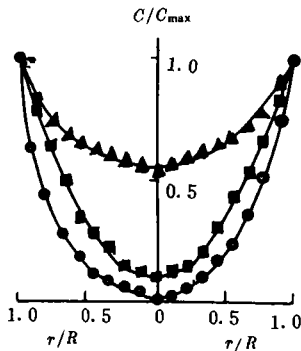


图6 二次风率对 $\text{CO}_2$ 剖面相对浓度的影响

$$\beta = 45^\circ, D_i = 0.71D_0, H/R = 3.0$$

符号	$R_2$	$\epsilon$
●	13.8%	1.0
■	23.6%	0.89
▲	34.5%	0.47

射流对提高悬浮空间气流横向混合速率的作用和影响。图5和图6所示分别为相同份额的二次风以不同入射角射入和不同份额的二次风以相同入射角射入时，示踪剂( $\text{CO}_2$ )相对浓度的剖面分布。可见，无论二次风的入射角如何变化(图5)，二次风射流的富氧区始终位于壁面附近，保证了高浓度颗粒群所需的燃烧空气量。并且，二次风的份额越大，入射角越大，其向中心区的穿透力越强，其横向的扩散与混合速率越快，新鲜的氧化剂向炭粒表面的扩散速度也越快。

综上所述，旋涡流化床悬浮空间两相流间的质量和动量传输过程及混合条件，都有利于使夹带到悬浮空间的含炭颗粒满足过渡燃烧区的混合及燃烧条件，从而有利于提高其燃尽度，并减少粉尘排放。

## 6 前景展望

1. 本文以空气动力学和化学动力学的理论为根据，剖析了旋涡流化床悬浮空间强旋流场的空气动力结构及其对悬浮颗粒运动的影响，其结果延长了炭粒子在炉内的平均停留时间，强化了两相间的传质，基本满足了两相浓度场的匹配。表明旋风燃烧是提高流化床悬浮空间炭粒燃尽度的有效措施，将这一技术用于35 t/h链条抛煤炉的改造已经取得了明显的社会和经济效益。

2. 旋涡流化床燃烧新技术具有燃烧强度大，燃烧效率高，锅炉结构紧凑，投资省，负荷调节性能好，粉尘排放少，锅炉尾部受热面的磨损减轻等优点。适合于中小型常规鼓泡床的改造和推广。其环保方面的要求也明显高于常规鼓泡床锅炉。

3. 本文强化悬浮空间气流横向混合的措施和经验，可为工业流化床燃煤锅炉提供一般性的借鉴。  
(下转第220页)

作用。

对于高原地区的风扇磨煤机的选型设计。由于大气压降低而导致的燃烧反应速度降低带来的影响,其提升压头除了考虑密度(即大气压力、输送介质温度)的修正外,在选择煤粉细度、热空气温度等都作慎重的考虑。一般的选择原则是:高原地区的风扇磨煤机的选取比一般地区的风扇磨煤机的选取大一个型号<sup>[6]</sup>。

### 4 结论

S<sub>02.300</sub> 试验磨煤机方法的研究为国内电厂的磨煤机选型和制粉系统设计计算提供了科学的依据。综合以上研究分析认为:根据流动和几何相似而建立的 S<sub>02.300</sub> 试验磨煤机制粉系统的试磨方法是科学的,其试验结果的准确度能够达到设计要求的,试验结果可以

为电厂磨煤机选型设计和制粉系统设计计算提供有关的特性参数。通过试磨研究,一方面可以对煤质特性进行综合性评价,另一方面还可以得该煤种在该型磨煤机中的研磨特性以提供设计依据。

### 参考文献

- 1 Von U. Schiiler. Stand der Mahltechnik in Kraftwerken. VGB, 1990.(7)
- 2 何佩敖,张肃.我国风扇磨煤机制粉系统的设计问题.电站系统工程,1991,(2)
- 3 金秀浩.KSG 风扇磨煤机.沈重技术,1990,(4)
- 4 成庆刚.S<sub>02.300</sub>试验磨的试磨方法的研究探讨.电站辅机,1992,(3)
- 5 张永兴.WGZ65/39—12 锅炉制粉系统改造技术.动力工程,1991,(1)
- 6 张安国.电力部行业标准 DL466—92 电站磨煤机及制粉系统选型导则.西安热工所,1992

(上接第 209 页)

### 参 考 文 献

- 1 赵长遂.旋涡流化床悬浮段气固悬浮流试验研究.东南大学学报,1990,20,(2),PP:35~41
- 2 段钰锋,赵长遂,徐益谦.旋涡流化床颗粒运动和扬析机理试验研究.东南大学学报,1992,Vol. 22,增刊,PP:76~82
- 3 徐谷衡,章名耀,徐益谦.NIT 燃煤增压流化床燃烧模型计算.工程热物理学报,1986,17(4)
- 4 [英]霍华德 J R 主编.流化床的燃烧和应用.科学出版社,1987.4
- 5 Korenberg J., etc. Two-stage circulating fluidized bed combined with cyclone combustion, Proc. of 10th Int. Conf. on FBC, ASME, 1989, 1019-1024
- 6 付维标,卫景彬.燃烧物理学基础.机械工业出版社,1984
- 7 金保升等.采用旋涡燃烧技术改造抛煤链条炉.中国工程热物理第八届年会论文集,四分册,北京,1992

<i>C</i>	重量浓度或体积浓度,kg/kg 或 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<i>C</i> <sub>0</sub>	初始重量浓度,kg/kg
<i>C</i> <sub>max</sub>	截面最大体积浓度,m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<i>C</i> <sub>min</sub>	截面最小体积浓度,m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<i>d</i> <sub>p</sub>	颗粒直径,m
<i>D</i> <sub>1</sub>	切圆直径,m
<i>D</i> <sub>0</sub>	悬浮空间内径,m
<i>H</i>	悬浮空间内高度,m
<i>Q</i> <sub>1</sub>	一次风体积流量,m <sup>3</sup> /h
<i>Q</i> <sub>2</sub>	二次风总体积流量,m <sup>3</sup> /h
<i>Q</i> <sub>2<i>i</i>(<i>i</i>=1,2,3)</sub>	第 <i>i</i> 排二次风体积流量,m <sup>3</sup> /h
<i>r</i>	径向座标,m
<i>R</i>	悬浮空间半径,m
<i>R</i> <sub>2</sub>	二次风份额,%
	$R_2 = Q_2 / (Q_1 + Q_2)$
<i>t</i>	扬析时间,min
<i>e</i>	浓度不均匀系数
	$e = (C_{max} - C_{min}) / C_{max}$
<i>β</i>	二次风入射角(射流方向与入射点切线所夹锐角),度
<i>m</i>	颗粒质量流率,kg/(m <sup>2</sup> ·s)

符 号

# JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1994 Vol. 9 No. 4

---

## CONTENTS

- (193) **Boiler Furnace slagging and Preventive Measures**.....He Peiao (*Harbin Electric Power Plant Equipment Design Institute*), Ai Jing (*Harbin Institute of Technology*)

Proceeding from established theories and practical personal experience the authors briefly describe various types of boiler furnace slagging and slagging-causing factors. Specific measures for the prevention of slagging are proposed in detail and various kinds of applicable reference data given. Presented in this paper are some examples of newly designed boilers firing slagging-prone fuels and existing boilers modified for operating on slagging-prone fuels. A variety of design principles and effective measures for slagging prevention are also laid down. **Key words:** *boiler furnace slagging, affecting factors, preventive measures, classification*

- (206) **Dynamics study of Vortex Fluidized Bed Cyclone Combustion**..... Duan yufeng, Zhao Changsui, Xu Yiqian (*Southeast University*)

With the help of a physical model featuring the injection of secondary air into a vortex fluidized bed suspension space to form a strong swirling-flow field and gas/solid suspension flow, an experimental study has been performed of the motion behavior of the groups of particles entrained from the bed surface into the suspension space and the matching of gas/solid dual phase concentration fields. It is observed that under the action of gas phase strong vortex turbulent flows there emerged at the near-wall region a stable suspension layer of high-concentration particles. The average retention time of the particles in the boiler is lengthened and gas/solid sliding speed increased, resulting in a strong dual phase mixing and sufficient contact, The proper aerodynamic structure exercises a very favorable effect on the enhancement of burning-down degree of carbon particles in the suspension space, bringing about a reduction of segregated combustible loss. The cold model experimental study results presented in this paper can prove very helpful in lowering the flyash combustible loss occurring in conventional bubbling fluidized bed and travelling-grate boilers equipped with coal spreaders and in enhancing the gas flow transverse mixing speed in the suspension space. **Key words:** *vortex fluidized bed, transverse mixing, cyclone combustion, classification*

- (210) **The Combustion Efficiency of Circulating Fluidized Bed boilers**..... We Zheng (*Xiang Tan boiler works*)

During the design of circulating fluidized bed boilers two factors, i. e. rational furnace height and circulation ratio, are in the main taken into consideration in order to enhance combustion efficiency. Derived in the paper is a formula for calculating furnace minimum height of a circulating fluidized bed boiler and also a relation between combustion efficiency and circulation