

970045

# 燃烧高水分低热值燃料的内旋流 流化床燃烧技术研究\*

盛宏至\*\* 黎 军 魏小林 田文栋 郝金华 王柏懿 吴承康  
(中国科学院力学研究所)

## 摘 要

内旋流型流化床炉利用非均匀布风产生高温气-固两相旋流,使燃料在炉内运动、相互碰撞、干燥、破碎、燃烧,并可通过改变布风控制燃料加热与挥发份析出速率、燃烧温度与热负荷,适合多种高水分劣质煤及城市垃圾的洁净燃烧,是一种高效低污染流化床燃烧技术。本文研究该型燃烧器床内空气运动、燃烧、传热及排放规律,发展新型清洁燃烧技术。

关键词: 流化床, 燃烧, 传热

## The Study of the Internal Circulating Fluidized Bed Combustion Technology for Burning High Moisture and Low Heating Value Fuels

Sheng Hongzhi Li Jun Wei Xiaolin Tian Wendong  
Hao Jinhua Wang Boyi Wu Chengkang  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

The Internal Circulating Fluidized Bed (ICFB) Combustor can generate high temperature gas-solid two-phase swirl by non-homogenous air distribution, which lets the fuels in the combustor move, impact, dry, crash, and ignite. The heating rate, gasification rate of the volatile components and the combustion temperature and load can be controlled by adjusting air distribution and various fuels, such as high moisture low grade coals and municipal solid waste (MSW), can be burned in ICFB furnace. ICFB Combustion is a sort of technology of high efficiency and low pollutant emission FBC (fluidized bed combustion). This paper studies the air motion pattern, the mechanisms of combustion, heat transfer and pollution formation, and develops the new clean

\* 国家攀登计划部分资助项目。

\*\* 中国, 北京, 邮编 100080。

combustion technology

**Key words:** Fluidized bed, Combustion, Heat transfer

## 引 言

当今世界, 能源与环境是人类持续发展面临的重大问题。清洁、高效、低本地燃烧洗煤、泥煤与城市垃圾、工农业垃圾等高水分、低热值燃料是极具挑战性的工作。这些燃料成分与燃烧特性差异大, 密度、形状与尺寸不规则, 燃烧容易结团, 固定碳扩散能力差距很大, 有些燃料的含水量可能高达 60%, 使清洁稳定的燃烧十分困难。

一般的燃烧方式无法使上述燃料稳定彻底的燃烧, 可以在燃烧中掺烧塑料、橡胶等工业垃圾, 以提高热值。但塑料橡胶的挥发份析出速率极高, 燃烧过程难以控制, 高分子聚合物极易在缺氧的高温气氛下裂解, 产生大量有害气体及碳烟, 严重污染环境。

传统沸腾燃烧方式效率高, 燃烧温度均匀, 燃料适应性强, 但对上述燃料的燃烧与排放控制适应性有限<sup>[1]</sup>, 因此, 发展适合多种燃料, 易于控制燃烧与排放的新型沸腾燃烧装置具有重要意义。

## 1 “清洁”燃烧器

低热值高水分煤的燃烧有相当难度。因此要在炉内对燃料充分干燥、预热、翻动, 技术难度比干燥煤燃烧高得多。因而应采取相应措施, 如采用热空气预热, 使用合理的一、二次风分配及较长的燃烧持续时间, 确保燃烧彻底; 有时还辅以辅助燃料等方法。流化床炉采用大量石英砂作为热载体, 蓄热性强, 并用高速气流翻搅燃料, 床内温度均匀, 燃料加热、干燥均匀充分, 燃烧稳定性好, 燃料适应性强, 排渣含碳量低, 过量空气系数不高, 燃烧温度低且易于控制, 氮氧化物的生成量较少, 此外还可在炉内加入碱性物质脱硫, 减少对锅炉换热面的腐蚀, 为新一代“清洁”燃烧器。

内旋流型流化床炉 (Internally Circulating Fluidized Bed —— ICFB) 是一种与传统鼓泡床和循环流化床不同的流化床类型, 由低速移动床与高速流动床构成复合结构 (图 1), 具有独特的优点。ICFB 采用石英厚砂床作为蓄热体, 通过燃料加热区 (移动床)、主燃烧区 (流动床) 与换热区 (移动或流动床) 的分别布风, 各区间较大的流化倍率差造成固相颗粒大尺度内旋流, 改善了燃料横向扩散、偏析等特性。由于 ICFB 利用有组织的高温床料旋流使燃料迅速干燥、加热, 从而维持燃烧温度的均匀稳定, 还使燃料相互剧烈碰撞, 可以破碎高水分燃料的凝聚结团。非均匀布风可独立控制燃烧与传热过程, 还有利于减少气泡与沟流对燃烧的影响。ICFB 床温均匀地控制在 800℃ 左右, 可实现低温高效燃烧, 防止玻璃等不燃物熔融结渣, 有效地利用石灰石实现床内脱硫脱氯, 自由空间温度维持在 900℃, 燃烧完全, 可以彻底破坏二噁英、呋喃 (PCDD, PCDF) 等有害气体。

特别需要指出, 当燃料热值、含水量或尺寸形状突然变化时, 还可改变加热区流化速度, 控制 ICFB 高温砂床对燃料的传热速率, 控制挥发份析出与燃烧速率, 防止排烟中氧含量过低、CO 及碳烟超标, 特别适合高水分劣质燃料的燃烧。特别是在 ICFB 床中布置与燃烧区独立布

风的埋管换热区,降低该区的流化倍率,可使总换热系数从100%降到20%,可在保持最佳燃烧温度的前提下大幅度改变换热量,负荷调节比远大于传统锅炉。如果将埋管设计为过热器,还可简单地控制锅炉的蒸汽过热参数,实现瞬时负荷调节。总之,ICFB的适应性较传统流化床炉更强,为流化床燃烧技术的发展方向,也是新一代“清洁”燃烧器的发展方向。

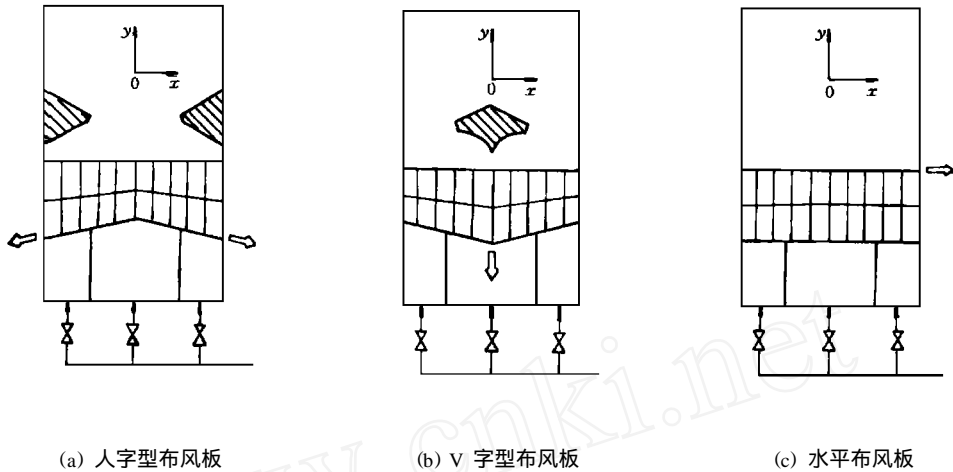


图1 3种冷模实验装置示意图

但是,ICFB技术存在大量气固两相流动、传热传质与燃烧学问题。尽管构思提出多年,国外也已开展研究,日本荏原公司也已经开发出此类流化床锅炉,但因其原理对流动控制的要求严格,技术难度较高,该公司对技术核心严格保密,从未公开过核心技术秘密与关键实验数据。中科院力学所近年进行了一系列冷态流动、燃料扩散与偏析、传热特性等试验研究与初步的数值模拟,并筹建了热态试验炉,独立发展ICFB技术。

## 2 ICFB 炉的研制

我们针对我国高水分燃料的燃烧特点,选择ICFB炉为研究对象,开发燃烧与烟气排放特性可控,并具有瞬时负荷变化适应能力的燃烧技术。为此,首先必须调整砂床向燃料的传热,控制燃料的加热速率及挥发份析出速率,从而控制燃烧速率,保证燃烧在合理的瞬时空燃比下进行,防止燃烧速率过高,空气供应不足产生大量CO与HC,使烟气中氧含量保持在5%~12%的范围,达到排放标准。其次必须有效地控制砂床向外界(如埋管)的传热速率,保证在燃料热值与含水量大幅度变化或锅炉负荷急剧变化时,砂床温度始终稳定在800℃左右,彻底解决NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、HCl排放及结渣、燃烧彻底等问题。

为保证流化床燃烧良好,流化倍率应大于3,但传热特性可控制的范围为1~2,鼓泡床锅炉工作在较高的流化倍率状态以满足燃烧的要求,因此无法独立控制燃烧传热特性。而ICFB内通过非均匀布风实现大尺度床料旋流,并可设置偏转板加强旋流。流化空气在进入浓相床时不同区域的速度差很大,形成复合床结构,通过控制移动床气流速度可以控制床料向燃料的传热速度,从而控制燃烧速度与温度。在ICFB床中布置与燃烧区独立布风的埋管换热区,改变该区的流化倍率,调节总换热系数。针对上述特点,我们进行了冷态流动特性试验、传热特性试

验, 热态试验炉建设及中试系统方案设计等系列研究。

### 2.1 非均质燃料扩散与分离偏析特性的冷态模拟试验

为研究不同密度不同尺寸燃料成分的扩散与分离偏析特性, 在 3 个小型冷态模拟装置中进行了试验(图 1), 装置几何尺寸均为 400 mm × 150 mm × 650 mm, 独立风室供风, 有效床面积 380 mm × 130 mm, 面积比 1 : 2.1, 布风板开孔率 5.81%, 孔径 4 mm。ICFB 床分别采用 15° 型与 12° 型布风板, 偏转板高 200 mm, 流化速度在高速风区为 0.9 m/s, 在低速风区为 0.2 m/s。水平均匀布风的鼓泡床供对比用, 流化速度为 0.4 m/s。床料采用粒径 0.5 mm ~ 1.0 mm 的黄砂, 静止床高为 130 mm。为模拟密度不同的异质组分, 分别选用尼龙、软硬塑料片等比重约 0.9~ 1.0 的轻质材料和比重 8 左右的铜铁金属片等重质材料制作示踪粒子, 尺寸分别为 3 mm × 5 mm, 5 mm × 5 mm 及 10 mm × 10 mm 等, 厚度 0.5 mm, 数量各为 200 个。测试开始时将示踪粒子一次注入床层表面的中心处, 控制床层流化的时间, 然后分别在床层内分 20 个子域取样计数(分区参照图 1)。

实验结果表明: 密度不同的示踪粒子有明显的分离偏析, 轻质粒子在 2 s 时间内不能在床层内分散均匀, 但 10 s 时间内已可以分散到整个床层内, 在 x 和 y 方向均达到较好的混合; 重质粒子逐步偏析到床层底部投料处(图 2)。ICFB 内轻质粒子的横向扩散能力远优于鼓泡床, 可改善可燃物的扩散混合与燃烧特性; 倾斜床比水平床有利于重质颗粒的侧滑, 不燃物可以自行移动到排出口附近, 分离排出<sup>[1, 2]</sup>。

此外, 还进行了冷热态空流场数值模拟<sup>[3]</sup>及 ICFB 破碎能力模拟试验, 结果表明 ICFB 有一定的破碎能力, 有助于破碎高水分煤的凝聚结团。

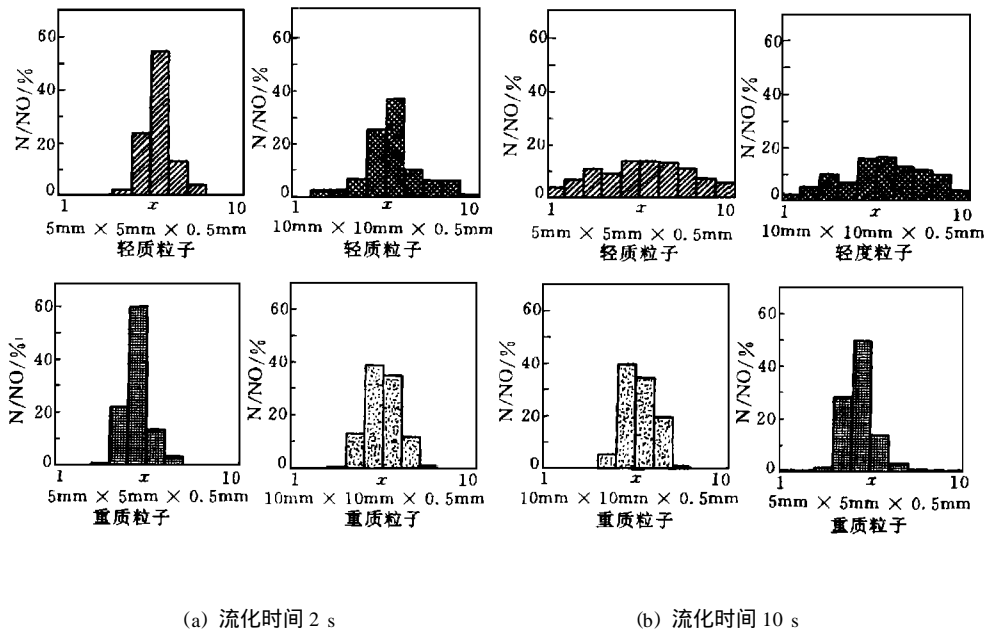


图 2 轻重质粒子扩散偏析特性的比较

### 2.2 传热特性研究

为研究移动床层向入炉燃料的传热特性及流化床与锅炉埋管间的换热特性设计了传热特

性试验。试验在常温流化床试验台进行,用高温油加热埋管,实现等壁温传热条件,测量管壁向砂床的换热量,着眼点为换热区流化倍率(0~20)对换热系数的影响及临近的流动区流化倍率的影响,以期得到较平坦的换热系数曲线,易于控制。试验系统为在冷态试验台上增加加热系统及埋管。试验研究发现:无挡板的ICFB传热特性比有挡板ICFB更为平坦(图3),高风速区流化倍率 $G'_f$ 变化对换热系数有明显影响,归纳了 $Nu$ 数公式如下:

$$Nu = (-0.787G'_f + 6.24) \frac{Nu_T}{47} + 3.42G'_f - 21.25$$

式中 $Nu_T$ 为小颗粒鼓泡床埋管传热的努谢尔特数<sup>[4]</sup>,该公式对于ICFB传热特性有较准确的预测能力,图4实线为计算值,虚线为20%误差带,试验点集中在实线附近,在虚线带内。

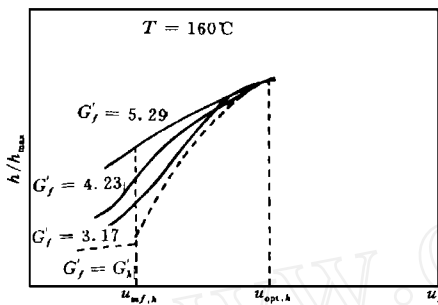


图3 ICFB 传热特性对比

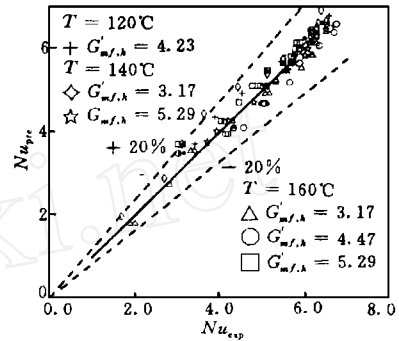


图4 ICFB 传热系数试验值与预测值关系

根据对试验结果的分析,可以认为ICFB埋管传热特性与鼓泡床差别的根本原因在于流化速度低于临界值时,鼓泡床床料停止运动成为固定床,而在ICFB邻近流动床的作用下,换热区的砂子在移动,因此改变了传热与传质过程;流动床区气体流速变化改变了换热区的砂子移动规律,因而对传热过程也有很大的影响。

2.3 1.2 t/d(吨/日处理量)热态试验炉研制

为研究ICFB床燃烧特性,积累经验,研制了1.2 t/d热态试验炉。

高水分燃料的高位热值( $H_{HV}$ )是锅炉设计的基本数据,应由氧弹试验测定,但因采样技术制约,一般测试精度较低。对于主要发热成分为烃类、碳水化合物的燃料,化学成分已知时可按作者归纳的公式<sup>[5]</sup>计算 $H_{HV}$ ,误差一般不超过2%。

$$H_{HV} = 35\,590C + 115\,140O + 9266S \quad (\text{kJ/kg})$$

对常见烃类与碳水化合物,根据化学反应关系导出每1000 kJ高位热值燃料的理论空气量 $L_{th}$ 如下式,精度能满足工程需要。

$$L_{th} = 0.2320m^3/1000 \text{ kJ} (H_{HV})$$

总过量空气系数为1.5~1.6,一次风量占45%~55%。一次风温度为控制床温、燃烧效率及排气成分的主要因素,空气预热至200~300,适当改变一、二次风量分配及总过量空气系数,可大幅度适应负荷与热值的变化。为有效控制移动床内的传热速率,选择移动床流化倍率为 $U/U_0 = 0.5 \sim 1.8$ ,流动床 $U/U_0 = 4 \sim 20$ 。根据砂粒密度直径与燃烧温度,可得到不同部位的起始流化速度与扬析速度,再由指定的流化倍率得到各段布风板与自由空间的截面积。

为能进行多种试验研究,该系统具有多组独立风路:分别用烟气预热的一、二次风、床面风、烟道射流风等;多个温度压力测孔、采样孔;试验段结构为组合式,采用多个小孔风帽布风板;密相区床截面 500 mm × 125 mm;风机压力 10 kPa~ 25 kPa。试验系统示于图 5。

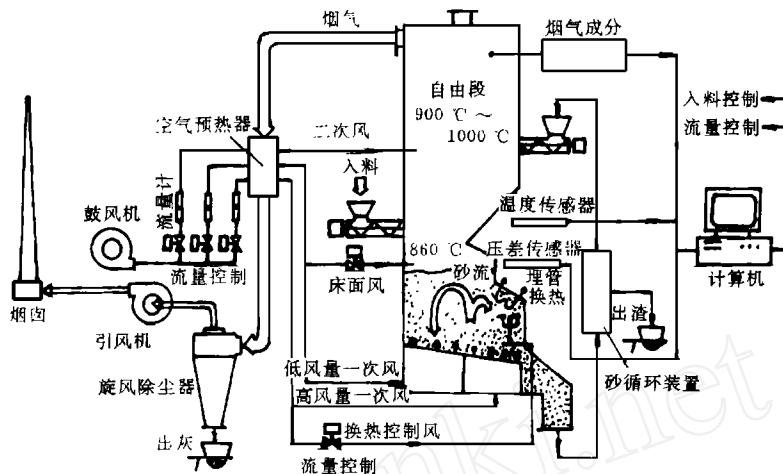


图 5 1.2t/d 处理量内旋流流化床炉系统

不同区域的炉内温度采用热电偶测量,烟气中 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、HC、O<sub>2</sub> 等气体的含量采用烟气分析仪与检测管测量。根据燃料特点采用微机优化底风、床面风及燃烬风,控制燃烧速率,保持烟气中 O<sub>2</sub> 含量在 5% ~ 12% 之间;控制换热区速率,维持床温在 780 ~ 850 之间。

### 2.4 10 t/d 热态试验炉方案设计

参考发达国家的设计运行规范:燃烧温度不低于 1000 ;燃烧持续时间:二次风后不短于 1 s;燃烧室出口氧含量 6% ~ 12%;负荷调节范围 80% ~ 110%,CO 排放上限值为 57 mg/m<sup>3</sup> 或 5 × 10<sup>-5</sup>,进行了 10 t/d 热态中试炉方案设计(图 6<sup>[5]</sup>),主要参数为:

- (1) 处理能力与负荷变动范围: 10 t/d, 40% ~ 110%
- (2) 燃料低位热值范围与含水率: 4200 kJ/kg~ 9000 kJ/kg, 60% ~ 25%
- (3) 布风板面积: 1500 mm × 700 mm

校核计算表明,改变砂径可以适应燃料热值的稳定变化。当燃料热值瞬时波动时改变一

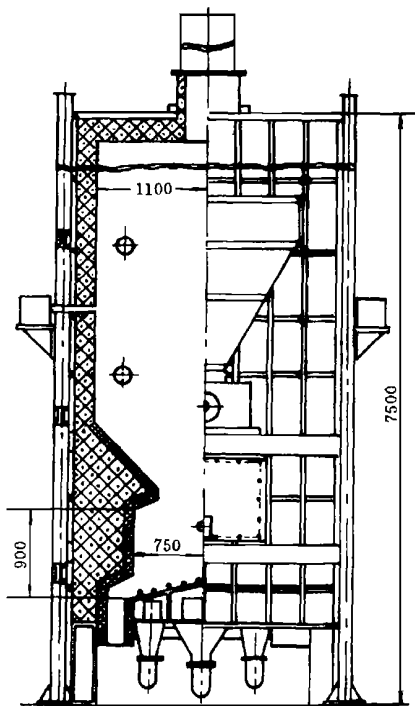


图 6 10 t/d 处理量内旋流流化床中试炉

次风流量, 可保持流化倍率在许可范围内。燃烧室的标定热强度为  $710 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \sim 1150 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 结构示于图 5。由于垃圾等高水分燃料中常含大尺寸不燃物, 需采用水冷搅龙底部排渣、振动筛筛分不燃物、斗式提升机砂循环的方式。

### 3 结束语

流化床是一种先进的燃烧方式, 已经逐渐被人们接受, 特别是非均匀布风 ICFB 等“清洁”燃烧技术的技术含量较高, 制造成本低, 代表流化床炉的发展趋势, 但其技术难度较高, 还需在应用及工程化中不断完善改进, 为我国及全球的环境与社会持续发展做出应有贡献。

感谢 本文研究工作得到国家科委攀登计划项目及中国科学院重点项目支持, 作者在此表示深切的谢意。

### 参 考 文 献

- 1 王柏懿, 盛宏至, 戚隆溪等. 废弃物燃烧及流化床焚烧炉冷模实验研究. 工程热物理学报, 1994, 15 (4): 453 ~ 456
- 2 盛宏至, 王柏懿, 田文栋等. 内循环式流化床异密度物体运动特性试验研究. 第三届全国工业流体力学学术会议论文集, ISBN 7-313-01274-8/0, 1993. 208~ 212
- 3 田文栋, 王柏懿, 盛宏至等. 回旋流型流化床垃圾焚烧炉热态湍流空流场的数值模拟, 青岛: 第三届全国环境流体力学学术会议论文集, 1994. 208~ 213
- 4 Grewal N S, Saxena S C. Heat Transfer between a Horizontal Tube and a Gas-Solid Fluidized Bed. Int J Heat Mass Transfer, 23: 1505~ 1519
- 5 Sheng Hongzhi, Wang Boyi, Tian Wendong, et al. Cold Model Investigation and Conceptual Design of the Fluidized Bed Refuse Incinerator of Revolving-Type. 北京: POLMET '94 城市环境国际研讨会论文集, Nov. 14~ 17, 1994: 787~ 795