

# 煤制气再燃低 $\text{NO}_x$ 燃烧中气固分离冷态实验研究

陈永权 张忠孝 毕德贵 娄彤滕叶  
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了研究部分气化煤制气再燃降低  $\text{NO}_x$  技术中的部分煤制气的气固分离效果以及影响分离效果的因素, 采用搭建与某 130 t 冷态炉膛相匹配的部分煤制气气固分离装置冷态实验台的方法, 测试了分离装置内底部分离风和顶部载气流速大小对装置内物料气固两相分离效果的影响。结果表明: 底部分离风与顶部载气流速是物料气固两相分离的两个重要影响因素, 其中, 当底部分离风流速  $v_1$  为 10 m/s, 顶部载气速度  $v_2$  为 5 m/s 时, 煤制气中半焦的分离效率最高, 挥发分的分离效率也达到较大值, 分离效果最好。

**关键词:** 煤制气; 气固分离; 分离效率; 数值模拟

中图分类号: TQ534; TD849 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2014)02-0080-04

## Cold experimental study of gas – solid separation of coal gas reburn low $\text{NO}_x$ burner

CHEN Yongquan ZHANG Zhongxiao BI Degui LOU Tong TENG Ye

(School of Environment and Architecture University of Shanghai for Science and Technology Shanghai 200093 China)

**Abstract:** Analyse the gas – solid separation efficiency and its influencing factors of coal gas in the technology of partially gasified coal gas reburn to reduce  $\text{NO}_x$ . Build a gas – solid separation cold test rig of coal gas which matches with a 130 tons cold hearth, exam the impact of separator wind and carrier gas flow rate on gas – solid separation effect of material in the separation device. The results show that, when the intake flow rate of the bottom inlet  $v_1$  is 10 m/s and the flow velocity of the top inlet  $v_2$  is 5 m/s, the separation efficiency of semi – coke is the highest and the separation efficiency of volatile also achieves greater value, the volatile can be well separated from semi – coke.

**Key words:** coal gas; gas – solid separation; separation efficiency; numerical simulation

## 0 引 言

部分气化煤制气技术<sup>[1]</sup>为解决中国部分电厂由于气源不足而无法通过气体再燃降低  $\text{NO}_x$  的问题提供了参考。利用部分气化煤制气中挥发分作为再燃燃料还原燃煤产生的  $\text{NO}$  是降低  $\text{NO}_x$  有效途径之一。这种技术主要将煤粉经过气化炉加热后, 煤粉中的挥发分作为再燃燃料送入炉膛的再燃喷嘴, 而产生的半焦则通过煤粉管道回到炉膛继续燃烧, 不仅能降低  $\text{NO}_x$ , 同时还可最大限度利用燃料, 是目前比较先进的燃煤技术。部分煤制气作为再燃燃料的

关键技术是煤制气中产生的半焦与挥发分的分离效果, 其系统内的流动属于气固两相流流动。

气固两相流动的研究方法和研究流体运动的规律一样, 有 3 种基本研究方法: 理论解析、实验研究和数值方法<sup>[2-4]</sup>。笔者主要通过实验研究的方法, 研究部分气化煤制气再燃技术中半焦与挥发分在气化炉内的分离, 为该技术的工程应用提供理论依据。

## 1 实验系统

### 1.1 实验装置

图 1 为部分煤制气气固分离冷态实验台系统。整个煤制气分离装置用有机玻璃制成, 内径  $r = 0.5$

收稿日期: 2013-12-26; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.02.021

作者简介: 陈永权(1988—), 男, 福建泉州人, 在读硕士, 从事煤的清洁燃烧技术研究。E-mail: yq785394127@qq.com

引用格式: 陈永权, 张忠孝, 毕德贵, 等. 煤制气再燃低  $\text{NO}_x$  燃烧中气固分离冷态实验研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(2): 80-83.

CHEN Yongquan ZHANG Zhongxiao BI Degui et al. Cold experimental study of gas – solid separation of coal gas reburn low  $\text{NO}_x$  burner[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(2): 80-83.

m 柱体部分高度  $h = 1.3 \text{ m}$ , 锥斗部分高度  $l = 0.250 \text{ m}$ 。经过计算,挥发分分离出口设在距装置顶部  $0.285 \text{ m}$  位置。实验采用平均粒径为  $0.8 \text{ mm}$ , 密度和半焦密度接近的细沙模拟煤制气中的半焦(细沙密度为  $1.85 \text{ g/cm}^3$ , 半焦密度为  $1.80 \sim 1.95 \text{ g/cm}^3$ ); 用粒径  $0.6 \text{ mm}$  的聚苯乙烯颗粒作为示踪颗粒, 模拟煤制气中的挥发分。

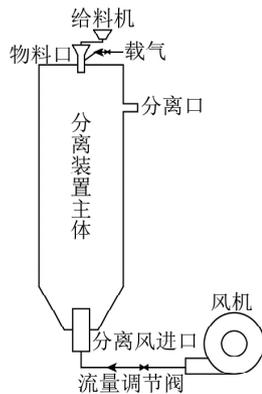


图 1 煤制气气固分离系统

实验过程中,细沙和聚苯乙烯颗粒在预先准备的混料容器中充分混合,以  $\text{H}_2$  为载气将混合物料由顶部下料口送入冷态装置内;同时由鼓风机从试验台底部送入分离风,通过调节风速,观察细沙和聚苯乙烯颗粒的分离情况。使用热线风速仪测量<sup>[5]</sup>分离风与载气的风速,并用天平对分离的物料进行称量、计算。

## 1.2 实验原理

任何一种气固分离装置都是利用一种或数种气固分离的物理过程达到分离气固混合物中固体颗粒的目的。在气固分离技术中,常见的分离机理有重力沉降、惯性力分离、荷电分离、拦截分离等<sup>[6-8]</sup>。笔者采用的是重力沉降机理。

在运动气流中,固体颗粒受到空气的浮力、气动阻力以及自身重力的影响,设合力为  $F_p$ , 则

$$F_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g - \frac{\pi d_p^2}{8} C_D \rho_g (u_g - u_p)^2$$

式中  $d_p$  为颗粒直径;  $\rho_p$  为颗粒密度;  $\rho$  为空气密度;  $C_D$  是流体的阻力系数;  $u_g$ 、 $u_p$  分别为空气、固体颗粒的速度;  $g$  为重力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

颗粒运动速度  $u_p$  随时间或距离的增加而增大,同时所受阻力的也随增大。当  $u_p$  增大到最大速度(即最终沉降速度  $u_m$ , 气流对粒群的气动阻力与颗粒所受重力相平衡)时,加速度为零。此段为加速段。而后颗粒以  $u_m$  作匀速运动,此段为匀速段。 $u_m$

可由  $F_p = 0$  求得,于是

$$u_m = u_g - u_p = \sqrt{\frac{4d_p(\rho_p - \rho_g)g}{3C_D\rho_g}}$$

当  $u_p = 0$  时,颗粒悬浮于流体中,此时  $u_m = u_g$ , 当  $u_m > u_g$  时,颗粒下沉;当  $u_m < u_g$  时,颗粒上升。

当底部分离风与顶部载气流速一定时,炉内细沙与聚苯乙烯颗粒由于密度不同,运动情况也不同。根据这一原理,通过分别改变底部分离风流速和载气气流流速大小,研究细沙与聚苯乙烯颗粒的分离情况。

采用分离效率来评判装置内气固两相的分离效果。分离后获得的粉体质量  $m$  与分离前的粉体质量  $m_0$  之比即为分离效率,表示为

$$\eta = \frac{m}{m_0} \times 100\%$$

## 1.3 实验工况

细沙质量流量为  $100 \text{ g/s}$ ; 聚苯乙烯颗粒质量流量  $5 \text{ g/s}$ ; 分离风速度  $v_1$  取  $7、8、9、10、11 \text{ m/s}$ ; 载气流速  $v_2$  取  $4、5、6、7、8 \text{ m/s}$ 。

## 2 数值模拟方法

基于三维的气固分离装置,采用纳维斯托克 N-S 方程进行数值模拟,将内部流动当做不可压缩流体来处理,这是因为采用的是恒温条件,对气流场的影响可以忽略。对于三维不可压缩流动的雷诺平均控制方程:

连续性方程

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) + \nu \nabla^2 \bar{U}_i \quad (2)$$

笔者采用了标准  $\kappa - \varepsilon$  模型模拟计算装置的内部流动,其基本方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \\ &\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ &\frac{\varepsilon}{k} \left[ C_{\varepsilon 1} \nu_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right] \quad (3) \end{aligned}$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (4)$$

式中  $x_i, x_j$  为  $i, j$  方向上的坐标;  $\overline{U}_i, \overline{U}_j$  为流体时均速度在  $i, j$  方向上的分量;  $u_i, u_j$  为流体脉动速度在  $i, j$  方向上的分量;  $\nu$  为流体运动黏滞系数;  $\nu_t$  为湍流黏滞系数;  $\varepsilon$  为湍动能耗散率;  $k$  为湍动能;  $\delta_{ij}$  为  $\delta_{ij} = 0 (i \neq j) \delta_{ij} = 1 (i = j)$ ;  $t$  为时间。

在 Fluent 中, 作为默认值常数,  $C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon_1} = 1.44, C_{\varepsilon_2} = 1.92$ 。

分离装置内的固体颗粒采用涉及湍流扩散影响的颗粒轨道模型<sup>[9]</sup>模拟炉内气固两相流动的情况。颗粒轨道模型是在拉格朗日坐标系内处理颗粒相, 将颗粒相看作离散体系, 充分考虑气相与颗粒相间的作用, 并且认为相间有速度滑移和温度滑移, 滑移可大可小, 与颗粒扩散无关。

入口边界条件: 底部分离风流速分别为 7、8、9、10、11 m/s, 顶部载气气流速度分别为 4、5、6、7、8 m/s, 颗粒质量流量为 100 g/s, 出口为微负压; 壁面边界条件: 无速度滑移, 无质量渗透条件<sup>[10]</sup>。其中, 湍动能  $k = \frac{3}{2} (\overline{U})^2$ , 湍动能耗散率  $\varepsilon = 0.09^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$ , 湍流强度  $I = 0.16 \text{Re}^{-1/8}$ , 湍流长度尺寸  $l = 0.007L$ 。

对各变量的差分方程组采用 SIMPLE 方法, 二阶上风差分格式对流动方程组进行迭代<sup>[11]</sup>, 得到不同工况下的炉内气固两相流动的数值模拟结果。

### 3 实验结果与数值计算对比

在混合物料不变的情况下, 调节分离风和物料载气流速大小, 观察煤制气分离装置内细沙与聚苯乙烯颗粒的分离情况。比对实验前后沙子与聚苯乙烯颗粒的质量变化而得到实验结果, 将实验数据与数值模拟的结果进行对比。聚苯乙烯颗粒从顶部出口流出即为分离, 细沙颗粒被灰斗捕集即为分离。

#### 3.1 气固分离装置内流场对气固分离的影响

分离风和载气速度分别为 10、5 m/s 进行了流场的模拟, 并得到该工况下细沙与聚苯乙烯颗粒的轨迹图, 如图 2 所示。

从图 2a) 可以看出, 随着底部分离风的吹入, 由于卷吸作用, 会在气流两边形成两个大涡, 而载气进入后, 靠近气流出口的位置, 气流直接流出, 背离出口的壁面附近会出现一个相对于下部两个涡小一些的回旋气流。而在接近出口水平面的位置, 由于分离风与载气两股气流的撞击作用, 大部分合成气流

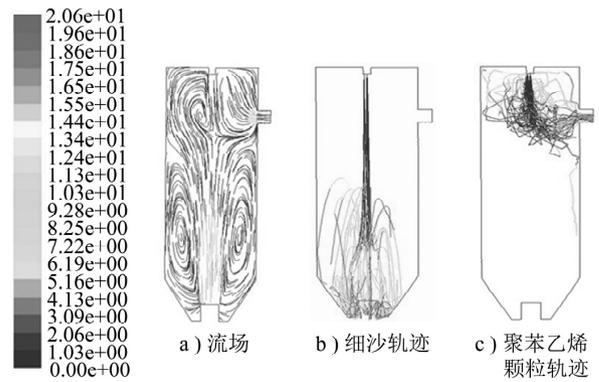


图 2  $v_1 (10 \text{ m/s}), v_2 (5 \text{ m/s})$  工况下的流场及细沙与聚苯乙烯颗粒的轨迹

从出口流出。

分离气流两旁形成的两股强回旋气流会将部分沙粒带往壁面, 最终下到灰斗, 从图 2b) 细沙颗粒轨迹可以看出这一作用。从图 2c) 可以看出, 小部分聚苯乙烯颗粒也会随两股强回旋流体落往灰斗。

装置顶部靠近气体出口位置, 由于出口的存在, 出口附近流场较为稳定。从图 2c) 看出, 部分聚苯乙烯颗粒直接随气流从出口流出, 而部分聚苯乙烯颗粒由于背离出口方向存在的回旋气流而被带往装置顶部, 最终随出气气流流出。

#### 3.2 混合物料分离风速对气固两相流分离的影响

气固分离中, 气体流速的大小对分离效果具有很大的影响。大量研究 [12 - 15] 采用分离效率表征分离效果, 因此实验可以用称量细沙与聚苯乙烯颗粒分离前后的质量来计算颗粒的分离效率, 进而分析分离效果。图 3 为不同分离风风速对煤制气气固两相流分离效果影响。

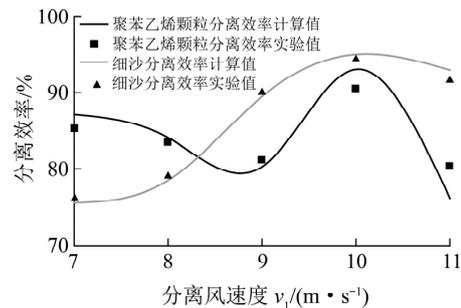


图 3 分离风风速对煤制气气固两相分离效果的影响

从图 3 可看出: 载气气流速度  $v_2$  恒定为 5 m/s 时, 随着底部分离风流速  $v_1$  的增加, 细沙的分离效率逐渐升高。当分离风流速趋近于 10 m/s 时, 细沙的分离效率达到最大值, 然后随着  $v_1$  继续增大, 细沙的分离效率反而降低。这是因为  $v_1$  较小时, 由于细沙

密度较大,部分细沙落入底部进气口,未被灰斗捕集。随着  $v_1$  增大,细沙大量扩散,撞击壁面,最终落入灰斗。而  $v_1 > 10$  m/s 时,部分细沙被鼓风带到分离出口,从而降低了分离效率。当  $v_1 < 9$  m/s 时,随着  $v_1$  的增加,装置中下段回流区逐渐增强,部分聚苯乙烯颗粒被回流气流带往装置底部灰斗;  $9$  m/s  $< v_1 < 10$  m/s 时  $v_1$  进一步增加,聚苯乙烯颗粒被上升主流气流带往装置顶部,从顶部出气口流出;而当  $v_1 > 10$  m/s 时,底部气流过大,对顶部回流造成严重影响,部分聚苯乙烯颗粒滞留装置顶部,无法吹出,影响了聚苯乙烯颗粒的分离效率。这一实验结果与数值模拟结果相吻合。

### 3.3 混合物料载气流速对气固两相流分离的影响

物料载气量大小对颗粒下落的最终沉降速度有影响,从而影响了固相颗粒与气相颗粒的分离效果。实验中分别设置分离风速度  $v_1$  为 10 m/s,顶部混合料载气流速  $v_2$  为 4、5、6、7、8 m/s,如图 4 所示。

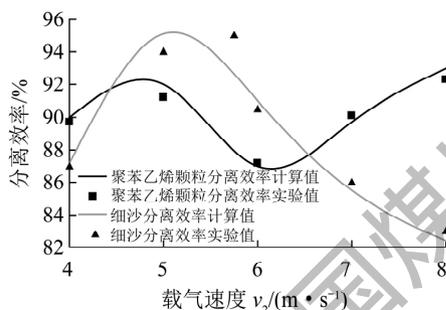


图 4 载气流速对煤制气气固两相流分离效果的影响

从图 4 可以看出,随着顶部进口载气流速  $v_2$  的持续增大,细沙颗粒的分离效率先增大后减小,当  $v_2$  趋近于 5 m/s 时,细沙的分离效率达到最大值。造成这一现象的原因是:  $v_2$  增大的初始阶段,底部分离风的回流区面积会相应增大,细沙颗粒经两股气流撞击扩散后被底部回流气流带往底部灰斗,分离效率提高;而  $v_2 > 5$  m/s 时,由于上下两股气流撞击效果的加剧,对装置内部流场的影响变大,增加了内部流场的紊乱程度和复杂程度,从而对细沙的分离效果产生严重影响,降低了细沙的分离效率。

当  $v_2 < 5$  m/s 时,由于分离风过大,部分聚苯乙烯颗粒滞留在装置顶部,未从出气口流出;而当  $v_2$  趋近于 5 m/s 时,聚苯乙烯颗粒的上升速度减小,大部分随出口气流流出;当  $5$  m/s  $< v_2 < 6$  m/s 时,随着顶部进口载气气流的增大,由于气流撞击的影响,部分聚苯乙烯颗粒被底部回流气流带往装置底部灰

斗。当  $v_2$  进一步增大后,由于顶部回流区的加强,吹往装置中部的聚苯乙烯颗粒又被顶部回流气流携带回顶部,并从出气口流出。

## 4 结 论

1) 通过数值模拟分离装置内部流场和颗粒轨迹可知: 上部和下部分别存在回流区,下部回流区在携带一部分下落细沙的同时,有可能携带一小部分聚苯乙烯颗粒一起向底部灰斗运动,而上部回流区又会携带部分聚苯乙烯颗粒在装置顶部循环运动,这两种情况都可能影响气固分离的效果。

2) 当底部分离风流速  $v_1$  为 10 m/s,混合料载气流速  $v_2$  为 5 m/s 时,细沙的分离效率最高,聚苯乙烯颗粒(模拟挥发分)的分离效率也达到要求,煤制气中半焦和挥发分两相流分离达到最佳工况。

### 参考文献:

- [1] 张忠孝. 部分气化煤制气再燃低 NO<sub>x</sub> 燃烧系统: 中国, 101353520A [P]. 2009-02-11.
- [2] 刘向军, 徐旭常. 循环流化床内稠密气固两相流动的数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 161-165.
- [3] 刘仲军, 惠世恩, 徐通模. 直弯管内气-固两相流动的分析 [J]. 西安交通大学学报, 1990, 24(5): 99-108.
- [4] 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- [5] 皇甫凯林, 徐 璋, 张雪梅, 等. 热线风速仪在测量电站风量中的实验研究 [J]. 电站系统工程, 2009, 25(3): 17-19.
- [6] 林小鹏. 循环流化床新型气固分离器的研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
- [7] 赵旭光, 赵三银. 重力沉降原理在微粉和超细粉粒度分析中的应用 [J]. 耐火材料, 2003, 37(2): 96-99.
- [8] 龙维德. 旋风收尘器收尘过程的作用机理及合理结构的研究 [J]. 硫酸工业, 1980(2): 4.
- [9] 刘明侯, 陈义良. 颗粒轨道模型对粉煤湍流燃烧计算结果影响的研究 [J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(1): 14-20.
- [10] 王伟平, 张忠孝, 滕 叶, 等. 部分气化煤制气多点喷射再燃脱硝的冷态流场研究 [J]. 洁净煤技术, 2013, 19(1): 97-100, 117.
- [11] 秦 岩. 选煤厂精细化管理的策略探讨 [J]. 煤质技术, 2008(6): 7-8.
- [12] 曹月梅, 安晓熙. 一种上行气固分离装置的冷态实验研究 [J]. 化工生产与技术, 2012, 19(3): 17-20.
- [13] 章 莉, 颜彬航, 吴昌宁, 等. 超短接触反应器气固快分装置的数值模拟 [J]. 化工学报, 2010(3): 623-628.
- [14] 李松庚, 林伟刚, 姚建中. 下行床弧面锥体气固分离装置的分离效率实验 [J]. 过程工程学报, 2002, 2(1): 12-16.
- [15] 杨仲卿, 唐 强, 张 力. 下排气旋风分离器结构优化研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(1): 167-170.