复合流化的烟气脱硫循环流化床气固相研究

郝晓文[1,2]，马春元[2]，马鸿良[3]

（1. 哈尔滨工业大学（威海）汽车工程学院，山东 威海 264209，haoxiaowen@sohu.com；
2. 山东大学 能源与动力工程学院，济南 250061；3. 山东山大能源环境有限公司，济南 250061）

摘 要：针对常规循环流化床烟气脱硫技术中仍存在的问题，提出了复合流化的烟气脱硫循环流化床. 在文丘里管内安装轴向叶片，形成了直流和旋流组合的流化方式，并采用试验和数值模拟相结合的方法研究了气固相冷态流动规律，与文丘里管直流流化的规律进行了比较. 结果表明，这种非均匀布风的复合流化方式比直流流化方式提高了切向速度，增加了塔内颗粒的停留时间，提高了颗粒浓度，增强了湍流脉动，加强了横向的扩散与混合，有效改善了流场均匀性，而且流动更快地达到均匀分布，改善了脱硫塔内的流动. 复合流化的烟气脱硫循环流化床技术是一项有应用前景的技术.

关键词：烟气脱硫；直流流化；复合流化；旋流；均匀性
中图分类号：TK224.1 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)07－1121－05

Gas-solid flow on composite fluidization of swirl-once through flow in CFB-FGD

HAO Xiao-wen[1,2], MA Chun-yuan[2], MA Hong-liang[3]

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China, haoxiaowen@sohu.com;
2. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
3. Shandong Shanda Energy & Envirenment Co. Ltd, Jinan 250061, China)

Abstract: The authors brought forward composite fluidization structure against the problems in the CFB-FGD. Axial swirl vanes, which formed the composite fluidization of swirl-once through flow, were installed in the venturi. The characteristics of gas-solid flow at cold state were discussed through experiment and simulation. The comparison between the composite fluidization and the once-through fluidization was carried out. As a result, the composite fluidization mode is nonuniform air distribution mode. Its tangent velocity is larger than that of the once-through fluidization, which results in the longer particles residence time, higher particles concentration, stronger fluctuation, and better capability of diffusion and mixture. The uniformity is improved and can be achieved more quickly, which improves the flow field in the composite fluidization.

Key words: flue gas desulfurization; once-through fluidization; composite fluidization; swirl flow; uniformity

循环流化床烟气脱硫技术在我国得到了广泛的应用. 但是小型烟气脱硫循环流化床在放大过程中会遇到更多的问题，比如流场偏转等原因造成流动均匀性差[1-2]、流化质量下降、气液固三相难以高效扩散与混合、传质效率难以提高和系统可靠性下降等问题，这些问题均与流化方式密切相关.

循环流化床烟气脱硫技术通常采用文丘里管直流流化[3-5]. 研究表明[6-8]，这种流化方式与入口弯道处加装导流板的组合能减小流场偏转. 而采用多个直径不同的多管文丘里管在轴向上更可使流场达到理想的对称状态[9]. 但以上措施横向速度低，扩散慢，横向截面内较差的混合与扩散使传质效率难以提高，横向截面内的流动均匀性并未改善，因此有必要对这种流化方式进行改进.

本文在传统文丘里管直流流化基础上增加旋

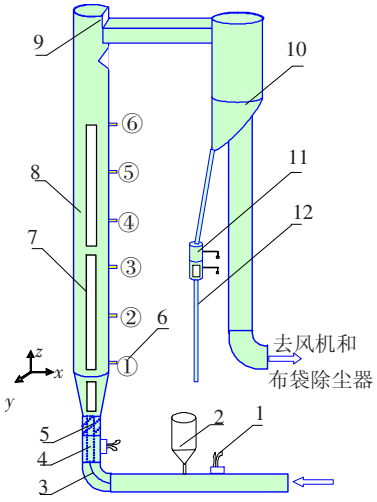
收稿日期：2008－12－12.
作者简介：郝晓文(1977—)，男，博士，讲师；
马春元(1961—)，男，教授，博士生导师.

流,形成了采用轴向旋转叶片的旋直复合流化技术,简称复合流化技术. 研究该技术的气固两相流场特性,并与文丘里管直流流化技术进行比较.

1 试验设计和数值计算方法

1.1 试验台介绍

循环流化床烟气脱硫气固相的试验系统如图 1 所示,脱硫塔主体截面形状为圆形,直径 $D = 2R = 300$ mm;文丘里管喉部直径 $d_1 = 180$ mm,文丘里管喉部加装内筒,其直径 $d_2 = 133$ mm;内外筒之间安装 6 片仰角 42°的轴向旋转叶片组成的旋流器,形成了内筒直流外部旋流的复合流化方式. 直流流化试验仍采用传统的文丘里管. 试验装置取消外循环. 图 1 中① 为 0D 截面,即脱硫塔主体入口,② 为 1D 截面,即与脱硫塔主体入口距离为 1 倍直径,依此类推.



1—压力测点; 2—给料装置; 3—导流板; 4—内筒; 5—旋转叶片; 6—压力测点; 7—PDA 测孔; 8—脱硫塔主体; 9—出口结构; 10—旋风分离器; 11—锁气器; 12—下料管

图 1 试验台系统图

流场测量采用三维粒子动态分析仪(3D - PDA). 选取密度 2 300 kg/m^3,平均粒径 45 μm,折射率 1.51,球形度大于 90% 的玻璃珠作为示踪粒子. 数据分析时选取粒径 0 ~ 10 μm 的玻璃珠作为气相示踪粒子,10 ~ 150 μm 的玻璃珠作为颗粒相示踪粒子. 通过计算,玻璃珠的终端速度为 1.00 m/s,输送速度为 1.75 m/s. 玻璃珠流化同时要避免入口弯道内积灰,所以选取的流化速度: 2.02 ~ 2.90 m/s.

1.2 数值计算方法

直流流化试验模型除塔顶采用四面体网格外其余均采用六面体网格;复合流化试验模型的流化装置、弯管和塔顶采用四面体网格,其余采用六面体网格. 采用双流体模型,对直流流化的模拟采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,对复合流化采用带旋流修正的 $k-\varepsilon$ 模型,弹性恢复系数为 0.95. 入口条件按速度均匀分布取值,出口条件按充分发展条件取值,给定出口处的外环境压力为大气压. 壁面按照无滑移条件取值,采用壁面函数法处理壁面附近的低雷诺数流动.

2 结果及分析

2.1 复合流化下的内筒风率

从表 1 可以看出,复合流化的内筒风率远高于内筒占总面积的比值,这是一种非均匀布风的流化方式,它的特点是可以增强横向扩散混合特性. 提高流化速度,阻力增加,横向混合和扰动增强,内筒风率也随之提高.

表 1 内筒风率与流化速度的关系表

流化速度/(m·s^{-1})	2.02	2.27	2.50	2.70	2.90
内筒风率/%	64.0	64.3	66.8	67.5	68.3

2.2 脱硫塔主体内颗粒的停留时间

循环流化床中颗粒的停留时间通过脱硫塔主体的压降来进行计算[10-12].

$$t_p = \frac{AL}{A[G_s/\rho_p(1-\bar{\varepsilon})]}. \tag{1}$$

式中: t_p 为颗粒平均停留时间,s; L 为图 1 中① ~ ⑥ 的长度,m; G_s 为颗粒循环速率,kg/(m^2·s); ρ_p 为颗粒密度,kg/m^3; $\bar{\varepsilon}$ 为截面平均空隙率.

当忽略壁面摩擦时,

$$(1-\bar{\varepsilon}) = \Delta p/(g\rho_p L). \tag{2}$$

式(1)可以简化为

$$t_p = \Delta p/(G_s g). \tag{3}$$

式中: Δp 为图 1 中① ~ ⑥ 的压降,Pa.

复合流化后颗粒的停留时间比直流流化明显提高,如图 2. 流化速度增加,复合流化的停留时间比相同流化速度下的直流流化提高了更多.

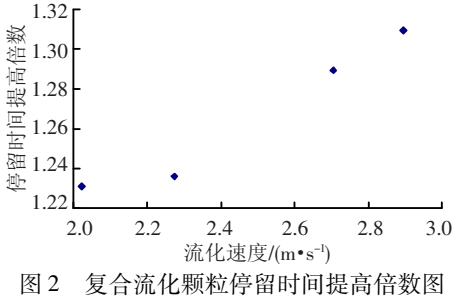


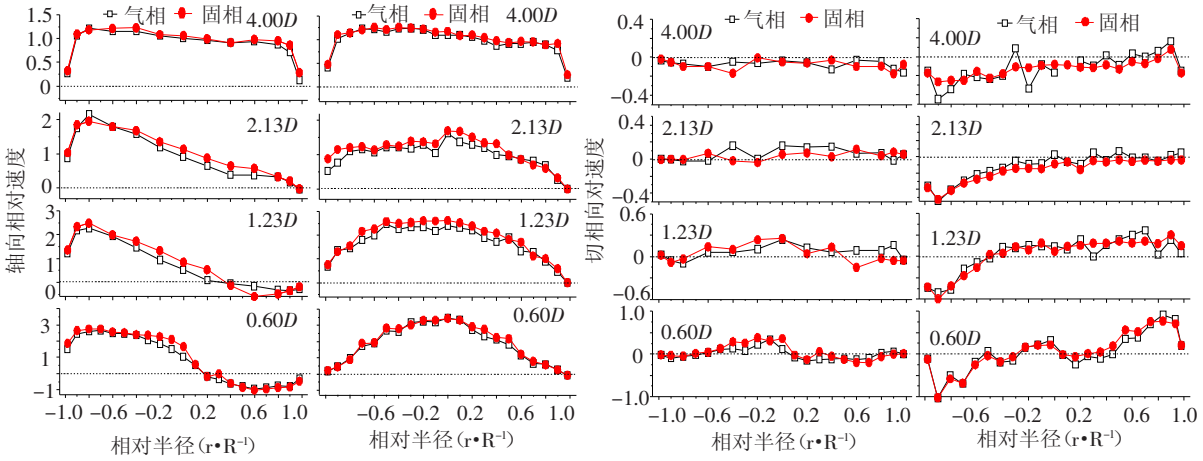
图 2 复合流化颗粒停留时间提高倍数图

2.3 PDA 的测量结果及分析

2.3.1 轴向速度分布

图 3(a)、3(b)中为脱硫塔主体试验数据,选取的流化速度为 2.90 m/s,相对速度是测量速度与流化速度的比值. 直流流化时(图 3(a)),在靠

近入口侧有较大的回流区，轴向速度偏斜严重，均匀性很差；随着高度的增加，回流区减小并消失，但轴向流动仍未均匀. 而复合流化时（图 3（b）），旋转增强了气固相的扩散，流动呈现环 – 核流动特性，轴向流动基本对称. 而且随着高度增加，复合流化的轴向速度更快达到均匀分布.



（a）直流流化的轴向速度　（b）复合流化的轴向速度　（c）直流流化的切向速度　（d）复合流化的切向速度

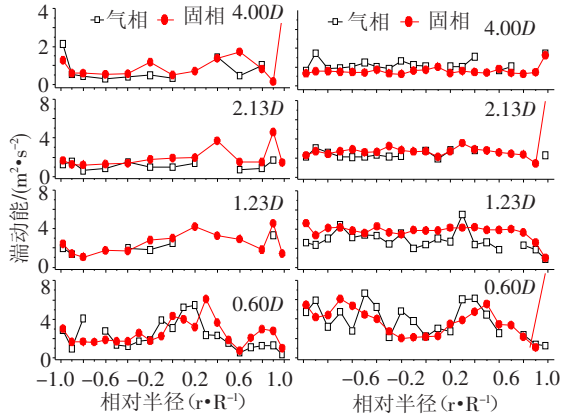
图 3　测量速度分布图

2.3.2　切向速度分布

相比直流流化结构，复合流化大大提高了近壁面区域的切向速度，速度分布规律性更明显，如图 3（c）、3（d）. 在塔体下部：从壁面到中心，切向速度绝对值逐渐增加而后减小；脱硫塔主体入口处中心区的流动受旋流影响较小，切向速度分布与直流流化类似. 随着高度增加，中心区旋转的强度和范围增加；平均切向速度逐渐减小，但在壁面附近流体仍有较强的旋流强度. 脱硫反应主要发生在脱硫塔主体中下部的恒速反应区，而复合流化技术的强制旋流在此处产生了大尺度旋涡，增强了气固相的扩散和混合，增加了停留时间，所以有利于提高系统脱硫效率.

2.3.3　湍动能变化特性

湍动能代表脉动的强度[13]. 在脱硫塔主体下部受入口的影响，湍流脉动在半径方向上的波动较大，而且扰动剧烈（图 4）.



（a）直流流化　（b）复合流化

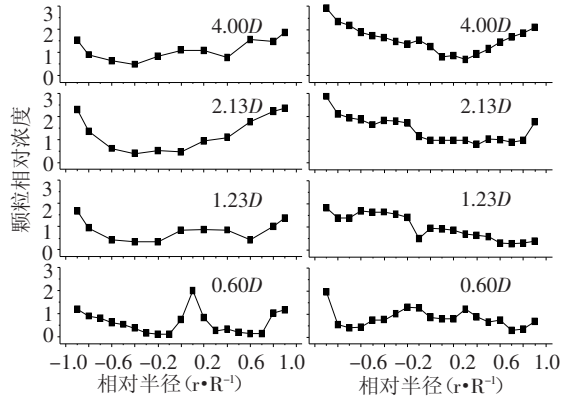
图 4　湍动能分布图

由于复合流化外侧旋流与内侧直流间有较强的剪切作用，所以在主体中下部复合流化有更强湍流脉动. 湍动能的提高能加强动量和质量的交换，有利于加快气相和固相的传播速度. 但在脱硫塔主体上部，由于湍流输运作用，脉动不断衰减，复合流化的湍流耗散快，湍动能与直流流化的大小相当.

2.3.4　浓度分布特性

图 5 的颗粒相对浓度为不同位置的颗粒数浓度与直流流化、截面 0.60*D* 的平均颗粒浓度的比值.

由于壁面浓度很高，为了更清晰的表示浓度变化规律，图 5 中未标出壁面附近的浓度. 高壁面浓度对防止粘壁和提高系统可靠性有利[14]. 复合流化时颗粒的运动距离增加，其平均颗粒浓度比直流流化有所提高，脱硫塔内循环和颗粒浓度增强.



（a）直流流化　（b）复合流化

图 5　颗粒相对浓度分布图

2.4　流场的不均匀度

对均匀性分布状况进行量化分析通常采用不

均匀度,不均匀度为测量线上速度的均方根值,按式(4)计算:

$$\zeta = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{c_i - \bar{c}}{\bar{c}}\right)^2\right]. \qquad (4)$$

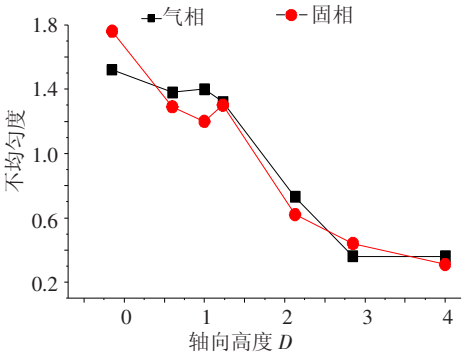
式中:ζ 为速度的不均匀度系数;c_i 为测点的速度,m/s;$\bar{c}$ 为测点速度的平均值,m/s;n 为测点数.

2.4.1 轴向速度不均匀度

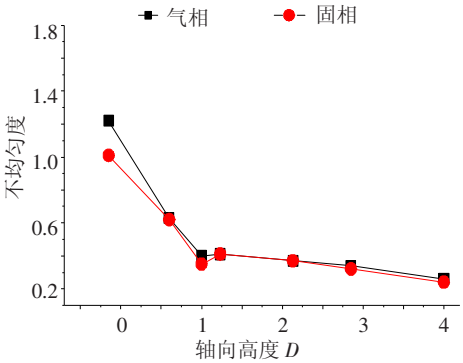
从图 6 可以看出,复合流化脱硫塔内均匀性均好于直流流化,流动的不均匀度系数比直流流化减小了 22% 以上,而且流动更快达到均匀的分布状态. 随高度的增加,复合流化流场的均匀性变化率减慢.

2.4.2 横向截面的速度均匀性

采用数值模拟的方法对复合流化下横向截面流场的均匀性进行了研究. 图 7 为模拟速度与试验数据的比较图,模拟数据所反应的总体趋势与试验相同,采用的计算模型和模拟方法得到的结果可以反映塔内流动规律.

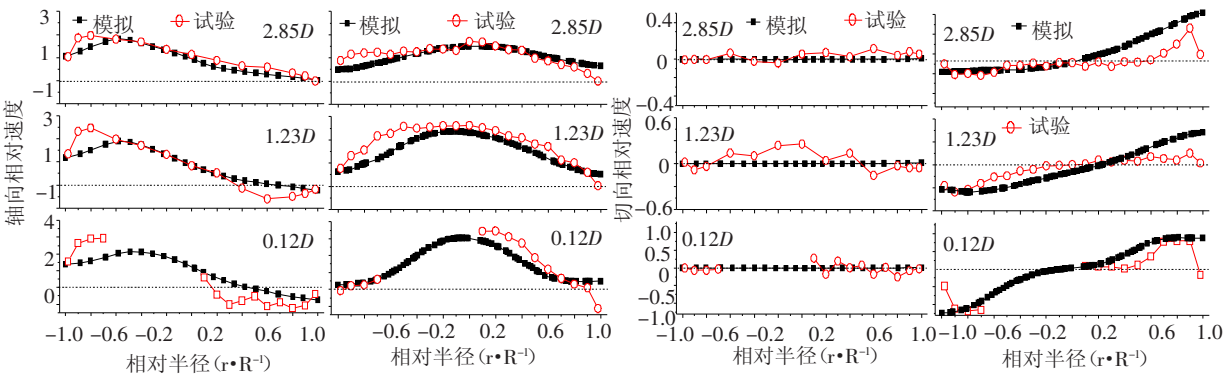


(a) 直流流化



(b) 复合流化

图 6 速度不均匀度系数分布图

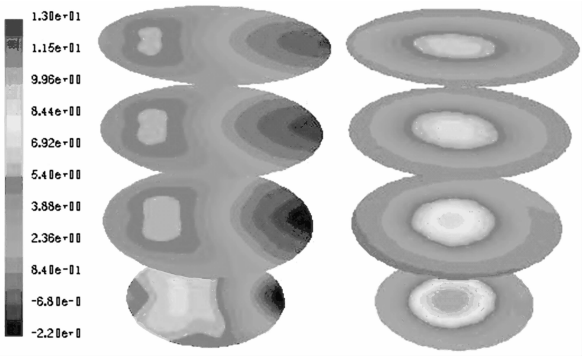


(a) 直流流化的轴向速度 (b) 复合流化的轴向速度 (c) 直流流化的切向速度 (d) 复合流化的切向速度

图 7 模拟速度分布图

从图 8 可以看出,复合流化不但提高了轴向速度在轴向上的均匀性,横向截面内轴向速度的对称性和均匀性也明显改善. 而且随着高度增加,复合流化更早达到均匀的分布状态.

复合流化技术采用轴向旋转叶片作为旋流器,旋流流动有较强的刚性,流场不易偏转,对称性好. 旋流器装在文丘里管内的外侧,旋流流动和直流旋流之间较强的剪切作用均使气流湍流输运的能力增强;复合流化技术流动的湍流脉动很强,横向截面内流动的混合与扩散得以提高,不但改善了横向截面内均匀性而且流动更快达到均匀分布. 脱硫塔截面内浓度、温度、湿度以及脱硫反应的不均匀与流动的不均匀密切相关,所以流动均匀性提高对提高脱硫反应的均匀性,获得提高脱硫效率有利.



(a) 直流流化 (b) 复合流化

图 8 模拟的固相轴向速度分布图

3　结　论

1）复合流化技术是一种非均匀布风的流化技术. 复合流化技术颗粒的停留时间比直流流化增加，脱硫塔内的颗粒浓度提高.

2）复合流化技术横向截面内的平均切向速度提高，湍流脉动能力增强，横向混合与扰动提高，脱硫塔内的流动改善.

3）复合流化装置减轻了入口结构对流动均匀性的影响，纵向上基本消除了流动偏斜，横向上提高了流动对称性，从而有效的改善了流场均匀性. 而且流动能够更快的达到均匀分布.

4）复合流化的循环流化床烟气脱硫技术在气固流动中有很多优势，是循环流化床烟气脱硫领域中一项有应用前景的技术.

参考文献：

[1] YERUSHALMI J, CANKURT N T. Further studies of the regimes of fluidization[J]. Powder Teehnol, 1979, 24(2):187 – 205.

[2] BAI D, JIN Y, YU Z Q, *et al*. The axial distribution of the cross-sectionally averaged voidage in fast fluidized beds[J]. Powder Teehnol, 1992, 71(1):51 – 58.

[3] 赵旭东，马春元，董勇，等. 75t/h 锅炉双循环流化床烟气脱硫装置研制及应用[J]. 中国电力，2002，35(3):62 – 65.

[4] NEWTON G H. Modeling the SO_2 – slurry droplet Reaction[J]. A ICHE Journal, 1990, 36(12): 1865 – 1872.

[5] JAMES K, EATHERY N. Model for flue gas desulfurization in a circulating dry scrubber[J]. A ICHE Journal, 1996, 42 (1):259 – 268.

[6] 李少华，张本贤，于静梅，等. 除尘脱硫塔内气固两相流动数值模拟[J]. 东北电力学院学报，2003，23(2): 1 – 5.

[7] 胡金榜，李艳平，李进龙，等. 循环流化床脱硫器文丘里式入口对流动特性的影响[J]. 天津大学学报，2005，38(3):225 – 228.

[8] SAXTON A L, WORLEY A C. Modern catalytic cracking design [J]. OilGas J, 1970, 68: 82 – 99.

[9] 魏星，李伟力，凡凤仙，等. 脱硫塔气固两相流场优化的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报，2006，26(7):12 – 18.

[10] SMOLDERS K, BAEYENS J. Overall solids movement and solids residence time distribution in a CFB-riser [J]. Chemical Engineering Science, 2000 55: 4101 – 4116.

[11] WEINELL C E, DAM-JOHANSON K, JOHNSSON, *et al*. Single particle behaviour in circulating fluidised beds[C]//Proceedings of the 7th engineering foundation conference on fluidisation. Australia: Brisbane, 1992: 295 – 304.

[12] HARRIS A T, DAVIDSON J F, THORPE R B. Particle residence time distributions in circulating fluidised beds [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58: 2181 – 2202.

[13] 秦裕琨，王磊，李争起，等. 淡一次风扩口角度对径向浓淡旋流煤粉燃烧器出口流场影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报，2000，20(3):56 – 60.

[14] 郝晓文，马春元，黄盛珠，等. 循环流化床脱硫塔直/旋流复合流化下的两相流场试验研究[J]. 热能动力工程，2005，20(5):497 – 500，505.

（编辑　杨　波）