

双层滤料颗粒床高温除尘器气固两相流场数值模拟

徐青涛¹, 杨国华^{1*}, 沈炜杰¹, 兰明勇²

(1.宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2.大庆油建公司, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为了解决工程应用中粗大粉尘颗粒大量进入双层滤料颗粒床从而导致反吹清灰困难以及增加颗粒床的过滤负担的问题, 在过滤床入口处安装导流板以促进粉尘的惯性分离. 本文运用 Fluent 软件中的离散相模型对除尘器的气固两相流场进行数值模拟, 分析不同导流板布置方式时的粉尘沉降率及床层进入率. 仿真结果表明: 等速布置方式导流板, 能阻止较粗粉尘颗粒进入过滤床, 提高沉降室底部粉尘沉降率, 为双层滤料颗粒床除尘器的设计提供参考.

关键词: 双层滤料颗粒床; 导流板; 两相流; 数值模拟

中图分类号: X701.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 03-0117-04

双层滤料颗粒床由上粗下细、上轻下重的两层化学性质稳定的固体颗粒滤料组成^[1], 上层粗颗粒滤料层截留绝大部分粉尘, 下层细颗粒滤料捕获残余微细亚微米级粉尘, 是集上层粗过滤与下层精过滤于一体的梯级过滤, 效率极高且压降低. 当床层压降达到设定值时, 采用反吹流化清灰, 清灰结束后, 轻质上层滤料始终浮于重质下层滤料之上, 双层滤料互不相混, 界面清晰, 保持双层滤料颗粒床梯级过滤特性不变^[2]. 其滤尘机理和一般的过滤式除尘器相同, 包含有惯性碰撞、截留、扩散、静电和筛滤等效应, 被截留的粉尘易发生团聚, 反吹清灰吹出的尘粒最终沉降在除尘器底部灰斗^[3].

双层滤料颗粒床高温除尘器具有耐高温、除尘效率极高等优点, 过滤效率可达到 99.99%, 出口粉尘浓度小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在煤(生物质、油页岩)热解、矿热炉、玻璃窑、水泥窑等高温除尘领域具有广阔的应用前景, 目前已成功应用在某公司的 $2 \times 13 \text{ t}$ 铝合金熔化炉的烟气消烟除尘上^[4]. 工程应用中采用多列、多层并联结构的除尘装置, 单个除尘单元如图 1 所示. 在引风机的作用下, 含尘气体从上方进气口进入, 粗大粉尘在沉降室中沉降, 较细粉尘进入两侧的双层滤料过滤床进行过滤, 每个过滤床连接一个排风支管, 干净的气体通过各个

排风支管汇集到总管道, 然后进入换热器进行余热回收, 最后通过引风机送入后续工艺^[5]. 某个过滤床清灰时, 对应的反吹风机开始运作, 反吹气流由下向上经布风板进入双层滤料颗粒床, 使滤料成流化状态, 把过滤时截留在颗粒层内的灰尘反吹到沉降室, 团聚后形成的粗大粉尘再次沉降, 进入灰斗, 剩余的细小粉尘随气流再返回其他颗粒床^[6].

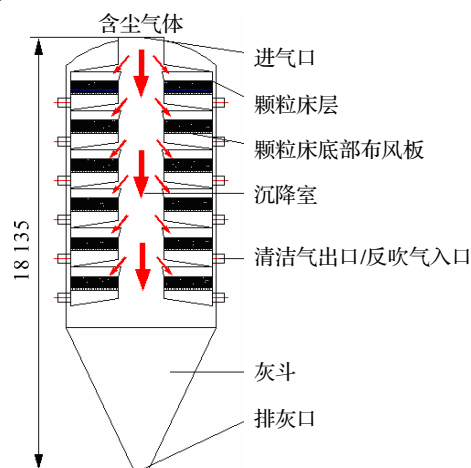


图1 双层滤料颗粒床除尘器简图(mm)

除尘器设备很大, 数值模拟方法可用于解决实验研究的难题, 模拟结果与实验结果也非常吻合^[7-9]. 为了促进粉尘的惯性分离, 在床层入口处

收稿日期: 2017-12-04.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0205800).

第一作者: 徐青涛(1990-), 男, 安徽亳州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 能源利用与环境保护. E-mail: 1527896621@qq.com

*通信作者: 杨国华(1961-), 男, 浙江嵊州人, 教授/博士, 主要研究方向: 能源利用与环境保护. E-mail: yangguohua@nbu.edu.cn

安装导流板是较好的方法^[10-13], 优化整个除尘装置的流场, 以促进粉尘沉降, 减少粉尘返回颗粒床, 对减轻过滤床负担具有重要意义. 本文运用 Fluent 软件对双层滤料颗粒床除尘器的气固两相流场进行仿真, 使用离散相模型(DPM)研究粉尘颗粒的运动轨迹, 分析安装导流板后的粉尘颗粒沉降情况, 研究不同的导流板安装参数对粉尘沉降的影响.

1 计算域的简化及 DPM 设定

单个除尘单元采用 6 层共 12 个过滤床的对称布置方式, 中间为沉降室通道(图 1). 整个除尘器长 6 m, 宽 6 m, 高约 18 m, 是方形塔状结构. 单个颗粒床每层长 6 m, 宽 2 m, 高 1.7 m. 由于整体是对称结构且尺寸较大, 故采用对称轴边界条件进行二维建模, 并且将底部积灰区域适当缩小, 减少网格数量与计算量. 图 2 为简化后的计算域模型.

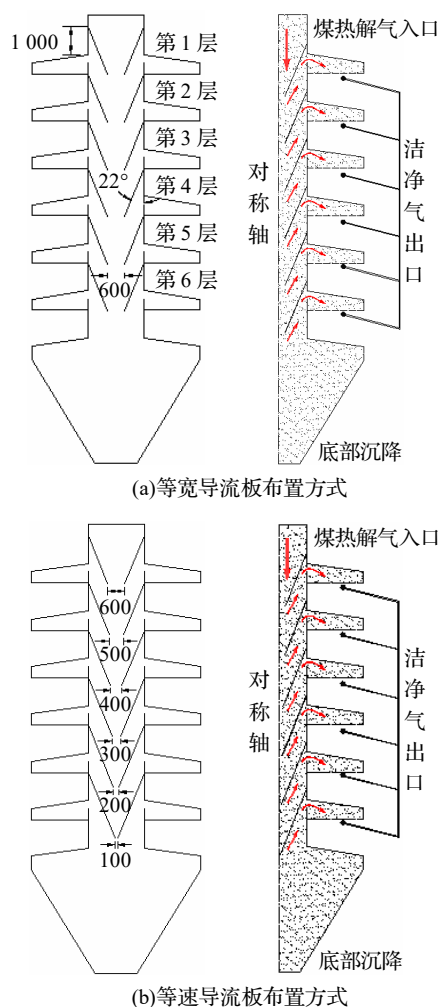


图 2 加装导流板后的计算域模型(mm)

图 2(a)中每层导流板结构及安装参数相同, 每对导流板的缩口间距均为 600 mm, 定义为等宽导流板布置方式, 第 1 层导流板缩口处平均速度为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 以下各层导流板缩口处平均速度逐层递减; 图 2(b)中每层导流板缩口间距各不相同, 每层缩口间距从上往下逐层递减, 每层导流板缩口处平均速度均保持 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 定义为等速导流板布置方式.

DPM 气相为 500°C 的煤热解气, 密度为 $0.382 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 动力黏度 $2.8957 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. 湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 它和标准 $k-\varepsilon$ 模型相似, 但 RNG $k-\varepsilon$ 模型考虑了湍流漩涡, 提高了这方面的精度^[14]. DPM 采用单向流固耦合求解方法, 使用 Group 射源作为颗粒入射边界条件, 分别选取 50, 75, 100, 125, 150, 175 μm 粒径的颗粒进行追踪, 颗粒数都设定为 10 000 个, 颗粒密度为 $1200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 并应用随机轨道方法考虑瞬时湍流速度对颗粒运动的影响. 选用离散求解器, 离散格式为一阶迎风格式, 压力速度耦合方法采用 SIMPLEC 算法^[15].

2 仿真结果分析

2.1 等宽导流板布置方式时气固流场的仿真与分析

以图 2(a)为计算域模型, 等宽导流板布置方式除尘器的气相流场如图 3 所示.

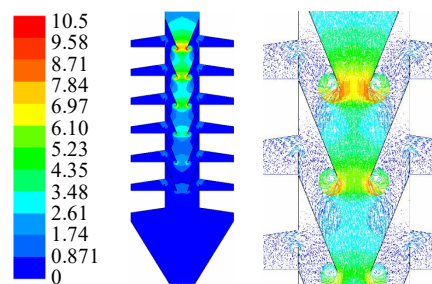


图 3 等宽导流板气相速度云图和局部气速矢量图

由图 3 可见, 高速气流集中在沉降室通道中轴线附近, 每层导流板缩口处速度最大且逐层减小, 导流板下侧出现气流涡旋, 涡旋区域从上往下也逐渐减小. 涡旋区域气流方向变化剧烈, 由于惯性与重力的共同作用, 大部分颗粒会集中在沉降室通道中部随着这股高速气流向下运动, 粉尘粒径越大这种效果会越明显, 这样就可以避免较粗大的粉尘颗粒大量进入颗粒床层, 因此涡旋有利于粗大颗粒的惯性分离, 对于减少过滤床的过滤负担非常有利, 粉尘颗粒的仿真结果见表 1.

表1 等宽导流板布置方式时不同粒径粉尘颗粒仿真结果

颗粒粒径/ μm	第1层数量	第2层数量	第3层数量	第4层数量	第5层数量	第6层数量	底部沉降数量	沉降率/%
50	534	704	1 323	2 002	2 500	2 405	532	5.32
75	91	183	656	1 738	2 949	3 198	1 185	11.85
100	13	40	238	1 048	2 482	3 610	2 569	25.69
125	1	3	52	366	955	3 343	5 280	52.80
150	0	0	7	30	282	1 811	7 870	78.70
175	0	0	0	4	61	531	9 404	94.04

注: 粉尘颗粒数量单位为“个”, 下表同。

结果显示, 当导流板缩口处等宽、风速不等时, 粒径为 $125\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒, 沉降率为 52.80% , $150\text{ }\mu\text{m}$ 以上粗大颗粒沉降率达到了 86.37% , 粉尘整体沉降率为 44.73% , 粗大粉尘具有较高的沉降率。但是, 仍有大量粉尘进入下部 4、5、6 三层床层, 较粗的粉尘颗粒进入下部床层, 不仅会增加颗粒床的过滤负担, 而且对于反吹清灰非常不利。因此, 需要进一步调整导流板结构参数, 在提高粉尘沉降率的同时, 尽可能减少下部床层粉尘进入率。

2.2 等速导流板布置方式时气固流场的仿真与分析

沉降室中轴线附近气流速度较高时, 导流板下侧的涡旋会十分明显, 惯性分离的作用也会更佳。等速导流板布置方式可使每层导流板缩口处气流速度相等, 在整个沉降室通道中维持较高风速。使用 Gambit 软件分别建立 5 个模型, 使导流板缩口处的平均气流速度分别为 $6, 8, 10, 12, 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 图 4 是 5 种不同风速下粉尘沉降率对比图。

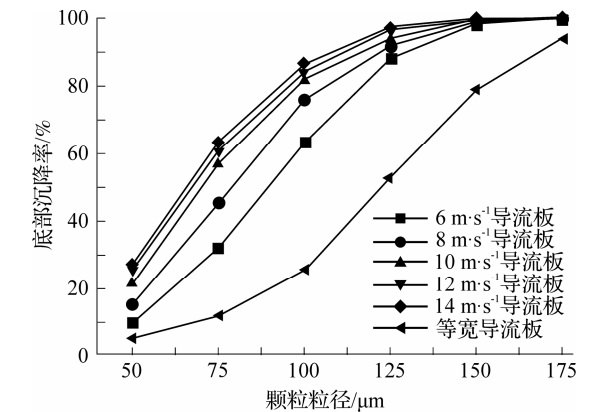


图4 5种不同风速下粉尘沉降率对比

随着导流板缩口处气流速度不断提高, 较粗的粉尘颗粒在沉降室底部的沉降率得到极大提高。这是因为气流速度较高时, 经过导流板的转折更

大, 惯性除尘作用更明显。当气流速度增大到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 再提升到 $12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 底部沉降率并无明显的提高, 且高速的含尘气流对导流板会有较大的冲击和磨损, 缩口间距太小也有堵塞通道的风险, 故认为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等速导流板布置方式较为合理。

2.3 不同导流板布置方式结果对比

表 2 为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等速导流板布置方式时的粉尘颗粒仿真结果。与表 1 对比可知等速导流板布置方式大大促进了粉尘的惯性分离: 不管是细粉尘还是粗粉尘, $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等速导流板布置方式都较等宽导流板布置方式的粉尘沉降率有大幅提高, 整体沉降率从 44.73% 提高到 79.27% , $150\text{ }\mu\text{m}$ 及以上大粉尘颗粒几乎都在沉降室沉降, 沉降率达 99.90% 。

表2 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等速导流板布置方式时粉尘颗粒仿真结果

颗粒粒径/ μm	第1层数量	第2层数量	第3层数量	第4层数量	第5层数量	第6层数量	底部沉降数量	沉降率/%
50	497	433	629	1 186	1 978	2 727	2 550	25.50
75	43	22	63	243	910	2 235	6 484	64.84
100	3	1	1	26	232	920	8 817	88.17
125	0	0	0	3	45	224	9 728	97.28
150	0	0	0	0	0	19	9 981	99.81
175	0	0	0	0	0	1	9 999	99.99

表 3 是以表 1、表 2 数据为基础, 粉尘颗粒为球形, 等宽导流板布置方式时第 1 层积灰体积量为当量体积 1 时计算所得的进入各个床层的粉尘当量体积量。可见 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等速导流板布置方式还大大降低了床层粉尘进入率。 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等速导流板布置方式的除尘器总积灰量只有等宽导流板布置方式的 13.01% , 这对减轻过滤床的过滤负担极为有利, 从这个角度看等速导流板布置方式也较等宽导流板布置方式更为合理。等速导流板布置方式各个床层的积灰量差别也较大, 其中第 6 层积灰量最大, 其是第 2 层最小积灰量的 42 倍。

表3 床层积灰当量体积量

导流板	第1层	第2层	第3层	第4层	第5层	第6层	总当量
等宽	1	1.76	6.74	24.02	60.14	173.72	267.38
等速	0.70	0.54	0.88	2.24	7.96	22.70	35.02

$10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等速导流板布置方式不仅大大提高了粉尘的沉降率, 还成功解决了粗大粉尘颗粒大量进入双层滤料颗粒床从而导致反吹清灰困难以及

增加颗粒床的过滤负担的问题.

3 结论

不同导流板布置方式对粉尘沉降率及粉尘床层进入率影响不同. 等速导流板布置方式较等宽导流板布置方式具有更高的粉尘沉降率及更低的床层粉尘进入率. 导流板缩口处速度是影响粉尘沉降率及床层粉尘进入率的主要因素. 导流板缩口处气流速度越高, 粉尘沉降率越高, 床层粉尘进入率越低, 气流速度达到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 导流板布置方式较为合理. 各床层的积灰量相差很大, 在反吹清灰时不能让各个床层等时间间隔依次反吹清灰, 而应根据各个床层的积灰量确定反吹清灰频次.

参考文献:

- [1] 杨国华, 周江华, 舒海平, 等. 双层滤料颗粒床过滤除尘新方法的研究[J]. 动力工程, 2005, 25(6):891-894.
- [2] 石开玉, 杨国华, 田素瑞, 等. 粉-粒双层滤料颗粒床对 $\text{PM}_{2.5}$ 的过滤特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015(1):138-143.
- [3] Tian S, Yang G, Li Z, et al. Cascade filtration properties of a dual-layer granular bed filter[J]. Powder Technology, 2016, 301:545-556.
- [4] 于春令, 杨国华, 王兴云. 双层滤料颗粒床高温除尘技术及其在冶金炉窑中的应用[J]. 环境工程, 2009, 27(2): 15-21.
- [5] Shi K, Yang G, Huang S, et al. Study on filtering characteristics of aerosol particulates in a powder-grain dual-layer granular bed[J]. Powder Technology, 2015, 272:54-63.
- [6] Hu F, Yang G, Ding G, et al. Experimental study on catalytic cracking of model tar compounds in a dual layer granular bed filter[J]. Applied Energy, 2016, 170:47-57.
- [7] 刘栋栋, 付海明, 陈军, 等. 旋风除尘器流场及浓度场实验与模拟[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9):2057-2064.
- [8] 王鲁平. 直流式旋风除尘器的数值模拟与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [9] 赵海鸣, 谢信, 夏毅敏, 等. 湿式除尘风机三相除尘运行参数研究[J]. 中南大学学报, 2017, 49(6):1505-1512.
- [10] 邓沙宁. 隔板式沉降室在冶金炉窑收尘系统的应用[J]. 湖南有色金属, 2011, 27(6):40-44.
- [11] 钱清. 试论隔板式沉降室在冶金炉窑收尘系统的应用[J]. 价值工程, 2015(12):173-174.
- [12] 毛锐, 刘根凡, 邓翔, 等. 布袋除尘器结构改进的数值模拟研究[J]. 环境工程, 2015(3):77-81; 91.
- [13] 汪家琼, 刘根凡, 邓翔. FLUENT 软件在布袋除尘器挡板和导流板设计中的应用[J]. 石油化工设备, 2008(5): 71-73.
- [14] Alekhin V, Bianco V, Khait A, et al. Numerical investigation of a double-circuit Ranque-Hilsch vortex tube[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 89:272-282.
- [15] Visagavel K, Srinivasan P S S. Analysis of single side ventilated and cross ventilated rooms by varying the width of the window opening using CFD[J]. Solar Energy, 2009, 83(1):2-5.

Numerical simulation of gas-solid two-phase flow field of high temperature with dual-layer granular bed filter

XU Qing-tao¹, YANG Guo-hua^{1*}, SHEN Wei-jie¹, LAN Ming-yong²

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Daqing Oilfield Construction Company, Daqing 163318, China)

Abstract: To tackle the problems of reverse-blowing for dust cleaning and the increasing filtration burden of the bed caused by the large size dust particles entering the dual-layer granular bed, the deflectors are installed at the entrance of the granular bed to create the inertial separation of the dust. In this paper, the discrete phase model in Fluent software is used to simulate the gas-solid two-phase flow field of the granular bed filter to analyze the dust settling rate and the bed dust entry rate of different arrangement mode of deflectors. The simulation results show that the deflectors with constant velocity can prevent the dust particles in large size from entering the filter bed and increase the dust settling rate.

Key words: dual-layer granular bed; deflector; two-phase flow; numerical simulation

(责任编辑 韩 超)