气力输送系统中袋式除尘器的模拟研究

段超龙[1]，乐文毅[2]，刘贵云[2]，年卫琦[2]
（1. 西安建筑科技大学，陕西 西安 710055；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410215）

摘 要： 以宝钢三烧的活性炭烟气净化项目中1#活性炭粉负压气力输送系统的原旋风袋式除尘器、组合袋式除尘器为研究对象。通过CFD软件分别对两种除尘器内部流场进行数值模拟研究，并计算出花板孔的流量分配系数。模拟结果较好地解释了原旋风袋式除尘器出现滤袋袋口破损的原因，同时表明了改进并添加导流板后的组合袋式除尘器的内部气流分布和花板孔的流量分布更加均匀。

关键词： 气力输送系统；旋风袋式除尘器；组合袋式除尘器；CFD；模拟研究；流量分配系数
中图分类号： X701.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2018)02－0054－05
doi： 10.13403/j.sjqt.2018.02.028

Simulation research of bag filters in pneumatic-conveying system

Duan Chaolong[1], Yue Wenyi[2], Liu Guiyun[2], Nian Weiqi[2]
(1. *Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an* 710055, *Shanxi*;
2. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410215, *Hunan*)

Abstract In this paper, with the original cyclone bag filter and the composite bag filter of No. 1 active carbon powder negative pressure pneumatic-conveying system for the active carbon flue gas purification project of Baosteel No. 3 sintering plant as the study object, the numerical simulation research for the internal flow fields of the two types of bag filter were conducted by using Computational Fluid Dynamics (CFD), and the flow distribution coefficient of tube sheet holes were also calculated. The simulation results well explain the cause of filter bag mouth damage of the cyclone bag-filter, and meanwhile they also indicate that, the internal air flow distribution and the tube sheet hole flow distribution of the composite bag filter after improvement and with addition of flow guide plates are more uniform.

Key words pneumatic conveying system; cyclone bag filter; composite bag filter; Computational Fluid Dynamics (CFD); simulation research; flow distribution coefficient

1 前 言

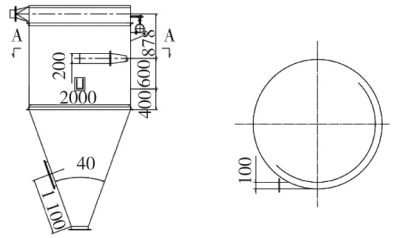
面对不断提高的“环保标准”，大量的电除尘器、湿式除尘器改造为脉冲袋式除尘器[1,2]。目前，袋式除尘器的数量约占各类除尘器总量的60%～70%[3]。且袋式除尘器的内部流场分布受进风方式、除尘器结构和运行参数等因素综合作用并直接影响到滤袋和袋式除尘器的寿命[4]。通过CFD模拟获取除尘器内部流场的可视化效果图，进而分析出气流的运动轨迹和气流分布不均的原因，对袋式除尘器的优化具有指导作用[5]。本文以宝钢三烧的活性炭烟气净化工程项目为依托，通过Fluent软件对原旋风袋式除尘器和改造后的组合式袋式除尘器进行气相数值模拟，对比分析了改造前后的流场分布、烟气轨迹和烟气不均匀性。模拟结果直观地体现出了原旋风袋式除尘器出现滤袋破损的原因，同时表明了组合式除尘器内部气流分布良好，花板孔流量分布均匀。

收稿日期： 2017－08－09
作者简介： 段超龙(1992－)，男，在读研究生，主要从事袋式除尘器优化方面的研究。
通讯作者： 乐文毅(1981－)，男，高级工程师，主要从事冶金行业大气污染物治理工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　工程实况

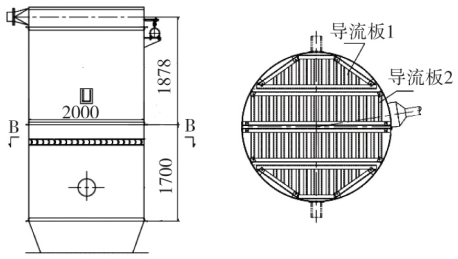
在宝钢三烧的活性炭烟气净化项目中，1#活性炭粉负压气力输送系统处理风量为 15.73 m^3/min。设计人员根据活性炭颗粒粒径较大的特点，选用旋风袋式除尘器(详见图 1)。除尘器的过滤面积为 28 m^2，处理风量为 15.73 m^3/min，进风口为 200 mm × 100 mm，真空泵压头为 49 kPa，滤袋规格为∅130 mm × 1 500 mm。工程实际运行时出现“冒黑烟”现象，更换后的滤袋一周左右就会再次磨破。设计人员结合以往工程经验，针对该除尘器出口负压高(为 -45 kPa)、颗粒粒径大(最大为 9 mm)与活性炭颗粒磨琢性强等特点。在原除尘器设备的基础上，将旋风袋式除尘器改造为有惯性、重力沉降作用的组合袋式除尘器，并在烟气入口上部设置角钢焊接而成的导流板，圆形进风口直径为 325 mm(详见图 2)。



a　　b

图 1　旋风袋式除尘器示意图

a—除尘器结构图；b—A - A 剖面



a　　b

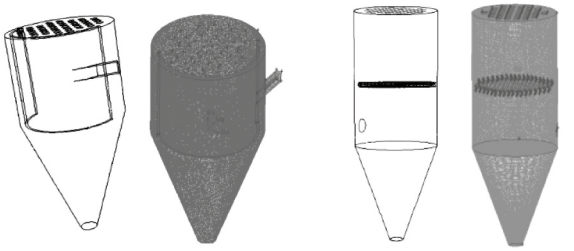
图 2　组合袋式除尘器示意图

a—除尘器结构图；b—B - B 剖面

3　建立模型与划分网格

采用 GAMBIT 2.4.6 软件对旋风袋式除尘器与组合袋式除尘器进行三维建模，并对三维模型进行网格划分。针对上述两种除尘器的特点，为保证计算的效率和精度，将花板孔简化为定压出口，并根据实际管路结构进行压损计算，核定该静压为 -42 kPa。

在除尘器导流板处、花板处结构较为复杂，利用 GAMBIT 2.4.6 通过 TGrid 方法在极其复杂的区域划分出与相邻的区域网格连续的完全非结构化的网格[6]。旋风袋式除尘器的三维模型的网格数量约为 117 万，如图 3a 所示；组合袋式除尘器的三维网格数量约为 260 万，如图 3b 所示。



a　　b

图 3　除尘器三维模型及网格示意

a—旋风袋式除尘器；b—组合袋式除尘器

4　数学模型与边界条件

4.1　数学模型

采用 Fluent 数值模拟来研究原旋风袋式除尘器和改造后的组合袋式除尘器的气相特征，以达到阐明改造前后的流场分布、烟气轨迹和烟气不均匀情况的目的。上述两种袋式除尘器内部的实际流场复杂，经简化之后，假设模拟流体为等温、定常和不可压缩流体。

旋风分离器内的流场是复杂的三维强旋转湍流流场，具有强烈的各向异性，因此旋风袋式除尘器采用 RSM 模型进行模拟计算[6]。压力梯度项采用 PRESTO 方法进行处理，各方程对流项采用 QUICK 差分格式，压力 - 速度耦合的求解采用 SIMPLEC 方法[6,7]。组合袋式除尘器根据假设条件宜采用标准 k - ε 湍流模型压力梯度项采用 Standard 方法进行处理，各方程对流项采用 Second Order Upwind 差分格式，压力 - 速度耦合的求解采用 SIMPLE 半隐式方法[8]。

在使用 RSM[6,7] 时，还需要补充湍流动能方程 k 和扩散方程 ε，其分别为[6]：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\eta+\frac{\eta_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\Big]+\frac{1}{2}(P_{ii}+G_{ii})-\rho\varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_k \varepsilon)}{\partial x_k}=\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\eta+\frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}\Big]+c_{1\varepsilon}\frac{1}{2}(P_{ii}+c_{3\varepsilon}G_{ii})-c_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

湍动粘度可表示为: $\eta_t=\rho c_\eta\frac{k^2}{\varepsilon}$ (3)

式中: $P_{ii}=-\rho(\overline{u'_i u'_k}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}+\overline{u'_i u'_k}\frac{\partial u_i}{\partial x_k})$ 为应力产生项; G_{ii} 为浮力产生项,对于不可压缩流体 $G_{ii}=0$; $c_{1\varepsilon}$、$c_{2\varepsilon}$、c_η、σ_k、σ_ε 为常数,其值分别为 $c_{1\varepsilon}=1.44$、$c_{2\varepsilon}=1.92$、$c_\eta=0.09$、$\sigma_k=0.82$、$\sigma_\varepsilon=1.0$; $c_{3\varepsilon}$ 为可压缩流体流动计算中与浮力相关的系数。

标准 k-ε 湍流模型运输方程为[8,9]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\eta+\frac{\eta_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\Big]+G_K+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\eta+\frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\Big]+c_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+c_{3\varepsilon}G_b)-c_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \quad (5)$$

式中: G_k 是平均速度梯度引起的应力源项; G_b 是由于浮力引起的湍动能的产生项; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; $c_{1\varepsilon}$、$c_{2\varepsilon}$、c_η 为经验常数,Fluent 中的默认值分别为: 1.44、1.92 和 0.09; σ_k、σ_ε 分别为湍动能、湍动耗散率对应的普朗特数,对应的默认值为 1.0、1.3; $c_{3\varepsilon}$ 为可压缩流体流动计算中与浮力相关的系数; S_k、S_ε 为用户定义源项,其中,$S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$。

4.2 边界条件

除尘器过滤面积为 28 m^2,处理风量为 15.73 m^3/min,过滤风速为 0.56 m/min,烟气温度为环境温度,空气密度为 1.225 kg/m^3,黏度 η 为 1.7894×10^5 Pa·s,设为花板孔为静压(-42 kPa)的压力出口边界条件。采用速度入口边界条件,旋风袋式除尘器进风口为 200 mm×100 mm,速度为 13.11 m/s; 组合袋式除尘器进风口为 ∅325 mm,速度为 3.15 m/s; 残差精度小于 10^{-4}。

4.3 流量分配系数[10]

$$K_i=Q_i/Q_{mean}(i=1,2,\cdots n) \quad (6)$$

式中: Q_i 为第 i 列花板孔的平均处理气体体积流量,m^3/s; Q_{mean} 为所有花板孔的平均处理气体体积流量,m^3/s。

5 结果与分析

5.1 旋风袋式除尘器模拟结果分析

图4为旋风袋式除尘器全压分布云图。可见,烟气以 13.11m/s 的流速由进风口进入除尘器,经导流弧圈作用后,由于速度较大,使在沿流体流动方向总压升高,且总压较高的区域集中在袋室上半部位。

图5为旋风袋式除尘器入口气体迹线图。可见,由进风口进入除尘器的烟气,由于旋流作用和出口负压作用分成了主流旋转向上流动,小部分流体旋转向下流动。由于该除尘器的出口负压(-42 kPa)远大于常规除尘器,导致花板区域烟气流速很高,使滤袋袋口在向上主流高速烟气的冲刷下,在极短时间内被磨穿,造成旋风袋式除尘器无法正常工作。

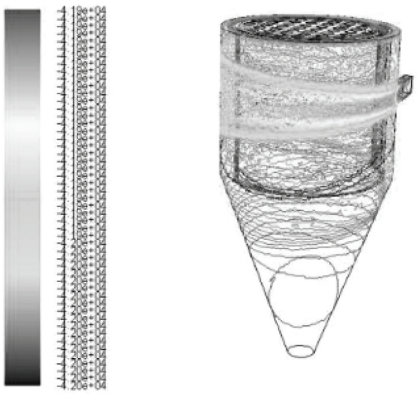


图4 旋风袋式除尘器全压分布云图

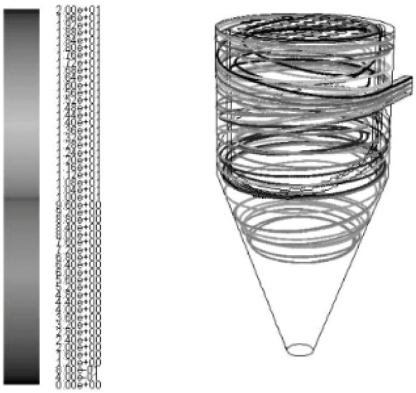


图5 旋风袋式除尘器入口气体迹线图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5.2　组合袋式除尘器模拟结果分析

图 6 为组合袋式除尘器动压分布云图。可见，烟气以 3.15 m/s 的流速由进风口进入除尘器，烟气进风速度小，向上流动的气体由于扩散作用，使导流板以上部位的烟气气流速度分布均匀；而在烟气进风入口，由于气流引射作用，在下部灰斗形成了窝流区，所以烟气入口下部动压较高且变化较大。

图 7 为组合袋式除尘器入口气体迹线图。可见，由进风口进入除尘器的烟气，在出口负压作用和烟气引射作用下，一部分向上流动扩散，另一部分流体沿灰斗壁面向下流动。且向下流动的烟气又在进口烟气的引射下向上流动扩散。

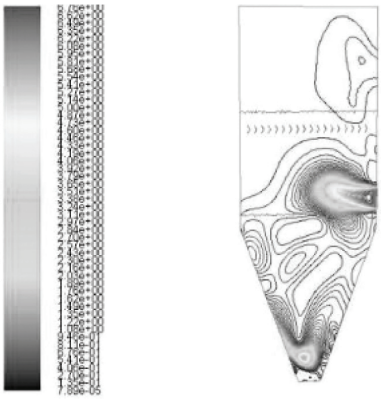


图 6　组合袋式除尘器动压分布云图

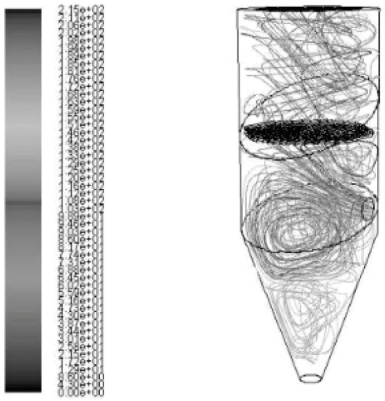


图 7　组合袋式除尘器入口气体迹线图

5.3　改进前后流量分配对比

为了方便计算不同滤袋的流量分配系数，对 48 个花板孔进行编号（详见图 8）。编号号码第一位数代表第几列，号码第二位数代表所在列自上往下数第几个花板孔。其中，对于上述两种除尘器的进风口来说，第 1 列距离最远且第 8 列距离最近。

通过统计各花板孔的气体体积流量，分别计算出每一列花板孔的平均气体体积流量 Q_i 以及每一个花板孔的平均气体体积流量 Q_{mean}，然后通过公式（6）求出每一列的平均流量分配系数 K_i。进而对滤室内滤袋流量分配问题进行判断。

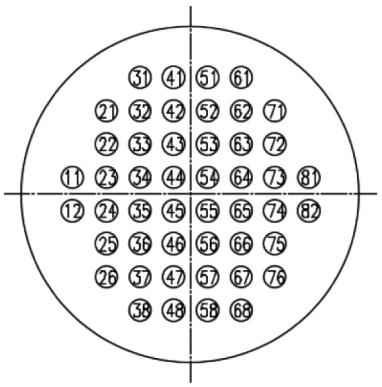


图 8　滤袋编号图

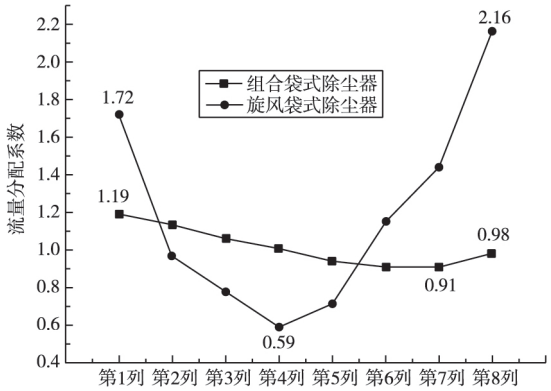


图 9　流量分配系数变化曲线

图 9 为流量分配系数变化曲线。通过对比图 9 中改造前后的流量分配系数可知：

（1）旋风袋式除尘器的流量分配系数由第 1 列的 1.72 下降到第 4 列的 0.59，再在第 8 列上升为 2.16。其原因是由于旋流作用造成的流量分布不均导致。

（2）组合袋式除尘器的流量分配系数由第 1 列最大的 1.19 下降到第 7 列的 0.91，再升高到 0.98。其原因是由于除尘器壁面对气流的挤压作用所造成。

（3）两者的流量分配系数均在靠近壁面处最大，但改造后流量分配系数均趋近于 1；改造前的流量分配系数由中心线部位向壁面逐渐递

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

增;改造后的组合袋式除尘器由于壁面作用和导流板的均流作用,其内部流量场更加均匀,烟气在袋室分布也更加均匀。

6 结 论

通过分析模拟结果,所得结论如下:

(1)模拟结果表明,在较高的出口负压作用下,原旋风袋式除尘装置滤袋破损的原因是由于高速烟气对滤袋的直接冲刷作用所致。

(2)改造后的组合袋式除尘器先利用惯性、重力作用除去活性炭大颗粒,再利用导流板均流作用和充分的烟气扩散空间使袋室获得了低速而均匀的烟气分布,且运行效果良好。

(3)通过对比改造前后的流量分配系数变化特点可知,改造后的组合袋式除尘器获得了较好的内部流场,同时也反应出了原旋风袋式除尘器和组合袋式除尘器各自花板孔的流量分配与各自花板孔的位置关系。

7 致 谢

由衷的感谢中冶长天提供的这次校企联合培养,以及在本文模拟、书写过程中提供的指导、帮助和工程相关的资料信息。

参考文献

[1] 张殿印,王纯. 脉冲袋式除尘器手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011:498-590.

[2] 张世刚,段向军,马云鹏. 袋式除尘器的应用及展望[J]. 机械工程与自动化,2011,(6):198-200.

[3] 刘再新,陈添乐. 烧结环境除尘超低排放技术研究及生产应用[J]. 烧结球团,2016,41(3):57-61.

[4] Saleem M,Krammer G,Khan R U,et al. Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter[J]. Powder Technology,2012,224(1-2):28-35.

[5] Andersen B O,Nielsen N F,Walther J H. Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters[J]. Powder Technology,2016,291:284-298.

[6] 陈家庆,俞接成,刘美丽,等. ANSYS FLUENT 技术基础与工程应用[M]. 北京:中国石化出版社,2014:100,238-251.

[7] 崔洁,陈雪莉,龚欣,等. 径向入口结构的旋风分离器内三维流场的数值研究[J]. 高校化学工程学报,2010,24(3):388-394.

[8] 朱红均,林元华,谢龙汉. FLUENT 12 流体分析及工程仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2011:89.

[9] 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,2015,33(3):77-81.

[10] 张立栋,王坤玉,薛长智,等. 袋式除尘器内流量不均匀性的数值研究[J]. 电站系统工程,2013,29(4):21-22.

(上接第13页)

不出改造资金,可采用适当增加输送带线层数的办法来应对。当输送带的线层数增加时,其刚性增加,被折叠的程度减轻,达到有效地防止此类异常磨损发生的目的。增加输送带的线层数会增加输送带的成本,因而输送带线层数的增加仅以防止折叠为度。这种托辊在冶金行业已很少见了,但在陶瓷行业尚有使用。

5 结束语

(1)本文提出了一种以系统年度输送带异常磨损量为基准来计算胶带机输送带异常磨损的方法。该方法能够更准确地找到输送带消耗的合理水平,方便各子系统之间的比较。

(2)掌握企业输送带异常磨损的总量和需要改变工艺条件(如长期的高温、高压、大负载、强冲击负荷等)才能有效消除的输送带异常磨损的量,有利于企业准确地制定输送带消耗的考核指标,有利于企业节能降耗。

(3)只有让现场的人员全面掌握输送带异常磨损防护技术,才能以最低的成本、及时地处理现场的突发情况,及时而有效地消除异常磨损。

参考文献

[1] 北京起重运输机械设计研究院,武汉丰凡科技开发有限公司. DTⅡA 型带式输送机设计手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2013:33-34.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net