

除尘系统气体分布器 CFD 模拟优化

陈建娟¹, 张娜¹, 岳宜文³, 丛山^{2,3*}

(1. 中国石化工程建设有限公司, 北京 100101;

2. 天津大学化工学院, 精馏技术国家工程研究中心, 天津 300350;

3. 北洋国家精馏技术工程发展有限公司, 天津 300072)

摘要:为提升管路内气体分布的均匀性,通过计算流体力学(CFD),采用 RNG- $k-\epsilon$ 湍流单相流模型对分布管内气体的三维流场进行数值模拟。通过分析模拟结果中三维流场的特点,对预分布管干路及支路的结构尺寸进行优化,使气体在各支路通量分布更均匀。在 $\pm 50\%$ 操作通量波动下对优化后的气体与分布管进行测试,模拟结果显示气体在各操作通量下均分布较好。

关键词:气体预分布管;除尘系统;CFD;单相流模型;结构设计与优化

中图分类号:TQ028.31

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)S-0292-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.S.066

CFD simulation and optimization of gas distributor in dust removal system

CHEN Jian-juan¹, ZHANG Na¹, YUE Yi-wen³, CONG Shan^{2,3*}

(1. Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China; 2. National Engineering Research Center of Distillation Technology, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

3. Pei Yang National Distillation Technology Corporation Limited, Tianjin 300072, China)

Abstract: Uniform distribution of gas to each cyclone separator has great effect on the operation of dust removal system. In the process of industrial dust removal, large-scale gas treatment requires parallel operation of multiple cyclone separators. Therefore, diameter-adjustable gas distribution pipe is often used for the connection and pre-distribution of parallel separators. In order to improve the uniformity of gas distribution in pipelines, RNG- $k-\epsilon$ turbulence single-phase flow model is used to simulate three-dimensional flow field of gas in the distribution pipe through computational fluid dynamics. Based on the characteristics of three-dimensional flow field in the simulation results, the structure and size of pre-distribution trunk and branch are optimized to make the gas flux distribution more uniform in each branch. The optimized gas and distribution pipe are tested under 50% operation flux fluctuation, and the simulation results show that gas distributes well under all operating fluxes.

Key words: gas pre-distribution pipe; dust removal system; CFD; single-phase flow model; structure design and optimization

旋风分离常常用于一定工况下的气固混合物的分离,如加热炉烟气处理^[1]、多晶硅还原炉尾气处理^[2]、木质碎料过滤除尘^[3]等,其分离效果取决于固体颗粒物系的性质、固气比等因素,除此之外,分离操作受气体处理量影响较大。在处理较大气体通量的体系时,往往需要多个旋风分离器并联操作,而各分离器之间物料的均匀进料对设备操作至关重要^[4]。工业上常采用气体分布管对各并联的旋风分离设备进行连接和气路分配。

气体分布管种类较多,结构各异,其中变径式气体分布管是工业中最常用的气体分布器,易于根据分离操作需求进行结构设计,尤其是高气体负荷下的除尘系统。变径式气体分布管通常由气体干路和各气体支路构成。前者将物料送至厂区各处,通过支路与各旋风分离设备进行连接进料。由于预分布

管内流体流动复杂多变,在较高的气体负荷下,分布管的结构和排布对于除尘系统整体影响很大。随着计算流体力学(CFD)理论和计算能力的提升,采用数值模拟的方法对分布器内部流场进行分析,将结果用于指导大型流体分布结构的设计和优化已经越来越多地被现代化厂区采用。本文将使用 CFD 软件对气体预分布管进行模拟研究,针对加热炉尾气除尘过程的气体三维流动进行模拟,通过优化结构尺寸以获得良好的气体物料进料分布。

1 气体分布管的物理模型

图 1 为用于工业级除尘的旋风分离器。物料通过分布管进入分离器,通过气体切向流动引起的离心作用将粒径较大的粉尘甩到分离器内壁,随后被收集进入灰堆统一处理。净化后的气体通过管路回

收稿日期:2020-08-19;修回日期:2020-09-07

作者简介:陈建娟(1973-),女,硕士,高级工程师,研究方向为化学工程与工艺,chenjianjuan@sei.com.cn;丛山(1972-),男,博士,副研究员,研究方向为分离过程开发,通讯联系人,congshan@tju.edu.cn。

流到分布管中进入下一工段。

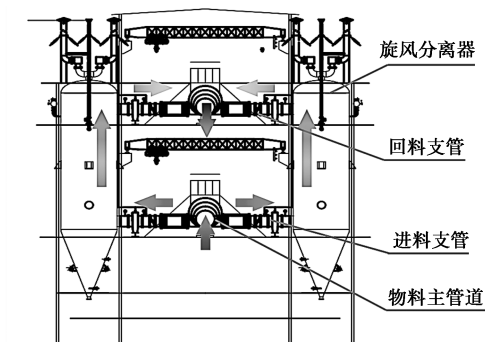


图1 旋风分离器及管路结构示意图

物料通过直径为 2 820 mm 的主管道进入整个车间,随后通过支管将待处理气体输入各旋风分离器中。预分布管设计必须足够合理,根据其结构,将待处理物料气体均匀分配到各单元中。通过结构尺寸的合理设计,消除分流不平衡带来的不利影响,甚至短路现象,尽可能发挥所有单元的作用,保证工业除尘过程的平稳运行。

分布管路的物理模型如图 2 所示。根据处理量和厂区布局需求,需要 12 个直径 5 400 mm 的等径旋风分离器等间距并联处理。物料通过变径主管道进入车间,随后从侧边等距开口,将物料输入旋风分离器中。对主管道的结构及侧面支管的尺寸进行优化设计是保证气体良好分布的关键。通过大量实验来摸索合理的分布管管径耗时耗力,往往在实际操作过程中被忽略,而造成工业设备的不合理利用。通过选用恰当的流体力学模型,选用 CFD 软件对分布器进行优化设计,不但可以保证设计合理,而且能节省大量时间和资源,缩短研发周期。通过三维可视化方法可以获得实验难以获得的直观数据,避免设计失误对旋风分离器的分离性能带来不利影响^[5-7]。

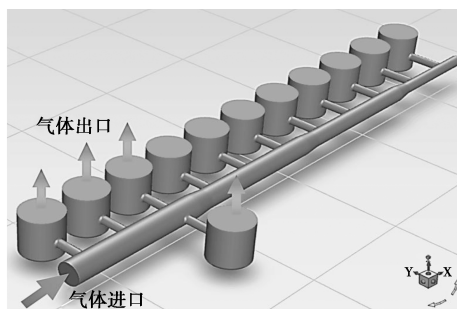


图2 分布管路的物理模型

2 模型建立与方法选择

随着化工工业高速发展及大型化,对流体均匀

分布的理论预测和设备设计都提出了更高的要求,以往的经验设计理论已经难以满足工程实际需求^[8]。对于流体的管道内流动问题,以往研究者提出以伯努利方程为基础的机械能守恒方程来求解以指导工业管道设计。这种方法在简单的管道排布中发挥了关键的指导作用,但是对于分支流动、多条流线的分析存在多种能量守恒或评估摩擦阻力损失,边界条件的复杂性为问题分析带来困扰。为避免这种困扰带来的影响,许多学者倾向于采用动量守恒法,将流道的分支排布与开孔等因素包含在动量交换系数中,而不在意流动的具体细节,构建了流体均布的基本理论,也为本文结构优化提供了基础和研究方向^[9-10]。

进料管内的气体分布属于多孔管分支系统的流动过程^[11],可将该过程简化为三维非稳态不可压缩流动过程,考虑到此处工业级气体处理量为 $(48 \sim 53) \times 10^4 \text{ Nm}^3$,流体流型为湍流,描述该问题可用连续性方程和纳维-斯托克斯方程联立求解,同时流体湍动行为采用 RNG- $k-\varepsilon$ 湍动方程进行描述。本文将采用单相流方法对管道内气体流场进行模拟。其中单相流连续性方程和动量守恒方程分别如公式(1)和公式(2)所示。

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体的密度,为 1.225 kg/m^3 ; t 为时间, s; \mathbf{u} 为速度矢量, m/s; ∇ 为拉普拉斯算子。

$$\partial (\rho \mathbf{u}) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + S_M \quad (2)$$

式中: P 为压力, Pa; S_M 为动量源项, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量, N/m^2 , 与应变速率 δ 有关,可表示为公式(3)。

$$\boldsymbol{\tau} = \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - (2/3) \delta \nabla \cdot \mathbf{u}] \quad (3)$$

式中: μ 为流体黏度,此处为 $1.79 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; T 为矩阵转置。

基于物理模型尺寸,采用 Gambit 2.4.6 建立三维模型并进行网格划分,选取整个管路作为计算区域,主管道的一侧为气体进口,根据气体处理量,确定气体进口速度为 2.22 m/s 。取旋风分离器一定高度的截面为压力出口,取管道壁面为无滑移边界。经过网格独立性检验,确定网格数量为 4.5×10^5 。

划分好的网格导入 Fluent R20 中进行求解,求解器类型为 pressure-based,采用压力-速度耦合算法,对于压力项和动量项均采用二阶迎风算法,湍流能和耗散率采用一阶迎风算法。迭代松弛因子设置为 0.75,并对距离入口最近的压力出口(1号压力出口)监测质量流量随时间的变化,如图 3 所示。当

初始开车时,物料开始输入管道,大量气体涌入距离进口最近位置的旋风分离器,其质量流量升高到稳态流量的 129%,而后随着后续分离器逐渐分流,1号旋风分离器的进气量逐渐降低,系统在 15 s 后即达到稳态。本文模拟采用瞬态模拟,各流动变量的残差定为 10^{-5} ,比较达到稳定状态之后的各设计类型尺寸管路的气体分布,以气体出口处质量流量作为计算评价指标。

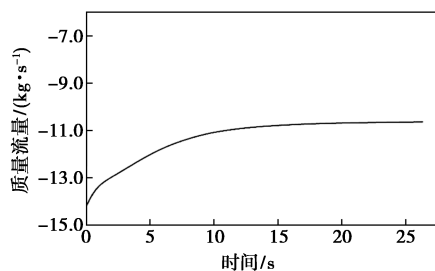


图 3 1号压力出口质量流量随时间的变化

3 模拟结果与结构优化

3.1 主管道结构比较

比较了3种主管道结构,将主管道分为4段:从入口开始以此为1段(17.12 m)、2段(16.12 m)、3段(16.12 m)、4段(16.12 m),段之间由2 m的变径管连接。各结构之间对应不同的段直径,如表1所示。

表 1 主管道各段直径设计方案 mm

	1段	2段	3段	4段
方案 1	2820	2420	2020	1420
方案 2	2820	2620	2420	2020
方案 3	2820	2820	2820	2820

将各方案建模进行模拟计算,获得流场分布如图4所示。体系达到稳态之后,主管道随着设备逐渐分流,距离入口越远,流速越低。

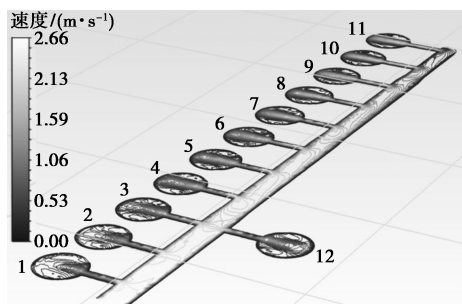
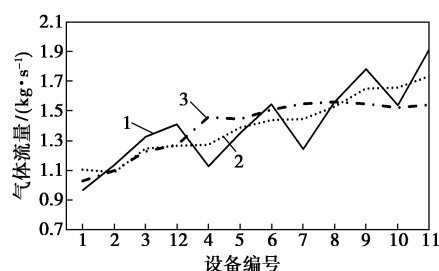


图 4 预分布管路流场分布

通过流场分布来看,气体可以有效地被分配到各设备之中。此处为各并联设备编号1~12,通过统计12个气体流量分布来评价3个方案的分布均匀

性。模拟达到稳定状态的管路系统分布均匀性,如图5所示。



1—方案 1;2—方案 2;3—方案 3

图 5 3个主管道方案各设备的气体分布

由模拟结果可知,对于方案1,距离入口越远的位置,由于气体流速下降和盲端阻挡使得远端静压力增大,气体流量逐渐增大,从而导致设备之间气体分布不均匀。方案2和方案3对2~4段的管径进行了不同程度的加粗,远端的气体流量相对于方案1有所降低,这是由于管径的扩大,使得远端静压力减小,主管道内压力梯度降低,各点的压力趋于平均。因此,适当扩大远端主管路的尺寸,对于气体的均匀分布更为有利。

3.2 支管管路尺寸优化

在工厂实际设计和后续改进过程中,主要管路往往不易修改,而管路排布的复杂性也决定了管道内部存在的静压力梯度。图6是方案1管路内的静压力分布。

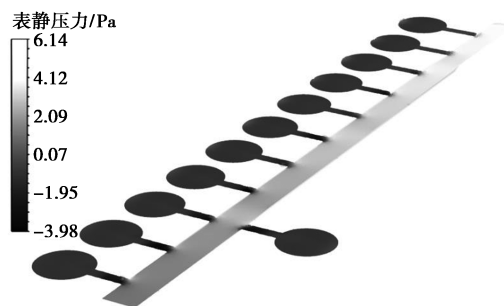
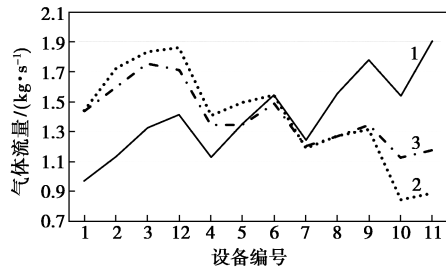


图 6 方案 1 管道内静压力分布

尤其是在较大处理量的情况下,较高的静压力梯度必然会导致气体在各设备之间难以均匀进料,因此根据压力分布在局部对支管进行改造是比较行之有效的方法。通过图6可知,在方案1设计中,远端静压力显著提高,因此考虑减小远端进料支管的尺寸,通过调节远端进料流动阻力的手段,使得各处流量达到平衡。为此提出以下调节方案:①方案4,在方案1设计基础上,将2~4段支管管径分别更改为920、820、720 mm;②方案5,在方案1设计基础上,将2~4段支管管径分别更改为920、860、

800 mm。在达到稳态之后,方案1、4、5的流量分布如图7所示。



1—方案1;2—方案4;3—方案5

图7 不同支管尺寸设计的气体分布

通过方案4与方案1的比较可以发现,通过减小远端支管管径,增大的流动阻力可以有效降低远端旋风分离器的处理通量。但是方案4由于支管管径过细,导致近端处理量较高,而远端气体流量过低,也会造成气体分布不均匀。方案5在方案4基础上对管径进行调节,通过模拟结果来看,其分布均匀性较前两种方案更为良好。因此,在实际工业设计中,改变并优化进料连接支管的直径对于气体分布的调节具有较好的效果。

3.3 优化结构的操作弹性

在实际工业生产中,含尘气体的处理量并不是一成不变的,因此评价结构的操作弹性在设备设计中具有比较重要的意义。在本次模拟中,对优化后的结构(方案5)进行测试,如图8所示。

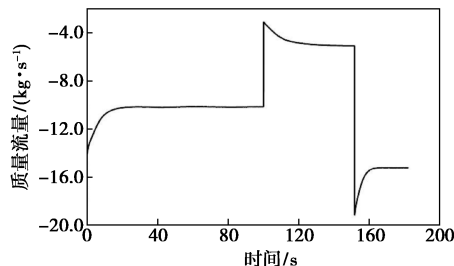
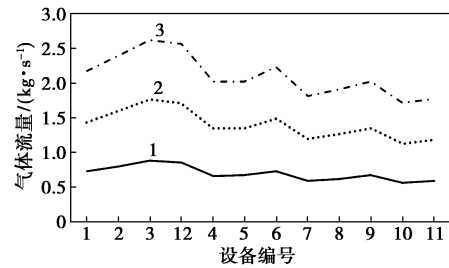


图8 1号旋风流量随时间的变化

在体系达到稳定之后,将气体流量相较初始进料量增大50%,待其达到稳定,计算各设备内流量的分布状况;而后将气体流量降低至初始进料量的50%,稳定后计算设备内的流量分布。各处理量的设备流量分布如图9所示。

通过模拟结果可知,当体系流量较小时,管路内部压力梯度较低,更容易实现均匀分布;而当流量逐渐增大,入口近端的流量会比远端有更大的提升,压力梯度增加使得气体分布均匀性变差。但总体而言,对于优化后的结构,操作弹性在 $\pm 50\%$ 时气体分布仍保持在较为均匀的状态。



1—25万/Nm³;2—50万/Nm³;3—75万/Nm³

图9 不同气体处理量的管路流量分布

4 结论

通过CFD对除尘系统气体分布进行了模拟研究。首先,通过单相流模型对几种主管道的变径结构进行了比较分析,并总结出结构与性能的作用规律。而后,在现有主管路基础上提出对支管管路尺寸进行变径设计与尺寸优化,获得了气体分布较为均匀的支管管径数据。最后,对优化后的结构进行操作弹性测试,评价了其在不同处理量下的气体分布性能。

(1)主管路的变径设计会改变流场内部静压力,进而会对气体分布产生影响。距离进口较远的位置,由于气体流量减小,流速降低,且受盲端阻挡,静压力增大。因此距离主管道入口较远的旋风分离器可分配到更大的气体量,引起物料分配的不均。通过增大远端管道的尺寸,可以有效改善这一现象,使气体更均匀地分配到每个分离单元。

(2)根据主管道内的静压力分布,可适当调整支管尺寸,以确保均匀的气体分配。以旋风分离器出口质量流量的均匀性为参考指标,对管路尺寸进行优化,获得分布较好的支管尺寸。优化结果显示,对于支管管径设置为1020~800 mm的等差序列尺寸,模型所分析的管路可以达到良好的气体分布。

(3)气体分布对气体处理量较为敏感,当流速较低时,主管道内静压梯度相对较小,气体可以更加均匀地分配到各旋风分离器中;而流速较高时,气路分布对结构设计更为敏感。优化之后的结构在气体处理量 $\pm 50\%$ 的波动范围内仍然保持较好的气体分布。

参考文献

- [1] 郭强,王泉海,卢啸风,等.大型CFB锅炉并联布置分离器烟气流动特性的数值模拟[J].中国电机工程学报,2019,39(13): 3851-3859.

(下转第299页)

3 脱硫实验与模拟结果对比

对船用柴油机 6S35ME-B9 进行实验研究,以硫含量为 2.7% 的重质燃油为燃料,产生烟气量为 20 000 Nm³/h, SO₂ 的体积分数为 0.06%, 温度为 230℃, 填料塔塔径为 2 m, 填料高度为 1.6 m, 采用 DN76 环矩鞍填料, 改变喷淋总量调节液气比, 通过测量吸收后烟气中 SO₂ 的体积分数, 计算得到实验脱硫效率。不同液气比下脱硫效率实验值和模拟结果对比如表 2 所示。

表 2 脱硫率实验值与模拟结果对比

液气比/(L·m ⁻³)	实验脱硫率/%	模拟脱硫率/%	结果偏差率/%
3.98	74.7	75.4	0.9
4.97	87.0	87.5	0.6
5.97	92.9	93.3	0.4
7.46	96.5	97.0	0.5
8.95	98.1	98.5	0.4

由表 2 可知, 模拟结果与实验数据最大偏差率在 1% 之内, 模拟结果可靠, 可指导工程设计。

4 结论

(1) 在相同的操作条件下, 脱硫效率随烟气中 SO₂ 体积分数及海水温度的升高而减小, 随填料高度及液气比的增加而增加; 脱硫后的海水 pH 波动

较小, 通常在 3.7~4.3 之间。

(2) 预喷淋能有效降低烟气进入填料塔的温度, 提高 SO₂ 的吸收效率, 增加预喷淋比海水直接喷淋脱硫效果好。

(3) 模拟脱硫效率与实验测得的脱硫效率最大偏差率在 1% 之内, 可为工程设计提供指导依据。

参考文献

- [1] IMO. Resolution MEPC.259(68) - 2015 guidelines for exhaust gas cleaning systems[S]. IMO, 2015.
- [2] 运明雅, 辛清萍, 张玉忠. 烟气脱硫技术的研究进展[J]. 山东化工, 2019, 48(7): 68-71.
- [3] 刘铭辉, 刘涛, 高艳玲, 等. 海上平台烟气海水脱硫技术应用研究与进展[J]. 工业催化, 2019, 27(5): 5-10.
- [4] 韩明洋. 船舶尾气脱硫设备与工艺的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [5] 吴斌, 李欣, 王怡. 船舶废气脱硫技术的应用[J]. 船海工程, 2019, 48(2): 48-50.
- [6] 马义平, 许乐平, 宿鹏浩, 等. 船舶烟气海水脱硫的模拟和设计[J]. 上海海事大学学报, 2013, 34(2): 41-45.
- [7] 张正斌. 海洋化学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2004.
- [8] 孙双双, 张少峰, 唐猛, 等. 双效气液并流工艺中海水脱硫特性的模拟研究[J]. 河北工业大学学报, 2016, 45(2): 55-61.
- [9] 赵文强, 李春虎, 王亮. 海水烟气脱硫工艺设计及优化[J]. 现代化工, 2010, 30(S2): 259-262.
- [10] 匡国柱, 史启才. 化工单元过程及设备课程设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. ■

(上接第 295 页)

- [2] 张世良. 旋风分离器在多晶硅还原炉尾气除尘中的应用[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(4): 146, 194.
- [3] 周捍东. 木质碎料旋风-过滤除尘技术与装置的开发和应用[J]. 林产工业, 2002, 39(5): 40-42, 39.
- [4] Mariani F, Risi F, Grimaldi C N. Separation efficiency and heat exchange optimization in a cyclone[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 179: 393-402.
- [5] Albluwi S F, Koleshwar V S, Shariff M M, et al. CFD improves water separation efficiency in wet crude tanks[J]. Oil & Gas Journal, 2020, 118(3): 43-47.
- [6] Misiulia D, Antonyuk S, Andersson A G, et al. High-efficiency industrial cyclone separator: A CFD study[J]. Powder Technology, 2020, 364: 943-953.
- [7] Wang P, Pan W, Dai G. A CFD-based design scheme for the perfor-

ated distributor with the control of radial flow[J]. AIChE Journal, 2020, 66(5). DOI: 10.1002/aic.16901.

- [8] Zhang X, Zhai G, Qian W, et al. Numerical simulation of effect of gas distributor on Fischer-Tropsch synthesis in fluidized-bed reactor[J]. Particuology, 2019, 45: 98-104.
- [9] Guo Y, Dai C, Lei Z. Hydrodynamics and mass transfer in multiphase monolithic reactors with different distributors: An experimental and modeling study[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018, 125: 234-245.
- [10] Lopes M G M, Santana H S, Andolphato V F, et al. CFD analysis of flow distributor designs for numbering-up of biodiesel synthesis[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 138: 458-471.
- [11] 张小龙, 李啸, 叶晗, 等. 基于 CFD 技术优化 50 L 发酵罐内气体分布器[J]. 农业技术与装备, 2020, (3): 28-29, 31. ■