

冶炼烟气制酸转化器布气装置理论研究及应用

欧阳灿 黄金豪

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 长沙 410019)

[摘要] 采用传统单级轴向布气装置的二氧化硫转化器易出现烟气分布不均、触媒层测温点温差较大、二氧化硫转化率不达标等问题。为找出问题根源和解决方案,借助计算流体力学模拟软件对单级轴向布气装置的气体分布效果进行了分析,同时基于多级布气的思想提出了一种新型多级轴向布气装置,对影响新型轴向布气装置布气效果和压降的关键参数的尺寸进行了优化研究。传统单级轴向布气装置结构单一,受筛孔板节流因素的影响,通过筛孔的气流与被筛孔板阻挡而改变流向的气流到达触媒层表面后,存在显著的速度、流量差异,导致布气装置布气不均匀。新型多级轴向布气装置通过多级布气有效克服了单级筛孔板的布气缺陷,其性能在工程实际应用中得到了检验,二氧化硫转化率、触媒床层温差、硫酸产量等指标均获得了显著改善。

[关键词] 二氧化硫; 转化器; 多级布气; 不均匀度; 流体力学模拟

[中图分类号] TF35 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)02-0046-05

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.008

0 前言

近年来随着富氧熔炼等先进冶金技术的广泛应用,有色冶金烟气制酸系统不断朝着高浓度和大型化方向发展^[1]。二氧化硫转化率是评价整个制酸系统成败的一个重要指标^[2]。合格的二氧化硫转化率既能保障制酸系统的产能,也是满足烟气达标排放和降低尾气脱硫处理成本的根本途径,因此对影响二氧化硫转化率的关键因素及装置开展研究显得尤为重要^[3]。

二氧化硫转化器属于冶炼烟气制酸系统的核心装置之一,冶炼烟气中的二氧化硫气体组分和氧气组分通过转化器的气体分布装置进入装置内部的触媒层中,在钒或钼触媒的催化作用下发生化学反应生成三氧化硫气体。性能优良的转化器装置应能保证各烟气组分尽量沿装置横截面均匀地进入触

媒层,从而避免烟气分布不均导致的触媒利用率降低、局部触媒超温、转化率不达标等不良后果。然而,对于内直径10 m以上的大型二氧化硫转化器,受自身制造成本控制,其高径比往往远低于小直径二氧化硫转化器。较低的高径比容易导致转化器内传统布气装置缺乏足够的气体均匀扩散距离,使得气体分布效果大打折扣,这也是众多已投入使用的大型二氧化硫转化器出现同层测温点温差偏大、触媒使用寿命偏低、二氧化硫转化率长期达不到设计值的原因。

为更加直观说明上述问题以及针对性地找出解决方案,本文首先借助CFD流体模拟软件建立了包含转化器进出口、触媒层、传统轴向布气装置在内的局部转化器流体域模型,期望通过模拟得出传统轴向布气装置作用下烟气在触媒层表面的分布情况,并分析气体分布不佳的原因及可能的改进方案。随后,对于改进后的轴向布气装置进行优化,找出布气装置中的关键参数尺寸对气体分布均匀度和压降的影响,通过比较得到最优轴向布气装置结构尺寸设计,并对该新型轴向布气装置进行了实际工程应用。

1 传统轴向布气装置流体分析

1.1 CFD模型建立

冶炼烟气制酸转化器装置各转化段的进气方式主要分为顶部轴向进气和侧向进气两种,通常多层结构转化器装置中最重要的一层转化段(转化率占

[收稿日期] 2023-12-21

[作者简介] 欧阳灿(1984—),男,湖南衡阳人,高级工程师,硕士,主要从事有色冶金工程非标设备设计工作。

[引用格式] 欧阳灿,黄金豪. 冶炼烟气制酸转化器布气装置理论研究及应用[J]. 绿色矿冶,2024,40(2):46-50.

OUYANG Can, HUANG Jinhao. Theoretical research and application of gas distribution device for smelting flue gas acid converter[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(2): 46-50.

比可达70%左右)或含有一个转化段的高浓度制酸预转化器多采用顶部轴向进气。本文主要围绕转化器轴向进气装置展开,选取的模型对象为设置在制酸系统转化器顶部的一个转化单元,包含一个转化段(图1)。烟气从顶部进气口进入,通过传统单级筛板型轴向布气装置后进入触媒层,并从转化单元侧下方出口流出。

为简化分析过程,排除多余干扰因素,模型进行如下简化:1)介质对象选取空气替代实际烟气组分;2)触媒层的催化剂、耐火瓷球、支持格栅均视为多孔介质,通过设定孔隙率参数替代实际建模;3)不考虑介质温度变化和触媒层中的化学反应;4)对于分析结果影响较小的支撑梁、立柱、触媒装卸口、人孔、结构加强筋板等零部件不进行建模。建立的转化单元模型内径为10 200 mm,总高6 500 mm,介质物性参数见表1。

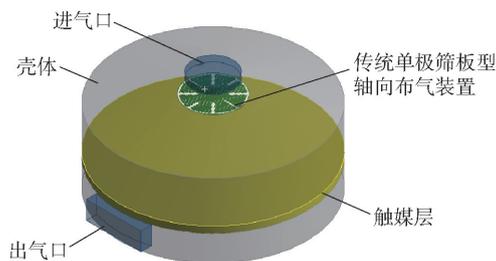


图1 转化单元流体域CFD模型

表1 介质物性参数表

介质名称	工况气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$)
空气	227 000	1.225	1.79×10^{-5}

传统单级筛孔板布气装置内部不规则区域众多,因此转化单元内该区域使用适应性更好的四面体网格进行划分,其他区域均采用相对较粗的六面体网格进行划分。转化单元流体域网格模型如图2所示,雅克比数值保证在0.9左右,网格数量约为511万,节点数量约为100万。

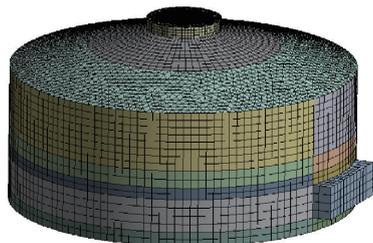


图2 转化单元流体域网格模型

1.2 边界条件设置

求解单元采用基于压力的求解器,流体性质为

单相流不可压缩流体,定常流动,湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型,壁面函数采用标准壁面函数,压力和速度解耦采用SIMPLE算法,动量、能量和湍流参数的求解采用二阶迎风算法。气体入口使用速度边界,气体出口使用压力边界,湍流度用湍流强度与水力直径表示,进出口边界条件见表2。

表2 进出口边界条件

边界	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	出口 压力/kPa	湍流 强度/%	水力 直径/m
气体入口	16.6	—	3	2.0
气体出口	—	30	3	1.5

触媒区域介质类型设置需开启Porous Zone选项,并设置多孔介质区域内的流动为层流,点选Laminar Zone。在Porous Zone选项卡中对多孔介质区域进行设置,Director-1方向向量和Director-2方向向量分别输入X和Y方向的向量,Director-3则为Director-1方向向量和Director-2方向向量的法向。点选Relative Velocity Resistance Formulation,表示相对速度阻力方程。在X、Y、Z方向分别输入阻抗值,分析对象中三个方向阻抗值,其均为 1.875×10^7 。在Inertial Resistance中X、Y、Z方向分别输入内部阻抗值,分析对象中三个方向内部阻抗值,其均为3 500。

1.3 结果分析

使用触媒上表面气体分布不均匀度作为轴向布气装置分气效果的评价指标,气体分布不均匀度计算见式(1)。

$$M = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i - u}{u} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: M 为气体分布不均匀度; n 为截面节点数量; u_i 为第*i*个节点的模拟气体流速, m/s ; u 为截面所有节点的平均模拟气体流速, m/s 。

触媒上表面气体分布不均匀度 M 越小,表明分布性能越好^[4]。

转化器传统轴向布气装置为单级筛孔布气盘结构,通过流体模拟后获得的速度场云图如图3所示。由图3可知,从进气口通入的气体一部分透过布气盘中的孔隙流向触媒层中间内圆区域,另一部分气体则受布气盘上的非开孔区域阻挡改变流向后到达触媒层外圆区域。触媒层上表面气体流速大体呈同心圆分布,相同直径同心圆环内的气体流速较为接近。触媒层上表面不同位置处的气体速度偏差较

大,触媒层外圆部分区域内出现了速度激增区域(图3中红色面积部分)。气体在此区域极有可能由于流速过快形成短路因而在触媒层中的停留时间不足,进而达不到反应要求的转化率;靠近触媒层上表面中心区域则流速偏低,气体在该区域极有可能停留时间过长而产生过度化学反应,易导致此区域内触媒的温度超出允许使用温度。

为更加直观了解气体的分布情况,以触媒层上表面中心为原点,以转化器半径为横坐标,从中心至边缘每间隔 0.5 m 进行取值,共选取 10 个横坐标点,以每个横坐标所在的同心圆上所有节点的气体流速平均值作为纵坐标值,得到图 4 所示气体平均速度线性图。由图 4 可知,触媒层上表面靠近转化器边缘的气体流速快,靠近转化器中心的气体流速慢。根据式(1),采用传统轴向布气装置,转化器触媒上表面气体分布不均匀度为 0.51,布气效果不佳。

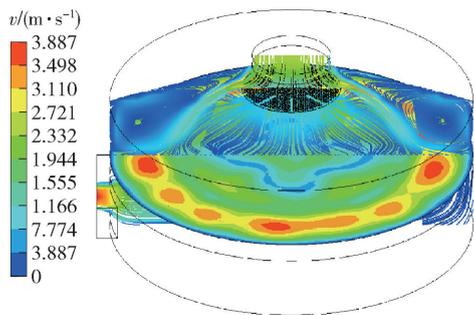


图3 传统型轴向布气装置速度场云图

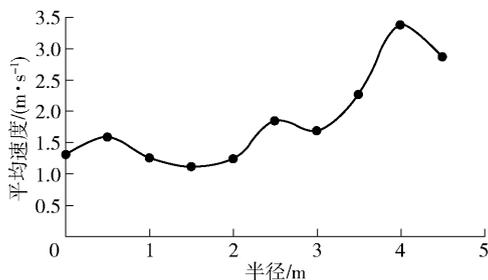


图4 单级轴向布气装置气体平均速度线性图

2 轴向布气装置结构改进

基于前述分析结果可知,传统轴向布气装置由于单级筛孔结构的不均匀节流作用,布气盘正下方影响区域内通气量偏少,而外围非影响区域内通气量偏多,这种布气不均由单级筛孔布气盘结构特点造成。针对这种弊端,本文基于多级布气的思想提出了一种改进型轴向布气装置(图5)^[5-6]。

改进后的布气装置由一级布气盘、二级布气盘

及相应连接件组成。烟气从进气口进入转化器后首先通过装置中的一级布气盘进行初步分气,形成三股不同去向:第一股烟气被一级布气盘上未开孔区域阻挡流向转化器边缘区域;第二股烟气通过一级布气盘上的圆形开孔流向近边缘区域;第三股烟气流向二级布气盘进行再分配。流向二级布气盘再分配的气体再次被分为两股:一股通过二级布气盘上的圆形开孔流向转化器中心区域;另一股则被二级布气盘上未开孔部分所阻挡流向近中心区域。通过多次分气,触媒层上表面共被分成了五个气体流通区域。这种结构的优点是气体再分布来抵消单一筛孔板的不均匀节流作用。

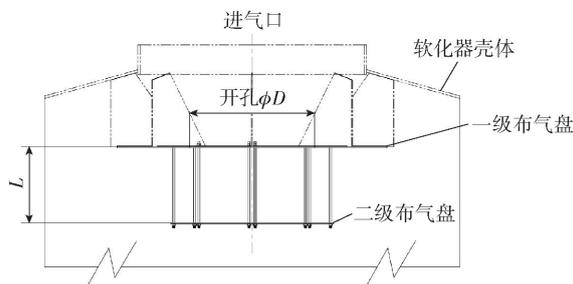


图5 改进型轴向布气装置

经研究发现,两级布气盘的间距 L 以及一级布气盘中心开孔直径 D 对于气体分布不均匀度和装置压力降影响较大,因此将二者设为关键参数。为进一步优化改进该多级轴向布气装置,采用控制变量法进行了大量组合模拟工作(保持转化器外形尺寸及进气口距触媒层距离不变,仅更改 L 值与 D 值)。在布气盘中心开孔直径 D 为 1 550 mm 时,两级布气盘间距 L 对于压降和气体分布不均匀度的影响趋势如图 6 所示;在两级布气盘间距 L 为 800 mm 时,一级布气盘中心开孔直径 D 对于压降和气体分布不均匀度的影响如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可得出结论:布气装置压降随 L 值与 D 值的增大而减小,气体分布不均匀度随 L 值和 D 值的增大呈现出先减少后增加的规律。同时通过多组数据对比发现,在保持转化器外形尺寸及进气口与触媒层距离不变的前提下, L 值与 D 值的改变对于装置压降的影响不大;与采用传统单级布气装置相比,改进型轴向布气装置带来的压降提升不超过 1 200 Pa,即增加的阻力损失不会超过制酸系统风机本身的富余量(通常在 3 000 Pa 以上)。因此,改进型轴向布气装置优化的关键在于获取最小的气体分布不均匀度。当 $L = 700$ mm、 $D = 1 400$ mm

时,能够获得最小的气体分布不均匀度,同时保持装置压降在系统可接受范围内,二者取值可认定为最优关键尺寸。

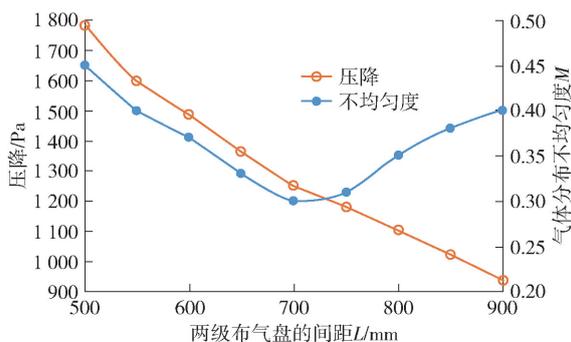


图6 布气盘间距对气体分布不均匀度和压降的影响

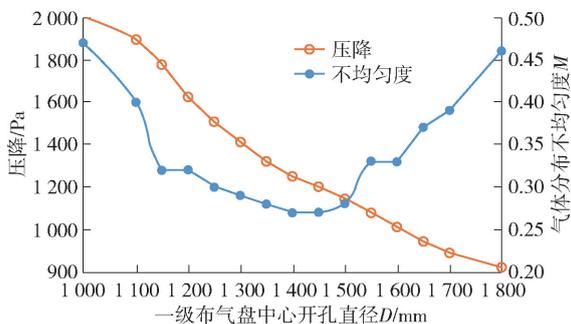


图7 一级布气盘中心开孔直径对气体分布不均匀度和压降的影响

采用上述最优关键尺寸,通过流体模拟后获得的速度场云图如图8所示。与图3进行比较可知,改进型顶部布气装置使得触媒层上表面的气体流速分布情况得到显著改善,消除了速度显著突变区域,触媒上表面气体分布不均匀度降低至0.28(较传统轴向布气装置降低了45%),理论上能有效避免局部触媒超温和流体短路的情况发生。

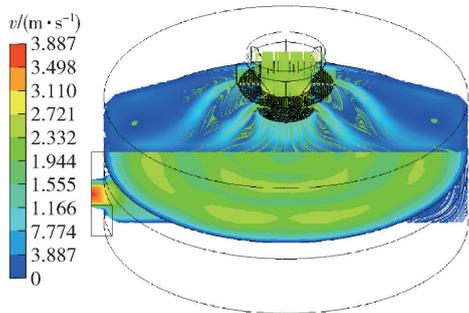


图8 多级轴向布气装置速度场云图

多级轴向布气装置气体平均速度线性如图9所示。对比图4和图9可知,采用多级轴向布气装置,触媒层不同位置的平均气速波动范围小,表明其布

气效果远超传统单级轴向布气装置。

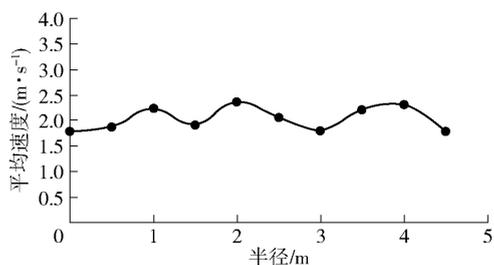


图9 多级轴向布气装置气体平均速度线性图

3 工程应用

国内某铜冶炼企业制酸系统转化器^[7]采用传统轴向布气装置,自2001年投入使用至今历经多次扩产,受生产装置结构老化、触媒活性降低、生产负荷远大于初始设计条件等因素影响,传统轴向布气装置现已无法满足实际生产需要,出现了转化器烟气分布不均、转化率下降、同层触媒温差较大等情况。停产检修时,发现一段催化剂层中直径约等于2/3转化器内径的同心圆区域较四周有下陷迹象,并且局部存在篦子板塌陷。塌陷区域位置与本文经流体分析得出的传统轴向布气装置气速最大区域基本吻合。

针对该转化装置存在的问题,对原转化器内部的第一段触媒布气装置进行改造并保证阻力增加值控制在1000 Pa范围内。基于多级布气的思路,将该转化装置已有的单级轴向布气装置改造成为拥有两级布气盘、挡气环及拉杆等组件的改进型轴向布气结构,在满足各限制条件的基础上通过模拟优化选取最优的 L 值与 D 值。改进型布气装置投入使用后,触媒床层温差、 SO_2 转化效率、环境效益及产酸量等方面均有明显改善,具体情况如下:

1) 触媒层下部两测点温差绝对值从最高 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至最高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明烟气在触媒层中得到了均匀分布和充分反应。

2) SO_2 转化率得到显著提高,进入后续尾吸脱硫工段的 SO_2 浓度由改造前的 $979.50\text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降至改造后的 $486.83\text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

3) 每月可减少 SO_2 排放量 35.47 t ,年减少排放量 425.64 t ,年增产98%的硫酸约 665 t 。

4) 改造后转化系统实际阻力增加值约为500 Pa,原二氧化硫风机仍能在原设计负荷范围内继续使用。

4 结论

本文从计算流体力学理论研究角度出发,借助CFD流体模拟软件对传统单级轴向布气装置进行了建模研究,并探索出了该传统结构存在的布气缺陷和改进措施;同时,对影响改进型轴向布气装置布气效果和压降的关键尺寸进行了优化研究;最终通过工程实际应用对改进型轴向布气装置性能进行了验证,得出如下结论:

1)传统单级轴向布气装置结构单一,受筛孔板节流因素的影响,通过筛孔的气流与被筛孔板阻挡而改变流向的气流到达触媒层表面后,存在显著的速度、流量差异,这也是传统单级轴向布气装置布气不均匀的根本原因。

2)改进型多级轴向布气装置利用气体再分布原理有效克服了单级筛孔板的布气缺陷,气体分布不均匀度得到明显提升,与此同时带来的阻力增加不会超出制酸系统风机正常选型富余量。

3)改进型多级轴向布气装置在首次工程实际应用中成功提升了现有转化装置的SO₂转化率,取

得良好环境效益的同时,工业硫酸产率得到提升。

4)改进型多级轴向布气装置结构紧凑、制造及安装周期短,特别适用于老旧硫酸装置就地改造。

[参考文献]

- [1] 李晓理,刘明华,王康,等. 冶炼烟气制酸技术及控制研究进展[J]. 北京工业大学学报,2023,49(4):475-484.
- [2] 管宁辉. 提高硫磺制酸装置SO₂转化率的探讨[J]. 硫酸工业,2015(4):7-10.
- [3] 李桂珍,曹龙文,张冠华,等. 提高硫酸系统SO₂转化率的研究及改造实践[J]. 硫酸工业,2018(7):12-16.
- [4] 曹佳璐,周军逸,唐建峰,等. 双切向环流式气体分布器结构优化数值模拟[J]. 煤气与热力,2019,39(7):29-34,46.
- [5] 欧阳灿,黄金豪,朱智颖,等. 二氧化硫转化器布气方法:202110008695.8[P]. 2021.
- [6] 欧阳灿,黄金豪,朱智颖,等. 二氧化硫转化器:202110008703.9[P]. 2021.
- [7] 鲁伟. 冶炼制酸系统转化器布气装置的研制及应用[J]. 云南冶金,2023,52(1):140-145.

Theoretical Research and Application of Gas Distribution Device for Smelting Flue Gas Acid Converter

OUYANG Can, HUANG Jinhao

(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410019, China)

Abstract: The sulfur dioxide converter using traditional single stage axial gas distribution devices is prone to problems such as uneven flue gas distribution, large temperature difference at the temperature measurement points of the catalyst layer, and substandard sulfur oxidation conversion rate. In order to find out the fundamentally cause of the problem and solve the problem, the gas distribution effect of single-stage axial gas distribution device was analyzed with the help of computational fluid dynamics simulation software. A new type of axial gas distribution device was proposed based on the idea of multi-stage gas distribution, and the dimensions of key factors affecting the gas distribution effect and pressure drop of the new axial gas distribution device were optimized and studied. The traditional single stage axial gas distribution device has a single structure. Affected by the throttling factor of the sieve orifice plate, there are significant velocity and flow differences after the airflow through the sieve orifice and the airflow that is blocked by the sieve orifice plate reaches the surface of the catalyst layer, resulting in uneven gas distribution of the gas distribution device. Through multi-stage gas distribution, the new axial gas distribution device effectively overcomes the gas distribution defects of the single stage sieve plate, and its performance has been tested in practical engineering applications. After the technical transformation, the sulfur dioxide conversion rate, catalyst bed temperature difference, sulfuric acid production and other indicators have been significantly improved.

Key words: sulfur dioxide; converter; multi-stage gas distribution; unevenness; fluid mechanics simulation