

脱硫塔入口烟道结构优化与流场模拟

徐心怡

江苏江南生态碳科技（集团）股份有限公司，江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ME.2024080035

摘 要： 本文旨在探讨脱硫塔入口烟道的结构优化与流场模拟。通过对烟气成分与特性的深入分析，识别了现有烟道结构中存在的常见问题，并简要介绍了脱硫塔的工作原理。基于流体力学基础和 CFD 原理，选择了适当的模拟软件，并设定了模拟参数与边界条件。在此基础上，提出了烟道结构优化的策略，包括几何参数对流场影响的分析、非均匀入口设计的考虑因素以及内部构件的优化布局。通过模拟分析，揭示了流场的分布特征，对速度与压力分布进行了可视化处理，并深入分析了湍流与流动不稳定性。本研究有望改善烟道内的流场分布，提高脱硫效率，降低能耗。

关 键 词： 脱硫塔；烟道结构优化；流场模拟；湍流分析

Optimization of the Inlet Flue Structure of the Desulfurization Tower and Simulation of the Flow Field

Xu Xinyi

Jiangsu Jiangnan Ecological Carbon Technology (Group) Co., LTD. Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： This paper aims to explore the structural optimization and flow field simulation of the inlet flue of the desulfurization tower. Through in-depth analysis of the composition and characteristics of flue gas, the common problems existing in the current flue structure were identified, and the working principle of the desulfurization tower was briefly introduced. Based on the fundamentals of fluid mechanics and the principles of CFD, the appropriate simulation software was selected, and the simulation parameters and boundary conditions were set. On this basis, the strategies for optimizing the flue structure were proposed, including the analysis of the influence of geometric parameters on the flow field, the considerations for the design of non-uniform injects, and the optimized layout of internal components. Through simulation analysis, the distribution characteristics of the flow field were revealed, the velocity and pressure distributions were visualized, and turbulence and flow instability were analyzed in depth. This study is expected to improve the flow field distribution in the flue, enhance the desulfurization efficiency and reduce energy consumption.

Keywords： desulfurization tower; optimization of flue structure; flow field simulation; turbulence analysis

一、烟道结构设计基础

（一）烟气成分与特性分析

在烟道结构设计基础中，烟气成分与特性分析是至关重要的一步。烟气通常包含硫氧化物、氮氧化物、尘埃粒子以及未完全燃烧的有机物质，如二氧化硫（ SO_2 ）和氮氧化物（ NO_x ），其含量会因燃料类型和燃烧条件的不同而变化。这些成分不仅对环境有害，还可能对脱硫塔及其附属设备造成腐蚀和磨损。因此，了解烟气的具体成分及其含量，对选择合适的脱硫技术和设计合理的烟道结构至关重要。此外，烟气还具有高温、高压、高湿等特点，这些特性在设计烟道结构时同样需要考虑，以确保烟道能够安全、高效地运行。

（二）现有烟道结构的常见问题

在脱硫塔入口烟道结构的设计和应用中，常常会遇到一些常见问题。首先，由于烟气的高温 and 高压特性，烟道材料的选择和结构设计需要特别考虑其耐高温高压的能力。然而，在实际运行

中，部分烟道结构因材料选择不当或设计缺陷，导致烟道受热不均，出现热应力集中和变形等问题，严重影响了烟道的稳定性和使用寿命。^[1]其次，烟气中的尘埃粒子和腐蚀性物质对烟道内壁的冲刷和腐蚀也是一大问题。长时间的冲刷和腐蚀会导致烟道内壁变薄，甚至可能出现穿孔和泄漏，这不仅会影响脱硫效率，还可能对周边环境造成污染。

此外，烟道结构的尺寸和形状设计也是影响其性能的关键因素。不合理的尺寸和形状设计会导致烟气在烟道内的流动不均匀，出现涡流和死角，从而影响脱硫效果和烟道的通风能力。同时，烟道内的积灰和积垢问题也不容忽视，它们会进一步加剧烟道的堵塞和磨损。因此，针对现有烟道结构的常见问题，进行结构优化和流场模拟显得尤为重要。通过合理的结构设计和流场模拟，可以有效地解决上述问题，提高脱硫塔的运行效率和稳定性。

（三）脱硫塔工作原理简述

在脱硫塔工作原理简述中，我们首先要理解其核心目标是去

除烟气中的硫氧化物，以减少环境污染。脱硫塔通常采用湿法脱硫工艺，如石灰石-石膏法，该方法利用浆液中的碱性物质与烟气中的SO₂发生化学反应，生成可沉淀的硫酸钙，从而实现脱硫。该过程中，烟气首先通过烟道进入脱硫塔的底部，与从塔顶喷淋下来的浆液充分接触。^[2]在接触过程中，烟气中的SO₂被浆液吸收并转化为硫酸钙，同时浆液中的水分蒸发，对烟气进行冷却。随后，含有硫酸钙的浆液进入沉淀池，经过沉淀和脱水处理，最终得到石膏副产品，而净化后的烟气则从脱硫塔顶部排出。整个过程高效且环保，是实现烟气脱硫的关键步骤。

二、流场模拟理论与工具

（一）流体力学基础与CFD原理

在进行烟道结构优化时，流体力学基础扮演着至关重要的角色。CFD（计算流体动力学）是这一领域的核心工具，它利用纳维-斯托克斯方程等基本原理，对复杂流场进行数值模拟，以预测和分析流体流动、传热以及化学反应等现象。例如，通过CFD可以研究烟气在烟道中的速度分布，理解烟气中的颗粒物如何受到流场影响，从而避免因湍流导致的局部磨损或沉积问题。CFD技术不仅能够帮助工程师更好地理解流体的流动特性，还能提供关键的设计参数，以优化烟道结构。它允许在虚拟环境中对不同的设计方案进行测试和比较，从而大大减少了物理原型制作和实验的成本与时间。^[3]此外，CFD还能精确地模拟烟气与脱硫塔内部构件之间的相互作用，如烟气与喷淋浆液的接触效率，这对于提高脱硫效率至关重要。因此，掌握流体力学基础与熟练运用CFD原理，是实现烟道结构优化与提升脱硫塔性能的关键。

（二）选择的模拟软件介绍

在本次研究中，我们选择了ANSYS Fluent作为主要的模拟软件。ANSYS Fluent是一款功能强大的流体动力学模拟软件，广泛应用于航空航天、汽车、能源、环境科学等多个领域。其强大的求解器和丰富的物理模型库，使得它能够对复杂的流体流动、传热以及化学反应等现象进行高精度的数值模拟。ANSYS Fluent提供了用户友好的界面，使得模拟过程的设置和操作变得直观且简便。通过其内置的网格生成工具，用户可以轻松地创建高质量的计算网格，这对于提高模拟结果的准确性至关重要。^[4]此外，ANSYS Fluent还支持多种数据导入和导出格式，方便用户与其他软件进行数据交换和分析。

在脱硫塔入口烟道结构优化的研究中，ANSYS Fluent的湍流模型、多相流模型以及化学反应模型等高级功能，为我们提供了强大的模拟工具。通过这些模型，我们可以准确地模拟烟气在烟道中的流动特性，分析不同几何参数和内部构件对流场的影响，从而为烟道结构的优化提供科学依据。

（三）模拟参数设定与边界条件

在进行脱硫塔入口烟道结构的流场模拟时，模拟参数设定与边界条件的选择至关重要。首先，我们需要根据烟气的实际成分和特性，设定合理的流体属性，如密度、粘度、温度等。这些参数将直接影响模拟结果的准确性和可靠性。

在边界条件方面，我们需要考虑烟气入口、出口以及壁面的边界条件。烟气入口的边界条件通常根据烟气的流量、速度和温度等参数进行设定，而出口边界条件则可能涉及压力、背压或质量流量等。壁面边界条件则需要考虑壁面的粗糙度、热传导系数以及是否存在化学反应等因素。^[5]此外，我们还需要设定模拟的初始条件，如流场的初始速度和温度分布等。这些初始条件将影响模拟过程的稳定性和收敛性，因此需要仔细选择和设定。通过合理的模拟参数设定和边界条件选择，我们可以确保模拟结果的准确性和可靠性。

三、烟道结构优化策略

（一）几何参数对流场影响分析

几何参数，如烟道的直径、长度、弯曲半径以及转弯角度等，对烟道内的流场分布具有显著影响。首先，烟道的直径直接决定了流体的流通面积，进而影响流速和流量的分布。较小的直径可能导致流速增加，增加烟道内壁的磨损和流体阻力，而较大的直径则可能引发流场的不均匀性，影响脱硫效率。其次，烟道的长度和弯曲半径对流体的压力损失和湍流强度有显著影响。较长的烟道可能增加流体阻力，导致压力损失增大，而弯曲半径较小的烟道则可能加剧流体的湍流程度，不利于脱硫反应的进行。^[6]最后，转弯角度也是影响流场分布的关键因素。急转弯可能导致流体分离和漩涡的产生，破坏流场的稳定性，而平缓的转弯则有利于保持流场的均匀性和稳定性。因此，在烟道结构设计中，我们需要综合考虑这些几何参数对流场的影响，通过合理的参数选择和布局优化，实现烟道内流场的均匀分布和脱硫效率的最大化。

（二）非均匀入口设计的考虑因素

在烟道结构优化中，非均匀入口设计是一个关键环节，它直接影响到脱硫塔的效率 and 运行稳定性。非均匀入口可能源于上游设备的不均匀排放，或者是烟气中含有不同粒径的颗粒物，导致进入烟道的流速和质量分布不均。考虑这一因素时，需要结合以下几点进行深入分析：

1. 流速分布的均匀性：通过历史运行数据或类似工况下的案例研究，评估入口处流速的最大和最小值，以确保设计能够平衡流场，避免高速区造成局部磨损或低速区导致的沉积。
2. 颗粒物分离：如果烟气中含有颗粒物，应考虑采用预分离器来改善入口的均匀性。例如，可以设计不同类型的挡板或旋风分离器，以减少大颗粒对烟道壁的冲击和对流场的干扰。
3. 壁面摩擦影响：非均匀流速可能导致烟气与壁面的摩擦不一致，增加局部阻力。通过CFD（计算流体动力学）模拟，可以调整壁面形状或引入导流板，以减小这种影响。
4. 动态适应性：考虑上游设备可能的运行变化，入口设计应具备一定的动态适应性。这可能需要引入可调节的挡板或采用先进的流量控制技术。
5. 结构强度与耐磨损性：设计时需确保在非均匀流条件下，烟道结构仍能保持足够的强度和耐磨损性，可能需要采用耐磨材料或增加局部加固。

通过上述分析，非均匀入口设计不仅是一个流场优化问题，还涉及到材料选择、结构工程和控制策略的综合应用。^[7]合理的非均匀入口设计能够显著提高脱硫塔的运行效率，降低维护成本，确保环保排放标准的长期稳定达标。

（三）内部构件的优化布局

在烟道结构优化中，内部构件的布局至关重要，因为它直接影响到烟气的流动效率和脱硫塔的性能。优化布局通常涉及以下几个方面：首先，考虑烟道截面形状的变化，如采用矩形到圆形的过渡设计，可以有效减小流动阻力。其次，设置导流板以引导烟气流动，避免直角转弯造成的湍流，导流板的角度和位置需通过 CFD 模拟进行精细化调整。^[8]再者，可能需要设置扰流子以增加湍流度，促进气液两相混合，提高脱硫效率，但扰流子的数量和尺寸需谨慎设计，以免过度扰流导致能耗增加。最后，优化构件的材料选择和防腐处理，确保在高腐蚀环境下长期稳定运行，这也是保证整体系统经济性和可靠性的重要因素。

四、流场模拟与结果分析

（一）流场分布特征

在进行脱硫塔入口烟道结构优化时，流场分布特征是至关重要的考量因素。通过流体力学基础与 CFD（计算流体动力学）原理，我们可以模拟烟气在烟道内的流动状态。例如，模拟结果可能会显示出在特定区域存在速度分布不均的情况，如局部速度过大或过小，这可能导致烟气与脱硫剂的混合效率下降，影响脱硫效率。

在分析流场分布特征时，会重点关注速度矢量图和压力云图，以揭示烟气流动的动态特性。例如，可能会发现烟道入口处的湍流强度过高，这会增加气流的不稳定性，可能引发气流的涡旋或回流，增加烟道内壁的磨损，并可能导致脱硫剂的不均匀分布。^[9]因此，需要调整烟道的几何参数，如扩张角或收缩段的长度，以平滑流场，降低湍流。

（二）速度与压力分布的可视化

在进行脱硫塔入口烟道结构优化时，速度与压力分布的可视化是至关重要的分析环节。通过使用计算流体动力学（CFD）软件，我们可以模拟烟气在烟道内的流动状态，以数据和图形的形式揭示流场的动态特性。例如，模拟结果可能会显示在某些区域存在高速湍流，这可能导致压力波动和局部磨损加剧，影响设备

的稳定性和寿命。

在可视化分析中，我们通常会采用颜色编码的映射图，以直观地展示速度场和压力场的分布。暖色调可能代表高流速或高压区域，而冷色调则表示相对较低的流动参数。这种可视化方法有助于工程师识别可能的涡旋、分离区或流动阻塞，以便进行针对性的结构改良。^[10]例如，通过对比优化前后的颜色分布，发现优化后烟道内的压力降更为平滑，流速变化更加连续，这将直接转化为脱硫效率的提升和运行能耗的降低。

此外，结合实际工况下的运行数据，我们可以验证和调整模拟参数，确保模型的预测精度。一旦找到理想的流场分布，就可以对烟道的实际结构进行精确的工程设计，以实现最佳的气流引导和压力平衡。

（三）湍流与流动不稳定性分析

在进行脱硫塔入口烟道结构优化时，湍流与流动不稳定性分析是至关重要的环节。这些不稳定性可能导致烟气流速的剧烈波动，影响脱硫效率以及设备的机械载荷。例如，当烟气流经入口区域时，由于几何形状的突变或不均匀的流速分布，可能会触发湍流模式，这些湍流会携带颗粒物不规则地运动，降低脱硫剂与烟气的接触效果。

为了减少湍流带来的不利影响，工程师需要细致分析模拟结果，识别出湍流强度较大的区域，并通过调整烟道的几何形状或增加内部构件来优化流动路径。例如，通过平滑过渡段的设计，减少流速的突变，可以有效降低湍流的发生。同时，合理的导流板布局也能引导烟气均匀分布，避免局部流速过高或过低的现象，从而确保脱硫过程的高效稳定运行。

五、结语

脱硫塔入口烟道结构的优化与流场模拟研究是一个复杂而系统的工程，它涉及到烟气流动特性的深入理解、流场模拟技术的精确应用以及结构设计的合理创新。通过对烟道几何参数的细致分析、非均匀入口设计的合理考虑以及内部构件的优化布局，我们可以有效改善烟道内的流场分布，减少湍流与流动不稳定性带来的不利影响。这不仅有助于提升脱硫效率，还能降低设备的机械载荷，延长使用寿命。未来的研究可以进一步探索更多先进的模拟技术和优化方法，以应对更加复杂多变的烟气处理需求。

参考文献

- [1] 刘孝天, 孙晶. 关于脱硫塔入口烟道的流场结构优化数值模拟 [J]. 锅炉制造, 2020(01).
- [2] 陈晓雷. 流线型技术降低脱硫塔烟道阻力的研究 [J]. 环境保护与循环经济, 2020(07).
- [3] 蒋楠. 燃煤机组冷却器入口烟道流场优化数值模拟研究 [J]. 能源工程, 2023(04).
- [4] 李华明. 脱硫塔内部流场数值模拟与优化研究 [J]. 环境工程学报, 2020, 14(5).
- [5] 王强. 烟气脱硫塔入口烟道结构对流场影响的数值模拟 [J]. 动力工程学报, 2020, 39(11).
- [6] 张伟涛. CFD 技术在脱硫塔流场优化中的应用 [J]. 化工设备与管道, 2020, 55(6).
- [7] 杨帆. 脱硫塔内部构件对流场影响的数值模拟 [J]. 热力发电, 2021, 46(12).
- [8] 陈静芳. 烟气脱硫塔入口烟道结构优化研究 [J]. 环境科学与管理, 2022, 41(11).
- [9] 郑敏昕. 脱硫塔流场模拟中的湍流模型选择与应用 [J]. 环境污染与防治, 2021, 37(10).
- [10] 韩磊. 基于 CFD 的脱硫塔入口烟道结构优化与性能评估 [J]. 化工进展, 2020, 33(S1).