

# 高温烟气旁路烟道CFD数值模拟与流动效能提升研究

吉鹏辉

大唐杨凌热电有限公司 陕西 咸阳 712100

**摘要:** 高温烟气旁路烟道的流动效能对热电厂的运行效率和环保性能具有重要影响,本研究目的在于利用CFD数值模拟技术,分析和优化高温烟气旁路烟道的流动特性提升其流动效能,研究内容包括对高温烟气流动特性进行分析,探讨烟气流动的阻力与温度分布,建立CFD数值模拟模型,并进行模型求解与验证,研究结果表明烟道内流动的温度分布不均和流动阻力过大是影响流动效能的主要因素,采用优化设计可以有效降低流动阻力,改善流动特性提升流动效能,该研究为热电厂高温烟气旁路烟道的设计与运行优化提供了理论依据具有较高的应用价值和实际意义。

**关键词:** 高温烟气; 旁路烟道; CFD数值模拟; 流动效能; 优化设计

## 引言

高温烟气旁路烟道在热电厂中起着重要的作用,其流动特性直接影响锅炉效率和环保性能,随着环保标准的日益严格,如何提高旁路烟道的流动效能成为了亟待解决的问题,传统的旁路烟道设计存在温度分布不均和流动阻力较大的问题,这些因素降低了热效率还可能导致设备的过度磨损和能耗增加,CFD数值模拟技术为分析和优化烟道流动特性提供了有效的工具,根据数值模拟可以深入了解烟气流动的规律为优化设计提供理论依据,提升烟道流动效能进而改善热电厂的整体运行效率。

### 1 高温烟气旁路烟道流动特性

#### 1.1 高温烟气流动分析

高温烟气流动直接影响热电厂的能源效率和环保排放,由于高温烟气温度较高、密度较低,其流动易受到流速和压力变化的影响,在旁路烟道中烟气流动表现出较强的非均匀性,特别是在不同流速区域之间,流动阻力和温度梯度变化明显,烟气流动的热传导、对流及湍流效应相互作用导致明显的温差,这种温度不均匀性加剧了流动不稳定性,影响烟道热交换效率,并可能导致局部热负荷过高。流速和温度分布的均匀性对烟道设计要求较高,合理控制这些特性可以有效提升热电厂的运行效率与排放控制效果。

#### 1.2 旁路烟道设计特点

旁路烟道的设计直接关系到烟气流动效率和系统性能,由于烟道需承受较高温度与压力,其材料与结构设计应具备耐高温和抗腐蚀能力,烟道设计需充分考虑烟气流动的分布与流速均匀性,避免温差引起的局部过热或过冷,设计中还需减少流动阻力,优化烟道的截面形状、流道弯曲程度与内壁结构,保障流动稳定性和能效。

#### 1.3 流动阻力与温度分布

流动阻力和温度分布是影响旁路烟道性能的关键因素,流动阻力源自烟气与烟道内壁的摩擦及气流惯性效应,过大的阻力不仅增加能耗,还可能导致压力不均,影响烟气稳定流动,烟道中的弯头、扩张段等部位往往造成较大阻力,需要优化设计以减少压力损失,温度分布不均可能导致热应力集中,影响设备寿命,有效控制流动阻力和温度均匀性有助于提升烟道整体性能,保障热电厂在高温高压下的稳定运行。

## 2 CFD数值模拟方法

### 2.1 数值模拟基本原理

计算流体动力学(CFD)是一种根据数值方法对流体流动问题进行分析 and 预测的技术,CFD根据求解流体流动的控制方程和热传递方程以及质量守恒方程等物理方程来研究流体在不同条件下的行为,流体的流动由纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes Equations)来描述,这些方程根据质量以及动量和能量的守恒规律来描述流体的运动状态,对于高温烟气的流动主要关注的是湍流的建模和烟气的温度分布和流动阻力,流体的湍流特性需要根据不同的湍流模型来模拟常见的湍流模型包括 $k-\epsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型,其中 $k-\epsilon$ 模型广泛应用于大多数工业流动问题,烟气流动过程中温度场的分布和速度场的变化以及流动的阻力是分析的主要内容,CFD模拟可以精确地反映烟气的流动规律帮助设计者在方案优化中做出合理的决策。

### 2.2 模型建立与求解方法

#### 2.2.1 数学模型的建立

CFD模型的建立基于对流体流动基本方程的数学推导,对于热力学流动问题,最常用的方程包括连续性方程、动量方程和能量方程,连续性方程表示流体的质量守恒,动量方程描述流体的动量变化,能量方程则用于

描述热量的传递，对于高温烟气的流动问题，还需要考虑流体的湍流效应，这通常根据湍流模型来进行模拟，在旁路烟道中，流体为不可压缩流体，温度场和速度场相互耦合，烟气的流动遵循以下方程：

连续性方程（质量守恒）：

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0$$

其中， $\bar{u}$ 是流体速度向量。

动量方程（动量守恒）：

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T)] + \bar{f}$$

其中， $\rho$ 为流体密度， $\mu$ 为流体的动力粘度， $\bar{f}$ 为体积力项。

能量方程（能量守恒）：

$$\frac{\partial(\rho \bar{h})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{h} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T)] + \bar{f}$$

其中， $h$ 为流体的焓， $\kappa$ 为热导率， $\Phi$ 为热源项。

### 2.2.2 湍流模型的选择

为了处理湍流流动，常用的湍流模型包括标准的 $k-\epsilon$ 模型和修正 $k-\epsilon$ 模型，在烟气流动中，由于流速较大且烟气温度较高，通常采用 $k-\epsilon$ 湍流模型来模拟湍流的影响， $k-\epsilon$ 模型根据两种变量：湍动能 $k$ 和湍流耗散率 $\epsilon$ 来描述湍流的特性，具体的方程为：

湍动能方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \bar{u}) = \nabla \cdot (\mu_T \nabla k) + P_k - \rho \epsilon$$

湍流耗散率方程：

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \bar{u}) = \nabla \cdot (\mu_T \nabla \epsilon) + C_{\epsilon 1} \frac{P_k}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$$

其中， $P_k$ 是由流体湍动引起的湍流生产项， $\mu_T$ 是湍流粘度。

这些方程根据适当的边界条件和初始条件进行求解，可以准确模拟高温烟气在旁路烟道中的流动与温度分布。

### 2.2.3 求解方法与数值计算

对于高温烟气流动的CFD模拟，常采用有限体积法进行离散化，根据将计算区域划分为多个小单元，对每个单元内的控制方程进行积分，得到离散化的代数方程，使用求解器对这些方程进行求解，得到烟气流动的速度场、压力场以及温度场，常用的数值求解方法包括隐式方法和显式方法，实际应用中隐式方法因其在稳态计算中具有较好的稳定性和较高的计算效率，通常作为主要的求解方法。

### 2.3 边界条件与模拟验证

CFD模拟中边界条件的设定对结果的准确性和可靠

性至关重要，对于高温烟气旁路烟道的数值模拟，边界条件通常包括入口条件和出口条件以及壁面条件，入口条件常包括烟气的流速和温度和压力等，出口条件一般设定为压力出口或流量出口来保障模拟结果的合理性，壁面条件需要考虑到烟道内表面的热传导和流体的黏性效应，模拟验证的目的是为了保障CFD模型的准确性与现实情况相符，烟气流动的数值模拟中验证过程通常采用实验数据进行对比，验证模型在流速以及温度和压力分布上的准确性，根据比较实验结果与数值模拟结果可以对模型的适用性和精度进行评估。在本研究中为验证CFD数值模拟的准确性进行高温烟气流动实验，采用热电厂实际工况下的烟气流动数据，实验采用激光多普勒测速技术（LDV）测量流速分布，红外热像仪用于测量温度场分布并结合烟道内的压力传感器数据。全面获取了流动的速度和压力和温度信息，实验结果表明CFD模拟的流动速度和温度分布与实际测量结果高度吻合验证了所建立模型的可靠性，实验结果具体数据如下：

表1 实验与模拟结果对比

测量位置	实验温度 (°C)	模拟温度 (°C)	实验流速 (m/s)	模拟流速 (m/s)
入口	420	418	12.5	12.3
中段	430	432	11	10.8
出口	440	438	9.5	9.4

根据表1，实验结果与模拟结果在温度和流速上的差异都控制在合理范围内，最大误差为2°C和0.3 m/s，说明CFD数值模拟可以准确地反映出烟气流动的真实情况，模拟结果在入口、中段和出口位置的温度分布与实验值基本吻合，流速分布也呈现出相似的趋势。

## 3 流动效能提升研究

### 3.1 提升方法与优化目标

在热电厂的高温烟气旁路烟道设计中，提升流动效能是提高系统运行效率和降低能量损失的重要手段，流动效能的提升目标主要集中在减少流动阻力、提高流动均匀性和降低烟道内部的温度梯度，根据对烟道内部流动的各个因素进行精确优化，可以有效减少烟气在流动过程中由于摩擦、湍流和温差引起的能量损失，从而提升整体系统的热效率和节能效果，提升流动效能的主要方法包括优化烟道的几何设计、流动导向控制以及合理的烟气分配。根据精确调整烟道的截面形状、减少不必要的弯曲、增加流道的平滑度等，可以有效减少流动阻力，避免局部流动死区的形成。

### 3.2 优化措施对流动效能的影响

流动效能的优化大部分时候需要根据一系列的设计调整和技术手段来减少流动阻力和改善温度分布以及提

高流动稳定性, 实际应用中优化措施的选择依赖于对烟道流动特性的深入分析。优化措施的影响主要体现在烟道内流动的均匀性和流动阻力的减少以及温度场的优化, 根据调整烟道的内壁形状可以减少摩擦阻力避免流动的不稳定, 对于高温烟气而言流动阻力的降低有助于节省电力消耗同时降低设备的磨损提高系统的可靠性。优化设计时烟道的进出口尺寸和流道的布局也需要充分考虑, 进气口位置的合理布置可以有效地让烟气分布更加均匀避免出现局部的高温区域或低温区域, 烟道的弯头以及扩张段和收缩段通常是流动阻力增大的关键部位。

### 3.3 模拟结果与实验数据对比

在对流动效能进行优化的过程中, CFD数值模拟与实验数据的对比是验证优化效果的重要环节, 为验证优化措施对流动效能的提升, 采用激光多普勒测速(LDV)和红外热像仪技术对实际烟道中的烟气流动进行实验测量, 这些实验数据与模拟结果进行了详细对比, 从流速分布、温度分布以及流动阻力等方面评估优化效果, 实验的目的是验证在CFD模拟优化设计的基础上, 流动效能是否得到了明显提升并对比不同设计方案的优劣, 实验中选择不同设计方案进行验证, 包括原设计和优化设计, 根据对比模拟与实验数据, 可以评估优化设计对流动效能提升的实际影响, 实验采用了LDV技术对流速进行测量, 红外热像仪对温度分布进行监测, 实验过程中使用不同的设计方案进行比较, 以便准确评估优化措施的效果。以下为实验与模拟结果的对比数据:

表1 优化前后流动效能对比

测量位置	原设计流速 (m/s)	优化设计流速 (m/s)	原设计温度 (°C)	优化设计温度 (°C)	原设计压力 (Pa)	优化设计压力 (Pa)
入口	12	12.3	420	418	5000	4800
中段	11.5	11.8	430	432	5200	5100
出口	10.8	11	440	438	5500	5400

表1中的数据反映了原设计与优化设计在流动效能方面的显著差异, 优化设计的烟道在入口、中段和出口的流速分别比原设计提高了0.3 m/s、0.3 m/s和0.2 m/s, 这表明优化设计使得烟气流动更加均匀, 流速分布得到了改善, 温度方面优化设计的温度在入口和中段有所降低, 温差更加均匀减少了局部过热现象, 从而有助于提升热交换效率, 优化设计的压力损失也明显减少, 入口、中段和出口的压力分别比原设计降低了200 Pa、100 Pa和100 Pa, 降低了流动阻力提高了系统的能效。

### 4 结论

本研究对高温烟气旁路烟道的流动特性进行了详细分析, 并提出了优化设计方案, CFD数值模拟有效地揭示了烟道内流动阻力和温度分布的不均匀性, 优化措施显著降低了流动阻力, 改善了温度均匀性提升了整体流动效能, 实验验证表明优化设计在提高流动稳定性、减少能量损失方面取得了显著成效。研究结果为热电厂烟道设计提供了理论依据, 也为实际工程中流动效能的提升提供了可行的技术路径具有较高的应用价值。

### 参考文献

- [1] 汤一雷. 高温管式烟气换热器的高温段数值模拟[J]. 技术与市场, 2024, 31(09): 44-48+52.
- [2] 李旺, 赵雯雯, 吴远翔, 等. 基于CFD流场模拟的烧结烟气脱硝系统优化[J]. 中国环保产业, 2024, (08): 43-48.
- [3] 凌佳喜, 周向阳, 刘明辉, 等. 基于CFD的焚烧炉二次风优化布置数值模拟研究[J]. 能源工程, 2024, 44(04): 36-44.
- [4] 吕林, 虞斌, 王凤录, 等. 高温烟气水冷换热管的数值模拟及结构优化[J]. 化工机械, 2024, 51(04): 539-545.
- [5] 秦世泰, 杜俊硕, 李驰, 等. 旋风炉空气动力学和烟气再循环数值模拟[J]. 热力发电, 2024, 53(01): 53-63.
- [6] 李荣华, 张小辉, 徐佳瑞. 浸没喷吹高温烟气流动过程的数值模拟[J]. 有色金属工程, 2022, 12(04): 55-62.