

Combustion Simulation Study of Sudden Expansion Burner under Different Coal Powder Fineness

Jianhua Zhang

Datang Shanxi New Energy Company, Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

This paper mainly studies and numerically simulates the combustion of sudden expansion burners under different coal powder fineness. By using ICEM CFD software to perform one-dimensional modeling and meshing of the sudden expansion burner, the corresponding numerical simulation is carried out by importing it into Fluent software. By changing the particle diameter of the coal powder injected, observe the change in ignition distance. The diameter of coal powder particles studied is 100 to 250 between μm , every 25 intervals μm is set as one working condition, with a total of 7 working conditions. By comparing the temperature distribution fields of the seven working conditions, the optimal diameter of coal powder particles is obtained, and the velocity vector distribution field, concentration field obtained from volatilization analysis, and carbon burnout rate chart under the optimal diameter of coal powder particles are provided.

Keywords

sudden expansion burner; coal powder combustion; numerical simulation; coal powder fineness; boiler flexibility peak shaving

突扩燃烧器在不同煤粉细度下的燃烧模拟研究

张建华

大唐山西新能源公司, 中国·山西太原 030000

摘要

论文主要对突扩燃烧器进行了不同的煤粉细度下的燃烧进行研究和数值模拟。通过使用ICEM CFD软件对突扩燃烧器进行一维建模并划分网格, 导入Fluent软件中进行相应的数值模拟。通过改变喷入煤粉的颗粒直径, 观察着火距离的变化。所研究煤粉颗粒直径100~250 μm 之间, 每间隔25 μm 设置为一个工况, 共计7个工况。通过对比七个工况的温度分布场, 得出最佳的煤粉颗粒直径, 并给出最佳煤粉颗粒直径下的速度矢量分布场、挥发份析出浓度场、碳燃尽率图。

关键词

突扩燃烧器; 煤粉燃烧; 数值模拟; 煤粉细度; 锅炉灵活性调峰

1 引言

由于新能源的不稳定性和需求侧用电的波动性, 对于火力发电厂, 如何根据电网的需求, 持续稳定的输出电力, 支撑和保持电力系统平衡, 成为热点研究方向。火电机组的灵活性改造是大势所趋。因此研究火电机组超低负荷稳燃具有重要意义。稳燃是指火电厂在长时间运行过程中, 保持燃烧系统的稳定性, 避免出现过热、过冷、爆炸等不安全情况。稳燃可以提高火电厂的经济性和安全性, 同时减少对环境的污染。

突扩燃烧器在稳燃方面表现出了良好的性能, 该型燃烧器利用突然扩张的几何形状的燃烧器, 使得一次风和煤粉的混合气流分离, 分离出来的混合气流在压力梯度的作用下

回流到燃烧火焰根部区域连续点火从而达到稳定燃烧目的, 如图1所示。

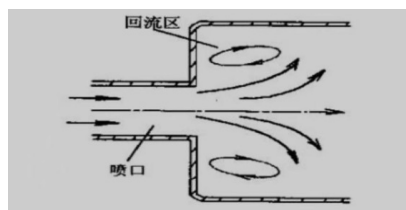


图1 突扩燃烧器稳燃原理

Xue Yongqiang^[1]研究了煤粉细度对于 NO_x 排放的影响。他们的实验结果表明, 当煤粉细度较细时, NO_x 排放量会增加, 而当煤粉细度较粗时, NO_x 排放量会减少。这是因为煤粉细度的变化会影响煤粉的燃烧速率和燃烧温度, 从而影响 NO_x 的生成和排放。因此, 突扩燃烧器成为应对锅炉低负荷稳燃的热点研究方向。

陈岩^[2]等人研究了煤粉颗粒直径对突扩燃烧器燃烧过

【作者简介】张建华(1969-), 男, 中国河北沧州人, 本科, 工程师, 从事自动化控制研究。

程的影响。研究表明,适当降低煤粉细度可以提高煤粉的燃烧速率,提高燃烧效率,并降低CO和NO_x的排放。然而,当煤粉细度过低时,会导致煤粉的聚集和堵塞,影响燃烧效果。因此,在选择煤粉细度时,需要在保证燃烧效率的前提下,考虑煤粉的输送和分散等因素,以达到最佳的燃烧效果。

Zhang X 等^[1]研究了一种新型的突扩燃烧器的设计和应用。该燃烧器的设计原理是利用高速旋转的气流将煤粉喷入燃烧室,并在燃烧室中形成高温、高压和高速度气流,从而实现突扩燃烧。通过实验研究发现,该燃烧器可以显著提高煤粉燃烧的效率 and 稳定性,并且能够降低NO_x和CO的排放量,提高锅炉的热效率和可靠性,降低燃料消耗和污染排放具有广泛的应用前景。

论文使用ICEM CFD进行建模和网格划分,使用Fluent软件进行燃烧的模拟计算。Fluent软件是数值模拟软件,他的功能全面且技术先进,应用范围广泛,可用于流体的流动状态模拟以及传热和燃烧化学反应数值模拟计算等。Fluent中包含有离散相模型、多相流模型、湍流模型和化学组分输运等许多模型。ICEM CFD可计算二维平面的简单图形和三维立体的多面体等网格,有效地解决对于速度梯度较大和具有不规则几何结构的流动问题。

论文主要研究突扩燃烧器中不同煤粉细度下的燃烧状况。先建立突扩燃烧器的一维模型,并在其中喷入高挥发份的煤种,通过更改煤粉细度来观察对比不同煤粉细度下的燃烧过程和温度分布场,选择出本次课题所选用的煤粉颗粒直径中最佳的煤粉颗粒直径,然后分析煤粉挥发份的析出分布场、速度分布场、碳燃尽率分布等,最后得出相关结论。

2 煤粉燃烧数值计算模型及方法

2.1 模型选择

2.1.1 湍流燃烧模型

Fluent软件提供了四种模拟反应的模型:有限速度模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型和部分预混燃烧模型。本课题中煤粉喷入炉膛才与空气混合反应燃烧,故选用非预混燃烧模型(PDF)。工程实际中通常运用涡流耗散EDM模型(Eddy-Dissipation Model),计算精度高且相对简单。该模型假设涡旋在小尺度范围内发生了快速的能量传递和耗散,而在大尺度上则可以看作是宏观的平均流动。通过引入涡流耗散模型可以有效地描述湍流运动中涡旋的衰减和消失,从涡旋耗散率的参数,而对湍流流场进行较为准确的数值模拟^[4]。

2.1.2 气固两相流模型

煤粉通过一次风吹入炉膛进行燃烧,在燃烧过程中一次风也不断地带着氧气与煤粉进行混合燃烧,这样的过程中离不开气固两相流动。在模拟的过程中需要将其分割开以便更好地理解 and 描述他们各自的状态或者他们之间的联系。例如,煤粉吹入的过程中,一次风为连续相,其携带的细小的煤粉颗粒为离散相,一次风可以用流场控制方程求解完成计算,而煤粉的运动和轨迹就需要用到离散相模型来计算,即

先计算一次风流场,再用流场变量通过离散相模型计算煤粉粒子受到的作用力,并确定其运动轨迹。

2.1.3 焦炭燃烧模型

本课题在模拟中选用动力学模型/扩散控制模型,即煤炭表面燃烧反应速度受燃烧动力学和煤粉颗粒表面O₂分子扩散的影响。在这个界面我们可以调节煤粉中挥发份含量、碳的含量、频率因子(Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor)和反应活化能(Kinetics-Limited Rate Activation Energy)的取值,当模拟过程中始终无法成功着火,可以在这里调整这四个参数(如增加挥发份的含量或者降低反应活化能)^[9]。

2.2 建模及网格划分

在ICEM CFD软件中进行突扩燃烧器一维模型的建立,本课题模拟采用的突扩燃烧器一维模型一次风入口长260mm,突扩段长200mm,燃烧器总长555mm,出口段长1500mm,炉膛长度10000mm,左侧为燃烧器模型,右侧为一维炉模型。

命名阶段中,该燃烧器的一次风与煤粉从燃烧器左侧喷口进入,故将最左侧线段命名为“air in”;模型最右侧为炉膛出口,命名为“out let”;上下两条线段为炉膛的壁面,对炉膛内的燃烧过程起到一定的加热作用,命名为“hot wall”(热墙);炉膛左侧的两段壁面命名为“water wall”,即水冷壁;燃烧器上下两侧壁面与左侧剩余的壁面与外界温度相近,命名为“cold wall”(冷墙);其余线段均为划分网格时的辅助线段,并不是真实存在,故命名为“inside”(内部线);所有的有线段顺时针(或者逆时针)围成的面均为模型的表面,命名为“face”。

在ICEM CFD软件中对突扩燃烧器一维模型进行网格划分,网格类型为“All Tri”(全部为三角形)。

3 数值模拟计算结果及分析

3.1 不同煤粉细度下的温度分布场

本方模拟研究了不同的颗粒直径(这里选用100μm、125μm、150μm、175μm、200μm、225μm和250μm)的温度分布图。

对比以上温度分布图,煤粉颗粒直径为100μm和125μm时,煤粉燃烧时将会灼烧燃烧器喷口,且火焰温度过高,不符合实际情况;煤粉颗粒直径为200μm以上时,煤粉燃烧的着火点逐渐变得滞后,随着煤粉颗粒直径的增加,距离燃烧器喷口越来越远,同样不符合实际情况;对比煤粉颗粒直径为150μm时的温度分布图和煤粉颗粒直径为175μm时的温度分布图,可以得出:当煤粉颗粒直径为175μm时,燃烧器和一维炉中燃烧效果最佳,如图2所示。

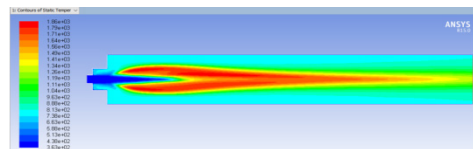


图2 煤粉颗粒直径为175μm时温度分布场

煤粉气流随一次风一起进去燃烧器点火，在燃烧器喷口处着火（不灼烧燃烧器喷口），在炉膛中进行充分燃烧，热墙设置为速度入口，温度 800K，速度 2m/s，燃烧时最高温度 1800K 左右，火焰形状近似对称，随着燃烧的进行，煤粉逐渐燃尽，温度逐渐下降，图中颜色由红逐渐变成绿色。

3.2 速度场分布

由于突扩形状的燃烧器喷口，从喷口出来的一次风和煤粉气流失去壁面的约束，向两侧扩散，此时混合气流的中心浓度相对降低，煤粉更容易进行着火。且两侧浓度相对中心浓度更低，在这样的浓度差下，两侧煤粉比中心煤粉更快着火，并且燃烧放出的热量可以提供给中心煤粉的着火燃烧所需的热量，即二次加热，提高煤粉燃烧的稳定性。随着燃烧的进行，由上下两侧的热墙进入的高温气流速度与一次风、煤粉气流速度进行交汇，使得燃烧火焰不会扩散到热墙，也就是使火焰收敛于中心轴线。同时在火焰中心着火区域高速气流卷吸周围的高温烟气形成回流从而继续加热煤粉气流，从而对煤粉燃烧起到一定的稳燃作用。

3.3 碳燃尽率分布

论文模拟燃烧采用高挥发份煤种，煤粉中焦炭的燃尽分布如图 3 所示，通常焦炭的燃烧和燃尽发生在挥发份析出和燃烧后，所以图中碳燃尽的分布大致在挥发份燃烧的峰值之后，近似嵌合。由于焦炭的着火温度大于挥发份的着火温度，挥发份析出并燃烧，放出大量的热量使得焦炭也随着开始着火燃烧。结合挥发份析出分布图，在靠近燃烧器出口的区域，挥发份析出燃烧到达峰值（红色区域）时，焦炭的浓度较高，焦炭的燃烧也到达峰值，即焦炭在炉膛中部轴线处的燃烧最为剧烈（图中红色和黄色区域）。大部分焦炭在炉膛中部就燃烧殆尽，部分未燃或者未燃尽的焦炭在炉膛后半段逐渐燃烧殆尽，图中有色区域逐渐由黄色转变为绿色，最后变为蓝色。

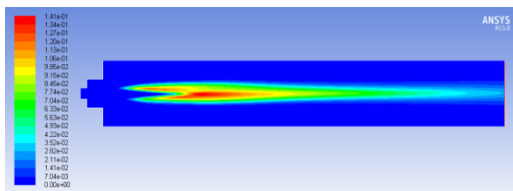


图 3 碳燃尽率分布图

3.4 挥发份析出组分浓度分布

煤粉燃烧过程中挥发份析出明显加快，在燃烧器喷口处，混合气流得到初步的加热，并且由于突扩形状的喷口使得中心轴线两侧浓度得到降低，所以先从两侧的气流开始，即图中前半块绿色区域，结合温度分布图可知此处区域温度在 1000K（730℃）左右，挥发份吸收热量析出并燃烧放热，由于挥发份含量较低，温度并未达到焦炭的着火点；靠近中心轴线的混合气流浓度相对较高，其中的挥发份也随着两侧挥发份燃烧放热而开始析出燃烧，即有色区域中部颜

色为红色和黄色的区域；最后由于挥发份含量较低，在中心轴线处剧烈燃烧放热之后，浓度越来越低，直至挥发份燃烧殆尽。

综上所述，通过使用 Fluent 软件，对比不同煤粉颗粒直径（选用 100 μm 、125 μm 、150 μm 、175 μm 、200 μm 、225 μm 和 250 μm ，其他条件完全相同）下的温度分布场，找出相对最佳工况，即相对最佳煤粉颗粒直径，并且逐个分析最佳煤粉颗粒直径下温度分布场、速度矢量分布场、煤粉挥发份析出浓度场、碳燃尽率分布图等，得出相应的结论。

4 结论

论文进行突扩燃烧器在不同煤粉细度下的燃烧和数值模拟，在其他条件完全相同的情况下，通过改变煤粉颗粒直径来探究不同的煤粉颗粒直径对于煤粉着火的影响，从而找出最有利于着火和燃烧的工况。在最佳工况（最佳煤粉颗粒直径）下分析温度、速度、各组分浓度等参数的分布。得出以下结论：

①当煤粉细度相对小于最佳煤粉颗粒直径时，煤粉的着火更加容易，着火点提前，从而灼烧燃烧器喷口，造成设备的损坏和严重的生产安全隐患。且煤粉中的焦炭与氧气接触面积更大，焦炭燃烧更快更强烈，在模拟中燃烧过程中的温度超出实际情况。

②当煤粉细度相对大于最佳煤粉颗粒直径时，煤粉着火变得艰难，着火点出现滞后现象，焦炭更加不容易着火燃烧，出现煤粉燃烧一直持续到炉膛出口的现象，同样会造成锅炉设备的损坏和安全隐患。并且当工况发生变化时，易出现燃烧不稳定的情况，造成机组运行不畅甚至停机。

③当煤粉细度处于最佳煤粉颗粒直径时，煤粉的着火刚好处于不灼烧燃烧器喷口的区域，并且火焰燃烧收敛于炉膛中心轴线，同时由于突扩燃烧器的特性，在火焰着火点附近产生回流，从而保证煤粉燃烧的稳燃，同时煤粉在炉膛的中部就已经燃烧殆尽，不会将燃烧延续到炉膛出口损坏锅炉设备，且燃烧温度较为贴合实际，不存在过高或过低的状况。

参考文献

- [1] Xue Yongqiang, Yan Ruiping. The Effect of Coal Particle size on the NO_x Emission[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2015, 37(4): 412-416.
- [2] 陈岩, 杨洋, 杨振宇, 等. 突扩燃烧器燃烧过程数值模拟及优化[J]. 热能动力工程, 2018, 33(1): 1-6.
- [3] Zhang X. A novel fuel-rich combustion technology for pulverized coal boilers with ultra-low NO_x emissions and high efficiency[J]. Energy Conversion and Management, 2019(181): 99-108.
- [4] 赵晓川, 赵亚军, 王建华, 等. 突扩燃烧器的燃烧机理及应用研究[J]. 热力发电, 2019, 48(1): 1-7.
- [5] Zhang Yan, Li Xu. Effect of particle size distribution on the combustion characteristics of pulverized coal [J]. Fuel, 2018, 216: 703-710.