

不同富氧条件下高炉煤气和焦炉煤气燃烧数值模拟

易正明^{1,2}, 张丑^{1,2}, 周正^{1,2}, 林超群^{1,2}

(1. 武汉科技大学 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 湖北 武汉 430081;
2. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要:为研究高炉煤气和焦炉煤气在不同富氧条件下的燃烧特性,以某钢厂75 t/h燃气锅炉为对象,利用数值模拟软件Fluent,选用带旋流修正的Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和有限速率/涡耗的散燃烧模型,采用速度入口、压力出口、标准壁面方程、无滑移、无湍流运动边界条件,对炉内着火距离、温度和热流密度分布进行了模拟。结果表明:焦炉煤气着火距离比高炉煤气短,焦炉煤气在富氧31%工况较空气燃烧工况更早达到1 000 K的稳定燃烧温度;燃气锅炉富氧后整体温度降低,温度分布更加均匀,空气燃烧、富氧26%和富氧31%三种工况的最高温度分别为1 867, 1 678和1 834 K;高炉煤气和焦炉煤气在 O_2/CO_2 燃烧条件下,气体辐射换热性能得到增强,炉内整体热流密度提升明显,富氧工况下整体温度较空气燃烧工况低,但壁面热流增大;富氧后炉膛内 NO_x 的生成量降低,富氧26%工况下折焰角处折算至3% O_2 的 NO 生成由空气燃烧工况的8.12 mg/m^3 降至0.63 mg/m^3 。

关键词:富氧燃烧;燃气锅炉;碳捕捉;氮氧化物;数值模拟

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.02.012

[引用本文格式]易正明,张丑,周正,等.不同富氧条件下高炉煤气和焦炉煤气燃烧数值模拟[J].热能动力工程,2022,37(2):84-91. YI Zheng-ming, ZHANG Chou, ZHOU Zheng, et al. Numerical simulation of blast furnace gas and coke oven gas combustion under different oxygen enrichment conditions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(2): 84-91.

Numerical Simulation of Blast Furnace Gas and Coke Oven Gas Combustion under Different Oxygen Enrichment Conditions

YI Zheng-ming^{1,2}, ZHANG Chou^{1,2}, ZHOU Zheng^{1,2}, LIN Chao-qun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430081; 2. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430081)

Abstract: In order to study the combustion characteristics of blast furnace gas (BFG) and coke oven gas (COG) under different oxygen-enriched conditions, a 75 t/h gas-fired boiler in a certain steel mill was taken as the object, the numerical simulation software Fluent was used to select the realizable $k-\varepsilon$ turbulence model with cyclone modification and the diffusive combustion model with finite rate and vortex dissipation. Using velocity inlet, pressure outlet and standard wall equations, under the boundary conditions of no slip or turbulent motion, the ignition distance, temperature field and heat flux density distribution in furnace were simulated. The results show that the ignition distance of coke oven gas is shorter than that of blast furnace gas, and coke oven gas reaches the stable combustion temperature of 1 000 K earlier under the condition of 31% oxygen enrichment than under the air combustion condition. After oxygen enrichment, the overall temperature in the gas-fired boiler decreases and the temperature distribution is more uniform. The maximum temperatures of air combustion, 26% oxygen enrichment and 31% oxygen enrichment

收稿日期:2021-04-01; 修订日期:2021-04-16

基金项目:国家自然科学基金(51604199)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51604199)

作者简介:易正明(1973-),男,湖北监利人,武汉科技大学教授。

ment are 1 867 K, 1 678 K and 1 834 K respectively. Under the conditions of O_2 and CO_2 combustion, the radiation heat transfer performance of mixed gas is enhanced, and the heat flux density in the furnace is improved obviously, which leads to the wall surface heat flux increased even though the overall temperature under the oxygen enrichment condition is lower than that under the air combustion condition. The NO_x production in the furnace decreases after oxygen enrichment, and the NO density converted to 3% O_2 at the furnace arch decreases from 8.12 mg/m^3 under the air combustion condition to 0.63 mg/m^3 under the condition of 26% oxygen enrichment.

Key words: oxygen-enriched combustion, gas-fired boiler, carbon capture, NO_x , numerical simulation

引言

能源与环境问题和人类生活密切相关,我国“十四五”规划指出,未来我国主要污染物排放总量将持续减少,碳排放强度降低,并制定了2030年前碳排放达峰行动方案,这对我国建设环境友好型社会提出了更高要求。富氧燃烧技术将高纯度 O_2 与主要成分为 CO_2 的再循环烟气混合作为锅炉助燃空气进行燃烧,燃烧后的 CO_2 浓度很高,能够实现后期封存或资源化利用的目的^[1]。高炉煤气热值低,燃烧不稳定,将富氧燃烧技术应用于主要燃烧高炉煤气的燃气锅炉中,不仅可以优化炉内燃烧,还能控制 CO_2 排放。富氧燃烧炉内的 O_2/CO_2 气氛与传统 O_2/N_2 气氛存在差异,大量研究表明,燃料在 O_2/CO_2 燃烧气氛下存在明显的着火延迟^[2];在与空气工况相同的氧分压下,富氧气氛下的火焰燃烧温度比常规空气气氛低 300 K 左右^[3]。Bearano 等人^[4] 基于烟煤的研究指出,要达到与常规空气燃烧接近的温度,富氧燃烧的氧气体积浓度要达到 30%,而且随着 O_2 体积浓度升高,燃烧温度有一定程度提高,炉内烟气具有更强的辐射特性和对流传热能力^[5-6], NO_x 的生成量相较于空气燃烧方式更低^[7-9]。近年来,学者们通过实验、数学计算和模拟等方法对锅炉富氧燃烧进行了深入的研究。王鹏等人^[10-11] 的研究表明,尽管富氧条件下燃料配风动量降低,采用针对富氧燃烧设计的旋流燃烧器仍可实现与空气燃烧相似的炉内流动特性。Schluckner 等人^[12] 研究了不同喷嘴设计对天然气富氧燃烧氮氧化物生成的影响,结果表明,当温度为 1 593 K,助燃空气中 N_2 摩尔分数为 10% 时,高动量燃烧器 NO_x 生成较低动量燃烧器降低 60%。闫高程^[13] 利用热态实验的方法研究了超高温火焰发生器在纯氧条件下的着火特性,提出

了一种基于富氧燃烧的超高温火焰点火方法。燃煤富氧燃烧领域在国内外已有大量研究^[14-15],但对高炉煤气和焦炉煤气在富氧条件下的燃烧特性研究较少。

本文利用 Fluent 软件模拟燃气锅炉在不同富氧条件下的燃烧特性,分析炉内着火距离、温度和热流密度分布及变化规律,为实际富氧燃气锅炉运行与 NO_x 控制提供理论依据。

1 研究对象及数值模拟

1.1 研究对象

研究对象为某钢厂 75 t/h 燃气锅炉,炉膛呈正方形,高度为 20 900 mm,边长为 5 450 mm。共布置 3 层燃烧器,燃烧器内环为燃料口,外环为助燃空气进气口,分布在炉膛四角。下两层为高炉煤气喷口,上层为焦炉煤气喷口,燃烧器高度分别为 2 600, 3 800 和 6 700 mm。燃烧器呈双切圆布置,假想切圆直径分别为 1 600 和 500 mm。炉膛底面中心内置一个下圆直径 2 700 mm、上圆直径 2 020 mm、高 4 900 mm 的稳燃装置。锅炉和燃烧切圆示意图如图 1 所示。

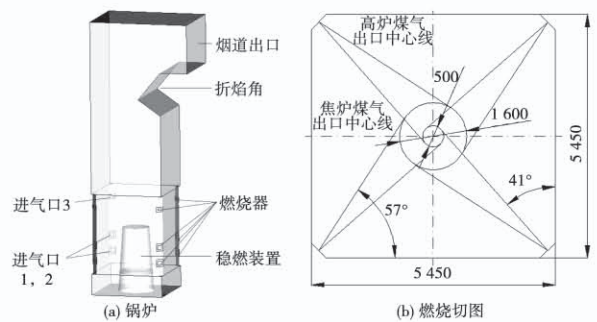


图1 锅炉和燃烧切圆示意图(mm)

Fig. 1 Schematic diagram of boiler and burning tangent circle(mm)

1.2 网格划分

在 Fluent 数值模拟计算中,合理和高质量的网格是数值模拟结果精确的前提条件,并且网格的质量还会影响收敛速度。伪扩散指的是在平流扩散方程数值解中因平流项有限差分的截断误差引起的虚假扩散^[16],是四角切圆燃烧锅炉模拟计算中的主要误差之一,其与所用的有限差分格式有关,有时甚至完全掩盖方程中其他扩散项的作用。目前,降低伪扩散的方法主要是加密网格和减小网格线与流线的夹角。第一种方法会降低计算效率,第二种方法通过调整网格线以减少伪扩散,通常情况下会将两种方法结合起来。燃烧器区域十分复杂,并且容易产生伪扩散,因此对该区域进行网格加密处理,并在燃烧器横截面方向采用平铺的方法生成非结构网格的方式(创建非结构网格)生成与实际流动方向基本平行的网格。在对网格进行独立性验证后,最终的计算网格数确定为 166 万。锅炉网格和燃烧器截面区域网格如图 2 所示。

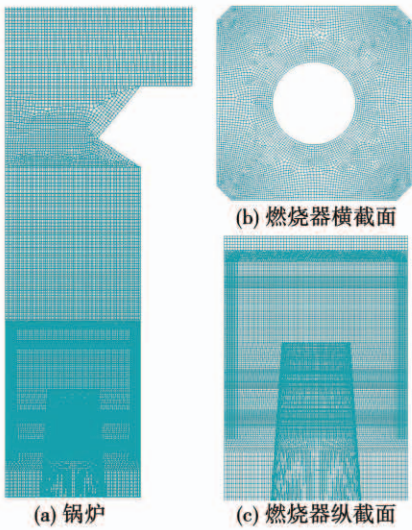


图 2 锅炉及燃烧器截面区域网格

Fig.2 Sectional grids of boiler and burner

1.3 数学模型

模拟的锅炉炉内形成切圆火焰,气体流动旋转大,因此选择由标准 $k-\varepsilon$ 模型修正后带有旋流修正的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。假设流动过程为湍流模式,忽略分子之间的粘性作用,这样在处理气体旋流时精度更高。气相湍流燃烧模型采用有限速率/涡耗散模型,利用该模型求解反应物和生成物输运组分方程,并由用户来定义化学反应机理。该模型综合考虑了动力学因素和湍流脉动,适用于预混燃烧、局部预混燃烧及非预混燃烧,可模拟大多数气相燃烧问题。P-1 辐射模型适用于几何结构复杂、辐射介质光学厚度大的研究对象,并且可以节省计算资源。本文采用 P-1 辐射模型进行数值模拟计算,压力-速度的耦合采用 SIMPLE 法求解^[17-18]。

1.4 边界条件

在进行数值模拟计算之前,需要给出锅炉速度入口、壁面及出口边界条件。速度入口为燃烧器喷口及助燃空气进气口,以水平烟道出口所在截面作为模型的压力出口。高炉煤气和焦炉煤气温度均为 320 K,空气温度为 663 K。采用标准壁面方程,无滑移、无湍流运动边界条件,考虑对流和辐射传热,对流传热系数为 $400\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,出口压力为 -60 Pa ,入口或出口边界的水力直径 D 为:

$$D=4A/L$$

(1)

式中: A —出、入口的有效面积; L —出、入口的四周周长。

锅炉设计纯烧高炉煤气或掺烧部分焦炉煤气,其成分分析如表 1 所示。各工况边界条件如表 2 所示。其中,进气口 1,2 为高炉煤气助燃空气进气口;进气口 3 为焦炉煤气助燃空气进气口。

表 1 高炉煤气和焦炉煤气成分体积分数分析

Tab.1 Analysis of composition volume fraction of BFG and COG

燃料	体积分数/%							热量
	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	CO ₂	O ₂	C _n H _m	Q/kJ·m ⁻³
高炉煤气	24.5	2.2	0.9	50.1	22	0.3	—	3 654
焦炉煤气	10	49.8	24.4	10.6	2	0.3	2.9	16 362

表 2 各工况边界条件

Tab.2 Boundary conditions of each working condition

工况	助燃空气	过剩空气系数	高炉煤气风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	焦炉煤气风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	进气口 1,2 风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	进气口 3 风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	普通空气	1.1	20.32	5.03	21.47	17.96
2	富氧 26%	1.1	20.32	5.03	17.34	14.51
3	富氧 31%	1.1	20.32	5.03	14.54	12.17

2 结果及分析

2.1 着火特性

着火距离是评价燃烧着火及燃烧稳定性的关键指标,通常认为燃烧温度超过 1 000 K 即可视作燃烧稳定^[19],着火距离一般控制在 0.3 ~ 1.5 m 之间较好,距离太短容易在燃烧器喷口附近结渣甚至烧坏燃烧器;距离太长会导致燃烧不稳定,引发炉膛熄火等事故。选取锅炉对角燃烧器喷口中心连线为特征直线,分析燃烧器喷口中心至炉膛中心方向上直线的温度变化。锅炉中共有 3 层燃烧器,由于下两层燃烧器均为高炉煤气燃烧器,因此只分析上中两层燃烧器的着火距离。

图 3 和图 4 分别是高炉煤气和焦炉煤气在不同富氧量下的着火距离分析。可以观察到中高层炉煤气燃烧器各工况着火距离均在 0.5 m 左右,上层焦炉煤气燃烧器各工况着火距离在 0.45 m 左右,这是由于焦炉煤气热值高,比高炉煤气更容易着火。其中富氧 26% 工况的特征直线整体温度较低,而富氧 31% 和普通空气燃烧温度接近,这与燃煤富氧燃烧中的结论接近^[4]。富氧 31% 工况在焦炉煤气燃烧器截面更早达到 1 000 K 的稳定燃烧温度,说明焦炉煤气在氧气体积浓度较高的条件下具有更好的着火特性。

2.2 炉内温度场变化

图 5 为不同氧气质量分数锅炉中心截面的温度分布。可以发现,高炉煤气和焦炉煤气在富氧 31% 燃烧条件下的燃烧特性与煤粉相似。炉内整体温度在富氧工况下比空气燃烧工况低 100 K 左右,这是由于在富氧 31% 气氛下,CO₂ 比 N₂ 比定压热容更高,炉内产生较低的绝热火焰温度^[4,20]。富氧 31% 工况比富氧 26% 工况高温区域面积更大,表明总体温度随入口 O₂ 体积浓度的增加而升高。这是由于

随着入口 O₂ 体积浓度的增加,放热氧化速率加快;并且入口 O₂ 体积浓度增加会使烟气量减少,导致在相同的吸热条件下,烟气的升温幅度较大^[21]。富氧 26% 和富氧 31% 工况截面在 1 400 ~ 1 500 K 温度区域的面积均小于空气燃烧工况,需进一步提升氧气体积浓度才能达到与空气燃烧工况相近的温度分布。

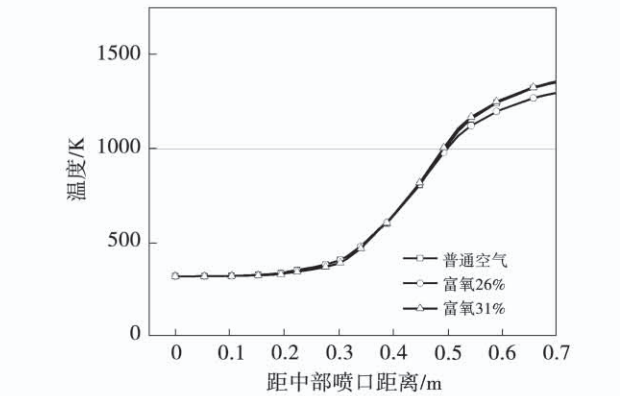


图 3 不同氧气质量分数中层燃烧器着火距离对比

Fig.3 Comparison of ignition distances of middle burners with different oxygen mass fractions

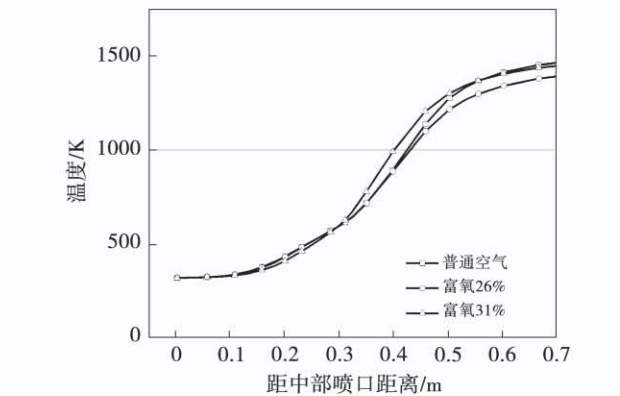


图 4 不同氧气质量分数上层燃烧器着火距离对比

Fig.4 Comparison of ignition distances of upper burners with different oxygen mass fractions

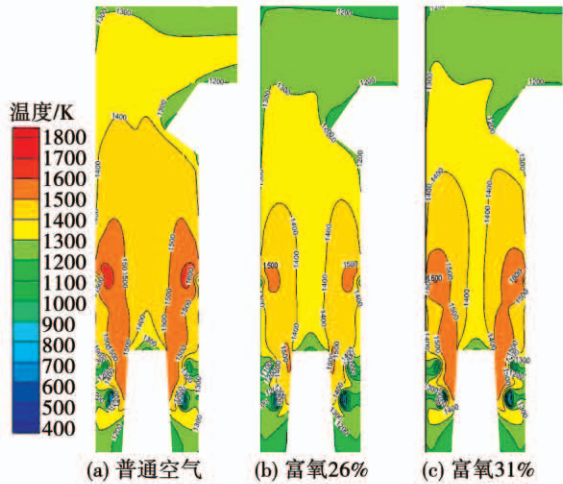


图 5 不同氧气质量分数锅炉中心截面温度分布
Fig. 5 Temperature distribution diagram of boiler center section under different oxygen mass fractions

图 6 是锅炉沿炉膛高度方向的截面平均温度曲线。由图可知,三种工况的截面平均温度变化趋势基本一致,燃烧器截面附近存在较大气流扰动,导致截面平均温度明显降低。富氧 26% 工况下整体截面平均温度最低,空气燃烧工况下整体截面平均温度最高。三种工况下的最高温度分别为 1 867, 1 678 和 1 834 K。与普通燃烧相比,富氧 26% 和富氧 31% 工况的最高温度分别降低了 189 和 33 K,这与文献[3,22-23]中燃煤燃烧的特征相似。

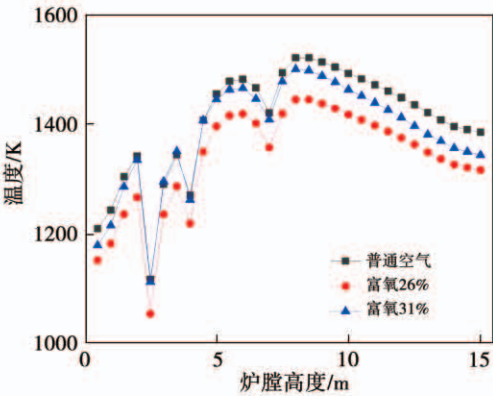


图 6 不同氧气体积分数下锅炉截面平均温度沿炉膛高度分布
Fig. 6 Average temperature distribution of boiler section along furnace height under different oxygen volume concentrations

2.3 炉内辐射特性

图 7 为不同氧气体积分数锅炉侧截面壁面热流

分布。由图可知,各工况在锅炉高 7 ~ 10 m 区域壁面热流密度值最大,并向周围逐渐减小,普通空气、富氧 26% 和富氧 31% 工况的最大值分别为 78.7, 81.3 和 82.3 kW/m^2 。富氧工况的最高热流密度值均大于普通空气燃烧工况,且随着富氧量的提升,高热流密度区域不断扩大。虽然富氧工况下整体温度较普通空气燃烧工况低,但壁面热流分布优于普通空气工况,表明高炉煤气和焦炉煤气在富氧 31% 燃烧条件下气体辐射传热得到增强,且没有燃煤时颗粒辐射的影响,全部为气体辐射,炉内整体热流密度提升效果明显,可以在温度低于普通空气燃烧工况条件下达到甚至超过原有的换热量。

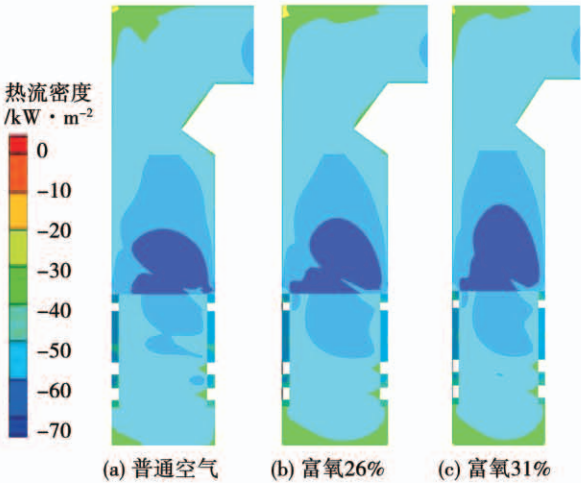


图 7 不同氧气质量分数侧截面壁面热流分布
Fig. 7 Heat flow distribution of side section wall surfaces with different oxygen mass fractions

2.4 不同氧气体积浓度对速度场的影响

图 8 为不同富氧条件下锅炉中心截面的速度分布云图。由图可知,三种工况下均在燃烧器附近形成了高速流动区域,且高速流动区域面积随氧气体积浓度的升高而降低。这是由于助燃空气中氧气体积浓度的提升会导致入口流速降低,高速流动区域面积随氧气体积浓度升高而减小。气流从燃烧器喷口进入炉内,绕炉膛中心形成切圆流动,并不断上升。由于稳燃装置的存在,在其正上方形成了长条形低速流动区域。此外,折焰角对炉内气体产生了扰动作用,尾部烟道处形成了三角形低速流动区域。氧气体积浓度的提升使得助燃空气流速降低,因此

两处低速流动区域面积均随着氧气体积浓度的增大而增大,

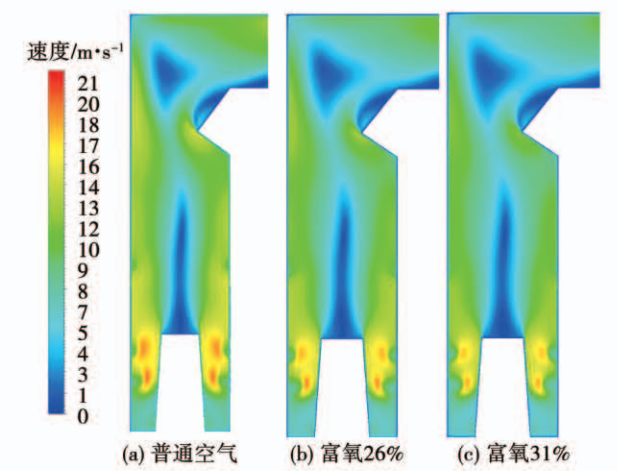


图 8 不同氧气体积浓度下锅炉中心截面速度分布图
Fig.8 Velocity distribution diagram of boiler center section under different oxygen volume concentrations

2.5 不同氧气体积浓度对氮氧化物排放的影响

图 9 是不同氧气体积浓度下锅炉截面平均 NO_x 质量浓度沿炉膛高度分布情况。由图可知,各工况平均截面 NO_x 生成较为稳定,普通空气燃烧工况下截面平均 NO_x 质量浓度最高,富氧 26% 工况下截面平均 NO_x 质量浓度最低。3 种工况下的最高截面平均 NO_x 质量浓度分别为 7. 89, 0. 61 和 4. 08 mg/m³,因此燃气锅炉应用富氧燃烧能有效降低 NO_x 排放。

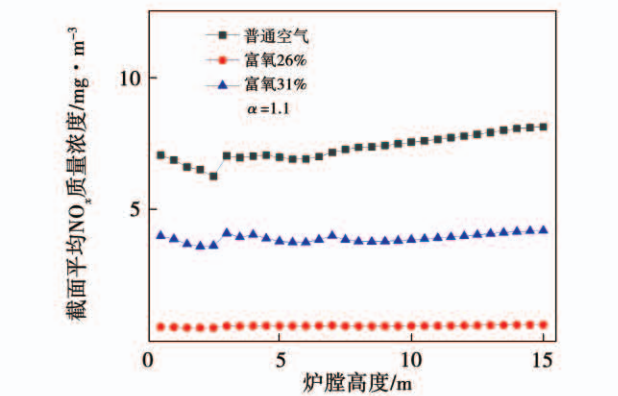


图 9 不同氧气质量分数下锅炉截面平均 NO_x 沿炉膛高度分布
Fig.9 Distribution of average NO_x of boiler section along furnace height under different oxygen mass fractions

2.6 不同氧气体积浓度下的折焰角参数

表 3 是模拟及现场运行工况下锅炉折焰角参数。由表中可以看出,模拟工况下随着氧气体积浓度的提升,折焰角处 O₂ 体积浓度不断升高,富氧后折焰角处 CO₂ 体积浓度在 60% 以上,NO_x 生成量均显著降低。空气燃烧条件下折焰角处各参数的模拟值与现场运行值较为接近,说明在选取合理的数学模型和较好的网格之后,数值计算结果较为可靠。表中工况 1 为现场运行工况,工况 2 ~ 4 为模拟工况。

表 3 模拟及运行工况折焰角参数
Tab.3 Furnace arch parameters under simulated and operating conditions

工况	过剩空气 系数 α	助燃空气	温度/K	NO _x 质量浓	体积浓度/%	
				度/mg · m ⁻³	O ₂	CO ₂
1	1.1	普通空气	1 353	9.85	3.80	18.8
2	1.1	普通空气	1 387	8.12	3.77	22.05
3	1.1	富氧 26%	1 318	0.63	4.20	65.22
4	1.1	富氧 31%	1 346	4.19	4.60	61.87

3 结 论

本文利用 Fluent 软件模拟了高炉煤气和焦炉煤气在不同富氧条件下的燃烧工况,分析各工况下的模拟参数,得出结论:

- (1) 高炉煤气着火距离在 0.5 m 左右,焦炉煤气比高炉煤气热值高,着火距离短。富氧 26% 工况下的燃烧器截面特征直线整体温度较低,而富氧 31% 工况与普通空气燃烧工况温度接近。焦炉煤气在氧气体积浓度较高的条件下有更好的着火特性,富氧 31% 工况下焦炉煤气燃烧器截面更早达到 1 000 K 的稳定燃烧温度。
- (2) 高炉煤气和焦炉煤气在富氧 31% 燃烧条件下的燃烧特性与煤粉相似,富氧工况比普通空气燃烧工况炉内整体温度低 100 K 左右,温度分布更加均匀,普通空气、富氧 26% 和富氧 31% 三种燃烧工况最高温度分别为 1 867,1 678 和 1 834 K;高炉煤气和焦炉煤气在富氧 31% 燃烧条件下,气体辐射传热得到增强,且没有燃煤时颗粒辐射的影响,

炉内整体热流密度提升效果明显,可以在温度低于普通空气燃烧工况条件下达到甚至超过原有的换热量。

(3) 在保持过剩空气系数不变的条件下,富氧燃烧比普通空气燃烧时助燃空气量减少,助燃空气流速降低,富氧燃烧后入射高速流动区域变短,整体最大流速降低;富氧后炉膛内 NO_x 的生成量降低,富氧 26% 工况下折焰角处的 NO_x 生成由空气燃烧时的 8.12 mg/m^3 降至 0.63 mg/m^3 。锅炉应用富氧燃烧后炉内流动及燃烧状况良好,没有过热现象的发生,且氮氧化物排放量降低,燃烧工况较好。

参考文献:

- [1] 游 卓. 富氧燃烧过程中的 NO_x 控制及其系统效率研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
YOU Zhuo. NO_x control and efficiency optimization of oxy-fuel combustion system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [2] 郑楚光,赵永椿,郭 欣. 中国富氧燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报,2014,34(23): 3856–3864.
ZHENG Chu-guang, ZHAO Yong-chun, GUO Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China[J], Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3856–3864.
- [3] ERIC C, KELLY T, ALLAN P. Coal combustion in O_2/CO_2 mixtures compared with air[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2000, 78(2): 402–407.
- [4] BEJARANO P A, LEVENDIS Y A. Single-coal-particle combustion in O_2/N_2 and O_2/CO_2 environments[J]. Combustion and Flame, 2008, 153(1/2): 270–287.
- [5] 吴海波. 不同 O_2/CO_2 配比下锅炉的富氧燃烧特性研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(2): 50–53.
WU Hai-bo. Study on the oxygen-enriched combustion characteristics of boilers with different O_2/CO_2 ratios[J]. Boiler Technology, 2017, 48(2): 50–53.
- [6] 韩娟娟,王春波. 600 MW 煤粉/生物质富氧燃烧锅炉热力特性分析及优化[J]. 华东电力, 2013, 41(6): 1368–1372.
HAN Juan-juan, WANG Chun-bo. Thermodynamic analysis and optimization of 600 MW coal/biomass oxygen-enriched combustion boiler[J]. East China Electric Power, 2013, 41(6): 1368–1372.
- [7] 游 卓,王智化,周志军,等. 1 000 MW 燃煤锅炉富氧燃烧改造及 NO_x 排放的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(11): 2080–2086.
YOU Zhuo, WANG Zhi-hua, ZHOU Zhi-jun, et al. Numerical simulation of NO_x emission from a 1 000 MW boiler retrofitted to oxy-fuel combustion[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(11): 2080–2086.
- [8] XU M, WU Y, WU H, et al. Experimental study on oxy-fuel combustion and NO emission in a spouted-fluidized bed with under bed feeding[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(4): 1132–1140.
- [9] 董静兰. 富氧燃烧氛围下纯煤掺烧生物质的污染物排放模拟研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(7): 68–73.
DONG Jing-lan. Simulation study of the pollutant emissions during the combustion of pure coal diluted and mixed with biomass in the oxygen-enriched combustion atmosphere[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(7): 68–73.
- [10] 王 鹏,郭军军,吴海波,等. 烟气循环倍率对煤粉富氧燃烧影响数值模拟[J]. 热力发电, 2019, 48(1): 90–95.
WANG Peng, GUO Jun-jun, WU Hai-bo, et al. Numerical simulation on influence of flue gas recirculation ratio on oxy-coal combustion[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(1): 90–95.
- [11] 王 鹏,陈寅彪,廖海燕,等. 200 MW 富氧燃烧锅炉配风优化数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(2): 98–103.
WANG Peng, CHEN Yin-biao, LIAO Hai-yan, et al. Numerical simulation on optimization of air distribution mode for a 200 MW oxy-fuel combustion boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(2): 98–103.
- [12] SCHLUCKNER C, GABER C, DEMUTH M, et al. Scrutiny of residual nitrogen content and different nozzle designs on NO_x formation during oxy-fuel combustion of natural gas[J]. Fuel, 2020, 277: 118065.
- [13] 闫高程. 基于富氧燃烧的超高温火焰点火实验研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(4): 265–271.
YAN Gao-cheng. Experiment study on the ignition method for super-high temperature flames based on oxygen-enriched combustion[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(4): 265–271.
- [14] 刘建华. 国内燃煤锅炉富氧燃烧技术进展[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 49–54.
LIU Jian-hua. Research and development of oxy-fuel combustion for coal-fired boiler in China[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 49–54.
- [15] 吴海波,王 鹏,柳朝晖,等. 神华煤富氧燃烧的结渣特性研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(4): 89–94, 147–148.
WU Hai-bo, WANG Peng, LIU Zhao-hui, et al. Study on the slagging characteristics of Shenhua coal under oxygen-enriched combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power

er,2016,31(4):89-94,147-148.

[16] 王志刚,嵯玉群,陈 昌,等. 四角切圆锅炉流场伪扩散效应网格的研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(5):22-28.

WANG Zhi-gang, ZHUO Yu-qun, CHEN Chang, et al. Research on the grid of pseudo-diffusion effect in the flow field of tangentially circled boiler[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(5):22-28.

[17] XU M, AZEVEDO J L T, CARVALHO M G. Modeling of a front wall fired utility boiler for different operating conditions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering,2001,190(28):3581-3590.

[18] VUTHALURU R, VUTHALURU H B. Modelling of a wall fired furnace for different operating conditions using FLUENT[J]. Fuel Processing Technology,2006,87(7):633-639.

[19] GERA D, MATHUR M, FREEMAN M. Parametric sensitivity study of a CFD-based coal devolatilization model[J]. Energy & Fuels,2003,17(3):794-795.

[20] NiCOLAI H, WEN X, MIRANDA F C, et al. Numerical investigation of swirl-stabilized pulverized coal flames in air and oxy-fuel atmospheres by means of large eddy simulation coupled with tabulated chemistry[J]. Fuel,2021,287(3):119429.

[21] WU Y, LIU D, DUAN L, et al. Three-dimensional CFD simulation of oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed with warm flue gas recycle[J]. Fuel,2018,216:596-611.

[22] MINE T, MARUMOTO T, KIYAMA K, et al. Development of Hitachi oxy-fuel combustion technologies [J]. Energy Procedia,2013,37:1365-1376.

[23] 陆 骑. 富氧旋流燃烧器优化设计与数值模拟研究[D]. 武汉:华中科技大学,2016.

LU Qi. Numerical simulation and optimization on an oxy-fuel swirl burner[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2016.

(刘 颖 编辑)

(上接第 69 页)

[9] 马义良,李宇峰,梁天赋,等. 火电机组“热电解耦”后低压缸末级叶片动应力分析[J]. 汽轮机技术,2018,60(5):343-345,356.

MA Yi-liang, LI Yu-feng, LIANG Tian-fu, et al. Dynamic stress analysis on LP last-stage blades of steam turbine for thermal electrolysis decoupling[J]. Turbine Technology,2018,60(5):343-345,356.

[10] 梁天赋,谢尉扬,王 飞,等. 汽轮机低压缸切缸运行关键技术研究[J]. 汽轮机技术,2019,61(6):471-472.

LIANG Tian-fu, XIE Wei-yang, WANG Fei, et al. The key technique research of removing the low pressure cylinder of steam turbine[J]. Turbine Technology,2019,61(6):471-472.

[11] 马义良,陈晓宇,李宇峰,等. 低压缸切缸技术在供热机中的应用[J]. 热力透平,2020,49(3):186-189.

MA Yi-liang, CHEN Xiao-yu, LI Yu-feng, et al. Application of low pressure cylinder cutting-off technology in heating units[J]. Thermal Turbine,2020,49(3):186-189.

(刘 颖 编辑)