

燃煤锅炉一次风掺混氢氧对炉膛温度影响的数值模拟

刘鑫,任建兴,李芳芹,李可君

(上海电力大学能源与机械工程学院,上海200090)

摘要:为提高1 000 MW超超临界四角切圆燃煤锅炉低负荷工况(300 MW)燃烧稳定性,在一次风中掺混不同比例氢气和氧气,采用数值模拟方法对比分析了低负荷掺混氢氧前后炉膛平均温度场和CO体积分数等参数。研究表明:一次风掺混氢氧加强了低负荷工况下的火焰温度,进而提升炉内整体平均温度,改善低负荷燃烧不稳定现象;掺混5%体积分数的氢气,主燃区炉内截面平均温度达到1 603 K,比初始工况平均温度高了37 K;掺混8%~15%体积分数的氢气,随着氢气燃烧产生水份比例增高,炉膛截面平均温度逐步降低;掺混5%体积分数的氢气和10%体积分数的氧气,主燃区炉内截面平均温度达到了1 696 K,比只掺混5%体积分数的氢气平均温度提高了93 K,比初始工况平均温度提高了130 K,此工况是该四角切圆锅炉低负荷下改造后较为理想的工况。

关键词:低负荷;燃煤锅炉;掺混氢氧;炉膛温度;数值模拟

中图分类号:TM621.2

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.01.019

[引用本文格式]刘鑫,任建兴,李芳芹,等.燃煤锅炉一次风掺混氢氧对炉膛温度影响的数值模拟[J].热能动力工程,2023,38(1):156-163. LIU Xin, REN Jian-xing, LI Fang-qin, et al. Numerical simulation of effect of primary air mixed with hydrogen and oxygen on furnace temperature of coal-fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 156-163.

Numerical Simulation of Effect of Primary Air Mixed with Hydrogen and Oxygen on Furnace Temperature of Coal-fired Boiler

LIU Xin, REN Jian-xing, LI Fang-qin, LI Ke-jun

(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code:200090)

Abstract: In order to improve combustion stability of 1 000 MW ultra-supercritical tangentially fired coal-fired boiler under low load condition (300 MW), different ratios of hydrogen and oxygen are mixed in primary air, and parameters such as average temperature field and CO volume fraction before and after low load mixing of hydrogen and oxygen are compared and analyzed by means of numerical simulation. The results show that mixing primary air with hydrogen and oxygen strengthens the flame temperature under low load conditions, thus increasing the overall average temperature in the furnace and improving the combustion instability under low load. By mixing 5% volume fraction hydrogen, the average cross-section temperature in the main combustion zone reaches 1 603 K, which is 37 K higher than the average temperature under initial conditions. By mixing 8%~15% volume fraction hydrogen, the average temperature of furnace section decreases gradually as the proportion of water produced by hydrogen combustion increases. By mixing 5% volume fraction hydrogen and 10% volume fraction oxygen, the average cross-sectional temperature in the main combustion zone reaches 1 696 K, which is 93 K higher than that of only mixing 5% volume fraction hydrogen, and 130 K higher than the average temperature in the initial working condition. This working condition is an ideal one after the low load retrofit of the tangentially fired boiler.

Key words: low load, coal-fired boiler, mixed hydrogen and oxygen, furnace temperature, numerical simulation

引 言

在清洁能源大规模并入电网且跟随电网调峰背景下,火电机组势必参与深度调峰,由电量型电源向调节型电源转变^[1-3]。燃煤锅炉低负荷运行下的稳燃问题是机组灵活调峰过程中亟需解决的关键核心问题。钟礼今等人^[4]在 700 MW 机组低负荷条件下开展了不同燃烧器投运方式对其运行安全、经济和环保性能影响的试验和数值模拟研究,获得了最优的燃烧器投运方式,使其达到了 300 MW 负荷下的稳定燃烧。付旭晨等人^[5]对 300 MW 锅炉低负荷稳燃能力进行了模拟与预测,发现在机组低负荷运行时提高稳燃性的措施包括降低一次风速、降低二次风量、燃烧器紧密运行同时适当降低运行氧量。Rost^[6]提出了一种用电点火技术点燃易燃的干褐煤,直接通过锅炉重油喷口点燃煤粉的方法,可以使锅炉在不投油的情况下保持低负荷燃烧。除此以外,国内外学者基于燃烧学基本理论,提出了一些改善锅炉低负荷燃烧状况的方法,主要包括调整燃烧器运行方式、调整机组配风方式、降低煤粉粒径及改变过量空气系数等^[7-10]。但目前的低负荷稳燃解决方案往往存在调峰深度不够、投油稳燃成本过高、污染环境及锅炉改造困难等问题。

本文针对国内某 1 000 MW 超超临界燃煤锅炉,采用计算流体力学(CFD)的方法,着重研究一次风掺混氢氧对炉膛平均温度及煤粉喷口高温火炬参数的影响。通过合理调整一次风掺混氢氧的比例,获得炉内温度场、烟气中 CO 体积分数的分布特性,确定低负荷下稳燃的最佳工况。该研究为电站煤粉锅炉变负荷运行和提升稳燃能力具有一定的理论指导意义。

1 研究对象

研究对象为某电厂 1 000 MW 大型电站锅炉,该机组锅炉炉膛长×宽×高为 21.48 m×21.48 m×115.31 m。电厂采用超超临界压力直流塔式锅炉,机组配备 6 台磨煤机,每台磨煤机对应两个一次风喷嘴,满负荷运行时投运 5 台,最底层 1 台备用。

燃烧系统为四角布置,切圆燃烧形成顺时针旋向的假想切圆,偏置二次风增加 22°形成大切圆,增强煤粉气流的扰动性能。锅炉燃烧器分为 3 组,每组对应两台磨煤机提供煤粉,二次风与一次风、油枪喷口间隔布置,燃烧区域的高度为 29.72 m,在上层燃烧器顶部布置有两层紧凑燃尽风(CCOFA)。锅炉结构、单组燃烧器布置及燃烧器摆角如图 1 所示。煤种的工业分析及元素分析如表 1 所示。

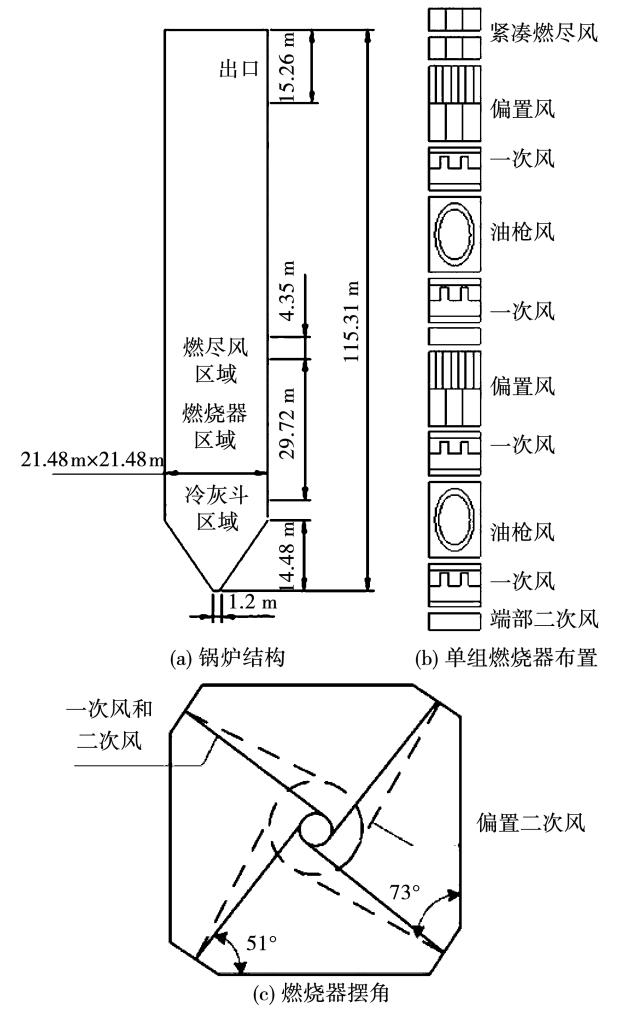


图 1 锅炉结构、单组燃烧器布置及燃烧器摆角
Fig. 1 Boiler structure, single group burner arrangement and burner swing angle

表 1 煤质特性

Tab. 1 Coal quality characteristics

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
V_{daf}	FC_{ar}	A_{ar}	M_{ar}	C_{daf}	H_{daf}	O_{daf}	N_{daf}	S_{daf}	
24.93	49.70	25.00	8.80	80.24	5.65	9.18	1.60	3.32	21 220

2 计算模型及数值方法

2.1 数学模型与计算方法

采用 simple 算法^[11] 进行三维稳态计算。湍流计算采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,能够更好地模拟圆形射流问题^[12];炉内辐射换热采用 P1 模型^[13];由于一次风中掺混氢气,因此气相湍流燃烧采用有限速率/涡耗散模型^[14];煤粉颗粒运动过程采用 Lagrange 描述下的随机轨道模型 (Stochastic particle tarjectory model)^[15];煤粉挥发分热解采用由两个平行的一阶反应共同控制的双方程竞争模型;采用动力/扩散模型模拟煤焦的非均相氧化反应^[16]。

2.2 网格划分

利用建模软件对计算区域进行建模,取炉膛宽度、深度、高度方向坐标分别为 Z 方向、 X 方向和 Y 方向,各结构尺寸采用实际锅炉数据。炉膛壁面网格采用 Quad 网格和 Map 方法、炉体采用 Hex 网格和 Map 方法,完成六面体网格生成。经过网格无关性验证,最终确定网格总数为 129 万。燃烧器入口的网格线方向与流动方向基本一致,可以有效避免数值发生伪扩散^[17]。针对燃烧器区域进行网格加密,确保模拟计算时能比较精确地模拟该区域物理量梯度变化大的特性。各一次风出口横截面的网格划分如图 2 所示。锅炉炉膛的计算区域网格划分如图 3 所示。

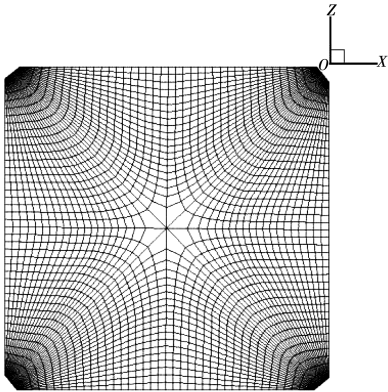


图 2 一次风出口横截面网格划分

Fig.2 Cross-sectional grid division of primary air outlet

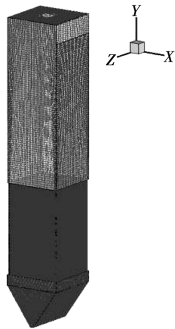


图 3 炉膛计算域网格划分

Fig.3 Computing domain griddivision of furnace

2.3 边界条件

炉膛壁面设置为无滑移壁面。一次风和二次风喷口设为速度入口,其速度和温度根据锅炉实际运行给出的运行参数进行设置,燃烧系统运行参数如表 2 所示。锅炉中燃烧器区域的燃烧非常剧烈,湍流强度较大,因此速度入口边界上湍流强度一般设为 9.9%。

表 2 燃烧系统运行参数

Tab.2 Operating parameters of combustion system

参数	数值
一次风速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	27.3
一次风温度/ $^{\circ}\text{C}$	75
二次风速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	60.3
二次风温度/ $^{\circ}\text{C}$	334
一次风率/%	21
二次风率/%	59
分离燃尽风率/%	20

2.4 模拟工况

根据燃煤锅炉设计参数,燃煤消耗量计算式^[18]为:

$$B_{\text{coal}} = Q_1 / (Q_{\text{net,ar}} \times \eta) \tag{1}$$

式中: B_{coal} —纯煤燃烧时的燃煤消耗量, kg/h ; Q_1 —锅炉内蒸汽每小时的吸热量, kJ/h ; $Q_{\text{net,ar}}$ —煤粉的收到基低位热值, kJ/kg ; η —锅炉热效率, %。

为保证单只燃烧器出力不变,低负荷氢气掺混一次风工况下,需要用氢气代替一部分煤粉。采用

氢气占一次风体积流量的百分比(以热量计算)进行掺混。所需氢气的流量为:

$$q_{H_2} = B_{\text{coal}} \times Q_{\text{net,ar}} \times \beta / (3\,600 \times Q_{H_2}) \quad (2)$$

式中: q_{H_2} —氢气流量, m^3/s ; β —氢气掺混比例, %; Q_{H_2} —单位体积氢气在一定温度下燃烧释放的热量, kJ/m^3 。

表 3 为锅炉额定工况和 30% 负荷下模拟工况参数。工况 1(额定工况)用来验证模拟结果的准确性;工况 2 为 300 MW 低负荷基准工况,用来研究此机组在低负荷燃烧下的炉内温度场和组分分布的变化情况。

表 3 额定工况和 30% 负荷模拟工况参数

Tab.3 Simulated operating parameters under rated conditions and 30 % load

参数	工况 1	工况 2
负荷/MW	1 000	300
一次风/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	543.96	217.57
总二次风/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	1 528.28	611.28
燃尽风/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	518.06	207.21
燃料消耗量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	302.40	120.96
运行磨煤机	A/B/C/D/E	A/B

表 4 给出在 30% 负荷工况下,A,B 层一次风均掺混不同氢氧比例的方案。工况 3~6 是在工况 2 基础上改变氢气掺混一次风的体积分数;工况 7~8 是在最佳氢气掺混体积分数工况下,向一次风中混入纯氧。

表 4 30% 负荷一次风掺混氢氧工况设置

Tab.4 Setting of 30% load primary air mixed with hydrogen and oxygen

工况	负荷/MW	掺混气体	掺混比例/%
3	300	氢气	5
4	300	氢气	8
5	300	氢气	12
6	300	氢气	15
7	300	氢气,氧气	5,5
8	300	氢气,氧气	5,10

3 结果与分析

3.1 模拟结果验证

为验证数值模拟结果的可靠性,将满负荷运行的模拟结果与设计值^[19]进行对比,高温过热器处详细数据如表 5 所示。由于在数值研究过程中对模型进行了一定的简化,因此数值模拟结果和实际运行数据存在一定的误差。两者烟气温度、CO₂体积分数和飞灰含碳量的误差分别为 3.72%、5.21% 和 6%,在合理的误差范围内,可以认为该模型能模拟该燃煤机组内真实燃烧情况。

表 5 高温过热器参数模拟结果与设计值对比

Tab.5 Comparison of simulation results and design values of high temperature superheater parameters

参数	模拟值	设计值
烟气温度/K	1 319	1 370
CO ₂ 体积分数/%	18.36	17.45
飞灰含碳量/%	1.41	1.5

3.2 炉内温度分布

3.2.1 锅炉变负荷运行的温度分布

图 4 为工况 1 和工况 2 炉膛中心截面的温度分布云图。由图 4(a)可以看出,在满负荷运行时,炉内温度分布基本对称,炉内火焰充满度较好,炉内温度沿炉膛高度方向增加,主燃区炉膛温度达到 1 800 K 以上,满足设计要求。由图 4(b)可以看出,在低负荷运行时,炉内整体温度水平大幅降低,主燃区炉膛温度最高约为 1 500 K,低温区域明显增多,燃烧不稳定。

图 5 为工况 1 和工况 2 下一次风水平截面温度分布。由图 5(a)可以看出,满负荷运行时,煤粉经一次风喷口喷出后可以立即着火,火焰充满度较好,能够维持良好的切圆燃烧。由图 5(b)可以看出,低负荷运行时,由于给煤量及煤粉质量分数大幅降低,增加了煤粉气流着火热,且低负荷时一次风速降低导致火焰刚性变差,煤粉着火位置推迟,整体温度降低,出现燃烧不稳定现象。

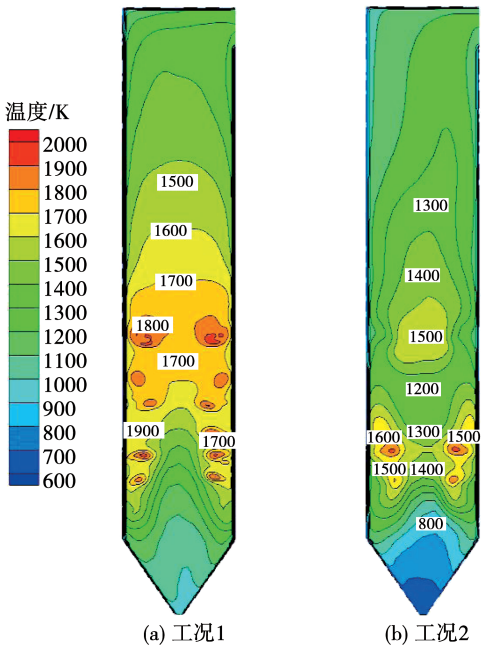


图 4 炉膛中心截面温度分布
Fig.4 Temperature distribution of central section
of furnace

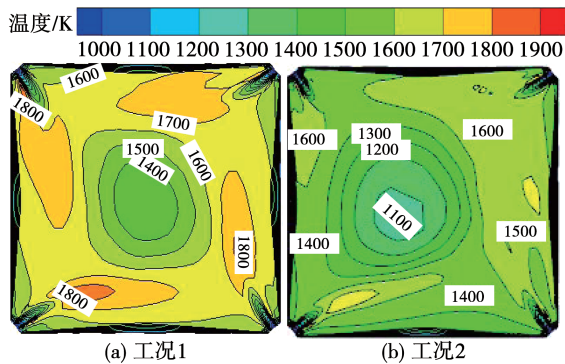


图 5 水平截面一次风温度分布
Fig.5 Horizontal sectional temperature distribution
of primary air

3.2.2 一次风掺混氢气对炉膛截面平均温度的影响

当负荷降为 300 MW 时,掺混不同比例氢气时各水平截面的温度分布如图 6 所示。从图 6 可以看出,一次风掺混氢气前后的温度分布模式类似,炉内温度首先沿炉膛高度方向增加,在主燃区(22~40 m)之后炉膛内烟气与炉膛受热面换热,导致截面平均温度逐渐降低。主燃区不完全燃烧所产生的 CO 和未燃尽碳随着气流上升,在 SOFA 区与补入的空气继续

反应,因此温度又有所回升。烟气沿炉膛高度方向继续与炉膛受热面换热,截面平均温度降低。

另外,一次风掺混氢气的比例对炉内截面平均温度有一定影响。当氢气的占比为 5% 和 8% 时,主燃区炉内截面平均温度最高为 1 603 和 1 611 K,比掺混氢气前温度高了 37 和 45 K;随着掺混氢气比例的增加,主燃区炉内截面平均温度开始降低,这是由于氢气体积分数的增加导致燃烧产生的水份增加,水吸收大量热量导致温度水平降低。在 SOFA 区以上,可以看到掺混氢气后的温度水平比掺混前略低,这是因为在主燃区氢气的燃烧消耗了一部分未燃尽碳,在 SOFA 区参与反应的碳质量分数减少。从图 6 中可以看出,工况 3 和工况 4 的炉内平均温度较掺混氢气前提升程度相差不大,从经济效益上考虑,选择 5% 氢气占比作为基准,进一步研究掺混纯氧所带来的影响。

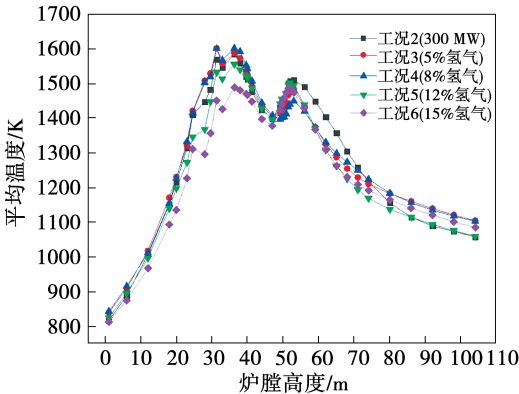


图 6 掺混不同比例氢气时各水平截面的温度分布
Fig.6 Temperature distribution of each horizontal
section when mixed with different proportions of
hydrogen

3.2.3 一次风掺混氢气和氧气对炉膛截面平均温度的影响

当负荷为 300 MW 时,以一次风掺混 5% 氢气为基准,掺混不同比例氧气沿炉膛高度方向上不同水平截面的温度分布如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当一次风同时掺混氢气和氧气时,炉膛内温度分布趋势与未掺混前保持一致。与只掺混氢气不同的是,当一次风中混入纯氧时,氧气和氢气优先燃烧迅

速放出大量热量,使得煤粉快速达到着火点。相比于未掺混前,提升了煤粉燃尽程度,降低未燃尽碳质量分数,主燃区炉内截面平均温度有显著提高。未掺混前,主燃区炉内截面平均温度最高为 1 566 K,只掺混 5% 氢气时平均温度最高为 1 603 K。在此基础上,混入 5% 和 10% 氧气后,主燃区炉内截面平均温度最高达到了 1 625 和 1 696 K,比未掺混氢气和氧气前温度提高了 59 和 130 K。表明,在低负荷燃烧时,一次风中掺混 5% 氢气和 10% 氧气可以使炉内温度保持较高水平,且温度场稳定,能够满足煤粉稳定燃烧。

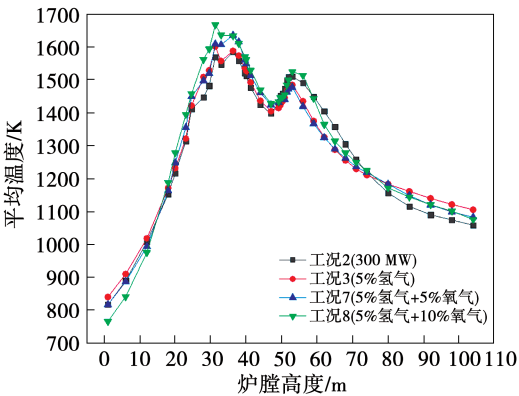


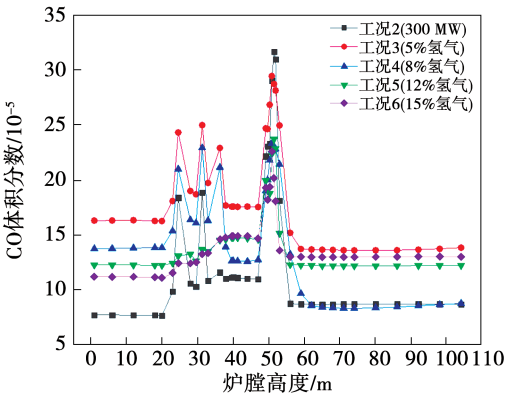
图 7 一次风掺混氢气和氧气沿炉膛高度方向上不同水平截面的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of primary air mixed with hydrogen and oxygen on different horizontal sections along the direction of furnace height

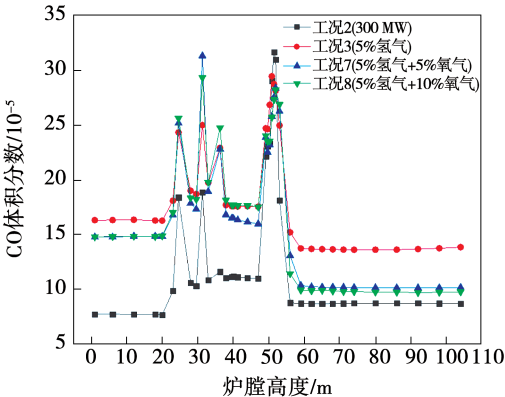
3.3 炉内各工况 CO 体积分数分布

CO 体积分数是评价煤粉炉内燃烧状况的一个重要指标。图 8 为各工况炉膛内 CO 体积分数的分布。由图 8 可知,不同工况下炉内 CO 体积分数变化趋势基本一致。CO 在炉内煤粉燃烧过程中主要是碳粒和氧气反应的产物,而碳粒氧化产生的 CO 会进一步燃烧并消耗氧气。由于 CO 和氧气的反应时间尺度比碳粒与氧气的非均相反应要小 100 倍以上,CO 体积分数对主燃区氧气体积分数的变化非常敏感。因此,从图 8(a)中可以看出,随着炉膛高度的增加,CO 体积分数出现 4 次波动,这是由于二次风携带大量氧气进入炉内增加燃烧强度导致。并

且,随着氢气的增加,CO 体积分数均有不同程度的升高,表现为:工况 3 的 CO 体积分数最高;工况 6 的 CO 体积分数最低;工况 4 和工况 5 的 CO 体积分数介于工况 3 和工况 6 之间。这是因为氢气燃烧消耗了大量氧气,导致煤粉在较高还原性气氛中生成大量 CO,随着氢气的增加,水蒸气的体积分数增高,导致 CO 体积分数降低。如图 8(b)所示,随着氧气的通入,工况 7 和工况 8 的 CO 体积分数比工况 3 均有所降低,氧气的通入也使煤粉的燃烧速率升高。在 SOFA 区后,CO 体积分数大幅度降低,与工况 2 基本保持一致。



(a) 一次风掺混氢气



(b) 一次风掺混氢气和氧气

图 8 各工况炉膛内 CO 体积分数的分布

Fig. 8 Distribution of CO volume fraction in furnace under various working conditions

3.4 掺混氢气和氧气对着火特性的影响

图 9 为低负荷各工况下一次风水平截面温度分布。图 9(a)为掺混前低负荷工况下一次风水平截面温度分布,以此作为基准工况对比分析掺混后的效果。从一次风水平截面温度分布来看,掺混后的

3 个工况都不同程度的提升了炉膛低负荷燃烧的稳燃性能。掺混前不能形成良好的切圆燃烧,掺混后由于氢气燃烧释放大量热量,煤粉气流得以迅速点燃,从整体上降低了一次风煤粉气流的着火热,着火位置提前,可以大致形成切圆燃烧。其中,工况 8 效果最为显著,在较高的氧气体积分数下,煤粉的着火特性得到改善,煤粉气流中掺混氢气,使煤粉更容易被点燃,燃尽时间的缩短更有利于煤粉快速燃烧,释放更高热量。从图 9(b)、(c)和(d)可以看出,工况 8 的高温火炬长度最长、刚性最强、温度最高,火焰温度达到 1 800 K,火焰的延展性也最好。结合图 7 及 3.2.3 的分析,工况 8 无论从水平截面温度分布还是从沿炉膛高度方向上平均温度分布来看,都能达到较高的温度水平,满足锅炉低负荷稳燃的指标。

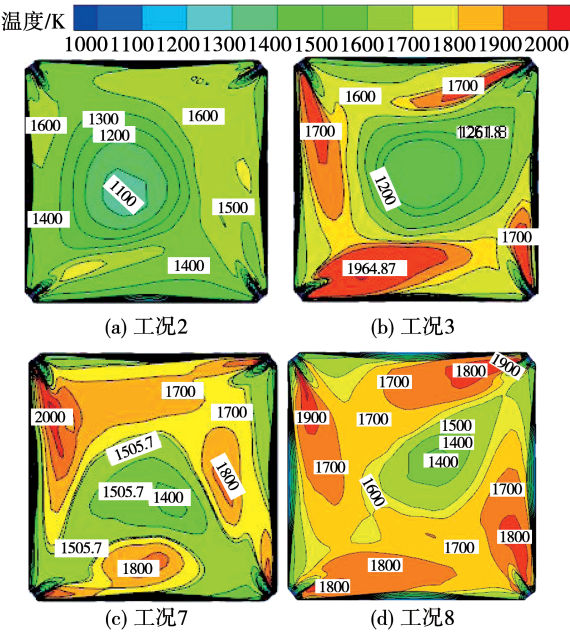


图 9 各低负荷工况下一次风水平截面温度分布

Fig. 9 Horizontal sectional temperature distribution of primary air under various low load working conditions

4 结 论

提出利用氢氧提升燃煤锅炉低负荷燃烧稳定性的方法,着重模拟分析了燃煤锅炉一次风掺混氢气和氧气对炉膛低负荷燃烧的影响。根据本文模拟数据,得出结论:

(1) 在锅炉低负荷运行时,一次风中掺混氢气

可以降低煤粉气流的着火热,改善煤粉的稳燃特性,提升炉内整体平均温度。掺混 5% 比例氢气,主燃区炉内截面平均温度最高为 1 603 K,比掺混氢气前温度高了 37 K;随着掺混氢气体积分数的增加,炉内平均温度又逐渐降低,这是由于氢气燃烧生成大量的水;当一次风中同时掺混氢气和氧气时,炉内温度水平得到进一步的提高,掺混 5% 比例氢气和 10% 比例氧气,主燃区炉内截面平均温度达到了 1 696 K,比未掺混氢气和氧气前温度提高了 130 K。

(2) 工况 8 在较高的氧气体积分数下,煤粉的着火特性得到改善,可以形成良好的切圆燃烧。工况 8 高温火炬长度最长、刚性最强、温度最高,火焰温度达到 1 800 K,火焰的延展性也最好。是该四角切圆锅炉低负荷下改造后较为理想的工况。

(3) 通过对燃煤锅炉一次风掺混氢气和氧气的模拟分析,验证了利用氢氧提升燃煤锅炉低负荷燃烧稳定性这一方法的可行性,为我国火电机组深度调峰提供新的思路。

参考文献:

[1] 张松岩,苗世洪,尹斌鑫,等.考虑火电深度调峰的多类型储能经济性分析[J].电力建设,2022,43(1):132-142.
ZHANG Song-yan, MIAO Shi-hong, YIN Bin-xin, et al. Economic analysis of multi-type energy storages considering the deep peak-regulation of thermal power units[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 132-142.

[2] 智佳佳,王海涛.350 MW 超临界燃煤机组协调及深度调峰控制技术优化[J].能源科技,2021,19(6):55-59.
ZHI Jia-jia, WANG Hai-tao. Optimization of coordination and deep peak shaving control technology for 350 MW supercritical coal-fired units[J]. Energy Technology, 2021, 19(6): 55-59.

[3] 张广才,周 科,柳宏刚,等.某超临界 600 MW 机组直流锅炉深度调峰实践[J].热力发电,2018,47(5):83-88.
ZHANG Guang-cai, ZHOU Ke, LIU Hong-gang, et al. Practice of deep peak load regulation for a 600 MW supercritical concurrent boiler[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 83-88.

[4] 钟礼今,邓 坚,孙伟杰,等.低负荷下燃烧器投运方式对锅炉性能的影响[J].动力工程学报,2015,35(9):693-698.
ZHONG Li-jin, DENG Jian, SUN Wei-jie, et al. Effects of burner operation mode on performance of the boiler under low load conditions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015,

- 35(9):693–698.
- [5] 付旭晨,郭 洋,于英利,等. 300 MW 等级锅炉变工况低负荷稳燃能力数值模拟与预测[J]. 热能动力工程,2020,35(5):112–118.
- FU Xu-chen, GUO Yang, YU Ying-li, et al. Numerical simulation and prediction on low load stable combustion of 300 MW grade unit boiler at off-design condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(5):112–118.
- [6] ROST R. Generation flexibilisation case studies: Jaenschwalde dried lignite fueled ignition and support firing system(FlexGen) & Moorburg USC power plant flexibilization(Moorflex)[C]//Germany:LEAG Company Lausitz Energie Kraftwerke AG, 2017.
- [7] 袁来运,钟文琪,陈 曦,等. 面向深度调峰的超临界煤粉锅炉变负荷燃烧三维数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3):535–541.
- YUAN Lai-yun, ZHONG Wen-qi, CHEN Xi, et al. Three-dimensional numerical simulation of variable load combustion of supercritical coal-fired boiler for deep peak load regulation[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2019, 49(3):535–541.
- [8] 秦小阳. 600 MW 超临界火电机组不投油深度调峰技术分析应用[J]. 中国电力(技术版), 2015, 4(5):36–39.
- QIN Xiao-yang. Analysis and applications of 600 MW supercritical thermal power units without oil depth peak-load regulation[J]. China Electric Power(Technical Edition), 2015, 4(5):36–39.
- [9] MARCEL R, FLORIAN M, FRANK O, et al. Flexibilization of steam power plants as partners for renewable energy systems[C]//Genoa, Italy:19th Power System Computation Conference, 2016.
- [10] 江志铭,张 妍,李越胜,等. 300 MW 四角切圆锅炉低负荷下燃烧特性数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3):182–188.
- JIANG Zhi-ming, ZHANG Yan, LI Yue-sheng, et al. Numerical simulation on combustion characteristics of a 300 MW tangentially fired boiler under low load[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3):182–188.
- [11] 田 娇,王 勇,乔晓磊,等. T 型煤粉锅炉富氧燃烧的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2013, 33(6):419–423, 436.
- TIAN Jiao, WANG Yong, QIAO Xiao-lei, et al. Numerical simulation on oxygen-enriched combustion of T-shaped pulverized coal-fired boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(6):419–423, 436.
- [12] ZHOU Hao, MO Gui-yuan, SI Dong-bo, et al. Numerical simulation of the NO_x emissions in a 1 000 MW tangentially fired pulverized-coal boiler: influence of the multi-group arrangement of the separated over fire air[J]. Energy & Fuel, 2011, 25(5):2004–2012.
- [13] REN Feng, LI Zheng-qi, LIU Guang-kui, et al. Numerical simulation of flow and combustion characteristics in a 300 MWe down-fired boiler with different overfire air angles[J]. Energy & Fuel, 2011, 25(4):1457–1464.
- [14] REHM M, SEIFERT P, MEYER B. Theoretical and numerical investigation on the EDC-model for turbulence-chemistry interaction at gasification conditions[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(2):402–407.
- [15] FANG Qing-yan, AMIR A B, Wei Yan, et al. Numerical simulation of multifuel combustion in a 200 MW tangentially fired utility boiler[J]. Energy & Fuel, 2012, 26(1):313–323.
- [16] 邓云天,李道林,潘卫国. 变磨煤机组下的墙式对冲燃煤锅炉炉内燃烧特性数值模拟[J]. 锅炉技术, 2020, 51(4):38–42.
- DENG Yun-tian, LI Dao-lin, PAN Wei-guo. Numerical simulation of combustion characteristics in wall opposed coal-fired boiler with variable pulverizer combination[J]. Boiler Technology, 2020, 51(4):38–42.
- [17] 孟 涛,邢小林,张 杰,等. 配风方式对燃煤锅炉掺烧污泥影响的数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1):263–271.
- MENG Tao, XING Xiao-lin, ZHANG Jie, et al. Numerical simulation study on the influence of air distribution mode on sludge mixing in coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1):263–271.
- [18] 张小桃,张程俞,黄雪琦,等. 生物质(气)耦合燃煤锅炉燃烧特性数值模拟[J]. 能源研究与管理, 2021(4):47–51, 57.
- ZHANG Xiao-tao, ZHANG Cheng-yu, HUANG Xue-qi, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of biomass(gas) coupled coal-fired boiler[J]. Energy Research and Management, 2021(4):47–51, 57.
- [19] 叶江明. 电厂锅炉原理及设备[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- YE Jiang-ming. Principles and equipment of power plant boiler[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2004.