

# 富氧燃烧对投运混煤锅炉低负荷稳燃性的影响

李可君, 李芳芹, 任建兴, 刘鑫

(上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 200090)

**摘要:**针对某650 MW超超临界燃煤锅炉在深度调峰过程中燃用大同烟煤时无法稳定燃烧的情况开展研究, 如何提高锅炉在低负荷运行中稳燃性的问题, 对原煤种进行掺混改良, 改变不同富氧燃烧配风方式, 利用计算流体力学模拟软件模拟了不同工况的炉内燃烧情况。模拟结果表明: 由于锅炉降低负荷运行增加了原煤种的着火难度, 固定碳含量低且挥发分高的煤种可以较好适应锅炉运行调整; 富氧燃烧可以提高锅炉低负荷运行时的出口烟温, 能满足后续脱硝处理的要求; 随着富氧燃烧程度的增大, 煤粉燃烧耗氧量增加, 每秒燃烧的煤粉颗粒数增加, 加剧了炉内的燃烧, 使燃烧更稳定; 当富氧浓度大于27%时, 不能高效提高炉内温度,  $\text{NO}_x$ 排放量增多; 当富氧浓度为27%时, 炉膛出口 $\text{NO}_x$ 排放量按6%  $\text{O}_2$ 折算为负增长的最小值, 是该锅炉低负荷投运较为理想的工况。

**关键词:**低负荷稳燃; 富氧燃烧; 深度调峰; 塔式锅炉

中图分类号: M621.2

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.011

[引用本文格式] 李可君, 李芳芹, 任建兴, 等. 富氧燃烧对投运混煤锅炉低负荷稳燃性的影响[J]. 热能动力工程, 2023, 38(5): 88-96. LI Ke-jun, LI Fang-qin, REN Jian-xing, et al. Influence of oxygen enriched combustion on low load combustion stability of mixed coal boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 88-96.

## Influence of Oxygen Enriched Combustion on Low Load Combustion Stability of Mixed Coal Boiler

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

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

**Abstract:** Aiming at the situation that Datong bituminous coal cannot be burned in a 650 MW ultra-supercritical coal-fired boiler stably during deep peak shaving, this paper studied how to improve the combustion stability of the boiler during low load operation. The raw coal is mixed and improved, and the air distribution mode of different oxygen-enriched combustion is changed. The combustion in the furnace under different conditions is simulated by using computational fluid dynamics simulation software. The simulation results show that the ignition difficulty of raw coal is increased due to the reduced load operation of the boiler, and the coal with low fixed carbon content and high volatile content can better adapt to the boiler operation adjustment; oxygen-enriched combustion can improve the outlet flue gas temperature of boiler under low load operation, and can meet the requirements of subsequent denitration treatment; as the degree of oxygen-enriched combustion increases, the oxygen consumption of pulverized coal combustion increases, and the number of pulverized coal particles burned per second increases, which intensifies the combustion in the furnace and makes the combustion more stable; when the oxygen-enriched concen-

收稿日期: 2022-06-26; 修订日期: 2022-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(52076126); 上海市科学技术委员会项目(20dz1205208)

**Fund-supported Project:** National Natural Science Foundation of China(52076126); Project of Shanghai Municipal Commission of science and Technology (20dz1205208)

作者简介: 李可君(1998-), 女, 上海电力大学硕士研究生.

通讯作者: 李芳芹(1976-), 女, 上海电力大学副教授.

tration is greater than 27% , the temperature in the furnace cannot be effectively raised , and the  $\text{NO}_x$  emission increases ; when the oxygen-enriched concentration is 27% , the  $\text{NO}_x$  emission at the furnace outlet ( 6%  $\text{O}_2$  ) is the minimum value of negative growth , which is an ideal condition for the boiler to be put into operation at low load .

**Key words:** stable combustion at low load , oxygen enriched combustion , deep peak shaving , tower type boiler

引 言

“十四五”期间,可再生能源在我国能源消耗中的占比会继续大幅增加,落后且高能耗的机组发电空间将进一步压缩<sup>[1]</sup>。在这种形势下,传统燃煤发电的比例应降低,以适应能源可持续发展的要求,这意味着燃煤机组应考虑进行深度调峰改造,采用更多的可再生发电功率输出。从发展趋势看,为实现 2030 年风光发电装机达到 12 亿 kW 以上,煤电平均负荷将进一步下降到 25% 左右<sup>[2-3]</sup>。这对燃煤机组提出了更高要求,如何实现大型机组在 25% 的低负荷运行下稳定燃烧,是现阶段国内专家学者研究的热门课题。

赵星海等人<sup>[4]</sup>通过通入富氧二次风的配风方式,改善了某 660 MW 锅炉在 30% 负荷下无法长时间稳定燃烧的问题。李宁等人<sup>[5]</sup>以亚临界 300 MW 机组为对象进行研究发现,增加  $\text{O}_2$  体积分数可以改善传热特性,增加煤粉燃烧的稳定性。吕洪坤等人<sup>[6]</sup>针对锅炉低负荷运行引起的出口烟温低等问题,通过提高锅炉运行氧量,有效提高了低负荷下炉膛出口烟温。丁乙崑等人<sup>[7]</sup>以 330 MW 锅炉为对象研究发现,最低不投油稳燃试验负荷可降至 30% ,实测燃烧器区域炉膛温度 1 483 K,且还有持续降低的潜力。基于前人的模拟研究发现,大部分研究都以单煤种进行锅炉改造优化,以往的模拟方法过于繁琐且改造规模庞大,需要耗费巨大财力、物力,增加了锅炉运行成本;另外,前人模拟研究的低负荷大多只降低至 30% ,不能满足现阶段国家深度调峰探索的需要。

本研究针对降负荷后锅炉稳燃性差及出口烟温低的问题,提出了改烧煤种和富氧燃烧的方案,即通过掺烧优质煤种改善煤粉燃烧特性,提高锅炉稳燃性。

一般来说,出口烟温达到 1 000 K 以上可以保证选择性催化还原法( Selective catalytic reduction,SCR)脱硝反应器的正常运行,在主燃区富氧燃烧提高炉膛的出口烟温,进而满足后续脱硝处理的正常运行。本模拟研究将混煤和富氧燃烧结合,同时对炉内的燃烧情况进行对比分析。为解决大同煤种在锅炉低负荷运行时无法稳定燃烧的情况,基于计算流体力学模拟软件( Computational fluid dynamics,CFD ),对大同煤种掺混鹤岗洗中煤,考察混煤在低负荷运行时的稳燃性,并探讨不同富氧燃烧配风方式对锅炉稳燃性的影响,以期为大型燃煤锅炉的深度调峰适应性提出一定的指导意见。

1 研究对象及模型建立

1.1 锅炉结构

以某超超临界 650 MW 机组为研究对象,该机组锅炉炉膛长、宽、高为 17.7,17.71 和 91.2 m。该四角切圆燃煤塔式锅炉结构及燃烧器布置如图 1 (a)所示。燃烧器采用四角切圆布置如图 1 (b)所示。由图 1(a)可知,一次风喷口共 8 层,从低到高依次记为 A,B1,B2,C1,C2,D,E,F,锅炉的某 1 层燃烧器处于备用状态,研究中将 F 层燃烧器关闭并设为壁面。二次风喷口共 14 层,由下至上分别记为 AA,AI,AB,B0,BC,C0,CD,DII,DE,EI,EII,EF,FI,FII,其中 DII,EI,EII,FI 为偏转二次风,偏转二次风的射入角度比一次风大,有助于形成风包粉的现象,起到加强煤粉气流刚性的作用。燃尽风喷口共 6 层 (BAGP1 ~3 和 UAGP1 ~3)。受热面主要包括低温过热器、高温过热器、低温再热器、高温再热器、二次高温再热器。由图 1(b)可知,一次风和二次风喷口交叉布置,燃烧器区域高度为 14.372 m。锅炉主要运行参数如表 1 所示。

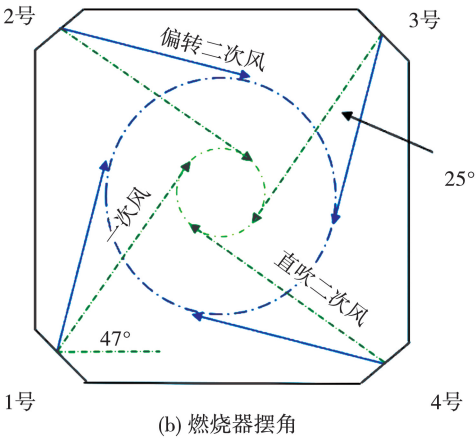
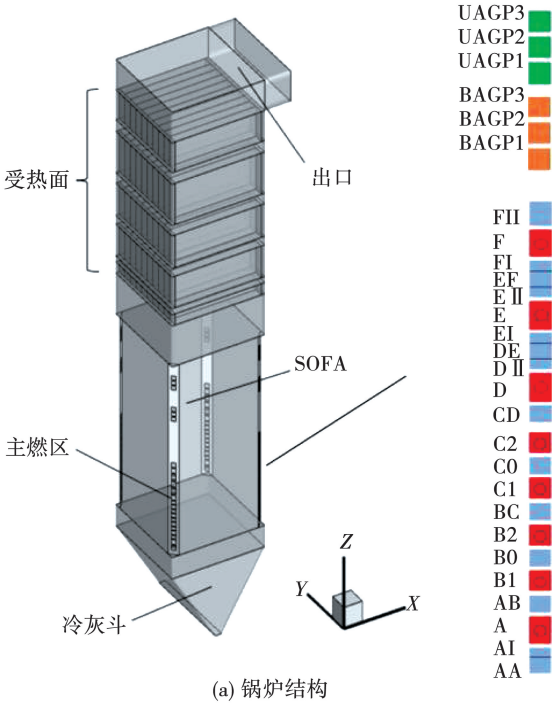


图 1 模拟对象示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulation object

表 1 锅炉运行参数

Tab.1 Boiler operating parameters

| 参数                                     | 数值    |
|----------------------------------------|-------|
| 过热蒸汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ | 1 794 |
| 过热蒸汽出口压力/MPa                           | 32.45 |
| 过热蒸汽出口温度/ $^{\circ}\text{C}$           | 605   |
| 再热蒸汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ | 1 452 |
| 再热蒸汽出口压力/MPa                           | 9.27  |
| 再热蒸汽出口温度/ $^{\circ}\text{C}$           | 623   |
| 一次风温/K                                 | 349   |
| 二次风温/K                                 | 621   |
| 燃尽风温/K                                 | 621   |
| 过量空气系数                                 | 1.15  |
| 给煤量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$    | 233.6 |

1.2 网格划分

根据锅炉实际尺寸建立模型并划分网格,如图 2 所示。锅炉模型采用分区划分,合理划分不同区域网格,其中主燃区为炉膛燃烧的主要场所,需要对该区域的网格进行加密处理,网格采用星形画法<sup>[8]</sup>。该画法可以有效减小伪扩散的几率,并且生成的网格扭曲度小,具有六面体网格稳定的特点。

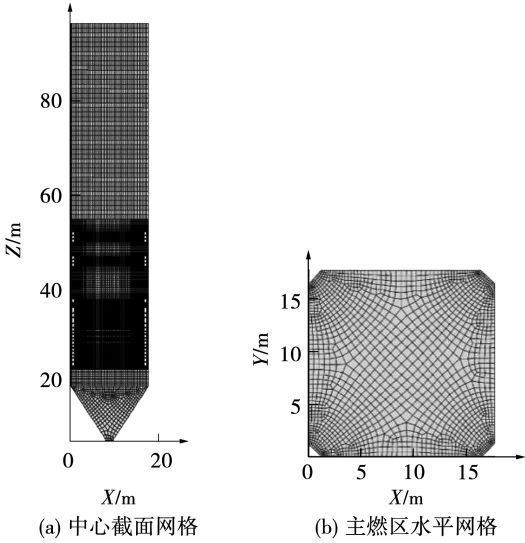


图 2 炉膛网格划分

Fig.2 Furnace grid division

为证明网格数无关性,分别对网格数为 67 万, 128 万和 192 万的模型进行模拟,模拟结果如图 3 所示。由图 3 可知,128 万和 192 万的模型模拟出来的温度水平差异不大,整体趋势基本一致,67 万网格的模型模拟结果差异较为明显,综合考虑计算的时间问题,选择 128 万网格作为最终模型。不同分辨率网格模拟得到的锅炉炉膛出口温度对比见表 2。

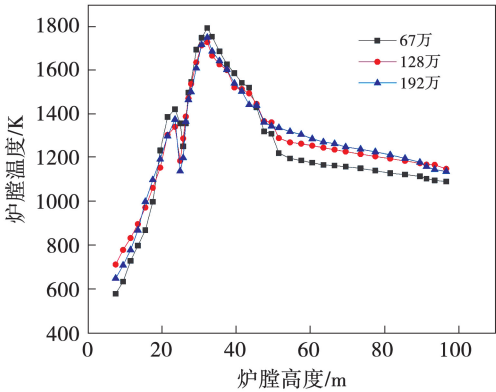


图 3 不同分辨率网格在炉膛高度上的温度差异

Fig.3 Temperature difference of different resolution grids at furnace height

表 2 网格数量无关性证明

Tab. 2 Grid independence verification

| 网格数<br>量/万 | 炉膛出口 O <sub>2</sub><br>体积分数/% | 炉膛出口<br>烟温/K | 炉膛出口 NO <sub>x</sub><br>质量浓度/mg·m <sup>-3</sup> |
|------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------------------------|
| 67         | 5.02                          | 1 055.89     | 740.74                                          |
| 128        | 5.75                          | 1 154.47     | 788.42                                          |
| 192        | 6.54                          | 1 159.23     | 801.04                                          |

1.3 数学模型

应用 CFD 流体力学模拟方法对锅炉模型进行数值模拟计算,气相湍流流动计算采用可实现的  $k-\varepsilon$  双方程湍流流动模型<sup>[9]</sup>,气相燃烧采用非预混模型<sup>[10]</sup>,挥发分燃烧采用混合分数-概率密度模型<sup>[11]</sup>,挥发分析出采用单步热解模型<sup>[12]</sup>,颗粒运动采用随机颗粒轨道模型<sup>[13]</sup>,焦炭燃烧采用扩散-动力控制反应速率模型<sup>[14]</sup>,燃烧过程中的辐射换热采用 P-1 辐射模型<sup>[15]</sup>。

在满负荷下该塔式锅炉出口烟气温度和 NO<sub>x</sub> 质量浓度为别为 1 154 K 和 788.42 mg/m<sup>3</sup> (6% O<sub>2</sub>) ,

与现场实测值 1 103 K 和 765.84 mg/m<sup>3</sup> (6% O<sub>2</sub>) 的误差分别为 3.89% 和 2.95% ,可以认为,所建立的几何模型及选用的数学模型能够模拟该 650 MW 燃煤塔式炉内的真实燃烧过程。

1.4 工况设计

表 3 为各煤种的煤质分析,混煤为大同烟煤和鹤岗洗中煤按照 1:1 比例混合而成。大同烟煤含碳量和固定碳含量高、发热量大,属于中高挥发分煤;鹤岗洗中煤含碳量和固定碳含量均较低、发热量小,属于高挥发分煤。两者混合正好解决了大同烟煤难燃的问题,能改善炉内的燃烧情况。表 4 为工况设置及各工况的配风方式,其中混煤成分与表 3 中一致。工况 1 用于验证模型的准确性;工况 2 用于考察大同烟煤低负荷燃烧的稳定性;工况 3 用于考察投入混煤低负荷燃烧是否优于工况 2;工况 4~7 为增强锅炉低负荷运行稳燃性而设置的不同 O<sub>2</sub> 体积分数燃烧的配风方式。锅炉满负荷运行时,投运 A, B, C, D, E 5 台磨煤机(7 层燃烧器);锅炉 25% 负荷运行时,投运 A, B 2 台磨煤机(3 层燃烧器)。

表 3 煤质分析

Tab. 3 Coal quality analysis

| 煤种    | 工业分析/%           |                   |                 |                 | 元素分析/%          |                 |                 |                 |                 | $Q_{\text{net,ar}}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
|-------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|
|       | $V_{\text{daf}}$ | $FC_{\text{daf}}$ | $A_{\text{ar}}$ | $M_{\text{ar}}$ | $C_{\text{ar}}$ | $H_{\text{ar}}$ | $O_{\text{ar}}$ | $N_{\text{ar}}$ | $S_{\text{ar}}$ |                                                  |
| 大同烟煤  | 24.7             | 64.2              | 11.7            | 3.0             | 70.8            | 4.5             | 7.1             | 0.7             | 2.2             | 27.8                                             |
| 鹤岗洗中煤 | 37.0             | 34.2              | 34.7            | 11.0            | 44.5            | 3.0             | 5.9             | 0.7             | 0.2             | 17.4                                             |
| 混煤    | 30.0             | 49.3              | 22.6            | 7.0             | 58.2            | 3.7             | 6.1             | 0.7             | 1.5             | 22.6                                             |

表 4 运行过程中的主要边界条件参数

Tab. 4 Main boundary condition parameters during operation

| 工况 | 负荷/% | 煤种   | 富氧浓度<br>/% | 每只燃烧器给<br>煤量/kg·s <sup>-1</sup> | 一次风速/<br>m·s <sup>-1</sup> | 二次风速/<br>m·s <sup>-1</sup> | 燃尽风速/<br>m·s <sup>-1</sup> |
|----|------|------|------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1  | 100  | 大同烟煤 | 21         | 1.831                           | 24.39                      | 40.33                      | 40.33                      |
| 2  | 25   | 大同烟煤 | 21         | 1.111                           | 16.26                      | 20.57                      | 22.43                      |
| 3  | 25   | 混煤   | 21         | 1.365                           | 16.46                      | 20.83                      | 22.71                      |
| 4  | 25   | 混煤   | 21         | 1.365                           | 18.19                      | 32.84                      | 0                          |
| 5  | 25   | 混煤   | 24         | 1.365                           | 18.19                      | 27.15                      | 0                          |
| 6  | 25   | 混煤   | 27         | 1.365                           | 18.19                      | 23.34                      | 0                          |
| 7  | 25   | 混煤   | 30         | 1.365                           | 18.19                      | 21.28                      | 0                          |

2 模拟结果与分析

2.1 空气燃烧工况的温度场分布特性

图 4 为锅炉变负荷投运大同烟煤(工况 1,2)和锅炉低负荷投运混煤(工况 3)的炉膛纵截面和水平截面温度云图。从图 4 中可以看到,当锅炉满负荷投运大同烟煤时(工况 1),炉膛中心能形成较好火焰对称,高温区域集中在燃烧器喷口处及上部燃尽风区域,其中心火焰温度能达到 1 600 K 左右,出口烟温达到 1 200 K 左右,满足最低稳燃温度的条件,并且高温烟气足以驱动后续脱硝处理。当锅炉降为 25% 负荷投运大同烟煤时(工况 2),炉膛的高温区域仅在燃烧器喷口处,形成局部高温,出口烟温只有

900 K 左右,后续将很难达到启动 SCR 反应器的要求,不符合深度调峰的要求。另外,从燃烧器水平截面温度云图看出,当大同烟煤在低负荷燃烧时,由于给煤量减少,一次风速降低以及自身固定碳含量高的原因,着火严重推迟,火焰长度短,燃烧情况很差,容易引起熄火等不良问题,极不稳定。当锅炉为 25% 负荷投运混煤时(工况 3),炉膛中心温度较工况 2 有所提升,高温区域有所扩大,火焰长度增长。混煤相比大同烟煤有较低的含碳量和固定碳含量,并且属于高挥发分煤,改善了低负荷投运大同烟煤着火推迟的问题,也更容易燃烧和燃尽,但是工况 3 的出口烟温仍然不满足后续脱硝的温度反应窗口。

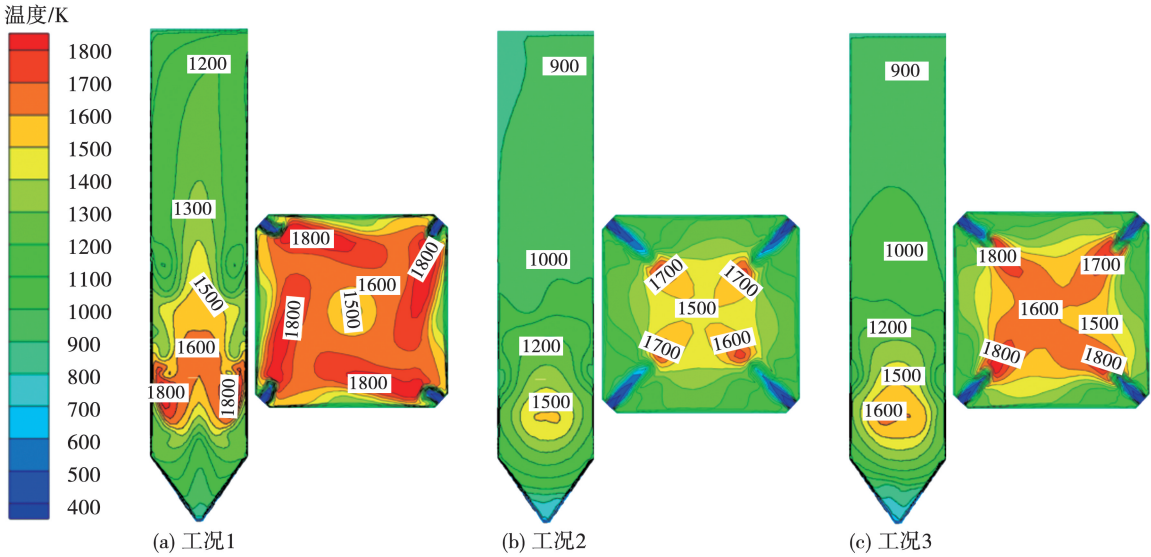


图 4 工况 1 ~ 3 炉膛纵截面和水平截面 ( $Z = 27.83\text{ m}$ ) 温度云图

Fig. 4 Temperature nephograms of furnace longitudinal section and horizontal section ( $Z = 27.83\text{ m}$ ) under conditions 1 to 3

2.2 富氧燃烧工况的温度场分布特性

图 5 为锅炉低负荷投运混煤工况的沿程温度分布。无论空气燃烧工况还是富氧燃烧工况,煤粉燃烧持续放热,温度在 B2 层燃烧器处 ( $27.83\text{ m}$ ) 达到峰值,随后因为二次风以大直径圆的方式高速喷入炉膛而大幅降低,形成风包粉,增强了煤粉气流的刚性,引起炉内流体的扰动,延长了煤粉在炉内的停留时间并且使空气与煤粉充分混合。由工况 3 的温度曲线可知,打开燃尽风喷口高温烟气到达燃尽风区

后,由于燃尽风温度较低且流量较大,使烟气温度下降幅度增加,烟气中的 CO 及未燃尽煤粉继续燃烧放热,使得烟气温度下降幅度减小,之后的下降幅度又增大,离开进风区后烟气温度趋于定值。在增加富氧浓度后,需要保证富氧燃烧的主燃区风量与空气燃烧的近似相等,每提高 1% 氧量,可考虑降低 5% 空气量<sup>[16]</sup>,所以对于富氧燃烧工况将关闭燃尽风,对一、二次风率进行适当的调整。由图 5 中可知,当关闭燃尽风后,炉膛上方受热面区域的

烟气温度下降得更缓慢,A 层一次风喷口处的温度波动比空气燃烧工况小;一、二次风率相应提高后,增加了煤粉气流的刚性和卷吸能力,减少掉落至冷灰斗的细煤粉量,同时增加了煤粉的燃尽率,使煤粉能更好地放热,即富氧燃烧工况更能适应锅炉低负荷运行的变动。富氧燃烧工况的炉膛出口烟温达到 1 000 K 以上,能够满足锅炉深度调峰对烟温的要求。

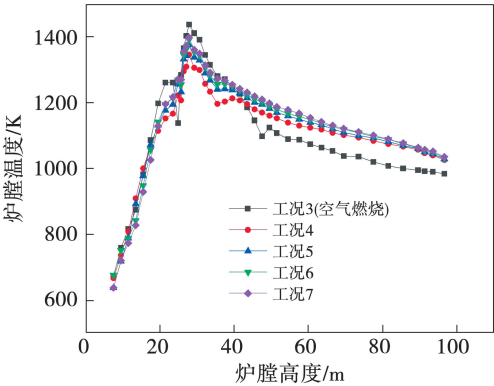


图 5 锅炉低负荷投运混煤工况的沿程温度分布  
Fig. 5 Temperature distribution along the mixed coal condition of boiler at low load

富氧浓度的增加使煤粉反应更加剧烈, $O_2$  消耗将会加快,炉内火焰燃烧特性得到改善,生成  $CO_2$  的量将会增多,释放更高热量,缩短燃尽时间,更有利于煤粉快速燃烧,使得煤粉更容易被点燃,即炉膛温度随富氧浓度的增加而增加。以 B2 燃烧器喷口处 (27.83 m) 水平截面为基准,富氧浓度分别从 21% 提升到 24%、从 24% 提升到 27%、从 27% 提升到 30%,炉膛温度分别提高了 30.23,14.74 和 7.16 K,即随着富氧浓度的增加,炉内同一位置温度升高的幅度下降。

2.3 富氧燃烧工况的组分场分布特性

图 6 为锅炉低负荷投运混煤工况的沿程  $O_2$  体积分数分布。由图 6 中可知,在主燃区时, $O_2$  不断投入,且与煤粉发生燃烧反应被大量消耗,致使  $O_2$  体积分数较低且出现波动<sup>[17]</sup>。由工况 3 的  $O_2$  体积分分数曲线可知,打开燃尽风喷口后,从炉膛上方到水平烟道出口,过量的燃尽风与煤粉充分燃烧, $O_2$  体积分分数先显著上升后逐步降低并趋于平稳。富氧燃烧的炉内  $O_2$  体积分分数普遍比空气燃烧工况的高,前

者的一、二次风率都较后者有一定的提升,风粉比提高,增加煤粉的着火热,导致耗氧量减少。但随着富氧浓度的增加,空气量的降低引起煤粉着火热降低,更有利于煤粉的燃烧,即炉内的  $O_2$  体积分分数随着富氧浓度的增加而减少。

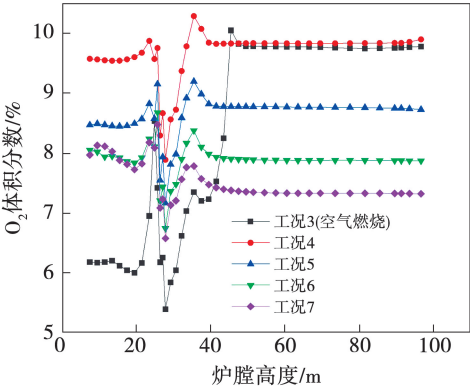


图 6 锅炉低负荷投运混煤工况的沿程  $O_2$  体积分分数分布  
Fig. 6 Distribution of  $O_2$  volume fraction along the mixed coal condition of boiler at low load

图 7 为锅炉低负荷投运混煤工况的沿程  $NO_x$  质量浓度分布。一般在高温火焰区热力型  $NO_x$  约占 20%,对于燃料型  $NO_x$  约占 75%~80%。空气燃烧工况生成的  $NO_x$  较高,一方面因为 N-O 的反应温度高,加快化学反应速度;另一方面因为二次风速较低,其旋流强度和刚性较小,提前与一次风混合,导致燃烧器区域燃料型  $NO_x$  大量生成。但在燃尽风区域,由于还原性气氛的增强将生成的  $NO_x$  还原成低价氮化物。锅炉低负荷运行时燃烧器的射流刚性较差,增加一次风率可减缓一次风与二次风的混合,使得煤粉能够到达炉膛中部低  $O_2$  体积分分数区燃烧,减少了煤粉燃烧初期  $NO_x$  的生成,即富氧燃烧工况生成的  $NO_x$  少于空气燃烧工况。富氧浓度的增加引起了 N-O 化学反应中反应物浓度的增加,即煤粉燃烧生成的  $NO_x$  质量浓度随着富氧浓度提高而提高。各工况按 6%  $O_2$  折算的出口  $NO_x$  质量浓度分别为 698.72,712.10,705.68 和 716.90  $mg/m^3$ ,当富氧浓度从 24% 增加到 27% 时,炉膛出口  $NO_x$  排放量(6%  $O_2$ ) 出现负增长。

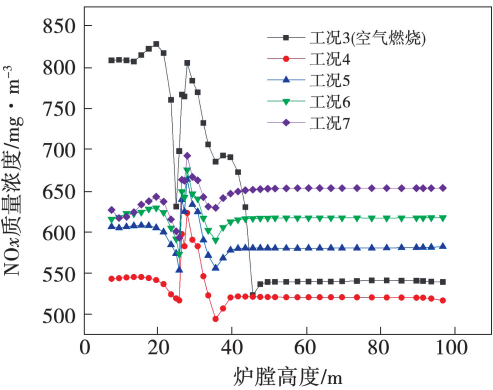


图7 锅炉低负荷投运混煤工况的沿程 NO<sub>x</sub> 质量浓度分布

Fig. 7 Distribution of NO<sub>x</sub> concentration along the mixed coal condition of boiler at low load

2.4 富氧燃烧工况的稳燃性分析

图8 为各工况在 A 层燃烧器喷口处水平截面最高温度分布。由图 8 可知,工况 2 达到最高温度需要的距离最长,加入优质煤种改善其煤质特性后,着火点距离缩短且最高温度有所升高;增加富氧浓度后,着火距离进一步缩短到 1.5 m 左右,当富氧浓度为 24% 时,着火点距离喷口最近,高温容易烧坏喷嘴。富氧燃烧各工况中达到最高温度的先后顺序为工况 5,工况 7,工况 4,工况 6。

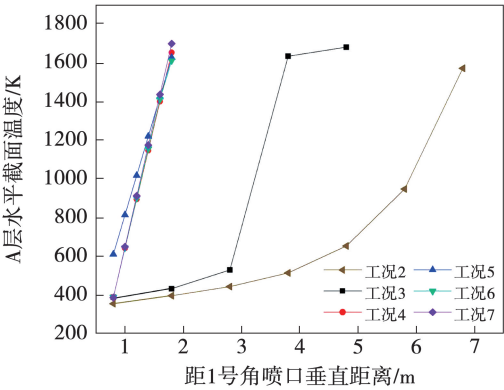


图8 各工况在 A 层燃烧器喷口处水平截面最高温度分布

Fig. 8 Maximum temperature distribution of horizontal section at burner nozzle of layer A under various working conditions

图 9 为 A 层燃烧器喷口每秒燃烧的煤粉颗粒数。由于最下层燃烧器为锅炉燃烧中最不稳定的区

域,该指标数值越大说明下层燃烧器燃烧及时且充分,结合煤粉燃烧能达到的最高温度分布可以分析锅炉的稳燃性。从图 9 中可以看到,富氧燃烧工况的燃烧效率优于工况 2 和工况 3,当富氧浓度为 21% (工况 4) 时,从 A 层燃烧器喷口喷出的煤粉每秒燃烧的颗粒数最多,该工况下一次风率小,随着富氧浓度增加,空气量减少,一次风率增加,风煤比随之增加,增加了着火热。由于这样对比不能得出富氧浓度对稳燃性的影响,因此需要统一为 23% 一次风率再作对比。从图 9 中可见,统一一次风率后,煤粉每秒燃烧的颗粒数随着富氧浓度的增加而增加。

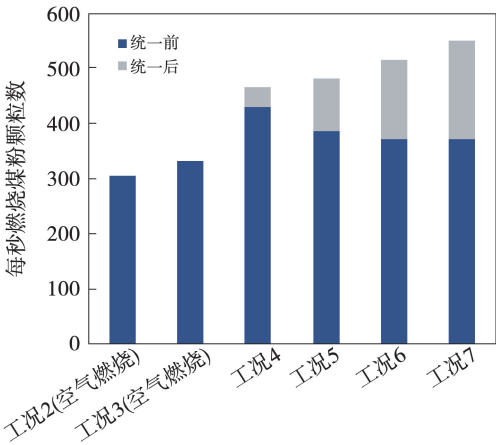


图9 各工况统一一次风率前后 A 层燃烧器喷口每秒燃烧的煤粉颗粒数

Fig. 9 Number of pulverized coal particles burned per second at burner nozzle of layer A before and after unifying primary air rate under various working conditions

综上所述,当富氧浓度增加到 27% 时,炉膛出口温度明显升高,炉内的 O<sub>2</sub> 利用率较高,炉膛出口的 NO<sub>x</sub> 质量浓度最低,且对燃烧最不稳定的下层燃烧器有一定的保护作用,煤粉燃烧时快速达到最高温且高温火焰不会烧坏喷嘴。

3 结 论

基于 CFD 流体力学模拟软件,考察优良混煤在低负荷运行时的稳燃性,探讨不同富氧燃烧配风方式对锅炉稳燃性的影响,并与空气燃烧工况做对比,得出如下结论:

(1) 当锅炉降至低负荷运行时,由于给煤量和空气量的降低,会造成一次风携粉能力下降、着火推迟、燃烧情况变差等问题,而固定碳含量低且挥发分高的煤种可以较好适应锅炉运行调整。

(2) 富氧燃烧工况可以提高锅炉低负荷运行时出口烟温并降低  $\text{NO}_x$  质量浓度。提高炉内富氧浓度后,A 层一次风喷口处附近的温度波动缓于空气燃烧工况,炉内火焰燃烧特性得到改善;富氧燃烧提高了风粉比,增加煤粉的着火热,耗氧量低于空气燃烧工况,因此  $\text{NO}_x$  生成量低于空气燃烧。

(3) 当富氧浓度从 24% 提升到 27% 时,炉膛出口的  $\text{NO}_x$  质量浓度为负增长,当富氧浓度超过 27% 时,对提高炉内温度的作用不大, $\text{NO}_x$  排放量增多。所以当富氧浓度为 27% 时是该锅炉低负荷投运较为理想的工况。

(4) 富氧燃烧有效提高一、二次风喷口交叉布置的超超临界锅炉低负荷投运混煤的稳燃性,为其他容量锅炉通过增加或减少富氧浓度实现低负荷稳燃提供了可能。

参考文献:

[1] 葛挺.“十四五”期间火电技术发展方向分析[J].河南电力,2020(S2):1-3.  
GE Ting. Analysis of the development direction of thermal power technology during the "14th Five-Year Plan" period [J]. Henan Electric Power,2020(S2):1-3.

[2] 王圣.我国“十四五”煤电发展趋势及环保重点分析[J].环境保护,2020,48(Z2):61-64.  
WANG Sheng. Analysis on the development trend of coal power and the key points of environmental protection during the "14th Five-Year Plan" in China [J]. Environmental Protection, 2020, 48(Z2):61-64.

[3] 王伟胜.我国新能源消纳面临的挑战与思考[J].电力设备管理,2021(1):22-23.  
WANG Wei-sheng. Challenges and thoughts of new energy consumption in China[J]. Power Equipment Management,2021(1):22-23.

[4] 赵星海,白贵生,贺楠,等.不同富氧配风方式下墙式切圆锅炉低负荷燃烧特性数值模拟[J].热能动力工程,2018,33(7):64-69.  
ZHAO Xing-hai, BAI Gui-sheng, HE Nan, et al. Numerical simulation of low load combustion characteristics of wall tangentially fired

boiler with different oxygen enriched air distribution modes [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(7):64-69.

[5] 李 宁,葛家楠,汪健生.300 MW 机组四角切圆煤粉炉空气与富氧燃烧对比模拟研究[J].热力发电,2022,51(6):122-131.  
LI Ning, GE Jia-nan, WANG Jian-sheng. Comparative simulation of air and oxygen-enriched combustion in a 300 MW tangentially fired pulverized coal boiler [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(6):122-131.

[6] 吕洪坤,童家麟,齐晓娟,等.对冲燃烧锅炉低负荷运行优化数值模拟研究[J].热能动力工程,2020,35(7):89-94.  
LYU Hong-kun, TONG Jia-lin, QI Xiao-juan, et al. Numerical simulation of low-load operation optimization for opposite firing boilers [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7):89-94.

[7] 丁乙崑,吴剑波,陈是楠,等.330 MW 锅炉低负荷下数值模拟及试验研究[J].锅炉技术,2021,52(6):29-33.  
DING Yi-yin, WU Jian-bo, CHEN Shi-nan, et al. Numerical simulation and experimental study of 330 MW boiler under low load [J]. Boiler Technology, 2021, 52(6):29-33.

[8] 秦 岭,班金城.电站锅炉数值计算建模及网格划分的探讨[J].能源工程,2009(4):13-16.  
QIN Ling, BAN Jin-cheng. Discussion on numerical simulation modeling and mesh generation for a boiler in power plant [J]. Energy Engineering, 2009(4):13-16.

[9] 陈 铭.电厂锅炉掺烧污泥燃烧特性及数值模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.  
CHEN Ming. Combustion characteristics and numerical simulation of blended sludge in power plant boilers [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[10] 袁来运.超临界煤粉锅炉变负荷燃烧的数值模拟及配风优化[D].南京:东南大学,2019.  
YUAN Lai-yun. Numerical simulation of variable load combustion of supercritical pulverized coal boiler and optimization of air distribution [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[11] 敬 赛.300 MW 切圆锅炉低氮燃烧数值模拟[D].北京:华北电力大学,2019.  
JING Sai. Numerical simulation of low nitrogen combustion in 300 MW tangential boiler [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

[12] 邵伟涛.燃煤电站锅炉低氮燃烧与 SCR 脱硝协同优化技术研究[D].上海:上海电力学院,2017.  
SHAO Wei-tao. Research on coordinated optimization of low nitrogen combustion and SCR denitrification for coal-fired boilers in power plant [D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Pow-

er,2017.

[13] 张宏伟,王 波,袁益超,等.900 MW 超临界锅炉混煤燃烧的数值模拟[J]. 锅炉技术,2014,45(6):47-52.  
ZHANG Hong-wei,WANG Bo,YUAN Yi-chao,et al. Numerical simulation of mixed coal combustion in 900 MW supercritical boiler[J]. Boiler Technology,2014,45(6):47-52.

[14] 张小桃,段佛元,黄 勇,等.660 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃数值模拟[J]. 热力发电,2020,49(3):38-44.  
ZHANG Xiao-tao,DUAN Fo-yuan,HUANG Yong,et al. Numerical simulation on biomass gas reburning in a 660 MW coal-fired boiler[J]. Thermal Power Generation,2020,49(3):38-44.

[15] 黄文静,缪正清,王次成,等.300 MW 四角切圆煤粉锅炉低氮燃烧的数值模拟研究[J]. 锅炉技术,2014,45(3):39-43.  
HUANG Wen-jing,MIU Zheng-qing,WANG Ci-cheng,et al. Numerical simulation of low nitrogen combustion in 300 MW tangen-

tially fired pulverized coal boiler[J]. Boiler Technology,2014,45(3):39-43.

[16] 赵星海,白贵生. 墙式切圆锅炉分级富氧燃烧对 NO<sub>x</sub> 生成量影响的数值模拟[J]. 热力发电,2017,46(5):63-68.  
ZHAO Xing-hai,BAI Gui-sheng. Numerical study on effect of staged oxy-fuel combustion on NO<sub>x</sub> production in wall type tangentially fired boiler [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5):63-68.

[17] 孙倩倩,刘迎春,卿 山,等.600 MW 机组煤粉混燃生物质气锅炉燃烧特性研究[J]. 热力发电,2021,50(5):75-80.  
SUN Qian-qian,LIU Ying-chun,QING Shan,et al. Combustion characteristics of a 600 MW unit boiler co-firing coal with biomass gas[J]. Thermal Power Generation,2021,50(5):75-80.

( 刘 颖 编 辑 )

( 上接第 56 页 )

[15] BORGHESI G,KRISMAN A,LU T,et al. Direct numerical simulation of a temporally evolving air/n-dodecane jet at low-temperature diesel-relevant conditions[J]. Combustion and Flame,2018,195:183-202.

[16] MINAMOTO Y,CHEN J H. DNS of a turbulent lifted DME jet flame[J]. Combustion and Flame,2016,169:38-50.

[17] CHEN J H,CHOUDHARY A,DE-SUPINSKI B,et al. Terascale direct numerical simulations of turbulent combustion using S3D[J]. Computational Science & Discovery,2009,2(1):015001.

[18] PASSOT T,POUQUET A. Numerical simulation of compressible homogeneous flows in the turbulent regime[J]. Journal of Fluid Mechanics,1987,181:441-466.

[19] ZHANG F,LIU H F,YU R,et al. Direct numerical simulation of H<sub>2</sub>/air combustion with composition stratification in a constant volume enclosure relevant to HCCI engines [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2016,41(31):13758-13770.

[20] BHAGATWALA A,LUO Z,SHEN H,et al. Numerical and experimental investigation of turbulent DME jet flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2015,35(2):1157-1166.

[21] ZHAO Z,CHAOS M,KAZAKOV A,et al. Thermal decomposition reaction and a comprehensive kinetic model of dimethyl ether [J]. International Journal of Chemical Kinetics,2008,40(1):1-18.

[22] ECHEKKI T,CHEN J H. High-temperature combustion in autoigniting non-homogeneous hydrogen/air mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2002,29(2):2061-2068.

( 丛 敏 编 辑 )