

水煤浆 MILD 燃烧数值模拟研究

段艳松,张立麒,毛志慧,祝鑫阳,胡艺,郑楚光
(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室,湖北武汉 430074)

摘要:为解决水煤浆常规燃烧存在的运行稳定性差等问题,以 IFRF 炉为研究对象,采用数值模拟方法尝试对水煤浆燃料进行了 MILD 燃烧研究。结果表明,在燃料输入功率不变的条件下,水煤浆 MILD 燃烧相对于常规旋流燃烧,流场的回流区域更大,烟气循环更加强烈,整体的炉膛温度更低,分布更加均匀,峰值温度最高降低了 227 K,燃烧反应速率更慢,燃烧反应区面积存在区域更大,整个炉膛基本处于低氧氛围下,尾部烟气中的 NO_x 排放降低了 50% 以上。此外,水煤浆浓度的改变对炉膛流场几乎没有影响,但可以降低炉膛整体温度以及尾部烟气中 NO_x 排放。

关键词:水煤浆;MILD 燃烧;常规旋流燃烧; NO_x 排放;数值模拟

中图分类号:TQ534 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)04-0036-06

Numerical simulation of MILD combustion on coal-water slurry

Duan Yansong, Zhang Liqi, Mao Zhihui, Zhu Xinyang, Hu Yi, Zheng Chuguang

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor operation stability of CWS (coal-water slurry) combustion, the MILD (moderate or intense low oxygen dilution) combustion characteristics of CWS were studied numerically based on the pilot-scale furnace of IFRF. Results show that under the same fuel input, the MILD combustion of CWS has extensive backflow region than the conventional swirl combustion, more intense flue gas circulation, lower and more uniform distribution of furnace temperature. The maximum peak temperature is reduced by 227 K. The rate of combustion reaction is slower, and the area of combustion reaction zone is larger. The whole furnace is in a low oxygen atmosphere, and the emission of NO_x is dramatically reduced by more than 50%. In addition, different concentrations CWS have little effect on flow distribution, but it can lower the temperature in the whole furnace and reduce the final NO_x emission.

Key words: coal-water slurry (CWS); MILD combustion; conventional swirl combustion; NO_x emission; numerical simulation

0 引 言

MILD (moderate or intense low oxygen dilution) 燃烧技术被誉为“21 世纪最有前景的燃烧技术之一”^[1-2]。相比常规燃烧技术, MILD 燃烧具有反应速率低、局部放热少、热流分布均匀、燃烧峰值温度低等优势,可以达到较高的燃烧效率以及较低的污染物排放^[3]。因此,该技术提出后受到了业界的广泛关注,研究者们分别对甲烷、天然气等气体燃

料^[4-5],以及乙醇、丙酮、庚烷等液体燃料^[6]的 MILD 燃烧开展了研究,发现由于 MILD 燃烧稳定性好,其降低 NO_x 和 CO 排放的优势不随炉温、燃料类型和燃料热值的变化而改变,且高速射流可以实现燃料和氧化剂快速混合,降低 NO_x 排放和峰值温度。荷兰国际火焰研究基金 (IFRF)^[7-9]、Mei^[10] 和 Suda^[11] 等通过试验或数值模拟手段研究了煤粉的 MILD 燃烧,发现煤粉 MILD 燃烧的峰值温度下降明显,且 NO 的排放下降显著。

收稿日期:2017-06-12;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.005

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFE0102500)

作者简介:段艳松(1993—),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事 MILD 燃烧方面的研究。通讯作者:张立麒,教授,博士。E-mail:lqzhang@mail.hust.edu.cn

引用格式:段艳松,张立麒,毛志慧,等.水煤浆 MILD 燃烧数值模拟研究[J].洁净煤技术,2017,23(4):36-41,46.

Duan Yansong, Zhang Liqi, Mao Zhihui, et al. Numerical simulation of MILD combustion on coal-water slurry[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4):36-41, 46.

通常要实现 MILD 燃烧需要将空气预热到 1 000 ℃ 以上,并配合高速射流以形成强烈的烟气卷吸,尽管现有研究表明,无论气体、液体还是固体燃料,都可以实现 MILD 燃烧,但从 MILD 燃烧的实现方式而言,该技术更适用于气体或液体燃料。

水煤浆作为一种高效、清洁的煤基燃料,具有燃烧效率高、污染物排放低、廉价等优点^[12]。但在长期的运行和实践中发现,水煤浆常规燃烧存在运行稳定性差、运行负荷不易调节、燃烧不稳定、炉膛温度不均匀、容易熄火、积灰等问题^[13]。如能将 MILD 燃烧技术应用于水煤浆燃料的燃烧,可望解决水煤浆初期着火困难、燃烧不稳定、温度不均匀等问题,同时还可极大地降低 NO_x 等污染物排放。本文将采用数值模拟方法进行了水煤浆 MILD 燃烧研究。

1 模拟对象与方法

1.1 炉膛结构及试验条件

以 Weber 等^[8]设计的 IFRF 试验炉为研究对

象,其几何结构和尺寸如图 1 所示。炉长为 6.25 m,横截面为 2 m×2 m。一次风喷口和二次风喷口内径分别为 0.125 m 和 0.027 3 m。MILD 燃烧试验中水煤浆通过位于中心两侧的一次风喷口进入炉膛,二次风通过中心处的二次风喷口进入炉膛内。试验数据的测点分布在如图 1 中的 7 个不同位置的截面。水煤浆进行旋流燃烧的旋流燃烧炉以 Weber 设计的旋流稳定燃烧炉为研究对象^[14],其主体几何结构和尺寸与前者相同,仅燃烧器和尾部出口有变化,如图 2 所示,燃烧器包括中心处的 2 个导管,分别通入水煤浆燃料流以及旋流氧化剂流。

1.2 模拟方法

根据炉膛结构的对称性,对 1/4 试验炉进行建模和模拟,MILD 燃烧模型网格总数约为 520 000,旋流燃烧模型网格数约为 570 000,对靠近燃烧器和炉膛中心处网格进行加密。为便于对比验证,试验所用煤为 Guasare 煤^[15],元素分析与工业分析见表 1。采用平均粒径为 42 μm 的 Rosin-Rammler 分布函数

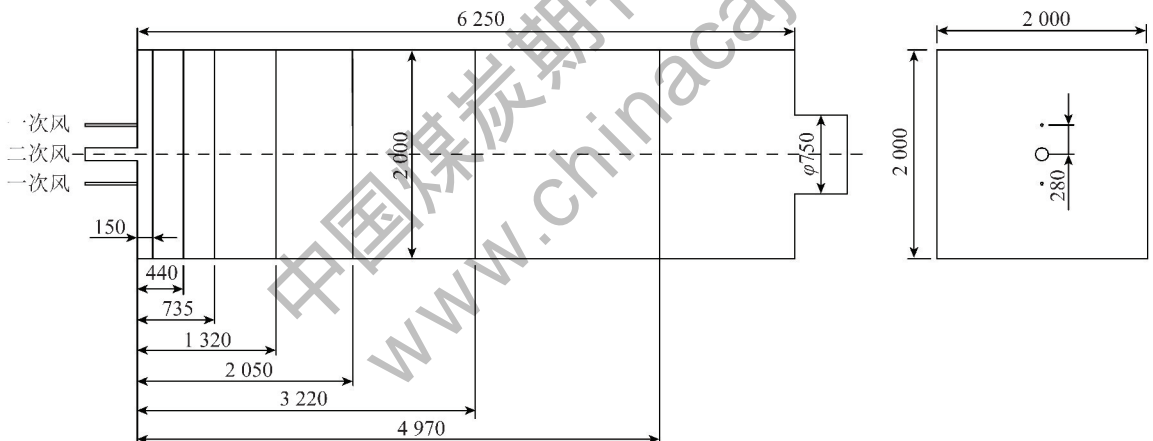


图 1 MILD 燃烧试验炉示意

Fig. 1 Structure of the MILD combustion furnace

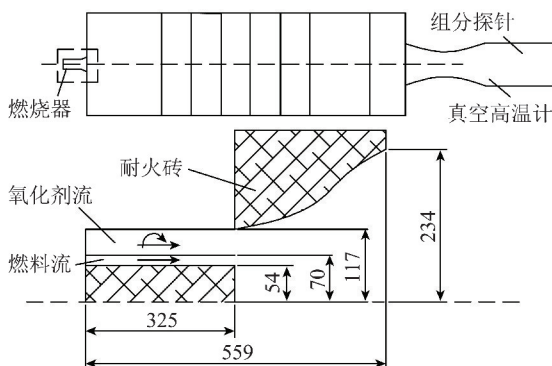


图 2 旋流燃烧试验炉示意

Fig. 2 Structure of the swirl combustion furnace

描述粒径分布,在 10 ~ 300 μm 范围内划分为 20 个粒径等级。MILD 燃烧湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,辐射换热采用 DO 模型。化学湍流相互作用模型采用 EDC 模型,煤粉挥发分模型采用双方程竞争模型。旋流燃烧湍流模型采用可实现的 $k-\varepsilon$ 模型及标准壁面函数,壁面温度设为恒温 1 300 K。化学湍流相互作用模型采用 FR/RD 模型。Liu 等^[16]发现 FR/RD 相对于 EDC 模型能更好的预测温度场和着火延迟。煤中挥发分析出后,焦炭会与周围气体发生反应,因此煤粉燃烧模型采用多表面反应模型。具体参数设置见表 2(A 为指前因子, E_a 为活化能)。

表1 元素分析与工业分析
Table 1 Proximate and Ultimate analysis

工业分析/%				元素分析/%					低位发热值/ (MJ·kg ⁻¹)
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{daf}	H_{daf}	O_{daf}	N_{daf}	S_{daf}	
2.9	3.3	37.1	56.7	81.6	5.5	10.7	1.5	0.6	31.74

表2 模拟所用的机理参数
Table 2 Combustion mechanism

参数	反应	$A/(kmol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1})$	$E_a/(kJ \cdot mol^{-1})$
碳表面反应机理	$C(s) + 0.5O_2 \longrightarrow CO$	5×10^{-3}	74
	$C(s) + CO_2 \longrightarrow 2CO$	6.35×10^{-3}	162
	$C(s) + H_2O \longrightarrow CO + H_2$	1.92×10^{-3}	147
容积燃烧反应机理	$vol + 1.471O_2 \longrightarrow 1.38CO + 2.069H_2O + 0.041N_2$	2.119×10^{11}	202.7
	$CO + 0.5O_2 \longrightarrow CO_2$	2.239×10^{12}	170
	$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$	2.75×10^9	84
	$CO_2 + H_2 \longrightarrow CO + H_2O$	6.81×10^8	114
	$H_2 + 0.5O_2 \longrightarrow H_2O$	9.87×10^8	31

计算中采用 SIMPLE 算法求解压力-速度的耦合,压力采用 PRESTO! 算法,动量、湍流动能、湍流耗散率、组分输运和能量均采用二阶迎风格式。除了残差达到预期的要求外,通过监视燃烧器所在平面的温度和氧气含量,当它们的数值基本不发生变化时则认为计算收敛。 NO_x 的形成仅考虑燃料型 NO_x 和热力型 NO_x 。考虑到湍流及温度波动的影响,采用 β -PDF 函数,NO 形成模型的具体细节可以参考文献[17]。水煤浆中水分的蒸发采用湿燃烧法,认为煤的存在对水的蒸发过程没有影响,且认为浆滴中的水分均匀地分布在浆滴所占的空间中[18]。对于水煤浆燃烧过程,由于炉温较高,水分蒸发迅速,其水分蒸发时间占燃尽时间的比例很低,在1%的数量级。因此,在对水煤浆燃烧过程进行数值模拟计算时,可以认为水分进入炉膛后就立刻蒸发完毕,但其蒸发所需汽化潜热包括在整个计算

过程中[19]

1.3 模型验证

为验证数值模型的准确性,将煤粉 MILD 燃烧模拟数据与文献[12]中的温度和速度数据进行比较,模拟数据和试验数据整体上吻合度较高,如图3、4所示。在炉膛前端3个测点处,中心区域速度的模拟数值均高于试验数值,这个差别主要是由于激光多普勒风速计的测量误差导致[9]。对于温度分布,仅在燃料射入区域($X=0.28m$)存在一定的差异。温度分布差别同样存在于 Vascellari 等[20]、Schaffel 等[9]和 Mei 等[10]的模拟中,这反映出数值模拟中存在着火延迟的问题:在模拟中,煤粉颗粒的加热、挥发分的析出、焦炭的燃烧是依次进行,而实际燃烧中则是同步进行。靠近炉膛中心模拟温度较高,可能主要是煤粉脱挥发模型本身的局限性,不能准确的模拟实际脱挥发过程。对于旋流

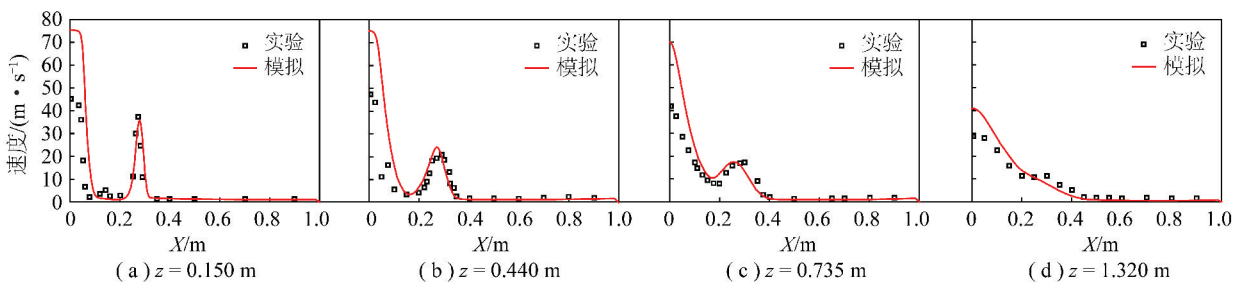


图3 不同位置试验和模拟的速度对比

Fig. 3 Speed comparison between experiments and simulation at different locations

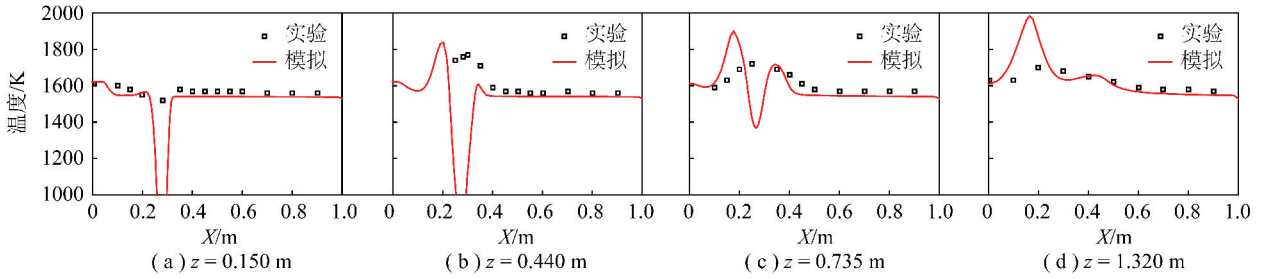


图 4 不同位置试验和模拟温度的对比

Fig. 4 Temperature comparison between experiments and simulation at different locations

燃烧模拟准确性的验证参见文献[21]。由以上试验数据以及模拟数据的吻合程度,考虑到水煤浆燃烧过程中采用湿燃烧法,可以认为所采用的数值模型对水煤浆燃烧是适用的。

1.4 模拟工况

为了研究相同炉膛条件下 MILD 燃烧和常规旋流燃烧的不同燃烧特性,模拟了 2 种燃烧方式下 3 种水煤浆质量分数(70%、65%、60%)的燃烧特性(表 3)。旋流燃烧中,旋流强度为 0.923。MILD 燃烧的实现时通过增加二次风温和高速射流来实现的,相对于旋流燃烧,MILD 燃烧一二次风射流速度更快,二次风温度更高。

表 3 模拟计算的工况

Table 3 Experimental conditions

燃烧方式	质量流量/ (kg · h ⁻¹)	温度/ K	组分含量/ %
MILD 燃烧	一次风	130	O ₂ =23, N ₂ =77
	二次风	675	O ₂ =23, N ₂ =77
旋流燃烧	一次风	130	O ₂ =23, N ₂ =77
	二次风	675	O ₂ =23, N ₂ =77

2 种燃烧氧化剂均为空气,不同浓度水煤浆质量流量分别为 94.29、101.54、110.00 kg/h,燃料输入功率均为 0.58 MW。为了使煤粉充分燃烧,过量空气系数均为 1.2。

2 试验结果与讨论

2.1 流场和内部循环率

图 5 给出了水煤浆 MILD 燃烧和常规旋流燃烧条件下的流线。可以看出,在 MILD 燃烧中,一次风和二次风在离开炉膛顶部一定距离之后进行混合,混合射流导致烟气的回流。烟气回流区几乎占据了整个炉膛,强烈的烟气回流可以稀释并预热燃烧器

出口的反应物。尽管改变水煤浆的浓度会使水煤浆的射流质量发生变化,但对于炉膛的烟气回流影响效果不明显。在水煤浆旋流燃烧中,则存在着 2 个回流区:一个存在于旋流燃烧器的出口位置处,回流区域较小;另外一个存在于炉膛前半部分,回流区域明显小于 MILD 燃烧。

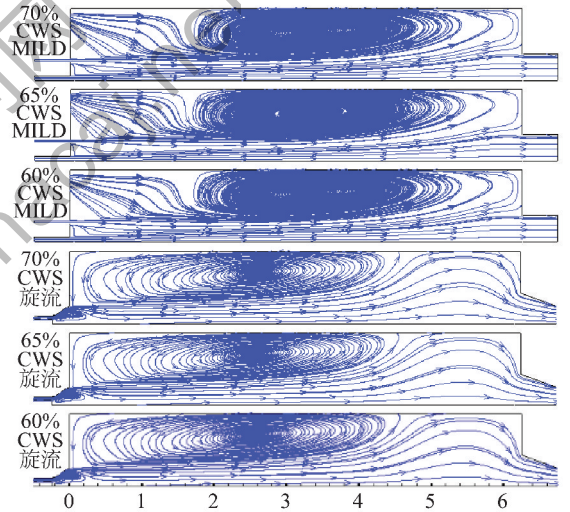


图 5 不同工况下的流线云图

Fig. 5 Streamline contours of different conditions for the studied cases

Wunning 等^[4]用烟气内部循环率 K_v 来定量分析烟气内部循环对 MILD 燃烧的影响, K_v 值越大,越有利于 MILD 燃烧,并将其定义为

$$K_v = \frac{m_e}{(m_o + m_f)} = \frac{m_{up} - m_o - m_f}{(m_o + m_f)}$$

式中, m_e 为被卷吸烟气的质量流量; m_o 为空气的质量流量; m_f 为燃料的质量流量; m_{up} 为具有向炉膛尾部方向上分速度的燃烧产物的质量流量。

图 6 给出了不同浓度水煤浆下 MILD 燃烧和旋流燃烧 K_v 值。可知,水煤浆的浓度对 K_v 的影响较小,这和流线云图基本符合。越靠近炉膛后部, K_v 越大,烟气卷吸越强烈。在 MILD 燃烧中,随着轴向

距离的增大, K_v 逐步增大, 且最大值大于 5, 符合 MILD 燃烧特性; 而在旋流燃烧中, K_v 很小, 均小于 2, 浓度越小, K_v 越小, 这主要是由于水蒸气抑制了烟气的回流。

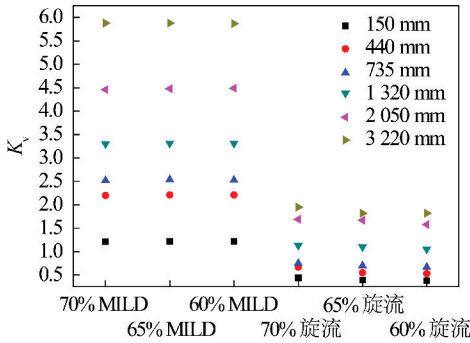


图 6 不同工况下的 K_v

Fig. 6 K_v of different conditions for the studied cases

2.2 温度分布

图 7 给出了不同工况下, 燃烧器所在的对称平面上的温度分布。MILD 燃烧条件下, 70%、65%、60% CWS 的峰值温度分别为 1 968、1 945、1 923 K; 旋流燃烧下, 70%、65%、60% CWS 的峰值温度分别为 2 195、2 160、2 116 K。可以发现, MILD 燃烧的峰值温度比旋流燃烧的峰值温度低 193 ~ 227 K, 炉膛整体温度更加均匀, 并且随着水煤浆质量分数的降低(水分含量增加), 峰值温度略有下降。随着水煤浆质量分数的降低, 一次风出口的低温区向后延伸, 这主要是由于水煤浆入射动量以及水分增加, 水分汽化吸热所致。旋流燃烧的高温区, 温度更高, 区域更大更靠近燃烧器出口位置, 燃烧反应剧烈, 容易导

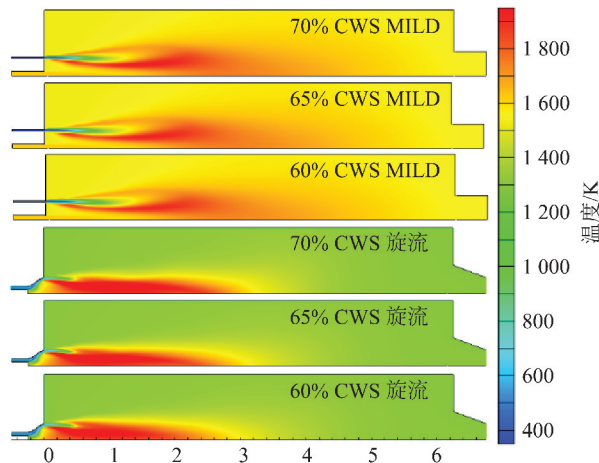


图 7 不同工况下的温度云图

Fig. 7 Temperature field of different conditions for the studied cases

致运行不稳定、运行负荷不易调节、熄火等一系列问题, 而 MILD 燃烧的燃烧速率缓慢、温度低、热流分布均匀、强烈的烟气回流可以很好的解决这些问题, 达到较好的燃烧效果。

为了进一步研究上述各工况的温度分布, 分别截取了 MILD 一次风出口以及旋流炉膛 $Y = 150$ mm 轴向温度分布并进行了比较。从图 8 可以看出: 旋流燃烧中, 温度在距离炉膛前墙很近的距离(0.6 m 左右)很快升到了峰值温度, 说明在旋流燃烧器出口位置, 水煤浆剧烈的燃烧; MILD 燃烧中, 距离一次风喷口 2 m 之后, 温度才达到最大, 升温比较平缓。旋流燃烧最高温度与炉膛末端温度差约为 1 000 K, MILD 燃烧仅为 400 K 左右, 说明在 MILD 燃烧方式下, 炉内的温度分布更加均匀。

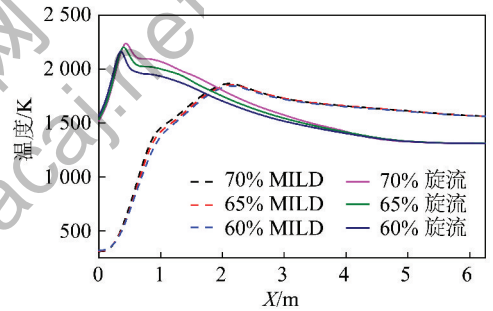


图 8 不同工况下的轴向温度云图

Fig. 8 Temperature profiles along the fuel jet centerline of different conditions for the studied cases

2.3 氧气浓度分布

图 9 给出了不同工况下燃烧器所在对称平面的 O_2 浓度分布云图。可知, MILD 燃烧的低氧区主要位于一次风出口处, 焦炭以及挥发分的燃烧消耗大量的氧气; 而旋流燃烧中, 低氧区则位于炉膛中心区域, 氧气浓度极低, 浓度小于 2%。在旋流燃烧中, 水煤浆质量分数减小会使水煤浆低氧区域的面积减少, 这主要是由于水煤浆质量分数减小会使烟气卷吸强度减弱, 水煤浆中的水分吸收更多的热量, 导致高温区面积减少, 反应区域减少, 从而导致低氧区域减少。在 MILD 燃烧中由于一二次风的高速射流, 强烈的烟气卷吸, 反应区域较大, 仅仅改变水煤浆质量分数对 O_2 浓度分布影响甚微。

2.4 NO_x 排放

图 10 给出了几种工况下的炉膛尾部 NO 的排放量。本文仅仅考虑热力型 NO_x 与燃料型 NO_x 。

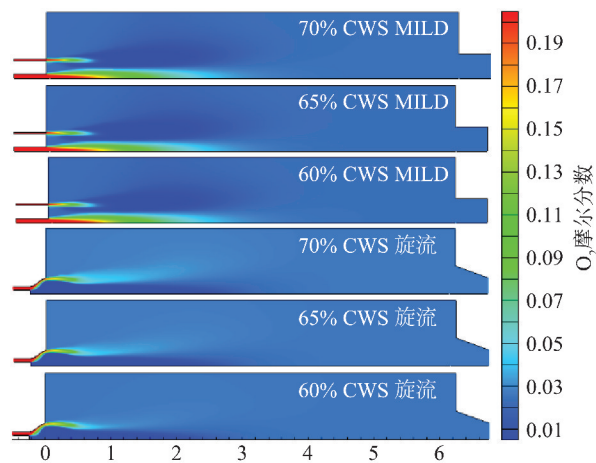


图 9 不同工况下的氧气云图分布

Fig. 9 Distributions of O_2 in burner located plane for studied cases

在燃料性 NO_x 模拟中,认为挥发分中的 N 首先全部转化为 HCN,然后氧化形成 NO,焦炭中的 N 直接转化为 NO。可以看出,在高速射流以及旋流 IFRF 燃烧炉膛中,MILD 燃烧形成的 NO_x 远低于旋流燃烧,降低了 54% 左右。这主要是由于 MILD 燃烧整体温度更低、温度更加均匀、强烈的烟气卷吸使低氧区域更大等,抑制了 2 种 NO_x 的形成。但需要注意的是,数值模拟得到的 NO_x 往往会偏高,这主要是模拟无法考虑 NO_x 的再燃过程以及模拟机制本身存在的局限性^[14]。



图 10 不同工况下的炉膛尾部烟气 NO 排放量

Fig. 10 NO emissions of different conditions in the furnace tail for studied cases

3 结 论

1) 在炉膛输入功率 0.58 MW 不变的条件下,水煤浆由旋流燃烧改为 MILD 燃烧时,炉膛内形成强烈的烟气回流,炉膛温度分布均匀,峰值温度降低了 190 ~ 227 K,且燃烧稳定性好,低氧区域更大, NO_x 排放降低了约 54%。

2) 水煤浆 MILD 燃烧时,降低水煤浆质量分数

不仅可以降低炉膛的温度,还可以降低尾部烟气中 NO_x 的排放,但对炉膛的流场分布特性影响较小。

3) 水煤浆燃料采用 MILD 燃烧方式,对于解决水煤浆常规燃烧过程中易于出现的运行不稳定、熄火、运行负荷不易调节等一系列问题具有较大帮助。

参考文献 (References):

- [1] Cavaliere A, de Joannon M. Mild combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(4): 329-366.
- [2] De Joannon M, Langella G, Beretta F, et al. Mild combustion: process features and technological constrains[J]. Combustion Science and Technology, 2000, 153(1): 33-50.
- [3] 李鹏飞,米建春, Dally B B, 等. MILD 燃烧的最新进展和发展趋势[J]. 中国科学:技术科学, 2011, 41(2): 135-149. Li Pengfei, Mi Jianchun, Dally B B, et al. The latest developments and trends of MILD combustion[J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 41(2): 135-149.
- [4] Wunning J A, Wunning J G. Flameless oxidation to reduce thermal NO -formation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(1): 81-94.
- [5] Cavigiolo A, Galbiati M A, Effuggi A, et al. Mild combustion in a laboratory-scale apparatus[J]. Combustion Science and Technology, 2003, 175(8): 1347-1367.
- [6] Ye J, Medwell P R, Varea E, et al. An experimental study on MILD combustion of prevaporised liquid fuels[J]. Applied Energy, 2015, 151: 93-101.
- [7] Weber R. Combustion of natural gas, oil and coal with air preheated to temperatures in excess of 1 000 °C: 17 th International Symposium on Combustion Processes [C]. Poznan: Poznan University of Technology, 2001: 24-27.
- [8] Weber R, Smart J P, Kamp W V. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2623-2629.
- [9] Schaffel N, Mancini M, Szele K A, et al. Mathematical modeling of MILD combustion of pulverized coal [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(9): 1771-1784.
- [10] Mei Z, Li P, Mi J, et al. Diffusion MILD combustion of firing pulverized-coal at a pilot furnace [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2015, 95(4): 803-829.
- [11] Suda T, Takafuji M, Hirata T, et al. A study of combustion behavior of pulverized coal in high-temperature air [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 503-509.
- [12] 丁宁,刘彦,王关晴,等. 水煤浆锅炉着火燃烧的影响因素分析[J]. 动力工程, 2009(10): 941-945. Ding Ning, Liu Yan, Wang Guanqing, et al. Analysis of influence factors for ignition and combustion of coal-water slurry fired boilers [J]. Power Engineering, 2009(10): 941-945.

(下转第 46 页)

参考文献 (References) :

- [1] 翁安心,周昊,张力,等.不同煤种混煤燃烧时 NO_x 生成和燃尽特性的实验[J].热能动力工程,2004,19(3):242-246.
Weng Anxin,Zhou Hao,Zhang Li, et al. Experimental research of the NO_x generation and burnout characteristics during the combustion of blended coals[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2004,19(3):242-246.
- [2] 陈刚,方庆艳,张成,等.电站锅炉配煤掺烧及经济运行[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [3] 邱建荣,马毓义,曾汉才,等.混煤特性的综合性实验研究[J].动力工程,1993,13(2):32-36.
Qiu Jianrong, Ma Yuyi, Zeng Hancai, et al. Coal blend features comprehensive experimental research [J]. Power Engineering, 1993, 13(2):32-36.
- [4] Ikeda M, Makino H, Morinaga H, et al. Emission characteristics of NO_x and unburned carbon in fly ash during combustion of blends of bituminous/sub-bituminous coals [J]. Fuel, 2003, 82(15):1851-1857.
- [5] Wang C, Liu Y, Zhang X, et al. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in Northwestern China [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(8):3634-3645.
- [6] Lee B, Kim S, Song J, et al. Influence of coal blending methods on unburned carbon and NO emissions in a drop-cetube furnace [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(11):5055-5062.
- [7] Lee B H, Eddings E G, Jeon C H. Effect of coal blending methods with different excess oxygen on unburned carbon and NO_x emissions in an entrained flow reactor [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11):6803-6814.
- [8] 马仑,汪涂维,方庆艳,等.混煤燃烧过程中的交互作用:机理实验研究与数值模拟[J].煤炭学报,2015,40(11):2647-2653.
Ma Lun, Wang Tuwei, Fang Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Experimental study and numerical simulation of mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11):2647-2653.
- [9] 方立军,高正阳,阎维平,等.利用热天平对电厂混煤燃尽特性的试验研究[J].华北电力技术,2001(1):7-9.
Fang Lijun, Gao Zhengyang, Yan Weiping, et al. Experiment study on burn out characteristic of blended Coal in power plant by thermobalance [J]. North China Electric Power, 2001(1):7-9.
- [10] 马国伟,张晓明,刘建华,等.混煤燃烧过程中的交互作用与动力学特性研究[J].电力科学与工程,2013(2):56-62.
Ma Guowei, Zhang Xiaoming, Liu Jianhua, et al. Study on interaction and kinetic characteristics during combustion of blended coals [J]. Electric Power Science and Engineering, 2013(2):56-62.
- [11] Arenillas A, Rubiera F, Arias B, et al. A TG/DTA study on the effect of coal blending on ignition behaviour [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2004, 76(2):603-614.
- [12] 马仑,汪涂维,方庆艳,等.混煤燃烧过程中的交互作用:掺烧方式对混煤燃烧特性的影响[J].煤炭学报,2016,41(9):2340-2346.
Ma Lun, Wang Tuwei, Fang Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Influence of coal blending methods on combustion characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9):2340-2346.
- [13] 李毅,杨公训,高松.水煤浆锅炉的发展及现状[J].热能动力工程,2007(6):583-585.
Li Yi, Yang Gongxun, Gao song. Development and status quo of coal-water-mixture (cwm)-fired boilers [J]. Engineering for Thermal Energy and Power, 2007(6):583-585.
- [14] Peters A, Weber R. Mathematical modeling of a 2.4 MW swirling pulverized coal flame [J]. Combustion Science and Technology, 1997, 122(1-6):131-182.
- [15] Tu Y, Liu H, Chen S, et al. Numerical study of combustion characteristics for pulverized coal under oxy-MILD operation [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 135:80-90.
- [16] Liu J, Chen S, Liu Z, et al. Mathematical modeling of air and oxy coal confined swirling flames on two extended eddy-dissipation models [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(2):696-708.
- [17] Galletti C, Ferrarotti M, Parente A, et al. Reduced NO formation models for CFD simulations of MILD combustion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(14):4884-4897.
- [18] 陈力,赵翔,孟德润,等.水煤浆燃烧过程的数值模拟[J].热力发电,2006,35(10):20-23.
Chen Li, Zhao Xiang, Meng Derun, et al. Numerical simulation of CWS combustion process [J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(10):20-23.
- [19] 于海龙,赵翔,周志军,等.煤浆浓度对水煤浆气化影响的数值模拟[J].动力工程,2005(2):217-220.
Yu Hailong, Zhao Xiang, Zhou Zhijun, et al. Numerical simulation of the effect of coal-water-slurry's concentration on its gasification [J]. Power Engineering, 2005(2):217-220.
- [20] Vascellari M, Cau G. Influence of turbulence-chemical interaction on CFD pulverized coal MILD combustion modeling [J]. Fuel, 2012, 101:90-101.
- [21] Mao Z, Zhang L, Zhu X, et al. Modeling of an oxy-coal flame under a steam-rich atmosphere [J]. Applied Energy, 2016, 161:112-123.

(上接第41页)