# 风扇磨出口氧量对塔式炉燃烧特性影响数值模拟

翟永强1,杨永伟1,张路涛1,孙培波1,高 磊1,程智海2

(1. 中国能源建设集团 华北电力试验研究院有限公司, 天津 300011;2. 上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090)

摘 要:风扇磨出口氧量变化直接影响褐煤的燃烧效率及氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的生成。采用 Fluent15.0 对某 660 MW 超临界机组风扇磨出口氧量分别为 8%、10%、12%、14%、16% 工况下燃料在塔式炉内 的流动特性、燃烧特性以及 NO<sub>x</sub> 的生成规律进行数值模拟研究。结果表明,随着风扇磨出口氧量的 增加,火焰中心和炉膛出口烟温降低,调整风扇磨出口氧量可有效控制火焰中心位置及炉膛出口烟 温,避免抽烟口处烟温过高而导致抽烟口结焦;同时,炉膛出口 NO<sub>x</sub> 含量增加。综合对比风扇磨出口 不同氧量工况下煤粉燃烧特性与 NO<sub>x</sub> 的生成规律,得出风扇磨出口最佳氧量为 10%。

关键词:风扇磨;塔式炉;燃烧优化;最佳氧量;数值模拟

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2018)06-0060-06

# Numerical simulation on combustion optimization of tower furnace with change of oxygen content of fan mill

ZHAI Yongqiang<sup>1</sup>, YANG Yongwei<sup>1</sup>, ZHANG Lutao<sup>1</sup>, SUN Peibo<sup>1</sup>, GAO Lei<sup>1</sup>, CHENG Zhihai<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power Test Research Institute Co. , Ltd. , China Energy Engineering Group, Tianjin 300011, China;

2. School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract**: The variation in the oxygen content at the fan mill outlet will directly affect the combustion efficiency of lignite and the formation of nitrogen oxides ( $NO_x$ ). In this paper, Fluent 15.0 software was used to calculate the flow, combustion and  $NO_x$  formation characteristics of the fuel in the tower furnace under the condition of 8%, 10%, 12%, 14% and 16% of the oxygen output at the fan mill outlet of a 660 MW supercritical unit. The results show that the fuel gas temperature at the flame center and the furnace outlet decreases significantly with the increase of the oxygen content at the outlet of the fan mill. Adjusting the oxygen content at the outlet of the fan mill can effectively control the central position of the flame and the fuel gas temperature at the hearth, avoiding excessive temperature of the flue gas and causing coking at the smoke outlet. Meanwhile, the  $NO_x$  content at the outlet of the furnace increases with the increase of the oxygen content at the outlet of the fan mill. After comparing the combustion characteristics of the pulverized coal and the  $NO_x$  generation rules under different oxygen conditions at the fan mill outlet, it is concluded that the optimum oxygen content at the fan mill outlet is 10%. **Key words**; fan mill; tower furnace; combustion optimization; optimum oxygen; numerical simulation

0 引 言

风扇磨制粉系统因其具有较好的干燥效果而广 泛应用于燃烧高水分褐煤的机组,其干燥热源主要 有3种介质:热一次风、高温烟气(取自屏过底部)、 低温烟气(取自引风机出口),同时风扇磨制粉系统 通过不同的烟风配比实现对磨出口氧量和温度的调 节。目前国内投运的配有风扇磨制粉系统的塔式炉 锅炉存在抽烟口处易结焦、炉膛出口烟温偏高、燃烧 效率偏低和 NO<sub>x</sub> 波动较大等问题。张向群等<sup>[1]</sup>通 过二次风量配比试验、磨煤机组合方式等对八角切 圆褐煤锅炉进行燃烧调整,结果表明,对于燃用低发

作者简介: 翟永强(1990—),男,河北承德人,助理工程师,主要从事燃烧与污染物控制研究。E-mail:zhai\_y\_q@163.com 引用格式: 翟永强,杨永伟,张路涛,等.风扇磨出口氧量对塔式炉燃烧特性影响数值模拟[J]. 洁净煤技术,2018,24(1):60-65.



ZHAI Yongqiang, YANG Yongwei, ZHANG Lutao, et al. Numerical simulation on combustion optimization of tower furnace with change of oxygen content of fan mill[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1):60-65.

收稿日期:2018-08-28;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18082801

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAA04B03)

热量的褐煤,设计炉膛容积热负荷选取下限,可降低 炉膛和受热面结焦的可能性,同时采用"正宝塔"型 配风方式提高燃烧器区域的燃尽率。肖海平等[2] 研究了燃烧调整对 NO。 排放和锅炉效率的影响,结 果表明,在保证一定锅炉效率的前提下,经燃烧调 整,NO, 排放降低 10% ~ 20% 。马煜等<sup>[3]</sup>研究了大 型风扇磨煤机磨制高水分褐煤的运行特性,研究结 果显示,冷炉烟对磨出口温度的调节效果明显,同时 煤粉水分增加1%,煤粉细度升高3.6%。郭晓克 等[4]对带废热回收的预干燥褐煤发电系统进行理 论研究。但对于风扇磨出口氧量对塔式炉燃烧的影 响研究鲜见报道,为此,笔者以国内某配有风扇磨制 粉系统的 660 MW 超临界燃煤机组塔式锅炉为研究 对象,采用数值模拟方法对风扇磨出口氧量变化对 塔式炉内褐煤的燃烧特性及 NO, 的生成规律进行 研究。

# 1 研究对象

研究对象为某 660 MW 超临界燃煤机组,由哈尔 滨锅炉厂有限责任公司设计制造,型号为 HG-2100/ 25.4-HM11 型超临界压力、变压运行、带内置式再循 环泵启动系统的直流锅炉,机组采用直吹式制粉系 统,配备 8 台 MB3600/1000/490 型风扇磨,6 运1 备1 检修,采用四墙八角切向燃烧。一台磨对应"一角"燃 烧器(分3组,共5层),由下到上分别为 A、B、C、D、E 层,燃烧器分布及切向角如图 1 所示。



图 1 燃烧器分布及切角大小 Fig. 1 Burner distribution and cut size

运行过程中,在任意6台磨煤机运行时,均能保 证锅炉能长期带满负荷运行,同时为保证炉内较好 的动力场,燃烧器尽量采用对角投运或停运的方式 运行,且为了防止火焰偏斜,未投粉的角同样进行投 风,即满负荷时采用"8角投风6角投煤"的方式运 行。本文按照实际运行情况采用"8角投风6角投 煤"的燃烧组织方式进行数值模拟。

# 2 模型建立与网格划分

#### 2.1 几何模型

由于塔式炉所有受热面均布置在炉膛内,考虑 到再热器、过热器等对流受热面对燃烧影响不大,而 模拟主要研究炉内的燃烧特性及 NO<sub>x</sub> 的生成,所以 建模不包括炉膛顶部的过热器、再热器等受热面,取 屏过底部(即下炉膛出口)为炉膛出口。炉膛截面 尺寸、燃烧器喷口尺寸等均采用1:1比例进行用全 尺寸建模,几何模型如图2所示。



Fig. 2 Geometric model

#### 2.2 网格划分

网格采用六面体结构化网格进行划分,同时采 用局部加密的方法对燃烧器喷口区域进行加密处 理,使整体网格质量较高,保证模拟精度。全模型共 划分网格 46.48 万,网格划分如图 3 所示。

#### 2.3 数学模型

煤粉气流在炉内的流动是涉及气固两相流动的 复杂过程,煤粉颗粒燃烧分为挥发分析出、焦炭燃烧 等阶段<sup>[5-8]</sup>,因此在模拟煤粉流动和燃烧过程需合 理选取数学模型。模拟选取的主要数学模型如下:

1) 气相湍流计算采用 Realizable 模型;

2) 煤粉颗粒的跟踪采用随机轨道模型;

3)气相湍流燃烧采用混合分数-概率密度函数 模型;

4) 挥发分的释放采用双步竞相反应速率模型;

5) 焦炭的燃烧采用动力学/扩散控制反应速率 模型: 洁净煤技术



6)辐射传热采用 P-l 辐射模型;

7) NO<sub>x</sub> 生成采用污染物排放模型。

## 3 模拟结果及分析

# 3.1 边界条件及煤质分析

模拟边界条件采用某 660 MW 超临界机组锅炉的设计参数,包括一次风温、一次风速、二次风速、二次风速等(表 1)。燃料设定采用设计煤种,煤粉细度 *R*<sub>90</sub>=45%,具体参数见表 2。

#### 3.2 工况设定

根据煤种特性,风扇磨出口氧量可在 8% ~ 16% 内调整,不同氧量条件下煤粉在炉内燃烧特性 不同<sup>[9-14]</sup>。为准确把握风扇磨出口不同氧量条件下 的燃烧特性,设定 5 个工况进行模拟,磨出口氧量分 别为 8%、10%、12%、14%、16%。

#### 3.3 动力场特性

图4为满负荷、风扇出口氧量为8%时的速

表1 边界条件设定

Table 1 Boundary conditions setting

-次风速/(m・s⁻¹)	二次风速度/(m・s <sup>-1</sup> )	夹心风速度/(m・s <sup>-1</sup> )	磨出口温度/℃	二次风温/℃	二次风率/%
19	50	30	150	324	75.5

表 2	煤质分析

Table 2Coal quality analysis

<i>M</i> <sub>t</sub> /%	$M_{\rm ad}/\%$	$A_{\rm ar}/\%$	$V_{\rm daf}/\%$	$Q_{\rm net,ar}/({ m MJ}\cdot{ m kg}^{-1})$	$w(C_{ar})/\%$	$w(H_{ar})/\%$	$w(0_{\rm ar})/\%$	$w(N_{ar})/\%$	$w(S_{t,ad})/\%$
32.80	6. 51	9.49	44.25	15.75	43. 21	2.62	11.14	0. 57	0.17



图4 各截面速度分布及煤粉颗粒运动轨迹

Fig. 4 Velocity distribution and pulverized coal particle motion trajectory

度分布。可知,一次风、二次风、燃尽风炉内速度场 在炉内均具有较好的对称性,在各层燃烧器截面具 有较好的充满度和切圆直径,同时煤粉喷出喷口后, 基本上沿切圆方向旋转上升,煤粉与气流的跟随性 较好,但个别颗粒运动轨迹表现出较大的随机性,具 有贴壁流动的特点。由图4(d)可知,燃尽风在喷入 炉膛后很快被上升的烟气流带走,燃尽风喷入炉膛 的最远距离为1/4 左右的炉膛深度,燃尽风的刚性 翟永强等:风扇磨出口氧量对塔式炉燃烧特性影响数值模拟

和穿透力较差,燃尽风的削旋作用不明显。

# 3.4 温度场特性

图 5 为磨出口氧量为 8%、10%、12%、14%、 16% 时 Y=0 截面的温度场分布。可知,在主燃烧区 域最高温度分别为 1 921、1 923、2 015、2 029、2 074 K,即在不改变主燃区二次风量的前提下,随着磨出 口氧量的增加,主燃区的最高温度总体呈上升趋势; 在氧量由 8% 增到 10% 时,主燃烧区的最高温度基 本不变;当风扇磨出口氧量由 10% 增到 16% 时,主 燃区的最高温度升高了 151 K,温度增加明显。





Fig. 5 Temperature distribution on Y=0 section

由图 5 可得,不同磨出口氧量条件下,炉内温度 分布不同,炉内最高温度点位置不同。在磨出口氧 量为 8% 时,最高温度出现在标高 36 m 左右,即 E 层燃烧器位置;在磨出口氧量为 10% 时,最高温度 出现在标高 35 m 左右,即 D 层与 E 层燃烧器中间; 在磨出口氧量为 12% 时,最高温度出现在标高 33 m 左右,即 D 层燃烧器位置;在磨出口氧量为 14% 时,最高温度出现在标高 31 m 左右,即 C 层燃烧器 与 D 层燃烧器中间;在磨出口氧量为 16% 时,最高 温度出现在 30 m 左右,即 C 层燃烧器位置。因此 随着磨出口氧量由 8% 增到 16%,火焰中心位置降 低了 6 m,因此改变磨出口氧量可改变主燃区火焰 中心位置,且效果明显。

图 6 为炉膛出口平均温度随风扇磨出口氧量的 变化。可知,在磨出口氧量分别为 8%、10%、12%、 14%、16%时,炉膛出口截面平均烟温分别为 1 548、 1 496、1 480、1 469、1 454 K,随着磨出口氧量的增 加,炉膛出口平均烟温逐渐降低。磨出口氧量由 8%增至 16%时,炉膛出口平均烟温降低 94 K;磨出 口氧量由 8%增到 10%时,炉膛出口烟温降低了 52 K,效果明显。炉膛出口烟温降低,可有效缓解抽烟 口结焦,因此适当提高风扇磨出口氧量可改善高温 炉烟抽取口处结焦问题。

## 3.5 浓度场特性

**3.5.1** O<sub>2</sub> 浓度特性

图7为磨出口氧量为8%、10%、12%、14%、



Fig. 6 Average gas temperature of furnace outlet

16%时,Y=0 截面的氧量分布。可知,在磨出口5 个氧量条件下,炉膛出口平均氧量分别为3.04%、 3.17%、3.32%、3.7%、4.05%。主燃区的O<sub>2</sub>主要 分布在靠近水冷壁1/4 炉膛深度的位置,炉膛中心 位置O<sub>2</sub>几乎全部被燃烧消耗。在燃尽风区域,O<sub>2</sub> 主要分布在燃尽风喷口附近,且浓度较高,而在中心 区域缺氧,燃尽风的作用未完全体现,燃尽风刚性较 差,穿透力不足。

3.5.2 CO浓度特性

图 8 为磨出口氧量为 8%、10%、12%、14%、 16%时,Y=0 截面的 CO 体积分数分布,炉膛出口截 面 CO 平均体积分数分别为 469×10<sup>-6</sup>、213×10<sup>-6</sup>、 207×10<sup>-6</sup>、198×10<sup>-6</sup>、146×10<sup>-6</sup>,即随着磨出口氧量 的增加,炉膛出口 CO 体积分数逐渐降低。由于在 燃烧器喷口附近煤粉浓度较高,氧量相对较低,煤粉 燃烧生成的 CO 主要集中在燃烧器喷口附近,随着 洁净煤技术

煤粉的扩散和燃烧过程的进行,在炉膛中心和主燃 区上方 CO 体积分数降低,但在燃尽区炉膛中心 CO 含量明显高于水冷壁附近,主要原因是燃尽风未能 冲到炉膛中心与烟气充分混合,而是在近壁面处直 接被上升的烟气流带走。为降低炉膛出口 CO 含 量,提高燃烧效率,可适当提高磨出口氧量,但磨出 口氧量的提高会导致主燃区截面热负荷增加,结焦 风险增大,因此,需采取有效措施提高燃尽风的刚性 和穿透力,增强燃尽风与烟气的混合效果是降低炉 膛出口 CO 体积分数、提高燃烧效率的最佳途径。



图7 Y=0 截面 O,体积分数分布





图8 Y=0 截面 CO 体积分数分布

Fig. 8 CO concentration distribution on Y=0 section

3.5.3 NO<sub>x</sub>浓度特性

图9为磨出口不同氧量工况下,沿炉膛高度方向的 NO<sub>x</sub>体积分数变化曲线。可知,在各工况下 NO<sub>x</sub>的生成趋势基本相同,在主燃烧区下方由于炉内烟气相对氧含量较高,对来自空气中的 N<sub>2</sub>具有较强的氧化性,导致大量 N<sub>2</sub> 被氧化成 NO<sub>x</sub>,而在主燃区虽然温度较高,但煤粉燃烧处于强还原性气氛,同时煤粉燃烧释放出的还原性气体 HCN、NH<sub>3</sub>等将生成的 NO<sub>x</sub> 还原成 N<sub>2</sub>,使主燃区 NO<sub>x</sub> 的生成 量迅速降低,随着烟气上行和煤粉的进一步燃烧, 在燃尽区附近由于氧气浓度相对较高,烟气中的 还原性气体逐渐降低,NO<sub>x</sub> 的生成缓慢增加。磨出 口氧量分别为 8%、10%、12%、14%、16% 时,炉膛 出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度分别为 202、227、362、430、 487 mg/m<sup>3</sup>,即随着磨出口氧量的增加,沿炉膛高 度方向的 NO<sub>x</sub> 浓度整体增加。但氧量由 8% 增到 10% 时, NO<sub>x</sub> 的生成量基本不变; 而当磨出口氧量 由 10% 增到 16% 时, NO<sub>x</sub> 的生成量迅速增加, 因此 在实际运行过程中要合理选择磨出口氧量, 从而 控制 NO<sub>x</sub> 的生成。



Fig. 9 NO<sub>x</sub> concentration distribution along furnace height

# 4 结 论

1)随着风扇磨出口氧量的增加,火焰中心下移,磨出口氧量由8%增至16%时,火焰中心下移6m,改变风扇磨出口氧量可有效调整火焰中心的位置。

2)随风扇磨出口氧量的增加,炉膛出口烟气温 度明显降低,磨出口氧量由8%增至16%,炉膛出口 烟温降低94 K;磨出口氧量由8%增到10%时,炉膛 出口烟温降低52 K,效果明显。

3)随着磨出口氧量的增加,炉膛出口 CO 体积 分数降低明显,虽然磨出口氧量为 16% 时,CO 浓度 最低,但是高氧量会导致 NO<sub>x</sub> 生成量增加,因此不 建议采用增加磨出口氧量的方法来降低炉膛出口 CO 的浓度。

4)随着磨出口氧量的增加,NO<sub>x</sub>生成量增加, 但在一定范围内氧量的增加并不会导致 NO<sub>x</sub>的大 量生成。综合考虑燃烧效率与 NO<sub>x</sub>的生成量,风扇 磨出口氧量控制在 10% 左右为最佳工况。

#### 参考文献(References):

- [1] 张向群,丁永允,曹阳,等.八角切圆褐煤锅炉运行优化调整
  [J]. 热力发电,2016,45(5):100-106.
  ZHANG Xiangqun, DING Yongyun, CAO Yang, et al. Operation optimization for octagonal corner tangentially-fired boiler burning low heat value lignite coal[J]. Thermal Power Generation,2016, 45(5):100-106.
- [2] 肖海平,张千,王磊,等. 燃烧调整对 NO<sub>x</sub> 排放及锅炉效率的影响[J]. 中国电机工程学报,2011,31(8):1-6.
  XIAO Haiping,ZHANG Qian, WANG Lei, et al. Effect of combustion adjustment on NO<sub>x</sub> emission and boiler efficiency [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(8):1-6.
- [3] 马煜,李希国.大型风扇磨煤机磨制高水分褐煤运行特性研究
  [J].电站系统工程,2012,28(1):35-36.
  MA Yu,LI Xiguo. Research on operation of large fan mill grinding high-moisture lignite [J]. Power System Engineering, 2012, 28 (1):35-36.
- [4] 郭晓克,刘明,肖峰,等.带废热回收的预干燥燃褐煤发电系统 理论研究[J].中国电机工程学报,2012,32(8):44-49.
   GUO Xiaoke,LIU Ming,XIAO Feng, et al. Theoretical study on a pre-dried lignite-fired power system with wasteheat recovery[J].
   Proceedings of the CSEE,2012,32(8):44-49.
- [5] RIBEIRETE A, COSTA M. Impact of the air staging on the performance of a pulverized coal fired furnace[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 29:2667–2673.

[6] 刘建全,孙保民,张广才,等.1000 MW 超超临界旋流燃烧锅
 炉稳燃特性数值模拟与优化[J].中国电机工程学报,2012,32
 (8):19-27.

LIU Jianquan, SUN Baomin, ZHANG Guangcai, et al. Numerical simulation and optimization on stable combustion of a 1 000 MW ultra supercritical unit swirlcombustion boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8):19-27.

- [7] FAN Weidong, LIN Zhengchun, KUANG Jinguo, et al. Impact of air staging along furnace height on NO<sub>x</sub> emissions from pulverized coal combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2010,91:625-634.
- [8] BAI Wengang, LI Hao, DENG Lei, et al. Air staged combustion characteristics of pulverized coal under high temperature and strong reducing atmosphere conditions [J]. Energy & Fuels, 2014, 28:1820-1828.
- [9] 李德波,沈跃良,徐齐胜,等.运用燃烧数值模拟分析某台 660 MW 超临界锅炉旋流燃烧器喷口燃烧事故[J].机械工程 学报,2013,49(16):121-130.
  LI Debo,SHEN Yueliang,XU Qisheng, et al. Numerical investigation on the key mechanisms of burnout of swirling combustors for 660 MW supercritical unit swirl coal-fired combustion boiler[J]. Journal of Mechanical Engineering,2013,49(16):121-130.
- [10] 白涛,孙保民,郭永红,等. 旋流燃烧锅炉的 NO<sub>x</sub> 排放数值模 拟研究[J]. 热力发电,2012,41(7):13-21.
  BAI Tao, SUN Baomin, GUO Yonghong, et al. Numerical simulation of NO<sub>x</sub> emission in a boiler with swirl burners[J]. Thermal Power Generation,2012,41(7):13-21.
- [11] 林敏杜,刘亚明.600 MW 超临界锅炉高温腐蚀改造方案的数 值模拟研究[J].广东电力,2013,26(8):37-40.
   LIN Minshe, LIU Yaming. Numerical simulation study on high temperature corrosion reform scheme for 600 MW Supercritical boiler[J]. Guangdong Electric Power,2013,26(8):37-40.
- [12] 刘钢,谭红军,叶菲.大型褐煤锅炉及其制粉系统的特点与选择[J].电力建设,2008,29(5):54-57.
   LIU Gang,TAN Hongjun,YE Fei. Characteristics and selection of large lignite boiler and its pulverization system[J]. Electric Power Construction,2008,29(5):54-57.
- [13] 白涛,郭永红,孙保民,等.1025 t/h 旋流燃烧器煤粉炉降低 NO<sub>x</sub>生成的数值模拟[J].中国电机工程学报,2010,30(29): 16-23.

BAI Tao, GUO Yonghong, SUN Baomin, et al. Numerical simulation of decreasing  $NO_x$  emission in a swirling combustion pulverized coal boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30 (29): 16–23.

[14] 张方炜. 高水分褐煤锅炉及其制粉系统设计[J]. 电力勘测设 计,2007(6):46-50.

ZHANG Fangwei. Design of boiler and pulverized coal system of high moisture brown coal [J]. Electric Power Survey & Design, 2007(6):46–50.