

褐煤的超细粉再燃中NO_x的生成与还原的数值模拟

郭永红¹, 孙保民¹, 刘彤¹, 冯兆兴², 王昶², 李振中²

(1. 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市昌平区 102206;

2. 国家电站燃烧工程技术研究中心, 辽宁省沈阳市 110034)

NUMERICAL SIMULATION OF NO_x FORMATION AND DEOXIDIZATION WITH MICRO-PULVERIZED COAL REBURNING TECHNOLOGY FOR LIGNITE

GUO Yong-hong¹, SUN Bao-min¹, LIU Tong¹, FENG Zhao-xing², WANG Yang², LI Zhen-zhong²

(1. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, Ministry of Education (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. National Power Plant Combustion Engineering Research Center, Shenyang 110034, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: 7 cases of general combustion and micro-pulverized coal reburning for a kind of lignite in a CRF (Combustion Research Facility) have been numerically studied. Concentrations of NO_x predicted agree well with the experimental data for case 2 and case 3. Simulating result indicates that reburning of micro-pulverized coal decreases NO_x emission in a large extent and NO_x decreasing ratio is 58.2%-75.06% compared with general combustion. At the same time, NO_x formation and deoxidization in the reburning zone and the burnout zone for micro-pulverized coal reburning are given. NO_x emission at outlet is determined by not only NO_x deoxidization ratio in the reburning zone but also NO_x increment in the burnout zone.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Combustion; Numerical simulation; Micro-pulverized coal; Reburning; NO_x; Deoxidization ratio

摘要: 对CRF(Combustion Research Facility)炉中褐煤的1种常规燃烧和6种超细粉再燃工况进行了数值模拟,模拟所得工况2和工况3的NO_x含量分布与中试试验数据较好地吻合。计算结果显示褐煤的超细粉再燃在很大程度上减少了NO_x的出口排放,与常规燃烧相比脱除率达到了58.20%~75.06%。同时也对超细粉再燃的再燃区和燃尽区中NO_x的生成与还原进行了分析,炉膛出口NO_x的含量不仅决定于再燃区NO_x的还原率,还决定于燃尽区NO_x的新生成。

关键词: 热能动力工程; 燃烧; 数值模拟; 超细粉; 再燃烧; 氮氧化物; 还原率

1 引言

在电站锅炉燃烧所产生的污染物中, NO_x (氮

氧化物)对人类环境危害较大而且较难处理,因此如何有效地控制NO_x生成已经成为人们普遍关注的焦点。目前控制NO_x排放的措施大致分为两类,一是烟气净化技术,脱除烟气中的NO_x;另一类是低NO_x燃烧技术,抑制或者还原燃烧过程中生成的NO_x。烟气净化技术由于其初投资巨大,运行费用昂贵,很难大面积推广,因此低NO_x燃烧技术显得尤为重要。燃料再燃烧技术是一种非常有效的降低NO_x排放的先进燃烧技术,自从日本三菱重工利用再燃技术实现降低NO_x排放50%^[1]以后,燃料再燃烧得到了迅速的发展。一般研究者认为,气体燃料是理想的再燃燃料,但近几年的研究发现,褐煤也是一种非常好的再燃燃料^[2-3]。与气体燃料相比,煤作为再燃燃料的优势是其经济性和在燃煤电厂使用的方便性。煤种一定时,将再燃煤粉进行超细化处理不仅可以降低再燃煤粉的不完全燃烧热损失,还可以提高煤粉再燃还原NO_x的效率^[4-5]。

为了分析褐煤的超细粉再燃中再燃区和燃尽区NO_x生成和还原的规律,在FLUENT平台上,对CRF炉中的1种常规燃烧和6种超细粉再燃工况的NO_x排放进行了数值模拟,超细粉再燃工况中再燃煤粉与主燃煤粉同为元宝山褐煤。工况2和工况3的中试试验数据与数值模拟结果的比较显示,数值计算较真实地反应了炉内NO_x的生成。计算结果同时表明:超细粉再燃有效地降低了NO_x的出口排放,与常规燃烧相比脱除率达到了58.2%~75.06%。

2 常规燃烧和超细粉再燃的数值模拟

2.1 计算工况

为了分析超细化褐煤作为再燃燃料的燃烧中再燃区和燃尽区NO_x生成和还原的规律，本文使用通用的计算流体力学软件FLUENT，对CRF炉内的 1 种常规燃烧和 6 种超细粉再燃工况进行了数值模拟。CRF炉结构如图 1 所示，炉膛分为 5 节，从上到下命名为M1、M2、M3、M4、M5。各节中心标高分别为 2790mm、2170 mm、1550 mm、930 mm、310 mm，炉膛出口为 0 mm。图中右侧为燃烧器喷口的截面图，二次风 1、2 皆有较大的切向速度，目的是为了形成二次风的旋流射流，让一、二次风较好的混合，同时形成高温的内回流区，有利于煤粉的着火和燃烧。工况 1 为常规燃烧，燃料流量为 25kg/h。超细粉再燃工况 2~工况 6，主燃烧器喷口给粉量为 21.25kg/h，再燃的超细粉给粉量为 3.75 kg/h，主燃区过量空气系数相同。工况 2、3 和 4 的再燃喷口在CRF炉M2 中心，燃尽风喷口在 M3 中心，3 种工况的不同点是再燃风煤质量比分别为 2:1、3:1 和 4:1。工况 5 和工况 6 的再燃风煤比与工况 3 相同，差别是再燃喷口比工况 3 的 2170mm 分别上移和下移 205mm。工况 7 与工况 3 的差别是燃尽风喷口向出口方向移动 205mm。7 种计算工况详细参数见表 1。表 2 中给出了试验和数值模拟中

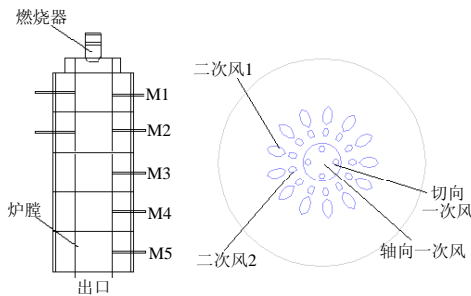


图 1 CRF 炉结构图

Fig. 1 Schematic diagram of CRF

表 1 7 种计算工况

Tab. 1 Seven cases simulated

工 况	一次风量 m ³ /h(100℃)	二次风量 m ³ /h (250℃)	再燃风量 m ³ /h (90℃)	燃尽风量 m ³ /h (250℃)	再燃风喷口 标高/mm	燃尽风喷口 标高/mm
1	10	142.55				
2	10	103.4	7.15	31.789	2170	1550
3	10	103.4	10.72	28.1	2170	1550
4	10	103.4	14.3	24.43	2170	1550
5	10	103.4	10.72	28.1	2375	1550
6	10	103.4	10.72	28.1	1965	1550
7	10	103.4	10.72	28.1	2170	1345

表 2 元宝山褐煤煤质分析 (元素分析和工业分析)

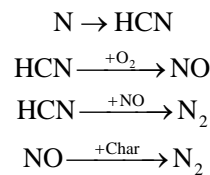
Tab. 2 Characteristic analysis of the lignite (ultimate and proximate analysis)

	工业分析/ %				元素分析/ %				
	M	A	V	FC	C	H	O	N	S
AD	9.72	29.25	27.13	33.9	43.64	2.59	12.91	0.79	1.1
DAF			44.54	55.55	71.51	4.25	21.15	1.29	1.8

使用褐煤的煤质分析，该褐煤的挥发分含量较高，这有利于NO_x的还原反应^[6]。计算中主燃煤粉平均直径为 73.4μm，超细粉平均直径为 34μm。

2.2 计算中的网格划分及使用的各模型

本计算中，针对边界特性，对燃烧器区域进行了网格加密，共划分了 8 万个四面体网格。使用快速反应模型来模拟CRF炉内的燃烧，速度与压力修正的耦合使用半隐格式压力关联方程算法 (SIMPLE)。气相的湍流流动选择标准的 *k-ε* 模型，煤粉颗粒相流动采用随机轨道法，计算中追踪了 100×10 个 (取 100 个直径，每个直径取 10 个粒子) 粒子。湍流反应使用Two mixture fraction/PDF 模型，挥发分析出模型为Two-competing-rates模型，燃烧模型是Kinetics/diffusion-limited模型，辐射传热选用P1 模型。NO_x的生成分为三部分——热力型、快速型和燃料型。本计算中对NO_x的生成采用后处理的方法。燃料型NO_x计算中认为焦炭中没有氮，全部氮都是以挥发分的形式出现，NO_x的生成与还原反应如下：



2.3 结果分析

2.3.1 实验数据与数值模拟结果的比较

国家电网燃烧工程技术研究中心对工况 2 和工况 3 进行了NO_x生成的中试试验。下面对这两个工况的试验数据和本文中的数值模拟结果进行比较。

图 2 给出了工况 2 的NO_x 含量试验数据和计算结果的比较，图中除了标高为 2170mm的测点外，其余 4 个测点试验数据和计算结果吻合得较好。CRF炉标高 2170mm处布置有再燃喷口，再燃煤粉喷入炉膛后，将被旋转的主气流带离喷口，进入再燃区，呈现还原性氛围的再燃区内NO_x的还原反应开始加剧，使得炉膛内NO_x含量降低，因此标高为 2170mm的再燃喷口处，NO的含量不可能为最低值。中试试验中，由于测点测到的只是一个点的数

据,而标高为2170mm的测点与再燃喷口在同一水平面上,因此这一误差可能是由于再燃风吹到了该测点所在区域,将局部的NO_x含量稀释,于是得到了近似为零的NO_x含量测量值。工况3的NO_x含量试验数据和计算结果的比较见图3,与工况2相似,除了标高为2170mm的测点外,其它4个测点试验数据和计算结果吻合良好。由此认为工况2和工况3的中试试验中2170mm的测点值是不可取的。抛弃这一测点后,工况2和工况3的中试试验数据与数值模拟计算结果较好地吻合。即数值模拟较真实地反应了中试试验CRF炉中NO_x的生成,因此下面使用数值计算的结果来分析再燃区和燃尽区内NO_x的生成与还原。

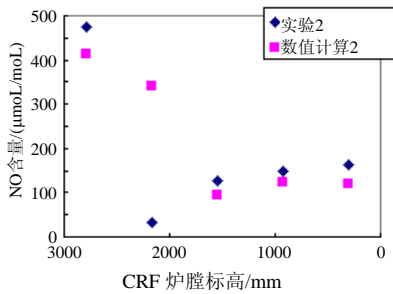


图2 工况2的NO_x含量试验数据和计算结果的比较
Fig. 2 Experiment and simulation of case 2

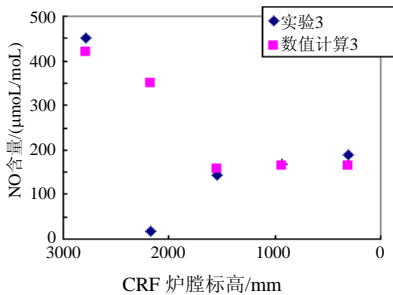


图3 工况3的NO_x试验数据与计算结果的比较
Fig. 3 Experiment and simulation of case 3

2.3.2 超细粉再燃与常规燃烧NO_x排放的比较

图4给出了7种工况随炉膛高度NO_x含量的变化曲线。图中常规燃烧工况1的出口NO_x排放远大于6种超细粉再燃工况的出口NO_x排放。常规燃烧工况1的NO_x含量在炉膛内呈现缓慢减少的趋势。超细粉再燃工况的NO_x含量变化显示,主燃烧区有大量NO_x生成,随着燃烧的进行,其NO_x的含量缓慢减小,到达再燃喷口后,由于超细粉的喷入,炉膛内NO_x的还原反应占主导地位,NO_x含量减小趋势加剧,直至与燃尽风相混合后,烟气中未燃的HCN等与氧气反应又生成部分NO_x,使得NO_x的含量停止下降反而上升。表3中给出了7种工况的出

口NO_x排放,常规燃烧工况1生成的NO_x最多,与之相比,6种超细粉再燃工况的出口NO_x脱除率达到了58.2%~75.06%。由此可见,褐煤的超细粉再燃有效地降低了NO_x的出口排放^[7]。

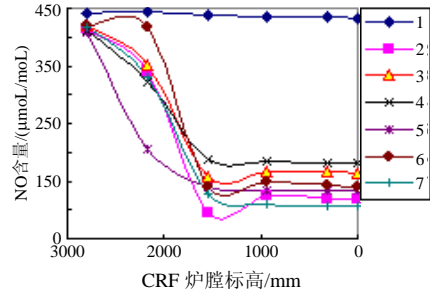


图4 7种工况NO_x含量的变化曲线
Fig. 4 NO_x content profiles of seven cases

表3 7种工况出口NO_x的含量及超细粉再燃工况的NO_x的还原率和NO_x的脱除率

Tab. 3 NO_x emission at outlet and NO_x deoxidization ratio and NO_x decreasing ratio of seven cases

工况	再燃区过量空气系数	NO _x 还原率/ %	NO _x 脱除率/ %	NO _x 出口含量 (μmol/mol)
1				433
2	0.830	72.14	72.52	119
3	0.866	55.56	62.12	164
4	0.899	41.61	58.20	181
5	0.866	59.83	69.28	133
6	0.866	54.52	67.44	141
7	0.866	70.09	75.06	108

2.3.3 超细粉再燃技术再燃区NO_x的还原

再燃区的NO_x还原率定义如下^[8]

$$\eta = (1 - [\text{NO}]_{\text{out}} / [\text{NO}]_{\text{in}}) \times 100$$

式中 [NO]_{out}为再燃区出口处NO_x的浓度; [NO]_{in}为再燃区入口处NO_x的浓度。

表3中数值模拟结果显示,工况2、3、4,过量空气系数最小的工况2再燃区NO_x还原率最大,达到了72.14%,过量空气系数最大的工况4其NO_x还原率最小,仅为41.61%。3种工况其它条件均相同,只有再燃区过量空气系数不同,由此可见再燃区过量空气系数越小,NO_x还原率越高。这一结果与文献[9]的实验结果一致。

表2中工况5、3、6,除再燃喷口位置不同外,其它条件均相同。工况5再燃喷口比工况3(2170mm)的高205mm,标高为2375mm,工况6的再燃喷口比工况3的低205mm,标高为1965mm。工况5的再燃区范围为1550~2375mm,是3种工况中最大的,其NO_x的还原率在3种工况中也是最高的,见表3。同理工况3的NO_x还原率居中,而工况6的

NO_x还原率最小。由于较大的再燃区延长了粒子在再燃区的停留时间,有利于NO_x的还原反应^[10],因此增大再燃区有利于提高NO_x的还原率。

表2中工况3、7除了燃尽风喷口位置不同外,其它条件相同。工况7燃尽风喷口比工况3(1550 mm)的低205mm,标高为1345mm,其再燃区的范围为1345~2170mm,大于工况3的1550~2170mm,因此工况7的再燃区NO_x还原率要高于工况3。这进一步验证了,增大再燃区有利于提高NO_x的还原率。

因此,再燃区较小的过量空气系数,较大的再燃区范围均有利于提高再燃区NO_x的还原率^[11]。

2.3.4 超细粉再燃技术燃尽区NO_x的生成

燃尽区,由于燃尽风的喷入,未燃的HCN等与氧气反应又生成部分NO_x,使得NO_x的含量有一个反弹^[12],参见图4的NO_x含量变化曲线,6种超细粉再燃工况燃尽区NO_x的反弹程度各不相同。

再燃区过量空气系数从小到大的工况2、3、4,其燃尽风的风量从小到大依次为工况4、3、2(主燃区3种超细粉再燃工况的配风相同,燃尽风按照1.2的过量空气系数来配比),图4中1550~930mm段的曲线给出了这3种工况燃尽区NO_x含量的反弹程度,工况2为最大,工况3次之,工况4为最小。由此可见,燃尽风风量的增大将使燃尽区新生成的NO_x增大^[13],不利于降低出口NO_x排放,但是燃尽风的增大意味着再燃风的减小,即再燃区过量空气系数减小,这是有利于NO_x还原反应的。因此再燃区的NO_x的还原和燃尽区NO_x新的生成要综合考虑,才可以使出口NO_x排放最大程度的减小。

表3中的工况2、3、4,其再燃区过量空气系数、再燃区NO_x还原率和NO_x脱除率的数据显示,再燃区NO_x还原率越大的工况,其出口NO_x脱除率也越大。但是,如前面的分析所述,再燃区NO_x还原率和燃尽区新的NO_x生成都将影响到出口NO_x的排放,由于工况2、3、4,燃尽区新的NO_x生成远小于再燃区NO_x较高的还原率,不足以影响出口的NO_x含量,因此表现出NO_x还原率高的工况其出口NO_x脱除率高。但比较表3中的工况2和工况7虽然工况2的再燃区NO_x还原率大于工况7,但是工况2的出口NO_x排放却小于工况7。正是由于工况7与工况2相比,较小的燃尽风和较小的燃尽区使得工况7的NO_x反弹较小,因此出口排放小于工况2。由此可见,再燃区NO_x还原率高的工况,其出口NO_x排放并不是最少的,超细粉再燃工况的出口NO_x排

放由再燃区的NO_x还原率和燃尽区新的NO_x生成综合决定。

3 结论

(1)超细粉再燃工况NO_x含量的数值模拟结果与中试试验较好地吻合。

(2)褐煤是有效的再燃燃料,褐煤作为超细粉再燃燃料的工况有效地降低了NO_x的出口排放,数值模拟结果显示NO_x脱除率高达58.2%~75.06%。

(3)再燃区较小的过量空气系数,较大的再燃区范围均有利于提高NO_x的还原率。

(4)超细粉再燃工况的出口NO_x排放由再燃区的NO_x还原率和燃尽区新的NO_x生成综合决定。

参考文献

- [1] Takahashi Y, Sengoku Y, Nakashima F *et al.* Development of MACT in furnace NO_x removal process for steam generators proc[C]. 1982 Joint Symposium Stationary NO_x Control Vol.1. EPRI Report CS-3182, 1983.
- [2] Burch T E, Tiliman F R, Chen W Y *et al.* Partitioning of nitrogenous species in the fuel-rich stage of reburning[J]. Energy and fuel, 1991, (5): 231-237.
- [3] Chen W Y, Ma L. Effect of heterogeneous mechanisms during reburning of nitrogen oxide[J]. AIChE Journal, 1996, 42(7): 1968-1975.
- [4] 姜秀民, 李巨斌, 邱健荣. 超细煤粉燃烧特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 71-78.
Jiang Xiumin, Li Jubin, Qiu Jianrong. Study on combustion on characteristic of micro-pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 71-78.
- [5] 姜秀民, 杨海平, 刘辉, 等. 粉煤颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 142-145.
Jiang Xiumin, Yang Haiping, Liu Hui *et al.* Analysis of the effect of coal powder granularity on combustion characteristics by thermogravimetry[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 142-146.
- [6] 钟北京, 傅维标. 煤的挥发分对NO_x再燃特性的研究[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(2): 185-189.
Zhong Beijing, Fu Weibiao. Study of NO_x reduction during reburning coal with volatiles[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2000, 6(2): 185-189.
- [7] 刘忠, 阎维平, 高正阳, 等. 超细煤粉的细度对再燃还原 NO 的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 204-208.
Liu Zhong, Yan Weiping, Gao Zhengyang *et al.* The effect of the micro-pulverized coal fineness on nitric oxide reduction by reburning [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 204-208.
- [8] 钟北京, 傅维标. 再燃燃料中HCN对NO_x还原反应的影响[J]. 热能动力工程, 2000, 15(1): 4-8.
Zhong Beijing, Fu Weibiao. The effect of HCN components in fuel

- reburned on NO_x reduction rate[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2000, 15(1): 4-8.
- [9] 钟北京, 施卫伟, 傅维标. 煤和煤焦还原NO_x的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2000, 21(3): 383-387.
Zhong Beijing, Shi Weiwei, Fu Weibiao. Experimental study of NO_x reduction with coal and char[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2000, 21(3): 383-387.
- [10] U S Department of Energy, National energy technology laboratory. micronized coal reburning demonstration for NO_x control[R]. PA 15236-0940, 2001.
- [11] 钟北京, 傅维标. 气体燃料再燃对NO_x还原的影响[J]. *热能动力工程*, 1999, 14(6): 419-423.
Zhong Beijing, Fu Weibiao. Effect of gaseous fuel reburning on NO_x reduction[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 1999, 14(6): 419-423.
- [12] 李永华, 李松庚, 冯兆兴, 等. 褐煤及其混煤燃烧NO_x生成的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(8): 34-36.
Li Yonghua, Li songgeng, Feng Zhaoxing *et al.* Experimental study on the formation of NO_x of brown and brown-blending coal combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(8): 34-36.
- [13] 程俊峰, 曾汉才, 熊蔚立, 等. 降低 300MW贫煤锅炉NO_x排放的试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(5): 157-160.
Cheng Junfeng, Zeng Hancan, Xiong Weili *et al.* Research and test for reducing NO_x emission of a 300 MW lean coal-fired boiler [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(5): 157-160.
-
- 收稿日期: 2004-11-24。
作者简介:
郭永红 (1975-), 女, 博士研究生, 研究方向为电站锅炉炉膛燃烧及污染物排放的数值模拟;
孙保民 (1959-), 男, 博士生导师, 研究方向为燃烧理论、污染物控制;
刘彤 (1963-), 女, 副教授, 研究方向为锅炉整体 CAD 的开发和应用;
冯兆兴 (1965-), 男, 年出生, 高级工程师, 研究方向为锅炉燃烧与环境保护;
王旻 (1965-), 男, 高级工程师, 研究方向为燃烧工程的研究;
李振中 (1956-), 男, 教授, 研究方向为锅炉燃烧与环境保护。