

# 多孔壁风耦合空气分级的燃烧技术

马红和<sup>1</sup>,周璐<sup>1</sup>,马素霞<sup>1</sup>,范江<sup>1</sup>,武卫红<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院热能工程系,太原山西030024;  
2. 山西电力科学研究所,太原山西030001)

**摘要:**简要介绍了空气分级燃烧技术原理,详细综述空气分级燃烧技术取得的研究进展和带来的问题,针对存在的问题提出了多孔壁风耦合空气分级燃烧技术,以期在防止高温腐蚀的基础上,同时实现煤粉的高效燃烧和低NO<sub>x</sub>排放。

**关键词:**多孔壁风;空气分级燃烧;煤粉锅炉

**中图分类号:**TK224.1+1

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2015)02-0143-03

## Progress in porous wall-air coupling with air-staged combustion technology

MA Hong-he<sup>1</sup>, ZHOU Lu<sup>1</sup>, MA Su-xia<sup>1</sup>, FAN Jiang<sup>1</sup>, WU Wei-hong<sup>2</sup>

(1. Department of Thermal Engineering, School of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** The technology principle of air-staged combustion technology is simply introduced. Its research progress and existing problems are reviewed in detail. In view of these problems, the porous wall-air coupling with air-staged combustion is proposed to prevent the high temperature corrosion. Meanwhile, the high efficient combustion and low NO<sub>x</sub> emissions are expected to be achieved.

**Key words:** porous wall-air; air-staged combustion; pulverized coal boiler

煤炭在世界能源结构中占据主导地位,但是煤燃烧产生了大量污染物,特别是氮氧化物,导致了严重的酸雨和光化学烟雾<sup>[1]</sup>。因此,各国政府和有关国际组织纷纷制定严格的NO<sub>x</sub>排放标准,如中国要求2012年1月1日后新建火电厂NO<sub>x</sub>排放不得超过100 mg/m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>,欧盟规定2016年起500 MW以上电厂的氮氧化物排放高限为200 mg/m<sup>3</sup>(6% O<sub>2</sub>)<sup>[3]</sup>。为此,科技人员开发了很多低NO<sub>x</sub>燃烧技术,常见的有低氮燃烧器、空气/燃料分级、过燃风以及烟气再循环等<sup>[4-5]</sup>。

其中,空气分级燃烧技术在降低NO<sub>x</sub>排放方面效果非常明显,并且容易实现、运行费用低廉<sup>[6]</sup>,在当前火力发电领域应用最为广泛,但是却造成了水冷壁的高温腐蚀和煤粉燃烧效率下降等问题。本文将对空气分级燃烧的技术原理进行简单介绍,详细综述该技术对降低NO<sub>x</sub>排放的作用特性和所造成问题。针对存在的问题,提出多孔壁风耦合空气分级燃烧的技术建议,以期防止水冷壁的高温腐蚀,并同时实现煤粉的高效燃烧和低NO<sub>x</sub>排放。

## 1 空气分级燃烧的技术原理

空气分级燃烧技术是将燃烧所需的部分空气,即“分离燃尽风(separated over fire air, SOFA)”,从

距主燃烧器适当距离引入,将燃烧区域拆分为贫氧还原区和富氧区,如图1所示<sup>[7]</sup>。贫氧还原区是主燃区,又称燃烧还原区;富氧区将煤粉完全燃尽,也称燃尽区。空气分级燃烧能够实现低NO<sub>x</sub>排放,原因有三:①主燃区氧量不足,燃烧温度低,抑制了热力型NO<sub>x</sub>的产生;②主燃区还原性的气氛还抑制了燃料氮转化为NO<sub>x</sub>,并能把已生成的NO<sub>x</sub>还原成氮气;③富氧区燃料较少,燃烧温度低,不会产生热力型NO<sub>x</sub><sup>[8]</sup>。

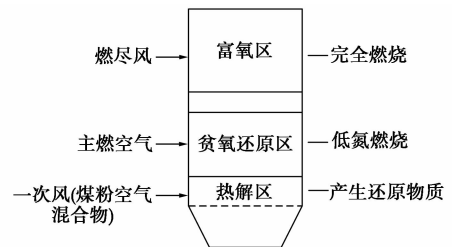


图1 空气分级燃烧示意图

## 2 空气分级燃烧技术对降低NO<sub>x</sub>排放的作用特性

从技术原理可以看出,空气分级燃烧特别有利于减少NO<sub>x</sub>排放,这也得到了很多研究的证明。一维沉降炉上的实验结果和模拟结果均表明空气分级

燃烧能够大大降低  $\text{NO}_x$  的排放<sup>[9]</sup>。而且两级或者多级空气分级燃烧,可使空气分多次参与煤粉的燃烧过程,大大降低了炉内的温度峰值,对降低  $\text{NO}_x$  排放的效果明显优于单级空气分级燃烧<sup>[10]</sup>。空气分级燃烧不仅可使  $\text{NO}_x$  排放量减少 20% ~ 50%,而且在适当条件下还可降低  $\text{SO}_x$  排放<sup>[11-12]</sup>。

空气分级燃烧对于降低  $\text{NO}_x$  排放的良好效果,在大型电站锅炉上也得到了证明。Li 等<sup>[13]</sup> 在 300 MW 的电站锅炉上研究发现,空气分级燃烧能够实现低  $\text{NO}_x$  排放。Choi 等<sup>[14]</sup> 采用现场测量和 Fluent 软件模拟相结合的方法,研究了 500 MW 的电站锅炉的烟气排放特性,也证明了空气分级燃烧可大大减少  $\text{NO}_x$  的产生。Liu 等<sup>[15]</sup> 利用三维模型研究了 600 MW 电站锅炉的燃烧过程,结果表明,煤粉在炉膛内的停留时间越长,越有利于  $\text{NO}_x$  还原为氮气。Díez 等<sup>[16]</sup> 利用 CFD 软件研究了  $\text{NO}_x$  在电站锅炉炉膛内的分布规律,证明了多级空气分级燃烧降低  $\text{NO}_x$  排放的效果优于单级分级燃烧。此外,Huang 等<sup>[17]</sup> 和 Li 等<sup>[18]</sup> 的研究也证明空气分级燃烧对于电站锅炉实现低  $\text{NO}_x$  排放有非常积极的作用。

### 3 空气分级燃烧带来的问题

尽管空气分级燃烧对降低  $\text{NO}_x$  排放非常有益,但同时还产生了一些“副作用”,主要表现如下。

首先,水冷壁极易发生高温腐蚀。这是因为采用了空气分级燃烧,炉膛主燃区是还原性气氛,存在大量  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}$  官能团和未燃尽的焦炭等还原性物质<sup>[15]</sup>。因此,一旦发生偏斜,气流就将强烈地撞击水冷壁,进而发生高温腐蚀<sup>[19]</sup>。

其次,空气分级燃烧容易导致煤粉燃烧效率降低<sup>[20]</sup>,实现低  $\text{NO}_x$  排放,往往是以牺牲煤粉的燃烧效率为代价的<sup>[21]</sup>。通常来讲,深度空气分级有利于降低  $\text{NO}_x$  排放,但会导致煤粉燃烧不完全、灰渣中碳含量高以及  $\text{CO}$  排放增多的问题<sup>[22]</sup>;浅层空气分级,虽然可获得较高的煤粉燃烧效率,但对降低  $\text{NO}_x$  排放帮助有限<sup>[23]</sup>。

### 4 多孔壁风耦合空气分级燃烧技术

鉴于空气分级燃烧带来的问题,科技人员开发了贴壁风防高温腐蚀的技术,在一定程度上减缓了高温腐蚀。但是从炉膛截面方向来看,贴壁风沿水冷壁流动,对于煤粉燃烧而言是一种无效风<sup>[24]</sup>,而且容易导致高温受热面管壁超温、 $\text{NO}_x$  排放浓度不

均匀等问题<sup>[25]</sup>。研究发现,当壁面附近氧气浓度超过 2% 时,水冷壁将无法与还原性物质直接接触,可有效防止高温腐蚀<sup>[26]</sup>。由此可想到一种改进思路:在燃烧还原区连续引入清洁空气,增设用于缓冲这股空气的腔体以及使空气均匀分配的多孔壁等,使空气从多孔壁以垂直水冷壁方向吹向炉膛,在水冷壁上形成一层氧气浓度超过 2% 的空气膜,将水冷壁与还原性气氛隔离开,高温腐蚀问题将得到解决。这层空气膜可称为“多孔壁风”,工作原理描述如图 2,这种技术称为多孔壁风耦合空气分级燃烧技术。

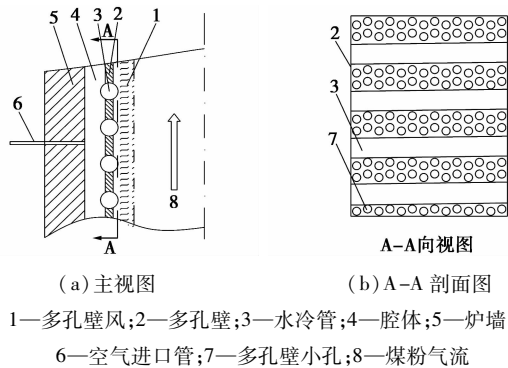


图 2 多孔壁风耦合空气分级燃烧的原理图

多孔壁风耦合空气分级燃烧技术的工作流程可以描述为:洁净空气通过空气管路 6 连续进入并充满腔体 4,均匀开有小孔 7 的多孔壁 2 和水冷管 3 焊接成水冷壁,腔体 4 内的空气穿过小孔 7,在水冷壁表面形成一层空气膜即多孔壁风 1,阻止煤粉气流 8 直接冲刷水冷壁。这种改进兼具多孔壁风和空气分级燃烧的优势,具体描述如下:①水冷壁面上有均匀的空气膜,将还原性气氛与水冷壁隔离,可防止高温腐蚀。②多孔壁风相当于进行“吹灰”,有效预防了水冷壁积灰、结渣。③提高了煤粉的燃烧效率。多孔壁风与水冷壁垂直,并且均匀地吹向炉膛,增强了煤粉气流的扰动,提高了煤粉的燃烧效率。④可有效降低  $\text{NO}_x$  排放。沿炉膛高度方向,多孔壁风从壁面一层层地逐步参与煤粉燃烧的过程,就像把空气一级一级地进行连续分级一样,相当于进行了多级空气分级燃烧,对降低  $\text{NO}_x$  排放更加有利。⑤多孔壁风从壁面四周均匀地吹向炉膛,避免了烟气成分的不均匀性。

### 5 结论与展望

空气分级燃烧技术对于煤粉锅炉降低  $\text{NO}_x$  排放极为有利,但同时也导致了水冷壁高温腐蚀和煤

粉燃烧效率降低等问题。贴壁风技术虽然一定程度上解决了高温腐蚀问题,但是造成了 $\text{NO}_x$ 排放不均匀等问题。鉴于此,本文中引入多孔壁风与空气分级燃烧进行耦合,以期解决水冷壁高温腐蚀问题,并同时实现煤粉的高效燃烧和低 $\text{NO}_x$ 排放。目前,多孔壁风耦合空气分级燃烧技术刚刚起步,还需在很多方面开展深入研究。

(1)多孔壁风对高温腐蚀的影响规律。引入贴壁风的目的是为了解决高温腐蚀问题,多孔壁风量、风速、温度以及引入方式都将对高温腐蚀产生影响。因此,开展多孔壁风对高温腐蚀影响规律的研究势在必行。

(2)多孔壁风对煤粉燃烧效率和低 $\text{NO}_x$ 排放的选择作用机制。通过实验或者数值模拟的手段,研究多孔壁风对煤粉燃烧效率和 $\text{NO}_x$ 排放作用关系,以及每种关系产生的原理,为该技术的推广应用奠定理论基础。

### 参考文献

- [1] Cristiano V S, Indrusiak M L S, Beskow A B. CFD analysis of the pulverized coal combustion processed in a 160 MWe tangentially-fired-boiler of a thermal power plant[J]. J of the Braz Soc of Mech Sci & Eng, 2010, 32(4): 427-436.
- [2] GB 13223—2011. 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境出版社, 2011.
- [3] Xiong J, Zhao H, Chen M, et al. Simulation study of an 800 MWe oxy-combustion pulverized-coal-fired power plant[J]. Energy & Fuels, 2011, 25: 2405-2415.
- [4] Li S, Xu T, Zhou Q, et al. Optimization of coal reburning in a 1 MW tangentially fired furnace[J]. Fuel, 2007, 86: 1169-1175.
- [5] Chen Z, Li Z, Zhu Q, et al. Gas/particle flow and combustion characteristics and  $\text{NO}_x$  emission of a new swirl coal burner[J]. Energy, 2011, 36: 709-723.
- [6] Si F, Romero C E, Yao Z, et al. Optimization of coal-fired boiler SCRs based on modified support vector machine models and genetic algorithms[J]. Fuel, 2009, 88: 806-816.
- [7] 尤鸿燕, 朱一飞, 胡伟. 燃煤锅炉空气分级燃烧降低 $\text{NO}_x$ 质量浓度的试验研究[J]. 2011, 25(2): 77-79.
- [8] Yu T, Zhu H, Peng C. Multi-objective optimization of coal-fired boiler combustion based on NSGA-II[J]. Journal of Networks, 2013, 7(8): 1300-1306.
- [9] Fan W, Lin Z, Kuang J, et al. Impact of air staging along furnace height on  $\text{NO}_x$  emissions from pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91: 625-634.
- [10] Shen J, Liu J, Zhang H, et al.  $\text{NO}_x$  emission characteristics of superfine pulverized anthracite coal in air-staged combustion[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 454-461.
- [11] Li S, Xu T, Sun P, et al.  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_x$  emission of a high sulfur self-retention coal during air-staged combustion[J]. Fuel, 2008, 87: 23-731.
- [12] Li S, Xu T, Hui S, et al. Optimization of air staging in a 1 MW tangentially fired pulverized coal furnace[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90, 99-106.
- [13] Li S, Xu T, Hui S, et al.  $\text{NO}_x$  emission and thermal efficiency of a 300 MWe utility boiler retrofitted by air staging[J]. Applied Energy, 2009, 86: 1797-1803.
- [14] Choi C R, Kim C N. Numerical investigation on the flow, combustion and  $\text{NO}_x$  emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2009, 88: 1720-1731.
- [15] Liu H, Liu Y, Yi G, et al. Effects of air staged conditions on the combustion and  $\text{NO}_x$  emission characteristics in a 600 MW wall fired utility boiler using lean coal[J]. Energy & Fuels, 2013, 27: 5831-5840.
- [16] Díez L I, Cortés C, Pallarés J. Numerical investigation of  $\text{NO}_x$  emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation[J]. Fuel, 2008, 87: 1259-1269.
- [17] Huang L, Li Z, Sun R, et al. Numerical study on the effect of the over-fire-air to the air flow and coal combustion in a 670 t/h wall-fired boiler[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87: 363-371.
- [18] Li Z, Jing J, Ge Z, et al. Numerical simulation of low  $\text{NO}_x$  combustion technology in a 100 MWe bituminous coal-fired wall boiler[J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 2009, 55: 574-593.
- [19] 苗长信, 刘富国, 王海, 等. 菏泽发电厂 420 t/h 煤粉锅炉水冷壁高温硫腐蚀分析及防治对策[J]. 电力建设, 2007, 28(2): 48-50.
- [20] Munir S, Nimmo W, Gibbs B M. The effect of air staged, co-combustion of pulverized coal and biomass blends on  $\text{NO}_x$  emissions and combustion efficiency[J]. Fuel, 2011, 90: 126-135.
- [21] Ribeirete A, Costa M. Impact of the air staging on the performance of a pulverized coal and furnace[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2009, 32: 2667-2673.
- [22] Ribeirete A, Costa M. Detailed measurement in a pulverized-coal-fired large-scale laboratory furnace with air staging[J]. Fuel, 2009, 88: 40-45.
- [23] Liu H, Chaney J, Li J, et al. Control of  $\text{NO}_x$  emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging[J]. Fuel, 2013, 103: 792-798.
- [24] 李敏, 邱纪华, 向军, 等. 锅炉水冷壁高温腐蚀运行工况的防腐模拟[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 150-154.
- [25] 陈敏生, 廖晓春. 600 MW 超临界锅炉防止高温腐蚀技术改造和运行调整[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 56-59.
- [26] 张翔, 邵国桢. 大型锅炉水冷壁高温腐蚀探讨[J]. 锅炉技术, 2002, 33(8): 9-13. ■