

文章编号: 1006-4729(2006)01-0029-04

空气分级燃烧降低燃煤电站锅炉 NO_x 生成的技术分析*

郑海红, 王冉阳, 任建兴

(上海电力学院 能源与环境工程学院, 上海 200090)

摘要: 在燃煤电厂锅炉燃烧中, NO_x 生成浓度高, 排放量大, 严重影响大气环境品质. 而煤种、一次空气系数、锅炉负荷、火上风投停是影响 NO_x 生成的重要因素, 在大型电站燃煤锅炉中实施空气分级燃烧技术, 可降低 NO_x 排放的浓度.

关键词: 燃煤锅炉; 空气分级; NO_x

中图分类号: X511 **文献标识码:** A

Technical Measure on NO_x Exhaust Redutin by Multi-stage Combustion at Large Coal-fired Power Plant Boiler

ZHENG Haihong WANG Ran-yang REN Jian-xing

(School of Thermal Power and Enviroment Engineering, Shanghai University
of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract At the combustion of coal-fired power plant boiler NO_x is a kind of injurious gas for air quality which exhausts in large number. Multi-stage combustion is an effective measure to reduce the NO_x exhaust of coal-fired boiler. The most important factors on NO_x creation are the coal species, the primary air coefficient, the boiler charge and the reject and the stopping of the primary air. The measure of multi-stage combustion can reduce the NO_x exhaust consistence and can be adopted in large coal-fired power plant boiler.

Key words coal-fired boiler; multi-stage; NO_x

现阶段和今后相当长的时期内, 煤炭仍是我国的主要动力燃料. 但由于煤炭中含有许多不可燃的矿物质、含硫和含氮的物质, 所以煤炭燃烧后会产生大量的固体颗粒, 而且含硫含氮物在燃烧过程中被氧化, 生成对大气产生严重危害的 SO₂ 和 NO_x. 研究表明, 大气污染物主要来自于燃煤电站锅炉, 其成分为 SO₂, NO_x, HC, CO 和微

粒等. 其中锅炉燃烧排放的 NO_x 是造成大气环境污染最为主要的物质之一, 国内发电行业已将燃煤电厂控制 NO_x 的生成与排放作为保护环境的重要措施之一.

我国国家环保总局也从立法的角度于 2003 年颁布了《火电厂大气污染排放标准》(GB13223-2003), 规定从 2004 年 1 月 1 日起, 新、扩、改建

收稿日期: 2006-02-16

基金项目: 上海市重点学科资助 (P1320).

300MW及以上火电机组中固态排渣煤粉炉 NO_x 排放量不得超过 $450 \text{ mg Nm}^3 (V_{\text{daf}} > 20\%)^{[1]}$ 。

燃煤锅炉降低 NO_x 排放的燃烧技术包括低 NO_x 燃烧器技术、炉内低过量空气系数运行、空气分级燃烧技术、燃料分级燃烧技术和烟气再循环技术等^[2-3]。空气分级燃烧技术是目前电厂中普遍采用的一种低 NO_x 燃烧技术。根据 NO_x 生成机理研究分析煤种、一次风空气系数、锅炉负荷、三次风投停等对 NO_x 生成的影响,同时采用空气分级燃烧的方法优化这些影响因素,可以达到有效降低 NO_x 生成的目的。

1 空气分级燃烧的原理

空气分级燃烧是通过调整燃烧器及其附近区域或是整个炉膛区域内空气和燃料的混合状态,使燃料经过“富燃料燃烧”和“富氧燃烧”两个阶段,实现 NO_x 生成量下降的燃烧控制技术。在富燃料燃烧阶段,由于氧气浓度较低,抑制了热力型 NO_x 的生成。同时,不完全燃烧使部分中间产物如 HCN 和 NH_3 将部分已生成的 NO_x 还原成 N_2 , 减少燃料型 NO_x 的生成^[4]。在富氧燃烧阶段,燃料燃尽,但由于此区域的温度已降低,新生成的 NO_x 量十分有限,因此,总体上 NO_x 的排放量明显减少。分级燃烧的实现有多种形式,但主要有顺烟气流向分级燃烧和沿炉膛断面分级燃烧两种方式。

(1)顺烟气流向分级燃烧(火上风方式)是将燃烧所需的二次风分两部分进入炉膛:一部分为主二次风,约占二次风总量的 70%~85%;另一部分为火上风,约占二次风量的 15%~30%。如此,炉膛内形成 3 个燃烧区域,即热解区、贫氧区和富氧区,如图 1 所示。

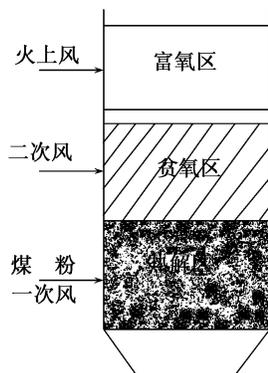


图 1 沿烟气流向分级燃烧

在热解区中煤粉和一次风混合燃烧,会生成少量的热力型 NO_x , 在贫氧区中燃料不完全燃烧,抑制了燃料性 NO_x 的生成,在富氧区中火上风促成了燃料的完全燃烧。整个过程减少了热力型 NO_x 的生成,同时抑制了燃料型 NO_x 的生成,降低了 NO_x 的总排放量,实现了高效低 NO_x 燃烧的要求。

(2)沿炉膛断面分级燃烧 是烟气流向垂直的炉膛断面上组织分级燃烧,通过将二次风射流部分偏向炉墙来实现的。它不仅可使主燃区处于还原性气氛从而降低 NO_x 的生成量,而且可使炉膛附近处于氧化性气氛,避免水冷壁的高温腐蚀,减轻燃烧器附近水冷壁的结渣。

2 分级燃烧和影响因素

本文以 300 MW 发电机组 SG-1025/18.3-M833 型锅炉为研究对象,该锅炉的形式为亚临界压力、一次中间再热、控制循环汽包炉,锅炉炉膛宽度为 11 970 mm,深度为 11 760 mm;炉膛断面热负荷为 5.69 MW m^2 (BMCR)和 5.15 MW m^2 (ECR);容积热负荷为 129.1 kW m^3 (BMCR)和 116.8 kW m^3 (ECR);燃烧方式为热风送粉、四角切圆燃烧、固态排渣;每角燃烧器共布置喷嘴 16 层,其中一次风 4 层,三次风 2 层,三次风喷口上部布置一层火上风,其余为二次风。制粉系统为配有 4 台钢球磨煤机的中间仓储式制粉系统,A、D 磨煤机和 B、C 磨煤机的制粉系统乏气作为三次风以对角方式送入燃烧器顶部乏气喷口。风烟系统配有 2 台送风机、引风机、一次风机和 2 台三分仓回转式空气预热器。空气预热器出口的热风一部分作为二次风,另一部分用于制粉系统干燥和输送煤粉。燃烧器设计参数见表 1。

表 1 燃烧器设计参数

| 项 目 | 设计风力 % | 设计风速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 设计风温 /°C |
|-----|-----------|--|-------------|
| 一次风 | 11.3 | 23.8 | 196.7 |
| 二次风 | 72.4 | 46.0 | 374.0 |
| 三次风 | 16.3 | 47.0 | 130.0 |

2.1 喷口布置的影响

锅炉喷口布置方式对炉内 NO_x 生成的影响较大,根据煤炭特性的不同,其配风方式也不同。对于烟煤采用均等配风,在实施分级燃烧技术时

一般遵循顺烟气流向, 一次风、二次风、三次风和火上风的比例方式, 风量比例可取 2 : 6 : 1 : 1

火上风喷口距离位置与 NO_x 生成浓度关系密切, 火上风喷口距离最上层燃烧器喷口间距一般可用下式进行估算:

$$H = 1.5 \left[\frac{V_{daf}}{10} \right] \times 0.5$$

式中, V_{daf}——煤种分析基挥发分含量, %。

如果锅炉燃用煤种挥发分 V_{daf} = 30.0%, 根据计算可得 H = 2.25(m), 说明随着燃用煤种挥发分的增大, 火上风喷口距离最上层喷口间距逐渐加大。

2.2 锅炉燃用煤种的影响

煤种对 NO_x 的生成影响较大, 根据 NO_x 生成机理, 煤种的变化直接影响燃料型 NO_x 的生成。燃料型 NO_x 是由燃料中所含的氮和氮化合物经热分解和氧化反应而生成的。研究表明: 当燃料中氮含量超过 0.1% 时, 所生成的 NO 在烟气中的浓度将会超过 130 ppm, 煤燃烧时约 75% ~ 90% 的 NO_x 是燃料型 NO_x。因此, 燃料型 NO_x 是煤燃烧时产生 NO_x 的主要来源。

燃料型 NO_x 的生成和破坏过程不仅和煤种特性、煤的结构、燃料中的氮受热分解后在挥发分和焦炭中的比例、成分和分布有关, 而且还和燃烧反应过程条件如温度和氧及各种成分浓度等密切相关。

在一般燃烧条件下, 燃料中的氮有机化合物首先被热分解成 HCN, NH₃, CN 等中间产物, 随挥发分一起从燃料中析出, 称之为挥发分 N。挥发分氮析出后仍残留在焦炭中的氮化合物, 称之为焦炭氮。在通常的煤燃烧温度下, 燃料型 NO_x 主要来自挥发分 N。煤粉燃烧时由挥发分生成的 NO_x 占燃料型 NO 的 60% ~ 80%, 由焦炭氮所生成的 NO_x 占到 20% ~ 40%。

在相同的条件下, 采用挥发分较高的煤种如烟煤对降低 NO_x 排放的效果较为显著。表 2 和表 3 分别为在分级燃烧试验时烟煤和贫煤的成分分析及其 NO_x 生成浓度^[5]。

表 2 试验煤种分析基成分

| 煤种 | W | A | V | FC | N | 发热量 Q _{hw} kJ kg ⁻¹ |
|----|------|-------|-------|-------|------|--|
| | % | | | | | |
| 烟煤 | 0.46 | 32.22 | 22.18 | 45.14 | 1.18 | 21.928 |
| 贫煤 | 0.21 | 27.84 | 14.08 | 57.87 | 0.89 | 22.162 |

由表 3 可知, 在一次空气系数小于 1 的情况下, 对于相同一次空气系数, 烟煤的 NO_x 排放浓度比贫煤约低 70 ~ 160 mg/m³, 说明挥发分较高的烟煤的 NO_x 排放浓度明显小于挥发分较低的贫煤, 因此, 采用分级燃烧控制 NO_x 生成时, 燃用烟煤的效果明显优于贫煤。

表 3 烟煤和贫煤 NO_x 生成浓度 mg/m³

| 一次空气系数 | 烟煤 | 贫煤 |
|--------|------|------|
| 0.65 | 540 | 700 |
| 0.75 | 540 | 680 |
| 0.85 | 570 | 700 |
| 0.95 | - | 720 |
| 1.05 | 850 | 850 |
| 1.20 | 1200 | 1000 |

2.3 一次空气系数选取的影响

一次空气系数高低将直接影响到煤粉的燃尽率, 在满足燃烧稳定的条件下, 一次空气系数的选取存在一个最佳值。对于实际运行的燃煤锅炉, 最佳的一次风空气系数既要满足分级燃烧热解区低 NO_x 生成量的要求, 又要满足炉内燃尽率的要求。

根据表 3 显示的数据和实际运行要求, 各煤种的最佳一次空气系数有所不同, 烟煤的最佳一次风空气系数大约在 0.8 ~ 0.9 之间, 在其他条件不变的情况下, 采用最佳一次空气系数分级燃烧的烟煤 NO_x 浓度约降低 60 mg/m³; 贫煤的最佳一次风空气系数则在 0.85 ~ 0.95 之间, 采用最佳一次风空气系数分级燃烧的贫煤 NO_x 浓度约降低 50 mg/m³。

2.4 火上风份额和锅炉负荷的影响

在采用顺烟气流向分级燃烧的方案中, 火上风份额的选取对 NO_x 生成影响较大。燃烧时通过减小主二次风风门挡板开度, 可以相对增大火上风比例, 相应减少 NO_x 的排放量。另外, 锅炉负荷对 NO_x 生成也有较大影响, 负荷越高, 炉内燃烧温度越高, 热力 NO_x 的生成比例明显上升, 而锅炉负荷越高, 火上风比例相应减少, 会影响火上风脱硝效果, 进而影响总的脱硝效率, 使 NO_x 生成浓度增加。表 4 为负荷对 NO_x 生成浓度的影响^[6]。

表 4 负荷对 NO_x 生成浓度的影响

| 负荷 | 炉膛出口氧 % | 炉膛出口 NO_x 浓度 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 火上风份额 % |
|-----|------------|--|------------|
| 100 | 2.4 | 814.8 | 5.95 |
| 80 | 2.5 | 615.0 | 7.46 |
| 70 | 2.8 | 470.0 | 10.30 |

由表 4 可知, 锅炉负荷越低, 火上风份额越大, NO_x 生成浓度越低. 但从运行的角度来看, 负荷的高低还会影响锅炉效率、发电效率等方面的指标, 因此, 负荷不能太低. 一般来说, 用电高峰期, 锅炉处于满负荷运行状态, NO_x 生成浓度就高; 用电淡季, 在锅炉负荷较低的情况下, 可以较大幅度地降低 NO_x 的生成, 实现低 NO_x 燃烧的目的.

根据上述分析可知, 在 300 MW 发电机组 SG-1025/18.3-M833 型锅炉上实施分级燃烧过程中, 控制一次风、二次风、三次风和火上风的比例为 2:6:1:1, 调整二次风门挡板的开度, 燃用挥发分、氮含量分别为 11.9% 和 0.79% 的煤种, 一次空气系数约为 0.85. 在不同锅炉负荷条件下, NO_x 总排放浓度见表 5.

表 5 不同锅炉负荷条件下 NO_x 总排放浓度

| 负荷 MW | 主汽温度 | 再热汽温度 | 排烟温度 | O_2/NO_x 浓度 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
|----------|-------|-------|-------|--|
| | /°C | | | |
| 300 | 539.4 | 534.4 | 128.0 | 909.0 |
| 282 | 541.4 | 537.1 | 121.0 | 857.2 |
| 266 | 539.4 | 536.7 | 122.0 | 811.4 |
| 244 | 540.6 | 533.8 | 122.0 | 763.0 |
| 225 | 541.0 | 538.0 | 116.0 | 740.8 |
| 203 | 540.8 | 535.4 | 115.0 | 698.4 |

注: O_2/NO_x 浓度表示含 O_2 氧气.

由表 5 可知, NO_x 总排放浓度随锅炉负荷的下降而降低.

3 结束语

在采用空气分级燃烧技术降低燃煤锅炉 NO_x 排放中, 燃用较高挥发分的煤粉, 降低一次空气系数对控制 NO_x 生成浓度和排放量有显著的效果. 顺烟气流向的分级燃烧, 增大火上风比例, 能够提高锅炉的脱硝效率. 在锅炉低负荷运行时, 炉内燃烧温度下降, 火上风比例相对增大, 有助于降低 NO_x 排放量.

参考文献:

- [1] 姚强. 洁净煤技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 45-55
- [2] 徐璋. 超细煤粉再燃降低 NO 排放的试验研究 [J]. 热力发电, 2004 (2): 34-37
- [3] Hartmut Spliethoff, Ulrich Griebel, Helmut Rudiger et al. Basic Effects on NO_x Emission in Air Staging and Reburning at a Bench-scale Facility [J]. Fuel, 1996 (75): 557-560
- [4] 任建兴, 翟晓敏, 傅建刚, 等. 火电厂氮氧化物的生成和控制 [J]. 上海电力学院学报, 2002, 18(3): 19-23
- [5] 肖理生. 分级燃烧最佳一次风空气系数的试验研究 [J]. 动力工程, 2001 (2): 1042-1045
- [6] 闫志勇. 锅炉分级燃烧降低 NO_x 排放的技术改造分析 [J]. 动力工程, 2004 (8): 764-769