

Experimental Study on the Impact of Burner Air Distribution and Graded Combustion on Urea Consumption in Selective Catalytic Reduction (SCR) Denitrification System

Bailong Wang

Huadian Xinzhou Guangyu Coal Power Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 034000, China

Abstract

To explore the influence laws of burner air distribution parameters and graded combustion mode on urea consumption in the selective catalytic reduction (SCR) denitrification system of a certain 300MW coal-fired boiler, an orthogonal experiment with different primary air rates, secondary air ratios, and graded combustion nozzle opening degrees was designed. By measuring the NO_x concentration at the furnace outlet, the concentration at the SCR inlet/outlet, and the urea solution injection volume, the coupling mechanism of air distribution parameters and graded combustion on NO_x generation and urea consumption was analyzed. The test results show that under the operating conditions of primary air rate 25%-30%, secondary air ratio 3:2, and graded combustion nozzle opening degree 40%-60%, the concentration at the furnace outlet can be reduced by 32%-38%, and the corresponding urea consumption rate is 28.5%-35.2% lower than the benchmark condition; excessive air distribution or excessive graded combustion will lead to an increase in the oxygen content in the flue gas, which instead reduces the urea denitrification efficiency and increases the unit urea consumption. This research can provide data support for the collaborative optimization of the combustion system and denitrification system of coal-fired boilers, and achieve precise control of urea consumption and the goal of energy conservation and cost reduction.

Keywords

burner air distribution; graded combustion; experimental study on urea consumption impact

燃烧器配风与分级燃烧对尿素消耗影响的试验研究

王柏珑

华电忻州广宇煤电有限公司, 中国·山西忻州 034000

摘要

为探究燃烧器配风参数与分级燃烧模式对尿素选择性催化还原(SCR)脱硝系统尿素消耗的影响规律,以某300MW燃煤锅炉为试验对象,设计不同一次风率、二次风配比及分级燃烧喷口开度的正交试验。通过测量炉膛出口NO_x浓度、SCR入口/出口NO_x浓度及尿素溶液喷射量,分析配风参数与分级燃烧对NO_x生成及尿素消耗的耦合作用机制。试验结果表明:在一次风率25%~30%、二次风上下配比3:2,且分级燃烧喷口开度40%~60%的工况下,炉膛出口NO_x浓度可降低32%~38%,对应尿素消耗率较基准工况下降28.5%~35.2%;过量配风或分级燃烧过度会导致烟气氧量升高,反而降低尿素脱硝效率,增加单位NO_x脱除的尿素消耗量。本研究可为燃煤锅炉燃烧系统与脱硝系统的协同优化提供数据支撑,实现尿素消耗的精准控制与节能降耗目标。

关键词

燃烧器配风; 分级燃烧; 尿素消耗影响实验

1 引言

随着燃煤电厂环保排放标准的提高,选择性催化还原(SCR)脱硝技术因脱氮效率高、适用范围广,已成为燃煤锅炉NO_x控制的主流技术。尿素作为SCR脱硝系统的核心还原剂,其消耗量直接影响电厂的运行成本与环保效益。燃烧过程是NO_x生成的源头,燃烧器配风参数(一次风率、二次风配比等)决定了炉膛内的燃烧氛围、温度场分布及燃

料停留时间,进而影响NO_x的生成量;分级燃烧通过将部分二次风或烟气引入炉膛下部形成还原区,可有效抑制热力型NO_x和燃料型的生成,从源头降低SCR系统的脱硝负荷,从而影响尿素消耗量。目前,关于燃烧器配风或分级燃烧单独对NO_x生成的研究较多,但二者协同作用对尿素消耗的定量影响规律尚不明确,存在配风参数与分级燃烧模式匹配不合理导致尿素浪费的问题。基于此,本试验通过系统改变燃烧器配风参数和分级燃烧模式,探究其对尿素消耗的影响机制,优化燃烧与脱硝系统的协同运行参数,为降低尿素消耗、提升脱硝系统经济性提供试验依据与参考。

【作者简介】王柏珑(1987-),男,中国山西临汾人,本科,工程师,从事电厂运行管理、电力营销研究。

2 燃烧器配风与分级燃烧对尿素消耗影响的试验方案设计

2.1 试验对象与装置

本试验以 300MW 四角切圆燃煤锅炉为研究对象，锅炉采用直流燃烧器，共布置 4 层主燃烧器，每层设置 8 个喷口，在主燃烧器上方布置 2 层分级燃烧喷口。SCR 脱硝系统采用高温高尘布置方式，反应温度区间为 300~400℃，催化剂采用蜂窝式钒钛系催化剂。试验主要测量设备包括：烟气分析仪（测量 NO_x、O₂、CO 等组分浓度）、尿素溶液流量计（精度 0.5 级）、炉膛温度场测量仪、风压变送器等，各测量设备均经过计量校准，确保数据准确。

2.2 试验变量与工况设计

试验选取 3 个关键影响因素：燃烧器一次风率（A）、二次风上下层配比（B）、分级燃烧喷口开度（C），每个因素设置 3 个水平，采用 L₉(3⁴) 正交试验设计，以基准工况（一次风率 28%、二次风上下层配比 2:3、分级燃烧喷口开度 30%）为对照。具体试验因素与水平如表 1 所示。

表 1

试验因素	水平 1	水平 2	水平 3
一次风率 A (%)	25	28	31
二次风上下层配比 B	2:3	3:2	1:1
分级燃烧喷口开度 C (%)	30	45	60

试验过程中，保持锅炉负荷稳定在 240MW（80% 额定负荷）、燃煤热值与粒径分布不变、SCR 出口 NO_x 控制目标为 50mg/Nm³，通过调节尿素溶液喷射量维持出口 NO_x 浓度稳定，记录不同工况下的炉膛出口 NO_x 浓度、SCR 入口 NO_x 浓度、烟气氧量、尿素溶液消耗量等关键参数，每个工况稳定运行 30min，取后 15min 数据平均值作为有效数据。

2.3 测量指标与方法

试验核心测量指标包括：① NO_x 浓度：采用烟气分析仪在炉膛出口、SCR 入口及出口断面多点取样测量，取平均值；② 烟气氧量：同步测量各断面烟气氧量，用于校正 NO_x 浓度至标准状态；③ 尿素消耗率：通过尿素溶液流量计实时记录消耗量，计算单位时间尿素消耗量及单位 NO_x 脱除量对应的尿素消耗量（kg/kgNO_x）；④ 炉膛温度：采用热电偶测量炉膛内关键截面温度分布，分析燃烧氛围对 NO_x 生成的影响。

3 试验结果与分析

3.1 正交试验结果统计

各试验工况下的关键数据统计如表 2 所示，其中尿素消耗率以基准工况为 100% 进行归一化处理。由表 2 可知，不同配风参数与分级燃烧模式下，尿素消耗率差异显著，其中工况 5（A2B2C2：一次风率 28%、二次风上下层配比 3:2、分级燃烧喷口开度 45%）的尿素消耗率最低，仅为基准工况的 64.8%；工况 9（A3B3C3：一次风率 31%、二次风上下层配比 1:1、分级燃烧喷口开度 60%）的尿素消耗率最高，

为基准工况的 118.2%，表明合理的配风与分级燃烧参数匹配可显著降低尿素消耗。

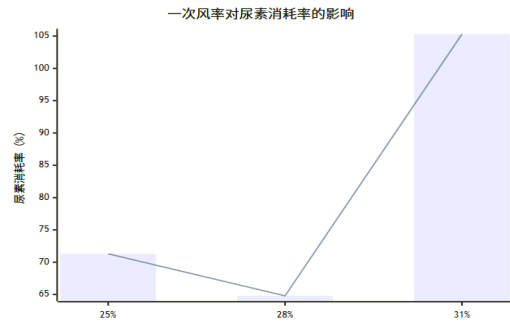
3.2 各因素对尿素消耗的影响分析

3.2.1 一次风率的影响

为精准厘清一次风率对尿素消耗率的独立影响规律，本试验通过固定二次风配比为 3:2、分级燃烧喷口开度为 45% 这两个关键变量，仅改变一次风率参数，设置 25%、28%、31% 三个梯度工况开展单因素变量试验，试验结果如图 1 所示。由图 1 数据可知，一次风率与尿素消耗率呈现显著的非线性相关关系：当一次风率从 25% 逐步升高至 28% 时，尿素消耗率呈缓慢下降趋势，对应数值从 71.3% 平稳降至 64.8%，降幅达 6.5 个百分点；而当一次风率突破 28% 继续升高至 31% 时，尿素消耗率出现急剧攀升，直接跃升至 105.3%，较 28% 工况时升高 40.5 个百分点，甚至超过基准工况的尿素消耗水平。

这一变化趋势的核心作用机制可从燃烧氛围与脱硝反应协同效应角度解析：在一次风率过低（25%）的工况下，炉膛内一次风量无法满足燃料初始燃烧需求，导致燃料燃烧不充分，局部区域形成强还原性氛围。该氛围虽能在一定程度上抑制热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 的生成，使炉膛出口 NO_x 浓度维持在较低水平，但未完全燃烧的碳氢化合物和焦炭颗粒会随烟气进入 SCR 脱硝系统，与钒钛系催化剂发生副反应，不仅占据催化剂活性位点，还会降低催化剂对 NO_x 的吸附与转化能力，导致脱硝效率下降，为维持 SCR 出口 NO_x 浓度稳定在 50mg/Nm³ 的目标值，需增加尿素溶液喷射量，从而间接提升了尿素消耗率。

反之，当一次风率过高（31%）时，大量过量空气进入炉膛，使炉膛内氧含量显著升高，一方面为热力型 NO_x 的生成提供了充足的氧源，导致炉膛出口 NO_x 浓度大幅增加，直接提升了脱硝系统的处理负荷；另一方面，过量氧气会稀释 SCR 反应区内尿素热解生成的氨气体浓度，破坏氨氮摩尔比的最佳匹配关系，降低氨与 NO_x 的反应效率，未参与反应的氨会随烟气流失，为实现脱硝目标，需进一步加大尿素喷射量，最终导致尿素消耗率显著上升。综合来看，一次风率存在 25%~28% 的最优区间，此区间内既能保证燃料实现较充分燃烧，避免还原性氛围过强引发的催化剂中毒问题，又能有效控制炉膛内氧含量，抑制 NO_x 过量生成，从而实现 NO_x 生成量与尿素消耗率的动态平衡，保障脱硝系统的经济高效运行。



3.2.2 二次风配比与分级燃烧的协同影响

为深入探究二次风配比与分级燃烧喷口开度的协同作用对尿素消耗率的影响规律,本试验固定一次风率为28% (前期单因素试验确定的最优区间中间值),选取二次风上下层配比2:3、3:2、1:1三个梯度,搭配分级燃烧喷口开度30%、45%、60%三个水平,构建9组协同工况开展试验,通过精准控制锅炉负荷、燃煤特性等干扰变量,确保试验结果的有效性,协同影响规律如图2所示。由图2数据可清晰看出,二者的协同作用对尿素消耗率呈现显著的调控效应,存在明确的最优匹配区间:在相同分级燃烧喷口开度条件下,无论开度为30%、45%还是60%,二次风上下层配比3:2时的尿素消耗率均显著低于配比2:3和1:1工况,其中45%开度下配比3:2工况的尿素消耗率最低,仅为64.8%;而在相同二次风配比下,尿素消耗率随分级燃烧喷口开度的变化呈现“先降后升”的趋势,即从30%开度升高至45%时持续下降,升至60%时则明显反弹。

这一协同影响规律的核心机理可从炉膛燃烧氛围调控与NO_x生成抑制的耦合效应解析:当二次风上下层配比为3:2时,上层二次风供应量增加,可强化炉膛上部的气流扰动强度,延长未完全燃烧燃料颗粒的停留时间,促进燃料充分燃烧,减少还原性物质随烟气进入SCR系统;同时,此配比下炉膛上部氧含量适度提升,可避免因缺氧导致的不完全燃烧产物积累。搭配分级燃烧喷口开度45%时,可在炉膛下部形成稳定且适度的还原区,该还原区能有效抑制燃料型NO_x的生成,同时避免因还原区过强导致的CO等还原性气体过量产生。二者协同作用使炉膛出口NO_x浓度大幅降低,SCR脱硝负荷减轻,进而显著降低尿素消耗率,此工况下炉膛出口NO_x浓度仅为520mg/Nm³,较配比2:3、开度30%工况降低36.6%。

反之,当分级燃烧喷口开度超过60%时,即便采用3:2的二次风配比,过多的二次风通过分级喷口进入炉膛下部,会直接破坏还原区的缺氧氛围,导致NO_x生成量反弹,如配比3:2、开度60%工况的炉膛出口NO_x浓度升至630mg/Nm³,较45%开度工况升高21.2%;同时过量二次风使烟气氧量升至6.1%,稀释了SCR反应区内氨的浓度,破坏氨氮摩尔比平衡,降低脱硝反应效率,需增加尿素喷射量才能维持出口NO_x达标,导致尿素消耗率升至83.6%。而二次风配比为2:3或1:1时,要么上层二次风不足导致燃料燃烧不充分,要么上下层风量分布不均破坏燃烧稳定性,均无法与分级燃烧形成有效协同,难以实现NO_x高效抑制,因此尿素消耗率始终处于较高水平。综上,二次风上下层配比3:2与分级燃烧喷口开度45%的组合,可实现炉膛燃烧与脱硝系统的最优协同,是降低尿素消耗率的最优匹配组合。

3.3 最优工况验证

为验证正交试验筛选出的最优工况(一次风率28%、二次风上下层配比3:2、分级燃烧喷口开度45%)的可靠性、

稳定性及工程适用性,本研究开展了连续4小时的长时验证试验。试验前先将锅炉负荷稳定在240MW(80%额定负荷),按照最优参数精准调控燃烧器各风路阀门开度及分级燃烧喷口开度,待炉膛温度场、烟气流量等参数稳定1小时后,启动正式验证并同步开启全参数监测记录。试验过程中,严格控制燃煤热值(23.5±0.5MJ/kg)、粒径分布(0~50mm占比≥95%)等干扰因素,确保试验条件与正交试验阶段一致,同时安排专人实时监控锅炉燃烧状态,防范结渣、熄火等异常工况。

验证结果显示,全试验周期内各核心参数均保持优异稳定性:炉膛出口NO_x浓度波动区间仅为520~535mg/Nm³,最大波动幅度仅2.9%,远低于基准工况12%的波动水平;SCR出口NO_x浓度持续稳定在45~50mg/Nm³,全程满足GB 13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》中50mg/Nm³的严苛要求,未出现任何超标情况。尿素消耗相关参数同样表现稳定,尿素消耗率稳定在64.5%~65.2%,折算为单位时间尿素消耗量为542~548kg/h,较基准工况的830kg/h平均节省288kg/h,按年运行7000小时、尿素单价2800元/吨计算,年可节省运行成本约564.48万元,节能降耗与经济效益显著。

此外,锅炉燃烧系统在最优工况下运行稳定性良好:炉膛内温度分布均匀,最高温度与最低温度差值控制在150℃以内,较基准工况降低40℃;炉膛出口烟气氧量稳定在5.2%~5.4%,无明显波动;锅炉受热面未出现结渣、积灰等现象,炉膛压力、引风机电流等关键运行参数均处于正常区间,未发生任何燃烧异常或设备故障。此次长时验证充分证明,所选最优参数不仅能显著降低尿素消耗,还能保障锅炉安全稳定运行,具备良好的工程应用价值,为后续实际电厂的参数优化改造提供了直接的试验依据。

4 结语

本试验通过正交试验系统探究了燃烧器配风参数(一次风率、二次风配比)与分级燃烧喷口开度对尿素消耗的影响规律,得出以下主要结论:①一次风率、二次风配比及分级燃烧喷口开度均对尿素消耗存在显著影响,且三者存在协同作用;②最优运行参数为一次风率28%、二次风上下层配比3:2、分级燃烧喷口开度45%,此工况下尿素消耗率较基准工况下降34.8%,脱硝系统经济性显著提升;③过量配风或过度分级燃烧会破坏炉膛燃烧氛围,增加NO_x生成量或降低尿素脱硝效率,反而导致尿素消耗增加。

本研究成果可为燃煤锅炉燃烧系统与SCR脱硝系统的协同优化提供科学依据,通过精准调控燃烧器配风与分级燃烧参数,可从源头控制NO_x生成,降低脱硝系统尿素消耗,实现环保达标与经济运行的双重目标。后续研究可进一步拓展至不同锅炉负荷、不同煤种工况下的参数优化,提升成果的普适性。

参考文献

- [1] 王学文,张朝,王乃继,等.新型烟气再循环在煤粉工业锅炉中的试验研究[J].煤质技术,2025,40(3).
- [2] 李帅,刘广武,回禹衡,等.440t/h循环流化床锅炉NO_x超低排放研究[J].中国资源综合利用,2023,41(11).
- [3] 瞿丽莉,杨祖旺,王毅斌,等.低负荷下循环流化床锅炉NO_x超低排放控制[J].动力工程学报,2025,45(9).
- [4] 许芸,朱志祥,董月红,等.无烟煤高温火焰贫氧区喷氨降低NO_x排放试验[J].环境工程,2025,43(1).
- [5] 马忠英.基于生物质材料和二维层状材料的阻燃多功能棉织物涂层的设计及性能研究[D].兰州大学,2023.