

富氧低 NO_x 稳燃技术在 300 MW 煤粉锅炉机组 灵活性调峰中的应用

陈子曦¹, 王庆², 王泉海¹, 雷云红², 李建波¹, 贾益², 亢银虎¹, 卢啸风¹

(1. 重庆大学 低品位燃料高效清洁利用技术及系统重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆富燃科技股份有限公司, 重庆 400050)

摘要: 为了对富氧低 NO_x 稳燃技术的实际应用效果进行工程示范, 针对富氧低 NO_x 稳燃技术在 300 MW 亚临界煤粉锅炉上的低负荷稳燃特性进行了实炉试验研究。通过将锅炉 A、D 层原 12 台一次风燃烧器改造为富氧低 NO_x 燃烧器以及对锅炉主要运行参数的测量分析, 研究富氧低 NO_x 稳燃技术对 SCR 入口的 NO_x 原始排放浓度、烟气温度的影响, 以及对锅炉总体运行特性的影响。实炉试验、日常运行以及第三方完成的性能测试结果表明, 原锅炉改造应用富氧低 NO_x 稳燃技术后, NO_x 原始生成量明显降低。改造后的运行实践证明, 锅炉最低可在 23.5% 负荷 (70.4 MW) 下稳定运行, 且同时能保证锅炉出口过热蒸汽参数和再热蒸汽参数达到运行要求、SCR 入口烟温维持在 280 °C 以上及 NO_x 原始生成浓度低于 300 mg/Nm³, 实现 NO_x 超低排放。锅炉运行经济性统计分析表明, 采用富燃低 NO_x 稳燃技术后, 调峰能力大幅提高, 可长期低负荷运行, 且可有效投入 SCR 脱硝系统, 锅炉的年平均点火和低负荷稳燃油量减少了 65%。因此富氧低 NO_x 稳燃技术可实现锅炉的低负荷稳燃及超低排放, 且大幅降低锅炉点火及稳燃用油, 提高锅炉的经济性。

关键词: 富氧低 NO_x 稳燃技术; 低负荷稳燃; 超低 NO_x 排放

中图分类号: X511; TK229.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)04-0134-06

Application of oxygen-enriched and low NO_x combustion steady technology during flexibility peak-load regulating of 300 MW pulverized coal boiler unit

CHEN Zixi¹, WANG Qing², WANG Quanhai¹, LEI Yunhong², LI Jianbo¹, JIA Yi², KANG Yinhu¹, LU Xiaofeng¹

(1. Key Laboratory of Low-grade Fuel Efficient Clean Utilization Technology and System, Chongqing University,

Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Furan Technology Co., Ltd., Chongqing 400050, China)

Abstract: In order to demonstrate the practical application of oxygen-enriched and low-NO_x stable combustion technology, the steady combustion characteristics of oxygen-enriched and low-NO_x technology on a 300 MW sub-critical pulverized coal-fired boiler under low load were studied. After transforming the original 12 primary air burners at A and D floors of the boiler into oxygen-enriched and low-NO_x ones, the main operating parameters of the boiler were measured and analyzed. The influence of oxygen-enriched and low-NO_x stable combustion technology on original NO_x emission concentrations and flue gas temperature at the SCR inlet and the overall operating characteristics of the boiler were studied in detail. The results of field tests, daily operation and performance testing done by third parties show that the original NO_x production is significantly reduced after the original boiler being modified and applied with oxygen-enriched and low-NO_x stable combustion technology. The operation after the transformation proves that the boiler can maintain stable operation at a minimum of 23.5% load (70.4 MW). At the same time, it can ensure that the superheated and reheated steam parameters at the boiler outlet meet the operating requirements, and the SCR inlet flue gas temperature is maintained above 280 °C and the original NO_x generation concentration is lower than 300 mg/Nm³, so as to achieve the ultra-low-NO_x emission. The statistical analysis of boiler operation economics shows that the peak shaving

收稿日期: 2019-04-26; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19042601

作者简介: 陈子曦 (1994—), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 研究方向为洁净煤燃烧技术。E-mail: 632646661@qq.com。通讯作者: 卢啸风, 教授。E-mail: xfluke@cqu.edu.cn

引用格式: 陈子曦, 王庆, 王泉海, 等. 富氧低 NO_x 稳燃技术在 300 MW 煤粉锅炉机组灵活性调峰中的应用 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 134-139.

CHEN Zixi, WANG Qing, WANG Quanhai, et al. Application of oxygen-enriched and low NO_x combustion steady technology during flexibility peak-load regulating of 300 MW pulverized coal boiler unit [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(4): 134-139.



移动阅读

ing capacity is greatly improved after using the oxygen-enriched and low-NO_x stable combustion technology, which can make boiler operate for a long time at low load, and can be effectively put into the SCR denitration system. The average annual ignition and low-load stable combustion oil is reduced by 65%. Therefore, the oxygen-enriched and low-NO_x stable combustion technology can achieve low-load stable combustion and ultra-low emission of the boiler, and greatly reduce the boiler ignition and stable combustion oil, and improve the economy of boiler.

Key words: oxygen-enriched and low-NO_x stable combustion technology; low-load stable combustion; ultra-low-NO_x emission

0 引 言

可再生能源发电的装机容量逐年增加且运行中有较强的随机性。为促进可再生能源发展,国内对燃煤锅炉机组提出了更高的调峰要求,要求部分锅炉实现 20% 负荷下稳定燃烧甚至频繁启停^[1-3]。因此锅炉运行中如何适应深度调峰要求将是电站锅炉燃烧技术的研究重点之一^[4-6]。而且要求锅炉在深度调峰的同时,需要实现污染物达标排放^[7]。

国内外学者开展了许多低负荷稳燃和降低 NO_x 排放的技术研究。其中低负荷稳燃技术主要包括气化小油枪稳燃技术和等离子稳燃技术,前者对煤种要求较高,而等离子点火燃烧器不适合低挥发分煤种,且使用寿命短,易磨损漏水,造成一次粉管堵塞^[8]。低 NO_x 排放技术主要有低氧燃烧、分级送风燃烧、燃料分级燃烧、回收 CO₂ 或 H₂O 富氧燃烧、双分级或双尺度燃烧技术等^[9-13],且在使用中达到较好的效果,此外还有尚在改进与研究中的脉动燃烧、化学链燃烧和 MILD 燃烧技术等,但这些技术在锅炉超低负荷运行时难以达到稳燃且同时抑制 NO_x 生成的效果^[14-18]。可见前人研究中同时满足低负荷稳燃和降低 NO_x 生成的技术很少。为此,作者团队研发了一种新的富氧低 NO_x 稳燃技术,在煤粉锅炉超低负荷调峰时,能解决煤粉锅炉不投油条件下的稳燃问题和 NO_x 生成量增大问题,并在某电厂的 300 MW 煤粉锅炉机组进行了应用示范。

本文介绍了某电厂 300 MW 煤粉锅炉燃烧器进行富氧低 NO_x 燃烧技术改造情况,在工业示范对不同负荷下 NO_x 排放量和烟气及蒸汽温度进行测量,

并对富氧低 NO_x 燃烧技术在超低负荷下的性能优势及其经济性进行分析,为不同电站锅炉深度调峰和低 NO_x 排放提供参考和改造依据。

1 富燃低 NO_x 稳燃技术的基本原理

预燃室中的浓煤粉流在局部极高氧浓度下高速燃烧,之后形成的还原性气氛中控制 NO_x 的生成,局部缺氧使 NO_x 还原为 N₂ 和 O₂,从而降低 NO_x 生成量^[19-20]。

由于煤粉在局部极高氧浓度下燃烧,提供着火所需的局部高温,使富氧煤粉火焰的稳定性好,可确保炉膛煤粉火焰着火稳定,还可维持其余煤粉燃烧器在低 NO_x 工况下运行^[21]。

2 富氧低 NO_x 技术在煤粉锅炉上的应用

2.1 锅炉概况

某电厂的 1 号炉为武汉锅炉厂制造的亚临界自然循环汽包锅炉(WGZ1018-18.44-2)。锅炉采用中速磨直吹制粉系统,墙式旋流燃烧器对冲布置,尾部双烟道,烟气挡板调节再热汽温,喷水减温调节过热汽温,中间一次再热,平衡通风,三分仓容克式空气预热器,刮板捞渣机连续固态排渣,全钢结构架,悬吊结构,锅炉运转层以上为紧身封闭岛式布置。

锅炉尾部烟道安装 SCR 脱硝系统,采用宽温区脱硝催化剂,其使用温度为 260~400 °C。锅炉设计汽包压力 9.61 MPa,过热蒸汽温度 543 °C,再热温度 543 °C,蒸汽流量 1 004 t/h。锅炉燃用劣质烟煤,煤质性质见表 1。

表 1 燃用煤种煤质性质
Table 1 Properties of burning coal

$A_{ar}/\%$	$V_{daf}/\%$	$w(C_{ar})/\%$	$w(H_{ar})/\%$	$w(N_{ar})/\%$	$w(O_{ar})/\%$	$w(S_{ar})/\%$	$Q_{net,p,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
37.06	18.13	44.28	2.77	0.91	6.02	1.66	16.82

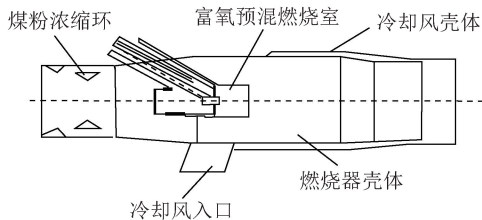
由于调峰运行,该锅炉机组在运行中启停频繁,最低运行负荷为额定负荷的 40%~50%,无法满足深度调峰至额定负荷 25% 的要求。为此,对机组进行富氧低 NO_x 燃烧技术改造,将锅炉 A、D 两层原 12

台一次风燃烧器改为富氧低 NO_x 燃烧器,并配套安装供氧系统、燃气系统和控制系统等。

2.2 富氧低 NO_x 燃烧器工作原理

图 1 为富氧低 NO_x 燃烧器原理,燃烧器主要由 5

部分组成。一次风和煤粉经过煤粉浓缩环后形成外稀内浓的2股煤粉流,部分煤粉进入富氧预混燃烧室呈富氧状态,使该部分煤粉的着火温度降低。预混室内通入的压缩氧气与油枪喷口处的燃油充分混合后高效燃烧,产生的火焰具有动量大、刚性强、传播速度快、中心温度高等特点,使富氧预混燃烧室内的富氧煤粉快速热解,释放挥发分着火燃烧,产生大量热而引燃整个一次风煤粉。冷却风从冷却风入口射入,冷却燃烧器壳体,避免了燃烧器被高温火焰烧坏^[22-23]。

图1 富氧低NO_x燃烧器原理Fig.1 Schematic diagram of oxygen-enriched and low NO_x combustion

2.3 测点布置

利用锅炉原有温度测点和压力测点,获得不同工况下烟气温度、蒸汽温度以及压力。在锅炉SCR入口烟道处,按网格法设置10个深度1 m的SCR入口烟气组分测点,如图2所示。

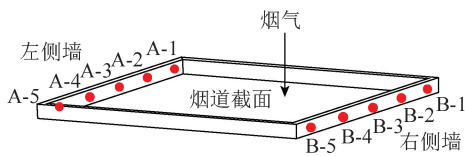


图2 SCR入口烟道处测点布置

Fig.2 Arrangement of measuring points at SCR inlet flue

2.4 试验工况

根据试验要求及现场实际情况,重点针对同时投运A、D层富氧低NO_x燃烧器前后及低负荷(20%~40%额定负荷)下SCR入口烟道NO_x浓度与温度进行测量,每个测点取平均值。试验工况见表2。

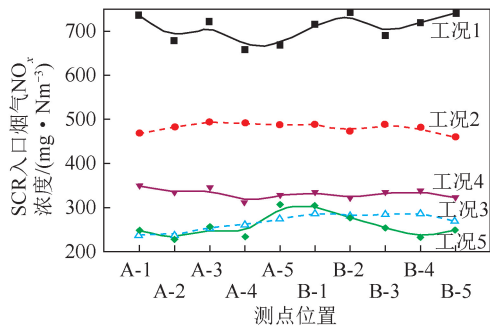
表2 NO_x及烟温测量工况Table 2 Measurement conditions of NO_x and flue gas temperature

工况	改造情况	负荷/MW	维持时间/h
1	改造前	187	4~5
2	改造后未投运富氧低氮燃烧器	200	4~5
3	改造后投运富氧低氮燃烧器	135	4~5
4	改造后投运富氧低氮燃烧器	100	4~5
5	改造后投运富氧低氮燃烧器	4~5	4~5

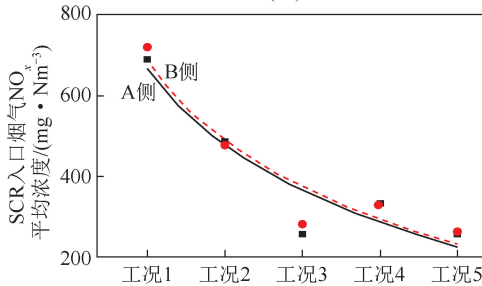
3 试验结果与分析

3.1 不同工况下NO_x生成量

图3(a)为锅炉改造前后SCR入口NO_x浓度分布,图3(b)为各工况NO_x平均浓度。可以看出,富氧低NO_x稳燃燃烧器改造后NO_x排放量显著降低。改造前,SCR入口烟道处NO_x浓度高达700 mg/Nm³左右。对比工况1、2,改造后未投入富氧低NO_x燃烧系统时,NO_x排放量降至481 mg/Nm³,其原因主要是富氧低NO_x稳燃燃烧器有煤粉浓缩环,将来流煤粉经浓淡分离形成浓淡2股煤粉流,煤粉浓度均偏离了生成大量NO_x的浓度范围,其原理与浓淡分离燃烧器相似,从而降低了NO_x排放量。



(a)

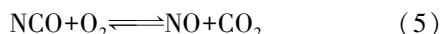
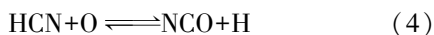
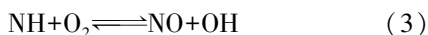
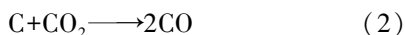
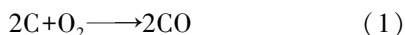


(b)

图3 各工况的NO_x生成量Fig.3 NO_x concentration of operating conditions

投运富氧低NO_x稳燃燃烧系统后(图3(b)中工况3~5),由于炉内NO_x的生成量减小,整个SCR入口烟道的NO_x浓度分布显著降低。通过局部富氧气氛使油强烈燃烧产生高温火焰,并使粉的着火温度下降,着火提前。低浓度富氧富煤粉火焰中,由于煤多风少,强化了反应(1)、(2),燃烧过程中生成较多的CO;高温促进了煤中挥发分的挥发,增加了挥发分中碳氢化合物浓度^[20,24]。挥发分中的NH₃和HCN等作为NO_x生成的主要前驱化合物,其生成和破坏机理对NO_x的释放具有重要作用,大量CO和碳氢化合物使还原性气氛加强,抑制前驱化合物NH₃和HCN中NH自由基和NCO自由基向NO_x的转化^[25-27],使反应(3)~(5)的正向氧化反应减弱,

降低了燃烧初期的 NO_x 生成量。



投入富氧低 NO_x 稳燃燃烧器后,燃烧器中心区域形成局部高浓度富氧,将火焰逐级放大。先点燃高浓度微油火焰,产生极高的烟温,再用高温微油火焰点燃中心区域的富氧富煤粉火焰,产生高温煤粉火焰,其点燃周边的普通煤粉气流,使锅炉低负荷运行时具有良好的稳燃效果^[28]。由于解决了点火稳燃问题,低负荷时炉内配风仍可沿用低 NO_x 燃烧原理,因此在总体较高氧浓度的低负荷工况下,生成的 NO_x 仍较少,且炉内燃烧稳定。

3.2 不同工况下 SCR 入口温度

图 4 为各工况 SCR 入口烟气温度。由图 4(a) 可知,工况 2 与改造前 SCR 入口温度分布相比变化很小,说明改造对 SCR 入口烟气温度的影响不大,这是因为改造成富氧低 NO_x 燃烧器后,由于燃烧工况稳定,即使火焰中心温度降低(降低 NO_x 生成的需要),但炉内燃烧换热情况与改造前无太大差异,且在同一负荷下锅炉的给煤量和空气量几乎相等,煤粉燃烧释放的总热量相近,炉膛出口温度变化不大,因此 SCR 入口烟气温度也无明显改变。由图 4(b) 可知,随着负荷的降低,SCR 入口烟气温度呈降低趋势。这是因为随着锅炉负荷的降低,给煤量和空气量减少,使炉内放热量减少,炉膛出口烟温随之下降,尾部烟道各级受热面温度均下降,排烟温度降低^[29-30]。在整个试验工况负荷范围内,烟气温度能够满足此电厂 1 号机组 SCR 系统 260~400 °C 正常投用的温度需求,且运行中可通过 A、D 层多点投运调整 SCR 入口烟温。本文在超低负荷时能维持 SCR 入口处尽可能高烟温的关键是将炉膛最上层和最下层燃烧器改造为富氧低 NO_x 燃烧。其中,

表 3 23.5% 负荷下锅炉内最大壁温偏差

Table 3 Maximum wall temperature deviation in boiler under 23.5% load

炉膛位置	高过出口管	后屏出口管	低过出口管	再热器出口	分隔屏出口管
最大壁温偏差/°C (负荷 70.4 MW)	53	99	13.7	71.4	161.8

4 经济性分析及工业应用

根据入炉试验及第三方性能测试结果,富氧低 NO_x 燃烧技术改造前后的油耗见表 4。富氧低 NO_x 燃烧技术改造前,该锅炉每年平均点火及稳燃耗油

最下层富氧低 NO_x 燃烧器主要起低负荷稳燃作用,最上层富氧低 NO_x 燃烧器的主要作用是强化炉膛中上部燃烧,维持炉膛出口烟温。锅炉超低负荷运行时,通过提高炉膛出口烟温,即可使 SCR 入口具有较高的烟温。

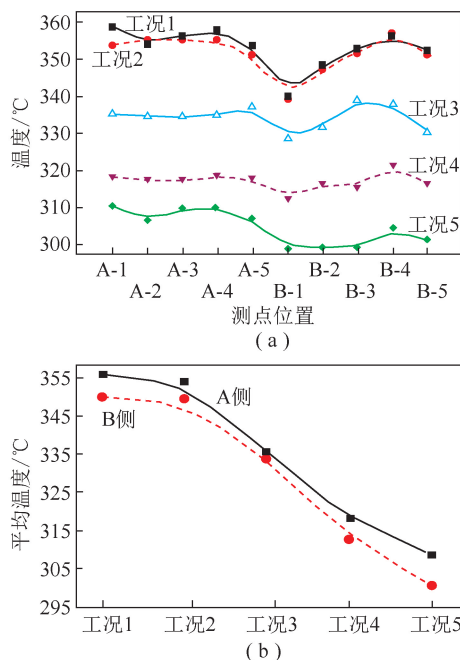


图 4 各工况 SCR 入口烟气温度

Fig.4 Flue gas temperature at the SCR inlet of the operating conditions

3.3 超低负荷下锅炉运行特性

表 3 为锅炉在投运富氧低 NO_x 稳燃系统时,23.5% 负荷(锅炉不投油枪)下锅炉蒸汽受热面壁温偏差。此时锅炉发电负荷为 70.4 MW,主汽温度 485.4 °C,SCR 入口 NO_x 浓度分别为 287.4、259.4 mg/Nm³,SCR 入口平均温度分别为 299、286.7 °C,脱硝效率达 93.7%、98.3%。

结合表 3 可知,说明投运富氧低 NO_x 稳燃系统后,锅炉在 20%~25% 超低负荷稳定运行的同时,不仅能保证 SCR 入口温度在较高的脱硝效率范围内,还能控制较低的 NO_x 生成量。

260 t 左右,改造后仅需 91 t,节油率达 65%,其中低负荷稳燃节油率达到 80% 以上。按目前市场柴油价格 0.81 万/t 计算,该锅炉应用富氧低 NO_x 燃烧器后,在电网调峰强度下,每年减少油耗成本 137 万元(表 4),经济效益可观。

表4 富氧低NO_x燃烧技术改造改造前后的油耗Table 4 Fuel consumption before and after low NO_x and oxygen-enriched combustion renovation

燃烧器	冷态启动及稳燃耗油/t	价格/万元
传统大油枪燃烧器	260	210.60
富氧低NO _x 燃烧器	91	73.71

5 结 论

1) 富氧低NO_x燃烧技术可保证锅炉在23.5%负荷时稳定运行,且锅炉NO_x排放可达标。

2) 锅炉实际运行表明,锅炉在接近20%的低负荷稳定运行时,NO_x原始排放浓度可控制在300 mg/Nm³以下,SCR入口烟气温度在280℃以上,满足该锅炉SCR入口温度要求。

3) 富氧低NO_x燃烧器显著降低了全年点火及低负荷稳燃油耗,经济效益可观。

参考文献(References):

- [1] 电力与能源刊讯.国家发改委发布《电力发展“十三五”规划(2016—2020年)》[J].电力与能源,2016(6):161.
Electric Power and Energy News.National Development and Reform Commission issued "Thirteenth Five-Year Plan" for electric power development(2016—2020) [J].Electric Power and Energy,2016(6):161.
- [2] 张广才,周科,鲁芬,等.燃煤机组深度调峰技术探讨[J].热力发电,2017,46(9):17-23.
ZHANG Guangcai,ZHOU Ke,LU Fen,et al .Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants[J].Thermal Power Generation,2017,46(9):17-23.
- [3] 周强,汪宁渤,冉亮,等.中国新能源弃风弃光原因分析及前景探究[J].中国电力,2016,49(9):7-12.
ZHOU Qiang,WANG Ningbo,RAN Liang,et al.Cause analysis on wind and photovoltaic energy curtailment and prospect research in China[J].China Power,2016,49(9):7-12.
- [4] 符旭.浅析火电厂大机组调峰运行方式[J].科技创新与应用,2014(36):113.
FU Xu.Analysis of peaking operation mode of large generating units in thermal power plants [J].Science and Technology Innovation and Application,2014(36):113.
- [5] 栗晓燕.火电调峰机组运行经济性研究[D].石家庄:河北科技大学,2017:1-2.
LI Xiaoyan. Research on economical operation of thermal power generation [D].Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology,2017:1-2.
- [6] 张也.大规模风电并网背景下火电调峰行为演化博弈模型研究[D].北京:华北电力大学,2017:1-7.
ZHANG Ye. Evolutionary game theory on thermal power peaking under large scale of wind power integration [D]. Beijing: North China Electric Power University,2017:1-7.
- [7] 于亮平,赵作起.等离子装置在2 023 t/h 锅炉点火和稳燃方面的应用[J].华电技术,2009,31(10):38-42.

的应用[J].华电技术,2009,31(10):38-42.

YU Liangping, ZHAO Zuqi. Application of plasma device in ignition and combustion stabilization of 2 023 t/h boiler[J].Huan-dian Technology,2009,31(10):38-42.

- [8] 董建聪,张忠孝,毕德贵,等.基于深度分级的煤粉锅炉低NO_x燃烧改造及调整试验研究[C]//2018 清洁高效燃煤发电技术交流研讨会论文集.北京:北京能源与环境学会,2018:5-14.
DONG Jiancong,ZHANG Zhongxiao,BI Degui,et al.Experimental research on low NO_x combustion reform and adjustment of pulverized coal boiler based on deep classification [C]//Proceedings of 2018 Clean and High Efficiency Coal-fired Power Generation Technology Exchange Seminar. Beijing: Beijing Society of Energy and Environment,2018:5-14.
- [9] 周大明.双尺度低NO_x燃烧技术在燃煤机组上的应用[J].电力安全技术,2015,17(12):46-50.
ZHOU Daming. Application of dual-scale low NO_x combustion technology in coal-fired units [J]. Electric Power Safety Technology,2015,17(12):46-50.
- [10] 陈旭东,任栋,官赫,等.燃煤电厂低NO_x燃烧技术的研究[J].冶金能源,2017,36(S2):76-78.
CHEN Xudong,REN Dong,GONG He,et al. Research on low NO_x combustion technology for coal-fired power plants[J].Metal-lurgical Energy,2017,36(S2):76-78.
- [11] 王春昌,王志刚.双分级可调低NO_x燃烧技术[J].热力发电,2015,44(6):102-105.
WANG Chunchang,WANG Zhigang.Double stage adjustable low NO_x combustion technology [J].Thermal Power Generation,2015,44(6):102-105.
- [12] 付俊杰.600 MW 电站锅炉的低NO_x燃烧改造[J].华北电力技术,2016(7):53-58.
FU Junjie.Renovation of low NO_x combustion for 600 MW power station boilers [J].North China Electric Power Technology,2016(7):53-58.
- [13] 陈冬林,叶托,李恒.低NO_x燃烧技术研究现状及进展[J].热力发电,2017,46(3):1-6.
CHEN Donglin,YE Tuo,LI Heng.Current status and progress of low NO_x combustion technology research [J].Thermal Power Generation,2017,46(3):1-6.
- [14] 苟湘.直流煤粉低NO_x燃烧和再燃技术的实验、理论与数值模拟研究[D].杭州:浙江大学,2007:1-6.
GOU Xiang. Experimental, theoretical and numerical simulation research on direct flow pulverized coal low NO_x combustion and reburning technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2007:1-6.
- [15] 林兆宁.600 MW 燃煤锅炉低NO_x燃烧优化运行研究[D].北京:华北电力大学,2014:1-5.
LIN Zhaoning.The optimal operation research on low NO_x combustion of 600 MW coal-fired boiler [D]. Beijing: North China Electric Power University,2014:1-5.
- [16] 吕旭阳.330 MW 燃煤锅炉低NO_x燃烧技术及数值模拟研究[D].北京:华北电力大学,2015:1-4.
LYU Xuyang. Investigation of low NO_x combustion technology and numerical simulation of a 330 MW coal-fired boiler [D]. Beijing:

- North China Electric Power University, 2015:1-4.
- [17] 高建.CO₂/H₂O 对煤燃烧过程氮氧化物生成特性影响研究 [D].武汉:华中科技大学,2019:1-3.
GAO Jian. Research on the effect of CO₂/H₂O on the formation characteristics of nitrogen oxides during coal combustion [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2019: 1-3.
- [18] 孙志君.煤粉 O₂/CO₂/H₂O 燃烧条件下 NO 生成与还原机理 [D].武汉:华中科技大学,2019:1-5.
SUN Zhijun.NO formation and reduction mechanism under pulverized coal O₂/CO₂/H₂O combustion conditions [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019:1-5.
- [19] 徐迎超,蒋孝科,毛天,等.富氧气氛煤粉气流着火特性的实验研究[J].锅炉技术,2008,39(1):42-46.
XU Yingchao, JIANG Xiaoke, MAO Tian, et al Experimental study of the flow of pulverized-coal ignition speciality on oxygen-enriched[J].Boiler Technology, 2008, 39(1):42-46.
- [20] 李少华,崔凯,张海,等.富氧节油煤粉燃烧器的原理和实验研究[J].锅炉技术,2012,43(3):47-51.
LI Shaohua, CUI Kai, ZHANG Hai, et al.Principle and experimental study of oxygen-enriched high temperature air combustion burner[J].Boiler Technology, 2012, 43(3):47-51.
- [21] 许臻,王泉海,刘名硕,等.富氧煤粉燃烧火焰成分特性试验研究[J].锅炉技术,2017(6):37-41.
XU Zhen, WANG Quanhai, LIU Mingshuo, et al.Experimental research on flame composition of oxy-coal combustion [J]. Boiler Technology, 2017(6):37-41.
- [22] 张玉山.1 025 t/h 锅炉简单机械雾化油枪点火的改进研究 [J].热能动力工程,2015,30(2):309-313,328.
ZHANG Yushan.Study of the improvement of the ignition by using a simple mechanical atomization oil gun in a 1 025 t/h boiler[J]. Thermal Power Engineering, 2015, 30(2):309-313,328.
- [23] 张雄,温治,王乃帅,等.富氧(纯氧)燃烧器的研究现状及发展趋势[J].金属热处理,2012(1):118-124.
ZHANG Xiong, WEN Zhi, WANG Naishuai, et al.Research status and development trends of oxygen-rich (pure oxygen) burners [J].Metal Heat Treatment, 2012(1):118-124.
- [24] 刘靖昀.富氧环境下煤粉燃烧特性试验研究[D].杭州:浙江大学,2006:14-25.
LIU Jingwei. Experimental study on pulverized coal combustion characteristics in oxygen-rich environment [D].Hangzhou: Zhejiang University, 2006:14-25.
- [25] HAGIHARA Y, HANEJI T, YAMAMOTO Y, et al.Ultra-low NO_x oxygen-enriched combustion system using oscillation combustion method[J].Energy Procedia, 2017, 120:189-196.
- [26] DAOOD S S, NIMMO W, EDGE P, et al.Deep-staged, oxygen enriched combustion of coal[J].Fuel, 2012, 101:187-196.
- [27] 王贲.富氧燃烧方式下典型煤种的 NO 释放特性及其化学反应动力学模拟[D].武汉:华中科技大学,2012:25-34.
WANG Ben.The NO release characteristics and chemical kinetics simulation of typical coals in oxy-fuel combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012:25-34.
- [28] 丁玉辉.微油点火小油枪在粉煤锅炉上的应用[J].中氮肥, 2009(5):23-25.
DING Yuhui.Application of micro-oil burner in pulverized coal fired boiler[J].Medium Nitrogen Fertilizer, 2009(5):23-25.
- [29] 曹志鹏.影响锅炉排烟温度的因素探析[J].区域供热, 2014(2):109-113.
CAO Zhipeng.Analysis of boiler flue gas temperature effect factor [J].District Heating, 2014(2):109-113.
- [30] 晏桃,马晓伟.对锅炉变负荷运行的几点思考[J].现代制造技术与装备, 2011(2):71, 74.
YAN Tao, MA Xiaowei.Some thoughts about the changing load of the boiler[J].Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2011(2):71, 74.