燃煤锅炉低氮燃烧稳定性试验研究

王承亮[1],谭厚章[2]
(1.华电国际技术服务中心,山东 济南 250014;2.西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室,陕西 西安 710049)

摘 要: 针对某 300 MW 燃煤锅炉低氮燃烧改造后频繁出现锅炉灭火现象,开展了冷态动力场和燃烧调整试验研究。试验发现,锅炉配风不合理和一次风浓侧反切角偏大引起锅炉热态动力场旋转动量降低,是造成锅炉燃烧稳定性降低与炉内灭火的主要原因。重点针对锅炉配风方式和一次风浓侧反切角优化改进等进行研究,并分析了热态动力场旋转动量减小导致锅炉稳定性降低的影响机理,提出优化改进锅炉燃烧稳定性的设备改进和运行优化方案。方案实施改进后,锅炉燃烧稳定性明显提高,至今未发生锅炉灭火事故,研究对未来锅炉低氮燃烧改造与机组安全经济运行具有借鉴和指导作用。

关键词: 燃煤锅炉;低氮燃烧;旋转动量;燃烧稳定性;灭火
中图分类号: TM621.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2016)05-0123-04

Low nitrogen combustion stability of coal-fired boiler

WANG Chengliang[1],TAN Houzhang[2]
(1.*Huadianguoji Technical Service Center*,*Jinan* 250014,*China*;2.*MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering*,*Xi'an Jiaotong University*,*Xi'an* 710049,*China*)

Abstract: The extinguishment was frequently occurred in a 300 MW coal-fired boiler with low nitrogen combustion reformation.Testing investigation was performed to analyze the reasons.It was found that unreasonable air distribution and the larger reverse tangent angle of primary air decreased the rotation momentum of thermal primary air.It also was the main reason for combustion stability decrease and extinguishment in boiler.Therefore,the research on optimization of air distribution mode and reverse tangential angle were carried out to analyze the influence mechanism of decreasing rotation momentum thermal dynamic field on combustion stability.The operation optimization and improvement scheme was proposed for enhancing the combustion stability for boiler.The boiler combustion stability was improved obviously through the operation optimization and improvement scheme. The research results could provide some reference and guidance for operating economically and low nitrogen combustion reformation.

Key words: coal-fired boiler;low nitrogen combustion;rotation momentum;combustion stability;extinguishment

0 引 言

低氮燃烧改造是直接减少燃煤锅炉 NO_x 排放的重要技术。我国的能源分布结构特点决定了未来 10~20 a 煤炭消耗仍然占有主要地位。但煤炭燃烧过程中会释放大量污染物,包括 SO_x、NO_x 和微细粉尘。随着国家更为严格火电污染物排放标准的颁布,未来更加高效、清洁、安全的煤炭利用技术将是火电机组发展与技术改造的发展趋势。

目前,大型燃煤火电机组控制 NO_x 低浓度排放的方法主要有低氮燃烧技术和尾部烟气脱硝技术。由于严格的 NO_x 排放标准,燃煤火电厂均采用这 2 种方法联合脱除 NO_x 以实现超低排放任务。卢红书[1]提出了对某台 300 MW 燃煤锅炉的燃烧器、一次风管道、二次风和空预器等系统较为具体的实施改造方案。朱利军[2]采用空气分级技术对某台直流燃煤锅炉进行了低氮燃烧改造,即增加 3 层三维可摆动的分离布置燃烬风以减少二次风喷口面积,实现炉内分级燃烧。黄俊杰[3]对某电厂 300 MW 燃煤锅炉进行了多维度深度分级燃烧改

收稿日期: 2016-02-04;**责任编辑:** 孙淑君 **DOI:** 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.05.024
作者简介: 王承亮(1971—),男,山东淄博人,高级工程师,从事节能技术研究和火力发电厂节能剖析诊断工作。E-mail:lwwcl@sohu.com
引用格式: 王承亮,谭厚章.燃煤锅炉低氮燃烧稳定性试验研究[J].洁净煤技术,2016,22(5):123-126,129.
WANG Chengliang,TAN Houzhang.Low nitrogen combustion stability of coal-fired boiler[J].Clean Coal Technology,2016,22(5):123-126,129.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

造，较好地实现了脱硝反应器入口烟气中 NO_x 浓度低于 300 mg/m^3 的排放标准。杨明等[4]分析了神华煤锅炉采用低氧与低氮结合的燃烧条件。朱磊[5]对某 300 MW 机组锅炉低氮改造后掉焦引起灭火事故进行了分析，发现由于改造后一次风浓侧反切角度过大，浓侧粉流和炉内主旋转气流融合较差，不利于稳定燃烧，主燃区过量空气系数应维持在 0.8 以上，过度缺氧燃烧不利于炉膛稳燃。池作和等[6]采用一次风微反切技术较好地解决了四角切圆燃烧锅炉稳燃和结渣的矛盾。陈刚等[7]研究了偏转二次风对炉内结渣的影响，并发现偏转二次风角度应该控制在 15°之内。赵晴川[8]分析了同心切圆燃烧系统中偏转二次风对炉内动力场、结焦以及 NO_x 排放的影响，并提出了相应的解决办法。

本文针对某台 300 MW 燃四角切圆燃煤锅炉低氮燃烧改造后频繁出现炉内灭火事故（运行 3 个月出现了 6 次灭火），进行了试验研究。分析认为锅炉配风不合理和一次风浓侧反切角偏大是导致炉内燃烧稳定性差的主要原因，通过相应的优化改进，燃烧稳定性明显提高，杜绝了炉内灭火事故的发生。本研究对燃煤锅炉低氮改造后安全稳定运行积累了一定的工程经验。

1　锅炉低氮燃烧改造方案

为实现锅炉低氮燃烧稳定运行，对锅炉燃烧器和二次风进行了整体优化改进，采用一次风水平浓淡燃烧技术（水平浓淡燃烧器）、一次风水平分级技术（燃烧器一次风浓侧反切）、二次风垂直分级技术（主燃烧器区域二次风喷口面积缩小），即燃烧器采用水平浓淡燃烧器，一次风淡侧和二次风的假想切圆直径相同（700 mm），一次风浓侧和二次风反切 12°，主燃烧器区域二次风喷口面积缩小约 30%，增加 4 层分离型燃烬风，即 SOFA（separated over fired air），原燃烬风 OFA1（over fired air）挡板封堵。锅炉燃烧器系统改造前后对比见表 1，一次风浓侧反切原理结构如图 1 所示。

2　锅炉低氮改造冷态动力场试验

经调研锅炉低氮燃烧器系统实施情况，锅炉燃烧器、二次风喷口角度安装位置均符合要求。冷态动力场试验未发现异常，冷态时各层风速均在 30 m/s 左右，各层风速偏差保持在±5%内；各风门挡板特性良好，开关灵活，具有良好的调节性能，能满足热态运行需要；烟花示踪试验显示炉膛内的主气流旋转方向为逆时针方向，一次风切圆轨迹明显，燃烬风能与主气流充分混合，符合设计要求。

表 1　锅炉燃烧器系统改造前后对比

Table 1　Comparison of boiler burner system before and after reform for a 300 MW coal-fired boiler

原二次风布置	改进后二次风布置
—	SOFA4 层
—	SOFA3 层
—	SOFA2 层
—	SOFA1 层
OFA2 层燃烬风	封堵
OFA1 层燃烬风	OFA1 层燃烬风

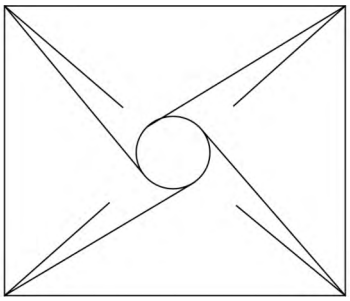

图 1　锅炉燃烧器一次风结构原理

Fig. 1　The structure principle of primary air from boiler burner

3　锅炉启动后配风原则及配风方式

锅炉低氮改造启动后，仍沿用原均等配风方式，燃烧器区域二次风挡板开度基本维持原开度运行；机组负荷 195 MW 时，辅助风与炉膛差压改造前后分别为 0.6、0.8 kPa，改造后因主燃烧器区域二次风喷口面积缩小使得辅助风与炉膛差压在相同运行工况下提高了约 0.2 kPa。

4　锅炉燃烧稳定性降低原因分析

4.1　锅炉四角切圆燃烧器稳燃机理分析

锅炉正常运行时，炉膛内热态动力场为逆时针旋转的高温烟气气流（图 2），即炉膛内由逆时针旋转向上的高温烟气气流来组织炉膛燃烧，实现煤粉燃烬。每只燃烧器实现稳定燃烧的热源主要有 3 种：① 燃烧器本身加装的稳燃钝体，实现局部烟气回流，卷吸高温烟气实现引燃；② 高速一次风射流的卷吸作用，卷吸高温烟气实现引燃；③ 来自逆时针旋转的上游燃烧器的高温烟气，高温卷吸到下游

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

燃烧器火焰根部，实现煤粉引燃。而数值模拟和热态试验证明，来自上游的高温烟气卷吸是提供燃烧器着火热的主要热源，若此着火热源发生弱化或瞬间失去，将导致锅炉燃烧稳定性降低或灭火。根据四角切圆煤粉炉稳燃机理分析，入炉煤煤质在锅炉允许范围之内时，若要提高锅炉燃烧稳定性，必须确保锅炉逆时针旋转的热态动力场动量强劲，上游燃烧器能够为下游燃烧器提供稳定的着火热源。

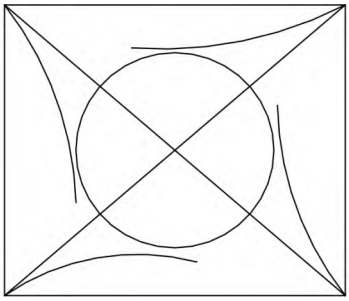

图 2　四角切圆燃烧锅炉稳燃机理

Fig. 2　Combustion stability mechanism of coal-fired boiler with four corner tangentially burning

4.2　锅炉燃烧热态动力场旋转动量降低

4.2.1　锅炉燃烧器设计方面的原因

影响锅炉热态动力场旋转动量的因素分析。一次风浓侧动量 M_n，一次风淡侧动量 M_d，主燃烧器区域二次风动量 M_f，一次风淡侧动量和主燃烧器区域二次风动量方向相同，一次风浓侧动量与二次风动量反切角度 α; 根据锅炉燃烧器系统设计分析，一次风淡侧和主燃烧器区域二次风动量为锅炉主旋转动量。根据矢量计算原理，则总旋转动量 M 将低于 $[M_n+(M_d+M_f)]$ 算术和，即采用一次风浓侧反切技术后，总旋转动量降低; 并且一次风浓侧动量越大、反切角度越大、二次风动量越小，总旋转动量将更小，导致锅炉热态逆时针旋转的气流速度变慢，上游燃烧器为下游燃烧器提供着火热的能力和抗干扰能力降低，表现为锅炉燃烧稳定性降低; 若出现锅炉掉焦或辅机 RB(runback) 等异常扰动时，锅炉热态旋转火球将瞬间停止转动或发生紊乱，燃烧器将失去上游燃烧器的点火源，锅炉发生灭火事故。其中一次风和二次风动量计算公式如下

$$M = M_n^2 + (M_d + M_f)^2 + 2M_n(M_d + M_f)\cos\alpha$$

根据以上分析，由于本锅炉燃烧器采用水平浓淡燃烧器浓侧反切角度 12°，导致锅炉热态旋转动量降低、燃烧稳定性降低。为验证本结论，利用停机机会，组织了专项诊断冷态动力场试验，即按模拟动量比组织正常动力场试验，根据“十字飘带”飘动情况，判定主切圆为逆时针旋转; 逐步降低二次风量，主切圆旋转动量明显降低，当二次风量降低至初始二次风量的 20%时，主切圆变为顺时针旋转，即冷态动力场切圆旋转方向发生了逆转，验证了一次风浓侧动量有降低锅炉热态动力场旋转动量的作用。

4.2.2　运行方式控制方面的原因

锅炉低氮改造后，因主燃烧器区域二次风喷口面积缩小了 30%，但运行人员仍沿用原均等配风方式，机组负荷 195 MW 时，辅助风与炉膛差压较改造前提高了约 0.2 kPa，表明主燃烧器区域进入炉膛的二次风量明显减少，进而使得锅炉热态动力场旋转动量降低，燃烧稳定性也进一步降低。

5　提高燃烧稳定性的改进措施

5.1　优化改进一次风浓侧反切角度

采用一次风浓侧反切低氮燃烧改造技术，一次风浓侧动量有抵消主旋转动量的作用; 并且一次风浓侧反切角度越大，总旋转动量降低越多，锅炉燃烧稳定性影响更大，因此将一次风浓侧反切角度由 12°改进为 5°; 利用机组检修机会，将燃烧器水平浓淡的反切钝体更换，将一次风浓侧反切角度由 12°改进为 5°。

5.2　优化调整磨煤机分离器挡板

为优化改进煤粉均匀性指数，强化锅炉燃烧，将磨煤机分离器下挡板开度由 42°调整至 38°; 磨煤机启动后取样化验，磨煤机煤粉均匀性指数由 1.05 提高至 1.12，磨煤机出力基本未变，煤粉细度 R_{90}(未通过 90 μm 筛上煤粉质量占试样质量的百分数) 为 7%左右，表明基本达到了优化调整目的。

5.3　二次风挡板检查及风门特性试验

二次风挡板动作一致性和风门特性是影响炉膛燃烧的重要因素。利用机组检修机会对所有二次风挡板进行了彻底检查和修复，确保了二次风挡板 DCS 开度与就地挡板实际开度对应; 经锅炉启动前进行的冷态动力场试验验证，二次风挡板调节特性良好。

5.4　一次风热态调平

四角切圆燃烧锅炉同层一次风风速的均匀性也是影响炉膛燃烧稳定性和炉膛偏烧的重要因素，虽然已进行了一次风冷态调平工作，但考虑到一次风热态时风粉阻力特性发生较大变化，可能使同层一次风风速偏差超过 5%，从而影响锅炉燃烧。为消除此因素的不利影响，锅炉启动后进行了热态一次

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

风调平，试验发现热态情况下同层一次风风速偏差基本超过了 10%，其中偏差最大的在 40%以上，通过试验将所有同层一次风风速偏差绝对值均调整至 5%以下。

5.5　锅炉配风方式优化

为增加燃烧器区域二次风动量，提高锅炉燃烧稳定性，提出优化配风方式方案(表 2)，即保持锅炉主燃烧器区域上、中、下至少 3 层主二次风挡板开度维持 70%及以上，其他二次风挡板开度维持 40%，以确保 NO_x 排放的基础上提高热态旋转动量和锅炉燃烧稳定性; SOFA 风挡板以从上层到下层控制为原则，且 SOFA 风挡板开度最低控制在 40%以上，以增加 SOFA 风补风覆盖率和动量。

表 2　锅炉优化配风方式

Table 2　Optimization of boiler air distribution

二次风门挡板	原开度/%	优化后开度/%
SOFA4 层	30	100
SOFA3 层	30	100
SOFA2 层	30	45
SOFA1 层	30	0
OFA1 层燃烬风	30	30
CC 层二次风	10	10
C2 层燃烧器周界风	20	20
C 油二次风	10	10
C1 燃烧器周界风	20	20
BC2 层二次风	30	80
BC1 层二次风	30	45
B2 层燃烧器周界风	20	20
B 层油二次风	10	10
B1 层燃烧器周界风	20	20
AB2 层二次风	30	80
AB1 层二次风	30	45
A2 层燃烧器周界风	20	20
A 层油二次风	10	10
A1 层燃烧器周界风	20	20
AA 层二次风	100	100

注: A、B、C 是区分锅炉本体设置的各层二次风、一次风、燃烬风和周界风喷口。

6　锅炉低氮燃烧系统改进后运行情况

改造后，锅炉燃烧稳定性明显提高，锅炉运行氧含量波动幅度降低，NO_x 更易于控制并稍优于原控制水平，飞灰可燃物降低了约 0.5%。自本锅炉低氮燃烧系统改进后，未出现锅炉灭火事故，锅炉灭火综合治理工作取得了成功。

6.1　锅炉燃烧稳定性变化

锅炉燃烧稳定性明显改善，具体体现在炉膛负压和运行氧含量波动幅度明显降低; 即在同样大小渣块掉落的情况下，炉膛负压修前波动值达到 300 Pa 以上，且底层燃烧器火检频闪，而修后锅炉负压基本无明显波动。

6.2　锅炉结渣特性变化

修后锅炉结渣特性无明显变化，仍可在除渣输送带发现个别体积稍大渣块，但未出现过锅炉燃烧器火检闪动情况。

6.3　锅炉燃烧经济特性变化

因主燃烧器区域形成了较为良好的热态动力场，热态旋转火球后期扰动强烈、风粉混合均匀，煤粉燃烧更加充分; 根据修前、修后飞灰可燃物化验结果分析，飞灰可燃物平均降低了约 0.5%。

6.4　锅炉 NO_x 排放特性变化

锅炉炉膛出口 NO_x 指标水平未发生明显变化，但因炉膛燃烧稳定性明显提高，炉膛具有了低氧运行的条件，为降低主燃烧器区域过量空气系数提供了条件，从而为降低 NO_x 的生成提供了调整空间。

7　结　　语

从四角切圆燃烧器稳燃机理研究入手，分析了配风方式及配风量对某 300 MW 燃烟煤四角切圆锅炉低氮燃烧改造后稳定燃烧的影响，说明配风不合理是导致锅炉频繁灭火的主要原因，对相应设备及运行工况进行了改进和调整，有效提高了设备运行的稳定性。

参考文献(References):

[1]　卢红书.300 MW 锅炉低 NO_x 燃烧系统改造效果分析[J].电力科技与环保，2015(3):28-31.
Lu Hongshu. Reformation of low NO_x combustion technology for Laicheng power plant 300 MW units[J].Electric Power Technology and Environmental Protection，2015(3):28-31.

[2]　朱利军.300 MW 燃煤锅炉低氮氧化物燃烧的改造[J].广东电力，2009，22(4):64-67.
Zhu Lijun. Modification of low nitrogen oxide combustion for 300 MW coal-fired boiler[J].Guangdong Electric Power，2009，22(4):64-67.

[3]　黄俊杰.300 MW 燃煤锅炉低氮燃烧器改造研究[D].广州: 华南理工大学，2014.

[4]　杨　明，谷红伟，李晓伟，等.神华煤锅炉低氮燃烧特性研究[J].洁净煤技术，2014，20(4):68-72.

(下转第 129 页)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

标量为 0.5 μg),按照样品分析步骤平行测定 7 份,根据 3 倍标准偏差计算苯并(a)芘的方法检出限。当萃取体积为 1 L,浓缩至 1 mL,进样量为 10μL 时,苯并(a)芘的方法检出限为 0.008 μg/L。

在 1 L 空白水样中添加低浓度苯并(a)芘标准溶液(加标量为 0.5 μg),平行样品 7 份,按照上述前处理和样品分析方法,测得加标回收率和相对标准偏差,见表 3。

表 3　苯并(a)芘 7 次空白加标平行分析结果

Table 3　Parallel analysis results of benzopyrene standard-addition in blank

空白加标样品	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	平均值/μg	标准偏差/%
苯并(a)芘质量/μg	0.426	0.428	0.431	0.430	0.433	0.426	0.428	0.429	0.3
回收率/%	85.2	85.6	86.2	86.0	86.6	85.2	85.6	85.8	0.5

3　结　　语

以二氯甲烷为萃取剂,w(乙腈):w(水) = 85∶15 为流动相,流速 1 mL/min,柱温 25 ℃的液液萃取-高效液相色谱法,能够测定水体中苯并(a)芘,具有良好的线性关系、准确度、精密度。当萃取体积为 1 L,浓缩至 1 mL,进样量为 10 μL 时,苯并(a)芘的方法检出限为 0.008 μg/L。该方法适用于水中苯并(a)芘的测定,具有一定的应用和推广价值。

参考文献(References):

[1] 信维平.苯并(a)芘的致癌性及快速检测研究[J].肉品卫生,2000(2):16-17.

[2] GB 11895—1989,水质、苯并(a)芘的测定、乙酰化滤纸层析分光光度法[S].

[3] 王海娇,王　娜,汪寅夫,等.高效液相色谱法分析地下水和饮用水中苯并(a)芘[J].岩矿测试,2010,29(5):625-627.
Wang Haijiao,Wang Na,Wang Yinfu,*et al*.Determination of benzo[a] pyrene in groundwater and drinking water samples by high performance liquid chromatography[J].Rock and Mineral Analysis,2010,29(5):625-627.

[4] 王　浩,刘艳琴,杨红梅,等.高效液相色谱法测定粮食中苯并芘残留的研究[J].粮油食品科技,2007,15(1):53-54.
Wang Hao,Liu Yanqin,Yang Hongmei,*et al*.A study on HPLC analysis of benzo(a) pyrene in grain[J].Science and Technology of Cereals,Oils and Foods,,2007,15(1):53-54.

[5] GB/T 15439—1995,环境空气苯并[a]芘测定高效液相色谱法[S].

[6] 程春梅,董刘敏,彭　进.超高效液相色谱法检测食用油中的苯并(a)芘[J].中国油脂,2011,36(2):77-78.
Cheng Chunmei,Dong Liumin,Peng Jin,*et al*.Determination of benzo(a) pyrene in edible vegetable oil by UPLC[J].China Oils and Fats,2011,36(2):77-78.

[7] 陈兆文.饮用水中苯并[a]芘的毛细管气相色谱分析[J].环境化学,1995,14(2):151-155.

[8] 郑海涛,刘　菲,刘永刚.固相萃取-气相色谱法测定水中多环芳烃[J].岩矿测试,2004,23(2):148-152.
Zheng Haitao,Liu Fei,Liu Yonggang,*et al*.Determination polycyclic aromatic hydrocarbons in water by solid phase extraction-gas chromatography[J].Rock and Mineral Analysis,2004,23(2):148-152.

[9] 陈　慧,黄要红,蔡铁云.固相萃取-气相色谱/质谱法测定水中多环芳烃[J].环境污染与防治,2004,26(1):72-74.
Chen Hui,Huang Yaohong,Cai Tieyun.Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sample using solid-phase extraction (SPE) coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J].Environmental Pollution & Control,2004,26(1):72-74.

(上接第 126 页)

Yang Ming,Gu Hongwei,Li Xiaowei,*et al*.combustion characteristics of shenhua coal boiler low NO_x combustioh[J].Clean Coal Technology,2014,20(4):68-72.

[5] 朱　磊.锅炉低氮改造后灭火原因分析与对策[J].浙江电力,2015(8):41-44.
Zhu Lei.Analysis on causes of boiler fire distinguishing after low NO_x retrofit and the countermeasures[J].Zhejiang Electric Power,2015(8):41-44.

[6] 池作和,周　昊,夏建军.一次风反切系统的数值模拟和多相流动特性分析[J].中国电机工程学报,1998,18(2):135-139.
Chi Zuohe,Zhou Hao,Xia Jianjun.Prediction on the flame-stability and slagging-prevention with concentric firing system using computer-simulation[J].Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering,1998,18(2):135-139.

[7] 陈　刚,邱继华,郑楚光.偏转二次风对炉内结渣的影响[J].动力工程,2004,24(1):5-8.
Chen Gang,Qiu Jihua,Zheng Chuguang.The influence on the slagging in furnace caused by biased secondary air for tangential fired boiler[J].Power Engineering,2004,24(1):5-8.

[8] 赵晴川.同心切圆燃烧系统偏转二次风的试验研究与探讨[J].热力发电,2007(3):41-44,47.
Zhao Qingchuan.Test study on and approach to biased secondary air in concentrically and tangentially firing system[J].Thermal Power Generation,2007(3):41-44,47.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net