

1000MW 超超临界机组深度调峰性能浅析

石天军, 梁立嘉, 范旭刚, 彭涛, 陈桢, 闫小坤
华能陇东能源公司正宁电厂, 甘肃庆阳, 中国

【摘要】随着新型电力系统的构建, 清洁能源在能源结构中所占的比重越来越大, 为保证电网的供电质量, 1000MW 火电作为调峰电源的作用越来越明显。华能正宁电厂作为华能陇东能源基地的配套调峰电源, 目前在建两台 1000MW 超超临界机组, 1000MW 超超临界调峰火电机组响应电网调度指令升、降负荷快, 这会使得超超临界锅炉面临低负荷深调期间燃烧不稳定, 水动力安全性降低, 脱硝装置入口烟气温度低等问题。本文就华能正宁电厂 2×1000MW 煤电项目设计特点进行简要论述, 介绍了该机组针对低负荷调峰工况采取的设计特点, 简述在点火启动初期和深度调峰期间的优势, 并为超超临界火电低负荷稳燃技术改造提供可行性经验。

【关键词】火电厂; 超超临界; 直流锅炉; 深度调峰

【基金项目】甘肃省十四五重点规划项目; 华能集团十四五重点规划电源项目

1. 引言

自从国家提出“双碳”目标以来, 清洁能源的发展速度显著提升, 其装机总量不断增加, 尤其是近几年, 风力发电厂及太阳能发电厂规模快速增长。然而, 风力和太阳能发电存在着无法控制的波动特性, 导致了一定程度上的电能浪费(即所谓的“弃风”“弃光”), 对电网产生了影响。华能正宁 2×1000MW 煤电项目作为华能陇东能源基地调峰电源, 建成后将配合新能源发电, 充分发挥削峰填谷、电源支撑的作用, 填补了大规模新能源发电存在的间歇性和不稳定性, 着力解决电能消纳问题[1]。

2. 设备简介

华能正宁电厂#1、#2 锅炉为哈尔滨锅炉厂生产的 HG-2923/29.3-YM6 型超超临界一次中间再热、单炉膛、固态排渣、平衡通风、变压运行直流锅炉, 配有东方汽轮机公司生产的 NJK1000-28/605/623 型汽轮机及东方电气公司生产的 QFSN1000-2-27A 氢冷发电机。正压直吹式制粉系统, 磨煤机采用 ZGM113G-II-YM6 (A、B、C、F 磨) 和 ZGM113N-II-YM6 (D、E 磨) 型中速磨煤机, 每台炉配 6 台磨, 正常额定负荷状态下 5 台磨运行 1 台磨备用。经过磨煤机处理后的煤炭颗粒被热一次风送到特定的燃烧器以实现燃烧过程, 燃烧方式采用四角切圆, 燃烧器布置在水冷壁四个角上, 燃烧器共设有 12 层煤粉喷嘴, 每台磨煤机对应相邻的两层煤粉喷嘴, 8 只燃烧器, 6 台磨共 48 只燃烧器, 燃烧器可以一定角度上下摆动。

3. 燃烧器简介及布置

3.1 双层等离子燃烧器

正宁电厂#1、2 采用 A、D 两层等离子燃烧器布置, 不设置常规油系统等。等离子点火技术是通过高频率高压形成电弧以生成直流空气等离子体的过程, 等离子体燃烧释放 5000 °C 以上的高温, 能够有效地引燃煤粉并提升炉膛内的温度, 以此稳定运行状态。等离子点火技术能够实现 100% 的节油目标[2], 并且等离子燃烧器点火后可以立即投入电除尘系统, 这有助于减小烟雾颗粒物的排出, 降低了对大气环境的污染。再者, 目前采用等离子点火技术的机组绝大多数只设置了 1 层等离子燃烧器, 单层等离子燃烧器在深调工况下的稳燃能力远不及双层等离子燃烧器[3], 导致其深调裕度有限, 而采用双层等离子燃烧器可以响应电网调峰需求并且有效保障低负荷下锅炉燃烧的稳定性 and 安全性。

3.2 水平浓淡燃烧器

正宁电厂#1、2 锅炉 B、C 层燃烧器采用低 NO_x 水平浓淡燃烧器, 其工作原理为煤粉喷嘴体中按煤粉管道的方向安装百叶窗式分离器, 旨在把煤粉分成浓、淡两股, 浓相煤粉射流朝向火焰(即: 向火侧)而淡相煤粉射流背向火焰(即: 背火侧), 这样可以保证稳定的着火过程, 防止炉内结渣和高温腐蚀, 这满足了锅炉负荷变化范围较大时煤粉着火和稳定燃烧的要求[4]。

3.3 中心富燃料燃烧器

正宁电厂#1、2 锅炉 B、C 层燃烧器采用中心富燃料燃烧器, 其工作原理是通过特殊设计的煤粉浓缩器使煤粉经过两次浓淡分离, 中

间煤粉浓度高(浓相), 两侧煤粉浓度低(淡相), 保证燃烧器中间区域的煤粉浓度处于最佳着火浓度范围, 中间区域的煤粉容易点燃且燃烧稳定, 继而依靠其高温烟气及热辐射点燃淡相煤粉气流, 大大提高了煤粉气流的着火能力和稳定燃烧能力。此外, 通过对燃烧器出口钝体的设计, 使喷嘴中心形成稳定的回流区, 进一步增强了煤粉流的着火稳定性。这种燃烧器不需要额外的辅助设备, 它可以依靠燃烧器自身的燃烧稳定性达到超低负荷燃烧稳定性的要求[5]。

3.4 燃烧器布置方式

正宁电厂锅炉采用四角切圆燃烧方式, 共设置6台磨煤机, 12层燃烧器, 每台磨煤机对应两层燃烧器, 燃烧器分为上、下两组, 由下至上依次为A、B、C磨为一组, D、E、F磨为一组, 其中A、B、C、F磨为大磨(出力80.2t/h), D、E磨为小磨(出力71.9t/h)。分别在A磨、D磨层设置等离子点火装置, 作为锅炉点火、稳燃装置。为确保锅炉低负荷稳燃效果, E层、F层燃烧器采用中心富燃料燃烧器, 在低负荷阶段保证火焰燃烧稳定。B、C层采用水平浓淡燃烧器, 可以大幅降低氮氧化物生成量。锅炉点火方式采用A层或D层等离子点火, 不设炉前燃油系统。

燃烧器在锅炉中的布置如下图1。

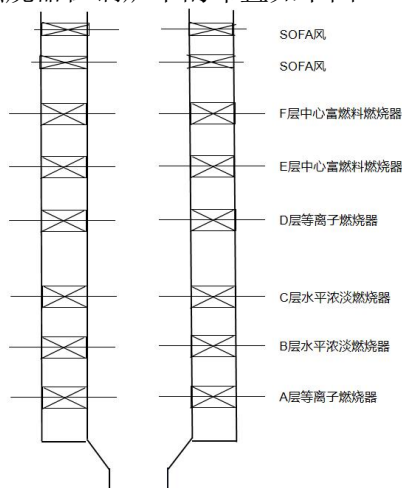


图1.燃烧器在锅炉中的布置

4. 锅炉深度调峰期间存在的主要问题

在深度调峰和快速升降负荷的过程中, 1000MW超超临界塔式锅炉的运行状态严重偏离了设计工况。在深度调峰阶段, 主要存在以下几种问题。

4.1 燃烧系统

在负荷较低的情况下, 锅炉的总燃料输入

会减少, 导致产生的热量也会相应降低。由于炉膛温度较低, 需要的着火热也会随之降低, 煤粉浓度也会相对较低, 这将使得着火时间延后, 从而导致煤粉燃烧效率降低, 这样就容易引发锅炉灭火等问题。

4.2 积灰

低负荷时煤量降低, 风量降低, 故烟气体量随之降低, 烟气流速也降低, 烟气流速降低, 易在尾部烟道受热面处积灰。

4.3 水冷壁

低负荷燃烧不稳定, 炉膛内的烟气温度场和速度场不均匀, 烟气热偏差增大, 水冷壁管中工质流速、流量低, 水冷壁的冷却出现偏差, 局部热量无法带走, 易出现超温导致爆管等问题, 会严重影响锅炉安全运行。

4.4 空气预热器

当负荷较低时, 空气预热器的入口烟气温度下降, 导致空气预热器出口温度进一步降低可能会引起空气预热器冷端低温腐蚀, 以及SCR反应温度下降, 导致部分未反应的NH₃与SO₃反应生成NH₄HSO₄, 从而导致空气预热器堵塞等问题。

4.5 SCR系统

在低负荷时, 锅炉燃烧产生的热量降低, 烟气在到达脱硝装置时烟温进一步降低, 易出现SCR反应温度达不到设计要求造成以下后果: (1) 催化剂活性下降脱硝效率降低; (2) 低温下未反应的NH₃与烟气中的SO_x反应生成NH₄HSO₄堵塞催化剂孔隙, 覆盖活性位点, 长期运行会导致催化剂永久失活, 缩短催化剂使用寿命。(3) 脱硝效率下降, 造成烟气出口NO_x含量超标。

5. 国内应对深调采取的技术措施

目前国内外学者基于燃烧基础理论对低负荷稳燃采取的技术措施主要有:

5.1 提供局部高温供给燃料着火

鲁鹏飞等[6]通过抽取再(过)热蒸汽来加热一次风煤粉气流的方式来提高燃料的温度, 结果表明, 可显著提高锅炉低负荷稳燃性能。谭厚章等人[7]研发出一种全新的强稳燃低温低氮双涡预燃燃烧器, 其工作原理是将煤粉经过高温预热解后与卷吸的高温烟气混合点火, 实验结果显示, 应用该燃烧器后, 煤粉可以顺利燃烧, 达到了稳定燃烧的效果。

5.2 提高氧气浓度

田欢等[8]做了深调期间不投油和不投油投氧两个对比试验, 结果表明, 低负荷不投油

稳燃工况能够满足额定工况 35% 的最低负荷稳燃要求, 不投油投氧能够满足机组额定工况 20% 的最低负荷稳燃要求。陈子曦等人[9]经过对煤粉炉 A、D 层燃烧器的改装并使用富氧低 NO_x 燃烧技术, 发现其效果显著: 不仅能大幅提升调峰性能, 使设备能在长时间内保持较低负载状态稳定工作, 同时还能保证 SCR 脱硝装置稳定运行, 使得年度总计低负荷燃油消耗量降低了 65%。

5.3 提高煤粉浓度

陈玲红等[10]研究了可调节煤粉浓度的燃烧器, 对燃烧器进行了改造, 并提出可通过改变中心风来实现煤粉气流的着火与燃煤机组的稳燃。李永华等[11]研究了一种新型可调节浓淡分离燃烧器, 该燃烧器在机组低负荷下对煤粉进行浓淡分离。在锅炉低负荷下对燃烧器分离特性进行研究, 结果表明, 该分离器能够在较低负荷下达到较好的分离效果, 使机组能够在低负荷下稳燃。

6. 正宁电厂应对深调采取的技术措施

6.1 磨煤机组合方式选择灵活

双层等离子可以作为锅炉点火、稳燃作用。最低负荷运行时上组燃烧器运行及 D 层等离子可随时投入稳燃, 下层等离子可作为紧急备用状态。如此布置方式具有点火选择灵活且兼具低氮和低负荷稳燃的特点, 适合运行各种工况。要求低负荷运行时, 有多种磨煤机组合工况可供选择, 其基本遵循原则为投运层燃烧器之间的火焰应能起到相互支持的作用, 一般情况下不允许隔层投运、跳层投运的情况发生。

负荷 < 300MW

A 工况: D+E 两台磨运行

B 工况: E+F 两台磨运行

C 工况: A+B 两台磨运行

D 双层燃烧器带等离子, 有等离子稳燃的条件下既可以采用上层两台磨深调, 也可以选用下层两台磨深调, 带等离子燃烧器有促进稳定燃烧, 防止锅炉灭火的作用。深调时若燃烧不稳定, 可以投入等离子稳燃, 投运等离子后可以提高煤粉的着火热, 利于煤粉燃烧。此外, 等离子有再挥发份的作用, 也有利于煤粉迅速燃烧。当锅炉负荷为最低稳燃负荷 (23%BRL) 时候, 锅炉应投运 2 台相邻的磨煤机; 为满足维持主汽、再热汽温度及水冷壁的安全需求, 同时考虑低负荷稳燃要求, 优先选择投运 D、E 层煤粉燃烧器, D 层等离子可以保证在事故情况下或燃烧工况恶化时及时

投运稳燃。在深调结束升负荷时, 可根据汽温等因素选择启动 C 磨或 F 磨。

负荷 300~400MW

A 工况: D+E+F 三台磨运行

B 工况: C+D+E 三台磨运行

C 工况: A+B+D 三台磨运行

D 工况: A+B+C 三台磨运行

E 工况: B+C+D 三台磨运行

当 3 台磨煤机在低负荷条件下运行时, 应优先选择上层磨煤机, 并搭配较大的燃尽风率, 可确保过热汽温 25%~100%BMCR 和再热汽温 50%~100%BMCR 负荷范围, 保持在额定值的稳定状态。可为大部分调峰机组低负荷时稳定气温提供参考方向, 采用上层磨运行时, 能够在主燃区产生更高的温度, 并缓解从燃烧切圆外围向切圆中心的温度递减现象, 提高炉膛中心燃烧温度, 从而提高低负荷稳燃性能, 也抬高了火焰中心高度, 提高了脱硝入口烟温, 有助于低负荷脱硝[12]。

6.2 E、F 层选用中心富燃料燃烧器

中心富燃料燃烧器喷口多, 主喷口提供主要的燃料流, 辅助喷口参与支持燃烧过程的调节, 当机组在低负荷条件下运行时, 燃煤量下降, 中心富燃料燃烧器能使煤粉浓度在最佳着火区间, 有利于低负荷下的着火与稳燃。再者, 中心富燃料燃烧器可以强化烟气回流区的卷吸热, 更有助于快速达到煤粉的着火热, 使煤粉快速燃烧, 中心富燃料燃烧器自身具备稳燃能力。

6.3 B、C 层选用低 NO_x 水平浓淡燃烧器

提高向火侧的煤粉浓度, 加快了火焰的扩散速度, 增强了化学反应的进程, 燃烧能力得到优化, 燃烧过程中产生的热量也随之上升, 对于保持火焰稳定性有着积极影响。再者, 浓相还原性气氛生成的燃料性 NO_x 少, 淡相空气量多, 生成的热力型 NO_x 少, 水平浓淡燃烧器具有高效、稳燃、低 NO_x 的优点, 所以这种设计理念已经成为燃烧器的改良和升级的重要参考依据。

6.4 省煤器分级布置

一级省煤器布置在脱硝之后, 可以减少脱硝之前的受热面数量, 减少烟气与工质间的对流传热, 提高脱硝装置的入口烟温, 在低负荷时满足脱硝反应温度要求。

6.5 下辐射区采用螺旋管圈膜式水冷壁

每根管子以 24.99° 的倾角盘绕四面炉墙螺旋上升, 盘绕方向与燃烧器切圆方向反向,

管子之间热负荷均匀,热偏差小,螺旋管圈中工质流速 3000~3500kg/(m².s)对水动力稳定性有着显著的影响,无论是相邻管道还是整个墙体,螺旋管圈水冷壁的偏差都非常小。在任何负荷条件下,水冷壁之间沿着水冷壁管轴线膨胀没有任何偏差。

6.6 采用 0#高加和#2 高加邻机供汽

启动点火期间由邻机为本机#2 高加提供汽源,提前投入#2 高加可以提高给水温度,减少烟气在水冷壁的换热,提高炉膛出口烟温,提高脱硝入口烟气温度,可以保证全负荷脱硝,保证低负荷时,SCR 反应温度满足,脱硝装置工作正常,烟囱出口 NO_x 含量达标。

6.7 增设烟气余热利用系统

烟气余热利用系统吸收空预器之后的烟气余热用于加热一、二次风,既充分利用尾部烟气余热提高了一、二次风风温,又防止了空预器冷端的低温腐蚀,二次风温度的提高,增加了反应的着火热,有利于加速燃烧反应进行,迅速着火,稳定燃烧,大幅提升了锅炉效率。

7.结束语

综上所述,深度调峰在能源领域的应用与发展具有重要意义。它不仅是应对能源供需变化的有效手段,更是推动能源转型、实现可持续发展的关键一步。相信在未来,随着技术的不断进步和创新,深度调峰将发挥更加显著的作用,华能正宁电厂 2×1000MW 机组应对低负荷深度调峰工况时在锅炉设计层面及磨煤机运行方式层面进行优化,使其具有燃烧稳定,水动力安全,实现全负荷脱硝,具有安全、环保、经济的优点。

参考文献

[1] 白浩,袁智勇,周长城,等.计及新能源波动与相关性的配电网最大供电能力调度方

法[J].电力系统保护与控制,2021,49(08):66-73.

- [2] 马悟明,陈禄,李明.锅炉配置双层等离子燃烧器燃烧特性试验研究[J].发电设备,2020,34(02):100-105+110.
- [3] 陈海民.等离子点火技术在某电厂的应用研究[D].华北电力大学(北京),2017.
- [4] 黄莺,王宇,庞振洲,等.水平浓淡燃烧器分离特性的相关性分析[J].锅炉制造,2020,(06):5-7+17.
- [5] 陶林,杨秀军,张天武,等.火电锅炉深度调峰技术浅析[J].锅炉制造,2023,(05):7-8+23.
- [6] 鲁鹏飞,薛宁.超临界锅炉超低负荷调峰运行稳燃改造方案研究[J].热力发电,2022,51(01):87-92.
- [7] 谭厚章,王学斌,郑海国,等.一种新型强稳燃低温低氮双涡预热解燃燃烧器开发及应用展望[J].热力发电,2022,51(01):93-99.
- [8] 田欢,郭艳平,王鹏,等.深度调峰背景下富氧燃烧对锅炉稳燃性能试验研究[J].节能,2024,43(05):118-121.
- [9] 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(04):134-139.
- [10] 陈玲红,池作和,岑可法.可调浓度燃烧器波形稳燃体出口流场特性的试验研究[J].热力发电,2005(12):52-54+58+116.
- [11] 李永华,梁化忠,陈鸿伟,李振中.自动可调浓淡燃烧器低负荷稳燃特性[J].热能动力工程,2002(05):517-520+545.
- [12] 丁湧.1000 MW 超超临界燃煤锅炉深度调峰研究[J].发电技术,2024,45(03):382-39.