

超临界锅炉低负荷配煤掺烧与 NO_x 协同控制技术应用

郑楠

陕西华电榆横煤电有限责任公司榆横发电厂 陕西 榆林 719000

摘要：新能源装机持续增长迫使火电机组深度调峰，超临界锅炉低负荷运行时稳燃与 NO_x 减排矛盾突出。本文分析了低负荷工况下炉膛温度场畸变、煤粉燃尽率下降及 NO_x 生成特性变异等技术瓶颈，提出了以配煤掺烧为核心、以“煤质调配—燃烧优化—还原区构建”为三级架构的控制技术路线。通过高挥发分烟煤与贫煤互补掺烧改善着火，结合空气分级与燃料分级构建深度还原区，实现锅炉效率与 NO_x 排放的协同优化。工程应用表明，该技术可实现低负荷下 NO_x 有效控制，为低成本超低排放提供可行路径。

关键词：超临界锅炉；低负荷；配煤掺烧； NO_x 协同控制；深度调峰

引言：新能源装机持续增长使火电机组深度调峰成为常态。超临界锅炉低负荷时炉膛热强度下降，煤粉着火延迟、火焰不稳、温度场畸变等问题突出，威胁安全运行且 NO_x 排放异常反弹。常规空气分级调控受限，单纯依赖后处理则成本高昂。从源头通过配煤掺烧优化煤质，并与燃烧组织协同调整，成为破解低负荷稳燃与 NO_x 减排双重约束的有效途径。本文针对超临界锅炉，分析低负荷技术瓶颈，提出协同控制方案并验证其效果。

1 低负荷运行的技术挑战

1.1 超临界锅炉低负荷稳燃机理

超临界直流锅炉在低负荷工况下面临的核心问题是一次火焰稳定性的丧失。煤粉气流的着火需要足够的热量反馈，在低负荷条件下单位时间输入炉膛的燃料量显著减少，炉膛平均温度较满负荷时下降 $150\sim 250^\circ\text{C}$ ，辐射换热热量大幅降低。当炉膛温度场低于煤粉气流的着火温度阈值时，着火延迟现象不可避免，表现为火焰脉动加剧、燃烧器区域负压波动增大，严重时可能导致炉膛灭火。从燃烧动力学角度分析，煤粉着火温度与挥发分含量呈负相关关系，低挥发分煤种的着火温度通常需达到 $700\sim 800^\circ\text{C}$ 以上，而低负荷下燃烧器区域的实际温度可能仅能维持 $550\sim 650^\circ\text{C}$ ，二者之间存在明显的温度缺口。超临界锅炉采用螺旋管圈水冷壁，低负荷时工质流量降低、水冷壁入口欠焓增大、管内流动不稳定风险上升，进一步限制了炉膛最低稳燃负荷的下探空间。目前国产600MW超临界锅炉的设计最低稳燃负荷通常为 $30\%\sim 40\%$ 额定负荷，实际运行中往往需要投油助燃才能维持安全运行。

1.2 低负荷对 NO_x 生成的影响

低负荷运行对 NO_x 排放的影响呈现非单调变化特征。热力型 NO_x 的生成速率与温度呈指数正相关，炉膛温度的

降低本应抑制热力型 NO_x 的生成。然而实际运行数据表明，部分机组在降负荷过程中 NO_x 排放浓度反而出现升高现象，根本原因在于燃烧组织方式的改变。当锅炉降负荷时，为维持主蒸汽温度在额定范围内，运行人员通常会减少燃烧器投运层数并关小燃尽风挡板，导致炉膛整体过量空气系数下降的同时，燃烧器区域呈现局部富氧燃烧状态，局部高温富氧区域的 NO_x 生成速率远高于设计工况下的均匀燃烧状态^[1]。与此同时，还原区体积因燃尽风比例的降低而大幅压缩，已生成的 NO_x 在还原区内的停留时间缩短、还原反应不充分。磨煤机在低出力下煤粉细度变粗，粗煤粉颗粒在还原区内的停留时间不足以完成充分的 NO_x 还原反应，也是造成排放升高的因素之一。两方面因素叠加，使低负荷时 NO_x 排放控制的难度显著增加。

2 配煤掺烧的技术原理与优化方法

2.1 配煤掺烧的基本原理

配煤掺烧是将两种及以上不同性质煤种按比例混合后送入炉膛，核心目标是通过煤质互补优化燃烧特性。其主要互补机制包括：高挥发分烟煤提供着火能量，改善低负荷火焰稳定性；低灰熔点煤种调节灰渣特性、防止结焦；低硫煤与高硫煤掺配控制 SO_2 生成；高热值煤与低热值煤掺配保障蒸发量。配煤并非简单混合，关键在于煤质间的非线性相互作用。研究表明，混煤着火温度不等于各单煤的加权平均值，当烟煤掺混比例超过 30% 时，混煤着火特性即呈现明显烟煤特征。这一非线性效应为低挥发分贫煤机组低负荷稳燃提供了理论支撑——仅需掺入一定比例高挥发分烟煤即可显著改善着火性能，无需改造燃烧器。

2.2 配煤方案的优化方法

配煤方案的确定需统筹考虑燃烧特性、排放特性、

结渣特性和磨煤机出力四个维度。以600MW超临界锅炉为例,其设计煤种为山西贫煤,低负荷稳燃困难。通过煤质数据库筛选,选取新疆烟煤作为掺配煤种,按不同比例进行热重分析和小型燃烧试验。试验结果表明,当烟煤掺配比例从0逐步提高到40%时,混煤的着火温度从780℃降至620℃,着火稳定性指数提高约60%。综合经济性与安全性,推荐日常掺配比例为25%~35%,极限调峰工况下可短时提高至40%~45%。在确定掺配比例的基础上,进一步控制入炉煤的均匀性——采用“先预混后入炉”的两级混合工艺,即在煤场完成初步堆叠混合,经输煤皮带进入原煤仓前增设在线混煤器进行二次均化,确保混煤热值波动控制在±5%以内。根据负荷变化动态调整各磨煤机的煤种分配方式,也是精细化管理的重要手段。

2.3 配煤对NO_x生成的影响机制

配煤掺烧对NO_x生成的影响体现在燃料氮转化路径的改变和燃烧环境的改善两个层面。挥发分氮的转化是燃料型NO_x的主要来源之一,高挥发分烟煤掺入后,挥发分析出提前,挥发分氮在还原性气氛中向N₂的转化比例提高,而向NO_x的转化比例降低。高挥发分煤的焦炭活性较高,焦炭氮在燃烧过程中的还原作用增强——焦炭作为还原剂可将已生成的NO_x还原为N₂,从而进一步降低最终NO_x排放浓度。配煤改善火焰充满度和温度场均匀性后,局部高温区的减少也抑制了热力型NO_x的生成。实验数据表明,在相同过量空气系数条件下,掺烧30%烟煤时NO_x排放浓度较纯烧贫煤降低约15%~20%。配煤对NO_x的协同抑制效应随负荷降低而更加显著,因为在低负荷下高挥发分煤的提前着火和稳燃作用更为突出,为后续空气分级创造更好的还原条件^[2]。

3 燃烧调整与还原区构建

3.1 空气分级燃烧的深度优化

空气分级燃烧是控制NO_x生成的基础性手段,其原理是将燃烧所需空气分阶段送入炉膛,在燃烧器区域形成富燃料还原性气氛抑制燃料型NO_x的生成,同时在燃烧器上方补入燃尽风完成焦炭燃尽。低负荷工况下,常规空气分级面临根本性矛盾:维持还原区所需的一次风量过低会导致煤粉气流刚性不足、火焰偏斜,而增加一次风量则会削弱还原效果。针对这一矛盾,提出“变一次风率+分级精准配风”的优化策略,核心是在变负荷过程中动态调整一次风率设定值。高负荷时维持常规一次风率22%~25%,低负荷时适当提高至26%~28%以保证煤粉气流的射流刚性和火焰稳定性,同时对二次风进行精细分配,将主燃烧器区二次风量压缩至理论空气量的

75%~80%,在燃烧器区域形成强还原性气氛。燃尽风率相应提高至20%~25%,利用燃尽风与主燃烧器区之间的高度差确保NO_x还原反应的充分时间。

3.2 燃料分级与还原区构建

燃料分级是在空气分级的基础上,通过将部分燃料从燃烧器上方喷入炉膛,在主燃区与燃尽区之间构建深度还原区域的先进技术手段。该技术的核心思想是:主燃烧器区在欠氧条件下燃烧生成含大量CO、H₂和烃类物质的还原性烟气,这些还原性组分在上升过程中与从还原区喷入的二次燃料接触,将主燃区已生成的NO_x还原为N₂。在超临界锅炉上的工程实施中,燃料分级主要利用上层燃烧器作为还原剂喷口,在低负荷停运上层燃烧器时将其改造为燃气或超细煤粉喷口实现燃料分级功能。以典型工程为例,利用B、C层燃烧器作为还原剂喷口,在35%负荷工况下投入10%~15%的辅助燃料(采用烟煤超细粉),使主燃烧器区出口的NO_x浓度从420mg/Nm³降至260mg/Nm³,还原效率达38%。燃料分级效果的优劣取决于还原剂喷口位置的精准选择——理想位置应在主燃烧器区火焰锋面上方3~5m处,该区域烟气温度仍维持在1000~1200℃,既是NO_x还原反应的最佳温度窗口,又足以保证喷入燃料的快速着火。

3.3 配煤掺烧与燃烧调整的耦合关系

配煤掺烧与NO_x控制之间存在着深刻的协同机制,而非独立的并行操作。协同性体现在三个层面。第一是煤质与燃烧环境的适配关系——配煤掺烧改变的是燃料的挥发分含量、热值和焦炭活性,高挥发分煤种燃烧速度快,在燃烧器区域内形成局部高温,有利于挥发分氮向N₂的转化而非NO_x的生成,为空气分级和燃料分级创造更有利的煤质条件。第二是多变量非线性协同作用的挖掘——通过配煤掺烧调整入炉煤质后,炉膛温度场分布更为均匀、火焰充满度提高,使得在保持相同锅炉效率的前提下可以进一步关小燃尽风挡板、扩大还原区体积,形成正向循环^[3]。第三是全工况自适应控制的实现——将配煤掺烧方案与燃烧控制系统进行联动设计,建立基于负荷指令和入炉煤质在线检测的煤质—风煤比—燃尽风开度三维前馈控制矩阵,使机组在变负荷过程中自动调用最优的配煤比例和配风参数组合。

4 低负荷精细化配风与协同控制集成

4.1 一次风参数精细化整定

一次风参数的精细化整定是低负荷稳燃的基础。一次风率过低时煤粉气流刚性不足、火焰容易贴壁,过高则推迟着火、火焰中心上移。低负荷工况下推荐将一次风率由常规的22%~25%提高至26%~28%,以增强煤粉气

流的射流刚性,防止火焰偏斜贴壁。一次风速的整定需兼顾煤粉输送安全与着火稳定性,推荐维持在22~26m/s范围内,同层燃烧器间风速偏差控制在 ± 2 m/s以内。一次风温的调整同样重要,提高一次风温可降低煤粉气流的着火热,推荐在磨煤机出口温度允许范围内(通常70~90℃)尽量提高一次风温,低负荷时可提高至上限值运行。煤粉细度的控制是配风与制粉系统的衔接环节,低负荷时磨煤机出力降低、煤粉变粗,应优化磨煤机分离器转速或调整加载力,将煤粉细度R90控制在18%~22%的设计范围内,保证煤粉在低负荷下的燃尽率^[4]。

4.2 二次风束腰式分级配风优化

束腰式分级配风是解决低负荷稳燃与NO_x控制矛盾的有效手段。其核心思想是将二次风集中供给于中部燃烧器区域,形成“束腰”效应——中部风量集中强化燃烧、稳定火焰,上部减少配风抑制火焰上冲,下部适度配风托举火焰防止火焰下移。以六层燃烧器为例,将B、C、D三层(中部)的二次风挡板开度由常规的75%提升至85%~88%,A层(下部)维持75%,E层(上部)降至60%,F层(上部)降至50%。这种配风方式使燃烧器区域的过量空气系数 α 维持在0.78~0.82的强还原性气氛范围内,有效抑制燃料型NO_x生成的同时,中部集中配风强化了火焰根部的氧气供应、改善了着火稳定性。燃尽风率相应提高至22%~25%,确保焦炭在炉膛上部完全燃尽。实际运行中,建议在低负荷段采用束腰配风,高负荷段切换为均等配风,以实现全负荷段稳燃与NO_x的综合优化。

4.3 燃尽风精准调控与NO_x协同

燃尽风调控是低负荷NO_x协同控制的最后关键环节。燃尽风率、燃尽风喷口摆角和燃尽风与主燃烧器区的高度差是三个核心调控参数。燃尽风率过低时焦炭燃尽不充分、飞灰含碳量升高,过高时还原区体积被压缩、NO_x还原效果下降。推荐低负荷工况燃尽风率维持

在22%~25%,实现稳燃与NO_x的平衡。燃尽风水平摆角用于抵消炉膛出口的残余旋转,减小烟气偏差对过热器管壁温度的影响,推荐在低负荷时将燃尽风水平摆角调整至+3°~+5°方向。燃尽风与主燃烧器区的高度差决定了NO_x在还原区的停留时间,高度差每增加1m,NO_x还原率约提高3~5个百分点,但过大的高度差会降低燃尽风与上升烟气的混合效果。推荐低负荷时主燃烧器区与燃尽风喷口的距离维持在5~7m,对应NO_x还原时间约1.5~2.0s。三个参数之间存在耦合关系——摆角改变影响实际混合高度,燃尽风率变化影响还原区氧量,需通过正交试验确定最优组合。

结束语

超临界锅炉低负荷稳燃与NO_x协同控制是深度调峰的核心技术难题。本文从低负荷稳燃机理和NO_x生成特性出发,提出了以配煤掺烧为基础、以“煤质调配—燃烧优化—还原区构建”为三级架构的协同控制技术路线。研究表明,通过高挥发分烟煤与贫煤互补掺烧改善着火,结合空气分级精准配风与燃料分级还原区构建,可实现低负荷下NO_x有效控制与飞灰含碳量达标,实现锅炉效率与NO_x排放的协同优化。该技术路线不涉及锅炉本体结构性改造,投资小、周期短,对在役超临界机组低负荷适应性改造具有重要推广价值。

参考文献

- [1]宋大勇,陈晓龙,张海涛,等.配煤掺烧比例对锅炉运行性能的影响[J].化工机械,2024,51(6):841-847.
- [2]李可君,李芳芹,任建兴,等.富氧燃烧对投运混煤锅炉低负荷稳燃性的影响[J].热能动力工程,2023,38(5):88-96.
- [3]黄细聪,蒋锋.超临界直流锅炉入炉煤快速切换装置研究与应用[J].中国仪器仪表,2024(1):59-61.
- [4]尤默,陈磊,尚勇,等.超临界墙式切圆锅炉低负荷燃烧特性[J].洁净煤技术,2023,29(10):145-152.