

一次风量调整对循环流化床锅炉燃烧稳定性的影响研究

张庆伟

云南华电巡检司发电有限公司 云南 红河州 652309

【摘要】：循环流化床锅炉凭借燃料适应性广、燃烧效率高、污染物排放易控制等优势，在电力、化工等领域得到广泛应用。燃烧稳定性是循环流化床锅炉安全、经济运行的核心指标，而一次风量作为重要的运行参数，对燃烧稳定性有着直接且显著的影响。本文结合实际运行案例，深入分析一次风量调整对循环流化床锅炉床温、物料循环、燃烧效率及污染物排放的影响，探究不同工况下一次风量的优化区间，为循环流化床锅炉的稳定运行提供参考。

【关键词】：循环流化床锅炉；一次风量；燃烧稳定性；床温；物料循环

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.022

引言

一次风量的大小直接影响着床层的流化质量、温度分布、物料循环倍率等关键参数，进而对锅炉的燃烧稳定性产生重要影响。在实际运行中，一次风量的调整是应对负荷变化、燃料特性改变等工况的重要手段。若一次风量控制不当，可能导致床层结焦、流化不良、燃烧效率下降等问题，甚至引发锅炉跳闸等安全事故。因此，深入研究一次风量调整对循环流化床锅炉燃烧稳定性的影响，明确不同工况下的最佳一次风量范围，对于提高锅炉运行的安全性和经济性具有重要意义。

1 循环流化床锅炉燃烧原理及一次风作用

1.1 燃烧原理

循环流化床锅炉的燃烧过程主要在炉膛内完成，燃料由给煤机送入炉膛下部的密相区，与从布风板送入的一次风充分混合。在一次风的作用下，燃料颗粒被流化，形成流化床状态。燃料在密相区进行初步燃烧，产生的高温烟气携带大量未燃尽的燃料颗粒和灰渣进入稀相区，继续燃烧。部分较粗的颗粒在重力和分离器的作用下被分离出来，通过返料器返回密相区再次参与燃烧，形成物料循环。这种循环燃烧方式延长了燃料在炉膛内的停留时间，提高了燃烧效率。

1.2 一次风的作用

1.2.1 提供初始燃烧氧气

一次风从布风板均匀送入密相区，为燃料的初始燃烧（尤其是挥发分燃烧和焦炭表面燃烧）提供关键的氧气。密相区的氧气浓度直接影响燃烧反应速率，一次风量不足会导致局部缺氧，造成一氧化碳浓度升高（超过 1000ppm）和燃烧效率下降；而风量过高则会使过量空气带走热量，降低床层温度。实践表明，密相区的过量空气系数控制在 0.7-0.9 时，既能保证燃料稳定着火，又可减少氮氧化物生成。

1.2.2 维持流化状态

一次风的动能是实现物料流化的核心驱动力。当一次风速达到临界流化风速（对于粒径 1-5mm 的床料，约为 0.8-2m/s）时，床层颗粒由静止状态转变为悬浮状态，呈现类似流体的特性。继续提高风速至操作流化风速（通常为临界流化风速的 2-3 倍），床层高度膨胀，颗粒间的碰撞和混合加剧，形成剧烈的流化床态。稳定的流化状态是保证燃烧均匀性的前提：一方面，流化使燃料颗粒与床料充分接触，避免局部过热（温度偏差控制在 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 以内）；另一方面，颗粒的循环流动促进了热量在床层内的均匀分布，防止出现“冷点”或“热点”。

1.2.3 保障布风均匀性

一次风通过布风板（由风帽和风室组成）的均匀分配，是避免局部流化不良的关键。风帽的合理设计（如钟罩式风帽）可使一次风在风室内充分混合后，以一定角度喷出，形成向上的气流和水平方向的扰动，防止颗粒在布风板表面沉积。一次风量的稳定供给能确保各风帽出口风速一致（偏差小于 10%），使床层整体流化均匀，避免因局部风速过低导致的“沟流”现象（气流沿局部通道短路，大部分床层未流化）。

2 一次风量调整对燃烧稳定性的影响

2.1 对床温的影响

床温是反映循环流化床锅炉燃烧状态的重要参数，其稳定性直接关系到锅炉的安全运行。一次风量的调整对床温有着显著影响。当一次风量较小时，流化风速较低，物料混合不够充分，燃料燃烧产生的热量难以快速扩散，导致密相区床温升高。若床温过高，超过燃料的灰熔点，可能引发床层结焦，破坏流化状态，严重影响燃烧稳定性。随着一次风量的增加，流化风速提高，物料的混合和扰动加剧，燃料燃烧产生的热量能够及时被带走，床温逐渐降低。同时，一次风量增加带来的氧气量增多，促进了燃料的充分燃烧，减少了不完全燃烧损失。但当

一次风量过大时,过量的冷空气会吸收大量热量,导致床温过低,影响燃料的着火和燃烧速度,甚至可能造成灭火。在某300MW循环流化床锅炉的运行案例中,当一次风量从70000m³/h增加到100000m³/h时(增幅约43%),密相区床温从950℃缓慢降至900℃,床温波动范围从±30℃缩小至±20℃,燃烧稳定性逐步提升;而当一次风量进一步增加到115000m³/h时,床温降至850℃,过量冷空气的吸热效应逐渐凸显,床温波动范围扩大至±25℃,燃烧稳定性出现下降趋势。

2.2 对物料循环的影响

物料循环是循环流化床锅炉的重要特征,其循环倍率的大小直接影响燃烧效率和炉膛温度分布。一次风量的调整会改变物料的流化状态和夹带量,进而影响物料循环。当一次风量较小时,流化风速低,物料的夹带量少,循环倍率小,炉膛上部的稀相区燃料量不足,燃烧强度降低,可能导致炉膛出口温度下降。随着一次风量的增加,流化风速提高,物料的夹带量增多,循环倍率增大。大量的循环物料返回密相区,不仅可以吸收部分热量,降低床温,还能与新加入的燃料充分混合,促进燃料的燃烧。但一次风量过大时,物料的夹带量过多,分离器的分离效率可能无法满足要求,导致大量细颗粒被烟气带走,循环倍率反而下降,同时还会增加引风机的电耗。在某130t/h循环流化床锅炉的试验中,当一次风量为60000m³/h时,循环倍率为5;当一次风量增加到70000m³/h时,循环倍率提高到8;当一次风量增加到80000m³/h时,循环倍率降至6。这表明存在一个最佳的一次风量范围,使得物料循环处于最佳状态。

2.3 对燃烧效率的影响

燃烧效率是衡量锅炉经济性的重要指标,一次风量的调整通过影响燃料与氧气的混合程度、停留时间等因素,对燃烧效率产生影响。当一次风量不足时,燃料燃烧所需的氧气供应不充分,会导致不完全燃烧损失增加,燃烧效率降低。

适当增加一次风量,能够为燃料燃烧提供充足的氧气,改善燃料与氧气的混合效果,促进燃料的充分燃烧,提高燃烧效率。但一次风量过大时,会使烟气量增加,排烟热损失增大,同时过量的空气会带走大量热量,降低炉膛温度,反而导致燃烧效率下降。在某电厂的实际运行中,当一次风量为额定风量的80%时,锅炉燃烧效率为89%;当一次风量调整为额定风量的90%时,燃烧效率提高到92%;当一次风量增加到额定风量的110%时,燃烧效率降至90%。

2.4 对污染物排放的影响

循环流化床锅炉的污染物排放主要包括氮氧化物(NO_x)和二氧化硫(SO₂)等,一次风量的调整对污染物排放也有一

定影响。对于NO_x的生成,一次风量增加,氧气供应充足,会促进燃料中氮元素的氧化,使NO_x排放量增加;而一次风量不足时,燃料在还原性气氛中燃烧,NO_x排放量会减少,但可能导致一氧化碳(CO)排放量增加。对于SO₂的排放,一次风量的影响相对较小,但一次风量过小会导致床层温度升高,可能影响脱硫剂的反应活性,降低脱硫效率。一次风量过大则会增加烟气量,稀释SO₂浓度,使脱硫系统的处理难度增加。

3 一次风量的优化调整策略

3.1 基于负荷变化的调整

锅炉负荷的波动直接反映了外界对热能需求的变化,而一次风量需与负荷变化形成精准匹配,通过分层调控实现不同负荷下的稳定燃烧。

3.1.1 低负荷工况(负荷60%以下)

在低负荷运行时,燃料输入量大幅减少,炉膛内燃烧强度减弱。此时若维持较高的一次风量,会导致流化风速过高,一方面过量冷空气吸收炉膛热量,使床温降至800℃以下,影响燃料着火稳定性;另一方面会加剧物料夹带,造成循环倍率下降至3以下,稀相区燃烧份额降低,形成“炉膛上部温度偏低、密相区局部过热”的不均衡状态。实际操作中,应将一次风量控制在额定风量的50%-60%。采用“阶梯式降风”模式,每降低5%负荷,一次风量递减3%-4%,避免风量骤降导致的流化不良;适当提高二次风比例至40%-50%,弥补密相区氧气不足的问题,同时增强炉膛上部扰动;当床压低于5kPa时,可暂停一次风量下调,通过添加床料维持流化质量。某200MW循环流化床锅炉在40%负荷(属于低负荷范围)时,将一次风量从额定值的70%降至55%,床温从780℃升至830℃,床温波动幅度从±40℃缩小至±20℃,未出现局部结焦现象。

3.1.2 中负荷工况(负荷60%-80%)

此区间为锅炉运行的经济负荷段,一次风量需兼顾燃烧效率与流化质量,通常控制在额定风量的60%-80%。随着负荷提升,燃料量逐步增加,需通过风量调整实现“床温稳定在850-900℃、循环倍率5-7”的优化目标。建立负荷-风量联动曲线:每提升10%负荷,一次风量增加5%-6%,确保氧燃比维持在1.1-1.2;当温度超过950℃时,提前增加5%一次风量,预防床温超限;通过调整风室挡板开度,使各测点床温偏差控制在±20℃以内。

3.1.3 高负荷工况(负荷80%以上)

高负荷时燃料燃烧旺盛,需充足氧气支持燃烧,同时需通过高流化风速强化物料循环。一次风量应设定为额定风量的

80%-100%，以保证循环倍率达到8-10，使大量高温循环灰返回密相区，抑制床温过度升高。每增加10%负荷，风量递增不超过8%，防止气流冲击造成床层波动；当密相区温度接近950℃时，优先通过增加一次风量（而非减煤）降温，每次增幅2%-3%；随着一次风量增加，引风机负压需同步提升0.5-1kPa，避免炉膛正压运行。

3.2 基于燃料特性的调整

燃料特性的差异会导致燃烧反应速率、热量释放规律显著不同，一次风量调整需针对性适配，实现“量质匹配”。

3.2.1 高挥发分燃料

此类燃料（如褐煤、生物质）着火温度低（约250-300℃），燃烧速度快，若一次风量不足易造成密相区局部高温结焦。一次风量需比设计值提10%-15%。采用“高风温+高风量”模式：将一次风预热至200-250℃，提升流化风速至2.5-3m/s，加快热量扩散；密相区底部风量占比60%，中上部占比40%，避免燃料集中燃烧；每小时根据床温变化微调风量，当床温超过920℃时，立即增加3%风量。某电厂燃用褐煤时，将一次风量从设计值的80000m³/h提高至88000m³/h，床温从960℃降至910℃，结焦现象完全消除，燃烧效率提升1.2%。

3.2.2 低挥发分燃料

无烟煤、贫煤等低挥发分燃料着火困难（着火温度>600℃），需通过降低一次风量提高床温，促进燃料燃尽。风量控制基础风量比设计值降低5%-10%，保证床温维持在900-950℃；采用“热风强化”技术：将一次风温提升至300℃以上，通过高温气流弥补热量不足；将煤颗粒控制在0-8mm，减少大颗粒未燃尽损失，此时可适当降低5%风量。

3.2.3 燃料粒度差异调整

燃料粒度分布直接影响流化状态，一次风量需随粒度变化动态适配。粗颗粒燃料（平均粒径>3mm）需提高风量10%-15%，流化风速控制在2.2-2.8m/s，防止颗粒沉积；细颗粒燃料（平均粒径<1mm）风量降低5%-8%，风速控制在1.8-2.2m/s，减少飞灰夹带；混合粒度燃料采用“梯度风速”调节，通过风室挡板差异化设置，使不同粒径颗粒均处于良好流化状态。

3.3 结合运行参数的综合调整

运行参数是燃烧状态的直接反映，一次风量调整需建立多

参数联动机制，实现“实时监测-智能判断-精准调控”的闭环管理。

3.3.1 床温与风量的动态平衡

床温是判断风量是否合理的核心指标，床温>950℃每升高10℃，增加2%一次风量，同时减少1%给煤量，直至床温降至920℃；床温<850℃每降低10℃，减少1.5%一次风量，若床温仍下降，启动床上点火器辅助加热；床温偏差>50℃检查布风均匀性，通过局部调风消除温度梯度，避免单侧超温。

3.3.2 烟气成分的反馈调节

基于烟气在线分析数据（O₂、CO、NO_x）的风量优化，密相区O₂维持在3%-5%，炉膛出口O₂控制在4%-6%，当氧含量偏离时，每1%偏差对应调整2%一次风量；CO浓度监控CO>500ppm时，增加3%风量并降低5%给煤量，防止不完全燃烧加剧；当NO_x>300mg/Nm³时，可降低3%-5%一次风量，同时增加5%二次风，在保证燃烧效率的前提下抑制NO_x生成。

3.3.3 物料循环系统的协同优化

通过循环倍率与床压的监测，实现风量精准调控。循环倍率<5增加5%-8%一次风量，提升夹带量，同时检查分离器效率，若分离效率<90%需进行清灰处理；循环倍率>10减少3%-5%风量，降低引风机负压0.5kPa，防止循环灰过多导致床温下降；床压波动>1kPa/min立即暂停风量调整，排查是否存在物料结块或返料器堵塞，待稳定后再逐步调节。

4 结论

一次风量是影响循环流化床锅炉燃烧稳定性的关键参数，其调整对床温、物料循环、燃烧效率和污染物排放均有着显著影响。适当的一次风量能够保证床层的良好流化状态，维持稳定的床温，提高燃烧效率，减少污染物排放。在实际运行中，应根据锅炉负荷、燃料特性等因素，结合床温、烟气成分等运行参数，对一次风量进行优化调整。低负荷时适当降低一次风量，高负荷时适当增加一次风量；对于不同特性的燃料，应针对性地调整一次风量，以保证锅炉的安全、经济、稳定运行。未来的研究可进一步结合数值模拟技术，深入分析一次风量调整对循环流化床锅炉内部流动和燃烧过程的影响机制，为一次风量的精准调控提供更有力的理论支持。

参考文献：

[1] 姜明明.循环流化床锅炉掺烧乏风瓦斯的燃烧特性数值模拟研究[D].内蒙古科技大学,2025.

- [2] 骆绍山.循环流化床锅炉低氮燃烧技术研究[J].中国设备工程,2025,(08):202-204.
- [3] 吴惠宇.太原三给热源厂循环流化床锅炉工艺介绍及其点火启动探析[J].现代工业经济和信息化,2025,15(01):249-254.
- [4] 崔志文,鲍明刚,张强军,等.循环流化床锅炉飞灰、炉渣含碳量高的原因分析及调整控制[J].工业锅炉,2025,(02):48-51.
- [5] 武振国,杨楚轲,张守玉,等.变负荷下循环流化床锅炉内燃烧行为研究进展[J].煤炭转化,2025,48(02):78-91.