

钢铁企业烧结烟气超低排放协同处理技术应用

刘淑颖

四川电力设计咨询有限责任公司 四川 成都 610000

【摘要】：随着我国经济的快速增长，经济发展与资源环境的矛盾日趋尖锐，污染物减排已成为我国当前的重要任务之一。烧结是钢铁冶炼中的一个重要环节，在烧结过程中将产生大量烟气，为了更经济合理的协同处理，以矽石和中煤混合的低热值煤为燃料，采用反应器对烧结机排烟进行脱硫脱硝等超低排放协同处理，一并脱除烧结烟气中的SOX、NOX、二恶英和一氧化碳等，不仅达到现行烧结机烟气超低排放要求，而且具有超前性，在实现超低排放标准的同时综合利用了钢铁企业的烧结废气，实现了“以废治废，变废为宝”的目的。同时利用反应器产生的余热发电，以实现资源的有效利用。

【关键词】：钢铁企业；烧结烟气；超低排放；反应器；烟风系统；协同运行

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.012

1 研究背景与意义

在国家大气污染防治与钢铁行业绿色转型政策推动下，超低排放改造已成为钢铁企业生存发展的硬性要求。烧结工序作为钢铁生产烟气排放最大、污染最复杂的环节，烟气量大、温湿度波动大、含尘量高、硫氮污染物与二噁英共存，治理难度显著高于火电行业。长期以来，国内烧结治理多采用独立脱硫、脱硝、除尘设备，存在系统分散、协同性差、运行不稳定、催化剂中毒、氨逃逸超标、改造投资高等问题，难以满足最新超低排放长期稳定达标要求。

为解决传统工艺短板，行业逐步发展烧结烟气多污染物协同治理+余热资源化利用一体化技术。采用反应器技术，利用低热值煤、煤泥掺烧处理烧结废气，同步完成脱硫、脱硝、除尘、脱二噁英，并实现余热发电，真正达到“以废治废、变废为宝”的治理效果。由于烧结系统、反应器系统、尾部环保岛相互串联、强耦合运行，烟风参数互相干扰、工况切换复杂，极易出现压力波动、温度失配、排放超标、设备结焦腐蚀等问题。因此，开展烟风系统协同运行技术研究，对保障机组安全、稳定、超低排放运行具有重要工程意义。

2 烧结系统及烟气特性分析

2.1 烧结工艺流程

带式烧结机整套系统包括原料预处理、配料、混合造球、烧结、成品处理五大系统。原料经破碎、筛分、加湿后精准配比，通过混合制粒提升透气性，布料点火后在负压抽风作用下连续完成烧结反应。烧结过程自上而下分为过湿带、干燥带、预热带、燃烧带、烧结矿带，完成水分迁移、固相反应、燃料

燃烧、熔融结晶全过程。烧结废气经机头电除尘后由主抽风机送入后端治理系统。烧结主抽风机为系统核心设备，具有大流量、高负压、变工况运行特点，是造成烟气参数频繁波动的主要源头。

2.2 烧结烟气特点

烧结生产工艺特性决定了烧结烟气工况复杂、波动剧烈、治理难度大，主要特征如下：

（1）烧结烟气量大且分布不均匀。

烧结系统漏风率高、物料循环倍率大，有相当一部分空气没有通过烧结料层，使烧结烟气量大大增加。每吨烧结矿产生烟气量可达4000~6000m³，受原料透气性、料层厚度、生产负荷影响，烟气量波动幅度可达40%以上，系统工况稳定性极差。

（2）二氧化硫浓度变化大。

SO₂排放浓度的波动范围较宽，受矿石和燃料中S含量和烧结工况决定，随着原燃料供需矛盾的不断变化和钢铁企业追求成本的最低化。钢铁企业所使用原燃料的产地、品种变化很大，由此造成其质量、成分（包括含硫率）等的差异波动很大，使得烧结生产最终产生的二氧化硫的浓度变化范围较大。对脱硫系统精准控制、稳定达标造成极大难度。

（3）烧结烟气成分复杂。

烧结烟气除常规硫化物、氮氧化物、粉尘外，还含有HCl、HF酸性腐蚀气体，以及铅、汞、铬、锌等重金属污染物和二噁英有机毒物，烟气组分复杂、治理维度多、设备腐蚀风险高。

(4) 烟气温度变化范围大、含氧量与含湿量高。

随着生产工艺的变化，烧结烟气的温度变化范围一般在 120-180℃。烟气含湿量大，为了提高烧结混合料的透气性，混合料在烧结前必须加适量的水制成小球，所以烧结烟气的含湿量较大，按体积比计算，水分含量一般在 10%左右。含氧量一般为 15%-18%。烧结机头烟气氧含量为 15%-18%，高湿、高氧、低温特性易诱发设备低温腐蚀、脱硝窗口偏移等问题。

(5) 粉尘浓度高、易堵塞设备。

烧结烟气初始含尘浓度高、粉尘颗粒细腻、粘附性强，极易造成换热设备堵塞、催化剂积灰失效、系统阻力升高，影响整套环保系统长期稳定运行。

2.3 烧结系统运行工况

烧结机组运行工况复杂多变，主要分为正常运行、大修、中修、小修、例行检修、临时检修、非计划停机七种运行模式。除全厂掉电外，烧结系统的工况调整均可以至少提前 10 分钟通知发电系统，并配合反应器的工况切换。计划性检修周期固定、停机时间可控；临时检修以台车更换为主，启停频繁、工况切换随机性强。系统短时间停机（4h 以内）可维持反应器通烧结烟气运行；停机超过 4h 需切换纯空气运行模式。多工况、高频率切换，对后端反应器、环保岛烟风系统的适应性、稳定性、协同控制能力提出极高要求。烧结系统的工况如下表所示：

序号	运行工况	备注
1	大修。每 12 月 1 次，每次约 20 天，属于计划停机。	纯烧烧结烟气切换纯烧空气运行
2	中修。每 6 月 1 次，每次约 2 天，属于计划停机。	
3	小修。一般每 2 月 1 次，每次 20h 以内，属于计划停机。	
4	例行检修。一般每 0.5 月 1 次，每次 6h 以内，属于计划停机。	
5	临时检修。时间在 30 分钟以内，检修完后恢复正常运行。频率不定，和运行情况有关。临时检修最常见的情况是更换烧结机台车，更换台车的频率不定，少则 2 周一次也没有，多则一天 5 次，更换时间在 10 分钟以内，属于非计划检修。	烧结机停机不超过 4h 时，保持纯烧烧结烟气继续运行；若烧结机停机超过 4h 时，需先由纯烧烧结烟气切换纯烧空气运行，待台车更换完毕后，再进行纯烧空气切换纯烧烧结烟气
6	非计划停机。当临时检修超过一定时间（一般 30 分钟左右）不能解决问题	纯烧烧结烟气切换纯烧空气运行

	时，需转为停机检修，属于非计划停机。	
7	正常运行。烧结系统正常启动用时约 4~8h，停机用时约 3h。	纯烧烧结烟气运行

3 烟风系统协同设计与运行控制

3.1 反应器烟风系统组成

反应器采用平衡通风设计，配置一次风机、二次风机、流化风机、引风机及尾部增压风机，可实现风量精准调节。系统配套炉内石灰石粉初脱硫+尾部湿法深度脱硫、SNCR+SCR 耦合脱硝、布袋除尘+湿式电除尘深度净化、GGH 烟气换热、湿法脱硫装置，形成完整的协同治理体系。系统可适应纯空气燃烧、纯烧结烟气燃烧、旁路烟气治理等多种运行模式。

3.2 系统运行模式

根据烧结系统、反应器系统、环保岛系统运行状态，整套装置划分为四类核心运行工况：（1）正常工况：烧结系统正常生产，烧结烟气全部送入反应器耦合燃烧处理，经环保岛脱硫、脱硝、除尘深度净化后达标排放，同步余热发电，即烧结系统→反应器岛→环保岛（脱硫除尘系统）→烟囱。

该工况下，反应器岛跟随烧结系统运行，环保岛和汽轮发电机组跟随反应器岛运行。空气进风口隔离门、烟气旁路两道隔离门均关闭。

（2）烧结停机工况：烧结机检修或故障停机，反应器切换补入自然空气维持燃烧发电，保障发电机组连续运行，降低停机损失，即（空气）→反应器岛→环保岛（脱硫除尘系统）→烟囱。

该工况下，按常规循环流化床机组控制运行。烧结系统主抽风机出口隔离门、烟气旁路两道隔离门均关闭。

（3）反应器停机工况：反应器或发电系统检修、故障停运，烧结烟气切换旁路通道，由尾部环保岛独立完成脱硫、脱硝、除尘治理，保证烧结生产不停、烟气持续达标排放，即烧结系统→烟气旁路→环保岛（脱硫除尘脱硝系统）→烟囱。

该工况下，环保岛跟随烧结系统运行，反应器岛及汽轮发电机组从系统中隔离（烟气旁路两道隔离门全开，烧结烟气母管至一次风机隔离门、烧结烟气母管至二次风机隔离门、引风机出口隔离门、空气侧隔离门均关闭）。

（4）环保岛故障工况：尾部治理系统异常故障，全线系统联锁停机，规避超温、超压、污染物超标等安全环保风险。同时，烟气旁路两道隔离门、烧结烟气母管至一次风机隔离门、烧结烟气母管至二次风机隔离门、引风机出口隔离门、空气侧隔离门均关闭。

多模式灵活切换实现了生产、治理、发电系统互不制约、

互为备用,大幅提升整套装置运行可靠性。

3.3 反应器启动与烟气切换逻辑

反应器启动严格遵循引风机→高压流化风机→二次风机→一次风机的标准启动顺序,优先建立稳定炉膛负压与流化风量,保证床料均匀流化,规避局部结焦风险。

烧结主抽风机出口关断门关闭状态,空气进口挡板式门全开,一、二次风机进出口关断门全开,一、二次风机进口调节百叶开度小于5%。

启动引风机:全关风机入口动叶,关闭出口电动门。启动引风机后,缓慢开启入口导叶,将炉膛负压控制切“手动”,监视炉膛压力,保持合适的炉膛压力。

启动高压流化风机:全开出口电动门,关闭入口调整门,启动后根据需要缓慢开启入口调整门。

启动二次风机:全开出口电动门,关闭入口调整门,入口关断门全开,启动后根据需要缓慢开启入口调整门,并注意监视、调整炉膛压力。

启动一次风机:全开一次风机出口各风道挡板门,关闭风机入口调整门。入口关断门全开,启动后开启入口调节百叶,使一次风量大于最小流化风量,调整炉膛压力。

所有风机启动完毕后,调整引风机、一、二次风机的风量,使炉膛出口压力维持在 $-50\text{Pa}\sim-100\text{Pa}$ 。

反应器启动按常规循环流化床锅炉模式启动,空气切换为烧结烟气工况可按如下两种方式进行

(1) 反应器负荷升至50%负荷稳定燃烧,控制空气进口

处压力为微负压。保持空气进口挡板门开度不动。反应器继续再升负荷,逐步启动烧结主抽风机和烧结机,维持控制空气进口处压力为微负压。联动反应器与烧结机各自增加负荷,反应器负荷升至70~80%(具体负荷可由现场调试具体确定),维持反应器负荷不动,逐步调小空气入口挡板式门开度,同时烧结主抽风机继续升负荷,维持风机入口母管压力(微负压),直到空气进口挡板门全部关闭,完成反应器的启动;

(2) 反应器负荷升至50%负荷(具体负荷可由现场调试具体确定)稳定燃烧,维持风机入口母管压力(微负压),逐步启动烧结主抽风机和烧结机,为了维持风机入口母管压力不变,需要逐步调小空气入口挡板门开度,直至空气入口挡板门关闭。然后在维持风机入口母管压力不变的前提下,反应器继续升负荷,烧结风机和烧结机随反应器负荷率进行自身升负荷,完成反应器的正常启动。

系统由纯空气工况向烧结烟气工况切换过程中,以母管压力稳定、炉膛参数平稳为核心控制原则,同步调节烧结主抽风机出力、空气补风挡板开度、反应器风机负荷,实现烟气量平稳过渡,杜绝压力震荡、温度骤变、燃烧不稳等问题,保障切换过程零超标、零故障。

4 结论

钢厂企业烧结烟气环保超低排放协同处理技术研究,为钢厂烧结烟气协同处理环保超低排放余热发电项目烟风系统与上游烧结系统及下游尾部脱硫脱硝系统协同的提供技术和运行指导,确保项目投运后安全可靠运行,减少对烧结生产率的影响。为今后类似项目的提供参考,具有显著的经济效益和环境保护的社会效益,同时具有广阔的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 生态环境部.钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准:GB 28662—2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.
- [2] 王海风,张春霞.钢铁行业烧结烟气治理技术发展现状及展望[J].钢铁,2020,55(06):1-9.
- [3] 李超,赵刚.烧结烟气多污染物协同净化技术应用研究[J].环境工程,2021,39(04):78-83.
- [4] 张军,刘建伟.循环流化床低热值燃料耦合烧结烟气治理技术研究[J].热力发电,2022,51(02):112-118.
- [5] 周明远.钢铁烧结超低排放改造关键技术与工程实践[J].冶金环境保护,2021(03):23-28.
- [6] 陈亮,王磊.烧结烟气参数波动对脱硝系统运行的影响[J].工业安全与环保,2020,46(08):89-92.
- [7] 刘志强.烟风系统耦合机组工况切换稳定性控制策略[J].电站系统工程,2022,38(01):45-48.
- [8] 赵鑫.大型钢铁烧结烟气低温脱硫脱硝协同控制技术[J].环境科学与技术,2022,45(S1):189-193.
- [9] 黄涛.低热值固废耦合烧结烟气资源化利用工程应用[J].电力科技与环保,2023,39(02):56-61.
- [10] 李明杰.钢铁行业超低排放改造运行优化与风险管控[J].工业水处理,2024,44(01):102-107.