烧结烟气超低排放全过程控制优化技术探讨

江 梅[1]，郭 敏[1]，程 华[2]，刘鸿志[3]，赵韶英[4]，王宗爽[1]
（1. 中国环境科学研究院，北京 100012；2. 首钢股份公司迁安钢铁公司，河北 唐山 064400；
3. 中国环境科学学会，北京 100082；4. 河钢集团邯钢公司，河北 邯郸 056015）

摘要： 铁矿烧结作为钢铁工业颗粒物、SO_2、NO_x以及二噁英等污染物产生和排放量最大的工序，其排放的烟气成分复杂，并且烟气量、烟气温度和污染物质量浓度受生产原料和工况的影响波动较大，该工序已成为实施烟气超低排放改造的重点和难点。本文基于系统观念，分析原（燃）料控制、工艺设备改进对烧结烟气污染物排放的影响，同时研究除尘、脱硫、脱硝等工艺技术之间的匹配性和适应性，以实现最小化副产物和二次污染物排放以及能源消耗。研究结果表明：采用优选燃料、燃料预处理以及燃料预制粒的组合技术可以最大限度地减少污染物的产生；通过优化工艺操作可以实现烧结过程减污降碳协同控制；在末端综合治理方面，利用高炉煤气对烧结烟气进行加热，以及配置烟气换热器能够充分利用烟气中的余热，并降低能源消耗。因此，通过原（燃）料、设备、工艺、运行操作等源头削减与过程控制技术以及除尘、脱硫、脱硝等末端综合治理技术的系统整合，可以实现烧结烟气超低排放的最优化。

关键词： 烧结；烟气；系统治理；大气污染；超低排放
中图分类号： TF046.4；X701 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2023）02－0115－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.031

Discussion on optimization technology of whole process control of ultra-low emission of sintering flue gas

JIANG Mei[1], GUO Min[1], CHENG Hua[2], LIU Hongzhi[3], ZHAO Shaoying[4], WANG Zongshuang[1]
(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Shougang Qian'an Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 064400, Hebei, China; 3. Chinese Society for Environmental Sciences, Beijing 100082, China; 4. HBIS Group Hansteel Company, Handan 056015, Hebei, China)

Abstract: As the largest process of producing and emitting such pollutants as particulate matter, SO_2, NO_x and dioxin in the iron and steel industry, iron ore sintering has a complex flue gas composition, and the flue gas volume, flue gas temperature and pollutant quality concentration fluctuate greatly by the influence of production raw materials and working conditions, which has become the focus and difficulty of implementing ultra-low emission transformation of the flue gas. Based on the system concept, the effects of raw material control and process equipment improvement on the emission of sintering flue gas pollutants are analyzed, while the matching and adaptability between process technologies such as dust removal, desulfurization and denitration are researched to minimize by-product and secondary pollutant emissions and energy consumption. The results show that the combined technology of optimized fuel, fuel pretreatment and fuel pre-granulation can minimize the generation of pollutants; by optimizing the process operation, the coordinated control of pollution and carbon reduction in the sintering process can be realized; in terms of terminal comprehensive treatment, heating the flue gas and configuring the flue gas exchanger can make full use of the waste heat in the fume and reduce

收稿日期： 2022－08－20；**修回日期：** 2022－11－01
作者简介： 江 梅（1969—），女，正高级工程师，从事大气污染控制研究和相关标准制订。
通信作者： 王宗爽（1978—），男，博士，研究员，从事大气污染控制研究和相关标准制订。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

energy consumption. Therefore, through the system integration of source reduction and process control technologies of raw (fuel) materials, equipment, processes, operation operations and terminal comprehensive treatment technologies such as dust removal, desulfurization and denitrification, the optimization of ultra-low sintering fume emissions can be achieved.

Key words: sintering; flue gas; system governance; air pollution; ultra-low emission

铁矿烧结是将一定比例的铁矿石、熔剂、固体燃料焙烧成一定尺寸烧结矿的工艺过程。据《2020钢铁行业环境评估报告》统计，我国已有794台烧结机，其中180～300 m^2占比为38.80%，而300 m^2及以上占比为18.89%。烧结工序中，排放的烟气量约为1 500～2 500 m^3/t，混入空气后的废气量约为4 000～6 000 m^3/t；颗粒物产生量约为8.2～18.5 kg/t，排放质量浓度一般为1～5 g/m^3；SO_2产生量约为0.8～2.0 kg/t，排放质量浓度一般为400～5 000 mg/m^3；NO_x产生量约为0.4～0.65 kg/t，排放质量浓度一般为200～500 mg/m^3[1-2]。根据《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》(环大气[2019]35号)，烧结烟气颗粒物、SO_2、NO_x超低排放限值分别为10、35、50 mg/m^3。分析可知，颗粒物、SO_2、NO_x的去除效率必须分别达到99%～99.8%、91.3%～99.3%、75%～90%才能达到超低排放要求。烧结烟气中，颗粒物、SO_2、NO_x排放量在钢铁企业污染物排放总量中的占比分别为22%～48%、42%～86%、48%～86%。烧结烟气的主要特点：① 温度变化大，变化范围为120～180 ℃；② 烟气量波动大，变化幅度为60%～140%；③ 含湿量大，水分体积分数为9%～13%；④ 含氧量变化大，体积分数多数为15%～17%(不考虑漏风情况)；⑤ 烟气成分复杂，包含颗粒物、SO_2、NO_x、HCl、重金属、HF、二噁英等多种气态污染物。总之，烧结烟气量、烟气温度和污染物质量浓度受生产原料和工况的影响波动较大，且成分复杂，是实施超低排放的重点和难点。

鉴于烧结烟气的排放特点，本文探讨从源头削减、过程控制和末端治理技术来实现超低排放，即：① 采用低硫矿石原料和低硫低氮燃料、降低烧结机漏风率等手段进行源头污染物减量；② 通过改善烧结过程透气性、厚料层烧结、热风烧结等工艺优化和改进手段减少污染物产生；③ 采用静电除尘、石灰石/石灰－石膏湿法脱硫等技术进行末端综合治理。

1 源头削减与过程控制优化技术

1.1 源头削减

源头削减是通过原燃料控制、降低烧结机漏风率等方法优化烧结工序的原料和设备参数，减少污染物的产生。

(1) 原燃料控制是通过优化物料的添加配比、化学成分、反应活性和粒度大小等手段，采用优选燃料、燃料预处理以及燃料预制粒的组合技术最大限度地减少污染物的产生。优选燃料包括优选低硫、低氮量的燃料以及优化燃料粒度等，如：宝钢将烧结用混匀矿中硫的质量分数控制在0.03%，使其达到《铁矿石产品等级的划分》(GB/T 3254—2016)中一级粉矿等级，以此大幅减少了烧结过程SO_2的产生[3]；燃料预处理技术包括采用石灰乳对燃料进行表面改性、在燃料中配加抑制NO_x产生的添加剂等。

(2) 烧结机的漏风率高，不仅会增加电耗，也会增加固体燃料消耗，从而增加污染物的排放。据统计，漏风率每减少10%，每吨烧结矿可减少电能消耗2 kW·h，减少焦粉消耗1 kg，减少煤气消耗1 680 kJ，并且可以提高烟气温度以利于余热回收[4]。降低烧结机本体漏风率的技术措施是在烧结机机头和机尾、风箱、滑道、栏板、台车等位置安装密封装置，如采用负压吸附式端部密封、独立气密封双层卸灰阀、自适应柔性端部密封、弹性滑道密封、重力自适应台车栏板密封、星轮齿板齿形修正、双胞弯管防磨等综合密封技术。

1.2 过程控制

过程控制是通过烟气循环、余热预热混合料、厚料层烧结、热风烧结、燃料分加等组合技术优化工艺操作，实现烧结过程减污降碳协同控制。

(1) 烟气循环技术包括内循环和外循环两种工艺，其中内循环是指从主抽风机前的风箱支管取风进行循环，是目前主流的烧结烟气循环技术。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

烟气循环技术一方面可以降低烟气排放量，另一方面由于烟气显热全部供给混合料进行热风烧结，可以降低过程固体燃料消耗。当烟气循环量为 20%～50% 时，烟气排放量可降低 15%～30%，固体燃料消耗可降低 3～5 kg/t。目前宝钢、沙钢、宁波钢铁、首钢迁安公司、湛江钢铁、安阳钢铁、河钢邯钢等企业已采用了该技术，烟气排放量减少了 30%～40%，颗粒物、NO_x、二噁英排放量最大减少了 50%、40%、70%，能源消耗降低了 5% 以上[5]。

(2) 余热预热混合料技术是将烧结烟道的显热回收利用产生的蒸汽或环冷机冷却废气等引入到烧结机前的布料处，对混合料进行干燥。该技术提高了混合料的温度，可改善料层过湿的现象和透气性[6]。柳钢 360 m^2 烧结机采用蒸汽预热混合料后，每吨烧结矿的固体燃料消耗下降了 1.29 kg[7]。

(3) 厚料层烧结技术是采用较高料层厚度进行烧结。由于料层厚度的增高，该技术使得点火时间和高温保持时间延长，从而降低固体燃料消耗。料层透气性是实施该技术的关键，实际生产中一般采取提高熔剂活性、预热混合料等措施提高透气性；另外，该技术可采取降低漏风率、增加主抽风机能力等措施来增加与烧结抽风系统的匹配性。唐钢 360 m^2 烧结机料层厚度由每 600 mm 提升到 750 mm 后，吨烧结矿固体燃料消耗下降了 7.84 kg[8]。

(4) 热风烧结技术是将高温热废气或烧结机机尾、冷却机热废气等作为热源，用来加热烧结表层。该技术可使烧结料层上、下部热量以及温度的分布趋向均匀，克服表层热量不足的问题，同时可提高烧结矿的强度，改善烧结矿的还原性。采用热风烧结技术，固体燃料消耗可降低 10% 左右[6]。

(5) 燃料分加技术是将燃料分两次投加，即在烧结过程一、二次混料阶段分别投加燃料。该技术可使燃料外裹在混合料颗粒的表面，让燃料颗粒直接与空气接触，以优化燃料的燃烧条件。太钢在 660 m^2 烧结机上增设了燃料分加系统，每吨烧结矿的固体燃料消耗降低了 1.7 kg[9]。

2　末端综合治理优化技术

烧结烟气末端综合治理系统涉及除尘、脱硫、脱硝三项技术，因此，该系统一方面需综合考虑各项技术之间的匹配性。此外，该技术应优化与外部的物质与能量交换，在污染物去除过程中尽可能不产生或少产生副产物或其他二次污染物，且副产物易于处理，充分利用钢铁企业副产能源和余热，使能源消耗最小化，减污降碳协同增效。

2.1　脱硝技术优化

末端综合治理的难点主要在于脱硝，而选择性催化还原(selective catalytic reduction，SCR)技术在烧结烟气脱硝中具有很大的节能优势。目前 SCR 技术包括高温 SCR 工艺，其温度为 320～420 ℃；中温 SCR 工艺，温度约为 240～320 ℃；低温 SCR 工艺，温度约为 180～240 ℃。采用 SCR 技术，若反应温度过低，硫酸铵会在催化剂表面凝结堵塞催化剂的微孔，使催化剂的活性降低。因此，对于烧结烟气，采用中高温 SCR 工艺仍是主流技术。与低温催化剂相比，SCR 技术选用中高温催化剂时运行更加成熟稳定，后期更换费用相应会更低[10-11]。实际中，烧结烟气温度为 120～180 ℃，干法、半干法脱硫后烟气温度会下降至 80～100 ℃，湿法脱硫后烟气温度会下降至 40～60 ℃。由此可见，采用 SCR 技术脱硝需要对烟气进一步加热，这会导致能耗升高，运行成本增大[12-13]。因此，应充分利用高炉煤气作为燃料对烧结烟气进行加热，同时考虑配置烟气换热器(gas-gas heater，GGH)利用烟气中的余热；此外，需要重点关注 SCR 装置的布置方式、SCR 和 GGH 的设置。

2.1.1　SCR 装置的布置方式

(1) 高尘高硫布置方式。采用该方式，烟气先脱硝后除尘脱硫。其优点：一方面由于 SO_2 可以固氨，在一定程度上缓解了氨逃逸的问题；另一方面由于脱硫前烟气温度较高，减少了热能用量，降低了 GGH 的体积。但这种布置方式的缺点也非常明显，一方面由于颗粒物中含有铅、锌等碱性重金属，会使催化剂受到污染，降低催化剂的效能，同时颗粒物会对催化剂产生磨损和堵塞

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

催化剂通道；另一方面催化剂会促使烟气中的SO_2转化成SO_3，使催化剂中毒，部分未参与反应的NH_3与烟气中的SO_3生成硫酸铵、硫酸氢铵，腐蚀设备。因此脱硝反应器应选用耐硫酸氢铵的催化剂，并采用耙式吹灰或声波－耙式联合吹灰方式，以防止催化剂堵塞和中毒。目前在烧结烟气SCR脱硝装置中尚未见高尘高硫布置方式。

(2) 低尘高硫布置方式。采用该方式，烟气先除尘后脱硝脱硫。该方式可使烟气中的颗粒物大幅减少，防止污染催化剂及磨损和堵塞反应器，但烟气中SO_3与NH_3的反应依然存在。低尘高硫布置方式主要包括静电除尘器+GGH+加热炉(可选)+SCR脱硝工艺+半干法脱硫+袋式除尘器工艺、静电除尘器+GGH+加热炉(可选)+SCR脱硝+烟气脱硫换热器(MGGH/WGGH)(可选)+湿法脱硫+湿式电除尘器工艺[14]。

(3) 低尘低硫布置方式。采用该方式，烟气先除尘脱硫后脱硝。这种布置方式应注意协同控制除尘和脱硫系统的运行参数，有效去除颗粒物和SO_2，保证脱硝反应器的正常运行。由于脱硫后烟气温度较低，该布置方式需要消耗更多的热能才能升温至脱硝反应温度，相应建造和运行费用增大。低尘低硫布置方式主要包括静电除尘器+半干法脱硫+布袋除尘器+GGH+加热炉+SCR脱硝工艺、静电除尘器+MGGH/WGGH(可选)+湿法脱硫+湿式电除尘器+GGH+加热炉+SCR脱硝工艺[15-16]。

2.1.2 SCR和GGH的设置

为了充分利用烟气的余热，减少能耗，采用SCR工艺对烧结烟气脱硝时，建议采用SCR+GGH，并考虑如下情况[12]：

(1) 对于湿法脱硫+SCR脱硝超低排放技术路线，考虑设置MGGH/WGGH提升湿法脱硫后的净烟气温度，以避免SCR+GGH冷端堵灰和腐蚀问题。

(2) 对于SCR脱硝+湿法脱硫超低排放技术路线，考虑硫酸氢铵沉积的问题，根据烟气SO_2质量浓度确定SCR+GGH冷端是否需要采用搪瓷换热元件及配置在线高压水洗装置。

(3) 对于半干法和干法脱硫+SCR脱硝超低排放技术路线，SCR+GGH的运行环境较好，不存在防腐和硫酸氢铵沉积问题。

2.2 除尘技术优化

(1) 为控制颗粒物排放质量浓度不大于10 mg/m^3，烧结机头应不少于4个电场配备高频电源或脉冲电源，烟气流速不大于0.75 m/s，比集尘面积不低于115 m^2/(m^3·s^{-1})[17]。对于活性炭干法脱硫工艺，前置静电除尘器的效率高，可以避免烟气中过多的颗粒物堵塞活性炭而导致其活性减小[18]；对于湿法脱硫工艺，前置静电除尘器的效率高，可以减小对后置SCR脱硝工艺的影响。

(2) 采用干法、半干法脱硫工艺时，脱硫后的除尘技术宜采用袋式除尘技术。对于袋式除尘器，若控制颗粒物排放质量浓度不大于10 mg/m^3，过滤风速宜不大于0.8 m/min；但对于干法、半干法脱硫后的袋式除尘器，需要进一步确定适宜的过滤风速。

(3) 采用湿法脱硫工艺时，脱硫后宜采用湿式电除尘技术。为控制颗粒物排放质量浓度不大于10 mg/m^3，湿式电除尘器的入口质量浓度宜不大于50 mg/m^3[19]。

3 超低排放技术路线分析

3.1 基于干法脱硫的超低排放技术路线

基于干法脱硫的超低排放技术路线为静电除尘器+活性炭脱硫脱硝工艺，其中活性炭脱硫脱硝为双塔串联或单塔两段式工艺，吸附塔采用逆流或错流技术，工艺流程如图1所示[20]。由图1可知：烟气通过静电除尘器除尘后进入脱硫脱硝吸附塔，进入吸附塔后烟气温度不得高于150 ℃，宜控制在120～140 ℃，脱硫脱硝后烟气经烟囱排放；饱和的活性炭从吸附塔排出送入解析塔，解析后的活性炭经冷却筛分后输送回吸附塔被循环使用；解析后的高质量浓度SO_2气体送至制酸系统制取H_2SO_4，筛下炭粉可送往高炉或烧结作为燃料使用，活性炭损耗采用输送系统进行补给。宝钢、首钢迁安公司、新兴铸管、晋南钢铁、日照钢铁、安阳钢铁、纵横钢铁、太原钢铁、德龙钢铁、江苏永钢、河钢唐钢和邯钢等采用了此工艺。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

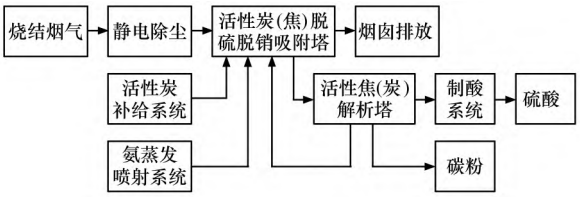


图 1　活性炭干法脱硫超低排放工艺流程

Fig. 1　Dry desulfurization technology process by activated carbon (coke) for ultra-low emission

该工艺要注意静电除尘技术与活性炭干法技术之间的匹配性。实际中应不少于 4 个电场配置高效静电除尘器，确保除尘效率，避免粉尘对活性炭工艺的影响，并且入口烟气颗粒物质量浓度宜低于 50 mg/m^3。

活性炭干法可以协同处理烟气中的 SO_2、NO_x、二噁英、重金属、汞等多种污染物。该技术无废渣排放，烟气无须再加热，副产物可以资源化利用。但由于活性炭工艺对系统设计、设备配置和运行管理的要求比其他工艺更加严格，需要有较高的运行管理水平。同时，为实现 SO_2 的资源化利用，需配置制酸系统和处理制酸过程产生的废水[10]。

3.2　基于半干法脱硫的超低排放技术路线

依据 SCR 脱硝装置的布置方式，基于半干法脱硫的超低排放技术路线可以采用静电除尘器 + GGH + 加热炉(可选) + SCR 脱硝工艺 + 半干法脱硫 + 布袋除尘器工艺，也可以采用静电除尘器 + 半干法脱硫 + 布袋除尘器 + GGH + 加热炉(可选) + SCR 脱硝工艺。采用后置 SCR 脱硝的循环流化床法(CFB)是目前比较主流和成熟的超低排放技术路线。宝钢、首钢长治公司、首钢京唐公司、建龙钢铁、日照钢铁、南京钢铁、山钢莱芜公司、中新钢铁等采用此工艺[16-20]。以中温 SCR 工艺为例，烧结烟气通过静电除尘器除尘后经增压风机被送至 CFB 吸收塔脱硫，再经布袋除尘后其出口温度约为 90 ℃；烟气经 GGH 与脱硝净烟气换热升温至约 250 ℃后进入脱硝反应器入口烟道，与加热炉的高温烟气混合升温至脱硝反应所需温度 280 ℃，经 SCR 反应器脱硝；脱硝后的净烟气由出口烟道送至 GGH，与原烟气换热降温，最后被脱硝引风机引入烟囱排放，其工艺流程如图 2 所示。

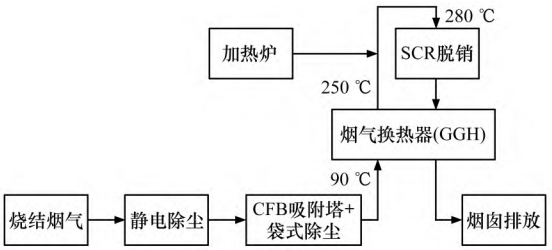


图 2　循环流化床半干法脱硫超低排放工艺流程

Fig. 2　Semi-dry desulfurization technology process by circulating fluidized bed for ultra-low emission

循环流化床半干法在运行过程中对工况的适应性较好。对于一般烟气脱硫，为控制 SO_2 质量浓度达到超低排放要求，烟气入口 SO_2 质量浓度一般宜不大于 3 000 mg/m^3；由于湿度大，烧结烟气非常适合循环流化床半干法脱硫，即使烟气入口 SO_2 质量浓度达到 4 500 mg/m^3，也能达到超低排放要求。采用循环流化床半干法脱硫后的袋式除尘器，若颗粒物达到超低排放要求，其过滤风速宜不大于 0.65 m/min。

循环流化床半干法对二噁英、重金属、氯化氢等有一定的脱除效果。该技术不产生废水，且脱硫剂(消石灰)的循环利用率高；吸收塔无须防腐，后续设备无堵塞和腐蚀风险；系统简单，易于运行维护，占地面积小，布置灵活。但脱硝时烟气须再加热，副产物灰渣以 $CaSO_3$ 成分为主，应用价值有限[5]。

3.3　基于湿法脱硫的超低排放技术路线

依据 SCR 脱硝装置的布置方式，基于湿法脱硫的超低排放技术路线可以采用两种：① 静电除尘器 + MGGH/WGGH(可选) + 湿法脱硫 + 湿式电除尘器 + GGH + 加热炉(可选) + SCR 脱硝工艺，该工艺已被山西建龙实业公司、常州东方特钢公司、丹阳龙江钢铁等采用；② 静电除尘器 + GGH + 加热炉(可选) + SCR 脱硝 + MGGH/WGGH(可选) + 湿法脱硫 + 湿式电除尘器工艺，该工艺已被津西钢铁、西王金属科技公司、河北兴华钢铁等采用。以石灰石 - 石膏湿法脱硫 + 后置中温 SCR 工艺为例，烟气先经过静电除尘器除尘，出口温度约为 140 ℃；经 MGGH/WGGH 降温后烟气进入石灰石/石灰 - 石膏脱硫系统，出口温度约为 50 ℃；烟气经 MGGH/WGGH 升温至约 90 ℃，再被增压

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

风机送至SCR+GGH预热(约为250 ℃)，经加热炉升温至SCR脱硝所需温度(280 ℃)；脱硝后的净烟气经SCR+GGH与原烟气换热降温后排放[13]。具体工艺流程如图3所示。

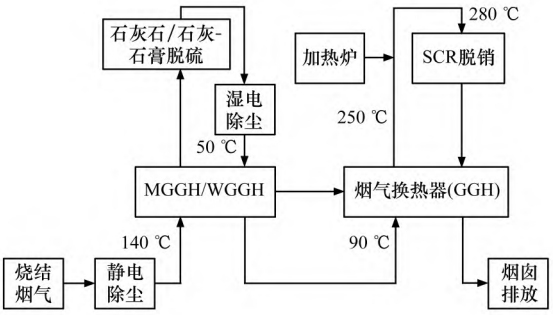


图3 石灰石/石灰－石膏湿法脱硫超低排放工艺流程

Fig. 3 Wet desulfurization technology process by limestone/lime-gypsum for ultra-low emission

湿法脱硫工艺适宜SO_2质量浓度高的烟气。为控制SO_2质量浓度达到超低排放要求，对于石灰石/石灰－石膏法，烟气入口SO_2质量浓度一般宜不大于10 000 mg/m^3。石灰石/石灰－石膏法脱硫技术成熟度高，可根据入口烟气条件和排放要求，通过改变物理传质系数或化学吸收效率等调节脱硫效率，使其运行稳定；此外，吸收剂(石灰石/石灰)的资源丰富，并且价格低廉。但该工艺在脱硝时需对烟气进行再加热，也需要处理脱硫废水，并且脱硫石膏资源的综合利用也存在一定问题。

4 结 语

(1) 烧结烟气超低排放是一个系统工程，需要综合考虑技术、运维和管理等多个方面，通过全过程控制技术、健全的运行维护机制以及良好的管理水平等来实现。

(2) 烧结烟气超低排放技术路线选择应充分考虑源头削减、过程控制以及末端综合治理全过程，其中源头削减是核心，过程控制是关键。通过原(燃)料、设备、工艺操作以及适宜的末端治理技术的优化整合，降低工序能耗和污染物排放，实现减污降碳、协同增效。

(3) 在烧结机进行定期检修时，应同时对除尘、脱硫和脱硝系统进行检查和维护，确保治理系统与烧结机同步运行；通过制定相应操作规程或技术管理规范，开展专业技能培训，并采取强化运行监管等手段，同步提升超低排放的管理和应用水平。

参考文献:

[1] 樊响,邓志鹏. 超低排放条件下的烧结烟气脱硫脱硝技术探讨[J]. 山西冶金,2020,186(4):141－142.
FAN Xiang,DENG Zhipeng. Discussion on sintering flue gas desulfurization and denitrification technology under ultra-low emission conditions [J]. Shanxi Metallurgy,2020,186(4):141－142.

[2] 于勇,朱廷钰,刘霄龙. 中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展[J]. 钢铁,2019,54(9):1－11.
YU Yong,ZHU Tingyu,LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China [J]. Iron and Steel,2019,54(9):1－11.

[3] 周茂军,张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术集成与实践[J]. 钢铁,2020,55(2):144－151.
ZHOU Maojun,ZHANG Daihua. Technology integration and practice of ultra-low emission of sintering flue gas in Baosteeel [J]. Iron and Steel,2020,55(2):144－151.

[4] 赵军凯,侯健,姜林. 邯钢435 m^{2}烧结机漏风治理与节能[J]. 冶金能源,2020,39(3):43－47.
ZHAO Junkai,HOU Jian,JIANG Lin. Air leakage control and energy saving of 435 m^2 sintering machine of Hansteel [J]. Energy for Metallurgical industry,2020,39(3):43－47.

[5] 刘文权,吴记全. 标准化引领烧结球团转型升级[J]. 冶金经济与管理,2017(5):39－42.
LIU Wenquan,WU Jiquan. Standardization leads sinter and pellet to transform and upgrade [J]. Metallurgical Economy and Management,2017(5):39－42.

[6] 董辉,王爱华,冯军胜,等. 烧结过程余热资源回收利用技术进步与展望[J]. 钢铁,2014,49(9):1－8.
DONG Hui, WANG Aihua, FENG Junsheng, et al. Progress and prospect in sintering waste heat resource recovery and utilization technology [J]. Iron and Steel,2014,49(9):1－8.

[7] 熊爱臣,刘武杨,吴丹伟,等. 蒸汽预热混合料技术在柳钢2#360 m^{2}烧结机的运用[J]. 湖南有色金属,2019,35(1):36－37.
XIONG Aichen, LIU Wuyang, WU Danwei, et al.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Application of steam preheating sinter mixture technology on 2# 360 m^2 sintering machine in Liuzhou iron [J]. Hunan Nonferrous Metals,2019,35(1):36 – 37.

[8] 郝建海. 烧结机栏板加高升级改造及厚料层烧结工艺的生产实践 [J]. 河南冶金,2020,28(4):16 – 17.
HAO Jianhai. Production practice of sintering machine bar plate upgrading and thick layer sintering process [J]. Henan Metallurgy,2020,28(4):16 – 17.

[9] 李强. 烧结细粒燃料分加技术研究 [J]. 烧结球团,2012,37(2):9 – 12.
LI Qian. Study on separate adding technology of fine grained fuels in sintering process [J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(2):9 – 12.

[10] 杨柳. 钢铁行业烟气超低排放技术分析 [J]. 冶金设备,2019,252(1):121 – 123.
YANG Liu. Analysis on ultra-low emission technology of flue gas in steel industry [J]. Metallurgical Equipment,2019,252(1):121 – 123.

[11] 欧盟共同体联合研究中心. 钢铁行业污染综合防治最佳可行技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2014.
European Community Joint Research Centre. Best available techniques reference document on the production of iron and steel [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

[12] 谢慧. 低温 SCR 在湿法脱硫后烟气脱硝中的应用 [J]. 化工管理,2019(4):95 – 98.
XIE hui. Application of low temperature SCR in flue gas denitrification after wet desulfurization [J]. Chemical Management,2019(4):95 – 98.

[13] 何庆文,邓文翔,张玲玲,等. 烧结烟气超低排放技术应用实践 [J]. 河北冶金,2020,295(7):70 – 73.
HE Qingwen,DENG Wenxiang,ZHANG Lingling,et al. Application practice of ultra low emisssion technology of sintering flue gas [J]. Hebei Metallurgy,2020,295(7):70 – 73.

[14] 周轶宗,梁世伟,沈凯. 钢铁烧结烟气大气污染综合防治技术路线 [C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷). 南京:中国环境科学学会,2020:1268 – 1273.
ZHOU Yizong, LIANG Shiwei, SHEN Kai. Technical route of comprehensive prevention and control of air pollution from steel sintering flue gas [C]//2020 Proceedings of the Annual Conference on Science and Technology of Chinese Society for Environmental Sciences(Volume I). Nanjing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2020:1268 – 1273.

[15] 王天义,穆怀明,王寅生,等. 关于钢铁企业烧结 – 焦化烟气超低排放情况的调研报告 [J]. 中国冶金,2019,29(7):79 – 84.
WANG Tianyi, MU Huaiming, WANG Yinsheng, et al. Investigation report on ultra-low emission of sintering and coking flue gas in iron and steel enterprises [J]. China Metallurgy,2019,29(7):79 – 84.

[16] 苗慧源,隋孝利,吴迪,等. 河钢承钢烧结烟气治理现状及超低排放改造 [J]. 河北冶金,2019(S1):141 – 145.
MIAO Huiyuan,SUI Xiaoli,WU Di,et al. Current status of sintering flue gas treatment and prospect of utra low emission reform in HBIS Chengsteel [J]. Hebei Metallurgy,2019(S1):141 – 145.

[17] 刘晨. 不同用途湿式静电除尘器 WESP 的选型探讨 [C]//第 18 届中国电除尘学术会议论文集. 南京:中国环境保护产业协会,2019:390 – 393.
LIU chen. Discussion on WESP selection of wet electrostatic precipitator with different uses [C]//Proceedings of the 18th China Academic Conference on Electrostatic Precipitation. Nanjing. China Association of Environmental Protection Industry,2019:390 – 393.

[18] 谢炜,王利斌,盛明,等. 活性焦在钢铁行业的应用及趋势分析 [J]. 煤质技术,2021,36(1):10 – 19.
XIE Wei,WANG Libin,SHENG Ming,et al. Application status and trend analysis of activated coke in iron and steel industry [J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(1):10 – 19.

[19] 李智超,邓崔翔,东波,等. 烧结烟气脱硫脱硝超低排放治理工艺综述 [J]. 山东化工,2020,49(2):239 – 241.
LI Zhichao,DENG Cuixiang,DONG Bo,et al. Summary of ultra-low emission control technology for sintering flue gas desulfurization and denitrification [J]. Shandong Chemical Industry,2020,49(2):239 – 241.

[20] 薛玉业,綦云. 烧结烟气湿法脱硫配套烟气脱硝技术 [J]. 煤中外能源,2020,25(7):79 – 84.
XUE Yuye,QI Yun. Flue gas denitrification technology for wet desulfurization of sintering flue gas [J]. Sino-Global Energy,2020,25(7):79 – 84.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net