

烧结烟气 CO 过程减排生产实践

李兆甲¹, 龙红明^{2,3}, 翟玉兵¹, 刘占平¹, 丁 龙², 裴元东³

(1. 河北新金钢铁有限公司 烧结厂, 河北 邯郸 056300; 2. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032;
3. 建龙钢铁控股有限公司, 北京 100070)

摘要: CO 是典型的大气污染物之一, 其对人体和生态环境存在较大危害。随着对 CO 污染物管控政策的相继出台和“双碳”理念的提出, 国家对 CO 排放的治理愈发深入和严格。针对燃料不完全燃烧而导致烧结烟气中 CO 的产生问题, 本文主要从降低烧结过程燃料消耗和提高烧结过程氧化氛围两个方面对某钢铁厂烧结烟气开展工业试验。前者采用了改善燃料粒度、优化燃料结构、厚料层烧结、燃料分加、合理配矿、烟气循环和提高混合料温度等措施; 后者采用了富氧点火、料面喷吹蒸汽、提高料层透气性和降低漏风率等措施。通过各项措施的实施, 钢铁厂烧结固体燃料由 49 kg/t 逐步降低到 44 kg/t, 烧结烟气中 CO 质量浓度由 6 000 mg/m³ 降低到 4 000 mg/m³ 以下。

关键词: 烧结烟气; CO 减排; 过程减排; 燃料消耗; 氧化氛围

中图分类号: TF325. 1; TF4

文献标志码: A

文章编号: 1000 - 8764(2025) 05 - 0117 - 06

doi: 10. 13403/j. sjqt. 2025. 05. 086

Production practice of CO process control in sintering flue gas

LI Zhaojia¹, LONG Hongming^{2,3}, ZHAI Yubing¹, LIU Zhanping¹, DING Long², PEI Yuandong³

(1. Sinter plant, Hebei Xinjin Steel Co., Ltd., Handan 056300, Hebei, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China; 3. Jianlong Steel Holding Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: CO is one of the typical air pollutants, which is harmful to the human body and the ecological environment. With the successive introduction of CO pollutant control policies and the proposal of the concept of dual carbon, the country's governance of CO emissions has become more and more in-depth and strict. Aiming at the problem of CO generation in sintered flue gas caused by incomplete combustion of fuel, this paper mainly conducts industrial tests on the sintered flue gas of a steel plant from two aspects: reducing fuel consumption in the sintering process and improving the oxidizing atmosphere of the sintering process. The former adopts such measures as improving fuel particle size, optimizing fuel structure, thick material layer sintering, fuel lamination addition, reasonable ore distribution, flue gas circulation and increasing mixture temperature. The latter adopts oxygen-rich ignition, steam spraying on the material surface, improving the air permeability of the material layer and reducing the air leakage rate. Through the implementation of various measures, the burning consumption of sintered solids in steel plants has been gradually reduced from 49 kg/t to 44 kg/t, and the CO concentration in sintered flue gas has been reduced from 6 000 mg/m³ to less than 4 000 mg/m³.

Key words: sintered flue gas; CO emission reduction; process emission reduction; fuel consumption; oxidizing atmosphere

CO 是常见的大气污染物之一, 会对人体和生态环境产生危害。它能与人体血红蛋白结合, 引

起头痛、头晕、恶心等症状, 严重时会导致昏迷和死亡。CO 可以稳定存在于环境中, 参与光化学

收稿日期: 2024 - 11 - 25; 修回日期: 2025 - 05 - 24

基金项目: 安徽省高校优秀科研创新团队项目(2023AH010016)

作者简介: 李兆甲(1990—), 男, 工程师, 从事烧结工艺及配矿研究。

通信作者: 丁 龙(1996—), 男, 博士, 从事烧结烟气污染物减排研究。

烟雾的形成,在大气中与其他污染物发生相互作用时还会产生臭氧、过氧乙酰硝酸酯等有害化学物质,影响空气质量。大气中的 CO 主要来源于工业烟气,其主要产生原因是化石燃料不完全燃烧。铁矿烧结是钢铁生产必不可少的工序,其每年产生 CO 高达 5 000 ~ 6 000 万吨^[1],对于钢铁企业而言,每年的排污税 70% 都是因为 CO 排放。随着对 CO 污染物管控政策的相继出台和双碳理念的持续推进,各行各业已将降低碳排放设为政治任务。裴元东等^[2]通过对烧结过程 CO 生成和分布特点的分析,提出在烧结当前条件下降低 CO 排放需要从源头削减和过程控制上着手。李乾坤等^[3]在烧结机上进行工业试验,通过对烧结过程的强化控制,550 m²烧结机 CO 排放量降低了 782 mg/Nm³。廖继勇等^[4-6]通过对烧结烟气 CO 的生成机理及排放规律,源头及过程控制技术,末端治理技术的研究,系统的阐述了降低烧结烟气 CO 的可行性方案。

针对某烧结厂烟气中 CO 质量浓度处于 5 000 ~ 6 000 mg/m³,相较先进钢铁企业烧结厂 CO 质量浓度为 2 000 mg/m³ 左右的差距较大的问题。本文采用了改善燃料粒度、优化燃料结构、厚料层烧结、燃料分加、合理配矿、烟气循环和提高混合料温度等措施从降低烧结过程燃料消耗以及采用了富氧点火、料面喷吹蒸汽、提高料层透气性和降低漏风率等措施从提高烧结过程氧化氛围两方面对其进行了治理,以期为同行提供借鉴与参考。

1 降低烧结过程燃料消耗措施

1.1 降低内部热量消耗

1.1.1 改善燃料粒度

一般认为燃料粒度过粗时,烧结过程中燃烧带变宽,从而使烧结料层透气性恶化。同时大颗粒燃料的周围还原性气氛较强,空气不够用,而没有燃料的地方,空气又得不到有效利用,导致燃料出现不完全燃烧,增加 CO 生成。但当燃料粒度过细时(特别是 < 0.5 mm 燃料以及各种含碳除尘灰),烧结过程中燃料燃烧快,热量快速释放,不能持续为烧结过程提供所需热量,使得烧结过程中液相量生成不足,从烧结机尾断面观察判断

为燃料偏小,因此需要配加更多的燃料进行烧结。燃料的增加也使得在燃烧过程中产生了更多的 CO。前期对固体燃料粒度的要求是 ≤ 3 mm 占比要达到 70%,烧结固体燃料消耗基本在 50 kg/t 左右,为降低固体燃料消耗初步采取的措施为提高固体燃料 ≤ 3 mm 粒级占比到 75%,但效果不明显。通过对燃料粒度的进一步研究^[7-8],将燃料粒度 ≤ 1 mm 质量分数要求由原来的 50% 降低至 30% 以下,燃料粒度改善后烧结固体燃料消耗降低 1 kg/t。

1.1.2 优化燃料结构

烧结厂最初的燃料结构为 70% 无烟煤 + 30% 高炉返焦粉,此结构下燃料价格较为合适但燃料消耗整体偏高。为找到更为合理的燃料结构,在文献 [9] 研究的基础上,进行了为期一个月的工业试验,在试验过程中,烧结原料结构整体保持不变(褐铁矿、赤铁矿和磁铁矿配比固定),烧结矿二元碱度控制为 2.0 倍,具体结果如表 1 所示。由表 1 可知,结构③燃料消耗最低,但结构②性价比最高。其原理为焦粉的燃烧速度和反应速度比无烟煤慢,接近空气传热速度,碳燃烧化学热和空气传输物理热接近同步,向下传递叠加而产生较高烧结温度和较薄燃烧带,改善烧结固结强度,提高成品率,降低能耗。但焦粉价格远高于无烟煤,最高时两者差价能达到 150 元/t,故此一般情况下选择结构②为燃料结构。燃料结构调整后烧结固体燃料消耗降低 1.5 kg/t。

表 1 无烟煤和焦粉试验数据

Table 1 Anthracite and coke powder's experimental data

燃料结构	价格/(元·t ⁻¹)				燃料消耗/(kg·t ⁻¹)
	无烟煤	外购焦粉	返焦粉	综合燃料	
基准	980	1 055	1 000	986.0	49.02
①	980	1 055	1 000	1 001.0	49.41
②	980	1 055	1 000	1 016.0	48.90
③	980	1 055	1 000	1 038.5	49.68

1.1.3 合理配矿与厚料层烧结

经过长期生产实践,在烧结原料中适宜搭配一定配比的磁铁矿,比例应不低于铁料配比的 20%,磁铁矿在烧结过程中氧化放热,在烧结时不需要太多的液相即可成型,同时磁铁矿的软化

和熔化温度较低,能在较低温度和较少固体燃料消耗下与脉石成分作用形成低熔点化合物。但磁铁矿的黏结性差,湿容量小,不利于成球,过多的配加磁铁矿在目前的生产条件下严重影响烧结矿产量和烧结矿成本。

同时,由于厚料层烧结因其自动蓄热原理,可以有效降低燃料消耗^[10-11]。烧结厂利用大修机会,对烧结台车栏板进行加高,从800 mm提高到900 mm,将点火炉也抬高100 mm,料层厚度具备了提高的条件。根据不同原料结构,最高布到950 mm。提高烧结料层100 mm大约可降低烧结固体燃料消耗1 kg/t。

1.1.4 燃料分加

料层厚度提高后,加剧了燃料上下分布不匀,上下料层热量偏差大的情况。为保证烧结矿质量普遍采取高水高碳的生产模式,无形中增加了燃料的消耗。为改善这一现状,采取了燃料分加生产工艺,在进入二混滚筒前再次配加燃料。目前配料室配无烟煤30%,在二混前二次配焦粉70%有效解决了燃料在烧结料层分布不匀的问题,稳定了烧结生产过程,降低了燃料消耗。当燃料全部在配料室添加时,燃料和矿粉混匀成球,在主机布料过程中受布料偏析的影响会造成下部料层燃料多而上部燃料不足;加厚了中下部料层的高温带,降低烧结料层高温透气性从而加剧中下部燃料不完全燃烧反应,升高了烟气中CO的产生量。二次配加燃料改善了燃料分布状态,料层上部燃料增多,料层下部燃料减少。并且在初步成球的混合料中二次配加燃料使得混合料小球外部裹上燃料,增加了燃料与氧气的接触面积,燃烧更加充分,从而达到降低燃料消耗,降低CO产生的目的^[12-13]。对燃料分加前后生产情况进行汇总统计(取5 d平均值),统计数据如表2所示。由表2可知,燃料分加后,烧结固体燃料消耗降低

表2 燃料分加试验前后数据对比

Table 2 Comparison of data before and after the split addition of fuel

项目	燃料消耗/(kg·t ⁻¹)	FeO/%	转鼓强度/%
试验前	45.91	8.97	75.89
试验后	44.04	8.77	76.15
对比	-1.87	-0.20	0.26

1.87 kg/t, 烧结矿的转鼓强度提高0.26%。

1.2 增加外部热量补充

1.2.1 烟气循环

烟气循环在降低固体燃料消耗和降低CO排放方面作用很大^[14]。2014年,烧结厂利用机尾高温段烟气和环冷高温烟气循环到料面进行热风烧结。为烟气减排,2018年改造为烟气内循环,烟气循环比例达到30%左右。2023年对原有烟气循环进行升级改造,在升级改造过程中,为了能最大限度降低烧结烟气中CO的排放,对各风箱中CO含量进行了烟气检测,数据如表3所示。参考国内外不同烟气循环工艺^[15]及现场实际情况,最终确定0#~7#和20#~24#风箱作为烟气循环风箱(烧结风箱编号为0#~25#),烟气循环比例达到40%。运行平稳后,烧结固体燃料消耗降低2 kg/t,烧结烟气CO质量浓度从6 000 mg/m³降低到了4 500 mg/m³。

1.2.2 提高混合料温

提高混合料温度能够有效提高烧结矿质量,降低烧结矿固体燃料消耗^[16],一般要求料温超过烧结料露点10℃以上,以减少过湿带的厚度,减少因水分蒸发所消耗的热量。平时,烧结厂混合料温度基本达到70℃左右,但在冬季生产时因皮带输送过程中热量损失大,导致混合料温度保持在60℃左右,严重制约冬季生产。为解决这一问题,依托于环保要求的输送带密闭措施,在密闭的输送带上通入蒸汽管道对混合料进行保温,降

表3 各风箱烟气CO质量浓度

Table 3 Flue gas CO mass concentration in each windbox

mg/m³

编号	0#	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#
CO质量浓度	31.2	701.2	5 281.2	5 581.2	5 121.2	4 208.8	5 658.8	5 407.5	5 423.8	5 332.5	4 678.8	5 256.2	4 117.5
编号	13#	14#	15#	16#	17#	18#	19#	20#	21#	22#	23#	24#	25#
CO质量浓度	5 382.5	5 147.3	4 312.5	4 671.2	1 956.2	2 616.2	3 940.0	2 235.0	1 796.2	1 642.5	748.8	283.8	87.5

低混合料在输送过程中的热量损失,使得冬季生产混合料温度基本稳定在 65 ℃ 以上。此措施的实施使得冬季生产固体燃料消耗比未采取此措施前固体燃料消耗降低了 1 kg/t。

2 提高烧结过程氧化氛围

2.1 富氧点火

烧结富氧点火对采用高炉煤气、转炉煤气或者二者的混合气体等低热值煤气点火的烧结可起到降低煤气消耗,降低固体燃料消耗以及提高烧结矿质量的作用^[17-19]。烧结厂采用高炉煤气和转炉煤气的混合气体,煤气消耗在 40 m³/t,表层烧结矿强度偏低。为提高烧结料面点火强度,煤气使用量略有富余,导致不完全燃烧的煤气随主抽风机抽入烟气中,造成烟气中 CO 含量升高。为解决这一问题,在助燃风中通入氧气,氧气通入量最大可达到 600 m³/h,助燃风含氧量可提升至 25%,富氧点火后煤气耗量基本上降到了 35 m³/t,固体燃料消耗也降低了 0.5 kg/t,烟气中 CO 质量浓度降低 200~300 mg/m³。

2.2 料面蒸汽喷吹

烧结料面喷吹蒸汽作为一项新技术,水蒸气可以加快固体燃料之间的传热,H₂O 分解成的 H⁺ 和 OH⁻ 有利于固体燃料的完全燃烧,降低烟气中 CO 含量^[20-21]。烧结厂通过外出考察对标,自行建造了料面蒸汽喷吹系统,在 5[#]~15[#] 风箱位置料面上部铺设蒸汽管道进行蒸汽喷吹。料面实施蒸汽喷吹后,烟气中 CO 质量浓度降低 300 mg/m³。

2.3 提高料层透气性

提高料层透气性意味着可以使更多的空气进入烧结料层参与烧结过程,使更多的氧参与到燃烧反应过程中,可减少燃料的不完全燃烧^[22]。随着料层厚度的不断提高,对料层透气性的要求也越来越高。为提高料层透气性,把原有的板式松料器升级为阶梯式松料器,松料器分上下两层,下层松料器距离台车算条 200 mm,距离两侧栏板 300 mm,两排钢管纵向间距为 250 mm,下层 11 根圆管,上层 10 根圆管,形成梯形。当料层厚度达到 1 000 mm 后可再增加一层松料器,继续改善料层透气性。

点火器下部料层(原始料层)在高负压生产模式下产生了不均匀收缩,负压越高收缩越大,上部料把下部料压实,降低了料层透气性。1985 年,武钢就进行了低负压点火工业试验^[23],随后各大钢厂陆续开展了低负压点火试验^[24-25],目前已成为成熟的技术。早期投产的烧结机存在设备老旧,串风严重等问题,无法实现低负压点火。为解决这一问题,在 1[#]~4[#] 风箱隔板上安装中部密封板,确保风箱不串风。对 1[#]~3[#] 风箱改造成料风分离式风箱,能通过风箱风门自由调整风箱负压。烧结厂 1[#]~3[#] 风箱负压基本能降低到 6~7 kPa,实现了低负压点火,确保了烧结原始料层的透气性。且低负压点火也降低了煤气单耗,烟气中 CO 质量浓度能降低 500~600 mg/m³。

2.4 降低漏风率

烧结系统漏风问题一直是烧结工作者致力解决的问题之一,也对烧结系统漏风的原因及治理技术进行了探究^[26-27]。烧结厂为降低烧结系统漏风率采取了一系列措施,主机滑道改为石墨密封,大烟道内衬重新防腐喷涂,建立机头电除尘放灰制度,区域负责人每班对从主机到湿电这一系统进行点检等。小问题及时补焊或者封堵,大问题检修时彻底解决。降低漏风率能有效提升烧结的有效风量,改善烧结过程氧化氛围,提升固体燃料的燃烧效率,降低烟气中 CO 的质量浓度。

3 效果验证

通过以上各项改造措施,目前烧结固体燃料消耗降低 4~5 kg/t,降低到 44 kg/t,夏季生产可降至 40~41 kg/t,烧结烟气中 CO 质量浓度基本能稳定在 4 000 mg/m³ 以下。2024 年 5 月 16~30 日对烧结厂烟气 CO 质量浓度进行了统计,结果如表 4 所示。

4 结 论

降低固体燃料消耗和提升烧结过程的氧化氛围是减少烧结烟气中因碳不完全燃烧而产生的 CO 的关键。钢铁厂可通过实施烟气循环、厚料层烧结、低负压点火、燃料分加及优化燃料粒度等主要相关措施,显著降低其排放质量浓度。文中所

表 4 改造后烟气 CO 质量浓度

Table 4 Flue gas CO mass concentration after the modification

mg/m³

日期	5 月 16 日	5 月 17 日	5 月 18 日	5 月 19 日	5 月 20 日	5 月 21 日	5 月 22 日	5 月 23 日
CO 质量浓度	3 888	3 779	3 932	3 713	3 962	3 759	3 946	3 968
日期	5 月 24 日	5 月 25 日	5 月 26 日	5 月 27 日	5 月 28 日	5 月 29 日	5 月 30 日	—
CO 质量浓度	3 832	3 814	3 954	3 813	3 974	3 775	3 876	—

述烧结厂通过综合应用这些技术, 固体燃料消耗从 49 kg/t 降低至 44 kg/t 左右, 并在夏季进一步降至 40 ~ 41 kg/t, 同时烟气中的 CO 质量浓度由 6 000 mg/m³ 成功降至 3 500 ~ 4 000 mg/m³。

参考文献:

- [1] 龙红明, 丁龙, 赵贺喜, 等. 典型钢铁生产流程烟气中 CO 减排研究进展 [J]. 钢铁, 2023, 58(8): 1-12.
LONG Hongming, DING Long, ZHAO Hexi, et al. Research progress of CO removal in flue gas of typical steel production process [J]. Iron & Steel, 2023, 58(8): 1-12.
- [2] 裴元东, 廖继勇, 张俊杰, 等. 铁矿粉烧结过程 CO 减排探讨 [J]. 烧结球团, 2019, 44(1): 69-73.
PEI Yuandong, LIAO Jiyong, ZHANG Junjie, et al. Discussion on CO emission reduction in iron ore fines sintering process [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(1): 69-73.
- [3] 李乾坤, 李国良, 殷国富, 等. 中天钢铁 550 m² 烧结机降低 CO 排放研究及实践 [J]. 烧结球团, 2019, 44(4): 70-73.
LI Qiankun, LI Guoliang, YIN Guofu, et al. Research and practice of reducing CO emission of Zenith Steel 550 m² sinter machine [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4): 70-73.
- [4] 廖继勇, 郑浩翔, 甘敏, 等. 烧结烟气 CO 的产生及治理途径: 生成机理及排放规律 [J]. 烧结球团, 2021, 46(2): 1-7.
LIAO Jiyong, ZHENG Haoxiang, GAN Min, et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas: Formation mechanism and emission law [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 1-7.
- [5] 廖继勇, 郑浩翔, 甘敏, 等. 烧结烟气 CO 的产生及治理途径: 源头及过程控制技术 [J]. 烧结球团, 2021, 46(2): 8-16.
LIAO Jiyong, ZHENG Haoxiang, GAN Min, et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas: Source and process control technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 8-16.
- [6] 廖继勇, 郑浩翔, 甘敏, 等. 烧结烟气 CO 的产生及治理途径: 末端治理技术 [J]. 烧结球团, 2021, 46(2): 17-23.
LIAO Jiyong, ZHENG Haoxiang, GAN Min, et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas: End treatment technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 17-23.
- [7] 冯二莲, 李楠, 姜涛. 现代烧结生产实用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
FENG Erlan, LI Nan, JIANG Tao. Practical technology of modern sintering production [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2022.
- [8] 王永红, 刘建波, 周俊兰等. 燃料粒度对烧结指标的影响研究 [J]. 烧结球团, 2018, 43(3): 37-42.
WANG Yonghong, LIU Jianbo, ZHOU Junlan, et al. Study on influence of particle size of fuels on sintering indexes [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(3): 37-42.
- [9] 邓联玉, 陈雪梅. 烧结过程中煤粉替代焦粉的实验研究 [J]. 涟钢科技与管理, 2015(2): 17-19.
DENG Lianyu, CHEN Xuemei. Experimental study on coal powder replacing coke powder in sintering process [J]. LYS Science-Technology & Management, 2015(2): 17-19.
- [10] 唐泽华, 王毅, 邓俊. 方大特钢 130 m² 烧结机厚料层烧结的生产实践 [J]. 冶金管理, 2021(23): 47-48.
TANG Zehua, WANG Yi, DENG Jun. Production practice of thick bed sintering in 130 m² sintering machine of Fangda Special Steel [J]. China Steel Focus, 2021(23): 47-48.
- [11] 张永平. 超厚料层烧结技术生产实践 [J]. 天津冶金, 2022(5): 18-20.
ZHANG Yongping. Production practice of sintering technology with ultra-thick material layer [J]. Tianjin Metallurgy, 2022(5): 18-20.
- [12] 吴跃文, 冯二莲. 太钢烧结采用燃料分加技术的改造 [J]. 烧结球团, 2004, 29(5): 32-36.

- WU Yuewen, FENG Erlan. Application of fuel divided addition technique in Taigang sintering plant [J]. Sintering and Pelletizing, 2004, 29(5): 32-36.
- [13] 李益慎. 燃料分加对烧结节能增产效果的综述 [J]. 武钢技术, 1993(9): 34-39.
- LI Yishen. Summary of the effect of fuel addition on sintering energy saving and production increase [J]. Wisco Technology, 1993(9): 34-39.
- [14] 贾秀凤, 喻波. 宁钢烧结烟气循环系统的节能减排效果 [J]. 烧结球团, 2015, 40(4): 51-54.
- JIA Xiufeng, YU Bo. Energy saving and emission reduction effect of Ningsteel sintering flue gas recirculation system [J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(4): 51-54.
- [15] 于恒, 王海风, 张春霞. 铁矿烧结烟气循环工艺优缺点分析 [J]. 烧结球团, 2014, 39(1): 51-55.
- YU Heng, WANG Haifeng, ZHANG Chunxia. Analysis on advantages and disadvantages of sintering waste gas recirculation process [J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(1): 51-55.
- [16] 李彦格, 孙汉勇. 邢钢 180 m²烧结机提高混合料温度的实践 [J]. 烧结球团, 2006, 31(3): 49-52.
- LI Yange, SUN Hanyong. Practice of increasing mixture temperature in Xinggang 180 m² sintering plant [J]. Sintering and Pelletizing, 2006, 31(3): 49-52.
- [17] 李怀林, 史郑斌. 烧结富氧点火生产实践 [J]. 烧结球团, 1999, 24(4): 46-47.
- LI Huailin, SHI Zhengbin. Production practice of sintering oxygen-enriched ignition [J]. Sintering and Pelletizing, 1999, 24(4): 46-47.
- [18] 张俊杰, 裴元东, 龙红明, 等. 中天钢铁烧结富氧点火研究与应用 [J]. 中国冶金, 2021, 31(8): 54-59.
- ZHANG Junjie, PEI Yuandong, LONG Hongming, et al. Research and application of sintering oxygen-enriched ignition in Zhongtian iron and steel [J]. China Metallurgy, 2021, 31(8): 54-59.
- [19] 刘前, 周浩宇, 裴元东, 等. 富氧条件对低热值燃气烧结点火的影响 [J]. 中国冶金, 2021, 31(7): 57-62.
- LIU Qian, ZHOU Haoyu, PEI Yuandong, et al. The influence of oxygen-enriched conditions on the ignition of low-calorific-value gas sintering [J]. China Metallurgy, 2021, 31(7): 57-62.
- [20] 裴元东, 史凤奎, 吴胜利, 等. 烧结料面喷洒蒸汽提高燃料燃烧效率研究 [J]. 烧结球团, 2016, 41(6): 16-20.
- PEI Yuandong, SHI Fengkui, WU Shengli, et al. Research on spraying steam on surface of sintering material bed to increase fuel combustion efficiency [J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(6): 16-20.
- [21] 赵改革, 邹凡球, 但家云, 等. 烧结料面喷洒蒸汽对烧结矿产质量及 CO 排放的影响 [J]. 矿业工程, 2024, 22(5): 62-67.
- ZHAO Gaige, ZOU Fanqiu, DAN Jiayun, et al. Effect of steam spraying on material surface on output and quality of sinter and CO emission [J]. Mining Engineering, 2024, 22(5): 62-67.
- [22] 张展雷, 吕娟珍. 提高烧结料层透气性的实践 [J]. 烧结球团, 2004, 29(4): 52-54.
- ZHANG Zhanlei, LÜ Juazhen. Practice of increasing the ventilation of sintering mixture [J]. Sintering and Pelletizing, 2004, 29(4): 52-54.
- [23] 周本华, 汪华斌. 低温低负压烧结点火试验 [J]. 烧结球团, 1986, 11(1): 48-52.
- ZHOU Benhua, WANG Huabin. Ignition test of low temperature and low negative pressure sintering [J]. Sintering and Pelletizing, 1986, 11(1): 48-52.
- [24] 桓庶宝, 肖学勇, 陈雪峰, 等. 攀钢烧结低负压点火技术 [J]. 烧结球团, 2002, 27(2): 57-59.
- HUAN Shubao, XIAO Xueyong, CHEN Xuefeng, et al. The low-negative-pressure ignition technology of sintering in panzhihua Iron and steel company [J]. Sintering and Pelletizing, 2002, 27(2): 57-59.
- [25] 冯二莲, 曹旭宾, 樊晓东, 等. 提高烧结机料层厚度生产实践 [J]. 今日制造与升级, 2021(3): 31-35.
- FENG Erlan, CAO Xubin, FAN Xiaodong, et al. Improvement of sinter layer thickness production practice [J]. Manufacture & Upgrading Today, 2021(3): 31-35.
- [26] 刘帅, 夏铁玉, 李政伟, 等. 360 m²烧结机系统漏风分析及改进 [J]. 鞍钢技术, 2014(2): 42-44.
- LIU Shuai, XIA Tieyu, LI Zhengwei, et al. Analysis and improvement of air leakage in the 360 m² sintering machine system [J]. Angang Technology, 2014(2): 42-44.
- [27] 周明顺, 田勇, 赵东明, 等. 铁矿烧结系统漏风治理技术及评估综述 [J]. 中国冶金, 2024, 34(1): 1-9.
- ZHOU Mingshun, TIAN Yong, ZHAO Dongming, et al. Overview of air leakage control technologies and evaluation for iron ore sintering systems [J]. China Metallurgy, 2024, 34(1): 1-9.