基于烟气循环烧结的 CO 过程控制优化工艺与技术

陈 宇[1]，刘 臣[1]，王兆才[1]，李亚飞[2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032）

摘要：烟气循环烧结工艺具备节能减排功效，符合绿色低碳转型高质量发展要求。受限于影响因素多，有些烟气循环烧结生产过程依然存在烧结矿产量降低的实际问题，同时烟气中 CO 排放情况值得关注。本文通过研究循环烟气的含氧量、温度、含水量等多因素共存而单因素变化对烧结指标及 CO 平均质量浓度的影响，获得适宜的工艺参数，并提出行之有效的烟气循环烧结工艺优化措施。研究结果表明：在高温、含水的状态下，对循环烟气进行全程富氧或中前部梯级富氧（21%~23%）有利于提升烧结矿产、质量与抑制 CO 生成，适宜的 O_2 体积分数应不低于 20%，同时适宜的烟气温度不宜高于 180~200 ℃，水分体积分数应低于 5%；当 O_2 体积分数由 17% 升至 21% 时，CO 平均质量浓度可降低 10%；针对宝山基地二烧结烟气循环工序，提出循环模式优化与烟气温度优化两项优化措施，精准调控循环烟气 O_2 体积分数约为 20%、烟气温度约 160 ℃、含水量约为 1%，从而实现烧结矿产能提升，突破烟气循环烧结技术瓶颈。

关键词：烧结烟气；循环烧结；烧结指标；CO 排放；工艺优化
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-8764(2024)06-0129-08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.099

CO process control optimization technology and technique based on gas circulation sintering

CHEN Yu[1], LIU Chen[1], WANG Zhaocai[1], LI Yafei[2]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;
2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China)

Abstract: The gas circulation sintering process has the effect of energy saving and emission reduction, and meets the requirements of green, low-carbon transformation and high-quality development. Due to many influencing factors, some gas circulation sintering production processes still have the actual problem of reduced sinter ore output. At the same time, the CO emission in the gas deserves attention. The coexistence of multiple factors such as oxygen content, temperature, moisture content of circulating gas and the influence of single factor change on sintering indicators and average CO concentration are researched, suitable process parameters are obtained, and effective measures are proposed to optimize the gas circulating sintering process. The results show that: under the condition of high temperature and moisture content of circulating gas, the whole process of oxygen enrichment or mid-front step oxygen enrichment (21%~23%) of the circulating gas is beneficial to improve the yield and quality of sinter and inhibit the generation of CO. The appropriate O_2 volume fraction should not be less than 20%, while the appropriate gas temperature should not be higher than 180~200 ℃, and the moisture volume fraction should be less than 5%; When the O_2 volume fraction increases from 17% to 21%, the average CO volume fraction can be reduced by 10%; For the second sintering gas circulation process in the Baoshan base, two optimization measures

收稿日期：2024-09-10；**修回日期**：2024-10-16
基金项目：湖南省科技创新计划资助项目（2020GK4055）；国家重点研发计划资助项目（2023YFC3707000）
作者简介：陈 宇（1984—），女，高级工程师，从事铁矿烧结节能减排环保工艺研究和工程设计工作。
通信作者：刘 臣（1989—），男，博士，高级工程师，从事铁矿烧结球团及熔融还原方面的研究工作。

are proposed: circulation mode optimization and gas temperature optimization. The circulating flue gas O_2 volume fraction, flue gas temperature and moisture content are accurately controlled to about 20%, 160 ℃ and 1%, respectively, so as to increase the sinter production capacity and break through the technical bottleneck of gas circulation sintering.

Key words: sintering flue gas; circulating sintering; sintering index; CO emission; process optimization

在“双碳”战略目标背景下，深入强化减污降碳协同治理与极致能效已成为钢铁工业高质量发展的内在要求与关键驱动力。在长流程炼铁工序中，铁矿烧结工艺存在固体燃料消耗多、气态污染物排放量大等问题，其绿色低碳转型升级已成为必然之路[1-2]。烟气循环烧结是选择性地将部分热烟气返回至烧结机料面，以多组分气体介质进行烧结的工艺，它不仅充分利用了废气的余热与潜热，而且可降低烧结废气排放量与处理成本。目前，针对该技术的基础研究较为丰富，且已得到钢铁行业充分认可并广泛推广应用[3-6]。2022年底，中国钢铁工业协会发布了钢铁行业极致能效技术清单，将“烧结废气余热循环利用工艺技术”列为烧结(球团)工序6项技术之一。2024年6月，河北省工业和信息化厅印发了《河北省2024年钢铁行业先进技术装备推荐目录》，将“铁矿烧结降碳减排耦合喷吹技术”列为23项技术之一，内含烧结烟气内循环、外循环技术。随着行业对烧结烟气污染物中CO治理的日益重视，烟气循环烧结正逐步成为CO过程控制的核心手段之一[7-9]。

宝钢股份宝山基地二烧结于2018年配置了烟气内循环系统，然而在实际运行过程中，由于内循环烟气具有含氧量低、烟气温度高、含水量高等独有特性，循环烟气对烧结过程与烧结矿产量影响较大，造成实际产量与预设产能有所差距。随着高配比烧结矿高炉生产以及相关降本增效等技术措施的推进，制约烟气循环烧结矿产量的难题需要有针对性地进行研究与攻克。

为克服烟气循环烧结工艺中烟气多属性特点(高温、低氧及含水)对烧结矿产、质量的负面影响[10-12]，本文基于烧结杯模拟试验，控制循环气体中O_2和H_2O体积分数、烟气温度等多因素共存以及单因素变化，探明这些因素对烧结产、质量指标与烟气污染物中CO排放浓度的影响规律，获取更切合实际工况的工艺参数，并提出对现有工艺不足的应对措施，在确保产量的前提下，为提高烧结矿质量提供技术支撑。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

烧结试验所用含铁原料以混匀矿、单味粉、返矿为主，以回收利用的内、外粉尘与烧结粉等二次资源为辅。所用熔剂包括白云石、石灰石和生石灰。各种原料的主要化学成分和粒度组成分别如表1、2所示。由表1、2可知，核心物料中混匀矿的全铁质量分数为60.06%，配比为44.59%，粒度均匀；此外，内、外粉尘的粒度小，配比较低。

表1 含铁原料和熔剂的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of iron-bearing raw materials and fluxes %

原料名称	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	配比
混匀矿	60.06	4.220	2.240	0.170	0.091	0.063	0.066	44.59
单味粉	57.25	4.710	1.560	0.549	0.155	0.005	0.054	14.80
返矿	55.49	5.940	2.260	10.210	1.590	0.029	0.066	20.25
烧结粉	55.85	5.820	2.150	10.840	1.780	0.008	0.069	6.23
内粉尘	47.33	6.390	2.370	15.710	1.900	0.323	0.059	1.87
外粉尘	42.56	6.560	2.430	8.980	1.540	0.051	0.066	1.48
生石灰	—	3.030	0.082	84.320	1.100	—	—	3.35
石灰石	1.02	1.710	0.605	53.770	1.310	0.045	—	3.72
白云石	1.96	0.665	0.207	30.540	21.120	—	0.010	3.70

表 2　含铁原料和熔剂的粒度组成(质量分数)

Table 2　Particle size composition of iron-bearing raw materials and fluxes　　%

原料名称	>8 mm	(5,8] mm	(3,5] mm	(1,3] mm	(0.5,1.0] mm	(0.25,0.50] mm	≤0.25 mm
混匀矿	12.28	31.94	32.34	21.09	1.14	1.21	—
单味粉	26.27	17.09	19.37	27.16	6.31	2.38	1.42
返矿	—	—	14.35	35.26	15.17	12.31	22.91
烧结粉	—	2.09	32.88	51.79	10.22	1.89	1.13
内粉尘	—	—	—	0.95	23.01	31.52	44.52
外粉尘	—	—	—	0.87	27.81	29.05	42.27
生石灰	—	—	—	4.32	26.53	28.96	40.19
石灰石	—	—	3.01	31.78	19.64	12.89	32.68
白云石	—	—	2.35	29.06	18.97	18.79	30.83

所用燃料为焦粉，其工业分析和粒度组成如表 3 所示。由表 3 可知，焦粉的固定碳质量分数为 84.32%，<3 mm、<0.5 mm 粒级质量分数分别为 80.05%、25.76%，这表明焦粉质量良好。

1.2　试验方法

烟气循环烧结试验装置如图 1 所示，基本操作参数如表 4 所示。试验装置主要包括烧结杯、热风炉、混气室、H_2O 蠕动泵及烟气成分检测系统等。烧结料层高度为 850 mm，点火温度为(1 050±50)℃，点火保温时间为 3 min，烧结负压为 14 kPa。待检测指标包括烧结速度、成品率、转鼓强度、利用系数、固体燃料消耗及烟气 CO 排放浓度。

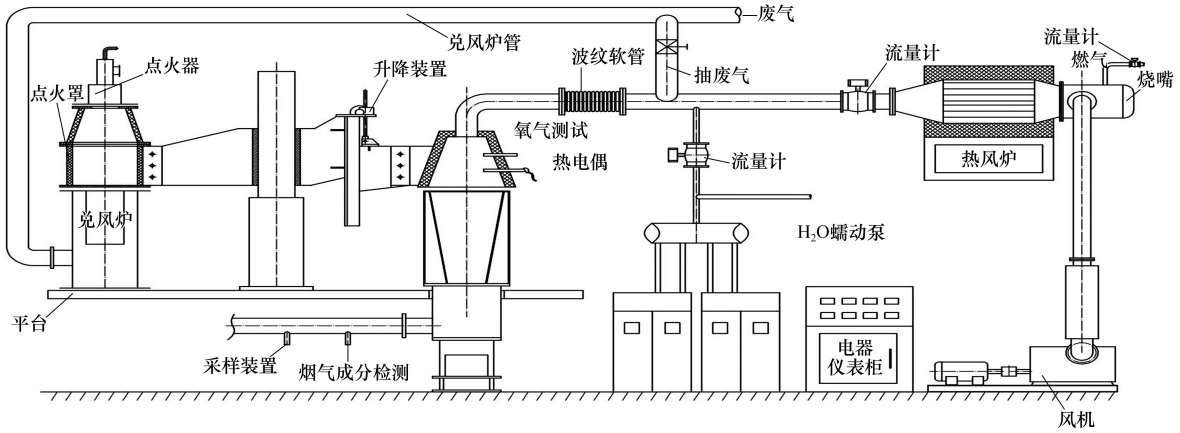


图 1　烟气循环烧结试验装置示意

Fig. 1　Test equipment schematic of flue gas circulation sintering

表 3　焦粉的工业分析及其粒度组成(质量分数)

Table 3　Proximate analysis and particle size composition of coke breeze　　%

工业分析				粒度组成/mm					
固定碳	灰分	挥发分	S	(5,8] mm	(3,5] mm	(1,3] mm	(0.5,1.0] mm	(0.25,0.50] mm	≤0.25 mm
84.32	11.11	1.72	0.51	2.16	17.79	36.13	18.16	11.90	13.86

表 4　烧结试验的基本操作参数

Table 4　Basic operating parameters of sintering pot test

料层高度/mm	铺底料厚度/mm	点火温度/℃	点火时间/min	保温时间/min	点火负压/kPa	烧结负压/kPa
850	20	1 050 ± 50	1.5	1.5	6	14

2 结果与讨论

2.1 循环烟气氧气含量的影响

在循环烟气温度为 180 ℃、水分质量分数为 5% 的条件下，试验研究循环烟气中 O_2 体积分数变化（15%、17%、19%、21%、23%）对烧结矿产、质量指标和烟气污染物中 CO 平均浓度的影响，然后以 O_2 体积分数 19% 为基准，研究梯级富氧（烧结前 15 min 富氧）对烧结矿产、质量指标和 CO 平均质量浓度的影响，结果如图 2、3 所示。

由图 2(a) 可知，当循环烟气 O_2 体积分数低至 15% 时，烧结矿产、质量指标显著恶化。随着 O_2 含量的增加，垂直烧结速度、烧结矿成品率和转鼓强度及烧结机利用系数都呈逐渐上升趋势，促使固体燃料消耗从 66.65 kg/t 降低至 61.74 kg/t，这表明氧气含量对烟气循环烧结至关重要。与基准烧结（O_2 体积分数为 21%、烟气温度为 25 ℃、干燥气体）相比，当循环烟气 O_2 体积分数为 21%、烟气温度为 180 ℃ 及水分体积分数为 5% 时，各项烧结指标已经有所改善，增加 O_2 体积分数至 23% 会进一步提升烧结指标。同时，随着 O_2 含量的增加，烟气中 CO 的平均质量浓度逐步降低，由 17.91% 下降至 2.85%［图 3(a)］。分析原因认为，O_2 含量的升高可促进 CO 的二次燃烧[13]。

由图 2(b) 可知，点火保温完成后，采用梯级富氧方法将烧结前 15 min 的 O_2 体积分数由 19% 增加至 21%，各项烧结指标有升有降，改善效果不突出；而当烧结前 15 min 的 O_2 体积分数由 19% 增加至 23% 时，烧结指标全面优化，垂直烧结速度、成品率、转鼓强度、利用系数分别提升至 21.13 mm/min、74.78%、68.79%、1.445 t/(m²·h)，固体燃料消耗降低至 62.27 kg/t。同时，图 3(b) 显示，梯级富氧烧结 CO 的平均质量浓度同样逐步降低。因此，于低氧烟气循环烧结工艺（<19%）而言，全程富氧或中前部梯级富氧（21%~23%）对整个烧结过程与污染物排放均有益处，是实现烟气循环烧结高质量发展的重要途径之一。

2.2 循环烟气温度的影响

在循环烟气 O_2、水分体积分数分别为 19%、5% 的条件下，研究循环烟气温度（120、150、180、240、280 ℃）对烧结矿产、质量指标和烟气污染物中 CO 平均质量浓度的影响，结果如图 4、5 所示。

由图 4 可以看出，当烟气温度由 120 ℃ 升高到 280 ℃ 时，烧结速度、烧结矿成品率和利用系数等指标呈现先升高后降低的趋势，随之固体燃料消耗呈现先降低后升高的趋势，而烧结矿转鼓指数呈现持续升高的趋势。当烟气温度为 180 ℃

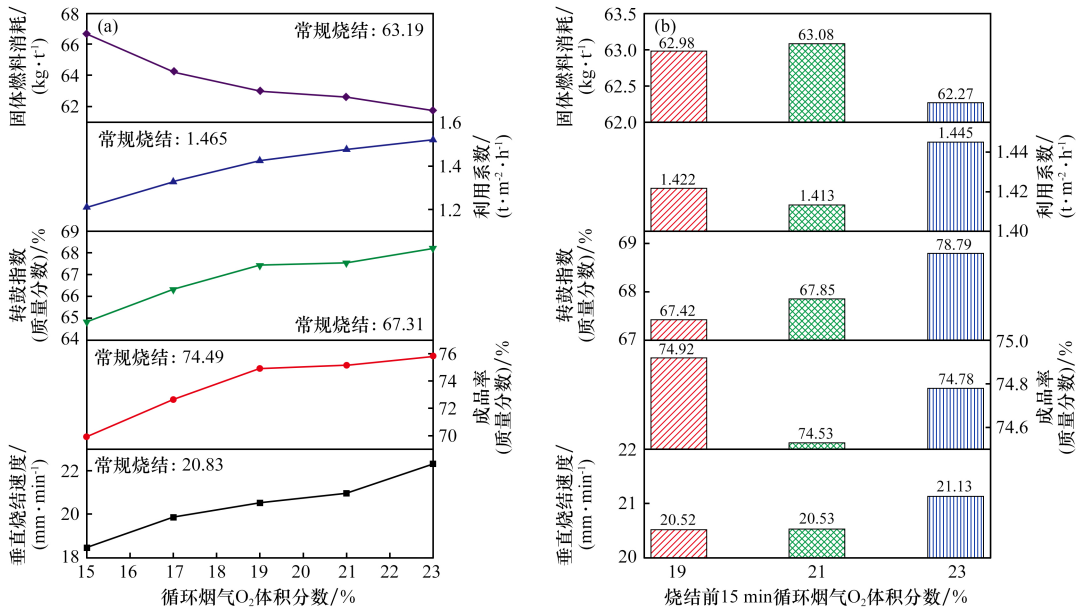


图 2 循环烟气 O_2 含量对烧结矿产、质量指标的影响

Fig. 2 Effects of O_2 content in circulating flue gas on sintering indexes

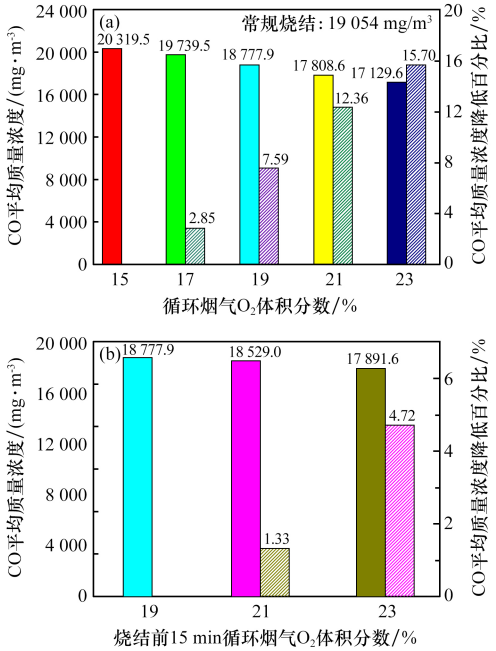


图 3　循环烟气 O_2 含量对 CO 平均质量浓度的影响

Fig. 3　Effects of O_2 content in circulating flue gas on average mass concentration of CO

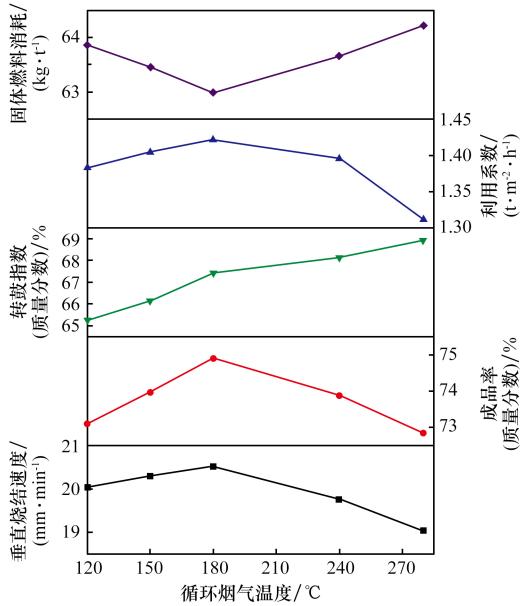


图 4　循环烟气温度对烧结矿产、质量指标的影响

Fig. 4　Effect of circulating flue gas temperature on sintering indexes

时，烧结矿成品率和烧结机利用系数的最大值分别为 74.92% 和 1.422 t/(m²·h)，固体燃料消耗最小值为 62.98 kg/t。当烟气温度升至 280 ℃时，两项指标分别降低了 2.78% 和 7.74%，同时固体燃料消耗升高至 64.23 kg/t，增加了 1.25 kg/t。烧结矿转鼓指数则由 120 ℃时的 65.23% 提高到 280 ℃时的 68.92%。与此同时，随着循环烟气温度的升高，烟气 CO 平均浓度呈上升趋势(图 5)，由 1.47% 增大至 1.61%。

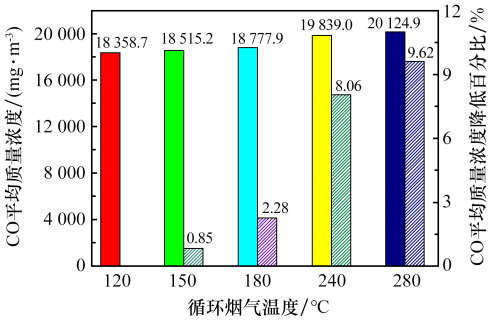


图 5　循环烟气温度对 CO 平均浓度的影响

Fig. 5　Effects of circulating flue gas temperature on average concentration of CO

因此，当循环烟气 O_2 含量和水分含量保持不变时，进入烧结料层的烟气温度不宜高于 180 ~ 200 ℃，超过此温度区间的高温热风既影响烧结机利用系数与节能效果，又影响焦粉燃烧，导致 CO 排放浓度升高。以上结果符合已有热风烧结的研究结论[3]：烟气温度过高，气体受热膨胀，通过烧结料层的有效 O_2 含量减少，致使燃料燃烧受阻，恶化烧结矿产、质量指标。

2.3　循环烟气水分含量的影响

根据循环烟气 H_2O(g)体积分数不宜超过 8% 的单因素研究结果，在循环烟气 O_2 体积分数分别为 19% 和 21%、烟气温度为 180 ℃的条件下，试验研究循环烟气水分体积分数(5%、8%)对烧结矿产、质量指标和烟气污染物中 CO 平均质量浓度的影响，结果如表 5 所示。由表 5 可以看出：在不同的循环烟气 O_2 含量条件下，随着水分含量升高，垂直烧结速度均变快，但其它指标整体变差。随着水分体积分数由 5% 变为 8%，当 O_2 体积分数为 19% 时，成品率和转鼓指数分别降低了 0.71% 和 0.21%；当 O_2 体积分数为 21% 时，成品率和转鼓指数分别降低了 0.63% 和 0.20%。因此，在循环烟气水分体积分数低于 8% 的情况下，烧结指标受影响的程度低。

此外，由表 5 可知，以 O_2、水分体积分数分别为 19%、5% 为基准，CO 平均质量浓度的降低幅度分别为 2.61%、5.16%、6.87%，表明烟气中CO平均质量浓度随循环烟气水分含量的增加而

表 5 循环烟气水分含量对烧结矿产、质量指标和 CO 质量浓度的影响

Table 5 Effects of H_2O content in circulating flue gas on sintering indexes and average concentration of CO

烟气成分（体积分数）/%		垂直烧结速度/（mm·min^{-1}）	烧结矿成品率/%	烧结矿转鼓指数/%	烧结机利用系数/（t·m^{-2}·h^{-1}）	固体燃料消耗/（kg·t^{-1}）	CO 质量浓度	
O_2	水分						平均值/（mg·m^{-3}）	变化幅度/%
19	5	20.52	74.92	67.42	1.422	62.98	18 777.9	基准
	8	20.93	74.21	67.21	1.435	63.16	18 288.0	2.61
21	5	20.97	75.15	67.53	1.475	62.62	17 808.6	5.16
	8	21.34	74.52	67.33	1.466	62.24	17 487.8	6.87

下降，同时随 O_2 体积分数的增加而进一步下降（与 2.1 节结果一致）。

3 烟气循环烧结工艺优化措施

基于以上研究结果，对现场进行必要的烟气循环烧结工艺优化与局部工程改造（图 6），主要调控循环烟气的 O_2 含量和温度，并改善烟气中水分含量。

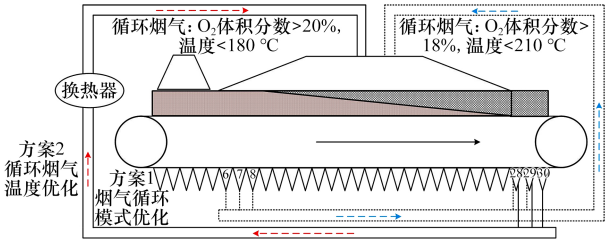


图 6 烟气循环烧结工艺优化方案

Fig. 6 Optimization scheme of flue gas circulation sintering process

3.1 烟气循环模式优化

依据图 6 中方案 1，烟气循环模式由“前 3 后 2”（6、7、8 号风箱 +28、29 号风箱）改为“前 3 后 3”（6、7、8 号风箱 +28、29、30 号风箱）。通过对风箱烟气流量、烟气成分等实测数据（表 6）进行统计可知：循环模式改变后，循环烟气 O_2 体积分数由 15.4% 提高至 20.4%，同时水分体积分数由 10.7% 降低至 0.8%，CO_2 体积分数由 6.9% 降低至 0.4%（需 <3%），这些烟气成分含量的调整均有利于改善烧结矿产、质量指标。与此同时，从烧结机稳定运行的角度来看，“后 3”的循环模式避免了 6、7、8 号风箱气流的短路问题。然而，在此模式下，循环烟气温度由 216 ℃ 提高至 448 ℃，依照烟气温度影响的研究结果，超高温度烟气直接循环会恶化烧结指标，抑制烟气成分含量调整的优势，因此对降低烟气温度采取了额外措施。

3.2 循环烧结烟气温度优化

依据图 6 中方案 2，为了降低循环烟气的温度，在烧结烟气循环烟道上增加了成套换热装备系统。该装备主要包括高参蒸发器与过热器、低参蒸发器与过热器及预热器、省煤器等。如图 7 所示，进入高参蒸发器与过热器的烟气温度为 392.8 ℃，经换热后进入低参蒸发器与过热器的烟

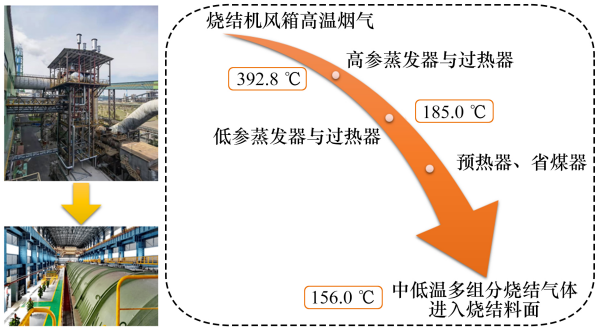


图 7 循环烟道换热装备系统

Fig. 7 The heat transfer equipment system of flue gas circulating pipeline

表 6 不同循环模式的烟气组成

Table 6 Effects of H_2O content in circulating flue gas on average concentration of CO

循环模式	温度/℃	工况流量/（m^3·min^{-1}）	体积分数/%					
			O_2	CO_2	CO	NO_x	SO_2	H_2O
“前 3 后 2”	216.1	11 358.7	15.4	6.9	0.706 31	0.022 31	0.011 22	10.7
“前 3 后 3”	448.2	10 029.6	20.4	0.4	0.044 56	0.007 13	0.020 73	0.8

气温度为 185 ℃，再经预热器、省煤器及除尘器，最后从循环风机出来并进入料面的烟气温度为 156 ℃，符合循环烟气温度需求。高温烟气提供的热量，对应可生产中压蒸汽 20 t/h（360 ℃、1.8 MPa），实现低品质余热高效回收利用。

4　面向 CO 减排的烟气循环烧结耦合技术

在烟气循环烧结工艺降低 CO 排放的基础上，开展系列 CO 减排技术研究，主要包括源头减量（固体燃料粒度精准制备的燃料调控技术）、过程控制（富氧点火、蒸汽喷吹、氢系燃料喷吹等烧结气氛调控技术）、末端治理（CO 催化氧化技术）。其中，在 CO 催化氧化技术研发中，开发的贵金属催化剂，分别于循环流化床 + SCR 硫硝脱除与双级活性炭硫硝脱除后的烟气中完成稳定性测试，CO 脱除效率为 60%～70%，放热效应明显；此外，开发的非贵金属催化剂在某双级活性炭硫硝脱除后烟气中完成稳定性测试，连续稳定运行 60 d，脱除效率 >95%。

以上技术可达到的 CO 质量浓度降低比例如表 7 所示。由表 7 可见，这些技术都可与烟气循环烧结技术在烧结系统中耦合，实现烟气 CO 源头 + 过程的协同减排[14]，CO 排放量降低 30%～40%，或实现烟气 CO 源头 + 过程 + 末端的近零排放，CO 排放量降低 95% 以上。值得注意的是，基于烟气循环烧结的耦合技术是对烟气循环烧结技术的优化升级，能够实现绿色减排、节能降耗、提产提质的叠加效果，如首钢京唐烧结工序实现“天然气喷吹 + 烟气内循环 + 烟气外循环 + 加湿喷吹”技术集成，首次荣获钢铁行业烧结工序能效“领跑者”称号。

表 7　CO 质量浓度降低比例统计

Table 7　Statistics on the proportion of CO concentration reduction

烟气循环烧结	固体燃料粒度精准制备	富氧点火	蒸汽喷吹	氢系燃料喷吹	CO 催化氧化	源头 + 过程的协同减排	源头 + 过程 + 末端的近零排放
10	15	3	10	5	90	30～40	>95

5　结　论

（1）通过研究循环烟气的氧气含量、温度及水分含量等多因素共存而单因素变化对烧结指标与 CO 平均质量浓度的影响规律，发现在循环烟气高温、含水的状态下，适宜的 O_2 体积分数应不低于 20%，烟气温度不宜高于 180～200 ℃，水分体积分数应低于 5%。经过影响因素的适度优化，CO 平均质量浓度可降低 10% 左右。

（2）依据研究结果，针对宝山基地二烧结烟气循环，通过烧结烟气循环模式与烟气温度优化两项措施来实施循环烟气 O_2 体积分数、烟气温度、水分含量的精准调控，避免气流短路，助力烧结产能提升。

（3）在国内外钢铁企业逐渐重视烧结烟气 CO 排放治理的形势下，烟气循环烧结工艺可实现烟气总量减排、CO 排放浓度降低的优势，受到更多关注。然而面对各个烧结厂复杂多变的烧结工况，聚焦细节优化的烟气循环烧结工艺革新势在必行。同时，构建与应用基于烟气循环烧结的综合节能减排技术是未来烧结厂绿色低碳发展趋势。

参考文献：

[1] 姜维，张永杰，李海峰．中国钢铁极致能效降碳实践与基础研究[J]．钢铁，2024，59(9)：2－12.
JIANG Wei，ZHANG Yongjie，LI Haifeng. Practice and basic research on carbon reduction through ultimate energy efficiency project for iron and steel in China[J]. Iron & Steel，2024，59(9)：2－12.

[2] 叶恒棣，王兆才，刘前，等．烧结烟气及污染物减量化技术研究[J]．烧结球团，2019，44(6)：60－67.
YE Hengdi，WANG Zhaocai，LIU Qian，et al. Study on reduction technology of sintering flue gas and pollutants[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(6)：60－67.

[3] 李文林，刘臣．烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术分析[J]．烧结球团，2022，47(4)：99－105.
LI Wenlin，LIU Chen. Analysis on sintering technology of flue gas circulation coupled with step oxygen enrichment[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(4)：99－105.

[4] LI G H，LIU C，RAO M J，et al. Behavior of SO_2 in the process of flue gas circulation sintering (FGCS) for iron ores[J]. ISIJ International，2014，54(1)：37－42.

[5] FAN X H，YU Z Y，GAN M，et al. Flue gas recirculation in iron ore sintering process[J]. Ironmaking & Steelmaking，2016，43(6)：403－410.

[6] 范晓慧,甘敏,季志云,等. 复合气体介质烧结的节能减排技术开发与应用[J]. 钢铁,2020,55(8):62 – 69;74.
FAN Xiaohui, GAN Min, JI Zhiyun, et al. Development and application of techniques for energy conservation and emission reduction during sintering process based on multiple-component gases medium[J]. Iron & Steel, 2020,55(8):62 – 69,74.

[7] 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;24.
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;24.

[8] 吴宏亮,罗云飞,周江虹,等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和CO排放的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(4):1179 – 1188.
WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Influence of oxygen enrichment and flue gas circulation on quality index of sinter and CO emissions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(4):1179 – 1188.

[9] 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.

[10] 范振宇. 烟气循环烧结的基础研究[D]. 长沙:中南大学,2011:94.
FAN Zhenyu. A fundamental investigation on flue gas circulating sintering[D]. Changsha: Central South University,2011:94.

[11] 徐慧如,高培程,朱旺,等. 首钢股份2#烧结烟气内循环单因素试验及应用实践[J]. 矿业工程,2023,21(2):48 – 51;65.
XU Huiru,GAO Peicheng,ZHU Wang,et al. Single factor test and application practice of internal circulation of 2# sintering flue gas of Beijing Shougang Co., Ltd.[J]. Mining Engineering,2023,21(2):48 – 51;65.

[12] ZHANG H L, RAO M J, FAN Z Y, et al. Effects of circulated flue gas components on iron ore sintering[J]. ISIJ International,2012,52(12):2139 – 2144.

[13] FAN X H,YU Z Y,GAN M,et al. Appropriate technology parameters of iron ore sintering process with flue gas recirculation[J]. ISIJ International, 2014, 54(11): 2541 – 2550.

[14] WU Y F,FAN X H,JI Z Y,et al. Influence of multiple gaseous medium injection on low-carbon iron ore sintering performance:Characteristics of natural gas and steam coupling injection[J]. Journal of Cleaner Production,2022,374:133907.

(上接第119页)

BI Xuegong, WANG Yayu, XIE Denggao, et al. Experimental study on production of carbon-blended pellets with using sinter ESP dusts[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(1):38 – 44.

[14] SHE X F, WANG J S, WANG G, et al. Removal mechanism of Zn,Pb and alkalis from metallurgical dusts in direct reduction process[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2014,21(5):488 – 495.

[15] PENG C,ZHANG F L,LI H F,et al. Removal behavior of Zn, Pb, K and Na from cold bonded briquettes of metallurgical dust in simulated RHF[J]. ISIJ International,2009,49(12):1874 – 1881.

[16] 王静松,李岩,冯怀萱,等. 钢铁产业集聚区难处理尘泥处理与全量资源化利用进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1737 – 1749.
WANG Jingsong,LI Yan,FENG Huaixuan,et al. Progress in treating difficult-to-handle dust and sludge and full-scale resource utilization in an iron and steel industry cluster[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(12):1737 – 1749.

[17] 尚海霞,李海铭,魏汝飞,等. 钢铁尘泥的利用技术现状及展望[J]. 钢铁,2019,54(3):9 – 17.
SHANG Haixia, LI Haiming, WEI Rufei, et al. Present situation and prospect of iron and steel dust and sludge utilization technology[J]. Iron & Steel,2019,54(3):9 – 17.