热风烧结与富氧匹配生产研究及应用

郝永寿[1]，李 强[1]，赵立卓[1]，吴 明[1]，季志云[2]，王晋芳[1]
(1. 太原钢铁集团有限公司，山西 太原 030003；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083)

摘要： 针对热风烧结工艺中，热风氧体积分数低导致烧结生产利用系数低、质量指标较差及固体燃料消耗成本升高等问题，文章采用烧结杯试验方法对热风烧结与富氧匹配生产条件下的热风氧体积分数、富氧时间、燃料配比及烟气氧体积分数等进行了优化研究，系统分析了富氧热风烧结对烧结过程的影响，同时对参数优化前后的试验效果进行了测试对比；并以试验结论为基础，在太钢450 m^2 烧结机上进行了富氧热风烧结工业化实践。结果表明，富氧热风烧结对烧结矿转鼓强度、FeO质量分数等物理化学指标改善明显，返矿率降低，利用系数提高，固体燃料消耗及电能消耗呈下降趋势，达到了优质、高产、低耗的目标。

关键词： 热风烧结； 富氧； 燃料配比； 工业化
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)05－0067－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.072

Research and application on hot air sintering and oxygen-rich matching production

HAO Yongshou[1], LI Qiang[1], ZHAO Lizhuo[1], WU Ming[1], JI Zhiyun[2], WANG Jinfang[1]
(1. Taiyuan Iron and Steel Group Co., Ltd., Taiyuan 030003, Shanxi, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Aiming at the low oxygen volume fraction in hot air sintering process, resulting in low utilization coefficient of sintering production, poor quality index and increased solid fuel cost, etc., the hot gas oxygen volume fraction, oxygen-rich time, fuel ratio and flue gas oxygen volume fraction under the production conditions of hot air sintering and oxygen-rich matching production are optimized by a sintering cup test method, the influence of oxygen-rich hot air sintering on the sintering process is systematically analyzed, and the test effect before and after parameter optimization is tested. On the basis of the test conclusion, the industrial practice of oxygen-rich hot air sintering of TISCO 450 m^2 sintering machine is carried out. The results show that oxygen-rich hot air sintering improves such physical and chemical indexes as sinter tumbler strength and FeO mass fraction, reduces the sinter return ratio, and increases the utilization coefficient, followed by a downward trend in solid fuel consumption and electricity consumption, achieving the goals of high quality, high yield and low consumption.

Key words: hot air sintering; oxygen-rich; fuel ratio; industrialize

富氧烧结的目的在于烧结过程中氧化性气氛的提高，属于钢铁行业前沿技术。目前，行业对富氧烧结的研究主要处于理论阶段，结论基本一致：富氧烧结后氧化性气氛增强、固体燃料利用

收稿日期： 2022－06－15； **修回日期：** 2022－08－03
基金项目： 国家自然科学基金面上项目(52274344)；湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ20068)；湖南省科技创新计划资助项目(2023RC3042)
作者简介： 郝永寿(1980—)，男，高级工程师，从事烧结生产工艺方面的工作。
通信作者： 赵立卓(1986—)，男，工程师，从事烧结生产工艺方面的工作。

中国知网 https://www.cnki.net

率提高，有利于提高烧结矿质量。但并未系统研究富氧烧结工艺参数的优化和进行工艺技术转化落地的工业实践。太钢 450 m^2 烧结实行高比例微细精矿粉烧结，生产原料特点和热风烧结工艺，带来烧结料层透气性恶化的问题，限制了烧结矿产、质量的进一步提升。根据物料平衡及氧平衡计算，烧结空气在烧结物料平衡中占比为 30.49%，氧平衡中占比为 24.96%，在烧结氧化还原反应过程中起到重要作用。太钢 450 m^2 烧结采用热风烧结工艺后，烧结机料面引入环冷机 150 ~ 200 ℃热风替代部分常温空气参与烧结化学反应过程，由于烟气温度升高后体积膨胀，参与烧结过程的氧气总量降为热风烧结前的 91%，烧结透气性恶化，质量指标下降。为改善烧结过程，太钢与中南大学合作，结合太钢烧结特点，开发出热风烧结与富氧匹配生产工艺，并针对热风氧体积分数、富氧时间、燃料配比等具体工艺参数进行了优化研究。在此基础上，2021 年太钢 450 m^2 烧结进行了富氧热风烧结工业化实践，取得烧结质量提升、能耗降低、环境改善等多重效果，创造了行业首例，有力促进了富氧烧结新工艺的发展。

1 富氧热风烧结试验研究

1.1 试验原料

太钢 450 m^2 烧结含铁原料主要有太钢自产铁矿粉 A(典型的高品位磁铁精粉)、铁矿粉 B(赤铁矿、磁铁矿构成的混合型铁精粉)、铁矿粉 C(高品位磁铁精粉)、以及矿粉 D(赤铁矿)和综合粉(一种二次回收的以磁铁矿为主的混合型含铁为原料)，5 种含铁原料的主要化学组成如表 1 所示。由表 1 可知，矿粉 A、B、C、D 的 w(TFe)分别为 66.75%、64.78%、67.68%、56.05%；综合粉 w(TFe)较低，仅为 37.51%，且 FeO、CaO、MgO 质量分数较高。此外，根据现场实际测量情况：矿粉 A 平均粒度为 0.055 mm，0 ~ <0.045 mm 粒级质量分数为 66%；矿粉 B 和矿粉 C 平均粒度为 0.046 mm，0 ~ <0.045 mm 占比达到 93%；自产铁矿粉配比为 87%，太钢属于高比例微细精矿粉烧结；矿粉 D 和综合粉为粉矿类型的含铁原料，平均粒度分别为 4.06 mm、1.66 mm，混合料配比分别为 8%、5%。太钢 450 m^2 烧结铁料配矿方案及生产配料方案分别如表 2、3 所示。

表 1 铁矿石主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and burning loss of iron ore

原料种类	主要化学成分								烧损
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S	
矿粉 A	66.75	27.84	6.13	0.26	0.21	0.32	0.016	0.017	-2.58
矿粉 B	64.78	9.75	4.29	0.42	0.61	1.22	0.030	0.031	0.50
矿粉 C	67.68	27.09	4.70	0.27	0.28	0.20	0.026	0.029	-2.45
矿粉 D	56.05	0.39	6.58	0.18	0.10	1.79	0.049	0.008	10.48
综合粉	37.51	26.90	10.03	19.77	3.20	2.51	0.130	0.300	7.08

表 2 配矿方案(质量分数)

Table 2 Ore blending plan %

矿粉 A	矿粉 B 及矿粉 C	矿粉 D	综合粉
39.0	48.0	8.0	5.0

表 3 配料方案(质量分数)

Table 3 Ingredient scheme %

混匀矿	熔剂 1	熔剂 2	燃料	返矿
61.98	3.72	8.06	3.88	22.36

1.2 试验研究

1.2.1 试验装置

在 200 ℃热风温度参数条件下，进行富氧热风烧结试验，在已经连接好热风烧结装置的基础上，按照试验方案，在预定的时刻打开和关闭氧气/氮气阀门，并按照设定的氧气体积分数调节氧气/氮气的流量使之达到设定值。考察热风条件下氧体积分数、富氧时间对烧结指标的影响以及富氧热风烧结对料层温度、燃料配比和烧结烟气氧体积分数的影响。富氧热风烧结试验具体工艺流程布置如图 1 所示。

1.2.2 试验方案

(1) 氧体积分数的影响。以未进行热风富氧烧结为基准试验；在通入热风的同时进行富氧，

中国知网 https://www.cnki.net

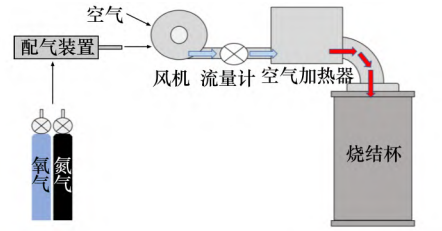


图 1　富氧热风烧结杯试验流程

Fig. 1　Process flow of oxygen – rich hot air sintering by cup test

使通入气体的氧体积分数分别达到 20%、21%、22%、23%、24%，通入时间和区间与热风一致，考察氧体积分数对烧结指标的影响。

(2) 富氧时间的影响。在通入热风的同时打开气瓶阀，调节氧气流量使通入气体的氧体积分数达到最佳方案，氧气通入时间分别为 0、6、10、14 min，考察富氧时间对烧结指标的影响。

(3) 对料层温度的影响。在最佳氧体积分数及富氧时间条件下进行富氧热风烧结试验(以未进行热风富氧烧结为基准试验)，使用铂 – 铂铑热电偶对料层温度进行测温，考察富氧热风烧结对料层温度的影响。

(4) 对烧结烟气氧体积分数的影响。在最佳氧体积分数及富氧时间条件下进行富氧热风烧结试验，使用烟气分析仪对烧结烟气中的氧体积分数进行测定，考察富氧热风烧结对烧结烟气氧体积分数的影响。

(5) 对燃料配比的影响。基准方案燃料配比为 5.00%；在最佳氧体积分数及富氧时间条件下进行富氧热风烧结试验，燃料配比分别设为 5.00%、4.75%、4.50%，考察富氧热风烧结对燃料配比的影响。

1.3　热风氧体积分数对烧结指标的影响

开展热风氧体积分数对烧结指标影响的试验研究，试验结果如表 4 所示。由表 4 可知：当氧热风烧结中体积分数低于空气中的氧体积分数时，烧结矿的成品率与基准相差不大，但烧结速度减慢，不利于产能发挥。随着氧体积分数由 21% 提高到 23%，垂直烧结速度、成品率、转鼓强度和利用系数均得到提高；当氧体积分数达到 23% 时，烧结速度达到 23.43 mm/min、成品率为 78.97%、转鼓强度为 70.29%、利用系数达 1.71 $t/(m^2 \cdot h^{-1})$。继续提升氧体积分数至 24%，烧结速度进一步加快，但成品率、利用系数略有下降。对于富氧热风烧结来说，合适的氧体积分数为 23%。

1.4　富氧时间对烧结指标的影响

开展富氧时间对烧结指标影响的试验研究，试验结果见表 5。

表 4　热风氧体积分数对烧结指标的影响

Table 4　Effect of oxygen content in hot air on sintering index

氧体积分数/%	烧结速度/($mm \cdot min^{-1}$)	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
基准	24.07	75.53	66.73	1.66
20	21.10	75.38	67.02	1.62
21	22.13	78.01	68.25	1.67
22	22.69	78.59	69.26	1.69
23	23.43	78.97	70.29	1.71
24	24.12	78.12	69.76	1.70

表 5　富氧时间对烧结指标的影响

Table 5　Effect of oxygen addition time on sintering index

富氧时间/min	烧结速度/($mm \cdot min^{-1}$)	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
0	24.07	75.53	66.73	1.66
6	22.56	77.24	67.65	1.66
10	22.94	78.09	68.38	1.68
14	23.43	78.97	70.29	1.71

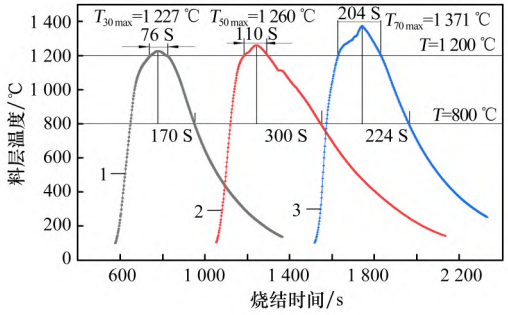
由表 5 可知，随着富氧时间的增加，垂直烧结速度、成品率、转鼓强度和利用系数均得到提高，当富氧时间由 6 min 增加至 14 min 时，烧结速度由 22.56 mm/min 提高至 23.43 mm/min，成品率

中国知网　https://www.cnki.net

由 77.24% 提高至 78.97%，转鼓强度由 67.65% 提升至 70.29%，利用系数由 1.66 t/(m²·h⁻¹) 提升到 1.71 t/(m²·h⁻¹)。因此，对于富氧热风烧结来说，合适的富氧时间为14 min。

1.5 富氧热风烧结对料层温度的影响

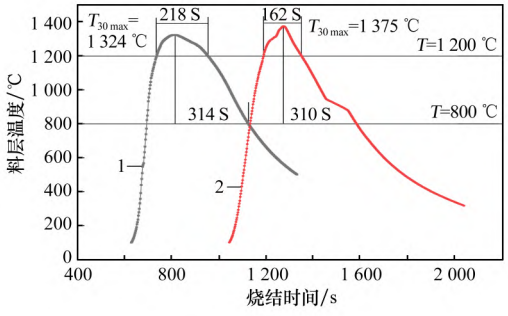
开展富氧热风烧结对料层温度影响的试验研究，图 2 为基准试验的料层温度曲线，图 3 为在富氧热风烧结时间为 14 min，热风温度为 200 ℃，氧体积分数为 23% 的条件下测得的料层温度曲线。由图 3 可知，在进行富氧热风烧结后，在距料层表面约 30 cm 处，料层最高温度为 1 324 ℃，1 200 ℃以上保持时间延长约 218 s，从最高温降至 800 ℃耗时约 314 s；在距料层 50 cm 处料层最高温度为 1 375 ℃，1 200 ℃以上保持时间为 162 s，从最高温降至 800 ℃耗时 310 s。相较于图 2 基准试验曲线可知，在通入富氧热风后料层温度趋于均匀，最高温度升高，高温保持时间延长，同时降温速度下降，相较于只通热风的情况，富氧热风在优化料层温度分布的同时提升了烧结质量。



1—距表层约 30 cm；2—距表层约 50 cm；3—距表层约 70 cm。

图 2 基准试验料层温度曲线

Fig. 2 Temperature curve of material layer on reference test



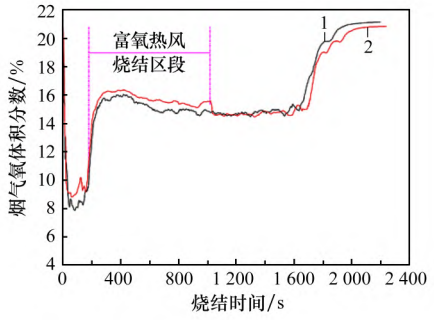
1—距表层约 30 cm；2—距表层约 50 cm。

图 3 富氧热风烧结试验料层温度曲线

Fig. 3 Temperature curve of test material by oxygen–rich hot air sintering

1.6 富氧热风烧结对烧结烟气氧体积分数的影响

开展富氧热风烧结对烧结烟气氧体积分数影响的试验研究，图 4 为燃料配比为 5.0%、富氧热风烧结时间为 14 min、热风温度为 200 ℃、氧体积分数为 23% 条件下测得的烧结烟气氧体积分数。



1—基准；2—富氧热风烧结。

图 4 富氧热风烧结对烟气氧体积分数的影响

Fig. 4 Effect on the volume fraction of oxygen in flue gas by oxygen – rich hot air sintering

1.7 富氧热风烧结对燃料配比的影响

富氧热风烧结对燃料配比的影响结果如表 6 所示。由表 6 可知，采用富氧热风烧结时，随着燃料配比降低，垂直烧结速度逐渐略有降低。当燃料配比由 5.00% 降低至 4.50% 时，垂直烧结速度由 23.43 mm/min 降低至 23.24 mm/min。当燃料配比由 5.00% 降低至 4.75% 时，成品率、转鼓强度和利用系数分别增加 0.36%、0.09% 和 0.01 t/(m²·h⁻¹)；当燃料配比由 4.75% 降至 4.50% 时，成品率、转鼓强度提和利用系数大幅下降，但烧结矿指标与基准方案大致相当。因此，在富氧热风烧结条件下，燃料配比降低 0.50% 仍可获得与基准方案相当的烧结指标。

2 富氧热风烧结实践

2.1 现场实施方案

为提高热风烧结的含氧量，在进入烧结机热风罩前的热风主管道内接入氧气管道进行富氧，氧气来源于公司氧气管网。因管网氧气压力高，为保证用气安全，经过两次压力调节阀降压后供正常使用，富氧流量调节可控，耗氧量控制在 3 500 ~ 4 500 m³/h，保证热风富氧率不低于23%，

中国知网 https://www.cnki.net

表 6　热风条件下燃料配比对烧结指标的影响

Table 6　Effect of coke powder ratio on sintering index under hot air condition

燃料配比/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
基准	24.07	75.53	66.73	1.66
5.00	23.43	78.97	70.29	1.71
4.75	23.67	79.33	70.38	1.72
4.50	23.24	76.07	66.47	1.65

具体工艺流程见图 5。

2.2　热风烧结与富氧匹配生产效果

热风烧结工艺投用后，环冷机基本实现颗粒物零排放，环保效益显著。经生产实践，热风温度可维持在 150～200 ℃，系统运行稳定。

2021 年太钢 450 m^2 烧结机实施富氧热风烧结匹配生产，烧结过程氧化气氛增强，燃烧速度及燃料利用率提高。在相同原料配比条件下，对比富氧热风烧结匹配生产前后烧结矿固体燃料消耗和主要物理化学指标，具体数据见表 7。

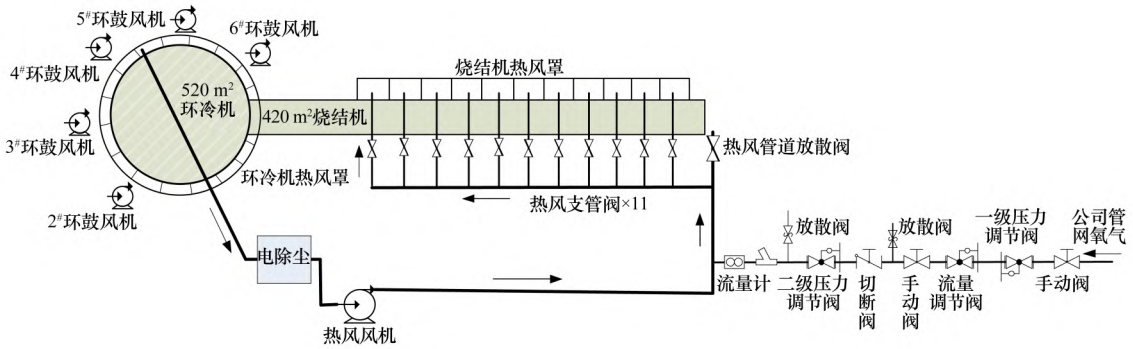


图 5　富氧烧结工艺流程

Fig. 5　Process flow of oxygen-rich hot air sintering

表 7　富氧热风烧结投用前后烧结矿质量及消耗指标对比

Fig. 7　Comparison of sinter quality and consumption indicators before and after oxygen-rich hot air sintering

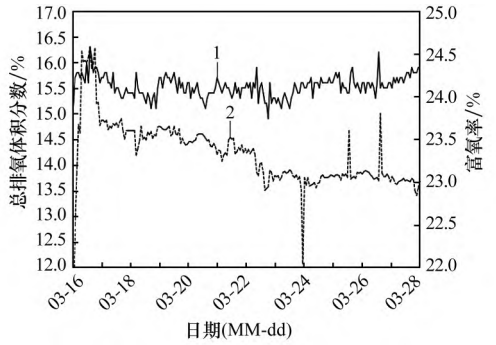
指标	转鼓指数/%	返矿率/%	w(FeO)/%	燃料消耗/(kg·t^{-1})	主抽电能消耗/(kW·h·t^{-1})	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
投用前	78.98	19.29	11.51	40.87	28.25	1.28
投用后	79.87	17.96	10.72	40.32	37.64	1.31
对比	0.89	−1.33	−0.79	−0.55	−0.61	0.03

由表 7 可知，热风与富氧匹配生产后烧结矿产、质量指标得到改善，其中转鼓指数提高 0.89%，返矿率和 w(FeO) 降低明显，分别下降 1.33%、0.79%，利用系数提高 0.03 t/(m^2·h)，燃料消耗降低 0.55 kg/t，主抽电能消耗降低 0.61 kW·h/t。烧结矿 w(FeO) 和返矿率下降，表明富氧热风烧结使烧结过程中宏观氧化气氛增强，烧结料层中的再生赤铁矿增加，FeO 降低；同时，固体燃料燃烧更趋充分，烧结上层热量改善，返矿产生减少，继而改善制粒效果，烧结过程中床层阻力下降，透气性改善，主抽电能消耗降低；燃料充分燃烧可降低燃料消耗，烧结液相量相对增加，为生成更多优质铁酸钙黏结相提供有利条件，烧结矿转鼓指数等指标改善。

2.3　富氧热风烧结对烟气氧体积分数的影响

污染物在线检测装置安装在烧结烟气总排烟囱，位于烟气净化工序之后。富氧热风烧结工艺投用后，烧结烟气在线检测显示氧体积分数明显升高，对环保排放指标必然产生影响。以两小时为一个计数单元，采取 3 月份富氧热风工艺投用阶段的连续运行数据(剔除停机时间)，烟气总排氧体积分数与热风富氧率关系如图 6 所示。

中国知网　https://www.cnki.net



1—烟气总排氧体积分数；2—富氧率。

图6 热风富氧率对烧结烟气氧体积分数的影响

Fig. 6 Effect of hot air oxygen onrichment rate on oxygen volume fraction of sintering flue gas

太钢450 m^2 烧结机于2019年达到国家超低排放标准，烧结烟气氧体积分数增加会影响污染物折算基准氧后的排放质量浓度，导致烧结烟气排放具有超标风险。由图6可知，热风富氧率与烧结烟气氧体积分数成正相关关系；随着富氧热风工艺投用，富氧率由19.6%升高至24.58%时，烟气总排氧体积分数由15.1%增加至16.3%；热风富氧率降低至23.06%时，烟气总排氧体积分数随之降低至15.52%。

按富氧率23.06%计算，相比未进行富氧生产，SO_2 排放质量浓度升高2.94 g/m^3、NO_x 排放质量浓度升高4.20 mg/m^3、颗粒物排放质量浓度升高0.84 mg/m^3。使用富氧热风烧结工艺需匹配烧结机前后风箱风量，降低主抽转速和燃料配比，提高料层厚度等，配合烧结机漏风率治理，减少富氧热风烧结对烟气污染物排放指标的影响。根据太钢450 m^2 烧结实践经验，冬季执行政府环保减排指令期间，通过增加富氧喷吹量，控制烟气氧体积分数在基准值(16%)以内时，在污染物减排20%的同时仍可保持高产，达到相比减排前台时产量反而增加8 t/h的效果。因此，在工业实践中需综合平衡富氧流量、烟气排放指标及烧结生产成本的关系。

3 富氧热风烧结效益

3.1 环境效益

环冷机周边环境得到明显改善，实现环冷机废气基本零排放目标。太钢环冷机废气经过热风除尘后，出口颗粒物质量浓度由20 mg/m^3 降低为3 mg/m^3。废气全部回收经电除尘后进行富氧，进入烧结机料面参加烧结过程，最终由抽风系统、脱硫脱硝系统进行处理，符合国家超低排放标准后外排大气。按照环冷机运行3台冷却风机，每台风机按50×10^5 m^3/h 风量计算，每年可减少向大气排放有害粉尘223 t，环冷机热风循环利用带来的环境效益显著。

3.2 经济效益

太钢450 m^2 烧结机年产量为480万吨，根据富氧热风烧结工艺对烧结矿指标的影响及氧气成本测算可知：富氧热风烧结后，返矿率降低1.33%，以太钢450 m^2 烧结步骤费150元/t计算，可产生经济效益792万元；富氧热风替代常温空气参与烧结过程，燃料单耗降低0.55 kg/t，按自产燃料价格2 446元/吨计算，折合经济效益65万元；热风富氧烧结匹配生产，电能消耗降低0.61 kW·h/t，按电价0.45元计算，折合经济效益132万元；富氧热风烧结氧气平均消耗为4 000 m^3/h，按氧气价格0.45元/m^3 计算，增加成本1 577万元/年，抵减后增加成本=(1 577−792−65−132)万元/年=588万元/年。

综上所述，富氧热风烧结工艺，尤其是热风烧结工艺，解决了环冷机废气热能浪费和污染物排放问题，但富氧后产生的经济效益为负效益。故烧结工序可根据烧结矿(产、质量)水平、烟气排放指标及成本承受能力，综合考虑富氧烧结工艺投用价值。

4 结 论

(1) 富氧热风烧结杯试验表明，随着氧体积分数的提升，烧结速度提高，成品率、转鼓强度和利用系数先升高后降低；热风条件下适宜的富氧制度为氧体积分数23%、富氧时间14 min。富氧后料层温度趋于均匀，燃料配比降低0.5%时仍可以获得与未富氧热风烧结生产时相当的烧结指标。

(2) 生产实践证明，热风与富氧匹配生产后，烧结矿经济质量技术指标得到改善，有利于实现低碳化烧结。烧结矿产、质量指标方面，转鼓强度提高0.89%，返矿率降低1.33%，利用系数提

中国知网 https://www.cnki.net

高 0.03 t/(m^2·h)；FeO 质量分数降低 0.79%。低碳化烧结方面，燃料单耗降低 0.55 kg/t，电能消耗降低 0.61 kW·h/t。

(3) 热风与富氧匹配生产，富氧率与烧结烟气总排氧含量成正相关关系，为降低对污染物排放指标的影响，需匹配工艺参数调整，控制烟气体积含氧量。

(4) 富氧热风烧结工艺解决了环冷机废气热能浪费和污染物无组织排放问题，同时可有效提高烧结机产能，在污染物减排 20% 条件下仍可达到高产目标。

参考文献:

[1] 褚世亮，贾彦忠，梁德兰，等. 富氧烧结对烧结矿矿相组成的影响[J]. 冶金研究，2008(7)：18－21.
CHU Shiliang，JIA Yanzhong，LIANG Delan. et al. Effect of stinering with oxygen enrichment on composition of the sinter mineral phase[J]. Metallurgy Research，2008(7)：18－21.

[2] 郭玉盛. 富氧烧结试验[J]. 烧结球团，1992，17(1)：16－18.
GUO Yusheng. Study of sintering of vanadium-titanium magnetite concentrates with oxygen enrichment[J]. Sintering and Pelletizing，1992，17(1)：16－18.

[3] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京：冶金工业出版社，2022.
HUANG Xihu. Metallurgical basic theory[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2022.

[4] 韩凤光，刘佩秋. 铁矿石富氧烧结试验研究[J]. 上海有色金属，2014，35(2)：66－70.
HAN Fengguang，LIU Peiqiu. Experimental study on oxygen enriched sintering of iron ore powder[J]. Shanghai Nonferrous Meetals，2014，35(2)：66－70.

[5] 刘晓文，黄从俊. 铁矿粉富氧烧结试验研究[J]. 粉末冶金工业，2016，26(5)：38－42.
LIU Xiaowen，HUANG Congjun. Experimental study on oxygen enriched sintering of iron ore powder[J]. Powder Metallurgy Industry，2016，26(5)：38－42.

[6] 李益慎. 国外烧结技术发展的动向[J]. 武钢技术，1998(8)：8－15.
LI Yisheng. Trends of sintering technology development abroad[J]. Wisco Technology，1998(8)：8－15.

[7] 范晓慧，孟君，陈许玲，等. 铁矿烧结中铁酸钙形成的影响因素[J]. 中南大学学报：自然科学版，2008，39(6)：1125－1131.
FAN Xiaohui，MENG Jun，CHEN Xuling，et al. Influence factors of calcium ferrite formation in iron ore sintering[J]. Journal of Central South University：Science and Technology，2008，39(6)：1125－1131.

[8] 胡兵，黄柱成，姜涛. 铁矿石富氧烧结点火试验研究[J]. 钢铁研究学报，2010，22(12)：2－3.
HU Bing，HUANG Zhucheng，JIANG Tao. Experimental study on enrichment oxygen ignition of iron ore sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research，2010，22(12)：2－3.

[9] 朱德庆，吴浩方. 梅山烧结矿冷却废气热风烧结工艺的研究[J]. 烧结球团，1997，22(5)：13－17.
ZHU Deqing，WU Haofang. Study on using cooler exhaus gas to realize hot air sintering in meishan I&S CO.[J]. Sintering and Pelletizing，1997，22(5)：13－17.

中国知网　https://www.cnki.net