兰炭替代焦粉应用于铁矿烧结的试验研究

秦林波，秦万里，陈旺生，王世杰，韩 军
（武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081）

摘要：为了开发清洁价廉的燃料用于铁矿烧结以缓解钢铁行业控煤、减煤政策实施，同时围绕“碳中和、碳达峰”的国家战略需求，本文采用兰炭替代部分焦粉作为烧结燃料，通过优化配料和粒度优化的方法，重点研究兰炭不同替代比及粒度对烧结矿质量性能指标的影响。研究结果表明：当兰炭替代焦粉占比为60%，且控制兰炭≤0.5 mm粒级占比为10%时，烧结矿的性能指标最佳；此时烟气中CO_2、SO_2的排放量分别降低了0.98%、3.706×10^{-3}%，但NO_x的排放量增加了9.49×10^{-4}%。矿物显微结构分析表明，控制兰炭≤0.5 mm粒级占比有助于烧结矿质量的提升。

关键词：兰炭；烧结矿；优化配料；粒度优化；烟气分析
中图分类号：TF046.4；TF053 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0095－08
doi：10.13403/j.sjqt.2023.04.060

Experimental research on application of semi-coke instead of breeze in iron ore sintering

QIN Linbo，QIN Wanli，CHENG Wangsheng，WANG Shijie，HAN Jun
(Resources and Environmental Engineering College，Wuhan University of Science and Technology，Wuhan 430081，Hubei，China)

Abstract：In order to develop clean and inexpensive fuels for iron ore sintering to alleviate the implementation of coal control and coal reduction policies in the iron and steel industry，and to focus on the national strategic needs of “Carbon Neutrality and Carbon Peaking”，the semi-coke is used to instead of part of the breeze as sintering fuel；through the methods of optimizing mixing and particle size，the effects of different substitution ratios and different particle sizes of semi-coke on the quality and performance indexes of sinter are studied. The results show that，when the proportion of semi-coke replacing breeze is 60%，and the proportion of ≤0.5 mm grain level of semi-coke is 10%；the performance index of sinter is the best. At this time，the discharges of CO_2 and SO_2 in flue as are decreased by 0.98% and 3.706×10^{-3}%，respectively，but the NO_x discharge is increased by 9.49×10^{-4}%. The analysis of mineral microstructure shows that controlling the proportion of ≤0.5 mm grain level of semi-coke can help improve the quality of sinter.

Key words：semi-coke；sinter；optimizing mixing；particle size optimization；flue gas analysis

铁矿烧结是现代钢铁工业生产过程中必不可少的工序，也是铁矿粉造块主要方法之一。铁矿烧结是将铁矿粉、固体燃料及熔剂按一定配比混匀，并布置于烧结机上，借助固体燃料燃烧产生高温，生成一定量的液相中间体将铁矿颗粒润湿黏结起来，形成具有一定强度的多孔块状烧结矿的过程[1]。烧结工序能耗是钢铁企业总能耗的12%，其中固体燃料消耗占烧结工序总能耗的75%~80%[2]。随着我国煤炭贮存量逐渐减少和控煤减煤政策实施，开发清洁价廉的燃料替代现有

收稿日期：2022－04－18；**修回日期**：2022－09－09
基金项目：湖北省重点研发计划资助项目(2021BCA131)；中央引导地方科技发展专项项目(2020ZYYD019)；武汉市应用基础研究项目(2020020601012275)
作者简介：秦林波(1986—)，男，副教授，从事烧结节能减碳及污染物控制研究。

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

化石燃料用于铁矿烧结是缓解钢铁行业能源紧缺重要途径之一[3]。

兰炭是弱黏结性煤在750 ℃以下经过干燥脱气、软化、熔融、流动、膨胀、固化后形成的浅黑色块状多孔体[4]，是一种新型固体燃料，具有价格低、硫低、固定碳高和发热值高等优点[5]。兰炭的软化温度和流动温度低于焦粉，在烧结过程中更加利于液相的生成和黏结，有助于烧结矿质量的提升[6]。目前国内外对兰炭用作烧结燃料已开展了大量研究。LUO 等[7]认为兰炭的替代占比为40%时，烧结矿质量最佳，SO_x 和 NO_x 的排放量分别降低了66%和25%。于韬等[3]和王润博等[8]研究得出，当兰炭的粒度过小时，因燃烧速度过快会导致烧结矿质量下降。杨双平等[5]发现当兰炭的替代占比为30%、碱度为1.82时，烧结效果最佳。延雨雨[9]研究发现：当使用兰炭替代焦粉用于烧结时，其对烧结矿质量的影响呈现先增加后减少的趋势；当兰炭替代焦炭占比为30%时，烧结矿成品率最高，其转鼓指数等指标达到烧结行业标准。但目前尚未结合烧结优化配料及粒度优化以提升兰炭的替代占比及调控烧结矿的品质。

本文采用优化配料和粒度优化相结合方法提升烧结固体燃料中兰炭的替代占比，并调控烧结矿的品质，在60 kg烧结杯中开展兰炭替代部分焦粉用作烧结燃料的试验研究，重点考察不同替代占比及粒度兰炭对烧结矿成品率、转鼓指数、落下指数、利用系数、烧结矿微观结构的影响，同时获得不同粒度的兰炭对烧结杯料层温度、燃烧效率及烟气组分的影响，为兰炭应用于烧结生产提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

烧结试验所用的混匀料、返矿、石灰石、除尘灰、燃料由南京某钢铁厂提供，生石灰取自当地某钢铁厂，主要化学成分如表1所示。燃料分别为陕西一号兰炭、筛焦楼焦粉(焦粉A)、兖矿焦粉(焦粉B)。试验过程中，为了保证固体燃料的粒度分布不影响试验结果，对其进行粒度筛分，分为>5.0、(4.0,5.0]、(3.0,4.0]、(2.0,3.0]、(1.0,2.0]、(0.5,1.0]、≤0.5 mm共7个粒级，按照每个粒级占比称取相应的质量，多次混合后装袋备用。固体燃料的基本性质如表2所示。

表1 烧结原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of sintering raw materials %

原料名称	TFe	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	P	S	TiO_2
混匀料	56.42	5.14	3.33	2.67	1.58	0.06	0.28	0.12
返矿	53.05	1.44	1.92	5.40	13.41	0.05	0.40	0.11
石灰石粉	0.99	1.71	3.65	6.52	47.30	0.01	0.05	0.13
除尘灰	49.57	1.80	3.28	6.56	13.26	0.06	0.76	0.14
生石灰	0.22	1.97	1.44	4.83	78.61	0.01	0.11	0.09

表2 烧结燃料的基本性质

Table 2 Basic properties of sintering fuel

燃料名称	粒度范围/mm	质量分数/%			着火点温度/℃	燃尽温度/℃	综合燃烧特性指数/10^{-7}	热值/($MJ\cdot kg^{-1}$)
		挥发分	固定碳	灰分				
焦粉A	≤5.0	2.67	84.23	12.60	672	836	2.27	28.307
	(1.0,2.0]	2.18	84.63	12.77	672	842	2.26	28.534
	(3.0,4.0]	2.04	84.98	12.58	683	836	2.23	28.281
兰炭	≤5.0	15.24	65.21	12.08	472	625	5.46	23.616
	(1.0,2.0]	11.46	72.34	7.76	464	626	6.64	27.285
	(3.0,4.0]	10.58	75.00	6.01	484	616	8.00	27.628

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

表 2(续)

燃料名称	粒度范围/mm	质量分数/%			着火点温度/℃	燃尽温度/℃	综合燃烧特性指数/10^{-7}	热值/(MJ·kg^{-1})
		挥发分	固定碳	灰分				
焦粉 B	≤5.0	2.87	83.51	12.54	632	825	1.80	28.449
	(1.0,2.0]	2.03	84.63	12.59	643	801	2.74	28.657
	(3.0,4.0]	2.05	84.98	12.26	649	817	2.54	28.856

1.2　试验方案及过程

根据南京某钢厂烧结生产条件，控制混合料的含水率为 7%，碱度为 1.93 左右，混合焦粉由焦粉 B 和焦粉 A 以 6∶4的配比混合而成。试验混匀料、生石灰、返矿、除尘灰的配比分别为 59.86%、4.58%、1.76%、28.17%、1.40%，固体燃料配比及兰炭≤0.5 mm 粒级占比如表 3 所示。由表 3 可知：P_1 ~ P_5 分别以 0%、40%、50%、60%、70%的兰炭代替混合焦粉(兰炭、混合焦粉的配比分别为 0∶1、4∶6、5∶5、6∶4、7∶3)，其它原料的相对质量分数不变；P_6 ~ P_9 的兰炭代替混合焦粉配比不变(6∶4)，通过调整兰炭≤0.5 mm 粒级占比分别为 10%、20%、30%、40%，从而改变兰炭的平均粒度，其它原料的相对质量分数不变。

表 3　烧结试验固体燃料配比及粒度

Table 3　Solid fuel ratio and particle size of sintering experiment

试验方案	混合焦粉/%	兰炭/%	w(焦粉)∶w(兰炭)	兰炭≤0.5 mm 粒级占比/%
P_1	4.23	0	1∶0	0
P_2	2.54	1.69	6∶4	22.60
P_3	2.12	2.12	5∶5	22.60
P_4	1.69	2.54	4∶6	22.60
P_5	1.28	2.96	3∶7	22.60
P_6	1.69	2.54	4∶6	10.00
P_7	1.69	2.54	4∶6	20.00
P_8	1.69	2.54	4∶6	30.00
P_9	1.69	2.54	4∶6	40.00

注：兰炭≤0.5 mm 粒级占比是指兰炭粒度≤0.5 mm 部分占总兰炭的质量分数，%。

烧结杯试验装置示意如图 1 所示。由图 1 可知，烧结杯是一个由耐高温合金材料制成的圆柱体(∅220 mm × 700 mm)，铺底料为 2 kg 粒度为 10 ~ 16 mm 的烧结矿。点火前，调节液化气流量至 6 m^3/h 左右、助燃风流量为 135 m^3/h。当点火罩温度达到 1 050 ℃后，移动点火罩至烧结杯上，点火时间为 1.5 min，点火负压控制在 -5 kPa。点火结束后保温 2 min，调节烧结负压至 -12 kPa。烧结结束后，将抽风负压调至 -4 kPa，冷却 2 min 后卸料。烧结结束后，翻转烧结杯，使烧结矿落入单辊破碎机中进行破碎。破碎后的烧结矿依次送至落下、转鼓装置中测定烧结矿落下强度和转鼓强度。烧结矿的落下强度和转鼓强度分别采用《烧结矿落下强度的测定》(YB/T 4606—2017)、《烧结矿和球团矿转鼓强度的测定方法》(YB/T 5166—1993)进行分析，测定结束后再计算烧结矿的成品率、落下强度、转鼓强度、利用系数等。在兰炭粒度优化的实验中，用 NHR -8100/8700 系列彩色无纸记录仪记录热电偶在烧结杯中间料层的温度，采用德国 MRUoptima7 烟气分析仪检测烟气中 NO_x、SO_2、CO_2、O_2 的质量浓度。

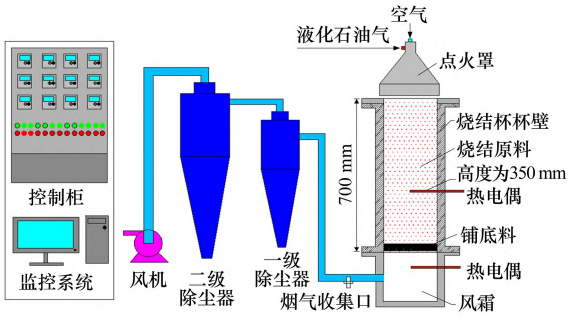


图 1　烧结杯装置示意

Fig. 1　Diagram of sintering cup device

2　结果与讨论

2.1　兰炭替代占比及粒度对烧结矿质量的影响

兰炭替代占比及粒度对烧结矿质量的影响试验结果如表 4 所示。由表 4 可知：随着兰炭替代焦粉占比的增加，烧结矿的转鼓强度出现波动；当兰炭替代焦粉的占比为 60%时，转鼓强度和落下强度分别为 61.75% 和 62.51%，低于单独焦粉

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

作为烧结燃料时的转鼓和落下强度。分析原因认为，掺混兰炭相较于单独焦粉降低了 CaO 质量分数，抑制了烧结矿中铁酸钙的生成，而铁酸钙是黏结相和矿物组成最主要的物质，导致烧结矿的强度降低[10]。由表 2、4 可知，兰炭的加入提高了垂直烧结速度，当兰炭替代占比为 60% 时，其相较于混合焦粉提高了 1.03 mm/min。兰炭的固定碳质量分数比焦粉低，但燃料反应性更好，因此掺混兰炭会缩短烧结时间，增加垂直燃烧速度[10]。此外，当兰炭替代焦粉占比从 40% 升高到 70% 时，烧结矿的成品率和利用系数呈现先增加后减少的趋势。在兰炭替代占比为 50% 时，成品率和利用系数最大分别为 77.47% 和 1.47 t/(m^2·h)。烧结矿的固结受到燃烧速度和传热速度的影响，当燃烧速度和传热速度不匹配时，会导致自动蓄热作用减弱，影响烧结料进行物理化学反应时所需要的融化温度保持时间，也会减少烧结过程中液相量的生成，从而影响烧结矿的成品率和转鼓强度[5,8]。

随着兰炭≤0.5 mm 的粒级占比的增加，转鼓强度呈现先减少后上升的趋势。当替代占比为 10% 时，转鼓强度最高为 62.93%，略高于混合焦粉。当兰炭≤0.5 mm 的粒级占比为 10% 时，相较于混合焦粉碱度增加了 8.9%，碱度的增加有利于针状或网状铁酸钙的生成，从而提高了烧结矿的强度[5]。另外，落下强度在 61.73%～63.68% 波动。因为≤0.5 mm 兰炭的热值为 23.616 MJ/kg，相比其它粒度低 4 MJ/kg 左右，热量提供不足会影响烧结蓄热，导致烧结矿料层温度过低，对烧结矿的强度和成品率有着不利的影响[3]。由表 4 可知，成品率在 77.5% 上下波动，未有明显影响。当兰炭粒度≤0.5 mm 的粒级占比为 10% 时，利用系数最大，随着兰炭≤0.5 mm 粒级占比的增加，呈现总体下降的趋势。这是因为细粒级燃烧速度更快导致烧结速度快于传热速度，不利于烧结矿的固结，从而降低了烧结矿的利用系数。

表 4 烧结杯试验结果

Table 4 Results of partial sintering cup experiment

试验方案	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	转鼓强度/%	落下强度/%	成品率/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	碱度
P_1	15.29	62.64	63.18	78.88	1.51	1.90
P_2	18.72	57.39	58.13	75.83	1.42	—
P_3	20.02	60.75	59.98	77.45	1.45	—
P_4	16.32	61.91	62.51	77.47	1.47	1.94
P_5	18.65	59.81	60.38	76.57	1.43	—
P_6	20.44	62.93	62.38	77.83	1.47	1.92
P_7	15.87	62.39	62.70	77.91	1.45	—
P_8	19.16	60.56	61.73	77.06	1.46	1.96
P_9	17.08	61.71	62.58	77.85	1.45	—

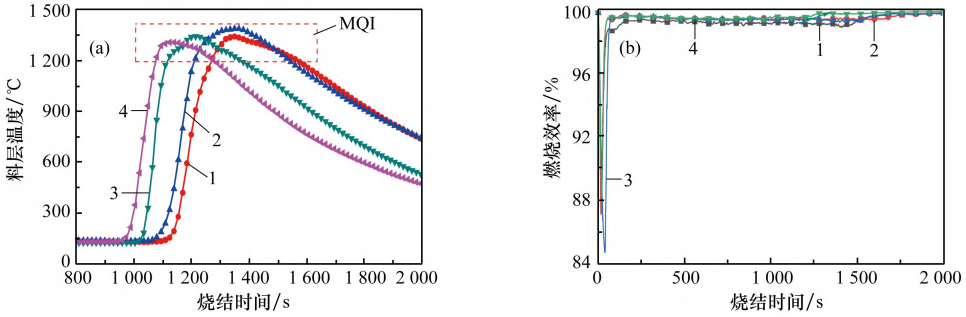
注：试验仅测量了 P_1、P_4、P_6、P_8 的碱度。

2.2 兰炭粒度对料层温度及烟气成分的影响

兰炭粒度优化对料层温度的影响如图 2(a)所示。图 2(a)中，对温度高于 1 200 ℃的区域进行积分计算，得到结果为高温熔融带面积(MQI)：20% > 10% > 30% > 40%，而融化温度保持时间(DTMT)：20% > 10% > 30% > 40%。由图 2(a)可知：当兰炭≤0.5 mm 粒级占比为 20% 时，MQI 和 DTMT 最高；兰炭≤0.5 mm 粒级占比为 40% 时，MQI 和 DTMT 最低。随着兰炭≤0.5 mm 粒级占比的增加，料层开始升温时间及达到最高温度的时间呈现整体缩短的趋势，而料层的融化温度保持时间和高温熔融带面积整体减少的趋势。通常，铁矿石在烧结过程中，熔融阶段提供了高强度烧结矿所需的凝聚力，产生的熔融体在很大程度上取决于温度 > 1 200 ℃的停留时间[11]。CHENG 等[11]认为固定碳质量分数过高，MQI 过高会导致烧结矿产品孔隙率降低，导致炼铁能耗较高。当兰炭≤0.5 mm 粒级占比为 20% 时，料层温度在 1 365 s 升至最高值 1 386 ℃；当替代占比为 40% 时，料层温度在 1 155 s 升至最高值 1 287 ℃。

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

粒度优化对燃烧效率的影响如图 2(b)所示。OOI 等[12]采用 CO_2 与(CO_2 + CO)体积分数的比值作为燃烧效率的指标。由图 2(b)可知：不同兰炭≤0.5 mm 粒级占比对应的燃烧效率大小关系：40% >20% >30% >10%；当兰炭≤0.5 mm 的粒级占比为 10%时，固体燃料的燃烧效率最低，这可能是固体燃料的平均粒度增大引起的。



(a) 料层温度；(b) 燃烧效率

≤0.5 mm 粒级占比/%：1—10；2—20；3—30；4—40。

图 2　粒度优化对料层温度和燃烧效率的影响

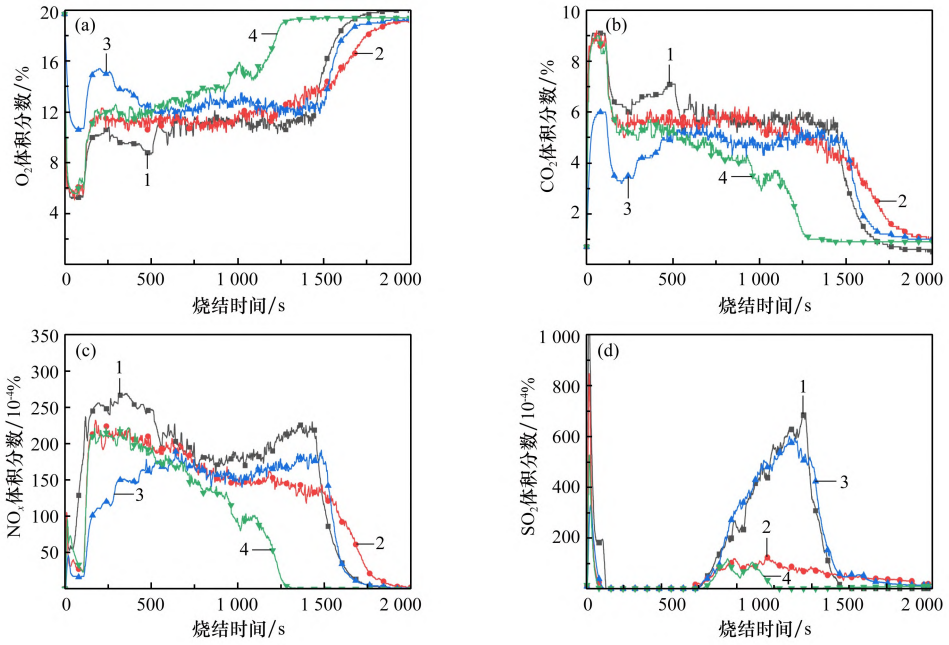
Fig. 2　Influence of particle size optimization on layer temperature and combustion efficiency

试验测得 100% 混合焦粉烧结烟气中 SO_2、NO_x、CO_2 的平均体积分数分别为 $1.229\ 1 \times 10^{-2}$%、9.870×10^{-3}%、5.35%，相对于掺混 60%兰炭来说，SO_2、CO_2 的平均体积分数分别降低了 3.706×10^{-3}%、0.98%，但 NO_x 体积分数增加了 9.49×10^{-4}%。兰炭粒度优化后固体燃烧效率变化如图 3 所示。图 3 中，对 O_2 图像积分后得到的大小关系为 10% <20% <30% <40%，CO_2 和 NO_x 体积分数积分结果为 10% >20% >30% >40%，SO_2 体积分数积分的结果为 10% >30% >20% >40%。由图 3 可知，当兰炭≤0.5 mm 粒级占比由 0 提升至 40% 时，CO_2 平均体积分数由 4.84%降至 3.33%，O_2 平均体积分数由 13.48%上升为 15.73%。烟气成分分析结果表明，在高固定碳质量分数时，CO_2 的体积分数显著增加，O_2 的体积分数明显降低[13]。当兰炭≤0.5 mm 粒级占比由 0 上升至 40% 时，NO_x 体积分数总体呈现下降趋势，由 $1.558\ 2 \times 10^{-2}$% 下降为 8.801×10^{-3}%，SO_2 体积分数由 $1.736\ 2 \times 10^{-2}$% 下降为 2.219×10^{-3}%。随着兰炭≤0.5 mm 粒级占比增加，CO_2 和 NO_x 的量在逐渐减小，O_2 的体积分数增加。因此，兰炭≤0.5 mm 粒级占比增加会减少碳的排放量，这可能是由于≤0.5 mm 兰炭的固定碳质量分数低引起的，NO_x 和 SO_2 的排放量也会减少，同时烧结矿质量稍有降低。

2.3　矿物的显微结构分析

兰炭对烧结矿微观结构的影响如图 4 所示。由图 4(a)可知，当烧结燃料为混合焦粉时，烧结矿熔融区的针状铁酸钙较多，相互间紧密交织，具有良好的强度。由图 4(b)可知，当用兰炭替代 60%焦粉时，针状的铁酸钙质量分数减少，板片状的铁酸钙质量分数增加，烧结矿熔融区表面多处出现裂缝，使得烧结矿的质量降低。当用兰炭替代焦粉时，磁铁矿的质量分数降低，铁酸钙形态由针状向板片状发展，使得烧结矿的质量降低[8]。图 4(c)、(d)是粒度优化对烧结矿质量的影响。当兰炭≤0.5 mm 的粒级占比为 10%时，针状的铁酸钙质量分数较多，针状铁酸钙和磁铁矿形成交织溶蚀结构，使得烧结矿的质量明显提高。而当兰炭≤0.5 mm 的粒级占比为 30%，烧结矿的针状铁酸钙不再那么密集，出现了大量的孔洞和缝隙，导致烧结矿的质量下降。王素平等[14]通过试验研究发现：当煤粉≤0.5 mm 的粒级占比为 0 时，铁酸钙多呈细针状，然而当≤0.5 mm 粒级占比为 70%时，铁酸钙多呈长板状；王永红等[15]通过降低燃料中 <1.0 mm 的粒级占比，增大 1.0 ~ 3.0 mm 燃料粒度来对燃料进行优化，发现燃料优化后针状铁酸钙明显增多，他认为应该控制燃料 <1.0 mm 的粒级占比在 30% 内；刘燊灰等[16]认为降低焦粉 <1.0 mm粒级占比有利于烧结液

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

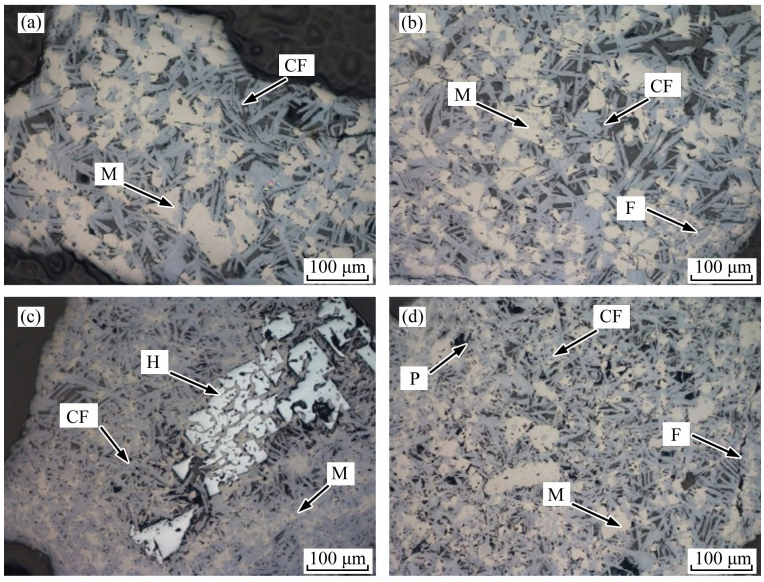


（a）O_2；（b）CO_2；（c）NO_x；（d）SO_2

≤0.5 mm 粒级占比/%：1—10；2—20；3—30；4—40。

图 3 粒度优化对烧结烟气成分的影响

Fig. 3 Influence of particle size optimization on sintering flue gas composition



（a）混合焦粉；（b）60% 兰炭替代焦粉；（c）≤0.5 mm 粒级占比为 10%；（d）≤0.5 mm 粒级占比为 30%

CF—铁酸钙；H—赤铁矿；M—磁铁矿；P—孔洞。

图 4 兰炭对烧结矿微观结构的影响

Fig. 4 Effect of semi-coke on the microstructure of sinter

相的生成及冷凝固结，能促进针状铁酸钙的生成。本文试验结果表明，控制兰炭≤0.5 mm 的粒级占比可以有效提高烧结矿的质量。烧结矿的主要化学成分如表 5 所示。

综合以上结果表明，优化配料中，随着兰炭替代占比的增加，燃料的转鼓强度、落下强度，

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

表 5　烧结矿的主要化学成分(质量分数)

Table 5　Main chemical composition of sintering ore %

试验方案	TFe	FeO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO
P_1	53.72	10.67	1.17	4.24	5.98	11.39
P_4	53.89	10.80	1.18	3.22	5.38	10.43
P_6	54.52	10.02	1.17	4.29	5.71	10.95
P_8	54.36	11.06	1.21	3.63	5.50	10.77

垂直燃烧速度和成品率都呈现先增后减的趋势，在 50%~60% 时出现拐点。掺混兰炭虽然提高了垂直燃烧速度，但会影响烧结过程的传热速度和蓄热作用，不利于液相中间体的生成，从而导致烧结矿的转鼓强度、落下强度和成品率下降。粒度优化后，当兰炭≤0.5 mm 的粒级占比为 10% 时，相较于混合焦粉，转鼓强度提高了 0.29%，垂直烧结速度上升 5.15 mm/min。严格控制兰炭≤0.5 mm 粒级占比，可以有效提高烧结矿质量，降低兰炭用作烧结燃料时其对烧结矿质量的负面影响，可以进一步提高兰炭替代焦粉的占比。微观结构分析结果证实，掺混兰炭会降低烧结矿的质量，但控制兰炭≤0.5 mm 的粒级占比可以有效提高烧结矿质量。

3　结　论

本文重点研究了兰炭替代占比和粒度优化对烧结矿质量的影响，探明了兰炭对烧结矿质量的影响规律，获取了烧结用最优兰炭配比。其主要的研究结论如下。

（1）当兰炭替代焦粉占比为 50%~60% 时，烧结矿的质量最佳。选择兰炭替代焦粉占比为 60%，且通过控制兰炭≤0.5 mm 的粒级占比，可以有效提高烧结矿质量，使得烧结矿质量的性能指数与混合焦粉相近。

（2）控制兰炭≤0.5 mm 的粒级占比为 10%~20% 时，烧结矿质量最优。当兰炭≤0.5 mm 的粒级占比为 10% 时，烟气中 NO_x 和 SO_2 的排放量分别为 $1.558\,2\times10^{-2}$%、$1.736\,2\times10^{-2}$%。兰炭替代焦粉占比为 60% 时，烟气中 CO_2、SO_2 的排放量相较于单独焦粉作为燃料分别降低了 0.98%、3.706×10^{-3}%，但 NO_x 的排放量增加了 9.49×10^{-4}%。

（3）兰炭的配入，提高了垂直烧结速度，但成品率、转鼓强度、利用系数会略有下降；随着兰炭≤0.5 mm 的粒级占比增加，转鼓强度、利用系数有变差的趋势。通过控制兰炭≤0.5 mm 的粒级占比，可以有效提升兰炭替代焦粉占比，同时改善烧结矿质量。

参考文献：

[1] ZHAO J, LOO C E, YUAN J, et al. A fundamental study of the co-combustion of coke and charcoal during iron ore sintering[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(8): 8743 - 8759.

[2] 范晓慧，季志云，甘敏，等. 生物质燃料应用于铁矿烧结的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2013，44(5)：7 - 13.
FAN Xiaohui, JI Zhiyun, GAN Min, et al. Application of biomass fuel in iron ore sintering[J]. Journal of Central South University, 2013, 44(5): 7 - 13.

[3] 于韬，张建良，王喆，等. 兰炭作烧结燃料对烧结矿质量的影响[J]. 烧结球团，2014，39(5)：5 - 9.
YU Tao, ZHANG Jianliang, WANG Zhe, et al. Influence of semi-coke used as sintering fuel on sinter quality[J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(5): 5 - 9.

[4] 李硕，朱子宗，徐军. 兰炭改性及配煤炼焦优化[J]. 钢铁，2012，47(8)：17 - 21.
LI Shuo, ZHU Zizong, XU Jun, et al. Optimization and modification of semi-coke blending for conventional coke-making[J]. Iron & Steel, 2012, 47(8): 17 - 21.

[5] 杨双平，郭拴全，张攀辉，等. 兰炭作烧结燃料对烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁，2016，51(9)：6 - 11.
YANG Shuangping, GUO Shuanquan, ZHANG Panhui, et al. Influence of semi-coke used as sintering fuel on metallurgical properties of sinter[J]. Iron & Steel, 2016, 51(9): 6 - 11.

[6] 王建鹏，张颖，惠宏智，等. 陕钢集团烧结配加兰炭的工业试验[J]. 烧结球团，2015，40(5)：5 - 9.
WANG Jianpeng, ZHANG Yin, HUI Hongzhi, et al. Industrial test of sintering proportioned with semi-coke in Shanxi iron and steel group[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(5): 5 - 9.

[7] LUO Y H, ZHU D Q, PAN J, et al. Utilisation of semi-coke as by-product derived from coal-based direct reduction process in iron ore sintering[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 43(8): 628 - 634.

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

[8] 王润博,张建良,王喆,等. 兰炭替代焦粉对烧结过程影响研究[J]. 钢铁钒钛,2015,36(2):6-11.
WANG Runbo,ZHANG Jianliang,WANG Zhe,et al. Influence of semicharcoal substituted for coke breeze on sintering performance[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2015,36(2):6-11.

[9] 延雨雨. 兰炭作为烧结燃料的应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
YAN Yuyu. Application of blue carbon as sintering fuel[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2016.

[10] HAN J,HUANG Z,QIN L,et al. Refused derived fuel from municipal solid waste used as an alternative fuel during the iron ore sinter process[J]. Journal of Cleaner Production,2021,278:123594.

[11] CHENG Z,YANG J,ZHOU L,et al. Sinter strength evaluation using process parameters under different conditions in iron ore sintering process[J]. Applied Thermal Engineering,2016,105:894-904.

[12] OOI T C,THOMPSON D,ANDERSON D R. The effect of charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistent organic pollutants[J]. Combustion and Flame,2011,158(5):979-987.

[13] YANG W,CHOI S,CHOI E S,et al. Combustion characteristics in an iron ore sintering bed:evaluation of fuel substitution[J]. Combustion and Flame,2006,145(3):447-463.

[14] 王素平,毕学工,翁得明. 煤粉粒度组成对武钢烧结矿铁酸钙生成的影响[J]. 烧结球团,2008,33(2):4-7.
WANG Suping,BI Xuegong,WENG Deming,et al. Influence of fuel size on calcium ferrite generating during sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2008,33(2):4-7.

[15] 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):6-11.
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):6-11.

[16] 刘燊辉,白凯凯,倪桂虎,等. 燃料粒度对铁矿烧结的影响研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):6-11.
LIU Shenhui,BAI Kaikai,NI Guihu,et al. Study on influence of fuel size on iron ore sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):6-11.

(上接第58页)

[23] 杜洪缙,朱德庆,杨聪聪,等. 高压辊磨和球磨预处理强化铬铁矿球团制备的研究[J]. 烧结球团,2013,38(6):33-37.
DU Hongjin,ZHU Deqing,YANG Congcong,et al. Study on high pressure roller grinding and ball milling pretreatment for intensification of chromite pellet preparation[J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(6):33-37.

[24] 李亚飞,杨涛,刘在春,等. 高压辊磨对含硫酸渣超细铁精粉生球性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2022,34(7):639-647.
LI Yafei,YANG Tao,LIU Zaichun,et al. Effect of high pressure roller grinding on green pellets properties of ultra-fine iron concentrate containing pyrite cinder[J]. Journal of Iron and Steel Research,2022,34(7):639-647.

[25] FAN Jianjun,QIU Guanzhou,JIANG Tao,et al. Mechanism of high pressure roll grinding on compression strength of oxidized hematite pellets[J]. Journal of Central South University,2012(19):2611-2619.

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