改质兰炭代替部分焦粉对铁矿烧结的影响

韩凤光，李和平，谢朝晖
（宝钢股份中央研究院 梅钢技术中心，江苏 南京 210039）

摘要：兰炭作为一种新型固体燃料，用于烧结生产时存在挥发分高、固定碳含量低等不足，对兰炭进行改质后可弥补上述不足。本研究通过基础性能测试与烧结杯试试验，系统地评估了改质兰炭代替部分焦粉在烧结应用的可行性。结果表明，改质兰炭的粒度分布以大于 5 mm 为主，占比达 46.64%，固定碳质量分数为 80.97%，挥发分为 7.32%，发热量为 27 021.81 J/g，显示出优良的燃烧特性。烧结杯试验表明：当改质兰炭替代焦粉的配比控制在 20% 以内时，烧结矿的转鼓强度与利用系数均出现小幅提升，成品率虽有轻微下降，但整体品质仍维持在可接受范围内；而当替代配比上升至 30% 以上时，则观察到烧结矿质量的显著恶化。值得注意的是，随着改质兰炭替代配比的增加，烧结矿的还原性能呈现增强趋势。基于此，建议在实际操作中合理调控改质兰炭的粒度组成，特别是减少小于 1 mm 颗粒的比例，同时适当调整燃料配比以确保烧结矿的品质。

关键词：改质兰炭；烧结性能；焦粉；转鼓强度
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0051－07
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.046

Effect of modified semi coke replacing part of coke powder on iron ore sintering

HAN Fengguang, LI Heping, XIE Zhaohui
(Meigang Technology Center of Baosteel Central Research Institute, Nanjing 210039, Jiangsu, China)

Abstract: As a new type of solid fuel, semi coke has such shortcomings as high volatile matter and low fixed carbon content when it is used in sintering production. Modification of semi coke can compensate for the above shortcomings. The feasibility of replacing part of the coke powder in sintering by modifying semi coke is systematically evaluated through basic performance tests and sintering cup tests. Results show that the particle size distribution of modified semi coke is mainly greater than 5 mm, accounting for 46.64%, with a fixed carbon mass fraction of 80.97%, volatile matter of 7.32%, and a calorific value of 27 021.81 J/g, demonstrating excellent combustion characteristics. Sintering cup tests show that when the proportion of modified semi coke replacing coke powder is controlled within 20%, both the drum strength and utilization coefficient of the sinter show slight improvements. Although the yield slightly decreases, the overall quality remains within an acceptable range; when the substitution ratio rises above 30%, a significant deterioration in sinter quality is observed. It is worth noting that as the proportion of modified semi coke substitution increases, the reducing performance of sinter shows an improving trend. Based on this, it is recommended to reasonably regulate the particle size composition of modified semi coke in practice, especially reducing the proportion of particles smaller than 1 mm, and appropriately adjusting the fuel mix to ensure the quality of the sinter.

Key words: modified semi coke; sintering properties; coke powder; drum strength

收稿日期：2025－07－18；**修回日期**：2025－12－23
基金项目：中国宝武低碳冶金创新基金支助项目(BWLCF202301)
作者简介：韩凤光(1979—)，男，博士，高级工程师，从事铁矿石烧结新技术、新方法等方面的研究。
通信作者：李和平(1971—)，男，博士，正高级工程师，从事铁矿石烧结新技术及冶金绿色减排等方面研究。

兰炭，作为一种新型固体燃料，又称半焦，近年来受到广泛关注。它主要产自中国西部地区，尤其是陕西省神木市。兰炭由弱黏结性煤在750 ℃以下经过一系列物理化学过程，如干燥、脱气、软化、熔融、流动、膨胀和固化而成，最终形成浅黑色的多孔块状物[1-2]。由于其独特的性质，兰炭在电石、铁合金、硅铁和碳化硅等多个行业中得到了广泛应用。兰炭的优势显著，其价格相对较低，且具有低硫、高固定碳含量和高发热值等优点。这些特性使其在工业生产中成为一种具有经济效益的替代燃料[3-4]。此外，相比于传统焦粉，兰炭的软化温度和流动温度更低，能够在烧结过程中更容易生成液相并促进黏结，从而改善烧结矿的质量。这一特性使得烧结燃料在较低的兰炭配比条件下，依然能够有效提升烧结矿的整体性能[5-6]。国内部分钢铁企业和高校研究院所对兰炭替代传统燃料进行了研究。兰炭替代焦粉进行烧结会对利用系数产生负面影响，直接降低烧结矿产量，且随着兰炭替代比例的增加，烧结矿质量下降。然而，当兰炭加入量为30%、碱度为1.82时，烧结矿的软化区间最窄，软化性能最佳[7]。安阳钢铁永通公司实践表明，随着兰炭配比的增加，烧结矿产量、燃耗、转鼓指数、筛分指数及粒度组成指标均会受到影响，但通过控制燃料粒度、提高料层厚度、提高点火温度和采取兰炭、焦粉分加等措施，这些指标均得到了改善。当兰炭配比控制在30%以下时，能够满足炼铁对烧结矿产质量的要求。陕西汉中钢铁的生产经验表明，适宜的烧结用兰炭粒度上限宜控制在3 mm以内，其中<3 mm粒级占比保持在75%左右为宜；同时需严防兰炭过粉碎，尽量减少<1 mm粒级的比例。烧结配加兰炭时，应适当提高燃料配比和烧结机点火温度，兰炭替代比例在30%以内对烧结矿产量、强度、粒度及冶金性能均无显著影响。新疆昆玉钢铁的使用情况表明，兰炭可以有效降低烧结矿燃料成本1.48元/t，其使用配比可以达到40%以上，对烧结矿质量无明显影响，并在适宜的配比下有利于提高烧结矿产量[8-11]。

综上所述，适量配加兰炭可优化烧结矿性能并降本增效。目前，部分钢铁企业出于经济性的考量，已将兰炭作为固体燃料的一部分应用于生产中，取得了显著的经济效益。但实际生产应用中，受其高挥发分、低固定碳制约。鉴于此，本研究采用改质兰炭替代部分焦粉开展系统试验，旨在攻克应用瓶颈，为兰炭在铁矿烧结中的高效利用提供技术支撑。

1 试验原料及方法

1.1 改质兰炭性质

改质兰炭分为工艺源头改质和后处理改质两类。试验所用改质兰炭为通过工艺源头进行改质。即通过原料优选、气氛控制和精准控温等措施，提升其固定碳含量及燃烧性能，同时降低灰分、硫分和挥发分。改质兰炭所用的原料为高钙、低硅铝的煤种，从源头降低灰分和磨蚀性；同时采用纯氧或特定气氛干馏，减少含氮量，提高反应活性，以及将传统600~800 ℃的干馏温度控制在610 ℃左右的窄区间，优化孔隙结构和挥发分。

1.1.1 燃烧性质

在固体燃料的研究中，焦粉、煤粉及改质兰炭的燃烧性质是影响其应用效果的重要指标。为了系统分析不同燃料的性能，本研究对某钢铁企业的焦粉、煤粉和兰炭进行了燃烧性质检测，结果如表1所示。由表1可知，改质兰炭的固定碳质量分数为80.97%，略低于焦粉的81.94%，但高于煤粉的78.58%，也高于普通兰炭78%左右的固定碳。此外，改质兰炭的挥发分为7.32%，显著高于焦粉的1.82%，但低于普通兰炭10%左右的挥发分。高挥发分的固体燃料通常会导致较快的燃烧速度，这可能会缩短烧结过程中高温保持的时间，从而对烧结矿的质量产生不利影响。在发热值方面，改质兰炭的发热值为27 021.81 J/g，

表1 燃料燃烧性质指标比较

Table 1 Comparison of combustion properties of fuels

燃料名称	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%	发热值/(J·g^{-1})
焦粉	15.38	1.82	81.94	27 944.58
煤粉(无烟煤)	11.56	5.91	78.58	29 829.18
改质兰炭	9.46	7.32	80.97	27 021.81

略低于焦粉的 27 944.58 J/g，相当于焦粉热量的 96.7%。这一结果表明，尽管改质兰炭在燃烧性能上存在某些劣势，但其潜在的经济效益依然值得关注。

为了深入理解不同类型燃料的特性，对各类燃料的灰分成分进行了分析，结果见表 2。由表 2 可知，改质兰炭的灰分成分在 SiO_2、TFe、Al_2O_3 和 CaO 等组分上均表现出与焦粉和煤粉不同的特征。这种成分差异可能会在实际应用中影响燃料的燃烧效率及其对环境的影响。

表 2　燃料的灰分成分(质量分数)

Table 2　Ash composition of fuels　　%

燃料名称	SiO_2	TFe	Al_2O_3	CaO
焦粉	46.23	10.88	28.12	5.72
改质兰炭	36.55	6.84	18.21	27.39

1.1.2　粒度分布

试验用燃料粒度分布情况如表 3 所示。由表 3 可知，改质兰炭的粒度相对较粗。在粒度大于 5 mm 的部分，改质兰炭的占比达到了 46.64%；而在大于 3 mm 部分，改质兰炭的占比更是高达 72.73%。相比之下，焦粉的粒度则主要集中在较小的范围，其粒度小于 3 mm 的占比超过了 75%。这种明显的粒度差异可能会影响两种燃料在炉内的混合性、燃烧速率及反应热效率等关键性能参数。

1.2　试验方案

本试验旨在探讨改质兰炭与现用烧结焦粉的替代关系，具体通过逐步增加改质兰炭的替代比例，以评估其对烧结矿质量指标的影响。试验设定改质兰炭替代焦粉的配比为 10%，具体试验方案如表 4 所示。为确保试验结果的准确性，考虑到改质兰炭的粒度较粗，采用对焦粉粒度的参考标准，对改质兰炭进行严格筛分，以确保其粒径在≤3 mm 的范围内占比不少于 75%。

1.3　试验条件

试验所用原料均来源于某钢铁企业炼铁厂，原料配比如表5所示。试验烧结料层为720 mm，

表 3　燃料粒度分布情况 (质量分数)

Table 3　Particle size distribution of fuels　　%

燃料名称	<0.5 mm	[0.5,1] mm	(1,3] mm	(3,5] mm	(5,8] mm	>8 mm
改质兰炭	1.80	5.06	20.40	26.10	23.27	23.37
焦粉	23.04	23.23	29.37	19.92	4.25	0.19

表 4　试验方案燃料配比(质量分数)

Table 4　Test plan of fuel rate　　%

改质兰炭替代配比	焦粉配比	改质兰炭配比	改质兰炭替代配比	焦粉配比	改质兰炭配比
0(基准)	5.0	0	40	3.0	2.0
10	4.5	0.5	50	2.5	2.5
20	4.0	1.0	60	2.0	3.0
30	3.5	1.5			

表 5　烧结原料主要化学成分及烧损 (质量分数)

Table 5　Main chemical compositions and losses on ignition of sintering raw materials　　%

烧结原料	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	H_2O	烧损
梅精矿	55.63	7.25	3.63	1.14	2.42	0.10	4.98	5.11
混匀矿	58.66	5.20	0.27	0.07	2.60	0.07	2.56	6.86
返矿	54.67	6.87	11.46	1.48	2.54	0.10	0.00	0.00
云屑	0.25	0.08	29.63	22.24	0.88	0.01	1.40	46.73
生石灰	0.40	3.11	79.43	1.44	0.95	0.03	0.00	13.70
灰石	0.26	2.23	53.18	0.61	0.73	0.01	1.00	42.67
焦粉	0.00	6.85	0.59	0.11	4.37	0.06	0.62	85.91

点火时间为 90 s，点火和冷却负压为 8 kPa，烧结负压为 16.5 kPa，烧结冷却至 250 ℃时倒料，再进行整粒筛分。最后对烧结矿质量的各项指标进行检测。烧结杯试验的各项参数见表 6。烧结过程中，烧结矿目标碱度为 1.85，w(MgO)为 1.4%，燃料配比为 5.0%，外配返矿为 20%~25%。

表 6 烧结杯试验参数

Table 6 Sintering pot test parameters

料层厚度/mm	点火负压/kPa	点火时间/s	混合料水分/%	烧结负压/kPa	冷却温度/℃
720	8.0	120	6.80	16.5	250

2 试验结果及讨论

根据前述的试验条件和方案，进行了一系列烧结杯试验，以评估改质兰炭不同替代配比对烧结矿质量的影响。其中改质兰炭的替代配比分别设定为 10%、20%、30%、40%、50%和 60%。

2.1 成品率的影响

改质兰炭不同焦粉替代配比对烧结矿成品率的影响如图 1 所示。由图 1 可知，当改质兰炭替代配比不超过 20%时，成品率变化不显著，基准组的成品率为 67.26%，在替代配比达到 20%时，仅轻微下降至 66.64%。然而，一旦改质兰炭替代配比超过 20%，成品率显著下降，尤其是在替代配比达到 50%时，成品率降至 61.36%，相较基准组下降约 5.9 个百分点。这表明，改质兰炭在焦粉中替代配比的增加可能会对烧结矿的整体成品率产生负面影响。改质兰炭的灰分含量要高于焦粉，随着替代配比的增加，灰分总量提高可能导致烧结过程中熔融物质不足，使得黏结相减少。黏结相是促使铁矿颗粒间结合的关键媒介，其数量减少会直接削弱颗粒间的黏结强度，从而降低成品率。其次，改质兰炭在烧结高温条件下，挥发分的快速释放易造成内部气体压力骤增，形成气泡甚至微裂纹，破坏已形成的烧结结构，进而导致成品率下降。此外，改质兰炭的固定碳含量和发热值均低于焦粉，若改质兰炭替代配比过高，则整体热量输入不足，烧结温度难以达到理想水平，从而抑制了足够液相的形成，影响烧结矿的成品率。

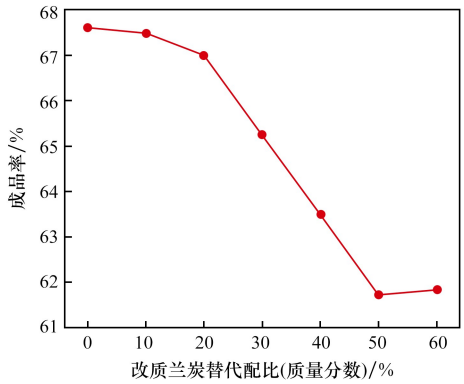


图 1 改质兰炭不同焦粉替代配比对成品率的影响

Fig. 1 Effect of different coke breeze replacement ratios by modified semi-coke on yield

2.2 转鼓强度的影响

改质兰炭不同焦粉替代配比对转鼓强度的影响如图 2 所示。由图 2 可以看出，随着改质兰炭替代焦粉配比的增加，烧结矿转鼓强度均得到不同程度改善。当兰炭对焦粉的替代配比达到 40%后，转鼓强度从基准组的 61.87%提高到 62.93%，提高了 1.06 个百分点。当进一步提高兰炭替代焦粉的配比至 60%时，转鼓强度有所下降至 62.4%，但仍比基准组好。改质兰炭的灰分中 CaO 含量高，SiO_2含量低，提高兰炭替代配比，相当于向烧结体系中引入了更多的碱性组分，从而轻微地提高了烧结矿的碱度。在适度的碱度范围(1.8~2.1)内，碱度的提高有利于转鼓强度的提高，碱度增加导致更多的磁铁矿受铁酸钙熔蚀，以熔蚀状和铁酸钙交织在一起，呈网状结构，这种熔蚀结构使烧结矿常温强度进一步提高[13-14]。

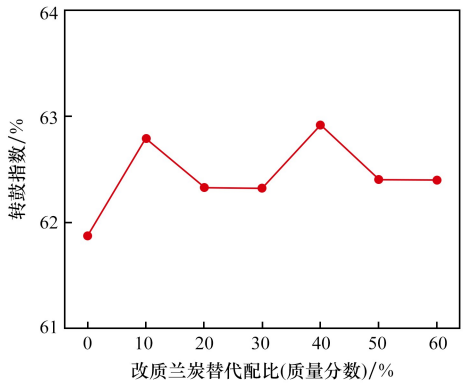


图 2 改质兰炭不同焦粉替代配比对转鼓强度的影响

Fig. 2 Effect of different coke breeze replacement ratios by modified semi-coke on tumble strength

2.3　利用系数的影响

改质兰炭不同焦粉替代配比对利用系数的影响如图 3 所示。由图 3 可以看出，随着改质兰炭替代焦粉配比增加，烧结矿利用系数呈先升后降趋势。当改质兰炭对焦粉的替代配比从 0 提至 20%时，烧结矿利用系数改善明显，从基准组的 1.891 t/(m^2·h)提高到 1.995 t/(m^2·h)，提高了 0.104 t/(m^2·h)。当进一步提高兰炭替代焦粉的配比至 60%时，利用系数随之下降至 1.776 t/(m^2·h)。适量替代(≤20%)时，兰炭挥发分快速燃烧可补偿热值不足，维持点火温度并促进铁酸钙生成；同时其较大粒度可优化混合料透气性，加快烧结速度，从而提高利用系数。但替代率过高(>20%)时，总热值不足导致烧结温度不够，且过量兰炭颗粒堆积会恶化料层透气性与热传导，致使烧结矿强度及成品率下降，烧结速度减缓，利用系数降低。

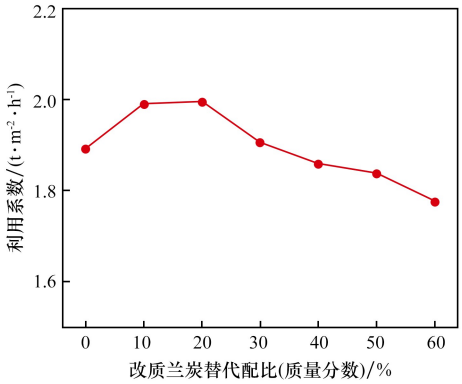


图 3　改质兰炭不同焦粉替代配比对利用系数的影响

Fig. 3　Effect of different coke breeze replacement ratios by modified semi-coke on sinter productivity

2.4　还原度的影响

改质兰炭不同焦粉替代配比对还原度的影响如图 4 所示。由图 4 可知，配加改质兰炭后对烧结矿的还原度指数有改善的趋势。由于改质兰炭固定碳含量较低，当按质量百分比等量替代焦粉时，总体的固定碳量会降低。固定碳量的降低会导致烧结矿中 FeO 的含量下降，从而使得还原过程更加容易，还原气氛的增强有利于 CO 还原剂更有效地夺取与铁结合的氧，从而改善还原效率，提高烧结矿的还原度指数。

2.5　矿相结构的影响

缩取出改质兰炭替代配比分别为0、20%、30%和 50%的烧结矿样品，并筛选 0.5～2.0 mm 粒度进行制样，用树脂镶嵌后，进行磨样、抛光，最终制成光片。将样品置于偏光显微镜下观察分析，采用人工计点法统计各组分的比例，要求有效视域数不少于 500 个。改质兰炭不同焦粉替代配比对烧结矿矿相结构的影响分别如图 5 与表 7 所示。

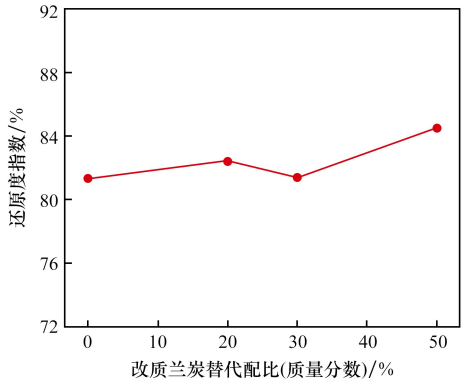
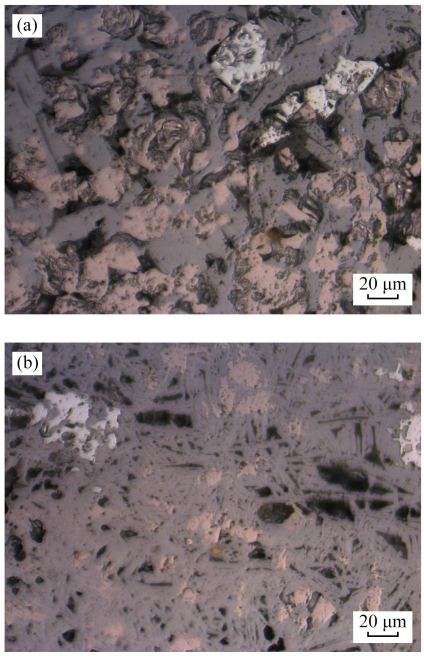


图 4　改质兰炭不同焦粉替代配比对还原度的影响

Fig. 4　Effect of different coke breeze replacement ratios by modified semi-coke on reducibility

由表 7 可知，随着改质兰炭替代 配比的提高，烧结矿中赤铁矿与铁酸钙含量均增加。此外，由图5可知，当替代配比达到30%时，针状铁酸钙



改质兰炭不同焦粉替代配比：(a) 0；(b) 30%

图 5　改质兰炭不同焦粉替代配比对烧结矿矿相结构的影响

Fig. 5　Effect of different coke breeze replacement ratios by modified semi-coke on sinter mineralogical structure

表7 改质兰炭不同焦粉替代配比烧结矿矿物组成
(质量分数)

Table 7 Mineral composition of sinters under various modified semi-coke replacement ratios %

改质兰炭替代配比/%	磁铁矿	赤铁矿	铁酸钙	硅酸盐+玻璃相	其他
0(基准)	36.1	25.0	32.1	4.8	2.0
20	34.0	25.2	33.2	5.1	2.5
30	32.8	26.2	33.3	4.6	3.1
50	34.6	25.4	32.5	4.9	2.6

发育良好，孔隙率降低，结构致密，强度提升。这是因为改质兰炭反应活性高，燃烧快且充分，增强了料层局部氧化性气氛，促进了磁铁矿向赤铁矿转化(铁酸钙形成的物质基础)；同时减少不完全燃烧或局部还原形成的低熔点脆性玻璃相，优化了烧结矿性能。此外，其燃烧速度快，气体高效逸出，减少大气孔，促使孔隙细小均匀，进一步提升了烧结矿整体致密性。

3 结 论

(1) 改质兰炭粒度偏粗(>5 mm 占46.64%)，固定碳质量分数高(80.97%)、挥发分适中(7.32%)，热值达27 021.81 J/g，是一种高效潜力燃料。

(2) 当改质兰炭替代焦粉的配比不超过20%时，烧结矿的转鼓强度、利用系数提升，成品率略降但综合质量与基准组相当，可兼顾产质量并提升还原度，利于冶金性能优化。

(3) 当改质兰炭替代配比达到或超过30%时，烧结矿质量明显劣化。建议适当增补燃料热值，并严控<1 mm 粒级比例，以减轻负面影响。

(4) 改质兰炭作为一种新型的燃料，在烧结过程中展现出良好的应用前景。通过合理控制替代配比和优化工艺参数，可以充分发挥兰炭的优势，提高烧结矿的产质量。未来的研究应进一步探索不同粒度分布对烧结效果的影响，以及如何通过工艺优化实现更高配比的改质兰炭替代，以推动铁矿烧结低碳发展。

(5) 随着改质兰炭替代配比的增加，烧结矿矿相有改善趋势，赤铁矿和铁酸钙含量略有增加。

参考文献：

[1] 贺晋伟. 兰炭规模化清洁化生产控制系统设计及炭化炉预测模型研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014:4-12.
HE Jinwei. Design on control system of scale and clean semi coke produce and research on prediction model of charring coke[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2014:4-12.

[2] 冯艳春. 末煤生产兰炭新工艺关键问题研究[D]. 大连:大连理工大学,2021:2-8.
FENG Yanchun. Study on the key problems of a novel blue-coke production technology using slack coal[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2021:2-8.

[3] 李建飞. 榆林市载能工业集中区环保对策[J]. 甘肃科技,2010,26(7):12-13.
LI Jianfei. The environmental measures of industrial clusters containing in Yulin[J]. Gansu Science and Technology,2010,26(7):12-13.

[4] 鲁慧慧,张朝晖,刘佰龙,等. 利用冶金焦粉和硅石粉生产硅铁合金的研究[J]. 金属材料与冶金工程,2012,40(5):33-37.
LU Huihui, ZHANG Zhaohui, LIU Bailong, et al. Research on the silicon ferroalloys produced by metallurgical coke powder and silica powder[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2012, 40(5): 33-37.

[5] 蒋大均. 燃料结构对烧结性能及综合效果的影响[J]. 钢铁,2020,55(2):31-41.
JIANG Dajun. Influence of fuel structure on sintering character and comprehensive effect[J]. Iron and Steel, 2020,55(2):31-41.

[6] 韩奎华,武鹏魁,刘文洋,等. 兰炭与秸秆混合燃料燃烧污染物排放和灰熔融性试验[J]. 洁净煤技术,2023,29(1):108-116.
HAN Kuihua, WU Pengkui, LIU Wenyang, et al. Experimental study on combustion pollutant emission and ash fusibility of blended fuel of semi-coke and straw[J]. Clean Coal Technology,2023,29(1):108-116.

[7] 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):10-13.
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):10-13.

[8] 王莹,王景甫,郭莲莲. 烧结矿与固体燃料混合物的动力学特性[J]. 化工进展,2012,31(增刊):104-108.
WANG Ying, WANG Jingfu, GUO Lianlian. The sinter

and dynamic properties of solid fuel mixture[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(S2):104 – 108.

[9] 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):16 – 21.
YANG Shuangping, GUO Shuanquan, ZHANG Panhui, et al. Influence of semi-coke used as sintering fuel on metallurgical properties of sinter[J]. Iron and Steel, 2016,51(9):16 – 21.

[10] 郗小亮,马杰,巨建涛,等. 兰炭作烧结燃料对生产小球团烧结矿的影响[J]. 烧结球团,2017,42(1):9 – 13.
XI Xiaoliang, MA Jie, JU Jiantao, et al. Influence of semi-coke used as sintering fuel on micropellet sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(1):9 – 13.

[11] 蒋大军,杜斯宏,何木光,等. 兰炭用作燃料对烧结性能影响的试验研究[J]. 冶金能源,2017,36(6):16 – 20.
JIANG Dajun, DU Sihong, HE Muguang, et al. Experimental research on sintering performance influence of blue carbon as a new type of fuel[J]. Energy for Metallurgical Industry,2017,36(6):16 – 20.

[12] 张华,张建良,徐润生,等. 兰炭与烟煤混合燃烧特性及机制分析[J]. 中国冶金,2016,26(2):7 – 12.
ZHANG Hua, ZHANG Jianliang, XU Runsheng, et al. Combustion characteristics and mechanism analysis of blended coal of semi coke and bituminous coal[J]. China Metallurgy,2016,26(2):7 – 12.

[13] 客海滨,张玉柱,王丽丽,等. 碱度对石钢烧结矿质量的影响[J]. 中国冶金,2007,17(3):21 – 24.
KE Haibin, ZHANG Yuzhu, WANG Lili, et al. Effect of babicity on sinter quality in Shigang[J]. China Metallurgy,2007,17(3):21 – 24.

[14] 伍英. 宝钢烧结用兰炭替代技术的研究[J]. 烧结球团,2019,44(4):18 – 22.
WU Ying. Study on semi-coke substitution technology for Baosteel sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4):18 – 22.

(上接第 50 页)

YANG Xuan, NIE Rongen, YU Hongbing, et al. Design of optimized batching of iron ore sintering and prediction model of chemical composition of sinter[J]. Hebei Metallurgy,2025(4):1 – 7.

[19] 唐佳润,刘月明,张福明,等. 烧结矿 FeO 含量预测技术的探讨[J]. 烧结球团,2025,50(1):21 – 30.
TANG Jiarun, LIU Yueming, ZHANG Fuming, et al. Discussion on prediction technology of FeO content in sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(1):21 – 30.

[20] KRZYWINSKI M, ALTMAN N. Visualizing samples with box plots[J]. Nature Methods,2014,11(2):119 – 120.

[21] HSIEH L H. Effect of raw material composition on the sintering properties[J]. ISIJ International,2005,45(4):551 – 559.

[22] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社,2016.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha:Central South University Press, 2016.

[23] RAN M, TANG Z P, CHEN Y H, et al. Early warning of systemic risk in stock market based on EEMD-LSTM [J]. PLoS One,2024,19(5):e0300741.

[24] 蔡子龙,李嘉棋,沈赋,等. 基于 SDAE-EEMD 降噪分解与改进 Informer-BiLSTM 模型的电力短期负荷预测方法[J]. 电网技术,2025,49(12):5009 – 5018.
CAI Zilong, LI Jiaqi, SHEN Fu, et al. A short-term power load forecasting method based on SDAE-EEMD denoising decomposition and an improved informer-BiLSTM model [J]. Power System Technology, 2025, 49(12):5009 – 5018.

[25] LI G N, HU Y P. An enhanced PCA-based chiller sensor fault detection method using ensemble empirical mode decomposition based denoising[J]. Energy and Buildings,2019,183:311 – 324.

[26] MARTÍN J, SÁEZ J A, CORCHADO E. Tackling the problem of noisy IoT sensor data in smart agriculture: Regression noise filters for enhanced evapotranspiration prediction[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 237:121608.

[27] 张芷玥,郑浩然,漆一宁,等. 基于时变效应:能量熵降噪的 BiLSTM 组合混凝土坝变形预测模型[J]. 水电能源科学,2025,43(8):147 – 151.
ZHANG Zhiyue, ZHENG Haoran, QI Yining, et al. BiLSTM composite concrete dam deformation prediction model based on time-varying effect-energy entropy noise reduction[J]. Water Resources and Power,2025,43(8):147 – 151.