兰炭在高炉中的燃烧率以及添加兰炭后的经济效益计算

朱秋平[1]，王申洋[2]，曹 成[1]，张建良[2]，孙烁超[1]，徐润生[2]
（1. 抚顺新钢铁有限责任公司，辽宁 抚顺 113001；2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：为了确定兰炭在高炉内部的燃烧率以及添加兰炭后钢铁企业是否具有经济效益，本文利用新型高炉喷煤燃烧模拟试验装置检测兰炭在高炉内的燃烧率，利用能质平衡计算添加兰炭对高炉燃料成本及冶炼成本的影响。试验结果表明，兰炭在高炉内的平均燃烧率为 64.03%，位于烟煤和无烟煤之间；结合现场的原燃料价格计算可得，当兰炭价格范围在 0.80～1.21 元/kg 时，添加兰炭可以降低高炉燃料成本和冶炼成本。研究结果可为钢铁企业选择并喷吹兰炭提供理论指导。

关键词：高炉；喷煤；兰炭；燃烧性；经济效益；性价比评价
中图分类号：TF538.63 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0238－09
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.022

Combustion rate of semi-coke in blast furnaces and economic benefits calculation after its addition

ZHU Qiuping[1], WANG Shenyang[2], CAO Cheng[1], ZHANG Jianliang[2], SUN Shuochao[1], XU Runsheng[2]
(1. Fushun New Iron & Steel Co., Ltd., Fushun 113001, Liaoning, China; 2. School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to determine the combustion rate of semi-coke inside the blast furnace and whether the steel enterprises have economic benefits after adding semi-coke, in this study a new-type simulation experimental device for blast furnace coal injection combustion was used to detect the combustion rate of semi-coke in the blast furnace and additionally the energy and quality balance calculation was used to access the impact of adding semi-coke on the fuel cost and smelting cost of the blast furnace. The experimental results show that the average combustion rate of semi-coke in the blast furnace is 64.03%, which is between bituminous coal and anthracite. Based on the calculation of on-site raw materials and fuel prices, it is obtained that when the price of semi-coke ranges from 0.80 and 1.21 Yuan/kg, adding semi-coke can reduce the fuel cost and smelting cost of blast furnaces. The findings of this study can provide theoretical guidance for iron and steel enterprises in selecting and injecting semi-coke.

Key words: blast furnace; coal injection; semi-coke; combustibility; economic benefits; cost-effectiveness evaluation

兰炭在高炉中的应用是钢铁行业实现节能减排和资源高效利用的一个重要方向。它作为低阶煤中低温干馏后的固体产物，因其低灰、低硫、低磷且高固定碳的特性，正逐渐成为高炉喷吹燃料中替代传统煤粉的研究热点。兰炭在高炉应用过程中也遇到了一些挑战，包括兰炭可磨性较差、燃烧性和反应性波动大、影响高炉理论燃烧温度等[1-4]。

收稿日期：2025－09－28；**修回日期**：2025－11－19
基金项目：国家自然科学基金区域联合重点基金资助项目(U24A20102)；国家重点研发计划资助项目(2024YFE0208900)；新疆维吾尔自治区重大科技专项资助项目(2022A01003)；山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”资助项目(202201050201011)
作者简介：朱秋平(1977—)，男，硕士，高级工程师，从事高炉工艺技术优化工作。
通信作者：徐润生(1988—)，男，博士，教授，从事炼铁新技术以及冶金二次资源综合利用与节能减排方面的研究。

为了破解上述制约兰炭应用的难题，大量研究人员从理化特性、加工性能及工艺匹配性等多维度进行了深入探索。在微观结构与反应活性方面，研究发现制备及处理条件对兰炭性能具有决定性影响。许修强等[5]则发现冷却过程对半焦微观结构的破坏是不可逆的，随淬火速率增大，半焦的比表面积和孔体积显著减小，导致其气化反应活性大幅下降。此外，预处理手段也是调控兰炭性能的有效途径，如王华山等[6]发现兰炭中的碱金属具有催化燃烧作用，通过热水洗涤预处理可使燃烧活化能降低约 5.06 kJ/mol。吴浩等[7]通过分析低变质煤热解过程中的官能团演变，证实提质过程增强了半焦的疏水性与热稳定性，其高反应性有助于提升高炉内煤粉的燃尽率。张立国等[8]考察了干馏温度对半焦加工性能的影响，发现其可磨性在 540 ℃时达到峰值，并指出需通过优化热解参数来改善其破碎特征。在燃烧性能优化方面，王雅军等[9]通过实验验证，由于低温热解半焦保留了部分挥发分，其点火性能优于完全焦化产物。张伟光等[10]通过建立物理化学模型证明，褐煤热解转化为半焦后，热值显著提高，水分和挥发分得到优化，能有效提高喷吹煤粉的整体燃烧率。何选明等[11]引入主成分分析法，证实梯级转化技术可显著改善半焦的燃烧性与流动性，实现半焦性能与高炉喷吹要求的深度匹配。从宏观工艺与经济效益角度看，兰炭的应用展现出巨大的潜力。宁晓钧等[12]分析了 LFC、COED、SJ 等典型工艺，评价并证实了兰炭作为新型碳素材料在低磷、低硫等方面的性能优势，并提出混喷兰炭可有效改善喷吹性能。蔡文淼等[13]的冶金性能试验进一步验证了半焦替代昂贵无烟煤的技术可行性，认为这在保证高炉平稳运行的同时，能显著降低炼铁成本。

为了在实际生产中更合理的使用兰炭，以实现节能减排的目的，本文重点研究了兰炭在高炉内的燃烧率以及兰炭的添加量与兰炭的价格对钢铁企业经济效益的影响。

1　试　验

1.1　材料制备与分析

试验选用抚顺新钢铁常用 7 种燃料，包括 5 种无烟煤、1 种烟煤以及 1 种兰炭。在试验之前，首先将 7 种燃料在 105 ℃的烘干箱中烘干 2 h，后用磨煤机将样品破碎，选用 0.075 μm 筛子将磨碎后的样品进行筛分，收集筛下的样品置于密封袋中室温保存留作备用。

抚顺新钢铁 7 种燃料的工业分析和元素分析结果如表 1 所示。通过氧弹量热仪得到的样品热值结果如表 2 所示。

由表 1 可知，成庄无烟煤和丰达无烟煤的灰分均在 11%～12%，昔阳无烟煤的灰分质量分数为 10.64%，灰分在 5 种无烟煤中偏高，但都满足高炉喷吹要求的灰分指标（＜12%）。大部分无烟煤挥发份质量分数在 8%～11%，较为适合用于高炉喷吹，其中成庄无烟煤挥发份最低。

由表 2 可知，抚顺新钢铁常用煤粉的发热量属于正常喷吹煤的发热量水平，已经达到了高炉喷吹煤粉发热量的要求，并且发热值不同于有效发热值，有效发热值才决定了煤在高炉中能够真正放出的热量。

1.2　新型高炉喷煤燃烧模拟试验装置

考虑到在高炉生产过程中，风口回旋区内气体流速很快，同时内部温度也很高，喷吹进高炉的煤粉需要在极短的时间内进行复杂的化学反应。为了在实验室中深入研究煤粉在风口回旋区的燃烧状态开发了用于模拟高炉内煤粉燃烧行为的设备，其原理如图 1 所示。

通过此装置可以研究高炉实际工况条件下煤粉与兰炭的燃烧规律。煤粉燃烧装置由高压和低压两个部分组成。第一部分（低压部分）起到加热氧气的作用，可以将氧气温度加热到热风温度。第二部分（高压部分）相当于喷枪，其中氧气压力可达到 4 × 101.325 kPa，在试验过程中起到煤粉载气的作用，将煤粉脉冲式快速送入试验装置的第三部分，风速可达到 220 m/s，煤粉停留时间也可达到 20 ms。第三部分是模拟风口区域，在这里煤粉样品和热风进行混合并燃烧放热最后同时进入高温区域，也就是相当于风口回旋区的第四部分，在这里剩余的碳与氧气进一步燃烧。样品在高温区域燃烧后所产生的废气和灰分，离开第四部分，经过一个耐火纤维过滤垫来收集煤粉样品

表 1 燃料工业分析和元素分析(质量分数)

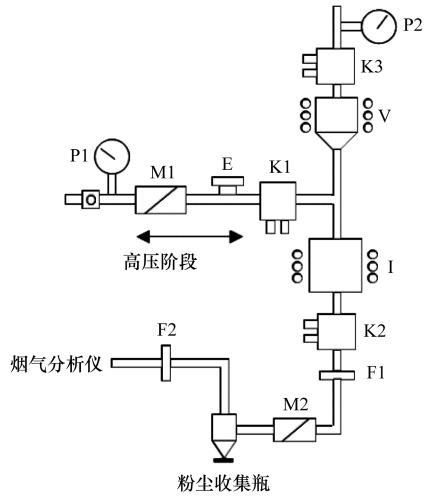
Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of fuels %

燃料种类	工业分析				元素分析				
	固定碳	灰分	挥发分	水分	C	H	O	N	S
潞安无烟煤	78.78	9.79	10.87	0.56	81.62	3.17	3.74	1.07	0.46
成庄无烟煤	80.42	11.73	7.22	0.63	82.05	3.09	0.62	1.14	1.11
昔阳无烟煤	80.31	10.64	8.38	0.67	83.56	3.21	0.54	1.05	1.13
丰达无烟煤	76.98	11.74	10.47	0.81	80.78	3.25	3.84	1.04	0.49
白杨树无烟煤	80.58	9.74	10.50	0.43	85.26	3.40	0.40	1.08	1.09
路局烟煤	59.71	5.52	36.80	3.87	61.26	3.89	14.13	0.91	0.83
兰炭	75.50	11.55	11.68	1.27	76.07	2.21	8.92	0.70	0.32

表 2 燃料高位热值和低位热值

Table 2 Gross calorific value and net calorific value of fuels J

燃料种类	高位热值	低位热值
潞安无烟煤	31 185.44	27 254.57
成庄无烟煤	31 659.49	28 580.06
昔阳无烟煤	32 040.65	28 809.76
丰达无烟煤	30 721.02	26 632.83
白杨树无烟煤	32 343.15	26 783.03
路局烟煤	30 900.93	24 535.81
兰炭	31 118.91	25 203.57



E—样本入口；F—过滤器；I—反应炉(1 500 ℃)；
V—预热炉(1 100 ℃)；K—冷却器；
M—电磁阀；P—压力表。

图 1 新型高炉喷煤燃烧模拟试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the new blast furnace pulverized coal injection combustion simulation test device

燃烧后的残余物，燃烧后的废气通过一个真空取气瓶来收集。

1.3 燃烧率计算过程

煤粉的燃烧率定义为煤中的 C 转化为 CO，CO_2 的百分含量，通过分析废气中的 CO、CO_2、CH_4、O_2和 H_2含量，并结合设备参数(表 3)以及试验过程的其它参数，即可确定出煤粉燃烧过程中不同氧碳原子比条件下的燃烧率，从而找出相应的规律。

$$\frac{m_{O_2,\min}}{m_{Br}} = 2.664 \times C + 7.937 \times H + 0.998 \times S - O \tag{1}$$

$$\frac{m_{O_2,Anlage}}{m_{Br}} = \frac{M_{O_2}}{R \times m_{Br}} \times \left(\frac{P_{ND} \times V_{ND}}{T_{ND}} + \frac{P_{HD} \times V_{HD}}{T_{HD}} + \frac{P_{GM} \times V_{GM}}{T_{GM}} \times 0.21\right) \tag{2}$$

$$\frac{m_{O_2,Uberschubn}}{m_{Br}} = \frac{m_{O_2,Anlage}}{m_{Br}} - \frac{m_{O_2,\min}}{m_{Br}} \tag{3}$$

式中：C、H、O、S 分别为煤中碳、氢、氧、氮的百分含量,%；V 为容量，mL；P 为压力，101 325 Pa；T 为温度，K；ND、HD、GM 分别代表低压区、高压区、气瓶(表 3)；$M_{O_2}=32$，氧气的相对原子质量；$R=8.314$，气体常数，J/(K·mol)；m_{Br}为煤粉质量，g；$m_{O_2,\min}$为单位质量煤完全燃烧耗氧量，g；$m_{O_2,Anlage}$为反应前装置内存在的氧气，g；$m_{O_2,Uberschubn}$为反应后装置内剩余的氧气，g。

$$\frac{m_{CO_2}}{m_{Br}} = 3.664 \times C \tag{4}$$

$$\frac{m_{SO_2}}{m_{Br}} = 1.998 \times S \tag{5}$$

式中：m_{CO_2}为完全燃烧质量为m_{Br}克的煤后产生的

二氧化碳质量，g；m_{SO_2}为完全燃烧质量为m_{Br}克的煤后产生的二氧化硫质量，g。

$$v_i = \frac{V}{m} = \frac{R \times T_N}{M_i \times P_N} \tag{6}$$

$$\varphi_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}/m_{Br}}{V_{CO_2}/m_{Br} + V_{SO_2}/m_{Br} + V_{O_2}/m_{Br}} \tag{7}$$

式中：v_i为标准大气压下单位质量物质 i 所占有的体积物质，m^3；T_N为标准大气压下的温度，K；P_N为标准大气压下的压力，atm；φ_{CO_2}为碳完全燃烧生成二氧化碳时，二氧化碳在集气瓶中的摩尔分数；M_i为物质 i 的分子量；V_{CO_2}、V_{SO_2}、V_{O_2}分别为m_{Br}质量的煤完全气化后产生的 CO_2、SO_2、O_2 气体的体积，mL。

式(8)为煤粉燃烧率(η)的计算公式。

$$\eta = \frac{\chi_{CO_2} + \chi_{CO}}{\varphi_{CO_2}} \tag{8}$$

式中：χ_{CO_2}、χ_{CO}分别为m_{Br}质量的煤完全气化后产生的 CO_2和 CO 气体的百分比,%。

表 3　主要设备参数

Table 3　Main equipment parameters

项目	V/mL	T/K	P/(101 325 Pa)
GM(气瓶)	350	298	0.05
HD(高压区)	85	298	5.00
ND(低压区)	606	1 873	2.60

根据煤粉的元素分析结果，可以计算出煤中的碳原子数。测定煤粉燃烧中参与的氧原子数时，应扣除设备中未参与反应的剩余氧。反应结束后，高压和低压部分仍有一定量的氧气残留，可根据反应结束时设备内的残余压力来确定。

1.4　燃料性价比的计算

目前通用的煤粉性能评价指标多达 10 种以上，主要包括煤粉的基础性能(工业分析、元素分析、发热值、可磨性、灰熔特性)及煤粉的喷吹工艺性能(喷吹性、流动性、着火点、爆炸性、燃烧性、反应性)。理论上对于考察煤粉性能，选取的指标越多越好。但是在实际生产中，较难收集全面的指标数据而且并非所有的指标数据都适合纳入定量化的指标体系中，为此需要对指标进行筛选。高炉喷吹煤粉的主要目的是实现以煤代焦，燃烧放热，降低焦比的作用。煤粉在高炉内的实际发热量是关注的重点，因此煤粉的有效热值是单煤评价体系中最为重要的一个指标。此次模型建立过程中主要考虑了煤粉有效热值与喷吹成本之间的定量关系，由于煤粉的燃烧性与热值对煤焦置换比影响权重的量化尚未可知，因此燃烧性对煤粉性价比的影响在此次建模过程中未加考虑。

煤粉性价比评价模型主要建立在煤粉有效热值和喷吹成本两个指标上。其中有效热值包括 6 个指标，分别包括固定碳含量、挥发分含量、灰分含量、水分、硫含量；喷吹成本包括 3 个指标，即进厂煤价、水分、可磨性。

高炉喷吹煤粉的最优性价比是指煤粉性能与煤粉价格之间最优比，此次建立模型过程中，高炉煤粉性价比从煤粉有效发热值的角度重点考虑。试验测得的发热值并不是煤粉在回旋区燃烧时放出的热量，而是将煤粉的分解热扣除后释放的热量。在此基础上，确定了煤粉在回旋区有效发热值的概念，有效发热值($Q_{有}$)的计算过程如下。

$$Q_{有} = Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4 - Q_5 \tag{9}$$

式中：Q_1 为碳碳不完全燃烧放热量，kJ/kg；Q_2 为水煤气反应耗热，kJ/kg；Q_3 为碳氢化合物分解耗热，kJ/kg；Q_4 为灰分形成炉渣耗热，kJ/kg；Q_5 为脱硫耗热，kJ/kg。

其中：

$$Q_1 = (10 \times C/12) \times 125.4 \tag{10}$$

$$Q_2 = (10 \times C/12 - 10 \times O/16) + (10 \times O/16) \times 283.4 + 5 \times H \times 242.0 - Q_{net} \tag{11}$$

$$Q_3 = (10 \times M/18) \times 124.5 \tag{12}$$

$$Q_4 = V \times 2 \times 420 \times 4.18 \tag{13}$$

$$Q_5 = S \times 4\,600 \tag{14}$$

式中：Q_{net}表示低位发热量，kJ/kg，C 表示碳元素质量分数,%，H 表示氢元素质量分数,%，O 表示氧元素质量分数,%，S 表示硫元素质量分数,%，M 表示空气干燥基水质量分数,%，V 表示灰分质量分数,%。

通过有效发热值，可以建立其与煤粉价格之间的关系，从而得到煤粉实际供给热的性价比指标 K(kJ/元)，其计算见式(15)：

$$K = \frac{Q_{有}}{P_{喷}} \tag{15}$$

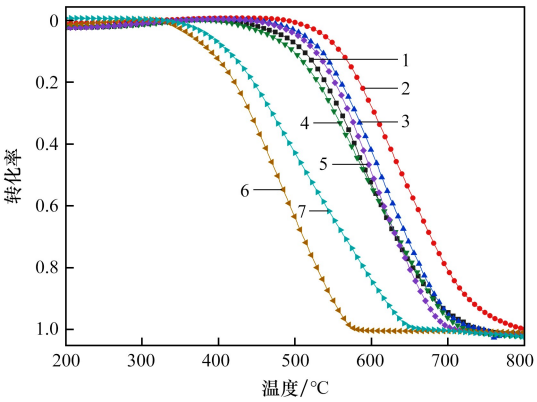
式中：$P_{喷}$ 为干基吨煤价格与吨煤制粉成本之和，元。

通过模型计算出同一变质程度的不同煤种的性价比 K 值，对比分析 K 值大小就可以定量评价不同喷吹煤的性价比差距。

2 结果与讨论

2.1 煤粉与兰炭的燃烧率

首先用微机差热天平对 7 种样品做差热试验测定样品的燃烧性，分别选取 5 mg 样品，升温速率为 20 ℃/min，设置温度从室温升高至 900 ℃，保温 5 min，分析 7 种样品的热重分析（TG-DTG）曲线如图 2 所示。



1—潞安；2—成庄；3—昔阳；4—丰达；5—白杨树；6—路局；7—兰炭。

图 2 煤粉与兰炭的 TG-DTG 曲线

Fig. 2 TG-DTG curves of pulverized coal and semi-coke

由图 2 可知，路局烟煤燃烧性好，在 320 ℃附近就发生失重，此阶段主要是挥发分的燃烧，不到 600 ℃，已经燃烧完全。在 5 种无烟煤中，失重曲线往高温区大幅移动，在 500 ℃附近才开始失重，主要由于无烟煤中挥发分含量少，失重主要是固定碳的燃烧，温度到 800 ℃才燃烧完全，其中潞安煤和丰达煤属于燃烧性较好的无烟煤。而兰炭考虑到本身基础性能和制备工艺的原因，其燃烧性要优于无烟煤并略差于烟煤。

利用新型高炉喷煤燃烧模拟试验装置检测 7 种燃料在模拟高炉风口环境下的燃烧率。试验结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出，7 种燃料的燃烧率普遍在 62% 左右，燃烧率并不算高，这主要是因为试验设备模拟高炉风口高温高压的特点，样品燃烧时间极短，不能完全充分燃烧。在所有试验样品中，烟煤的燃烧率整体要高于无烟煤的燃烧率。其中，潞安无烟煤的燃烧率在无烟煤中比较好，而兰炭的燃烧率则介于烟煤和无烟煤之间，燃烧率试验结果与差热曲线分析一致，也符合现场实际应用情况。

表 4 不同燃料的平均燃烧率

Table 4 Average combustion rate of different fuels %

无烟煤					路局烟煤	兰炭
潞安	成庄	昔阳	丰达	白杨树		
64.17	61.79	61.49	63.27	61.18	66.12	64.03

选用不同种类煤粉中燃烧率较好的煤种，分别为路局烟煤、丰达无烟煤和兰炭。设计试验方案用筛子筛取 150～106、106～80、80～75、75～50 μm 的不同种类、不同粒度的燃料，其对应的燃烧率如表 5 所示。

表 5 不同粒度燃料的燃烧率

Table 5 Combustion rate of fuels with different particle sizes %

燃料种类	粒度/μm			
	150～106	106～80	80～75	75～50
路局烟煤	61.45	64.31	68.34	69.73
兰炭	59.75	62.03	64.97	66.12
丰达无烟煤	53.08	57.43	60.76	63.49

考虑到燃料的燃烧主要分为预热阶段、快速燃烧阶段和燃尽阶段。燃料粒度对不同燃烧阶段的影响也各不相同，在预热阶段主要包括对流换热与热传导，粒度降低加快热风与煤粉之间的换热，以及燃料颗粒内部的传热，使燃料更容易整体达到热均匀与燃点。在快速燃烧阶段，粒度降低增加了碳颗粒的比表面积，使得总反应速率加快，同时增加了碳原子与氧气的接触面积更有利于燃烧反应的进行。结合表 5 可知，不管是路局烟煤、兰炭和丰达无烟煤，其表现的规律都是粒度越细，燃烧率越高，燃烧性能越好，在高炉内更容易被燃烧利用。

为了更好的分析以上原因，对丰达无烟煤、路局烟煤与兰炭样品在试验过程中未燃颗粒的物理结构性质参数进行了检测，结果如表 6 所示。

由表 6 可以看出，丰达无烟煤、兰炭与路局烟煤未燃颗粒的 BET 比表面积均较小，分别为

表 6　燃料物理结构性质参数

Table 6　Physical and structural properties of the samples

燃料种类	BET 表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	孔隙体积/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	平均孔隙体积/nm	t-Plot 微孔表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	t-Plot 外表面面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	t-Plot 微孔容积/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	BJH 孔隙吸附累计体积/($cm^3 \cdot g^{-1}$)
丰达无烟煤	0.620 6	0.002 580	16.632 1	0.455 0	0.165 6	0.000 173	0.002 436
兰炭	1.098 8	0.003 733	13.589 9	0.396 7	0.702 1	0.000 166	0.003 584
路局烟煤	1.478 8	0.004 138	11.193 6	0.347 5	1.131 3	0.000 145	0.003 954

0.620 6、1.098 8、1.478 8 m^2/g。其中丰达未燃煤粉的比表面积最小，路局未燃煤粉的比表面积最大，而总孔体积也从 0.002 58 cm^3/g 增加至 0.004 14 cm^3/g，说明路局烟煤有更丰富的孔隙界面，兰炭次之，丰达无烟煤最次。平均孔径方面，三者孔径分别为 16.63、13.59、11.19 nm，均处于典型介孔范围。根据未燃煤粉的结构参数可以看出，燃烧性能越好的煤种，未燃煤粉的比表面积越大，孔隙界面越丰富。

2.2　煤粉和兰炭的性价比评价

为了科学的评价 7 种燃料在实际生产过程中的性价比，利用煤粉有效热值与喷吹成本计算出煤粉的性价比指数 K，K 值越大燃料的性价比越高。燃料有效热值及 K 值的计算结果分别如表 7、8 所示。

由表 7、8 可知，无烟煤的有效热值要明显高于烟煤的有效热值，因为本次计算没有考虑煤粉在高炉内部的燃烧率情况，若考虑到烟煤的燃烧率普遍高于无烟煤，两者的有效热值结果差距会缩小。由于烟煤和无烟煤本身采购价格差距比较大，在比较性价比指数时，不同种类的煤粉独立比较，其中无烟煤的性价比指数排序为丰达 > 潞安 > 昔阳 > 白杨树 > 成庄。兰炭由于采购价格的优势，其性价比指数 K 明显高于其他煤种，所以用兰炭替代部分低性价比煤种进行喷吹，具有提高经济效益的理论基础。

表 7　不同燃料的有效热值

Table 7　Effective heating value of different fuels　　**kJ/kg**

燃料种类	不完全燃烧热	水煤气反应热	碳氢化合物分解热	灰分成渣热	脱硫耗热	有效热值
潞安无烟煤	8 529.29	154.24	823.83	343.74	21.16	4 683.31
成庄无烟煤	8 574.22	161.30	643.83	411.86	51.06	4 518.83
昔阳无烟煤	8 732.02	163.17	663.19	373.59	51.98	4 455.21
丰达无烟煤	8 441.51	168.46	836.54	412.21	22.54	4 579.31
白杨树无烟煤	8 909.67	156.23	700.11	341.99	50.14	4 535.07
路局烟煤	6 401.67	776.74	1 422.54	193.81	38.18	2 625.21
兰炭	7 949.31	87.41	792.54	405.50	14.72	4 255.10

表 8　不同燃料性价比指数

Table 8　Cost-effectiveness index of different fuels

燃料种类	有效热值/($kJ \cdot kg^{-1}$)	采购价格/元	制粉成本/元	K/($kJ \cdot kg^{-1} \cdot 元^{-1}$)
潞安无烟煤	4 683.31	1 383.48	11.83	3.37
成庄无烟煤	4 518.83	1 394.28	21.16	3.19
昔阳无烟煤	4 455.21	1 301.40	19.54	3.35
丰达无烟煤	4 579.31	1 301.40	8.72	3.49
白杨树无烟煤	4 535.07	1 344.60	16.69	3.33
路局烟煤	2 625.21	1 174.20	17.62	2.21
兰炭	4 255.10	1 134.60	20.64	3.68

2.3 添加兰炭的经济效益

在工业试验之前，先通过能质平衡模型计算添加兰炭后对燃料成本的影响。能质平衡模型计算以物料平衡小于 0.1%，维持全炉热损失(5.93%)、风口理论燃烧温度(2 241 ℃)及碱度不变(1.24)为约束条件，模型所采用数据均来自现场采集，原燃料成分如表 9、10 所示，喷吹兰炭参数及燃料结构变化后高炉关键参数的计算结果分别如表 11、12 所示。

根据当前企业燃料结构作为计算的基准期，即 50% 烟煤 + 50% 无烟煤，添加兰炭后为维持基准期工况条件，采用了改变富氧与风温以及降低焦比等操作。不同燃料结构下兰炭价格对燃料成本的影响如图 3 所示。

由图 3 可知，随着兰炭价格的增加，燃料成本呈上升趋势，根据兰炭添加量的不同，燃烧成本提升的幅度也有所不同。目前，现场基准燃料结构的燃料成本为 895.64 元/tHM。添加 10% 兰炭时，兰炭价格为 1.171 元/kg，与添加 20% 兰炭时，兰炭价格为1.199元/kg，燃料成本都达到了 895.64 元/tHM，超过目前的燃料成本，说明在此之后就不存在经济效益。其中，添加 20% 兰炭在价格小于约 1.143 元/kg 时，比添加 10% 兰炭更有经济效益。

因此，兰炭价格范围在 0.80 ~ 1.199 元/kg 时添加兰炭是具有经济效益的。当兰炭价格在 0.80 ~ 1.143 元/kg 时，添加 20% 有更高的经济效益；当兰炭价格在 1.143 ~ 1.199 元/kg 时，添加 10% 兰炭更有经济效益。

3 结 论

(1) 兰炭在高炉内的燃烧率要高于无烟煤但低于烟煤，在改变燃料粒度后，粒度越细，燃烧率越高，燃烧性能越好。

(2) 兰炭价格范围在 0.80 ~ 1.199 元/kg 时，添加兰炭可以降低燃料成本。当兰炭价格在

表 9 入炉原料主要化学成分(质量分数)

Table 9 Main chemical composition of raw materials for furnace charging %

原料种类	TFe	S	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	MnO	H_2O
烧结	55.04	0.010	8.69	11.20	5.93	2.15	2.49	0.33	—
球团	63.20	0.007	0.48	0.76	6.69	0.56	1.44	0.14	0.50

表 10 入炉燃料主要成分(质量分数)

Table 10 Main composition of fuels for furnace charging %

燃料	固定碳	S	灰成分						挥发分	水分
			CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	其他	总计		
焦炭	85.19	0.77	1.65	0.61	6.08	3.86	0.40	12.60	1.34	0.10
煤粉	68.29	0.66	2.59	0.15	2.89	2.62	0.12	8.37	22.14	0.54

表 11 喷吹兰炭参数

Table 11 Parameters of injected semi-coke

喷吹量/($m^3 \cdot t^{-1}$)	鼓风温度/℃	富氧率/%	炉顶温度/℃	鼓风湿度/($m^3 \cdot m^{-3}$)	炉料入炉温度/℃
100	1 150	3.80	137	0.005 3	25

表 12 燃料结构变化后高炉关键参数的计算结果

Table 12 Calculation results of key blast furnace parameters after fuel structure changes

燃料结构	富氧率/%	焦比/($kg \cdot tHM^{-1}$)	煤比/($kg \cdot tHM^{-1}$)	燃料比/($kg \cdot tHM^{-1}$)	风温/℃	热损失/%	理论燃烧温度/℃
50% 烟煤 + 50% 无烟煤	3.80	381.0	155	536.0	1 150	5.93	2 241.32
10% 兰炭 + 40% 无烟煤 + 50% 烟煤	3.81	380.0	155	535.0	1 150	5.93	2 240.43
20% 兰炭 + 30% 无烟煤 + 50% 烟煤	3.86	379.7	155	534.7	1 152	5.93	2 240.16

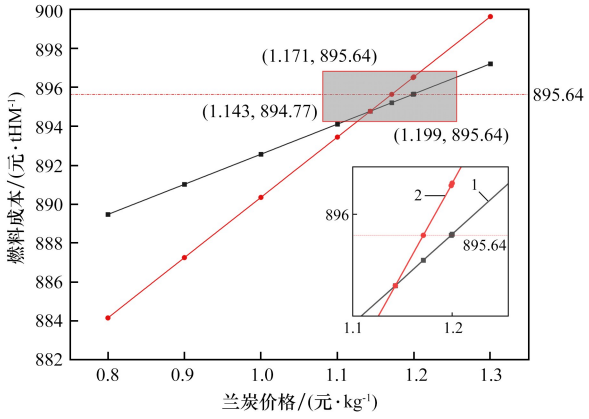


图 3　不同燃料结构下兰炭价格对燃料成本的影响

Fig. 3　Effect of semi-coke price on fuel cost under different fuel structures

0.80 ~ 1.143 元/kg 时，添加 20% 兰炭有更高的经济效益；当兰炭价格在 1.143 ~ 1.199 元/kg 时，添加 10% 兰炭更有经济效益。

参考文献：

[1] 折媛,尤宽,巨建涛,等. 干馏炉内水蒸气对兰炭热解过程中硫迁移的影响[J]. 钢铁,2023,58(8):51 - 60.
SHE Yuan, YOU Kuan, JU Jiantao, et al. Effect of water vapor on sulfur migration during pyrolysis of semi-coke in oven for dry distillation[J]. Iron and Steel, 2023, 58(8):51 - 60.

[2] 白凤强,王小东. 新兴铸管 3 号高炉喷吹兰炭工业试验[J]. 炼铁,2019,38(3):16 - 21.
BAI Fengqiang, WANG Xiaodong. Commercial test of injecting semi-coke in No. 3 BF of Xinxing ductile[J]. Ironmaking, 2019, 38(3):16 - 21.

[3] 巢昌耀,吴锽,杜瑞岭,等. 煤粉与半焦的混合燃烧特性及动力学分析[J]. 工程科学学报,2016,38(11):1532 - 1538.
CHAO Changyao, WU Keng, DU Ruiling, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of pulverized coal and semicoke[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(11):1532 - 1538.

[4] 张颖,王莹,查松妍,等. 钢铁行业氢冶金技术路线及发展现状[J]. 烧结球团,2023,48(4):8 - 15.
ZHANG Ying, WANG Ying, ZHA Songyan, et al. Hydrogen metallurgy technology routes and development status of iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(4):8 - 15.

[5] 刘高军,乔瑜,徐明厚. 不同制焦气氛下 H-form 煤焦特性[J]. 燃烧科学与技术,2014,20(3):232 - 237.
LIU Gaojun, QIAO Yu, XU Minghou. Charecteristics of H-form coal chars made under different atmospheres[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(3):232 - 237.

[6] 许修强,王永刚,陈宗定,等. 胜利褐煤半焦冷却处理对其微观结构及反应性能的影响[J]. 燃料化学学报,2015,43(1):1 - 8.
XU Xiuqiang, WANG Yonggang, CHEN Zongding, et al. Influence of cooling treatments on char microstructure and reactivity of Shengli brown coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, 43(1):1 - 8.

[7] 宁晓钧,党晗,张建良,等. 低阶煤热解与兰炭生产工艺研究进展[J]. 钢铁,2021,56(1):1 - 11.
NING Xiaojun, DANG Han, ZHANG Jianliang, et al. Research progress of low-order coal pyrolysis process and semi-coke production process[J]. Iron and Steel, 2021, 56(1):1 - 11.

[8] 蔡文淼. 高炉喷吹半焦的冶金性能试验及研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.
CAI Wenmiao. Research on metallurgical property of semi-coke for pulverized coal injection in blast furnace[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.

[9] 张伟光,俞楠,施瑞盟,等. 基于煤质特性的高炉喷吹褐煤及其热解半焦可行性研究[J]. 煤炭技术,2025,44(5):260 - 265.
ZHANG Weiguang, YU Nan, SHI Ruimeng, et al. Feasibility study of injecting lignite and pyrolysis semi-coke into blast furance based on coal quality characteristics[J]. Coal Technology, 2025, 44(5):260 - 265.

[10] 王华山,房瑀人,王春生. 预处理对兰炭燃烧性能的影响[J]. 科学技术与工程,2021,21(2):558 - 562.
WANG Huashan, FANG Yuren, WANG Chunsheng. Influence of pretreatment on blue-coal combustion characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2):558 - 562.

[11] 王雅军,张永,张静. 喷吹低温半焦的实验室研究[J]. 包钢科技,2012,38(1):6 - 8.
WANG Yajun, ZHANG Yong, ZHANG Jing. Lab study of low-temperature semicokes for injection[J]. Science & Technology of Baotou Steel (Group) Corporation, 2012,

38(1):6 – 8.

[12] 张立国,任伟,刘德军,等. 半焦作为高炉喷吹用煤研究[J]. 鞍钢技术,2015(1):13 – 17.
ZHANG Liguo, REN Wei, LIU Dejun, et al. Study on semi-coke used as pulverized coal for injection into blast furnace[J]. Angang Technology,2015(1):13 – 17.

[13] 何选明,付鹏睿,王春霞,等. 用于高炉喷吹的低阶煤梯级转化半焦的燃烧性能[J]. 钢铁,2014,49(9):92 – 96.
HE Xuanming, FU Pengrui, WANG Chunxia, et al. Combustion behavior of low rank coal char application in blast furnace injection[J]. Iron & Steel,2014,49(9):92 – 96.

(上接第195页)

[14] MEYER M,LAGOEIRO L E,GRAÇA L M,et al. Phase and microstructural characterization of iron ore pellet and their relation with cold crushing strength test[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2016, 37(5):295 – 304.

[15] UMADEVI T,KUMAR P,LOBO N F,et al. Influence of pellet basicity (CaO/SiO_2) on iron ore pellet properties and microstructure[J]. ISIJ International,2011,51(1):14 – 20.

[16] ZHU W H,WINTERSTEIN J,MAIMON I,et al. Atomic structural evolution during the reduction of α-Fe_2O_3 nanowires[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2016,120(27):14854 – 14862.

[17] CHEN B J, JIANG T, WEN J, et al. High-chromium vanadium-titanium magnetite all-pellet integrated burden optimization and softening-melting behavior based on flux pellets[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2024,31(3):498 – 507.

广 告 目 次

封面	《烧结球团》创刊50周年特刊	前彩11	南京三埃工控有限公司
封二	襄阳中和机电技术有限公司	前彩12 – 13	北京金都泰拓冶金技术研究有限公司
封三	河南好运祥耐材有限公司	前彩14 – 15	北京顺泰克科技有限公司
封底	河北同业冶金科技有限责任公司	前彩16	焦作市迈科冶金机械有限公司
前彩1	湖南宏德陶瓷科技有限公司	前彩17	成都利君实业股份有限公司
前彩2 – 3	朝阳重型机器有限公司	前彩18	江苏鑫华能环保工程股份有限公司
前彩4 – 5	湖南中冶长天重工科技有限公司	前彩19	江阴市创裕机械有限公司
前彩6 – 7	唐山助纲炉料有限公司	前彩20	厦门川亿机械设备有限公司
前彩8	秦皇岛秦冶重工有限公司	前彩21	鞍山市明阳金属材料有限公司
前彩9	华基环保(武汉)有限公司	前彩22	中冶长天炉窑工程技术公司
前彩10	长沙天为华信环保装备有限公司		