神东高钙煤对高炉理论燃烧温度的影响及工业实践

王 斌[1]，郭爱军[1]，郭彦强[1]，张建良[2]，徐润生[2]，张 楠[2]
(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 719315；2. 北京科技大学
冶金与生态工程学院，北京 100083)

摘要： 神东高钙烟煤作为一种典型的高挥发分烟煤，过去多被用作电厂火力发电，仅有少部分被用于高炉喷吹。文章通过建立高炉理论燃烧温度计算模型，计算不同喷吹配比条件下神东高钙烟煤对理论燃烧温度的影响，在此基础上进行了神东高钙烟煤高炉喷吹的工业试验。结果表明，喷吹神东高钙烟煤后，高炉风口前理论燃烧温度和煤气量均逐渐增加，其中煤气量的增加主要是由于煤气成分中的 H_2 量的增加导致。工业试验结果说明喷吹神东高钙烟煤后，高炉的各项经济技术指标均得到了明显的改善，证明了神东高钙烟煤应用于高炉喷吹的可行性，为提高神东高钙烟煤在炼铁领域的应用价值，促进高炉炼铁喷吹煤的优化选择提供了重要支撑。

关键词： 神东烟煤；高钙；高炉喷吹，理论燃烧温度；工业试验
中图分类号： TF538.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)05－0108－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.078

Influence of Shendong high calcium coal on theoretical combustion temperature of blast furnace and industrial practice

WANG Bin[1], GUO Aijun[1], GUO Yanqiang[1], ZHANG Jianliang[2], XU Runsheng[2], ZAHNG Nan[2]
(1. CHN Energy Shendong Coal Group Co.,Ltd.,Ordos 719315,Inner Mongolia,China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering,University of Science & Technology Beijing,100083,Beijing,China)

Abstract: As a typical high volatile bituminous coal,Shendong high calcium bituminous coal is mostly used as thermal power in power plants in the past,and only a small part is used for blast furnace injection. The influence of Shendong high calcium bituminous coal on the theoretical combustion temperature under different injection ratio conditions is calculated by establishing the calculation model of theoretical combustion temperature for blast furnace,and the industrial test on blast furnace injection of Shendong high calcium bituminous coal is carried out on this basis. The results show that after the injection of Shendong high calcium bituminous coal,the theoretical combustion temperature and gas volume before the blast furnace tuyere are gradually increased,and the increase of gas volume is mainly caused by the increase of H_2 amount in the gas composition. The results of industrial tests show that,after the injection of Shendong high calcium bituminous coal,the economic and technical indicators of the blast furnace have been significantly improved,which proves the feasibility of Shendong high calcium bituminous coal in blast furnace injection,and provides important support for improving the application value of Shendong high calcium bituminous coal in the field of ironmaking and promoting the optimal selection of blast furnace ironmaking injection coal.

Key words: shendong bituminous coal; high calcium; blast furnace injection; theoretical combustion temperature; industrial test

收稿日期： 2022－06－13；**修回日期：** 2022－08－03
基金项目： 国家自然科学基金面上项目(51774032)
作者简介： 王 斌(1986—)，男，高级工程师，从事矿物加工方面的研究。
通信作者： 徐润生(1988—)，男，博士，副教授，从事低碳绿色炼铁新技术方面的研究。

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

在国家“碳达峰、碳中和”目标的指引下，钢铁行业作为高污染、高能耗行业的典型代表，如何提高能源利用率，降低污染物的排放，已成为亟待解决的重要议题[1-2]。铁前生产在钢铁全流程生产中占有重要环节，其能源消耗占比也十分巨大，因此，从炼铁环节开始进行生产优化和技术创新，将对整个钢铁生产过程的节能降耗产生重要影响[3-4]。高炉喷煤技术作为炼铁生产的关键技术之一，对于高炉提煤降焦，提高利用系数和高炉冶炼强度以及稳定炉缸热量等方面都做出了重要贡献[5-6]。随着高炉喷煤技术的不断发展进步，喷吹煤粉的结构也在不断发生变化，从最开始的单种煤粉的喷吹，到现在的烟煤和无烟煤的混合喷吹，再到烟煤和无烟煤各自配比的不断改变及优化[7]。在实际生产过程中，考虑到成本和安全等因素，喷吹煤粉品种的选择也成为影响高炉冶炼过程顺行的重要因素之一[8-9]。

然而随着煤炭资源的不断开采利用，可用于高炉喷吹的优质无烟煤资源变得越来越稀少，这直接导致了原、燃料成本的增加，目前关于高炉喷吹燃料选择相对较多[10-13]，但是以煤炭为基础的喷吹燃料结构仍然占据主要地位，而低变质程度的烟煤储量巨大，是部分替代无烟煤组成高炉喷吹混合燃料的最佳选择。考虑到烟煤的种类繁多，且不同品种的烟煤成分差异巨大，因此可满足高炉喷吹正常使用的烟煤需要在挥发分，灰分及其成分，燃烧性和反应性等方面都有一定要求。神东高钙烟煤作为一种典型的高挥发分烟煤，具有储量丰富、供应稳定、反应性较好、灰分较低，且灰分中 CaO 质量分数较高的特点[14]，因此如果将其应用于高炉喷吹，能够极大地缓解优质煤炭资源短缺的压力，实现高炉喷吹燃料的结构优化，稳定高炉生产，控制炼铁生产成本[15-16]。

文章通过研究不同比例的神东高钙烟煤进行高炉喷吹时对理论燃烧温度的影响，为其应用于高炉喷吹提供理论支撑。同时，结合现场工业试验，验证神东高钙烟煤进行高炉喷吹时对高炉各项生产经济技术指标的影响，明确神东高钙烟煤应用于高炉喷吹的效果和可行性，为提高烟煤使用价值，优化高炉炼铁生产做铺垫。

1　喷吹神东高钙烟煤对理论燃烧温度的影响

1.1　计算条件的设定

风口理论燃烧温度是衡量高炉正常生产的重要指标，其大小反映了高炉当前喷吹燃料的燃烧效果，它影响着炉缸内炉渣和铁水的温度分布，煤气分布情况甚至矿石落下过程中软熔带的形成形状[17-18]。当理论燃烧温度过低时，表明煤粉没有充分燃烧，会造成炉料热量供给不足；相反，如果理论燃烧温度过高，伴随着氧化物质的产生，煤气体积会剧烈膨胀上升，则会严重影响炉内的透气性和冶炼的顺行。影响理论燃烧温度的因素包括：喷煤比和煤粉种类，富氧鼓风量，热风风温和鼓风湿度[19-20]。控制适宜的理论燃烧温度的措施一般包括：① 提高烟煤喷吹比例。烟煤中挥发分含量较高，在风口分解耗热会增加，烟煤本身发热值较低，从而导致烟煤本身在炉缸内有效发热量减少，同时炉缸煤气量增加，进而降低风口回旋区的理论燃烧温度。② 喷吹焦炉煤气/天然气等富氢燃气替代部分煤粉。随着天然气/焦炉煤气喷吹量的增加，理论燃烧温度在不断降低。天然气喷吹量每增加 10 m^3，理论燃烧温度降低26 ℃左右[21]。

文章考虑煤粉喷入高炉内的实际燃烧情况，建立理论燃烧温度计算模型，在此基础上研究喷吹神东高钙烟煤后理论燃烧温度的变化，计算模型如图 1 所示[22]。

1.2　理论燃烧温度的变化

文章以国内某钢厂的高炉作为工业试验对象，其高炉基本冶炼参数如表 1 所示。在当前高炉冶炼条件下，确定其他冶炼参数不变，不断提高神东高钙烟煤的配比，在此基础上计算理论燃烧温度，炉腹煤气量及煤气成分等的变化，并分析研究高炉喷吹神东高钙烟煤对炉内冶炼顺行可能产生的影响。

基于高炉实际冶炼的定风操作，将神东高钙烟煤按照 15%、20%、25%、30%、35%、40% 的配比与俄罗斯无烟煤混合喷吹，探究随着神东高钙煤配比的不断提高，高炉风口回旋区理论燃烧温度和炉腹煤气量等的变化，计算结果如上表 2 所示。由表 2 可知，在神东高钙烟煤配比为 15% 时，高炉风口前理论燃烧温度为2 232.1 ℃，此时

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

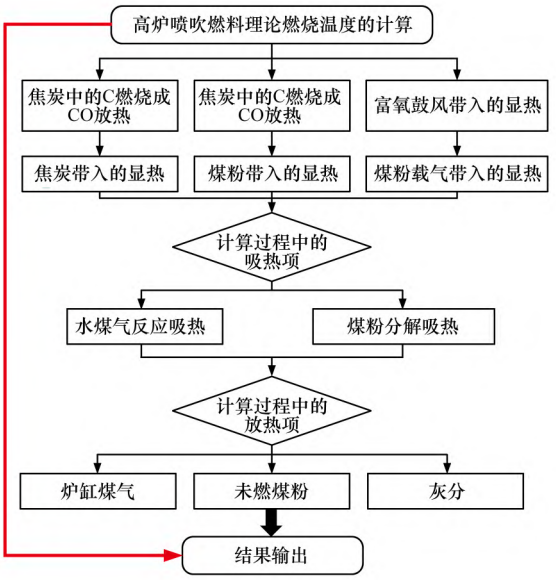


图1 理论燃烧温度的计算模型结构

Fig. 1 Calculation model of theoretical combustion temperature

吨铁炉腹煤气量达到1 663.5 m^3，对应的煤气成分中含N_2量为929 m^3，而还原性气体H_2和CO的成分分别为97.7 m^3和636.8 m^3。当高钙烟煤配比达到了20%时，对应的理论燃烧温度增加到2 232.3 ℃，吨铁炉腹煤气量也随之增加，达到了1 665 m^3/t，此时吨铁炉腹煤气成分和15%高钙烟煤喷吹时产生的煤气成分相比，H_2，N_2等含量变化各不相同。在此基础上继续增加神东高钙烟煤的配比，可以看到理论燃烧温度，吨铁炉腹煤气量均呈现增加的趋势，在神东高钙烟煤配比增加到40%时，理论燃烧温度达到了最大值为2 233.7 ℃，说明在此条件下的热量最为充分。

表1 高炉基本冶炼参数

Table 1 Basic smelting parameters of blast furnace

产量/($t \cdot h^{-1}$)	煤比/($kg \cdot t^{-1}$)	风温/℃	风量/($m^3 \cdot min^{-1}$)	湿度/%
240	160	1 150	5 000	12

表2 不同神东高钙烟煤配比下高炉风口回旋区相关参数计算结果

Table 2 Calculation results of parameters related to blast furnace tuyere raceway under different ratios of Shendong high calcium bituminous coal

神东高钙烟煤配比(质量分数)/%	理论燃烧温度/℃	吨铁炉腹煤气量/m^3	气体成分组成/m^3		
			N_2	H_2	CO
15	2 232.1	1 663.5	929.0	97.7	636.8
20	2 232.3	1 665.0	928.9	99.3	636.9
25	2 232.7	1 665.9	928.4	100.7	636.8
30	2 233.0	1 668.0	928.8	102.4	636.8
35	2 233.5	1 669.4	928.7	103.8	636.8
40	2 233.7	1 670.9	928.7	105.4	636.9

此外，从表2结果还可发现，随着神东高钙煤混合配比的增加，炉腹煤气量的增加主要是由于煤气成分中含H_2量的增加导致，而含CO量基本维持不变。煤气量的变化原因在于喷吹神东高钙烟煤的总量增加后，由于高钙煤中的挥发分物质及挥发分中的氢元素质量分数较高，这样煤粉在实际喷吹入炉后，迅速发生分解反应后释放的挥发性物质及其中的含氢物质会有所增加，并且随着烟煤配比的不断提高，混合燃料的燃烧性能也得到增强，更多的煤粉在风口回旋区发生燃烧反应也会产生更多的煤气量。同时，由于煤气量中H_2的增加，而H_2相对于CO具有更小的黏度和更高的扩散速度，在煤气上升过程中也有利于加热矿石和提高还原的扩散速度，煤气还原势得到增强，进而促进间接还原的发展，提高间接还原度。

理论燃烧温度变化的原因在于神东高钙煤中较高的挥发分在喷入高炉后需要分解耗热，增加了混合燃料在风口前的耗热量，而炉腹煤气量的增加也会降低理论燃烧温度；但神东高钙烟煤的灰分较低，可以减少风口前的灰分产物量，同时烟煤可以提高混煤的燃烧率。在这些因素共同作用下，风口回旋区的理论燃烧温度呈略微增加趋势。总的来看，喷吹神东高钙烟煤后，高炉风口

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

前理论燃烧温度在多种因素的共同影响下有一定提高，从理论计算的角度证明了喷吹神东高钙烟煤的可行性。

2　神东高钙烟煤高炉喷吹工业试验

2.1　工业试验前期准备

文中选用国内某钢铁厂的大型高炉进行现场工业试验，在保持烧结矿、球团矿、块矿、焦炭等原燃、料条件不变的条件下，控制高炉操作指标不发生波动，将入炉烟煤替换为神东高钙烟煤，收集现场操作数据，分析研究神东高钙烟煤入炉后对高炉生产指标产生的影响。

表 3　神东高钙烟煤工业试验高炉基础参数

Table 3　Basic parameters of Shendong high-calcium bituminous coal industrial test blast furnace

有效容积/m^3	炉缸直径/m	风口数/个	出铁口数/个	焦比/($kg\cdot t^{-1}$)	煤比/($kg\cdot t^{-1}$)	燃料比/($kg\cdot t^{-1}$)	理论燃烧温度/℃
2 200	11.08	30	3	386.80	159.07	545.90	2 338.8

2.2　工业试验结果分析

工业试验结果分析，选取 9 月、10 月份的数据，高炉冶炼参数为逐日数据，除尘灰成分数据为间断抽检数据。高炉基准期(9 月 11 日—26 日)和试验期(9 月 27 日—10 月 12 日)的理论燃烧温度变化如图 2 所示。由图 2 可知，在试验期理论燃烧温度明显上升。在去除个别异常数值后，基准期理论燃烧温度平均约为 2 349.5 ℃，试验期理论燃烧温度为 2 354.8 ℃。试验期比基准期高，主要是因为神东高钙烟煤的燃烧性能较强，和无烟煤混合搭配后明显地改善了混合燃料的燃烧效果，提高了混煤的燃烧率，有利于混煤在风口前更好地释放热量，保证了高炉炉缸的热量稳定。

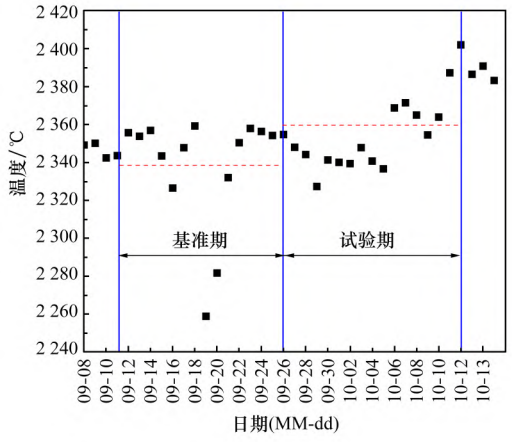
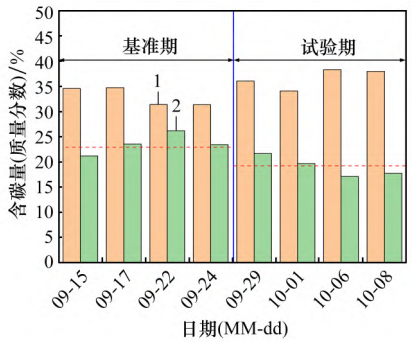


图 2　基准期和试验期理论燃烧温度变化

Fig. 2　Changes of theoretical combustion temperature in reference period and test period

通过高炉灰含碳量分析，可以区分不同燃料在高炉内的利用率。因此这里对高炉灰进行了取样测试，结果见图 3。由图 3 可知，试验期布袋灰的残碳质量分数要低于基准期，基准期与试验期含碳量分别约为 22.9% 与 19.0%。煤粉进入炉内后迅速发生气化燃烧反应，这个过程中会有部分未燃煤粉随着高温反应产生的煤气流向炉顶上升，最后排出炉外。因此，高炉布袋灰中的固定碳主要来自未燃煤粉，其数值越高说明未燃煤粉的数量越多，表明煤粉的燃烧反应发生得越不完全，对应的煤粉利用率越低。可见，在喷吹神东高钙烟煤后，煤粉利用率得到了显著提高，证明了神东高钙烟煤用于高炉喷吹的可行性。



1—铁；2—固定碳。

图 3　基准期和试验期布袋灰中成分的变化

Fig. 3　Changes in the composition of bag ash during the reference period and the test period

神东高钙烟煤含钙量较高，在进入高炉后大部分会进入渣中参与造渣反应，这在一定程度上替代了熔剂的作用。通过对基准期和试验期的炉渣进行取样检测，分析喷吹神东高钙烟煤后炉渣碱度的变化，结果见图 4。由图 4 可知，基准期与试验期炉渣平均碱度分别为 1.22 和 1.23，试验期炉渣碱度要高于基准期炉渣碱度，说明神东高钙烟煤灰中较高的 CaO 可参与高炉的成渣反应，有

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

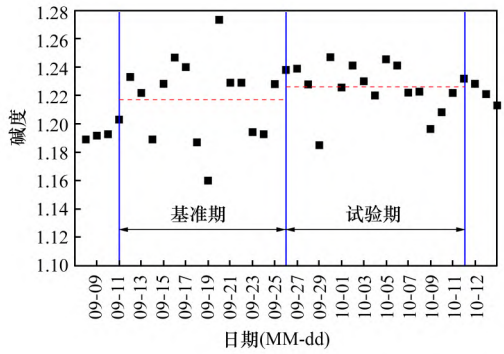


图 4 基准期和试验期炉渣碱度的变化

Fig. 4 Changes of slag basicity in reference period and test period

利于高炉造碱性渣和提高生铁质量。

通过炉渣碱度的分析可以发现，喷吹神东高钙烟煤后，煤灰中大量的 CaO 进入炉渣中，提高了炉渣碱度，而通过对炉渣含硫量的分析则可以更直接地证明煤中的钙对炉渣的影响。基准期和试验期炉渣含硫量的变化见图 5。由图 5 可知，基准期与试验期高炉炉渣平均含硫量分别为 1.11% 和 1.12%，这证明由于喷吹高钙烟煤，炉渣中含钙量增加，导致炉渣脱硫能力得到提高，从而使得试验期的含硫量高于基准期。

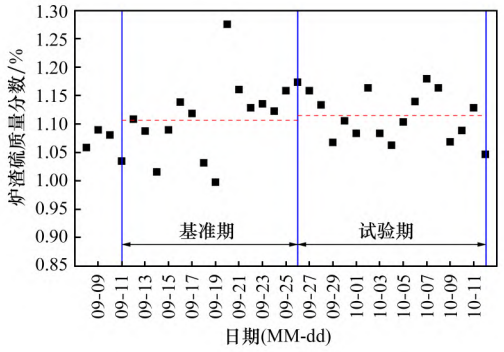


图 5 基准期和试验期炉渣硫质量分数的变化

Fig. 5 Changes of sulfur mass in slag during base period and test period

高炉生产指标是高炉冶炼情况的直观体现，这里对试验高炉的焦比、煤比、燃料比和产量进行对比研究。结果分别见图 6 ~ 9 所示。由图 6 可知，除去个别异常数据后，基准期与试验期平均焦比分别为 387.17 kg/t 和 384.03 kg/t，相较于基准期下降了 3.14 kg/t，喷吹神东高钙烟煤后达到了降低焦比的效果。由图 7 可知，高炉基准期与试验期的煤比分别为 159.39 kg/t 和 152.66 kg/t。可见，在保证了高炉正常冶炼的条件下，试验期相较于基准期煤比降低了 6.73 kg/t。由图 8 可知，基准期与试验期的平均燃料比分别为 546.56 kg/t 和 536.69 kg/t。可见，喷吹神东高钙烟煤可降低燃料比。由图 9 可知，基准期与试验期高炉平均每日产量分别为 5 651.3 t 和 5 787.1 t。可见，喷吹神东高钙烟煤后，日产量增加大约 135.8 t。

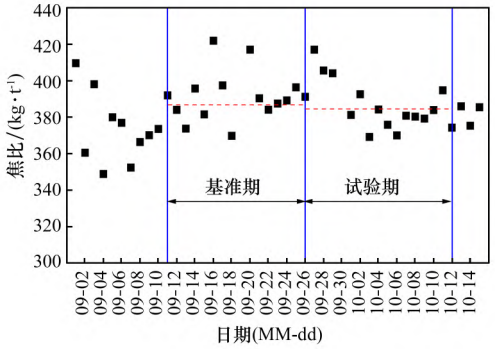


图 6 基准期和试验期焦比的变化

Fig. 6 Changes of focal ratio in the base period and the test period

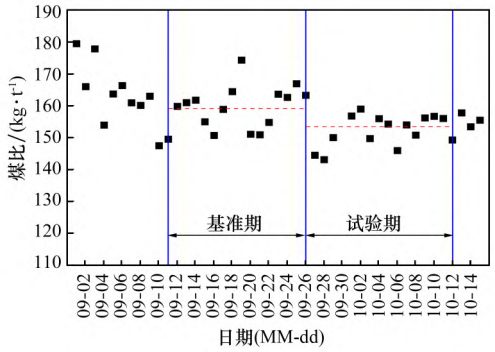


图 7 基准期和试验期煤比的变化

Fig. 7 Changes of coal ratio in base period and test period

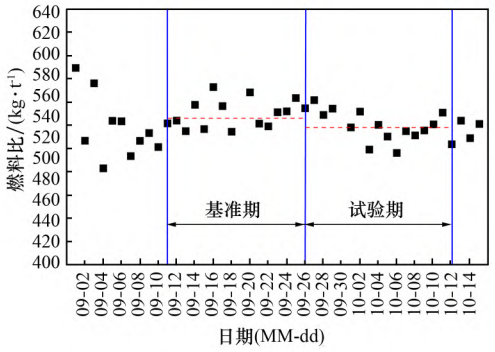


图 8 基准期和试验期燃料比的变化

Fig. 8 Changes in fuel ratio during base period and test period

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

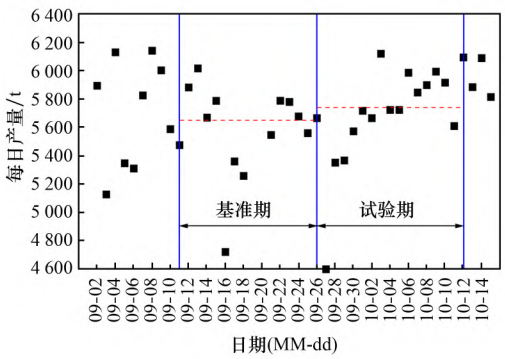


图 9　基准期和试验期产量的变化

Fig. 9　Changes in production during the base period and the experimental period

3　结　论

文章建立了高炉喷吹煤粉的理论燃烧温度计算模型，并结合现场实际工况参数，通过逐步提高神东高钙烟煤喷吹的比例，研究了喷吹神东高钙烟煤后对高炉风口前热状态的影响规律。研究结果表明:

(1) 随着神东高钙烟煤的配比从 15% 逐渐提高至 40% 时，风口前理论燃烧温度有所增加，炉腹煤气量呈现出增加的趋势，通过对炉腹煤气各成分的分析计算，发现喷吹神东高钙烟煤后煤气量增加的主要原因在于煤气成分中的 H_2 含量增加，而 N_2 和 CO 的含量则近似不变，这主要是由于高钙烟煤的挥发分含量较高，并且挥发分中具有较多的含氢成分，喷入高炉后煤粉在高温环境下迅速分解产生含氢物质。计算结果为神东高钙烟煤的工业应用奠定了基础。

(2) 喷吹神东高钙烟煤后，高炉理论燃烧温度得到改善，煤粉在炉内的燃烧作用增强，表现为炉尘灰中的碳质减少，并且造渣反应效果提高，炉渣碱度和硫质量分数等指标均有所改善；且在喷吹神东高钙烟煤后，高炉焦比和燃料比降低，产量明显增加。工业试验的结果表明神东高钙烟煤完全具备大规模、高比例进行高炉喷吹的条件，为其在炼铁领域的高效合理应用提供重要支撑。

参考文献:

[1] 曾宇，姜喆，张建良，等. 大喷煤条件下鞍钢高炉喷吹煤粉的炉内利用率[J]. 中国冶金，2022，32(3)：61－67.
ZENG Yu，JIANG Zhe，ZHANG Jianliang，et al. Utilization rate of coal injection for blast furnace in Ansteel under the large injection condition[J]. China Metallurgy，2022，32(3)：61－67.

[2] 张建良，刘征建，焦克新，等. 炼铁新技术及基础理论研究进展[J]. 工程科学学报，2021，43(12)：1630－1646.
ZHANG Jianliang，LIU Zhengjian，JIAO Kexin，et al. Progress of new technologies and fundamental theory about ironmaking[J]. Journal of Engineering Science，2021，43(12)：1630－1646.

[3] 曾宇，姜喆，张建良，等. 鞍钢高炉喷吹燃料的综合特性分析[J]. 中国冶金，2022，32(5)：80－85；108.
ZENG Yu，JIANG Zhe，ZHANG Jianliang，et al. Comprehensive analysis on characterisics of injection fuel in Ansteel blast furnace[J]. China Metallurgy，2022，32(5)：80－85；108.

[4] 邵远敬，徐蕾，刘校平，等. 中国钢铁生产“碳中和”解决方案探讨[J]. 中国冶金，2022，32(4)：1－8.
SHAO Yuanjing，XU Lei，LIU Xiaoping，et al. Discussion on the solution of “carbon neutrality” in China’s steel production[J]. China Metallurgy，2022，32(4)：1－8.

[5] 薛庆国，杨帆，张欣欣，等. 氧气高炉的发展历程及其在北京科技大学的研究进展[J]. 工程科学学报，2021，43：1579－1591.
XUE Qingguo，YANG Fan，ZHANG Xinxin，et al. Development of an oxygen blast furnace and its research progress in university of science and technology Beijing[J]. Journal of Engineering Science，2021，43：1579－1591.

[6] ZHANG J L，FU H Y，LIU Y X，et al. Review on biomass metallurgy：pretreatment technology，metallurgical mechanism and process design[J]. International Journal of Minerals，Metallurgy and Materials，2022，29(6)：1133－1149.

[7] 王广伟，曾宇，张建良，等. 鞍钢高炉喷煤优化搭配研究[J]. 鞍钢技术，2021(1)：1－6.
WANG Guangwei，ZENG Yu，ZHANG Jianliang，et al. Study on blending optimization of pulverized coal injection into blast furnace of Ansteel[J]. Ansteel Technology，2021(1)：1－6.

[8] 张福明. 我国 5 000 m^3 级高炉技术进步及运行实绩[J]. 炼铁，2021，40(1)：1－8.
ZHANG Fuming. China’s technical progress in 5 000 m^3

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

BF and operational performance [J]. Ironmaking, 2021, 40(1): 1 – 8.

[9] 张建,王凯,王喆,等. 首钢京唐1号高炉富氧率与炉况的匹配分析 [J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(8): 720 – 726.
ZHANG Jian, WANG Kai, WANG Zhe, et al. Matching analysis of oxygen enrichment rate with furnace condition of No. 1 blast furnace in Shougang Jingtang [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(8): 720 – 726.

[10] 刘竹林,蒋友源,寿擎,等. 高炉混合喷吹用生物质燃料可磨性及燃烧性能分析 [J]. 中国冶金, 2020, 30(3): 8 – 12.
LIU Zhulin, JIANG Youyuan, SHOU Qing, et al. Analysis on grindability and combustion performance of biomass fuel for mixed injection of blast furnace [J]. China Metallurgy, 2020, 30(3): 8 – 12.

[11] 彭政富,张建良,毕传光,等. 焦粉与兰炭对高炉混煤燃烧特性的影响 [J]. 钢铁, 2019, 54(12): 10 – 18.
PENG Zhengfu, ZHANG Jianliang, BI Chuangguang, et al. Effects of coke powder and semi – coke on combustion characteristics of blast furnace blended coal [J]. Iron and Steel, 2019, 54(12): 10 – 18.

[12] 王朋,张建良,王广伟,等. 热解制备芦竹半焦基础性能分析 [J]. 中国冶金, 2019, 29(2): 12 – 16.
WANG Peng, ZHANG Jianliang, WANG Guangwei, et al. Analysis of basic characteristics of Arundo donax char prepared by pyrolysis [J]. China Metallurgy, 2019, 29(2): 12 – 16.

[13] 徐润生,郑恒,王炜,等. 炭化温度对高炉喷吹用竹炭微观结构的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(7): 515 – 522.
XU Runsheng, ZHENG Heng, WANG Wei, et al. Effect of carbonization temperature on microstructure characters of bamboo char used for blast furnace injection [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(7): 515 – 522.

[14] 乔军强,张少宁,李燕江,等. 神东烟煤用于高炉喷吹的可行性分析 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S1): 219 – 225.
QIAO Junqiang, ZHANG Shaoning, LI Yanjiang, et al. Feasibility analysis of Shendong bituminous coal used for blast furnace injection [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S1): 219 – 225.

[15] 邸传耕,王振飞,张建良,等. 神东烟煤水分对其高炉喷吹性能的影响 [J]. 中国冶金, 2020, 30(1): 26 – 31.
DI Chuanqeng, WANG Zhenfei, ZHANG Jianliang, et al. Effect of moisture of Shendong bituminous coal on its blast furnace injecting performance [J]. China Metallurgy, 2020, 30(1): 26 – 31.

[16] JIN L Z, NIU X M. Micromorphology and safety properties of meager and meager – lean coal for blast furnace injection [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(5): 774 – 781.

[17] 周恒,徐坤,姚舜,等. 高炉喷吹COREX脱CO_2顶煤气的数值分析 [J]. 钢铁, 2021, 56(2): 57 – 62.
ZHOU Heng, XU Kun, YAO Shun, et al. Numerical simulation of injection of COREX decarbonized top gas to blast furnace [J]. Iron and Steel, 2021, 56(2): 57 – 62.

[18] 王春梅,周东东,徐科,等. 高炉理论燃烧温度模型的修正 [J]. 炼铁, 2018, 37(3): 11 – 14.
WANG Chunmei, ZHOU Dongdong, XU Ke, et al. Modification of theoretical combustion temperature model of BF [J]. Ironmaking, 2018, 37(3): 11 – 14.

[19] 马洪修,程洪全,罗德庆,等. 鼓风湿度对首钢股份3号高炉冶炼的影响 [J]. 炼铁, 2021, 40(2): 13 – 17.
MA Hongxiu, CHENG Hongquan, LUO Deqing, et al. Influence of blast humidity on Shougang's No. 3 BF smelting [J]. Ironmaking, 2021, 40(2): 13 – 17.

[20] ZHANG C L, WANG G W, NING X G, et al. Numerical simulation of combustion behaviors of hydrochar derived from low – rank coal in the raceway of blast furnace [J]. Fuel, 2020, 278: 118267.

[21] 吴胜利,余晓波,陈辉,等. 高炉理论燃烧温度的计算 [J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(12): 1432 – 1438.
WU Shengli, YU Xiaobo, CHEN Hui, et al. Calculation of theoretical flame temperature in blast furnace [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(12): 1432 – 1438.

[22] 张建良,邱家用,国宏伟,等. 高炉风口区理论燃烧温度的研究 [J]. 钢铁, 2012, 47(7): 10 – 14.
ZHANG Jianliang, QIU Jiayong, GUO Hongwei, et al. Research of theoretical flame temperature in blast furnace tuyere [J]. Iron and Steel, 2012, 47(7): 10 – 14.

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