喷吹高钙烟煤对含铁炉料熔滴性能的影响

白云峰[1]，陈 伟[1]，高凤丽[1]，张建良[2]，柴轶凡[2]，徐润生[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： 针对某高钙烟煤低灰、低硫、低磷、高CaO、高热值、高燃烧率的特点，本文进行向高炉喷吹该烟煤的试验，研究熔剂入炉方式变化对含铁炉料性能的影响，探索高比例喷吹该烟煤条件下的炉料结构，为该烟煤大规模应用高炉喷吹奠定基础。研究结果表明：使用该烟煤后，除熔融开始温度和软化区间略有提高外，其他指标均降低；保持烟煤占比为30%不变，随着煤比由140 kg/t上升到200 kg/t，炉料的软化开始温度、软化终了温度、熔融终了温度逐渐增加，熔融开始温度、软化区间、最大压差变化不大，熔融区间和软熔层厚度呈现出先升高后降低的趋势；保持煤比为160 kg/t不变，随着烟煤占比从30%上升到100%，炉料的软化开始温度、软化终了温度、熔融开始温度、熔融终了温度整体呈现先升高后降低的趋势，软化区间呈现出先降低后升高的趋势，熔融区间、最大压差和软熔层厚度也呈现出先升高后降低的趋势。

关键词： 炉料结构；熔滴性能；烟煤；无烟煤；烧结矿；球团矿
中图分类号： TF631；TF046 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0101－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.029

Effect of injecting high calcium bituminous coal on droplet performance of iron－containing burden

BAI Yunfeng[1], CHEN Wei[1], GAO Fengli[1], ZHANG Jianliang[2], CHAI Yifan[2], XU Runsheng[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, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at such characteristics as low ash, low sulfur, low phosphorus, high CaO, high calorific value and high combustion rate of a high calcium bituminous coal, the experiment on injecting the bituminous coal into blast furnace is conducted, the influence of flux injection mode change on the performance of iron-containing burden is studied, and the burden structure under the condition of high proportion injection of the bituminous coal is explored, which lays the foundation for the large-scale application of blast furnace injection of the bituminous coal. The results show that, after using this bituminous coal, except for a slight increase in the melting start temperature and softening interval, other indexes are reduced. Keeping the bituminous coal ratio unchanged at 30%, with the coal ratio increasing from 140 kg/t to 200 kg/t, the softening start temperature, softening end temperature and melting end temperature of the burden gradually increase, while the melting start temperature, softening interval and maximum pressure difference have little changes, and the thickness of melting interval and soft melting layer first increases and then decreases. When the coal ratio is kept constant at 160 kg/t, with the proportion of bituminous coal rising from 30% to 100%, the softening start temperature, softening end temperature, melting start temperature and melting end temperature of the burden as a whole show a trend of increasing first

收稿日期： 2022－06－25；**修回日期：** 2022－08－04
基金项目： 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-IDRY－20－014)
作者简介： 白云峰(1967—)，男，正高级工程师，从事煤洗选加工的研究工作。
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和冶金二次资源综合利用的研究。

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

and then decreasing, the softening interval shows a trend of decreasing first and then increasing, and the melting interval, maximum pressure difference and soft melting layer thickness also show a trend of increasing first and then decreasing.

Key words: burden structure; droplet performance; bituminous coal; anthracite; sinter; pellet

煤炭作为全世界分布最广、储量最大的化石能源，是全世界经济发展的主要动力能源[1]。随着经济的发展与城镇化的推进，我国的煤炭资源消耗也逐年增加，据统计从2011年起其消耗量占世界煤炭资源总消耗量的比重均超过50%[2-4]。但是我国煤炭行业发展不平衡、不充分，煤炭开采水平与煤炭利用率低于发达国家[5-6]。化石能源是一种不可再生的资源，因此如何实现低阶煤的高效利用就尤为重要[7-8]。同时现代高炉冶炼需用焦炭，它是高炉冶炼中的发热剂、还原剂、增碳剂以及维持高炉料柱透气性的骨架[9]。然而炼焦会造成环境污染、能源浪费等一系列问题，并且随着钢铁产量的增加，冶金焦日趋匮乏[10-12]。若将低阶煤用于高炉喷吹，以替代焦炭起提供热量、还原剂和增碳剂的作用，既缓和了焦煤的需求，也减少了炼焦生产对环境的污染和能源的消耗，同时焦比降低、生铁成本减少、企业效益得以提高。此外高炉喷煤是调剂炉况热制度的有效手段，可以改善高炉炉缸的工作状态，使高炉稳定顺行；降低理论燃烧温度，为高炉使用高风温和富氧鼓风创造了条件；可提高煤气的还原能力和穿透扩散能力，有利于矿石还原和高炉操作指标的改善[13-14]。

上湾高钙烟煤属于低阶烟煤，具有低灰、低硫、低磷、高CaO、高热值、高燃烧率的特点，非常适用于高炉喷吹[15]。大量喷吹该高钙烟煤除了可以部分替代焦炭，降低焦比、提高煤比、减少生铁成本、提高企业效益外，还可以增加由煤粉带入高炉的熔剂量，从而减少由烧结矿带入高炉的熔剂量，进而减少烧结矿的使用量，最终达到节能降耗，提质增效的目的。本文通过研究熔剂入炉方式改变对含铁炉料性能的影响，揭示适用于高比例喷吹该烟煤的炉料结构，为其大规模应用于高炉喷吹奠定基础。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验原料为某钢铁企业3 200 m^3高炉的炉料，其实物如图1所示。炉料结构中，烧结矿、中信球团矿、龙腾球团矿、PB块矿的配比分别为54.28%、7.99%、23.27%、14.46%；喷吹结构中，无烟煤、烟煤的配比分别为70.66%、29.34%。含铁炉料、喷吹的固体燃料的化学成分如表1所示。由表1可知：烧结矿的TFe质量分数为57.06%、二元碱度为1.91，两种球团矿的TFe质量分数均为64%左右，龙腾球团矿的碱度为0.72，PB块矿的TFe质量分数为62.3%。烟煤、无烟煤、上湾高钙烟煤的挥发分分别为36.88%、14.64%、31.86%，固定碳质量分数分别为53.76%、75.30%、60.98%。上湾高钙烟煤的灰分中Ca和Fe的质量分数远高于普通烟煤，而S质量分数却很低；相比于烟煤，无烟煤灰分中主要含SiO_2和Al_2O_3，CaO质量分数较低。

1.2 试验方案

以该钢铁公司实际生产数据(矿比为1 621.143 kg/t，煤比为158.568 kg/t，高炉渣的碱度约为1.2)作为参照，设置其为对照组。此外，为了简化试验过程计量，将烟煤占比按30%、煤比按



(a) 烧结矿；(b) 中信球团矿；(c) 龙腾球团矿；(d) PB块矿；(e) 焦炭

图1 试验原料实物

Fig. 1 Image of the test material

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

表 1　含铁物料和和煤粉灰分的化学成分(质量分数)

Table 1　Chemical composition of iron-containing materials and pulverized coal ash　%

试验原料	TFe	FeO	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	TiO_2	K_2O	Na_2O	SO_3	其他
烧结矿	57.06	9.26	—	2.35	1.88	5.05	9.66	0.13	0.03	0.010	—	14.570
中信球团矿	64.54	—	—	—	0.52	5.66	—	—	—	—	—	29.280
龙腾球团矿	64.40	0.35	—	0.27	1.21	3.30	2.36	0.18	0.05	0.040	—	27.840
PB 块矿	62.30	0.09	—	0.02	1.37	3.34	0.02	0.02	0.01	0.003	—	32.827
烟煤	—	—	13.13	—	6.73	33.50	15.03	—	0.69	—	8.23	22.690
无烟煤	—	—	5.40	—	28.79	50.84	4.03	—	1.79	—	1.61	7.540
上湾高钙烟煤	—	—	21.37	—	11.40	19.13	29.09	—	0.20	—	—	18.810

160 kg/t 来计算。保持矿比和渣的碱度不变，使用上湾高钙烟煤来代替现有烟煤，并通过改变煤比和烟煤喷吹占比来达到降低烧结矿配比、提高球团矿配比，进而减少烧结矿的使用量。根据《铁矿石高温荷重还原软熔滴落性能测定方法》(GB/T 34211—2017)，计算得到具体试验方案如表 2 所示。

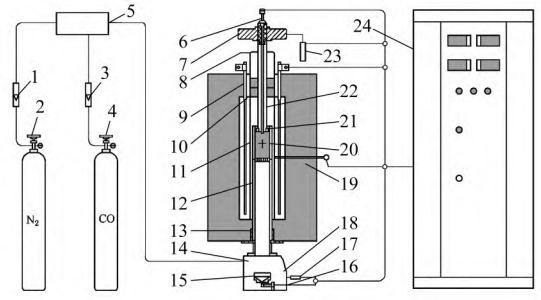
表 2　炉料结构的熔滴试验方案

Table 2　Melt-drop experiment scheme of charge structure

试验编号	试验加入量/g					煤比/(kg·t^{-1})	烟煤占比(质量分数)/%
	烧结矿	中信球团矿	龙腾球团矿	PB 块矿	焦炭		
0#(对照组)	271.40	39.95	116.35	72.30	160	160	30
1#	258.90	39.95	128.85	72.30	160	140	30
2#	263.50	39.95	124.25	72.30	160	160	30
3#	268.15	39.95	119.60	72.30	160	180	30
4#	272.75	39.95	115.00	72.30	160	200	30
5#	251.85	39.95	135.90	72.30	160	160	50
6#	240.20	39.95	147.55	72.30	160	160	70
7#	222.70	39.95	165.05	72.30	160	160	100

1.3　试验方法

试验装置为铁矿石高温荷重还原软熔滴落设备(图 2)。为了更好地模拟高炉的实际生产情况，试验所用原料置于(105 ± 5) ℃的鼓风干燥箱中干燥，时间不小于 2 h；之后通过破碎、筛分得到粒度范围为 10.0 ~ 12.5 mm 的试样。试验开始前，根据不同组别的试验方案，提前将 4 种铁矿石原料混合均匀。试样的装入顺序：首先在石墨坩埚底部平铺 80 g 焦炭，然后将混匀的铁矿石铺在底层焦炭颗粒上，随后将剩余的 80 g 焦炭铺在最上层，测量料层高度后进行系统气密性检查。将石墨坩埚放入高温炉进行焙烧，其升温制度：从室温至 900 ℃，升温速率为 10 ℃/min；900 ~ 1 100 ℃，升温速率为2 ℃/min；1 100 ~ 1 600 ℃，升温速率为 5 ℃/min；当试料温度达到 1 600 ℃后持续焙烧30 min。其还原制度：炉温为500 ℃前通入



1—N_2 质量流量控制器；2—N_2 钢瓶；3—CO 质量流量控制器；4—CO 钢瓶；5—混气气瓶；6—测温热电偶；7—荷重砣；8—气体出口；9—U 型硅钼棒；10—隔热套环；11—刚玉护管；12—石墨支管；13—密封套；14—气体入口；15—承滴坩埚；16—电子天平；17—差压变送器；18—密封箱；19—控温热电偶；20—石墨坩埚；21—石墨压头；22—石墨压杆；23—位移变送器；24—主控系统。

图 2　铁矿石高温荷重还原软熔滴落设备

Fig. 2　Iron ore high temperature load reduction soft melt dripping equipment diagram

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

N_2，流量为5 L/min；到500 ℃后切换为30% CO + 70% N_2 的混合气体，流量为5 L/min；试验结束后继续通 N_2，流量为2 L/min；当料层温度低于200 ℃时，停止通入 N_2。

含铁炉料的软熔性能影响高炉的透气性和软熔带结构，对整个炉况的影响非常大，是矿石评价的重要指标。软熔试验用来模拟炉料在高炉冶炼过程中软化、熔融、滴落的过程。本文主要测试软化开始温度、熔融开始温度、滴落温度等与高炉生产有直接关系的指标。炉料的软化区间、熔融区间和软熔层厚度计算分别如式(1)～(4)所示。

$$\Delta T_1 = T_{40} - T_{10} \quad (1)$$

$$\Delta T_2 = T_d - T_s \quad (2)$$

$$\Delta H = H_s - H_d \quad (3)$$

$$\Delta P = P_{顶} - P_{底} \quad (4)$$

式中：T_{10}为软化开始温度(试样软化收缩10%时的温度)，℃；T_{40}为软化终了温度(试样软化收缩40%时的温度)，℃；T_s为熔融开始温度(压差为1 kPa时的温度)，℃；T_d为熔融终了温度(熔滴物滴下时的温度)，℃；ΔT_1为软化区间，℃；ΔT_2为熔融区间，℃；H_s为熔融开始位移，mm；H_d为滴落开始位移，mm；ΔH为软熔层厚度，mm；ΔP为试验过程中气体通过料层的压力差，kPa；$P_{顶}$为料层顶部压力，kPa；$P_{底}$为料层底部压力，kPa。

2 结果与讨论

2.1 不同条件下炉料的熔滴性能变化

对不同炉料进行软化熔滴性能试验，结果如表3所示。将试验结果分为三组：① 在烟煤占比为30%、煤比为160 kg/t不变的情况下(0#、2#试样)，对比使用现有烟煤与上湾高钙烟煤所得到的软化熔滴性能；② 保持烟煤占比为30%不变的条件下(1#～4#试样)，改变不同的煤比，得到不同的软化熔滴性能；③ 保持煤比为160 kg/t不变的条件下(2#、5#～7#试样)，改变不同的烟煤占比，得到不同的软化熔滴性能。下文将从上述三个方面来论述不同条件下炉料的熔滴性能变化。

表3 不同炉料的软化熔滴性能试验结果

Table 3 Experimental results of softening, melting and dripping properties of different charges

试验编号	温度/℃						ΔP_{max}/kPa	ΔH/mm
	T_{10}	T_{40}	T_s	T_d	ΔT_1	ΔT_2		
0#	1 059	1 211	1 312	1 417	152	105	6.8	16.3
1#	1 038	1 202	1 312	1 380	164	68	8.0	9.4
2#	1 042	1 203	1 321	1 391	161	70	3.9	12.5
3#	1 048	1 198	1 263	1 373	150	110	8.0	21.1
4#	1 068	1 227	1 314	1 418	159	104	5.6	16.4
5#	1 065	1 215	1 312	1 418	149	106	5.5	16.2
6#	1 032	1 182	1 270	1 405	150	135	6.1	19.5
7#	1 032	1 202	1 304	1 407	171	103	4.9	18.11

注：ΔP_{max}为试验过程中气体通过料层的最大压力差，kPa。

(1) 0#与2#试样软化熔滴性能的对比。由表3中0#与2#试样的软化熔滴性能可以看出，与喷吹的现有烟煤相比，使用上湾高钙烟煤后，其软化开始温度、软化终了温度、熔融终了温度降低，熔融开始温度升高。此外，除了其软化区间略有提高，熔融区间、最大压差、软熔层厚度均降低。

(2) 1#～4#试样软化熔滴性能的对比。对比表3中1#～4#试样T_{10}、T_{40}、T_s、T_d可以看出，随着煤比由140 kg/t上升到200 kg/t，炉料的软化开始温度、软化终了温度、熔融终了温度总体呈上升的趋势，即随着煤比的增加，炉料的软化开始温度、软化终了温度、熔融终了温度逐渐增加。熔融开始温度规律性不明显，2#试样(煤比为160 kg/t)的熔融开始温度最大，3#试样(煤比为180 kg/t)的熔融开始温度最小。

对比表3中1#～4#试样中ΔT_1、ΔT_2可以看出，随着煤比由140 kg/t上升到200 kg/t，炉料的软化区间变化不大。炉料的熔融区间呈现出先升

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

高后降低的趋势，其中在煤比为 180 kg/t 时炉料的熔融区间最大，在煤比为 140 kg/t 时炉料的熔融区间最小。研究表明，软化区间和熔融区间越小，高炉炉料的透气性越好，软化熔滴性能就越好。因此，在煤比为 140、160 kg/t 时，炉料的软化熔滴性能要更优越一些。

对比表 3 中 1# ~4# 试样 ΔP_{max}、ΔH 可知，随着煤比由 140 kg/t 上升到 200 kg/t，综合炉料的最大压差波动范围不大，在煤比为 160 kg/t 时有最小的最大压差。随着煤比的增加，炉料的软熔层厚度呈现出先增大后减小的趋势，3# 试样(煤比为 180 kg/t)的软熔层厚度最大，1# 试样(煤比为 160 kg/t)的软熔层厚度最小。研究表明，最大压差和软熔层厚度越小，渣相的黏度越低，流动性越好，软化熔滴性能就越好。因此，在煤比为 160 kg/t 时炉料的软化熔滴性能最优。

综上所述，随着煤比由 140 kg/t 上升到 200 kg/t，炉料的软化开始温度、软化终了温度、熔融终了温度逐渐增加，炉料的熔融开始温度、软化区间、最大压差变化不大，炉料的熔融区间和软熔层厚度呈现出先升高后降低的趋势；在煤比为 160 kg/t 时炉料的软化熔滴性能最优。

(3) 2#、5# ~7# 试样软化熔滴性能的对比。对比 2#、5# ~7# 试样 T_{10}、T_{40}、T_s、T_d 可知，随着烟煤占比的提高，混合炉料的开始软化温度、软化终了温度、开始熔融温度、熔融终了温度的波动范围不大。

对比 2#、5# ~7# 试样 ΔT_1、ΔT_2 可以看出，随着烟煤占比由 30% 增加到 100%，炉料的软化区间呈现出先降低后升高的趋势。其中，烟煤占比为 100% 时综合炉料的软化区间最大，烟煤占比为 50%、70% 时综合炉料的软化区间相近。随着烟煤占比的提高，炉料的熔融区间呈现出先升高后降低的趋势。其中，烟煤占比为 70% 时综合炉料结构的熔融区间最大，烟煤占比为 30% 时综合炉料结构的熔融区间最小。因此，在烟煤占比为 30% 时综合炉料的软化熔滴性能最好。

对比 2#、5# ~7# 试样 ΔP_{max}、ΔH 可知，随着烟煤占比从 30% 上升到 100%，综合炉料的最大压差和软熔层厚度呈现先增大后减小的趋势。其中，6# 试样即烟煤占比为 70% 时综合炉料的最大压差和软熔层厚度最大，2# 试样即烟煤占比为 30% 时综合炉料的最大压差和软熔层厚度最小。因此，当烟煤占比为 30% 时的综合炉料的软化熔滴性能最好。

综上所述，随着喷煤时的烟煤占比从 30% 上升到 100%，综合炉料的软化开始温度、软化终了温度、熔融开始温度、熔融终了温度，炉料的软化区间呈现出先降低后升高的趋势，综合炉料的熔融区间、最大压差和软熔层厚度呈现出先升高后降低的趋势。因此，在烟煤占比为 30% 时综合炉料的软化熔滴性能最优。

2.2　经济效益分析

根据表 2 所示熔滴试验方案得到炉料结构的配比数据如表 4 所示，并计算得到不同组别相对于 0# 对照组的烧结矿与球团矿的配加量变化。由表 4 可以看出，除了 4# 试验烧结矿配加量增加以外，其余各组的烧结矿配加量均减少，球团矿配加量均增加。其中，当煤比为 160 kg/t、烟煤占比为 100% 时，烧结矿的配加量减少得最多，球团矿配加量增加得最多。

表 4　炉料结构配比数据(质量分数)

Table 4　Data table for the structural proportioning of the furnace charge　　%

试验编号	炉料结构				配加量变化	
	烧结矿	中信球团矿	龙腾球团矿	Pb 块矿	烧结矿	球团矿
0#	54.28	7.99	23.27	14.46	0	0
1#	51.78	7.99	25.77	14.46	−2.5	2.5
2#	52.70	7.99	24.85	14.46	−1.58	1.58
3#	53.63	7.99	23.92	14.46	−0.65	0.65
4#	54.55	7.99	23.00	14.46	0.27	−0.27
5#	50.37	7.99	27.18	14.46	−3.91	3.91
6#	48.04	7.99	29.51	14.46	−6.24	6.24
7#	44.54	7.99	33.01	14.46	−9.74	9.74

一般情况下，烧结生产的工序能源消耗(折标煤)约为 49 kg/t，而球团工序的能源消耗仅为烧结矿能耗的一半左右(23 kg/t)。球团工序的生产能耗低的原因：① 球团生产过程中各个阶段废气的利用率高，在此过程中热量得到了充分的利用；

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

② 球团生产的流程较短，而焙烧过程是密闭的，这样就降低了生产过程中的烟尘量，减少了除尘设备的使用从而降低了电能消耗。

由前述可知，保持烟煤占比为30%不变的条件下，在煤比为160 kg/t时炉料的软化熔滴性能最优。因此，满足煤比为160 kg/t、烟煤占比为30%的2#试样的软化熔滴性能最优。结合表4可知，与0#对照组相比，2#炉料烧结矿的占比下降了1.58%，球团矿的占比增加了1.58%。

在煤比为160 kg/t、烟煤占比为30%的喷煤结构下，用上湾烟煤代替神东烟煤，入炉熔剂减少1.19 kg/t，烧结矿减少1.58%，可节约标煤26 kg/t。结合表5，以炉容为3 200 m^3、年产铁水量为280万吨的高炉为例，每年可以节约标煤所用花费约131万元(人民币)。每年可以节约熔剂使用量为3 332 t，约100万元(人民币)。

表5 计算所用的数据

Table 5 Data tables used for calculations

高炉容积/m^3	铁水产量/万吨	烧结工序能耗/(kg·t^{-1})	球团工序能耗/(kg·t^{-1})	标煤价格/(元·t^{-1})	生石灰价格/(元·t^{-1})
3 200	280	49	23	700	300

3 结 论

(1) 与喷吹的现有烟煤相比，使用上湾高钙烟煤后，其软化开始温度、软化终了温度、熔融终了温度降低，熔融开始温度升高；此外，除了其软化区间略有提高外，熔融区间、最大压差、软熔层厚度均降低。

(2) 保持烟煤占比为30%不变，随着煤比由140 kg/t上升到200 kg/t，炉料的软化开始温度、软化终了温度、熔融终了温度逐渐增加，炉料的熔融开始温度、软化区间、最大压差变化不大，炉料的熔融区间和软熔层厚度呈现出先升高后降低的趋势。在煤比为160 kg/t时炉料的软化熔滴性能最优。

(3) 保持煤比为160 kg/t不变，随着喷煤时烟煤占比从30%上升到100%，综合炉料的软化开始温度、软化终了温度、熔融开始温度、熔融终了温度，炉料的软化区间呈现出先降低后升高的趋势，综合炉料的熔融区间、最大压差和软熔层厚度呈现出先升高后降低的趋势。

(4) 保持煤比、喷煤结构不变，采用上湾高钙烟煤代替原有烟煤，除综合炉料的软化熔滴性能更优外，每年采用球团矿替代烧结矿生产可节约标煤费用约131万元(人民币)，且每年可以节约熔剂使用量为3 332 t，约100万元(人民币)。

参考文献:

[1] 张莉，张建强，宁树正，等. 中国与全球煤炭行业形势对比分析[J]. 中国煤炭地质，2021，33(S1)：17－21；43.
ZHANG Li，ZHANG Jianqiang，NING Shuzheng，et al. China and global coal industry situations comparative analysis[J]. Coal Geology of China，2021，33(S1)：17－21；43.

[2] 张春晖，肖楠，苏佩东，等. “双碳”目标约束下我国煤炭行业绿色转型发展机遇[J]. 能源科技，2022，20(1)：3－5；27.
ZHANG Chunhui，XIAO Nan，SU Peidong，et al. Green transition and development opportunities of China′s coal industry under the constraints of the “Carbon Peaking and Carbon Neutrality” goals[J]. Energy Science and Technology，2022，20(1)：3－5；27.

[3] 邢婷玉. 基于VECM模型的中国煤炭需求弹性分析[J]. 陕西煤炭，2022，41(1)：96－99；107.
XING Tingyu. Analysis of China′s coal demand elasticity based on VECM model[J]. Shaanxi Coal，2022，41(1)：96－99；107.

[4] 岳福斌. 2021—2022年中国煤炭产业经济形势研究报告[J]. 中国煤炭，2022，48(2)：5－14.
YUE Fubin. Research report on economic situation of China′s coal industry from 2021 to 2022[J]. China Coal，2022，48(2)：5－14.

[5] 康红普，王国法，王双明，等. 煤炭行业高质量发展研究[J]. 中国工程科学，2021，23(5)：130－138.
KANG Hongpu，WANG Guofa，WANG Shuangming，et al. High-quality development of China′s coal industry[J]. Steategic Study of CAE，2021，23(5)：130－138.

[6] 王珩珩. 关于未来煤炭开采技术发展方向的探讨

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

[J]. 当代化工研究,2022(1):7-9.
WANG Hangheng. Discussion on the future development direction of coal mining technology [J]. Modern Chemical Research,2022(1):7-9.

[7] ZHUKOVSKIY Y L,BATUEVA D E,BULDYSKO A D,et al. Fossil energy in the framework of sustainable development: Analysis of prospects and development of forecast scenarios [J]. Energies,2021,14(17):5268.

[8] ZHANG R,XING Y W,XIA Y C,et al. Synergistic adsorption mechanism of anionic and cationic surfactant mixtures on low-rank coal flotation [J]. ACS Omega,2020,5(32):20630-20637.

[9] FAN Y J,CHAI Y F,WU J Y,et al. Behavior of coke in the blast furnace for smelting Bayan Obo Mine [J]. Fuel,2022,309:122147.

[10] 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 Anstellunder the large injection condition [J]. China Metallurgy,2022,32(3):61-67.

[11] 王小艾,姜鑫,田晓文,等. 提高高炉喷煤比的关键技术研究与应用 [J]. 河北冶金,2021(5):49-54;69.
WANG Xiaoai,JIANG Xin,TIAN Xiaowen,et al. Research and application of key technology to improve the coal injection ratio of blast furnace [J]. Hebei Metallurgy,2021(5):49-54;69.

[12] WU K,PAN W,XU W R,et al. Research on utilization factor of injected pulverized coal into BF at large PCI rate [J]. Steel Research International,2008,79(12):904-907.

[13] 孔凡朔,张建良,李丙来,等. 高炉喷煤精确控制技术开发应用 [J]. 钢铁,2006,41(6):9-12.
KONG Fanshou,ZHANG Jianliang,LI Binglai,et al. Development and application of accurate PCI control technology [J]. Iron & Steel,2006,41(6):9-12.

[14] 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):1-8.
ZENG Yu,JIANG Zhe,ZHANG Jianliang,et al. Comprehensive analysis on characteristics of injection fuel in Ansteel blast furnace [J]. China Metallurgy,2022,32(5):1-8.

[15] LI Y J,ZHANG J L,WANG G W,et al. Effect of coal blending on ash fusion behavior for blast furnace injection of high calcium bituminous coal [J]. Energy Science & Engineering,2019,7(6):3332-3343.

(上接第 100 页)

[12] 梁辉,查贤斌,归柯庭. γFe_2O_3 的选择性催化还原脱硝性能及其对 NH_3 和 NO 的表面吸附行为研究 [J]. 中国电机工程学报,2014(32):5734-5740.
LIANG Hui,ZHA Xianbin,GUI Keting,et al. A study of selective catalysis reduction denitration performance and adsorption of NH_3 and NO over γFe_2O_3 catalyst [J]. Proceedings of the CSEE,2014(32):5734-5740.

[13] 高岩. 选择性催化还原脱硝催化剂的实验与机理研究 [D]. 济南:山东大学,2013.
GAO Yan. Experimental and mechanism analysis on selective catalytic reduction de NO_x catalyst [D]. Jinan: Shandong University,2013.

[14] 马建蓉,刘振宇,黄张根,等. NH_3 在 V_2O_5/AC 催化剂表面的吸附与氧化 [J]. 催化学报,2006,27(1):91-96.
MA Jianrong,LIU Zhenyu,HUANG Zhanggen,et al. Adsorption and oxidation of NH_3 over V_2O_5/AC catalyst [J]. Chinese Journal of Catalysis,2006,27(1):91-96.

[15] 李晓晓. 球状活性炭担载锡基铈基金属氧化物用于 NO 低温催化还原研究 [D]. 上海:华东理工大学,2015.
LI Xiaoxiao. SnO_2-CeO_2/spherial activated carbon based catalysts for low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH_3 [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology,2015.

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