doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.013
引用格式：刘诗薇，张哲，邹冲，折媛，黄琪琪，李佳乐，施瑞盟，尚敏. 神木低变质煤参与配煤炼焦的可行性[J]. 矿冶，2026，35(2)：275-284.
LIU Shiwei, ZHANG Zhe, ZOU Chong, SHE Yuan, HUANG Qiqi, LI Jiale, SHI Ruimeng, SHANG Min. The feasibility of using low-varied lignite from Shenmu in coal blending for coking[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 275-284.

神木低变质煤参与配煤炼焦的可行性

刘诗薇[1] 张 哲[1] 邹 冲[1] 折 媛[1] 黄琪琪[1]
李佳乐[1] 施瑞盟[1] 尚 敏[2]
（1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院，西安 710000；
2. 神木市三江煤化工有限责任公司，陕西 榆林 719000）

摘 要：为了探索神木低变质煤在配煤炼焦领域的应用潜力，对神木低变质煤的煤质特性、岩相特征和热解特性进行了测定，将焦渣特性≥3、基质镜质组含量>10.5%，镜质组反射率≥0.52%的低变质煤归为低黏煤，其它归为无黏煤；相较于无黏煤，低黏煤的煤质特性与气煤更为相似。通过测定不同比例（*SR*）的低黏、无黏煤替换气煤后，配合煤的黏结性、坩埚焦的反应性（*PRI*）和反应后强度（*PSR*），进一步探讨了神木低变质煤的各显微组分在热解过程中的作用。结果表明，当*SR*<*CR*（低黏、无黏配合煤黏结性最相近时的交叉比例）时，低变质配合煤的黏结性主要受基质镜质组的影响，此时低黏配合煤的黏结性较高，坩埚焦的*PRI*较低而*PSR*较高；当*SR*>*CR*时，低变质配合煤的黏结性主要受镜质组总量的影响，此时配合煤的黏结性，坩埚焦的*PRI*和*PSR*之间的差异减小；特别是当*SR*≤6%时，2#配合煤的黏结性最优（*G*值≥76），适用于冶金焦生产。研究结果可为神木低变质煤在冶金焦领域的应用提供理论依据和技术支持。

关键词：低变质煤；配煤炼焦；岩相学；黏结性；坩埚焦
中图分类号：TF0；TF4；TF5 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）02-0275-10

The feasibility of using low-varied lignite from Shenmu in coal blending for coking

LIU Shiwei[1] ZHANG Zhe[1] ZOU Chong[1] SHE Yuan[1] HUANG Qiqi[1] LI Jiale[1]
SHI Ruimeng[1] SHANG Min[2]
(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710000, China;
2. Shenmu Sanjiang Coal Chemical Industry Co., Ltd., Yulin 719000, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the potential application of Shenmu low-vitrinite coal in coal blending for coke production, the coal quality characteristics, petrographic features, and pyrolysis characteristics of Shenmu low-vitrinite coal were determined. Coals with a coke ash characteristic of≥3, a matrix vitrinite content of>10.5%, and a vitrinite reflectance of≥0.52% were classified as low-viscous coals, while the others were classified as non-viscous coals. Compared with non-viscous coals, the coal quality characteristics of low-viscous coals were more similar to those of lignite. By measuring the cohesiveness, *PRI*, and *PSR* of different proportions (*SR*) of low-viscous and non-viscous coals replacing bituminous coal, the role of each microscopic component in the pyrolysis process of Shenmu low-vitrinite coal was further explored. The results showed that when *SR*<*CR* (the crossing proportion when the cohesiveness of low-viscous and non-viscous blended coal is most similar), the cohesiveness of low-vitrinite blended coal was mainly influenced by the matrix vitrinite, with the cohesiveness of low-viscous blended coal being

收稿日期：2024-12-19 **修回日期：**2025-01-25 **录用日期：**2025-02-06
基金项目：陕西省自然科学基础研究计划项目(2022JQ-541)；榆林市科技局产学研合作项目(2023-CXY-194)
第一作者：刘诗薇，博士，副教授，主要从事低阶煤热解与高效利用。E-mail：liushiw2010@126.com
通信作者：施瑞盟，博士，副教授；E-mail：shireimeng2010@163.com
©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

higher and the *PRI* of the crucible coke being lower and the *PSR* being higher. When *SR*>*CR*, the cohesiveness of low-vitrinite blended coal was mainly influenced by the total amount of vitrinite, with the cohesiveness, *PRI*, and *PSR* of the blended coal and crucible coke being similar. Especially when *SR*≤6%, the cohesiveness of 2# blended coal was the best (*G* value≥76), which was suitable for metallurgical coke production. The research results can provide theoretical basis and technical support for the application of Shenmu low-vitrinite coal in the metallurgical coke field.
Key words: low-metamorphic coal; blending coal for coking; petrograph; bond index; crucible ash

随着钢铁行业的快速发展，高炉对焦炭的高品质需求与优质炼焦煤资源稀缺的矛盾越发凸显[1-3]。在优质炼焦煤储量减少、价格波动剧烈的情况下，焦炭原料的供应和品质均无法适应现代高炉的生产要求，亟需拓展新煤源，开发新的炼焦技术[4-7]。

相关研究表明，配合煤的黏结性与煤质基础[8]、煤岩组成和热解反应密切相关，进而对焦炭的质量具有重要影响[9-13]。因此，低变质煤的煤质特性及其对配合煤黏结性的影响，是决定其是否适用于冶金焦生产的关键因素[14]。现阶段低变质煤在炼焦领域的研究主要集中在两个方面：一是将低变质煤通过水热处理[15]、热萃取[6,16]，或向其配合煤中添加黏结剂[17,18]、改质沥青[19]等以提高配合煤的黏结性。以上研究可有效提高配合煤黏结性，但综合的成本提高限制了其在实际生产过程中的应用。二是将具有一定黏结性的低变质煤直接配入配合煤中，如黏结性较好的气煤的配入[20-22]，这虽然会导致焦炭质量一定程度的下降，但仍满足冶金焦的使用标准。部分学者也尝试过将长焰煤、不黏煤引入冶金焦生产，然而，这通常会导致配合煤质量的显著下降[23-25]。综上所述，目前对低变质煤在冶金焦生产领域的应用研究尚处于起步阶段，关于低变质煤在焦化过程中的特性研究尚不明确，缺乏一套科学且系统化的应用规范，不同种类的低变质煤在配煤炼焦后产生的焦炭质量存在显著差异，这可能会对高炉冶炼的稳定性产生负面影响，低变质煤在冶金焦生产领域的应用研究仍具巨大的潜力。

神木地区低变质煤储量丰富，具有化学活性好、低灰、低硫低磷等特性[26]，如将神木低变质煤作为配煤炼焦煤源，可有效降低焦炭的灰、硫成分，提高焦炭强度，降低原料成本[27]。然而，由于神木低变质煤通常被认定为无黏结性煤，其在冶金焦生产领域的应用尚未获得关注。课题组通过干馏试验发现，神木低变质煤中有部分煤种具有低黏结性[28]，相较于其它低变质煤，其煤质特性与气煤十分相似。

神木低变质煤替换气煤参与配煤在冶金焦生产中的应用不仅能够改善焦炭工业、元素组分，缓解焦炭质量劣化，还具有提高资源利用率和经济效益等重要意义。然而，神木低变质煤的配入量需要控制在一个合理的范围内，以免对焦炭质量产生较强的负面影响[29,30]。鉴于此，本文对神木低变质煤的煤质基础、岩相特征和热解特性进行了深入研究，并将神木地区低变质煤进一步细分为低黏煤和无黏煤两大类。通过分析配合煤的黏结性、坩埚焦的反应性和反应后强度，探讨了神木低变质煤各显微组分在热解过程中的作用，并筛选出适用于冶金焦生产的优质神木低变质煤，进而为丰富高炉炼焦煤源及推动低变质煤在冶金焦领域的应用提供了理论依据和技术支持。

1 试验原料与研究方法

1.1 试验样品的选取

试验目标煤种选自神木地区的低变质程度煤（根据标准GB/T 5751—2009《中国煤炭分类》中分类可知，样品的*G*值均小于5，属于不黏煤；通过焦渣特性将其划分为低黏煤和无黏煤），其中低黏煤分别编号为1#、2#、3#、4#，无黏煤分别编号为5#、6#、7#、8#。炼焦煤选取某钢厂的焦煤（J1、J2、J3）、肥煤（F）、气煤（Q1、Q2）和瘦煤（S1、S2）。根据标准GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》和GB/T 31391—2015《煤的元素分析》分别对神木低变质煤与某钢厂气煤进行工业、元素分析检测，其结果见表1。

两种基础配煤比例采用某钢厂焦化部门的生产配比，分别记为配合煤1和配合煤2，配合煤中各炼焦煤的黏结性指数（*G*值）和配煤比例如表2所示。结合表1和表2可知，相较于Q2，Q1与神木低变质煤的$S_{t,d}$、焦渣特性和黏结性更为相似。因此本文主要研究用神木低变质煤代替Q1的可行性。

1.2 试验方法

利用MSP 9000C显微镜设备对样品的显微组分进行和镜质组随机反射率分布测定，结合SETSYS Evolution，France，SETARAM热分析的热解数据对神木低变质煤与Q1的性质进行比对后，采用黏结指数测定仪NJ-2检测低变质配合煤的黏结性指数，优

表1 煤的工业、元素分析

Table 1 Proximate and element analysis of coal

样品编号	工业分析				元素分析	焦渣特性
	V_d/%	A_d/%	FC_d/%	M_{ad}/%	$S_{t,d}$/%	
1#	37.18	10.21	50.18	2.43	0.33	3.0
2#	33.97	6.63	56.53	2.87	0.26	3.0
3#	36.14	7.12	52.79	3.95	0.32	3.0
4#	35.33	6.22	53.9	4.55	0.18	3.0
5#	30.41	6.91	59.51	3.17	0.29	2.0
6#	29.99	4.68	61.34	3.99	0.39	2.0
7#	32.31	6.43	55.54	5.72	0.15	2.0
8#	33.04	5.03	54.01	7.92	0.35	2.0
气煤Q1	34.87	8.48	52.87	3.78	0.45	4.0
气煤Q2	34.85	8.20	55.42	1.53	1.46	6.0

备注：V_d为干基挥发份，%；M_{ad}为空干基水分，%；FC_d为干基固定碳，%；A_d为干基灰分，%；$S_{t,d}$为干基全硫，%。

表2 炼焦煤黏结性和配合煤的基础配比

Table 2 Coking coal cohesion and basic ratio of blending coal

煤种	J1	J2	J3	F	Q1	Q2	S1	S2
*G*值	89.96	89.46	89.46	94.33	68.52	85.04	27.61	42.41
配合煤1	13%	10%	15%	10%	27%	10%	7%	8%
配合煤2	15%	12%	14%	11%	24%	10%	6%	8%

选部分神木低变质煤参与坩埚焦的制备并检测其热态性能。

岩相分析：将原煤样品按岩相分析标准GB/T 16773—2008《煤岩分析样品制备方法》制备光片，原煤的显微组分和镜质组反射率分别参照标准GB/T 8899—2013《煤的显微组分和矿物质测定方法》和GB/T 6948—2008《煤镜质体反射率显微镜测定方法》对样品进行检测。

TG-DTG检测：取10.0±0.1 mg值试样置于热分析仪天平坩埚内，将热分析仪抽成真空，以100 mL·min^{-1}流速向热分析炉腔内通入Ar至压强平稳，保温10 min，开始试验程序，以10 ℃·min^{-1}升温速率升温至900 ℃。

黏结性指数：配合煤的样品粒度<1 mm占比70%，1~2 mm占比30%，与宁夏标准无烟煤充分混合后按照标准GB/T 5447—2014《烟煤黏结性指数测定方法》对其进行检测。

坩埚焦制备：将粒度<3 mm占比90%的配合煤以0.8 t·m^{-3}的堆密度装入坩埚后置于升降井式炉炉膛中心，以8 ℃·min^{-1}升温至300 ℃、3 ℃·min^{-1}升温至550 ℃、4 ℃·min^{-1}升温至1 050 ℃保温30 min，全程通入700 mL·min^{-1}的N_2保护。

PRI、*PSR*检测：取人工破碎焦（粒度为3~6 mm）20±0.1 g，置于型号为TL1200的卧式管式炉中以10 ℃·min^{-1}升温至1 100 ℃，通入300 mL·min^{-1}的CO_2反应2 h，升降温期间通入500 mL·min^{-1}的N_2保护。测完*PRI*后的样品置于NJ-2中，转鼓600转后使用1 mm的圆孔筛振筛5 min，称取筛上物质量[31,32]。

2 试验结果与分析

2.1 基础特征

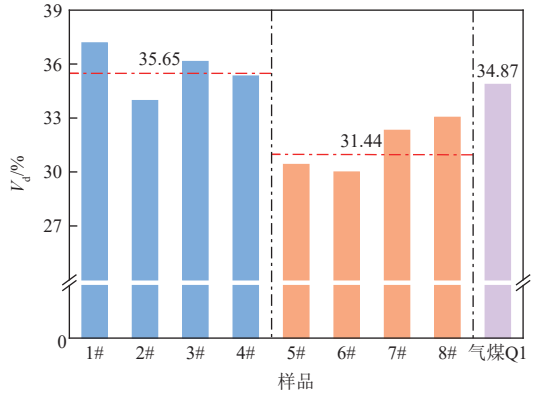
2.1.1 基础性质分析

神木低黏煤（样品1#、2#、3#、4#）、无黏煤（样品5#、6#、7#、8#）与配合煤中的气煤Q1的煤质基础分析如图1所示。低黏、无黏煤的$\overline{V}_d$（平均干燥基挥发分含量）和气煤Q1的V_d分别为35.65%、31.44%和34.87%；气煤Q1与低黏煤的V_d差异较小，与无黏煤的V_d差异较大。低黏、无黏煤的$\overline{A}_d$（平均干燥基灰分含量）和气煤Q1的A_d分别为7.55%、5.76%和8.48%；气煤Q1与低黏煤的A_d差异较小，与无黏煤的A_d差异较大。低黏、无黏煤的$\overline{S}_{t,d}$（平均干燥基全硫含量）和气煤Q1的$S_{t,d}$分别为0.27%、0.29%、0.45%；低黏煤和无黏煤的$S_{t,d}$皆低于气煤Q1的$S_{t,d}$。

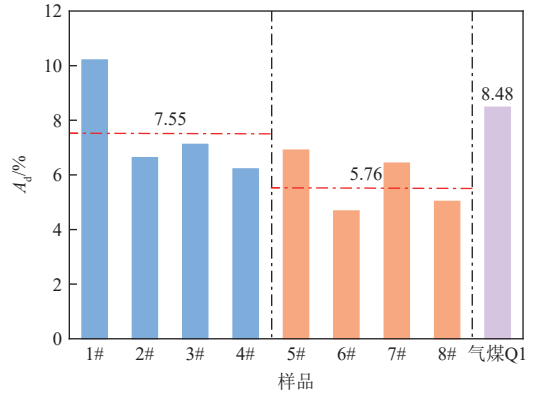
相较于无黏煤，神木低黏煤的V_d、A_d与气煤Q1的更为接近，且神木低黏煤的A_d和$S_{t,d}$低于气煤Q1，从成分来看，神木低黏煤的加入更有益于焦炭整体性能的提高。

2.1.2 岩相分析

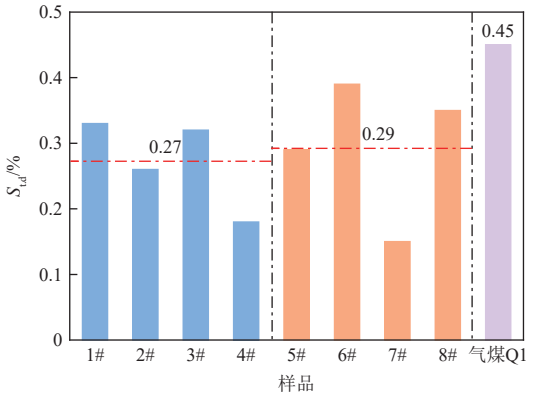
神木低变质煤与气煤Q1的显微结构如图2所示。根据主要镜质组的划分及显微形貌分析发现，无黏煤的结构镜质组含量最多，低黏煤次之，气煤Q1的基质镜质组含量最高。从显微结构分析，神木低黏煤与



(a)V_d的比对图



(b)A_d的比对图



(c)$S_{t,d}$的比对图

图1 神木低变质煤与气煤Q1的煤质基础对比

Fig. 1 Comparison of low-rank coal from Shenmu with the coal quality baseline of Q1

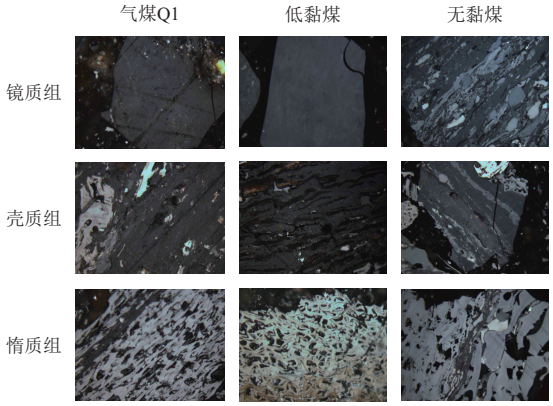
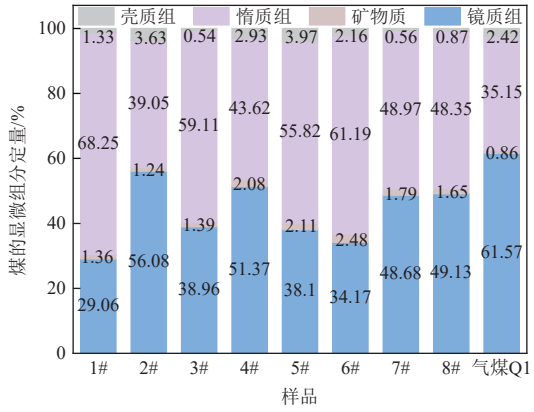
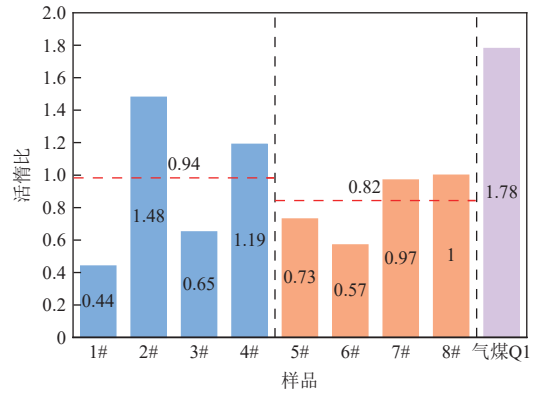


图2 神木低变质煤与气煤Q1的显微结构图片

Fig. 2 Microstructural images of low-rank coal from Shenmu and Q1



(a)煤的显微组分定量



(b)煤的活惰比

图3 神木低变质煤与气煤Q1的显微组分及活惰比

Fig. 3 The microscopic components and active-inactive ratio of low-rank coal from Shenmu and Q1

气煤Q1的显微结构较为相似。

神木低变质煤和气煤Q1的显微组分及活惰比如图3所示。气煤Q1的镜质组占比61.57%，活惰比为1.78。神木低变质煤中，低黏煤2#和4#的镜质组占比达到了50%以上，分别为56.08%和51.37%，活惰比分别为1.48和1.19；另外无黏煤7#和8#的镜质组占比接近50%，活惰比分别达到了0.97和1.0。从显微组分的组成来看，低黏煤2#、4#和无黏煤7#、8#的显微组分和活惰比与气煤Q1接近，有望替代气煤Q1参与配煤炼焦[33,34]。

根据显微结构，镜质组主要划分为基质、结构和均质镜质组，惰质组主要划分为丝质体和半丝质体[35,36]，神木低变质煤和气煤Q1的基质镜质组和丝质体含量如图4所示。低黏煤的基质镜质组含量

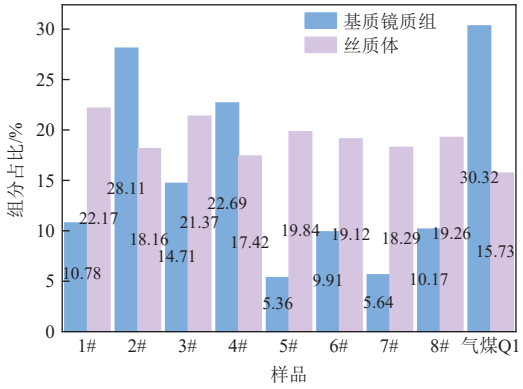


图4　神木低变质煤基质镜质组和丝质体含量

Fig. 4　The lignin and cellulose contents of the subbituminous coal matrix in Shenmu coalfield

>10.5%，无黏煤的基质镜质组含量≤10.5%，其平均含量分别为19.07%和7.91%，丝质体平均含量分别为19.78%和19.13%。低黏煤1#~4#的基质镜质组含量较高，分别占镜质组比例为37.09%、50.13%、37.76%和44.17%（均质镜质组分别占镜质组含量的35.55%、34.37%、44.46%和42.28%，结构镜质组分别占镜质组含量的27.36%、15.53%、17.78%和13.52%），其中基质镜质组占比较高的2#和4#具有替换气煤Q1用于配煤炼焦的潜力。

镜质组反射率（R_{ran}）可以有效的反应煤质特性，优化配煤结构[37,38]，神木低变质煤与气煤Q1的镜质组反射率如图5所示。神木低黏煤的镜质组反射率≥0.52，无黏煤的镜质组反射率<0.52，低黏煤和无黏煤的镜质组反射率分别为0.563和0.497。其中，2#的镜质组反射率（0.585）与气煤Q1的镜质组反射率（0.621）最为接近；2#和气煤Q1的反射率分布如图6所示，其反射率分布较气煤Q1范围略窄，主要集中在0.5~0.6；从反射率分布情况来看，2#与气煤Q1的重叠区域较大，二者镜质组反射率大小和分布极为相似。

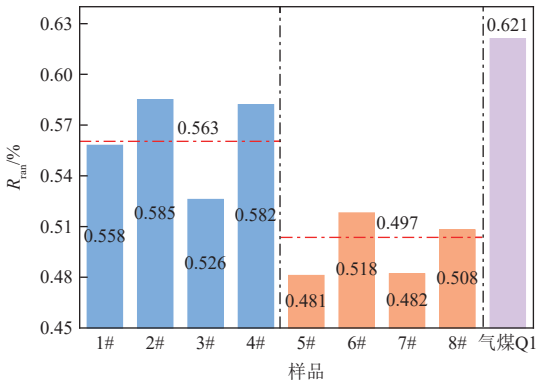


图5　神木低变质煤与气煤Q1的R_{ran}

Fig. 5　Lignite coal from Shenmu and Q1's R_{ran}

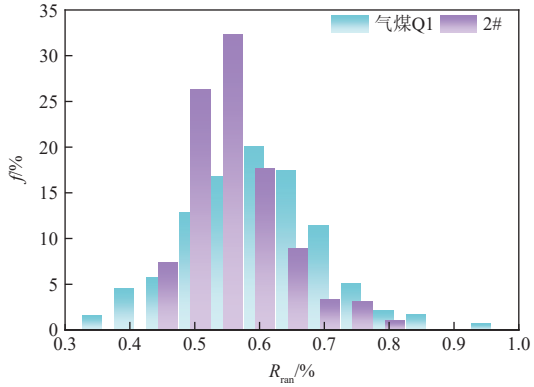


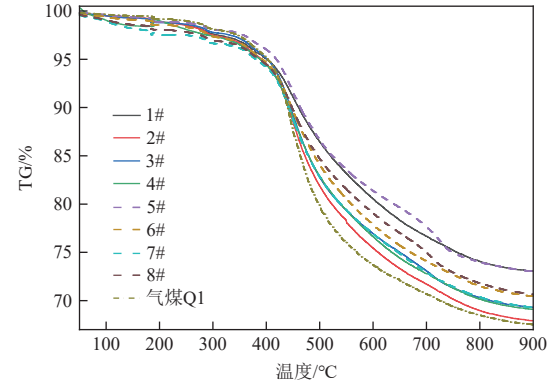
图6　低黏煤2#与气煤Q1的反射率分布

Fig. 6　The reflectance distribution of low-viscosity coal No. 2 and Q1

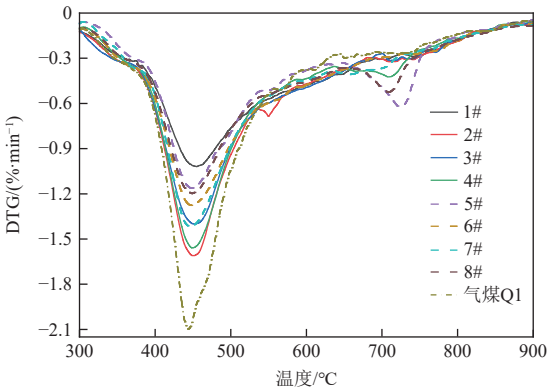
综上所述，部分神木低黏煤在显微、组分构成、镜质组反射率及其分布等岩相分析结果方面与气煤Q1有较为相似的性质，具有替换气煤Q1进行配煤炼焦的潜力。

2.2　神木低变质煤与气煤Q1的热解特性

配合煤的热解特性对炼焦过程具有重要影响，本文对神木低变质煤与气煤Q1的热解特性进行了分析，其结果如图7所示。神木低变质煤与气



(a)TG曲线



(b)DTG曲线

图7　神木低变质煤与气煤Q1的TG-DTG曲线

Fig. 7　The TG-DTG curve of low-rank coal from Shenmu and Q1

煤Q1的热解反应开始温度偏低(约为320 ℃)。神木低变质煤与气煤Q1的活泼热分解阶段均集中在350~550 ℃，此时气、固、液三相共存，并与主焦煤热解产生胶质体的温度区间有重合[39,40]；神木低变质煤与气煤Q1最大失重速率的温度点都在440 ℃，热解反应速率依次为：气煤Q1>低黏煤>无黏煤。其中低黏煤2#、4#和无黏煤7#与气煤Q1更为接近。

热解反应的实质是活性组分在升温过程中反应的过程。神木低变质煤的活惰比与其在440 ℃时(最大失重点)热解反应速率的相关性如图8所示。从图8可以看出，在热解反应区间350~550 ℃内，神木低变质煤的活性组分越多，热解时反应速率越大。

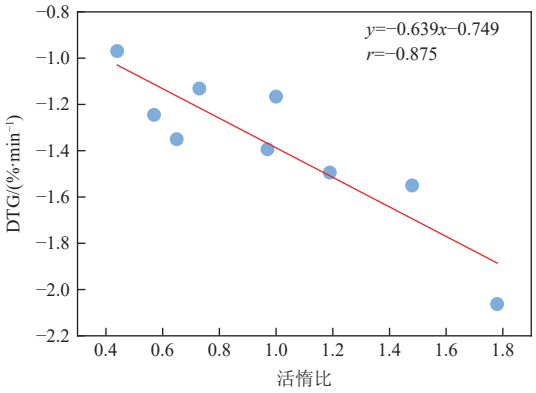


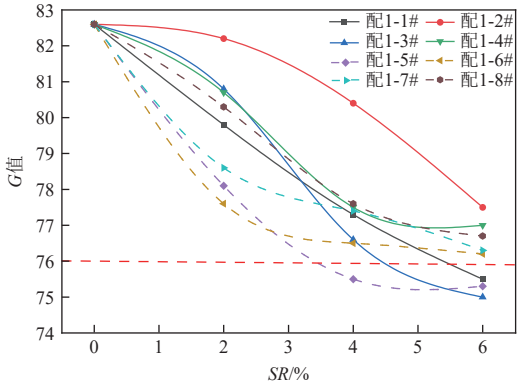
图8 活惰比与热解失重速率的相关性

Fig. 8 The correlation between live weight gain and thermal decomposition weight loss rate

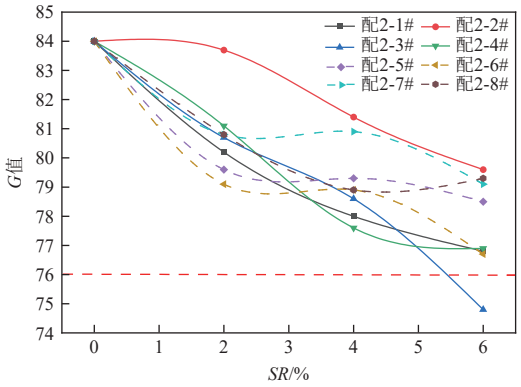
根据互换性配煤原理，活惰比在一定程度上影响胶质体物质的量，可见在350~550 ℃的热解特性与煤的活惰比具有很好的正相关性，证明在此温度区间内挥发分的逸散量与胶质体的量呈正相关[41,42]；另外神木低变质煤的热解区间可与肥煤的软化温度(350 ℃[43])良好搭接。试验结果表明，神木低黏煤2#、4#和无黏煤7#的热解特性与气煤Q1最为接近。

2.3 神木低变质煤配煤后黏结性的变化规律

为了更好的说明低变质煤替换气煤参与配煤炼焦的可行性，本文采用神木低变质煤以不同比例替换气煤Q1参与配煤炼焦，并对两种配合煤(表2所示的配合煤1和配合煤2)的*G*值进行检测，其结果如图9所示。随着神木低变质煤替换气煤Q1的比例(*SR*)增加，配合煤的*G*值下降，通常当低变质煤*SR*<10%时，配合煤的*G*值≥76时，焦炭品质符合冶金焦标准[44,45]。由图9可知，炼焦煤配比直接影响基础配合煤的*G*值，配合煤1的*G*值<配合煤2的*G*值，当*G*值=76时，配合煤1中符合炼焦标准的有2#、4#、6#、



(a)低变质煤对配合煤1黏结性的影响



(b)低变质煤对配合煤2黏结性的影响

注：横坐标*SR*的物理意义为：低变质煤替气煤Q1的比例，下同。

图9 神木低变质煤替换气煤Q1后的配合煤黏结性

Fig. 9 The coal-binding properties of the substitute low-rank coal for Q1 after the change of the Q1 coal grade

7#、8#(5种)，配合煤2中除3#外(7种)皆符合，配合煤2中可选择低变质煤的种类较多，适用于配煤炼焦的*SR*较大，这与配合煤2的基础煤种黏结性较高有关。

对于配合煤1，当0<*SR*<3%时，低黏煤配入配合煤1的*G*值>无黏煤配入配合煤1的*G*值(8#除外)，两者差异随*SR*的增加在不断减小；当*SR*=3%时，*G*值的大小基本相同(2#除外)；当3%<*SR*<6%时，掺入2#低黏煤的配合煤黏结性逐渐减小，但仍高于其它配合煤的黏结性；当*SR*=6%时，低黏、无黏煤对炼焦配合煤1的黏结性影响相近。对于配合煤2，当0<*SR*<2%时，掺入低黏煤2#、4#的配合煤黏结性高于掺入无黏煤配合煤黏结性，其中低黏煤2#配合煤的黏结性明显高于其它配合煤；当*SR*=2%时，除2#外，低黏配合煤的黏结性与部分无黏配合煤(7#、8#)的黏结性相近；当2%<*SR*<4%时，部分无黏配合煤的黏结性上升，低黏配合煤的黏结性持续下降；当*SR*=4%时，除2#外，其它低黏配合煤的黏结性均低于无黏配合煤；当4%<*SR*<6%时，低黏、

无黏配合煤的黏结性均呈下降趋势（8#除外），低黏煤2#的配合煤黏结性仅略高于其它低变质煤的配合煤。将两种低变质煤（低黏和无黏）在配合煤中*G*值的变化情况进行划分，低黏煤*G*值占有明显优势和不占优势的分界比例定义为交叉比例（*CR*），可知，CR_1=3%>CR_2=2%。当*SR*<*CR*时，低黏配合煤的*G*值>无黏配合煤的*G*值；当*SR*>*CR*时，低黏配合煤的*G*值≈无黏配合煤的*G*值，可见，相较于无黏煤，部分低黏煤少量代替气煤Q1（*SR*<*CR*时）进行配煤炼焦更具有优势。当*SR*≤6%时，低黏煤2#、4#和无黏煤7#、8#替换气煤Q1后配合煤的*G*值较高，其中低黏煤2#混入配合煤后的黏结性优势最明显。

结合煤岩的结果进一步分析，神木低变质煤的基质镜质组和镜质组总量分别对*CR*前后配合煤的*G*值影响如下图10所示。当*SR*<*CR*时，配合煤的*G*值与基质镜质组、镜质组总量均呈正相关关系，但与基质镜质组含量的相关性更好（基质镜质组与*G*值的相关系数（0.809）>镜质组总量与*G*值的相关系数（0.465））。当*SR*>*CR*时，配合煤的*G*值与基质镜质组、镜质组总量均呈正相关关系，但与镜质组总量的相关性更好（基质镜质组与*G*值的相关系数（0.558）<镜质组总量与*G*值的相关系数（0.767））。可见，神木低变质煤替换气煤Q1后配合煤的黏结性与其显微组分的构成具有明显的相关性。*SR*<*CR*时，基质镜质组含量越高，配合煤的*G*值越大；*SR*>*CR*时，镜质组总量差异较小，配合煤的*G*值差异减小。综上所述，低变质煤参与配煤炼焦可采用岩相进行初步筛选，小比例配入主要考虑基质镜质组含量，大比例配入则主要考虑低变质煤的镜质组总量。

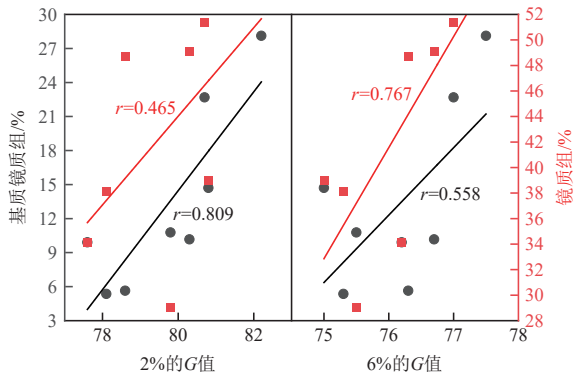


图10　神木低变煤基质镜质组与镜质组总量对配合煤黏结性的影响

Fig. 10　The influence of vitrinite in the low-rank coal of Shenmu and the total vitrinite on the caking property of blended coal

结合煤热解特性进一步分析（神木低变质煤的TG和DTG与其配合煤的黏结性的相关性如图11所示），神木低变质煤的热解特性与其参与的配合煤的黏结性呈现正相关性，相关系数*R*≥0.8；热解特性越好的低变质煤（如2#），同比例替换气煤Q1后配合煤的黏结性优于其它低变质煤的配合煤黏结性指数。

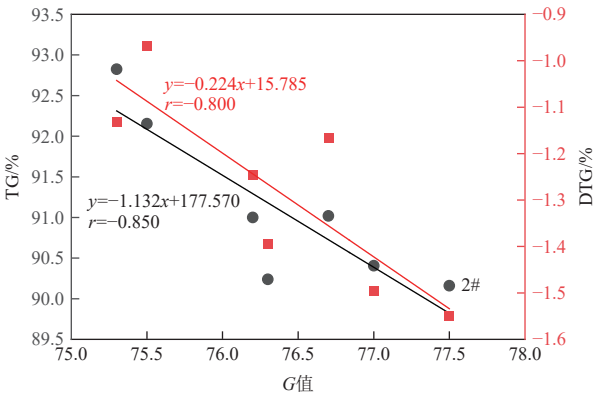


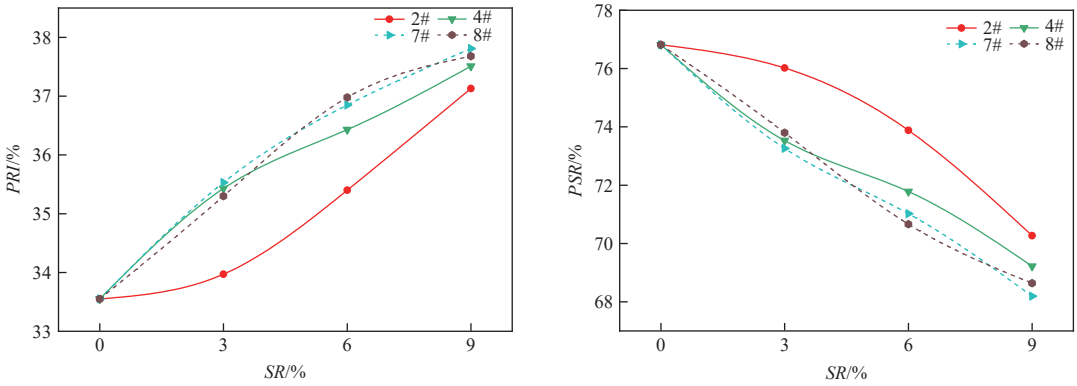
图11　热解特性与2%配合煤黏结性的相关性

Fig. 11　Thermal decomposition characteristics and correlation with the bonding property of 2% blended coal

综上所述，从黏结性指标来看，部分神木替换气煤Q1后配合煤的黏结性虽有所下降，但仍符合炼焦的入炉要求，小比例替换气煤是可行的。

2.4　神木低变质煤对坩埚焦性能的影响

实际生产过程中，受到原料和成本限制，焦、肥煤占比通常不会太高，即配合煤1比配合煤2应用情况更为普遍，因此本文主要采用配合煤1进一步探究神木低变质煤对坩埚焦性能的影响。神木低变质煤参与配煤炼焦对坩埚焦*PRI*和*PSR*的影响如图12所示。分别选用黏结性较好的低黏煤2#、4#和无黏煤7#、8#替换配合煤1中的气煤Q1。由图11可知，随着神木低变质煤替换气煤Q1比例增大，坩埚焦的*PRI*增加、*PSR*下降。低黏煤2#替换气煤Q1后，坩埚焦性能明显优于其他煤样。当0<*SR*≤3%时，2#坩埚焦的*PRI*最低，*PSR*最高，性能最好，4#、7#、8#的坩埚焦性能差异较小；当3%<*SR*≤6%时，低黏煤4#的坩埚焦性能逐渐优于无黏煤7#、8#的坩埚焦性能，此时低黏煤坩埚焦性能>无黏煤坩埚焦性能，它们之间的性能差异逐渐增大；当6%<*SR*≤9%时，低黏煤坩埚焦性能>无黏煤坩埚焦性能，低黏煤坩埚焦与无黏坩埚焦的性能差异逐渐减小；当*SR*=9%时，低黏煤坩埚焦的性能略优于无无黏煤坩埚焦的性能。可见，随着*SR*的增加，2#坩埚焦的性能远好于其它低变质煤的坩埚焦性能，低黏煤与无黏煤配煤炼焦



(a)低变质煤对坩埚焦*PRI*的影响　(b)低变质煤对坩埚焦*PSR*的影响

图 12　神木低变质煤配煤炼焦对坩埚焦性能的影响

Fig. 12　The influence of coal blending with low-rank metamorphic coal from Shenmu on the performance of crucible coke

后的坩埚焦性能差异先增大，后减小；当*SR*=6%时，低黏煤2#和4#较无黏煤7#、8#的坩埚焦性能优势明显，低黏煤2#的坩埚焦性能最优。

神木低变质煤以6%替换气煤Q1时，配合煤的黏结性与坩埚焦性能的关系如图13所示。由图13可知，神木低变质煤掺入后，配合煤黏结性与坩埚焦的性能存在相关性，配合煤的*G*值越大，坩埚焦的*PRI*越小，*PSR*越大，相关系数*R*>0.82。

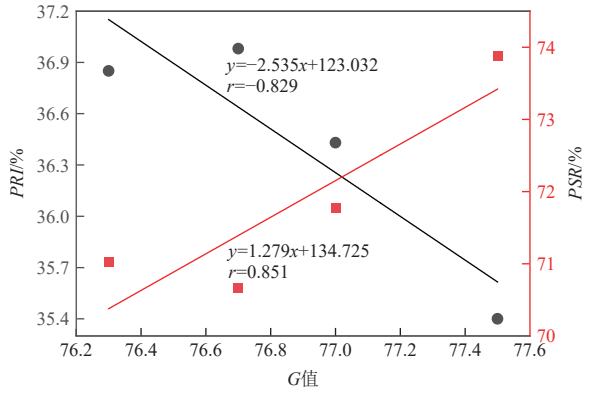


图 13　6%配合煤的黏结性与坩埚焦性能的关系

Fig. 13　The relationship between the cohesiveness of 6% blended coal and the performance of crucible coke

综上所述，神木低变质煤替换气煤Q1配入配合煤1后使得坩埚焦性能下降，其中配加低黏煤的坩埚焦性能下降速率先减小再增大，配加无黏煤的坩埚焦性能下降速率先增大后减小。低黏煤与无黏煤坩埚焦性能差异先增大后减小，这与黏结性指数的结果互相印证。坩埚焦实验表明：通过岩相、热解分析筛选出的部分优质神木低变质煤，如2#可以替换气煤Q1参与配煤炼焦，且通过配合煤的黏结性能有效预测不同低变质煤对配合煤坩埚焦（焦炭）性能的影响差异。

3　结论

1）通过煤质基础、岩相分析可将神木低变质煤进一步划分低黏、无黏煤：低黏煤的焦渣特性≥3，基质镜质组>10.5%，镜质组反射率≥0.52；无黏煤的焦渣特性<3，基质镜质组含量≤10.5%，镜质组反射率<0.52；部分低黏煤的岩相和热解特征与气煤接近，具备替换气煤进行配煤炼焦的潜力。

2）基础炼焦配合煤的黏结性越好，低变质煤的种类可选性越多，配入比例越大。当*SR*<*CR*时，配合煤的黏结性、坩埚焦的*PSR*与低变质煤的基质镜质组含量相关性更好；当*SR*>*CR*时，配合煤的黏结性、坩埚焦的*PSR*与低变质煤镜质组总量相关性更好。

3）当*SR*≤6%时，低黏煤2#、4#和无黏煤7#、8#替换气煤Q1后配合煤的*G*值≥76，结合低变质煤的基础组分、热解特性、配合煤的黏结性和坩埚焦性能等综合分析，低黏煤2#参与配煤炼焦的优势最为显著，应用于冶金焦生产的潜力最大。

参考文献

[1] 林杰，王婷琪．我国焦炭-钢铁供需平衡度的实证研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(2): 29-36.
LIN J, WANG T Q. Empirical research on the supply and demand balance of coke and steel in China[J]. China Coal, 2023, 49(2): 29-36.

[2] 王骏. 下游缩产能焦炭需求不济[N]. 期货日报, 2013-10-24(007).
WANG J. Downstream capacity cuts have led to weak demand for coke[N]. Futures Daily, 2013-10-24(007).

[3] 胡德生，孙维周，毛晓明．焦炭质量及炼焦配煤结构对高炉煤比的影响[J]. 炼铁, 2022, 41(1): 1-5.
HU D S, SUN W Z, MAO X M. Influence of coke quality and coking coal blending structure on BF coal rate[J]. Iron Making, 2022, 41(1): 1-5.

[4] ASHIDA R, HASHIMOTO A, KAWASE M, et al. Production of metallurgical coke from low rank coal utilizing wet oxidation[J]. ISIJ International, 2019, 59(8): 1386-1395.

[5] 郑文华, 温燕明, 郑波. 新常态下中国炼焦化学行业运行及发展趋势[J]. 钢铁, 2016, 51(5): 1-8.
ZHENG W H, WEN Y M, ZHENG B. Operation and development trend of coking industry in China in new normal[J]. Iron and Steel, 2016, 51(5): 1-8.

[6] ZHAO J, LIU H, ZHANG H, et al. Metallurgical performance and structural characteristics of cokes of hypercoal prepared from the mixture of low-rank coal and biomass residue[J]. Fuel, 2023, 332: 126069.

[7] BROOKS B, RISH S K, LOMAS H, et al. Advances in low carbon cokemaking-Influence of alternative raw materials and coal properties on coke quality[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 173: 106083.

[8] GUO X, TANG Y, EBLE C F, et al. Study on petrographic characteristics of devolatilization char/coke related to coal rank and coal maceral[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 227: 103504.

[9] 王成勇, 门东坡. 煤岩显微组分对配合煤粘结指数的影响[J]. 山东工业技术, 2015(10): 49. DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2015.10.027.
WANG C Y, MEN D P. The microscopic components of coal rock affect the coal's bonding index[J]. Shandong Industrial Technology, 2015(10): 49. DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2015.10.027.

[10] 倪志强, 孙章, 谢全安, 等. 炼焦煤中镜质组活性质量的研究[J]. 煤炭转化, 2015, 38(4): 58-61.
NI Z Q, SUN Z, XIE Q A, et al. Study on activity quality of vitrinite in coking coal[J]. Coal Conversion, 2015, 38(4): 58-61.

[11] 李希明. 粘结指数在配煤炼焦生产中的应用[J]. 包钢科技, 1987(2): 41-46.
LI X M. Application of the bond index in coal blending and coking production[J]. Baotou Steel Science and Technology, 1987(2): 41-46.

[12] 刘虎才, 蒋建伟, 郭运山, 等. 单种强黏结性肥煤的配煤实验及黏结指数变化分析[J]. 煤化工, 2014, 42(4): 67-69.
LIU H C, JIANG J W, GUO Y S, et al. Blending experiment of a fat coal with strong caking property and the change rule of the caking index[J]. Coal Chemical Industry, 2014, 42(4): 67-69.

[13] FLORES B D, BORREGO A G, DIEZ M A, et al. How coke optical texture became a relevant tool for understanding coal blending and coke quality[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 164: 13-23.

[14] MOCHIZUKI Y, KUBOTA Y, UEBO K, et al. Influence of tarry material deposition on low-strength cokes or pyrolyzed chars of low rank coals on the strength[J]. Fuel, 2018, 232: 780-790.

[15] SHUI H, WU Y, WANG Z, et al. Hydrothermal treatment of a sub-bituminous coal and its use in coking blends[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(1): 138-144.

[16] ASHIDA R, IWASE K, MIURA K. Production of metallurgical coke utilizing low-rank coals upgraded by mild solvent treatment[J]. ISIJ International, 2017, 57(1): 37-40.

[17] 王翠萍. 添加粘结剂配煤炼焦试验与可行性[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(6): 45-47, 60.
WANG C P. Experimental study on additive binder coal briquetting and its feasibility[J]. Clean Coal Technology, 2009, 15(6): 45-47, 60.

[18] WANG M Y, CHANG Z W, LIU H, et al. Bonding mechanism of binder and low-rank coal during carbonization[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2022, 50(12): 1564-1572.

[19] 叶诚钧. 不粘结性煤配型煤炼焦的研究[J]. 燃料与化工, 1995, 26(2): 59-64.
YE C J. Research on non-stick coal blending for coking[J]. Fuels and Chemicals, 1995, 26(2): 59-64.

[20] 黄先佑, 王建明, 祝永强, 等. 攀钢配加气煤和瘦煤炼焦试验[J]. 中国冶金, 2019, 29(12): 55-58.
HUANG X Y, WANG J M, ZHU Y Q, et al. Coking test with gas coal and lean coal in Pansteel[J]. China Metallurgy, 2019, 29(12): 55-58.

[21] 潘林辉, 黄胜, 时峰, 等. 气煤替代1/3焦煤的配煤方案优化试验[J]. 中国冶金, 2022, 32(1): 90-96.
PAN L H, HUANG S, SHI F, et al. Optimization test for coal blending scheme of replacing 1/3 coking coal with gas coal[J]. China Metallurgy, 2022, 32(1): 90-96.

[22] RICHTER H, MAMIĆ J, MORSY M, et al. Low-rank coals for power generation[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017: 269-299.

[23] 曹志, 徐靖, 马文娜, 等. 不同配比弱黏结性煤参与配煤炼焦的研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 172-179.
CAO Z, XU J, MA W N, et al. Research on different proportion of weakly cohesive coal participating in coal blending and coking[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2022, 39(2): 172-179.

[24] 付利俊, 孙睿, 李晓炅, 等. 神木煤配煤炼焦试验研究[J]. 包钢科技, 2019, 45(5): 16-19.
FU L J, SUN R, LI X J, et al. Experimental study on coal blending for coking with shenmu coal[J]. Baotou Steel Science and Technology, 2019, 45(5): 16-19.

[25] 曾令鹏, 刘克辉, 范国光, 等. 神华烟煤配煤炼焦在韶钢的应用[J]. 南方金属, 2020(1): 22-26.
ZENG L P, LIU K H, FAN G G, et al. Application of blending shenhua bituminous coal for coking at SGIS[J]. Southern Metals, 2020(1): 22-26.

[26] 张凯, 刘俊杰, 张君涛, 等. 神木煤的快速热解特性及其热解动力学研究[J]. 化工技术与开发, 2023, 52(增刊1): 6-12.
ZHANG K, LIU J J, ZHANG J T, et al. Flash pyrolysis behavior of shenmu coal and its pyrolysis kinetics[J]. Chemical Technology and Development, 2023, 52(Sup.1): 6-12.

[27] 刘颖义, 穆红旺, 张淑会, 等. 焦炭质量预测模型的建立[J]. 中国冶金, 2012, 22(1): 28-31.
LIU Y Y, MU H W, ZHANG S H, et al. Establishment of prediction model of coke quality[J]. China Metallurgy, 2012, 22(1): 28-31.

[28] 刘诗薇, 陈俞瑾, 邹冲, 等. 典型神木低黏结性烟煤的岩相与煤质特征相关性[J]. 中国冶金, 2024, 34(3): 56-65, 112.
LIU S W, CHEN Y J, ZOU C, et al. Correlation between petrographic and coal quality characteristics of typical Shenmu low caking coal[J]. China Metallurgy, 2024, 34(3): 56-65, 112.

[29] 鲍俊芳, 贾丽晖, 宋子逵. 澳大利亚高变质焦煤与低变质煤种间的交互效应研究[J]. 武钢技术, 2017, 55(3): 5-10.
BAO J F, JIA L H, SONG Z K. Research on the interaction effects between high-vermogenetic bituminous coal and low-vermogenetic coal varieties in Australia[J]. Wuhan Iron and Steel Technology, 2017, 55(3): 5-10.

[30] 赵俊国, 韩美琴. 一种确定配煤最佳比例的简易方法探索[J]. 燃料与化工, 2011, 42(6): 12-15.
ZHAO J G, HAN M Q. Exploration of an easy method for determining the optimal coal blending ratio[J]. Fuels and Chemicals, 2011, 42(6): 12-15.

[31] CAO X, YAN J, WANG Z, et al. Comparative study on coal blending and coke-making property of two kinds of thermal dissolution soluble fractions from lignite and coking coal[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2022, 166: 105585.

[32] 杨俊和. 焦炭的粒焦反应性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1999(3): 64-67.
YANG J H. The reactivity of coke breeze[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1999(3): 64-67.

[33] 隋月斯, 王刚, 刘波, 等. 最优活惰比及高活性组分质量煤种浅析[J]. 金属世界, 2020(6): 12-16.
SUI Y S, WANG G, LIU B, et al. Optimal active/inactive ratio and analysis of high active component coal quality[J]. The Metal World, 2020(6): 12-16.

[34] 马保良, 张玉柱, 许莹, 等. 利用除尘灰岩相分析研究高炉喷吹煤粉燃料状况[J]. 矿冶, 2017, 26(2): 41-45.
MA B L, ZHANG Y Z, XU Y, et al. The condition of pulverized coal fuel injection in blast furnace is studied by means of dust removal limestone facies analysis[J]. Mining and Metallurgy, 2017, 26(2): 41-45.

[35] 文志刚, 张爱云, 王正允, 等. 基质镜质体成烃的新认识[J]. 石油与天然气地质, 2001(2): 102-104.
WEN Z G, ZHANG A Y, WANG Z Y, et al. New insights into the formation of kerogen from organic matter[J]. Oil & Gas Geology, 2001(2): 102-104.

[36] 赵师庆, 吴观茂, 刘德汉, 等. 腐殖煤中镜质-类脂组的过渡显微组分[J]. 煤田地质与勘探, 1993(2): 25-30.
ZHAO S Q, WU G M, LIU D H, et al. Transitional microscopic components of lignin-humic coal[J]. Coal Geology & Exploration, 1993(2): 25-30.

[37] 朱群. 炼焦煤的镜质组反射率分布在成焦中的研究[J]. 燃料与化工, 2022, 53(6): 15-17, 20.
ZHU Q. Study on vitrinite reflectance distribution of coking coal in coking process[J]. Fuels and Chemicals, 2022, 53(6): 15-17, 20.

[38] 岳伟明, 杨伯威. 炼焦煤镜质组反射率分布、焦炭光学组织与焦炭热性质的相关性研究[J]. 山西化工, 2020, 40(1): 50-53.
YUE W M, YANG B W. Study on the relativity of vitrinite reflectance distribution, coke optical structure and coke thermal properties in coking coal[J]. Shanxi Chemical Industry, 2020, 40(1): 50-53.

[39] 刘向军, 张健, 邵敏. 煤堆自燃过程的数值模拟[J]. 矿冶, 2008, 17(1): 30-33.
LIU X J, ZHANG J, SHAO M. Numerical simulation of spontaneous combustion process of coal pile[J]. Mining and Metallurgy, 2008, 17(1): 30-33.

[40] JHA P K, SINGH P K, KUSHWAHA S, et al. Effect of plastic range and ash chemistry on hot strength properties of coke[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 47(8): 925-928.

[41] BARRIOCANAL C, DIEZ M A, ALVAREZ R, et al. On the relationship between coal plasticity and thermogravimetric analysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003, 67: 23-40.

[42] 王永伟, 赵学卿. 焦煤配煤挥发分与黏结指数的相互关系[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(增刊2): 118-121.
WANG Y W, ZHAO X Q. Relation between volatiles yield and caking index of blending coal from coking coal[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(Sup.2): 118-121.

[43] 刘涛. 不同变质程度煤的热解特性及其共炭化研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2013.
LIU T. Study on the pyrolysis and co-carbonization performance of differentrank of coal[D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2013.

[44] 吴洪义, 陈晓光, 韩文有, 等. 美国和俄罗斯焦煤的对比研究与炼焦实践[J]. 燃料与化工, 2021, 52(2): 1-4, 13.
WU H Y, CHEN X G, HAN W Y, et al. Comparison and practice of using coking coal from the USA and Russia[J]. Fuels and Chemicals, 2021, 52(2): 1-4, 13.

[45] 刘皓. 低变质煤配入量对焦炭性能的影响研究[J]. 中州煤炭, 2016(3): 126-128.
LIU H. Study on the influence of low metamorphic coal dosage on coke properties[J]. Zhongzhou Coal, 2016(3): 126-128.