烧结

某无烟煤用于铁矿烧结的燃烧特性研究

时进吉[1]，宋 斌[1]，袁亚强[2]，左海滨[2]
(1. 晋能控股集团有限公司 晋城煤炭事业部，山西 晋城 048000；2. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室，北京 100083)

摘要： 为了系统地探究某无烟煤用于铁矿烧结的燃烧特性，本文采用 TG-DTG 和 XRD 等方法对寺河、成庄无烟块煤及其洗末煤、焦粉的燃烧特性和微晶结构进行对比分析，提出采用灰分指数(ρ_{AI})用于评价灰分对燃烧性能的影响，并分析固体燃料粒度对寺河、成庄洗末煤和焦粉燃烧特性的影响。试验结果表明，经过洗选后的寺河和成庄洗末煤的着火和燃烧性能明显提高，其灰分指数值显著降低，燃烧特性参数也更接近于焦粉；随着固体燃料粒度的增大，寺河、成庄洗末煤和焦粉的平均燃烧速率降幅分别为 22.57%、10.97% 和 15.53%；成庄洗末煤以混合粒度的配料模式燃烧时稳定性最好，其替代焦粉用于烧结生产更具优势。XRD 分析结果表明，相较于寺河洗末煤，成庄洗末煤与焦粉的微晶结构参数更为相近，这与热分析的试验结果相符合。

关键词： 烧结；无烟煤；固体燃料；粒度；灰分指数；燃烧特性
中图分类号： TF046.4；TQ534 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0001－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.016

Research on combustion characteristics of an anthracite used in iron ore sintering

SHI Jinji[1], SONG Bin[1], YUAN Yaqiang[2], ZUO Haibin[2]
(1. Jincheng Coal Business Department, Jinneng Holding Group, Jincheng 048000, Shanxi, China;
2. State Key Laboratory of New Technology of Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to systematically explore the combustion characteristics of an anthracite used in iron ore sintering, the combustion characteristics and microcrystal structure of Sihe and Chengzhuang lump anthracite, its cleaned powder coal and coke powder are compared and analyzed by TG-DTG, XRD and other methods, the ash index (ρ_{AI}) is proposed to evaluate the influence of ash on combustion performance, and the influence of solid fuel particle size on the combustion characteristics of cleaned powder coal and coke powder of Sihe and Chengzhuang is analyzed. The results show that the ignition and combustion performance of Sihe and Chengzhuang cleaned powder coal are significantly improved, the ash index value is significantly reduced, and the combustion characteristic parameters are closer to that of coke powder. With the increase of solid fuel particle size, the average combustion rates of Sihe and Chengzhuang cleaned powder coal and coke powder are decreased by 22.57%, 10.97% and 15.53%, respectively. Chengzhuang cleaned powder coal has the best stability when burned in the batching mode of mixed particle size, and it has advantages over coke powder for sintering production. The XRD analysis results show that, compared with Sihe cleaned powder coal, the microcrystalline structural parameters of Chengzhuang cleaned powder coal and coke powder are more similar, which is consistent with the

收稿日期： 2021－11－10；**修回日期：** 2021－12－19
基金项目： 中国五矿科技专项计划项目(2020ZXA01)
作者简介： 时进吉(1969—)，男，高级工程师，从事煤质检测、煤炭加工和利用等工作。
通信作者： 左海滨(1976—)，男，教授，博士生导师，从事钢铁冶金新技术相关的研究工作。

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

experimental results of thermal analysis.

Key words: sintering; anthracite; solid fuel; particle size; ash index; combustion characteristics

在当前的烧结生产中，许多优质无烟煤常常全部或部分代替焦粉作为烧结固体燃料，以节省冶金焦的使用[1-3]。但无烟煤和焦粉的燃烧特性往往存在一定差距，因此使用燃烧性能更加接近焦粉的无烟煤是维持烧结稳定生产的基础[4-5]。山西晋城生产的寺河和成庄无烟煤皆为高阶无烟煤，相较于同类无烟煤，其石墨化程度更高，燃烧特性与焦粉更为相近[6]。由于煤和杂质(矸石)的物理化学性质存在差异，通过不同的煤炭洗选可以使两者有效分离开来，从而形成质量均匀，多用途的煤炭[7-8]。洗末煤是通过洗选后供烧结生产使用的无烟煤。洗选后，无烟煤的燃烧性能将会提高。此外，不同种类固体燃料的燃烧特性受粒度的影响程度也有所差异，其燃烧性能的稳定性直接关系着烧结矿的质量[9-11]。因此，用于烧结生产的固体燃料常采用混合粒度的配料模式。不同粒度条件下无烟煤燃烧性能的稳定程度是衡量其替代焦粉的重要指标之一。针对固体燃料粒度问题，晏文兴等[12]通过烧结杯试验系统探究了无烟煤粒度对两种不同品位铁矿粉烧结矿产量的影响；杨旭辉[13]基于马钢二烧无烟煤的破碎现状，分析了固体燃料粒度对烧结生产的影响；沈文俊[14]研究了焦粉与无烟煤作为固体燃料时，其混合比变化对烧结矿产、质量的影响。

本文采用非等温热重法，从固体燃料粒度和微晶结构的角度出发，分析寺河、成庄无烟块煤、洗末煤以及焦粉的燃烧特性，研究固体燃料粒度对寺河、成庄洗末煤和焦粉燃烧性能的影响，并比较3种固体燃料微晶结构的差别，从而为该无烟煤替代焦粉用于烧结实际生产提供指导。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用的寺河、成庄无烟煤开采自山西晋城，其为特低硫煤，并且粒度较小，需经过洗选制成洗末煤使用。试验所用焦粉则为烧结现场常用燃料。试验将寺河、成庄无烟煤及其洗末煤和焦粉制成粒度小于0.074 mm的颗粒，并参照《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008)、《煤中碳和氢的测定方法》(GB/T 476—2008)、《煤中氮的测定方法》(GB/T 19227—2008)和《煤中全硫的测定方法》(GB/T 214—2007)、《煤灰成分分析方法》(GB/T 1574—2007)的测试方法，检测固体燃料的工业成分、元素成分、热值以及灰分的主要化学成分，结果分别如表1、2所示。由表1、2可知：与无烟煤相比，寺河和成庄洗末煤的挥发分质量分数降低，总热值略有提高，并且洗末煤中灰分的化学成分与焦粉更为相近。这是因为煤炭洗选技术可以在一定程度上去除部分杂质，实现煤炭中有用成分的富集；寺河和成庄无烟煤均为典型的高阶无烟煤，相较于其他种类无烟煤，其作为部分替代烧结用焦粉，在固体燃料燃烧性能上具有明显优势。

1.2 试验方法

试验采用北京某公司生产的WCT-1123综合热分析仪对固体燃料性能进行检测，具体操作步骤：① 精确称量寺河、成庄无烟煤和洗末煤以及焦粉的质量，每组使用量均为(10±0.1) mg；② 将所

表1 固体燃料的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and elemental analysis of the solid fuels

固体燃料名称	工业分析(质量分数)/%			元素分析(质量分数)/%					总热值/(MJ·kg^{-1})
	固定碳	挥发分	灰分	C	H	O	N	S	
寺河无烟煤	84.09	6.02	9.89	84.10	2.56	2.11	1.03	0.31	30.73
成庄无烟煤	84.20	6.35	9.45	84.44	2.77	1.91	1.13	0.30	31.30
寺河洗末煤	83.05	5.64	11.31	82.49	2.81	2.05	1.00	0.34	31.28
成庄洗末煤	84.58	5.98	9.44	84.41	2.99	1.78	1.04	0.34	32.08
焦粉	87.97	0.23	11.80	87.17	0.77	0.64	0.91	0.51	35.23

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

表 2　固体燃料中灰分的主要化学成分(质量分数)

Table 2　Main chemical composition of ash in solid fuel　　%

固体燃料名称	CaO	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	Na_2O+K_2O
寺河无烟煤	7.52	1.45	48.46	4.92	34.47	1.17	2.01
成庄无烟煤	5.91	1.03	48.53	3.35	37.80	1.25	2.12
寺河洗末煤	4.19	0.86	48.46	4.11	38.64	1.63	2.12
成庄洗末煤	4.15	0.87	47.76	3.23	40.30	1.75	1.93
焦粉	4.47	0.89	51.08	7.79	32.41	1.75	1.60

称量的样品，放入刚玉坩埚中(∅5.0 mm × 10.0 mm)，将坩埚放置于热分析仪支撑杆的左托盘上，并检查循环水的流动情况；③ 通入一定流量的空气，设定气体流量为 100 mL/min；最后，设定升温速率为 20 ℃/min 和终点温度为 1 000 ℃，对样品进行加热。

试验进行如下优化：① 为保证数据的准确性，重复三次每组试验；② 经过多次试验优化样品质量、气体流速和加热速率等参数，从而避免传热限制，并将传质影响降到最低；③ 由于煤阶程度较高，试样的热分解以及挥发分的挥发和燃烧将被忽略，反应过程主要为固定碳与氧气进行的多相反应。

根据试验测得的样品失重曲线可得失重量，即质量转化率与样品温度之间的关系。此外，可根据升温速率和反应时间确定样品温度。定义转化率为样品在反应过程中的实时失重率。样品转化率的表达式如下。

$$\alpha=\frac{m_0-m_t}{m_0-m_\infty} \tag{1}$$

式中：α 为样品转化率，无量纲；m_0 为样品的初始质量，mg；m_t 为 t 时刻的质量，mg；m_∞ 为样品在反应结束时的质量，mg。

根据《煤炭燃烧特性试验方法 热重分析法》(GB/T 33304—2016)，通过试验所得到的 TG-DTG 曲线可确定样品的着火温度(T_i，℃)、燃尽温度(T_j，℃)、最大燃烧速率(v_p，min^{-1})和最大燃烧速率温度(T_p，℃)等固体燃料燃烧特性参数。随后根据这些特征参数可求得样品从 T_i 到 T_p 的平均燃烧速率(v_m，min^{-1})、烧结时间(t，s)、可燃性指数(C，$min^{-1}\cdot℃^{-2}$)和燃烧特性指数(S，$min^{-2}\cdot℃^{-3}$)。计算公式如下。

$$v_m=\beta\times\frac{\alpha_j-\alpha_i}{T_j-T_i} \tag{2}$$

$$t=\frac{T_j-T_i}{\beta} \tag{3}$$

$$C=\frac{v_p}{T_i^2} \tag{4}$$

$$S=\frac{v_p\times v_m}{T_i^2\times T_j} \tag{5}$$

式中：β 为升温速率，℃/min；α_i 为样品着火时转化率，%；α_j 为样品燃尽时的转化率，%。

其中，可燃性指数可反映样品的着火稳定性，决定在燃烧反应过程初期样品的反应能力。燃烧特性指数则代表着固体燃料的综合燃烧性能，C 值和 S 值越大，样品的着火和燃烧性能越好。

2　结果与讨论

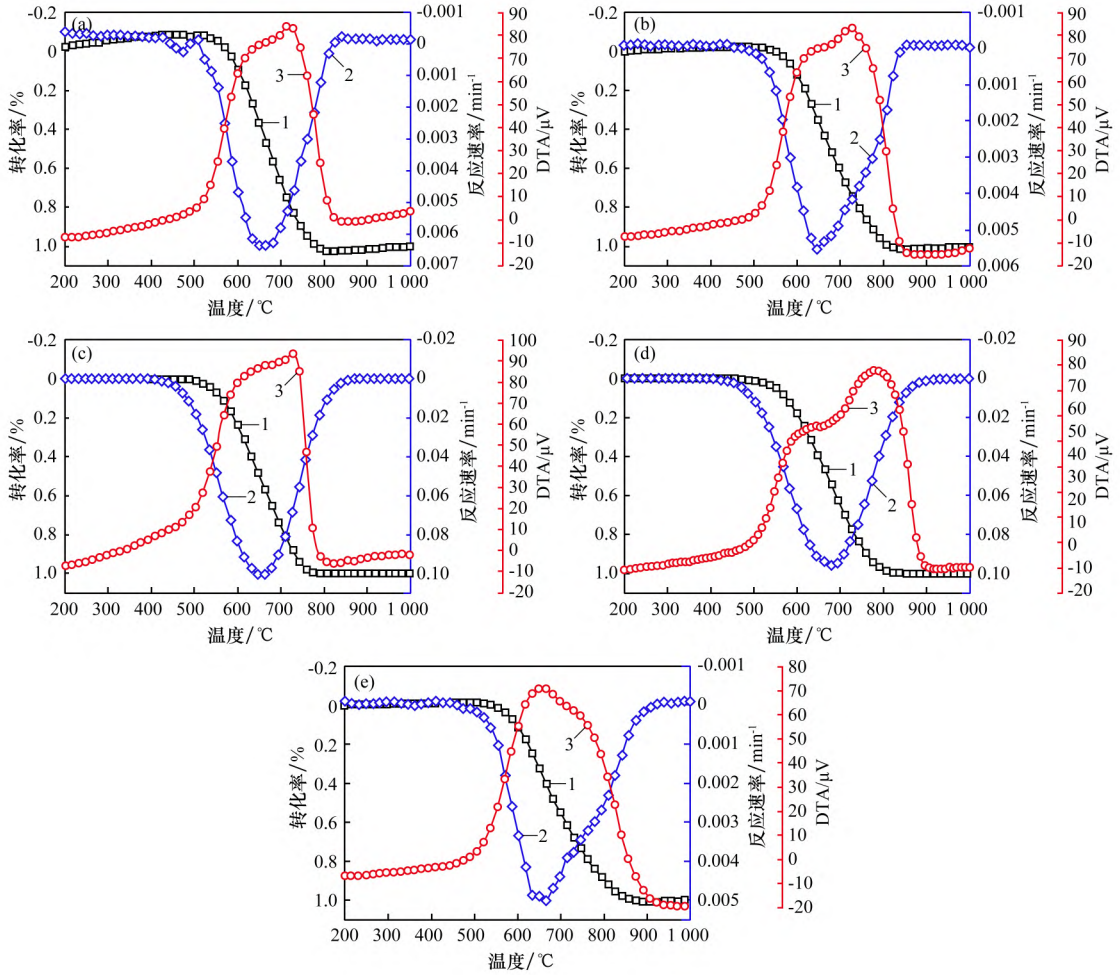
2.1　无烟煤、洗末煤和焦粉的燃烧特性对比

本文基于 TG-DTG 法分析寺河、成庄无烟煤和洗末煤以及焦粉的燃烧过程，结果如图 1 所示。由图 1 可知，5 种固体燃料的的燃烧区间都集中在 400 ~ 900 ℃的温度段内，且都只有一段失重，这主要是由于无烟煤、洗末煤与焦粉中挥发分的质量分数较少。

根据式(2) ~ (5)可得试验样品的平均燃烧速率、烧结时间、可燃性指数和燃烧特性指数等特征参数，结果如表 3 所示。由表 3 可知，经过洗选后，寺河和成庄洗末煤的着火性能和燃烧性能都明显优于无烟煤，且燃烧时间较长。相对焦粉而言，两种洗末煤的着火和燃烧性能较好，成庄洗末煤的燃烧时间与焦粉相差不大。从燃烧性能角度分析，洗末煤更适合部分替代焦粉用于烧结生产。

燃烧过程中灰分是影响固体燃料燃烧特性的重要因素之一。随着煤焦颗粒燃烧反应的进行，

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



(a) 寺河无烟煤；(b) 成庄无烟煤；(c) 寺河洗末煤；(d) 成庄洗末煤；(e) 焦粉

1—转化率；2—反应速率；3—DTA。

图 1 无烟煤、洗末煤和焦粉的热重分析曲线

Fig. 1 Thermogravimetric analysis curves of anthracite, cleaned powder coal and coke powder

表 3 无烟煤、洗末煤和焦粉的燃烧特性参数

Table 3 Combustion characteristics of anthracite and washing coal, cleaned powder coal and coke powder

固体燃料名称	T_i/℃	T_p/℃	v_p/(mg·min^{-1})	T_j/℃	v_m/(mg·min^{-1})	C/(10^{-7} min^{-1}·℃$^{-2}$)	S/(10^{-11} min^{-2}·℃$^{-3}$)	t/min
寺河无烟煤	532.8	636.2	0.005 7	770.4	0.084 2	2.007 9	2.194 5	12.43
成庄无烟煤	549.9	646.0	0.005 5	813.5	0.075 9	1.818 8	1.697 0	13.81
寺河洗末煤	444.5	655.1	0.101 0	811.8	0.054 5	5.111 9	3.431 8	18.37
成庄洗末煤	450.6	683.7	0.096 0	880.7	0.046 5	4.728 1	2.496 4	21.51
焦粉	509.6	670.3	0.088 6	905.9	0.050 5	3.411 7	1.901 9	19.81

颗粒表层逐渐被灰分包裹。煤焦灰分中多数为酸性组分，它会阻碍氧与碳粒的接触，降低燃烧速率；其中的碱性组分往往会对 C-O 反应起到催化作用，加快燃烧反应的进行[15]。所以灰分中组分的不同对煤焦燃烧具有显著影响。本文采用灰分指数(ρ_{AI},%)[16]评价反应过程中样品灰分对燃烧的阻碍作用，具体公式如下。

$$\rho_{AI}=\lambda_{Ash}\times\frac{w(SiO_2)+w(Al_2O_3)+w(TiO_2)}{w(CaO)+w(MgO)+w(Fe_2O_3)+w(Na_2O)+w(K_2O)}\times 100\% \tag{6}$$

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

式中：λ_{Ash}为燃料中灰分的质量分数，%；$w(SiO_2)$、$w(Al_2O_3)$、$w(TiO_2)$、$w(CaO)$、$w(MgO)$、$w(Fe_2O_3)$、$w(Na_2O)$、$w(K_2O)$分别为灰分中 SiO_2、Al_2O_3、TiO_2、CaO、MgO、Fe_2O_3、Na_2O、K_2O 的质量分数，%。

根据表 1 工业分析检测结果中的灰分质量分数和表 2 中 5 种固体燃料的灰分化学成分，结合式(6)可得寺河、成庄无烟煤和洗末煤以及焦粉对应的灰分指数值，结果如图 2 所示。

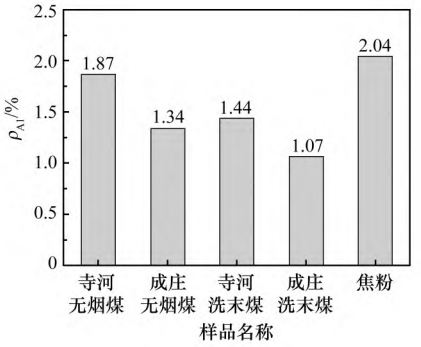


图 2　无烟煤、洗末煤和焦粉的灰分指数值对比

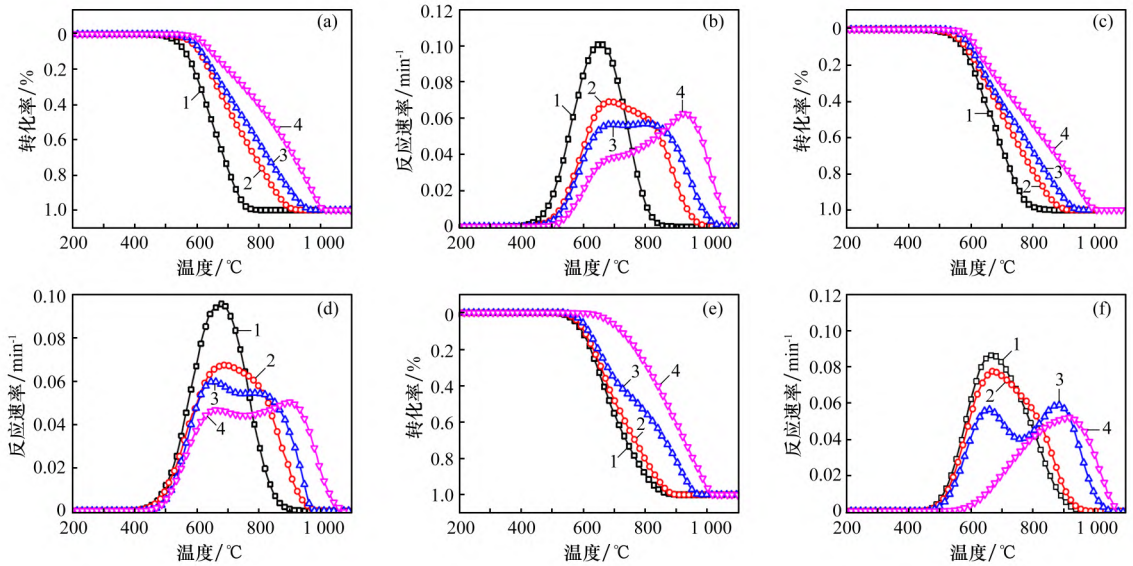
Fig. 2　Comparison between ρ_{AI} values of anthracite, cleaned powder coal and coke powder

由图 2 可知：灰分对 5 种固体燃料燃烧的阻碍作用由大到小依次为焦粉、寺河无烟煤、寺河洗末煤、成庄无烟煤和成庄洗末煤。这表明焦粉的燃烧特性受灰分的阻碍作用影响较大，相较于无烟煤，其平均燃烧速率较低；而寺河和成庄洗末煤的灰分指数值都明显低于对应的无烟煤，所以煤炭洗选技术可以降低灰分对燃料燃烧的阻碍作用。但试验样品燃烧性能的好坏与其对应灰分指数值检测结果的规律并不相符。因此，煤焦的化学结构才是影响自身燃烧特性的主要原因。

2.2　不同粒度下洗末煤与焦粉的燃烧特性对比

由前述可知，寺河和成庄洗末煤与焦粉的燃烧性能更为接近，适合替代焦粉用于烧结生产，但固体燃料的粒度分布对烧结矿产、质量有着重要影响。本文通过无烟煤和焦粉的粒度控制有效改善其燃烧性能，进而优化烧结过程中固体燃料结构的使用方案。

为探究燃料粒度对寺河和成庄洗末煤以及焦粉燃烧速率的影响，本文选取 4 种不同粒度(0～0.5 mm，0.5～1 mm，1～3 mm，3～5 mm)的 3 种固体燃料分别进行热重分析试验，结果如图 3 所示。由图 3 可知，不同粒度固体燃料的燃烧速率曲线呈现明显的变化，即粒度的增大使得样品的失重速率曲线逐渐向高温区移动，且高温段持续时间明显延长。虽然固体燃料高温持续时间的延长会使得铁矿和熔剂之间的反应更加充分，从



(a)　寺河洗末煤转化率；(b)　寺河洗末煤反应速率；(c)　成庄洗末煤转化率；(d)　成庄洗末煤反应速率；(e)　焦粉转化率；(f)　焦粉反应速率

粒度范围/mm：1—0～0.5；2—0.5～1；3—1～3；4—3～5。

图 3　不同粒度洗末煤和焦粉的热重分析曲线

Fig. 3　Thermogravimetric analysis curves of cleaned powder coal and coke powder under different particle size

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

而改善烧结矿质量，但粒度增大会导致着火性能降低，这同样会影响烧结生产效率。

利用式(4)和(5)求得的不同粒度寺河和成庄洗末煤以及焦粉的燃烧特性参数，结果如表4所示。由表4可知，随着固体燃料粒度的增加，寺河洗末煤的平均燃烧速率由0.054 5 min^{-1}下降到了0.042 2 min^{-1}，降幅为22.57%；成庄洗末煤的平均燃烧速率由0.051 5 min^{-1}下降到了0.043 5 min^{-1}，降幅为10.97%；焦粉的平均燃烧速率由0.054 5 min^{-1}下降到了0.042 2 min^{-1}，降幅为15.53%；着火性能参数值、综合燃烧性能参数值与燃烧时间的变化趋势与平均燃烧速率类似。由此可知，寺河洗末煤的燃烧特性受粒度变化的影响最大，成庄洗末煤在粒度变化时的燃烧稳定性最好，并且略优于焦粉。所以相较于寺河洗末煤，成庄洗末煤替代焦粉用于烧结生产更具优势。

表4 不同粒度条件下洗末煤和焦粉的燃烧特性参数

Table 4 Combustion characteristics of cleaned powder coal and coke powder under different particle size

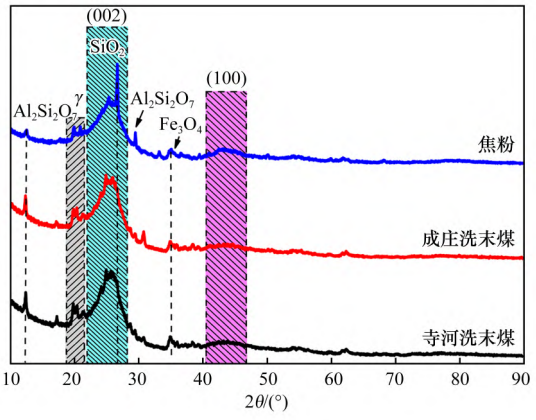
固体燃料名称	粒度范围/mm	T_i/℃	T_p/℃	v_p/min^{-1}	T_j/℃	v_m/min^{-1}	C/(10^{-7} min^{-1}·℃$^{-2}$)	S/(10^{-1} min^{-2}·℃$^{-3}$)	t/min
寺河洗末煤	0~0.5	444.5	655.1	0.101 0	811.8	0.054 5	5.111 9	3.431 8	18.37
	0.5~1	482.1	688.8	0.069 1	944.0	0.043 3	2.973 1	1.363 7	23.10
	1~3	508.1	798.9	0.056 8	979.1	0.042 5	2.200 1	0.955 0	23.55
	3~5	537.5	927.5	0.062 5	1 011.0	0.042 2	2.163 3	0.902 9	23.68
成庄洗末煤	0~0.5	450.6	683.7	0.096 0	880.7	0.046 5	4.728 1	2.496 4	21.51
	0.5~1	470.8	684.6	0.067 5	913.3	0.045 2	3.045 3	1.507 2	22.13
	1~3	492.3	664.8	0.059 9	971.2	0.041 8	2.471 5	1.063 7	23.95
	3~5	515.3	663.2	0.046 7	998.1	0.041 4	1.768 8	0.729 5	24.14
焦粉	0~0.5	509.6	670.3	0.088 6	905.9	0.051 5	3.411 7	1.901 9	19.81
	0.5~1	519.7	664.9	0.077 6	912.1	0.050 9	2.873 1	1.603 4	19.92
	1~3	536.6	882.9	0.058 9	974.3	0.045 7	2.045 6	0.959 5	21.89
	3~5	562.8	918.5	0.072 7	1022.5	0.043 5	1.995 2	0.946 5	22.99

2.3 洗末煤和焦粉的 XRD 分析

煤焦的微晶结构主要是由芳香层叠加而成，其层片直径可表示为 L_a(nm)；层间距为 d_{002}(nm)；平均叠加高度为 L_c(nm)。此外，在衍射角(2θ)为15°~22°范围内出现的宽缓弥散峰主要是由煤焦有机结构中的脂肪链造成的，其被称为 γ 带[17]。

为了更好地对比分析寺河、成庄洗末煤和焦粉的燃烧特性，本文对3种固体燃料进行XRD检测，具体结果如图4所示。由图4可知，在3种试验样品的检测曲线中，除煤焦特有的 γ 带、002带和100带之外，还存在 $Al_2Si_2O_7$、SiO_2 和 Fe_3O_4 等脉石组分，且焦粉曲线中 SiO_2 相的对应峰强度较大，γ 带对应的峰强度明显弱于寺河和成庄洗末煤。

根据 Bragg 方程和 Scherrer 公式可知，d_{002}、L_a 和 L_c 以及代表脂肪链结构的重复间距和平均叠加高度的 d_γ 和 L_γ 等微晶结构参数可通过式(7)~(11)求得。



1—焦粉；2—成庄洗末煤；3—寺河洗末煤。

图4 洗末煤和焦粉的 XRD 检测结果

Fig. 4 XRD test results of cleaned powder coal and coke powder

$$d_{002}=\frac{\lambda}{2\sin\theta_{002}} \tag{7}$$

$$L_c=\frac{K_1\lambda}{\beta_{002}\cos\theta_{002}} \tag{8}$$

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

$$L_a = \frac{K_2\lambda}{\beta_{100}\cos\theta_{100}} \tag{9}$$

$$d_\gamma = \frac{\lambda}{2\sin\theta_\gamma} \tag{10}$$

$$L_\gamma = \frac{K_1\lambda}{\beta_\gamma\cos\theta_\gamma} \tag{11}$$

式中：λ 为入射波长，采用 CuKα 时，$\lambda = 0.154\ 2$ nm；K 为常数，$K_1 = 0.94$，$K_2 = 1.84$；θ 和 β 为每个带对应的掠射角(°)和衍射峰半高宽(rad)。

对于样品的微晶结构参数而言，微晶层片直径(L_a)越大，层片堆积高度(L_c)越高，微晶的层间距(d_{002})越小，煤焦的碳素结构越趋近于石墨化，其燃烧性能也就越差。平均叠加高度(L_γ)越大，重复间距(d_γ)越小代表有机碳的脂肪链结构越完整，其燃烧性能也就越好。

式(7)～(11)具体计算结果如表 5 所示。由表 5 中 3 种样品的 XRD 分析结果可知，相较于寺河洗末煤而言，成庄洗末煤的微晶结构参数更接近于焦粉，这与热重分析的试验结果相符合。

表 5　洗末煤和焦粉的微晶结构参数

Table 5　Crystal structure parameters of cleaned powder coal and coke powder

固体燃料名称	2θ/(°)			β/rad			d_γ/nm	d_{002}/nm	L_γ/nm	L_a/nm	L_c/nm
	γ	002	100	γ	002	100					
寺河洗末煤	21.21	25.58	43.98	0.068 6	0.069 3	0.112 0	0.419 7	0.348 2	2.156 1	2.731 8	2.145 9
成庄洗末煤	21.17	25.61	44.04	0.068 4	0.068 6	0.095 8	0.418 9	0.347 8	2.150 7	3.195 3	2.167 9
焦粉	21.26	25.76	43.76	0.072 7	0.072 2	0.085 1	0.417 9	0.345 8	2.027 1	3.591 1	2.058 5

3　结　论

(1) 经过洗选后的寺河和成庄洗末煤灰分指数值显著降低，着火和燃烧性能明显提高，且与无烟煤相比，洗末煤的燃烧特性更接近于焦粉。

(2) 随着燃料粒度的增加，寺河洗末煤的平均燃烧速度降幅最大，成庄洗末煤在混合粒度燃烧时稳定性最好。

(3) 相较于寺河洗末煤，成庄洗末煤的微晶结构参数更接近于焦粉，其替代焦粉用于烧结生产更具优势。

参考文献:

[1] 郭勇文. 用煤粉代替焦粉的烧结实践[J]. 冶金丛刊,2012,5(9):31－35.
GUO Yongwen. Sintering practice of replacing coke powder with coal powder[J]. Metallurgical Series,2012,5(9):31－35.

[2] 成藕芬. 攀钢烧结燃料粒度对烧结矿产质量的影响[J]. 烧结球团,1981,5(6):39－43.
CHENG Oufen. Effect of fuel size on mineral quality of Panzhihua iron and steel[J]. Sintering and Pelletizing,1981,5(6):39－43.

[3] 张军红,金永龙,孙家富,等. 以煤代焦烧结煤粉粒度的选择[J]. 鞍山钢铁学院学报,2001,24(3):174－177.
ZHANG Junhong,JIN Yonglong,SUN Jiafu,et al. Choices of coal size during sinter process with coals instead of coke powder[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning,2001,24(3):174－177.

[4] 李丙来,刘振林,刘继彬,等. 烧结固体燃料粒度对烧结矿产质量试验研究影响[J]. 山东冶金,2013,18(6):21－22.
LI Binglai,LIU Zhenlin,LIU Jibin,et al. Effect of particle size of sintered solid fuel on sintered mineral quality[J]. Shandong Metallurgy,2013,18(6):21－22.

[5] 阙志刚,吴胜利,王金生,等. 无烟煤代替焦粉燃烧行为及对烧结 NO_x 排放的影响[J]. 钢铁,2019,54(10):23－29.
QUE Zhigang,WU Shengli,WANG Jinsheng,et al. Combustion behavior of anthracite instead of coke powder and its effect on NO_x emission from sintering[J]. Iron and Steel,2019,54(10):23－29.

[6] HE Xueqiu,LIU Xianfeng,NIE Baisheng,et al. FTIR and Raman spectroscopy characterization of functional groups in various rank coals[J]. Fuel,2017,206(10):555－563.

[7] 刘海英. 南桐选煤厂洗末煤脱硫工艺的应用[J]. 煤炭加工与综合利用,2016,3(3):9－12.
LIU Haiying. Application of desulphurization process for washed coal in nantong coal preparation plant[J]. Coal

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

Processing and Comprehensive Utilization,2016,3(3):9 – 12.

[8] 王金官. 成庄矿模块洗末煤车间降低介耗的实践[J]. 科技情报开发与经济,2007,17(4):282 – 283.
WANG Jinguan. Practice of reducing medium consumption in modular washing coal workshop of Chengzhuang mine [J]. Science and Technology Information Development and Economy,2007,17(4):282 – 283.

[9] 袁亚强,何志军,韩啸,等. 准颗粒中烧结用燃料燃烧特性[J]. 钢铁研究学报,2020,32(5):40 – 46.
YUAN Yaqiang,HE Zhijun,HAN Xiao,et al. Combustion characteristics of sintering fuel in quasi-particles [J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(5):40 – 46.

[10] 周明顺,赵东明,李建军,等. 焦粉粒度分布对铁矿石烧结指标的影响[J]. 中国冶金,2018,28(2):11 – 16.
ZHOU Mingshun,ZHAO Dongming,LI Jianjun,et al. Effect of coke particle size distribution on sintering index of iron ore [J]. China Metallurgy,2018,28(2):11 – 16.

[11] 欧大明,孙骐,沈红标,等. 焦粉粒度对铁矿石烧结过程的影响[J]. 钢铁,2008,43(10):8 – 12.
OU Daming,SUN Qi,SHEN Hongbiao,et al. Effect of coke particle size on iron ore sintering Process [J]. Iron and Steel,2008,43(10):8 – 12.

[12] MOHAMED O A. 无烟煤和白云石粒度对铁矿烧结的影响[J]. 晏文兴,译. 烧结球团,1980,19(5):85 – 89.
MOHAMED O A. Effect of particle size of anthracite and dolomite on iron ore sintering [J]. YAN Wenxing,Translator. Sintering and Pelletizing,1980,19(5):85 – 92.

[13] 杨旭辉. 无烟煤粒度对烧结矿产质量的影响[J]. 烧结球团,1990,15(5):25 – 30.
YANG Xuhui. Influence of anthracite particle size on productivity and quality of sinter [J]. Sintering and Pelletizing,1990,15(5):25 – 30.

[14] 沈文俊. 焦粉与无烟煤对烧结生产的影响[J]. 武钢技术,2014,52(3):22 – 26.
SHEN Wenjun. Effect of coke and anthracite on sintering production [J]. WISCO Technology,2014,52(3):22 – 26.

[15] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2014:58 – 64.
JIANG Tao. Technical manual for sintering pellet production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2014:58 – 64.

[16] WANG Guangwei,ZHANG Jianliang,HUANG Xin,et al. Co-gasification of petroleum coke-biomass blended char with steam at temperatures of 1 173 ~ 1 373 K [J]. Applied Thermal Engineering,2018,137(4):678 – 688.

[17] 闵凡飞,陈清如,张明旭. 新鲜生物质热解气化半焦特性的XRD研究[J]. 中国矿业大学学报,2006,6(3):336 – 340.
MIN Fanfei,CHEN Qingru,ZHANG Mingxu. Pyrolysis gasification semicoke characteristics of fresh biomass by XRD [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2006,6(3):336 – 340.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。

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