

岔哈泉煤的煤质特征和显微组分解离规律

武振林¹, 刘 鹏¹, 李国锋¹, 逯 波¹, 袁东营², 黄 澎²

(1. 国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司, 新疆 哈密 839000;

2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013)

摘要:岔哈泉矿区煤炭资源丰富且煤质优良,研究其煤质特性及显微组分解离规律对于优质煤炭资源的开发与高效利用具有重要意义。以岔哈泉矿区1号煤为研究对象,结合煤岩学和矿物学视角,采用X射线衍射、扫描电子显微镜及偏光显微镜等手段,系统分析了煤岩组分与矿物的赋存状态,并通过浮沉试验和密度梯度离心法研究了显微组分的分选特性。研究结果显示:1号煤中镜质组含量最高,其次为壳质组,惰质组含量最少;矿物组分主要包括高岭石、菱铁矿、黄铁矿、方解石和石英等,其中硅酸盐矿物以高岭石和石英为主,约占矿物总量的78.8%,碳酸盐矿物主要有菱铁矿和方解石,约占矿物总量的19%,矿物的赋存对煤炭加工利用过程具有潜在的影响。此外,镜质组、惰质组和壳质组的最佳分选密度分别为 $1.25\sim 1.30\text{ g/cm}^3$ 、 $1.30\sim 1.35\text{ g/cm}^3$ 和小于 1.25 g/cm^3 。研究成果为岔哈泉矿区煤炭资源的高效利用提供了科学依据。

关键词:显微组分;密度梯度离心;分选;赋存形态

中图分类号:TD94

文献标志码:A

Coal quality characteristics and maceral dissociation law of Chahaquan coal

WU Zhenlin¹, LIU Peng¹, LI Guofeng¹, LU Bo¹, YUAN Dongying², HUANG Peng²

(1. China Energy Investment Group Xinjiang Hami Energy Chemical Co., Ltd., Hami 839000, China;

2. China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Chahaquan mining area is rich in coal resources with excellent coal quality. Investigating the coal quality characteristics and maceral dissociation law is of great significance for the development and efficient utilization of high-quality coal resources. Taking No. 1 coal seam in Chahaquan mining area as the research object, this study systematically analyzed the occurrence states of coal macerals and minerals from the perspectives of coal petrology and mineralogy. Techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and polarized light microscopy were employed. The separation characteristics of maceral were further explored through float-sink experiments and density gradient centrifugation. The results show that the content of vitrinite in No. 1 coal is the highest, followed by liptinite, with the content of inertinite being the lowest. The mineral components mainly include kaolinite, siderite, pyrite, calcite, and quartz. Silicate minerals, predominantly kaolinite and quartz, account for approximately 78.8% of the total minerals, and carbonate minerals, mainly siderite and calcite, account for about 19%. The occurrence of these minerals has potential implications for coal processing and utilization. Additionally, the optimal separation densities for vitrinite, inertinite, and liptinite is $1.25\sim 1.30\text{ g/cm}^3$, $1.30\sim 1.35\text{ g/cm}^3$, and less than 1.25 g/cm^3 respectively. This study provides a scientific basis for the efficient utilization

收稿日期:2024-10-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB4103400);国家能源投资集团有限公司技术开发项目(GJNY-23-167)

作者简介:武振林(1968—),男,内蒙古呼和浩特人,教授级高级工程师,主要从事煤炭直接液化、煤制化学品等煤化工技术研究及管理工作。E-mail:10510333@chnenergy.com.cn

黄 澎(1982—),男,安徽淮北人,研究员,博士,主要从事煤炭直接液化、煤基碳材料等方面的研究工作,本文通信作者。E-mail:squallok@qq.com

of coal resources in the Chahaquan mining area.

Key words: maceral; density gradient centrifugation; separation; mode of occurrence

我国的能源结构为“富煤、贫油、少气”,在今后相当一段时间内,煤炭资源仍然会是我国的基础能源^[1-4]。在当前“碳达峰、碳中和”背景下,研究煤炭资源的清洁高效利用,对发挥我国的煤炭资源优势、保障能源安全、保护生态环境具有重要的意义^[5]。岔哈泉矿区位于新疆巴里坤县,长约 12.7 km,宽约 9.1 km,面积约 74.32 km²,资源储量巨大。矿区含煤地层为侏罗纪中统西山窑组,共计含煤 9 层,其中全区稳定可采煤层仅有 1 号煤层。岔哈泉矿区地层区划属于北疆-兴安地层大区北塔山地区小区,区域出露的地层有:古生界的石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系,新生界的古近系、新近系和第四系。1 号煤层主要分布在侏罗纪中统西山窑组地层中,煤层整体具有低-中水分、低灰分、高挥发分、低有害元素和中高热量的特点,是优质的化工用煤和动力用煤。

煤是由无机组分和有机组分共同组成的一种非均质性的固体燃料,有机组分主要是镜质组、惰质组和壳质组三种类型,其与煤的工艺性质和工业利用价值密切相关^[6-8]。煤中的镜质组在热解、气化、液化等转化过程中作为活性组分存在,而惰质组则作为一种惰性组分存在^[9-13]。因此,显微组分的富集对煤炭资源分质高效利用具有重要意义。由于不同显微组分在性质上具有差异性,如硬度、色泽、表面性质,基于物理性质的差异性,中外学者们提出了密度浮沉富集法、电化学富集法、破碎筛分富集法、化学氧化富集法等分离方法^[14]。一般来说,煤中惰质组的密度最高,镜质组次之,壳质组最低,有学者基于此提出了基于密度的等密度梯度离心技术和基于表面性质差异性的浮选法^[15-17]。了解不同显微组分在不同密度级中的分布规律是进行富集分选的前提,本研究在分析岔哈泉矿区煤质特性的基础上,探讨有机显微组分在各密度级中的分布规律。

1 样品和试验方法

选取岔哈泉矿区侏罗纪西山窑组的 1 号煤层为研究对象,依据相关标准进行煤的工业分析、元素分析、矿物组成及形貌分析、显微组分和镜质体反射率分析。显微组分和镜质体反射率分析是利用 BRICC-M 煤岩自动化测试系统,依据 GB/T 8899—2013《煤的显微组分和矿物测定方法》和 GB/T 40485—2021《煤的镜质体随机反射率自动测定 图像分析法》的规定进行;煤中的矿物组成主要通过 Bruker D2 的 X 射线衍射仪和 Siroquant 软件进行定性和定量分析,矿物的形貌分析主要通过扫描电子显微镜进行。

煤中灰分、挥发分、全硫、哈氏可磨性指数、煤化程度、镜质组含量分级和壳质组含量分级依据 GB/T 15224.1—2018《煤炭质量分级 第 1 部分:灰分》、GB/T 15224.2—2021《煤炭质量分级 第 2 部分:硫分》、MT/T 849—2000《煤的挥发分产率分级》、MT/T 852—2000《煤的哈氏可磨性指数分级》、MT/T 1158—2011《镜质体反射率的煤化程度分级》、MT/T 1160—2011《煤的镜质组含量分级》和 MT/T 1161—2011《煤的壳质组含量分级》的规定进行评价。

煤样的浮沉试验主要依据 GB/T 478—2008《煤炭浮沉试验方法》进行,煤样的粒度范围为 0.5~3.0 mm,密度液选取氯化锌溶液,密度设置为 1.20、1.30、1.40、1.50、1.60 和 1.70 g/cm³,共获取 7 种不同密度级产物,烘干、称重、破碎,依据相关标准进行测试分析,探究显微组分与各密度级产物之间的关系。针对浮沉试验各密度级产物煤岩组成,将样品破碎至 0.074 mm 以下,利用苯和四氯化碳配制合适的密度液,获取产物后烘干,测定相关产物中显微组分的含量。

2 结果与讨论

2.1 原煤的煤质特性

2.1.1 原煤的工业分析、全硫和元素分析

原煤的煤质分析数据如表 1 所示,岔哈泉矿区 1 号煤层原煤属于特低灰、特低硫和特高挥发分的较难磨煤。原煤的氢碳原子比为 0.82,灰分(A_d)为 9.91%(A2 等级)、挥发分(V_{daf})大于 35%,水分含量(M_{ad})14.86%,固定碳(FC_d)45.03%,哈氏可磨性指数(Hardgrove grind ability index, HGI)大于 50,依据 GB/T

23810—2021《商品煤质量 直接液化用煤》的规定,均符合液化用煤的指标要求。

表 1 原煤的煤质分析数据
Table 1 Coal quality analysis data of raw coal

名称	工业分析/%				元素分析/%					HGI
	M_{ad}	A_d	V_{daf}	FC_d	C	H	O	N	S	
原煤	14.86	9.91	50.02	45.03	75.61	5.14	18.00	0.88	0.37	59

注:氧元素含量为差减法计算所得。

2.1.2 原煤的显微组分分析

原煤中的镜质体反射率和显微组分如表 2 所示。煤中的显微组分以镜质组为主,惰质组次之,壳质组的含量最低。依据相关分级标准,岔哈泉矿区的煤属于低煤级、中高镜质组和中壳质组煤。煤中的活性组分较高,活惰比高达 5.85,表明成煤植物赋存于还原性的环境中,是岔哈泉矿区原煤可用于直接液化的有利因素。

表 2 岔哈泉矿区原煤的镜质体反射率和煤岩组成
Table 2 Vitrinite reflectance and coal-petrology composition of coal from Chahaquan mining area

名称	镜质体反射率	镜质组/%	惰质组/%	壳质组/%	矿物/%
原煤	0.356	76.1	10.1	9.3	4.5

原煤的显微组分如图 1 所示。如图 1(a)和图 1(b)所示,壳质组以孢粉体和角质体为主,呈现蠕虫状分布于镜质组之上;惰质组以碎屑惰质体为主,呈现零星状分布于镜质组中,与镜质组相比反射率明显偏高。如图 1(c)所示,镜质组主要以结构镜质体的形式存在;如图 1(d)所示,黄铁矿呈现亮白色,以裂隙充填的形式分布于镜质组中。

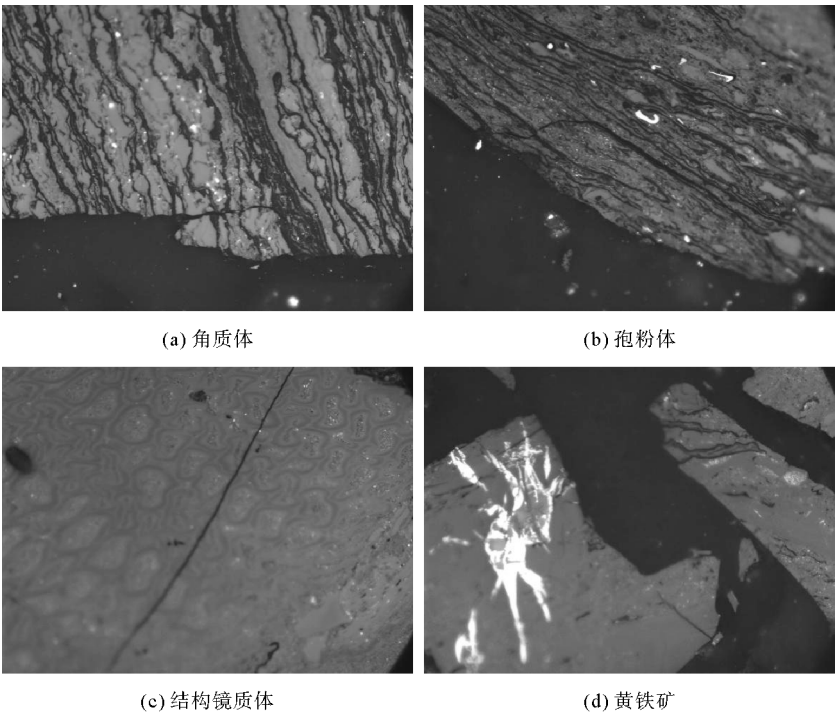


图 1 岔哈泉原煤的显微组分
Fig. 1 Maceral components of Chahaquan coal

2.1.3 原煤的矿物组成分析

在煤炭的液化、焦化及燃烧等利用过程中,煤中所含的矿物可能造成设备腐蚀,对灰渣处理以及燃烧效率产生重要影响。因此,煤炭加工和利用过程中应特别关注矿物的存在及其潜在影响。通过针对矿物特性的优化处理措施,可以进一步提升煤炭的利用效率。借助 X 射线衍射仪和 Siroquant 软件对煤中的矿物进行定性定量分析,具体结果见图 2 和图 3。煤中的矿物组成比较简单,硅酸盐矿物以高岭石和石英为主,约占矿物总量的 78.8%,碳酸盐矿物主要是菱铁矿和方解石、约占矿物总量的 19%。

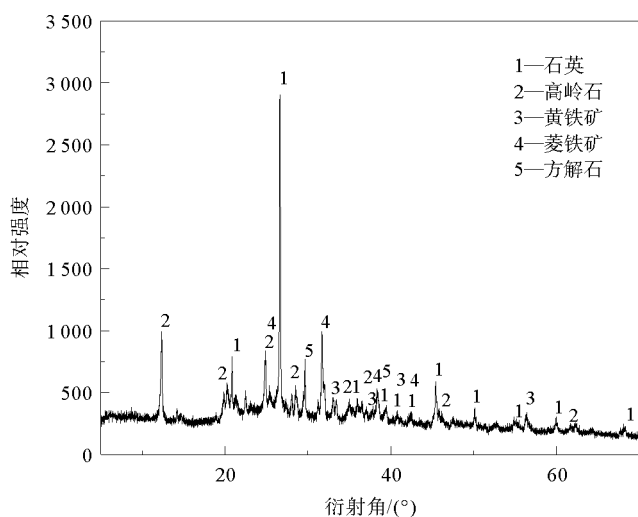


图 2 煤样的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of coal sample

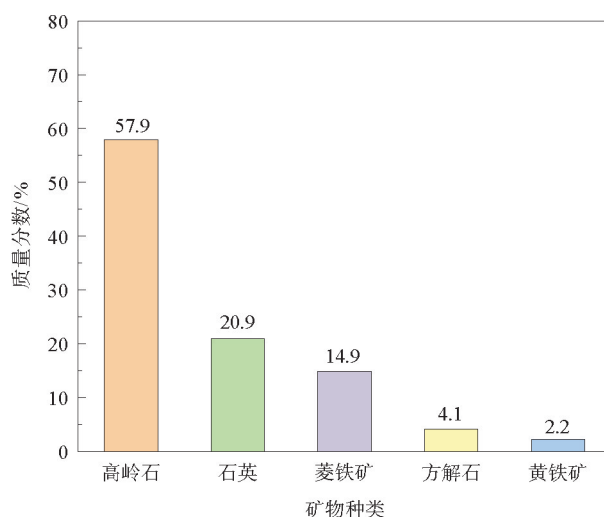
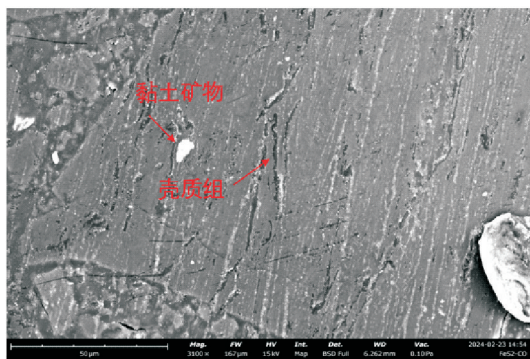


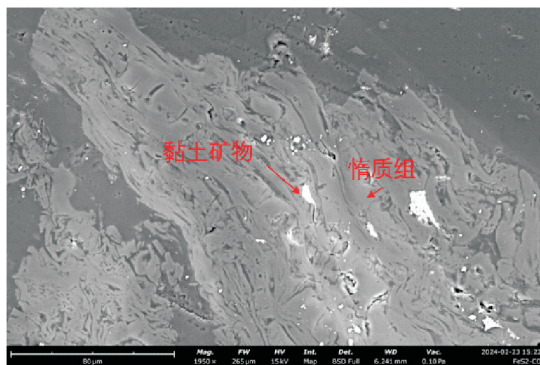
图 3 样品的矿物组成

Fig. 3 Mineral composition of the sample

利用扫描电子显微镜对煤中的矿物质形貌特征进行分析。如图 4(a)所示,壳质体和黏土矿物分布于结构镜质体之上,其中孢子体的长度在 $40\ \mu\text{m}$ 左右,黏土矿物的直径大约 $10\ \mu\text{m}$,充填于镜质组的胞腔中;如图 4(b)所示,黏土矿物分布于丝质体的胞腔之中;如图 4(c)所示,白云石分布于均质镜质体的微裂隙之中,裂隙长度在 $60\ \mu\text{m}$ 左右;如图 4(d)所示,黏土矿物均匀分布于结构镜质体的胞腔之中;如图 4(e)所示,镜质组呈条带状分布于黏土矿物之中,可见明显的植物细胞壁残留孔;如图 4(f)所示,菱铁矿离散分布在镜质组之中,晶型发育较好,可见明显的棱角状;如图 4(g)所示,黄铁矿分布在植物有机质的胞腔和表面,石英呈块状分布于镜质组孔隙中;如图 4(h)所示,黄铁矿以块状形式出现,黏土矿物以胞腔充填的形式出现;如图 4(i)和图 4(j)所示,黏土矿物分布在有机质的胞腔之中,方解石则以块状的形式存在、在破碎时易于解离。一般以块状或裂隙充填形式赋存的矿物易于通过破碎进行解离,而以胞腔充填形式赋存的矿物则不易解离。



(a) 镜质组胞腔中的黏土矿物



(b) 镜质组胞腔中的黏土矿物

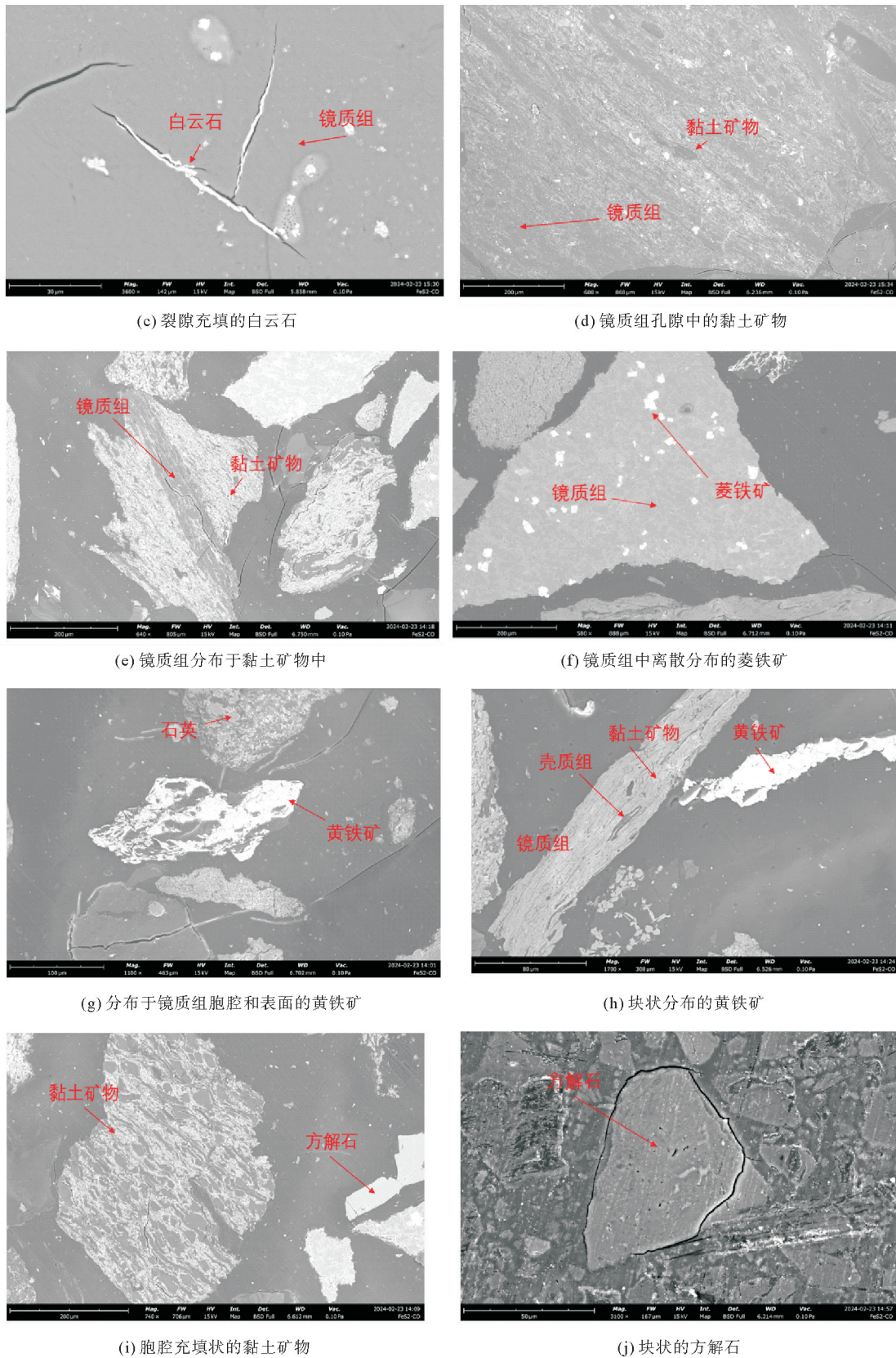


图 4 扫描电子显微镜下矿物组分的形貌特征

Fig. 4 Morphological features of mineral components under scanning electron microscope

2.2 原煤的浮沉试验分析

岔哈泉矿区原煤的多级密度浮沉产物的具体分析结果见表 3。各密度级产物中 1.20~1.30 g/cm³ 密度级的产率最大,产率为 61.12%;各密度级产物的灰分 and 全硫含量随着密度的增加逐渐升高。

表 3 岔哈泉煤多级密度浮沉产物性质分析

Table 3 Analysis of Chahaquan coal properties of products after multi-density flotation separation

密度级/(g/cm ³)	产率/%	灰分/%	全硫/%	镜质组/%	惰质组/%	壳质组/%	矿物/%
<1.20	1.08	4.53	0.23	71.3	1.0	25.3	2.4
1.20~1.30	61.12	4.25	0.23	85.4	2.0	10.9	1.7
1.30~1.40	24.78	6.47	0.22	68.8	21.9	5.1	4.2
1.40~1.50	6.97	9.93	0.29	49.7	44.3	2.7	3.3
1.50~1.60	2.25	19.90	0.60	43.7	50.6	1.7	4.0
1.60~1.70	0.67	37.49	0.79	40.9	35.2	1.2	22.7
>1.70	3.13	78.86	2.59	25.0	7.4	2.3	65.3

对各密度级产物煤中的显微组分进行测定。如表 3 所示,各密度级产物的镜质组含量随着密度的增加先增加后减小,在 1.20~1.30 g/cm³ 密度级含量最大,最大值为 85.4%;壳质组含量的变化趋势与镜质组基本一致,在小于 1.20 g/cm³ 密度级的含量最高,达到 25.3%;各密度级产物的惰质组含量随着密度的增加先增加后减小,在 1.50~1.60 g/cm³ 密度级产物中惰质组的含量最高,达到 50.6%。

2.3 显微组分富集

依据浮沉试验各密度级产物的煤岩数据,为了获取高纯度的镜质组、惰质组和壳质组,采取以下流程进行试验:将样品破碎至 0.074 mm 以下,利用苯和四氯化碳配置密度液(1.25、1.30、1.35 和 1.40 g/cm³),通过等密度梯度离心的方式获取 4 种富集物,即密度分别是:小于 1.25 g/cm³、1.25~1.30 g/cm³、1.30~1.35 g/cm³ 和 1.35~1.40 g/cm³。离心速度设置为 3 000 r/min、维持 5 min,最后滤纸过滤、烘干、制片、抛光和测试。对收集到的样品依据国家标准进行工业分析、全硫分析和显微组分测试,具体结果见表 4。

表 4 不同密度级富集组分性质分析

Table 4 Analysis of the properties of enriched components at different density grades

密度级/(g/cm ³)	灰分/%	全硫/%	镜质组/%	惰质组/%	壳质组/%	矿物/%
1.35~1.40	7.59	0.30	80.6	11.0	4.4	4.0
1.30~1.35	7.71	0.26	23.1	76.5	0.2	1.0
1.25~1.30	4.33	0.19	94.2	3.6	1.7	0.6
<1.25	3.43	0.16	49.5	1.5	47.8	1.1

如表 4 所示,小于 1.25 g/cm³ 的密度级产物中灰分 and 全硫含量最低,1.30~1.35 g/cm³ 的密度级产物的灰分含量最高。各密度级产物的显微组分中,1.25~1.30 g/cm³ 的密度级产物中的镜质组含量最高,可达 94.2%;小于 1.25 g/cm³ 的密度级产物中的壳质组含量最高,可达 47.8%;1.30~1.35 g/cm³ 密度级产物中惰质组含量最高,达 76.5%。

各显微组分富集产物的煤岩特征如图 5 所示,其中大部分颗粒均小于 20 μm,镜质组与惰质组颗粒之间解离的非常彻底,壳质组以孢粉体或角质体的形式与镜质组紧密结合。

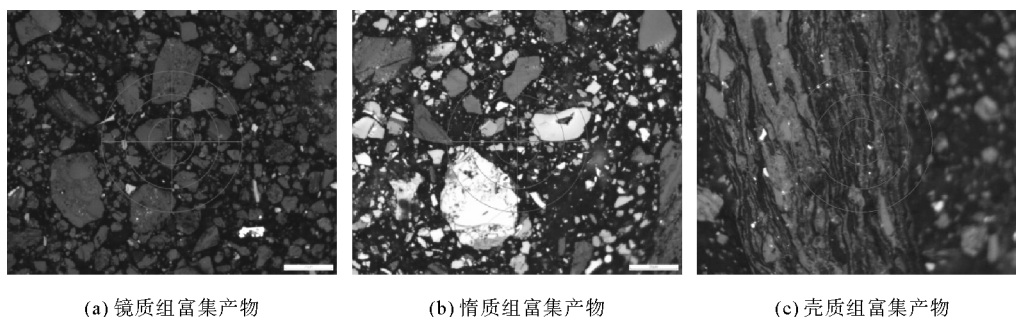


图5 各富集产物的煤岩特征

Fig. 5 Coal petrology characteristics of each enriched maceral

3 结论

岔哈泉矿区1号煤层的煤炭资源丰富,但目前针对岔哈泉矿区的煤炭资源特性的研究较少,通过对矿区煤层煤质特性的系统性分析,得到如下结论:

1) 岔哈泉矿区1号煤具有特低灰、特低硫、特高挥发分、氢碳原子比高、镜质组含量高、惰质组含量低的特点,表明该煤不仅具有良好的清洁燃烧性能,还适合作为液化原料煤。

2) 煤中的矿物种类相对简单,主要包括高岭石、菱铁矿、黄铁矿、方解石和石英等。矿物的赋存形态以块状、胞腔充填状、裂隙充填状为主。在煤炭气化、液化、焦化以及燃烧等利用过程中,需特别重视矿物的存在及其潜在影响,针对矿物特性的优化处理措施可进一步提高煤炭利用效率。

3) 根据浮沉试验和密度梯度离心的结果,镜质组的最佳分选密度为 $1.25 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$,惰质组的最佳分选密度为 $1.30 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$,壳质组的最佳分选密度为小于 1.25 g/cm^3 。研究结果为岔哈泉矿区煤炭显微组分的分选和富集提供了详尽的数据支持,为提升煤炭加工利用的科学性奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王双明,师庆民,王生全.富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J].煤炭学报,2021,46(5):1365-1377.
WANG Shuangming, SHI Qingmin, WANG Shengquan. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1365-1377.
- [2] 孔凯,尹大伟,张虎,等.岩-煤组合体试样变形场与能量演化特征试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(5):30-39.
KONG Kai, YIN Dawei, ZHANG Hu, et al. Experimental study on deformation field and energy evolution characteristics of rock-coal composite samples[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Sciences), 2022, 41(5): 30-39.
- [3] 范超军,张鑫鹏,杨雷,等.1950—2022年中国煤与瓦斯突出事故的时空分布规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(3):279-287.
FAN Chaojun, ZHANG Xinpeng, YANG Lei, et al. Spatial and temporal distribution of coal and gas outburst accidents in China from 1950 to 2022[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(3): 279-287.
- [4] 葛世荣,刘淑琴,樊静丽,等.低碳化现代煤基能源开发关键技术体系[J].煤炭学报,2024,49(7):2949-2972.
GE Shirong, LIU Shuqin, FAN Jingli, et al. Key technologies for low-carbon modern coal-based energy[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 2949-2972.
- [5] 谢克昌.新型能源体系发展背景下煤炭清洁高效转化的挑战及途径[J].煤炭学报,2024,49(1):47-56.
XIE Kechang. Develop new energy system and promote clean and efficient conversion of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 47-56.
- [6] 范文生,党帅,韩新杰,等.山西地区1/3焦煤显微组分的热解特性研究[J].燃料与化工,2024,55(1):5-8.

- FAN Wensheng,DANG Shuai,HAN Xinjie,et al. Study on pyrolysis characteristics of 1/3 coking coal macerals in Shanxi [J]. Fuel and Chemical Processes,2024,55(1):5-8.
- [7] 王岩,杨承伟,袁东营,等. 煤岩学在炼焦配煤中的应用进展及优化配煤技术[J]. 过程工程学报,2022,23(1):25-37.
WANG Yan,YANG Chengwei,YUAN Dongying,et al. Application progress of coal petrology in coking coal blending and coal blending optimization technology[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2022,23(1):25-37.
- [8] 韩新杰,李凯,岳伟明,等. 基于煤分子结构特性的炼焦煤热解动力学研究[J]. 燃料与化工,2024,55(4):1-6.
HAN Xinjie,LI Kai,YUE Weiming,et al. Study on pyrolysis kinetics of coking coal based on structural characteristics of coal molecular[J]. Fuel and Chemical Processes,2024,55(4):1-6.
- [9] 张乾,高增林,王栋,等. 煤岩显微组分分离富集物热化学反应特性[J]. 化工进展,2022,41(增1):160-167.
ZHANG Qian,GAO Zenglin,WANG Dong,et al. Thermal chemical reaction behavior of the coal maceral concentrates[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2022,41(S1):160-167.
- [10] 孙庆雷,林云良,祝贺,等. 煤岩显微组分热解过程中硫化氢的逸出特性[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2013,32(1):32-37.
SUN Qinglei,LIN Yunliang,ZHU He,et al. Evolution characteristic of H_2S during pyrolysis of coal macerals[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Sciences),2013,32(1):32-37.
- [11] 何建国,马荣,张宁,等. 黑山矿区煤岩煤质特征及清洁高效利用研究[J]. 中国煤炭,2021,47(7):77-82.
HE Jianguo,MA Rong,ZHANG Ning,et al. Research on characteristics of coal petrology and coal quality and coal clean and efficient utilization in Heishan mining area[J]. China Coal,2021,47(7):77-82.
- [12] 马明明,李立,高生辉. 煤显微组分热解特性的研究进展[J]. 煤化工,2022,50(3):86-89.
MA Mingming,LI li,GAO Shenghui. Research progress on coal maceral pyrolysis characteristics[J]. Coal Chemical Industry,2022,50(3):86-89.
- [13] 赵帅琪,张瑞,黄瀚,等. 水气转化对超临界水煤气化的抑制特性[J]. 化工学报,2024,75(8):2960-2969.
ZHAO Shuaiqi,ZHANG Rui,HUANG Han,et al. Inhibition of water-gas shift reaction on coal gasification in supercritical water[J]. CIESC Journal,2024,75(8):2960-2969.
- [14] 姚雷,陈新波,高博,等. 煤岩显微组分分选研究进展[J]. 选煤技术,2023,51(4):1-7.
YAO Lei,CHEN Xinbo,GAO Bo,et al. Recent advances in research on separation of maceral components of coal[J]. Coal Preparation Technology,2023,51(4):1-7.
- [15] 邓明瑞,刘红娜. 煤岩有机显微组分分离富集的意义及其研究现状[J]. 选煤技术,2023,51(6):54-65.
DENG Mingrui,LIU Hongna. Significance of separation and enrichment of organic coal macerals and status quo of related research work[J]. Coal Preparation Technology,2023,51(6):54-65.
- [16] 周安宁,张怀青,李振,等. 低阶烟煤煤岩显微组分分选及其分质利用研究进展[J]. 洁净煤技术,2022,28(7):1-22.
ZHOU Anning,ZHANG Huaiqing,LI Zhen,et al. Advances in coal macerals separation and quality-based utilization of low-rank bituminous coal[J]. Clean Coal Technology,2022,28(7):1-22.
- [17] 闫兰英,赵伟,周安宁. 煤岩显微组分的浮选分离及其对活性炭性能影响[J]. 煤炭科学技术,2016,44(增2):197-201.
YAN Lanying,ZHAO Wei,ZHOU Anning. Effect of coal macerals concentrated by flotation separation on properties of activated carbon[J]. Coal Science and Technology,2016,44(S2):197-201.

(责任编辑:吕海亮)