

准格尔煤田官板乌素6号煤层中煤矸石的 矿物学特征研究

崔晓南^{1,2,3}, 黄文辉^{1,2,3}, 丁国平⁴, 敖卫华⁵, 周鸿璞^{1,2,3}, 梁 飞^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京)非常规天然气地质评价及开发工程北京市重点实验室, 北京 100083; 4. 陕西陕煤韩城矿业有限公司下峪口煤矿, 陕西韩城 715405; 5. 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 运用X射线衍射、红外光谱、热重-热流和扫描电镜等手段对准格尔矿区官板乌素煤矿主采6号煤层下部层位中煤矸石的矿物组成和微观形貌进行了系统研究。结果表明,煤矸石在官板乌素煤矿6号煤层下部层位中分布广泛,呈薄层状产出,主要矿物组成为高岭石,其次含有极少量的勃姆石等矿物。样品中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (摩尔比值)在2.00~2.10之间,接近高岭石族矿物理论比值,有害组分铁、钛含量相对较低。在扫描电镜下,可见煤矸石样品中高岭石单晶形态主要为六方片状,叠片状聚晶,晶片的片径多在5 μm 以下。该矿区煤矸石中的高岭石为结晶度较高的优质高岭岩,可用于生产陶瓷。

关键词: 官板乌素;煤矸石;高岭石;结晶度

中图分类号: P578. 964; P618. 11

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)04-0647-08

Mineralogical features of the coal gangue in the Guanbanwusu mine, Jungar coalfield

CUI Xiao-nan^{1,2,3}, HUANG Wen-hui^{1,2,3}, DING Guo-ping⁴, AO Wei-hua⁵, ZHOU Hong-pu^{1,2,3}
and LIANG Fei^{1,2,3}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism, Ministry of Education, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Xiayukou Coal Mine, Shaanxi Coal Hancheng Mining Industry Co. Ltd., Hancheng 715405, China; 5. School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The mineral composition and microstructure of the parting of Guanbanwusu mining area in Jungar coalfield were analyzed with X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectrum and Scanning electron microscope. The results indicate that partings are widely distributed in the bottom layer of No. 6 coal seam of the Guanbanwusu coal mine, showing lamellar output. The main mineral in the partings is kaolinite followed by a very small amount of boehmite and other minerals. The molar ratio of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ is approximately 2.00~2.10, which is close to the theoretical ratio of the kaolinite group minerals. The sample has a low content of Fe and Ti. The single-crystal form of kaolinite is mainly hexagonal plate, flaky stacked polycrystalline, as shown

收稿日期: 2015-11-02; 接受日期: 2016-03-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2014CB238901); 国家自然科学基金资助项目(41472136)

作者简介: 崔晓南(1988-), 女, 博士, 主要从事煤中矿物学和地球化学研究, E-mail: 309485086@qq.com; 通讯作者: 黄文辉(1961-), 教授, 博士生导师, 主要从事环境地球化学、煤层气地质方面的研究, E-mail: huangwh@cugb.edu.cn。

by scanning electron microscope. The size of the single-crystal is less than 5 μm . The kaolinite in the gangue of the Guanbanwusu mining area has high crystallinity, which can be used to produce ceramics.

Key words: Guanbanwusu; gangue; kaolinite; crystallinity

Fund support: National Key Basic Research Program of China (2014CB238901); National Natural Science Foundation of China (41472136)

煤矸石是煤炭生产过程中排放的固体废物,是一种在成煤过程中与煤层伴生的一种含碳量较低、比煤坚硬的黑灰色岩石。目前我国累计堆放的煤矸石约 45 亿吨,而且堆存量每年还以 1.5 ~ 2 亿吨的速度增加,仅 2013 年我国煤矸石排放总量已达到 7.5 亿吨,越来越多的煤矸石侵占了大量的土地资源,严重地污染了环境(葛银堂, 1996; 邓丁海等, 1999; Szczepanska and Twardowska, 1999; 王国强等, 2001; 王喜富等, 2003; 王心义等, 2006; 丁伟等, 2011)。煤矸石的矿物成分以高岭石为主,通常又被称为煤系高岭岩,并一定程度地富集金属元素和有机质,因此煤矸石也具有一定的资源利用价值。

准格尔煤田位于鄂尔多斯盆地东北缘,主要含煤地层分布于上石炭统太原组和下二叠统山西组,是我国一个重要的产煤基地。煤矸石在准格尔煤田石炭-二叠纪煤层中普遍发育,常呈薄层状,厚度为几个厘米至几十厘米,个别达 1 m 以上,横向分布较为稳定(刘钦甫等, 1997)。该矿区年生产 2 000 万吨商品煤,原煤中煤矸石含量为 12% 左右,同时产生约 270 万吨的煤矸石(贾仙芝等, 2006)。

官板乌素煤矿位于准格尔煤田中部,是已投产多年的一个井工矿,毗邻黑岱沟和哈尔乌素露天煤矿。近年来诸多学者就官板乌素主采 6 号煤层进行了系统研究。Sun 等(2012)在官板乌素煤矿发现稀有元素 Li 异常富集(229 $\mu\text{g/g}$)。Dai 等(2012)也发现官板乌素煤矿不仅锂异常富集,同时还富集 Al_2O_3 、Ga 和稀土元素。白观累等(2014)对官板乌素 6 号煤层中的黏土矿物、碳酸盐矿物和硫化物矿物等的赋存特征及成因进行了研究。前人研究多集中在官板乌素煤矿煤中矿物和元素地球化学方面,而对煤矸石的研究相对较少。充分了解煤矸石的矿物学特征对于其如何利用、变废为宝、发展该地区绿色经济起着至关重要的作用。因此本文借助 XRD、FTIR、TG-DSC 和 SEM 等现代分析方法,对准格尔煤田官板乌素煤矿正在开采的 6 号煤层下部层位中煤矸石的矿物组成和微观形貌进行了系统研究,以期为该地区煤矸石的综合利用提供科学依据。

1 实验

1.1 样品采集

此次研究按照国标 GB/T 482-2008 的采样规范,结合准格尔煤田官板乌素煤矿的实际情况(该煤矿采用放顶煤采矿方式,现采煤工作面垂直高度在 3 m 左右),对主采 6 号煤下部层位的煤样和夹矸自上而下进行了分层采样,样品采集后迅速储存在塑料袋中以减少污染。样品编号、采集深度等信息如图 1 所示。

从图 2 的手标本照片中可以看出,样品呈灰-灰黑色、坚硬、致密块状,隐晶结构,部分样品呈贝壳状断口,矿物颗粒极为细小。把煤矸石样品放置在水中,没有膨胀、松散、软化和混浊等现象出现,属于硬质煤系高岭岩。将样品粉碎研磨、自然风干后,进行后续实验。

1.2 样品表征

化学成分测定采用荷兰 PHILIPS 公司的 PW2404 X 射线荧光光谱仪(XRF),在 Rh 靶、功率为 4 kW、20℃、相对湿度 30% 条件下对样品中各组分进行定量分析。测试方法和依据为 GB/T 14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法,第 28 部分:16 个主次成分量测定》。

X 射线衍射分析使用荷兰帕纳科公司(PANalytical B.V.)的 X'Pert PRO MPD X 射线衍射仪测定,Cu 靶,Ka 射线,功率 40 kV,40 mA,连续扫描。其中全岩粉末定量分析的扫描速度为 4°/min,扫描范围 $2\theta = 5^\circ \sim 70^\circ$ 。

红外光谱分析采用美国 ThermoFisher 公司的 Nicolet 6700 傅里叶变换红外光谱仪。利用 KBr 压片技术制样,测试条件:扫描次数为 32 次,分辨率为 4 cm^{-1} ,波数范围 400 ~ 4 000 cm^{-1} ,光栏大小为 100,动静移动速度为 0.632 9 m/s。

采用捷克 Tescan 公司的 VEGA II 扫描电子显微镜观察样品的微观形貌,分辨率 2 nm,加速电压 20.0 kV,低真空,信号类型为二次电子(SE)。

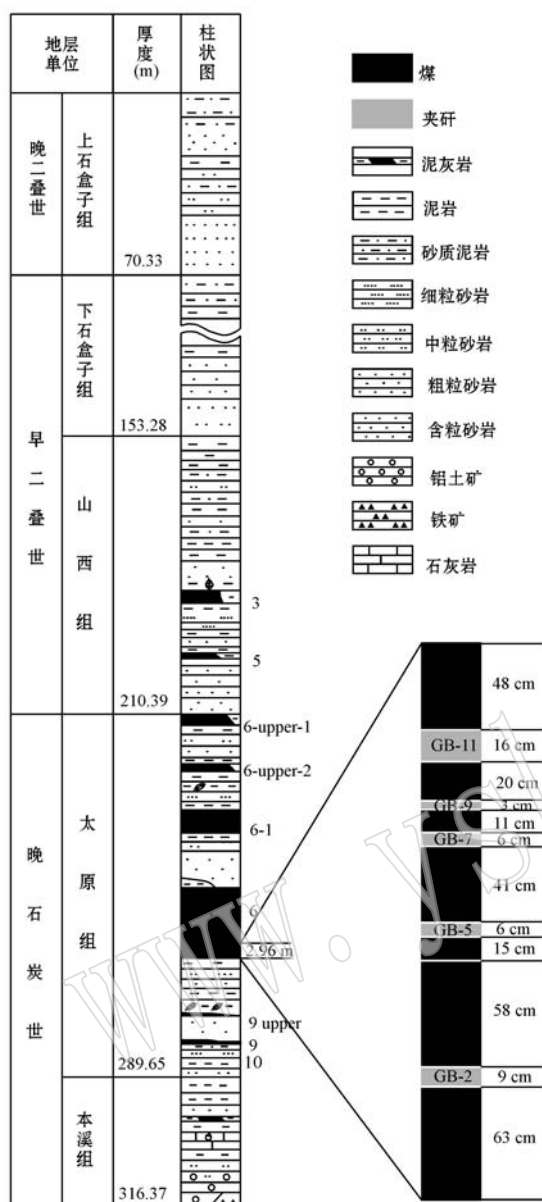


图1 官板乌素石炭一二叠系柱状图(据 Dai 等, 2012)及采样分布图

Fig. 1 Sedimentary sequences of Guanbanwusu mine (modified after Dai *et al.*, 2012) and the collected bench samples

采用瑞士 Mettler Toledo 公司的 TGA/DSC1/1600HT 至尊型热分析仪对样品在受热过程中的质量变化和热效应进行精确测试, N_2 气氛, 温度范围 $30 \sim 1100^\circ\text{C}$, 升温速度 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 化学成分分析

从化学全分析结果(表1)可以看出, 研究区煤矸

石的化学组成较为稳定, 主要为 SiO_2 和 Al_2O_3 。 SiO_2 含量为 $32.24\% \sim 42.85\%$, Al_2O_3 含量为 $26.70\% \sim 34.57\%$ 左右, 有害元素铁、钛含量低, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (摩尔比值) 在 $2.053 \sim 2.109$ 之间, 接近高岭石族矿物理论比值 2.0, 说明该研究区煤矸石样品中主要矿物为高岭石(任磊夫, 1992)。样品中其它元素含量较少, K_2O 、 Na_2O 、 MgO 和 CaO 可能指示样品中含有微量的长石、白云母等矿物。该矿区煤矸石的烧失量较高, 在 $20\% \sim 40\%$ 之间。

2.2 X射线衍射

由 X 射线衍射图谱(图3、表2)可知, 该研究区 6 号煤层下部层位煤矸石样品的矿物成分几乎完全是高岭石(Dai *et al.*, 2012; 张帅等, 2014), 表现为强烈而对称的 0.715 nm 和 0.358 nm 两个衍射峰, 分别为高岭石(001)和(002)基面反射峰; $35^\circ \sim 40^\circ$ 之间出现 2 个“山”字型的衍射峰; 在(001)和(002)晶面衍射峰之间出现数量不等的衍射峰(赵杏媛等, 1990)。尖锐而对称的高岭石(001)反射峰以及两个“山”字型的衍射峰的出现均表明样品中的高岭石结晶度较高。GB-2、GB-5、GB-7 和 GB-11 这 4 个样品基本不存在其他矿物的特征衍射峰, 说明该研究区煤矸石的矿物成分是比较纯的高岭石。而在样品 GB-9 中除了存在高岭石的特征衍射峰以外, 还存在 0.310 nm 小的尖锐衍射峰, 为勃姆石(120)晶面的特征衍射峰, 说明该矿区 6 号煤层下部层位矸石中存在微量的勃姆石(Hinckley, 1963; 代世峰等, 2006)。

目前, 利用 X 射线衍射数据判断晶体结晶指数, 使用最为广泛的是 Hinckley 在 1963 年提出的 Hinckley 指数(H_i)(Hinckley, 1963; 任磊夫, 1992): $H_i = (A + B)/A_1$, 式中 H_i 为 Crystallinity Index 的英文缩写, A、B 分别为 $1\bar{1}0$ 和 $11\bar{1}$ 衍射峰的高度, A_1 为 $1\bar{1}0$ 衍射峰顶点到背景线的距离(图4), H_i 越大, 结晶度越高, 其有序度也就越高。据 Hinckley 结晶度指数公式计算得出的样品 GB-2、GB-5、GB-7、GB-9 和 GB-11 的高岭石结晶度指数 H_i 分别为 1.24、1.18、1.36、1.2 和 1.04, 介于 $1.04 \sim 1.36$ 之间, 说明为结晶度好-极好的有序-高度有序的高岭石(刘钦甫等, 2000; 刘长龄等, 2002)。

除了 Hinckley 指数以外, 还有学者运用 $1\bar{1}0$ 晶面与 020 晶面强度的比值, 来表征高岭石结晶度(杨雅秀, 1992), 即 $I(1\bar{1}0)/I(020)$ 这个比值越大, 结晶度越好。表3为 $1\bar{1}0$ 晶面与 020 晶面的衍射强度

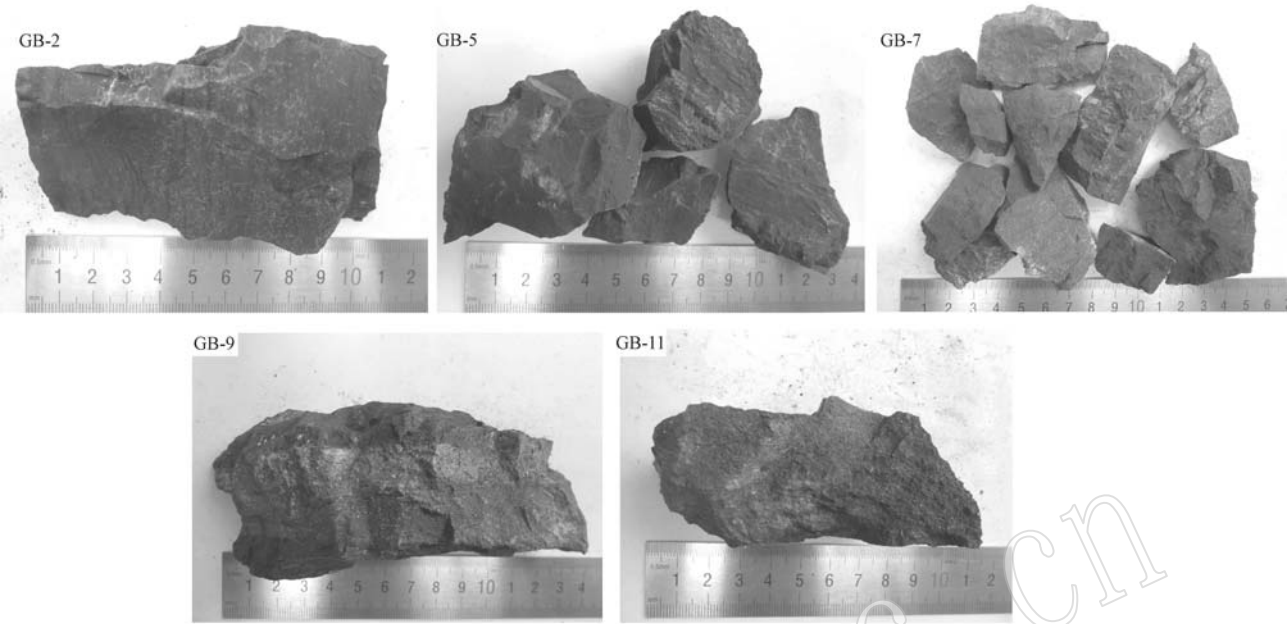


图 2 煤矸石手标本照片
Fig. 2 Photos of coal gangue samples

表 1 煤矸石样品的化学组成
Table 1 Chemical composition of coal gangue samples

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I	总量	$\frac{n(\text{SiO}_2)}{n(\text{Al}_2\text{O}_3)}$
GB-2	42.851	34.570	0.240	0.044	0.099	0.014	0.139	0.002	0.261	0.014	21.663	99.897	2.107
GB-5	38.704	31.204	0.248	0.043	0.146	0.013	0.171	0.002	0.592	0.021	28.709	99.852	2.109
GB-7	38.236	30.820	0.348	0.068	0.527	0.023	0.236	0.004	0.612	0.033	28.558	99.465	2.109
GB-9	32.244	26.701	0.476	0.045	0.631	0.016	0.078	0.005	1.033	0.022	38.136	99.385	2.053
GB-11	35.014	28.674	0.699	0.023	0.161	0.012	0.092	0.003	0.942	0.024	34.097	99.741	2.076

表中: L.O.I 代表烧失量。

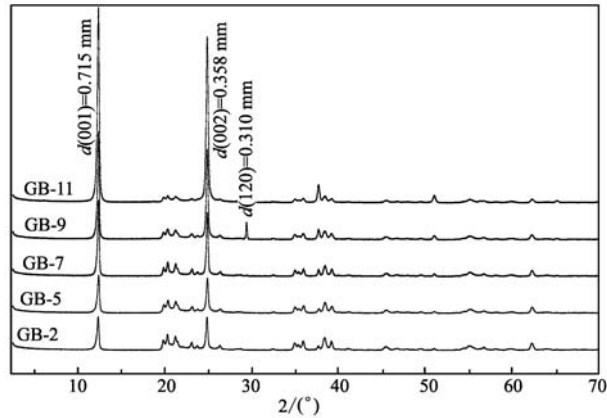


图 3 煤矸石样品的 XRD 衍射图谱
Fig. 3 X-ray diffraction spectra of coal gangue samples

比值,它反映的结果与 Hinckey 指数计算结果一致,表明 GB-7 的结晶度最高,而 GB-11 的结晶度相对较低。

表 2 煤矸石的 X 射线衍射数据
Table 2 XRD data for coal gangue samples

hkl	d/nm (理论值)	d/nm(实测值)				
		GB-2	GB-5	GB-7	GB-9	GB-11
001	0.714	0.717	0.713	0.714	0.714	0.714
020	0.445	0.446	0.445	0.446	0.447	0.446
110	0.435	0.436	0.435	0.435	0.437	0.436
111	0.417	0.417	0.416	0.417	0.417	0.418
021	0.378	0.374	0.374	0.374	0.374	0.384
002	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357
201	0.257	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256
003	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238

2.3 红外光谱

从傅里叶红外光谱(图 5)可以看出,煤矸石样品的红外光谱是典型的高岭石的红外光谱特征,其吸收频率主要集中于高频区 3 400~3 700cm⁻¹和中、低

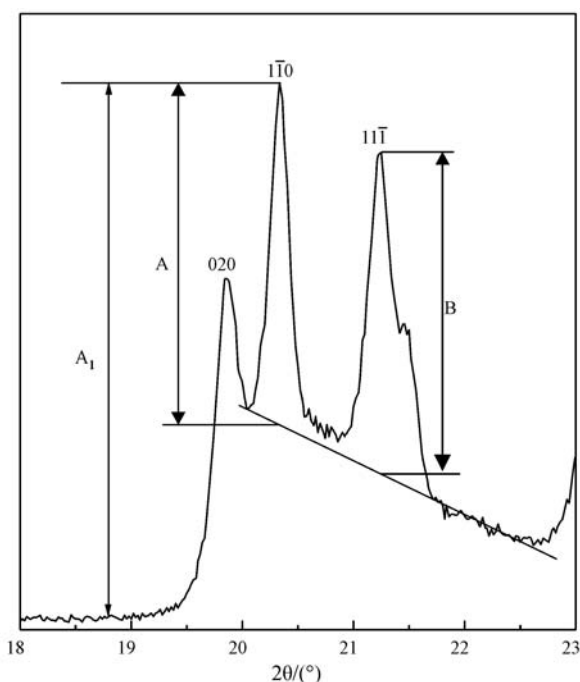


图4 高岭石 Hinckley 指数计算

Fig. 4 Calculation of the Hinckley crystallinity index for kaolinite

表3 高岭石晶面强度比

Table 3 The intensity of crystal ratio of kaolinite

样品	GB-2	GB-5	GB-7	GB-9	GB-11
$I(1\bar{1}0)$	3.337	2.669	2.935	2.028	1.287
$I(020)$	2.136	1.771	1.811	1.314	961
比值	1.562	1.507	1.621	1.543	1.339

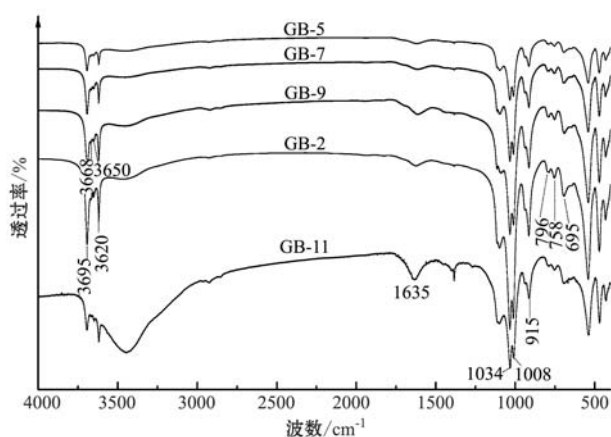


图5 煤矸石样品的红外图谱

Fig. 5 Infrared spectra of coal gangue samples

频区 $400 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 的2个范围内。高频区 $3620 \sim 3700 \text{ cm}^{-1}$ 为高岭石的—OH伸缩振动吸收带,其中 3695 cm^{-1} 和 3620 cm^{-1} 处均出现两个比较尖锐的

吸收峰,峰形似蟹钳状,而且 3695 cm^{-1} 吸收峰的强度大于 3620 cm^{-1} 吸收峰,在 3650 cm^{-1} 处还出现一个强度较低的峰。其中 3695 cm^{-1} 和 3650 cm^{-1} 附近的吸收带由高岭石内表面羟基(八面体层面向层间域的OH)伸缩振动引起; 3620 cm^{-1} 附近的吸收带是由高岭石的内羟基(位于粘土矿物八面体层和四面体层之间的OH)伸缩振动引起。在5个煤矸石样品的红外光谱中, 3668 cm^{-1} 处均出现一个小峰,此峰亦是内表面羟基伸缩振动峰,该峰的出现也说明该矿区煤矸石中的高岭石结晶度较高(陈双喜等,1992;王永刚,2014)。 1635 cm^{-1} 处的吸收峰是由于吸着水的弯曲振动所引起的(王万军等,2006),可能是样品回潮或KBr吸附水分子所致,对于研究高岭石本身无意义。在中低频区 $1000 \sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ 处呈一强的吸收带,由两个峰 1008 cm^{-1} 和 1034 cm^{-1} 构成,为硅氧层的Si—O伸缩振动; 915 cm^{-1} 峰是由Al—O—H的键角弯曲振动引起的;在 $680 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 区间出现的 695 、 758 、 796 cm^{-1} 3个比较弱的吸收峰,是铝氧层的骨架振动及铝羟基的弯曲振动叠加的结果(韩秀伶等,1982;杨志琼等,1988;刘大锰等,1993;瓮诗甫,2010;徐廷婧等,2010;李小红等,2011)。在 550 cm^{-1} 以下有3个强度依次减弱的吸收峰属于硅氧层的键角弯曲振动(任磊夫,1992;彭文世等,1982)。

2.4 扫描电镜观察

通过煤矸石样品的扫描电镜图片(图6)可以看出,煤矸石样品中高岭石单晶形态主要表现为六方片状,叠片状聚晶,只有少量高岭石单晶呈现残缺或者变形的现象,说明该矿区煤矸石中高岭石的结晶度较高,这一结论与X射线、红外光谱的结果相符。晶片的片径一般集中于 $1 \sim 8 \mu\text{m}$,多在 $5 \mu\text{m}$ 以下。

2.5 热稳定性分析

样品GB-2的差热曲线图(图7)表明,煤矸石样品在整个加热过程中主要有两个质量损失阶段: $30 \sim 100^\circ\text{C}$ 有一个快速的质量损失台阶,主要是吸附水逃逸所引起的; $350 \sim 700^\circ\text{C}$ 之间有一个大而宽缓的质量损失台阶,损失质量约占总质量的13.2%,在 520°C 时质量损失达到最快,该阶段为高岭石的脱羟基过程。由热流曲线可知,样品在小于 100°C 时有一个微弱的吸热谷,是由于吸附水逃逸所造成的(任磊夫,1992; Dai *et al.*, 2012),与第一个质量损失阶段相对应。此峰不是很明显,说明高岭石表面的吸附水较少。并且可以看到随着温度升高过程中一直有

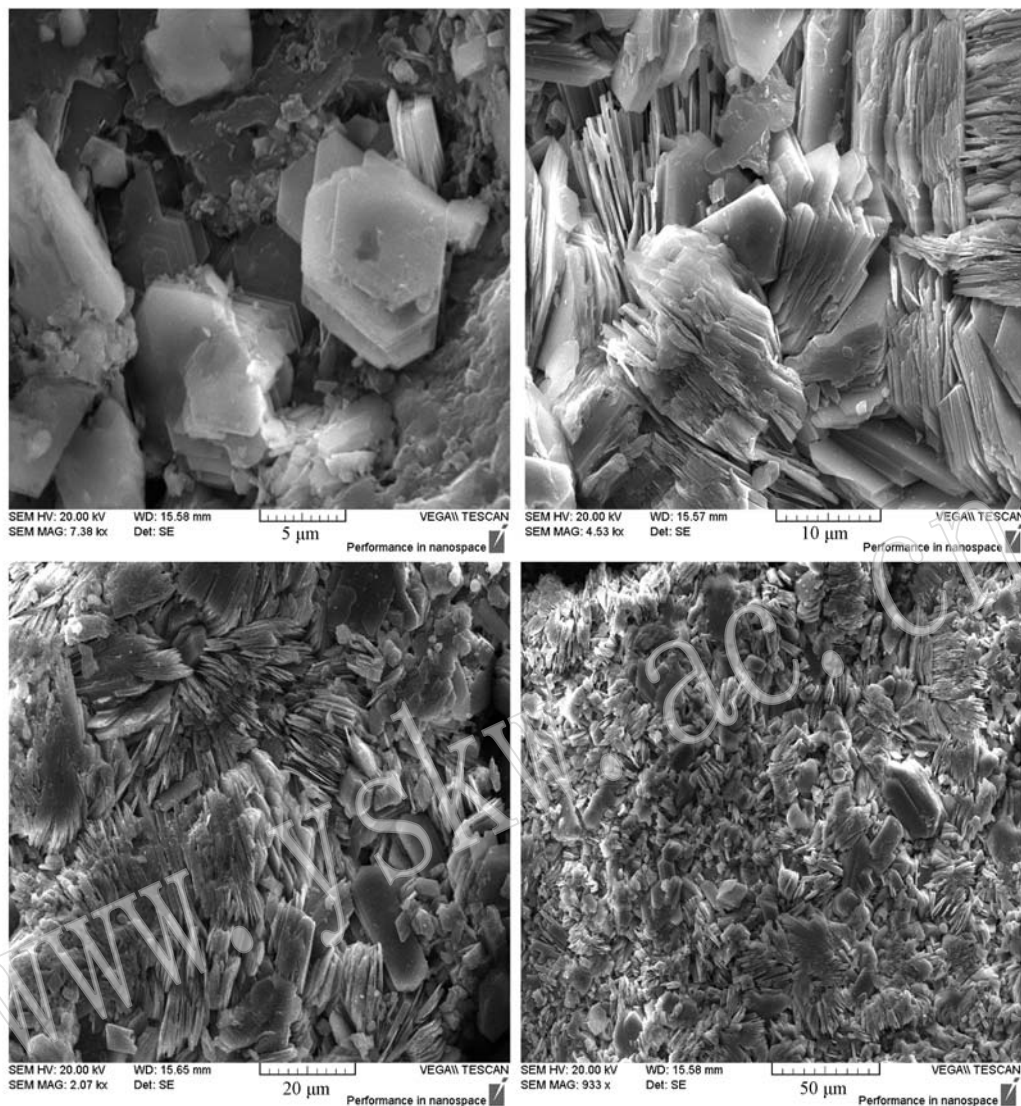


图 6 煤矸石样品的扫描电镜图像

Fig. 6 SEM of coal gangue samples

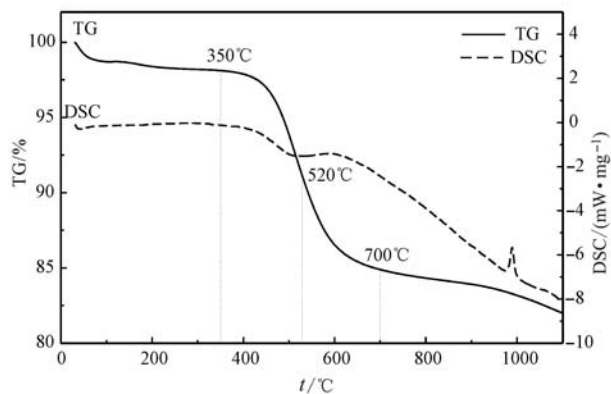


图 7 煤矸石样品的热重-热流曲线

Fig. 7 TGA-DSC curves of coal gangue samples

热量平稳的放出,一直达到高岭石脱除层间羟基。在 500℃ 出现一个明显的吸热谷,是由于高岭石脱羟基造成的。到 700℃ 左右几乎完全脱去层间羟基,转变为偏高岭石。此外,在 900~1 000℃ 附近出现一个尖锐的放热峰,这是由无定形氧化铝重结晶为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 造成的。

3 结论

(1) 样品的化学成分分析、X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱和差热分析等测试结果表明,准格尔煤田官板乌素煤矿 6 号煤层下部层位煤矸石中主要矿物为结晶度较好的有序高岭石,其次含有极少量

的勃姆石等矿物质。

(2) 煤矸石样品中化学成分以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, 其它元素含量相对较低, 一般都在 1% 以下。 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (摩尔比值) 在 2.053~2.109 之间, 接近高岭石族矿物理论比值。

(3) 扫描电镜下可见煤矸石样品中高岭石单晶形态主要表现为六方片状, 叠片状聚晶, 少量高岭石单晶呈现残缺或者变形的现象。晶片大小一般集中于 1~8 μm , 多在 5 μm 以下。

(4) 从以上测试结果看, 该矿区的煤矸石主要矿物成分为结晶度较高的优质高岭岩, 是极宝贵的矿产资源。虽然厚度不大, 不宜单独开采, 但在采煤过程中, 可以综合利用。由于其结晶度较高, 含杂质少, 可作为陶瓷原料, 生产粗瓷、细瓷等。

References

- Bai Guanlei, Wang Jinxi, Duan Piaopiao, *et al.* 2014. Occurrence characteristics and genesis of mineral of No. 6 coal from Guanbanwusu Mine[J]. *Coal Technology*, (11): 91~93(in Chinese with English abstract).
- Chen Shuangxi, Feng Min and Fang Pan. 1992. Study on the order state of Kaolinites in Huaibei and eta, Anhui[J]. *Geology of Anhui*, 2(1): 60~65(in Chinese with English abstract).
- Hinckley D N. 1963. Variability in "crystallinity" values among the kaolin deposits of the Coastal Plain of Georgia and South Carolina[J]. *Clays and Clay Minerals*, 11: 229~235.
- Dai Shifeng, Jiang Yaofa, Colin R W, *et al.* 2012. Mineralogical and geochemical compositions of the coal in the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, China: Further evidence for the existence of an Al (Ga and REE) ore deposit in the Jungar Coalfield[J]. *International Journal of Coal Geology*, 98: 10~40.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng, *et al.* 2006. A discovery of extremely-enriched boehmite from coal in the Junger Coalfield, the Northeastern Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 295~299(in Chinese with English abstract).
- Deng Dinghai and Cen Wenlong. 1999. Environmental effect of coal gangue stack area[J]. *China Mining Magazine*, 8(6): 87~91(in Chinese with English abstract).
- Ding Wei, Huang Zhilong, Zhou Jiaxi, *et al.* 2011. Evaluation on comprehensive utilization of trace elements from coal gangue in Shuicheng, Guizhou[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 502~508(in Chinese with English abstract).
- Ge Yintang. 1996. The trace elements in the gangue of Shanxi and its effect to the environment[J]. *Coal Geology of China*, 8(4): 58~62(in Chinese).
- Han Xiuling and Chen Kaihui. 1982. Study of infrared absorption spectra on the kaolinite~halloysite evolutionary series[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1(1): 71~79(in Chinese with English abstract).
- Jia Xianzhi and Guo Jianping. 2006. The practice of develop cyclic economy in Jungar energy company[J]. *China Coal*, 32(9): 74~76(in Chinese).
- Li Xiaohong, Jiang Xiangping, Chen Chao, *et al.* 2001. Research on diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy of kinds of kaolin in various areas[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 31(1): 114~118(in Chinese with English abstract).
- Liu Changling and Liu Qinfu. 2002. Advance on the relation of orders of kaolinite crystallization in coal series to the origin[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 17(2): 73~81(in Chinese with English abstract).
- Liu Dameng, Ge Baoxun, Huang Zhiming, *et al.* 1993. Characteristics and comprehensive utilization of coal wastes in the Pingdingshan mining district[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 13(4): 374~382(in Chinese with English abstract).
- Liu Qinfu, Xu Hongliang and Zhang Pengfei. 2000. Crystallinity difference for various origin of kaolinites in coal measures[J]. *Journal of China Coal Society*, 25(6): 576~580(in Chinese with English abstract).
- Liu Qinfu and Zhang Pengfei. 1997. Study on the Composition and Mineralization Mechanism of the Coal-series Kaolin in the Late Paleozoic Coal of North China[M]. Beijing: Ocean Press(in Chinese).
- Peng Wenshi and Liu Gaokui. 1982. FTIR Atlas of Minerals[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Ren Leifu. 1992. Clay Minerals and Claystone[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Sun Yuzhuang, Zhao Cunliang, Li Yanheng, *et al.* 2012. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam #6 from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, northern China[J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 30(1): 109~130.
- Szczepanska J and Twardowska I. 1999. Distribution and environmental impact of coal-mining wastes in Upper Silesia, Poland[J]. *Environmental Geology*, 38(3): 249~258.
- Wang Guoqiang, Zhao Huahong, Wu Daoxiang, *et al.* 2001. Gangue sanitary landfill and recovering ecological environment in Huaibei and Huainan mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 26(4): 428~431(in Chinese with English abstract).
- Wang Wanjun and Zhao Yanqiao. 2006. Preparation study of molecular sieve from coal gangue in Qingfeng[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, (6): 18~23(in Chinese with English abstract).

- Wang Xifu and Zhang Luxiu. 2003. Coal Gangue and Its Application in Railway Construction of Coal Field[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House(in Chinese).
- Wang Xinyi, Yang Jian and Guo Huixia. 2006. Study on heavy metals in soil contaminated by coal waste rock pile [J]. Journal of China Coal Society, 31(6): 808~812(in Chinese with English abstract).
- Wang Yonggang. 2014. Study on the degree of crystallinity of kaolinite in gangue[J]. Shanxi Chemical Industry, 151(3): 19~22(in Chinese with English abstract).
- Wong Shifu. 2010. Analyzation of Fourier Transform Infrared Spectroscopy [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House(in Chinese).
- Xu Tingjing and Wang Hejin. 2010. An IR spectroscopy study of kaolinite from Jingdezhen area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(1): 59~66(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaxiu. 1992. Clay Minerals in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Yang Zhiqiong, Zhao Xingyuan and Zhang Ling. 1988. Infra-Red spectra analysis for clay minerals of kaolinites [J]. Experimental Petroleum Geology, 10(1): 60~66(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuai, Liu Qinfu, Shi Songlin, *et al.* 2014. Distribution and formation mechanism for boehmite of No. 6 Coal Partings at Haerwusu Mining Area, Junger Coalfield[J]. Acta Mieralogica Sinica, 24(1): 92~96(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingyuan and Zhang Youyu. 1990. Clay Minerals and the Analyzation of Clay Mineral[M]. Beijing: Ocean Press(in Chinese).
- 附中文参考文献
- 白观累, 王金喜, 段飘飘, 等. 2014. 官板乌素6#煤中矿物的赋存特征及成因研究[J]. 煤炭技术, (11): 91~93.
- 陈双喜, 冯敏, 方磐. 1992. 安徽淮北等地高岭石有序度研究[J]. 安徽地质, 2(1): 60~65.
- 代世峰, 任德贻, 李生盛, 等. 2006. 鄂尔多斯盆地东北缘准格尔煤田中超常富集勃姆石的发现[J]. 地质学报, 80(2): 295~299.
- 邓丁海, 岑文龙. 1999. 煤矸石堆放区的环境效应研究[J]. 中国矿业, 8(6): 87~91.
- 丁伟, 黄智龙, 周家喜, 等. 2011. 贵州水城地区煤矸石中微量元素综合利用评价[J]. 矿物学报, 31(3): 502~508.
- 葛银堂. 1996. 山西煤矸石中的微量元素及其对环境的影响[J]. 中国煤田地质, 8(4): 58~62.
- 韩秀伶, 陈开惠. 1982. 高岭石-多水高岭石演化系列的红外吸收光谱研究[J]. 地质科学, 1(1): 71~79.
- 贾仙芝, 郭建平. 2006. 准格尔能源公司发展循环经济的实践[J]. 中国煤炭, 32(9): 74~76.
- 李小红, 江向平, 陈超, 等. 2011. 几种不同产地高岭土的漫反射傅里叶红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 31(1): 114~118.
- 刘长龄, 刘钦甫. 2002. 高岭石矿物结晶有序化程度与成因关系研究新进展[J]. 地质找矿论丛, 17(2): 73~81.
- 刘大锰, 葛宝勋, 黄志明, 等. 1993. 平顶山矿区煤矸石特征及综合利用途径[J]. 矿物学报, 13(4): 374~382.
- 刘钦甫, 张鹏飞. 1997. 华北晚古生代煤系高岭岩物质组成和成矿机理研究[M]. 北京: 海洋出版社.
- 刘钦甫, 许红亮, 张鹏飞. 2000. 煤系不同类型高岭岩中高岭石结晶度的区别[J]. 煤炭学报, 25(6): 576~580.
- 彭文世, 刘高魁. 1982. 矿物红外光谱图集[M]. 北京: 科学出版社.
- 任磊夫. 1992. 粘土矿物与粘土岩[M]. 北京: 地质出版社.
- 王国强, 赵华宏, 吴道祥, 等. 2001. 两淮矿区煤矸石的卫生填埋与生态恢复[J]. 煤炭学报, 26(4): 428~431.
- 王万军, 赵彦巧. 2006. 青峰煤矸石矿物学特征及分子筛制备研究[J]. 矿产保护与利用, (6): 18~23.
- 王喜富, 张禄秀. 2003. 煤矸石及其在矿区铁路建设中的应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社.
- 王心义, 杨建, 郭慧霞. 2006. 矿区煤矸石堆放引起土壤重金属污染研究[J]. 煤炭学报, 31(6): 808~812.
- 王永刚. 2014. 煤矸石中高岭石的结晶度研究[J]. 山西化工, 151(3): 19~22.
- 瓮诗甫. 2010. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 徐廷婧, 王河锦. 2010. 景德镇地区高岭石红外光谱分析[J]. 岩石矿物学杂志, 29(1): 59~66.
- 杨雅秀. 1992. 中国黏土矿物[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨志琼, 赵杏媛, 章玲. 1988. 高岭石类粘土矿物的红外吸收光谱分析[J]. 石油实验地质, 10(1): 60~66.
- 张帅, 刘钦甫, 石松林, 等. 2014. 准格尔煤田哈尔乌素矿区6号煤层夹矸中勃姆石的分布及成因[J]. 矿物学报, 24(1): 92~96.
- 赵杏媛, 张有瑜. 1990. 粘土矿物与粘土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社.