

我国朔州地区煤矸石的矿物学特征及煅烧组分变化研究

刘玉林^{1,2}, 刘长森^{1,2}, 刘岩^{1,2}, 赵毅^{1,2}, 谭琦^{1,2}

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
2. 国家非金属矿资源利用工程技术中心, 河南 郑州 450006

中图分类号: X752 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)03-0100-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.03.017

摘要 目前,煤矸石利用是固废处置与利用的重要内容之一,煤矸石的综合利用与其矿石性质密切相关,但对煤矸石各组分的嵌布关系,元素分布、物相存在形式、微观形貌等相关研究较少。文章针对我国朔州地区煤矸石开展工艺矿物学研究,采用XRD、XRF、EDS、SEM等方法,查明了该煤矸石成分为石英、高岭土、黄铁矿、伊利石、金红石,且多为集合体形式存在,其颗粒微观形貌呈现层状或鳞片状。煤矸石中有用矿物高岭石的含量为56.3%,其次为石英21.1%,伊利石15%。铁杂质主要以黄铁矿存在,其含量为6.5%。煤矸石煅烧试验表明:黄铁矿在850℃左右开始被氧化,生成赤铁矿;在1000℃煅烧2 h,煤矸石中碳降低到0.1%以下,硫含量也降低到1.74%。在900~1000℃温度区间内,高岭石转变为无定型的偏高岭土。

关键词 煤矸石;组成;黄铁矿;煅烧;杂质

我国是煤炭生产大国和消费大国,资源储量非常丰富,煤炭在能源消费结构中的比重占70%以上,煤炭资源将在很长时间内作为我国一次能源的主要支柱^[1]。与之相对应的是,采煤过程中产生的煤矸石的积存量及排放量也十分惊人。

根据《煤炭工业发展“十三五”规划》,预计到2020年,全国煤炭产量39亿t,煤矸石产生量7.95亿t,利用量达6.1亿t,利用率在75%左右。我国对煤矸石综合利用主要途径有:(1)用作发电、造气、供热、生产沸腾炉燃料;(2)作为建材、水泥生产原燃料,作水泥及混凝土掺合料或功能辅助胶凝材料,用于制砖、生产轻集料和空心砌块,作筑路和矿井回填材料,生产马赛克、烧制彩釉地砖等建筑材料等;(3)用于制备化工原料,制取碱性氯化铝、聚合物氯化铝、硫酸铝和水玻璃;(4)用于制备陶瓷、耐火材料的原料^[2-3]。

煤矸石是采煤过程和洗煤过程中排放的固体废弃物,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^[4]。煤矸石的物质组成决定了煤矸石的综合利用途径^[5]。卞孝东^[3]认为煤矸石主要由砾岩、砂岩、泥岩、黏土岩及石灰岩组成,化学组成以SiO₂、Al₂O₃、C、Fe₂O₃等为主,其化学成分不稳定;

孙春宝^[6]等人分析了煤矸石的塑性指数、含水率、黏度、硬度、密度、耐火度等物理性质及煤矸石化学组成范围;梁效^[7]对内蒙古某煤矸石的基本性质以及煅烧工艺脱除煤矸石的有机质的影响做了研究。前人对煤矸石的综合利用开展了许多工作,主要针对品质较好、组成相对简单的煤系高岭土开展大量研究,但对成分较为复杂、难利用的低品质的煤矸石的工艺矿物学相关的研究较少,特别是对山西朔州地区的煤矸石工艺矿物学及综合利用未见报道。在煤矸石煅烧方面,黄腾、田钊等人^[8-12]针对煤系高岭土的煅烧前后高岭土的白度、活性及结构变化做了研究,对煅烧过程中影响其综合里利用的铁、碳、硫等杂质变化及存在形式相关的研究也较为欠缺。本文以XRD、XRF、EDS、SEM等手段,系统开展了朔州地区成分较为复杂且难利用的煤矸石工艺矿物学的研究,查明煤矸石的物质组成、元素组成分布、微观结构、嵌布特征,可指导煤矸石综合利用的前段的预处理,同时探讨了在煤矸石利用过程中常用的煅烧温度区间内,其物相组成及碳、铁等杂质元素的变化,为煤矸石的综合利用及评价、开发工作提供理论基础和科学依据,加快该地区煤矸石综合利用的进程。

1 试验仪器与原料

1.1 原料

试验所用的煤矸石为山西省朔州市某劣质煤采场的煤矸石,其化学多元素分析结果如表1。

表1 煤矸石化学多样分析结果 /%

Component	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	S	C	loss
Content	21.02	55.01	6.04	4.58	1.81	13.74

1.2 检测与表征

全谱型等离子体发射光谱仪(ICP - AES) 213DF0G/* ASDWE/ICPE - 9820; 帕纳科 Empyrean 锐影 X 射线衍射仪;能量色散型 X 射线荧光分析装置,仪器型号为 EDX - 7000;煤岩分析仪 - 蔡司 MY 系列煤岩分析系统;扫描电子显微镜能谱仪;聚焦离子束扫描电镜双束工作站,仪器型号:Zeiss/Auriga FIB SEM。

采用 X 射线衍射仪分析样品的物相组成,X 射线衍射条件:加速电压为 40 kV,管电流 100 mA,Cu 靶 K α 射线($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), 2θ 范围为 $10^{\circ} \sim 85^{\circ}$,测试步长 $0.3^{\circ} \cdot \text{s}^{-1}$;采用 X 射线荧光分析仪测试样品的元素组成,试验方法:将 0.5 g 粉末试样放入测试模具中,放入测试仪器中测试,测试温度为室温;采用扫描电镜和 EDS,分别在粉煤灰颗粒和煤矸石颗粒表面选点,进行扫描并确定颗粒的元素组成,并对颗粒的化学组成进行判定;采用煤岩分析仪 - 蔡司 MY 系列煤岩分析系统观测样品光片的微观结构。

1.3 试验方法

煤矸石样品经过破碎至 - 2 mm,经过缩分混匀,用三头研磨机研磨至 - 200 目作为分析检测的样品。

光片制备方法:用环氧树脂 + 三乙醇胺,质量比为 9 : 1,取 30 g 的环氧树脂置于坩埚中,加三乙醇胺,将坩埚放在酒精灯上加热至沸腾,把试样投入到胶中煮沸,将热胶倒入不漏胶的纸杯中,置于 80 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥,取出切平磨片。试样切平后首先进行粗磨,粗磨过后在中磨盘上继续磨制,后精磨,试样在毛玻璃板上磨制 3 min 左右,过程中添加助磨剂 W3 级 Al_2O_3 ,进一步磨光。

以箱式电炉对样品进行煅烧,煅烧后分析样品的物质组成及铁、碳等元素的含量变化。试验条件:取 10 g 样品平铺于瓷舟中,放置箱式电炉中进行煅烧,升温速率 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

2 煤矸石的矿物学特征

2.1 煤矸石的元素组成及分布

煤矸石原矿化学多项分析见表1,X 射线荧光分析见表2。由表1,表2 可知,矿石中以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, SiO_2 含量在 50% 以上, Al_2O_3 含量也大于 20%,烧失量大于 10%,固定碳含量为 4.52%。

表2 煤矸石的 X 荧光分析结果 /%

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O
Content	51.69	21.59	0.04	5.94	6.12	0.76	0.08

Component	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	ZnO	LOI	Fixed carbon
Content	0.06	1.26	0.06	—	—	11.40	4.52

在扫描电镜和 X 射线能谱分析镜下,分别在煤矸石颗粒表面选点(如图1),进行扫描并确定颗粒的元素组成,判定颗粒的化学组成。结果如表3。

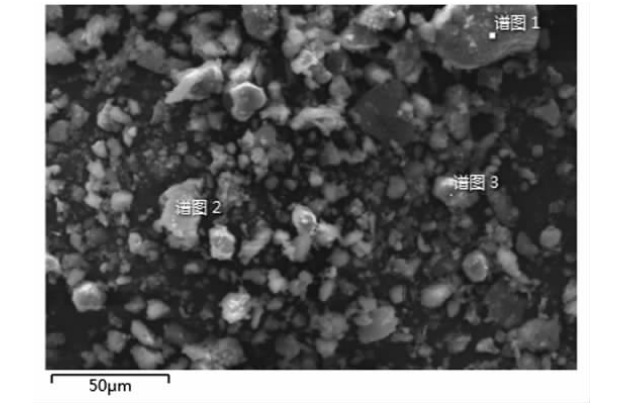


图1 煤矸石点扫描原图
Fig. 1 Coal gangue spot scan original drawing

表3 煤矸石的化学成分能谱检测结果 /%

Table 3 Chemical composition energy spectrum test results of coal gangue

point	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Ti	Cu	Zr
1	50.24	6.77	38.68	0.59	0.15	0.00	0.39	0.00	0.08	0.22
2	65.12	12.34	14.88	5.16	0.42	0.22	1.64	0.22	0.00	0.00
3	50.48	8.86	34.25	2.88	1.12	0.00	2.07	0.33	0.00	0.00

对测点2 进行元素组成及分布扫描,其主要元素 O、Si、Al、C 的分布如图2 所示(煤矸石中 C 多为有机质且受环境气氛中影响,数值误差较大,因此在表3 中删除该部分数值),其主要杂质元素 S、Fe、K、Ti 的分布如图3 所示。

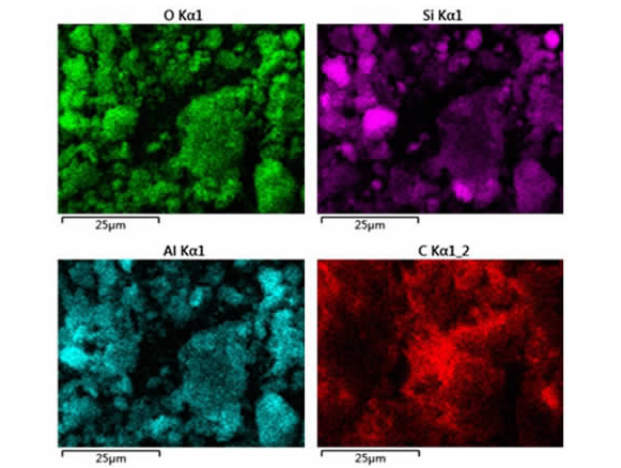


图2 扫描区域中主要元素(O、Si、Al、C)的分布
Fig. 2 Distribution of main elements (O、Si、Al、C) in scanning are

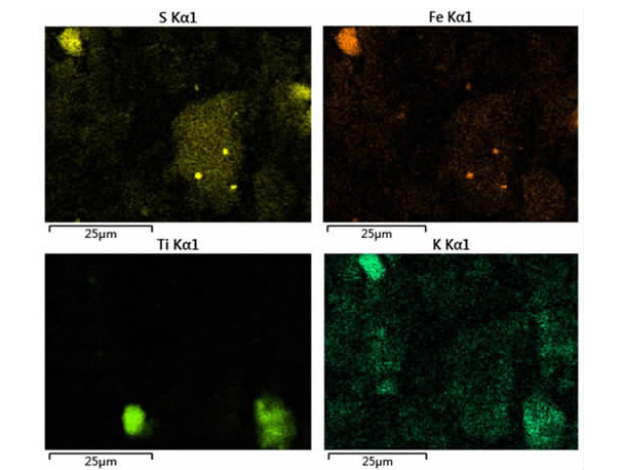


图3 扫描区域中杂质元素(S、Fe、Ti、K)的分布
Fig. 3 Distribution of impurity elements (S、Fe、Ti、K) in scanning are

由图2、图3可知,O、Si、Al元素分布较为一致,推断主要矿物为铝硅酸盐为主;S、Fe分布相同,其存在形式应该为铁的硫化物。

2.2 煤矸石矿物组成

煤矸石的X射线衍射图谱见图4,该煤矸石的主要成分为高岭石、石英,含部分伊利石、黄铁矿及少量的金红石,以RIR方法计算物相的质量分数,含量计算结果如表4。

表4	煤矸石物相组成	/%				
Table 4	Phase composition of coal gangue					
phase	Quartz	Kaolinite	Illite	Pyrite	Rutile	
Content	21.1	56.3	15	6.5	1.1	

将煤矸石试样制备的光片置入煤岩分析仪-蔡司MY系列煤岩分析系统下,其石英、高岭石、黄铁矿的

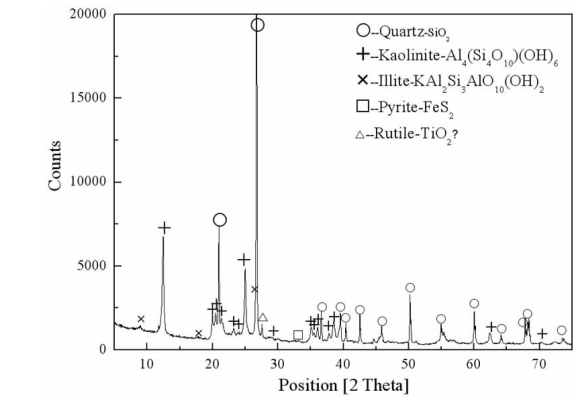


图4 煤矸石X-射线衍射图谱
Fig. 4 X-ray diffraction pattern of coal gangue

分布特征如图5所示。由图5(a)、(b)、(c)可以看出煤矸石中的高岭土呈块状,石英主要以集合体形式存在,成灰黑色,黄铁矿呈不规则的集合体形式存在,图5(d)可以看出黄铁矿边缘被氧化。

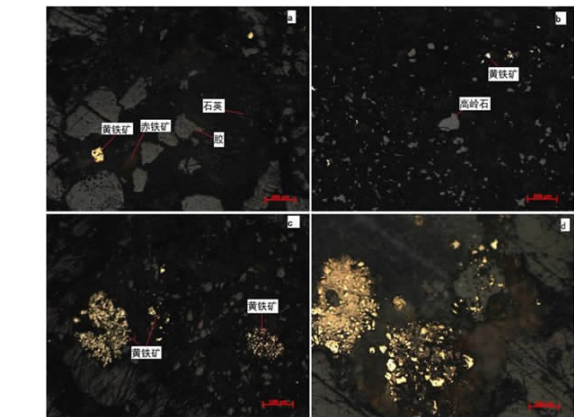


图5 煤矸石显微镜下主要物相组成及存在形式
Fig. 5 Main phase composition and existing forms of coal gangue under microscope

结合XRD分析结果判定,煤矸石中所含主要矿物成分为高岭石、石英、黄铁矿等,亦含有少量赤铁矿,有机成分主要为黑色有机质。在黏土矿物形成的基质中,常包裹有少量石英、黄铁矿及赤铁矿。石英呈灰黑色,不规则分布;黄铁矿结晶状况良好,有较好的黄铁矿晶体,呈他形晶,黄铁矿边缘氧化,呈集合体形式存在;赤铁矿结晶体较少,亦有和黏土质形成隐晶质。

2.3 煤矸石的微观形貌

煤矸石在扫描电镜下的颗粒表面特征如图6所示。由图6可知,煤矸石颗粒表面较为粗糙,呈不规则的块状分布,颗粒呈现较为明显的层状结构。具有片状结构颗粒主要为煤矸石中的高岭石、伊利石。高岭石多呈层状结构,该煤矸石中的高岭石结构为层状结构,且为多层叠合,整体呈块状,伊利石呈极细小的鳞片状晶体。

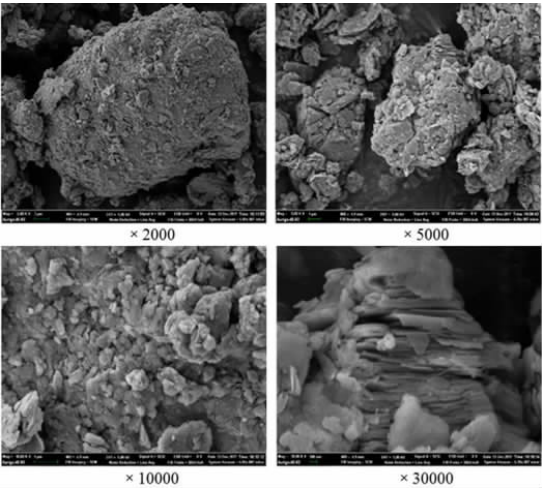


图 6 扫描电镜下煤矸石颗粒的微观形貌
Fig. 6 Microscopic morphology of coal gangue particles under scanning electron microscope

3 煤矸石煅烧后组成及物相变化

煤矸石原矿的工艺矿物学结果表明:该煤矸石中主要有用组分为高岭石,可当做煤系高岭土进行利用。煤系高岭土通过一定的工艺方法可制备出煅烧高岭土(偏高岭土)、吸附剂(煤矸石 4A 分子筛)等高值化产品^[5,14]。在一定温度条件下,煅烧后的煤矸石活性有一定的提高,高岭土生成偏高岭土,呈现高活性^[6],可广泛应用于水泥、陶瓷、造纸、橡塑填料等行业。

煤矸石的高值化利用同时受到碳、硫、铁等杂质元素的影响,研究在不同温度下的煅烧煤矸石中元素的变化以及物相转变,揭示煤矸石在煅烧过程中主要杂质元素的变化过程。

3.1 煤矸石煅烧后化学组分的变化

研究资料表明^[15]:煤矸石在 750 ~ 850 ℃ 时火山灰活性最好,此时煤矸石中非晶态 SiO₂ - Al₂O₃ 含量

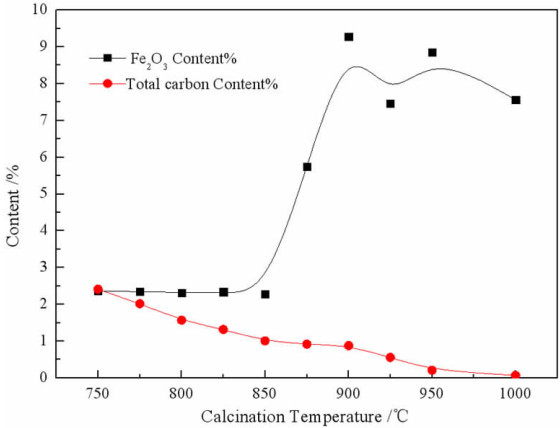


图 7 煤矸石在不同温度小煅烧 2 h 后 C、Fe₂O₃ 含量变化
Fig. 7 Change of carbon and Fe₂O₃ content of coal gangue after small calcination at different temperatures for 2 hours

最高;高于 900 ℃ 煤矸石中可能会形成莫来石,其活性会将降低。因此,煅烧温度确定为 750 ~ 1 000 ℃。

为了掌握煤矸石煅烧过程中碳、硫、铁变化,试验采用焙烧的方式,在 750 ~ 1 000 ℃ 温度范围内变化,分析煤矸石煅烧后的碳、铁、硫元素的变化规律,试验结果如图 7。

试验表明,随着煅烧温度的上升,煤矸石中的碳含量出现明显的下降,当温度达到 1 000 ℃ 时,煤矸石中的碳含量下降到 0.07%,当温度超过 850 ℃ 时,Fe₂O₃ 的含量出现明显的上升,说明煤矸石中的黄铁矿在 850 ℃ 时开始氧化,生成了赤铁矿。在 900 ~ 1 000 ℃ 时,Fe₂O₃ 含量出现波动,其可能原因为,在 900 ~ 925 ℃ 区间 C 含量显著降低,整体呈现还原气氛,Fe₂O₃ 被还原为 Fe₃O₄;当温度继续升高,C 含量较少时,整体又呈现出氧化气氛,Fe₃O₄ 被氧化为 Fe₂O₃。在 1 000 ℃ 时 Fe₂O₃ 含量出现降低,原因可能与试验的试样中黄铁矿含量有关。

进一步将煅烧时间延长到 4 h 后,煤矸石煅烧后的碳、铁、硫元素的变化规律如图 8。

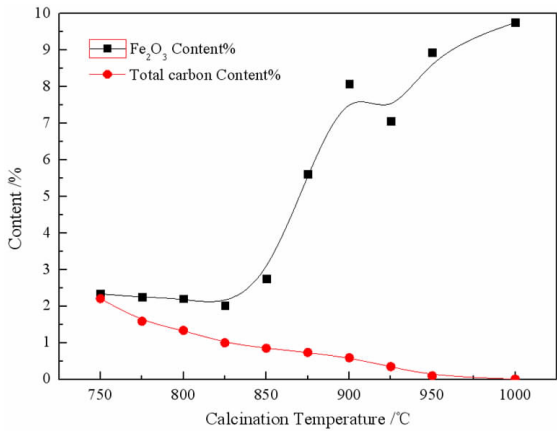


图 8 煤矸石在不同温度下煅烧 4 h 后 C、Fe₂O₃ 含量变化
Fig. 8 Change of carbon and Fe₂O₃ content of coal gangue after small calcination at different temperatures for 4 hours

当煅烧时间延长一步,煤矸石中的碳含量降低更明显,在 1 000 ℃ 下,煅烧煤矸石中的 C 含量从 0.07% 降低到 0.01%。Fe₂O₃ 含量的变化较小,在 1 000 ℃ 下达到最大,其原因应该为碳被完全氧化后,氧化气氛最强。

对比不同温度及不同煅烧时间下煤矸石中 C、Fe₂O₃ 的变化,焙烧时间对煤矸石中碳、铁杂质影响较小,焙烧时间 2 h 内,煤矸石中氧化反应已经足够,温度为 900 ℃ 时,可以除去大部分碳杂质,同时煤矸石中黄铁矿基本被氧化成 Fe₂O₃。

对在 900 ℃ 和 1 000 ℃ 焙烧 2 h 的煤矸石样品进行化学分析,其煅烧前后的化学组成变化结果如表 5。

煤矸石煅烧后,SiO₂、Al₂O₃ 等出现小幅度上升,其原因是烧失部分有机物。硫含量变化最大,在 1 000

℃其含量明显降低。此外,铁的含量出现较大的变化。

表 5 煤矸石焙烧前后的主要化学组成 /%

Table 5 Main chemical composition of coal gangue before and after roasting

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
Original sample	51.69	21.59	5.94	1.26	6.12	0.76
900 ℃ - 2 h	50.23	22.82	9.28	2.61	5.12	1.90
1 000 ℃ - 2 h	52.17	26.85	7.46	1.24	1.74	0.78

3.2 煤矸石煅烧后的物相变化

将在 900 ℃和 1 000 ℃煅烧 2 h 的煤矸石分别做 X 射线衍射分析,研究其煅烧前后的物相变化。煤矸石焙烧后的 XRD 图谱如图 9。

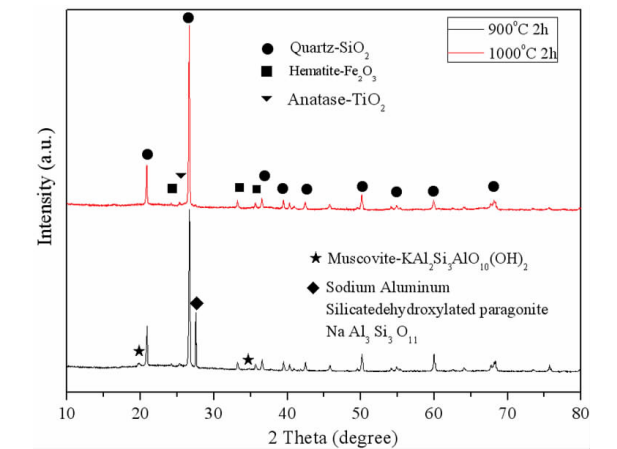


图 9 煤矸石煅烧后的 XRD 图谱
Fig. 9 XRD pattern of calcined coal gangue

对比图 4 与图 9 的 XRD 结果,在 900 ℃煅烧 2 h 时,高岭石特征峰完全消失,表明在该温度下,高岭石转变成无定型的偏高岭石相;黄铁矿被氧化生成了赤铁矿。此外,在 1 000 ℃煅烧后,出现锐钛矿的特征峰,说明煤矸石中稳定的金红石转变为活跃的锐钛矿。在 1 000 ℃以下,未见莫来石相生成。

综上所述表明:该煤矸石在 900 ~ 1 000 ℃能脱除绝大部分的碳质,高岭石完全转化成无定型的偏高岭土,同时,黄铁矿也被氧化成赤铁矿。

4 结论

(1)煤矸石的主要矿物组成为石英、高岭土,含有少量黄铁矿、伊利石、金红石,主要有用矿物为高岭石,

含量为 56.3%,其次为石英 21.1%,伊利石 15%。铁杂质主要以黄铁矿存在,其含量为 6.5%。主要化学成分以 SiO₂、Al₂O₃、FeS₂ 以及有机碳质为主,SiO₂ 含量在 50% 左右,Al₂O₃ 含量在 20% 左右。

(2)煤矸石中的高岭石为层状结构,整体呈块状;石英为集合体不规则分布,被黏土矿物包裹,煤矸石中的黄铁矿结晶状况良好,有较好的黄铁矿晶体,呈他形晶,部分黄铁矿氧化,形成孔洞。煤矸石颗粒表面较为粗糙,呈不规则的块状分布,颗粒呈现较为明显的层状结构。

(3)煤矸石煅烧后硫、碳、铁等杂质元素出现大幅度变化,煅烧后,黄铁矿在 850 ℃以上开始被氧化生成了赤铁矿,当温度在 1 000 ℃煅烧 2 h,煤矸石中的碳降低到 0.1% 以下,硫含量降低到 1.74%。煤矸石中的高岭石转变成无定型的偏高岭石相。

参考文献:

[1] 李彤. 中国煤炭产业对外依存度问题研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.

[2] 孙春宝,董红娟,张金山,等. 煤矸石资源化利用途径及进展[J]. 矿产综合利用,2016(6):1-7.

[3] 卞孝东. 浅谈煤矸石的组成特征及综合利用途径[J]. 矿产综合利用,2007(5):51-54.

[4] 张拥军,常鑫,杨金花. 浅析煤矿煤矸石山生态环境恢复治理技术[J]. 山西化工,2019,179(1):185-188.

[5] JIAYAN LI, JINMAN WANG. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: Areview[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,239:1-17.

[6] 孙春宝,董红娟,张金山,等. 煤矸石及其国内外综合利用[J]. 煤炭技术,2016,35(3):286-288.

[7] 梁效. 煤矸石中高岭土的分选及煅烧增白试验研究[D]. 西安:西安科技大学,2018.

[8] 王占娥,李辉,徐德龙,等. 煤系高岭土悬浮煅烧工艺试验研究[J]. 非金属矿,2007,30(2):45-47.

[9] 田钊. 煤系高岭土煅烧与脱碳试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.

[10] 刘成俊. 内蒙古乌海煤系高岭土低温快速煅烧试验[J]. 中国非金属矿工业导刊,2017,125(1):12-13.

[11] 黄腾. 选矿提纯与低温焙烧降低煤系高岭土 COD 及机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2016.

[12] 王相,李金洪. 准格尔露天煤矸石制备精细煅烧高岭土的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2011,30(6):1249-1253.

[13] 宋旭艳,宫晨琛,李东旭. 煤矸石活化过程中结构特性和力学性能的研究[J]. 硅酸盐学报,2004,32(3):358-363.

[14] 霍晨磊,何亚波,孟子浩. 煤矸石资源化利用技术综述[J]. 山西焦煤科技,2011(1):47-49.

[15] 宋艳芳,武学恒. 高温煅烧提高煤矸石活性试验中煅烧温度的选择[J]. 地质评论,2013,59(S):818.

Mineralogical Characteristics and Calcination Composition Changes of Coal Gangue in Shuozhou Area of China

LIU Yulin^{1,2}, LIU Changmiao^{1,2}, LIU Yan^{1,2}, ZHAO Yi^{1,2}, TAN Qi^{1,2}

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, China Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, China;
2. Mineral Resource Comprehensive Engineering Research Center, Zhengzhou 450006, China

Abstract: At present, the utilization of coal gangue is one of the important contents of solid waste disposal and utilization. The comprehensive utilization of coal gangue is closely related to its ore properties, but there are few related researches on the distribution of elements, the existing forms of phases, and the micro – morphology of coal gangue components. In this paper, the process mineralogy of coal gangue in Shuozhou region of China was studied. XRD, XRF, EDS, SEM and other methods were used to find out that the coal gangue is composed of quartz, kaolin, pyrite, illite and rutile, and most of them exist in the form of aggregates, and the micro – morphology of its particles was lamellar or scaly. The content of useful mineral kaolinite in coal gangue was 56.3% . , followed by quartz 21.1% , illite 15% . Iron impurities mainly existed in pyrite with a content of 6.5% . Calcination test of coal gangue shows that: Pyrite began to be oxidized at 850 ℃ to form hematite. When calcined at 1 000 ℃ for 2 hours, the carbon content in coal gangue was reduced to below 0.1% , and the sulfur content was also reduced to 1.74% . In the temperature range of 900 ~ 1 000 ℃ , kaolinite was transformed into a-morphous metakaolin.

Key words: coal gangue; composition; pyrite; calcination; impurity

引用格式:刘玉林,刘长森,刘岩,赵毅,谭琦. 我国朔州地区煤矸石的矿物学特征及煅烧组分变化研究[J]. 矿产保护与利用,2020,40(3):100–105.
Liu YL, Liu CM, Liu Y, Zhao Y and Tan Q. Mineralogical characteristics and calcination composition changes of coal gangue in Shuozhou area of China[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(3): 100–105.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E – mail: kcbh@chinajournal.net.cn

自然资源部发布绿色矿山评价指标

为做好绿色矿山遴选工作,近日,自然资源部印发《绿色矿山评价指标》和《绿色矿山遴选第三方评估工作要求》,对评价指标标准进行了统一,并对第三方评估工作进行了规范。

《绿色矿山评价指标》明确了绿色矿山遴选的先决条件:一是《营业执照》《采矿许可证》《安全许可证》证照合法有效;二是近3年内未受行政处罚且未发生过重大安全、环保事故;三是未被列入矿业权人勘查开采信息公示系统异常名录;四是矿山正常运营,且剩余储量可采年限不少于3年;五是矿区范围未涉及各类自然保护地。

评价指标包括矿区环境、资源开发方式、资源综合利用、节能减排、科技创新与智能矿山、企业管理与企业形象6项一级指标以及24项二级指标、100项三级指标,采取计分办法,总分1000分。原则上,得分低于800分的矿山企业不能参与绿色矿山遴选,各省(区、市)自然资源部门可根据实际情况,在综合要求不降低前提下,适当对“达标线”进行调整。其中,一级指标得分原则上不能低于该级指标总分值的75%。

针对绿色矿山遴选第三方评估,自然资源部要求第三方评估机构组成不少于5人的评估组,且须与矿山企业保持独立,不得参与矿山自评报告编写,评估开展前后1年内不得与矿山企业有关联业务往来。第三方评估报告要详细叙述评估程序、查阅资料、查看现场等情况,明确判定矿山企业是否符合标准要求的依据。

(来源:中国自然资源报 作者:邵思跃)