

地球科学与测绘



移动扫码阅读

宋晓夏,马宏涛,李凯杰,等.大同煤田石炭-二叠系接触变质煤的煤岩学特征研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):182-191. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.023
SONG Xiaoxia, MA Hongtao, LI Kaijie, et al. Study on coal petrology characteristics of contact metamorphosed coal from Carboniferous - Permian in Datong Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 182-191. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.023

大同煤田石炭-二叠系接触变质煤的煤岩学特征研究

宋晓夏^{1,2}, 马宏涛¹, 李凯杰¹, 刘东娜^{1,2}, 赵金贵^{1,2}, 薛德生³

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 煤与煤系气地质山西省重点实验室 山西 太原 030024; 3. 山西省煤炭地质 115 勘查院 山西 大同 037003)

摘要:大范围的岩浆岩侵入煤体严重影响了煤矿开采和煤质,为研究接触变质煤的煤岩学特征,对大同煤田 3 个矿揭露的 3 条辉绿岩岩墙及接触变质煤剖面进行了系统采样,对样品进行了镜质体反射率测定、工业分析和元素分析以及宏观煤岩特征和显微组分特征的系统观测,并对正常煤和接触变质煤的煤岩学特征参数的差异进行了识别和统计,在对显微组分的类型进行总结归纳的基础上,对接触变质煤中显微组分的演化和识别进行了探讨。研究表明:大同煤田的接触变质煤的镜质体反射率通常大于 1.0%,干燥基挥发分小于 20%;严重热变煤与侵入体直接相邻或镜质体反射率大于 2.0%,其宏观煤岩特征与正常煤差异显著,可分为块状焦、砾状焦、粒状焦 3 种类型;轻微热变煤的镜质体反射率介于 1.0%~2.0%;其宏观煤岩特征与正常煤无明显差异;大同煤田接触变质煤的显微组分可分为 3 类,即原有组分、天然焦基质和新生成的组分;原有组分为原始煤中未热变或轻微热变的镜质组、惰质组和类质组;天然焦基质包括由镜质组和类质组转变而来的中间相小球体、镶嵌结构体、流动结构体等;新生成的组分主要为热解碳。严重热变煤的显微组分以天然焦基质为主,轻微热变煤中残余大量原有组分。

关键词:辉绿岩岩墙;岩浆岩侵入体;接触变质作用;煤岩学

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0182-10

Study on coal petrology characteristics of contact metamorphosed coal from Carboniferous - Permian in Datong Coalfield

SONG Xiaoxia^{1,2}, MA Hongtao¹, LI Kaijie¹, LIU Dongna^{1,2}, ZHAO Jingui^{1,2}, XUE Desheng³

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Coal and Coal Measure Gas Geology, Taiyuan 030024, China; 3. No. 115 Shanxi Coal Geological Exploration Institute, Datong 037003, China)

Abstract: Large-scale igneous intrusions, seriously affected the coal mining process and coal quality. In order to study the Petrographic characteristics of the contact metamorphosed coal, three diabase dikes and their alteration halos were sampled at three coal mines in Datong Coalfield. Vitrinite reflectance was measured and proximate and ultimate analyses were identified. Macroscopic and microscopic analyses were used to compare the differences of petrographic characteristics between the unaffected coal and the contact metamorphosed coal, the macerals in contact metamorphosed coals were identified and quantitatively analyzed. Macerals were classified and their evolution process was discussed. The results show that the contact metamorphosed coal in Datong Coalfield has the vitrinite reflectance higher than 1.0% and its volatile matter yield is normally lower than 20%. The severely altered coal is immediately adjacent to the igneous intrusion or has the vitrinite reflectance higher than 2.0%, its macroscopic characteristics are significantly different from the unaffected coal, which can be divided

收稿日期:2020-06-12;责任编辑:曾康生
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41802191)
作者简介:宋晓夏(1967—),男,山西原平人,副教授,博士。E-mail: songxiaoxia@tyut.edu.cn
通讯作者:马宏涛(1995—),男,山西临汾人,硕士研究生。E-mail: mahongtao0594@link.tyut.edu.cn

into three types: massive coke, brecciated coke and granular coke. The slightly altered coal has the vitrinite reflectance ranging from 1.0% to 2.0%. No obvious macroscopic difference between the slightly altered coal and the unaffected coal was observed. macerals in the contact metamorphosed coal in Datong Coalfield can be divided into three types, namely remnants of original macerals, matrix of natural coke and newly formed components. The original macerals are unchanged/slightly altered vitrinite, inertinite, and liptinite groups. The matrix of natural coke is mainly transformed by vitrinite and liptinite groups, which include mesophase spheres, mosaic structures, and flow structures. The newly formed component is main pyrolytic carbon. Macerals of the severely altered coal is dominated by matrix of natural coke, while the slightly altered coal mainly comprises remnants of original macerals.

Key words:diabase dike;igneous intrusion; contact metamorphism; coal petrology

0 引 言

煤的接触变质作用是指岩浆侵入含煤岩系或直接与煤层接触时,岩浆的高温和压力导致煤发生的变质作用。国内外学者对接触变质煤的煤岩学特征进行过大量研究^[1-5]。高温岩浆岩体从中心部位向周边温度递减形成接触变质带,煤接触变质带一般可分为焦-岩混合带、天然焦带、焦-煤混合带、热变煤带^[6]。Hoehne 最早将因岩浆岩侵入而发生严重变质的煤定名为“天然焦”^[7],但是目前对天然焦仍没有明确的定义。天然焦的生成归因于温度的瞬时升高^[8],一般出现在侵入岩体周边有限范围内,与侵入体的直接接触。天然焦由于经历强烈的接触变质作用而具有类似工业焦炭的特征,如宏观上表现为光泽暗淡、致密坚硬、多气孔和空腔等。随着煤与岩浆岩侵入体距离的减小,天然焦表面大量的裂隙和裂纹呈现出“龟背结构”,并可见氧化物充填于裂隙中^[7,9-13]。由于岩浆的烘烤作用及热液作用,烟煤经历塑性-固结-塑性的连续过程,在此过程中显微组分发生软化、断裂、变形,并最终形成各类热变组分^[14]。天然焦表现出显著的各向异性,在显微镜下可观察到由于挥发分释放而形成的囊泡,类质组分热变或消失,惰性组分不受影响或只发生轻微变化^[7,15-18]。接触变质煤中的热变组分主要由镜质组转化而来,包括各向同性体、微各向异性体、各向异性体、各向异性小球体、镶嵌结构体和热解碳等^[6]。然而,各种热变组分的特征及不同热变组分之间的差异,特别是热变组分的识别还缺乏详细的探讨。

近年来,大同煤田在开采石炭-二叠系煤层过程中揭露了大量的火成岩侵入体,不仅对煤矿生产造成严重影响,同时降低了煤炭的工业利用价值。

笔者选择了大同煤田 3 座煤矿的 3 条辉绿岩岩墙及其接触变质带的剖面为研究对象,对接触变质煤的宏观、显微煤岩特征进行了详细的观测,对比了正常煤和接触变质煤的煤岩学特征差异,对接触变质煤中出现的显微组分进行了识别和描述,并对大同煤田接触变质煤中出现的显微组分进行了总结归纳。

1 大同煤田地质概况

大同煤田位于山西省北部,煤田的东部以大同山阴山前断裂为界,南部为洪涛山背斜与宁武煤田相接,西界为煤层露头线。寒武、奥陶系灰岩为煤田之基盘,其上发育有石炭-二叠系和侏罗系含煤地层及白垩系和新近系、第四系地层。煤田总体构造为一大型开阔的不对称向斜,东南翼陡峻,西北翼开阔。研究表明,大同煤田在印支期和燕山期均有构造岩浆活动,印支期为基性-超基性的煌斑岩和碳酸盐岩侵入^[19-20],燕山期为辉绿岩、玄武质安山岩侵入^[21]。大同煤田石炭-二叠系含煤地层包括石炭系上统太原组,二叠系下统山西组(图 1)。

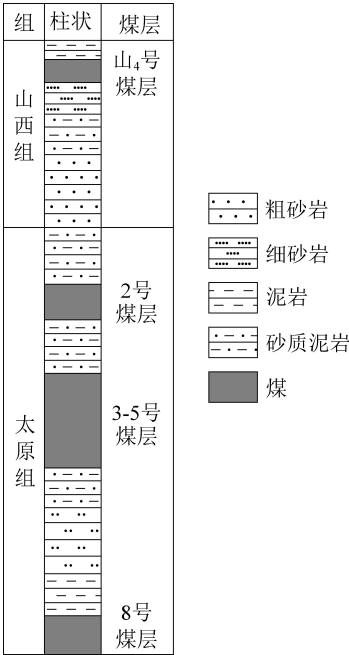


图 1 大同煤田含煤地层柱状
Fig.1 Coal-bearing stratum columnar in Datong Coalfield

太原组为一套海陆交互相的含煤地层,主要包括灰、灰白色砂岩,灰、深灰色、灰黑色粉砂岩、砂质泥岩、泥岩、炭质泥岩和煤层,局部发育薄层泥灰岩。主要可采煤层为 2、3、5、8 号煤层。3 号、5 号煤层在西部及东部地区合并后称 3-5 号煤,形成复煤层。山西

组为一套陆相含煤地层,包括灰色砂岩,灰、深灰色粉砂岩、砂质泥岩、泥岩、高岭土泥岩炭质泥岩和煤组成。山4煤层为局部可采煤层,位于山西组的底部。未受火成岩侵入影响的煤主要属长焰煤和气煤,正常煤受火成岩侵入影响后变质成为天然焦或无烟煤。

2 样品与测试方法

2.1 样品采集

分别在大同煤田塔山矿、挖金湾矿、小峪矿的4条巷道揭露的岩墙周围煤层进行系统采样(图2),

其中塔山矿 8222 顶板高抽巷和 5222 回风巷揭露的是同一条岩墙(图2c)。4个采样剖面的基本情况见表1。在塔山矿 8222 顶板高抽巷共采集样品12块,包括6块岩石样品(TS1-TS6)和6块煤样品(TS7-TS12);在塔山矿 5222 回风巷采集样品19块,包括16块岩石样品(T1-T16)和3块岩石样品(编号T17-T19);在挖金湾矿 8100 切眼采集样品7块,包括岩石样品2块(WJ1、WJ2)和煤样品5块(WJ3-WJ7);在小峪矿采集样品5块,包括岩石样品1块(XY1)和煤样品4块(XY2-XY5)。

表1 样品剖面简况

Table 1 Brief introduction of sampling profile

煤矿	岩浆岩			正常煤			采样剖面范围	样品数量
	产状	岩性	揭露巷道	层位	煤层	$R_{o,max}/\%$		
塔山矿(图2a,图3a)	岩墙	辉绿岩	8222 顶板高抽巷	太原组	2	0.80~0.81	正常煤-接触变质煤-岩浆岩	12
塔山矿(图2b)	岩墙	辉绿岩	5222 回风巷	太原组	3-5	0.67~0.94	正常煤-接触变质煤-岩浆岩	19
挖金湾矿(图2d,图3b,图3c)	岩墙	辉绿岩	8100 开切眼	太原组	2	0.68~0.78	正常煤-接触变质煤-岩浆岩	7
小峪矿(图2d,图3d,图3e)	岩墙	辉绿岩	2105-1 运输巷	太原组	2	0.64~0.72	正常煤-接触变质煤-岩浆岩	5

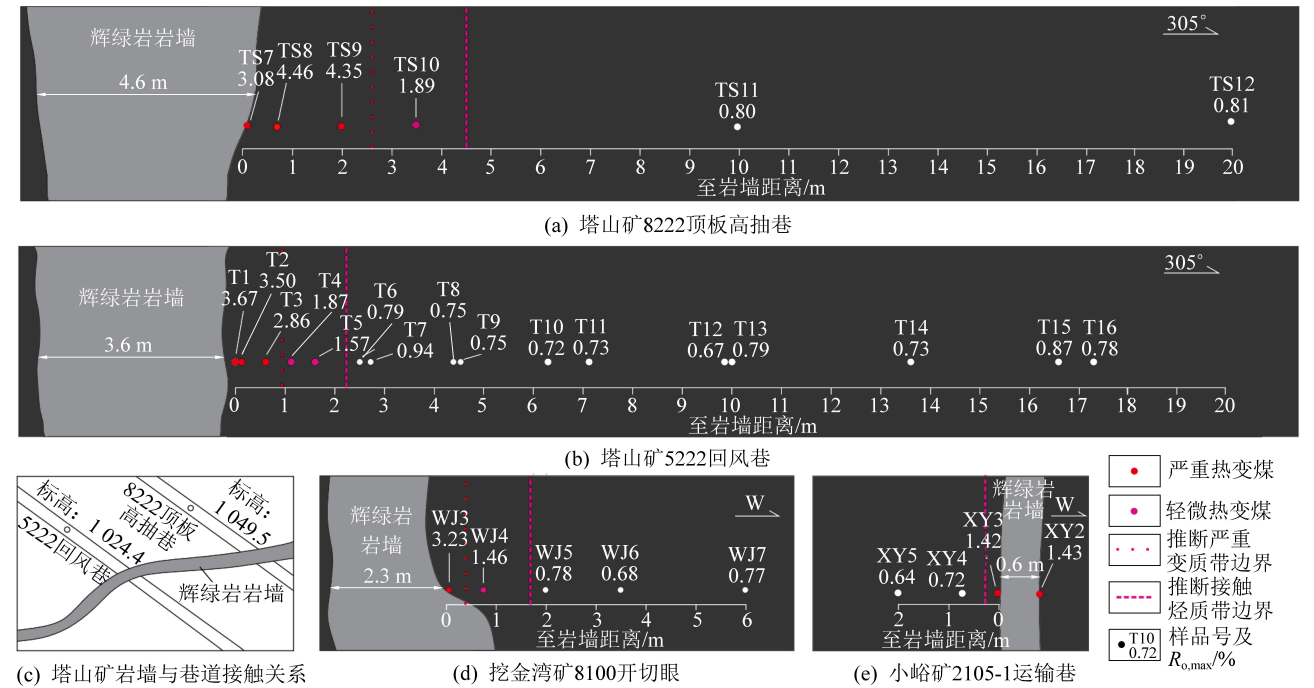


图2 采样点位置图与煤样镜质体最大反射率($R_{o,max}/\%$)

Figure.2 Diagram of sampling location and the mean maximum vitrinite reflectance of coal samples

2.2 试验方法

根据 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》和 GB/T 476—2001《煤的元素分析方法》对煤样进行工业分析和元素分析。选取粒径 2~3 cm 的煤样,使用 Leica S9i 体视镜对样品进行观察和描述。依据 GB/T 16773—2008《煤岩分析样品制备方法标准》制备粉煤光片,使用 Leica DM4500P 显

微镜在 100 倍和 500 倍油浸反射光下识别和鉴定显微组分并进行显微图片采集。按照 GB/T 8899—2013《煤的显微组分分组和矿物测定方法》对正常煤样品进行显微组分定量。利用显微镜配合 3Y 分光光度计,按 GB/T 6948—2008《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》,测定正常煤的镜质体最大和随机反射率。接触变质煤的显微组分发生热

变,反射率的测定方法较为复杂。对热变程度较低的轻微变质煤,测定各向同性的均质镜质体的反射率。对热变程度较高的严重变质煤,几乎不存在大面积、平整的镜质体,反射率的测定对象为具有片状消光的颗粒^[22]。

3 结果与讨论

3.1 侵入体的岩性特征

塔山矿 8222 工作面的顶板高抽巷岩墙(图 3a)和 5222 回风巷岩墙样品在显微镜下可观察到典型

的辉绿结构,即半自形辉石充填在斜长石搭成的格架中,因而该岩墙为辉绿岩。挖金湾矿 8100 工作面开切眼岩墙因遭受强烈的碳酸盐化而呈灰白色(图 3b、图 3c),岩石薄片可观察到多数在斜长石格架中的辉石蚀变成绿泥石和碳酸盐矿物,因而挖金湾矿岩墙为碳酸盐化辉绿岩。小峪矿 2105-1 运输巷岩墙受到严重风化(图 3d),显微镜下观察到的矿物均发生黏土化,难以鉴定岩石类型。但根据地面踏勘的结果,侵入于小峪矿 2105-1 运输巷的岩墙可能为辉绿岩。

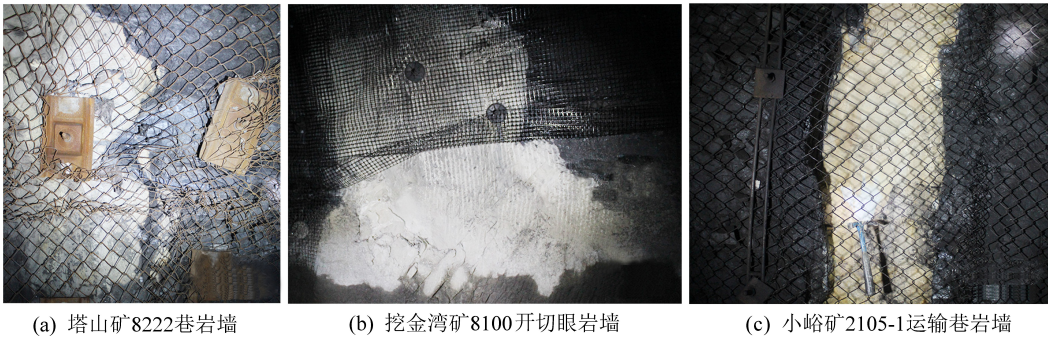


图 3 岩墙及煤岩接触带特征

Figure.3 Characteristics of the dikes and coal/rock contact zone

3.2 接触变质带的划分

煤的镜质体反射率、工业分析、元素分析数据见表 2。随着煤与岩墙距离 L 的增大,镜质体反射率逐渐减小,灰分降低,挥发分产率升高。煤中 C 含量减少,H、N、O 含量升高。观察发现,接触变质煤的性质与正常煤具有明显的差异,例如靠近侵入体的样品(表中灰色区域,TS7~TS10,T1~T5,WJ3~WJ4,XY2~XY3)的镜质体最大反射率均在 1%以上,除 WJ4 外,样品的挥发分均小于 20%。距侵入体较远的样品,镜质体最大反射率均小于 1%,挥发分显著升高(>20%)。由于煤的镜质体反射率是指示煤变质程度的良好标志,当煤的镜质体反射率恢复到正常煤的水平,即标志着接触变质带的终点^[18]。以镜质体反射率作为主要判断依据,结合工业分析、元素分析结果以及大同煤田石炭-二叠系正常煤的性质,可推断出各剖面接触变质带的范围,推测的各岩墙接触变质带范围如图 2 所示。由于接触变质带的范围具有多种影响因素,例如侵入时煤的煤级、煤岩学组成、热传导性、裂隙发育程度、含水量、温度和压力以及侵入体的化学成分、温度、结晶程度等^[23],因而不同岩墙造成的接触变质带的范围有较大差异。如图 2 所示,样品 TS7~TS10,T1~T5,WJ3~WJ4,XY2~XY3 位于接触变质带内。分析上述煤样的性质发现,大同煤田石炭-二叠系接触变质煤的镜

质体最大反射率大于 1%或干燥基挥发分小于 20%。在接触变质带内,煤的变质程度随着与侵入体距离的增加而逐渐降低。例如,TS7~TS9,T1~T3,WJ3 的镜质体最大反射率均在 3%左右,挥发分相比距岩墙较远的接触变质煤进一步降低。为此,接触变质带可进一步划分为严重变质带和轻微变质带。严重变质带经受强烈的接触变质作用,包括直接与侵入体接触的样品,例如“TS7、T1、WJ3、XY2、XY3,以及镜质体最大反射率大于 2%的样品,如 TS8~TS9,T2~T3。轻微变质带经受的接触变质作用较弱,煤的镜质体最大反射率为 1%~2%,如: T10、T4~T5、WJ4。

3.3 接触变质煤的宏观煤岩特征

对样品宏观煤岩特征的观察发现,严重热变煤的宏观煤岩特征与正常煤明显不同,轻微热变煤的宏观煤岩特征与正常煤差别不显著。依据所采样品的宏观煤岩特征,大同煤田的严重热变煤可分为以下 3 种类型^[6]:

- 1) 块状焦。位于煤岩接触带附近,灰黑色、光泽暗淡、层理不可见、块状构造、致密坚硬、密度较大、断口呈参差状或阶梯状。裂隙发育,裂隙内常充填碳酸盐矿物(图 4a)。
- 2) 砾状焦。灰黑色、光泽较暗、角砾状结构,砾径一般为 0.2~1.0 cm。块状构造、孔隙较发育、密

度较大、断口呈棱角状。部分裂隙被碳酸盐矿物充填(图 4b)。

表 2 煤样镜质体反射率、工业分析、元素分析结果

Table 2 Vitrinite reflectance, proximate and ultimate analysis of coal samples													
地点 编号	L/m	R _{o,ran} /%	R _{o,max} /%	M _{ad} /%	A _d /%	V _d /%	FC _d /%	C _{daf} /%	H _{daf} /%	N _{daf} /%	O _{daf} /%	S _{t,d} /%	
塔山矿 8222 顶板高抽巷	TS7	0.01	2.08	3.08	8.92	60.52	9.40	30.08	79.95	2.44	0.50	17.09	0.02
	TS8	0.80	3.74	4.46	7.94	25.48	6.33	69.80	93.76	1.16	0.55	4.48	0.05
	TS9	2.00	3.72	4.35	4.8	24.43	5.60	71.33	93.84	1.60	0.97	3.27	0.32
	TS10	3.50	1.78	1.89	1.38	54.07	10.67	35.27	78.92	4.35	1.37	15.17	0.19
	TS11	10.00	0.75	0.80	1.98	15.20	33.85	56.09	83.34	4.88	1.40	9.95	0.43
	TS12	20.00	0.76	0.81	1.79	27.05	31.37	50.07	81.97	4.48	1.34	11.82	0.39
塔山矿 5222 回风巷	T1	0.01	3.45	3.67	4.05	26.39	8.76	64.85	94.66	1.03	0.50	3.79	0.02
	T2	0.10	3.29	3.50	4.78	24.63	5.55	69.82	93.76	1.16	0.55	4.48	0.05
	T3	0.60	2.69	2.86	2.01	23.73	6.34	69.93	93.84	1.60	0.97	3.27	0.32
	T4	1.10	1.75	1.87	1.08	11.79	17.36	70.85	84.88	5.39	1.42	7.84	0.47
	T5	1.60	1.47	1.57	1.15	11.65	19.06	69.29	82.95	5.36	1.40	9.68	0.61
	T6	2.50	0.74	0.79	1.76	8.06	26.53	65.41	85.87	4.94	1.55	7.13	0.51
	T7	2.70	0.88	0.94	1.38	9.66	24.58	65.76	84.59	5.41	1.48	7.97	0.55
	T8	4.40	0.70	0.75	1.80	6.63	30.99	62.38	83.87	5.50	1.51	8.73	0.39
	T9	4.50	0.71	0.75	1.91	7.56	31.94	60.50	85.24	5.05	1.44	7.80	0.47
	T10	6.30	0.68	0.72	1.86	8.58	45.64	45.78	84.33	5.54	1.63	8.05	0.45
	T11	7.10	0.68	0.73	1.86	8.31	27.21	64.48	83.66	5.50	1.51	8.83	0.50
	T12	9.90	0.63	0.67	1.64	9.33	34.46	56.21	84.29	5.43	1.67	8.20	0.41
	T13	10.00	0.75	0.79	1.65	9.62	29.84	60.54	84.23	5.32	1.29	8.63	0.53
	T14	13.60	0.68	0.73	1.75	10.33	30.17	59.50	83.24	5.42	1.32	8.92	1.10
	T15	16.60	0.82	0.87	1.80	14.18	24.95	60.87	82.71	5.12	1.40	10.16	0.61
	T16	17.30	0.73	0.78	1.24	11.83	31.55	56.62	83.74	5.37	1.34	8.79	0.76
挖金湾矿 8100 开切眼	WJ3	0.01	2.61	3.23	6.08	74.72	13.56	11.71	55.94	5.71	0.84	37.47	0.04
	WJ4	1.00	1.37	1.46	1.54	32.61	30.87	46.59	81.81	4.78	1.39	11.72	0.30
	WJ5	2.00	0.73	0.78	2.32	22.69	42.43	44.51	79.79	5.23	1.39	13.21	0.38
	WJ6	3.50	0.64	0.68	2.75	28.58	43.41	40.42	79.83	5.57	1.32	12.79	0.49
	WJ7	6.00	0.72	0.77	2.34	23.13	40.58	45.68	80.86	5.49	1.37	11.85	0.43
小峪矿	XY2	0.01	1.25	1.42	3.22	26.14	13.15	64.15	88.81	2.77	1.26	6.71	0.45
	XY3	0.01	1.08	1.43	2.31	45.21	9.78	45.01	84.64	3.07	1.07	10.79	0.43
	XY4	0.80	0.68	0.72	3.02	15.98	33.76	55.65	82.57	4.69	1.28	10.33	1.13
	XY5	2.00	0.61	0.64	3.28	10.34	34.82	58.44	83.58	4.60	1.34	9.96	0.52

3) 粒状焦。褐色、光泽较暗、粒状结构、粒径小于 0.2 cm。块状构造、孔隙十分发育,手试强度低,断口粗糙(图 4c)。



(a) TS7块状焦 (b) TS8砾状焦 (c) XY3粒状焦 (d) TS12正常煤

图 4 接触变质煤样品的宏观煤岩特征

Fig.4 Macroscopic characteristics of contact metamorphosed coal samples

3.4 接触变质煤的显微组分特征

3.4.1 正常煤的显微组分特征

正常煤即未受到岩浆岩侵入影响的煤层。在显微镜下观察,正常煤的显微组分主要为平整、纯净的

均质镜质体(图 5a)和胶结其他显微组分的基质镜质体(图 5b)。惰质组主要为丝质体和碎屑惰质体(图 5c)。类质组以孢子体为主,在显微镜下呈灰褐色(图 5d)。

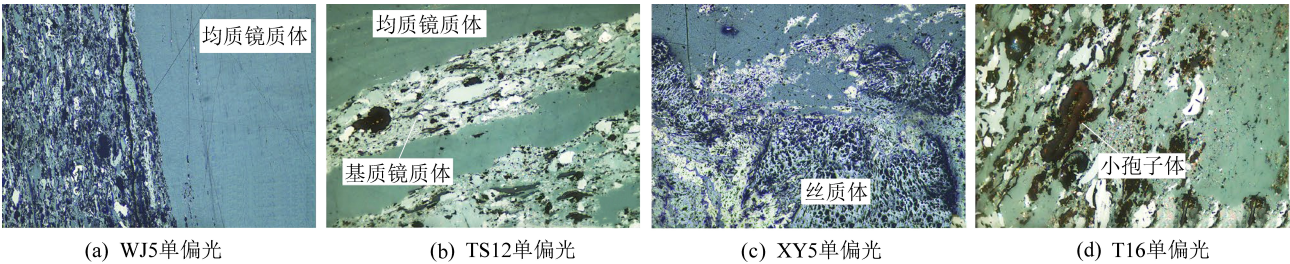


图 5 正常煤的显微煤岩特征

Fig.5 Microscopic characteristics of normal coal

3.4.2 严重热变煤的显微组分特征

与正常煤相比,严重热变煤的显微组分受岩浆岩侵入的影响大,按照 Stach 等对热变煤显微组分研究,可有原有组分、天然焦基质和新生成组分 3 类。

1)原有组分。原有组分即在正交镜下完全消光的部分,包括煤中原有的矿物和惰性组分^[11]。原有惰性组分包括碎屑惰质体、丝质体和粗粒体,不出现或只出现轻微热变(图 6)。

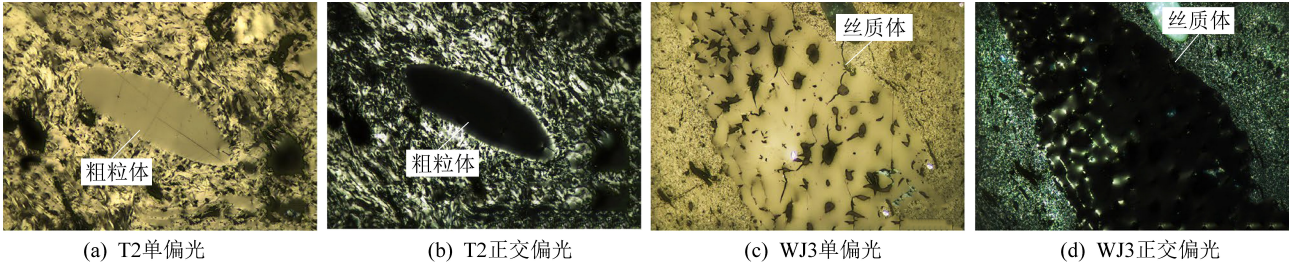


图 6 接触变质煤的原有组分

Fig.6 Remnants of original macerals

2)天然焦基质。天然焦基质是主要由镜质组和类质组在高温条件下生成的物质^[11],包含多种热变组分,如中间相小球体、镶嵌结构体、流动结构体等。中间相小球体的出现标志着煤层经受过约 400 ℃的高温^[6],在这一温度下,煤层开始发生物理性质的改变,显微组分开始由各向同性体向各向异性体转化。中间相物质具有微弱各向异性,即旋转物台出现轻微的亮度变化。

3)新生成的组分。新生成的组分包括石墨球粒、热解碳和以碳酸盐为主的新矿物^[11]。石墨球粒和热解碳被认为是煤在缺氧条件下的产物或挥发性含碳物质经化学裂解的结果。当煤在缺乏空气的条件下受热超过 300 ℃时,一部分转变呈挥发物质,这些物质处于其生成温度时为液态和气态的,在冷却时可以部分地凝固而形成焦油或沥青状固体,这些物质可以出现在一些气孔、裂缝和裂隙中,特别是在它们运移到较冷的地段中时^[25]。观察到的热解碳具有明显的各向异性,呈花瓣状(图 9a~图 9b)、球粒状(图 9c~图 9f)和同心圆状(图 9g~图 9h)充填于空腔、裂隙中。

镜下观察到的中间相小球体的直径仅有 0.5 μm,SINGH 等^[7]曾报道过类似的现象。这种微各向异性体的排列十分致密,有时与细粒镶嵌结构体难以区分(图 7a~图 7d)。

3.4.3 轻微热变煤的显微组分特征

不同粒径的镶嵌结构体是大同煤田严重热变煤中最常见的显微组分,其中以细粒镶嵌结构(粒径 0.5~1.5 μm)最为常见(图 8a、图 8b),中粒镶嵌结构(粒径 1.5~5.0 μm)次之(图 8c、图 8d),粗粒镶嵌结构(粒径>5 μm)较为少见(图 8c、图 8d)。煤在高温下发生软化变形又重新固结形成流动结构体。流动结构体在显微镜下呈条带状定向排列的各向异性体(图 8e、图 8h),有时嵌入各向同性体中(图 8g、图 8h)。

轻微热变煤的变质程度低于严重热变煤,煤中显微组分受岩浆岩侵入的影响程度较小。轻微热变煤的显微组分大部分为各向同性,各向异性体包括中间相小球体(图 10d、图 10f),热变孢子体(图 10a—图 10c)和热解碳(图 10g、图 10h),镶嵌结构体和流动结构体较少。各向同性体未发生热变或发生轻微热变,在正交镜下完全消光。中间相小球体

显示微弱的各向异性,少数小球体聚合、固结形成镶嵌结构体。热变孢子体仍保留其原始形态,但已变为各向异性体。热解碳具有明显的各向异性,充填于显微组分的空腔、裂隙中。

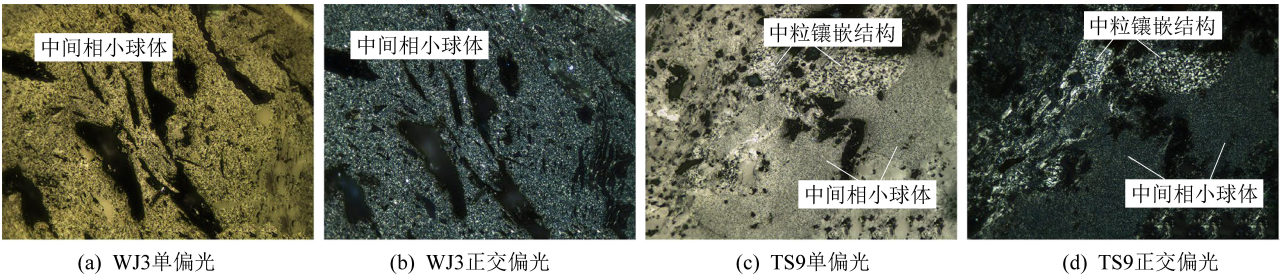


图 7 中间相小球体与镶嵌结构体
Fig.7 Mesophase spheres and mosaic structures

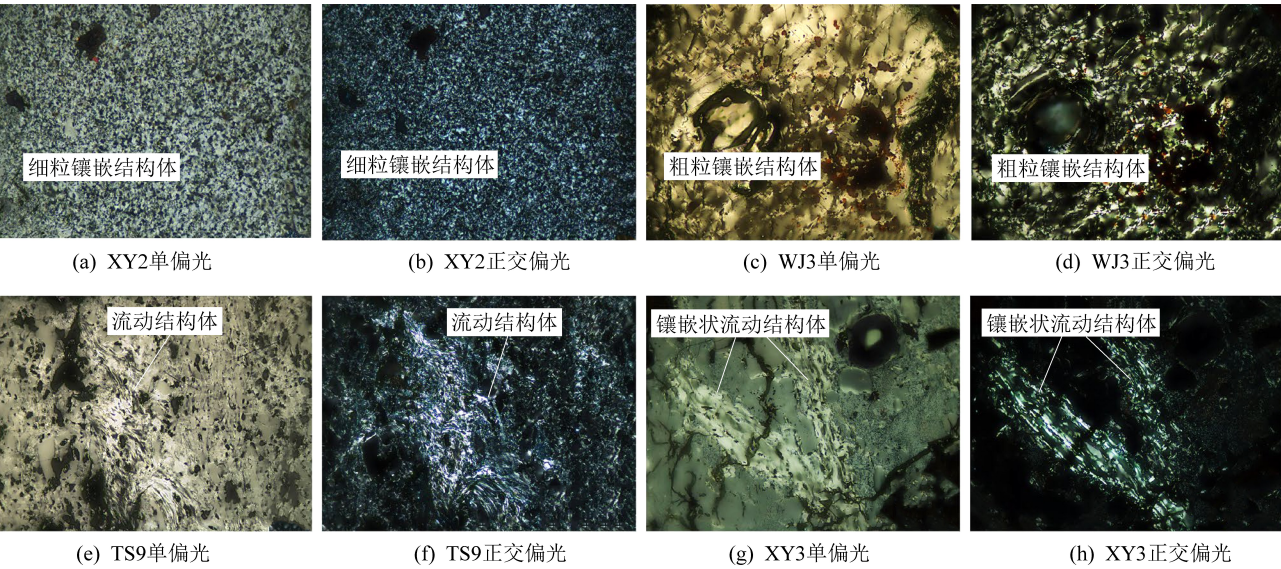


图 8 镶嵌结构体和流动结构体
Fig.8 Mosaic and flow structures

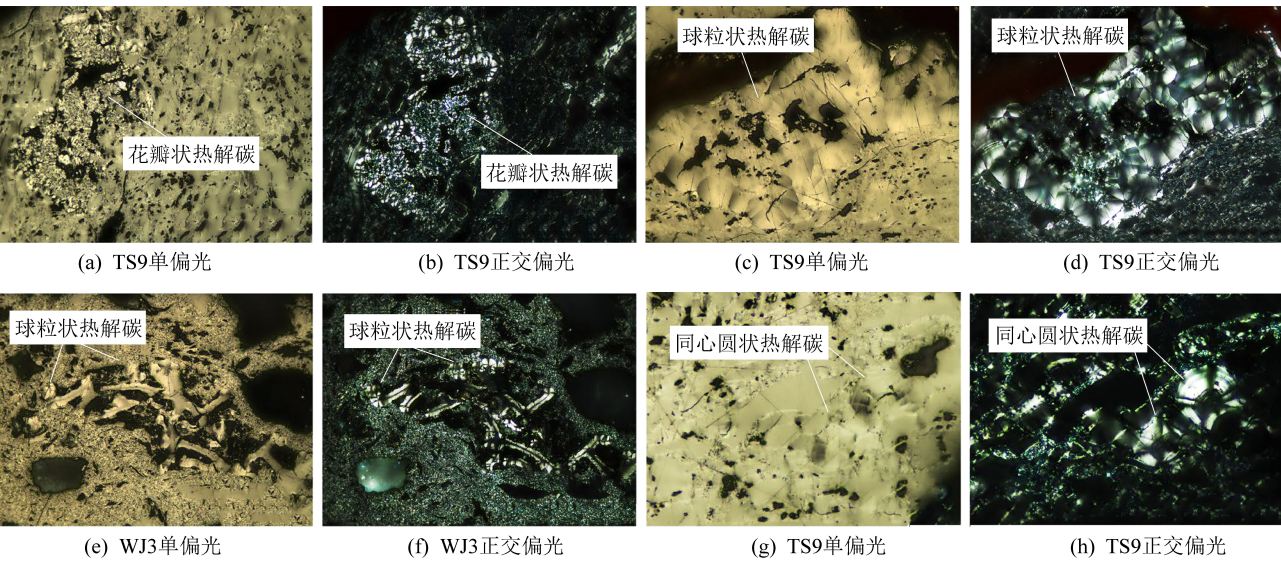


图 9 热解碳
Fig.9 Pyrolytic carbon

3.5 大同煤田接触变质煤的显微组分类型

1) 根据对大同煤田接触变质煤的显微组分的

研究,参照《斯塔赫煤岩学》^[11]中叙述的接触变质煤的 3 组显微组分(原有组分、天然焦基质、新生成

的组分),对大同煤田接触变质煤中出现的显微组

分进行了总结归纳(表 3)。

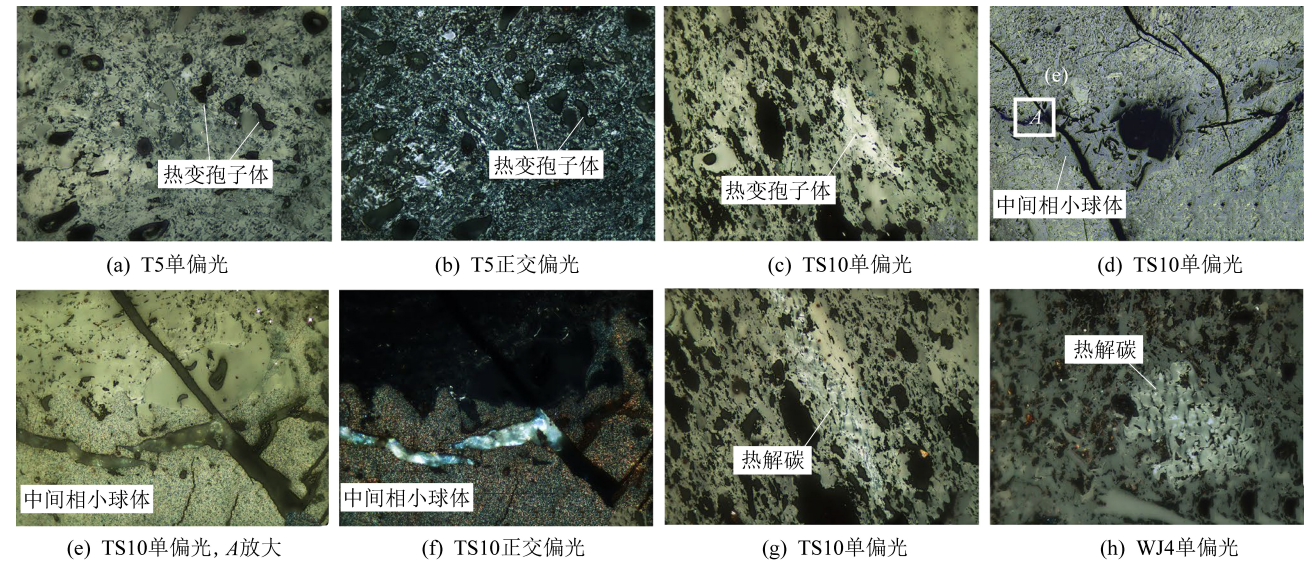


图 10 热变煤的显微组分

Fig.10 Microcomponents of slightly altered coals

表 3 大同煤田接触变质煤的显微组分类型

Table 3 Macerals of contact metamorphosed coals in Datong Coalfield

显微组分	显微特征
原有组分	显微组分保留原始煤中的结构和构造(各向同性,在正交镜下完全消光)
原始镜质组	未热变/轻微热变的原始镜质组,各向同性,分布在天然焦基质中
惰性组分	未热变/轻微热变的惰质组,以丝质体为主,在正交镜下完全消光或出现微弱各向异性
壳质组/热变壳质组	保留原始形态的壳质组,在正交镜下完全消光或出现各向异性(如热变孢子体)
天然焦基质	主要由镜质组生成的物质,在正交镜下显示强各向异性
中间相小球体	有机显微组分转化为具有微弱各向异性的小球体,直径约 0.5 μm,排列致密
镶嵌结构体	有机显微组分呈片状或板条状各向异性体彼此镶嵌或堆叠
细粒镶嵌结构体	粒度 0.5~1.5 μm
中粒镶嵌结构体	粒度 1.5~5.0 μm
粗粒镶嵌结构体	粒度 5.0~10.0 μm
流动结构体	有机显微组分呈定向性流动
条带状流动结构体	条带状各向异性显微组分呈定向流动
镶嵌状流动结构体	流动结构体嵌入各向同性体中
新生成的组分	由于岩浆岩侵入而新生成的物质
热解碳	充填于空腔中的气相沉积物质,呈花瓣状、球粒状、片状或同心圆状

2) 岩浆岩侵入煤层,使煤的显微组分发生热变。然而由于接触变质煤与侵入体的距离不同,其显微组分对热效应的响应也不同。根据显微组分定量结果(表 4),严重热变煤的显微组分以各向异性体为主,如中间相小球体和镶嵌结构,偶尔观察到流动结构和热解碳。原始镜质组在严重热变煤中显著减少,如 WJ3 中只残余 3%。类质组消失,惰性组分未出现明显变化。轻微热变煤的显微组分以原始组为主,如 T5、TS10、WJ4 中原始镜质组分别占 60.5%、66.3%、70.8%。各向异性显微组分主要为中间相小球体,镶嵌和流动结构只占很小的一部分或未观察到,部分轻微变质煤中观察到热变孢

子体。

3.6 接触变质煤中显微组分的演化与识别

在温度较低的条件下(<300 ℃),煤的显微组分和矿物质都没有很大的变化^[11]。当温度继续升高,煤受热至其表面分子达到近似液体的活动程度时,便产生流变现象,构成一种塑性、各向同性、既非液体亦非固体的中间相物质^[26]。实验室研究表明,镜质组和类质组在 300~500 ℃ 经历了显著的变化^[27-28]。工业焦炭生产过程中,煤在隔绝空气加热到 350~450 ℃ 开始软化、熔融并出现脱挥发分液泡。当加热到 450~550 ℃ 时,中间相开始生长,并逐渐形成镶嵌结构体^[29]。中间相小球体是各向同

性体向镶嵌结构转变的中间阶段,Kisch^[30]认为天然焦中的镶嵌结构体形成于约 470 ℃,是中间相小球体经聚合、固结而成的产物。中间相小球体与镶嵌结构体主要存在 2 方面的差异:①2 者粒度不同,中间相小球体的排列十分致密,观察到的小球体直

径仅有 0.5 μm。镶嵌结构体呈片状拼接在一起,粒度一般大于中间相小球体。②2 者各向异性不同,中间相小球体具有微弱的各向异性,在正交偏光下转动物台仅显示微弱的明暗变化。镶嵌结构的各向异性明显,转动物台出现交替消光。

表 4 大同煤田接触变质煤的显微组分含量

Table 4 Quantitative analysis of micro-texture in contact metamorphosed coal from Datong Coalfield														
显微组分		样品含量/%												
		T1	T2	T3	T4	T5	TS7	TS8	TS9	TS10	WJ3	WJ4	XY2	XY3
原有组分	原始镜质组	23.7	21.4	15.5	19.8	60.5	16.7	22.2	17.4	66.3	3.0	70.8	27.5	26.7
	惰性组分	19.7	16.2	18.3	12.3	14.5	10.8	13.9	11.3	15.2	11.8	12.8	20.8	12.9
	壳质组/热变壳质组	—	—	—	0.3	0.4	—	—	—	0.6	—	0.5	—	—
天然焦基质	中间相小球体	25.7	30.2	39.8	57.3	13.0	21.6	22.8	25.9	17.2	26.9	14.8	18.1	11.6
	细粒镶嵌结构体	26.7	26.5	21.6	9.8	9.8	24.5	26.0	23.9	—	30.4	—	23.1	40.0
	中粒镶嵌结构体	1.3	1.5	2.0		0.8	7.8	2.6	4.8	—	10.9	—	3.8	3.1
	粗粒镶嵌结构体	—	—	—	—	—	—	0.2	0.6	—	0.9	—	0.6	—
流动结构体	条带状流动结构体	2.5	3.0	1.4	—	0.2	14.8	10.9	12.3	—	14.8	—	4.4	3.6
	镶嵌状流动结构体	—	—	—	—	—	1.9	—	—	—	—	—	0.6	0.9
新生组分	热解碳	0.5	1.2	1.4	0.4	0.8	1.9	1.4	3.7	0.7	1.3	1.1	1.1	1.3

煤在软化过程中伴随着挥发分的释放。挥发性物质从熔融或半熔融状态下的煤中逸出,在显微组分表面留下气孔。逸出的气体推动尚处于半塑状态的中间相,使融并的中间相发生形变,形成形状不规则的粒状镶嵌和流动型各向异性体^[22]。因而气孔周围往往形成粒度较粗的镶嵌结构或具有强烈各向异性的流动结构(图 8c,图 8d)。显微镜下观察到的镶嵌结构常呈不规则的片状或板条状,有堆叠和拉长的痕迹,流动结构具有定向性,显示出熔融、流动再凝固的形成过程。除了高温的作用,在压力显著的区域产出的天然焦基质中更易出现流动结构^[7]。

形成热解碳需要高温,GOODARZI^[31]和 ZHENG^[32]认为热解碳的出现标志着煤经受了超过 500 ℃的高温。方家虎等^[22]列举了一些学者进行的人工热解碳试验条件,认为热解碳的形成温度高于 800 ℃。研究在 TS10 和 WJ4 中发现了在空腔、裂隙中充填的热解碳。然而,TS10 和 WJ4 所处的热条件不足以生成热解碳,因而这些热解碳是气相裂解产物在温度下降后重新沉积的结果^[29]。

4 结 论

1)大同煤田石炭-二叠系接触变质煤的镜质体最大反射率通常大于 1%,干燥基挥发分小于 20%。接触变质煤可分为严重热变煤和轻微热变煤。严重

热变煤直接与侵入体相邻或镜质体最大反射率大于 2%,轻微热变煤的镜质体最大反射率介于 1%~2%。

2)严重的宏观煤岩特征与正常煤差异显著,包含块状焦、砾状焦、粒状焦 3 种类型;轻微热变煤的镜质体反射率高于正常煤,其宏观煤岩特征与正常煤的无明显差异。

3)接触变质煤的显微组分可分为 3 大类,即原有组分、天然焦基质和新生成的组分。原有组分为原始煤中未热变或轻微热变的镜质组、惰质组和类质组;天然焦基质包括由镜质组和类质组转变而来的中间相小球体、镶嵌结构体、流动结构体等;新生成的组分主要为热解碳。

4)严重热变煤的显微组分多为各向异性体;热变煤的显微组分以各向同性体为主,其所经历的接触变质作用强度弱于严重热变煤。

参考文献(References):

[1] REN D, ZHAO F, WANG Y, *et al.* Distributions of minor and trace elements in Chinese coals [J]. International Journal of Coal Geology, 1999, 40(2/3): 109-118.

[2] YAO Y, LIU D, HUANG W. Influences of igneous intrusions on coal rank, coal quality and adsorption capacity in Hongyang, Handan and Huaibei Coalfields, North China [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 88(2/3): 135-146.

- [3] CHEN J, LIU G, LI H, *et al.* Mineralogical and geochemical responses of coal to igneous intrusion in Pansan Coal Mine of Huainan Coalfield, Anhui, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014/(124):11–35.
- [4] RAHMAN M W, RIMMER S M. Effects of rapid thermal alteration on coal: Geochemical and Coal Petrology signatures in the Springfield(No. 5) Coal, Illinois Basin [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 131:214–226.
- [5] QUEROL X, ALASTUEY A, LOPEZ-SOLER A, *et al.* Geological controls on the mineral matter and trace elements of coals from the Fuxin basin, Liaoning Province, Northeast China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1997, 34(1/2):89–109.
- [6] 杨起,吴冲龙,汤达祯,等. 中国煤变质作用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996:59–76.
- [7] SINGH A K, SINGH M P, SHARMA M, *et al.* Microstructures and microtextures of natural cokes; a case study of heat-affected coking Coals from the Jharia Coalfield, India [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 71(2/3):153–175.
- [8] KWIECISKA B, PETERSEN H I. Graphite, semi-graphite, natural coke, and natural char classification—ICCP system [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 57(2):99–116.
- [9] CHANDRA D. Reflectance of thermally metamorphosed coals [J]. *Fuel*, 1963, 42(1):69–74.
- [10] GHOSH T. Reflectance of Himalayan coals [J]. *Fuel*, 1970, 49(2):226–228.
- [11] 斯塔赫 E. 斯塔赫煤岩学教程[M]. 杨起,等译. 北京:煤炭工业出版社,1990:156–164.
- [12] KARAYIGIT A, WHATELEY M. Properties of a lacustrine sub-bituminous(k1) seam, with special reference to the contact metamorphism, Soma-Turkey [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1997, 34(1/2):131–155.
- [13] JIANG J, CHENG Y, Wang L, *et al.* Coal petrology and geochemical effects of sill intrusions on coal and their implications for gas outbursts in the Wolonghu Mine, Huaibei Coalfield, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 88(1):55–66.
- [14] WARD C R, WARBROOKE P R, ROBERTS F I. Geochemical and mineralogical changes in a coal seam due to contact metamorphism, Sydney Basin, New South Wales, Australia [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1989, 11(2):105–125.
- [15] DAI S, REN D. Effects of magmatic intrusion on mineralogy and geochemistry of coals from the Fengfeng-Handan Coalfield, Hebei, China [J]. *Energy Fuels*, 2007, 21(3):1663–1673.
- [16] RIMMER S M, YOKSOULIAN L E, HOWER J C. Anatomy of an intruded coal, I: effect of contact metamorphism on whole-coal geochemistry, Springfield(No. 5)(Pennsylvanian) coal, Illinois Basin [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 79(3):74–82.
- [17] SAGHAFI A, PINETOWN K, GROBLER P, *et al.* CO₂ storage potential of South African coals and gas entrapment enhancement due to igneous intrusions [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 73(1):74–87.
- [18] STEWART A K, MASSEY M, PADGETT P L, *et al.* Influence of a basic intrusion on the vitrinite reflectance and chemistry of the Springfield(No. 5) coal, Harrisburg, Illinois [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, 63(1–2):58–67.
- [19] 邵济安, 张永北, 张履桥, 等. 大同地区早中生代煌斑岩—碳酸岩岩墙群[J]. 岩石学报, 2003, 19(1):93–104.
- SHAO Ji'an, ZHANG Yongbei, ZHANG Lvqiao, *et al.* Early Mesozoic dike swarms of carbonatites and lamprophyres in Datong area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1):93–104.
- [20] NIU X, CHEN B, FENG G, *et al.* Origin of lamprophyres from the northern margin of the North China Craton: implications for mantle metasomatism [J]. *Journal of the Geological Society*, 2017, 174(2):353–364.
- [21] 刘东娜. 大同双纪含煤盆地煤变质作用与沉积—构造岩浆活动的耦合关系[D]. 太原:太原理工大学, 2015.
- [22] 方家虎, 唐修义. 热变煤的光学结构及其地质意义[J]. 煤田地质与勘探, 1993, 21(5):21–25.
- FANG Jiahu, TANG Xiuyi. The optical textures of the thermally altered coals and their geological implications [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1993, 21(5):21–25.
- [23] GOLAB AN, CARR PF. Changes in geochemistry and mineralogy of thermally altered coal, Upper Hunter Valley, Australia [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004(57):197–210.
- [24] SINGH A K, SHARMA M, SINGH M P. SEM and reflected light petrography: a case study on natural cokes from seam XIV, Jharia coalfield, India [J]. *Fuel*, 2013(112):502–512.
- [25] SANYAL S. Nature of a thin vein of solidified tarry matter formed during natural carbonization of coal from Victoria West Colliery Raniganj Coalfield India [J]. *Fuel*, 1965, 44(5):333–338.
- [26] 陈儒庆. 煤化作用期间煤的地质流变学[J]. 煤田地质与勘探, 1991, 19(2):36–39.
- CHEN Ruqing. Geological rheology of coal during coalification [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1991, 19(2):36–39.
- [27] TAYLOR G. Development of optical properties of coke during carbonization [J]. *Fuel*, 1961, 40(6):465–472.
- [28] BROOKS J D, TAYLOR G. The formation of some graphitizing carbons [J]. *Chemistry Physics of Carbon*, 1968(4):243–286.
- [29] RIMMER S M, CRELLING J C, YOKSOULIAN L E. An occurrence of coked bitumen, Raton formation, Purgatoire River valley, Colorado, USA [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015(141):63–73.
- [30] KISCH H, TAYLOR G. Metamorphism and alteration near an intrusive-coal contact [J]. *Economic Geology*, 1966, 61(2):343–61.
- [31] GOODARZI F, GENTZIS T, JACKSON G, *et al.* Optical characteristics of heat-affected bitumens from the Nanisivik Mine, NW Baffin Island, Arctic Canada [J]. *Energy Sources*, 1993, 15(2):359–376.
- [32] ZHENG Z, ZHANG J, HUANG J. Observations of microstructure and reflectivity of coal graphites for two locations in China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1996, 30(4):277–284.