

烧变岩岩石学及稀土元素地球化学特征

黄 雷, 刘池洋

西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西北大学含油气盆地研究所, 陕西西安 710069

摘要: 烧变岩的研究有益于对煤层形成以来所经历的构造运动、古气候和古地理的探讨。为了获得有关烧变岩基本特征的数据资料, 本文利用扫描电镜、能谱测试、古地磁及 ICP-MS 等测试手段对陕北神木地区烧变岩进行了系统的岩石学及稀土元素地球化学的分析研究。剖面上将烧变岩分成烧熔岩和烧烤岩两个序列。扫描电镜观察及能谱测试显示, 各矿物均显示烧熔迹象, 除伊利石外未发现其他类型粘土矿物; 磁化率测试显示烧变岩具异常高的磁化率; 地球化学分析显示烧变岩稀土元素配分特征近于沉积岩(原岩)特征; 纵向剖面上, 随烧变程度增大(由烧烤岩至烧熔岩)其稀土元素总量逐渐减小, 烧熔岩稀土元素总含量较烧烤岩的要明显低; 另外, 烧熔岩表现为较明显的 Ce 负异常, 而烧烤岩则表现为无 Ce 异常, 有些甚至表现为偏正异常。

关键词: 烧变岩; 矿物岩石学; 磁化率; 稀土元素; Ce 负异常。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2008)04-0515-08

收稿日期: 2007-10-29

Petrologic and REE Geochemical Characters of Burnt Rocks

HUANG Lei, LIU Chi-yang

State Key Laboratory of Continental Dynamics (Northwest University), Institute of Petroliiferous Basin of Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: The study of burnt rocks facilitates the discussion on the tectonic movement, paleoclimate and paleogeography that coal seams were subject to after they were formed. In order to obtain the basic data on the features of the burnt rocks, a systematic study of petrology and REE geochemistry on burnt rocks in Shenmu, North Shaanxi Province, has been done, using the methods of SEM, EDS, susceptibility measurements and ICP-MS. The burnt rocks are divided into two series in the section: the melted rocks and the baked rocks. SEM and EDS analyses reveal that all the minerals show burnt and melted traces, and there are no clay minerals except illite found in the burnt rocks. Susceptibility measurements reveal that the burnt rocks have abnormally high susceptibility values, whereas a geochemical analysis shows that the REE distribution pattern of burnt rocks is similar to that of sedimentary rocks (initial rocks). In the longitudinal section, the REE gradually decreases as the burning degree increases (from baked rocks to melted rocks), and the total REE of melted rocks is obviously lower than that of baked rocks. Besides, the melted rocks show apparent negative Ce anomalies, while the baked rocks show no anomaly of Ce, and sometimes even show positive anomalies.

Key words: burnt rock; mineral petrology; susceptibility; REE; negative Ce anomaly.

烧变岩是由近地表煤层自燃烘烤所导致围岩(一般为泥岩或砂岩)在外观、岩石学特征发生改变而成的一类特殊岩石, 王玉山(1986)将其归为一种特殊少见的变质岩。烧变岩多为自燃煤的上覆岩层, 而下伏岩层基本保持原岩特征不变。一般在有自燃煤存在的地方均可见烧变岩, 其存在是世界范围内的一种普遍地质现象, 如美国(Cosca *et al.*, 1989; Heffern and Coates, 2004; Nolter and Vice, 2004)、印度尼西亚(Whitehouse and Mulyana, 2004)、印度(Prakash *et al.*, 1997)、澳大利亚(El-

lyett and Fleming, 1974)、罗马尼亚(Rădan and Rădan, 1998)、捷克(Krsová *et al.*, 1989; Tyráček, 1994)、新西兰(Lindqvist *et al.*, 1985)、俄罗斯(Sokol *et al.*, 1998)、中亚地区诸盆地(Novikov and Sokol, 2007). 在我国北方煤田区如新疆、宁夏、内蒙古、甘肃、青海、陕西、山西等地均可见烧变岩, 包括地史时期的与现今时期的. 作为自然界较为普遍存在的一种地质现象, 国内虽已有研究报道(刘志坚, 1959; 王玉山, 1986; 尚桂林等, 1990; 牛建国, 2001; 孙家齐等, 2001), 但并不是很多. 由于烧变岩是与煤层自燃事件伴生的, 其研究对探讨煤层形成以来所经历的构造运动、古气候和古地理, 以及煤自燃的诱因、过程等的研究显然都是有益的. 基于此, 本文对烧变岩的岩石学特征及稀土元素地球化学特征进行了研究报道.

本文研究对象为陕北神木地区的烧变岩, 所处地层为侏罗系延安组. 该区烧变岩广布, 有些地方几层倾角平缓的煤层均发生自燃, 则整座山的岩层均被烧烤, 而呈现一片樱红, 蔚为壮观, 该区有许多地方籍此命名, 如: ××火盘、火烧沟等.

研究中挑选样品 13 块, 采自考考乌苏沟(E: 110°14′50. 1″, N: 39°2′13. 9″)和店塔东(E: 110°30′45. 5″, N: 39°1′59. 1″)两处(位置见图 1), 其岩性描述如表 1 所示. 为描述方便将 K05-17、YWS05-3 和 DD05-6 三样品称为煤灰样品, 其余样品称为烧变岩样品.

1 区域地质构造背景

研究区位于鄂尔多斯盆地北部地区(图 1). 包括研究区在内的整个盆地, 在演化上经历了中晚三叠世延长期、早中侏罗世富县—延安期、中侏罗世直罗—安定期和早白垩世 4 个主要沉积阶段, 晚白垩世以来进入后期改造时期, 主体长期、幕式、差异性整体抬升和强烈不均匀剥蚀(刘池洋等, 2006).

延安组为鄂尔多斯盆地重要的含煤地层, 在晚白垩世以来的后期改造事件中, 长期经受幕式抬升与剥蚀. 这一构造背景使研究区的延安组煤层多靠近甚或出露地表, 并被河谷冲沟所切割(图 1). 同时, 自晚白垩世以来, 研究区整体表现为较为干旱的气候条件(陕西省地质矿产局, 1989).

研究区的煤层自燃事件正是在这一区域动力学环境背景下发生的.

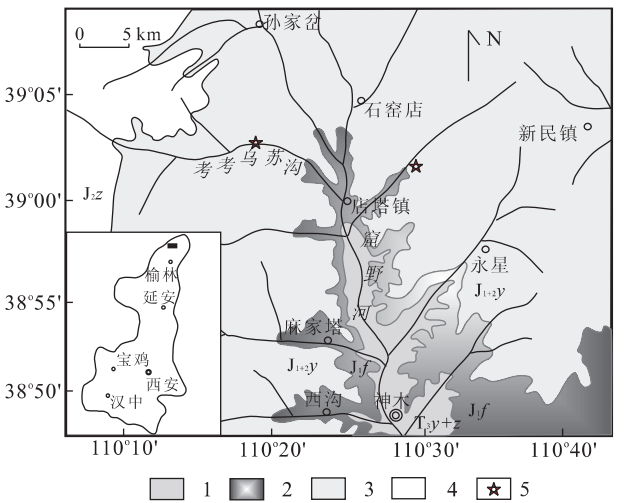


图 1 研究区区域地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the study area showing the section localities

1. 上三叠统瓦窑堡组 and 永平组; 2. 早侏罗世富县组; 3. 早中侏罗世延安组; 4. 中侏罗世直罗组; 5. 剖面所在位置

表 1 研究中所选样品统计

Table 1 Samples used in this study

样品号	采样地点	样品特征
K05-17	考考乌苏沟	煤灰, 灰白色薄层
K05-16	考考乌苏沟	烧烤岩, 浅灰红色
K05-15	考考乌苏沟	烧烤岩, 浅红色, 较 K05-16 色深
K05-14	考考乌苏沟	烧烤岩, 浅灰红色, 较 K05-15 色浅
K05-13	考考乌苏沟	烧烤岩, 与 K05-14 色调一致
YWS05-3	考考乌苏沟	煤灰, 含新芦木化石
YWS05-4	考考乌苏沟	烧熔岩, 蜂窝状, 红色夹黑色, 熔孔发育
YWS05-5	考考乌苏沟	烧烤岩, 块状, 坚硬致密, 含黑色微细植物化石碎片
YWS05-6	考考乌苏沟	烧烤岩, 块状, 红色板片状, 夹白色点质物
YWS05-7	考考乌苏沟	细砂岩, 浅黄白色, 块状
DD05-1	店塔东	致密泥质烧烤岩
DD05-6	店塔东	煤灰, 灰白色薄层
F05-1	店塔东	烧熔岩, 熔融状流动构造

关于鄂尔多斯盆地北部烧变岩的形成时代, 前人通过区域地质构造环境演化的推断以及含烧变岩砾石的地层时代约束, 综合认为主要为早白垩世晚期至晚第三世(尚桂林等, 1990). 笔者对盆地北部的烧变岩进行了裂变径迹定年分析, 测试年龄数据分布在晚白垩世中期、始新世和中新世晚期 3 个时期, 并结合煤田钻孔资料综合认为: 该区烧变岩的形成跨越时间长——自晚白垩世中期至第四纪, 且具阶段性(具体测年数据及分析将另文报道).

2 烧变岩野外地质剖面特征

笔者对陕北神木地区的多处烧变岩露头进行了详细的实地考察。发现在烧变岩纵向剖面上(图 2a, 2b),最下部往往是未完全燃烧的黑色自燃煤,即烧变残留煤层。其上出现灰白色薄层泥岩(条带)(图 2c),厚度一般在 5 cm 左右,具有比重小、质地疏松、手捏具滑感、具层纹、半固结状等特点,该层为完全燃烧后的煤灰(尚桂林等,1990)。有时也可见呈铁红色—铁锈色的具层纹半固结状煤灰夹于灰白色或灰褐色煤灰之间,这种煤灰可能因具较多赤铁矿等物质而显这种色调。煤灰以上为烧变岩,自下往上其烧变程度由强变弱。下部烧变岩由于靠近自燃煤最近,遭受烘烤温度最高,形成过程中一般出现部分或全部熔融,之后又迅速冷却,而呈熔融状、炉渣状或蜂窝状,形成后其原岩的沉积构造不复存在。向上随着所接受烘烤温度的逐渐变低,烧变程度亦依次降低而由红色、浅红色逐渐过渡到与围岩(原岩)色调一致,原岩的沉积构造也未被破坏。有时纵向上连续的多层自燃煤反复出现,上述剖面序列就会旋回出现。

根据上述烧变岩在纵向剖面上的产出特点,可将其分为以下 2 类:其一是烧变过程中发生熔融或部分熔融而具熔融状、炉渣状或蜂窝状的烧熔岩(图 2d, 2e);其二是烧变过程中未发生原岩的熔融,保存

原岩沉积构造特点的烧变岩,可称其为烧烤岩。

因为煤自燃产生的温度尚与自燃煤层厚度有关,所以当燃烧煤层较薄时,产生的热量不足以使围岩发生熔融,在相应剖面上也就不会有烧熔岩出现,而只有烧烤岩类(图 2b)。

3 烧变岩矿物岩石学特征

关于烧变岩的物理性质及岩石学特征,前人研究表明尚桂林等(1990)、管海晏等(1997)、De Boer *et al.* (2001):烧变岩孔隙率、含水量较原岩显著增高,抗压强度降低,抗剪强度有所减小;磁性明显增强。

笔者对各样品进行了环境扫描电镜下的观察以及能谱测试分析(实验仪器为 Quanta400FEG 热场发射环境扫描电子显微镜和 OXFORD 能谱仪(INC350),均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成),结果显示无论是烧熔岩还是烧烤岩,在其主要矿物组成上仍保持原岩特征。所研究样品主要为砂岩、泥岩烧变而成,其矿物组成主要为石英和长石,以及伊利石等粘土矿物。但烧变岩中石英、长石等矿物发育明显的烧熔痕迹(图 3),并且烧熔岩较烧烤岩中更为明显,前者石英、长石多显示具烧熔边的片状结构,少见或未见具晶型的颗粒,而后者尚见

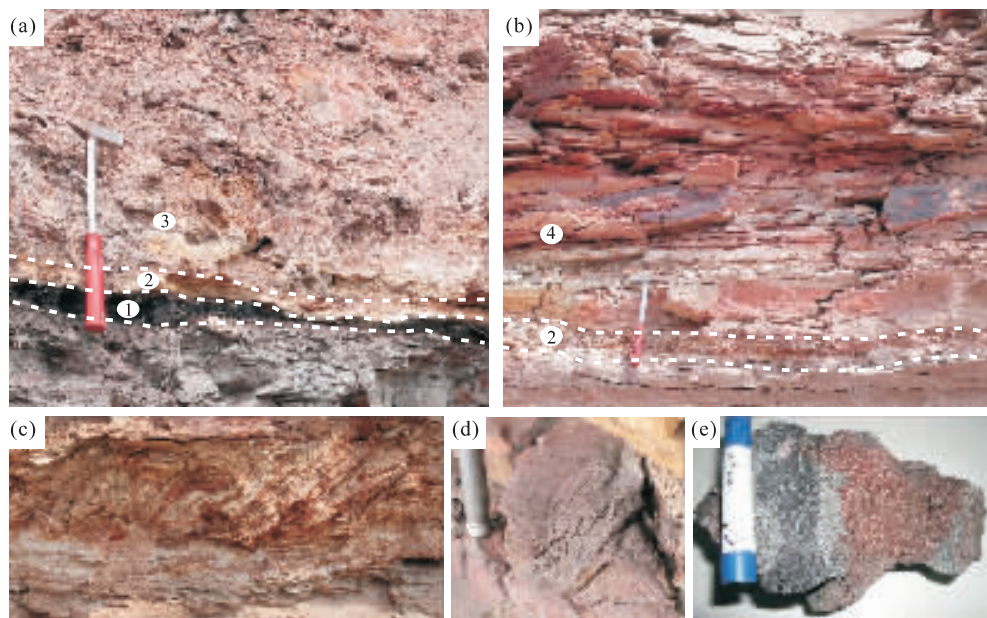


图 2 烧变岩纵向剖面及煤灰与烧熔岩照片

Fig. 2 Photos of burnt rock in profile, and coal ash, melted rocks

a 和 b. 烧变岩纵向剖面,其中 1. 烧变残留煤层;2. 煤灰层;3. 烧烤岩层;4. 烧熔岩层;c. 煤灰;d. 熔融状烧熔岩;e. 炉渣状烧熔岩

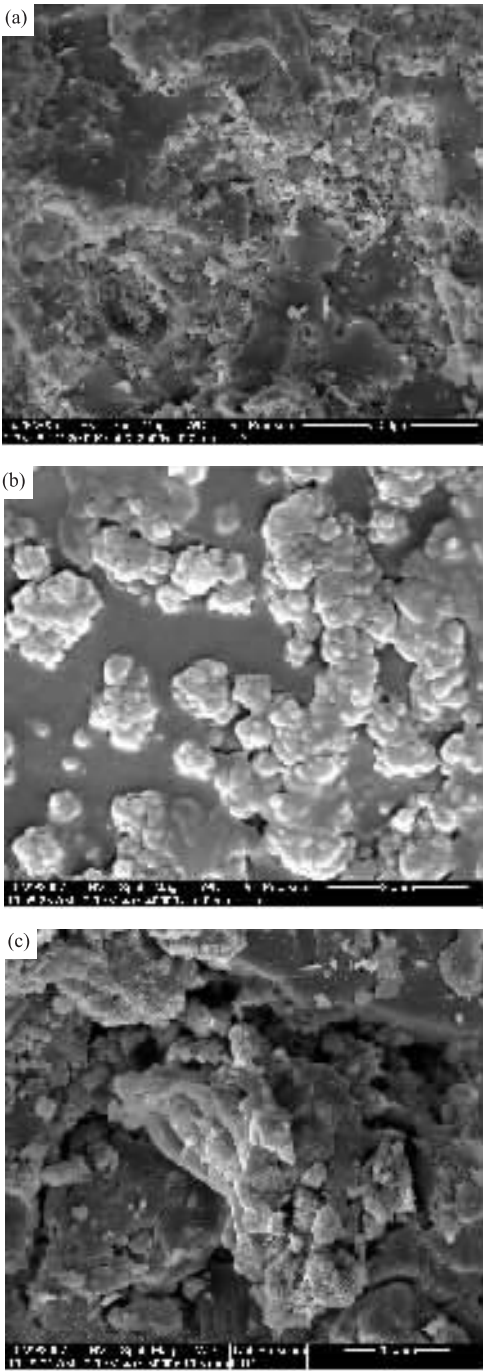


图 3 环境扫描电镜下烧变岩中矿物特征

Fig. 3 Feature of minerals in burnt rocks observed through SEM

a、b. 烧熔岩中不同放大倍数下具烧熔边痕迹的长石;c. 烧烤岩中具烧熔边的长石

具解理的长石颗粒;另外烧变岩中除伊利石外未有砂岩、泥岩中常见的高岭石、蒙脱石等其他类型粘土矿物的发现,伊利石在形态上成不典型的鳞片状或丝缕状(图 4a, 4b),能谱测试显示伊利石具较高的

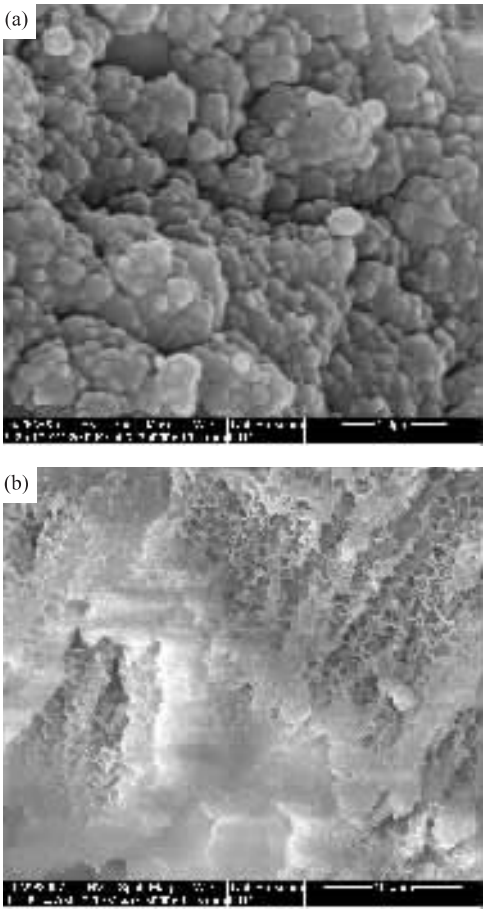


图 4 环境扫描电镜下呈不规则鳞片状(a)和丝缕状(b)的伊利石

Fig. 4 Illite with irregular lepidosome features (a) and filamentous features (b) shown under the SEM

铁含量.

另外对烧变岩进行了体积磁化率的测试,发现烧变岩具有相对沉积岩异常高的磁化率值,所测样品体积磁化率值介于 $0.88 \times 10^{-3} \sim 1.99 \times 10^{-3}$ CGSM 之间. 研究表明,砂岩的磁化率变化范围为 $10 \sim 150 \times 10^{-6}$ CGSM,泥质岩的磁化率极其微弱;而各类火成岩的磁化率变化区间为 $10 \sim 13\,000 \times 10^{-6}$ CGSM(李色篆,1988;徐海军等,2006). 可见,烧变岩磁化率值高出正常沉积岩几个数量级,而更近火成岩的磁化率值特征.

4 烧变岩稀土元素地球化学特征

样品主要采自两个连续剖面,自下而上包括烧熔岩和烧烤岩两个序列,另外还采集烧变岩下部的煤灰也作为分析对象. 所有样品均在西北大学大陆

动力学国家重点实验室利用 ICP-MS 分析测试, 获得其各稀土元素含量, 测试数据见表 2。

烧变岩样品稀土元素总量 $\sum \text{REE} = (61.30 \sim 269.00) \times 10^{-6}$, 除 2 个样品外都大于 100×10^{-6} ; 3 个煤灰样品的 $\sum \text{REE}$ 分别为: 366.9×10^{-6} , 130.4×10^{-6} , 131.6×10^{-6} 。

利用球粒陨石标准化模式 (Taylor and Mclennan, 1985) 作图 (图 5), 所有样品 REE 分布模式都为曲线右倾斜, 烧变岩样品 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 8.90 \sim 19.3 > 1$ 。轻稀土元素段右倾明显, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 5.08 \sim 6.60 > 1$, 为轻稀土富集型, 重稀土段相对平缓, $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.27 \sim 0.40$ 。煤灰样品 REE 分布模式也显示相同的规律。从分配曲线上看所有烧变岩样品均显示钕负异常, 利用公式:

$$\delta \text{Eu} = \frac{\text{Eu}}{\text{Eu}^*} = \frac{\text{Eu}_{\text{N}}}{\frac{1}{2}(\text{Sm}_{\text{N}} + \text{Gd}_{\text{N}})}, \quad (1)$$

(式(1)中 Eu 表示实际值, Eu* 表示理想值) 计算得异常系数为 0.58~0.68。

同样方法计算 δCe , 发现除 YWS05-4 和 F05-1 两个样品以外, 其余 δCe 值均在 1 左右或略大于 1,

而 YWS05-4 和 F05-1 两样品 δCe 值分别为 0.68 与 0.57, 显示 Ce 负异常而与其他样品不同, 值得注意的是这两个样品在烧变中均发生全部熔融, 即是所谓的烧熔岩。

另外, Eu/Sm 在不同成因的岩类中差异较大, 可作为成因探讨的依据 (陈德潜和陈刚, 1990), 计算出所有样品 Eu/Sm 值为 0.19~0.24, 这一数值范围显示砂岩—页岩的特征。YWS05-4 至 YWS05-7 四块烧变岩样品组成的系列剖面上, 各样品分别代表了不同的燃烧程度, 差别较明显, 其稀土元素总含量上显示出较为明显的规律: 随着烧变程度的增大 (由烧烤岩至烧熔岩) 其稀土元素总量呈逐渐减小的趋势, 烧熔岩稀土元素总含量较烧烤岩的要明显低。样品采样间距不大, 原岩岩性 (沉积环境) 应相差甚微, 故稀土元素的这种分配规律可能是由于烧变过程中元素分异造成的。K05-16 至 K05-12 样品构成的系列剖面上由于几块样品的燃烧程度差别不太显著, 稀土元素含量随烧变程度的增大逐渐减小的规律不甚明显。

虽然各烧变岩样品的稀土元素含量特征有所差

表 2 烧变岩样品中稀土组成 (10^{-6})
Table 2 The REE compositions of burnt rocks

样品名称	DD05-1	DD05-6	F05-1	K05-13	K05-14	K05-15	K05-16	K05-17	YWS05-3	YWS05-4	YWS05-5	YWS05-6	YWS05-7
La	24.00	92.50	24.00	42.50	36.30	43.30	55.30	25.60	24.30	12.12	20.60	18.60	20.00
Ce	50.50	154.00	47.80	87.10	77.60	87.50	117.20	48.70	53.30	25.00	41.60	39.50	43.40
Pr	5.75	15.90	5.38	9.81	8.64	9.45	12.60	5.79	6.32	2.70	4.73	4.55	5.02
Nd	23.20	59.60	21.30	40.60	33.90	36.70	49.90	23.40	26.40	10.72	18.60	18.50	20.40
Sm	4.61	10.50	4.13	7.52	6.08	6.57	8.96	4.70	5.42	2.18	3.56	3.67	3.94
Eu	0.89	2.04	0.82	1.58	1.25	1.37	1.95	1.13	1.14	0.47	0.73	0.80	0.85
Gd	4.63	10.87	4.00	7.26	5.83	6.20	8.41	4.72	4.94	2.21	3.54	3.61	3.79
Tb	0.74	1.60	0.59	1.00	0.80	0.84	1.13	0.81	0.71	0.36	0.55	0.56	0.54
Dy	4.28	8.90	3.33	5.34	4.29	4.62	5.84	5.22	3.71	2.13	3.10	3.09	2.91
Ho	0.91	1.76	0.70	1.07	0.84	0.95	1.12	1.25	0.73	0.46	0.65	0.60	0.59
Er	2.48	4.30	1.91	2.81	2.21	2.55	2.89	3.58	1.95	1.21	1.81	1.58	1.56
Tm	0.40	0.60	0.31	0.44	0.34	0.40	0.43	0.61	0.30	0.19	0.29	0.24	0.24
Yb	2.70	3.82	2.20	3.02	2.29	2.68	2.87	4.17	2.09	1.30	1.98	1.64	1.70
Lu	0.43	0.58	0.36	0.48	0.36	0.42	0.45	0.70	0.33	0.21	0.31	0.26	0.27
$\sum \text{REE}$	125.60	366.90	116.80	210.60	180.80	203.50	269.00	130.40	131.60	61.30	102.00	97.30	105.30
$\sum \text{L}/\sum \text{H}$	6.59	10.32	7.71	8.83	9.66	9.90	10.63	5.19	7.92	7.34	6.58	7.40	8.07
δEu	0.58	0.58	0.61	0.65	0.63	0.65	0.68	0.73	0.66	0.66	0.62	0.66	0.66
δCe	1.00	1.10	0.57	1.01	0.97	1.10	1.13	0.75	1.05	0.68	1.16	0.99	1.06
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	8.90	24.20	10.90	14.10	15.90	16.10	19.30	6.13	11.60	9.30	10.40	11.40	11.80
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	5.20	8.80	5.80	5.70	6.00	6.60	6.17	5.44	4.48	5.56	5.78	5.08	5.09
$(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{N}}$	0.27	0.42	0.27	0.33	0.35	0.31	0.40	0.19	0.34	0.27	0.28	0.34	0.32
Eu/Sm	0.19	0.19	0.20	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.21	0.22	0.21	0.22	0.22

注: 所有样品均在大陆动力学国家重点实验室 (西北大学) 测试, 在 Elan6100DRC 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 上进行, 样品经 BH-VO-1、GSR-1 和 AGV-1 国际标样监控, 分析相对误差 $< 5\%$ 。

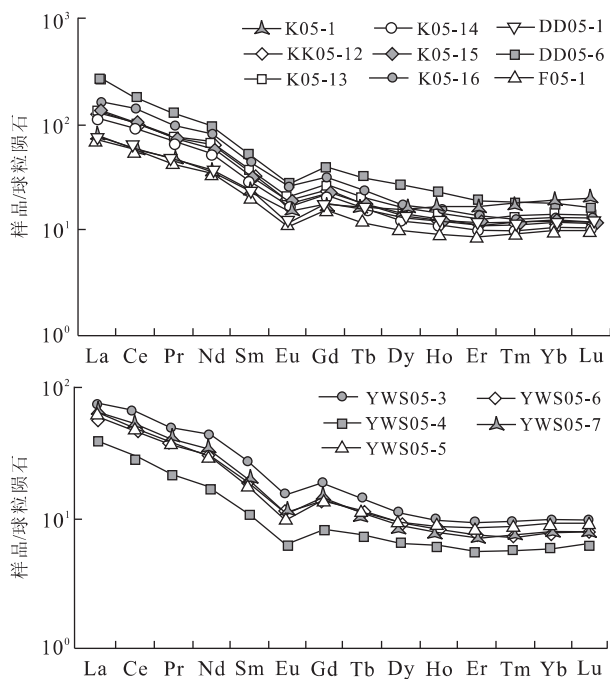


图 5 烧变岩各样品稀土元素分配样式

Fig. 5 The distribution curves of REE in burnt rock samples

异,但仍具有规律性,但总体看来,这些配分规律显示为沉积岩(原岩)稀土元素的配分特征(Elderfield and Greaves, 1982; Gromet *et al.*, 1984; Taylor and McLennan, 1985; McLennan, 1989; 陈德潜和陈刚,1990; Sholkovitz, 1990; Abanda and Hannigan, 2006; 周炼等,2007)。

K05-17、YWS05-3、DD05-6 三个样品为煤灰样品,从稀土元素配分曲线上看,除 Σ REE 稍高以外,其曲线形态及其他指标均与烧变岩相似。

5 讨论

(1)粘土矿物的热模拟试验研究表明,在常压 550 °C 恒温 3 h 的条件下,高岭石等大部分粘土矿物就会全部消失而变成伊利石(周国清,1995)。而在烧变岩的形成温度上 Bendor *et al.* (1981)、Cosca (1989)、管海晏等(1997)、De Boer *et al.* (2001)认为,离煤层较远仅受到轻度烧烤的烧变岩所经历烧变温度在 340~800 °C 之间,至于炉渣状烧熔岩所经受温度会更高。根据上述粘土矿物的热模拟试验结果,这一烧变温度完全允许高岭石等粘土矿物全部转化为伊利石,这与研究中所观察到仅见伊利石而未见其他粘土矿物的结果是不谋而合的。而伊利石

中较高的含铁量可能也是高温烧变的结果。

(2)相应磁化率测试显示具有异常高的磁化率值,这一高值磁化率可能主要是由赤铁矿和磁铁矿等强磁性铁矿物引起的。含煤地层中往往都含有赤铁矿(Fe_2O_3)、褐铁矿($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、黄铁矿(FeS)、菱铁矿(FeCO_3)等铁矿物,这些铁矿物在煤层自燃过程中,随着烧变岩的形成,不断地发生化学变化:一般在高温氧化作用下,黄铁矿变成红色的赤铁矿(管海晏等,1997),菱铁矿在 300 °C 时开始转化为磁铁矿,随着温度的升高磁铁矿也向赤铁矿转化,至 680 °C 时菱铁矿的最终氧化产物几乎全是赤铁矿(潘永信等,1999)。故烧变岩中含铁成分可能多数甚至全部以赤铁矿和磁铁矿形式存在。赤铁矿与磁铁矿是典型的强磁性矿物,它的一个重要特点就是当它从高温冷却下来时,会得到很强的温差剩磁,要比感应磁化强度大数千倍,正是由于这一原因才使得烧变岩具有如此异常高的磁化率值。另外也正是赤铁矿的赋存使烧变岩显示笔者所见的红色色调。De Boer *et al.* (2001)对中国新疆地区烧变岩的岩石磁学测试分析结果也证明了这一点。

(3)烧变岩的稀土元素配分特征显示(La/Yb)_N=8.90~19.3, δEu =0.58~0.68,多数样品 $\Sigma\text{REE}=(100\sim269)\times10^{-6}$;这一稀土的总量值范围及富轻稀土、Eu 亏损的特点均显示沉积岩(原岩)的稀土元素配分特点。各烧变岩样品的稀土配分曲线虽然都显示出沉积岩的特征,但从纵向剖面上看,具有随着烧变程度的增大,由烧烤岩至烧熔岩其稀土元素总量逐渐减小的趋势,烧熔岩稀土元素总含量较烧烤岩的要明显低。烧烤岩与烧熔岩的稀土元素配分特征上的差异,除在 ΣREE 上前者要较后者大以外,烧熔岩还表现为 Ce 的较明显负异常,而烧烤岩则表现为无 Ce 异常,有些甚至表现为偏正异常。鉴于样品采样间距不大,原岩岩性(沉积环境)应相差甚微,故烧熔岩与烧烤岩在稀土元素分配规律上的上述差异可能是由于烧变过程中元素分异造成的。

(4)研究表明,煤层自燃事件可以认为是由构造运动间接诱发的,并且自燃事件所形成烧变岩的年龄可以代表构造运动发生的时间(Novikov and Sokol, 2007)。据此,鄂尔多斯盆地北部烧变岩的年龄特点——自晚白垩世中期至第四纪阶段性分布,正可以佐证盆地(北部)晚白垩世以来曾经历以主体长期、幕式整体抬升和强烈不均匀剥蚀为特点的构造演化。

(5)煤层大面积自燃受气候因素的控制,一般认为干燥气候是煤层自燃发生的条件。现今的煤田活火区发生地带也主要集中在日照度强的干旱—半干旱地区,如中国的新疆地区、印度尼西亚的加里曼丹和苏门答腊岛(Whitehouse, 2004)等地。据此,我们完全有理由认为大面积的煤层自燃事件可以表征当时的一种干燥气候环境。因而鄂尔多斯盆地北部烧变岩的大范围存在表明该区在煤层自燃发生时期属于干燥气候环境。

6 结论

(1)烧变岩岩石中所含矿物具有明显的烧熔痕迹,含高铁伊利石而未见其他粘土矿物,这些均为高温烘烤所致;烧变岩异常高的磁化率值是由高温烘烤条件下其他含铁矿物转变为磁铁矿和赤铁矿等强磁性铁矿物所引起的。

(2)烧变岩的形成过程中,稀土元素发生分异作用,导致烧熔岩与烧烤岩在稀土元素配分上的差异:烧熔岩的稀土元素总含量明显较低,并且烧熔岩还显示明显的Ce负异常。尽管如此,各烧变岩样品的稀土配分特征,如稀土元素总量值范围、轻稀土富集及Eu亏损等,均显示近于沉积岩的特征。

(3)鄂尔多斯盆地北部烧变岩的形成跨越时间长——自晚白垩世中期至第四纪,且具阶段性形成的特点。这一形成时间的特点,表明盆地北部晚白垩世以来曾经历以主体长期、幕式整体抬升和强烈不均匀剥蚀为特点的构造演化,同时又表征盆地北部在这一时期整体处于干燥气候环境下。

References

- Abanda, P. A., Hannigan, R. E., 2006. Effect of diagenesis on trace element partitioning in shales. *Chem. Geol.*, 230: 42—59.
- Bentor, Y. K., Kastner, M., Perlman, I., et al., 1981. Combustion metamorphism of bituminous sediments and the formation of melts of granitic and sedimentary composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 2229—2255.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shannxi Province, 1989. Regional geology of Shaanxi Province. Geological Pub. House, Beijing, 1—610 (in Chinese).
- Chen, D. Q., Chen, G., 1990. The practical rare-earth element geochemistry. Metallurgical Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Cosca, M. A., Essene, E. J., Geissman, J. W., et al., 1989. Pyrometamorphic rocks associated with naturally burned coal beds, Powder River basin, Wyoming. *Am. Mineral.*, 74: 85—100.
- De Boer, C. B., Dekkers, M. J., Van Hoof, T. A. M., 2001. Rock-magnetic properties of TRM carrying baked and molten rocks straddling burnt coal seams. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 126: 93—108.
- Elderfield, H., Greaves, M. J., 1982. The rare earth elements in seawater. *Nature*, 296: 214—219.
- Ellyett, C. D., Fleming, A. W., 1974. Thermal infrared imagery of the burning mountain coal fire. *Remote Sens. Environ.*, 3(1): 79—86.
- Gromet, L. P., Dymek, R. F., Haskin, L. A., et al., 1984. The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 2469—2482.
- Guan, H. Y., Van Ganderen, J. L., Tan, Y. J., et al., 1997. The environment investigation and study of coal bed self-combustion in northern China. Coal Industry Press, Beijing, 54 (in Chinese).
- Heffern, E. L., Coates, D. A., 2004. Geologic history of natural coal-bed fires, Powder River basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, 59(1—2): 25—47.
- Krsová, M., Krs, M., Pruner, P., et al., 1989. Palaeointensity of the geomagnetic field during Upper Cainozoic derived from palaeo-slugs and porcellanites in North Bohemia. *Stud. Geophys. Geod.*, 33: 338—361.
- Li, S. Z., 1988. The methods and application of rock and mineral magnetism study. Metallurgical Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Lindqvist, J. K., Hatherton, T., Mumme, T. C., 1985. Magnetic anomalies resulting from baked sediments over burnt coal seams in southern New Zealand. *N. Z. J. Geol. Geophys.*, 28: 405—412.
- Liu, C. Y., Zhao, H. G., Gui, X. J., et al., 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617—638 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. J., 1959. Discussion of the characteristics and genesis of burnt rock and the burnt regularity of underground fire. *Geological Review*, 19(5): 209—211 (in Chinese).
- McLennan, S. M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21: 169—200.
- Niu, J. G., 2001. Hydrogeological characteristics of burnt rock in Huojitu Mine, Shenfu mining area. *Coal Geology & Explo-*

- ration, 29(1):37—39 (in Chinese with English abstract).
- Nolter, M. A., Vice, D. H., 2004. Looking back at the Centuria coal fire: A synopsis of its present status. *Int. J. Coal Geol.*, 59(1—2):99—106.
- Novikov, I. S., Sokol, E. V., 2007. Combustion metamorphic events as age markers of orogenic movements in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7):1561—1572.
- Pan, Y. X., Lin, M., Hao, J. Q., 1999. Rock-magnetic properties related to thermal mineral alterations in siderite samples. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(6):756—763 (in Chinese with English abstract).
- Prakash, A., Gupta, R. P., Saraf, A. K., 1997. A Landsat TM based comparative study of surface and subsurface fires in the Jharia coalfield, India. *Int. J. Remote Sens.*, 18:2463—2469.
- Rădan, S. C., Rădan, M., 1998. Rock magnetism and paleomagnetism of porcelanites/clinkers from the western Dacic basin (Romania). *Geol. Carpat.*, 49:209—211.
- Shang, G. L., Jiang, X. M., Liu, D. M., 1990. The self-combustion element of Jurassic coal bed and its burnt characteristics in northern Shenmu. *Coal Geology of China*, 2(1):25—29 (in Chinese).
- Sholkovitz, E. R., 1990. Rare-earth elements in marine sediments and geochemical standards. *Chem. Geol.*, 88(3—4):333—347.
- Sokol, E., Volkova, N., Lepezin, G., 1998. Mineralogy of pyrometamorphic rocks associated with naturally burned coal-bearing spoil-heaps of the Chelyabinsk coal basin, Russia. *Eur. J. Mineral.*, 10:1003—1014.
- Sun, J. Q., Ma, R. S., Shu, L. S., 2001. Petrologic characteristics of burnt rocks from coalfield selfcombustion at Urumqi, Xinjiang. *Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute*, (4):15—19 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford.
- Tyráček, J., 1994. Stratigraphical interpretation of the paleomagnetic measurements in the porcellanites of the Most basin, Czech Republic. *Vestník Českého Geologického ústavu*, 69(2):83—87.
- Wang, Y. S., 1986. Burnt rocks and its characteristics. *Science and Technology of Xinjiang Geology*, (2):30—31 (in Chinese).
- Whitehouse, A. E., Mulyana, A. A. S., 2004. Coal fires in Indonesia. *International Journal of Coal Geology*, 59:91—97.
- Xu, H. J., Jin, Z. M., Ou, X. G., 2006. Lithology determination of rocks from CCSD 100—2 000 m main hole by magnetic susceptibility and density using discriminant function analysis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4):513—519 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, G. Q., 1995. Thermal modelling research of clay minerals. *Experimental Petroleum Geology*, 17(3):286—292 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L., Gao, S., Liu, Y. S., et al., 2007. Geochemistry and implications of elastic sedimentary rocks from the northern margin of Yangtze craton. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1):29—38 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈德潜, 陈刚, 1990. 实用稀土元素地球化学. 北京: 冶金工业出版社.
- 管海晏, 冯·亨特伦, 谭永杰, 等, 1997. 中国北方煤田自然环境影响调查与研究. 北京: 煤炭工业出版社, 54.
- 李色篆, 1988. 岩矿石磁性研究方法及其应用. 北京: 冶金工业出版社.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. 地质学报, 80(5):617—638.
- 刘志坚, 1959. 论烧变岩的特征、成因及地下火燃烧的规律性. 地质论评, 19(5):209—211.
- 牛建国, 2001. 神府矿区活鸡兔矿井烧变岩水文地质特征. 煤田地质与勘探, 29(1):37—39.
- 潘永信, 林緬, 郝锦绮, 1999. 菱铁矿热转变过程中岩石磁学性质基本特征. 地球物理学报, 42(6):756—763.
- 陕西省地质矿产局, 1989. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1—610.
- 尚桂林, 蒋新民, 刘大民, 1990. 神木北部侏罗纪煤层自然因素及其烧变特征. 中国煤田地质, 2(1):25—29.
- 孙家齐, 马瑞士, 舒良树, 2001. 新疆乌鲁木齐煤田自然烧变岩岩石特征. 南京建筑工程学院学报, (4):15—19.
- 王玉山, 1986. 烧变岩及其特征. 新疆地质科技, (2):30—31.
- 徐海军, 金振民, 欧新功, 2006. 磁化率和密度对中国大陆科学钻探主孔 100—2 000 m 岩石类型的判别. 地球科学——中国地质大学学报, 31(4):513—519.
- 周国清, 1995. 粘土矿物的热模拟研究. 石油实验地质, 17(3):286—292.
- 周炼, 高山, 刘勇胜, 等, 2007. 扬子克拉通北缘碎屑沉积岩地球化学特征及意义. 地球科学——中国地质大学学报, 32(1):29—38.