

李回贵, 李化敏, 李长兴, 等. 应用扫描电镜 - X 射线能谱研究神东矿区砂岩中结构面的微观结构及元素特征[J]. 岩矿测试, 2018, 37(1): 70 - 78.

LI Hui-gui, LI Hua-min, LI Chang-xing, et al. Study on Microstructure and Elements in the Sandstone of the Shendong Coal Field, Inner Mongolia by SEM-EDX[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(1): 70 - 78.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201705120080】

# 应用扫描电镜 - X 射线能谱研究神东矿区砂岩中结构面的微观结构及元素特征

李回贵<sup>1</sup>, 李化敏<sup>2</sup>, 李长兴<sup>1</sup>, 陈善乐<sup>1</sup>

(1. 贵州工程应用技术学院矿业工程学院, 贵州 毕节 551700;

2. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 神东矿区砂岩地层中存在大量的结构面, 这种结构面的存在会对岩层的力学性能、超声波传播、破坏形式以及力的传递等都有显著的影响, 但是结构面的微观结构及元素特征是其主要原因之一。本文以布尔台煤矿、大柳塔煤矿和补连塔煤矿地层砂岩中的结构面为研究对象, 采用 FEI-SEM 扫描电镜和能谱仪对不同结构面的微观结构和元素特征进行了研究。结果表明: 神东矿区砂岩中的结构面可以分为两大类 (I 和 II), 其中 I 类又可以分为三个亚类 (I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub>); I 类主要含有煤, II 类主要含有白云母。I<sub>1</sub> 和 II 类结构面颗粒感不明显, 颗粒边界不清晰, I<sub>2</sub> 和 I<sub>3</sub> 类结构面颗粒感比较明显, 颗粒边界比较清晰。I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub> 和 II 类型结构面的孔隙直径和裂隙长度 (μm) 分别为 2.1、81.8、8.9、38.8、4.5、143.7 和 3.8、13.8。I<sub>1</sub> 类结构面主要组成元素是 C、O、Si、Al、K、Ti 和 Fe; I<sub>2</sub> 类结构面主要为 C; I<sub>3</sub> 类结构面主要为 C、O、Si、Al、K 和 Mg; II 类结构面的主要元素有 C、O、Si、Al、K 和 Ti。神东矿区地层中结构面主要元素为 C 和 O, 两种类型的微观结构存在差异。研究结果有助于进一步揭示神东矿区顶板动力灾害及台阶下沉等现象。

**关键词:** 结构面; 微观结构; 孔隙; 元素特征; 神东矿区

**中图分类号:** P575.1; P575.2      **文献标识码:** A

神东矿区煤系地层砂岩中存在大量的节理、层理等不连续弱面, 具有明显的各向异性。大量的研究表明, 层理不仅仅对岩体的力学性质有显著的影响, 同时也会对顶板的运动规律、破断方式、能量的传递以及支架选型等都有一定的影响<sup>[1-3]</sup>。但是层理的微观结构、成分特征等是层理对岩体力学性质产生显著影响的根本原因。因此, 研究层理的微观结构非常有必要。

目前国内外学者针对岩石的微观结构开展了大量的相关研究。已有多位学者采用 X 射线及扫描电镜的方法对不同类型岩石的成分、元素和微观结

构特征进行了研究<sup>[4-8]</sup>。杨春和等<sup>[9]</sup>采用偏光显微镜、扫描电镜、X 射线粉晶衍射针对板岩在不同浸泡时间下的微观结构进行了分析, 并且分析了微观结构对板岩力学性质的影响, 研究认为板岩随着水的浸泡作用使得矿物颗粒产生膨胀, 胶结程度越来越差。石秉忠等<sup>[10]</sup>对须家河组三段的硬脆性泥页岩水化过程的微观结构进行了实验研究, 认为硬脆性泥页岩在水化过程中先通过原生的孔缝促进内部矿物发生水化作用, 进而慢慢产生扩展发生宏观破裂。时贤等<sup>[11]</sup>以页岩为研究对象, 采用计算机断层 (CT) 扫描技术、扫描电镜等设备对页岩的微观结构进行了研究。薛华庆等<sup>[12]</sup>采用 CT 扫描技术对油

收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-11-20; 接受日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (U1261207); 国家自然科学基金资助项目 (51604093); 贵州省重点学科矿业工程学科资助项目 (ZDXK[2016]13); 贵州省联合基金资助项目 (LH 字 [2016]7051)

作者简介: 李回贵, 博士, 讲师, 从事矿山岩石力学研究。E-mail: lihuigui1221@163.com。

砂、致密砂岩和页岩的微观结构进行了研究,并且分析了 CT 扫描技术与常规测试方法的差异。曹平等<sup>[13-14]</sup>运用 Talysurf CLI2000 三维表面激光形貌仪对岩石节理表面形貌特征进行了研究,认为节理面的分维数与 JRC 之间存在函数关系,并且温度对水岩作用存在一定的影响。陈世江等<sup>[15]</sup>首先基于数值图像技术对岩石节理进行扫描,再利用分形理论对其进行了分析。

以上研究虽然在一定程度上揭示了节理的形貌特征,但是这些研究主要集中在节理的宏观形貌特征,对于其微观结构和成分特征研究相对较少,尤其是针对天然形成的结构面研究更加鲜有报道。因此,为了研究神东矿区地层中结构面的微观结构及元素特征,本文以神东矿区布尔台煤矿、大柳塔煤矿和补连塔煤矿覆岩中采集的结构面试样为研究对象,采用扫描电镜和 X 射线能谱仪对其结构面的微观结构和元素特征进行了研究。

## 1 实验部分

### 1.1 试样采集

本文试样采集于神东矿区布尔台煤矿、大柳塔煤矿和补连塔煤矿。试样采集的方法采用地面钻孔取心的方法,然后在实验室内采用美国 GCTS 切割机把含有结构面的一段岩心切割下来,自然干燥 7 天。

### 1.2 试验设备及试验方案

本文的扫描电镜和 X 射线能谱实验是采用美国 FEI 场发射扫描电镜。该仪器具有超高分辨率,能做各种固态样品表面形貌的二次电子像、反射电子像观察及图形处理,配有高性能 X 射线能谱仪,能同时进行样品表层的微区点、线、元素的定性、半定量及定量分析,具有形貌和化学组分综合分析能力。为了分析不同结构面微观结构及元素的差异,每组结构面试样重复进行三次实验。实验的主要步骤如下。

(1) 取样。每组试样选取三个样品,样品的尺寸要求长 8 mm、宽 8 mm、高 5 mm 左右。然后对样品表面的粉尘和离散的颗粒进行处理。

(2) 干燥试样。由于扫描电镜是在高真空下进行的,因此需要进行干燥。

(3) 固定试样。用导电的电胶把试样固定在小圆盘上,然后把掉下来的颗粒处理掉。

(4) 镀膜。采用喷金仪在高真空下对试样进行镀膜。

(5) 扫描电镜试验。用钳子把镀好膜的试样放入载物台上,然后开始进行试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构面的宏观特征分析

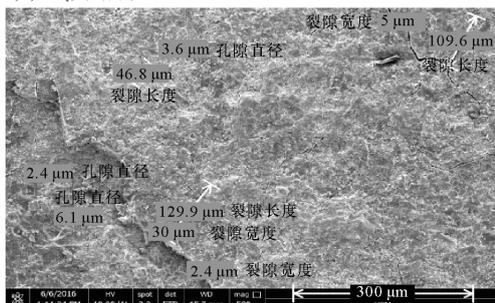
为了研究砂岩结构面的宏观结构特征,采用高清数码相机采集砂岩结构面的相片。砂岩中的结构面主要可以分为两大类,第 I 类是以煤为主,可以分为 I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub> 三个小类;第 II 类是以云母为主。两种结构面特征为: I<sub>1</sub> 类,植物的叶炭化形成的结构面,该类结构面中保留了很明显的植物叶形状,结构面比较光滑,孔裂隙相对较少,结构面中叶化石相互交错,没有一定的规律; I<sub>2</sub> 类,植物树干炭化形成的结构面,该类结构面能够观察到一定的裂隙,结构面不是很光滑; I<sub>3</sub> 类,以小颗粒状煤形成的结构面,该类结构面没有明显的孔裂隙,但是其结构面很粗糙,有一定的反光性; II 类,该类结构面是以白云母为主形成的结构面,没有明显的孔裂隙,结构面比较粗糙,能够清晰地观察到白云母。

从以上分析和图中可以发现,两种类型砂岩中的结构面具有一定的差异。I<sub>1</sub> 类结构面在被破坏时具有一定的抗拉能力和抗压能力,但是由于其结构面比较光滑,结构面断裂之后其抗剪切能力可能相对较小。I<sub>2</sub> 类结构面由于其主要物质是碳,属于有机质与砂岩,基本上没有黏聚力,结构面的抗拉强度基本上为 0,抗拉和抗剪能力相对较弱,如果砂岩中存在这种连续的结构面,其基本上不能定为同一层,应该分为两层。I<sub>3</sub> 类结构面相对粗糙,具有一定的摩擦力,因此这类结构面在断裂之后其抗剪强度相对较大。由于这种结构面比较薄,也具有一定的黏聚力,因而具有一定的抗拉强度和剪切强度。II 类结构面以有机质和云母为主,两种物质与砂岩的黏聚力相对较小,但是其结构面相对粗糙,因此该类结构面砂岩具有一定的抗剪强度,但是抗拉强度可能相对较小。

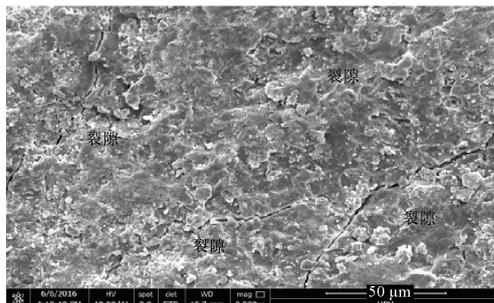
### 2.2 结构面的微观结构特征分析

本文采用了环境扫描电镜测试了神东矿区砂岩中两种典型结构面的微观结构特征。测试过程中两种典型的结构面试样都被分别放大了 100 倍、200 倍、500 倍、1000 倍、2000 倍和 5000 倍。图 1 是两种砂岩被放大 500 倍和 2000 倍的微观结构特征图<sup>[16-17]</sup>,可以看出,两种结构面的微观结构特征具有明显的差异。I<sub>1</sub> 类结构面颗粒感不明显,颗粒边界不清晰,但是其表面比较平整光滑;能够观察到一

(1) I<sub>1</sub>类结构面

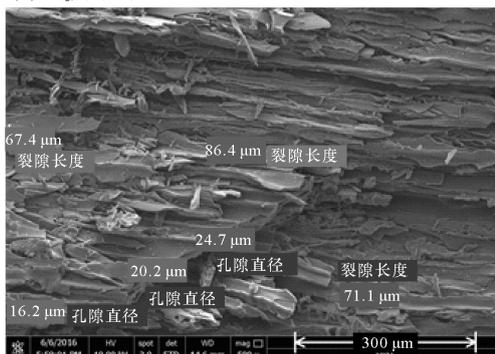


放大500倍

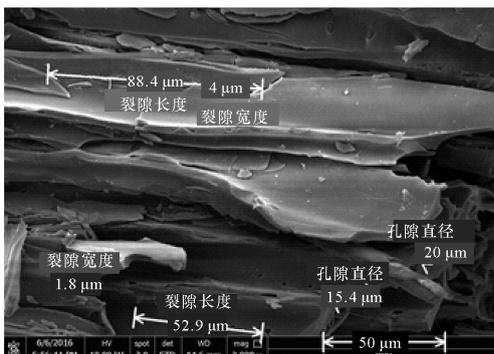


放大2000倍

(2) I<sub>2</sub>类结构面

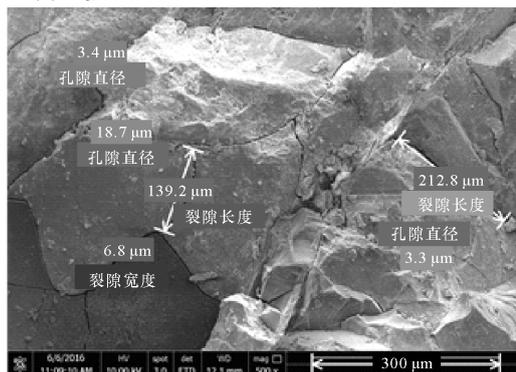


放大500倍

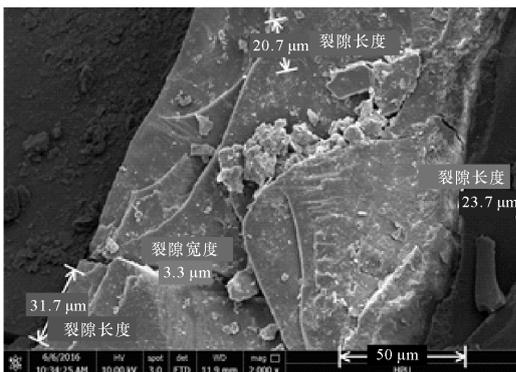


放大2000倍

(3) I<sub>3</sub>类结构面

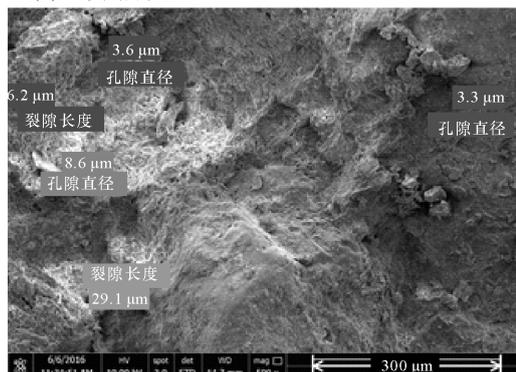


放大500倍

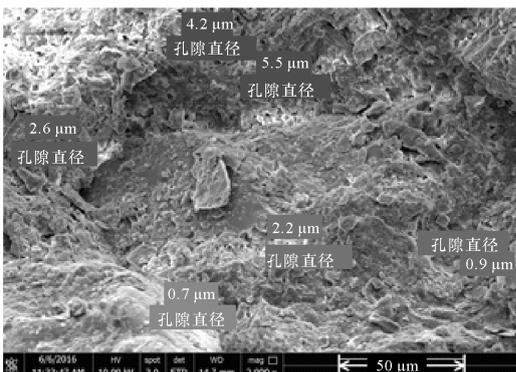


放大2000倍

(4) II类结构面



放大500倍



放大2000倍

图1 不同类型结构面微观结构特征分析

Fig.1 Analysis on microstructure characteristics with different type of structural planes

定量的孔隙,但是孔隙的直径比较小;部分试样可以观察到明显的裂隙,并且裂隙的长度和宽度比较大。 $I_2$ 类结构面颗粒感比较明显,颗粒边界比较清晰,但是其表面非常粗糙、不光滑;能够观察到大量的孔隙,并且孔隙的直径比较大;能够观察到大量的裂隙,并且裂隙的长度和宽度比较大。 $I_3$ 类结构面颗粒感较明显,颗粒边界相对较清晰,并且表面相对较光滑平整;能够观察到少量的孔隙,并且孔隙的直径特别小;能够观察到大量的裂隙,并且裂隙的长度和宽度都比较大。II类结构面的颗粒感不明显,颗粒边界也不是特别清晰,并且表面相对较粗糙、不光滑;能够观察到少量的裂隙,但是裂隙的宽度和长度都较小;能够观察到一定量的孔隙,但是孔隙的直径特别小。

表 1 列出了神东矿区砂岩中两种典型结构面的孔隙和裂隙参数。图 2 是神东矿区砂岩中两种典型结构面的裂隙长度和孔隙直径分布特征图。从表 1 中可以看出,两种类型结构面的裂隙长度、孔隙直径和孔裂隙面积百分比具有很大的差异。裂隙长度最大的是  $I_3$ 类结构面,平均值为  $143.7 \mu\text{m}$ ,但是其标准偏差也是最大的,其值为  $95.6 \mu\text{m}$ ,这说明不仅  $I_3$ 类结构面的裂隙长度大,而且其离散程度也大;裂隙长度最小的是  $I_2$ 类结构面,平均值为  $13.8 \mu\text{m}$ ,并且其标准偏差明显偏小,其值为  $6.5 \mu\text{m}$ ,这说明  $I_2$ 类结构面不仅裂隙长度特别小,而且其裂隙长度一致性也很好。两种类型结构面的孔隙直径分别为  $2.1 \mu\text{m}$ 、 $8.9 \mu\text{m}$ 、 $4.5 \mu\text{m}$  和  $3.8 \mu\text{m}$ 。孔隙直径最大的是  $I_2$ 类结构面,其标准偏差也是最大的,说明虽然孔隙直径大,但是孔隙分布不均一,孔隙直径最小的是  $I_1$ 类结构面,同时其标准偏差也是最小的,说明  $I_1$ 类结构面不仅孔隙直径小,而且其孔隙直径相差不大。孔隙比表面积百分比是指某种结构面的微观结构图中孔隙和裂隙的面积与总的微观结构图面积的比值。从表 1 中的数据可以看出,  $I_1$ 、 $I_3$ 和 II类结构面的孔裂隙面积百分比相差不大,但是  $I_2$ 类结构面的特别大。

从图 2 中可以发现,两种典型结构面孔隙直径的大小、孔隙直径分布、孔隙个数、裂隙长度、裂隙长度的分布以及裂隙个数具有明显的差异。 $I_1$ 类结构面的裂隙个数最多,裂隙长度的范围较大,裂隙长度主要分布在  $150 \mu\text{m}$  以下;孔隙直径相对较小,主要分布在  $3.6 \mu\text{m}$  以下。 $I_2$ 类结构面的裂隙长度范围和裂隙的个数比  $I_1$ 类结构面的要小,裂隙长度主要分布在  $60 \mu\text{m}$  以下,低于  $60 \mu\text{m}$  裂隙个数的百分

比达到了 78.7%;孔隙直径是最大的,但是其孔隙个数要小于  $I_2$ 类结构面,孔隙的直径主要分布在  $21 \mu\text{m}$  以下,低于  $21 \mu\text{m}$  孔隙个数的百分比达到了 85.4%。 $I_3$ 类结构面的裂隙长度是最大的,但是其裂隙个数要比  $I_1$ 类和  $I_2$ 类结构面少,裂隙长度的分布范围比较大;孔隙个数是最少的,并且孔隙直径相对较小,这说明  $I_3$ 类结构面的孔隙发育比较少,并且其直径也相对较小。 $I_2$ 类结构面的裂隙长度范围是最小的,并且裂隙个数也是最少的,这说明  $I_2$ 类结构面的裂隙发育特别少; $I_2$ 类结构面的孔隙个数是最多的,孔隙直径的范围也比较大,在  $0 \sim 24 \mu\text{m}$  以内都发现了孔隙,但是主要分布在  $8 \mu\text{m}$  以内,直径小于  $8 \mu\text{m}$  的孔隙个数的百分比达到了 77.6%。

表 1 不同类型结构面孔裂隙特征

Table 1 Pore and fracture characteristics of different type of structural planes

类型	裂隙长度( $\mu\text{m}$ )		孔隙直径( $\mu\text{m}$ )		孔裂隙面积百分比(%)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	500 倍	2000 倍
$I_1$ 类	81.8	59.8	2.1	1.3	7.0	8.3
$I_2$ 类	38.8	34.1	8.9	8.8	29.7	19.8
$I_3$ 类	143.7	95.6	3.3	4.5	7.7	7.3
II类	13.8	6.5	6.4	3.8	8.0	7.8

## 2.3 结构面的元素及能谱特征分析

### 2.3.1 结构面的元素特征分析

表 2 是神东矿区砂岩中典型的两种结构面元素质量和原子半定量分析数据。可以发现,两种类型结构面的组成元素具有明显的差异。 $I_1$ 类结构面主要组成元素是 C、O、Si、Al、K、Ti 和 Fe,其中 C、O 和 Si 的含量比重较大,C 的质量百分比和原子百分比都是最大的,O 次之,Si 第三,从这些元素分析中可以发现,  $I_1$ 类结构面中应该含有 C、石英和金红石。 $I_2$ 类结构面中主要组成元素是 C 和 O,C 的质量百分比和原子百分比分别达到了 86.19% 和 89.26%,从元素分析结果中可以看出  $I_2$ 类结构面主要为 C。 $I_3$ 类结构面的主要元素有 C、O、Si、Al、K 和 Mg,其中 C、O、Si 和 Al 的比重较大,Si 的质量百分比和原子百分比分别达到了 51.03% 和 40.20%,C 的质量百分比和原子百分比分别为 9.87% 和 18.19%,这说明  $I_3$ 类结构面的石英含量相对较高,并且含有一定量 C。II类结构面主要组成元素有 C、O、Si、Al、K 和 Ti,其中 C、O、Si 和 Al 的比重较大,O 元素的质量百分比和原子百分比最大,分

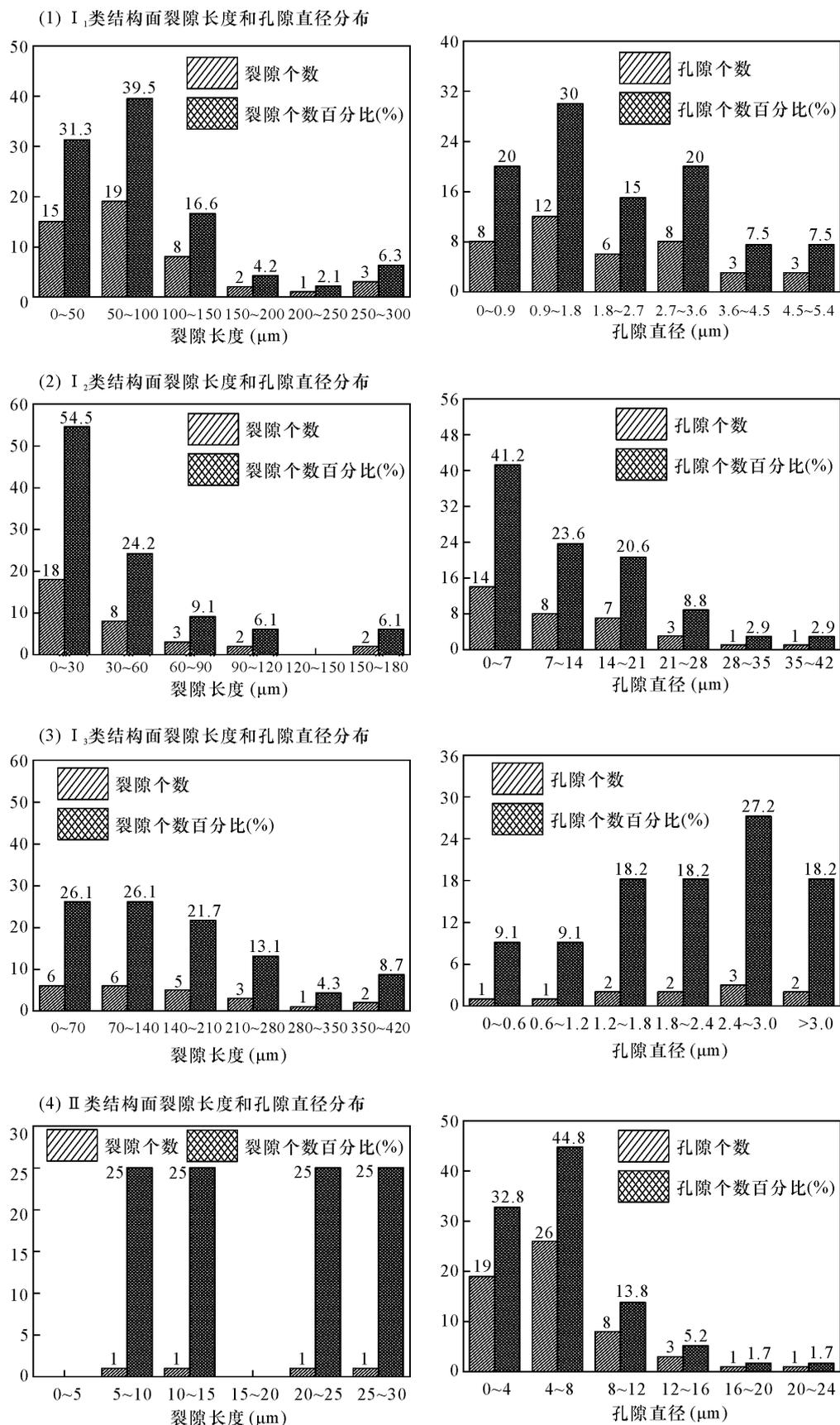


图 2 不同类型结构面裂隙及孔隙参数特征

Fig. 2 Characteristics of fracture and pore parameters of different type of structural planes

别为39.36%和47.84%,并且Ⅱ类结构面中C和Ti元素的质量百分比和原子百分比也有一定的含量,质量百分比分别为12.40%和4.87%,原子百分比分别为20.08%和1.98%,这说明Ⅱ结构面中含有一定量的石英、碳和金红石。

表 2 不同类型结构面元素质量和原子半定量分析

Table 2 Qualitative and semi-quantitative analysis of elements with different type of structural planes

元素	I <sub>1</sub> 类		I <sub>2</sub> 类		I <sub>3</sub> 类		Ⅱ类	
	质量百分比 (%)	原子百分比 (%)	质量百分比 (%)	原子百分比 (%)	质量百分比 (%)	原子百分比 (%)	质量百分比 (%)	原子百分比 (%)
C	48.32	60.99	86.19	89.26	9.87	18.19	12.40	20.08
O	29.46	27.91	13.81	10.74	18.22	25.19	39.36	47.84
Si	11.98	6.46	-	-	51.03	40.20	26.53	18.37
Al	5.76	3.24	-	-	16.91	13.87	14.98	10.80
K	1.37	0.53	-	-	3.05	1.72	1.87	0.93
Mg	-	-	-	-	0.92	0.84	-	-
Ti	0.54	0.17	-	-	-	-	4.87	1.98
Fe	2.58	0.70	-	-	-	-	-	-

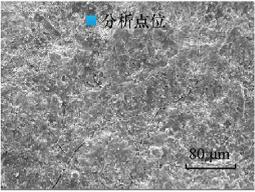
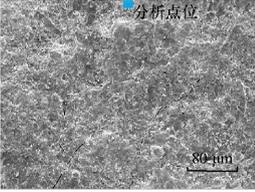
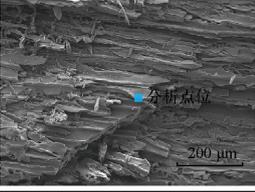
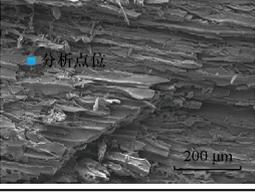
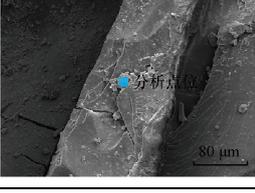
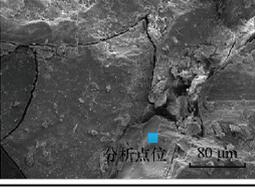
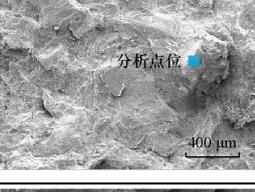
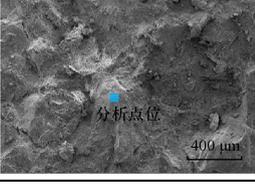
### 2.3.2 结构面的元素特征分析

传统的光学显微镜一般只能观察矿物的微观结构、孔隙特征及孔隙分布特征,对于矿物的类型很难鉴定,但是结合扫描电镜与能谱仪不仅可以观察到不同类型结构面的微观结构、孔隙特征及孔隙分布,并且可以对不同结构面的矿物进行初步的分析<sup>[4-8,18]</sup>。

表3是神东矿区砂岩中两种典型结构面的能谱特征分析结果。通过表3可以发现,I<sub>1</sub>类结构面的表面具有许多碳颗粒,并且有少量高岭石。I<sub>2</sub>类结构面分析的两个点位C元素的质量百分比和原子百分比都超过90%,说明I<sub>2</sub>类结构面的主要成分是碳。I<sub>3</sub>类结构面中分析的两个点位C元素的质量百分比和原子百分比都较高,说明I<sub>3</sub>类结构面存在碳;通过对I<sub>3</sub>类结构面第一个分析点位的Al、Si和O原子百分比进行分析可知,Al、Si、O元素质量比近似等于1:1:4.5,这与高岭石的原子比例相似,因此说明表面还存在高岭石。Ⅱ类结构面的两个分析点位中没有发现C元素的存在,通过对第一个分析点位元素的原子比例分析可知,第一个点位的矿物是长石;第二个点位只有Si和O两种元素,这说明第二个点位的矿物是石英。

表 3 不同类型结构面 X 射线能谱特征分析结果

Table 3 Analytical results of X-ray energy spectrum characteristics of different type of structural planes

结构面类型	矿物	原子百分比 (%)	元素含量 (%)	分析点位
I <sub>1</sub> 类	碳	C:87.21	C:83.65	
		O:12.79	O:16.35	
I <sub>1</sub> 类	高岭石	C:71.57	C:61.68	
		O:21.63	O:24.83	
		Si:4.17	Si:8.41	
		Al:2.63	Al:5.08	
I <sub>2</sub> 类	碳	C:92.57	C:90.34	
		O:7.43	O:9.66	
I <sub>2</sub> 类	碳	C:92.76	C:90.58	
		O:7.24	O:9.42	
I <sub>3</sub> 类	高岭石	C:67.52	C:56.69	
		O:23.90	O:26.74	
		Si:5.06	Si:9.94	
		Al:3.51	Al:6.63	
I <sub>3</sub> 类	碳	C:82.58	C:78.07	
		O:17.42	O:21.93	
Ⅱ类	长石	Si:36.08	Si:43.53	
		O:45.83	O:31.50	
		K:7.68	K:12.90	
		Al:10.41	Al:12.07	
Ⅱ类	石英	Si:63.08	Si:63.08	
		O:36.92	O:36.92	

### 3 结论

本文从宏观和微观等多角度对神东矿区煤系地层中结构面的特征进行了分析,研究表明神东矿区砂岩地层中的结构面从宏观特征上主要可以分为两大类,第Ⅰ类以煤为主,主要有三个亚类分别为Ⅰ<sub>1</sub>、Ⅰ<sub>2</sub>、Ⅰ<sub>3</sub>,第Ⅱ类以云母为主。两种结构面的主要元素都是C和O,但是两种结构面的微观结构有显著的差异。虽然这两种结构面在微观结构上存在显著的差异,但是这两种结构面都会大大降低岩石的抗拉强度,这也是导致神东矿区矿山压力显现剧烈、地表容易形成台阶式下沉的原因之一。

### 4 参考文献

- [1] Behrestaghi M H N, Rao K S, Ramamurthy T. Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India [J]. *Engineering Geology*, 1996, 44(1): 183 - 201.
- [2] Exadaktylos G E, Kaklis K N. Applications of an explicit solution for the transversely isotropic circular disc compressed diametrically [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(2): 227 - 243.
- [3] Gatelier N, Pellet F, Loret B. Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 335 - 354.
- [4] 周尚文,薛华庆,郭伟,等.基于扫描电镜和X射线能谱的页岩矿物分析方法[J].*中国石油勘探*, 2017, 22(6): 27 - 33.  
Zhou S W, Xue H Q, Guo W, et al. A mineral analysis method for shale based on SEM and X-ray EDS [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(6): 27 - 33.
- [5] 王满,王英伟.平顶山矿区煤体微观结构的扫描电镜分析[J].*煤矿安全*, 2014, 45(7): 169 - 171.  
Wang M, Wang Y W. SEM analysis of coal microstructure in Pingdianshan mining area [J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(7): 169 - 171.
- [6] 李长明,宋丽莎,王立久,等.砒砂岩的矿物成分及其抗蚀性[J].*中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 11 - 16.  
Li C M, Song L S, Wang L J, et al. Mineral composition and anti-erodibility of Pisha sandstone [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(2): 11 - 16.
- [7] 王建其,柳小明.X射线荧光光谱法分析不同类型岩石中10种主量元素的测试能力验证[J].*岩矿测试*, 2016, 35(2): 145 - 151.  
Wang J Q, Liu X M. Proficiency testing of the XRF method for measuring 10 major elements in different rock types [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2016, 35(2): 145 - 151.
- [8] 赵康,赵红宇,贾群燕.岩爆岩石断裂的微观结构形貌分析及岩爆机理[J].*爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 913 - 918.  
Zhao K, Zhao H Y, Jia Q Y. An analysis of rockburst fracture micromorphology and study of its mechanism [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 913 - 918.
- [9] 杨春和,冒海军,王学潮,等.板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J].*岩土力学*, 2006, 27(12): 2090 - 2098.  
Yang C H, Mao H J, Wang X C, et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2090 - 2098.
- [10] 石秉忠,夏柏如.硬脆性泥页岩水化过程的微观结构变化[J].*大庆石油学院学报*, 2011, 35(6): 28 - 34.  
Shi B Z, Xia B R. The variation of microstructures in the hard brittle shale hydration process [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2011, 35(6): 28 - 34.
- [11] 时贤,程远方,蒋恕,等.页岩微观结构及岩石力学特征实验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增刊2): 3439 - 3445.  
Shi X, Cheng Y F, Jiang S, et al. Experimental study of microstructure and rock properties of shale samples [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Supplement 2): 3439 - 3445.
- [12] 薛华庆,胥蕊娜,姜培学,等.岩石微观结构CT扫描表征技术研究[J].*力学学报*, 2015, 47(6): 1073 - 1078.  
Xue H Q, Xu R N, Jiang P X, et al. Characterization of rock microstructure using 3D X-ray computed tomography [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 1073 - 1078.
- [13] 曹平,宁果果,范祥,等.不同温度的水岩作用对岩石节理表面形貌特征的影响[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(4): 1510 - 1516.  
Cao P, Ning G G, Fan X, et al. Influence of water-rock interaction on morphological characteristic of rock joint surface at different temperatures [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(4): 1510 - 1516.
- [14] 曹平,贾洪强,刘涛影,等.岩石节理表面三维形貌特征的分形分析[J].*岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增刊2): 3839 - 3843.  
Cao P, Jia H Q, Liu T Y, et al. Fractal analysis of three-

dimensional topography characteristics of rock joint surface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supplement 2): 3839-3843.

- [15] 陈世江,朱万成,张敏思,等. 基于数字图像处理技术的岩石节理分形描述[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2087-2092.

Chen S J, Zhu W C, Zhang M S, et al. Fractal description of rock joints based on digital image processing technique [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2087-2092.

- [16] 焦淑静,韩辉,翁庆萍,等. 页岩孔隙结构扫描电镜分析方法研究[J]. 电子显微镜学报, 2012, 31(5): 432-436.

Jiao S J, Han H, Weng Q P, et al. Scanning electron microscope analysis of porosity in shale [J]. Journal of

Chinese Electron Microscopy Society, 2012, 31(5): 432-436.

- [17] Li H G, Li H M, Gao B, et al. Study on pore characteristics and microstructure of sandstones with different grain sizes [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 136: 364-371.

- [18] 王坤阳,杜谷,杨玉杰,等. 应用扫描电镜与X射线能谱仪研究黔北黑色页岩储层孔隙及矿物特征[J]. 岩矿测试, 2014, 33(5): 634-639.

Wang K Y, Du G, Yang Y J, et al. Characteristics study of reservoirs pores and mineral compositions for black Shale, Northern Guizhou, by using SEM and X-ray EDS [J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(5): 634-639.

## Study on Microstructure and Elements in the Sandstone of the Shendong Coal Field, Inner Mongolia by SEM-EDX

LI Hui-gui<sup>1</sup>, LI Hua-min<sup>2</sup>, LI Chang-xing<sup>1</sup>, CHEN Shan-le<sup>1</sup>

(1. College of Mining Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

### Highlights

- The microstructure and element characteristics of structural planes were studied by using Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectrometer.
- The structural plane in sandstone of Shendong coal field can be divided into two types.
- The main elements of structure formation in Shendong mining area are C and O, but the microstructures of the two types of structural planes have differences.



Side

Structural planes

Front

**Abstract:** The sandstone strata in the Shendong coal field have lots of structural planes, which has a significant influence on the mechanical properties, ultrasonic wave propagation, failure mode and force transfer of the strata. The structural plane in the sandstone strata of the Buertai, Daliuta, Bulianta mine was chosen as the research object, and their microstructure and element characteristics were studied by using FEI-SEM and Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF). Results show that the structural planes in sandstone of the Shendong coal field can be divided into two types ( I and II ), with I being further divided into three subgroups ( I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub> ). Type I mainly contains coal, whereas type II mainly contains muscovite. Types I<sub>1</sub> and II structural plane particles are not obvious and the particle boundaries are not clear. But the particles of type I<sub>2</sub> and I<sub>3</sub> structure planes are more obvious with much clearer particle boundaries. The pore diameter and fracture length of type I<sub>1</sub> structure plane are 2.1 μm and 81.8 μm, respectively, whereas those for type I<sub>2</sub> structure plane are 8.9 μm and 38.8 μm, respectively. The pore diameter and fracture length of type I<sub>3</sub> structure plane are 4.5 μm and 143.7 μm, whereas those for type II structure plane were 3.8 μm and 13.8 μm, respectively. The main elements of type I<sub>1</sub> structure plane are C, O, Si, Al, K, Ti and Fe, whereas the main elements of I<sub>2</sub> structure plane is C. The main elements of I<sub>3</sub> structural plane are C, O, Si, Al, K and Mg. The main elements of type II structural plane are C, O, Si, Al, K and Ti. Therefore, C and O are the main elements of the structural planes in the strata of the Shendong coal field. The microstructures of the two types of structural planes are different. The results are helpful to further reveal the roof dynamic disaster and step subsidence in the Shendong coal field.

**Key words:** structural plane; microstructure; pore; element characteristics; Shendong coal field