



郭小铭,刘英锋,郭康,等.鄂尔多斯盆地南部侏罗系杂色泥岩特征及形成机制[J].矿业安全与环保,2024,51(6):130-137.
GUO Xiaoming, LIU Yingfeng, GUO Kang, et al. Characteristics and formation mechanism of Jurassic variegated mudstone in the southern Ordos Basin[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(6): 130-137.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230685

扫码阅读下载

地质保障

鄂尔多斯盆地南部侏罗系杂色泥岩特征及形成机制

郭小铭^{1,2,3}, 刘英锋^{1,2,3}, 郭康^{1,2,3}, 武晓适⁴

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 陕西 西安 710077;
3. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077; 4. 天地科技股份有限公司, 北京 100013)

摘要:鄂尔多斯盆地南缘旬耀矿区局部侏罗系地层发育有杂色泥岩,胶结松散且遇水易崩解,严重影响区域内煤矿建设并威胁矿井安全,需对其微观结构和力学特征进行研究。采用 XRD 和 SEM 测试方法,分析泥岩岩矿组成及遇水微观结构变化。开展泥岩崩解、膨胀试验研究杂色泥岩的整体崩解性和膨胀特征。试验结果表明,侏罗系杂色泥岩岩矿组成以石英、伊利石和高岭石为主,原始状态结构较稳定但遇水后形成大量微裂隙导致微观结构发生变化。泥岩试样遇水后 4 min 内崩解率可达 98%,属于极易崩解岩层且具有良好的膨胀性能。利用元素分析与沉积环境分析,推测矿区内局部沉积的杂色泥岩是由于沉积过程中水体动荡导致地层沉积环境变化与后期风化共同作用的结果。研究成果揭示了矿区范围内照金煤矿发生采煤工作面顶板重大泥砂溃涌事故的物质来源,可为区内同类灾害防治过程中顶板岩性特征研究提供依据。

关键词:旬耀矿区;杂色泥岩;崩解试验;膨胀试验;沉积环境

中图分类号:TD745;TU458

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2024)06-0130-08

Characteristics and formation mechanism of Jurassic variegated mudstone in the southern Ordos Basin

GUO Xiaoming^{1,2,3}, LIU Yingfeng^{1,2,3}, GUO Kang^{1,2,3}, WU Xiaoshi⁴

(1. CCTEG Xi'an Research Institute(Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China;
2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Xi'an 710077, China;
3. Shaanxi Key Lab of Mine Water Hazard Prevention and Control, Xi'an 710077, China;
4. Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: There are Jurassic variegated mudstones in the Xun Yao mining area on the southern margin of the Ordos Basin. These mudstones were loose and easily disintegrated in water, affecting the construction of coal mines seriously and threatening the safe production of mines. This made research on the microstructure and mechanical characteristics of the mudstones significant. In this study, the XRD and SEM technic were used to analyze the composition and microstructure changes of the mudstones. The collapse and swelling tests were conducted to investigate the macro variegated shale disintegration and expansion characteristics. The results showed that the composition of the Jurassic variegated mudstone was dominated by quartz, illite and kaolinite. The original structure was relatively stable, but the microstructure changed and a large number of micro-cracks were formed after water contact. The disintegration rate of the mudstone could reach 98% within 4 min after water contact, which belonged to a highly disintegratable rock and had a good expansion performance. The localized variegated mudstone in the mining

area could be caused by the change of stratum sedimentary environment. This could be induced by the water turbulence and the weathering after sedimentation based on elemental and sedimentary environment analysis. As revealing the material source of the mud-sand collapse disaster in the mining face of the Zhaojin Coal Mine in the mining area, this study provided a basis for the further research of roof

收稿日期:2023-08-11;2023-09-13 修订

基金项目:国家自然科学基金项目(52104240);天地科技股份有限公司“科技创新基金”专项项目(TDKC-2022-QN-03)

作者简介:郭小铭(1988—),男,山西吕梁人,博士,副研究员,主要从事矿山水文地质、工程地质方面的研究工作。
E-mail: gxm824@126.com。

characteristics in the disaster prevention and control.

Keywords: Xun Yao mining area; variegated mudstone; disintegration test; expansion test; sedimentary environment

泥岩是含煤地层中普遍发育且较为常见的软弱岩层,其强度特征受到地下水、温度、地应力等因素影响较为显著。在煤矿开采过程中常由于泥岩软化而发生巷道变形、顶板离层、井筒变形等现象^[1],破坏煤矿井巷甚至威胁矿井安全。

2016 年 4 月,位于鄂尔多斯盆地南部的照金煤矿发生严重的采煤工作面顶板泥砂溃涌事故,造成严重的人员伤亡和财产损失。后期探查揭露表明,煤层顶板侏罗系地层发育有厚度不等的褐黄、灰绿、紫杂色泥岩层,是主要的溃入泥砂物^[2]。由于该事故是我国西部侏罗系煤田发生的首例采煤工作面顶板大型泥砂溃涌灾害,研究该类杂色泥岩的结构特征并揭示其形成机制,对我国西部侏罗系煤田开发过程中该类灾害的评价和防治具有重要意义。

国内外有关泥岩矿物组成、强度影响因素及结构特征方面的研究成果较多。泥岩地层的岩矿成分和元素分析是研究泥岩物质组成的主要手段^[3-4],对研究泥岩地层的沉积环境特征具有指导意义^[5]。针对泥页岩微观孔隙和裂隙结构及形态的研究主要采用扫描电镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)、透射电子显微镜(TEM)等进行微观观察^[6-9],对不同条件、不同尺度的泥岩微观结构进行观测与对比。不同区域的泥岩由于岩矿成分、沉积环境等不同,表现出的力学性质与蠕变、软化特征存在差异。通过开展剪切试验^[10]、蠕变试验^[11-12]、吸水试验^[13]、三轴压缩试验^[14]等,可研究不同泥岩的各项破坏特征与蠕变性质。部分学者通过实验室崩解实验确定岩石稳定性^[15],还利用钻孔窥视手段进行现场裂隙演化规律研究^[16]。同时,在泥岩遇水软化机理方面,国内外也开展了大量研究^[17],研究结果表明,由于泥岩矿物成分、风化条件等各不相同,不同区域泥岩性质差异明显。旬耀矿区发现的杂色泥岩层在钻探施工过程中接触钻井液后短时间就发生塌孔,表现出与多数区域泥岩的不同特征,需开展专项测试与微观结构分析综合研究,分析泥岩力学特征及其形成机制,指导煤矿安全生产与井巷工程建设。

笔者通过室内岩样测试和微观结构观测,开展煤层顶板侏罗系泥岩岩矿成分分析、微观结构测试、崩解试验和膨胀试验,研究鄂尔多斯盆地南缘煤层顶板典型杂色泥岩的结构和力学性质,揭示泥岩遇水结构松散和崩解特性。结合元素分析方法研究杂色泥岩的沉积环境与易崩解特征的成因,为区域内煤矿顶板泥砂溃涌灾害评价与防治提供基础。

1 研究区概况

鄂尔多斯盆地是我国主要的赋煤盆地之一,北

到阴山,南越渭河盆地与秦岭山系相连,东起吕梁山,西至贺兰山—六盘山^[18]。盆地内发育有伊盟隆起、伊陕斜坡、天环坳陷、西缘冲断推覆构造带、晋西挠褶带及渭北隆起带 6 个次级构造单元^[19]。研究区位于盆地南部渭北隆起带内的旬耀矿区照金煤矿,地理位置位于陕西省耀州区西北部,如图 1 所示。

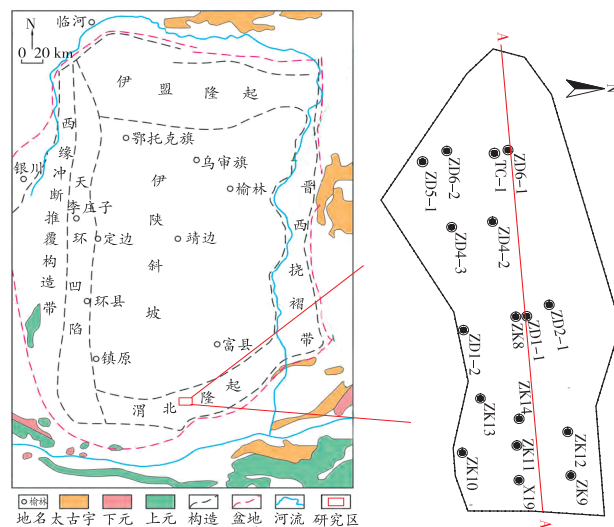


图 1 研究区位置及井田揭露杂色泥岩的钻孔分布

Fig. 1 Location of the study area and the distribution of boreholes in minefield which expose variegated mudstone

区内地层由老到新分别发育有三叠系延组(T_3y),侏罗系富县组(J_1f)、延安组(J_2y)、直罗组(J_2z),白垩系宜君组(K_1y)、洛河组(K_1l)、环河—华池组(K_1h),新近系(N)和第四系(Q)。其中,影响煤矿开采的含水层包括:侏罗系直罗组砂岩裂隙弱富水含水层,单位涌水量 $0.000\ 166\ L/(m \cdot s)$;白垩系洛河组砂岩裂隙含水层,单位涌水量 $0.002\ 149 \sim 0.009\ 301\ L/(m \cdot s)$ 。

照金煤矿 ZF202 工作面发生严重的顶板泥砂溃涌事故,采煤工作面顶板大量泥砂、碎石和水混合物迅速溃入井下,溃入泥砂物质总量 $2\ 291.65\ m^3$,在我国深埋煤层开采中极为罕见。事故发生后地面探查结果表明,煤层顶板部分区域延安组地层缺失,在直罗组底部发育有厚度 $30\ m$ 左右的杂色泥岩,为事故发生的主要溃入泥砂来源,如图 2 和图 3 所示。



图 2 侏罗系杂色泥岩地层

Fig. 2 The Jurassic variegated mudstone formation

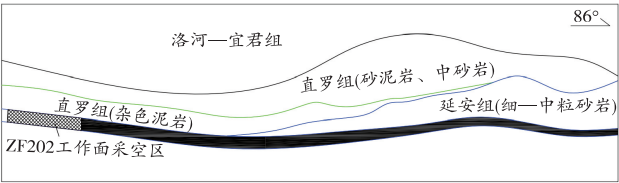


图 3 照金井田侏罗系地层走向剖面示意图

Fig. 3 Stratigraphic strike profile of Zhaojin Coal Field

系统查明杂色泥岩结构与力学性质对揭示深埋条件下泥砂溃涌灾害形成机制有重要意义,同时可为区域内其他矿井发生类似灾害的危险性评价提供依据^[20]。

2 试验手段与方法

笔者针对杂色泥岩微观结构和试样力学性质进行研究。主要开展 XRD 岩矿成分分析、SEM 测试、崩解试验和膨胀试验,分别对不同试样开展原始状态和饱水条件的测试。

2.1 样品采集

在井田 ZD4-2、ZD5-1、JT-2 钻孔中选取侏罗系地层不同层段岩样,重点针对杂色泥岩层中的泥岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩进行分析,并与中砂岩对比。测试内容包含:XRD、SEM、崩解试验和膨胀试验。专项测试及采样序号如表 1 所示。

表 1 专项测试及室内试验采样序号

Table 1 Special tests and indoor tests sampling number

序号	孔号	岩层类别	测试内容			
			XRD	SEM	崩解试验	膨胀试验
1	ZD4-2	中砂岩	✓	✓	✓	✓
2		泥岩	✓	✓	✓	✓
3		泥岩	✓	✓	✓	✓
4		泥岩	✓	✓	✓	✓
5		泥岩	✓	✓	✓	✓
6		泥岩	✓	✓	✓	✓
7	ZD5-1	砂质泥岩	✓	✓	✓	✓
8		泥岩	✓	✓	✓	✓
9		粉砂质泥岩	✓	✓	✓	✓
10	JT-2	泥岩	✓			
11		泥岩	✓			
12		泥岩	✓			

2.2 岩矿组成及微观结构观察

分别采用 X 射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)对试样进行岩矿成分分析和微观结构观察,分析试样的岩矿组成及其遇水前后微观结构变化特征。

1) XRD 岩矿成分分析

采用 D/max-2500X 射线衍射仪分析 1~12 号试样岩石矿物组成,根据衍射曲线对试样中矿物的相对含量进行半定量计算,确定泥岩和中砂岩试样

各岩石矿物组成。

2) SEM 测试

采用 FEI Quanta 400 FEG 环境扫描电子显微镜系统对 1~9 号试样进行扫描,分别观测试样原始状态和遇水风干后的微观结构,评价泥岩遇水稳定性。

试验方案如下:①利用电镜扫描获得 1~9 号试样的微观结构;②将 1~9 号样品放入水中后迅速取出,待其风干后利用扫描电镜进行测试;③对比分析同一试样原始状态和遇水后微观结构的差异。

2.3 崩解性能试验

照金井田发现的杂色泥岩层的遇水崩解是造成泥砂溃涌灾害的主要原因。对 1~9 号试样的崩解性能进行研究。

考虑试样崩解性能的体积效应,选择 2 组无宏观裂隙的泥岩原状试样进行对比试验,第一组平均质量 155.09 g,第二组平均质量 14.95 g。将原状试样装入可透水的试样盒浸入水槽崩解,间隔 1~5 min 利用电子天平称量残余试样质量,称量精度 0.01 g。采用崩解后的试样残余质量与试样总质量之比计算耐崩解指数(见公式(1)),评价各试样的崩解性能。

$$I = \frac{m_r}{m_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I 为耐崩解指数; m_r 为残留试样质量,g; m_t 为试样总质量,g。

3 号试样崩解试验过程如图 4 所示,其他试样的试验过程与其类似。

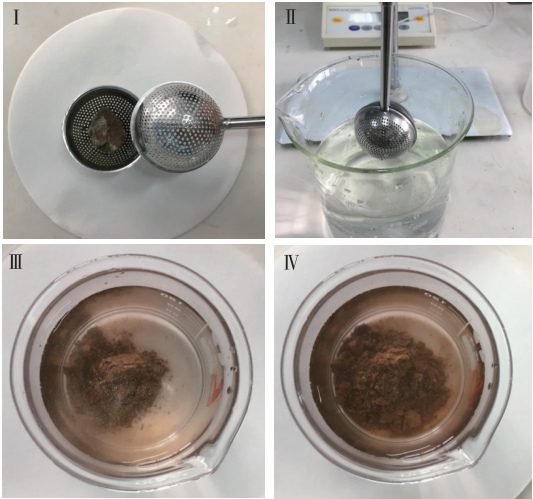


图 4 3 号试样崩解性试验

Fig. 4 Disintegration test of sample No. 3

2.4 膨胀性能试验

煤层开采上覆含水层水沿导水裂隙带进入杂色泥岩层,地层遇水膨胀易造成采场压架并增大泥砂溃涌的动能,查明泥岩层的膨胀特征对采场泥砂溃涌灾害防治有较大意义^[21]。采用 WZ-2 型低压固结仪,对 1~9 号试样进行膨胀力测试。

试验方案如下:①采用高 20 mm、直径 61.8 mm 的标准切土环刀切好试样,将装试样的环刀置入固结仪的固结室,施加 1 kPa 的预压力使试样和仪器上下各部件紧密接触;②安装百分表并调整到零位,记录初始读数后卸去预压力;③向试样中加入蒸馏水并始终保持水面高出顶面 5 mm,使试样吸水膨胀;④当试样膨胀百分表指针开始转动时,添加砝码通过传力杆施加荷载限制样品膨胀,指针回到初始读数并读取此时所加砝码的值及对应时间;⑤试验初始阶段每 1 min 读取 1 组数据,随着膨胀势减缓读数时间延长,直至时间间隔为 1 h;⑥间隔 2 h 百分表指针读数不变时可认为试样达到稳定状态,通过对砝码盘上所有的砝码的重量求和换算得出压力值

即为试样测试的最大膨胀力。膨胀力计算公式如下:

$$P=\frac{W}{A}\times 10 \tag{2}$$

式中: P 为膨胀力,kPa; W 为施加在试样上的总平衡荷载,N; A 为试样面积, cm^2 。

3 试验结果与分析

3.1 岩矿组成及微观结构测试结果

3.1.1 XRD 岩矿组成分析结果

采用 XRD 对试样的岩矿组分进行测试,结果见表 2。可以看出,1 号试样的岩矿成分以石英为主,其次为蒙脱石和钾长石;2~12 号泥岩试样岩石矿物组成以石英为主,其次为高岭石和伊利石。

表 2 岩矿组分测试结果
Table 2 Sample mineral content test results

序号	各组分体积分数/%												
	石英	钾长石	斜长石	方解石	高岭石	绿泥石	伊利石	蒙脱石	滑石	赤铁矿	锐钛矿	针铁矿	菱铁矿
1	72.9	7.3		2.5		4.0	2.0	10.5	0.1	0.7			
2	80.6	0.5	0.2	0.4	6.5		9.5			1.1	1.0		
3	70.2	1.0	0.4	7.6	8.0		8.0			1.3	1.0	2.7	
4	67.4	0.4	0.2		16.5		7.0			4.5	0.9	3.1	
5	66.6	0.3	0.2		6.0		24.0			0.7	2.0		0.2
6	70.9	0.4	0.2		11.5		9.0			2.0	1.5	4.5	
7	68.4				14.5		8.0			4.2	1.8	3.1	
8	62.5	0.9	0.2		12.0		12.5			2.4	1.2	8.3	
9	63.1	3.9	1.7		6.0		20.0			3.0		1.4	3.0
10	47.8	0.4			34.5		14.5				2.8		
11	51.9	1.3		1.6	26.0		18.0			1.2			
12	62.4	0.9		3.5	16.5		11.0						

由表 2 可知,砂岩试样和泥岩试样岩矿组成差异明显,尤其是高岭石和伊利石等黏土矿物所占比重不同。对比砂岩和泥岩试样各组分的平均组成,结果如图 5 所示。

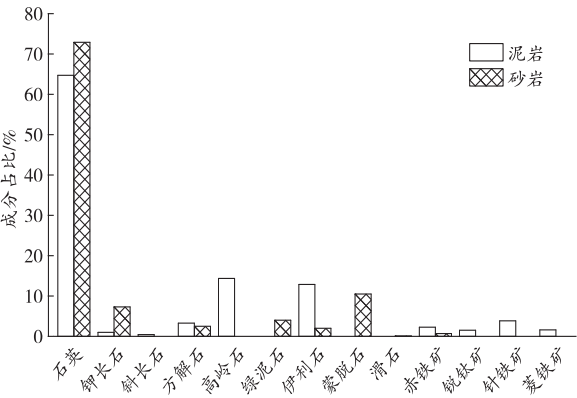


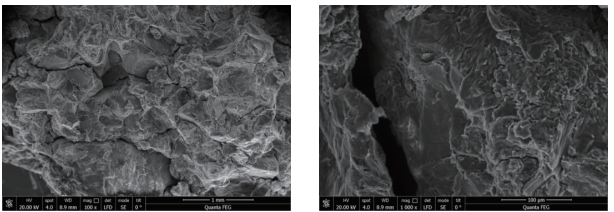
图 5 泥岩砂岩试样主要成分对比

Fig. 5 Comparison of main components of mudstone sandstone samples

泥岩试样中各类矿物的体积分数占比如下:高岭石占比 6.5%~16.5%,伊利石占比 2.0%~24.0%,赤铁矿占比 0.7%~4.5%,钾长石占比 0.3%~7.3%,锐钛矿占比为 0.9%~2.0%。部分试样含有方解石、绿泥石、蒙脱石、滑石等。

3.1.2 SEM 测试结果

由于砂岩粒径较大,故选取放大倍数为 100 和 1 000,泥岩试样选取放大倍数 100 和 2 000,观测对比试样原状和遇水后的结构特征^[22]。各试样扫描电镜结果如图 6~8 所示。



×100

×1 000

(a) 原状试样

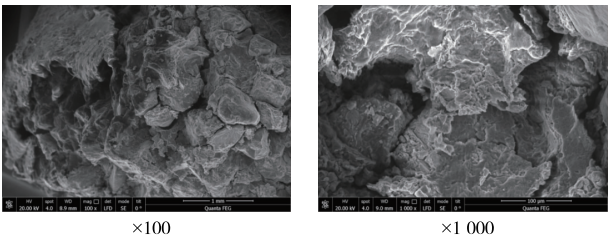


图 6 1 号试样扫描电镜结果(中砂岩)
Fig. 6 Scanning electron microscopy results of sample No. 1 (middle sandstone)

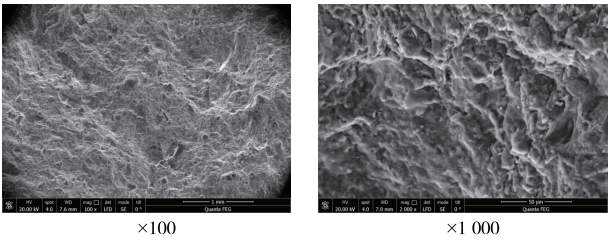


图 7 3 号试样扫描电镜结果
Fig. 7 Scanning electron microscopy results of sample No. 3

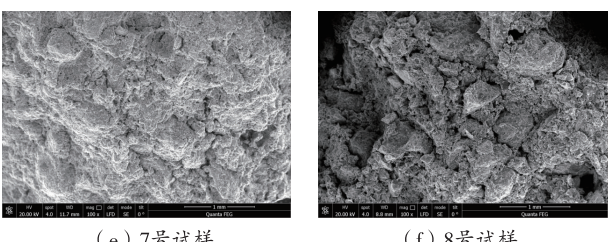
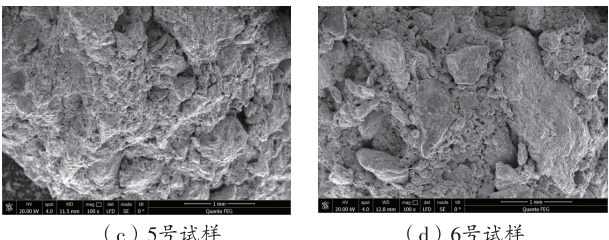
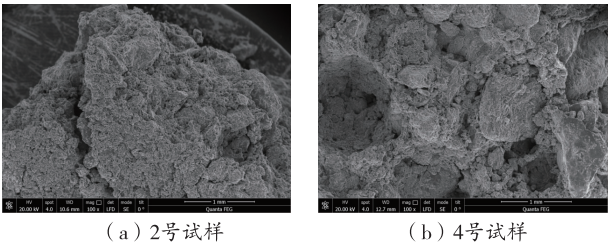


图 8 其他试样遇水风干放大 100 倍扫描电镜结果
Fig. 8 Scanning electron microscopy results of other samples are air-dried and magnified 100 times

由图 8 可知,砂岩试样遇水后仅有少量裂缝,但表面架构基本不变。泥岩地层遇水风干后表面变得极为粗糙,产生大量微裂缝,结构松散。在放大 2 000 倍下可看出试样成分和架空结构,出现较多的孔隙和裂隙。由此可知,泥岩在遇水后整体微观结构由致密变为松散,胶结较差,结构排列紊乱。

3.2 崩解性试验结果

通过崩解试验发现,在试样初入水中后约 20 s 开始出现大量气泡,并伴随着泥岩试样的崩解,约 2 min 后崩解较为稳定,呈现缓慢剥蚀和中间开裂。试验结果表明,1 号砂岩试样在试验周期(1 d)内无明显崩解现象,2~9 号泥岩试样均有明显的崩解现象,耐崩解指数整体较低。试验结果见表 3~4。

表 3 第一组试样耐崩解指数计算结果
Table 3 Disintegration index of the first group samples

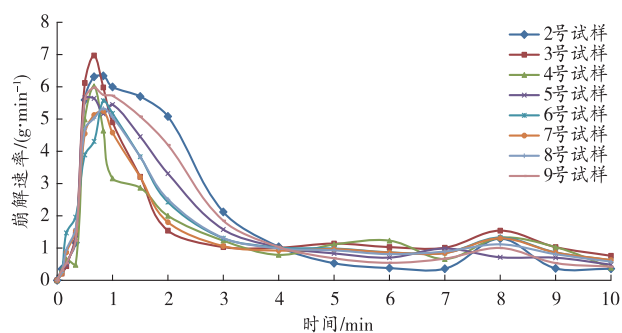
试样序号	原始质量/g	崩解质量/g	残余质量/g	耐崩解指数/%
2	141.21	138.58	3.71	2.63
3	149.97	145.56	6.62	4.41
4	157.53	148.92	13.57	8.61
5	184.37	178.86	10.15	5.51
6	139.26	126.97	17.11	12.29
7	146.44	135.74	15.67	10.70
8	171.38	165.68	9.77	5.70
9	150.57	135.23	23.10	15.34

表 4 第二组试样耐崩解指数计算结果
Table 4 Disintegration index of the second group samples

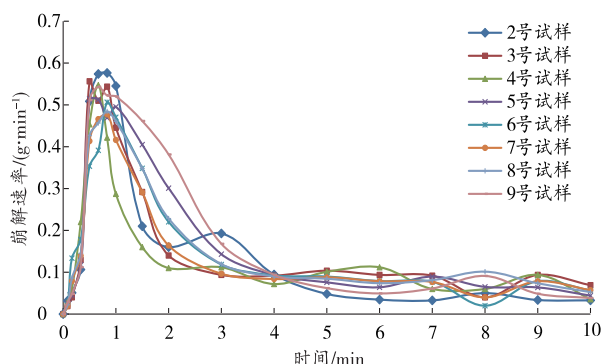
试样序号	原始质量/g	崩解质量/g	残余质量/g	耐崩解指数/%
2	13.13	12.12	1.01	7.70
3	14.50	14.17	0.33	2.28
4	15.15	13.71	1.44	9.50
5	16.44	15.29	1.15	7.00
6	13.22	12.99	0.23	1.74
7	14.35	13.90	0.45	3.14
8	17.24	16.25	0.99	5.74
9	15.56	14.20	1.36	8.74

由表 3~4 可知,2 组泥岩试样耐崩解指数为 1.74%~15.34%,平均指数 6.94%,耐崩解指数低,崩解性强。2 组试验中泥岩试样最终均几乎完全崩解,同一试样不同质量耐崩解指数无统一变化规律,表明在充分含水条件下崩解总量受试样尺寸因素控制较弱。

进一步分析泥岩试样崩解速率,得出其与时间变化关系,如图 9 所示。



(a) 第一组试样(平均质量 155.09 g)



(b) 第二组试样(平均质量 14.95 g)

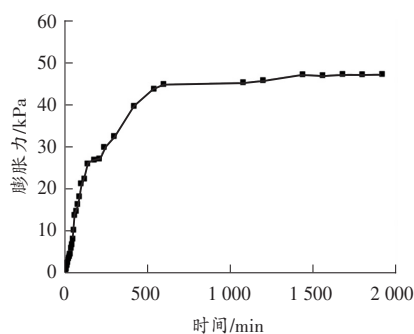
图 9 各试样的崩解速率—时间变化关系

Fig. 9 Disintegration rate-time relationship of each sample

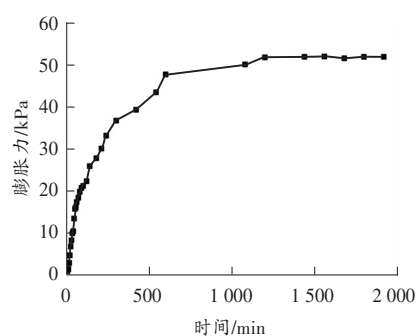
由图 9 可知,不同尺寸泥岩试样崩解速率变化趋势基本相同。初入水中时崩解速率较小,之后迅速增大。入水 20 s 左右崩解速率开始增大,40~70 s 左右崩解速率达到最大值,之后速率减缓,所有试样在 4 min 左右后几乎全部崩解。由此可见,试样崩解速率极快,反映出其遇水极不稳定的特征。

3.3 膨胀力测试结果

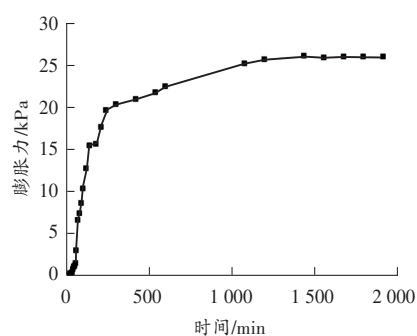
采用“应力平衡法”对 1~9 号试样进行膨胀力测试。试验过程中记录膨胀力随时间的变化情况,绘制膨胀力—时间关系曲线,如图 10 所示。由于 1 号试样在试验周期内无明显膨胀现象,因此未得出膨胀力测试结果。



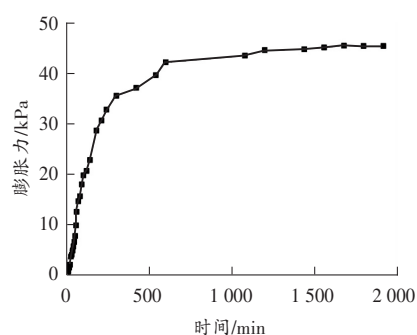
(a) 2 号试样



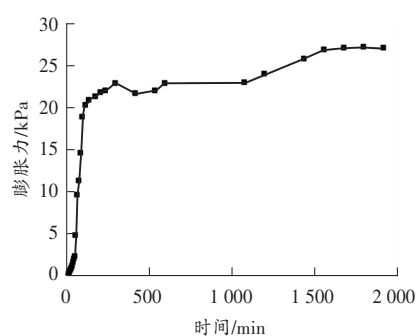
(b) 3 号试样



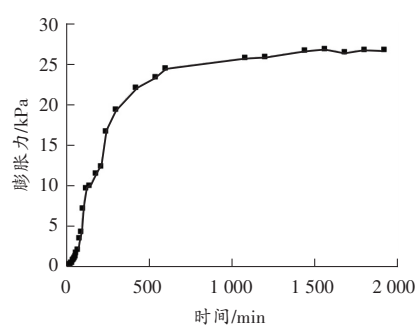
(c) 4 号试样



(d) 5 号试样



(e) 6 号试样



(f) 7 号试样

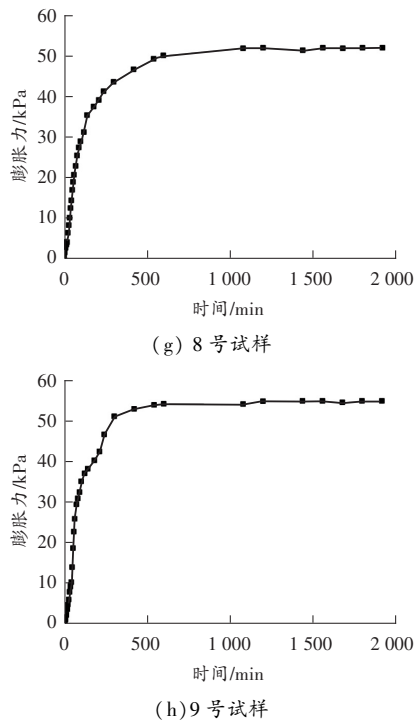


图 10 泥岩试样膨胀力—时间关系曲线
Fig. 10 Expansion force-time curves of mudstone samples

由图 10 可知,试验初始阶段泥岩试样膨胀力随着浸水时间的增加而逐渐增大,试验 6 h 后膨胀力基本达到稳定值。其中,2、3、5、8、9 号试样膨胀性较大,膨胀力终值为 45.5~55.0 kPa;4、6、7 号试样膨胀性较小,膨胀力终值为 25.9~27.1 kPa(见表 5)。各试样最大膨胀力可达 55.0 kPa,平均膨胀力 41.4 kPa。

表 5 各试样膨胀力值统计

Table 5 Statistics of expansion force values of each sample

试样序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
膨胀力/kPa	0	47.2	52.0	25.9	45.5	27.1	26.8	52.0	55.0

3.4 杂色泥岩特征分析

通过 XRD、SEM、崩解试验和膨胀试验,对泥岩岩矿组成、微观结构、宏观崩解性能和膨胀特征进行了研究。结果表明,照金煤矿煤层顶板揭露的杂色泥岩地层与其他区域和层位多数泥岩地层相比有独特的结构和力学特征。

杂色泥岩岩矿组成以石英、高岭石和伊利石为主,石英体积分数接近中砂岩岩样,表明其具有胶结性差的特点。高岭石在遇水和风干状态下发生较为明显的膨胀和失水体积收缩,产生大量次生孔隙。SEM 测试结果直观呈现出泥岩遇水并风干后裂隙和孔隙明显的发育特征,岩石内部结构失稳。泥岩遇水后崩解速率极快,短时间内即可全部崩解,无任何力学强度。围压作用下泥岩崩解过程中产生较大的

膨胀力。

4 杂色泥岩成因分析

室内试验结果表明,旬耀矿区照金煤矿揭露的杂色泥岩层具有极易崩解特性,同时该泥岩层呈现褐色、紫红色、紫褐色、绿色等混杂颜色。由于该层泥岩为煤层顶板发生泥砂溃涌灾害的主要物质来源,分析其形成原因对圈定泥岩分布范围有指导作用。

4.1 杂色泥岩颜色差异成因

通过 XRD 分析可知,褐色、紫红色等泥岩中赤铁矿、针铁矿占比较高,初步分析其 Fe 元素含量对泥岩颜色有一定影响。分别选取紫红色和绿色泥岩试样,分析其元素组成,测试结果如图 11 所示。

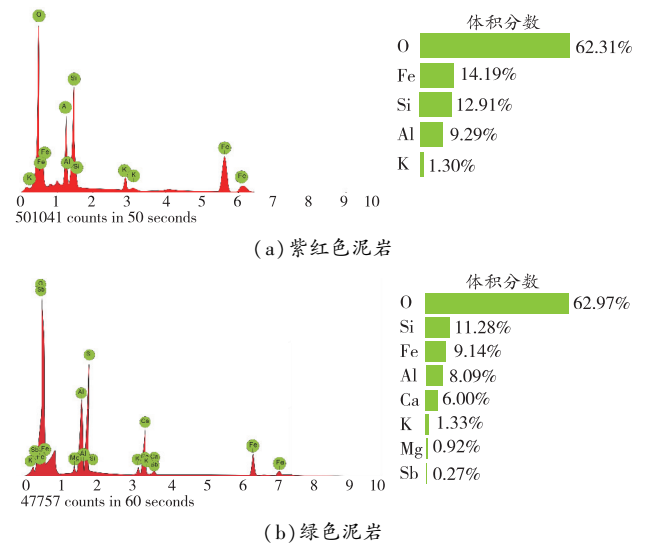


图 11 元素分析结果

Fig. 11 Elemental analysis results

通过元素分析,同样发现黏土矿物中铁元素体积分数较高,对泥岩颜色控制较为明显。一般而言,三价铁离子为红色泥岩的主要致色因子,二价铁元素以绿色为主,是暗色泥岩颜色的主要控制因素。

4.2 泥岩结构特征成因

膨胀性与崩解性是泥岩的普遍特征。但是照金煤矿揭露的侏罗系杂色泥岩具有崩解性强、崩解速率极快的特点,与大多数泥岩特征差异明显,也是造成泥砂溃涌灾害的主要原因。综合区域沉积环境、构造发育、地球化学作用等因素分析,推测泥岩结构特征的主要形成因素。

鄂尔多斯盆地南缘旬耀矿区侏罗系地层沉积环境属于辫状河三角洲平原^[23]。该时期水体较为动荡,丰水时期洪水越过天然堤,形成较深的水体环境。相对干旱期水体较浅,水深变化频繁,沉积环境在还原和氧化环境间交替出现。较干旱时期,泥岩

直接出露水面,经历风化作用,之后在丰水期泥岩沉于水底。当水体相对较深时,沉积环境处于还原状态,形成以灰绿色、淡黄色和灰色为主的泥岩;当水体相对较浅时,沉积环境处于氧化状态,形成以红褐色、红色、紫褐色为主的泥岩。

在 SEM 测试过程中,在杂色泥岩试样中发现有大量铁结核和赤铁矿化植物根系等陆相碎屑岩风化壳的标志物,由此证明杂色泥岩形成时期经历了物理化学风化作用后的重沉积,造成岩体结构整体较为松散。

5 结论

1) 旬耀矿区照金煤矿揭露的杂色泥岩地层以高岭石和伊利石为主,原始状态下微观结构较为完整,遇水出现大量孔隙、微裂隙结构。

2) 杂色泥岩平均耐崩解指数为 6.94%,在 4 min 左右几乎完全崩解,耐崩解性受尺寸因素控制较弱。同时,泥岩具备良好的膨胀性能,最大膨胀力为 55.0 kPa,平均膨胀力 41.4 kPa。遇水后微观结构被破坏并表现出的强崩解性,在煤层回采过程中给顶板管理造成较大困难。

3) 综合测试 results 和沉积环境,杂色泥岩的形成是由于沉积环境受潮盆/河流水深度变化而出现氧化、还原的交替变化,从而表现为颜色多样、胶结程度差的特征。

参考文献(References):

- [1] 张俊文,袁瑞甫,李玉琳. 厚泥岩复合顶板煤巷围岩控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(1):152-158.
ZHANG Junwen, YUAN Ruifu, LI Yulin. Research on surrounding rock control of coal roadway with thick mudstone compound roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 152-158.
- [2] 郭小铭,董书宁,刘英锋,等. 深埋煤层开采顶板泥砂溃涌灾害形成机理[J]. 采矿与安全工程学报,2019,36(5):889-897.
GUO Xiaoming, DONG Shuning, LIU Yingfeng, et al. Formation mechanism of mud and sand inrush disaster during the mining of deep-buried coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(5): 889-897.
- [3] 柴肇云,张亚涛,张学尧. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. 煤炭学报,2015,40(5):1188-1193.
CHAI Zhaoyun, ZHANG Yatao, ZHANG Xueyao. Experimental investigations on correlation with slake durability and mineral composition of mudstone[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1188-1193.
- [4] 涂春霖,郭英海,胡敏,等. 阳泉矿区泥岩地球化学特征及地质意义[J]. 煤炭科学技术,2015,43(3):115-120.
TU Chunlin, GUO Yinghai, HU Min, et al. Geochemical features of mudstone and geological significance in Yangquan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 115-120.
- [5] 罗忠,耶龙义,姚光华,等. 滇东黔西上二叠统含煤岩系泥岩粘土矿物组成及环境意义[J]. 古地学报,2008,10(3):297-304.
LUO Zhong, SHAO Longyi, YAO Guanghua, et al. Mudstones in the Upper Permian coal-bearing series in eastern Yunnan and western Guizhou: Clay minerals composition and their environmental significance[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2008, 10(3): 297-304.
- [6] 杨建林,王来贵,李喜林,等. 泥岩饱水过程中崩解的微观机制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(4):476-480.
YANG Jianlin, WANG Laigui, LI Xilin, et al. Micromechanism of disintegration of mudstone in saturation process[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(4): 476-480.
- [7] 黄振凯,陈建平,王义军,等. 松辽盆地白垩系青山口组泥岩微观孔隙特征[J]. 石油学报,2013,34(1):30-36.
HUANG Zhenkai, CHEN Jianping, WANG Yijun, et al. Characteristics of micropores in mudstones of the Cretaceous qingshankou formation, Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 30-36.
- [8] 张盼盼,刘小平,王雅杰,等. 页岩纳米孔隙研究新进展[J]. 地球科学进展,2014,29(11):1242-1249.
ZHANG Panpan, LIU Xiaoping, WANG Yajie, et al. Research progress in shale nanopores[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11): 1242-1249.
- [9] 刘伟,余谦,闫剑飞,等. 上扬子地区志留系龙马溪组富有机质泥岩储层特征[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):346-352.
LIU Wei, YU Qian, YAN Jianfei, et al. Characteristics of organic-rich mudstone reservoirs in the Silurian Longmaxi Formation in Upper Yangtze Region[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 346-352.
- [10] 李杭州,廖红建,孔令伟,等. 膨胀性泥岩应力-应变关系的试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(1):107-110.
LI Hangzhou, LIAO Hongjian, KONG Lingwei, et al. Experimental study on stress-strain relationship of expansive mud-stone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 107-110.
- [11] 张永安,李峰. 红层泥岩的剪切蠕变试验研究[J]. 工程勘察,2010,38(4):23-26.
ZHANG Yongan, LI Feng. Experimental study on shear creep properties of the mudstone in red beds[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(4): 23-26.
- [12] 黄小兰,杨春和,刘建军,等. 不同含水情况下的泥岩蠕变试验及其对油田套损影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(a02):3477-3482.
HUANG Xiaolan, YANG Chunhe, LIU Jianjun. Experimental study on mudstone's creep behavior under different water contents and its effect on casing damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(a02): 3477-3482.
- [13] 何满潮,周莉,李德建,等. 深井泥岩吸水特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(6):1113-1120.
HE Manchao, ZHOU Li, LI Dejian, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of mudstone in deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1113-1120.
- [14] 李亚丽,于怀昌,刘汉东. 三轴压缩下粉砂质泥岩蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学,2012(7):2035-2047.
LI Yali, YU Huaichang, LIU Handong. Study of creep constitutive model of silty mudstone under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(7): 2035-2047.

(下转第 146 页)

- [15] 徐树媛,张永波,孙灏东,等. 基于 RBF 核 ε -SVR 的导水裂隙带高度预测模型研究[J]. 安全与环境学报,2021,21(5):2022-2029.
XU Shuyuan, ZHANG Yongbo, SUN Haodong, et al. Predictable testing and determination of the height of the fractured water-conducting zone based on the ε -SVR model via the RBF kernel function[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(5): 2022-2029.
- [16] 王金满,张丽娜,冯宇,等. 基于 CT 扫描技术预测露天煤矿区不同压实土壤水分特征曲线[J]. 煤炭学报,2022,47(3):1296-1305.
WANG Jinman, ZHANG Li'na, FENG Yu, et al. Prediction of the soil water characteristic curve in an opencast coal mining area based on CT scanning technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1296-1305.
- [17] 安士凯,李昱昊,王晓鹏,等. 厚冲积层矿区地表移动持续时间预测方法研究[J]. 煤炭科学技术,2022,50(8):24-31.
AN Shikai, LI Yuhao, WANG Xiaopeng, et al. Study on prediction method of surface movement duration in thick alluvial mining area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 24-31.
- [18] 陈鹏,彭是阳,王鹏飞,等. 断层分形与多重分形特征及其对突

出分布的控制作用[J]. 煤炭科学技术,2019,47(7):47-52.

CHEN Peng, PENG Shiyang, WANG Pengfei, et al. Fractal and multifractal characteristics of geological faults in coal mine area and their control on outburst[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 47-52.

- [19] 李军,张波. 基于 IFAHP-改进熵权法的煤矿综合防尘体系安全评价[J]. 煤炭技术,2023,42(9):195-199.

LI Jun, ZHANG Bo. Safety evaluation of comprehensive dust control system in coal mine based on IFAHP-improved entropy weight method[J]. Coal Technology, 2023, 42(9): 195-199.

- [20] JU J F, LI Q S, XU J L, et al. Self-healing effect of water-conducting fractures due to water-rock interactions in undermined rock strata and its mechanisms[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(1): 287-297.

- [21] 陈亚洲,董维红. 利用示踪试验时间-浓度曲线分析岩溶管道结构特征[J]. 水文地质工程地质,2022,49(1):41-47.

CHEN Yazhou, DONG Weihong. Analysis of structural characteristics of Karst conduit by time-concentration curve of tracer test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 41-47.

(责任编辑:林桂玲)

(上接第 137 页)

- [15] GAUTAM T P, SHAKOOR A. Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions[J]. Eng Geol 166:17-25.
- [16] 吕玉广,乔伟,肖庆华,等. 西北侏罗纪煤田软岩劣化控制技术[J]. 矿业安全与环保,2021,48(6):86-92.
LYU Yuguang, QIAO Wei, XIAO Qinghua, et al. Soft rock deterioration control technology in Jurassic Coalfield of northwest China[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(6): 86-92.
- [17] 黄宏伟,车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(7):866-870.
HUANG Hongwei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 866-870.
- [18] 刘池洋,赵红格,桂小军,等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报,2006,80(5):617-638.
LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-638.
- [19] 师晶,黄文辉,吕晨航,等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界泥岩地球化学特征及地质意义[J]. 石油学报,2018,39(8):876-889.
SHI Jing, HUANG Wenhui, LYU Chenhang, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Upper Paleozoic mudstones from Linxing Area in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(8): 876-889.

- [20] 曾一凡,刘晓秀,武强,等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报,2023,48(2):538-550.

ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, et al. Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538-550.

- [21] 李安润,邓辉,王红娟,等. 水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型[J]. 水文地质工程地质,2021,48(2):106-113.

LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, et al. Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 106-113.

- [22] 张鹏飞,卢双舫,李俊乾,等. 基于扫描电镜的页岩微观孔隙结构定量表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(2):19-28.

ZHANG Pengfei, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Quantitative characterization of microscopic pore structure for shales using scanning electron microscopy[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(2): 19-28.

- [23] 贾建称,贾茜,张妙逢,等. 鄂尔多斯盆地西南缘侏罗系-下白垩统划分对比与煤炭开发区划研究[J]. 中国煤炭地质,2015,27(7):29-36.

JIA Jiancheng, JIA Qian, ZHANG Miaofeng, et al. A study on Jurassic to Lower Cretaceous stratigraphic division, correlation and coal exploitation regionalization in southwestern margin of Ordos Basin[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(7): 29-36.

(责任编辑:陈玉涛)