

# 新疆沙吉海煤矿侏罗系软岩气态水 吸附特性实验

付金磊<sup>1</sup>,袁越<sup>2,3\*</sup>,秦坚<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201;

3.煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**针对软岩巷道围岩吸水发生变形、强度劣化及失稳破坏的现象,采用新疆沙吉海煤矿煤系地层侏罗系泥岩样品开展气态水吸附特性实验研究,得到了泥岩气态水吸附特性曲线 $Q-t$ 。通过非线性拟合分析,建立了泥岩的吸水特征方程,分析了气态水吸附速率的演化规律。结合电镜扫描与X射线衍射试验结果,探讨了全岩矿物、黏土矿物及微观结构等物理参数对泥岩气态水吸附特性的影响。结果表明:(1)5个泥岩样品的气态水吸附特性及变化规律相似,吸水量与吸水时间呈正相关;根据吸水特征方程求导分析,得出吸水速率与吸水时间呈负相关。(2)泥岩样品在吸水过程中速率降低,主要是由于内部孔隙壁面发生膨胀,泥岩孔隙过水通道变窄,吸水受到阻碍。(3)泥岩中含有的蒙脱石与伊/蒙混层具有强亲水性,间接造成泥岩吸附气态水能力强,其微裂隙在水及多应力场作用下扩大和贯通,进一步降低了围岩稳定性。研究结果为新疆沙吉海煤矿侏罗系地层软岩巷道的稳定性控制研究提供了理论依据。

**关键词:**沙吉海煤矿;侏罗系软岩;吸水实验;气态水;吸附特性

中图分类号:TD167

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)02-0043-08

## Experimental Study on Water Vapor Adsorption Characteristics of Jurassic Soft Rock in Shajihai Coal Mine, Xinjiang

Fu Jinlei<sup>1</sup>, Yuan Yue<sup>2,3</sup>, Qin Jin<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Aiming at the phenomena of deformation, strength deterioration and destabilization of surrounding rock water absorption in soft rock roadway, the experimental study on the characteristics of gaseous water adsorption in the coal-sediment jurassic mudstone samples from the Shajihai Coal Mine in Xinjiang is carried out, and the gas-water adsorption characteristic curve  $Q-t$  of mudstone is obtained. Through the nonlinear fitting analysis, the water absorption characteristic equation of mudstone is established, and the evolution law of gaseous water adsorption rate is analyzed. Combined with the results of scanning electron microscopy and X-ray diffraction experiments, the effects of physical parameters such as minerals, clay minerals and microstructure on the adsorption characteristics of mudstone gaseous water are discussed. Results show that: (1) The adsorption characteristics and variation of gaseous water in the five mudstone samples are similar, and the water absorption is positively correlated with the water absorption time. According to the water absorption characteristic equation, the water absorption rate is negatively correlated with the water absorption time. (2) The rate of mudstone

收稿日期:2019-04-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504091);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3166)

\*通信作者,E-mail:yuanyuekafu@163.com

samples decreases during the water absorption process, mainly due to the expansion of the inner pore wall surface, the narrowing of the mudstone pore water passage, and the water absorption is hindered. (3) The montmorillonite and the Yi/Mongolian mixed layer contained in the mudstone have strong hydrophilicity, which indirectly causes the mudstone to have strong ability to adsorb gaseous water. The micro-cracks expand and penetrate under the action of water and multi-stress fields, further reducing the stability of the surrounding rock. The research results has provided a theoretical basis for the study of stability control of soft rock roadway in jurassic strata in Shajihai Coal Mine of Xinjiang.

**Keywords:** Shajihai Coal Mine; jurassic soft rock; water absorption tests; water vapor; absorption characteristics

煤炭占我国一次能源消费总量的主体地位,消费占比达60%以上.我国西部地区煤炭储存量大,储存总量占全国55%左右,可见在西部大开发战略中煤炭开采等相关工作具有重要地位<sup>[1-3]</sup>.煤矿软岩地质环境复杂、成岩作用差等性质,造成地下工程治理问题极其复杂<sup>[4-6]</sup>.本文以新疆沙吉海煤矿为工程背景,该区煤系地层属于中生界侏罗系软岩地层,具有胶结性差、膨胀性大及富水性较强<sup>[7,8]</sup>等特点,其层理、微裂隙在吸水过程中扩展、贯通,将导致岩体稳定性降低,随吸水时间增加产生膨胀,加剧了岩体变形速度,导致煤矿巷道出现变形坍塌等失稳现象,因而,水是影响软岩结构、力学性能的重要因素<sup>[9-11]</sup>.因此,针对沙吉海软岩吸水性质,研究其在吸水过程中的变化规律对于侏罗系软岩巷道稳定性控制具有重要意义.

国内外众多学者开展了软岩吸水特性研究, Guo H Y 等<sup>[12-14]</sup>建立了砾岩吸水率与其影响因素之间的关系方程;杨晓杰等<sup>[15]</sup>探究了泥岩遇水后强度软化机理,又开展了不同含水率的软岩样品吸水与强度软化试验<sup>[3]</sup>;张娜等<sup>[16]</sup>分析了软岩样品在有无水压条件下吸水量与吸水时间变化规律;郭宏云等<sup>[17]</sup>从化学角度探讨了软岩在天然和干燥状态下的有压与无压吸水的强度软化规律;郝耐等<sup>[18]</sup>研究了水对敦煌石窟围岩产生风化作用的吸水试验;邓华锋等<sup>[19]</sup>针对红层软岩抗压、抗拉特性,展开干燥、自然与饱和3种状态下软岩力学性能变化的试验研究.

综上所述,国内外众多学者从多角度开展了软岩吸水特性试验研究.但是,目前研究专门针对侏罗系沉积地层的软岩吸水规律的研究并不多,尤其是气态水吸附特性试验研究更少.煤矿侏罗系软岩巷道围岩在开采过程中,长期与高温高湿空气接触,此时岩样将吸收大量的气态水,随吸水时间增加产生膨胀,加剧了岩体变形速度,导致煤矿巷道出现变形坍塌等失稳现象.因而,开展煤矿侏罗系软岩气态水吸附特性实验研究对侏罗系软岩巷道稳定性控制有重要的现实意义及指导意义.

## 1 实验概况

### 1.1 试样制备

本文泥岩取自煤系地层为中生界侏罗系地层的新疆沙吉海煤矿,该矿位于我国新疆和什托洛盖特大型煤田内,胶结性弱强度较低<sup>[7,8]</sup>.泥岩的强度低于煤体的强度,结构相对较完整,膨胀性能较好,黏土矿物伊/蒙混层比重相对较高,间接造成泥岩吸附气态水能力强,其微裂隙在水及多应力场作用下扩大和贯通,导致围岩稳定性大幅降低<sup>[20]</sup>.

根据实验需要,选取新疆沙吉海煤矿泥岩5个样进行干燥处理,规格为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱体岩样,泥岩试样的基本参数情况见表1所示.泥岩颜色主要呈浅灰色,具有不明显的层理,表面光滑,结构相对密实,样品表面先用蜡密封,然后用保鲜膜包裹后,再用蜡密封.

### 1.2 气态水吸附实验设备与实验方法

采用由深部岩土力学与地下工程国家重点实验室自主研发的深部软岩气态水吸附智能测试系统如图1所示<sup>[20]</sup>.该系统主要由图1所示:a. 样品柜, b. 数据显示表盘, c. 电子天平, d. 数据采集系统4部分组成,并且该系统可创造气态水吸附特性试验所需的恒温恒湿条件,自动记录气态水吸附数据绘制曲线,可通过电子天平的数据接口进行数据交换.

表 1 泥岩参数






岩样编号	1#-N0°	2#-N30°	3#-N30°	4#-N45°	5#-N60°
直径/mm	49.50	49.54	49.49	49.30	50.00
高度/mm	97.52	101.00	100.60	99.30	100.20
干燥后样品质量/g	414.07	430.93	423.43	414.02	426.52
岩样图片					



图 1 深部软岩气态水吸附智能测试系统

软岩巷道开挖后岩体将暴露在高温高压的地层中,长期与高温高湿空气接触,此时岩样将吸收大量的气态水,为此深部软岩气态水吸附智能测试系统通过设置箱体温度和湿度,使置于箱体中的岩样能够吸附水蒸气,通过称重系统,称取岩样吸水量,并通过数据传输系统,将吸水数据传输到电脑上,实时监测岩样在某一时刻的吸水情况,绘制软岩气态水吸附特征曲线.软岩气态水吸附实验原理示意图如图 2 所示.

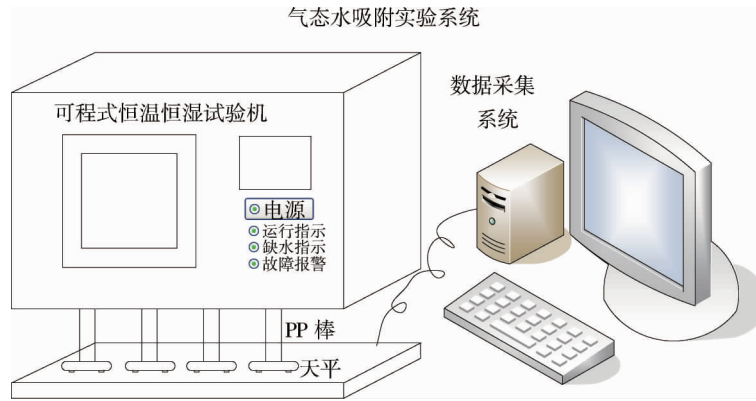


图 2 软岩气态水吸附实验原理<sup>[21]</sup>

实验条件:温度 30℃,湿度 95%,吸水时间 480 h.读数时间要求:0~120 min,每 5 s 记录一次,120 min 后,每 60 min 记录一次,气态水吸附特性试验流程如图 3 所示<sup>[20,21]</sup>.

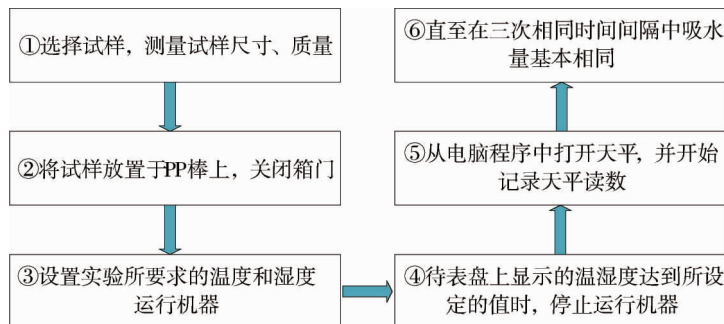


图 3 气态水吸附特性试验流程

## 2 实验结果及分析

### 2.1 泥岩气态水吸附特性

将泥岩样品吸水情况统计表见表 2 所示,绘制吸水过程曲线( $Q-t$ ),其中  $Q$  为吸水量,  $t$  为吸水时间,吸水特征曲线见下图 4 所示. 由图 4 可知:5 个泥岩的吸水量与吸水时间呈正相关,吸水速率与吸水时间呈负相关,最终接近平稳达到饱和状态.5 个泥岩相比,吸水量、吸水速率、气态水吸附特性差异性较小,但 5<sup>#</sup>-N60° 与其他编号泥岩间的差异最为显著.

表 2 5 个泥岩样品吸水情况统计表

岩样编号	干燥后质量/g	吸水量/g	吸水率/%
1 <sup>#</sup> -N0°	414.07	13.65	3.297
2 <sup>#</sup> -N30°	430.93	14.31	3.321
3 <sup>#</sup> -N30°	423.43	13.43	3.172
4 <sup>#</sup> -N45°	414.02	13.49	3.258
5 <sup>#</sup> -N60°	426.52	15.83	3.711

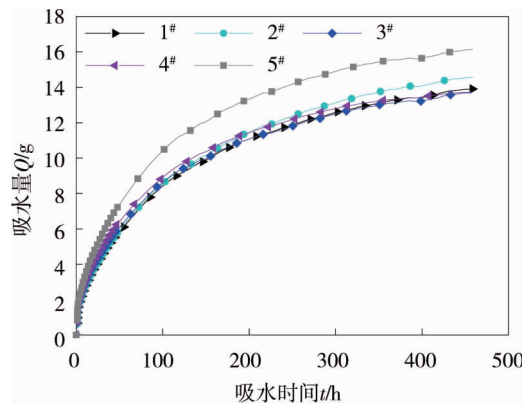


图 4 5 个泥岩样品  $Q-t$  曲线

### 2.2 吸附特性曲线回归分析

对 5 个泥岩样品的气态水吸附曲线进行非线性回归分析,获得了泥岩的吸水特征方程,将泥岩气态水吸附曲线的拟合结果整理制成表 3 所示.

$$Q(t) = B + (A - B) / [1 + (t/C)^D] \tag{1}$$

式中: $Q$  为  $t$  时间后的吸水量, g ;  $t$  为吸水时间, h ;  $A, B, C, D$  为拟合参数.

表 3 5 个泥岩气态水吸附曲线拟合结果

岩样编号	吸水时间( $t$ )/h	吸水率( $w$ )/%	吸水量( $Q$ )/g	拟合参数				
				$A$	$B$	$C$	$D$	$R^2$
1 <sup>#</sup> -N0°		3.297	13.65	0.590 06	20.203 86	177.039 00	0.782 25	0.998 93
2 <sup>#</sup> -N30°		3.321	14.31	0.582 62	22.177 53	206.705 83	0.773 14	0.998 90
3 <sup>#</sup> -N30°	480	3.172	13.43	0.579 01	24.356 07	291.735 40	0.612 41	0.998 07
4 <sup>#</sup> -N45°		3.258	13.49	0.576 02	23.078 40	224.944 00	0.625 52	0.998 14
5 <sup>#</sup> -N60°		3.711	15.83	0.566 53	26.097 60	205.604 00	0.646 44	0.998 13
均值		3.352	14.14					

根据吸水量将泥岩样品分为 I、II 两组,其中 5<sup>#</sup>-N60° 与 2<sup>#</sup>-N30° 岩样吸水量为均值以上分为 I 组,其它 3 个岩样吸水量为均值以下分为 II 组. I 组 5<sup>#</sup>-N60° 吸水量明显高于其它岩样, II 组 4<sup>#</sup>-N45° 岩样吸水量少又接近 II 组吸水量平均值,可以反映 II 组岩样吸水规律,因此选取典型 4<sup>#</sup>-N45° 与 5<sup>#</sup>-N60° 岩样,展开对泥岩吸附能力一强一弱规律性分析.对式 1 求一阶导数,得  $t$  时刻泥岩吸水速率曲线,4<sup>#</sup>-N45° 与 5<sup>#</sup>-

N60°岩样拟合曲线与求导后吸水速率曲线如图5所示.

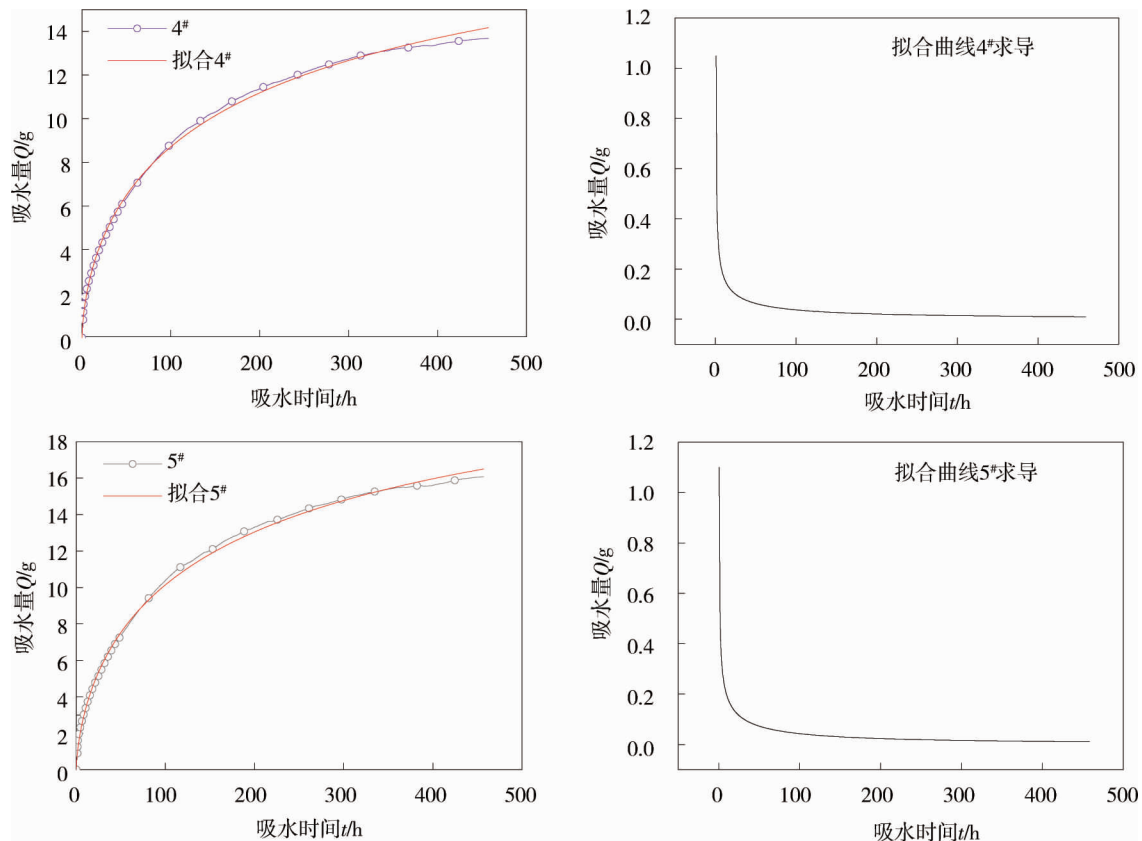


图5 4<sup>#</sup>-N45°与5<sup>#</sup>-N60°岩样拟合曲线及拟合曲线求导

由图5发现,4<sup>#</sup>-N45°与5<sup>#</sup>-N60°泥岩样品的吸水变化规律相似,吸水速率随吸水时间呈减速趋势.泥岩吸水速率均大于0,表明泥岩从吸水到吸水饱和结束,吸水量随时间增加而增大.吸水速率曲线随吸水时间增加而减少直到为0,说明泥岩吸水饱和结束.由表3可以看出,岩样吸水时间为480 h,5<sup>#</sup>-N60°泥岩饱和吸水量及吸水率最大,3<sup>#</sup>-N30°泥岩吸水量最小,但是相差不大,泥岩的气态水饱和平均吸水量均值为14.14 g,吸水率为3%~4%,吸水率均值为3.35%.因此,5个泥岩样品对气态水的吸附能力的强弱顺序为:5<sup>#</sup>-N60°>2<sup>#</sup>-N30°>1<sup>#</sup>-N0°>4<sup>#</sup>-N45°>3<sup>#</sup>-N30°<sup>[20]</sup>.

### 3 矿物成分及微观结构对泥岩气态水吸附的影响

#### 3.1 矿物成分及微观结构测试结果

泥岩中黏土矿物成分具有不同程度的亲水性,将影响泥岩对气态水的吸附能力,因此研究泥岩的黏土矿物种类与含量是十分重要的<sup>[20]</sup>.利用X射线衍射实验获取到4<sup>#</sup>-N45°、5<sup>#</sup>-N60°泥岩的全岩矿物成分及黏土矿物成分分析结果,见表4、表5,其中S为蒙脱石,I/S为伊/蒙混层,I为伊利石,K为高岭石,C\*为绿泥石,C\*/S为绿/蒙混层.

从4<sup>#</sup>-N45°与5<sup>#</sup>-N60°样品的X射线衍射结果发现,泥岩的主要矿物成分为钠长石、钾长石与石英,其中石英的含量高达30.9%,黏土矿物总量最高可达66.1%,黏土矿物中含少量的蒙脱石,而伊/蒙混层的相对含量较高,可达47%,间接增加了蒙脱石的含量,蒙脱石与伊/蒙混层具有强亲水能力<sup>[20]</sup>.

表4 泥岩全岩矿物种类及含量(4<sup>#</sup>-N45°,5<sup>#</sup>-N60°)

样品岩性	矿物种类和含量/%					黏土矿物总量/%
	石英	钾长石	钠长石	方解石	菱铁矿	
4 <sup>#</sup> -N45°	27.3	0.7	2.0	/	3.9	66.1
5 <sup>#</sup> -N60°	30.9	1.2	2.3	/	/	65.6

表5 泥岩黏土矿物种类及相对含量表(4<sup>#</sup>-N45°,5<sup>#</sup>-N60°)

样品岩性	黏土矿物相对含量/%						混层比/(%S)	
	S	L/S	I	K	C*	C*/S	L/S	C*/S
4 <sup>#</sup> -N45°	10	45	27	18	/	/	51	/
5 <sup>#</sup> -N60°	8	47	30	15	/	/	53	/

4<sup>#</sup>-N45°泥岩扫描电镜分析结果如图6a所示,当影像放大5 000倍时,看到泥岩10 μm左右宽的微裂隙,可观察到大量的块状高岭石,分布极为不均匀;当影像放大10 000倍时,观测到大量的粒表层叠片状L/S混层与溶蚀坑.5<sup>#</sup>-N60°泥岩扫描电镜分析结果如图6b所示,当影像放大5 000倍时,看到泥岩10 μm左右宽的大量微裂隙,且贯通性好;当影像放大10 000倍时,观测到片状伊利石、粒表层絮状L/S混层与溶蚀坑.泥岩中存在微裂隙等孔隙通道,为吸水提供便利条件,因此泥岩具有易吸水膨胀的特点.

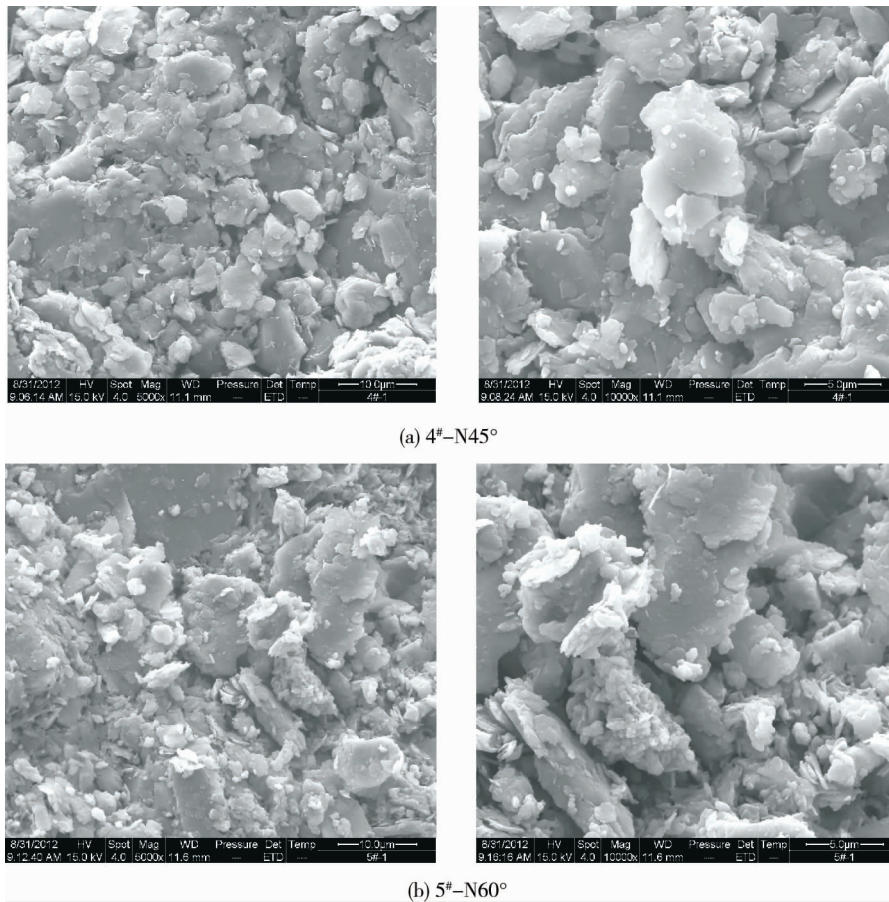


图6 泥岩的SEM影像

### 3.2 成分及结构对泥岩气态水吸附的影响

泥岩的黏土矿物含量与吸水量相关性分析如图7所示.从图7看出,泥岩样品黏土矿物含量与吸水量具有正相关关系,结果表明泥岩样品中黏土矿物含量越大,它对气态水的吸附能力越强.相关论文、书籍<sup>[20-22]</sup>表明黏土矿物的亲水性强弱顺序:蒙脱石 > 伊蒙混层 > 伊利石 > 高岭石 > 绿泥石.其中,钙、镁、钠离子等活动性强的阳离子存在蒙脱石中,因此具有强亲水特性,而其他黏土矿物成分交换性极强的阳离子较少,导致吸水性均弱于蒙脱石.泥岩全岩矿物成分中石英、钾长石与钠长石也存在镁、钠、钾等活动性强的阳离子,因此又提高其吸水性质.而4<sup>#</sup>-N45°泥岩样品中石英、钾长石与钠长石含量均少于5<sup>#</sup>-N60°泥

岩样品,间接表明了气态水吸附能力  $5^{\#}-N60^{\circ} > 4^{\#}-N45^{\circ}$  泥岩样品。

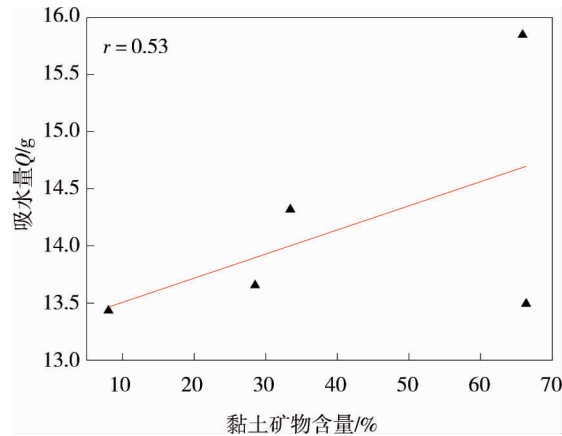


图7 泥岩的黏土矿物含量与吸水量相关性

泥岩样品在吸水过程中,吸水速率与吸水时间呈负相关,吸水过程中孔隙通道变化示意图如图8所示.泥岩样品吸水致使黏土矿物微结构发生变化,将导致内部孔隙之间的连通性受到阻碍,内部孔隙壁面发生膨胀,致使泥岩吸水受到阻碍.但是,吸水量与吸水时间呈正相关,未达到饱和状态时吸水量将持续增加至饱和,由于泥岩存在层理,内部微裂隙等,水作用将使泥岩处于不稳定状态<sup>[20]</sup>.

综合以上分析可知,在沙吉海矿区中生界侏罗系含煤地层巷道围岩中,泥岩中存在大量裂隙和微溶洞,观察到片状高岭石存在裂隙,且片絮状 I/S 混层黏土矿物在粒表中可见,具有较强的膨胀性.泥岩中含有的蒙脱石与伊/蒙混层具有强亲水性,间接造成泥岩吸附气态水能力强,其微裂隙在水及多应力场作用下扩大和贯通,进一步降低了围岩稳定性.

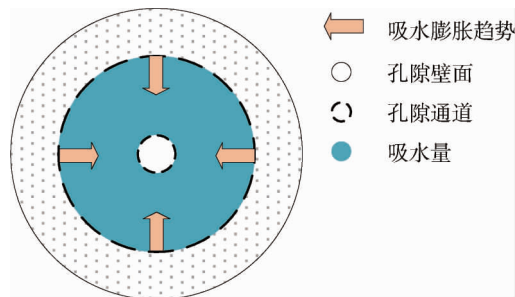


图8 吸水过程中泥岩孔隙通道变化

## 4 结论

1) 新疆沙吉海煤矿侏罗系泥岩5个样品的气态水吸附特性及变化规律相似,吸水量与吸水时间呈正相关,吸水速率与吸水时间呈负相关.5个泥岩气态吸水能力差异性小,对气态水的吸附能力的强弱顺序为: $5^{\#}-N60^{\circ} > 2^{\#}-N30^{\circ} > 1^{\#}-N0^{\circ} > 4^{\#}-N45^{\circ} > 3^{\#}-N30^{\circ}$ .

2) 5个泥岩样品在吸水过程中,吸水量在增加,而吸水速率与吸水时间呈负相关,这主要是由于泥岩吸水致使黏土矿物微结构发生变化,导致内部孔隙之间的连通性受到阻碍,内部孔隙壁面发生膨胀,泥岩孔隙过水通道变窄,阻碍了泥岩吸水.

3) 泥岩中所含有的黏土矿物成分及含量对其气态水吸附特性有明显的影响.蒙脱石与伊/蒙混层具有强亲水性,导致泥岩吸附气态水能力强,因此泥岩的膨胀性高,其微裂隙在水及多应力场作用下扩大和贯通,进一步降低了围岩稳定性.

## 参考文献:

- [1] 袁越,付金磊,秦坚,等.高渗压下砂砾层巷道变形稳定性分析[J].矿业工程研究,2018,33(4):22-30.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005(16):2803-2813.
- [3] 杨晓杰,王嘉敏,张民,等.大强煤矿深部巷道围岩吸水软化规律试验研究[J].矿业科学学报,2017,2(5):432-438.
- [4] 何满潮,邹正盛,邹友峰.软岩巷道工程概论[M].徐州:中国矿业大学出版社,1993.
- [5] 何满潮,景海河,孙晓明.软岩工程力学[M].北京:科学出版社,2002.
- [6] 何满潮,孙晓明.中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南[M].北京:科学出版社,2004.
- [7] 袁越.沙吉海矿区中生代砂砾层特性及其支护对策[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [8] 何满潮,袁越,王晓雷,等.新疆中生代复合型软岩大变形控制技术及其应用[J].岩石力学与工程,2013,32(3):433-441.
- [9] 徐智敏,高尚,孙亚军,等.西部典型侏罗系富煤区含水介质条件与水动力学特征[J].煤炭学报,2017,42(2):444-451.
- [10] 袁越,刘圣.沙吉海煤矿特大型软岩皮带卸载硐室围岩控制对策研究[J].工程研究-跨学科视野中的工程,2017,9(5):446-453.
- [11] 达瓦,明德巴依尔.新疆某工程的膨胀软岩地质特性及处理[J].西部探矿工程,2008(11):55-57.
- [12] Guo H Y, Lei X Y, Zhang Y M, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of natural soft rock at high stress state[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(3):489-495.
- [13] Guo H Y, He M C, Sun C H, et al. Hydrophilic and strength-softening characteristics of calcareous shale in deep mines[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012,4(4):344-351.
- [14] Guo H Y, Li B, Zhang Y M, et al. Hydrophilic characteristics of soft rock in deep mines[J].International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(2):177-183.
- [15] 杨晓杰,王嘉敏,张秀莲,等.深井泥岩吸水软化规律实验研究[J].煤炭技术,2017,36(9):1-3.
- [16] 张娜,柳龙标,侯东文,等.深部煤矿钙质页岩吸水特征实验研究[J].矿业研究与开发,2014,34(5):10-15.
- [17] 郭宏云,赵健,柳培玉.深部软岩与水作用后的强度软化特性及化学分析[J].岩石力学与工程学报,2018(s1):3374-3381.
- [18] 郝耐,张秀莲,王淑鹏,等.敦煌石窟砂岩吸水特性及力学效应试验研究[J].科学技术与工程,2017(12):26-31.
- [19] 邓华锋,方景成,李建林,等.含水状态对红层软岩力学特性影响机理[J].煤炭学报,2017,42(8):1994-2002.
- [20] 张娜,赵方方,张毫毫,等.岩石气态水吸附特性及其影响因素实验研究[J].矿业科学学报,2017,2(4):336-347.
- [21] 张秀莲,杨晓杰,郭宏云,等.敦煌莫高窟支撑体砾岩吸水规律实验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):940-948.
- [22] 赵杏媛,张有瑜.粘土矿物与粘土矿物分析[M].北京:海洋出版社,1990.