

# 深部矿井岩石水稳性微观机理及强度软化特性研究

段宏飞, 姜振泉, 朱术云, 肖为国, 李冬林

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了研究深部矿井岩石水稳性性质及遇水后强度软化的规律, 对巨野煤田千米深部矿井岩石进行了系统的水解试验, 表现出6种水解变形破坏形式, 结合极限膨胀量特征总结了4类水稳性特征类型, 并从饱水试验空隙率的角度论证了分类的合理性。在此基础上, 分析了岩石水稳性差异的微观机理, 认为微观结构的差异是影响水稳性特征类型的主要原因, 而岩石内部高岭石、伊利石和伊蒙混层的相对定量含量是另一原因。岩石饱水后其强度软化明显, 而岩石水稳性特征类型对其软化特征具有明显影响并具有一致性, 其中饱水后抗拉强度试验中岩石主要呈现层状破坏, 而岩石抗剪强度软化的关键是内摩擦角 $\varphi$ 值的变化。不同饱水时间抗拉强度试验表明, 岩石抗拉强度随饱水时间的增加呈指数规律减小, 最后趋于稳定值; 重复浸水-压缩试验表明, 多次重复浸水-压缩使得岩样的最终破坏应力下降, 出现了强度疲劳现象, 其值小于饱和试样一次性加压破坏时的应力, 更小于天然状态试样加压破坏时的应力。这是因为岩石每次浸水后内部结构的膨胀效应使其内部结构发生了软化, 从而降低了岩石的结构连接强度。

**关键词:** 深部矿井; 水稳性; 微观结构; 强度软化

中图分类号: TU451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)09-1636-10

**作者简介:** 段宏飞(1983-), 男, 山西大同人, 博士研究生, 主要从事煤矿工程地质水文地质与岩土工程方面的学习和研究工作。E-mail: dhfcumt9@126.com。

## Micro-mechanism of water stability and characteristics of strength softening of rock in deep mines

DUAN Hong-fei, JIANG Zhen-quan, ZHU Shu-yun, XIAO Wei-guo, LI Dong-lin

(School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to study the properties of water stability and the rules of strength softening of rock, systematic hydrolysis tests are carried out on rock samples from deep mines of Juye Coal Field at depth below one kilometer. The results show six types of hydrolysis deformation and failure. Based on the limit expansion quantity feature, four types of water stability properties are summarized, to demonstrate the rationality of classification by voidage. On this basis, the micro-mechanism of difference in water stability is analyzed, and the main reason lies in the difference in micro-structure and the other reasons include the relative quantitative contents of clay mineral of kaolinite, illite, illite/montmorillonite mixing layer. The strength softening feature of rock samples changes obviously after saturation and is affected by the type of their water stability properties. Moreover, it has good consistency. Layered failure mainly appears in the saturated tensile strength tests. Change in internal friction angle  $\varphi$  is the key to change in shear strength softening feature. The tensile strength tests on saturated rock samples show that the tensile strength of rock samples decreases with the increase of saturated time with a trend of an exponential decline and has a stable value at the end. The repeated immersion compression tests show that the final failure stress drops on condition of repeated immersion compression of rock samples, and strength fatigue appears. Its value is less than the failure stress of saturated samples under one-time pressure condition, and is much less than the failure stress of natural state samples. This is because the expansion effect of the internal structure of rock samples after immersion makes their internal structure soften, which reduces the connection strength of rock structure.

**Key words:** deep mine; water stability; microstructure; strength softening

## 0 引言

岩石遇水作用产生的各种物理、化学乃至力学性质的变化, 是影响工程岩体强度的重要因素<sup>[1-2]</sup>, 而岩

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11-0306); 中国矿业大学青年科研基金资助项目(2009A029)  
收稿日期: 2011-09-02

石强度降低一直是困扰地下工程围岩稳定性的技术难题之一。在矿山开采领域, 煤矿巷道所穿越的地层多为沉积岩地层, 且多为软岩, 水稳性性差<sup>[3]</sup>, 随着煤炭向深部开采, 岩石在高温高应力高承压等条件下其强度软化特征越发明显。岩石水稳性及软化机制问题属于水岩耦合作用研究范畴, 是目前国际上岩石力学与工程地质学领域的前沿课题之一<sup>[4]</sup>, 对于重大工程的设计与工程维护具有重要意义<sup>[5]</sup>。

Arnould<sup>[6]</sup>从泥岩内部矿物质成分与微观结构角度分析了泥岩容易崩解的原因; Risnes 等<sup>[7]</sup>研究了水对白垩岩的弱化效应及其水活动性对微观结构的影响; 周瑞光等<sup>[8]</sup>、罗鸿禧等<sup>[9]</sup>运用统计学方法分析了岩石强度与所含黏土矿物的物化性指标的关系; 杨春和<sup>[10]</sup>等测定了板岩不同浸泡时间下孔隙度的变化; 朱建明等<sup>[11]</sup>对矿井软岩的微观特性进行了研究; 刘长武等<sup>[3]</sup>在对泥岩饱水试验的基础上, 分析认为软岩遇水崩解软化与其物质成分和微结构有关; 周翠英等<sup>[5,12-13]</sup>开展了粉砂质泥岩饱水条件下微观结构的测试与力学性质的试验, 认为软岩力学性质降低的原因是多种机制综合作用的结果; 李鹏等<sup>[14]</sup>从水对岩石的蠕变特性进行了研究; 乔丽苹等<sup>[15]</sup>研究了水对岩石的强度、变形模量的影响; 黄宏伟等<sup>[16]</sup>对泥岩进行了饱水试验的研究, 并在微观结构变化规律的基础上提出了泥岩软化的微观机制。综合这些研究成果不难发现, 关于岩石水稳性问题的研究主要集中在原状结构岩体遇水作用后的强度软化性及结构稳定性, 极少考虑结构扰动岩石的水稳性特点, 另外关于千米深部矿井岩石的水稳性特征研究也较少, 基于此, 本文以巨野煤田赵楼煤矿、万福煤矿千米深部矿井3煤顶底板岩样为研究对象, 进行了系统的水解试验、微观结构分析和相关强度软化特征试验, 探讨了不同水稳性特征类型饱水岩石的力学特性。

## 1 水稳性特征分类

岩石水稳性特征主要体现于两方面: 一是岩石遇水变形破坏现象, 包括岩石浸水后掉渣、表面开裂、崩解碎裂及至泥化现象; 二是岩石遇水膨胀的现象, 一般以膨胀量指标来反映岩石的膨胀程度。文中笔者以巨野煤田赵楼煤矿、万福煤矿千米深部矿井3煤顶底板7个层组37个层位的212组岩样为研究对象, 分别进行了系统的岩石浸水变形破坏与膨胀试验, 了解了大量岩石遇水变形破坏的情况及相应的膨胀量, 在此基础上总结了6类岩石水解变形破坏形式和4类水稳性特征。

### 1.1 水解试验变形破坏形式

水解试验采用自然浸泡饱水方式, 将岩样置于容器

中, 缓慢加水至岩样完全浸泡于水中, 然后连续观察30 d 浸水过程内岩样的水解变形破坏情况, 根据试验观测情况, 总结了6类浸水后岩样的水解变形破坏形式。

(1) 完整I型, 岩石浸水后无掉渣、开裂和膨胀现象, 强度很高、用力敲击不碎; 主要岩性为细砂岩、含砾粗砂岩、粉细砂岩互层和石灰岩。岩样浸水后变形破坏情况如表1和图1(a)所示。

表1 完整I型岩石浸水变形破坏特点

Table 1 Immersion deformation and failure characteristics of complete I -type rock samples

试样编号	深度/m	岩性	浸水变形破坏情况
ZS-4-5	896.8~897.4	细砂岩	无掉渣现象, 用力敲击不碎
ZS-10-1	842.1~843.2	含砾粗砂岩	岩石无变化, 用力敲击不碎
ZS-10-8	895.7~913.3	粉细砂岩互层	岩石无变化, 用力敲击不碎
主井9	837.1~840.3	石灰岩	岩石无变化, 用力敲击不碎

注: 赵楼煤矿、万福煤矿岩样, 试样编号前分别带 ZS- 和主井。

(2) 完整II型, 岩石浸水后无开裂现象, 有极少量掉渣, 手掰轻巧不碎, 用力敲击在局部沿隐微裂隙开裂; 主要岩性为粉砂岩、砂质泥岩。岩样浸水后变形破坏情况如表2和图1(b)所示。

表2 完整II型岩石浸水变形破坏特点

Table 2 Immersion deformation and failure characteristics of complete II -type rock samples

试样编号	深度/m	岩性	浸水变形破坏情况
ZS-7-9	987.5~987.3	泥岩	浸水14 d 后无明显变化, 轻敲不碎; 浸水30 d 用力敲击沿隐微节理开裂
主井13	854.8~856.7	粉砂岩	除有轻微掉渣现象, 岩样无变化, 用力敲击不碎
主井25	913.3~920.6	泥岩	浸水14 d 后有轻微掉渣现象, 沿层理出现为微裂缝, 用力敲击沿微裂缝开裂

(3) 不崩解型, 岩石浸水后不发生崩解破坏, 仅出现轻微掉渣或少量裂隙, 用力敲击沿裂隙、节理开裂; 主要岩性为泥岩、砂质泥岩等。岩样浸水后变形破坏情况如表3和图1(c)所示。

表3 不崩解型岩石浸水变形破坏特点

Table 3 Immersion deformation and failure characteristics of no crumbling-type rock samples

试样编号	深度/m	岩性	浸水变形破坏情况
ZS-10-4	866.1~875.8	泥岩	浸水7 d 有极少量的掉渣, 敲击可沿裂隙面开裂
ZS-7-1	1106.1~1112.5	砂质泥岩	浸水初期岩块有掉渣现象, 用力敲击沿节理开裂
ZS-8-2	1110.5~1119.2	泥岩	浸水7 d 有极少量的掉渣, 敲击可沿裂隙面开裂
主井10	1158.1~1167.6	泥岩	浸水初期岩块有掉渣现

象,用力敲击沿节理开裂

(4) 裂解型,岩石浸水后有掉渣现象,可沿裂隙、节理轻敲或手掰开裂,呈片状开裂或块状崩裂、塌落等;主要岩性为泥岩、泥质细砂岩和粉细砂岩互层等。岩样浸水后变形破坏情况如表4和图1(d)所示。

表4 裂解型岩石浸水变形破坏特点

Table 4 Immersion deformation and failure characteristics of pyrolysis-type rock samples

试样编号	深度/m	岩性	浸水变形破坏情况
ZS-4-8	924.1~931.5	粉细砂岩互层	掉渣,产生裂隙,沿层理开裂
ZS-7-7	937.3~938.2	泥岩	少量掉块,周围产生裂纹,手捏整块岩石成粉碎状,碎末成片状
主井5	799.2~805.1	泥岩	表面出现裂纹,手掰或敲击后顺裂纹破坏
主井14	857.8~864.1	泥质细砂岩	掉渣,产生交叉裂纹,崩解成几块,

(5) 碎解成块型,岩石浸水后吸水膨胀崩解,最后崩解为片状碎屑或碎块或者完全碎裂;主要岩性为铝质泥岩、泥岩、粉砂岩等。岩样浸水后变形破坏情况如表5和图1(e)所示。

表5 碎解成块型岩石浸水变形破坏特点

Table 5 Immersion deformation and failure characteristics of broken pieces-type rock samples

试样编号	深度/m	岩性	浸水变形破坏情况
ZS-4-1	875.6~883.3	铝质泥岩	浸水2d产生垂直裂隙,掉渣、水平开裂,成碎块状较强的掉渣现象,沿层理裂隙开裂,轻掰手捏易碎,并有沉渣成泥现象
ZS-4-4	899.7~902.1	泥岩	浸水5d掉渣,10d后手捏易碎
ZS-4-6	907.1~908.9	泥岩	浸水5d掉渣,10d后手捏易碎

(6) 泥化型,岩石浸水后最终崩解成碎末,崩解物为粒状;主要岩性为泥岩、夹炭屑细砂岩、中砂岩等。岩样浸水后变形破坏情况如表6和图1(f)所示。

表6 泥化型岩石浸水变形破坏特点

Table 6 Immersion deformation and failure characteristics of mud-type rock samples

试样编号	深度/m	岩性	浸水变形破坏情况
ZS-10-3	861.7~863.5	细砂岩	浸水7d易沿炭屑面掰开成碎块,碎块可用手研成碎末
主井18	877.3~880.5	泥岩	浸水3d发生膨胀崩解,成碎块状,手搓碎块成细小颗粒

1.2 膨胀试验膨胀量确定

由于黏土矿物亲水性的特点,岩石浸水后因晶格结构一定程度的扩容而发生膨胀变形、这对矿井围岩支护极为不利。极限膨胀量,也称极限线膨胀率,是指在一定压力(或者压力为零)下岩石浸水膨胀变形稳定时试样增加高度与原高度之比的百分数。笔者采

用压力为零的方法研究了6类水解破坏形式岩石的极限膨胀量,表7为6类岩石水解变形破坏形式所对应的极限膨胀量,图2为6类岩石水解变形破坏形式平均极限膨胀量柱状图。从图2中可以更加直观反映出表7的相关内容,可以看出,随着岩石水解变形破坏程度的增加,极限膨胀量也在一定增加,岩石的极限膨胀量基本上与其水解变形破坏程度增加的趋势一致,呈正相关关系。其中,完整II型与不崩解型极限膨胀量相近,参考表7数据,其极限膨胀量都小于0.5%;裂解型与碎解成块型极限膨胀量相近,参考表7数据,其极限膨胀量总体小于3.0%;同样方法分析,完整I型极限膨胀量小于0.2%;泥化型极限膨胀量大于3.0%。

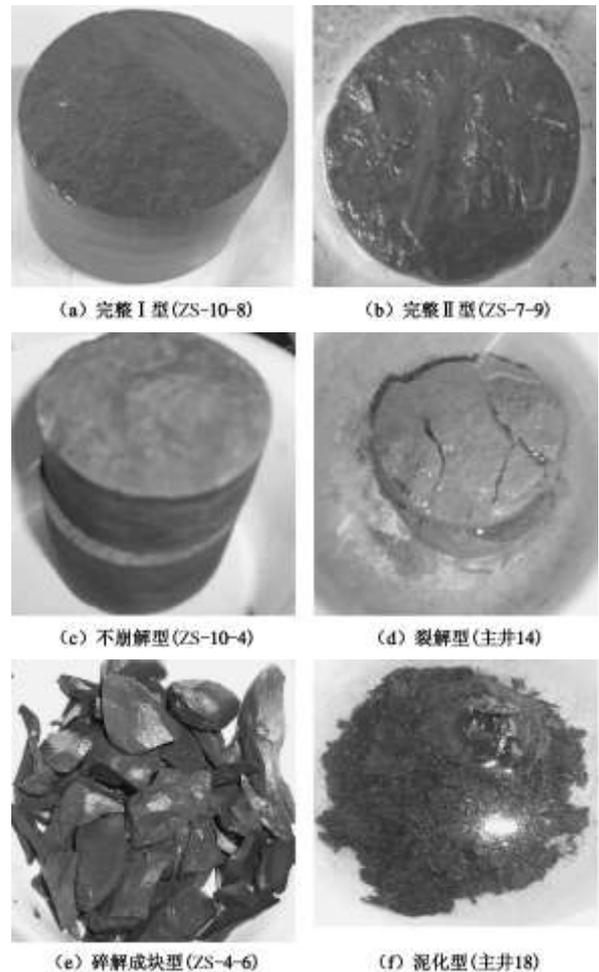


图1 6类岩石水解变形破坏形式

Fig. 1 Six types of hydrolysis deformation and failure

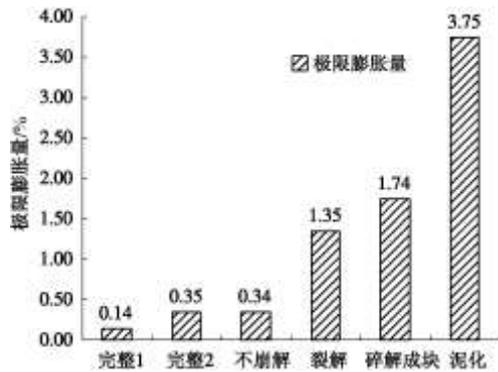


图 2 6 类岩石水解变形破坏形式平均极限膨胀量柱状图

Fig. 2 Histogram of average limit expansion quantities

### 1.3 水稳性特征分类

由岩石浸水变形破坏表现的 6 类形式, 并结合其与极限膨胀量的对应关系, 总结了岩石的 4 类水稳性特征:

I: 完整 I 型, 极限膨胀量小于 0.2%, 水稳性好;

II: 完整 II 型、不崩解型, 极限膨胀量小于 0.5%, 水稳性较好;

III: 裂解型或碎解成块型, 极限膨胀量总体小于 3%, 水稳性较差;

IV: 泥化型, 极限膨胀量大于 3%, 水稳性差。

其中, I 类为硬岩, 浸水饱和后不膨胀崩解, 强度降低不明显; II, III, IV 类为浸水饱和和变形破坏明显, 强度容易降低的软岩 (下文中分析研究岩样多为 3 煤顶底板水稳性特征类型为 II, III, IV 类的软岩)。

在总结了 4 类水稳性特征类型岩石的基础上, 选取了部分岩样测试了其天然含水率和饱水试验空隙率 (见表 8), 天然含水率和饱水试验空隙率是岩石浸水后所表现出来的重要水理性质, 它反映了岩石内部结构的一些差异。其中, 饱水试验反映的空隙率指岩样饱水后空隙体积与总体积之比, 它反映了岩石内部空隙的发育情况, 受岩石内部孔裂隙数量、大小、分布、开闭程度以及联通情况等因素的影响。而天然含水率是天然状态下岩石中水的质量与岩石烘干后的质量之比。表 8 显示了不同水稳性特征类型的岩石天然含水率与饱水试验反映的空隙率数据, 反映了不同水稳性特征类型与天然含水率、空隙率之间的变化关系, 为了能够直观地反映岩石天然含水率、空隙率与水稳性特征类型的关系, 取相同水稳性特征类型岩石的天然含水率、空隙率平均值做柱状图, 如图 3 所示。图 3 直观地显示了岩石水稳性特征越差, 岩石的天然含水率值越大、空隙率值越大。再结合表 8 数据分析, 岩石的天然含水率值在 0.62%~3.62% 之间, 其中 I, II 两类多集中在 0.62%~1.88% 之间, III, IV 类岩石多集中在 1.60%~3.62% 之间; 而饱水试验反映的岩石空隙率值在 0.31%~6.70%, 其中 I, II, III 3 类基本集中在 0.50%~2.50% 之间, 而 IV 类基本集中在 3.00%~

7.00% 之间。分析认为, 岩石浸水后, 水的作用使岩石中空隙的相互作用加剧, 导致微空隙扩展及其相互作用快速发展, 导致岩体的性质恶化, 所以, 岩石中

表 7 6 类岩石水解变形破坏形式所对应极限膨胀量

水解变形破坏形式	极限膨胀量/%				
	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4	平均值
完整 I 型	0.16	0.20	0.06	—	0.14
完整 II 型	0.37	0.32	—	—	0.35
不崩解型	0.40	0.29	0.39	0.27	0.34
裂解型	1.62	1.51	0.92	—	1.35
碎解成块型	1.79	1.08	2.48	1.61	1.74
泥化型	3.50	4.00	—	—	3.75

表 8 不同水稳性类型岩石天然含水率与空隙率

Table 8 Natural moisture contents and voidages of rock samples with different types of water stability properties

试样编号	岩性	含水率/%	空隙率/%	水稳性类型
zs-4-5	细砂岩	0.62	0.78	I
zs-10-1	含砾粗砂岩	1.07	2.5	
zs-10-8	粉细砂岩互层	1.18	0.31	
O2x-6-6	灰白色中砂岩	1.37	1.63	
zs-7-9	泥岩	1.01	0.98	II
O2x-5-6	灰黑色粉砂岩	1.54	1.53	
O2x-5-13	紫红色泥岩	1.44	2.35	
zs-10-4	泥岩	1.3	1.69	
O2x-5-9	杂色泥岩	1.88	0.79	
O2x-6-1	粉细砂岩互层	1.4	1.73	
zs-4-8	粉细砂岩互层	1.6	3.11	III
zs-7-7	泥岩	1.84	1.94	
O2x-5-5	黑色粉砂岩	2.39	1.83	
O2x-6-10	紫红色泥岩	1.62	1.38	
zs-4-1	泥岩	2.55	4.3	IV
zs-4-4	泥岩	1.39	6.4	
zs-7-3	含砾中砂岩	1.02	1.52	
O2x-6-4	灰黑色泥岩	2.82	3.22	
zs-10-3	细砂岩	2.89	3.1	IV
O2x-5-4	黑色中砂岩	3.12	6.7	

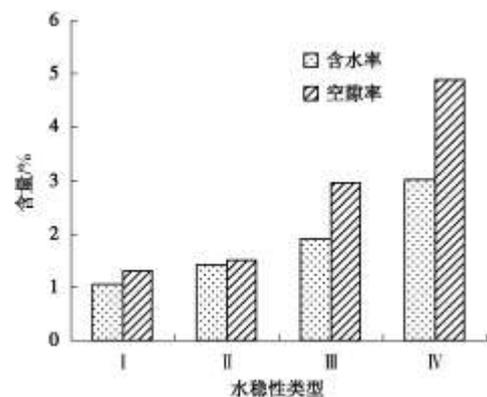


图 3 4 类水稳性特征类型平均天然含水率与空隙率柱状图

Fig. 3 Histogram of average nature moisture contents and voidages

空隙越发育其水稳性就越差, 而岩石水稳性越差其空隙率就越高, 可见饱水试验反映的岩石空隙率是岩石

水稳性特征类型变化的影响因素之一。基于此，说明了4类岩石水稳性特征类型的划分趋势是合理的。

## 2 水稳性差异的微观机理分析

岩石水解试验表现出4种水稳性特征类型，出现了6种水解变形破坏形式，在微观机理上必然受到岩石内部所含黏土矿物和微观结构的影响。

### 2.1 黏土矿物

黏土矿物是岩石矿物组成成分中最为活跃的部分，它的亲水性、膨胀性、分散性、可塑性等一系列独特性质影响着岩石的水稳性特征，因此，岩石中黏土矿物的组成、类型、含量将直接关系到岩石的水稳性特征。岩石中主要黏土矿物有蒙脱石、伊利石、高岭石和伊/蒙混层等。目前，有关黏土矿物相对定量分析的方法有电子显微镜、红外吸收光谱、差热分析、X射线方法等。笔者取巨野煤田3煤顶底板37个自然层位的泥质岩(除I类外)的17个浸水后表现出不同水稳性特征的代表岩样，用D/Max-3B型X射线衍射仪采用定向片法制样测定其黏土矿物相对定量，其相对定量是依照原石油部标准进行，相对定量是指每一种黏土矿物相对于样品中总黏土所占的百分比，而不是占原样的百分比。具体测定结果见表9，并以ZS10-3试样的X-射线衍射图谱为例进行黏土矿物含量分析，如图4所示，可以看出，其自然片峰层间距 $11 \times 10^{-1}$  nm，乙二醇饱和和处理后层间距膨胀现象不明显，说明了该峰不是钠蒙脱石( $12 \times 10^{-1}$  nm)形成的，也说明了样品主体虽为伊蒙混层(参见表9数据)，但混层中伊利石成分较多。一般来说伊蒙混层峰宽化低矮且左侧背底较高，而本样品，该峰不仅高大较对称且左侧背底不高，说明了样品中的伊利石处在向混层、蒙脱石方向发展变化，即伊利石混层化。

分析表9数据，可以看出随着水稳性特征类型的变化，岩石中各黏土矿物的相对定量含量变化较大，但难以直观反映出影响岩石水稳性特征的主要黏土矿物。为了直观分析，将同种水稳性特征类型的试样相同黏土矿物其相对定量含量取平均值后作柱状图，如图5所示。由图5可以直观的看出，随着水稳性特征类型的变化，水解岩石变形破坏程度的增加，岩石黏土矿物中高岭石与伊利石含量呈减小趋势，伊蒙混层的含量呈递增趋势；而蒙脱石与绿泥石含量基本变化不大，参考表9数据，分别小于4%与3%。这是由于蒙脱石具有很强的膨胀能力，结合图2可初步解释蒙

表9 岩样黏土矿物相对定量分析结果

Table 9 Results of clay minerals in relative quantitative analysis

试样编号	K	Cl	I	I/M	M	水稳性类型
O2X5-13	84	7	5	3	1	II
02X5-6	57	2	36	4	1	
ZS7-9	71	2	21	5	1	

O2x5-9	53	3	25	16	3	III
O2x5-7	55	1	39	4	1	
ZS10-4	67	1	9	21	2	
O2x5-5	55	1	16	24	4	
O2x6-10	53	3	29	12	3	
ZS7-7	76	3	14	5	2	
O2x6-4	53	3	23	19	2	IV
ZS4-1	66	1	5	25	3	
ZS4-4	67	2	13	15	3	
O2x6-4	38	2	12	40	8	
ZS10-3	32	2	5	59	2	
O2x5-4	27	2	2	66	3	
主井18	58	3	4	32	3	IV
主井6	54	3	16	24	3	

注：K：高岭石；Cl：绿泥石；I：伊利石；I/M：伊利石/蒙脱石；M：蒙脱石。

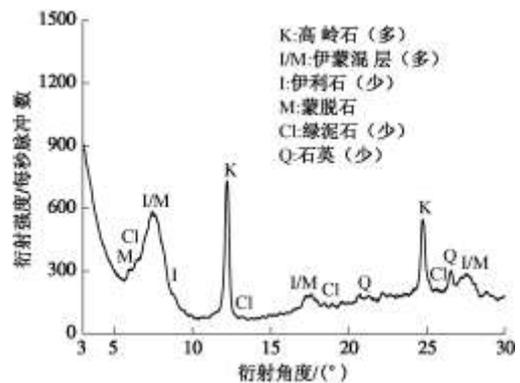


图4 ZS10-3试样的X-射线衍射图谱

Fig. 4 X-ray atlas of sample ZS10-3

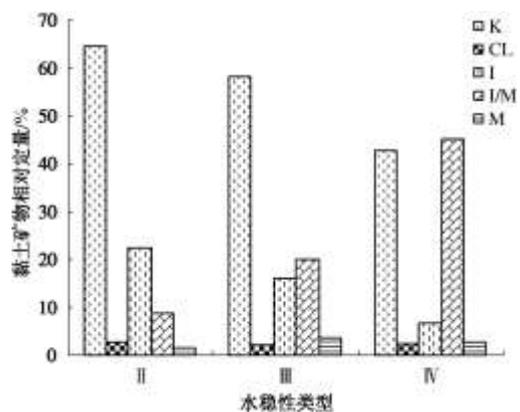


图5 不同水稳性特征岩样各黏土矿物平均含量曲线图

Fig. 5 Histogram of average contents of various clay minerals

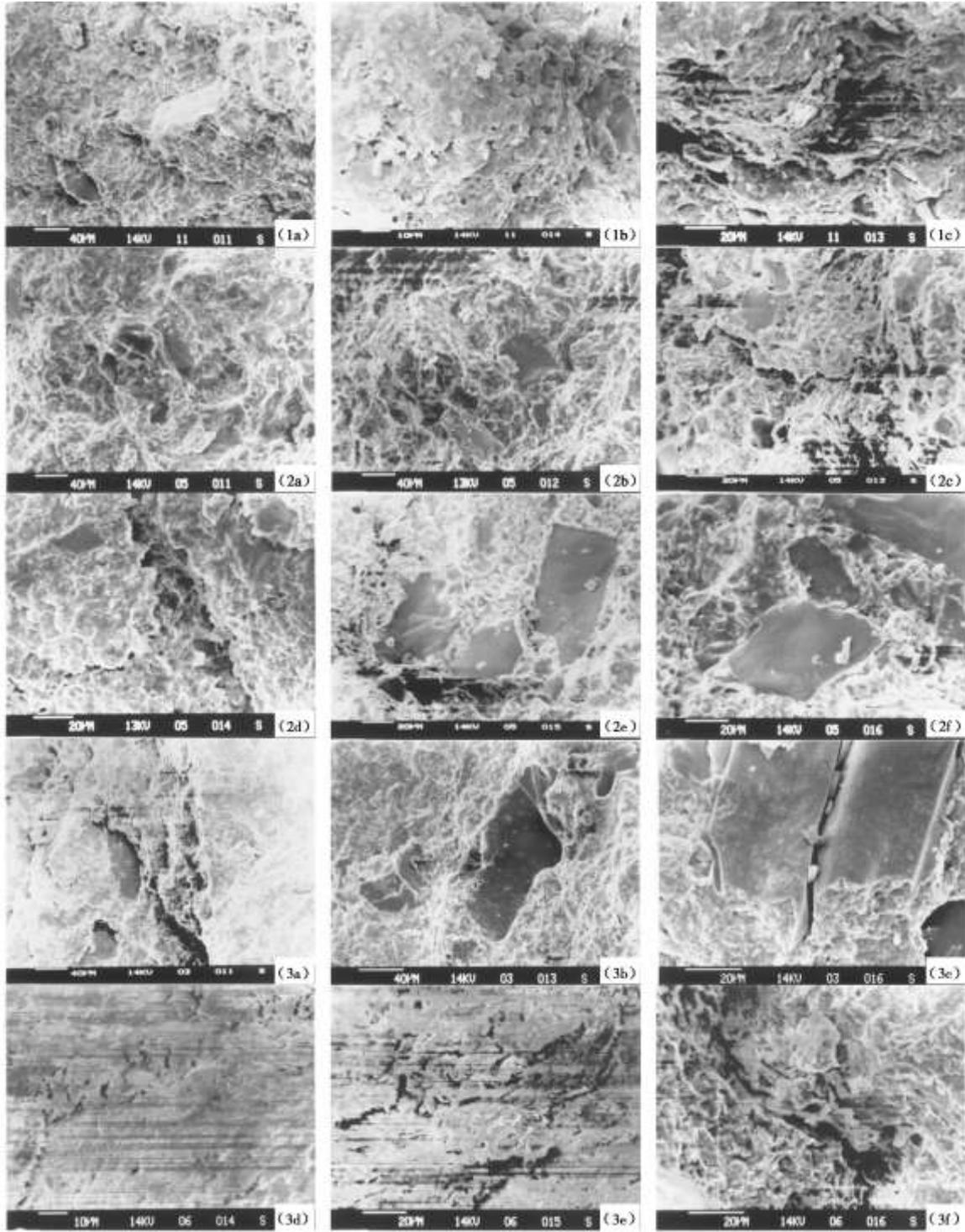
脱石含量变化不大的原因。伊利石的膨胀能力次之，高岭石最弱，几乎不具膨胀性，伊蒙混层大体上呈现了与水稳性特征类型一致的趋势，而伊利石呈现降低趋势，与水稳性特征类型相背。由此可知，黏土矿物中高岭石、伊利石和伊蒙混层的相对定量含量是影响岩石水稳性特征类型差异性的原因之一，然而它们之间存在怎样的量化关系还将值得进一步探讨。

### 2.2 微观结构差异

笔者取巨野煤田3煤顶底板软岩中13种不同水稳性特征类型的代表性岩样进行扫描电镜分析，了解不同

水稳性特征岩石微观结构上的差异从而探究岩石微观结构对其水稳性特征的影响。根据代表岩样的电镜扫描分析情况 (见图 6), 结合 X 射线衍射分析结果: 水稳性特征 II 类岩石中石英含量较多且多存在一些粗大颗粒, 其中黏土矿物以高岭石高含量为特点 (见表 9、图 6), 矿物颗粒分布杂乱, 无明显的方向性。微观结构总体比较致密局部疏松, 总体结构致密表现为粗大

颗粒多被细粒物质充填, 除颗粒边沿含有少量的微小空洞外, 连通性较好的大空隙基本没有; 而局部疏松则表现在呈 S 状分布的伊蒙混层集中部位 (见图 6 (1a)、图 6 (1b) 和图 6 (1c))。分析认为: 水稳性特征 II 类岩石总体致密局部疏松的微观结构形态有利于抑制水分子的破坏作用, 这是其浸水后无明显水解



注: 图 (1) (2) (3) 分别代表水稳性特征类型 II、III、IV 类的代表岩样; a, b, c, d, e, f 分别代表同一岩样不同角度的扫描图片。

图 6 代表岩样的电镜扫描分析图

Fig. 6 Images of representative rock samples by SEM

的主要原因。岩石浸水条件下, 水分子容易进入岩石内部结构疏松的部位并导致伊蒙混层膨胀, 而伊蒙混

层的S状分布形态对局部膨胀有降低作用,使形成的膨胀力难以向周围扩张,从而使得这类岩石浸水后宏观上无明显的崩解现象。

水稳性特征III类岩石中微观结构较致密,无明显带状分布特征。图6(2a)中显示细粒伊蒙混层矿物分布不规则,无明显方向性;图6(2c、2d)显示此类软岩局部含原生裂隙,裂隙扩展方向不明显且无破坏性扩展特征证实了此裂隙的原生特点,对比图6(2b)和图6(2f)发现,此类软岩浸水后产生了大量新生裂纹,这些裂纹基本上沿原生裂隙发育;图6(2e)和图6(2f)显示粗大颗粒表面有台阶状痕迹,反映了此类软岩中的粗大颗粒以石英或长石类为主,能谱分析进一步证实其中石英占有绝对比例且颗粒间胶结密实。分析认为:水稳性特征III类岩石浸水后亲水性黏土矿物的结构性轻微膨胀是产生新生裂纹的主要原因,而新生裂纹的产生又为水的进入提供了便利,从而使得裂隙部位的水与黏土矿物进一步发生水化学反应,导致黏土矿物进一步膨胀使得在裂隙处出现了应力集中,从而形成了沿裂隙薄弱面裂解或碎解成块这种宏观的水解现象。

水稳性特征IV类岩石中矿物呈片层状分布,伊蒙混层和高岭石互层,断裂一般在伊蒙混层面(见图6(3a)和图6(3b)软岩断面电镜扫描图片),图6(3c)显示切向方向镜下矿物颗粒形态,看出粗大矿物切向基本上没有黏土矿物胶结充填;图6(3d)和图6(3e)中黏土矿物局部空隙发育,成线状或条带状分布,孔径形状不规则、扩散方向不明显,电子束轰击下充电现象严重,说明结构疏松,空洞连通性好。图6(3f)可观察到局部孔隙纵向扩散形成裂隙。分析认为:水稳性特征IV类岩石微观结构具有以下特点:总体结构致密,局部黏土矿物结构松散,孔隙连通性好,沿孔隙形成裂隙;伊蒙混层和高岭石互层排列;断裂面在伊蒙混层面出断开,断面伊利石颗粒粗大且粒间无充填。水稳性特征IV类岩石的这些特点利于伊蒙混层矿物浸水产生层间崩解,并且在粒间孔隙发育容易导致水沿颗粒裂隙进入层间黏土矿物,当水进入局部松散结构部位情况下,内部的不均匀膨胀容易导致岩石碎解泥化。

### 3 强度软化特征

岩石浸水后表现出4类水稳性特征类型,通过微观机理上的分析可知,岩石水稳性特征类型不仅受到岩石内部黏土矿物的影响,也受到其微观结构的影响,岩石浸水后强度降低是困扰地下工程围岩稳定性的难题之一,为了进一步研究岩石浸水后微观结构的变化对岩石工程性质的影响,选择了3煤顶底板4类水稳性特征类型岩石进行了强度软化试验和重复浸水—压缩试验,以研究岩石浸水后其强度软化特征、强度软

化的时间效应以及强度软化的扰动效应。

#### 3.1 抗压、抗拉、抗剪强度软化特征

表10为3煤顶底板10组4类水稳性特征岩样抗压强度试验测试结果,由表中数据容易看出,各岩样的抗压强度软化较为明显,饱水之后均出现了不同程度的降低,降低幅度达到5%~96%。表10反映出同种岩性不同水稳性类型的岩样其软化系数出现明显差异,如试样6-7和7-5,均为灰黑色泥岩,水稳性类型分别为II和III,软化系数分别为0.85和0.59,可见岩样的水稳性特性类型对其软化特征具有明显影响并存在一致性,同种岩性不同水稳性特性类型岩样软化系数存在较大差异,随着岩样水解破坏程度的增加、水稳性特征类型的变化而变化。然而,由于胶结类型、胶结物成分、颗粒接触关系等的不同,同种岩性的岩样其软化系数也存在较大差异,因此,对于科学研究与工程应用,进行软化系数的实测并与水稳性特性类型结合是有必要的。

表10 4类水稳性岩样抗压强度试验测定结果

Table 10 Compressive strength results of four types of water stability properties of rock samples

试样编号	岩性	单轴抗压强度/MPa		软化系数	水稳性类型
		干燥	饱水		
7-6	灰岩	65.78	56.00	0.85	I
7-7	灰白色细砂岩	47.25	32.30	0.68	I
7-9	灰白色中砂岩	44.13	32.30	0.73	I
5-6	灰黑色粉砂岩	58.17	22.57	0.39	II
6-1	粉细砂岩互层	41.73	39.75	0.95	II
6-7	灰黑色泥岩	13.04	11.07	0.85	II
7-10	砂质泥岩	31.10	28.69	0.92	II
5-5	黑色粉砂岩	25.72	6.69	0.26	III
7-5	灰黑色泥岩	14.25	8.39	0.59	III
7-8	灰绿色铝质泥岩	16.30	0.62	0.04	IV

表11为3煤顶底板12组4类水稳性特征岩样天然状态与饱水状态(浸水240h)抗拉强度试验测试结果,可以看出,岩石饱水后抗拉强度降低幅度明显,其中I、II和III类岩石的降低幅度在30%以上,软化后仍具有一定抗拉强度;并且与水稳性特征类型存在一致性,岩石水稳性特性类型越大,其整体降低幅度越大,最大为85%,有的甚至出现饱水直接破坏;水稳性IV类岩石抗拉强度降低幅度最大,甚至直接浸水破坏。由表11中破坏特征可知岩石多伴随或主要呈层状破坏,这是因为煤矿岩石多属于沉积岩,而构造多为层理构造的原因。

表11 4类水稳性岩样抗拉强度试验测定结果

Table 11 Tensile strength results of four types of water stability properties of rock samples

试样编号	岩性	单轴抗拉强度/MPa		降低幅度/%	水稳性类型	破坏特征
		天然	饱水			

3	10 <sub>下</sub> 灰岩	5.07	3.56	30	I	劈裂破坏
5	灰白色细砂岩	4.90	3.09	37	I	劈裂破坏
6	灰白色中砂岩	3.20	2.16	32	I	劈裂破坏
1	粉细砂岩互层	2.88	1.12	61	II	层状开裂
4	灰黑色粉砂岩	5.81	2.63	54	II	层状破坏
7	黑灰色泥岩	1.95	0.75	61	II	破裂破坏
11	灰黑色粉砂岩	2.07	0.75	64	II	劈裂伴层状破坏
2	灰黑色泥岩	1.33	0.19	85	III	层状破坏
10	砂质泥岩	2.85	1.78	38	III	层状破坏
8	灰黑色泥岩	2.16	—	≈100	III	饱水直接破坏
12	灰黑色泥岩	0.27	—	≈100	III	浸水完全破坏
9	灰绿色铝质泥岩	0.94	—	≈100	IV	饱水直接破坏

为了研究3煤顶底板岩石遇水作用对抗剪强度的影响, 设计了4组不同岩性岩样的天然与饱水两种状态下的抗剪强度对比试验, 表12为岩样抗剪强度测试结果, 可以看出, 4种岩性的岩样饱水后黏聚力*c*和内摩擦角*φ*在数值上均出现了一定程度的降低, 但黏聚力*c*的变化不明显; 而内摩擦角*φ*的变化却比较明显, 其中以细砂岩和粉砂岩变化最为明显, 出现了黏聚力*c*值的大幅降低。分析结果可知, 岩石因含水状态的改变, 内摩擦角*φ*值降低幅度远大于黏聚力*c*, 故可以认为抗剪强度软化的关键是内摩擦角*φ*值的变化。

表12 岩样抗剪强度对比试验测定结果

Table 12 Compressive strength results of rock samples

试样编号	岩性	抗剪强度指标			
		黏聚力 <i>c</i> /MPa		内摩擦角 <i>φ</i> (°)	
		天然	饱水	天然	饱水
3	中砂岩	10.74	8.4	43.07	41.50
8	细砂岩	12.08	11.74	31.59	25.83
12	粉砂岩	12.91	11.06	35.78	26.51
2	泥岩	5.95	4.94	44.63	43.77

### 3.2 强度软化的时间效应

为了研究3煤顶底板岩石不同饱水时间条件下的软化特征即强度软化的时间效应, 选取粉砂岩、细砂岩和中砂岩3组岩样, 设计了不同饱水时间的岩样抗拉强度软化试验, 岩样不同饱水时间抗拉强度测试结果见表13。

表13 岩样不同饱水时间抗拉强度测试结果表

Table 13 Test results of tensile strength of three types of rock samples with different saturated time

岩性	饱水时间/d				
	0	20	60	90	120
粉砂岩	2.35	1.40	1.1	1.07	0.84
细砂岩	4.29	3.15	2.38	1.5	1.63
中砂岩	4.18	3.23	2.33	1.98	2.01

在表13试验测试数据的基础上, 采用Origin非线性曲线拟合工具进行了曲线拟合(见图7), 得出不同岩样抗拉强度随时间软化的公式为

$$\sigma_t = Ae^{-t/r} + \sigma_\infty \quad (1)$$

式中  $\sigma_t$  为岩样抗拉强度(MPa);  $t$  为岩样饱水时间(d);  $\sigma_\infty$ ,  $A$ ,  $r$  为公式待求参数, 考虑公式(1)的曲线类型,  $\sigma_\infty$  的意义指饱水时间无限大时岩样的抗拉强度, 本次试验3个参数的具体数值及模型的拟合程度相关系数见表14。

如图7、表14所示, 粉砂岩、细砂岩和中砂岩不同饱水时间抗拉强度拟合曲线较好, 相关系数分别为0.95364, 0.94888, 0.99390, 均大于0.94, 说明公式(1)的拟合效果较好。试验分析表明, 岩样抗拉强度随饱水时间的增加呈指数规律减小, 岩样浸水前抗拉强度最大, 随着饱水时间的增加抗拉强度呈指数规律减小; 当饱水时间较大时, 抗拉强度趋于某一稳定值  $\sigma_\infty$ , 说明岩石的强度特征受饱水时间的影响并同时具有一定的依赖性, 尽管如此, 由于笔者只是进行了岩样抗拉强度饱水时间效应的试验, 其他强度随饱水时间是否同样服从公式(1)的指数递减规律还将值得进一步探讨。

表14 抗拉强度随时间软化公式参数表

Table 14 Parameters of formula of tensile strength softening with time

岩性	$\sigma_t = Ae^{-t/r} + \sigma_\infty$			相关系数 $R^2$
	$\sigma_\infty$	$A$	$r$	
粉砂岩	0.97523	1.36813	18.13938	0.95364
细砂岩	1.28390	2.97170	48.70086	0.94888
中砂岩	1.86201	2.32637	36.73711	0.99390

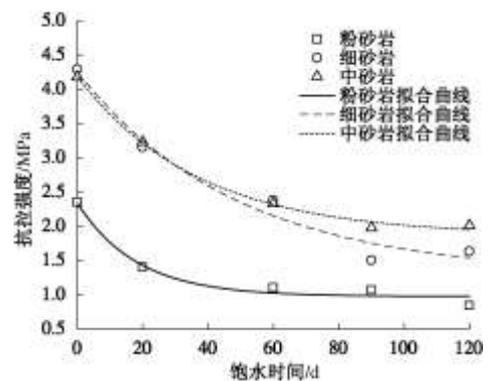


图7 3组岩样不同饱水时间抗拉强度拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of tensile strength of three types of rock samples with different saturated time

### 3.3 强度软化的扰动效应

为了研究3煤顶底板岩石不同扰动程度下的水稳性特点, 设计了5组水稳性特征较好岩样的重复浸水—压缩试验, 试验方法如下:

(1) 将浸水 240 h 饱水岩样加压至一定水平后重新置于水中, 浸水 72 h;

(2) 对上述浸水 72 h 岩样重新加压, 控制最大应变不小于前次最大应变值的 60%;

(3) 重复 (1)、(2) 过程, 直至岩样发生破坏。

表 15 不同浸水 - 压缩过程岩样弹性模量

Table 15 Elastic modulus of rock samples with different immersion-compression processes

试样编号	岩性	弹性模量				破坏应力/MPa
		过程 1	过程 2	过程 3	过程 4	
3	泥岩	3.36	5.72	6.36	2.61	23.04
5	泥岩	1.996	2.79	3.74	1.70	15.01

由于重复试验过程试样的破坏以及应变片失效等原因, 有 3 组试样在 2 次浸水 - 压缩过程便发生了破坏, 只有第 3、第 5 组岩样完成了 4 次浸水 - 压缩过程。试验结果见图 8。分析试验结果, 不难看出: 同一岩样不同浸水 - 压缩过程其应力应变曲线初始阶段都出现了明显的压实变形 (见图 8 (a)、图 8 (b)), 表明不论是初始岩样还是压缩后岩样在浸水条件下其内部结构都发生了膨胀变形; 通过对试验数据的处理 (见表 15), 发现不同浸水 - 压缩过程岩样的弹性模量不同, 表现为随着过程的进行出现先增加最后降低的现象。分析认为, 在第 1 次浸水 - 压缩过程时, 由于岩石内部微裂隙的影响, 弹性模量相对较小, 当第 2 次、第 3 次浸水 - 压缩过程时, 岩样表现为较好的弹性特征, 在初始阶段压密变形后应力应变曲线近似表现为直线且应力与前一过程相比具有明显的提高; 如图 8 (a)、图 8 (b) 所示, 两组岩样都是在第 4 次浸水 - 压缩过程发生了破坏, 与第 3 次浸水 - 压缩过程相比, 岩样的最终破坏应力均出现了下降, 及岩样出现了强度疲劳现象, 然而这与正常压缩试验条件下岩样进入屈服阶段再循环加卸载出现的强度疲劳明显不同, 分析认为: 在重复浸水 - 压缩试验过程中, 岩样每次浸水后内部结构的膨胀效应使得其内部结构发生了软化, 从而降低了岩样的结构连接强度, 出现了强度疲劳现象; 当岩样在重复浸水 - 压缩过程条件下, 其发生破坏时的应力明显小于饱水试样一次性加压破坏时的应力, 更小于天然状态试样加压破坏时的应力,

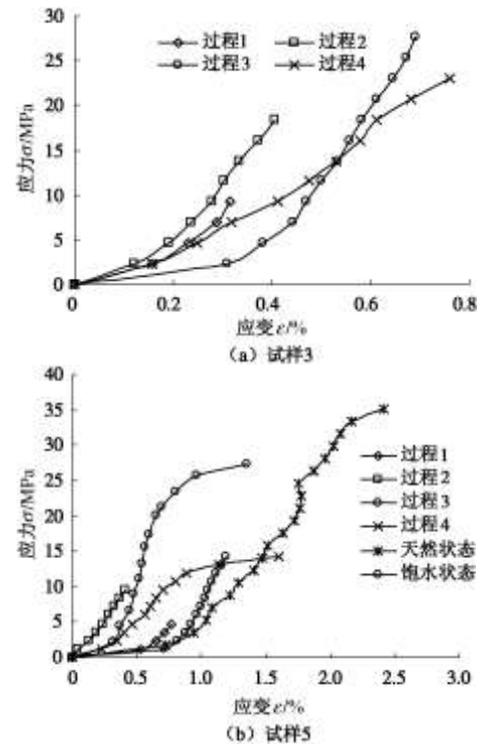


图 8 泥岩重复浸水 - 压缩试验

Fig. 8 Repeated immersion-compression tests on mud stone

如图 8 (b) 所示。可见岩石经过变形扰动后其结构确实发生了软化, 一方面表现为最终破坏应力的降低, 一方面表现为与结构膨胀相关的塑性变形的增加。

## 4 结 论

(1) 岩石水解试验表明岩石浸水后表现出 6 种水解变形破坏形式, 分别为完整 I 型、完整 II 型、不崩解型、裂解型、碎解成块型和泥化型; 在此基础上, 结合极限膨胀率试验, 总结了 4 类岩石水稳性特征类型, 并从饱水试验空隙率的角度论证了分类的合理性。

(2) 通过对岩石微观机理的分析发现, 随着岩石水稳性特征类型的变化, 其所含黏土矿物相对定量含量变化较大, 其中高岭石、伊利石和伊蒙混层的相对定量含量是影响水稳性特征类型差异的原因之一; 通过扫描电镜分析, 发现不同水稳性特征类型岩石微观结构明显不同, 而微观结构的差异是影响水稳性特征类型的主要原因。

(3) 岩石饱水后, 抗压、抗拉强度软化明显, 同种岩性岩石降低幅度存在明显差异, 而岩石的水稳性特征类型对其软化特征具有明显影响并具有一致性; 饱水后抗拉强度试验中, 岩石主要呈现层状破坏; 岩样饱水后黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  在数值上均出现了一定程度的降低, 其中内摩擦角  $\varphi$  值降低幅度远大于黏聚力  $c$ , 岩石抗剪强度软化的关键是内摩擦角  $\varphi$  值的变化。

(4) 水对岩石的力学效应不仅受含水状态的影

响, 还受饱水时间、扰动状态的影响。不同饱水时间抗拉强度试验表明, 岩样抗拉强度随饱水时间的增加呈  $\sigma_t = Ae^{-t/r} + \sigma_\infty$  指数规律减小, 最后趋于稳定值  $\sigma_\infty$ ; 重复浸水—压缩试验表明, 多次重复浸水—压缩使得岩样的最终破坏应力下降, 出现了强度疲劳现象, 其值小于饱和试样一次性加压破坏时的应力, 更小于天然状态试样加压破坏时的应力。这是因为岩样每次浸水后内部结构的膨胀效应使得其内部结构发生了软化, 从而降低了岩样的结构连接强度。

### 参考文献:

- [1] 肖裕行, 王泳嘉, 卢世宗, 等. 裂隙岩体水力等效连续介质存在性的评价[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(1): 75 - 80. (XIAO Yu-xing, WANG Yong-jia, LU Shi-zong, et al. Assessment of hydromechanically equivalent continuum model for fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(1): 75 - 80. (in Chinese))
- [2] 汤连生, 周翠英. 渗透与水化学作用之受力岩体的破坏机理[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1996, **35**(6): 95 - 100. (TANG Lian-sheng, ZHOU Cui-ying. Analysis on mechanism of permeation and hydrochemical action resulting in failure of loaded rock mass[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen (Natural Science), 1996, **35**(6): 95 - 100. (in Chinese))
- [3] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1): 28 - 31. (LIU Chang-wu, LU Shi-liang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(1): 28 - 31. (in Chinese))
- [4] 刘 镇, 周翠英, 朱凤贤, 等. 软岩饱水软化过程微观结构演化的临界判据[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 661 - 666. (LIU Zhen, ZHOU Cui-ying, ZHU Feng-xian, et al. Critical criterion for microstructure evolution of soft rocks in softening process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 661 - 666. (in Chinese))
- [5] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(1): 33 - 38. (ZHOU Cui-ying, DENG Yi-mei, TAN Xiang-shao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(1): 33 - 38. (in Chinese))
- [6] MARCEL ARNOULD. Discontinuity networks in mudstones: A geological approach[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, **65**(4): 413 - 422.
- [7] RISNES R, HAGHIGHI H, KORSNES R I, et al. Chalk fluid interactions with glycol and brines[J]. Tectonophysics, 2003, **370**(1/2/3/4): 213 - 226.
- [8] 周瑞光, 曲永新, 成彬芳, 等. 山东龙口北皂煤矿软岩力学性质特性试验研究[J]. 工程地质学报, 1996, **4**(4): 55 - 60. (ZHOU Rui-guang, QU Yong-xin, CHENG Bin-fang, et al. The mechanical properties of soft and weak rock in Longkou Coal Mine, Shangdong[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, **4**(4): 55 - 60. (in Chinese))
- [9] 罗鸿禧. 南海海洋土的成份结构和物化性质[J]. 岩土力学, 1989, **10**(4): 6 - 9. (LUO Hong-xi. The composition microstructure and physico-chemical properties of marine soil in South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 1989, **10**(4): 6 - 9. (in Chinese))
- [10] 杨春和, 冒海军, 王学湖, 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 Chun-he, MAO Hai-jun, WANG Xue-hu, et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(12): 2090 - 2098. (in Chinese))
- [11] 朱建明, 任天贵, 高 谦, 等. 小官庄铁矿软岩微观特性的试验研究[J]. 中国矿业, 1997, **6**(4): 56. (ZHU Jian-ming, REN Tian-gui, GAO Qian, et al. Tests and research of the micro-characteristics of soft rocks of Xiaoguanzhuang Iron Mine[J]. China Mining Magazine, 1997, **6**(4): 56. (in Chinese))
- [12] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 394 - 400. (ZHOU Cui-ying, TAN Xian-shao, DENG Yi-mei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 394 - 400. (in Chinese))
- [13] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 软岩在饱水过程中微观结构变化规律研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, **42**(4): 98 - 102. (ZHOU Cui-ying, DENG Yi-mei, TAN Xiang-shao, et al. Research on the variation regularities of microstructures in the testing of interaction between soft rocks and water[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sun Yatsen, 2004, **42**(4): 98 - 102. (in Chinese))
- [14] 李 鹏, 刘 建, 朱杰兵, 等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1865 - 1871. (LI Peng, LIU Jian, ZHU Jie-bing, et al. Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural

- plane of sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(7): 1865 - 1871. (in Chinese))
- [15] 乔丽苹, 刘建, 冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(10): 2117 - 2124. (QIAO Li-ping, LIU Jian, FENG Xia-ting. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(10): 2117 - 2124. (in Chinese))
- [16] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机制研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(7): 866 - 870. (HUANG Hong-wei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, **35**(7): 866 - 870. (in Chinese))