

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0610

各向异性片岩的微观组构信息定量 提取与断面形貌特征分析

尹晓萌¹, 晏鄂川², 王鲁男³, 陈 利¹

(1. 信阳师范学院 建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430079;
3. 辽宁石油化工大学 矿业工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 取 3 类具有明显片理面的武当群片岩, 采用偏光显微镜、扫描电镜研究其微观组构、断面形貌特征。构建了面积百分比、尺寸与周长-面积分形维数、定向分布系数等指标, 利用 IPP 专业图像处理软件, 对矿物和孔隙(微裂隙)两系统的含量、形态、分布特征等进行定量分析; 并基于 Matlab 的数字图像处理技术, 对断裂面粗糙度展开定量评价。偏光显微镜下显示, 片岩具有矿物定向排列与粒、片状矿物近互层状分布的典型特征。矿物系统的微观定量分析结果表明: 武当群片岩白云母的含量为 11%~30%; 小岛法计算的白云母矿物周长-面积分形维数为 1.31~1.39; 定向分布系数为 0.61~0.85; 微裂隙依附于白云母矿物边缘孕育、扩展, 导致武当群片岩的孔隙(微裂隙)微观指标与对应的矿物微观指标有较强的相关性。沿片理面的片岩断面主要呈现沿晶破坏特征, 断口较平坦, 基于断面形貌图绘制的灰度信号波曲线的盒维数为 1.48~1.60; 斜交片理面破裂的片岩断面以穿晶破坏为主, 有穿晶-沿晶破坏交替而生的迹象, 断口粗糙起伏, 对应的灰度信号波曲线的盒维数为 1.65~1.69。武当群片岩的断面粗糙度各向异性约为 1.03~1.14。

关 键 词: 片岩; 微观组构; 断面形貌; 图像处理; 各向异性

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)07-2617-12

Quantitative microstructure information extraction and microscopic morphology analysis of anisotropic schist

YIN Xiao-meng¹, YAN E-chuan², WANG Lu-nan³, CHEN Li¹

(1. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Faculty of Mining Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China)

Abstract: The microstructure and section characteristics of three kinds of Wudang group schist with obvious foliation were studied by polarizing microscope and scanning electron microscope. Multiple indicators including area percentage, size and perimeter area fractal dimension and directional distribution coefficient were proposed to quantitatively analyze the content, morphology and distribution characteristics of mineral system and pore (micro fissure) system by professional image processing software. The roughness of fracture surface was quantitatively evaluated based on the digital image processing technology of MATLAB. Polarizing microscope shows that the schist has typical characteristics of mineral orientated alignment and intergranular distribution of granular and lamellar minerals. The microscopic quantitative analysis of the mineral system shows that the content of the muscovite of Wudang group schist is 11%~30%. The perimeter-area fractal dimension of muscovite calculated by island method is 1.31~1.39. The directional distribution coefficient is 0.61 to 0.85. Since micro fissure is attached to the edge of muscovite, there is a strong correlation between microscopic indicators of micro fissure and those of mineral. The section of the schist along foliation mainly presents the characteristics of intergranular failure, so the fracture surface is relatively flat. The box dimension of the grayscale signal wave curve based on the profile map is 1.48~1.60. In contrast, the fractured schist section is mainly transgranular failure, with the signs of alternate transgranular and intergranular failure, which lead to rough fracture surface. The box dimension of the signal wave curve is 1.65 to 1.69. The roughness anisotropy of the fractured schist section is about 1.03 to 1.14.

Keywords: schist; microstructure; section morphology; image processing; anisotropy

收稿日期: 2018-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41672313, No. 41807240); 河南省科技攻关项目(No. 182102310786); 信阳师范学院“南湖青年学者”奖励计划。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41672313, 41807240), the Programs for Science and Technology Development in Henan (182102310786) and Nanhu Scholars Program for Young Scholars of Xinyang Normal University.

第一作者简介: 尹晓萌, 男, 1988 年生, 博士, 讲师, 主要从事工程岩土体稳定性研究。E-mail: xiaomengyin123@163.com

1 引言

在鄂西北十堰市境内的隧道工程区普遍出露由石英、云母和长石等组成的浅色片岩,其片理发育,各向异性显著。针对这套浅色武当群片岩的各向异性,国内一些学者,如刘胜利^[1]、王章琼^[2-3]、尹晓萌^[4]等在强度、变形各向异性及破坏模式等宏观力学特征等方面取得了一些成果,但在这类片岩微观特征研究方面少有涉及。

岩石的微观特征本质上对其宏观力学行为起控制作用^[5]。加强各向异性岩石内部组构、破裂面形貌等微观特征研究,有助于把控其变形与强度特性、揭示变形破坏机制等,故微观试验被广泛运用于岩石的各向异性研究。Vanorio 等^[6]采用激光共聚焦扫描显微镜(CLSM)对富油页岩的显微结构进行观察,认为镜质体与微裂隙的排列结构是引起油页岩各向异性的主要原因。Kuila 等^[7]利用 CT 扫描观察了低孔隙度页岩的显微组构,揭示其波速各向异性对应力场的响应规律与矿物颗粒的定向性及层状微观结构特征有关。陈天宇等^[8-9]采用扫描电镜发现含气页岩中存在黄铁矿层理,且孔隙顺层理定向分布,坚硬矿物颗粒和薄片状矿物交替排布,这些特征引发了该岩石渗透、变形的各向异性。王家兴等^[10]利用铸体薄片试验、电镜扫描试验,结合常规力学试验与工程现场调查,探讨了某工程区片岩的矿物含量与岩石单轴抗压强度的关系以及矿物排列特征对隧道围岩稳定性的影响。邓继新等^[11]从岩石的孔隙形态、孔隙与矿物空间分布特征方面探讨了影响龙马溪页岩声学特性的微观机制,指出因微裂隙与黏土的定向具有一致性,使得黏土矿物含量成为该页岩纵横波各向异性程度的决定性因素。侯振坤等^[12]对龙马溪页岩不同层理方向的微观组构特征进行了分析,探讨了弹性模量、抗压强度、波速各向异性的内在机制。郑达等^[13]分析了硅质千枚岩、绢云母千枚岩在力学试验后的微观形貌特征,探讨了两种岩石的微观破裂机制。钟建华等^[14]分析了扫描电镜下垂直层理与平行层理方向孔隙和微裂隙的形态、展布特征,指出页岩内部的孔隙、微裂隙的拉张型、剪切型扩展分别引起岩石的宏观张性破裂、剪切-滑移破裂。

上述文献着眼于岩石宏观物理力学特性与微观特征的相关性研究,对含原生弱面的岩石的矿物组成、结构、断面形貌等展开定性分析,但皆未深入

定量地挖掘岩石微观信息,缺乏揭示各向异性岩石微宏观特性内在关联的有力基础。定量分析岩石微观特征的关键工作之一是提取微观图像信息,该工作主要通过图像处理与分析来实现。因此图像处理与分析的好坏对定量结果的准确性有直接影响。伴随数字化技术的发展,近年来,有学者采用 Photoshop (PS)、Matlab、Imagepro plus (IPP) 等软件对岩土体微观图像进行数字化处理与分析^[15]。其中 PS 是一款商业软件,运用于研究领域时,其图像处理结果的可靠性相对较低;Matlab 包含多种图像处理函数,且强大的矩阵运算功能为数字图像处理提供了极大便利;IPP 是一款集图像处理、定量信息提取与分析、图像生成一体化的专业图像处理分析软件,在科研、医学与工业领域有广泛应用。本文采用 IPP、Matlab 分别对岩石的微观组构、形貌图像进行处理,并定量提取图像中蕴含的微观信息。

采集 3 种具有不同表观特征的武当群片岩岩样,借助偏光显微镜和扫描电镜对 3 种岩样的矿物成分和微观结构进行定性分析,并利用图像处理与分析技术,对武当群片岩的矿物和孔隙(微裂隙)的含量、形态、分布排列等组构特征与岩石破裂后的形貌特征展开定量研究。通过 3 种武当群片岩微观特征的对比分析,为后续揭示武当群片岩宏观各向异性的微观机制、探讨微宏观指标的关联性奠定基础。

2 样品特征及试验方法

2.1 样品表观特征

武当群片岩取自十房高速公路沿线的通省隧道内,在相隔 300~400 m 的 3 个段位,分别钻取具有不同表观特征的新鲜岩样,标定 J、L、W 3 种类别(见图 1)。其中 J 类片岩,具有较显著的片状构造,片理面密集,片理间距小于 1 mm,锤击声稍脆;L 类片岩,片状构造,片理间距为 2~4 mm,锤击不易破坏,声脆,有较弱的回弹现象;W 类片岩,片状构造,片理相对稀疏,锤击声脆,回弹现象明显。



图 1 J、L、W 3 类武当群片岩实物图
Fig.1 Three kinds of Wudang group schist—J, L, W types

2.2 试验仪器及方法

依次在中国地质大学（武汉）的高级显微镜实验室与国家重点实验室开展武当群片岩的微观试验。

首先采用 Zeiss Axioscope A1 型偏光显微镜观察、分析矿物组成与排列结构特征。每类武当群片岩皆沿垂直、平行片理两方向进行切割，并磨制成岩矿薄片（3 类片岩共制取 6 块薄片），放在偏光显微镜载玻台上，利用单偏光镜和正交偏光镜下，矿物在透射光下的光学特征及矿物晶体特征等对薄片中的矿物种类进行鉴定，并观察矿物的排列结构。

然后利用 Quanta200 环境扫描电子显微镜观察岩石组构与断面形貌，并将镜下图像作为定量分析的基础。该仪器可释放高能电子束，通过这些入射电子与样品产生相互作用激发出的背散射电子、二次电子等成像，既可获取矿物组合排列图，也可得到样品表面形貌图。所需试验样品因观察目的不同而异：观察岩石组构时，为了消除偶然误差，获取可靠结果，在 J、L、W 3 类片岩样中各取两块完整样，沿垂直片理面方向切割成岩石小薄片，并在垂直片理的切割面上依次进行粗磨—细磨—抛光—干燥—镀膜，制成岩石光片，分别标号 Ja、Jb、La、Lb；Wa、Wb（见图 2）；观察断面形貌时，采用点荷载试验仪分别对 3 类岩样加荷致裂，获取各类岩样在沿片理面与斜交片理面两个破裂方向的断块，统一切割成断面面积为 $1\sim 2\text{ cm}^2$ 、厚度为 $4\sim 6\text{ mm}$ 的块体，磨平与断面相对的一面，将断口表面喷涂一层金膜（见图 3，编号下标 1 表示沿片理方向，下标 2 表示斜交片理方向）。



图 2 组构观察所用的片岩光片

Fig.2 Polished sections used for the analysis of mineral composition and microstructure

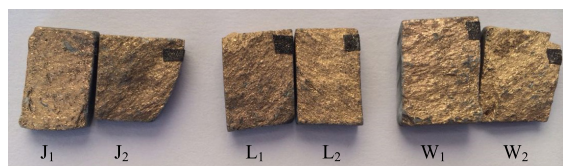


图 3 形貌观察所用的片岩样品

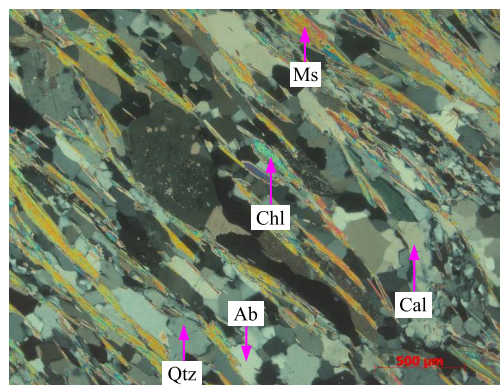
Fig.3 Schist samples used for morphology observation

3 武当群片岩微观组构特征分析

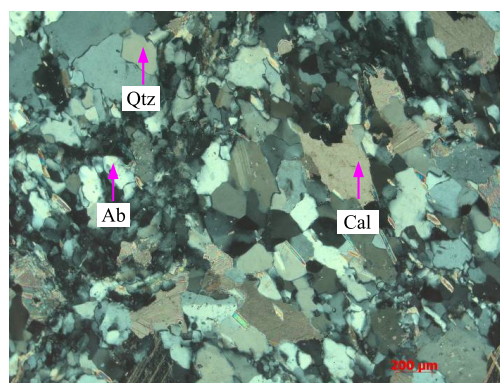
3.1 偏光显微镜下的组构特征分析

鉴定发现，3 种片岩的矿物成分相似，皆含有石英、长石、白云母、方解石矿物（见图 4，以 J 类片岩为例）。此外可见少量绿泥石（J 类岩样）与黑云母（L、W 类岩样）。垂直片理面方向（见图 4(a)）和平行片理面方向（见图 4(b)）展示出不同的矿物形态与结构特征：图 4(a)显示，细长的片状白云母断续“充填”于粒状石英、长石、方解石之间，两种形态的矿物表现出不同程度的定向拉长，整体呈似互层状结构；图 4(b)中，石英、长石、方解石呈不规则近等轴粒状形态，颗粒间以凹凸起伏的不规则面紧密嵌合。这种特有的矿物分布排列方式造成了片岩的非均质性，是引起此类岩石宏观物理力学各向异性的本质原因。

不同表观特征的武当群片岩的矿物排列特征表现出一定程度的差异。分别对比图 4(a)与图 5(a)、图 4(b)与图 5(b)，发现 J 类片岩比 L 类片岩相同矿物的生长规模更大，矿物排列的有序性更强，而矿物嵌合的紧密度稍弱。W 类片岩矿物排列特征与前二者相似，有序性相对较弱，篇幅原因不予赘述。



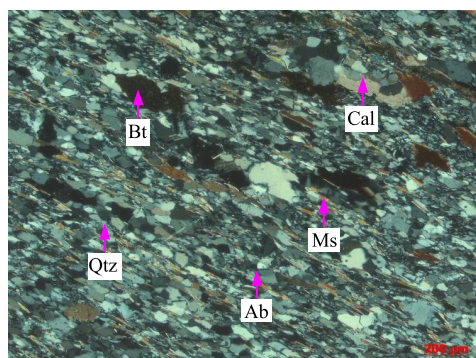
(a) 垂直片理面方向



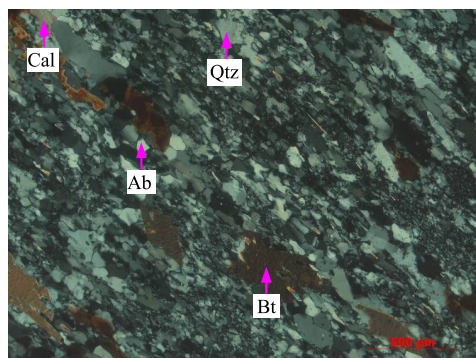
(b) 平行片理面方向

图 4 J 类武当群片岩的矿物排列结构图

Fig.4 Distribution of minerals of Wudang group schist-J type



(a) 垂直片理面方向



(b) 平行片理面方向

图5 L类武当群片岩的矿物排列结构图
Fig.5 Distribution of minerals of Wudang group schist-J type

3.2 基于扫描电镜的微观组构信息定量提取

3.2.1 分析对象与目标的确定

确定分析对象与目标是本次定量分析的首要工作。将岩石看作由矿物与孔隙（微裂隙）两类系统组成的统一体，分别对此两类对象的微观信息进行分析。其中矿物系统组成复杂，在此忽略次要矿物，重点选取主控岩石力学性质、影响片岩各向异性特征的矿物进行分析。

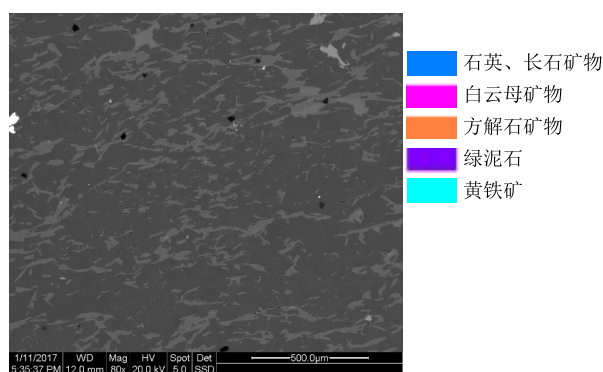
试验研究表明，一定围压范围内，轴向压力与弱面的夹角由 $90^\circ \sim 0^\circ$ 变化时，标准圆柱形岩样主要呈现 3 种破坏形式，即斜交弱面剪切破坏、顺弱面剪切滑移破坏、顺弱面劈裂破坏^[4, 16-17]。一方面，片岩在斜交片理面方向产生贯穿性破裂面时，矿物颗粒被错段，岩石力学强度受矿物性质控制，分析主矿物成分、含量有助于把握岩石在该方向的力学性质。另一方面，片理面附近云母聚集、矿物颗粒呈面接触，云母矿物形态尤其是边缘面的平滑规则程度决定了重结晶矿物之间的结合强度，进而对顺片理方向、沿矿物边缘滑移破坏的岩石的强度产生重要影响。此外，片岩在温压条件下经历区域变质作用导致矿物的定向分布，是该类岩石区别于均质岩石的重要特征之一，它对岩石力学特性产生主

控作用。而对于孔隙（微裂隙）系统，孔隙（微裂隙）含量对岩石物理力学性质的影响不容忽视，岩石的波速、变形各向异性度等也与裂隙形态、分布规则性（定向程度）等密切相关^[11-12, 18]。因此，从含量、形态、分布特征方面对矿物、孔隙（微裂隙）展开定量分析，可以较为全面地掌控片岩微观组构信息，达到间接评判各向异性岩石宏观物理力学特性的目的。

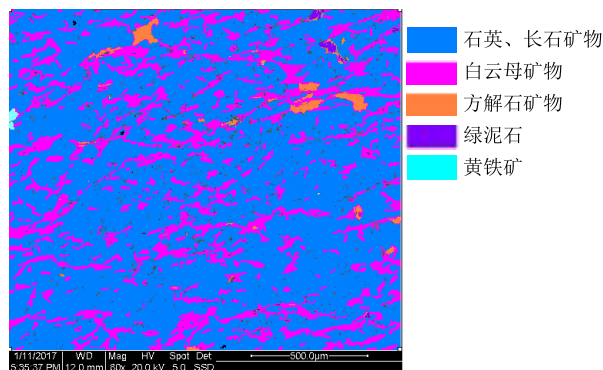
3.2.2 图像处理及定量指标确定

为准确选取分析对象，须对扫描电镜下的微观图像进行预处理。根据分析对象的不同分别采用不同的图像处理方式。

(1) 提取矿物微观信息前的图像处理。考虑适宜的统计范围，统一以 80 倍电镜图像为底图进行处理。不同类矿物在矿物分布图中的明暗度具有明显差别，据此在 IPP 中设定不同的阈值对灰度图像进行分割处理，从而选定不同种类的矿物对象。以 Wa 样品为例，图 6(a)、6(b)分别为图像分割前后的矿物分布图。黄铁矿矿物含量极少，偏光显微镜下未被发现。



(a) 原灰度图

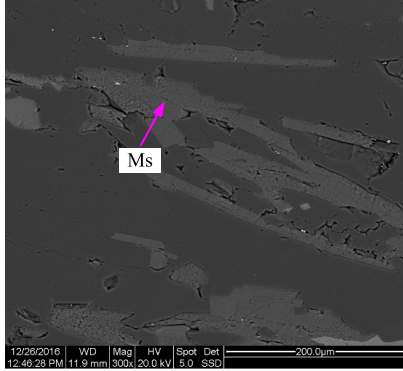


(b) 处理后的彩色分区图

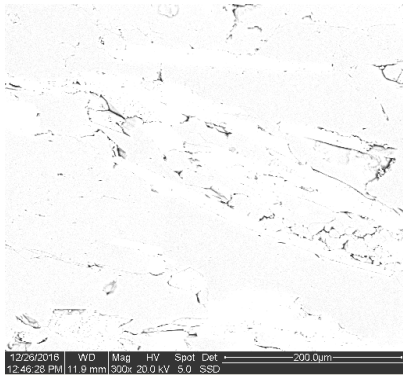
图6 Wa 光片中的矿物分布图
Fig.6 Distribution of minerals in the polished section with label Wa

(2) 提取孔隙（微裂隙）微观信息前的图像处

理。相关研究指出,由 300~600 倍电镜图获取的岩石孔隙度与实测孔隙度相近^[19],在此统一以 300 倍电镜图像为底图进行处理。通过调整图像的亮度与对比度、伽马矫正等,将灰度图处理为白色矿物与黑色孔隙裂隙组成的二值图(见图 7,以 Jb 样品为例)。



(a) 原灰度图



(b) 处理后的二值图

图 7 Jb 光片中的孔隙、微裂隙分布图

Fig.7 Distribution of pores and micro fissures in the polished section with label Jb

确定代表性指标,分别对两类对象的含量、形态、分布等微观结构信息进行定量直观地描述。

(1) 矿物和孔隙、微裂隙的含量

在处理后的矿物分布图或二值图中,提取某类对象子单元(如各个矿物颗粒、各个孔隙)的面积参数,统计此类对象的总面积,计算其与图幅面积百分比,视为此类对象的含量。根据分析对象的不同,分为矿物含量和孔隙、微裂隙含量。

(2) 矿物和孔隙、微裂隙的形态

分为整体形态和边缘形态,整体形态通过分析对象的长、短轴尺寸和长短轴比在各区间的百分比进行度量,边缘形态利用表面粗糙度予以反映。

矿物边缘形态具有不规则性,且表现出一定的

继承性^[20],在一定程度上是自相似的,具有较为显著的分形特征。将图像中的矿物视为不规则边界封闭形成的二维面域,则可利用小岛法计算该面域边界的分形维数,定量评价其粗糙程度。根据小岛法^[21],不规则二维图形的分形周长 P 和面积 A 存在如下关系式:

$$\lg[P(\lambda)/\lambda] = D \lg(a_0) + D \lg[A(\lambda)^{1/2}/\lambda] \quad (1)$$

式中: λ 为测量尺寸; D 为分形维数; a_0 为与小岛形状有关的常数。不断变换 λ , 可得到由若干组 $\lg[P(\lambda)/\lambda] \sim \lg[A(\lambda)^{1/2}/\lambda]$ 构成的散点图,若拟合呈线性关系,所得直线的斜率倒数即为表征该对象边界粗糙度的分形维数。岩石内部同种矿物颗粒众多,各颗粒的边界形态彼此相似,表现出统计意义上的相似性。因此,为简化计算,假定 $\lambda=1$,则由式(1)得

$$\lg P = D \lg a_0 + \frac{D}{2} \lg A = \frac{D}{2} \lg A + C \quad (2)$$

提取分析对象各子单元的等效周长、面积后,进行 $\lg P - \lg A$ 的线性拟合,得到周长-面积分形维数 $D=2k$ (k 为拟合直线的斜率)。 D 值越大,意味着矿物边缘越粗糙,形态越复杂。针对孔隙(微裂隙)系统中规模较大的微裂隙,可采用相同手段分析其边缘形态特征。

(3) 矿物和孔隙、微裂隙的分布

以图幅纵轴为基本方向,测量出该方向顺时针转动至某矿物颗粒长轴方向的角度值 α , 视为该颗粒定向分布角。定义表征某种矿物定向分布程度的系数 δ 为

$$\delta = 1 - \frac{X}{\alpha} \quad (3)$$

其中:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i}{N}, X = \sqrt{\frac{\sum (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{N}} \quad (4)$$

式中: N 为所统计的某矿物的数量; α_i 为第 i 个矿物颗粒的定向分布角。矿物定向分布系数 δ 越大,表明矿物定向分布程度越高。同理可得到孔隙、微裂隙的定向分布系数与规模较大的微裂隙的定向展布系数。

3.2.3 武当群片岩微观特征的定量分析结果

利用 IPP 图像处理软件,按图像预处理—确定标尺—选取测量对象与参数—提取微观信息—数据统计分析的流程,分别确定矿物、孔隙(微裂隙)系统的微观指标值,并对 J、L、W3 种武当群片岩

的微观特征进行对比分析。

3.2.3.1 矿物系统微观特征对比分析

(1) 主要矿物含量

表 1 展示了各样品的主要矿物含量。整体而言, 武当群片岩中的硬质矿物-石英和长石的含量为 62%~84%, 软质矿物-白云母的含量为 11%~30% 不等。对比可见, W 类岩样的硬质矿物含量明显比 J、L 样高, 而软质矿物则比两者低, J 样的白云母矿物含量相对较高, 其次为 L 样。

表 1 各样品主要矿物含量

Table 1 Content of main minerals in each sample

样品	矿物含量/%					
	Ja	Jb	La	Lb	Wa	Wb
石英和长石	77.89	62.20	78.65	69.91	81.12	83.74
云母	17.18	29.57	15.50	25.04	17.54	11.63

由矿物组成分析知, 白云母是武当群片岩的主要矿物之一。相关研究^[22]与实践表明, 该矿物的存在对武当群片岩的力学特性有显著影响。因此, 分析矿物的形态特征、分布特征时, 重点针对白云母矿物的微观指标进行统计计算。

(2) 矿物形态特征

表 2 展示了 6 个样品中白云母矿物的长轴、长短轴比的统计结果。整体来看, J 类样品在长轴高值区 (大于 100 μm) 与长短轴比高值区 (大于 9) 内的白云母含量高于其他两类样品, W 类样品的白云母在上述两区间的分布比例值最小。表明, J 类样品的白云母生长规模最大, 单向发育最显著, 其次为 L 类样品。

表 2 各样品白云母矿物的轴长尺寸与轴长比值分布统计
Table 2 Statistics of the long axis and the ratio of long axis to short axis of mica minerals in each sample

长轴大于 100 μm 的占比/%						长短轴比大于 9 的占比/%					
Ja	Jb	La	Lb	Wa	Wb	Ja	Jb	La	Lb	Wa	Wb
26.9	13.8	9.8	13.2	10.5	4.7	9.8	8.9	1.1	2.6	0.6	0.4

图 8(a)、8(b)分别为 Ja、Jb 样品白云母矿物的等效周长 P 、面积 A 的双对数关系图。图中显示 $\ln P$ 、 $\ln A$ 两组数据皆表现出明显线性关系。根据拟合直线的斜率值得 Ja、Jb 两样品中云母矿物的周长-面积维数分别为 1.336、1.313。同理, 获取其他样品白云母矿物的分形维数, 统计见表 3。数据显示, W 类片岩两个样品中白云母的分维数相差较大, 表现异常, 总体上看, 该类样品与 L 类样品白云母的分维数相近, 而 J 类样品展示的分维数明显比其他两类小。表明, J 类样品中白云母矿物边界形态的

复杂程度较低, 指示单向发育的白云母矿物的长边相对平滑。

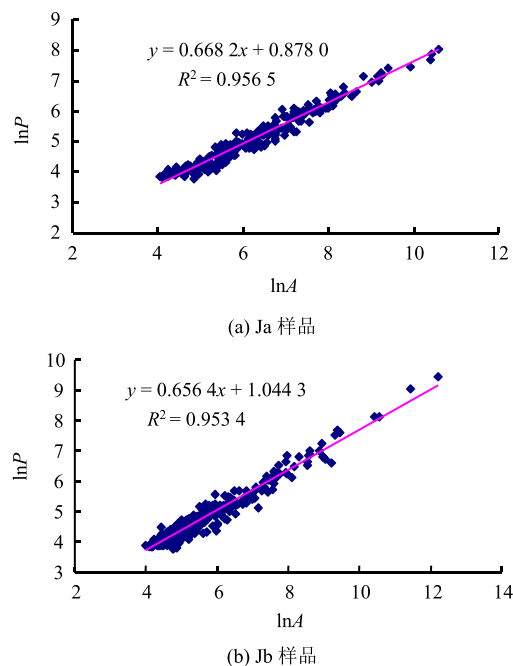


图 8 J 类武当群片岩的白云母矿物周长与其面积的双对数关系图

Fig.8 Relationship between the perimeter and area of mica mineral in the Wudang group schist -J type

表 3 各样品白云母矿物的分维数

Table 3 Fractal dimension of mica minerals in each sample

样品	维数	样品	维数
Ja	1.336	Lb	1.373
Jb	1.313	Wa	1.385
La	1.359	Wb	1.329

(3) 矿物分布特征

表 4 展示了 6 个样品白云母矿物的定向分布系数 δ 。可以看出, 白云母矿物在 3 类岩样中的定向分布程度明显不同: 在 J 类样品中定向度明显高于其他两类样品, L 和 W 类的定向度相近, 但总体上前者比后者稍大。

表 4 各样品白云母矿物的定向度

Table 4 Orientation degree of mica minerals in each sample

样品	定向分布系数	样品	定向分布系数
Ja	0.85	Lb	0.71
Jb	0.73	Wa	0.61
La	0.63	Wb	0.67

3.2.3.2 孔隙 (微裂隙) 系统微观指标对比分析

采用与矿物系统微观特征定量分析相同的方法

获取孔隙（微裂隙）系统的含量、形态、分布特征的微观指标，统计如表 5 所示。

表 5 各样品孔隙、微裂隙定量指标统计
Table 5 Proportion of micro pores and fractures in each sample

样品	孔隙、微裂隙比例 /%	短轴值分布 (大于 10 μm) /%	长短轴比分布 (大于 20) /%	分形维数	孔隙微裂隙定向分布系数	微裂隙定向展布系数
Ja	1.50	0.9	8.3	1.675	0.58	0.83
Jb	5.60	1.7	2.6	1.681	0.60	0.81
La	3.90	0.8	6.2	/	0.52	0.62
Lb	1.27	0.0	0.0	1.451	0.56	0.68
Wa	0.58	0.0	0.0	/	0.56	0.61
Wb	1.24	0.5	1.0	1.370	0.55	0.69

(1) 孔隙、微裂隙含量

表 5 显示，武当群片岩的孔隙、微裂隙比例在 0.5%~5.6% 不等，该指标在 3 种片岩样品中明显不同，总体表现出 J 类样品最高，平均约 3.5%；其次为 L 类岩样，平均约 2.6%；W 类比例最低，不足 1.5%。

(2) 孔隙、微裂隙形态特征

以孔隙、微裂隙的短轴值为指标分析其张开度，以长短轴比为指标分析孔隙、微裂隙单向延展度。表 5 中数据显示，该片岩的孔隙、微裂隙的张开度普遍较小，90% 以上分布在 0~6 μm 短轴长区间内；短轴长高值区内（大于 10 μm ）的占比较小，在此区间内 3 类样品的孔隙、微裂隙的比例稍有差异：J 样品中张开度较大的孔隙、微裂隙的百分比稍大于 L 样和 W 样，W 样中最小。长短轴比数据显示，3 类样品中，80% 以上的孔隙、微裂隙分布在 0~10 μm 区间，在长短轴比高值区（大于 20），J 类样品中的微裂隙数量的百分比稍高于 L、W 类样品，表明前者的微裂隙单向延展规模相对后两者较大。综合短轴值、长短轴比的统计结果，3 类样品孔隙、微裂隙的规模尺寸大小为：J>L>W。

相对孔隙而言，微裂隙尺寸较大，对岩石的物理力学性质影响更加显著，在此选取 15 条延展规模最大的微裂隙分析其边界形态特征。表 5 中统计了各样品微裂隙的周长-面积维数，其中 La、Wa 样品中微裂隙的面积、周长对数值不存在线性关系，无分形特征，由其余 4 个样品的数据可以看出，J 类样品中微裂隙分维数明显大于其余两类，W 类的分维数最小。表明 J 类样品微裂隙边界的复杂程度高于 L 和 W 类，而 W 类者最低。

(3) 孔隙、微裂隙分布特征

表 5 中的定向度数据显示，各样品孔隙与微裂

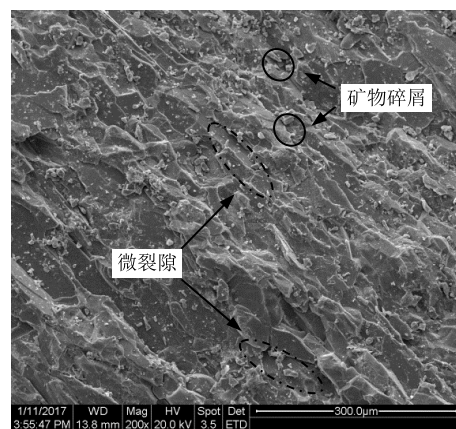
隙总的定向分布程度较低，这是石英、长石等粒状矿物间的孔隙无规则随机分布的结果。由于规模较大的微裂隙主要沿片状矿物和粒状矿物的接触面展布（见图 7(a)），致使微裂隙定向展布系数相对较高，其中 J 类样品中微裂隙定向展布程度明显高于其他两类。

4 基于扫描电镜的断面形貌特征分析

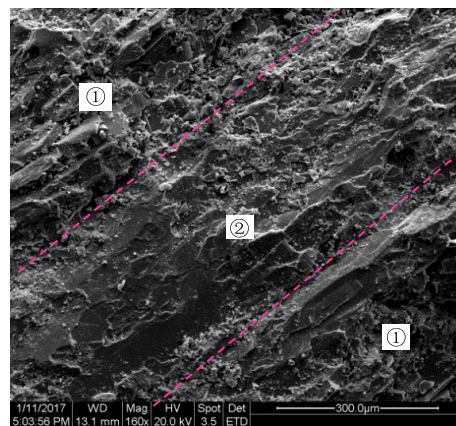
4.1 断面形貌特征定性分析

利用点荷载试验仪沿平行片理面方向对 3 种片岩施加荷载（短柱状岩样，侧向加荷，下同），发现破裂后的岩石断口主要沿片理面发育，平整度相对较好；斜交片理面预制一定尺度的裂缝后，沿平行裂缝面方向施加荷载时，形成的断裂面顺预制裂缝扩展，表面粗糙起伏，残留有较多的矿物碎屑。

扫描电镜下两种方向的断裂面形貌特征具有明显差异。以 W 类片岩为例，如图 9(a)所示，在沿片理面发育的岩石断口上可见薄片状云母矿物层层堆叠现象，断面起伏度较小，局部凹陷与凸起处有少量片状矿物碎屑，偶见沿矿物表面发育的微裂隙。



(a) 沿片理面方向



(b) 斜交片理面方向

图 9 W 类片岩断面形貌图

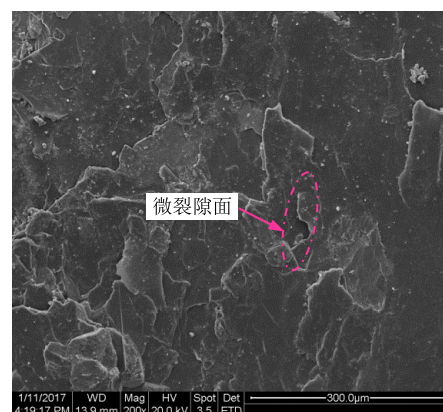
Fig.9 Fractured surface of schist-W type

图 9(b)所示, 顺预制裂缝 (斜交片理面) 方向的断口表面参差不齐, 图中起伏度与矿物特征呈明显区域性差异: ①号区域平整度较差, 见粒、板状矿物有明显定向排列, 矿物普遍破裂, 形成阶梯状断面, 表面残留较多矿物碎屑; ②号区域表面相对平坦光滑, 矿物呈薄片状紧密堆叠, 表面碎屑较少。该现象表明, 顺预制裂缝面方向施加外力时, 片岩断口主要沿斜交矿物发育方向扩展, 局部有沿平行片状矿物表面衍生的迹象, 总体呈现出斜交-平行片理面交替而生的特征。引起这种现象的原因有二: 一方面, 比表面积较大的片状矿物以面面接触定向展布, 形成平坦薄弱面, 斜交片理面的裂缝扩展至片理面处, 因产生沿晶断裂所需的能量远比产生穿晶断裂的小, 易顺片理面产生一定规模的裂缝; 另一方面, 因沿云母晶边发育的微裂隙对裂缝的引导作用, 也会产生这种现象。这种点荷载作用下的断裂面形貌特征, 与文献[23]提出的岩石在压缩作用下产生的斜穿弱面和沿弱面滑动的复合破坏模式相契合, 虽然两文中岩石的受力特征不同, 但都反映了弱面、微裂隙等对岩石受力破坏时裂缝扩展的导向作用。

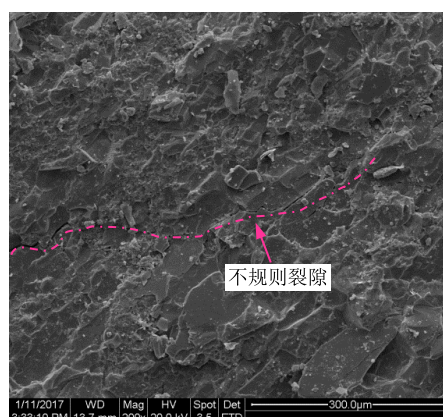
3 类岩石的断裂面形貌特征在斜交片理面方向相近, 而在沿片理面方向表现出明显差异。图 9(a)、10(a)、10(b)显示, J 类片岩产生完整的沿晶破裂, 断裂面平坦静滑, 矿物碎屑极少, 可见云母矿物面之间的微裂隙存在。L 类、W 类片岩表面起伏度相对较大, 主要产生沿晶破裂, 局部有穿晶断裂后的矿物碎屑残留, 镜下可见 L 类片岩中有切割片状矿物的裂隙存在, 可能是不规则裂隙在外力作用下扩展所致。上述现象指示, 相对 L、W 类片岩而言, J 类片岩的云母矿物表面形态较规则, 晶面间的微裂隙较发育, 因此产生沿片理面方向的开裂所需的破坏能较小, 易形成光滑平整的裂面; L、W 类片岩中, 部分不规则分布的微裂隙引起局部晶体断裂, 增大了断面的粗糙度。这与扫描电镜下片岩组构特征的分析结论相契合。由此可见, 片岩微观特征的不同导致其力学性能的差异, 断裂表面的粗糙起伏程度是其主要体现之一。

4.2 断面粗糙度的定量评价

扫描电镜获取的岩石断面图是由一系列像素点组成的数字图像, 各像素点的灰度值由 0~255 不等, 图像灰度值的变化与岩石表面起伏度密切相关[24]。研究表明, 物体的粗糙表面与图像的灰度表面皆具有分形特征[25]。因此, 可利用图像灰度值的分形维数定量评价断面的起伏程度。



(a) J 类片岩



(b) L 类片岩

图 10 沿片理面方向的断面形貌图
Fig.10 Fractured surface of schist with cracking direction along the foliation

将岩石断面的灰度图读入 Matlab 中, 获取图中各像素点的灰度值, 形成灰度矩阵。为弱化局部暗色的微裂隙引起灰度值的突变对总体结果造成影响, 采用 20×20 的网格划分读入的图像, 取每个网格内像素点灰度值的平均值作为灰度矩阵的组成元素, 据此绘制由矩阵元素组成的灰度值曲线图。按上述操作分别提取图 9(a)、10(a)、10(b)中的灰度值作图 (见图 11), 可见各灰度值曲线图形似不规则的信号波, 3 条信号波的复杂程度具有差异性, 这种复杂不规则的波形具有自相似性和标度不变性, 可采用盒维数法计算分形维数定量描述其波动强弱[26]。

以 J 类片岩的灰度波形图为例, 在 Matlab 环境中, 用边长为 a 的小方格对曲线波进行覆盖, 计算覆盖图形所需的方格数 N , 不断变换 a 值大小, 分别获取与之对应的 $N(a)$, 统计 $\log_2 N(a) - \log_2 a$ 如图 12, 图中显示两者呈较好的线性关系, 盒维数 $D_J = -\log_2 N(a) / \log_2 a = 1.48$ 。同理计算 L 类、W 类灰度波形图的盒维数为 $D_L = 1.53$ 、 $D_W = 1.60$ 。可见, W

类片岩的盒维数最大, 表明其灰度信号的波动较为强烈, 岩石断裂面粗糙度最大, 其次为 L 类片岩。由此可见, 该武当群片岩沿片理面的断面粗糙度为 $D_1=1.48\sim 1.60$ 。同理, 斜交片理面的断面粗糙度为 $D_2=1.65\sim 1.69$ 。

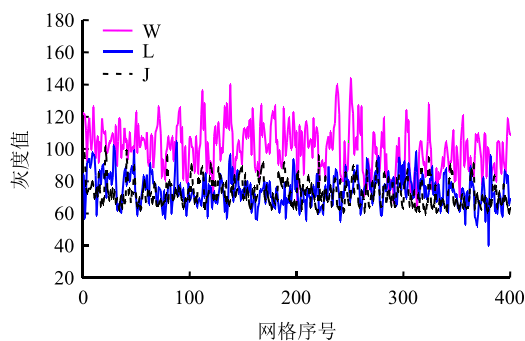


图 11 沿片理面方向断面的灰度波形图

Fig.11 Grayscale waveform diagram of fracture surface with cracking direction along the foliation

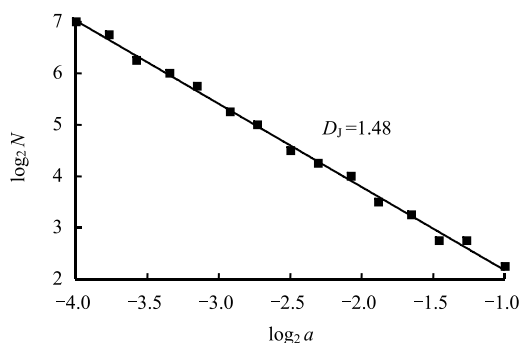


图 12 盒维数法分形维数计算结果 (J 类样品沿片理方向的断裂面)

Fig.12 Results of box counting fractal dimension (J samples with cracking direction along the foliation)

5 讨 论

片岩的波速、强度、变形等物理力学指标往往表现出显著的片理角效应, 这与均质岩石的性质有本质不同, 加强此类岩石在矿物、孔隙 (微裂隙) 的含量、形态、分布等微观组构特征方面的定量研究, 对于揭示宏观各向异性的机制, 评判岩石物理力学各向异性度有重要意义。

由矿物、孔隙 (微裂隙) 系统组成的统一体, 其内蕴含的微观信息复杂, 定量指标较多。减小相关性指标, 提取主要指标, 是建立微宏观定量关系的基础。扫描电镜下的组构图像 (见图 7) 显示, 微裂隙与白云母存在空间依附关系, 前者主要沿后者的边缘孕育。而 3 类样品的微观定量指标数据亦表明: 云母含量越高、尺寸规模越大、定向性越好,

则微裂隙越多、规模越大、定向延展度越高; 两种对象的边缘粗糙度却呈现相反规律, J 类样品的云母矿物的分形维数最小, 而其微裂隙分形维数较其他两类大, 原因为 J 类片岩中微裂隙尺寸较大, 微裂隙形成于平滑的云母边缘且向不规则粒状矿物接触面扩展, 由此增大了其边缘复杂程度。由此可见, 微裂隙与白云母的微观指标有较好的相关性。对矿物系统而言, 虽然 3 类样品的数据显示, 白云母的各微观指标存在一定相关性, 但从地质成因角度来说, 矿物的含量、形态、分布特征相互间的关联性较小, 3 个特征相对应的微观指标理应相互独立。因此, 石英长石及白云母矿物的含量, 白云母矿物的尺寸、分形维数、定向分布系数等可作为关联岩石宏观物理力学性质的主要微观指标。

岩石的强度性质与破坏后的断面形貌特征本质上受其微观组构特征的控制, 而断面形貌特征是岩石力学性能的特征, 故表面的粗糙起伏度对岩石的强度具有指示意义。斜交片理面的断面主要发生穿晶破坏, 表露的各晶体断口呈阶梯状粗糙不平, 岩石抵抗破坏的能力较强; 沿片理面扩展而生的断面主要发生沿晶破坏, 展露出相对平整的片状晶面, 岩石抵抗破坏的能力较弱, 因此, 断面粗糙度的各向异性与岩石的强度各向异性具有较大关联性。据前文沿片理面与斜交片理面的断面粗糙度指标, 得此类武当群片岩的断面粗糙度各向异性近似为 $K=D_2/D_1=1.03\sim 1.14$ 。根据文献[4]中的数据, 利用 Niandou 提出的各向异性度公式 $K=(\sigma_{1\max}-\sigma_3)/(\sigma_{1\min}-\sigma_3)$ ($\sigma_{1\max}$ 为最大抗压强度, $\sigma_{1\min}$ 最小抗压强度, σ_3 为围压), 计算得该类片岩强度各向异性为 2.00~2.19。因二维平面内的分形曲线的维数始终在 1~2 间, 采用灰度波动曲线的盒维数度量的断面粗糙度各向异性与岩石的强度各向异性存在成倍差异, 显然此倍数随岩性变化而异。岩石的强度各向异性在工程设计施工中不容忽视, 常用单轴、三轴压缩试验获取相关数据。试验前须制取不同弱面角的圆柱样, 而弱面发育、风化程度较强的岩石往往面临制样困难, 片理斜交纵轴的圆柱样尤难获取。鉴于岩石断面上的各向异性指标更易获取, 可利用其间接评判岩石力学各向异性, 因此, 从断面形貌角度探讨岩石各向异性, 加强断面粗糙度各向异性与岩石强度各向异性的关联规律研究, 具有实际工程意义。

6 结 论

(1) 武当群片岩在平行片理和垂直片理方向的

矿物分布排列特征不同,表现出明显的非均质性。垂直片理方向显示出矿物定向排列与矿物间近互层状分布特征,是引起该片岩各向异性的本质原因。

(2)针对岩石中的两类系统——矿物与孔隙(微裂隙)系统,从含量、形态、分布特征方面构建了反映片岩物理力学各向异性的微观定量指标体系,包括面积百分比、轴长值+轴长比、周长-面积维数、定向分布系数等。基于 IPP 的图像处理、分析结果显示,武当群片岩主要矿物为粒状石英和长石、片状白云母,两种形态的矿物分别占比 62%~84%、11%~30%,岩石的孔隙、微裂隙比例为 0.5%~5.6%;云母矿物、微裂隙的面积-周长维数分别为 1.31~1.39、1.37~1.68,二者的定向度分别为 0.61~0.85、0.61~0.83。

(3)不同表观特征的 3 种武当群片岩,其矿物系统在含量、形态、分布特征方面表现出一定规律性和差异性。含量方面,J 样的白云母矿物含量相对较高,其次为 L 样;形态方面,J 样中白云母矿物的边缘相对平滑,矿物的生长规模最大,单向发育最显著;分布特征方面,3 种样品中白云母矿物定向排列程度为:J>L>W。由于微裂隙主要伴生在白云母矿物边缘,孔隙裂隙在含量、形态、分布特征方面的定量指标与白云母矿物的对应指标具有较强的相关性。可采用白云母矿物的定量指标进行后续微宏观指标的关联性研究。

(4)沿片理面破裂与斜交片理面破裂的断面的形貌特征有明显差异,前者主要发生沿晶破坏,断面相对平坦,后者以穿晶破坏为主,局部有沿晶破坏现象,矿物断口多呈阶梯状粗糙不平。由断面形貌图提取了灰度信号图,基于盒维数法的分形计算结果显示,武当群片岩平坦断面的粗糙度为 1.48~1.60,起伏断面的粗糙度为 1.65~1.69,该片岩断面粗糙度各向异性约为 1.03~1.14。从断面形貌角度探讨各向异性对于间接评判岩石力学各向异性有实际工程意义。

参考文献

- [1] 刘胜利,陈善雄,余飞,等.绿泥石片岩各向异性特性研究[J].岩土力学,2012,33(12):3616—3623.
LIU Sheng-li, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3616—3623.
- [2] 王章琼,晏鄂川,刘毅学,等.武当群片岩变形参数各向异性特征及机制研究[J].岩土力学,2014,35(5): 1317—1322.
WANG Zhang-qiong, YAN E-chuan, LIU Yi-xue, et al. Anisotropic properties of deformation parameters and its mechanism of Wudang group schist[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1317—1322.
- [3] 王章琼,晏鄂川,黄祥嘉,等.鄂西北片岩变形参数各向异性及水敏性研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S02):3967—3972.
WANG Zhang-qiong, YAN E-chuan, HUANG Xiang-jia, et al. Anisotropic and water sensitivity properties study of schist deformation parameters in northwest of Hubei province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(S02): 3967—3972.
- [4] 尹晓萌,晏鄂川,崔学杰,等.片岩强度各向异性特征及破坏模式分析[J].工程地质学报,2017,25(4):943—952.
YIN Xiao-meng, YAN E-chuan, CUI Xue-jie, et al. Characteristic of strength anisotropy and failure modes of schist[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2017, 25(4): 943—952.
- [5] 陈文玲,赵发锁,弓虎军.基于微观试验的云母石英片岩三轴蠕变机制研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊 2):3578—3584.
CHEN Wen-ling, ZHAO Fa-suo, GONG Hu-jun. Study of triaxial creep mechanism of mica-quartz schist based on microscopic test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl. 2): 3578—3584.
- [6] VANORIO T, MUKERJI T, MAVKO G. Emerging methodologies to characterize the rock physics properties of organic-rich shales[J]. **Leading Edge**, 2008, 27(6): 780—787.
- [7] KUILA U, DEWHURST D N, SIGGINS A F, et al. Stress anisotropy and velocity anisotropy in low porosity shale[J]. **Tectonophysics**, 2011, 503(1—2): 34—44.
- [8] 陈天宇,冯夏庭,张希巍,等.黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1772—1779.
CHEN Tian-yu, FENG Xia-ting, ZHANG Xi-wei, et al. Experimental study on mechanical and anisotropic properties of black shale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1772—1779.
- [9] 陈天宇,冯夏庭,杨成祥,等.含气页岩渗透率的围压敏感性和各向异性研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):639—643.

- CHEN Tian-yu, Feng Xia-ting, YANG Cheng-xiang, et al. Research on confining pressure sensitivity and anisotropy for gas shale permeability[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2014, 31(4): 639—643.
- [10] 王家兴, 石豫川, 段伟锋, 等. 基于微观试验的片岩力学特性研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 73—78.
- WANG Jia-xing, SHI Yu-chuan, DUAN Wei-feng, et al. A study of the mechanical property of schist based on microscopic tests[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2014, 51(3): 73—78.
- [11] 邓继新, 王欢, 周浩, 等. 龙马溪组页岩微观结构、地震岩石物理特征与建模[J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 2123—2136.
- DENG Ji-xin, WANG Huan, ZHOU Hao, et al. Microtexture, seismic rock physical and modeling of Longmaxi formation shale[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2015, 58(6): 2123—2136.
- [12] 侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2541—2550.
- HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Experimental study on anisotropic properties of Longmaxi formation shale under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2541—2550.
- [13] 郑达, 巨能攀. 千枚岩岩石微观破裂机理与断裂特征研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 317—322.
- ZHENG Da, JU Neng-pan. Scanning electronic microscope tests for rock micro-rupture mechanism and fracture characteristic of phyllite[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(3): 317—322.
- [14] 钟建华, 刘圣鑫, 马寅生, 等. 页岩宏观破裂模式与微观破裂机理[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 242—250.
- ZHONG Jian-hua, LIU Sheng-xin, MA Yin-sheng, et al. Macro-fracture mode and micro-fracture mechanism of shale[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2015, 42(2): 242—250.
- [15] 周阳. 黄土微结构数字图像处理与量化方法的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- ZHOU Yang. Study on the digital image processing and quantification technologies of loess microstructure[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [16] 张春生, 刘宁, 褚卫江, 等. 石英云母片岩各向异性特征多尺度精细化描述[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 573—582.
- ZHANG Chun-sheng, LIU Ning, CHU Wei-jiang, et al. Multi-scale fine description on the anisotropic characteristics of quartz-mica schist[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(3): 573—582.
- [17] 李志刚, 徐光黎, 黄鹏, 等. 粉砂质板岩力学特性及各向异性特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 200—209.
- LI Zhi-gang, XU Guang-li, HUANG Peng, et al. Mechanical and anisotropic properties of silty slates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 200—209.
- [18] 陈超, 楼章华, 金爱民. 饱和水与干燥碳酸盐岩声波各向异性研究[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(4): 131—137.
- CHEN Chao, LOU Zhang-hua, JIN Ai-min. Acoustic anisotropy of water-saturated and desiccated carbonate rocks[J]. **Lithologic Reservoirs**, 2017, 29(4): 131—137.
- [19] 綦建峰, 隋旺华, 张改玲, 等. 基于SEM图像处理红层砂岩孔隙度及分维数计算分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(增刊): 339—345.
- QI Jian-feng, SUI Wang-hua, ZHANG Gai-ling, et al. Calculation and analysis of the porosity and fractal dimension of red stratum sandstone based on SEM images processing[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2014, 22(Suppl.): 339—345.
- [20] 王宝军, 施斌, 刘志彬, 等. 基于GIS的黏性土微观结构的分形研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 244—247.
- WANG Bao-jun, SHI Bin, LIU Zhi-bin, et al. Fractal study on microstructure of clayey soil by GIS[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(2): 244—248.
- [21] 朱华, 姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- ZHU Hua, JI Cui-cui. Fractal theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [22] 王家兴. 石英云母片岩各向异性特征及其对围岩稳定性影响的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- WANG Jia-xing. Research for the anisotropy of quartz mica schist and its effect on the stability of the surrounding rock[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.