

花岗岩微观力学性质试验研究

张帆^{1,2}, 郭翰群², 赵建建², 胡大伟¹, 盛谦¹, 邵建富^{2,3}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学和工程国家重点实验室 湖北 武汉 430071 2. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院 湖北 武汉 430068;
3. 法国里尔科技大学 里尔力学实验室, 法国 里尔 59650)

摘要:为探讨花岗岩的微观力学特性,通过粉晶X射线衍射和光学显微镜的表面观察,获得花岗岩各矿物成分及比例和在显微镜下的表面形貌。然后通过纳米压痕试验,得到荷载-位移曲线和残余压痕,定性分析花岗岩各成分的力学特征,对压痕试验结果统计分析获得各成分的弹性模量和硬度。再通过二次均质化方法得到花岗岩的等效弹性模量和泊松比,并与单轴压缩试验测得的弹性模量及已有研究资料的泊松比进行对比。结果表明:花岗岩主要由石英、长石、云母等成分组成,并能通过颜色、形态特征识别;石英结构致密,力学性质良好,长石次之,云母质地很软,有明显的孔隙结构;均质化方法计算的弹性模量与单轴压缩试验值相差较小,泊松比与已有研究资料基本吻合,其对于评价材料的力学性能有着重要的工程实践意义。研究成果有助于更好地了解花岗岩的微观力学特性,并为从微观角度确定岩石宏观力学性质研究提供参考。

关键词:岩石力学;微观力学性质;纳米压痕试验;矿物成分

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)增2-3864-09

Experimental study of micro-mechanical properties of granite

ZHANG Fan^{1,2}, GUO Hanqun², ZHAO Jianjian², HU Dawei¹, SHENG Qian¹, SHAO Jianfu^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China; 3. Laboratory of Mechanics of Lille, University of Sciences and Technologies of Lille, Lille, 59650, France)

Abstract: In order to study the micro-mechanical properties of granite, the mineral compositions of granite and their proportion were obtained by powder X-ray diffraction experiments, also the surface morphology of granite was observed by optical microscope. Nano-indentation tests were conducted, and then, the load-displacement curves and residual indentation prints were obtained to qualitatively analyze the mechanical properties of the mineral compositions. The elastic modulus and hardness of each component were obtained by statistical analysis of indentation results. A two-step homogenization method was applied to calculate the equivalent elastic modulus and Poisson's ratio of the granite, which were compared with those obtained by uniaxial compression test and existing research materials respectively. Results show that: the granite is mainly composed of quartz, feldspar and biotite, which can be identified by color and morphological features. The quartz structure is compact and the mechanical properties are good, which is followed by the feldspar, but the biotite texture is very soft and its pore

收稿日期: 2017-02-16; **修回日期:** 2017-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579093, 51479193); 中国博士后科学基金资助项目(2013M531773)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51579093 and 51479193) and China Postdoctoral Science Foundation Funded Project(Grant No. 2013M531773)

作者简介: 张帆(1981-), 女, 2011年于法国里尔科技大学土木工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩石力学、岩土材料多场耦合方面的教学与研究工作。E-mail: fanzhang@aliyun.com。通讯作者: 胡大伟(1981-), 男, 现任研究员。E-mail: dwu@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0129

structure is obvious. The difference between the elastic modulus calculated by the homogenization method and that obtained from the uniaxial compression test is relatively small and the Poisson's ratio is in agreement with the existing data, which has important engineering significance for evaluating the mechanical properties of materials. The results of this study can help to better understand the micro-mechanical properties of granite and provide a reference for the study of macroscopic mechanical properties of rock from a microscopic view.

Key words : rock mechanics ; micro-mechanical properties ; nano-indentation test ; mineral composition

1 引 言

花岗岩强度高,力学性质良好,不易风化,结构稳定,并且大量存在于地壳岩层中,因此广泛用于隧道、地下洞库、水电站、核废料地下处置库等工程建设中^[1]。地层中的岩石通常处于三向受力状态,同时也可能受到温度、渗流、化学等因素的综合作用,使得岩石的研究必须考虑其受力状态以及岩体所处的环境条件。学者们对于岩石在不同围压作用下所表现的性质以及在温度,渗流,化学,裂隙,流变等不同组合条件作用下的力学性质变化及其破坏机制等方面做了大量的研究,并取得了丰富成果,为相关工程建设提供了理论指导和技术支持。通常,学者们大多把岩石在宏观上看作一种均匀的,各向同性的材料进行力学性质的研究,但岩石作为多相材料,各矿物成分的分布组成及其微观力学性质决定着岩石的宏观力学性质表现。诸多研究也表明,岩石的损伤和破坏等力学性质的变化,从本质上说是由其微观结构和各矿物成分力学性质的变化而导致的。因此,研究岩石的微观结构及各矿物成分的微观力学性质,对于补充和解释岩石的力学性能具有重要的理论和应用意义。

近年来,诸如深度感应纳米压痕技术等先进设备的发展,使得研究材料的微观结构特征和相应的微观力学性质成为可能。赵庆新^[2]通过纳米压痕试验对矿物掺和料水泥中的水泥颗粒、磨细矿渣、粉煤灰颗粒的弹性模量进行了比较研究。V. Magnenet 等^[3]通过阵列压痕试验研究了泥岩基质及较大内含矿物对应的体积分数和弹性模量。A. Bandini 等^[4]通过纳米压痕试验对大理石内部晶体微裂隙对力学性能的影响研究,揭示了微裂隙的形成过程和其过程中力学性质的变化规律。P. Shukla 等^[5]通过纳米压痕试验对各类页岩的力学性质进行了对比分析,因页岩取样扰动会产生裂纹而无法取得符合标准的传统力学性质测试所需岩样,因而取矿井中的碎片通过纳米压痕试验测得其力学性质参数用作水压致裂法装置设计参考。在微观力学性质方面的研究可

以揭示其材料的本质性能,但在岩石方面进行的研究仍较少,相关的研究也还不成熟,在国内则更为鲜见。为了更好地了解花岗岩不同矿物构成及其微观力学性质,本文结合粉晶 X 射线衍射和光学显微镜观察,测得花岗岩各矿物成分组成,识别各矿物成分的微观分布特征,通过在各成分中的网格点阵纳米压痕试验,定性地分析花岗岩各成分所表现的力学特征,同时统计拟合分析各成分的弹性模量和硬度概率密度分布,得到各成分弹性模量和硬度的大致集中分布范围,对压痕试验所得的结果采用二次均质化方法计算得到花岗岩的等效弹性模量和泊松比,并与传统单轴压缩试验所得弹性模量,已有研究资料的泊松比进行比较。研究结果有助于更好地了解花岗岩的微观力学特性,并为从微观角度确定岩石宏观力学性质研究提供参考。

2 试验技术原理和过程

2.1 纳米压痕试验技术及原理

纳米压痕测试仪器通过高分辨率的制动器和传感器,采用电磁或静电驱动控制和检测压头在材料表面的压入和退出,并提供高分辨率的连续荷载与位移的测量^[6]。本试验使用的试验仪器为武汉大学力学研究中心实验室的 Hysitron 纳米压痕测试系统(见图 1)。



图 1 Hysitron 纳米压痕测试系统

Fig.1 Hysitron nano-indentation tester system

压痕测试系统形变量很小，要求试样表面的平整光洁，否则将严重影响测试结果。试验时金刚石压头在控制的荷载作用下，垂直压入样品表面，试样表面开始发生弹性变形，随着荷载的增大，塑性变形产生甚至断裂，可获得该测试点的荷载-位移曲线(见图 2)，通过曲线上的特征参数计算出试样的硬度和弹性模量，两者都是评价材料力学性能的重要指标^[7-8]。

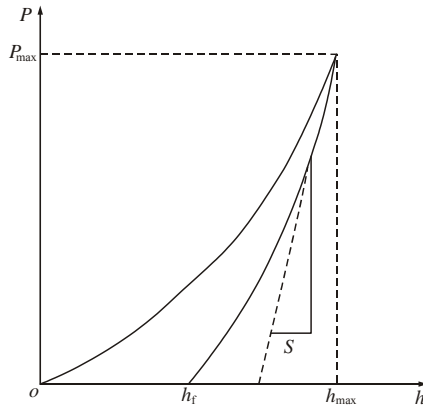


图 2 典型加载卸载荷载-位移曲线

Fig.2 Typical loading/unloading-displacement cures

图 2 中横轴 h 为压入深度；纵轴 P 为荷载； P_{max} 为最大荷载； h_{max} 为最大位移； h_r 为卸载后的压入深度； S 为弹性接触刚度，可由下式计算求得

$$S = \left(\frac{dp}{dh} \right)_{h=h_{max}} \quad (1)$$

实际通常由卸载曲线上半部分弹性阶段的曲线拟合斜率求得。由此可以根据下式计算出待测材料的弹性模量 E ：

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (2)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (4)$$

式中： E_r 为折合模量，表示压头和试验材料共同作用的模量； E_i ， ν_i 分别为金刚石压头的弹性模和泊松比，其取值为 $E_i = 1\ 141\ \text{GPa}$ ， $\nu_i = 0.07$ ； β 为压头校正系数； ε 为与压头形状有关的常数，本试验采用正三棱锥形的 Berkovich 压头，故有 $\beta = 1.034$ ， $\varepsilon = 0.75$ ； h_c 为接触深度(nm)； A_c 为接触区域的投影面积(nm^2)。

硬度 H 表征材料局部抵抗外力压入其表面的能力，由下式求得

$$H = \frac{P_{max}}{A_c} \quad (5)$$

对于正三棱锥压头试验时压头接触深度和投影面积有对应关系：

$$A_c = \frac{3\sqrt{3} \tan \theta}{\cos \theta} h_c^2 \quad (6)$$

式中： θ 为压头中心轴线与侧面的夹角，本试验采用的 Berkovich 压头的 $\theta = 65.35^\circ$ ，即有 $A_c = 24.56h_c^2$ 。由式(4)可知，在试样可能的泊松比范围内，泊松比 ν 的不同取值计算出来的各弹性模量 E 差别很小，例如大多数工程材料的泊松比 $\nu = 0.15 \sim 0.35$ ，即当 $\nu = 0.25 \pm 0.1$ 时，弹性模量 E 仅产生 5.3% 以内的相对误差，因此 ν 可根据材料的属性自行选取合适值。同时由于 $E_i \gg E$ ，使用 $E_i = 1\ 140\ \text{GPa}$ 与使用 $E_i = \infty$ 计算出的弹性模量平均大约相差 1.6%^[3]，因此，在没有特别高精度要求的情况下，可以忽略金刚石压头刚度的影响，使用下式简化计算：

$$E = E_r (1 - \nu^2) \quad (7)$$

2.2 试验准备步骤

试验所用的花岗岩外观呈灰白色，并伴有黑色细粒状斑点，试样加工成直径 37 mm，高度 15 mm 的扁圆柱体。

(1) 试样处理。取直径 37 mm，高度 15 mm 的花岗岩试样，分别用 400，800，1 200，2 000，5 000 目，7 000 目的砂纸依次打磨，每种砂纸打磨时间依次增加，尤其在最后一道打磨工序时保证充分打磨，使试样表面平整光滑，然后用无水乙醇清洗样品，使试样表面无任何杂物，接着把试样置于 50 的烘箱里烘 24 ~ 48 h 直至试样完全烘干为止。

(2) 粉晶 X 射线衍射试验。取质量 30 g 的花岗岩放入 50 的烘箱里烘干 24 h，烘干后用锤子将花岗岩敲碎，然后用玛瑙研钵将小碎粒磨成粉末，在中国地质大学化学分析实验室利用德国 Bruker AXS D8-Focus X 射线衍射仪在温度 24 湿度 36% 的环境下对试样粉末进行矿物成分分析。

(3) 将打磨烘干好的试样放入压痕试验机内，用光学显微镜观察试样表面形貌，识别出各矿物成分及其分布特征，并在预测矿物成分中的微区中选取平整度较高，有代表性的区域进行压痕试验。

3 试验现象及结果分析

3.1 花岗岩矿物成分构成和分布

通过 X 射线衍射试验，对花岗岩进行矿物成分分析，得到本试验使用的花岗岩主要由石英

(SiO₂), 钾长石(K_{0.91-0.96}Al_{0.97-1}Si_{2.98-3.03}O₈), 钠长石(Na_{0.82-1.04}Al_{0.97-0.99}Si_{3.01-3.07}O₈)以及黑云母(K(Mg, Fe)₃AlSi₃O₁₀(F, OH)₂)等组成, 其矿物组成及比例分数如表 1 所示。

表 1 花岗岩试样矿物组成及比例
Table 1 Components and individual proportion of granite

矿物种类	所占比例/%
石英	9
钾长石	45
钠长石	21
云母	23
绿泥石	1.8
方解石	0.2

花岗岩表面在光学显微镜下的成像, 由于显微镜视野局限和矿物成分分布特征, 不能在同一视野中完全清晰显示各矿物的分布, 故取清晰部分组合分析, 如图 3 所示。由图像表面的颜色和形状等特征, 可识别出花岗岩主要由石英, 长石, 黑云母组成^[9], 其中长石是由钾长石和钠长石综合成的一种成分。从图像可以看出, 花岗岩试样表面呈大片的灰色区域 1, 其表面较为平滑, 此种矿物成分为长石。灰色区域中夹杂着不规则的灰白色区域 2, 分布的面积相对较小, 此种矿物成分为石英。在试样表面还点缀着零星的黑色区域 3, 该种区域类似圆形, 面积相对较大, 数量相对少, 分布杂散, 其矿物成分为黑云母。仔细观察发现: 黑云母表面凹凸不平, 成蜂窝状, 并泛有黑色光泽, 有的部位散发着彩光, 其构造形态具有明显的高温熔融矿物在冷却凝固后形态圆滑的特征, 这也是火成岩的一大特色。同时, 也能从图像中看出, 各类矿物成分区域分布比例大致与 X 射线衍射获得的各主要矿物成分比例相一致。

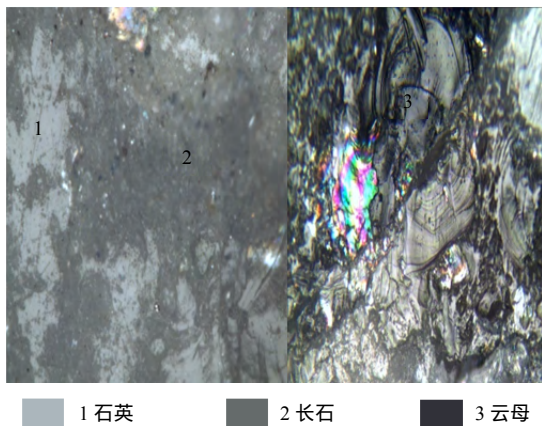


图 3 花岗岩各矿物成分分布

Fig.3 Distribution of mineral components of granite

3.2 荷载-位移曲线分析

有了对花岗岩各矿物成分的认识, 就可以分别针对各类矿物成分进行压痕试验, 了解各矿物成分的力学性质, 进而探讨其对花岗岩宏观力学性能的影响。在试验前通过初始试探试验发现, 云母质地较软, 若和其他 2 种成分以相同的荷载加载, 则会产生很大的塑性变形甚至局部破裂, 影响测试的准确性。本试验对云母成分以 2 000 μN 为最大荷载, 对石英和长石以 8 000 μN 为最大荷载进行加载, 加载路径为“5-2-5”在各成分中进行网格点阵纳米压痕试验^[10], 即在相同荷载速率下 5 s 加载到预设荷载, 保持恒载 2 s 后以相同荷载速率 5 s 卸载。设置 2 s 的恒载阶段是为了消除在纳米压痕测试加载过程中应变滞后现象对测试结果的不利影响, 而恒载阶段的徐变主要发生在 2 s 以内^[11]。

在对花岗岩各成分的压痕试验中, 选取 3 条代表典型特征的荷载-位移曲线以及压痕试验前后残余变形扫描图像, 对该种矿物成分的特征进行对比分析, 定性得出各矿物成分力学性质规律。

从图 4 中可以看出, 花岗岩中的石英成分是一种很好的弹性材料, 其加载过程可大致分为压密阶段, 线弹性阶段, 卸载阶段主要恢复弹性变形, 其恢复的弹性变形较大, 残余变形很小且较为集中。加载过程中曲线平滑, 在维持恒载时, 石英的徐变变形量很小, 表明石英结构致密, 刚度较高, 力学性能良好。同时石英的各荷载-位移曲线形状基本一致, 各曲线基本都集中在同一位置, 其力学性质均匀, 离散性小。从图 5 可以看出, 压痕试验后出现了明显的残留压痕, 压痕印记与压头形状相吻合, 周围未有明显的塑性变形, 也表明了石英弹性性质良好。

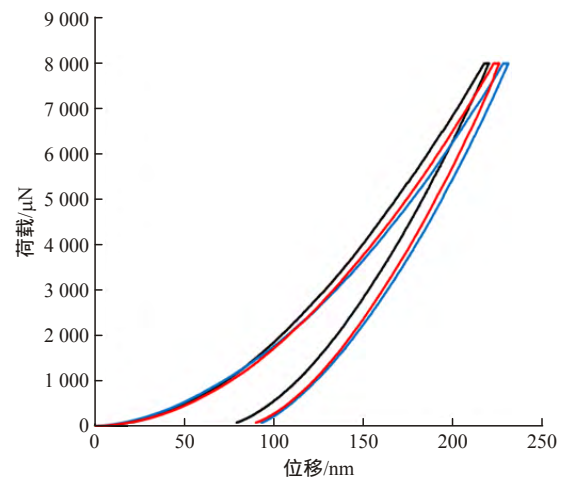


图 4 石英加载卸载荷载-位移曲线

Fig.4 Quartz loading/unloading-displacement curve

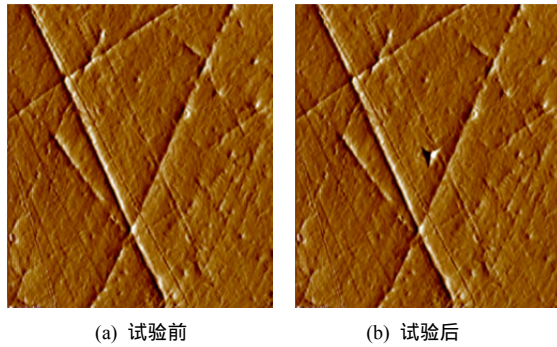


图5 石英压痕试验前后扫描图像

Fig.5 Scanning images of quartz for pre-and post-indentation test

从图6可以看出,花岗岩中的长石成分弹性性能比石英稍差,加载过程中总变形量较大,恒载时其徐变量比石英略大。但是在卸载过程中,其非线性弹性变形恢复较多,残余变形量比石英大且较为分散。在加载过程中,其压密阶段较长且曲线上存在少许凹凸曲折点,表明长石结构相对疏松,孔隙结构稍显。同时,各荷载-位移形状基本相似,但位置分布较为分散,其力学性质离散性相对较大。

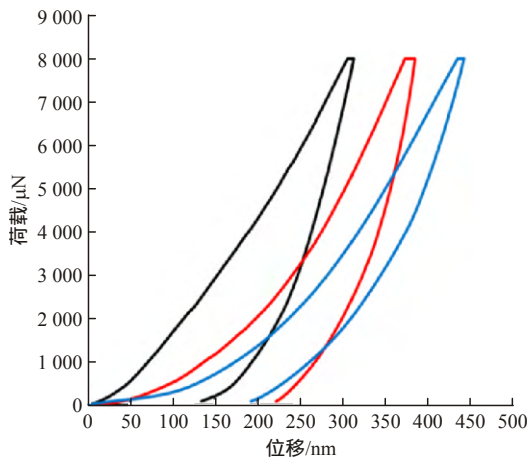


图6 长石加卸载荷载-位移曲线

Fig.6 Feldspar loading/unloading-displacement curve

在图7中,对比长石压痕前后的扫描图像可以发现,试验后在压痕点处残留了较大的压痕印记,压痕与压头形状相比出现了一些变形。可以推断长石的质地相对较软,在压头压入过程中,长石矿物成分往侧向挤密移动,随着压入深度的增加,压头的周围向上凸起,使压点周围形貌发生较大改变。

在对云母的压痕试验中,先同其他2种成分一样用8000 μN 的最大荷载进行试验,发现云母是一种质地很软的材料,压痕点处局部在加载过程中发生了破坏和巨大变形,会使得其测得的力学性质不准确,由此根据加载过程中的破坏情况采用2000 μN

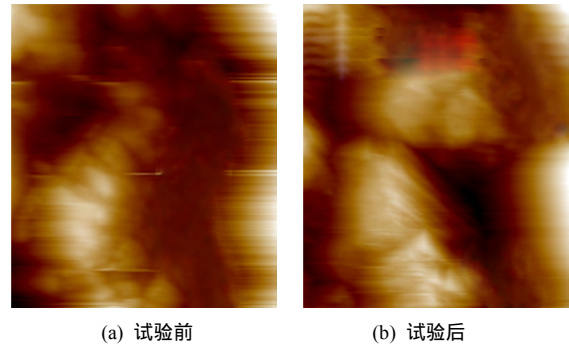


图7 长石压痕试验前后扫描图像

Fig.7 Scanning images of feldspar pre-indentation and post-indentation test

的最大荷载进行试验。从图8可以看出,云母的荷载-位移曲线形态各异,曲线的位置也比较分散。加载过程中的压密阶段荷载增加缓慢,位移迅速增加,呈现明显的凹型。与其他2种成分相比,在同一荷载作用下,云母的压密阶段明显有所延长,同时大部分加载曲线上出现了明显凹凸曲折点,孔隙结构明显。在恒载阶段,其余变量也较大。卸载时恢复的变形较小,残余变形相对较大且分布离散,力学性质离散性也较大。在图9中,由于加载的荷载较小,云母卸载后留下清晰的小印记,周围形态未发生明显变化。

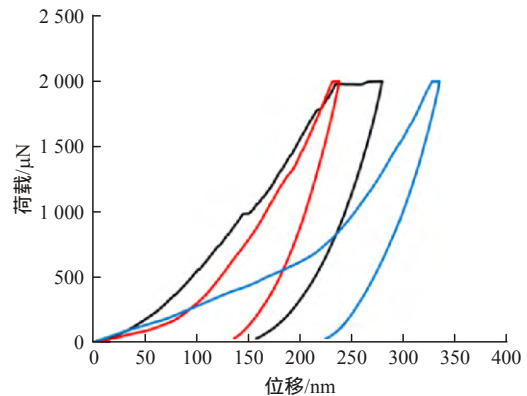


图8 云母加卸载荷载-位移曲线

Fig.8 Biotite loading/unloading-displacement curve

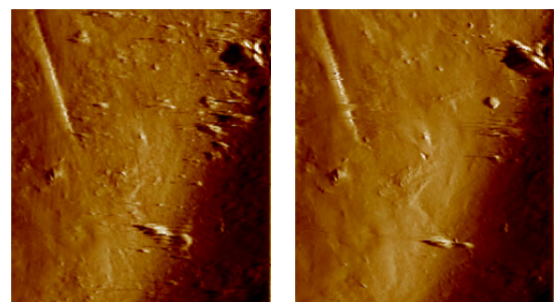


图9 云母压痕试验前后扫描图像

Fig.9 Scanning images of biotite for pre-and post-indentation test

3.3 各矿物成分微观力学性质统计分析

利用纳米压痕试验所获得的参数，通过技术及原理部分的计算公式，可求得花岗岩各成分的弹性模量和硬度值。由于各成分的性质各不相同，在计算过程中所选择的泊松比 ν 也不同，对于石英泊松比 ν 取为 0.15，长石取为 0.2，云母取为 0.3^[12]。通过对各种成分的诸多压痕试验获得的弹性模量和硬度进行统计分析，拟合出其正态分布曲线，获得该种成分的弹性模量和硬度值的范围。

从图 10 和 11 可以看出，石英的弹性模量和硬度分布较为集中，这与石英的荷载-位移曲线分布情况相符。石英弹性模量为 86.1 ± 8.4 GPa，硬度为 10.9 ± 2.0 GPa，其变化范围相对较小。

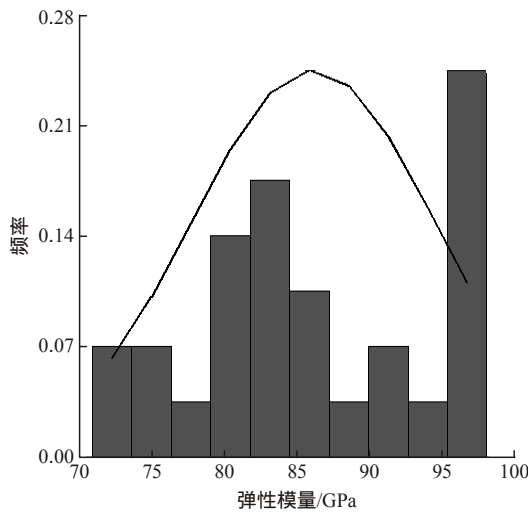


图 10 石英弹性模量统计分析图

Fig.10 Statistical analysis of elastic modulus of quartz

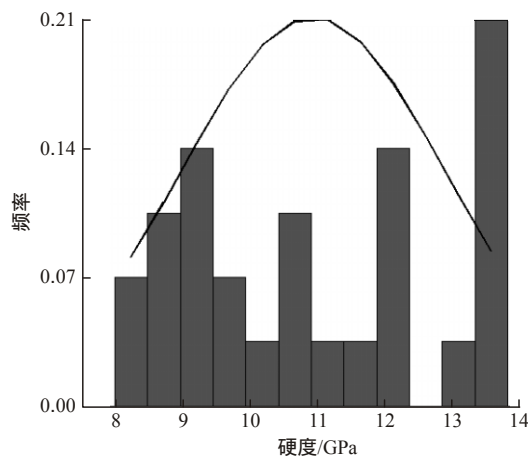


图 11 石英硬度统计分析图

Fig.11 Statistical analysis of hardness of quartz

从图 12 和 13 可以看出，长石的弹性模量和硬度的变化跨度很大，这也与其荷载-位移曲线表现的分布情况相符，弹性模量和硬度的集中和分散位置大致相对应。求得长石的弹性模量为 35.9 ± 21.2 GPa，硬度为 2.6 ± 2.2 GPa，其值的变化范围较大。

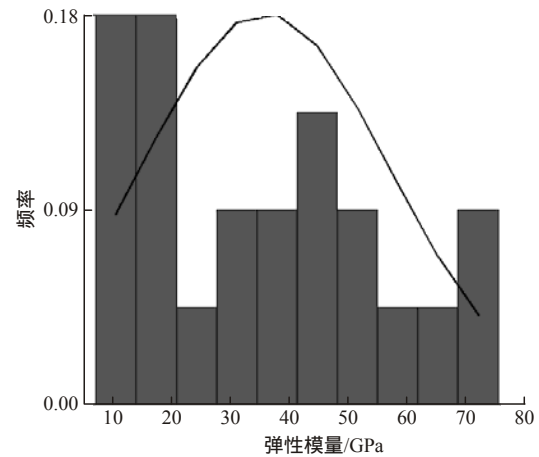


图 12 长石弹性模量统计分析图

Fig.12 Statistical analysis of elastic modulus of feldspar

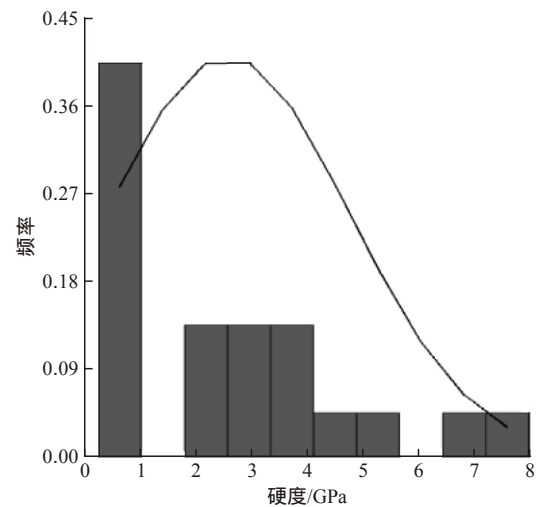


图 13 长石硬度分析统计图

Fig.13 Statistical analysis of hardness of feldspar

同样地，从图 14 和 15 可以看出，云母弹性模量和硬度的变化范围跨度大，其弹性模量的分布主要集中在 10~40 GPa 范围，硬度的分布主要集中在 0.3~3 GPa 范围。求得云母的弹性模量为 30.2 ± 16.9 GPa，硬度为 1.83 ± 1.8 GPa。

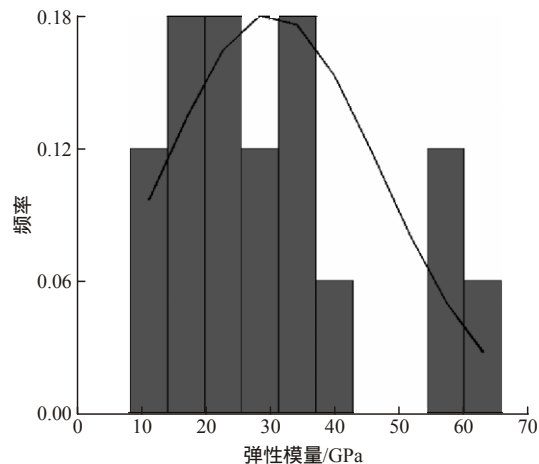


图 14 云母弹性模量分析统计图

Fig.14 Statistical analysis of elastic modulus of biotite

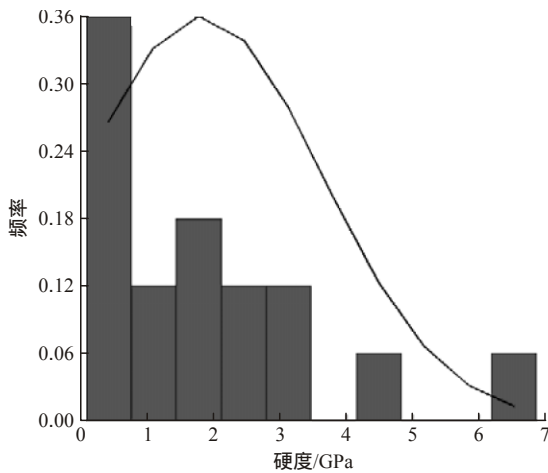


图 15 云母硬度分析统计图

Fig.15 Statistical analysis of hardness of biotite

4 微观力学性质均质化分析

均质化方法有多种, A. C. Guery 等^[13-14]根据不同的考虑因素和条件假设分别推导出 Dilute 方法, Mori-Tanaka 方法以及 Self-consistent 方法, 并分别使用这些均质化方法推测竖井中不同深度泥岩的力学性质, 并与试验值及数值模拟结果对比, 结果显示, 这些均质化方法是可行的, 并且 Mori-Tanaka 方法最为准确。因为 Mori-Tanaka 方法不但考虑了矿物成分对地质材料力学性质的影响, 还考虑了矿物颗粒间的相互影响。Y. Huang 等^[15]在 Mori-Tanaka 方法的基础上, 考虑地质材料中孔隙的作用, 推导了二次均质化方法, 并通过试验进行对比验证, 结果显示, 二次均质化方法计算结果与试验结果基本吻合。参考 Y. Huang 等^[15-17]对均质化方法的分析过程, 结合花岗岩绝大多数的孔隙都很小并且主要集中在云母中的构造特征, 将花岗岩在微观上近似看作由石英, 长石, 以及云母孔隙介质构成的复合体, 云母孔隙介质由云母颗粒固相和其中的孔隙结构组成。考虑到花岗岩的构造特征, 本文采用最合适的二次均质化方法对花岗岩的力学性质进行分析计算。花岗岩中含有的少量绿泥石, 是云母在低温热水作用下易形成的产物, 其性质与云母相似, 而方解石是颗粒间常见的钙质胶结物, 其含量极少, 对分析结果影响很小, 因此把绿泥石和方解石归类于云母中进行分析。二次均质化方法是一个两步的非线性均质化程序, 其目的是把各成分的微观力学性质转化为整体的宏观力学性质, 其转化程序为: 第一步, 把云母颗粒固相和孔隙结构均质化成两者共同组成的均匀云母孔隙介质; 第二步, 把石英、长

石、云母孔隙介质均质化成与实际花岗岩等价的均匀材料, 其均质化过程如图 16 所示。

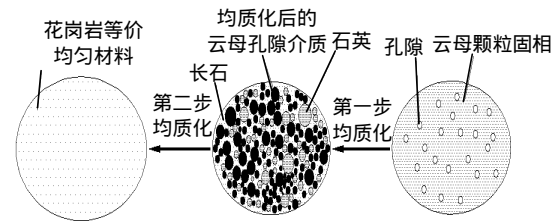


图 16 均质化程序示意图

Fig.16 Illustration of homogenization procedure

根据均质化程序, 结合压痕试验所测得的花岗岩微观力学性质参数, 先从第二步均质化开始分析, 采用经典的 Mori-Tanaka 方法^[18]进行均质化计算来确定花岗岩的宏观力学性质参数, 其计算过程如下:

$$k^{hom} = \left(\sum_{r=0} f_r \frac{k_r}{3k_r + 4\mu_0} \right) \left(\sum_{s=0} \frac{f_s}{3k_s + 4\mu_0} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$G^{hom} = \frac{\sum_{r=0} f_r \frac{\mu_r}{\mu_0(9k_0 + 8\mu_0) + 6\mu_r(k_0 + 2\mu_0)}}{\sum_{s=0} \frac{f_s}{\mu_0(9k_0 + 8\mu_0) + 6\mu_s(k_0 + 2\mu_0)}} \quad (9)$$

式中: f_r ($r = 0, 1, 2$) 分别为花岗岩中云母, 石英和长石所占的体积分数; k_r, μ_r 分别为体积模量和剪切模量, 石英和长石成分可近似看作弹性致密均匀材料, 其由本文节 3.3 试验所得的弹性模量通过材料力学关系 $k_r = E / [3(2 - 2\nu)]$ 和 $\mu_r = E / [2(1 + \nu)]$ 求得。云母的体积模量和剪切模量应由云母颗粒固相和其中的孔隙结构共同作用等效, 通过第一步均质化过程求得。第一步均质化过程计算:

$$k_0 = \frac{4(1 - \varphi)k_s\mu_s}{4\mu_s + 3\varphi k_s} \quad (10)$$

$$\mu_0 = \frac{(1 - \varphi)\mu_s}{1 + 6\varphi \frac{k_s + 2\mu_s}{9k_s + 8\mu_s}} \quad (11)$$

式中: φ 为云母的孔隙率, k_s 为云母颗粒固相的体积模量, μ_s 为云母固相的剪切模量。其求解方法与石英和长石相同。由于本试验花岗岩中少量的绿泥石和方解石成分归于云母的体积分数中计算, 即云母、石英、长石的体积分数各为 $f_0 = 25\%$, $f_1 = 9\%$, $f_2 = 66\%$ 。测得该花岗岩的孔隙率为 1.19%, 由于绝大多数的孔隙都很小并且主要集中在云母中, 则云母的孔隙率估计约为 $\varphi = 4.8\%$ 。

经过 2 次均质化过程计算得到花岗岩宏观力学性质参数, $k^{hom} = 21.74 \text{ GPa}$, $G^{hom} = 14.75 \text{ GPa}$, 花

岗岩整体可近似看作均匀弹性材料，则其均质化得

到的等效弹性模量 $E^{\text{hom}} = \frac{9K^{\text{hom}}G^{\text{hom}}}{3K^{\text{hom}} + G^{\text{hom}}} = 36.1 \text{ GPa}$

以及泊松比 $\nu^{\text{hom}} = \frac{3K^{\text{hom}} - 2G^{\text{hom}}}{6K^{\text{hom}} + 2G^{\text{hom}}} = 0.223$ 。通过单

轴压缩试验得到该种花岗岩的弹性模量约为 31 GPa，相比偏差率为 16.5%，偏差较小。泊松比未直接测得，但相关研究资料^[12, 19]表明：花岗岩的泊松比为 0.2~0.3，可见两者基本吻合。造成弹性模量偏差的原因是多方面的，其中一者均质化过程本身就是一个条件理想假设估算的过程，它的参数的设定对结果偏差也有一定影响；二者可能均质化分析计算对花岗岩的适用需进一步的优化。均质化方法为研究材料的力学性质提供了一个新思路，其得到的材料力学性质与实际值可能在一定范围内存在偏差，但对于评价材料的力学性质有着重要的作用和工程实践意义。例如在工程中，需要对矿井、隧洞等工程的围岩力学性质进行评价，而在复杂工程环境下钻取符合传统力学试验要求的岩样很困难或者成本太高，取小块岩样通过均质化分析评价该围岩的力学性能就成了一种高效简便的途径。

5 结论与展望

通过 X 射线衍射试验和光学显微镜的表面观察，获得了构成花岗岩的各矿物成分和比例及其表面形貌。同时通过纳米压痕试验获得花岗岩各成分的微观力学性能指标，再通过均质化分析得到花岗岩的弹性模量和泊松比，并与单轴压缩试验得到的弹性模量，已有研究资料的泊松比进行对比，得到如下结论：

(1) 花岗岩主要由石英，长石和黑云母等矿物成分构成，在光学显微镜下可以通过其颜色、形态特征区分识别。表面较为平滑且呈大片的灰色区域的矿物成分为长石。在灰色区域中夹杂面积较小的不规则的灰白色区域的矿物成分为石英。试样表面分布杂散的类似圆形黑色区域矿物成分为黑云母，其表面凹凸不平，成蜂窝状，有黑色光泽，时有散发着彩光。

(2) 通过各种矿物成分荷载-位移曲线和残余压痕定性地分析得到，石英结构致密，力学性能良好，徐变小，分布均匀，离散性小。长石质地相对较软，结构也相对疏松，力学性质分布离散性也相对较大。云母则表现为全然不同的性质，其质地很软，有明显的孔隙结构，徐变大，力学性质离散性

也较大。

(3) 各矿物成分的力学性质统计分析得到石英弹性模量为 $86.1 \pm 8.4 \text{ GPa}$ ，硬度为 $10.9 \pm 2.0 \text{ GPa}$ ；长石的弹性模量为 $35.9 \pm 21.2 \text{ GPa}$ ，硬度为 $2.6 \pm 2.2 \text{ GPa}$ ；云母的弹性模量为 $30.2 \pm 16.9 \text{ GPa}$ ，硬度为 $1.83 \pm 1.8 \text{ GPa}$ 。

(4) 本试验所测的花岗岩微观力学参数经过两步的均质化计算得到花岗岩等效弹性模量为 36.1 GPa，单轴压缩试验得到该花岗岩弹性模量约为 31 GPa，两者偏差较小，泊松比计算值与已有研究资料基本吻合，均质化方法对于评价材料的力学性质有着重要的作用和工程实践意义。

纳米压痕试验是研究材料微观力学性能的一种有效方法，但用于岩石微观力学性质的研究仍很少。本文也只是做了一些基础性的研究，由于试验条件限制，在研究方面也存在一些不足，比如试样处理的平整度仍然不够，统计分析的数据量仍较少等，可能会引起一些误差。通过纳米压痕技术可以研究岩石各物相本质的弹塑性、徐变、断裂韧性等性能，也可以结合其他技术研究微结构的力学性能以及矿物颗粒排列构造和黏结作用与力学性能的关系^[20]，这些都需要进一步的研究和发现。

参考文献(References)：

- [1] 张 帆, 盛 谦, 朱泽奇, 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2 651-2 655. (ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study on post-peak mechanical behavior and strain-softening model of three gorges granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2 651-2 655.(in Chinese))
- [2] 赵庆新. 矿物掺合料对高性能混凝土徐变性能的影响机理[博士学位论文][D]. 南京: 东南大学, 2007: 36-43. (ZHAO Qingxin. Effects and mechanisms of mineral admixtures on creep properties of high performance concrete[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Dongnan University, 2007: 36-43.(in Chinese))
- [3] MAGNET V, AUVRAY C, FRANCIUS G, et al. Determination of the matrix modulus of Meuse/Haute-Marne argillite[J]. Applied Clay Sciences, 2011, 52(3): 266-269.
- [4] BANDINI A, BERRY P, BEMPORAD E, et al. Effects of intracrystalline microcracks on the mechanical behavior of a marble under indentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 54(1): 47-55.
- [5] SHUKLA P, KUMAR V, CURTIS M, et al. Nanoindentation studies

- on shales[C]// The 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, USA : [s. n.], 2013 : 23 – 26.
- [6] 张泰华. 微纳米力学测试技术[M]. 北京 : 科学出版社, 2013 : 21 – 25.(ZHANG Taihua. Micro/nano-mechanical testing technology[M]. Beijing : Science Press, 2013 : 21 – 25.(in Chinese))
- [7] 黎明, 温诗铸. 纳米压痕技术理论基础[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3) : 142 – 145.(LI Ming, WEN Shizhu. Theoretical methods on nanoindentation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3) : 142 – 145.(in Chinese))
- [8] 赵宏伟, 赵宏健, 姚金玖, 等. 一种钠钙硅酸盐玻璃的纳米压痕测试分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2009, 7(3) : 205 – 210.(ZHAO Hongwei, ZHAO Hongjian, YAO Jinjiu, et al. Nanoindentation test and analysis of a kind of soda lime silica glass[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2009, 7(3) : 205 – 210.(in Chinese))
- [9] 孙浩, 徐金明, 吴红斌. 使用试验视频图像研究花岗岩中不同矿物成分的变化特征[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5) : 44 – 49.(SUN Hao, XU Jinming, WU Hongbin. An investigation of mineral composition changes on granite surface using video images from uniaxial compression test[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(5) : 44 – 49.(in Chinese))
- [10] CONSTANTINIDES G, RAVI CHANDRAN S, ULM F J, et al. Grid indentation analysis of composite microstructure and mechanics : principles and validation[J]. Material Science and Engineering, 2006, 43(12) : 189 – 202.
- [11] MILLER M, BOBKO C, VANDAMME M. Surface roughness criteria for cement paste nano-indentation[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(4) : 467 – 476.
- [12] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京 : 科学出版社, 2013 : 49 – 51.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock Mechanics and Engineering[M]. Beijing : Science Press, 2013 : 49 – 51.(in Chinese))
- [13] GUERY A C, CORMERY F, SHAO J F, et al. Application of a micromechanical model to cavity excavation analysis in argillite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5) : 905 – 917.
- [14] GUERY A C, CORMERY F, SHAO J F, et al. A comparative micromechanical analysis of the effective properties of a geomaterial : effect of mineralogical compositions[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(5) : 585 – 593.
- [15] HUANG Y, SHEN W Q, SHAO J F, et al. Multi-scale modeling of time-dependent behavior of claystones with a viscoplastic compressible porous matrix[J]. Mechanics of Materials, 2014, 79(1) : 25 – 34.
- [16] SHEN W Q, SHAO J F, KONDO D, et al. A micro-macro model for clayey rocks with a plastic compressible porous matrix[J]. International Journal of Plasticity, 2012, 36(9) : 64 – 85.
- [17] SHEN W Q, KONDO D, DORMIEUX L, et al. A closed-form three scale model for ductile rocks with a plastically compressible porous matrix[J]. Mechanics of Materials, 2013, 59(6) : 73 – 86.
- [18] MORI T, TANAKA K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions[J]. Acta Metallurgica, 1973, 21(7) : 597 – 629.
- [19] 谢仁海, 渠天祥, 钱光谟. 构造地质学[M]. 徐州 : 中国矿大出版社, 2007 : 25 – 37.(XIE Renhai, QU Tianxiang, QIAN Gangmo. Geological tectonics[M]. Xuzhou : China Mining and Technology Press, 2007 : 25 – 37.(in Chinese))
- [20] 赵素晶, 孙伟. 纳米压痕在水泥基材料中的应用与研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1) : 164 – 176.(ZHAO Sujing, SUN Wei. Application and research progress of nanoindentation in the field of cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(1) : 164 – 176.(in Chinese))