

基于矿物纳米压痕测试的岩石力学参数跨尺度估计方法

柳秀洋^{1,2}, 徐鼎平^{1*}, 江 权¹, 李邵军¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 岩石的力学特性是岩体工程设计与分析的关键依据。然而, 在高地应力引起的岩芯饼化、强节理化岩体以及地外岩体等特殊工况下, 往往难以获取符合试验要求的标准化圆柱岩石试样。为解决这一问题, 构建一套基于岩石矿物纳米压痕测试的岩石宏观力学参数综合预测体系。首先, 采用纳米压痕测试获取岩石组成矿物的细观力学参数, 包括硬度、弹性模量及 I 型断裂韧度; 进而采用广义均值法将矿物弹性模量升尺度为岩石宏观弹性模量, 其预测精度显著优于传统均匀化方法。其次, 基于压痕硬度与抗压强度在物理机制上的一致性, 建立考虑不同强度等级矿物影响的多元线性回归模型, 用于预测岩石单轴抗压强度, 并揭示低强度矿物对宏观强度的控制作用。进一步地, 结合断裂力学理论与等效加权模型, 构建基于矿物 I 型断裂韧度的岩石抗拉强度预测方法。该预测体系为难以取样条件下的岩石力学参数快速评估提供了有效途径, 并通过引入 Hoek-Brown 准则, 为实现“岩屑纳米压痕-岩芯-岩体”力学参数的跨尺度预测奠定方法基础。

关键词: 岩石力学; 纳米压痕; 硬度; 弹性模量; 断裂韧度; 单轴抗压强度; 抗拉强度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2026)05-1489-14

第一作者: 柳秀洋 (1997-), 现为博士后, 主要从事岩石细观力学性质及其表征方法方面的研究工作。E-mail: liuxiuyang20@mailsucas.ac.cn

***通信作者:** 徐鼎平 (1980-), 现任研究员, 主要从事深部岩体工程风险量化与数字孪生方面的研究工作。E-mail: dpxu@whrsm.ac.cn

Cross-scale estimation method for rock mechanical parameters based on mineral nanoindentation testing

LIU Xiuyang^{1,2}, XU Dingping^{1*}, JIANG Quan¹, LI Shaojun¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The mechanical properties of rocks are critically important for the design and analysis of rock mass engineering. However, under specific conditions—such as core diskings due to high in-situ stress, highly jointed rock masses, and extraterrestrial rock bodies—obtaining standard cylindrical rock specimens that meet conventional testing requirements can be challenging. To address this issue, this study develops an integrated prediction framework for estimating the macroscopic mechanical parameters of rocks based on nanoindentation tests of the constituent minerals. First, nanoindentation is employed to obtain meso-scale mechanical parameters of rock-forming minerals, including hardness, elastic modulus, and mode-I fracture toughness. The generalized

收稿日期: 2025-10-16; **修回日期:** 2025-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52279117, 52325905); 中国电力建设股份有限公司科技项目 (DJ-HXGG-2023-04)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52279117 and 52325905) and Technology Project of PowerChina (Grant No. DJ-HXGG-2023-04)

means method is then applied to upscale the mineral elastic moduli to the macroscopic elastic modulus of the rock, demonstrating significantly higher prediction accuracy than traditional homogenization approaches. Second, leveraging the physical consistency between indentation hardness and uniaxial compressive strength, a multiple linear regression model incorporating the influence of minerals with varying strength grades is established to predict the uniaxial compressive strength of rocks, revealing the dominant role of low-strength minerals in controlling macroscopic strength. Furthermore, by integrating fracture mechanics theory with an equivalent weighting model, a predictive model for the tensile strength of rocks is formulated based on the mode-I fracture toughness of minerals. This framework provides an effective approach for the rapid estimation of rock mechanical parameters under sampling-constrained conditions and, through the introduction of the Hoek-Brown criterion, establishes a methodological foundation for achieving cross-scale predictions of mechanical parameters from “rock cuttings nanoindentation-rock core-rock mass”.

Key words: rock mechanics; nanoindentation; hardness; elastic modulus; fracture toughness; uniaxial compressive strength; tensile strength

First author: LIU Xiuyang (1997 –), postdoctoral research fellow, is engaged in research on the mesoscopic mechanical properties of rocks and their characterization methods. E-mail: liuxiuyang20@mails.ucas.ac.cn

***Corresponding author:** XU Dingping (1980 –), research fellow, is engaged in research on risk quantification and digital twins in deep rock mass engineering. E-mail: dpxu@whrsm.ac.cn

1 引言

准确获取岩石及岩体力学参数(如弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度),是地下工程稳定性分析与设计的基础^[1]。然而,传统方法通过室内宏观力学试验(如单轴压缩、巴西劈裂)获取这些参数时,需制备符合国际岩石力学学会建议标准的圆柱形岩石试样,而钻探、切割等制样过程常面临挑战大、耗时长、成本高的问题^[2]。这在具有显著岩芯饼化的高地应力岩体、强节理化岩体及地外岩体等特殊条件下尤为突出。此种“样本困境”促使学者们积极探索各类参数升尺度方法。这些方法可在无需大量试验、弱化样本尺寸效应的前提下,实现对弹性模量及单轴抗压强度等参数的估算。当前研究主要沿3条路径推进:经验回归模型、均匀化理论及数据驱动算法。

经验回归模型是最早发展且应用最为广泛的升尺度方法。其核心思想是建立易于获取的间接物理力学指标与目标参数之间的统计相关性。例如,通过点荷载强度、声波传播特性、地层孔隙度、施密特锤回弹硬度及巴西劈裂强度等物理力学指标估算单轴抗压强度^[3-5]。均匀化理论则代表着一种物理机制驱动的升尺度方法,尤其适用于从微观/细观组分特性推演宏观岩石力学行为,其理论基础源于复合材料力学与多尺度均匀化理论^[6-7]。其核心在于如何

利用离散的、代表矿物相或微小区域的力学数据(如通过纳米压痕技术获取的单矿物相或微尺度区域的弹性模量),有效推导宏观岩块的力学参量^[8]。数据驱动算法代表了升尺度方法的最新前沿,其核心在于利用各类智能算法,直接从多源数据中挖掘岩石力学参数与其影响因素之间复杂的、非线性映射关系,无需显式物理方程或强假设^[9-10]。尽管数据驱动算法具备强大的特征自动提取和复杂模式识别能力,且输入数据源丰富,但复杂数据驱动模型常被视为“黑箱”,其预测逻辑难以理解,可能给出物理上不合理的预测结果。

基于矿物细观力学特性的跨尺度预测方法,正逐步成为实现“无岩样化”参数估计的研究热点。其核心在于通过矿物相的力学响应预测岩石宏观力学行为,为特殊条件下原位岩体参数的“无岩样化”预测提供了新思路^[11]。随着微纳米力学测试技术的发展,纳米压痕技术为岩石细观力学参数的定量表征提供了新途径,通过矿物尺度的弹性模量、硬度及断裂韧性测试,可获取非均质岩石的细观力学参数。这种无损检测技术可在小尺寸试样上进行多次测量。相较于传统室内测试,纳米压痕对试样尺寸和形状的限制极小,单次加卸载循环可在几分钟内完成,且可通过预设程序实现单个试样表面的自动化批量测试。总体而言,纳米压痕技术在表征岩石矿物力学特性、实现岩石力学特性快速评估方面至关重要。

在基于细观力学参数的升尺度预测方面, 已有研究进行了初步探索。例如, 张帆等^[12]最早利用纳米压痕试验获取花岗岩组成矿物的细观力学参数, 并采用基于均匀化理论的 Mori-Tanaka 方法实现了花岗岩宏观弹性模量的预测, 但其研究未涉及岩石强度参数的预测。G. C. Komadja 等^[2]通过网格纳米压痕测试与统计反卷积技术, 成功识别了花岗岩、石灰岩和大理岩中主要矿物的纳米力学参数, 并通过线性拟合建立了岩石单轴抗压强度与矿物弹性模量和硬度的关系, 验证了基于矿物细观力学特性预测宏观强度的可行性, 但其预测模型高度依赖于特定岩性的回归系数, 缺乏其他岩石纳米压痕数据对其模型的验证, 且缺乏对抗拉强度的有效预测。总体而言, 现有研究或侧重于单一细观力学参数(如弹性模量)与宏观参数的关联, 未能形成一个能够同时预测岩石弹性模量、单轴抗压强度与抗拉强度的系统性方法, 也未能建立与岩体参数的关联。这一局限性凸显了本文研究的必要性。

鉴于此, 本文基于岩石矿物纳米压痕测试数据(弹性模量、硬度及 I 型断裂韧度), 构建了一套完整的岩石力学参数升尺度预测体系, 实现了从矿物细观力学行为到岩石宏观弹性模量、单轴抗压强度与抗拉强度的系统预测。进一步地, 通过引入 Hoek-Brown 准则与地质强度指标(GSI), 建立了“岩屑纳米压痕-岩芯-岩体”跨尺度关联体系, 为深地、强节理化岩体及地外取样等特殊工况下的岩石/体力学参数快速评估提供了新的实用途径。

2 基本原理、方法

2.1 纳米压痕测试原理

纳米压痕技术以接触力学理论为基础, 使用已知几何形状和力学参数的金刚石压头, 以微牛或毫牛为单位的荷载压入待测试样表面^[13], 如图 1 所示, 其中, h_m 为最大压入深度。纳米压痕仪器在单次的加载-保载-卸载过程中, 自动测量施加的荷载和压入深度, 并通过压入力学模型识别出试样的硬度、弹性模量等力学参数^[14]。

试样的压痕硬度 H 可根据下式计算:

$$H = P_m / A_c \quad (1)$$

式中: P_m 为最大压痕荷载; A_c 为压头与试样接触区域的投影面积, 可根据接触深度 h_c 计算得到。

试样的弹性模量 E 则与压头的弹性模量 E_i 和压

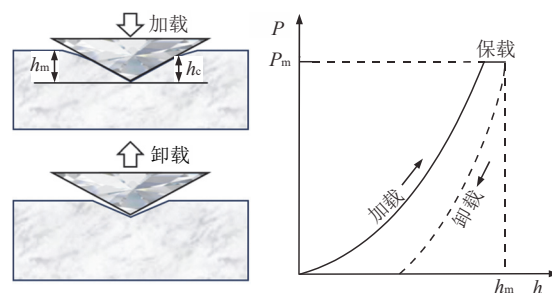


图 1 纳米压痕测试原理

Fig.1 Principle of nanoindentation test

入折合模量相关 E_r , 其公式如下:

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

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

式中: β 为一个与压头几何形状有关的常数; E_i , ν_i 分别为压头材料的弹性模量和泊松比; E , ν 分别为被测试样品的弹性模量和泊松比; S 为弹性接触刚度, 通常采用最小二乘法拟合卸载曲线顶部的 25%~50% 来获取。

采用纳米压痕测试计算材料的 I 型断裂韧度 K_{IC} 的方法有压痕裂纹形貌观测法和压痕能量耗散法 2 种^[15]。目前, 常采用压痕能量耗散法来计算材料的断裂韧度。该方法的核心在于从荷载-压痕深度曲线中提取能量参数, 并结合接触力学模型计算试样的断裂韧度^[16]。

本试验采用双江口水电站地下厂房花岗岩, 试验方案与结果可参阅徐鼎平等^[13]的研究成果。

2.2 矿物力学参数识别方法

纳米压痕试验虽可获取岩石细观力学参数, 但无法直接识别压痕点所对应的矿物种类。为解决该问题, 通常需借助统计学与矿物学分析手段, 将力学测试结果与矿物相进行关联。目前常用的方法主要包括基于统计分析的统计纳米压痕技术与结合化学成分分析的相定位纳米压痕技术, 以下将分别予以简要介绍。

2.2.1 基于统计纳米压痕测试识别矿物力学参数

统计网格纳米压痕试验已广泛应用于识别岩石(如页岩、泥岩和砂岩)中不同矿物的力学参数。该技术通过在岩石试样表面预设区域进行大量网格纳米压痕测试, 获取力学响应数据, 并借助数学统计模型对数据进行反卷积分析, 从而识别出各矿物相的力学特性及其概率分布。岩石等非均质材料的纳米压痕测试数据通常呈现出多峰分布的特征, 每个

峰往往对应一种矿物相或微结构。可采用无监督聚类算法对纳米压痕测试数据进行分类,常用方法包括高斯混合模型和 K 均值聚类分析法,其基本原理如下:

(1) 高斯混合模型是一种基于概率的软聚类算法。它假设从纳米压痕试验中获得的各矿物相的力学参数数据服从高斯分布^[17]。因此,整个测试区域获得的统计分布即为各矿物相高斯分布的叠加。第 i 相的概率密度函数 $f_i(\mathbf{x})$ 可表示为

$$f_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma_i|}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{x}-\mu_i)^T(\mathbf{x}-\mu_i)}{2\Sigma_i}\right] \quad (4)$$

式中: μ_i , Σ_i 分别为第 i 相力学参数的均值向量和协方差矩阵。

(2) K 均值聚类方法一种基于欧氏距离相似性度量的迭代聚类算法,可用于对纳米压痕试验中获取的荷载-压痕深度曲线数据进行自动分类。该方法通过设定合适的聚类数目 K ,并迭代计算确定各类别的中心点(均值),从而实现对矿物力学特性的有效聚类识别^[18]。其目标是 minimized 评价指标 J ,即各类内部误差平方和的总和:

$$U = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (5)$$

2.2.2 基于相定位纳米压痕测试识别矿物力学参数

相定位纳米压痕技术通过结合扫描电子显微镜与能谱分析(SEM-EDS),在压痕测试区域同步获取化学成分分布信息,进而根据特征化学元素的富集程度识别矿物种类,并将其与对应压痕点的力学参数进行匹配。该方法能够实现对岩石中不同矿物相的精准定位与力学性能测定,避免了统计方法因多矿物相力学响应叠加或随机采样偏差导致的参数模糊化问题,规避因矿物力学特性相近导致的误判风险,具体操作可参阅 X. Y. Liu 等^[19]的研究工作。

2.3 升尺度方法

2.3.1 岩石弹性模量估计的升尺度方法

广义均值方法是一种基于数学平均的半经验模型,由 S. C. Ji 等^[20]最早系统性地提出并将其应用于多相复合材料等效弹性模量的预测。通过引入微观结构指数 j ,广义均值方法将材料的有效性能与各组分性能、体积分数及微观结构特征相关联,避免了复杂的微观力学分析,为预测多相复合材料的弹性模量提供了简洁高效的工具^[20]。该方法在陶瓷、合金以及树脂等材料的力学性能预测方面应用广泛,现将其引入岩石力学性能评估。该方法操作便

捷,其以单一参数 j 为核心,并能够灵活捕捉微观结构特征对材料力学性能的影响。通过整合各组分的体积分数 f_i 与弹性模量 E_i 实现快速计算,适用于工程中需快速评估材料力学性能的场景。其公式如下:

$$E = \left\{ \sum_{i=1}^n (f_i E_i^j) \right\}^{1/j} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \quad (7)$$

j 值反映材料的微观特征,不同材料对应不同的微观结构指数 j 。当微观结构指数 j 分别取 1, -1, $+\infty$ 和 $-\infty$ 时,广义均值公式将分别对应于材料性能的算术平均值、调和平均值、最大值和最小值。对于多晶岩石(例如花岗岩),当 j 取 $-\infty$ 时预测的弹性模量与单轴压缩试验结果较为吻合^[21]。

2.3.2 岩石单轴抗压强度估计的升尺度方法

岩石矿物的纳米压痕硬度 H 与单轴抗压强度 σ_c 均反映材料在外部压缩载荷作用下的抵抗破坏能力:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= F_m / A \\ H &= P_m / A_c \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: F_m 和 A 分别为岩石试样的最大轴向力和受压横截面积。压痕硬度与抗压强度的物理本质,均与矿物颗粒强度、界面胶结强度、微观结构致密性以及内部缺陷分布密切相关。纳米压痕硬度通过压头在微细观尺度下压入矿物表面,从而量化材料抵抗局部塑性变形的能力。单轴抗压强度则通过宏观压缩试验测定岩石整体承载极限。两者均受控于岩石的矿物组成(高石英含量通常能提升岩石硬度和抗压强度)、晶体结构完整性(如孔隙率低、微裂纹少可增强两者性能)以及微细观力学特性(如颗粒间胶结质量)。例如,致密花岗岩由于矿物颗粒紧密嵌合,其压痕硬度与抗压强度均显著高于多孔砂岩。

从式(8)可以看出,岩石的单轴抗压强度与矿物硬度具有相同的数学形式。此外,由于矿物是岩石的基本组成单元,岩石的单轴抗压强度受其组成矿物的强度和体积分数影响。因此,建立岩石单轴抗压强度与组成矿物的硬度及体积分数之间的关联是合理的。在建立这种关系前,需先根据矿物的微观强度,将其分为高强度矿物、中强度矿物和低强度矿物三类,随后进行多元线性回归,形式如下所示:

$$\sigma_c = a_1(f_h H_h) + a_2(f_m H_m) + a_3(f_l H_l) \quad (9)$$

式中: f_h , f_m 和 f_l 分别为高强度、中强度和低强

度矿物的体积分数； H_h ， H_m 和 H_l 分别为高强度、中强度和低强度矿物的压痕硬度； a_1 ， a_2 和 a_3 均为拟合系数，也称矿物硬度对岩石强度的贡献系数。

2.3.3 岩石抗拉强度估计的升尺度方法

岩石的 I 型断裂韧度 K_{IC} 与抗拉强度 σ_t 之间的关系源于它们在材料破坏机制中的内在联系，由于 I 型断裂(张开型)涉及拉伸应力导致的岩石分离，理论上 I 型断裂韧度应与抗拉强度相关^[22-23]。从理论层面看，Griffith 裂纹理论揭示了这种关系的核心机制：当岩石内部存在初始裂纹时，其临界破坏应力 $\sigma_{critical}$ 与裂纹尺寸 α 的平方根成反比，即 $K_{IC} = \sigma_{critical} \sqrt{\pi \alpha}$ 。若假设抗拉强度 σ_t 接近无缺陷材料的理论强度，则两者通过裂纹尺度间接关联 ($K_{IC} \propto \sigma_t \sqrt{\alpha}$)：抗拉强度 σ_t 高的岩石往往具有更小的原生缺陷或更致密的微观结构，这使得裂纹扩展需要更高的能量输入，从而提升断裂韧度 K_{IC} 。I 型断裂韧度与抗拉强度的相关性进一步通过大量的试验规律得以验证。研究表明，I 型断裂韧度 K_{IC} 与抗拉强度 σ_t 常呈近似线性正相关^[23]，如图 2 所示。在拉伸试验中，材料失效往往开始于最大缺陷处的应力集中，当局部应力强度因子达到 K_{IC} 时，微裂纹迅速扩展导致试样的整体破坏。此时，抗拉强度作为宏观表现参数，实际上隐含了缺陷尺寸与断裂韧度之间的动态平衡关系。

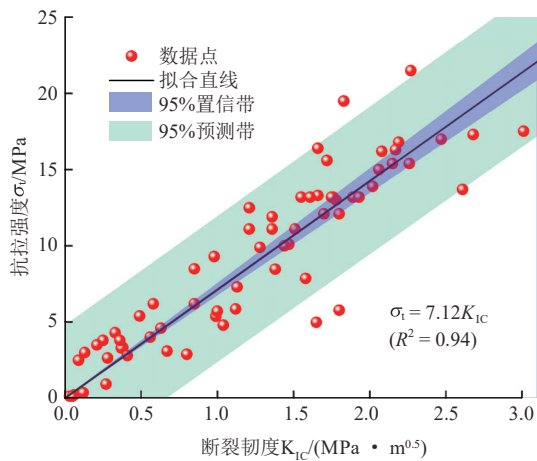


图 2 岩石断裂韧度与抗拉强度的关系^[23]
Fig.2 Relationship between fracture toughness and tensile strength of rocks^[23]

基于矿物 I 型断裂韧度的岩石抗拉强度预测过程主要分 2 步进行，首先是参照预测复合材料弹性模量的 Voigt 模型^[24]，根据岩石的组成矿物的 I 型断裂韧度及对应的体积分数计算等效 I 型断裂韧度 K_{IC}^{eq} ，见式(8)。然后根据等效 I 型断裂韧度和抗拉

强度进行线性回归得到预测公式如下所示：

$$K_{IC}^{eq} = \sum_{i=1}^n (f_i K_{IC_i}) \tag{10}$$

$$\sigma_t = k_1 K_{IC}^{eq} + k_2 \tag{11}$$

式中： f_i ， K_{IC_i} 分别为第 i 种矿物的体积分数和 I 型断裂韧度； k_1 ， k_2 均为拟合系数； n 为矿物种数。

3 基于纳米压痕测试的岩石宏观力学参数预测

3.1 基于矿物弹性模量的岩石弹性模量预测

图 3 列出 2 种花岗岩的弹性模量随微观结构指数 j 的变化^[21]，当微观结构指数 j 趋近于 $-\infty$ (< -150 过后，弹性模量几乎不再变化)，其预测的弹性模量与单轴压缩实测值较为接近，表 1 列出了基于广义均值法和单轴压缩试验得到的 6 种花岗岩的弹性模量对比数据^[21]，可以看出，6 组数据的预测误差均 $< 15\%$ ，表明广义均值法能够较精准地预测花岗岩的宏观弹性模量。

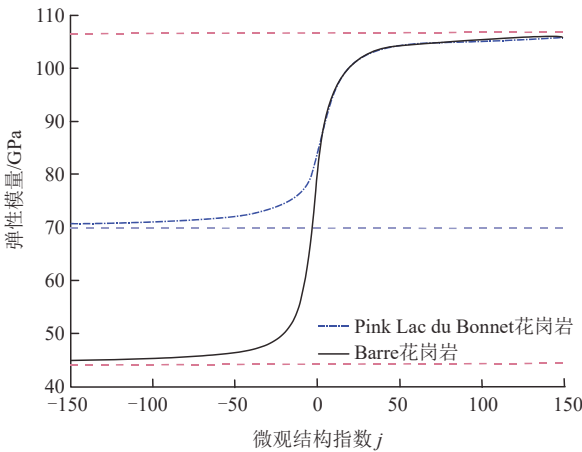


图 3 弹性模量随微观结构指数 j 的变化^[21]
Fig.3 Variation of elastic moduli with microstructural exponent j ^[21]

表 1 基于广义均值法和单轴压缩试验得到的花岗岩的弹性模量^[21]

花岗岩名称 (granite name)	弹性模量(elastic modulus)/GPa		误差 (error)/ %
	广义均值法(generalized means method)	单轴压缩试验(uniaxial compression test)	
Pink lac du Bonnet	70.6	74.2	4.8
Barre	44.8	46.1	2.8
Kapidad Peninsula	45.0	51.2	12.0
Tonalite	44.9	48.6	7.6
Catalca	45.1	45.1	0.0
Stripa	70.3	69.1	1.3

为进一步验证广义均值法在预测岩石弹性模量方面优越性,通过查阅文献,共收集了 16 组岩石的物理力学参数数据^[12, 19, 21, 25-32],包括基于纳米压痕测试获取的组成矿物的弹性模量和硬度值、体积分数以及基于单轴压缩的岩石的弹性模量和单轴抗压强度,如表 2 所示。其中包含 10 组火成岩数据(全部花岗岩,以 G 开头编号)和 6 组沉积岩数据(1 组泥岩(以 M 开头编号)和 5 组砂岩(以 S 开头编号))。

表 2 花岗岩的矿物组成、等效 I 型断裂韧度以及抗拉强度
Table 2 Mineral composition, equivalent fracture toughness and tensile strength of granites

文献来源 (references source)	矿物种类 (mineral type)	体积分数 (volume fraction)/%	等效 I 型断裂韧度 (equivalent mode I fracture toughness)/(MPa · m ^{0.5})	岩石抗拉强度 (rock tensile strength)/MPa
X. Huang 等 ^[33]	石英	25	4.20	8.2
	钾长石	40		
	斜长石	30		
	黑云母	5		
H. X. Lan 等 ^[34]	石英	30	4.59	11.4
	钾长石	40		
	斜长石	30		
	黑云母	10		
左建平 等 ^[35-36]	石英	24.05	3.69	5.76
	钾长石	16.95		
	斜长石	55.65		
	云母	3.35		
毛伟泽 ^[37]	石英	40	4.20	7.87
	长石	50		
	云母	10		
	石英	45.6		
李 春 ^[38]	钾长石	27.9	4.70	11.6
	斜长石	28.0		
	云母	6.5		
	石英	21.7		
Z. Heng 等 ^[39]	钠长石	46.4	4.04	8.1
	正长石	31		
	黑云母	0.9		
	石英	25.2		
M. Lei 等 ^[40]	长石	61.6	3.64	5.69
	云母	13.2		
	石英	39		
	钾长石	37		
C. E. C. Inga 等 ^[41]	斜长石	22	4.51	11.28
	黑云母	2		
	石英	20		
	钠长石	28		
S. Sha 等 ^[42]	斜长石	40	4.19	10.49
	云母	12		
	石英	34.7		
	碱性长石	16.2		
唐欣薇 等 ^[43]	斜长石	38.4	3.75	6.1
	云母	10.7		

续表

参考文献 (references)	矿物种类 (mineral type)	体积分数 (volume fraction)/%	等效 I 型断裂韧度 (equivalent mode I fracture toughness)/(MPa · m ^{0.5})	岩石抗拉强度 (rock tensile strength)/MPa
B. Shu 等 ^[44]	石英	24	4.10	9.2
	钾长石	23		
	斜长石	27		
	黑云母	14		
	辉石及其他	12		
胡训健等 ^[45]	石英	30	4.32	8.4
	钾长石	40		
	斜长石	20		
	黑云母	10		
李 博等 ^[46]	石英	35.7	3.99	7.4
	正长石	35.9		
	斜长石	25.8		
	黑云母	2.6		
H. Hofmann 等 ^[47]	石英	44	4.04	7
	正长石	21		
	斜长石	24		
O. K. Mahabadi 等 ^[26]	云母	11	4.00	7.36
	石英	22		
	长石	73		
	黑云母	5		
M. Saadat 和 A. Taheri ^[48]	石英	30	4.06	8.9
	长石	60		
	云母	10		
J. Zhou 等 ^[49]	石英	27.6	3.84	7.2
	碱性长石	44.7		
	斜长石	13.8		
	云母	14		

基于式(4)以及表 2 中各组成矿物的物理力学参数,采用广义均值法估算出岩石的宏观弹性模量,并将预测结果分别与传统的基于均匀化理论的 Mori-Tanaka 法^[13]计算结果以及单轴压缩试验实测值进行了系统对比。对比结果(见表 3 和图 4)表明,在全部 16 组数据中,除花岗岩 G10、砂岩 S1 和 S3 外,广义均值法的预测误差均控制在 30%以内,验证了该方法基于矿物弹性模量及体积分数有效估算岩石宏观弹性模量的能力。进一步分析显示,广义均值法对花岗岩的预测精度尤为突出,10 组花岗岩样本的平均预测误差仅为 11.8%,其预测效果优于在泥岩和砂岩中的表现。需要说明的是,图 4 中“误差 1”与“误差 2”分别代表广义均值法与 Mori-Tanaka 法相对于单轴压缩试验结果的误差。整体误

差对比可见(见图 4(b)),广义均值法的预测性能显著优于 Mori-Tanaka 法:超过 81.25%的广义均值预测值误差低于 30%,其中半数以上样本的误差更低于 15%,体现出良好的工程适用性与预测稳定性。

3.2 基于矿物硬度的岩石单轴抗压强度预测

利用多元线性回归技术,采用表 3 中岩石组成矿物的物理力学试验数据,建立了描述岩石单轴抗压强度 σ_c 与矿物的压痕硬度及体积分数关系的经验方程分析如下所示:

$$\sigma_c = 23.27f_h H_h + 26.96f_m H_m + 52.05f_l H_l$$
$$(R^2 = 0.996) \tag{12}$$

$$\sigma_c = 22.44f_h H_h + 28.62f_m H_m + 44.73f_l H_l$$
$$(R^2 = 0.998) \tag{13}$$

表 3 岩石及其组成矿物的物理力学参数
Table 3 Physical and mechanical parameters of rocks and their constituent minerals

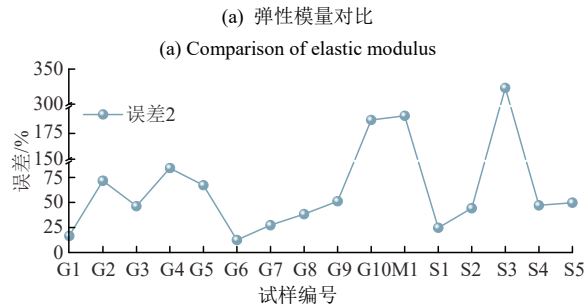
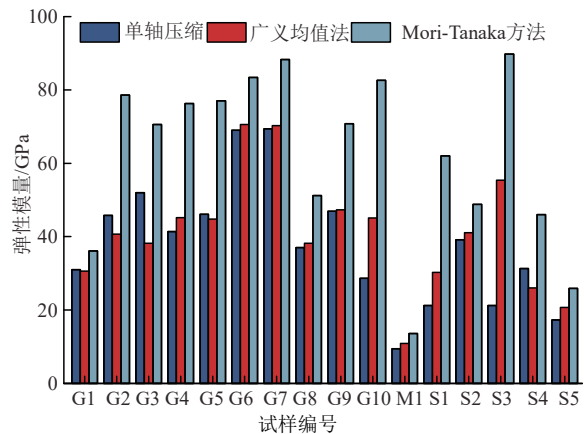
岩石种类 (rock type)	编号 (No.)	矿物种类 (mineral type)	纳米压痕(nanoindentation)		f_i /%	单轴压缩试验(uniaxial compression test)	
			硬度 (hardness)/GPa	弹性模量(elastic modulus)/GPa		抗压强度(compressive strength)/MPa	弹性模量(elastic modulus)/GPa
火成岩	G1	石英	10.9	86.1	9	90	31.0
		长石	2.6	35.9	66		
		云母	1.83	30.2	25		
	G2	石英	13.85	97.4	58	270	45.8
		长石	8.12	64.2	38		
		云母	1.06	39.3	4		
	G3	石英	14.5	99.3	22	147.3	52.0
		长石	3.2	75.6	73		
		黑云母	1.8	37.1	5		
	G4	石英	14.5	106.3	40	171.1	41.4
		钾长石	11.4	100.6	7		
		斜长石	3.2	67.2	40		
	G5	黑云母	1.8	45.2	13	180	46.1
		石英	9.01	106.7	31.9		
		微斜长石	6.54	76.7	17.8		
	G6	钠长石	5.45	69.9	36.5	200	74.2
		黑云母	0.94	44.2	10.8		
		白云母	5.14	79.3	3		
	G7	石英	9.01	106.7	30	220	69.4
		微斜长石	6.54	76.7	40		
		钠长石	5.45	69.9	20		
	G8	白云母	5.14	79.3	10	132	37.0
		石英	14.5	95.7	44		
		钾长石	11.4	73.9	12		
	G9	斜长石	3.2	88.1	39	234.5	46.9
		黑云母	1.8	68.3	5		
		石英	10.24	93.9	34		
	G10	长石	2.96	38	53	221.4	28.7
		云母	1.93	47.8	13		
		石英	13.85	96.8	30		
沉积岩	M1	长石	8.12	69.5	58	40.9	9.4
		黑云母	1.06	46.4	12		
		角闪石	12.3	155	17		
		石英	12.6	110.9	8		
		长石	10.1	94.8	53	221.4	28.7
		云母	1.5	44.4	22		
		石英、白云石	3.38	33.46	10		
		方解石、白云母	1.2	18.16	44		
		黏土	0.59	10.84	46	40.9	9.4

续表		纳米压痕(nanoindentation)			单轴压缩试验(uniaxial compression test)	
岩石种类 (rock type)	编号 (No.)	矿物种类 (mineral type)			$f_l / \%$	
			硬度(hardness)/GPa	弹性模量(elastic modulus)/GPa		抗压强度(compressive strength)/MPa
沉积岩	S1	石英	14	107.5	46	207.5
		长石	9	80	14	
		方解石	2	72.5	6	
		黏土	1.5	30	34	
	S2	石英、黄铁矿	7.5	69.29	36.7	113
		长石、方解石	1.6	54.24	23.8	
		黏土	1.09	40.74	39.5	
	S3	石英	11.79	101.6	56.4	207.5
		白云石	6.95	125.04	16	
		方解石	3.83	64.61	20.9	
		黏土	2.13	53.93	6.7	
	S4	石英、黄铁矿、白云石	7.65	85.2	49.7	131.2
		长石、方解石	2.69	56.49	15.3	
		黏土	0.83	25.7	35	
	S5	石英、黄铁矿、白云石	9.07	71.7	13	64.5
		长石、方解石	3.28	36.6	35	
		黏土	0.94	20.6	52	

$$\sigma_c = 27.81f_h H_h + 4.05f_m H_m + 65.98f_l H_l$$
$$(R^2 = 0.997)$$

式(12)为根据表 3 所列的所有岩石数据拟合而成, 式(13)为火成岩(即花岗岩)的数据拟合而成, 式(14)为沉积岩的数据拟合而成。

通过分析各方程的拟合优度指标(R^2 均超过



(b) 误差对比

(b) Comparison of errors

图 4 基于广义均值法和 Mori-Tanaka 法预测的弹性模量与单轴压缩试验的对比

Fig.4 Comparison of elastic moduli predicted by the Generalized Means method and Mori-Tanaka method with uniaxial compression test results

0.995), 表明上述拟合方程均具有优异的拟合效果。在所有岩石类型中, 低强度矿物的回归系数最高, 其次是中强度矿物, 而高强度矿物的回归系数最低。这表明低强度矿物的压痕硬度对岩石单轴抗压强度的贡献最为显著。实测值与拟合值的散点关系(见图 5)表明, 所有拟合值均紧密分布在 95%置信区间内, 这验证了该多元线性拟合方程具有良好的预测能力。此外, 火成岩(花岗岩)的拟合精度优于沉积岩(页岩和泥岩)。

3.3 基于矿物 I 型断裂韧度的岩石抗拉强度预测

表 2 详细列出了 17 种花岗岩的组成矿物体积分数、等效 I 型断裂韧度以及抗拉强度数据。其中,

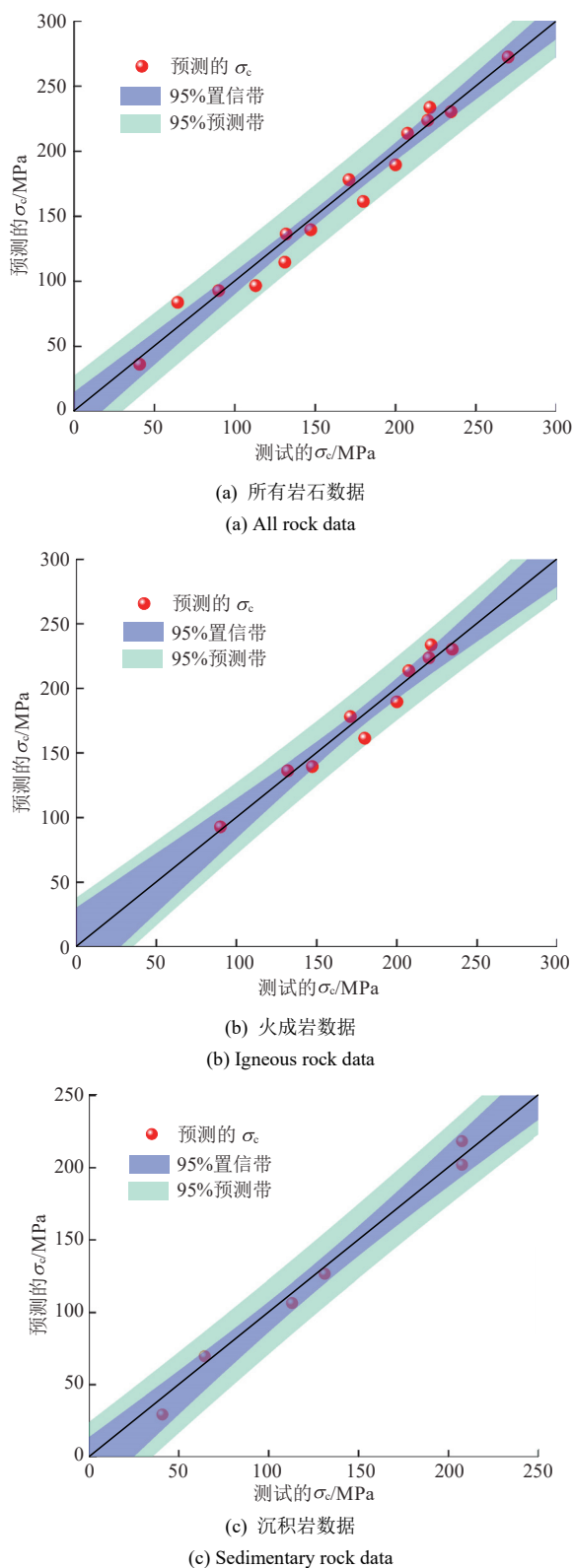


图5 单轴抗压强度的测量值与预测值的关系

Fig.5 Relationship between measured and predicted values of uniaxial compressive strength

等效 I 型断裂韧度是根据文献中矿物的断裂韧度或本试验测得的矿物 I 型断裂韧度计算得出的。由于其他岩石组成矿物的体积分数及对应的 I 型断裂韧度数据在已有文献中鲜有提及, 难以收集到具有较

高代表性的数据, 因此后续得到的抗拉强度预测公式主要适用于花岗岩。

图 6 展示了基于表 2 数据拟合得到的岩石组成矿物的等效 I 型断裂韧度与岩石抗拉强度的关系。可以看到, 所有数据点均落在 95% 的预测带区间, 拟合优度 R^2 达到 0.88, 拟合效果良好。图 7 展示了预测的抗拉强度值的残差分布情况, 数据点的残差分布在 ± 1 MPa 范围内, 残差的平均绝对误差仅为 0.51 MPa, 平均绝对百分比误差为 6.1%, 这进一步印证了该模型的预测精度。

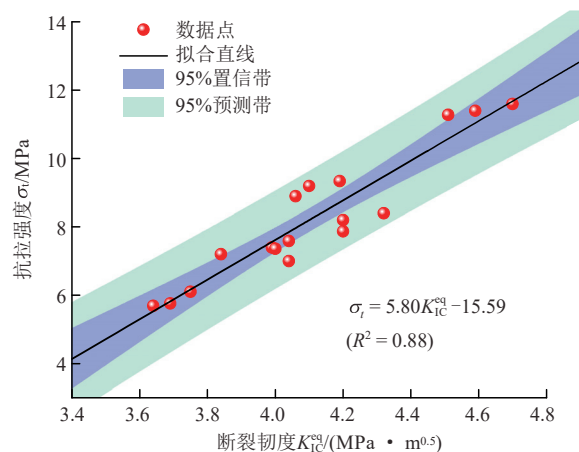


图6 基于花岗岩组成矿物的等效 I 型断裂韧度与宏观抗拉强度的关系

Fig.6 Relationship between the equivalent fracture toughness and macroscopic tensile strength based on the constituent minerals of granites

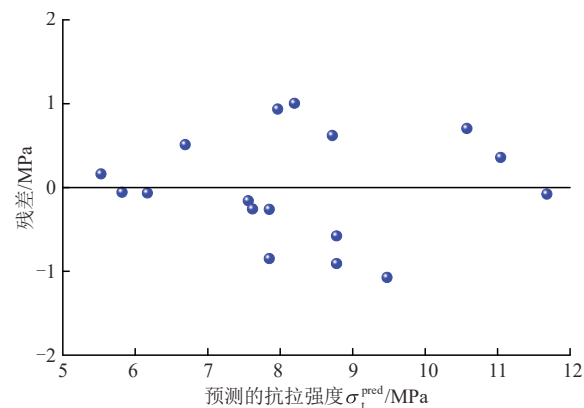


图7 预测的抗拉强度值的残差分布

Fig.7 Residual distribution of predicted tensile strength values

4 讨论

4.1 “岩屑纳米压痕-岩芯-岩体”力学参数关联体系

通过上述研究, 可以基于矿物纳米压痕试验结果, 通过升尺度方法估计标准岩样(岩芯)力学参数(弹性模量、单轴抗压强度、抗拉强度)。若进一步

结合升尺度方法, 基于这些估计的岩石力学参数预测岩体力学参数, 则可构建“岩屑纳米压痕-岩芯-岩体”力学参数跨尺度全链条关联体系(见图 8), 从而有效解决深地/深空工程中因样本稀缺导致的岩体力学参数评估难题。具体而言, 基于矿物纳米压痕试验估计的岩样力学参数可结合 Hoek-Brown 准则, 实现岩体力学参数的预测。

具体实施路径如下(见图 8): 首先, 基于纳米压痕试验获取矿物细观力学参数(弹性模量、硬度与 I 型断裂韧度), 并采用统计或相定位方法进行矿物识别与参数归属; 进而分别建立三大关键宏观参数的升尺度预测模型: 基于广义均值法由矿物弹性模量预测岩石宏观弹性模量, 基于矿物硬度分级回归模型预测单轴抗压强度, 以及结合 Voigt 模型与断裂韧度线性回归预测岩石抗拉强度。在获得可靠的岩石宏观力学参数后, 可将其作为输入, 进一步结合 Hoek-Brown 准则和地质强度指标(GSI), 估算岩体的强度与变形参数。

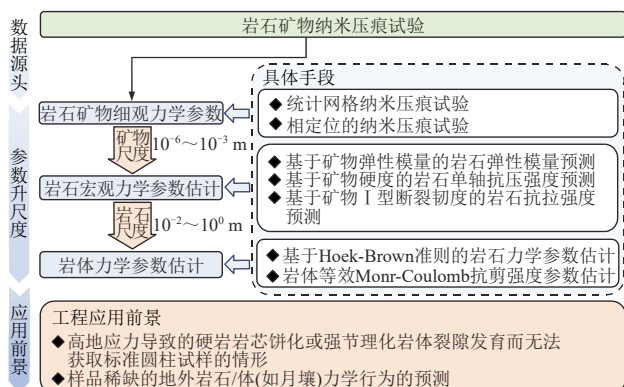


图 8 基于矿物纳米压痕测试的岩石宏观力学参数估计框架

Fig.8 Framework for estimating macroscopic mechanical parameters of rock based on mineral nanoindentation testing

Hoek-Brown 准则的通用形式^[50]为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (15)$$

式中: σ_1 , σ_3 分别为最大和最小主应力。岩体参数 m_b , s 和 a 可通过下式与现场地质调查确定的 GSI 值、岩石材料常数 m_i 和爆破扰动因子 D 建立联系:

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \exp[(GSI - 100) / (28 - 14D)] \\ s &= \exp[(GSI - 100) / (9 - 3D)] \\ a &= 1/2 + 1/6(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

通过预测体系获得可靠的单轴抗压强度 σ_c 后, 基于 Hoek-Brown 准则和 GSI 系统预测岩体的力学

行为, 岩体的单轴抗压强度 σ_{cm} 和抗拉强度 σ_{tm} 可表示如下:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c s^a \quad (17)$$

$$\sigma_{tm} = -s\sigma_c / m_b \quad (18)$$

岩体的弹性模量 E_m 则可根据预测的岩石弹性模量 E_r 并参考以下经验公式进行估算:

$$E_m = E_r \left\{ 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + \exp[(60 + 15D - GSI) / 11]} \right\} \quad (19)$$

此外, 为便于工程中采用 Mohr-Coulomb 强度准则进行稳定性分析, 可在特定正应力范围(例如岩体抗拉强度 $\sigma_{tm} \sim \sigma_c / 4$)内将 Hoek-Brown 准则线性化, 推导岩体的等效内摩擦角 φ_m 和黏聚力 c_m 。具体计算可参照 E. Hoek 等^[51]提出的经验方法:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_m &= \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \\ c_m &= \left\{ \sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1} / \right. \\ &\quad \left. \{ (1+a)(2+a) \{ 1 + [6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}] / \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (1+a)(2+a) \}^{1/2} \} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: σ'_{3n} 为破坏时的最小主应力。

4.2 工程应用前景与展望

在深部高地应力导致的岩芯饼化或裂隙极为发育的强节理化岩体中, 标准试样难以获取, 本方法可基于少量岩屑或小尺寸岩块实现对关键力学参数的快速评估, 然后结合现场地质调查确定的 GSI 指标, 为围岩稳定性分析提供可靠依据。此外, 在行星地质勘探、放射性废物地质处置库选址等样品极其珍贵或获取成本极高的特殊领域, 纳米压痕技术凭借其样品需求小、近乎无损的特点, 使得“无岩样化”或“无损化”的力学评估成为可能。

尽管该方法前景广阔, 但其预测模型在各类岩石中的适用性仍存在局限。为此, 亟需构建覆盖岩浆岩、沉积岩和变质岩的普适性验证体系。具体而言, 应在数据层面系统整合全球范围内的岩石纳米压痕测试结果, 并同步开展针对三大岩类的大规模纳米压痕测试, 构建具有广泛代表性的岩石纳米压痕数据集。基于这一数据集, 可对现有岩石力学参数预测模型进行全面验证与迭代优化, 从而显著提升其跨岩类的预测精度与工程适用性。

5 结 论

本文构建了一套基于岩石矿物纳米压痕测试数

据的宏观力学参数预测体系,为解决高地应力岩芯饼化、强节理化岩体及珍贵地外样品等“取样难”工况下的力学参数评估问题提供了新途径。主要结论如下:

(1) 采用广义均值法对矿物弹性模量进行升尺度预测,以获取岩石宏观弹性模量,其预测精度显著高于传统均匀化方法,在花岗岩中表现尤为突出,平均误差仅为 11.8%。

(2) 通过多元线性回归模型,结合矿物压痕硬度与单轴抗压强度的物理机制一致性,考虑了高、中、低强度矿物分类,研究发现低强度矿物对岩石宏观抗压强度的影响最为显著。

(3) 结合断裂力学理论与等效加权模型,构建了基于矿物 I 型断裂韧度的岩石抗拉强度预测模型,残差平均绝对误差为 0.51 MPa,平均绝对百分比误差为 6.1%,拟合效果良好。

本文提出的“岩屑纳米压痕-岩芯-岩体”力学参数跨尺度预测全链条体系,具有显著的工程应用价值,能够为深部工程、节理化岩体及地外岩体等特殊条件下的岩石/体力学参数的快速估计提供支持。

参考文献(References):

- [1] ALADEJARE A E. Evaluation of empirical estimation of uniaxial compressive strength of rock using measurements from index and physical tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(2): 256 - 268.
- [2] KOMADJA G C, STANISLAS T T, MUNGANYINKA P, et al. New approach for assessing uniaxial compressive strength of rocks using measurement from nanoindentation experiments[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(8): 299.
- [3] KARAKUL H, ULUSAY R. Empirical Correlations for predicting strength properties of rocks from P-Wave velocity under different degrees of saturation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(5): 981 - 999.
- [4] MISHRA D A, BASU A. Use of the block punch test to predict the compressive and tensile strengths of rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 51: 119 - 127.
- [5] AYDIN A, BASU A. The Schmidt hammer in rock material characterization[J]. Engineering Geology, 2005, 81(1): 1 - 14.
- [6] 周 博, 卢自立, 汪华斌, 等. 基于均匀化理论的土石混合体应力应变关系[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 2 001 - 2 007.(ZHOU Bo, LU Zili, WANG Huabin, et al. Stress-strain relationship of soil-rock mixture based on homogenization theory[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12): 2 001 - 2 007.(in Chinese))
- [7] 朱其志, 胡大伟, 周 辉, 等. 基于均匀化理论的岩石细观力学损伤模型及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 266 - 272.(ZHU Qizhi, HU Dawei, ZHOU Hui, et al. Research on homogenization-based mesomechanical damage model and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 266 - 272.(in Chinese))
- [8] ZHANG F, GUO H Q, HU D W, et al. Characterization of the mechanical properties of a claystone by nano-indentation and homogenization[J]. Acta Geotechnica, 2018, 13(6): 1 395 - 1 404.
- [9] CAO J, GAO J C, RAD H N, et al. A novel systematic and evolved approach based on XGBoost—firefly algorithm to predict Young's modulus and unconfined compressive strength of rock[J]. Engineering with Computers, 2022, 38(5): 3 829 - 3 845.
- [10] MOMENI E, ARMAGHANI D J, HAJI HASSANI M, et al. Prediction of uniaxial compressive strength of rock samples using hybrid particle swarm optimization-based artificial neural networks[J]. Measurement, 2015, 60: 50 - 63.
- [11] LIU X Y, XU D P, LI S J, et al. Estimating the mechanical properties of rocks and rock masses based on mineral micromechanics testing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(7): 5 267 - 5 278.
- [12] 张 帆, 郭翰群, 赵建建, 等. 花岗岩微观力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增 2): 3 864 - 3 872.(ZHANG Fan, GUO Hanqun, ZHAO Jianjian, et al. Nanoindentation tests on granite after heat treatment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Supp.2): 3 864 - 3 872.(in Chinese))
- [13] 徐鼎平, 柳秀洋, 徐怀胜, 等. 深埋花岗岩细观力学特性纳米压痕试验及参数均质化研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(8): 2 761 - 2 771.(XU Dingping, LIU Xiuyang, XU Huaisheng, et al. Research on homogenization-based mesomechanical damage model and its application[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(8): 2 761 - 2 771.(in Chinese))
- [14] OLIVER W, PHARR G. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology[J]. Journal of Materials Research, 2004, 19(1): 3 - 20.
- [15] 江俊达, 沈吉云, 侯东伟. 基于纳米压痕的水化硅酸钙断裂韧度测试与计算方法[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1 067 - 1 073.(JIANG Junda, SHEN Jiyun, HOU Dongwei. Determination of fracture toughness of hydrated calcium silicate by nanoindentation[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(8): 1 067 - 1 073.(in Chinese))

- [16] LAWN B R, EVANS A G, MARSHALL D B. Elastic-plastic indentation damage in ceramics—The median-radial crack system[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1980, 63(9/10): 574 – 581.
- [17] LI C X, WANG D M, KONG L Y. Mechanical response of the Middle Bakken rocks under triaxial compressive test and nanoindentation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 139: 104660.
- [18] LU J K, XU T, TANG X H, et al. Nanoindentation-based characterization of micromechanical properties of greenish mudstone from deep Fushun West open-pit mine(Fushun City, China)[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(2): 59.
- [19] LIU X Y, XU D P, LI S J, et al. An insight into the mechanical and fracture characterization of minerals and mineral interfaces in granite using nanoindentation and micro X-ray computed tomography[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(5): 3 359 – 3 375.
- [20] JI S C, WANG Q, XIA B, et al. Mechanical properties of multiphase materials and rocks: a phenomenological approach using generalized means[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(8): 1 377 – 1 390.
- [21] AYATOLLAHI M R, NAJAFABADI M Z, KOLOOR S S R, et al. Mechanical characterization of heterogeneous polycrystalline rocks using nanoindentation method in combination with generalized means method[J]. *Journal of Mechanics*, 2020, 36(6): 813 – 823.
- [22] 孙 伟. 脆性岩石巴西劈裂和断裂韧度试验细观分析方法及破裂机理研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京科技大学, 2020.(SUN Wei. Research on the meso-analysis method and fracture mechanism in Brazilian test and fracture toughness test of brittle rock[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.(in Chinese))
- [23] ZHANG Z X. An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 401 – 406.
- [24] LOU Y H. Isotropized Voigt-Reuss model for prediction of elastic properties of particulate composites[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(25): 3 934 – 3 941.
- [25] MA Z Y, ZHANG C P, GAMAGE R P, et al. Uncovering the creep deformation mechanism of rock-forming minerals using nanoindentation[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(2): 283 – 294.
- [26] MAHABADI O K, TATONE B S A, GRASSELLI G. Influence of microscale heterogeneity and microstructure on the tensile behavior of crystalline rocks[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2014, 119(7): 5 324 – 5 341.
- [27] JAMSHIDI A. Predicting the strength of granitic stones after freeze-thaw cycles: considering the petrographic characteristics and a new approach using petro-mechanical parameter[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(6): 2 829 – 2 841.
- [28] WONG L N Y, MARUVANCHERY V. Different lithological varieties of Bukit Timah granite in Singapore: a preliminary comparison study on engineering properties[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2 923 – 2 935.
- [29] XU J J, ZHANG Y H, RUTQVIST J, et al. Thermally induced microcracks in granite and their effect on the macroscale mechanical behavior[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2023, 128(1): B024920.
- [30] LI X, WANG S, XU Y, et al. Effect of microwave irradiation on dynamic mode—I fracture parameters of Barre granite[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 224: 106748.
- [31] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(6): 643 – 659.
- [32] MO C, ZHAO J, ZHANG D. Real-time measurement of mechanical behavior of granite during heating-cooling cycle: a mineralogical perspective[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(7): 4 403 – 4 422.
- [33] HUANG X, QI S, ZHENG B, et al. An advanced grain-based model to characterize mechanical behaviors of crystalline rocks with different weathering degrees[J]. *Engineering Geology*, 2021, 280: 105951.
- [34] LAN H X, MARTIN C D, HU B. Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2010, 115: B01202.
- [35] 左建平, 周宏伟, 范 雄, 等. 三点弯曲下热处理北山花岗岩的断裂特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2 422 – 2 430.(ZUO Jianping, ZHOU Hongwei, FAN Xiong, et al. Research on fracture behavior of Beishan granite after heat treatment under three-point bending[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(12): 2 422 – 2 430.(in Chinese))
- [36] 王超圣, 蔡俊超, 韩书娟, 等. 北山花岗岩声发射特征及破坏模式识别研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(1): 87 – 94.(WANG Chaosheng, CAI Junchao, HAN Shujuan, et al. Study on acoustic emission characteristics and failure mode identification of Beishan granite[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(1): 87 – 94.(in Chinese))

- [37] 毛伟泽. 花岗岩力学性质变异性的细观机制研究[硕士学位论文][D]. 浙江: 浙江大学, 2020.(MAO Weize. Study on meso-mechanism of variability of mechanical properties of granite[M. S. Thesis][D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2020.(in Chinese))
- [38] 李 春, 胡耀青, 张纯旺, 等. 不同温度循环冷却作用后花岗岩巴西劈裂特征及其物理力学特性演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1 797 - 1 807.(LI Chun, HU Yaoqing, ZHANG Chunwang, et al. Brazilian split characteristics and mechanical property evolution of granite after cyclic cooling at different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1 797 - 1 807.(in Chinese))
- [39] HENG Z, XU T, KONIETZKY H, et al. New insights into the continuous—discontinuous failure characteristics of granite under Brazilian splitting test conditions using acousto-optic-mechanical (AOM) method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025, 187: 106041.
- [40] LEI M, DANG F N, XUE H B, et al. Study on mechanical properties of granite minerals based on nanoindentation test technology[J]. Thermal Science, 2021, 25(6): 4 457 - 4 463.
- [41] INGA C E C, SINHA S, WALTON G, et al. Modeling Brazilian tensile strength tests on a brittle rock using deterministic, semi-deterministic, and Voronoi bonded block models[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(7): 5 293 - 5 313.
- [42] SHA S, RONG G, PENG J, et al. Effect of open-fire-induced damage on Brazilian tensile strength and microstructure of granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4 189 - 4 202.
- [43] 唐欣薇, 黄文敏, 周元德, 等. 华南风化花岗岩劈拉断裂行为的试验与细观模拟研究[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 246 - 256.(TANG Xinwei, HUANG Wenmin, ZHOU Yuande, et al. Experimental and meso-scale numerical modeling of splitting tensile behavior of weathered granites from South China[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 246 - 256.(in Chinese))
- [44] SHU B, LIANG M, ZHANG S H, et al. Numerical modeling of the relationship between mechanical properties of granite and microparameters of the flat-joint model considering particle size distribution[J]. Mathematical Geosciences, 2019, 51(3): 319 - 336.
- [45] 胡训健, 卞 康, 刘 建, 等. 花岗岩晶体粒径分布对声发射特性影响的颗粒流模拟[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增 2): 721 - 730.(HU Xunjian, BIAN Kang, LIU Jian, et al. Particle flow simulation of the influence of granite crystal size distribution on acoustic emission characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Supp.2): 721 - 730.(in Chinese))
- [46] 李 博, 朱 强, 张丰收, 等. 基于矿物晶体模型的非均质性岩石双裂纹扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1 119 - 1 131.(LI Bo, ZHU Qiang, ZHANG Fengshou, et al. Study on crack propagation of heterogeneous rocks with double flaws based on grain based model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1 119 - 1 131.(in Chinese))
- [47] HOFMANN H, BABADAGLI T, YOON J S, et al. A grain based modeling study of mineralogical factors affecting strength, elastic behavior and micro fracture development during compression tests in granites[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 147: 261 - 275.
- [48] SAADAT M, TAHERI A. Modelling micro-cracking behaviour of granite during direct tensile test using cohesive GBM approach[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 239: 107297.
- [49] ZHOU J, LAN H, ZHANG L, et al. Novel grain-based model for simulation of brittle failure of Alxa porphyritic granite[J]. Engineering Geology, 2019, 251: 100 - 114.
- [50] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(3): 445 - 463.
- [51] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion—2002 edition[C]// Proceedings of the North American Rock Mechanics Society. Toronto: [s. n.], 2002: 267 - 273.