

DOI: 10.11779/CJGE20240541

# 基于纳米压痕的玄武岩微观弹性模量测定及参数尺度升级研究

齐姝霞<sup>1,3</sup>, 刘一苇<sup>\*1,2</sup>, 唐旭海<sup>1,2</sup>, 张俊楷<sup>3</sup>, 严成增<sup>3</sup>, 刘泉声<sup>1</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学深圳研究院, 广东 深圳 518057; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 玄武岩力学特性与未来海洋资源开采、探月工程和火星基地建设息息相关, 由于深海和深空环境下获取完整岩心难度较大, 难以通过传统宏观岩石力学试验来准确测定其力学参数。为此, 基于微观岩石力学试验与精确矿物晶体模型 (accurate grain-based modeling, AGBM), 提出了一种适用于非标准尺寸和形状玄武岩样本的力学参数测试方法。利用矿物自动定量分析系统 (TESCAN integrated mineral analyzer, TIMA) 和纳米压痕测试, 分别获取玄武岩的矿物成分、微观结构信息和成岩矿物的微观弹性模量。基于 TIMA 和纳米压痕得到的微观参数, 构建玄武岩精确矿物晶体模型, 通过数值模拟玄武岩单轴压缩过程得到玄武岩的宏观弹性模量, 进而实现任意小尺寸玄武岩样本的弹性模量测定。研究表明, 基于 AGBM 的数值模拟所得玄武岩弹性模量与宏观试验结果最为接近, 显著优于传统的均质化方案, 包括 Voigt-Reuss-Hill 方案、Mori-Tanaka 方案及稀释方案。最后, 讨论了晶间相力学性质、孔隙率及孔隙填充对 AGBM 模型尺度升级效果的影响。本研究为小尺寸非标准玄武岩样本的力学性质预测提供了技术支持。

**关键词:** 玄武岩; 纳米压痕; 多尺度; 微观力学性能; 尺度升级

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)09-1956-11

**作者简介:** 齐姝霞(1998—), 女, 硕士, 主要从事岩石多尺度力学表征方面的研究工作。E-mail: 1427947438@qq.com。

## Determination of microscopic elastic modulus of basalt based on nanoindentation experiment and study on parameter upscaling methods

QI Shuxia<sup>1,3</sup>, LIU Yiwei<sup>\*1,2</sup>, TANG Xuhai<sup>1,2</sup>, ZHANG Junkai<sup>3</sup>, YAN Chengzeng<sup>3</sup>, LIU Quansheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Wuhan University Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Mechanical properties of basalt are crucial for future marine resource extraction, lunar exploration, and Mars base development. However, obtaining intact basalt cores is challenging due to the difficulties of sampling in deep-sea and deep-space environments, making it impractical to determine their mechanical properties using traditional macroscopic rock mechanics tests. In this study, a new method to get mechanical properties of non-standard basalt specimens based on microscopic rock mechanics experiments and accurate grain-based modeling (AGBM) is proposed. The Tescan integrated mineral analyzer (TIMA) is used to analyze mineral composition and microstructure of basalt. Nanoindentation tests are used to obtain elastic moduli of rock-forming minerals. AGBM models of basalt are constructed based on digital images obtained by TIMA and mechanical parameters derived from nanoindentation. It is found that elastic moduli of basalt obtained through AGBM-based numerical simulations of uniaxial compression tests closely align with those from macroscopic experiments. In contrast, homogenization methods, including the Voigt-Reuss-Hill scheme, the Mori-Tanaka scheme, and the dilution scheme, show considerable discrepancies. Finally, the study examines the impacts of interphase mechanical properties, porosity, and pore filling on upscaling results of AGBM models. The proposed method provides an approach for predicting mechanical properties

**基金项目:** 中国博士后科学基金特别资助项目 (2023TQ0247); 中国博士后科学基金面上项目 (2023M732715); 国家资助博士后研究人员计划项目 (GZB20230544); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2023A1515111071, 2024A1515011772) This work was supported by the China Postdoctoral Science Foundation (Grants Nos. 2023TQ0247, 2023M732715), the Postdoctoral Fellowship Program (Grade B) of China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. GZB20230544), and Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (Grants Nos. 2023A1515111071, 2024A1515011772).

**收稿日期(Received):** 2024-06-03 **修回日期(Revised):** 2024-11-11 **接受日期(Accepted):** 2024-11-14 **网络出版日期(Online):** 2024-11-15

\*通信作者 (E-mail: liuyiwei@whu.edu.cn)

of basalt samples in arbitrary shapes and small sizes.

**Key words:** basalt; nanoindentation; multi-scale; microscale mechanical property; upscaling method

## 0 引言

玄武岩广泛分布于海底、陆地火山地区以及月球和火星表面, 广泛应用于海底工程、探月工程及地质工程的设计和建设中<sup>[1-3]</sup>。随着玄武岩在 CO<sub>2</sub> 矿化封存、海底工程和探月工程等领域中的应用需求增加, 深入了解其微观和宏观力学特性变得尤为重要, 对未来深海工程、地外钻探取心、太空科研站建设及行星采矿任务的论证具有重要意义。

目前, 岩石力学参数主要通过宏观力学试验获取, 如单轴或三轴压缩试验、巴西劈裂、拉伸和直剪试验等<sup>[4-6]</sup>。然而, 宏观力学试验对岩样的完整性和标准性要求较高, 不适用于尺寸较小或形状不规则的样品。例如, 国际岩石力学学会和美国材料试验学会建议的单轴压缩试验样品通常为高度 100 mm、直径 50 mm 的标准圆柱体<sup>[7]</sup>。然而, 由于深海和深空环境中的环境压力、温度及采样设备的限制, 采集到的岩石样本通常尺寸较小且形状不规则, 难以采用传统测试方法。此外, 传统宏观试验方法基于经典连续介质力学理论, 无法有效表征玄武岩的非均质矿物组成和多尺度特征。因此, 亟需开发适用于非标准尺寸和形状的玄武岩力学性质测试方法, 以满足特殊工程需求。

近年来, 以纳米压痕技术为代表的微观力学测试在获取岩石力学参数方面显示出显著优势<sup>[8]</sup>。纳米压痕测试精度高, 其载荷分辨率和位移分辨率可达  $10^{-9}$  N 和  $10^{-9}$  m, 能够在纳米或亚微米尺度上探测岩石的力学性能。同时, 该技术对样品大小和形状的限制较少, 特别适用于样品稀缺且取样成本高的深海和深空岩石。此外, 纳米压痕测试可以解析岩石内部矿物单元的力学响应, 有助于更好地解释岩石在宏观尺度上的力学行为。纳米压痕测试已广泛应用于多种岩石类型, 如页岩、煤岩、砂岩、石灰岩和花岗岩等。Liu 等<sup>[9]</sup>利用纳米压痕试验结合离散元法研究了花岗岩的微观力学性质和裂纹特性; Ma 等<sup>[10]</sup>应用纳米压痕技术揭示了花岗岩中常见成岩矿物的蠕变变形机制; Liu 等<sup>[11]</sup>探讨了纳米压痕测试在页岩非均质性及 CO<sub>2</sub>-水-页岩相互作用中的应用; Bennett 等<sup>[12]</sup>通过不同深度的纳米压痕试验研究了页岩的均匀性和复合材料特性; Zhou 等<sup>[13]</sup>则通过网格纳米压痕试验测定了砂岩的微观力学性能。

玄武岩由多种成岩矿物组成, 具有显著的多尺度力学特征。要建立岩石在微观、细观和宏观尺度上力

学性能与其组分和结构之间的关系, 需要考虑不同尺度的材料相及界面的相互作用。常见的多尺度分析方法包括均质化方法和数值模拟方法。均质化方法通过计算微观力学单元来确定复合材料的宏观平均力学性能, 常用的方法包括自洽法、稀释法、微分法和 Mori-Tanaka 法等<sup>[14]</sup>。此外, 数值模拟技术在岩石晶粒尺度上得到广泛应用, 如矿物晶体模型 (grain-based modeling, GBM) 和颗粒流模型等, 能够从微观尺度深入理解岩石的复杂力学机制<sup>[15]</sup>。GBM 是一种基于岩石矿物颗粒尺度的数值仿真技术, 通过 Voronoi 镶嵌生成多边形晶粒结构, 以模拟岩石晶粒的力学行为, 从而揭示其微观-宏观响应机制<sup>[16]</sup>。然而, 传统 GBM 通常依赖宏观试验数据反演微观力学参数, 缺乏直接的微观力学参数测量, 同时 Voronoi 方法简化了矿物形状, 导致对岩石微观结构的刻画不够精确。为此, Tang 等<sup>[17]</sup>、Xu 等<sup>[18]</sup>提出了精确矿物晶体模型 (TESCAN integrated mineral analyzer, TIMA), 该模型可准确表征岩样的矿物特征, 如种类、分布、尺寸、体积分数及咬合关系等, 有效提高了晶体模型的精度, 成功模拟花岗岩的弹塑性加载与热破裂行为。

本文提出了一种基于纳米压痕技术和精确矿物晶体模型的测试方法, 用于测试小尺寸玄武岩样品的力学参数。首先, 利用矿物自动定量分析系统 (TESCAN integrated mineral analyzer, TIMA) 获取玄武岩的矿物成分和微观结构信息; 接着, 通过纳米压痕试验测定长石、辉石、橄榄石和钛铁矿的微观弹性模量; 然后, 基于这些数据构建玄武岩的精确矿物晶体模型, 利用数值模拟计算玄武岩单轴压缩过程中的宏观弹性模量, 并与宏观试验结果进行对比分析。同时, 本文还将 AGBM 与均质化模型 Voigt-Reuss-Hill 方案、Mori-Tanaka 方案和稀释方案进行了比较, 验证了 AGBM 在尺度升级中的有效性和优越性。

## 1 微观岩石力学试验

### 1.1 试验原理及方法

#### (1) TIMA 测试

采用 TIMA 系统获取玄武岩的矿物成分和微观结构信息。该系统基于背散射电子 (back scattered electron, BSE) 成像和能量色散光谱 (energy dispersive spectroscopy, EDS) 技术, 通过高密度 X 射线能谱分析采集样品表面单像素的组成信息, 并与内部数据库



比对确定矿物类型,从而生成覆盖岩石微观结构和矿物分布的图像(如图1)。TIMA 系统可快速分析岩石、矿石等样品,提供矿物成分、含量、颗粒形态、尺寸和孔隙分布等信息<sup>[19]</sup>,并支持 BSE 数据的自动或半自动图像分析处理。本研究采用 TIMA 的高分辨率映射模式, BSE 像素间距设为 3  $\mu\text{m}$  (图2红色数据点), EDS 步长为 9  $\mu\text{m}$  (图2黄色数据点),在每个点采集超过 1000 次 X 射线数据,通过与矿物库对比确定玄武岩表面的矿物成分。

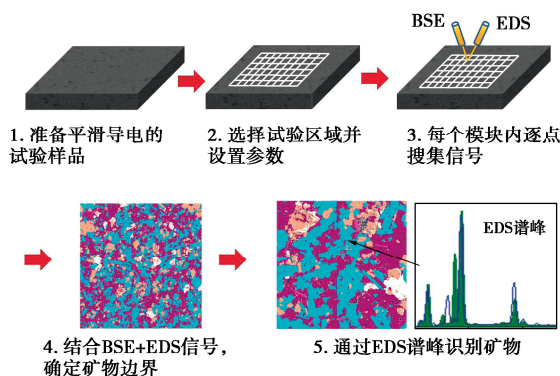


图1 TIMA 运行原理

Fig. 1 Principle of TIMA

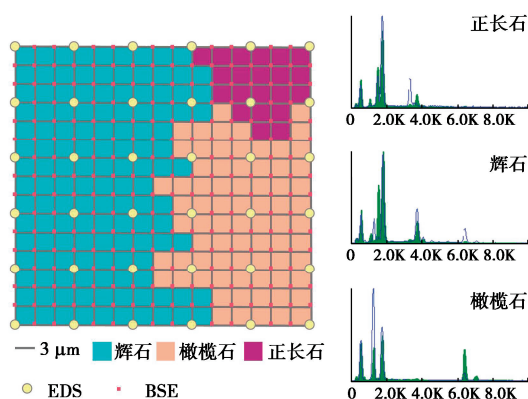


图2 TIMA 鉴定不同矿物类型

Fig. 2 Identification of different mineral types via TIMA

## (2) 纳米压痕测试

纳米压痕测试基于接触力学原理,使用已知几何形状和力学特性的金刚石压头对样品表面施加压入,通过高精度位移和载荷传感器实时记录压入载荷与位移数据<sup>[20]</sup>。通过分析获得的载荷-位移曲线,可计算材料的弹性模量和硬度等力学参数。本研究使用布鲁克公司生产的 Hysitron TI 950 TriboIndenter 纳米压痕测试仪(见图3),采用 Oliver-Pharr 方法从载荷-位移曲线中提取玄武岩的弹性模量<sup>[21]</sup>。

首先,从载荷-位移曲线中计算初始卸载斜率(接触刚度  $S$ ),定义为

$$S = \frac{dP}{dh} \Big|_{h_{\max}} \quad (1)$$

式中:  $h_{\max}$  为最大压入深度。折减模量  $E_r$  为

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

式中:  $\beta$  为与压头形状相关的无量纲校正因子,对于 Berkovich 压头,一般取 1.05;  $A_c$  为压头在样品表面上的投影接触面积,通常由最大接触深度的函数确定,其中接触深度  $h_c$  可表示为

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{P}{S} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon$  为取决于压头尖端类型的常数,对于 Berkovich 压头取 0.75。杨氏模量可以表示为

$$E = (1 - \nu^2) \left[ \frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中:  $\nu$  为待测样品的泊松比;  $\nu_i$  为金刚石的泊松比,  $\nu_i = 0.07$ ;  $E$  和  $E_i$  分别为待测试样和金刚石压头的弹性模量,  $E_i = 1140 \text{ GPa}$ 。

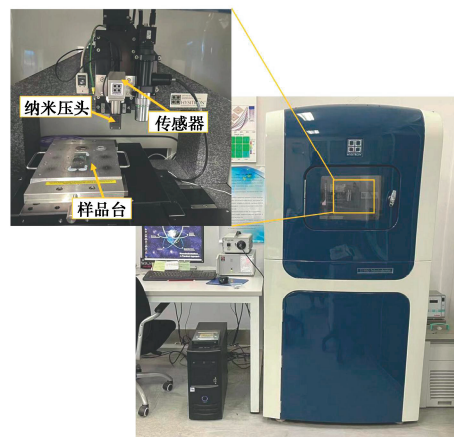


图3 纳米压痕仪

Fig. 3 Nanoindentation instrument

## 1.2 玄武岩样品制备

本研究试验材料为海南新鲜玄武岩,样品被切割成 20 mm × 20 mm × 5 mm 的立方体(见图4),并用 EcoMet 250 Buehler 抛光机分步抛光。抛光过程依次使用粒度为 P800、P1200、P2500 和 P5000 的碳化硅砂纸对样品进行打磨,随后采用 1, 0.3, 0.05  $\mu\text{m}$  的超细氧化铝悬浮液进行精细抛光,以降低表面粗糙度。抛光后,样品经超声波清洗,并用光学显微镜检查,以减少表面粗糙度对测量的影响,确保试验数据的准确性。

## 1.3 纳米压痕测试方案

纳米压痕测试使用网格压痕技术,根据 Constantinides 等<sup>[22]</sup>提出的网格压痕方法,通过在样品上布置大量纳米压痕点以统计评估材料的力学性能分

布, 提供矿物相的定性、定量和可重复性数据。在试验前, 使用标准铝样对压痕尖端进行清洁和校准, 以确保其表面完好。本试验使用 Berkovich 金刚石压头, 并在光学显微镜下对矿物晶体定位, 以保证测试区域的平整性, 从而减少表面粗糙度的影响。为克服矿物样本的非均质性, 每种矿物执行 75 次压痕测试, 压痕点间距设为 10  $\mu\text{m}$ 。详细参数设置见表 1。测试中, 位移传感器用于测量压入位移, 支撑弹簧的变形反映连续压入荷载。测试记录的载荷-位移曲线包括: ①以 0.8 mN/s 的加载速率增加至最大载荷 4 mN; ②保持最大载荷 2 s; ③以 0.8 mN/s 的速率卸载至 0。

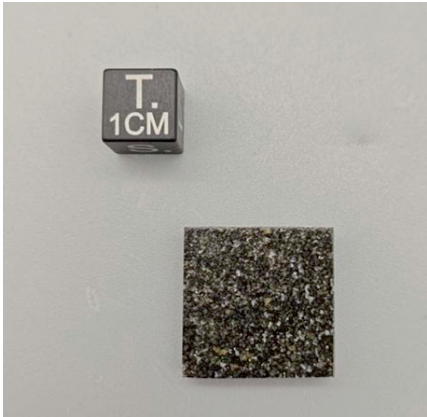


图 4 抛光后的玄武岩样品  
Fig. 4 Basalt sample after polishing

表 1 纳米压痕试验参数

Table 1 Nanoindentation test parameters					
点阵规格	点阵数量	压痕点间距	加载速率	卸载速率	最大负载
5×5	12	10 $\mu\text{m}$	0.8 mN/s	0.8 mN/s	4 mN

1.4 试验结果

(1) 玄武岩样品矿物组成

TIMA 分析提供了玄武岩样品表面的矿物分布图(见图 5)及各矿物的体积分数(见表 2)。结果显示, 玄武岩具有显著的非均质性, 主要由长石、辉石、橄

榄石和钛铁矿组成。其中, 辉石的体积分数最高, 为 36.42%, 分布广泛; 长石次之, 体积分数为 34.65%, 呈大片状分布; 橄榄石的体积分数为 18.51%, 呈颗粒状分布; 钛铁矿含量较少, 为 2.16%, 具有针状几何特征。TIMA 结果显示玄武岩的孔隙度为 7.16%。

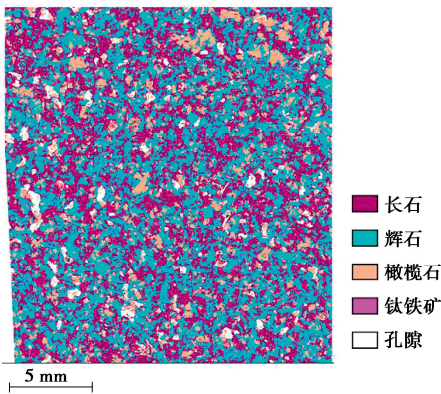


图 5 玄武岩 TIMA 图  
Fig. 5 TIMA image of basalt sample

表 2 玄武岩各矿物占比

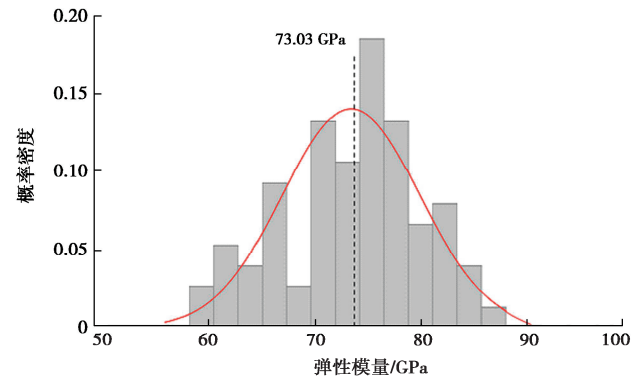
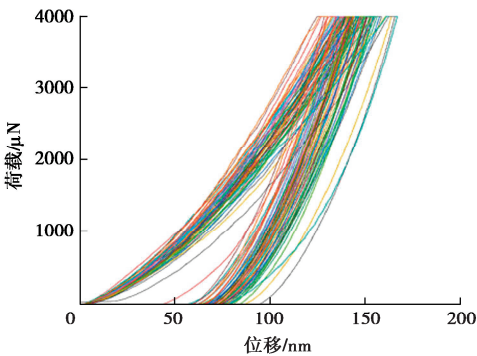
Table 2 Proportion of minerals of basalt					
长石	辉石	橄榄石	钛铁矿	孔隙	其他
34.65%	36.42%	18.51%	2.16%	7.16%	1.10%

(2) 矿物微观力学参数

通过纳米压痕试验获取了长石、辉石、橄榄石和钛铁矿的载荷-位移曲线, 并基于高斯拟合分析各矿物的弹性模量概率密度分布(见图 6)。结果表明, 长石、辉石、橄榄石和钛铁矿的平均弹性模量分别 73.03, 125.71, 124.50, 97.51 GPa, 拟合标准差分别为 5.65, 6.33, 4.20, 13.07 GPa。

2 宏观单轴压缩测试

为验证宏观力学性能, 选用同一地区的玄武岩样品制备标准尺寸为 50 mm×100 mm 的圆柱试样(见



(a) 长石

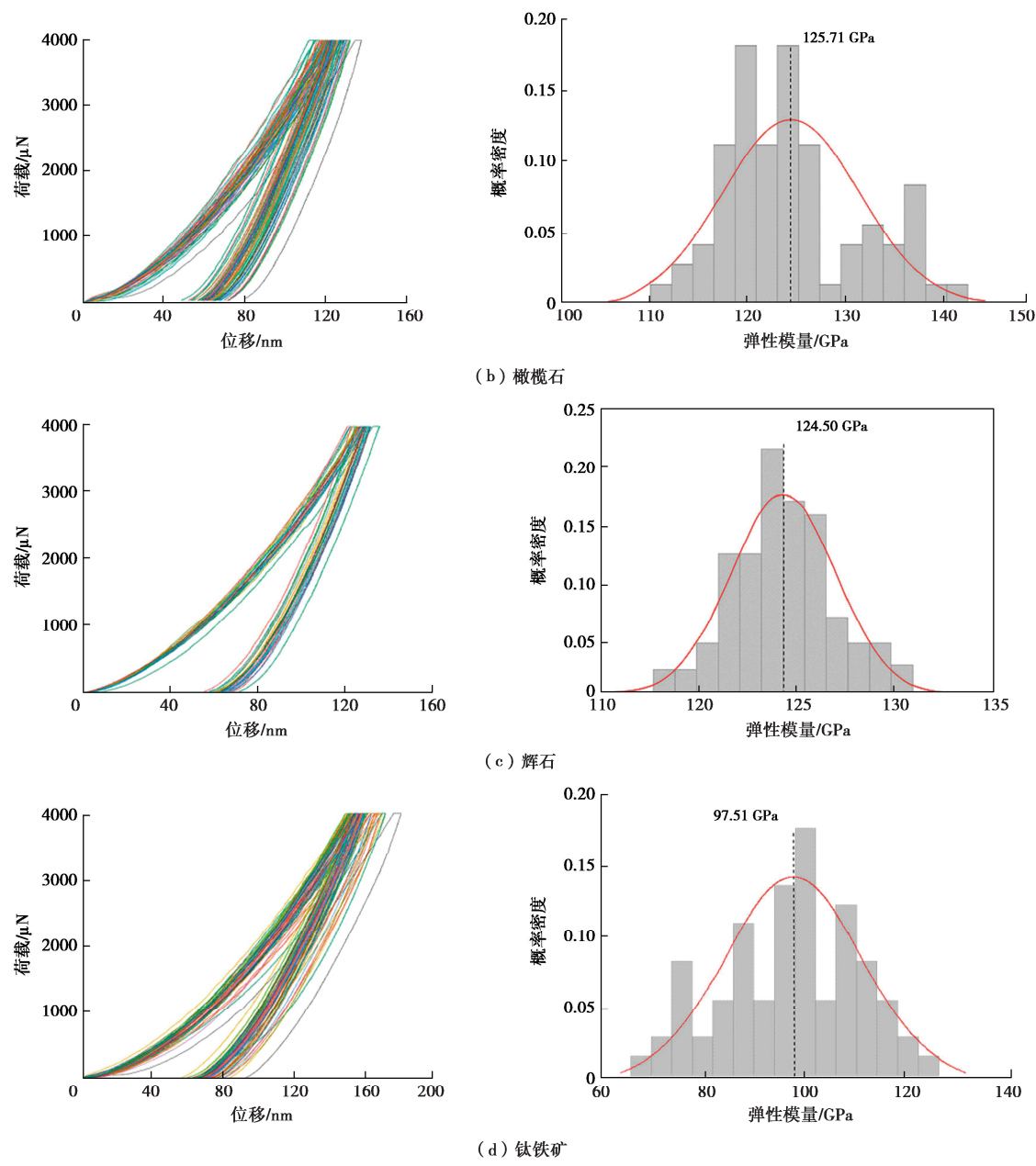


图 6 玄武岩各矿物纳米压痕结果

Fig. 6 Results of elastic moduli of various minerals in basalt

图 7), 并在 HCT300E 油电混合伺服压力试验机进行单轴压缩试验。设备最大载荷为 300 kN, 力控制率范围为 0.05~50 kN/s, 应变率范围为 0.00025~0.0025 s<sup>-1</sup>。试验加载速率为 0.2 mm/min, 以确保数据准确性。3 次试验中计算的弹性模量分别为 47.32, 49.67, 51.90 GPa, 取平均值 49.63 GPa 作为宏观试验结果。

3 玄武岩微观力学参数尺度升级

上述 TIMA 与纳米压痕试验分别确定了玄武岩的微观结构和主要成岩矿物的弹性模量。为实现玄武岩微观力学参数的尺度升级, 本研究基于精确矿物晶体

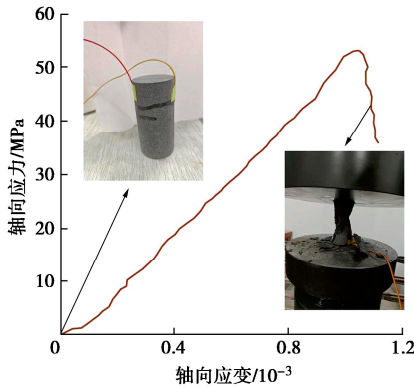


图 7 玄武岩单轴压缩试验

Fig. 7 Uniaxial compression test results of basalt samples



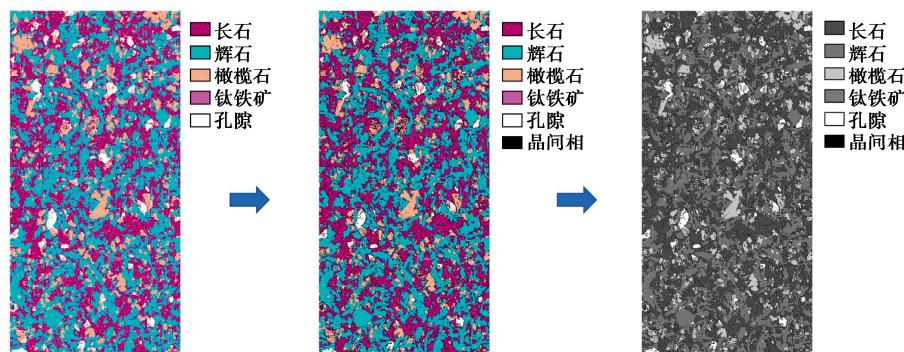


图 8 玄武岩矿物晶体建模过程

Fig. 8 Modeling process of basalt mineral crystals

模型 (AGBM) 及均质化方案 (Voigt-Reuss-Hill 方案、Mori-Tanaka 方案及稀释方案) 进行参数的尺度升级, 并对这些方法进行了对比分析。

3.1 精确矿物晶体模型 (AGBM)

从 TIMA 获取的二维玄武岩数字矿物图像中选择  $0.8\text{ cm} \times 1.6\text{ cm}$  的区域, 以构建玄武岩单轴压缩数值模型 (图 8)。利用灰度阈值分割法区分各矿物介质, 并在矿物边界处插入晶间相单元, 以模拟矿物间的胶结效应。首先, 将数字矿物图像转化为灰度图像, 根据灰度值与彩色矿物图像的对比划分成岩矿物的灰度区间。接着, 采用网格映射法将像素点转换为有限元单元网格, 每种矿物对应一类材料集合, 从而构建出反映岩石真实微观结构和矿物力学特性的矿物晶体数值模型。不同单元的材料弹性模量依据纳米压痕实测结果确定, 矿物的密度和泊松比则取自文献[23, 24]。晶间相的弹性模量参考 Tang 等<sup>[17]</sup>研究结果, 取值为  $20\text{ GPa}$ , 矿物晶体材料参数取值列于表 3。为考虑孔隙等缺陷结构的影响, 模型中根据 TIMA 测得的孔隙率设置孔隙单元, 孔隙单元视为易变形的软性线性材料。AGBM 模型基于 TIMA 数字矿物图像, 在矿物体积分数、形态、接触状态和尺寸等方面具有较高精度, 能够真实反映玄武岩的微观结构特征。

表 3 矿物晶体材料参数

Table 3 Material parameters of minerals in AGBM

矿物	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比
长石	2561	73.03	0.27
辉石	3272	124.50	0.21
橄榄石	3224	125.71	0.24
钛铁矿	4700	97.51	0.24
孔隙	1000	1.00	0.45
晶间相	2700	20.00	0.25

采用 ABAQUS 有限元软件对玄武岩单轴压缩数值模型进行求解。ABAQUS 是一款通用的有限元软件, 具备强大的非线性计算分析能力。模型假设为平

面应变条件, 材料参数采用试验测得的弹性模量和强度。模型上边界施加  $0.1\text{ mm}$  的垂直位移, 下边界施加垂直约束。为减少端部效应, 模拟过程中去除模型的上下压板。选用时间步长为  $5 \times 10^{-5}\text{ ms}$ , 以确保显式时间积分方案的数值稳定性。模拟得到的应力-应变曲线如图 9 所示。根据曲线斜率计算的宏观弹性模量为  $52.75\text{ GPa}$ , 与宏观单轴压缩力学测试结果误差为  $6.3\%$ 。

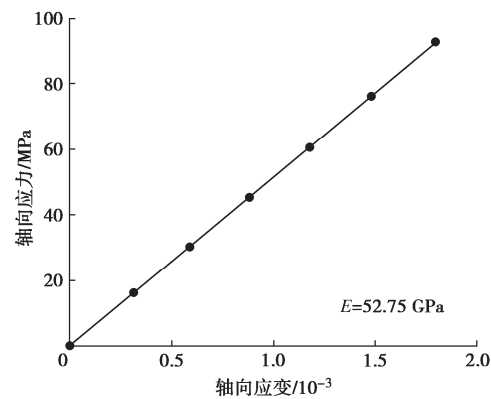


图 9 玄武岩应力-应变曲线图

Fig. 9 Stress-strain curve

通过基于真实微观结构和力学特性的 AGBM 模型, 能够直接揭示宏观与微观力学性能之间的内在关系, 并实现内部应力演化的定量可视化。玄武岩在单轴压缩下的应力演化如图 10 所示。由于岩石内部矿物晶体彼此连接无法独立变形, 压缩过程中发生应力重新分配。图 10 (a) 显示, 长石、辉石和橄榄石作为主要矿物承担了大部分压应力, 而孔隙承受的压力极小, 显著低于其他矿物。图 10 (b) 表明, 水平拉应力主要出现在橄榄石内部, 橄榄石相比其他矿物强度更高。图 10 (c) 可见垂直压应力在强度较低的孔隙内达到最大 (红色区域)。图 10 (d) 则显示, 剪切应力集中在弹性模量差异较大的相邻矿物及孔隙周围。

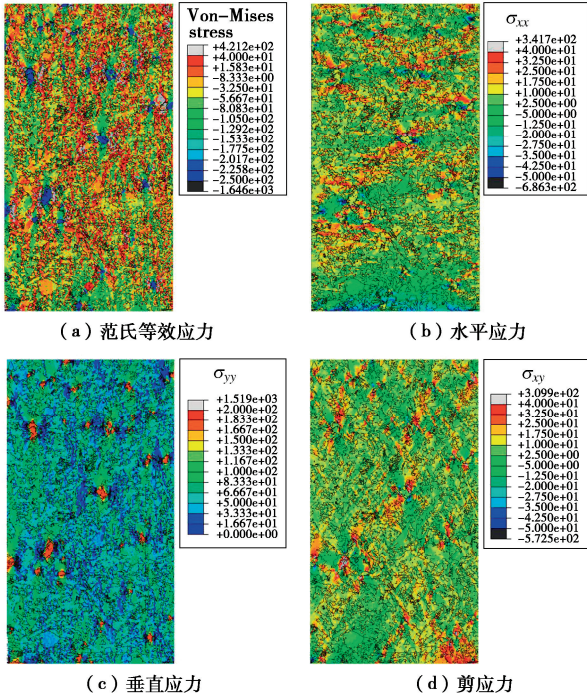


图 10 玄武岩单轴压缩应力分布

Fig. 10 Stress distribution of basalt under uniaxial compression

### 3.2 基于 Voigt-Reuss-Hill 方案的尺度升级

Voigt-Reuss-Hill 方法通过结合 Voigt (上限) 和 Reuss (下限) 边界来估算复合材料的宏观弹性模量。Voigt 模型假设材料各向同性和线性, 利用各组分的体积分数 ( $\gamma_i$ ) 与其弹性模量 ( $E_i$ ) 的乘积之和来计算等效弹性模量的上限 ( $E_v$ ):

$$E_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i E_i \quad (5)$$

另一方面, Reuss 模型确立了等效弹性模量的下限 ( $E_R$ ):

$$\frac{1}{E_R} = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{E_i} \quad (6)$$

随后, 取上下限的平均值计算等效弹性模量 ( $E_H$ ):

$$E_H = \frac{1}{2}(E_v + E_R) \quad (7)$$

计算结果表明, Voigt-Reuss-Hill 方案预测的玄武岩宏观弹性模量为 101.32 GPa, 与试验测得的宏观值差距较大。

### 3.3 基于 Mori-Tanaka 方案的尺度升级

Mori-Tanaka 方案广泛用于多相弹性复合材料的均匀化分析。该模型将每种矿物组分视为嵌入基质中的包裹体, 并考虑包裹体间的相互作用。通过对矿物进行强度分级, 岩石可以简化为高强度矿物 (橄榄石、辉石)、中等强度矿物 (钛铁矿) 和低强度矿物 (长石) 构成的三相介质模型。在微观尺度上, 该模型假设三

相介质为各向同性 (见图 11)。通过矿物相的微观力学参数及体积分数, 可将力学参数从微观尺度转换为宏观尺度。各相的等效体积模量  $K_M$  和剪切模量  $G_M$  通过以下公式计算:

$$K_M = \frac{\sum f_i \frac{k_i}{3k_i + 4\mu_0}}{\sum \frac{f_i}{3k_i + 4\mu_0}} \quad (i = 0, 1, 2) \quad (8)$$

$$G_M = \frac{\sum \frac{f_i \mu_i}{\mu_0(9k_0 + 8\mu_0) + 6\mu_i(k_0 + 2\mu_0)}}{\sum \frac{f_i}{\mu_0(9k_0 + 8\mu_0) + 6\mu_i(k_0 + 2\mu_0)}} \quad (9)$$

$$k_i = \frac{E_i}{3(1 - 2\nu_i)} \quad (10)$$

$$\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + 2\nu_i)} \quad (11)$$

式中:  $k_i$ ,  $\mu_i$ ,  $f_i$  分别为特定矿物相体积模量、剪切模量和体积分数。 $\nu_i$  和  $E_i$  分别表示该矿物相的泊松比和弹性模量。模型中,  $i$  取值为 0, 1 和 2, 分别表示低、中、高强度矿物相。

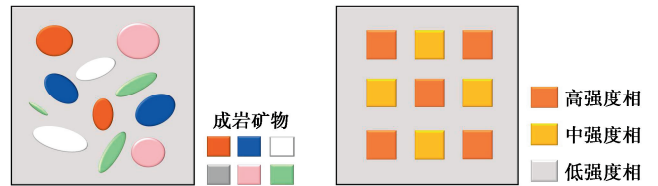


图 11 岩石三相介质力学模型

Fig. 11 Equivalent rock model

随后, 通过以下方程确定玄武岩宏观尺度的弹性模量  $E_{hom}$ :

$$E_{hom} = \frac{9K_M G_M}{3K_M + G_M} \quad (12)$$

计算结果表明, Mori-Tanaka 方案得出的玄武岩宏观弹性模量为 87.17 GPa。

### 3.4 基于稀释方案的尺度升级

稀释方案假设所有矿物材料为连续、均匀的各向同性线性弹性体, 且矿物晶体在代表性体积元内随机分布, 不考虑矿物间相互作用。该方法将代表性体积元的有效力学性质视为各矿物晶体包裹体的简单叠加。基于此, 等效体积模量  $K_M$  和剪切模量  $G_M$  可通过以下方程确定:

$$K_M = k_0 + \sum_{i=1}^n f_i \frac{(k_i - k_0)(3k_0 + 4\mu_0)}{3k_i + 4\mu_0} \quad (13)$$

$$G_M = \mu_0 + \sum_{i=1}^n f_i \frac{5\mu_0(\mu_i - \mu_0)(3k_0 + 4\mu_0)}{\mu_0(9k_0 + 8\mu_0) + 6\mu_i(k_0 + 2\mu_0)} \quad (14)$$

计算结果表明, 稀释方案得出的玄武岩宏观弹性



模量为 82.64 GPa。

### 3.5 不同尺度升级方案结果对比

将采用 AGBM、Voigt-Reuss-Hill、Mori-Tanaka 和稀释方案 4 种方法计算的玄武岩弹性模量数值与宏观试验结果进行了对比。结果显示, AGBM 方法与试验值最为接近, 误差为 6.3%; 均质化方法的误差较大, 显著高于试验值。这一差异可能由以下因素引起:

(1) 3 种均质化模型均假设材料各向同性, 而玄武岩的冷却凝固过程导致其表现出明显的各向异性特征。

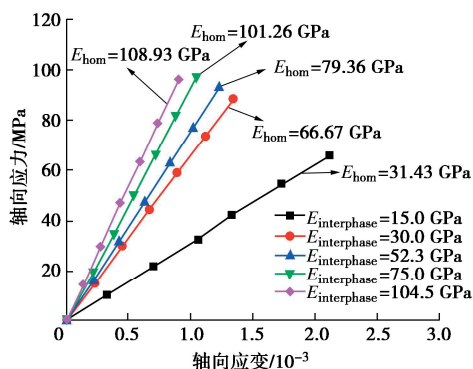
(2) 均质化模型仅考虑了矿物的体积分数, 忽略了矿物形状、尺寸、相互镶嵌, 以及微孔洞和软弱胶结面等因素的影响。

(3) 均质化方法在沉积岩(如板岩<sup>[25]</sup>、页岩<sup>[26]</sup>)的预测中表现较好, 可能因为这些岩石的基体与夹杂物特征更符合均质化方案的假设, 而玄武岩缺乏类似的软弱基质(如黏土矿物)。因此, 均质化方案不适用于玄武岩。

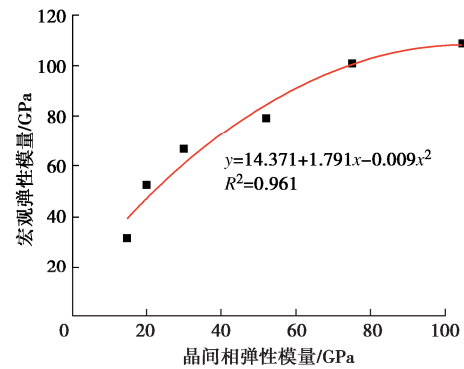
## 4 参数敏感性分析

### 4.1 晶间相对玄武岩宏观力学性质的影响

岩石的晶间相指的是矿物晶体之间的区域, 包括晶界以及存在于这些界面的次生矿物和胶结矿物。晶间相作为岩石的弱面, 对其整体力学性能具有显著影响。鉴于玄武岩在不同成岩过程中会形成不同形式和强度的晶间胶结结构, 本文进一步探讨了晶间相力学性质对玄武岩 AGBM 跨尺度力学性能的影响。通过设定晶间相的弹性模量为 15.0 GPa (取自其他岩石数据)、30.0, 52.3 GPa (各矿物弹性模量均值的一半)、75.0, 104.5 GPa (各矿物弹性模量均值), 并采用 AGBM 方法进行数值模拟。结果显示, 玄武岩的宏观弹性模量分别为 31.43, 66.67, 79.36, 101.26, 108.93 GPa (见图 12 (a))。拟合的曲线表明, 随着晶间相弹性模量的增加, 玄武岩的宏观弹性模量呈单调增加趋势 (见图 12 (b))。



(a) 玄武岩 AGBM 单轴压缩应力-应变曲线



(b) 晶间相弹性模量与玄武岩宏观弹性模量的拟合关系

图 12 晶间相取值对玄武岩宏观弹性模量的影响

Fig. 12 Macroscopic elastic moduli of basalt under different elastic moduli of interphase

以上结果表明, 晶间相的力学性质对玄武岩的宏观力学特性影响显著。需注意的是, 本文通过设定单一全局晶间相弹性模量来简化晶间相的作用模型, 未考虑晶间相力学性质的非均匀性。在复杂的成岩过程中, 玄武岩中的各类矿物具有不同的晶间胶结特性, 例如胶结厚度和成分的差异, 这些因素会进一步影响玄武岩的宏观力学性质。未来研究将深入探讨玄武岩中晶间胶结矿物的类型和几何特征, 并通过数值模拟分析晶间胶结非均匀性对宏观力学性能的影响。

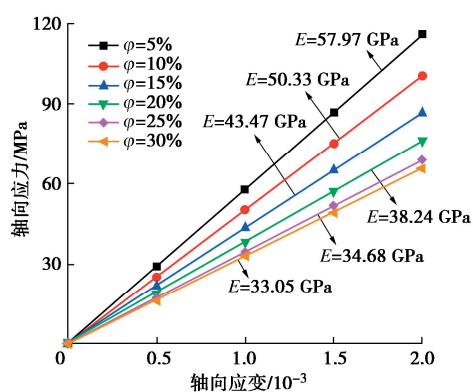
### 4.2 孔隙率及孔隙填充对玄武岩宏观力学性质的影响

玄武岩作为一种天然多孔材料, 内部包含大量不规则、跨尺度的孔隙, 这些孔隙直接影响岩石的宏观物理、力学及化学性质。不同地区玄武岩的孔隙特征显著不同, 主要受冷却过程影响。本文进一步探讨了孔隙率对玄武岩 AGBM 跨尺度力学性能的影响。相关文献指出, 玄武岩的孔隙率从接近零到超过 25% 不等, 主要取决于熔岩流中的位置<sup>[27]</sup>。为进一步探讨孔隙率对玄武岩宏观力学性质的影响, 本文计算了孔隙率分别为 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 时 AGBM 模拟得到的宏观弹性模量, 结果分别为 57.97, 50.33, 43.47, 38.24, 34.68, 33.05 GPa (见图 13 (a))。相较于 5% 孔隙率, 15%, 30% 孔隙率下, 玄武岩宏观弹性模量分别下降了 25.0%, 40.2%, 显示孔隙率对宏观弹性模量具有显著影响。拟合曲线显示, 随着孔隙率增加, 玄武岩的宏观弹性模量单调减小 (见图 13 (b))。

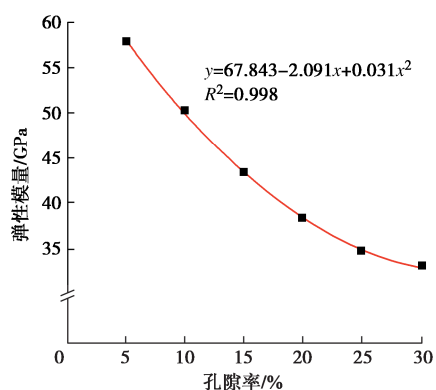
作为一种喷出岩, 玄武岩常具有结核等原生构造, 或在后期经历孔隙和裂隙的填充作用。先前研究表明, 高岭石和绿泥石等黏土矿物可能填充在玄武岩的原生气孔、冷凝收缩缝和构造裂缝中<sup>[19]</sup>。为研究



孔隙填充对玄武岩宏观力学性质的影响, 本文建立了孔隙填充条件下的精确矿物晶体模型, 分析了不同孔隙填充百分比 (25%, 50%, 75%, 100%) 对玄武岩宏观弹性模量的影响, 结果如图 14 所示。拟合结果显示, 随孔隙填充率增加, 玄武岩的宏观弹性模量显著提高 (图 14 (a))。拟合结果表明, 随着孔隙填充率的增加, 玄武岩宏观弹性模量显著上升 (图 14 (b))。需注意, 本研究假设填充物为均质黏土矿物, 未考虑不同孔隙类型的填充物非均质性, 未来研究可进一步探讨这一点。



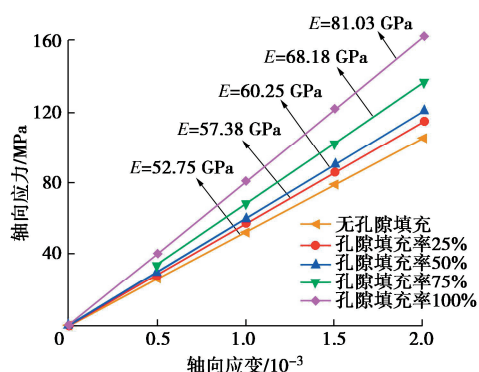
(a) 玄武岩 AGBM 单轴压缩应力-应变曲线



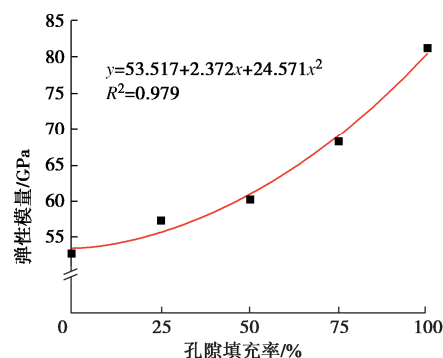
(b) 孔隙率与玄武岩宏观弹性模量的拟合关系

图 13 不同孔隙率下玄武岩的宏观弹性模量

Fig. 13 Macroscopic elastic moduli of basalt under different porosity values



(a) 玄武岩 AGBM 单轴压缩应力-应变曲线



(b) 孔隙填充率与玄武岩宏观弹性模量的拟合关系

图 14 不同孔隙填充百分比下玄武岩的宏观弹性模量

Fig. 14 Macroscopic elastic moduli of basalt under different pore fillings

## 5 结 论

本文提出了一种适用于非标准尺寸和形状玄武岩样本的力学参数测试方法, 以适用于特殊工程的力学测量需求。通过纳米压痕法测量了玄武岩中各矿物的微观弹性模量, 结合精确矿物模型 (AGBM) 及尺度升级方法, 对玄武岩的宏观弹性模量进行了预测和分析。主要得到以下 4 点结论。

(1) 纳米压痕测试测得玄武岩中 4 种主要矿物的弹性模量均值分别为: 长石 73.03 GPa、辉石 125.71 GPa、橄榄石 124.50 GPa 和 钛铁矿 97.51 GPa。

(2) 精确矿物晶体模型 (AGBM) 能够有效整合微观力学参数与真实岩石微观结构, 所得结果与宏观试验值具有良好的一致性, 误差仅为 6.3%, 显示出该方法在玄武岩微观力学参数尺度升级中的适用性和准确性。

(3) 传统的均质化方法 (如 Voigt-Reuss-Hill、Mori-Tanaka 及稀释方案) 在预测玄武岩的宏观弹性模量时误差较大, 远高于实际值, 主要由于这些方法忽视了玄武岩成岩过程中的矿物形状、孔隙特征和胶结关系。相较之下, AGBM 方法能够更好地捕捉玄武岩的微观结构特征。

(4) 晶间相弹性模量的提高和孔隙填充率的增加会显著增强玄武岩的宏观弹性模量, 而孔隙率的增加则显著降低宏观弹性模量。未来研究在进行玄武岩多尺度力学分析时, 需充分考虑晶间相性质、孔隙特征及孔隙填充的非均匀性, 以更准确地预测玄武岩的力学性能。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 齐妹霞和刘一苇设计研究内

容, 唐旭海、严成增和刘泉声提供研究指导, 齐姝霞和刘一苇完成计算分析, 齐姝霞和张俊楷完成实验, 齐姝霞和刘一苇参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by QI Shuxia and LIU Yiwei and supervised by TANG Xuhai, YAN Chengzeng, and LIU Quansheng. The numerical analyses were conducted by QI Shuxia and LIU Yiwei. The experiments were conducted by QI Shuxia and ZHANG Junkai. The manuscript was drafted and revised by QI Shuxia and LIU Yiwei. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

### 参考文献:

- [1] WILKINSON J F G. Classification and average chemical compositions of common basalts and andesites[J]. *Journal of Petrology*, 1986, **27**(1): 31-62.
- [2] LIM D S S, ABERCROMBY A F J, KOB S NAWOTNIAK S E, et al. The BASALT research program: designing and developing mission elements in support of human scientific exploration of Mars[J]. *Astrobiology*, 2019, **19**(3): 245-259.
- [3] EINEN J, THORSETH I H, OVREÅS L. Enumeration of Archaea and Bacteria in seafloor basalt using real-time quantitative PCR and fluorescence microscopy[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2008, **282**(2): 182-187.
- [4] 冯佰研, 秦哲, 牛传星, 等. 水岩作用下露天矿蚀变岩石力学试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, **44**(3): 39-43, 105. (FENG Baiyan, QIN Zhe, NIU Chuanxing, et al. Study on mechanics test of altered rock under water-rock interaction in surface mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, **44**(3): 39-43, 105. (in Chinese))
- [5] 谭赢, 刘希灵, 赵宇喆. 基于巴西劈裂试验的岩石声发射特性及断口特征分析[J]. *实验力学*, 2021, **36**(2): 241-249. (TAN Ying, LIU Xiling, ZHAO Yuzhe. Acoustic emission parameter characteristics and fracture morphology analysis of rocks based on Brazilian splitting test[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, **36**(2): 241-249. (in Chinese))
- [6] 周喻, MISRA A, 吴顺川, 等. 岩石节理直剪试验颗粒流宏观细观分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(6): 1245-1256. (ZHOU Yu, MISRA A, WU Shunchuan, et al. Macro-and meso-analyses of rock joint direct shear test using particle flow theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(6): 1245-1256. (in Chinese))
- [7] SHAO Z L, WANG Y, TANG X H. The influences of heating and uniaxial loading on granite subjected to liquid nitrogen cooling[J]. *Engineering Geology*, 2020, **271**: 105614.
- [8] MA Z Y, PATHEGAMA GAMAGE R, ZHANG C P. Application of nanoindentation technology in rocks: a review[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, **6**(4): 60.
- [9] LIU X Y, XU D P, DUAN S Q, et al. Study on the micromechanical and crack characteristics of granite based on nanoindentation test and discrete element method[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2024, **11**(4): 1547-1563.
- [10] MA Z Y, ZHANG C P, PATHEGAMA GAMAGE R, 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.
- [11] LIU Y W, LIU Q S, WU Z J, et al. Cross-scale mechanical softening of Marcellus shale induced by CO<sub>2</sub>-water-rock interactions using nanoindentation and accurate grain-based modeling[J]. *Underground Space*, 2024, **19**: 26-46.
- [12] BENNETT K C, BERLA L A, NIX W D, et al. Instrumented nanoindentation and 3D mechanistic modeling of a shale at multiple scales[J]. *Acta Geotechnica*, 2015, **10**(1): 1-14.
- [13] ZHOU Z L, LEI B X, CAI X, et al. Estimating macrofracture toughness of sandstone based on nanoindentation[J]. *Geofluids*, 2021, **2021**(1): 6621643.
- [14] 陈玉丽, 马勇, 潘飞, 等. 多尺度复合材料力学研究进展[J]. *固体力学学报*, 2018, **39**(1): 1-68. (CHEN Yuli, MA Yong, PAN Fei, et al. Research progress in multi-scale mechanics of composite materials[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2018, **39**(1): 1-68. (in Chinese))
- [15] ZHANG Y H, WONG L N Y. A review of numerical techniques approaching microstructures of crystalline rocks[J]. *Computers & Geosciences*, 2018, **115**: 167-187.
- [16] ZHANG Y H, WONG L N Y, CHAN K K. An extended grain-based model accounting for microstructures in rock deformation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, **124**(1): 125-148.
- [17] TANG X H, ZHANG Y H, XU J J, et al. Determining Young's modulus of granite using accurate grain-based modeling with microscale rock mechanical experiments[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, **157**: 105167.
- [18] 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): e2022JB024920.
- [19] HRSTKA T, GOTTLIEB P, SKÁLA R, et al. Automated mineralogy and petrology-applications of TESCAN integrated mineral analyzer (TIMA)[J]. *Journal of Geosciences*, 2018: 47-63.
- [20] 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 Part B): 4457-4463.
- [21] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. *Journal of Materials Research*, 1992, **7**(6): 1564-1583.
- [22] CONSTANTINIDES G, RAVI CHANDRAN K S, ULM F J, et al. Grid indentation analysis of composite microstructure and mechanics: Principles and validation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, **430**(1/2): 189-202.
- [23] BASS J D. Elasticity of minerals, glasses, and melts[M]// *Mineral Physics & Crystallography*. Washington D C: American Geophysical Union, 2013: 45-63.
- [24] CHRISTENSEN N I. Poisson's ratio and crustal seismology[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, **101**(B2): 3139-3156.
- [25] 张妹珠, 许婧璟, 江 权, 等. 基于原子力显微镜的板岩杨氏模量宏微观跨尺度表征方法研究[J]. *岩土力学*, 2022, **43**(增刊 1): 245-257. (ZHANG Meizhu, XU Jingjing, JIANG Quan, et al. Cross-scale characterization of the Young's modulus of slate using atomic force microscopy[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, **43**(S1): 245-257. (in Chinese))
- [26] SADEGHPOUR F, DARKHAL A, GAO Y F, et al. Comparison of geomechanical upscaling methods for prediction of elastic modulus of heterogeneous media[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2024, **239**: 212915.
- [27] AL-HARTHI A A, AL-AMRI R M, SHEHATA W M. The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia[J]. *Engineering Geology*, 1999, **54**(3/4): 313-320.
- [28] 黄玉龙, 张 皓, 郭 强, 等. 低阻玄武岩的矿物学特征及其油气地质意义——以辽河坳陷古近系为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, **54**: 1-13. (HUANG Yulong, ZHANG Hao, GUO Qiang, et al. Mineralogical characteristics of low resistivity basalt and its petroleum geological significance: a case study of paleogene in Liaohe depression[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2024, **54**: 1-13. (in Chinese))