文章编号:1672-3961(2025)04-0093-15 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.271

基于 PFC-GBM 方法的矿物组成对花岗岩单轴压缩力学特性影响

张庆豪[1,2,3],马瑞阳[1,2,3],林鹏[1,2,3*],谢辉辉[2,3,4],王朝阳[1,2,3],亢金涛[1,2,3],娄彦飞[1,2,3]
(1.山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2.隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 山东 济南 250061; 3.山东大学岩土与地下工程研究院,山东 济南 250061; 4.山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:为研究花岗岩内各类矿物的体积分数、矿物粒径大小、矿物粒径分布非均匀性 3 个因素对花岗岩抗压力学特性的影响规律,采用 GBM (grain-based model)方法对花岗岩微观矿物组成建模,确定了各因素影响抗压力学特性的强弱,在裂纹演化的角度揭示各因素影响抗压力学特性的机理。研究结果表明:各参数与花岗岩强度均有较高的相关性,花岗岩抗压强度随石英、长石体积分数及平均粒径的增长呈上升趋势,随云母体积分数与非均质因子的增加呈下降趋势;矿物体积分数对强度影响由强到弱为石英、长石、云母体积分数,粒径参数对强度影响次序为平均粒径、非均质因子;矿物体积分数与晶内 3 种接触占比增减的相关性较高,平均粒径主要影响晶内与晶间接触占比,非均质因子则会导致同种与异种晶间接触占比发生变化,这 3 种方式都能够在不同程度上改变模型破裂所消耗的能量和裂纹发育路径,进而影响单轴抗压强度。

关键词:花岗岩; 矿物组成; GBM 模型; particle flow code(PFC); 抗压强度; 裂纹演化
中图分类号:TU452 **文献标志码**:A
引用格式:张庆豪,马瑞阳,林鹏,等. 基于 PFC-GBM 方法的矿物组成对花岗岩单轴压缩力学特性影响[J].山东大学学报(工学版),2025,55(4):93-107.
ZHANG Qinghao, MA Ruiyang, LIN Peng, et al. The influence of mineral composition on uniaxial compression mechanical properties of granite based on PFC-GBM method[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(4):93-107.

The influence of mineral composition on uniaxial compression mechanical properties of granite based on PFC-GBM method

ZHANG Qinghao[1,2,3], MA Ruiyang[1,2,3], LIN Peng[1,2,3*], XIE Huihui[2,3,4], WANG Zhaoyang[1,2,3], KANG Jintao[1,2,3], LOU Yanfei[1,2,3]
(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 2. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 4. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In order to investigate the influence of three factors, namely the volume fraction, particle size and non-uniform distribution of various minerals in granite, on its compressive properties, the GBM (grain-based model) method was used to model the mineral composition of granite, to determine the strength of each factor′s influence on compressive mechanical properties, and to reveal the mechanism of each factor′s influence on compressive mechanical properties from the perspective of crack evolution. The results of the research showed that: each parameter had a high correlation with the strength of granite, and the granite compressive strength tended to increase with the growth of quartz and feldspar volume fraction and average grain size, and decrease with the increase of mica volume fraction and non-homogeneous factor; the influence of the mineral volume fraction parameter on the strength was in the order of strongest to weakest, which was the quartz, feldspar and mica, and the influence of the grain size parameter on the strength was in the following order average grain size, non-homogeneous factor; the correlation between the mineral volume

收稿日期:2024-10-21
基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52279103, 52379103);山东省自然科学基金优秀青年基金资助项目(ZR2023YQ049)
第一作者简介:张庆豪(2001—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为岩土体颗粒流数值模拟。E-mail:202215402@ mail.sdu.edu.cn
*通信作者简介:林鹏(1989—),男,山东潍坊人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为隧道及地下工程地质灾害预测预报与处置。
E-mail: sddxytlp@ sdu.edu.cn

fraction and the three types of intracrystalline contact ratio was high, the average grain size mainly affected the intracrystalline and inter-crystalline contact ratio, and the non-homogeneous factor led to change in the contact ratio of homogeneous and heterogeneous inter-crystalline contact, which were able to change the model rupture of the energy consumed and the path of crack development in varying degrees, and thus affected the uniaxial compressive strength.

Keywords: granite; mineral composition; grain-based model; PFC; compressive strength; crack evolution

0 引言

花岗岩是酸性岩类的典型代表,在地壳岩层中广泛分布,其矿物组成包括长石、石英等主要矿物及云母、角闪石等次要矿物,矿物颗粒发育良好且可见性强,在工程上影响花岗岩比较明显的是矿物成分、颗粒大小等因素。研究岩石材料的力学性质,重点在于从岩石本身即岩石的组构特征出发,采用理论分析、数值及室内试验相结合的方法[1-4],确定花岗岩的力学性质与其矿物组成之间的关系,尤其是定量关系,可以为花岗岩的损伤机理和破坏过程研究提供参考。

学者们针对花岗岩矿物组成对宏观力学特性的影响开展了广泛的研究。文献[5]的研究表明,岩石的强度和变形特性与其细观结构和矿物组成密切相关;文献[6]提出高强度矿物与软弱矿物的比例是影响花岗岩强度的重要因素,矿物的粒径大小也对岩石的强度产生影响;文献[7]的研究结果显示,高温会使得矿物尤其是石英晶体性质发生转变,最终导致花岗岩破裂特性的改变;文献[2]通过试验获得了多种岩样的力学参数,并分析了岩石矿物组成和微观结构对力学性质的影响;文献[8]对玄武岩进行了类似的研究,探究了黏土矿物和硬质矿物体积分数对岩石力学性质的影响;文献[9]通过研究矿物组分与岩石强度之间的关系指出,斜长石矿物体积分数的增加将导致岩石单轴抗压强度增加。此外,岩石特征应力与微观矿物结构也具有一定的关系。尽管国内外学者对花岗岩宏观力学特性进行了较多试验研究,但天然岩石材料微观矿物结构的随机性使得试验结果表现出较大的差异性[10],通过试验手段定量化研究矿物组成结构对花岗岩宏观力学特性的影响仍有一定的困难。

文献[11]提出的离散单元法(discrete element method, DEM)可在有效研究岩石宏观力学特性的前提下,从微观尺度对岩石内部裂纹的起裂、扩展及聚合规律进行研究。基于离散单元法的颗粒流程序 PFC(particle flow code)能够较好地模拟岩石在加载过程中的宏观特性,广泛应用于研究岩石的各项力学行为[12-13],但其先后开发的两种团簇模型 cluster 和 clump 模型[14]在研究矿物晶体结构对宏观力学特性影响方面仍有不足,无法真实反映出破裂机制。文献[15]将 GBM 引入到 PFC 中,每个晶体同样由几个黏结颗粒组成,但晶体可以发生变形和破碎,成功模拟了花岗岩等结晶岩石的微观结构。

在花岗岩材料的研究中,采用 PFC-GBM 方法模拟其在受力情况下的微观行为,通过揭示材料内部结构的特征和破坏过程的细节,可以深入了解其力学特征及裂纹演化过程[16-17]。在力学特征研究方面,文献[18]采用数值模拟方法研究了岩石粒径分布对力学行为及破坏方式的影响;文献[19]研究了晶粒排列均匀化程度及大小等微观结构变化对模型宏观力学性质的影响程度;文献[20]提出了一种新型的晶粒微观结构变换方法(microstructure transformation method, MTM),研究了晶粒优先取向对结晶岩宏观力学性能和微观特性的影响。在裂纹演化研究方面,文献[21-22]研究了花岗岩单轴及三轴压缩条件下岩石内部微裂纹的变化规律;文献[23]基于计算机层析成像和基于晶粒的模型 CT-GBM (computed tomography and grain-based model) 建立花岗岩热力耦合数值模型,研究了高温对花岗岩微裂纹行为的影响;文献[24]提出了一种在 PFC 中建立 3D-GBM 的方法,根据试验及模拟结果分析了花岗岩的断裂模式;文献[25]建立了围压和裂隙倾角双重因素影响下花岗岩应力峰值经验模型,并从微观尺度上阐明了花岗岩微裂纹破裂机理。

上述研究通过采用物理试验及数值模拟等方式,表明矿物组成各因素对岩石尤其是花岗岩这类结晶岩宏观性质影响明显并分析得到一些基本规律,但对这三个因素影响程度的分析比对与作用机制仍需进一步探究。本研究采用颗粒流矿物晶体模型(PFC-GBM)对花岗岩矿物晶体结构进行建模及单轴压缩模拟,系统分析了矿物组成各因素对花岗岩宏观力学特性的影响规律及影响程度的对比,同时在微观尺度揭示了花岗岩在单轴压缩过程中的裂纹演化特征,探究了其对花岗岩宏观力学特性影响的作用机理。

1　花岗岩矿物晶体模型构建及微观参数确定

矿物晶体模型（GBM）是分析花岗岩等结晶岩的有效工具，本节基于矿物晶体模型的构建方法，采用更精细的方式划分接触类型并完成参数标定。在模拟过程中记录应力-应变曲线，参照接触划分方式改进原有裂纹监测程序，统计细观裂纹的类型与数目，最终揭示矿物组成对与单轴抗压强度和裂纹演化模式的关系。

1.1　花岗岩矿物晶体模型构建

根据文献[15]提出的 GBM 模型构建方法，对照花岗岩特性，其模型构建过程（见图 1）为：依照矿物占比及晶体尺寸生成原始颗粒（见图 1（a））；围绕各原始颗粒生成 Voronoi 多边形网格（见图 1（b））；在网格中填充基础颗粒形成矿物晶体模型（见图 1（c））。

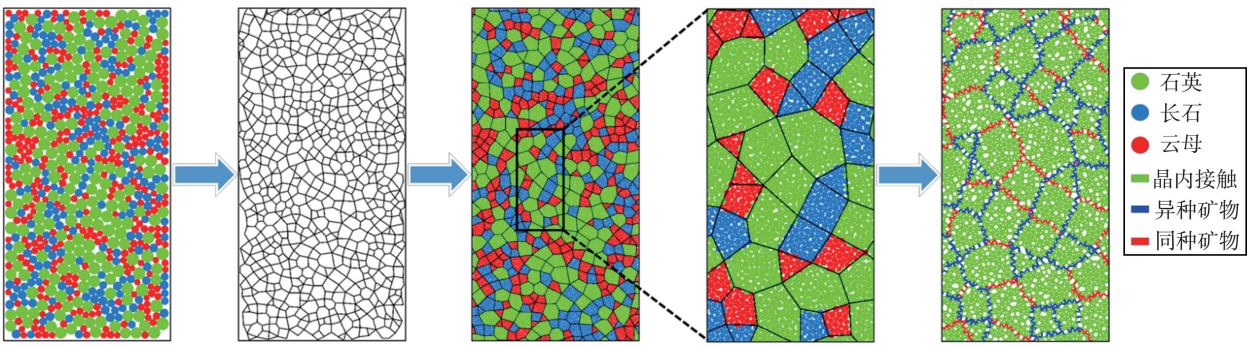


图 1　GBM 构建流程与接触分组

Fig.1　GBM construction process and contact grouping

矿物晶体模型的构建依照现有步骤，将模型中矿物晶体分为石英、长石、云母 3 种矿物，并基于此构建多级平行黏结矿物划定接触类型[26]。将模型颗粒间的接触分为晶体内部、同种矿物晶间、不同矿物晶间 3 个级别，各级依照矿物种类进一步分类，晶内接触分为石英、长石与云母 3 类，同种矿物晶间接触亦是如此，异种矿物晶间接触可分为石英-长石、石英-云母与长石-云母 3 类。如图 1（d）所示，不同颜色颗粒分别代表 3 类矿物，黑色线条即为晶体边界，其内外接触参数各异；晶内接触、同种矿物晶间、异种矿物晶间三级接触与晶体边界位置关系如图 1（e）所示。

矿物晶体模型涉及颗粒较多，在不影响计算结果的前提下，为提高计算速度，取模型高 80 mm，宽 40 mm。模型中涉及的细观参数分为基础参数组、接触组，前者由模型基本原理与模拟对象矿物组成参数所限制，相对固定，后者则是需要标定的主要对象。其中基础参数组最小粒子半径 0.15 mm，粒子半径比 1.66，石英、长石、云母的体积分数分别为 25%、50%、25%，晶体粒径分别为 2.43±0.25 mm、3.42±0.25 mm、1.98±0.25 mm[14]；晶内接触参数按照矿物类型划分为 3 组，同种晶间接触参数与异种晶间接触参数同样可分为 3 组。

1.2　微观参数确定

在 PFC 中对于矿物晶体模型（GBM）无法直接采用矿物晶体的宏观力学参数，但各晶体内细观参数相对大小仍满足宏观力学参数规律，强度相关参数符合石英>长石>云母；在此基础上，设定初始细观参数，遵循适用于平行黏结模型（linear parallel bond model，LPBM）的宏观参数与细观参数间的基本规律，基于文献[14]所得力学试验结果，在相同矿物体积分数下采用“试错法”对细观参数进行校准，为简化标定过程取 $k^*=kp^*$、$E^*=Ep^*$，经过多次尝试后，标定得到的细观参数结果如表 1 所示，数值试验模拟结果与力学试验结果对比如表 2 所示。

表 1　模型细观参数校准结果

Table 1　Calibration results of model microscopic parameter

细观参数		刚度比	线性有效模量/GPa	平行黏结刚度比	平行黏结有效模量/GPa	黏聚力/MPa	法向强度/MPa	摩擦角/(°)	摩擦系数
晶内接触	石英	1.0	47	1.0	47	150	100	19.5	0.35
	长石	2.0	42	2.0	42	112	75	22.4	0.41
	云母	3.1	33	3.1	33	96	64	17.3	0.33

表 1(续)

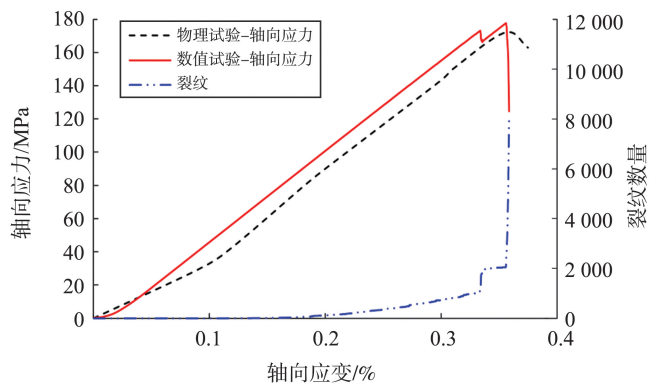
细观参数		刚度比	线性有效模量/GPa	平行黏结刚度比	平行黏结有效模量/GPa	黏聚力/MPa	法向强度/MPa	摩擦角/(°)	摩擦系数
同种矿物晶间接触	石英-石英	1.0	33	1.0	33	84	31	19.5	0.35
	长石-长石	1.2	29	1.2	29	63	23	22.4	0.41
	云母-云母	1.9	23	1.9	23	54	20	17.3	0.33
异种矿物晶间接触	长石-云母	1.6	26	1.6	26	58	21	19.9	0.37
	石英-云母	1.3	27	1.3	27	69	25	18.4	0.34
	石英-长石	1.9	31	1.9	31	73	27	21.0	0.38

表 2 花岗岩力学特性对比表

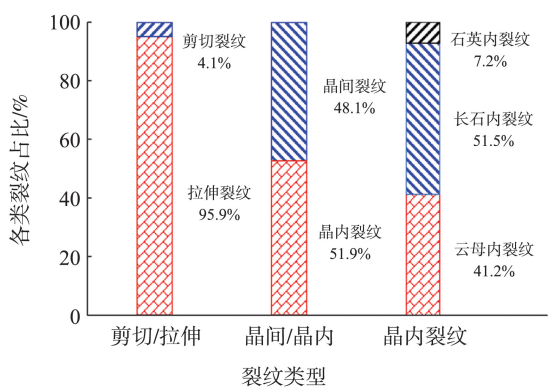
Table 2 Comparison of mechanical properties of granite

宏观参数	泊松比	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa
室内试验	0.229	52.400	172.000
数值模拟	0.220	52.100	176.440
误差/%	3.93	0.57	2.58

结果显示模型泊松比 v、弹性模量 E、单轴抗压强度 σ_c 均接近力学试验数据。单轴压缩数值试验所得应力-应变曲线如图 2(a)所示,其中峰值应变 ε_p 为 0.356,与力学试验数值0.36接近,峰值应变前后也对应着裂纹快速扩展及破坏的发生。破坏时裂纹类别如图 2(b)所示,此时张拉破坏占据主导地位;同时矿物晶体内裂纹相比于晶间裂纹占优势,与文献[27]所得结论一致;此外矿物晶体内裂纹中受矿物体积分数与力学性质强弱影响,长石体积分数最高且力学性质偏弱,裂纹数量占主导地位,云母内裂纹次之,石英内裂纹最少。



(a) 试验及模拟应力-应变曲线



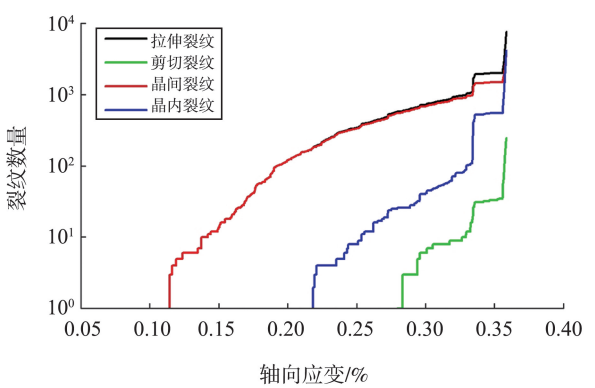
(b) 数值模拟各类裂纹占比

图 2 数值模拟结果对比图

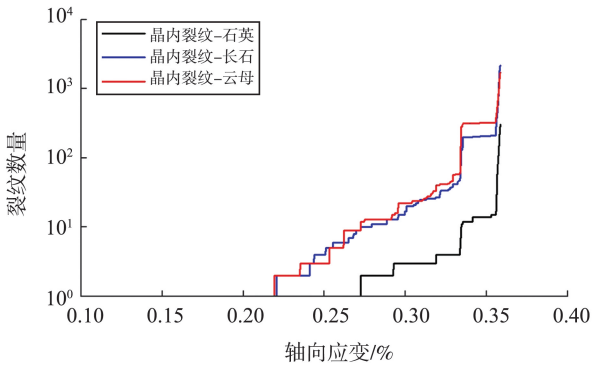
Fig.2 Comparison of numerical simulation results

1.3 细观尺度下的单轴压缩裂纹演化模式

为进一步分析单轴压缩条件下裂纹的演化模式,采用 PFC 内置的 Fish 函数改进后进行裂纹数量监测,如图 3 所示,模型受单轴压缩而破坏的过程中,首先发育的是拉伸裂纹,并在整个破坏过程中占主导地位,在应力达到峰值前,产生的晶内裂纹较少,在完全破坏时刻,晶内裂纹占据主导地位,主要为长石及云母晶内裂纹,裂纹分布由随机分布于矿物晶间至矿物晶内晶间聚集成簇。裂纹发育次序与数量的差距主要取决于该处接触失效所需的能量高低,受接触黏结强度大小影响,在同一应力水平下接触强度小的部位首先产生裂纹[28-29];但随着应力的增长,尤其是晶内裂纹的发育使得由于细观组构非均匀性造成的应力集中更加明显,新的裂纹更易在已有裂纹附近萌生,故破裂分布由晶间均匀分布,转为晶内-晶间破裂面附近聚集成簇,最终贯通整个模型,峰值应力正是这一转变的临界点,因此该值的大小不仅取决于各类接触参数的大小,还受到细观组构因素的影响。



(a) 拉伸/剪切/晶内/晶间-裂纹化演化过程



(b) 矿物晶体内裂纹演化过程

图 3　单轴压缩条件下各类裂纹演化过程

Fig.3　The evolution process of various cracks under uniaxial compression

2　花岗岩矿物晶体模型模拟结果

在研究花岗岩强度特性时，矿物组成的影响至关重要，开展室内试验进行探究成本较高且容易受到多种因素的干扰，难以研究单一因素的影响。本节通过构建花岗岩矿物晶体模型，探究矿物体积分数、矿物粒径大小与矿物粒径分布非均匀性对花岗岩强度的影响规律；结合不同影响因素下晶内及晶间裂纹占比、模型单轴压缩破坏时的裂纹形态等数据，分析不同矿物组成对花岗岩单轴抗压强度影响的作用机理。

2.1　工况设计

2.1.1　矿物粒径参数设置

矿物粒径大小及粒径分布非均匀性对岩石力学特性影响明显[30]，为反映矿物粒径大小即细粒或粗粒的特性，本研究采用平均粒径 d 来表征，矿物粒径分布非均匀性采用非均质因子 H 来进行表征，两影响因素均采用文献[31]提出的表征方法，计算公式为

$$d=\frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{j}(w_i/\bar{d}_i^2)}},\tag{1}$$

$$H=\frac{1}{3j}\sum_{i=1}^{j}\sum_{k=1}^{3}\left|\frac{d_{ik}}{d}-1\right|,\tag{2}$$

式中，d_i、w_i 分别为第 i 种晶体颗粒的平均粒径和体积分数，j 为矿物晶体类型数，d_{i1}、d_{i2}、d_{i3} 分别为第 i 种晶体颗粒的最小粒径、平均粒径、最大粒径，d 为矿物平均粒径。

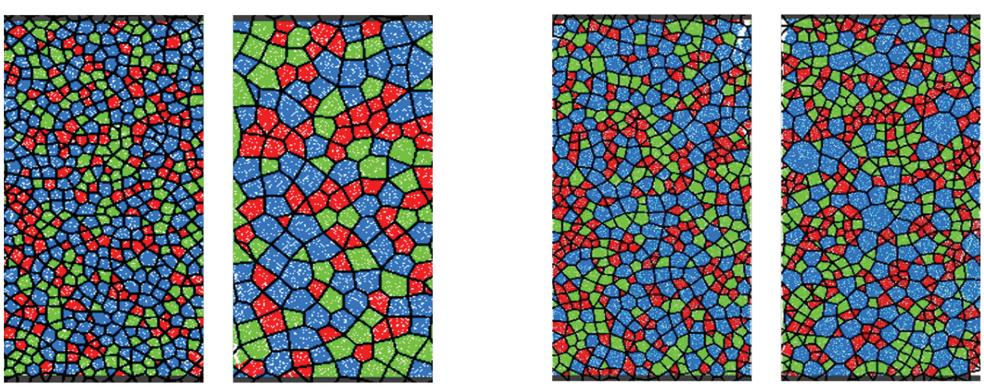
为探究单一因素对花岗岩单轴压缩力学特性的影响规律，以校准后模型为基准，分别将平均粒径设置为 d=1.5、2.5、3.5、4.5 mm，非均质因子设置为 H=0.11、0.30、0.45、0.60，同时根据式(1)可以看出平均粒径 d 不仅受各类矿物粒径大小的影响，还会以矿物体积分数的变化而调整，因此在设置平均粒径 d 及非均质因子 H 的基础上，选取 10 组矿物体积分数参数如表 3 所示，共生成 160 组模型。不同矿物粒径模型如图 4 所示，分别展示了不同矿物粒径大小及非均质因子条件下的模型状态。

表 3　矿物体积分数参数

Table 3　Mineral volume fraction parameters

单位：%

矿物	石英	长石	云母
P1	15	70	15
P2	15	80	5
P3	25	50	25
P4	25	60	15
P5	25	70	5
P6	30	50	20
P7	30	60	10
P8	30	65	5
P9	40	50	10
P10	40	55	5



(a) 不同矿物粒径大小模型示意图　　(b) 不同非均质因子模型示意图

图 4　不同矿物粒径模型示意图

Fig.4　Schematic diagram of different mineral particle size models

2.1.2 矿物体积分数参数设置

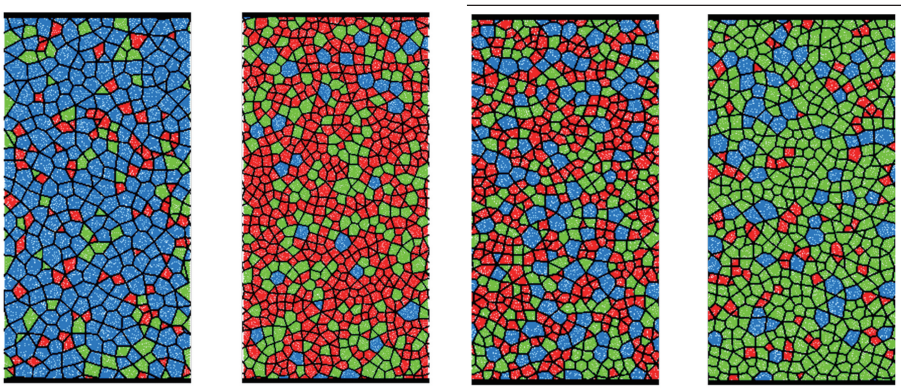
本研究中 GBM 矿物类型包括石英、长石、云母 3 类,矿物体积分数参数调整以这三者为基础,为避免样本量过小及某些特殊情况造成的分析结果差异,石英与长石矿物体积分数变化范围为 5%~ 95%,云母矿物体积分数变化范围为 0%~90%,以 5 位间隔进行矿物体积分数参数设置,如表 4 所示,共生成模型 190 组,在矿物成分方面涵盖大部分花岗岩类型。矿物体积分数的变化会导致平均粒径 d 与非均质因子 H 的变化,为保持统一,平均粒径 d 取值为 2.2~2.8 mm,非均质因子 H 取值为 0.21 ~ 0.25,各模型随机参数一致。不同矿物体积分数模型如图 5 所示,分别展示了石英、长石、云母体积分数占据主导地位及三者体积分数较为均衡的 4 种模型状态,绿色为石英、蓝色为长石、红色为云母,图中括号内数字依次表示石英、长石、云母体积分数。

表 4 矿物体积分数参数设置

Table 4 Mineral volume fraction parameters setting

单位:%

矿物	石英	长石	云母
M1	5	5	90
M2	5	10	85
…	…	…	…
M188	90	5	5
M189	90	10	0
M190	95	5	0



(10, 80, 10) (a) M35　(30, 10, 60) (b) M87　(30, 30, 40) (c) M91　(70, 20, 10) (d) M173

图 5 不同矿物体积分数模型示意图

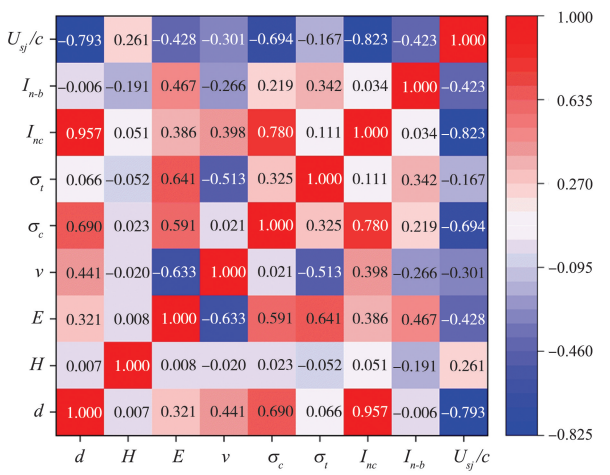
Fig.5 Different mineral volume fraction model diagram

2.2 不同矿物组成对单轴压缩影响规律研究

2.2.1 矿物粒径对单轴压缩影响规律

以校准后模型为基准,将改变平均粒径 d 与非均质因子 H 生成的 160 组模型完成数值试验后对结果进行统计,平均粒径 d 和非均质因子 H 与宏观力学参数及裂纹占比参数相关性如图 6 所示,颜色的加深代表两个变量间相关性的增加。除单轴抗拉强度外,平均粒径 d 与各参数的相关性均较高;平均粒径与长石裂纹占晶内裂纹之比呈负相关外,与其他各参数均呈正相关;除了异种晶间裂纹占比 U_{sj}/c 外,非均质因子 H 与泊松比 v、弹性模量 E 等的相关性水平均不高,与单轴抗压强度为负相关性,与异种晶间裂纹占比 U_{sj}/c 为正相关。

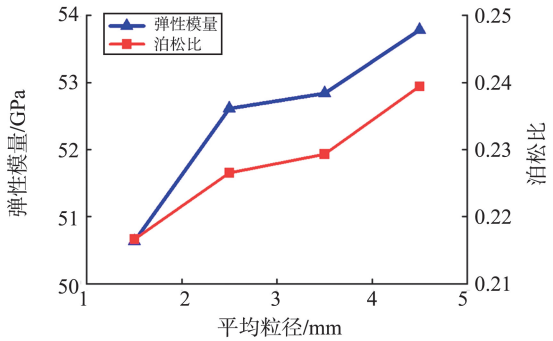
矿物体积分数 P1 条件下不同矿物粒径大小及非均质因子条件下的花岗岩泊松比及弹性模量两宏观力学参数的变化规律如图 7 所示,在非均质因子一定的情况下,模拟所得弹性模量及泊松比的整体变化趋势随矿物平均粒径的增长而增长,在矿物平均粒径一定的情况下,模拟所得弹性模量及泊松比的整体变化趋势随非均质因子的增长存在小幅度的波动,两者变化规律与相关性分析一致,即弹性模量和泊松比与平均粒径存在正相关性,与非均质因子相关性较弱。



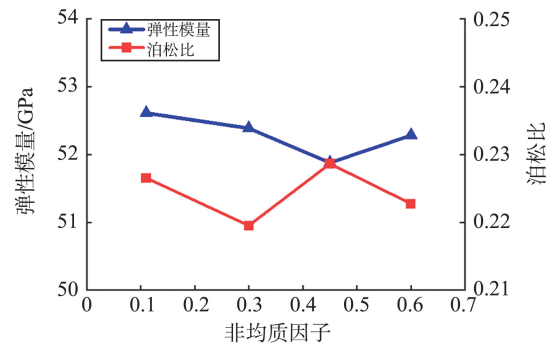
注:弹性模量 E、泊松比 v、单轴抗压强度 σ_c、单轴抗拉强度 σ_t、晶内裂纹占总裂纹之比 I_{nc}、长石内裂纹占晶内裂纹之比 $I_{n\text{-}b}$、异种晶间裂纹占比 U_{sj}/c。

图 6 矿物粒径与各参数相关性

Fig.6 Correlation between mineral particle size and various parameters



(a) 平均粒径与弹性模量和泊松比变化曲线



(b) 非均质因子与弹性模量和泊松比变化曲线

图 7　不同粒径参数与弹性模量和泊松比变化曲线

Fig.7　Variation curves of elastic modulus and Poisson's ratio with different particle size parameters

单轴抗压强度是表征花岗岩单轴压缩力学特性最为重要的参数之一，对粒径大小和粒径分布非均匀性与单轴抗压强度开展关联度分析得到结果如表 5 所示，非均质因子 H 与单轴抗压强度的灰色关联度要低于平均粒径 d。

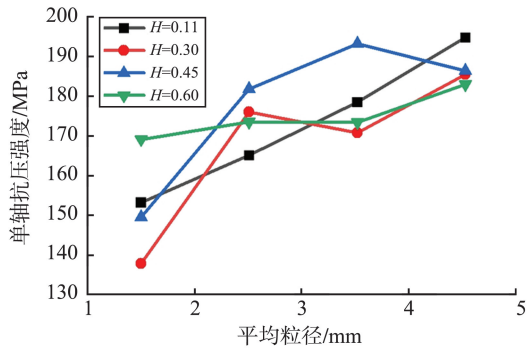
表 5　粒径大小和粒径分布与单轴抗压强度关联度分析

Table 5　Relation analysis between particle size and particle size distribution with uniaxial compressive strength

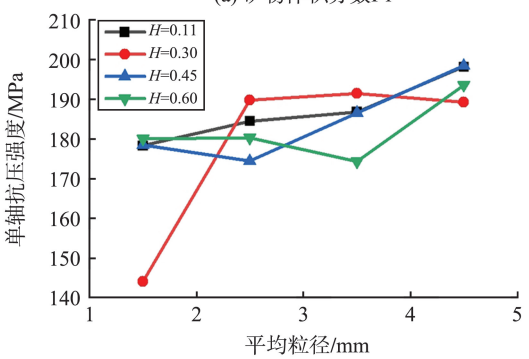
灰色关联度	平均粒径/mm	非均质因子
单轴抗压强度	0.617	0.57

平均粒径 d 与单轴抗压强度相关性较高，但随着其他因素的改变，平均粒径 d 对强度的影响程度乃至增减都会出现差异。平均粒径对单轴抗压强度的影响如图 8 所示，在不同矿物体积分数与非均质因子 H 条件下，随着矿物粒径 d 的增长，单轴抗压强度整体上均呈现上升趋势，但普遍存在不同程度的波动。此外，单轴抗压强度在不同平均粒径 d 增长阶段，变化幅度不同，多在 1.5~2.5 mm 阶段增长幅度最大。

非均质因子 H 与单轴抗压强度的相关性不高，随着其他因素的改变，非均质因子 H 对单轴抗压强度的影响程度差异明显，如图 9 所示，在不同矿物体积分数与平均粒径 d 条件下，随着非均质因子 H 的增长，单轴抗压强度数据呈现较大的离散性；可以观察到只有在某些矿物体积分数与平均粒径 d 的条件下，如在 P2 系列，平均粒径 d 为 1.5 mm 与 2.5 mm 时，非均质因子 H 与单轴抗压强度才会呈现较为良好的负相关性，而在部分条件下，单轴抗压强度呈上下波动乃至上升的趋势。



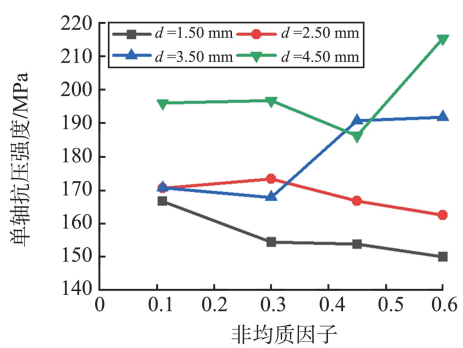
(a) 矿物体积分数P1



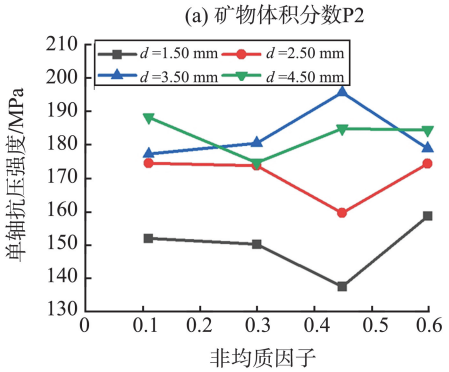
(b) 矿物体积分数P7

图 8　平均粒径对单轴抗压强度的影响

Fig.8　Effect of average particle size on uniaxial compressive strength



(a) 矿物体积分数P2



(b) 矿物体积分数P6

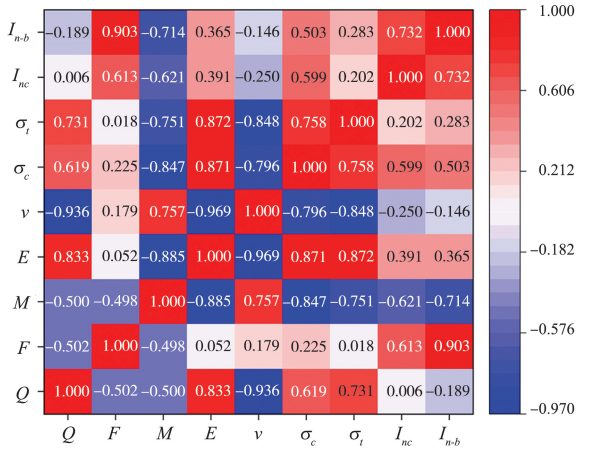
图 9　非均质因子对单轴抗压强度的影响

Fig.9　Effect of heterogeneity factor on uniaxial compressive strength

2.2.2 矿物体积分数对单轴压缩影响规律

将不同矿物体积分数的 190 组工况完成数值试验后对结果进行统计,通过相关性分析得出矿物体积分数与宏观力学参数及两个裂纹占比参数相关性如图 10 所示,长石与石英体积分数与单轴抗压强度呈正相关性,云母体积分数与之呈负相关;石英对晶内裂纹占比影响较小,长石体积分数与晶内裂纹占比为正相关,云母体积分数与之为负相关;三者与长石晶内裂纹占比均有较强的相关性,除长石外,另外两个参数与之均为负相关。

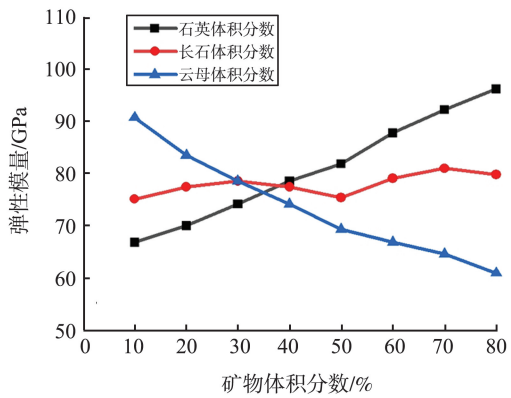
不同矿物体积分数与花岗岩弹性模量和泊松比两宏观力学参数的变化规律如图 11 所示,可以看出弹性模量随石英体积分数的增长而增长,随云母体积分数的增长而下降,泊松比的变化则与之相反,同时长石体积分数的变化对于两宏观力学参数的影响较小,变化规律与相关性分析一致。



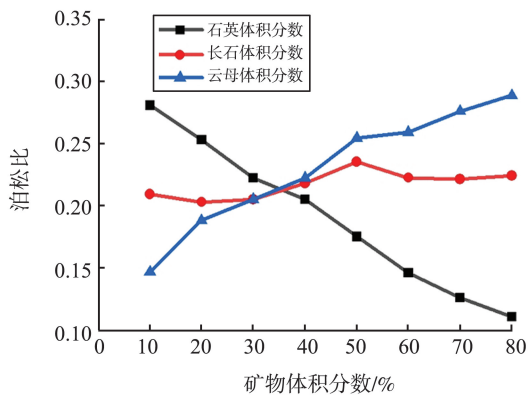
注:石英体积分数 Q、长石体积分数 F、云母体积分数 M、弹性模量 E、泊松比 v、单轴抗压强度 σ_c、单轴抗拉强度 σ_t、晶内裂纹占总裂纹之比 I_{nc}、长石内裂纹占晶内裂纹之比 I_{n-b}。

图 10 矿物体积分数与各参数相关性

Fig.10 Correlation between mineral volume fraction and various parameters



(a) 矿物体积分数与弹性模量变化曲线



(b) 矿物体积分数与泊松比变化曲线

图 11 不同矿物体积分数与弹性模量和泊松比变化曲线

Fig.11 Variation curves of elastic modulus and Poisson's ratio with different mineral volume fractions

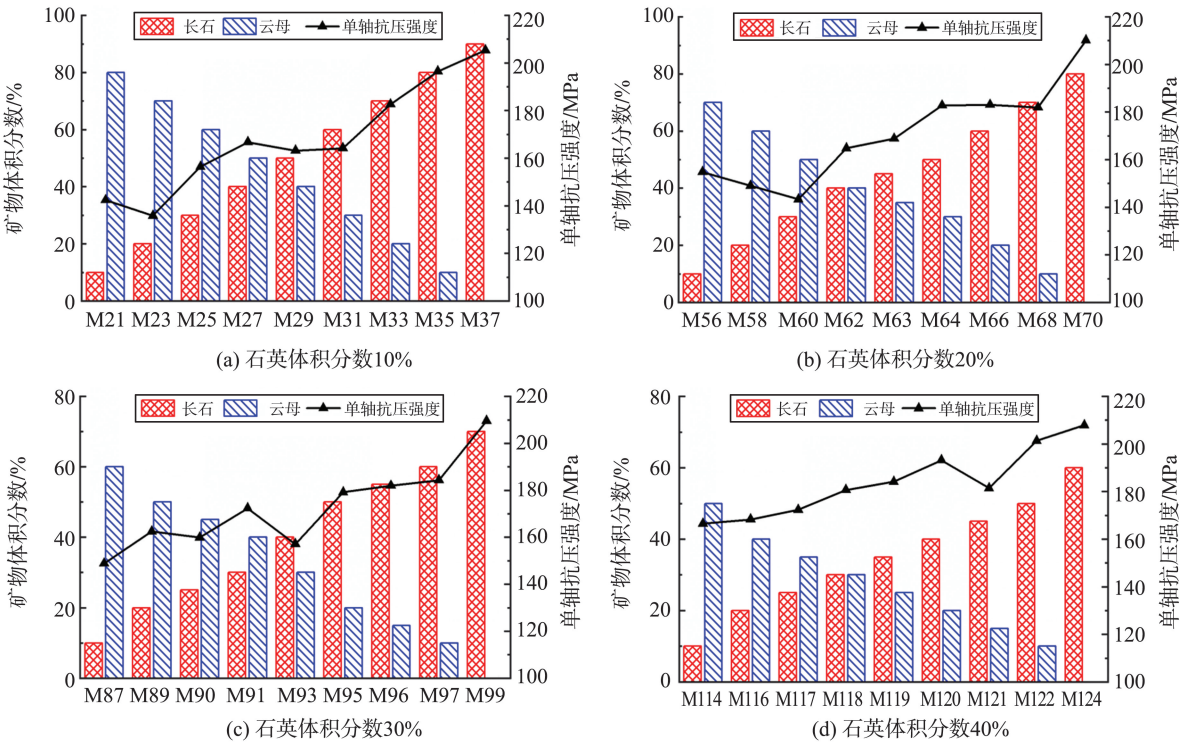
石英、长石、云母矿物体积分数与单轴抗压强度均有较强的相关性,除云母体积分数外,另外两个参数与单轴抗压强度为正相关,这与大部分研究结论一致,对不同矿物体积分数与单轴抗压强度开展关联度分析得到结果如表 6 所示,通过灰色关联度分析得矿物参数关联度次序为石英、长石、云母。

表 6 矿物体积分数与单轴抗压强度关联度分析

Table 6 Relation analysis between mineral volume fraction and uniaxial compressive strength

灰色关联度	石英体积分数	长石体积分数	云母体积分数
单轴抗压强度	0.722	0.703	0.641

矿物体积分数对单轴抗压强度的影响如图 12 所示,在相同石英体积分数条件下,调整长石与云母的体积分数研究其对单轴抗压强度的影响的统一性和差异性。通过分析得到单轴抗压强度-长石体积分数拟合结果如表 7 所示。比较不同石英体积分数条件下,对应的相关系数与变化速率,结果显示在不同石英体积分数条件下,随着长石体积分数的增长,单轴抗压强度均呈增长趋势,当石英体积分数较低时,所得拟合函数的相关系数较高,从图 12 中也可以看出此阶段曲线波动较小,这是由于当石英体积分数较低时,云母体积分数变化范围大,在其体积分数较高的阶段,模型单轴抗压强度一直徘徊在较低水平;随着石英体积分数的提升,云母体积分数可变化范围缩小,曲线整体的增长速率也不断提升,从这个角度也可以表明,当石英体积分数一定且云母体积分数在低于 20%乃至趋近于 0 的阶段,云母对单轴抗压强度的影响更加显著。



(a) 石英体积分数10%　(b) 石英体积分数20%

(c) 石英体积分数30%　(d) 石英体积分数40%

图 12　矿物体积分数对单轴抗压强度的影响

Fig.12　Effect of mineral volume fraction on uniaxial compressive strength

表 7　单轴抗压强度-长石体积分数拟合函数参数

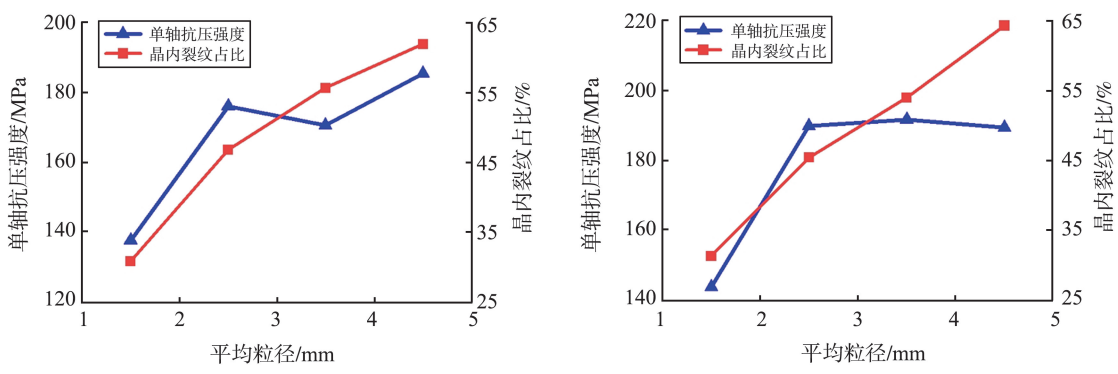
Table 7　Uniaxial compressive strength-feldspar volume fraction fitting function parameters

石英体积分数/%	R^2	k
10	0.82	3.14
15	0.76	3.36
20	0.79	3.89
25	0.77	3.39
30	0.85	3.87
40	0.89	5.10
50	0.60	4.48
60	0.51	3.37
70	0.55	7.29

2.3　矿物组成对单轴压缩破坏裂纹演化影响

2.3.1　矿物粒径大小对单轴压缩破坏裂纹演化影响

由矿物粒径与各参数相关性分析结果可知,在单轴压缩破坏时晶内裂纹占比与平均粒径 d 具有最高的相关性。以 $H=0.30$,矿物体积分数 P1 与 P7 条件下的数据为例,得出矿物晶内裂纹占比与单轴抗压强度随平均粒径 d 的变化如图 13 所示,随着平均粒径的增长,晶内裂纹占比逐渐提升,相应的矿物晶间裂纹占比呈下降趋势,在平均粒径 1.5 ~ 3.5 mm阶段增长速率较高而后趋于平缓。



(a) 矿物体积分数P1　(b) 矿物体积分数P7

图 13　平均粒径对晶内裂纹占比变化的影响

Fig.13　Effect of average particle size on the proportion of intragranular cracks

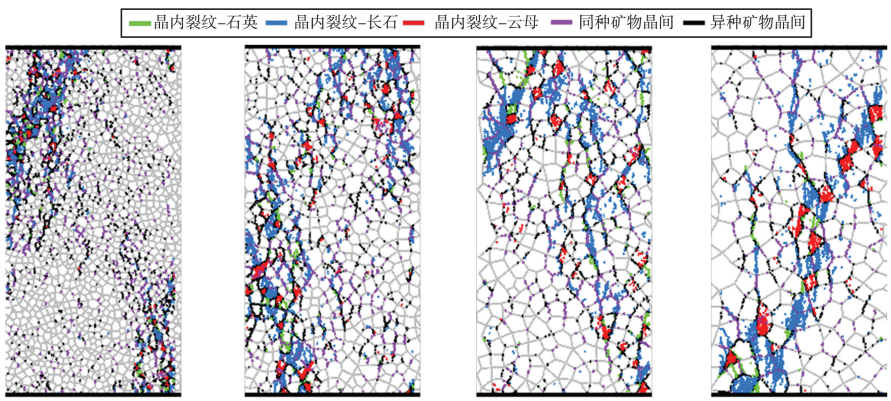
单轴抗压强度与各类裂纹占比都是模型受外部载荷作用的结果，在模型各类接触参数一定的情况下，其变化是由矿物组成差异造成的，直接体现为各类接触的比例增减与分布位置的变化。具体到矿物粒径大小：在矿物体积分数与非均质因子 H 一定的条件下，平均粒径 d 的提升，代表 3 类矿物晶体各自的平均粒径均有所增长。经统计，矿物体积分数为 P7 条件下各类接触占比变化如表 8 所示，比较其各类接触占比可以看出矿物晶内接触占比明显提升，同种与异种矿物晶间接触占比下降，即平均粒径主要影响晶内接触占比；而 3 类矿物的晶内接触占比基本保持一致，对模型整体强度的影响较小，不是平均粒径 d 起作用的主要方式。

表 8 各类接触随粒径增长的比例变化

Table 8 The proportion of various types of contact with the increase of particle size

d/mm	矿物晶内/%	同种矿物晶间/%	异种矿物晶间/%	石英晶内/%	长石晶内/%	云母晶内/%
1.5	66.91	13.28	19.81	30.27	60.52	9.21
2.5	79.59	8.01	12.40	30.83	59.00	10.17
3.5	84.90	5.95	9.16	35.38	55.32	9.30
4.5	88.31	5.05	6.64	27.99	63.79	8.22

以矿物体积分数 P7 为例，不同平均粒径下模型破裂时裂纹形态如图 14 所示。随着矿物晶体的普遍增大，裂纹更倾向于上下贯通模型，裂纹分布的分散程度降低，更加集中于贯通的破裂面两侧。在接近峰值时刻前，晶间裂纹在模型中随机均匀分布，随着矿物晶体增长晶间接触占比下降，相应的晶间裂纹占比减少，分布也更为集中；同时可以看到由于云母晶体力学性质较弱其裂纹成簇现象更明显，晶体破裂也更加彻底，长石晶内裂纹部分紧贴着晶间裂纹线性分布，另外一部分则从晶体中间贯穿，石英晶内裂纹与之类似，随着晶体粒径的增长，贯穿石英-长石晶体难度提升，模型整体承压能力也随之提升。



(a) d = 1.5 mm (b) d = 2.5 mm (c) d = 3.5 mm (d) d = 4.5 mm

图 14 不同平均粒径下模型破坏裂纹形态（P7）

Fig.14 Model failure crack morphology under different average particle sizes (P7)

2.3.2 矿物粒径分布非均匀性对单轴压缩破坏裂纹演化影响

由矿物粒径与各参数相关性分析结果可知，在单轴压缩破坏时异种晶间裂纹占比与非均质因子 H 具有较高的相关性，选取 d = 2.5 mm，矿物体积分数为 P2 与 P6 条件下的数据为例，得出模型中异种晶间裂纹占比与单轴抗压强度对非均质因子 H 的变化如图 15 所示，随着非均质因子 H 的增长，异种晶间裂纹占比 U_{sj}/c 整体随之上升，当非均质因子 H 从0.11～0.45 阶段，其增长速率较高，在最后阶段趋于平缓。

花岗岩矿物组成的差异具体到矿物粒径分布非均匀性主要体现在：在矿物体积分数与平均粒径 d 一定的条件下，随着非均质因子 H 的提升，代表 3 类矿物晶体各自的粒径的极差有所提升，尤其是长石粒径极差增长明显。经统计，矿物体积分数为 P2 条件下各类接触占比变化如表 9 所示，比较其各类接触占比可以看出矿物体积分数与非均质因子 H 对矿物晶内接触占比的影响均有限；石英晶内、长石晶内与云母晶内接触占比也基本保持一致，对模型整体强度的影响较小。因此，非均质因子 H 主要通过影响同种和异种晶间接触占比发挥作用。

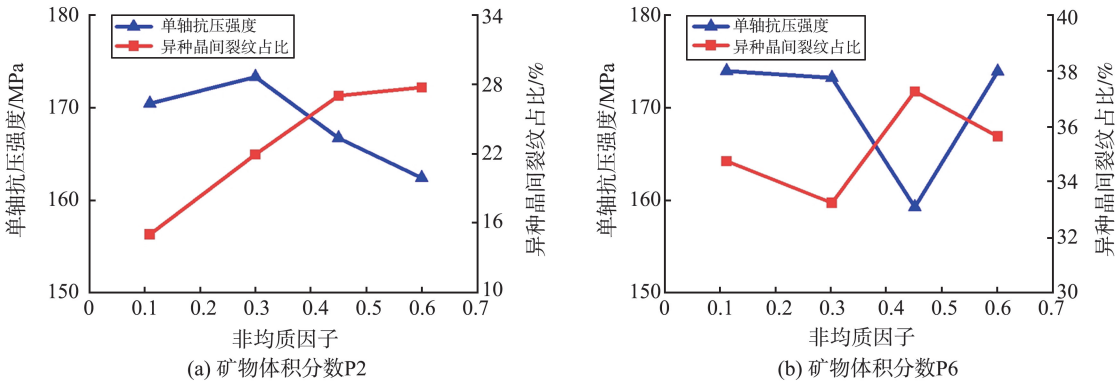


图 15　非均质因子对异种晶间裂纹占比的影响

Fig.15　Effect of heterogeneity factor on the proportion of heterogeneous intergranular cracks

表 9　各类接触随非均质因子增长的比例变化

Table 9　The proportion of various types of contact with the increase of heterogeneity factor

H	矿物晶内/%	同种矿物晶间/%	异种矿物晶间/%	石英晶内/%	长石晶内/%	云母晶内/%
0.11	79.52	13.74	6.74	15.05	80.20	4.75
0.30	79.99	11.02	8.99	17.57	77.41	5.02
0.45	80.54	9.60	9.86	15.64	79.56	4.80
0.60	81.07	7.78	11.15	14.87	79.61	5.52

以矿物体积分数 P2 为例,不同非均质因子 H 模型破裂时裂纹形态如图 16 所示。模型的破裂倾向于贯通整个模型,随着非均质因子 H 的增长,异种晶间接触占比提升,在破裂面附近发育更多异种晶间裂纹,裂纹贯穿长石晶体的情况相对减少,更多地沿着晶体边界发育,一定程度上降低了裂纹起裂发育需要达到的应力水平,使得模型整体接触失效的难度有所下降,相应的单轴抗压强度也随之下降。

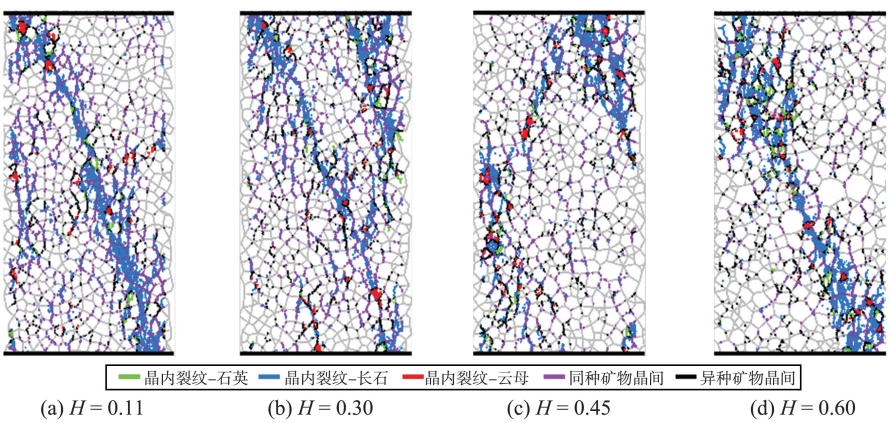


图 16　不同非均质因子下模型破坏时裂纹形态（P2）

Fig.16　Model failure crack morphology under different heterogeneous factor (P2)

2.3.3　矿物体积分数对单轴压缩破坏裂纹演化影响

由于矿物体积分数变化会导致模型各类接触数量与承压时应力集中情况发生变化,最终在完全破坏时刻不同模型各类裂纹占比各不相同。在石英体积分数一定的条件下,模型中长石晶内裂纹占比随长石体积分数的变化最为明显。长石体积分数对长石晶内裂纹占比的影响如图 17 所示,随着长石体积分数的增长,其裂纹占比变化整体趋势基本一致,晶内裂纹占比在长石体积分数小于 50% 时增长较为缓慢,在云母体积分数趋近于 0 时波动较大且占比增长也更为明显,与单轴抗压强度的变化趋势一致。

单轴抗压强度与裂纹占比随矿物体积分数的变化趋势基本保持一致,从模型接触角度看,这是由于矿物体积分数的更改导致了模型中各类接触的比例和分布调整,当石英体积分数为 30%,模型中各类接触占比变化如表 10 所示。此时矿物晶内接触占比增大、同种矿物晶间与异种矿物晶间接触占比减小,这是由于长石矿物粒径最大,当长石体积分数提升时,相当于模型平均粒径 d 小幅度提升,晶内接触占比也随之上升,但在大多数情

况下影响有限。随着长石体积分数的增长,石英矿物晶内接触占比不变,长石晶内接触占比增长,云母内接触占比则下降,这与晶内 3 类裂纹变化趋势接近。

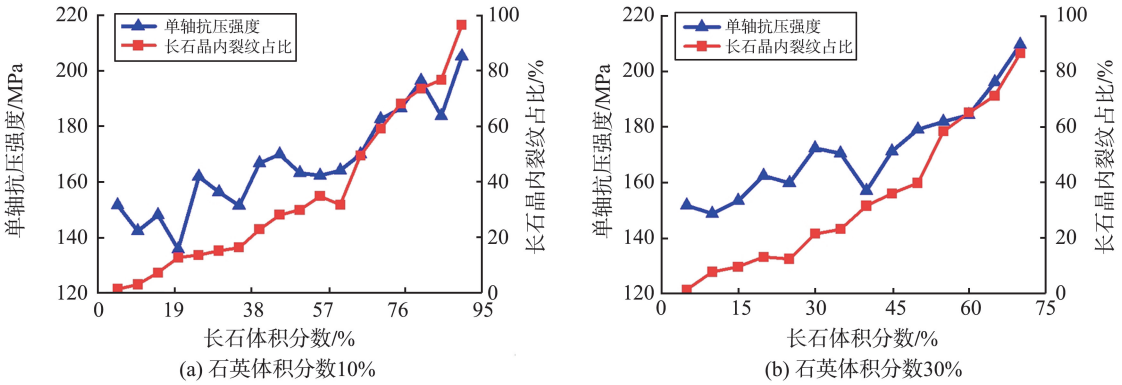


图 17 长石体积分数对长石晶内裂纹占比的影响

Fig.17 Effect of feldspar volume fraction on the proportion of cracks in feldspar crystals

表 10 各类接触占比随矿物体积分数变化(石英体积分数 30%)

Table 10 The proportion of various types of contact varies with mineral volume fraction (quartz volume fraction 30%)

单位:%

长石体积分数	矿物晶内	同种矿物晶间	异种矿物晶间	石英晶内	长石晶内	云母晶内
10	77.00	11.71	11.29	37.38	10.19	52.43
30	79.08	7.67	13.25	32.13	32.54	35.33
50	81.11	5.96	12.93	33.75	50.16	16.09
70	83.07	8.99	7.94	32.03	67.97	0.00

当石英体积分数一定时,随着长石矿物体积分数的提升,模型破裂时裂纹形态如图 18 所示。由图 18 可知:云母裂纹数量明显下降,在长石矿物体积分数较低的情况下,裂纹更容易沿着云母晶体及其边界发育并聚集成簇形成贯通面;随着长石体积分数的提升,这一裂纹发育形式发生改变,由于云母体积分数的降低,显然贯穿长石晶体的情况明显增多,当长石体积分数为 50%与 70%时,二个模型裂纹形态接近,但后者裂纹起裂发育的难度要高于前者。

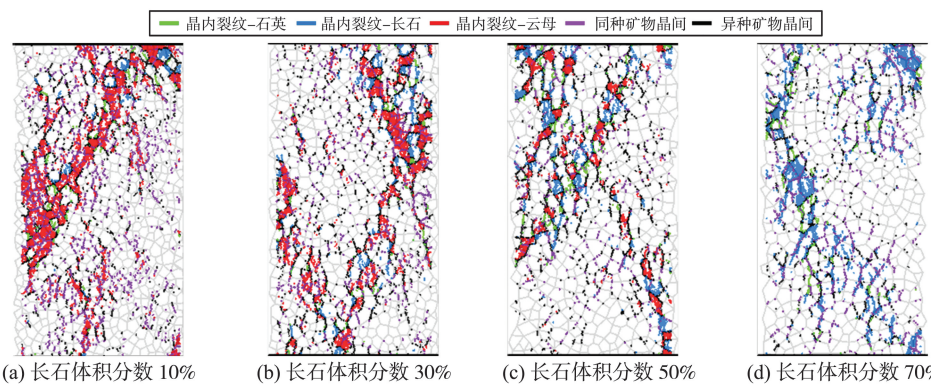


图 18 不同长石体积分数下模型破坏裂纹形态(石英体积分数 30%)

Fig.18 Model failure crack morphology under different feldspar volume fractions (quartz volume fraction 30%)

当云母体积分数一定,随着石英体积分数的提升模型中各类接触占比变化如表 11 所示。同理,石英体积分数的提升意味着长石体积分数的减少,模型平均粒径 d 也略有下降,矿物晶内接触占比减小、同种矿物晶间与异种矿物晶间接触占比增大但变化有限;石英矿物晶内接触占比则大幅增长,长石晶内接触占比逐渐减少,云母内接触占比保持不变,整体接触强度增加,单轴抗压强度也随之提升。

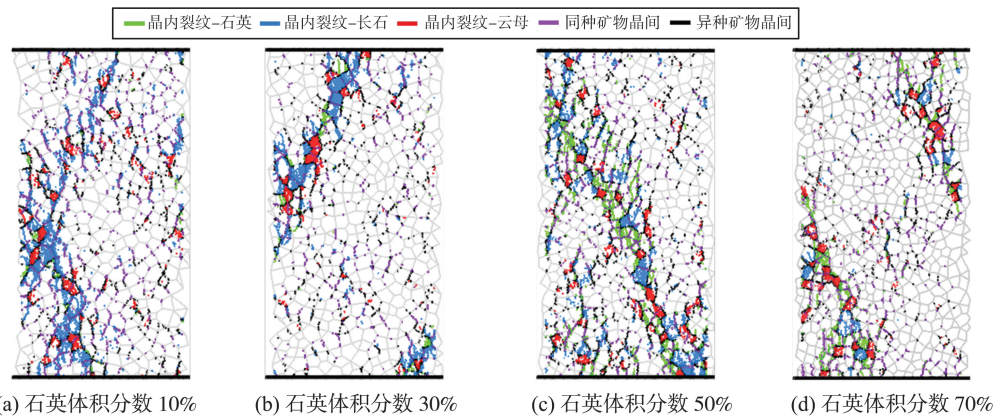
表 11 各类接触占比随矿物体积分数变化(云母体积分数 10%)

Table 11 The proportion of various types of contact varies with mineral volume fraction (mica volume fraction 10%)

单位:%

石英体积分数	矿物晶内	同种矿物晶间	异种矿物晶间	石英晶内	长石晶内	云母晶内
10	83.31	8.42	8.27	12.99	78.19	8.82
30	82.24	7.20	10.56	31.72	59.24	9.04
50	80.96	7.64	11.40	51.18	41.06	7.76
70	79.89	11.46	8.66	70.72	20.20	9.08

上述 4 种工况的模型破裂时裂纹形态如图 19 所示。由图 19 可知，云母裂纹占比变化有限，石英晶内裂纹更多的分布在破裂面两侧，裂纹形态由受云母-长石晶体影响，转为受云母-石英影响，贯穿长石晶体的难度显然要低于贯穿石英晶体，但由于长石体积分数降低，难以通过云母-长石晶体形成破裂面使得模型完全破裂，贯穿石英晶体的情况增多，需要更高的应力水平，模型承压能力随之提升。



(a) 石英体积分数 10%　(b) 石英体积分数 30%　(c) 石英体积分数 50%　(d) 石英体积分数 70%

图 19　不同石英体积分数下模型破坏裂纹形态（云母体积分数 10%）

Fig.19　Model failure crack morphology under different quartz volume fractions (mica volume fraction 10%)

综上，无论是长石还是石英体积分数的改变，矿物晶内接触与裂纹占比的变化幅度相比于平均粒径 d 更小，影响程度有限；矿物体积分数的改变主要会影响石英、长石与云母晶内接触占比的升降，这是其影响单轴抗压强度与裂纹占比的主要作用形式。

3　结论

本研究通过建立矿物晶体离散元模型，选取能够表征花岗岩不同矿物组成且便于在模型中计量的参数、设置不同参数组合，分析了花岗岩矿物粒径大小、矿物粒径分布非均匀性与矿物体积分数对花岗岩强度特性的影响，得到的主要结论如下。

（1）统计数值计算结果。对能够表征花岗岩矿物组成的各因素与单轴抗压强度进行相关性分析，平均粒径 d、石英及长石矿物体积分数与单轴抗压强度为正相关性，云母体积分数与非均质因子 H 为负相关性，其中非均质因子 H 对单轴抗压强度的影响受体积矿物体积分数与平均粒径 d 的限制，作用范围有限。

（2）统计各类接触与裂纹占比的演变情况。分析了不同参数影响模型的主要方式，平均粒径 d 主要影响晶内与晶间接触，非均质因子 H 则会导致同种与异种晶间接触占比发生变化，矿物体积分数则与晶内 3 种接触的增减有关。这 3 种方式均可以改变模型破裂所消耗的能量和裂纹发育路径，进而影响单轴抗压强度。

（3）根据矿物粒径相关与矿物体积分数相关的两组数值试验结果。分别采用灰色关联分析得到矿物体积分数参数与单轴抗压强度关联度次序为石英体积分数、长石体积分数、云母体积分数，粒径参数与之关联度次序为平均粒径 d 及非均质因子 H。

参考文献：

[1] IRFAN T Y. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1996, 29(1): 5-35.

[2] 赵斌，王芝银，伍锦鹏. 矿物成分和细观结构与岩石材料力学性质的关系[J]. 煤田地质与勘探，2013，41(3)：59-63.
ZHAO Bin, WANG Zhiyin, WU Jinpeng. Relation between mineralogical composition and microstructure to the mechanical properties of rock materials[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 59-63.

[3] 朱长歧，周斌，刘海峰. 南海海滩岩的细观结构及其基本物理力学性质研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(4)：683-693.
ZHU Changqi, ZHOU Bin, LIU Haifeng. Microstructures and fundamental engineering properties of beach calcarenite from South China Sea[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 683-693.

[4] 皮锦添，徐奴文，张丰收，等. 基于微震监测与 DFN 模拟的金川水电站尾闸室破坏机制[J]. 隧道与地下工程灾害防治，2024，6(3)：60-72.
PI Jintian, XU Nuwen, ZHANG Fengshou, et al. Failure

mechanism of tailrace surge chamber in Jinchuan Hydropower Station based on microseismic monitoring and DFN simulation[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(3): 60-72.

[5] HECHT C A, BÖNSCH C, BAUCH E. Relations of rock structure and composition to petrophysical and geomechanical rock properties: examples from permocarboniferous red-beds[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(3): 197-216.

[6] KEIKHA T, KEYKHA H A. Correlation between mineralogical characteristics and engineering properties of granitic rocks[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 4055-4065.

[7] SHAO Z L, TANG X H, WANG X G. The influence of liquid nitrogen cooling on fracture toughness of granite rocks at elevated temperatures: an experimental study[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 246: 107628.

[8] 左建平, 柴能斌, 赵灿, 等. 门头沟玄武岩细观矿物组成与宏观力学行为的关联性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(5): 942-951.
ZUO Jianping, CHAI Nengbin, ZHAO Can, et al. Investigation on the relationship between of micro/meso mineral composition and macro mechanical behavior of Mentougou basalt[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(5): 942-951.

[9] ÖMER Ü. Assessment of mineralogical and petrographic factors affecting petro-physical properties, strength and cracking processes of volcanic rocks[J]. Engineering Geology, 2016, 210: 10-22.

[10] 宫凤强, 何志超. 钻孔卸压防治岩爆机理的试验研究进展与展望[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(2): 1-23
GONG Fengqiang, HE Zhichao. Progress and prospect of experimental research on the mechanism of rockburst prevention and control by drilling pressure relief[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(2): 1-23.

[11] CUNDALL P A, STRACK O D L. Discussion: a discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1980, 30(3): 331-336.

[12] HUANG H Y, DETOURNAY E. Discrete element modeling of tool-rock interaction II: rock indentation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(13): 1930-1947.

[13] 王者超, 周尔康. 应力路径对砂岩真三轴变形宏细观特征影响[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(2): 1-10.
WANG Zhechao, ZHOU Erkang. Effects of stress path on true triaxial macro and micro deformation characteristics of sandstone[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(2): 1-10.

[14] 刘黎旺, 李海波, 李晓锋, 等. 基于矿物晶体模型非均质岩石单轴压缩力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 542-550.
LIU Liwang, LI Haibo, LI Xiaofeng, et al. Research on mechanical properties of heterogeneous rocks using grain-based model under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 542-550.

[15] POTYONDY D O. A grain-based model for rock: approaching the true microstructure[C]// Proceedings of Rock Mechanics in the Nordic Countries. Kongsberg, Norway: Norwegian Group for Rock Mechanics, 2010: 225-234.

[16] 孙港, 王军祥, 孟祥竹, 等. 基于近场动力学理论的岩石双孔爆破动态断裂行为数值模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(2): 42-58.
SUN Gang, WANG Junxiang, MENG Xiangzhu, et al. Numerical simulation of dynamic fracture behavior of rock dual-hole blasting based on peridynamic theory[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(2): 42-58.

[17] HUANG X L, QI S W, GUO S F, et al. Effect of the crystal habit on micromechanical extensile behaviors of the crystalline rock during compression[J]. Engineering Geology, 2022, 310: 106874.

[18] KOYAMA T, JING L R. Effects of model scale and particle size on micro-mechanical properties and failure processes of rocks: a particle mechanics approach[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2007, 31(5): 458-472.

[19] 韩森, 张钦礼. 3D Voronoi 等效晶质模型在岩石破坏细观研究中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(6): 88-93.
HAN Sen, ZHANG Qinli. Application of 3D Voronoi equivalent crystal model in microscopic study of rock failure[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(6): 88-93.

[20] HU Y P, ZHANG Z R, YAN Z W, et al. Discrete element simulation study on effects of grain preferred orientation on micro-cracking and macro-mechanical behavior of crystalline rocks[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2024, 63(1): 20240001.

[21] HOFMANN H, BABADAGLI T, ZIMMERMANN G. A grain based modeling study of fracture branching

during compression tests in granites[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 152-162.

[22] PENG J, WONG L N Y, TEH C I, et al. Modeling micro-cracking behavior of bukit timah granite using grain-based model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(1): 135-154.

[23] GUO P Y, ZHANG P, BU M H, et al. Microcracking behavior and damage mechanism of granite subjected to high temperature based on CT-GBM numerical simulation[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159: 105385.

[24] QUAN J S, RONG G, XU L D, et al. A three-dimensional grain-based model for studying the microscopic fracture behaviour of granite[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159: 105427.

[25] 严旭锋, 张振宇, 郝胜鹏, 等. 基于矿物晶体模型的非均质裂隙花岗岩双轴压缩微裂纹演化特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(4): 102-114.
YAN Xufeng, ZHANG Zhenyu, HAO Shengpeng, et al. Microcracks evolution of heterogeneous fissured granite under biaxial compression based on grain-based numerical modeling[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(4): 102-114.

[26] LI X F, ZHANG Q B, LI H B, et al. Grain-based discrete element method (GB-DEM) modelling of multi-scale fracturing in rocks under dynamic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(12): 3785-3817.

[27] MOORE D E, LOCKNER D A. The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(1): 95-114.

[28] 付安琪, 蔚立元, 苏海健, 等. 循环冲击损伤后大理岩静态断裂力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2021-2030.
FU Anqi, YU Liyuan, SU Haijian, et al. Experimental study on static fracturing mechanical characteristics of marble after cyclic impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2021-2030.

[29] 张涛, 蔚立元, 苏海健,等. 基于多级力链网络分析的花岗岩压缩特性的矿物尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1988-2003.
ZHANG Tao, YU Liyuan, SU Haijian, et al. Investigation on the grain size effect of the compression characteristics of granites based on the multi-level force chain network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1988-2003.

[30] 韩振华, 张路青, 周剑, 等. 矿物粒径对花岗岩单轴压缩特性影响的试验与模拟研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 497-504.
HAN Zhenhua, ZHANG Luqing, ZHOU Jian, et al. Uniaxial compression test and numerical studies of grain size effect on mechanical properties of granite[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 497-504.

[31] LIU G, CAI M, HUANG M. Mechanical properties of brittle rock governed by micro-geometric heterogeneity[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 358-372.

(编辑:宋艳)

(上接第 92 页)

[16] 贾升安, 李春阳, 黄海峰, 等. 基于土-水特征曲线试验的非饱和土强度预测[J]. 水运工程, 2022(12): 225-231.
JIA Sheng′an, LI Chunyang, HUANG Haifeng, et al. Strength prediction of unsaturated soil based on SWCC test[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(12): 225-231.

[17] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[18] BISHOP A W. The principl of effective stress[J]. Teknisk Ukeblad, 1959, 106(39): 859-863.

[19] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程:SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[20] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379-392.

(编辑:郭少华)