



地学前缘

Earth Science Frontiers

ISSN 1005-2321, CN 11-3370/P

《地学前缘》网络首发论文

- 题目： 基于数值模拟表征岩石组构对裂隙性储层发育影响程度的机理研究——以济阳坳陷花岗质岩石为例
- 作者： 何晓，牛花朋，赵贤，周浩彦，林伟峻，张关龙，孟涛，穆星
- DOI： 10.13745/j.esf.sf.2025.2.7
- 收稿日期： 2024-12-03
- 网络首发日期： 2025-03-06
- 引用格式： 何晓，牛花朋，赵贤，周浩彦，林伟峻，张关龙，孟涛，穆星. 基于数值模拟表征岩石组构对裂隙性储层发育影响程度的机理研究——以济阳坳陷花岗质岩石为例[J/OL]. 地学前缘. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.2.7>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2025.2.7

基于数值模拟表征岩石组构对裂缝性储层发育影响程度的机理研究——以济阳坳陷花岗质岩石为例

何 晓^{1,2}, 牛花朋^{1,2,*}, 赵 贤^{1,2}, 周浩彦^{1,2}, 林伟峻^{1,2},
张关龙³, 孟 涛³, 穆 星³

1. 中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室，北京 102249

2. 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249

3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院，山东 东营 257015

HE Xiao^{1,2}, NIU Huapeng^{1,2,*}, ZHAO Xian^{1,2}, ZHOU Haoyan^{1,2},
LIN Weijun^{1,2}, ZHANG Guanlong³, MENG Tao³, MU Xing³

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, China

HE Xiao, NIU Huapeng, ZHAO Xian, et al. Numerical simulation method on the impact of the difference of rock composition and structure on the development mechanism of fractured reservoirs: a case study from the granitoids in Jiyang Depression. *Earth Science Frontiers*, 2025

Abstract: Fractured oil and gas reservoirs are an important growth point of oil and gas reserves worldwide. The proven geological reserves account for more than 30% of the total proven geological reserves. They are widely distributed and have great exploration potential. Rock composition and structure (mineral composition, grain size, structure) is the fundamental factor controlling the degree of fracture development. The particle discrete element method has been applied to the study of the mechanical properties of brittle minerals and the fracture mechanism of microcracks. However, the influence of differences of rock composition and structure on the degree of fracture development and the mechanism are relatively weak. In this paper, the key scientific issue of the fracture mechanism of granitic bedrock under the constraint of composition and structure differences is constructed. The discrete element numerical model of mineral content, mineral grain size, mineral orientation and macroscopic mechanical parameters and fracture development mode is constructed to clarify the control mechanism of rock composition and structure on fracture development, thereby providing indicative significance for the exploration of fractured oil and gas reservoirs. Taking the fractured granitic bedrock reservoir in Jiyang Depression as an example, the rock composition and structure are quantitatively characterized through core observation description, casting thin section identification

收稿日期：2024-12-03; 修回日期：2025-02-27

基金项目：中国石油化工股份有限公司研究项目“济阳坳陷太古界潜山油气成藏条件及目标评价”(P22067)

作者简介：何晓（2000—），男，硕士研究生，地质工程专业。E-mail: 2022215048@student.cup.edu.cn

*通信作者简介：牛花朋，(1979—)，女，博士，教授，从事矿物岩石学与储层地质学相关研究。E-mail: niuhuapeng@126.com

and XRD analysis, and the initial discrete element numerical simulation model of rock composition and fracture prediction is established. The initial model microscopic parameters were calibrated and verified by using uniaxial rock compression tests and acoustic emission monitoring. Based on the numerical simulation results, a comprehensive quantitative prediction model of the impact of rock composition and structure on rock mechanical properties and fracture development was constructed. The research results show that: (1) by quantifying the number of mineral intracrystalline fractures, it was found that alkali feldspar contributes the most to the development of reservoir fractures, and its content is positively correlated with the total number of microcracks in the rock, followed by plagioclase, and quartz is the lowest, and its content is negatively correlated with the total number of microcracks in the rock; (2) as the particle size of granite increases from 2.0 mm to 5.0 mm, the uniaxial compressive strength decreases, and the smaller the tectonic stress required for the development of microcracks, the easier it is to generate fractured reservoirs, but when the tectonic stress is large enough, the density of microcracks decreases; (3) by quantifying the number of mineral intercrystalline fractures, it was found that the inclination angle of mineral orientation relative to the tectonic stress direction is positively correlated with the proportion of intercrystalline microcracks. Compared with massive granite, granite with gneiss structure has lower compressive strength and better connectivity between microcracks, making it easier to develop high-quality reservoirs. This research result can provide an important theoretical basis for the prediction of fractured reservoirs.

Keywords: fractured oil and gas reservoir; rock composition and structure; numerical simulation; quantitative prediction

摘要：裂缝性油气藏是全球范围内重要的油气储量增长点，已探明地质储量约占总探明地质储量的30%以上，其分布范围广泛且勘探潜力巨大。岩石组构（矿物组分、粒度、结构）是控制裂缝发育程度的根本因素，颗粒离散元法已应用于脆性矿物力学性质及微裂缝破裂机制的研究，然而岩石组构差异对裂缝发育程度的影响及机理研究较弱。本文针对组构差异约束下的花岗质基岩成缝机制这一关键科学问题，构建矿物含量、矿物粒径、矿物定向排列与宏观力学参数以及裂缝发育模式的离散元数值模型，明确岩石组构对裂缝发育的控制机理，从而为裂缝性油气藏的勘探提供指示意义。以济阳坳陷花岗质裂缝性基岩储层为例，通过岩心观察描述、铸体薄片鉴定和XRD等分析测试，定量表征岩石组构特征，建立岩石组构-裂缝预测初始离散元数值模拟模型。运用岩石单轴力学压缩试验和声发射监测，标定并验证初始模型细观参数。综合数值模拟结果，构建岩石组构对岩石力学性质及裂缝发育控制作用的综合定量预测模型。研究结果表明：

(1) 通过对矿物的晶内缝数量化后，发现碱性长石对储层裂缝发育贡献程度最高，其含量与岩石微裂缝发育总数呈正相关，斜长石次之，石英最低，其含量与岩石微裂缝发育总数呈负相关；(2) 随着花岗质岩石粒径由2.0 mm 增大至 5.0mm，单轴抗压强度呈下降趋势，发育微裂缝所需的构造应力越小，易于生成裂缝性储层，但在构造应力作用足够大时，微裂缝密度有所下降；(3) 通过对矿物的晶间缝数量化后，发现相对于构造应力方向的矿物定向排列倾角与晶间微裂缝数占比呈正相关，具片麻理的花岗质岩石相较块状花岗质岩石的抗压强度低的，且微裂缝之间的连通性更好，更容易发育优质储层。该研究成果可为裂缝性储层预测提供重要理论依据。

关键词：裂缝性油气藏；岩石组构；数值模拟；定量预测

中图法分类号：P554; P574.12; P584

0 前言

裂缝性油气藏是以缝、洞为主要渗流通道的裂缝性储集层构成的油藏、气藏和凝析气藏^[1]。裂缝性油气藏分布广泛，如伊朗库姆盆地^[2,3]、墨西哥东南盆地^[4-6]、北美 Appalachian 盆地^[7]、阿拉伯 Sinjar 隆起^[8,9]、中国渤海湾盆地^[10-12]等均有大型裂缝性油气藏分布。目前，世界裂缝性油气藏已探明地质储量超过 100×10^8 t，约占总探明地质储量的 30%以上^[13-16]。裂缝性储层岩性主要有碳酸盐岩^[17-21]、基岩^[22-25]、泥质岩以及其他低渗透碎屑岩等岩类^[26-28]。

岩石组构是控制裂缝发育的根本因素。众多学者认为石英、长石等脆性矿物的含量高低，直接影响裂缝发育程度^[27,29-33]。李长海等认为对于碳酸盐岩储层而言，岩石脆性矿物含量越高，岩石越容易发育裂缝^[33]。田鹤等认为页岩中构造裂缝的发育程度通常与石英和方解石含量呈良好的正相关关系，与黏土矿物呈负相关性^[27]。此外，有学者认为不同岩性由于矿物组分、粒度、结构等因素的差异，会影响岩石力学性质，进而影响天然裂缝的发育程度^[34,35]。

颗粒离散元法多用于地质力学以及工程力学领域。L. Kong 等提出了一种基于耦合水粒的离散元模型，并对结晶岩石的流体驱动微裂纹进行了研究^[36,37]；X.J. Hu 等采用基于晶粒的模型研究了在加热、冷却和单轴压缩加载过程中，LdB 花岗岩的晶粒不均匀性对其力学和微裂纹行为的影响^[38]；Y. Cheng 等采用二维颗粒流程序中基于颗粒的模拟方法，数值研究了材料非均质性对长英质结晶岩石强度、变形行为及相关微裂纹过程的影响^[39]；韩振华等以阿拉善花岗岩为例，选取矿物粒径差异明显的似斑状花岗岩和中粒花岗岩两类岩石，采用单轴压缩试验与数值模拟相结合的方式研究了矿物粒径对岩石力学特性的影响^[40]；M. Bahaaddini 等通过与实验室力学试验进行比较，研究了颗粒离散元多种接触模型相结合的方法在再现霍克斯伯里砂岩力学行为方面的能力^[41]。此外，声发射技术已被证明是研究岩石损伤微观机制的可行方法，多被用于研究脆性岩石失稳破坏过程（单、三轴力学试验）中内部微裂纹的萌生、扩展和贯通一系列时空演化过程，以及岩石在多种应变率下的破裂机制研究、岩石内部张拉-剪切破裂占比的规律变化和不同加载形式对岩石破裂机制的影响等方面^[38,42-44]。

综上，颗粒离散元在研究脆性岩石力学性质及微裂缝发育领域均有良好的效果，但在裂缝性储层发育机制上应用较少。本文以济阳坳陷花岗质岩石为例，采用单轴压缩试验兼声发射与颗粒离散元相结合的方法，建立矿物含量、矿物粒径、矿物定向排列与宏观力学参数以及裂缝发育模式的数值模拟模型，从而揭示岩石组构对裂缝性储层的控制机制。

1 区域地质背景及样品来源

随着油气勘探程度加深，油气勘探不断向更细、更深、更广、更难、更具挑战的领域发展，深层基岩内幕已成为裂缝性油气藏勘探的前瞻领域之一，受到广泛关注^[45,46]。渤海湾盆地是一个发育在太古界-中生界基底之上，受新生代构造运动影响形成的盆地，基岩（潜山）油气藏是渤海湾盆地重要的油气藏类型^[25,47,48]。其中，渤海湾盆地济阳坳陷具有大量基础地质资料，钻遇太古界探井 500 余口，取心井 200 余口，基岩岩石类型主要为二长花岗岩、正长花岗岩、花岗闪长岩、花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩等花岗质岩石，埋深基本在 3500 m

以下，发育风化壳型和内幕型储层^[49-54]。同时，济阳坳陷南部鲁西隆起区露头条件良好，岩性可与济阳坳陷太古界覆盖区基岩基本对应，露头资料丰富，便于野外勘测取样。

本研究共计采集样品 5 件，均来自于鲁西隆起区野外露头（图 1）。其中，0920 号样品采自山东省泰安市新泰市（ $117^{\circ} 41' 24''$ E、 $36^{\circ} 0' 16''$ N），岩性为花岗闪长岩；1041 号样品采自山东省泰安市新泰市（ $117^{\circ} 40' 9''$ E、 $36^{\circ} 0' 6''$ N），岩性为花岗闪长岩；1717 号样品采自山东省济南市莱芜区（ $117^{\circ} 37' 45''$ E、 $36^{\circ} 5' 26''$ N），岩性为花岗闪长岩；1722 号样品采自山东省泰安市新泰市（ $117^{\circ} 43' 44''$ E、 $35^{\circ} 56' 28''$ N），岩性为二长花岗岩；T15 号样品采自山东省泰安市岱岳区（ $117^{\circ} 14' 55''$ E、 $36^{\circ} 19' 47''$ N），岩性为英云闪长岩（图 2）。

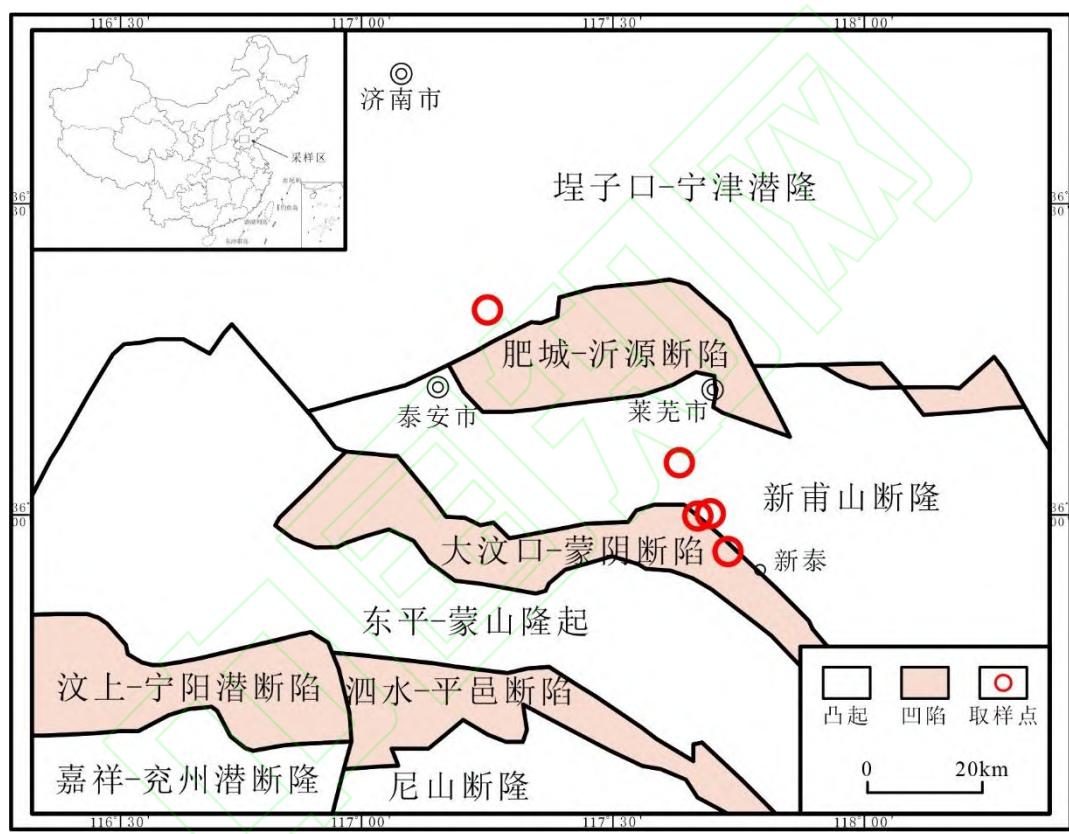
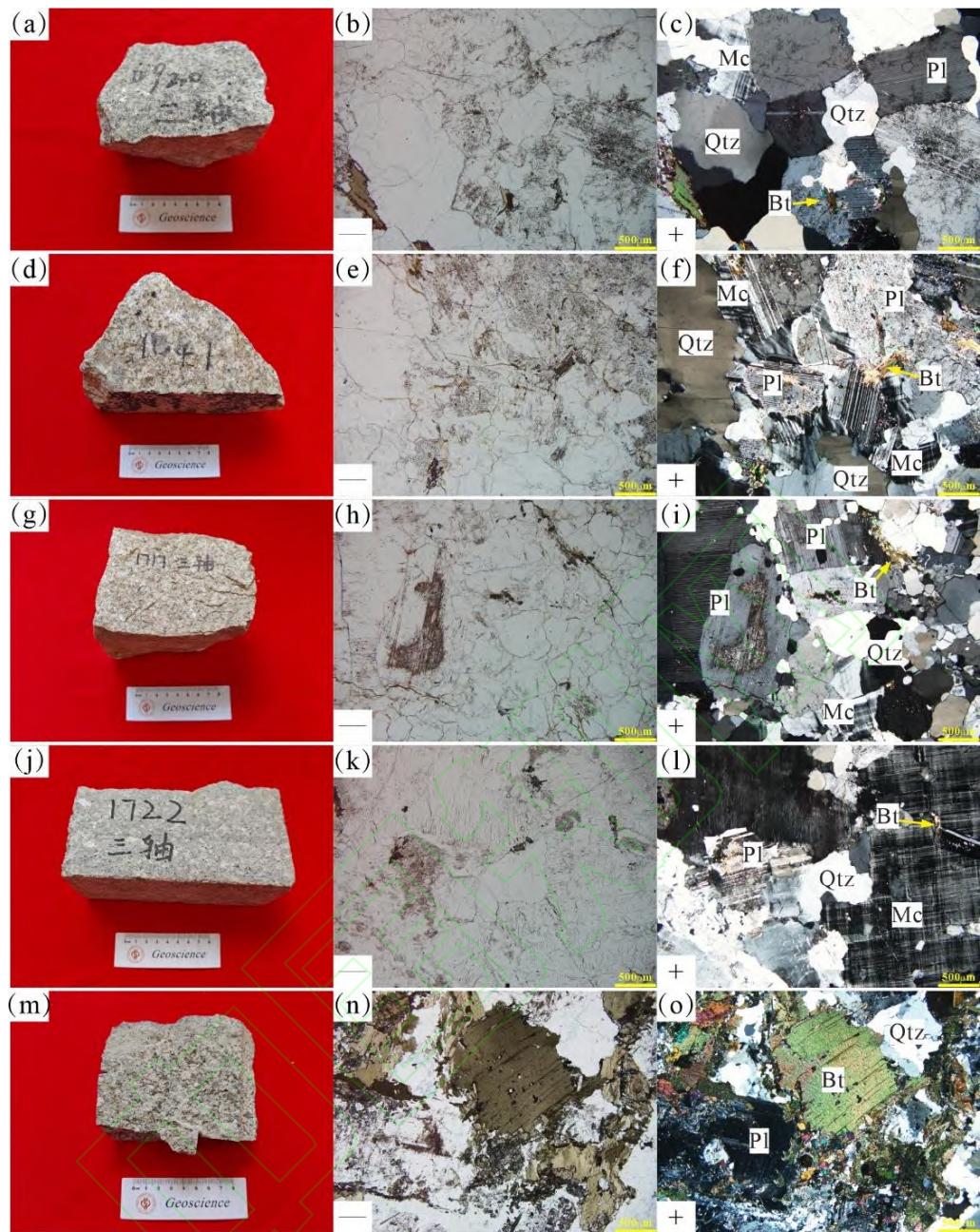


图 1 取样区地质简图

（据文献^[55]改）

Fig. 1 Geological map of the sampling area



a—0920 样品, 花岗闪长岩; b—0920 样品, 花岗闪长岩, 铸体薄片 (-) $\times 50$; c—0920 样品, 花岗闪长岩, 铸体薄片 (+) $\times 50$; d—1041 样品, 花岗闪长岩; e—1041 样品, 花岗闪长岩, 铸体薄片 (-) $\times 50$; f—1041 样品, 花岗闪长岩, 铸体薄片 (+) $\times 50$; g—1717 样品, 花岗闪长岩; h—1717 样品, 花岗闪长岩, 铸体薄片 (-) $\times 50$; i—1717 样品, 花岗闪长岩, 铸体薄片 (+) $\times 50$; j—1722 样品, 二长花岗岩; k—1722 样品, 二长花岗岩, 铸体薄片 (-) $\times 50$; l—1722 样品, 二长花岗岩, 铸体薄片 (+) $\times 50$; m—T15 样品, 英云闪长岩; n—T15 样品, 英云闪长岩, 铸体薄片 (-) $\times 50$; o—T15 样品, 英云闪长岩, 铸体薄片 (+) $\times 50$ 。Qtz—石英, Pl—斜长石, Mc—碱性长石, Bt—黑云母。

图 2 样品及铸体薄片

Fig. 2 Samples and casting sheet

2 花岗质岩石模型参数标定

在岩心观察描述、镜下薄片鉴定、XRD、岩石单轴力学试验兼声发射监测的基础上,综合运用数值模拟的方法,开展组构差异约束下的花岗质岩石力学性质与裂隙性储层发育机制

研究。首先量化岩石组构，获取离散元建模要素，建立岩石组构-裂缝预测初始离散元数值模拟模型；其次，运用单轴力学试验及声发射监测实验标定初始模型细观参数，进行验证，不符合预期则重新用“试错法”标定模型细观参数。

2.1 初始模型建立

通过岩石样本观察、薄片鉴定以及 XRD 实验，发现济阳坳陷花岗质岩石主要由石英、斜长石、碱性长石、黑云母、角闪石等矿物组成。根据火成岩粒度划分准则：粗粒结构粒径 (d) $> 5 \text{ mm}$ ；中粒结构粒径 (d) $= 2 \sim 5 \text{ mm}$ ；细粒结构粒径 (d) $= 0.2 \sim 2 \text{ mm}$ ；微粒结构粒径 (d) $= 0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$ 。其矿物粒径普遍在 $1 \sim 5 \text{ mm}$ ，属于细-中粒结晶质脆性岩石（图 2）。由于其他矿物成分（方解石、白云石、黏土矿物等）含量较低，对整个模型的影响较小，因此为简化模型未考虑，将其占比分配给石英、斜长石、碱性长石及暗色矿物（黑云母、角闪石等），数值模型采用调整后的花岗质岩石成分。

单轴压缩试样加工标准按美国 ASTM (American Society for Testing and Materials) 标准和国际岩石力学学会 ISRM (International Society for Rock Mechanics) 关于岩石单轴实验的要求加工。室内加工套取直径 25 mm 的圆柱形试样，然后将圆柱形试样的两端车平、磨光，基面偏差在 2.5% 范围内，使岩样的长径比 2.0 。因此，初始模型大小为 $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 与实际力学试件相一致；模型中的矿物颗粒大小范围通过薄片鉴定测量，在粒径范围内均匀分布；矿物含量通过 XRD 实验获得，矿物形状（块状或片麻理）及定向排列角度通过试样观察确定（表 1）。根据以上花岗质岩石组构要素，建立初始模型，其中矿物颗粒由小颗粒形成的晶体簇组成，在单轴压缩试验兼声发射监测中通常能记录数十万甚至数百万个事件数，一个事件数代表一个微裂缝的生成，现有的计算机水平很难实现该数量级的数值模拟运算，因此本次数值模拟选取一个较合理的晶体簇组成。矿物组成颗粒最小粒径为 0.3 mm ，最大与最小粒径比为 1.66 ，一个矿物颗粒由数十至数百个小颗粒组成，此外暂时给予初始模型一些合适的黏结强度防止模型出现破坏（图 3）。

表 1 样品矿物含量及粒径大小

Table 1 Mineral content and particle size of the samples

样品 编号	岩性	石英 含量 (%)	石英 粒径 (mm)	斜长石 含量 (%)	斜长石 粒径 (mm)	碱性长石 含量 (%)	碱性长石 粒径 (mm)	暗色矿物 含量 (%)	暗色矿物 粒径 (mm)
0920	花岗闪 长岩	29.6	1.0-3.0	52.2	1.0-3.0	13.5	1.0-2.0	4.7	1.0-2.0
1041	花岗闪 长岩	38.2	1.0-4.0	39.8	1.0-3.0	18.6	1.0-4.0	3.4	1.0 左右
1717	花岗闪 长岩	22.0	1.0-2.5	62.3	1.0-3.5	14.8	1.0-2.0	0.9	1.0 左右
1722	二长花 岗岩	25.6	1.0-4.0	28.9	1.0-3.5	43.5	1.0-5.0	2.0	1.0 左右
T15	英云闪 长岩	17.7	1.0 左右	55.0	1.0-3.5	0.0	-	27.3	1.0-4.5

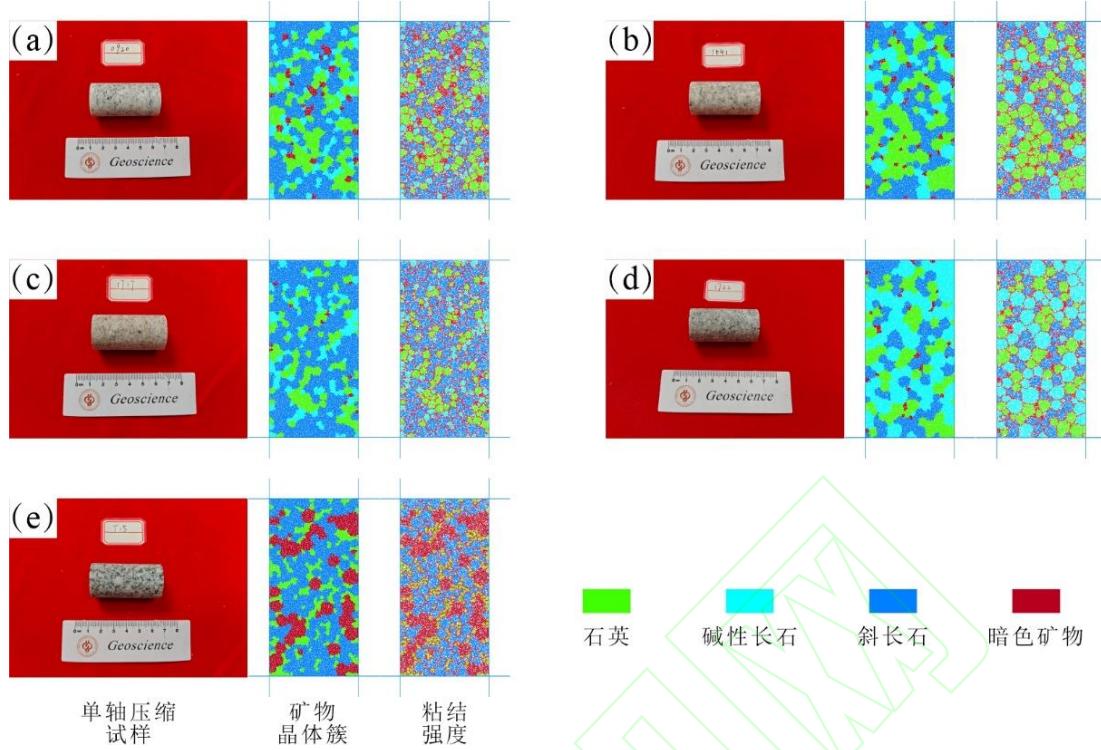


图3 力学试样及数值模拟建模

Fig. 3 Mechanical specimens and numerical simulation modeling

2.2 细观参数标定

众多学者在其研究中使用 Linear Parallel Bond Model (PBM 模型) 进行岩石细观参数标定^[56-58], 还有部分学者在其研究中使用 Flat-Joint Model (FJM 模型) 进行标定^[36, 59]。由于 PBM 模型在脆性岩石模拟中应用较多且效果较好, 因此在本次研究中使用 PBM 模型拟合花岗质岩石。岩石单轴力学试验采用高温高压岩石流变仪 TAR-1500, 该系统可施加的轴向应力范围为 0~1500 kN, 最大围压为 80 MPa, 温控范围 150 °C。在细观参数标定过程中选取 3 个宏观力学参数作为标定目标, 即杨氏模量 (E)、单轴抗压强度 (UCS) 和泊松比 (v)。细观参数中控制力学性质和破坏模式的有: 有效模量 (emod)、键有效模量 (pb_emod)、抗拉强度 (pb_ten)、黏聚力 (pb_coh)、摩擦角 (pb_fa)、摩擦系数 (fric)、法向-切向刚度比 (kratio) 等。

此外, 在进行单轴压缩试验同时还进行了声发射监测, 选择 PCI-2 声发射监测仪, 声发射采样率固定为 40 Msps, 阈值设定为 30 dB, 放大器增益设置为 40 dB。检测数据包括: 上升时间、计数、能量、持续时间、幅值、信号强度、绝对能量等。通过数据处理将 AF (声发射计数/持续时间) 与 RA (上升时间/幅值) 2 个参数相互联系, 用于评价并标定花岗质岩石破坏类型及裂缝性储层形成机理。张拉裂缝信号呈现出高 AF 低 RA 的分布特征, 剪切裂缝信号呈现出低 AF 高 RA 的分布特征^[42]。结果表明花岗质岩石在单轴压缩破坏中均以张拉裂缝为主, 剪切裂缝占比极少 (图 4)。其中, 0920、1722、T15 号样品破坏过程中剪切裂缝占比分别为 1.5%、2.0%、1.4%, 1041、1717 号样品破坏过程中剪切裂缝占比分别为 2.9%、3.4%。有研究表明, 随着风化程度的加深, 单轴压缩破坏过程中剪切裂纹的占比有所增加^[60]。且 1041、1717 号样品抗破坏强度明显低于 0920、1722、T15 号样品, 在铸体薄片鉴定中发

现 1041、1717 号样品长石黏土化程度相较其他样品更高, 因此在标定过程中, 对 1041、1717 号样品给予一个风化系数 (k)。

$$AF = \frac{\text{声发射计数}}{\text{持续时间}}$$

$$RA = \frac{\text{上升时间}}{\text{幅值}}$$

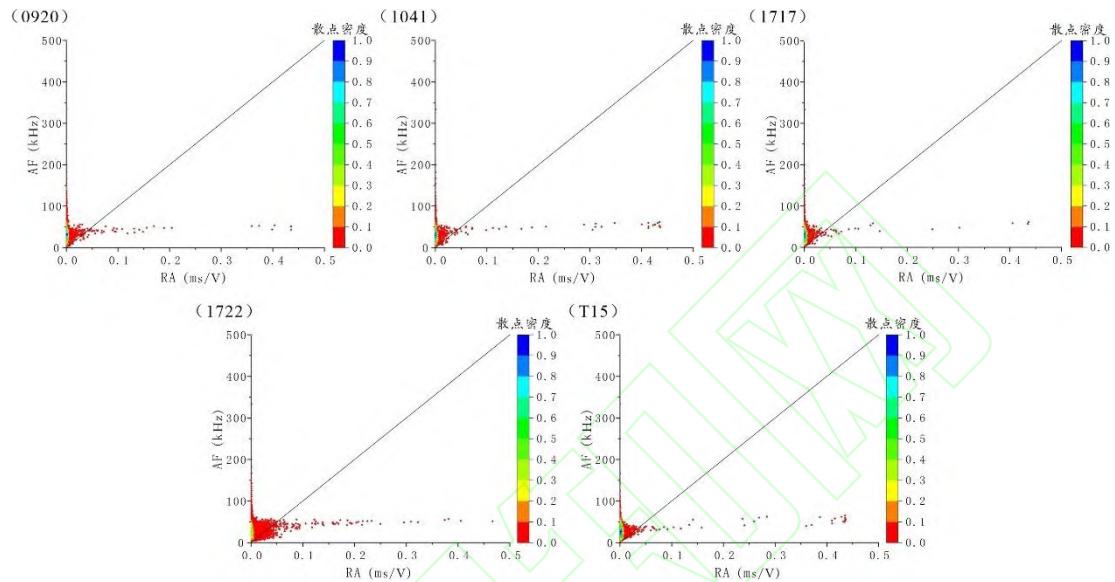


图 4 样品声发射 RA-AF 值散点分布及密度图

Fig. 4 Scatter distribution and density diagram of RA-AF value of acoustic emission

参数标定采用用户手册推荐的“试错法”进行细观参数的标定, 即基于室内试验结果先假定一组细观参数, 根据其得到一次模拟结果, 然后将该结果与室内试验结果对比, 随后再调整细观参数再进行模拟, 如此反复, 不断试错尝试调整模型细观参数, 直至模拟结果与室内试验力学参数、裂缝响应特征有较好匹配。与多组室内岩心力学试验及声发射监测结果对比, 拟合良好则模型建立完成, 否则返回校正细观参数, 再继续验证。首先选取 0920、1722、T15 号样品的单轴抗压试验对济阳坳陷花岗质岩石中 4 种主要矿物强度参数进行标定, 然后再对矿物晶界强度参数进行标定, 通过“试错法”多次反复校准直至模拟结果与室内力学试验吻合良好(表 2); 最后对 1041、1717 号样品中的风化系数 (k) 进行拟合(表 3)。

表 2 济阳坳陷花岗质岩石模型细观参数

Table 2 Mesoscopic parameters of granitic rock model in Jiyang Depression

矿物	有效模量 (GPa)	键有效模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)	黏聚力 (MPa)	摩擦角 (°)	摩擦系数	法向-切向 刚度比
石英	55.0	55.0	90.0	162.0	55.0	0.5	1.41
斜长石	22.0	22.0	74.5	134.1	45.0	0.5	2.26
碱性长石	28.0	28.0	70.5	126.9	45.0	0.5	2.26
暗色矿物	16.0	16.0	47.0	84.6	37.0	0.5	2.82
晶界	29.0	29.0	54.0	97.2	53.0	0.5	2.26

表 3 济阳坳陷花岗质岩石模型风化系数

Table 3 Weathering coefficient of granitic rock model in Jiyang Depression

风化系数	有效模量	键有效模量	抗拉强度	黏聚力	摩擦角	摩擦系数	法向-切向刚度比
k	0.75	0.75	0.75	0.75	1	1	1

2.3 标定结果

将模拟结果与室内实验所得的力学参数与裂缝响应特征进行对比,发现五组样品均能较好匹配。其中,室内试验与数值模拟得到的轴向应力-应变曲线吻合程度较好(图5)。宏观力学参数中:数值模拟所得杨氏模量(E)与室内试验所得的实际值误差均小于9%;单轴抗压强度(UCS)与实际值误差均小于3%;泊松比(v)与实际值误差均小于14% (表4)。模拟结果中仅有个别模拟数据误差较大,可能与矿物蚀变(长石黏土化)影响其力学性质和微风化作用形成的微裂隙改变其力学薄弱面走向有关。

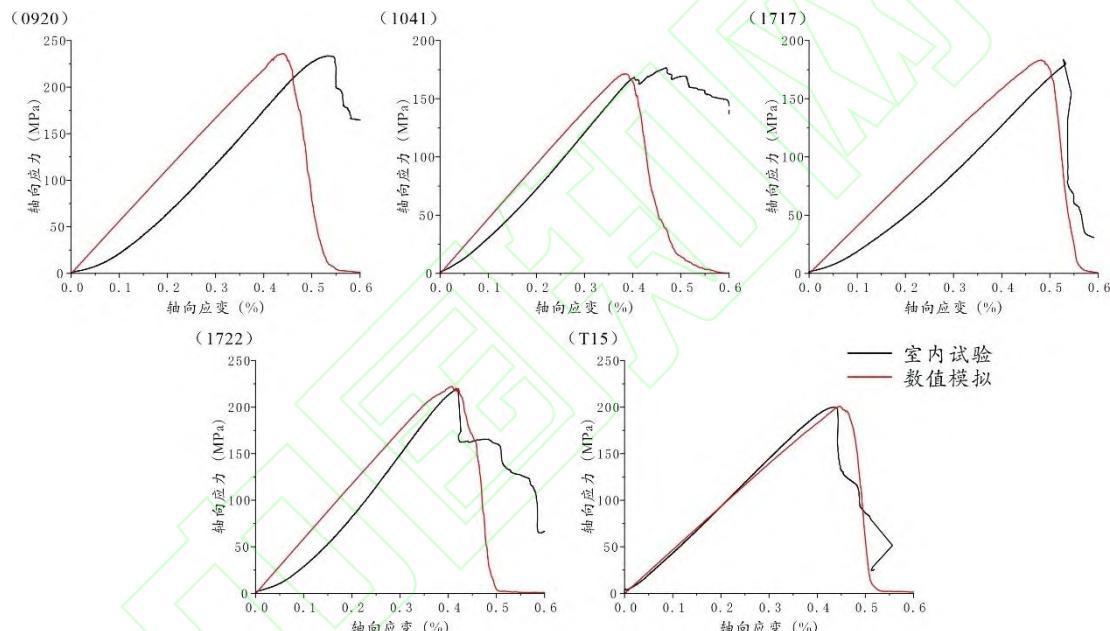


图 5 室内试验与数值模拟应力-应变关系图

Fig. 5 Stress-strain relationship between laboratory test and numerical simulation

表 4 室内力学试验及数值模拟力学参数

Table 4 Mechanical parameters of indoor mechanical test and numerical simulation

样品 编号	实验单轴 抗压强度 (MPa)	模拟单轴 抗压强度 (MPa)	相对 误差 (%)	实验弹性 模量 (GPa)	模拟弹性 模量 (GPa)	相对 误差 (%)	实验 泊松 比	模拟 泊松 比	相对 误差 (%)
	233.907	235.936	0.9	53.929	55.9	3.7	0.256	0.275	7.4
1041	176.54	171.536	-2.8	46.175	46.9	1.6	0.251	0.241	-4.0
1717	183.703	183.339	-0.2	37.248	40.6	9.0	0.288	0.248	-13.9
1722	219.459	222.282	1.3	61.712	58.7	-4.9	0.283	0.263	-7.1
T15	200.174	201.064	0.4	50.988	46.7	-8.4	0.272	0.258	-5.1

此外，通过对比室内样品和数值模拟宏观裂缝，二者均以张拉破坏产生的张裂缝为主，且裂缝走向较为一致（图 6）。结果表明，数值模拟有效复现了花岗质岩石的力学性质与裂缝发育特征。

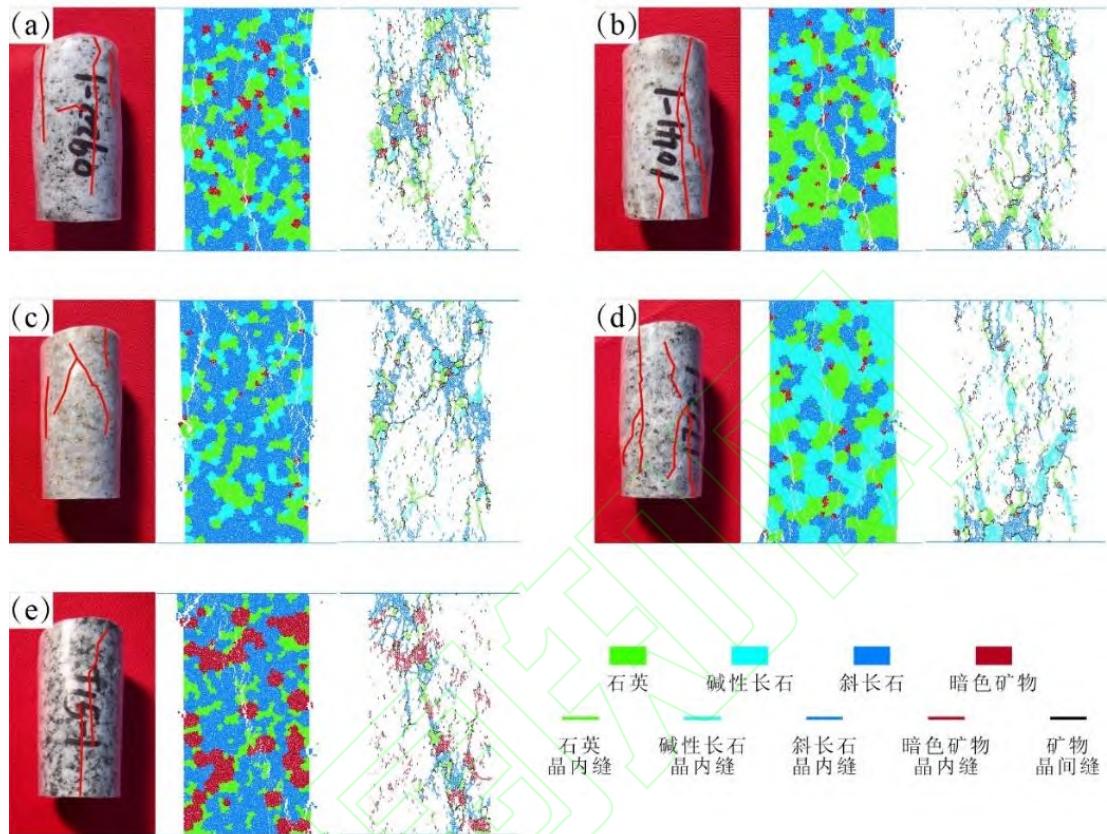


图 6 试样室内单轴压缩破坏及模拟结果图

Fig. 6 Uniaxial compression failure and simulation results in the sample room

3 结构差异对裂缝性储层发育程度影响的机理

3.1 矿物含量

为了研究矿物含量对岩石力学特性以及微裂缝发育程度的影响，参考 QAPF 深成岩分类三角图，对不同矿物含量的花岗质岩石进行数值模拟。其中，Q 为石英；A 为碱性长石；P 为斜长石；F 为副长石类或副长石。在进行 QAPF 分类时，需去掉 M（镁铁质矿物及其有关矿物）重新计算 Q、A、P、F 使其总和为 100%^[61]。且暗色矿物中部分矿物呈现出韧性并非脆性，例如黑云母在平行于其解理时力学性质较差，而在垂直与其解理时又呈现出明显的韧性，因此在数值模拟时为减小暗色矿物韧性带来的影响，将暗色矿物含量统一设置为 10% 减小误差。

石英矿物实际含量以 2.7% 的增幅从 4.5% 逐渐增大至 55.8%，去除暗色矿物含量的 10%，即石英矿物相对含量以 3% 的增幅从 5% 逐渐增大至 62%；将碱性长石含量/斜长石相对含量的比值以 95/5、80/20、50/50、20/80 和 5/95 的顺序依次循环 4 次，共计 20 组模拟实验（表

5, 图 7)。研究区花岗质岩石以细-中粒为主, 将 20 组模拟实验中矿物粒径均统一为 2.5 mm, 消除粒径大小及非均质性的影响。

表 5 不同矿物含量花岗质岩石数值模拟分组

Table 5 Numerical simulation groups of granitic rocks with different mineral contents

组号	岩性	石英含量 (%)	斜长石含量 (%)	碱性长石含量 (%)	碱性长石含量/ 斜长石含量	暗色矿物含量 (%)
1	石英碱长正长岩	4.5	4.275	81.225	95/5	10.0
2	石英正长岩	7.2	16.56	66.24	80/20	10.0
3	石英二长岩	9.9	40.05	40.05	50/20	10.0
4	石英二长岩闪长/辉长岩	12.6	61.92	15.48	20/80	10.0
5	石英闪长/辉长/斜长岩	15.3	70.965	3.735	5/95	10.0
6	碱长花岗岩	18.0	3.6	68.4	95/5	10.0
7	正长花岗岩	20.7	13.86	55.44	80/20	10.0
8	二长花岗岩	23.4	33.3	33.3	50/20	10.0
9	花岗闪长岩	26.1	51.12	12.78	20/80	10.0
10	英云闪长岩	28.8	58.14	3.06	5/95	10.0
11	碱长花岗岩	31.5	2.925	55.575	95/5	10.0
12	正长花岗岩	34.2	11.16	44.64	80/20	10.0
13	二长花岗岩	36.9	26.55	26.55	50/20	10.0
14	花岗闪长岩	39.6	40.32	10.08	20/80	10.0
15	英云闪长岩	42.3	45.315	2.385	5/95	10.0
16	碱长花岗岩	45.0	2.25	42.75	95/5	10.0
17	正长花岗岩	47.7	8.46	33.84	80/20	10.0
18	二长花岗岩	50.4	19.8	19.8	50/20	10.0
19	花岗闪长岩	53.1	29.52	7.38	20/80	10.0
20	富石英花岗岩类	55.8	32.49	1.71	5/95	10.0

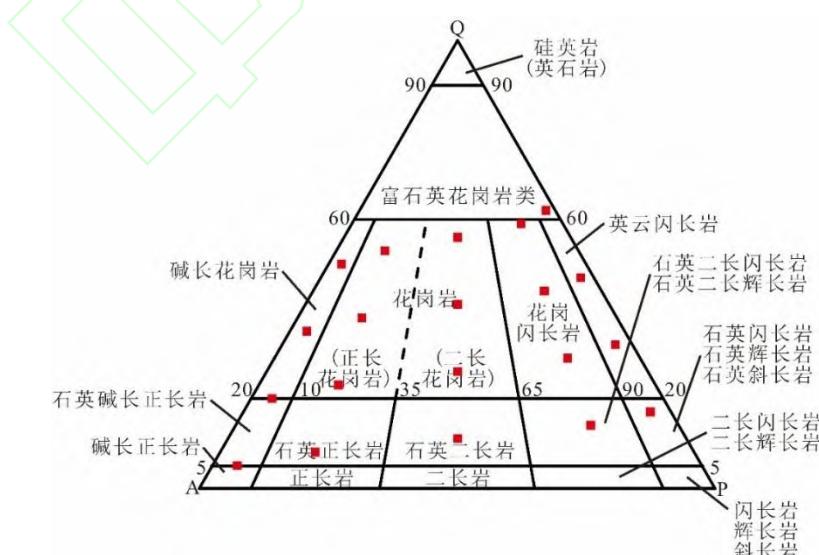
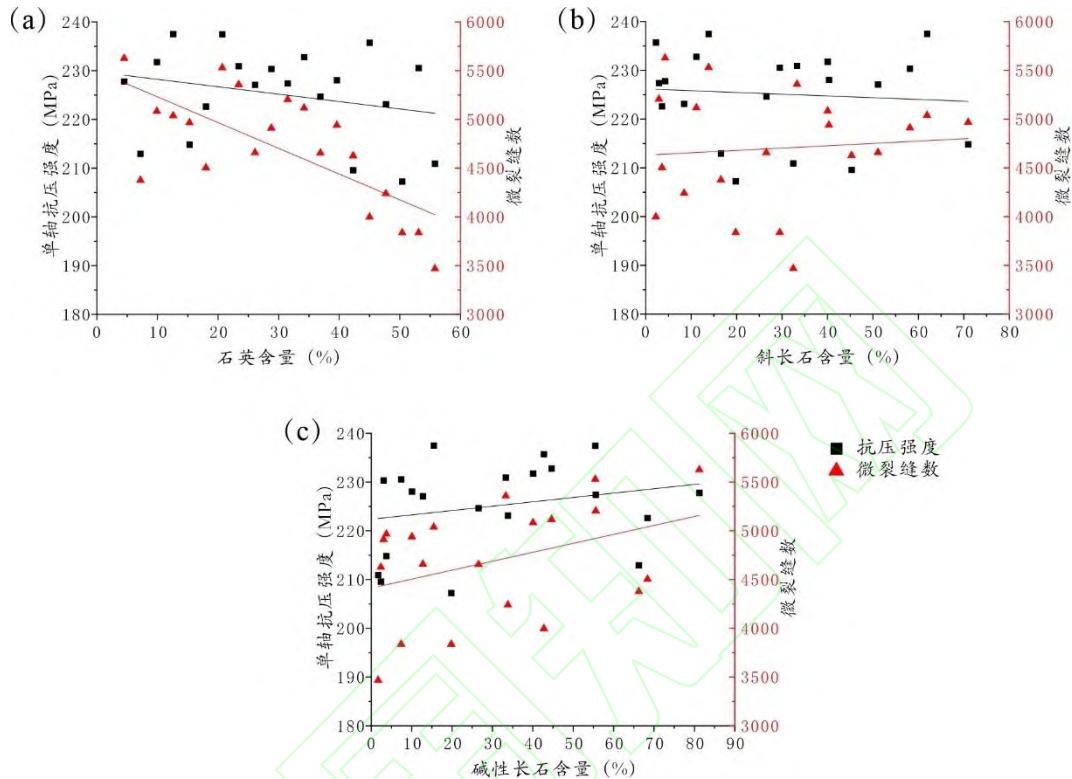


图 7 数值模拟花岗质岩石 QAP 分类图

Fig. 7 QAP classification map of granitic rocks

结果表明：石英含量与岩石强度呈弱负线性相关，斜长石含量与岩石强度呈微负线性相关，碱性长石含量与岩石强度呈弱正线性相关；线性相关系数普遍偏低，由此可见矿物含量的变化对岩石强度的影响并不明显。石英含量与岩石微裂隙发育总数呈负相关，斜长石含量与岩石微裂隙发育总数呈正相关，碱性长石含量与岩石微裂隙发育总数呈正相关（图 8）。



a—石英含量与单轴抗压强度及总微裂隙数关系图；b—斜长石含量与单轴抗压强度及总微裂隙数关系图；c—碱性长石含量与单轴抗压强度及总微裂隙数关系图。

图 8 矿物含量与单轴抗压强度及总微裂隙数关系图

Fig. 8 Relation between mineral content and uniaxial compressive strength and total number of microcracks

此外，还对石英、斜长石、碱性长石矿物含量与其晶内缝数量关系进行了统计：石英/斜长石/碱性长石等矿物含量占比越高，其对应的矿物晶内缝占比越高；随着各自矿物含量占比的上升，碱性长石的晶内缝占比上升幅度最高，斜长石上升幅度次之，石英上升幅度最低（图 9）。石英完全无解理，受力破坏时毫无规则，如果没有预先存在裂纹则很难破坏形成晶内缝。长石具有 2 组相互垂直或接近垂直的相交解理：碱性长石一组解理完全，一组解理较完全，夹角约 90° ；斜长石解理完全，一组解理中等，夹角约 86° ；长石发生破坏时其裂纹一般沿着解理，极易形成晶内缝，且斜长石的聚片双晶发育程度低于碱性长石，因而碱性长石更容易发生破裂，模拟结果与之相吻合。

由此可知，石英含量的增高对花岗质岩石裂缝性储层的发育促进作用较低，斜长石含量与碱性长石含量的增高对花岗质岩石裂缝性储层的发育有着很大的建设性作用，其中碱性长石尤为明显。

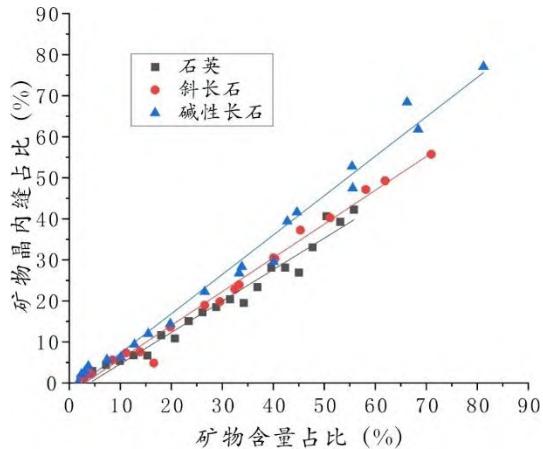


图 9 矿物含量占比-矿物晶内缝占比关系图

Fig. 9 Relationship between the proportion of mineral content and the proportion of mineral intracrystalline fractures

3.2 粒径大小

矿物粒径对岩石力学特性以及微裂缝发育程度也有着一定程度的影响,研究区花岗质岩石以花岗闪长岩、二长花岗岩等岩性为主。因此,选取花岗闪长岩(石英含量39.6%、斜长石含量40.32%、碱性长石含量10.08%、暗色矿物含量10%)、二长花岗岩(石英含量36.9%、斜长石含量26.55%、碱性长石含量26.55%、暗色矿物含量10%)和正长花岗岩为例(石英含量34.2%、斜长石含量11.16%、碱性长石含量44.64%、暗色矿物含量10%)和正长花岗岩为例,将矿物粒径大小以0.5 mm的增幅从2 mm逐渐增大至5mm,共计21组模拟实验(图10)。

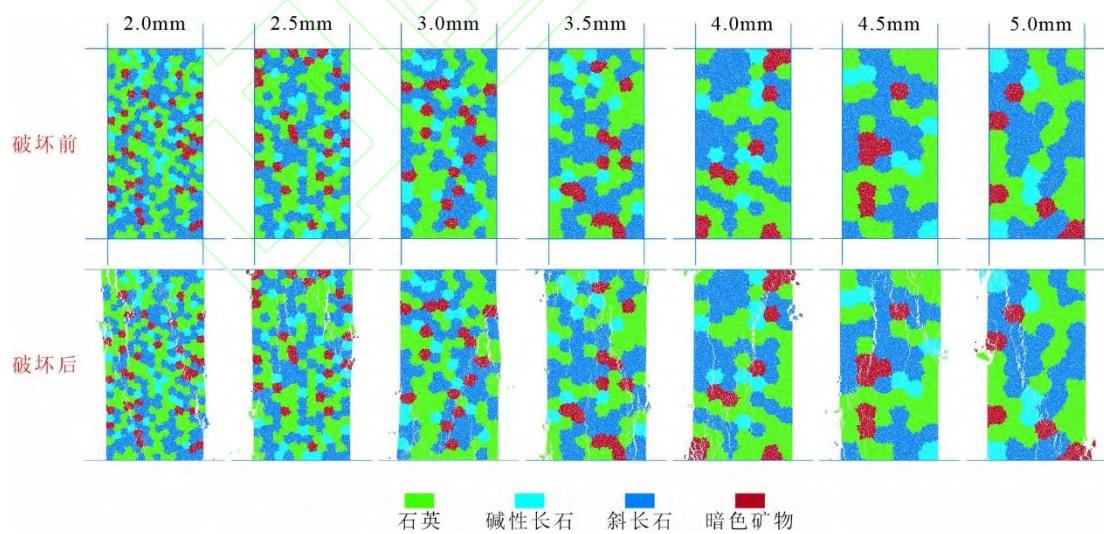
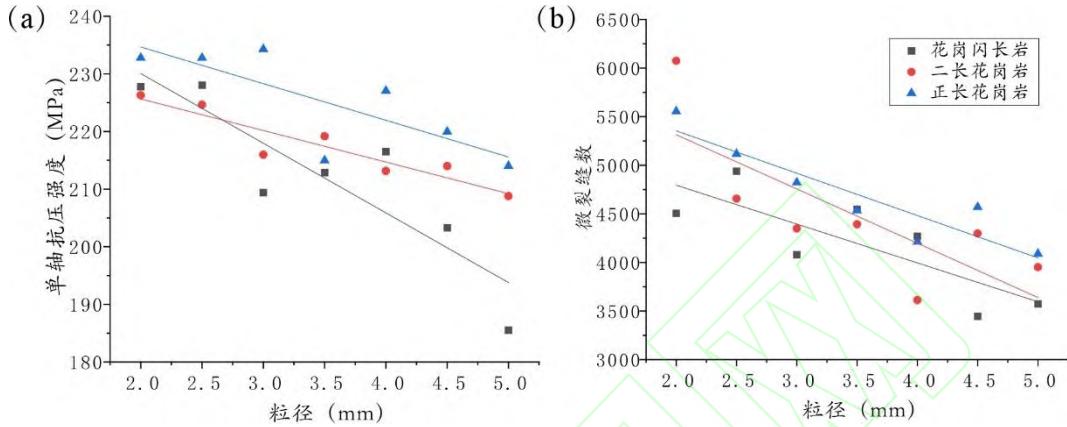


图 10 不同粒径花岗质岩石数值模拟建模及破坏结果

Fig. 10 Numerical modeling and failure results of granitic rocks with different particle sizes

结果表明,随着粒径的增大,花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩的岩石强度均呈现出不同程度的下降。随着粒径的增大,花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩的岩石微裂缝发育数均呈现出不同程度的下降(图11)。由此可知,粒径越大岩石形成微裂缝所需的构造

应力越小；但在构造应力作用足够大的情况下，粒径越大岩石形成微裂隙总数会有一定程度的下降。花岗质岩石矿物颗粒越大颗粒间边界更为显著，在构造应力作用下晶界易成为应力集中点，从而优先形成微裂隙发生破坏；矿物颗粒越小结构越致密均匀，应力分布相对分散，裂缝发育需克服更多的阻力。且相较于大粒径的花岗质岩石，小粒径花岗质岩石宏观裂缝数量较少，但微裂隙网络更密集。



a—矿物粒径-单轴抗压强度关系图；b—矿物粒径-总微裂隙数关系图。

图 11 不同粒径花岗质岩石力学性质及微裂隙发育情况

Fig. 11 Mechanical properties and microfracture development of granitic rocks with different particle sizes

3.3 定向排列

研究区花岗质岩石部分为块状构造（花岗结构等），部分具片麻理/弱片麻理。其中，具片麻理/弱片麻理的花岗质岩石呈现出矿物定向排列的特征，当构造应力与矿物定向排列角度不同时，岩石的力学性质与和裂隙发育程度可能存在差异。因此，改变模型中矿物形态以椭圆形式（等效粒径为 2.5 mm）生成用于表征岩石的片麻理，将矿物定向排列倾角以 10° 的增幅从 0° 逐渐增大至 90° ，依旧选取花岗闪长岩（石英含量 39.6%、斜长石含量 40.32%、碱性长石含量 10.08%、暗色矿物含量 10%）、二长花岗岩（石英含量 36.9%、斜长石含量 26.55%、碱性长石含量 26.55%、暗色矿物含量 10%）和正长花岗岩为例（石英含量 34.2%、斜长石含量 11.16%、碱性长石含量 44.64%、暗色矿物含量 10%）和正长花岗岩为例进行数值模拟，共计 30 组（图 12）。

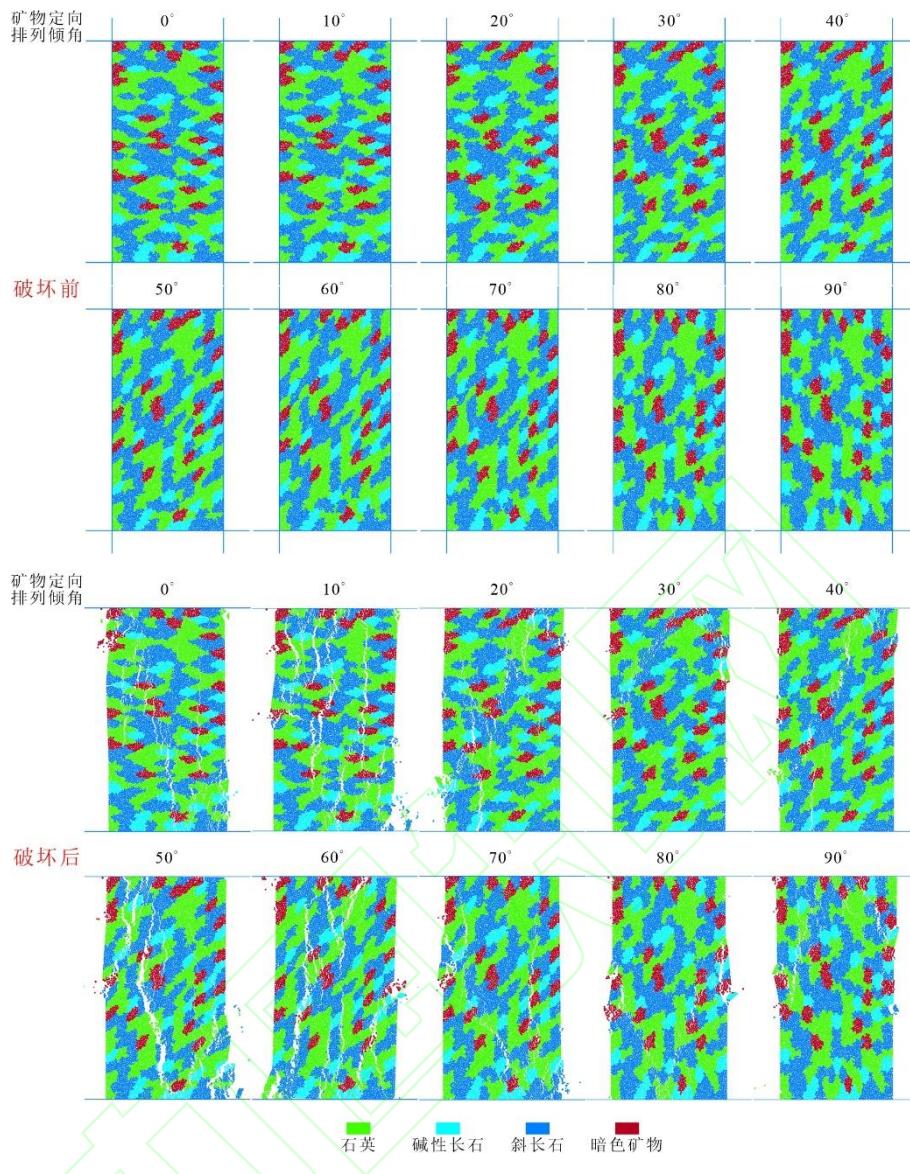
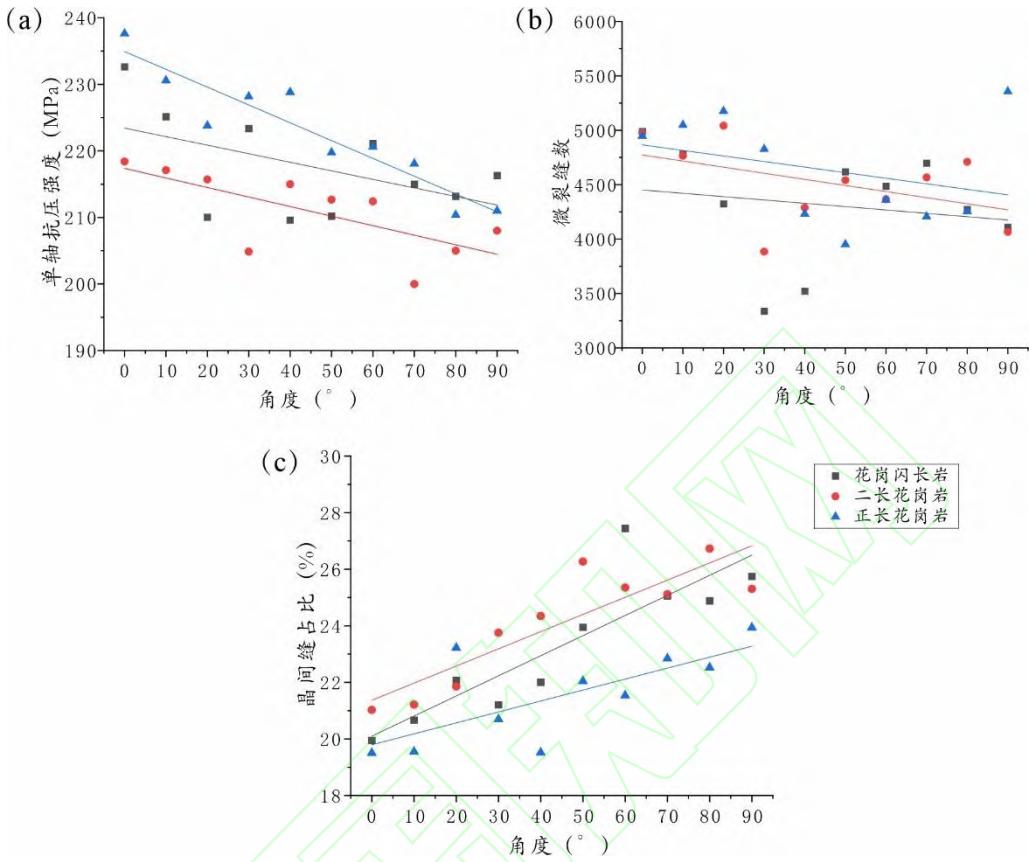


图 12 花岗质岩石矿物定向排列数值模拟建模及破坏结果

Fig. 12 Numerical simulation modeling and failure results of orientation arrangement of granitic rocks and minerals

结果表明，随着片麻理角度的增大，花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩的岩石强度均呈现出不同程度的下降，在 90° 时有所回升；且随着片麻理角度的增大，花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩的岩石微裂隙发育数均呈现出不同程度的下降。相比同等粒径下块状构造（花岗结构等）的花岗闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩的单轴抗压强度 228.051 MPa、224.645 MPa 以及 232.776 MPa，具片麻理的花岗质岩石强度普遍偏低，更有利于裂缝性储层的生成（图 13a、b）。通过统计矿物定向排列倾角与晶间裂隙数的占比关系可知，尽管随着片麻理角度的增大岩石微裂隙发育数均呈下降趋势，但晶间缝的占比显著提高，保证了裂缝的连通性，同样也能形成优质储层（图 13c）。片麻状构造的花岗质岩石裂缝发育通常顺片麻理的方向，随着矿物定向排列倾角的增大，即片麻理的方向与所设应力方向逐渐一致，裂缝发育需克服矿物晶间的阻力显著下降，优先沿片麻理方向延伸形成贯通性晶间裂缝，微裂隙网络逐渐稀疏。前人通过对不同倾角的片麻状构造花岗质岩石进行了室内力学试验^[62, 63]，

模拟结果与其结论相一致；此外，有研究表明具片麻理的岩石储层物性更优^[25]。该方法可为地质勘探开发上寻找优势岩性岩相储层提供指导。



(a) 矿物定向排列角度-单轴抗压强度关系图; (b) 矿物定向排列角度-总微裂缝数关系图; (c) 定向排列角度-晶间微裂缝占比关系图。

图 13 不同定向排列角度花岗质岩石力学性质及微裂缝发育情况
Fig. 13 Directional arrangement of minerals, mechanical properties and microfracture development of granitic rocks at different angles

4 结论

对于济阳坳陷花岗质岩石，矿物含量、矿物粒径以及矿物的定向排列对其力学性质和裂隙发育有着重要影响。且数值模拟在研究这种结晶类岩石储层发育控制因素有着较好的效果。

(1) 石英、斜长石、碱性长石等矿物的含量与花岗质岩石单轴抗压强度之间并无明显相关性。长石含量是花岗质岩石裂隙性储层发育的关键因素，其中碱性长石含量的增加对裂隙发育的建设性作用尤为明显。

(2) 在同一构造应力条件下，当矿物成分及含量一致时，大粒径的岩石更容易发育裂隙性储层；但随着粒径的增大，微裂隙的密度会有所下降。

(3) 相较于块状花岗质岩石，具片麻理的花岗质岩石裂隙发育所需的构造应力更小，且微裂隙之间的连通性更好，更容易发育优质储层。

参考文献

- [1] 国家能源局. SY/T 5386-2010 裂缝性油(气)藏探明储量计算细则[Z]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [2] AGHLI G, MOUSSAVI-HARAMI R, TOKHMECHI B. Integration of sonic and resistivity conventional logs for identification of fracture parameters in the carbonate reservoirs (A case study, Carbonate Asmari Formation, Zagros Basin, SW Iran)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 186.
- [3] 夏在连, 刘树根, 时华星, 等. 中伊朗盆地地层条件下裂缝性储层岩石力学性质实验分析[J]. 石油实验地质, 2008, (01): 86-93.
- [4] 王希贤. EBANO油田裂缝-孔隙型灰岩稠油油藏特征及油气富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(02): 416-422.
- [5] 张量, 卢景美, 李爱山, 等. 墨西哥东南盆地白垩系裂缝综合研究——以M区块W构造为例[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(05): 58-65.
- [6] FIROOZABADI A. Recovery Mechanisms in Fractured Reservoirs and Field Performance[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2000, 39(11).
- [7] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, (04): 392-400.
- [8] 宁飞, 何娟, 赵亮东, 等. Sinjar隆起西翼储层裂缝发育特征及形成机制[J]. 科技导报, 2016, 34(13): 88-92.
- [9] 赵中平. 阿拉伯板块北缘Sinjar隆起西翼裂缝成因及启示[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(01): 107-116.
- [10] 祝晓林, 刘宗宾, 葛丽珍, 等. 渤海油田裂缝性潜山油藏储层分类及剩余油分布规律[J]. 断块油气田, 2022, 29(04): 527-531.
- [11] ZHANG K X, BAI G P, CAO B F. Global Deep Siliciclastic Reservoirs: Distribution Patterns and Geological Features[M]. International Conference and Exhibition, 2015, 13-16 September 2015: 484.
- [12] 巩磊, 秦欣楠, 高帅, 等. 变质岩潜山多尺度裂缝发育特征及裂缝网络结构模式: 以渤中Z变质岩潜山为例[J]. 地学前缘, 2024, 31(05): 332-343.
- [13] 徐长贵, 杜晓峰, 刘晓健, 等. 渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(02): 235-247.
- [14] 谢玉洪, 张功成, 沈朴, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷大气田形成条件与勘探方向[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1199-1210.
- [15] 韩大匡. 中国油气田开发现状、面临的挑战和技术发展方向[J]. 中国工程科学, 2010, 12(05): 51-57.
- [16] 袁士义等. 裂缝性油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [17] D'ELIA L, GARCIA M, FEINSTEIN E, et al. Characterization of a naturally fractured ignimbrite reservoir: Subsurface model validated from worldwide analogue outcrops and production data[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 158.
- [18] 韩鹏远, 丁文龙, 杨德彬, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层裂缝表征与主控因素分析[J]. 地学前缘, 2024, 31(05): 209-226.
- [19] 李云涛, 丁文龙, 韩俊, 等. 顺北地区走滑断裂带奥陶系碳酸盐岩裂缝分布预测与主控因素研究[J]. 地学前缘, 2024, 31(05): 263-287.
- [20] 邵威猛, 牛永斌, 程梦园, 等. 豫西北奥陶系马家沟组碳酸盐岩中裂缝-溶洞的发育特征及成因机制[J]. 现代地质, 2023, 37(05): 1306-1320.
- [21] 刘倩, 樊太亮, 高志前, 等. 新疆塔北隆起桥古地区前中生界碳酸盐岩潜山储层特征与发育模式[J]. 现代地质, 2022, 36(05): 1391-1402.
- [22] LIU C Y, LI H Y, SHAN X L, et al. Development mechanism of metamorphic fractured reservoirs in the Bohai Bay Basin: Implications from tectonic and magmatic hydrothermal activities[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 229.
- [23] 余朝华, 杜业波, 肖坤叶, 等. 乍得Bongor盆地基岩潜山储层特征与影响因素研究[J]. 岩石学报, 2019, 35(04): 1279-1290.
- [24] 朱茂林, 刘震, 刘惠民, 等. 东营凹陷北带基岩风化壳储层发育特征及控制因素[J]. 地学前缘, 2024, 31(03): 324-336.
- [25] 穆星, 孟涛, 石泉清, 等. 济阳坳陷太古宙基岩储层特征及油气成藏条件分析[J]. 现代地质, 2024: 1-18.
- [26] 徐静, 叶小明, 刘小鸿, 等. 不同岩性裂缝油气藏定量表征关键技术[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(05): 41-48.
- [27] 田鹤, 曾联波, 徐翔, 等. 四川盆地涪陵地区海相页岩天然裂缝特征及对页岩气的影响[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(03): 474-483.
- [28] 孙雅雄, 梁兵, 邱旭明, 等. 苏北盆地高邮凹陷阜二段页岩天然裂缝发育特征及其对页岩油富集和保存的影响[J]. 地学前缘, 2024, 31(05): 61-74.

- [29] ZENG X, YANG T, FENG J W, et al. Development characteristics and controlling factors of fractures in lacustrine shale and their geological significance for evaluating shale oil sweet spots in the third member of the Shahejie Formation in the Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Science, 2024, 21(2): 791-805.
- [30] ZHANG X M, WANG R, SHI W Z, et al. Structure- and lithofacies-controlled natural fracture developments in shale: Implications for shale gas accumulation in the Wufeng-Longmaxi Formations, Fuling Field, Sichuan Basin , China[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 223.
- [31] 马诗杰, 曾联波, 石学文, 等. 四川盆地泸州地区海相页岩天然裂缝特征及主控因素[J]. 地球科学, 2023, 48(07): 2630-2642.
- [32] 史今雄, 赵向原, 潘仁芳, 等. 川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(02): 393-405.
- [33] 李长海, 赵伦, 刘波, 等. 碳酸盐岩裂缝研究进展及发展趋势[J]. 地质科技通报, 2021, 40(04): 31-48.
- [34] 杜晓宇, 金之钧, 曾联波, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7页岩油储层天然裂缝发育特征与控制因素[J]. 地球科学, 2023, 48(07): 2589-2600.
- [35] 张庄, 章顺利, 何秀彬, 等. 川西坳陷须家河组二段裂缝发育特征及形成主控因素——以合兴场气田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(05): 581-590.
- [36] KONG L, SHANG J L, RANJITH P G, et al. Grain-based DEM modelling of mechanical and coupled hydro-mechanical behaviour of crystalline rocks[J]. Engineering Geology, 2024, 339.
- [37] KONG L, RANJITH P G, LI B Q Y. Fluid-driven micro-cracking behaviour of crystalline rock using a coupled hydro-grain-based discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 144.
- [38] HU X J, GUO P P, XIE N, et al. Creep Behavior and Associated Acoustic Characteristics of Heterogeneous Granite Containing a Single Pre-existing Flaw Using a Grain-Based Parallel-Bonded Stress Corrosion Model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(7): 4799-4832.
- [39] CHENG Y, WONG L N Y. A study on mechanical properties and fracturing behavior of Carrara marble with the flat-jointed model[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, 44(6): 803-822.
- [40] 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(03): 497-504.
- [41] BAHADDINI M, SHEIKHPOURKHANI A M, MANSOURI H. Flat-joint model to reproduce the mechanical behaviour of intact rocks[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, 25(8): 1427-1448.
- [42] 王聚贤, 梁鹏, 张艳博, 等. 基于声发射RA-AF值与kneedle算法的岩石拉剪破裂分类研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3267-3279.
- [43] HU X J, GONG X N, HU H B, et al. Cracking behavior and acoustic emission characteristics of heterogeneous granite with double pre-existing filled flaws and a circular hole under uniaxial compression: Insights from grain-based discrete element method modeling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(4).
- [44] CHENG A P, SHU P F, DENG D Q, et al. Microscopic acoustic emission simulation and fracture mechanism of cemented tailings backfill based on moment tensor theory[J]. Construction and Building Materials, 2021, 308.
- [45] 邹才能, 林敏捷, 马锋, 等. 碳中和目标下中国天然气工业进展、挑战及对策[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(02): 418-435.
- [46] 吴晓智, 柳庄小雪, 王建, 等. 我国油气资源潜力、分布及重点勘探领域[J]. 地学前缘, 2022, 29(06): 146-155.
- [47] 刘海涛, 于海涛, 孙雨, 等. 断陷盆地多类型斜坡形成与油气差异富集规律——以渤海湾盆地为例[J]. 岩石学报, 2022, 38(09): 2697-2708.
- [48] 宋明水, 李友强. 济阳坳陷油气精细勘探评价及实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(01): 93-101.
- [49] 宋明水, 王惠勇, 张云银. 济阳坳陷潜山“挤-拉-滑”成山机制及油气藏类型划分[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(04): 1-8.
- [50] 王德英, 王清斌, 刘晓健, 等. 渤海湾盆地海域片麻岩潜山风化壳型储层特征及发育模式[J]. 岩石学报, 2019, 35(04): 1181-1193.
- [51] 张鹏飞, 刘惠民, 王永诗, 等. 济阳坳陷太古界潜山储集体发育模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(06): 20-29.
- [52] 刘惠民, 张鹏飞, 宋国奇, 等. 鲁西地区太古界裂缝类型与发育规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(05): 34-40.
- [53] 孟涛, 穆星, 石泉清, 等. 基岩成岩作用对储层发育的影响——以济阳坳太古界基岩为例[J]. 地学前缘, 2024: 1-21.

- [54] 伍劲, 高先志, 马达德, 等. 柴达木盆地东坪地区基岩风化壳特征[J]. 现代地质, 2017, 31(01): 129-141.
- [55] 李晓东, 王伟, 田忠华, 等. 鲁西泰山岩群新太古代构造特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2024: 1-13.
- [56] ZHANG Q, ZHANG X P, JI P. Numerical study of interaction between a hydraulic fracture and a weak plane using the bonded-particle model based on moment tensors[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 105: 79-93.
- [57] LIU G, CAI M, HUANG M. Mechanical properties of brittle rock governed by micro-geometric heterogeneity[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 358-372.
- [58] LI X F, LI H B, LIU Y Q, et al. Numerical simulation of rock fragmentation mechanisms subject to wedge penetration for TBMs[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 53: 96-108.
- [59] ZHOU J, LAN H X, ZHANG L Q, et al. Novel grain-based model for simulation of brittle failure of Alxa porphyritic granite[J]. Engineering Geology, 2019, 251: 100-114.
- [60] 张翼宇. 不同风化程度花岗岩破坏特征及损伤演化试验研究[D]. 河南: 华北水利水电大学, 2022.
- [61] 张招崇. 深成岩的分类命名问题[J]. 现代地质, 2024, 38(04): 1205-1208.
- [62] CHO J, KIM H, JEON S, et al. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 50: 158-169.
- [63] KONG F M, XUE Y G, QIU D H, et al. Effect of grain size or anisotropy on the correlation between uniaxial compressive strength and Schmidt hammer test for building stones[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299: 123941.

