

## 热液成矿过程岩石差异破裂机制

王张弛<sup>1,2</sup> 许洛源<sup>1</sup> 周荣志<sup>3</sup> 徐其来<sup>1</sup> 蔡哲鑫<sup>1,4</sup> 张鹏聪<sup>1</sup> 于皓丞<sup>1,2\*</sup>

1. 中国地质大学(北京)地质过程与成矿预测全国重点实验室,深时数字地球前沿科学中心,地球科学与资源学院,北京 100083
2. 山东省地质科学研究所,自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室,山东省战略性金属矿产成矿过程与资源利用重点实验室(筹),山东省济南市 250013
3. 山东黄金地质矿产勘查有限公司,山东省烟台市 261400
4. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,地球与空间科学学院,北京 100871

**摘要:** 岩石破裂对热液运移和金属富集至关重要,影响着矿体的规模、形态和空间分布,其差异破裂机制受岩石岩性、力学性质以及构造应力体制等多因素控制,不同因素影响导致破裂模式差异的机制需要定量约束。本文基于安德森断层理论与修正格里菲斯准则,系统分析了不同岩性(花岗岩和板岩)在不同构造体制(正断层、逆断层、走滑断层)、不同深度下孔隙流体因子( $\lambda_v$ )与差应力( $\sigma_1-\sigma_3$ )对三类破裂模式(伸展破裂、伸展-剪切破裂、剪切破裂)的控制机制。在相同深度(4 km 或 6 km)下,花岗岩(岩石抗拉强度与岩石内聚强度比值约 0.55-0.62)在不同构造体制内均发育完整的三类破裂序列,而板岩(岩石抗拉强度与岩石内聚强度比值约 0.66-0.75)在不同构造体制内不发育伸展-剪切破裂;对于正断层,差应力增长相对缓慢,在浅部以伸展破裂为主导,但在深部以剪切破裂为主导;对于逆断层,差应力随深度的增加迅速攀升,优先发生剪切破裂;在岩石破裂再活化过程中,不同深度下均以剪切破裂为主导,若后期断层愈合,则可能发生剪切破裂。计算结果表明,在相同深度下,岩性差异是控制破裂模式差异的主要因素;在相同构造体制下,深度变化对岩石破裂模式影响较大,岩性差异影响微弱,不同构造体制之间的破裂模式差异更为显著;对于不同条件下先存破裂的再活化因其力学性质改变均表现为剪切破裂,若内聚强度增大则伸展破裂在低差应力下再次发育。

**关键词:** 岩石破裂模式; 安德森断层理论; 修正格里菲斯准则; 孔隙流体因子; 差应力; 再活化

**中图分类号:** P553

**收稿日期:** 2025-10-30

**基金项目:** 国家重点研发计划(2023YFC2906900),自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心开放课题(LDKF-2023BZX-10),自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室和山东省战略性金属矿产成矿过程与资源利用重点实验室(筹)(KFKT202410),中国地质大学(北京)大学生创新创业训练计划项目(S202511415033),中央高校基本科研业务费专项(2652024008),深时数字地球前沿科学中心项目(2652023001)

**作者简介:** 王张弛(2005.08-),男,地质学专业,本科生。E-mail: zhangchiwanggeo@qq.com, ORCID: 0009-0001-2751-3784;

**\*通讯作者:** 于皓丞(1991.12-),副教授,博士生导师,从事矿床学教学与科研工作, E-mail: haochengyugeo@qq.com, ORCID: 0000-0003-1051-0955;

## Fracture Modes in Hydrothermal Ore-Forming Processes

Zhang-Chi Wang<sup>1,2</sup>, Luo-Yuan Xu<sup>1</sup>, Rong-Zhi Zhou<sup>3</sup>, Qi-Lai Xu<sup>1</sup>, Zhe-Xin Cai<sup>1,4</sup>, Peng-Cong Zhang<sup>1</sup>,  
Hao-Cheng Yu<sup>1,2\*</sup>

1. *State key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Frontiers Science Center for Deep-time Digital Earth, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*
2. *Shandong Key Laboratory of Metallogenic Geological Process and Resources Utilization (Preparatory), Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization Subordinated to the Ministry of Land and Resources, Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China*
3. *Shandong Gold Geological Mineral Exploration Co., Ltd. Shandong Yantai 261400, China*
4. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*

**Abstract:** Rock fracturing is crucial for hydrothermal fluid migration and metal enrichment, influencing the scale, shape, and spatial distribution of ore bodies. The mechanisms governing differences in fracture modes are controlled by multiple factors such as rock lithology, mechanical properties, and tectonic stress regimes. The mechanisms by which different factors lead to variations in fracture modes require quantitative constraints. Based on Anderson's fault theory and the modified Griffith criterion, this study systematically analyzes the control mechanisms of pore fluid factor ( $\lambda_v$ ) and differential stress ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) on three types of fracture modes (extensional fractures, extensional-shear fractures, and shear fractures) for different lithologies (granite and slate) under various tectonic regimes (normal fault, reverse fault, and strike-slip fault) at different depths. At the same depth (4 km or 6 km), granite (with a ratio of tensile strength to cohesive strength of approximately 0.55-0.62) develops a complete sequence of all three fracture types under different tectonic regimes, whereas slate (with a ratio of tensile strength to cohesive strength of approximately 0.66-0.75) lacks extensional-shear fractures in all tectonic regimes. For normal faults, the increase in differential stress is relatively slow, with extensional fractures dominating at shallow depths, while shear fractures dominate at greater depths. For reverse faults, differential stress increases rapidly with depth, leading to a preference for shear fracturing. During the reactivation of rock fractures, shear fractures dominate at all depths. If subsequent fault healing occurs, shear fractures may develop. The calculation results indicate that, at the same depth, lithological differences are the primary factor controlling variations in fracture modes. Under the same tectonic regime, depth variations significantly influence rock fracture modes, while lithological differences have a minor effect. Differences in fracture modes between

different tectonic regimes are more pronounced. For pre-existing fractures under varying conditions, reactivation due to changes in mechanical properties generally manifests as shear fractures. This study contributes to deepening the understanding of fracture dynamics theory in hydrothermal mineralization systems and provides a theoretical reference for target selection in deep hydrothermal mineral exploration.

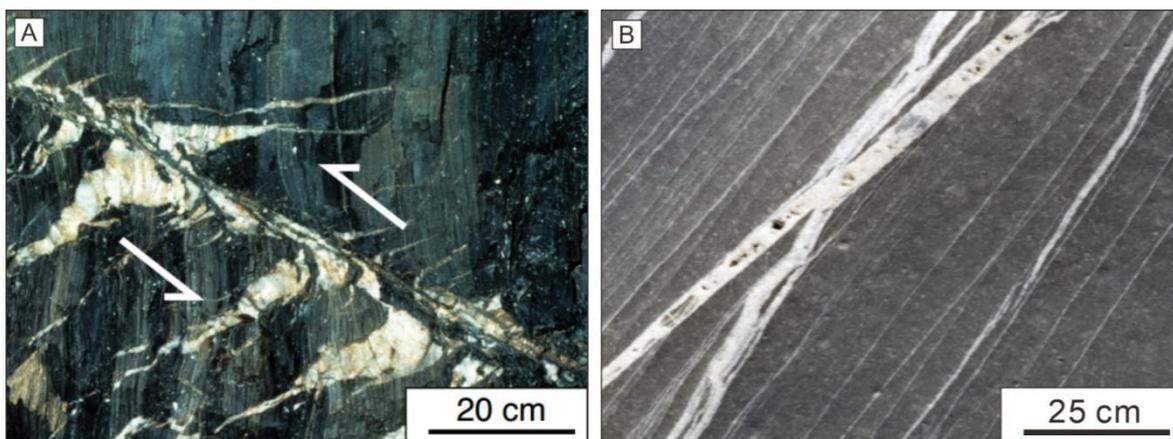
**Keywords:** Rock fracture modes; Anderson's fault theory; Modified Griffith criterion; Pore fluid factor; Differential stress; Reactivation

## 1.引言

热液成矿作用是地球深部物质循环与金属元素富集的重要地质过程(Cox, 2010; Audétat, 2019; Qiu et al., 2021)。岩石破裂所形成的三维裂隙网络,既是成矿流体运移的核心导矿构造,也是成矿物质沉淀的重要容矿空间。该裂隙网络的破裂模式差异性,直接影响成矿热液系统的连通性与渗透性(Liu et al., 2020; Zhang et al., 2022),进而控制矿体的规模大小、形态特征与空间分布规律(Hickey et al., 2014; 李振宇等, 2024; Yu et al., 2025)。随着全球浅部矿产资源日渐枯竭,深部成矿系统已成为矿产勘查与研究的前沿热点(Li et al., 2021; Alcalde et al., 2022; Shirani Faradonbeh et al., 2025)。充分理解深部复杂应力场作用下岩石破裂行为的控制因素及其差异机制,对于揭示热液成矿系统的发育规律具有重要意义(Chi et al., 2022; 杨立强等, 2024)。

在脆性-韧性过渡带及更深部的地质环境中,岩石破裂模式呈现显著的复杂性与多样性,伸展破裂、伸展-剪切破裂及剪切破裂是三类典型的宏观脆性破坏模式(图 1; Sibson, 2004)。这些模式的形成与演化受岩性、构造体制、深度(围压)、孔隙流体压力及流体-岩石相互作用等多因素的联合控制(徐颖等, 2018; Lu et al., 2024; Sun et al., 2025; Wang et al., 2025),且各因素间存在强烈的非线性耦合效应。安德森断层理论明确了不同构造体制下的主应力配置关系(Jones, 1942),修正格里菲斯准则与库仑破裂准则为解释脆性岩石破坏提供了基础力学框架(Griffith, 1921)。然而,现有研究多聚焦岩石物理力学性质(Lin et al., 2021)、地质环境(Damasceno et al., 2023)、应力状态(Ren et al., 2020)、流体作用(Huang et al., 2023)等单一因素对岩石破裂的影响,缺乏对多因素共同作用的系统分析。此外,对于岩石破裂后因力学性质改变而引发的再活化过程,如其断层愈合-再破裂的动态循环机制、流体-岩石反应引发的岩石强度参数(抗拉强度  $T$ 、内聚强度  $C$ )变化规律,亦尚未形成定量约束。一些研究在构造体制的对比分析中,多局限于单一构造背景下的破裂特征描述,尤其缺乏对正断层、逆断层、走滑断层体制下破裂模式演化路径的系统对比,同时对不同构造体制转换过程中破裂模式的过渡机制的研究亦显不足。针对不同岩性(如刚性花岗岩与塑性板岩)在深部复杂环境下的破裂响应差异,尤其是抗拉强度与内聚强度比值( $T/C$ )对破裂序列完整性的控制机理,亦尚未形成统一的定量判别标准。

针对上述问题,本文整合构造地质学、岩石力学,以热液成矿系统中典型赋矿围岩(花岗岩、板岩)为研究对象,基于安德森断层理论、修正格里菲斯准则与有效应力定律,系统探讨岩性差异( $T/C$  比值)、构造体制类型(正断层、逆断层、走滑断层)、深度(围压)变化及孔隙流体因子( $\lambda_v$ )的耦合作用对三类破裂模式的控制机制;定量揭示岩石破裂再活化过程中断层愈合-再破裂的动态力学响应。本研究成果有助于为热液成矿系统的破裂动力学理论的理解提供理论参考。



**图 1** 不同破裂模式野外剖面。A. 与小型逆断层相关的剪切脉与伴生的伸展脉，共同指示了断层的运动方向与局部构造应力场。位于澳大利亚维多利亚州中部的 Wattle Gully 金矿；B. 与断层相关的方解石伸展脉群，产于英国萨默塞特郡基尔夫的灰岩中。图像引自 Cox, 2020。

**Figure 1.** Field profile illustrating different fracture modes. A. Shear veins and associated extensional veins related to a small reverse fault. They collectively reveal the orientation of fault motion and the local tectonic stress field. Wattle Gully Gold Mine, central Victoria. B. Fault-controlled arrays of calcite extensional veins in limestones at Kilve, Somerset, UK. The image is after Cox, 2020.

## 2. 研究方法

为系统揭示岩性、构造体制与深度对岩石破裂模式的联合控制机制，本文基于安德森断层理论、修正格里菲斯准则与库仑破裂准则，并引入孔隙流体因子 ( $\lambda_v$ )，定量分析流体在岩石破裂过程中的作用。

地壳内的应力状态主要受控于深度、构造作用力和地形效应 (Lucier et al., 2008)。垂向应力  $\sigma_v$  在近地表主要由上覆岩层重力引起，方向近似垂直，大小可视为地表垂向应力的分量，记为  $\sigma_v$ ，若岩石密度恒定，其随深度的变化关系为：

$$\sigma_v = \rho_{\text{rock}}(z)gz$$

其中  $\rho$  为岩石密度， $z$  为深度， $g$  为重力常数。根据有效应力定律 ( $\sigma'_i = \sigma_i - P_f$ ， $P_f$  为孔隙流体压力；Rubey et al., 1959)，定义孔隙流体因子 ( $\lambda_v$ ) 为孔隙流体压力与正应力的比值 ( $\lambda_v = P_f/\sigma_v$ )，用来表征流体压力的相对大小。在静水压力条件下，孔隙流体压力等于静水压力，其值通常小于静岩压力 ( $\sigma_v$ )，因此  $\lambda_v$  通常小于 1。然而，在地质过程中（尤其是在封闭或半封闭的热液系统中），由于快速沉积压实或构造挤压等因素，孔隙流体压力可以显著升高。当  $\lambda_v > 1$  时，即表示孔隙流体压力 ( $P_f$ ) 超过了静岩压力 ( $\sigma_v$ )。这种状态并非静态平衡，而是一种动态的、由流体生成或补给速率超过排泄速率所维持的高压状态。据此，可分别推导三类破裂的临界条件。

对于伸展破坏，由水力压裂准则  $P_f = \sigma_3 + T$ （其中  $\sigma_3$  为最小主应力方向，伸展构造体制下为水平方

向；T 为抗拉强度）与  $\lambda_v$  的定义式联立可得：

$$\lambda_v = \frac{\sigma_3 + T}{\sigma_v}$$

地壳浅部岩石的脆性破裂行为可采用格里菲斯-莫尔-库仑复合准则进行描述 (Brace, 1960; Hancock, 1985)。对于伸展-剪切破坏，由修正的格里菲斯破坏准则与水力压裂准则可得 (Secor, 1965)：

$$\lambda_v = \frac{[8T(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}{16T\sigma_v}$$

对于剪切破坏，基于莫尔-库仑准则，考虑最优破裂角  $\theta_{\text{pot}} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{1}{\mu} \right)$ ，其中  $\mu$  为内摩擦因数，其临界条件为 (Cox, 2020)：

$$\lambda_v = \frac{1}{2\sigma_v} \left[ 2C \tan 2\theta_{\text{opt}} - \left( \frac{1 - \cos 2\theta_{\text{opt}}}{\cos 2\theta_{\text{opt}}} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1 + \cos 2\theta_{\text{opt}}}{\cos 2\theta_{\text{opt}}} \right) \sigma_3 \right]$$

### 3.结果

为定量验证上述破裂模式控制机制，本文选取热液成矿系统的常见赋矿围岩花岗岩与板岩为研究对象，其在不同深度下的岩石力学参数如表 1 与表 2 所示（岩石力学参数数据源自：林天瑞等, 1993；曾庆有, 2018；黄正均等, 2020；马超等, 2024）。基于前人建立的  $\lambda_v - (\sigma_1 - \sigma_3)$  判别模型与临界方程 (Cox, 2020)，系统计算并绘制了二者在不同构造体制与深度下的破裂模式图（图 2，3）。

表 1 花岗岩 4 km、6 km 相关力学参数

Table 1. Mechanical parameters of granite at 4 km and 6 km

深度 (z; km)	抗拉强度 (T; MPa)	完整岩石内聚强度 (C; MPa)	内摩擦因数 ( $\mu$ )	岩石密度 ( $\rho$ ; g/cm <sup>3</sup> )
4	19	30.35	0.6	2.63
6	18	32.6	0.7	2.63

表 2 板岩 4 km、6 km 相关力学参数

Table 2. Mechanical parameters of slate at 4 km and 6 km

深度 (z; km)	抗拉强度 (T; MPa)	完整岩石内聚强度 (C; MPa)	内摩擦因数 ( $\mu$ )	岩石密度 ( $\rho$ ; g/cm <sup>3</sup> )
4	17	22.5	0.65	2.74
6	15.8	24	0.7	2.74

基于上述岩石力学参数，对于花岗岩 4 km 在正断层情况下：T = 19 MPa, C = 30.35 MPa,  $\rho = 2.63 \text{ g/cm}^3$ ,  $\mu = 0.6$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，根据  $\sigma_v = \rho_{\text{rock}}(z)gz$ ，同时令  $x = \sigma_1 - \sigma_3$ ，可得深度在 4 km 时， $\sigma_v = 105.2 \text{ MPa}$ ， $\sigma_1 \approx \sigma_v$ ；

对于伸展破坏：

$$\lambda_v = \frac{\sigma_3 + T}{\sigma_v}$$

$$\lambda_v = \frac{121.58 - x}{105.2}$$

对于伸展-剪切破坏:

$$\lambda_v = \frac{[8T(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}{16T\sigma_v}$$

$$\lambda_v = \frac{27854.4 - 132.6x - x^2}{27854.4}$$

对于剪切破坏:

$$\theta_{opt} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{1}{\mu} \right)$$

$$2\theta_{opt} = 59^\circ$$

$$\lambda_v = \frac{1}{2\sigma_v} \left[ 2C \tan 2\theta_{opt} - \left( \frac{1 - \cos 2\theta_{opt}}{\cos 2\theta_{opt}} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1 + \cos 2\theta_{opt}}{\cos 2\theta_{opt}} \right) \sigma_3 \right]$$

$$\lambda_v = \frac{312.86 - 2.95x}{210.4}$$

对于花岗岩 4 km 在逆断层情况下: 同理  $\sigma_v = 105.2$  MPa,  $\sigma_3 \approx \sigma_v$ ;

对于伸展破坏, 前文已经推导过,  $\lambda_v$  为常数, 此处  $\lambda_v \approx 1.156$

对于伸展-剪切破坏:

$$\lambda_v = \frac{[8T(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}{16T\sigma_v}$$

$$\lambda_v = \frac{27854.4 + 132.6x - x^2}{27854.4}$$

对于剪切破坏:

$$\theta_{opt} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{1}{\mu} \right)$$

$$2\theta_{opt} = 59^\circ$$

$$\lambda_v = \frac{1}{2\sigma_v} \left[ 2C \tan 2\theta_{opt} - \left( \frac{1 - \cos 2\theta_{opt}}{\cos 2\theta_{opt}} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1 + \cos 2\theta_{opt}}{\cos 2\theta_{opt}} \right) \sigma_3 \right]$$

$$\lambda_v = \frac{328.54 - x}{221.987}$$

对于花岗岩 4 km 在走滑断层情况下:  $\sigma_v = 105.2$  MPa, 则  $\sigma_2 = 105.2$  MPa;  $\sigma_1 = 105.2 + x/2$ ;  $\sigma_3 = 105.2 - x/2$ ; 对于伸展破坏:

$$\lambda_v = \frac{\sigma_3 + T}{\sigma_v}$$

$$\lambda_v = \frac{243.16 - x}{210}$$

对于伸展-剪切破坏:

$$\lambda_v = \frac{[8T(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}{16T\sigma_v}$$

$$\lambda_v = \frac{27854.4 - x^2}{27854.4}$$

对于剪切破坏:

$$\theta_{opt} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{1}{\mu} \right)$$

$$2\theta_{opt} = 59^\circ$$

$$\lambda_v = \frac{1}{2\sigma_v} \left[ 2C \tan 2\theta_{opt} - \left( \frac{1 - \cos 2\theta_{opt}}{\cos 2\theta_{opt}} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1 + \cos 2\theta_{opt}}{\cos 2\theta_{opt}} \right) \sigma_3 \right]$$

$$\lambda_v = \frac{41280.2 - 258x}{27854.4}$$

板岩及其他深度条件下的破裂包络线按上述相同方法进行计算, 并绘制  $\lambda_v - (\sigma_1 - \sigma_3)$  图像 (图 2, 3):

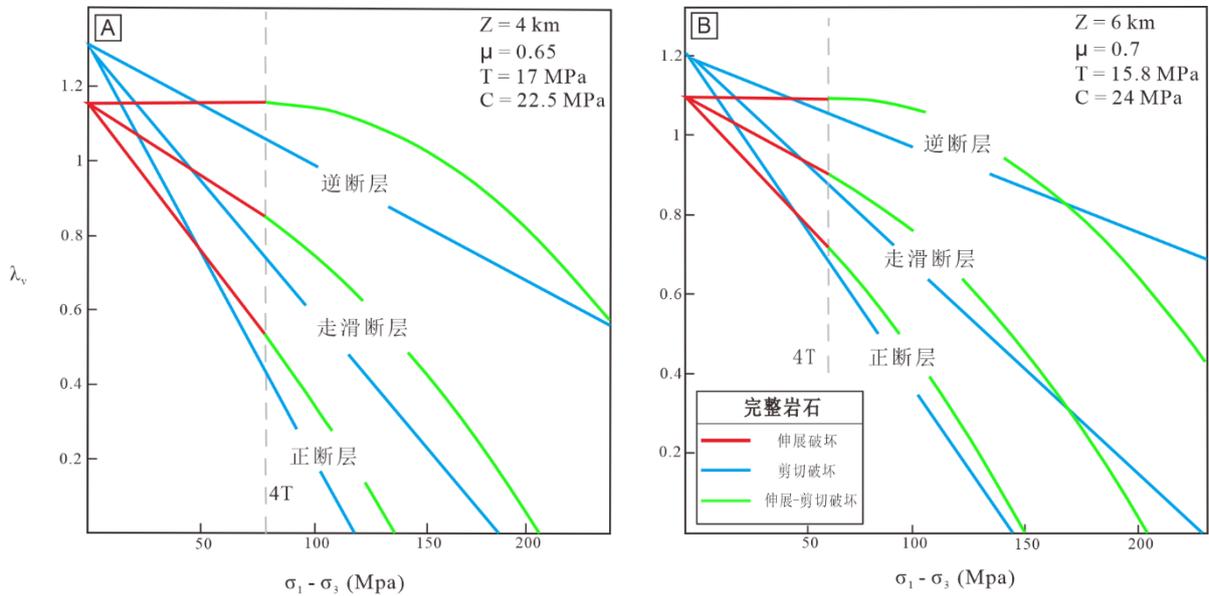


图 2 板岩在 4 km (A)、6 km (B) 深度下破裂模式图:  $z$  表示深度,  $\mu$  表示岩石内摩擦系数,  $T$  表示岩石抗拉强度,  $C$  表示岩石内聚强度; 图中红色线代表完整岩石的伸展破裂, 绿色线代表完整岩石的伸展-剪切破裂, 深蓝色线代表完整岩石的剪切破裂。

**Figure 2.** Diagram showing fracture modes in slate at depths of 4 km (A) and 6 km (B), where  $z$  is depth,  $\mu$  is the internal friction coefficient,  $T$  is tensile strength, and  $C$  is cohesive strength. The red, green, and dark blue lines represent extensional, extensional-shear, and shear fractures of intact rock, respectively.

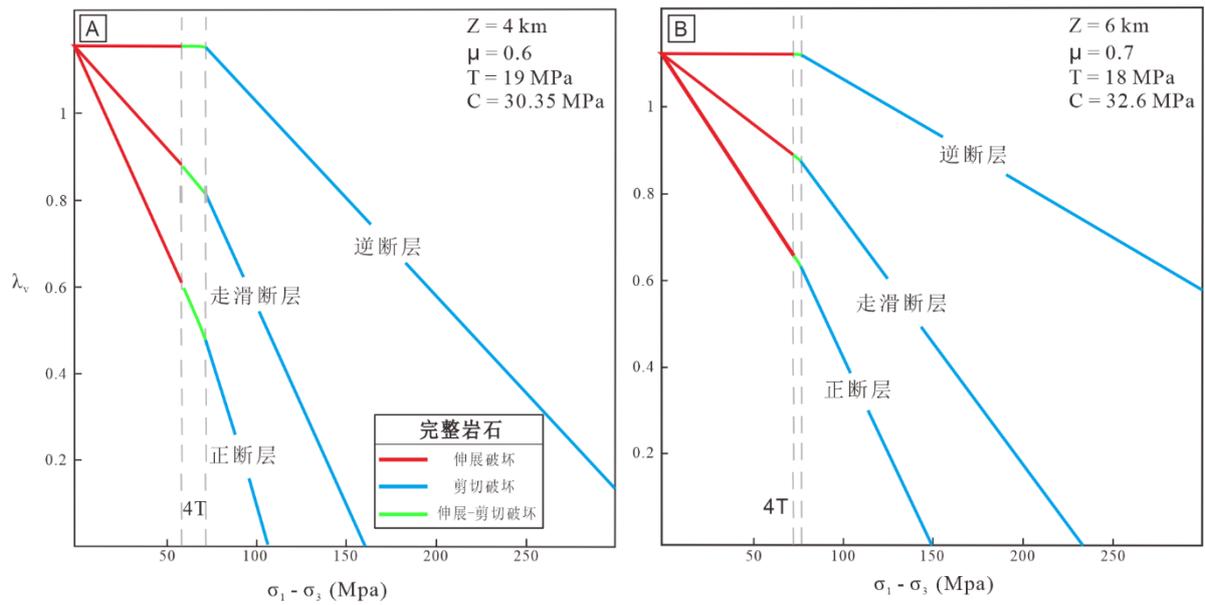


图3 花岗岩在4 km (A)、6 km (B) 深度下破裂模式图: z 表示深度,  $\mu$  表示岩石内摩擦系数, T 表示岩石抗拉强度, C 表示岩石内聚强度; 图中红色线代表完整岩石的伸展破裂, 绿色线代表完整岩石的伸展-剪切破裂, 深蓝色线代表完整岩石的剪切破裂。

**Figure 3.** Diagram showing fracture modes in granite at depths of 4 km (A) and 6 km (B), where z is depth,  $\mu$  is the internal friction coefficient, T is tensile strength, and C is cohesive strength. The red, green, and dark blue lines represent extensional, extensional-shear, and shear fractures of intact rock, respectively.

板岩各深度破裂模式图中剪切破裂包络线与伸展破裂包络线的交点位于剪切破裂包络线与伸展-剪切破裂包络线左侧, 从而缺失伸展-剪切破裂模式, 而花岗岩各深度破裂模式图的三段破裂模式由伸展, 到伸展-剪切, 再到剪切破裂形成完整的破裂序列。

基于以上  $\lambda_v - (\sigma_1 - \sigma_3)$  图解, 绘制出完整岩石在逆断层以及正断层下, 不同深度对破坏包络线的影响 (图4, 5):

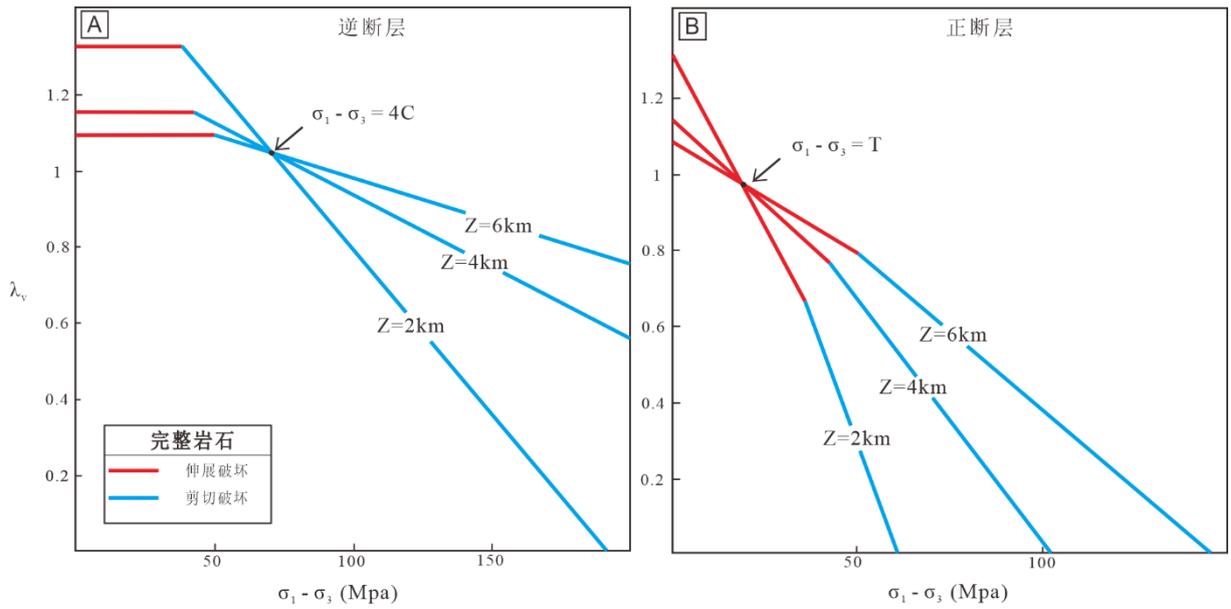


图4 板岩逆断层（A）以及正断层（B）深度变化对破裂路径的影响：图中红色线代表完整岩石的伸展破裂，深蓝色线代表完整岩石的剪切破裂。

**Figure 4.** Diagram showing the influence of depth variation on the failure envelope in slate under reverse fault (A) and normal fault (B) conditions; the red line represents extensional fractures in intact rock, and the dark blue line represents shear fractures in intact rock.

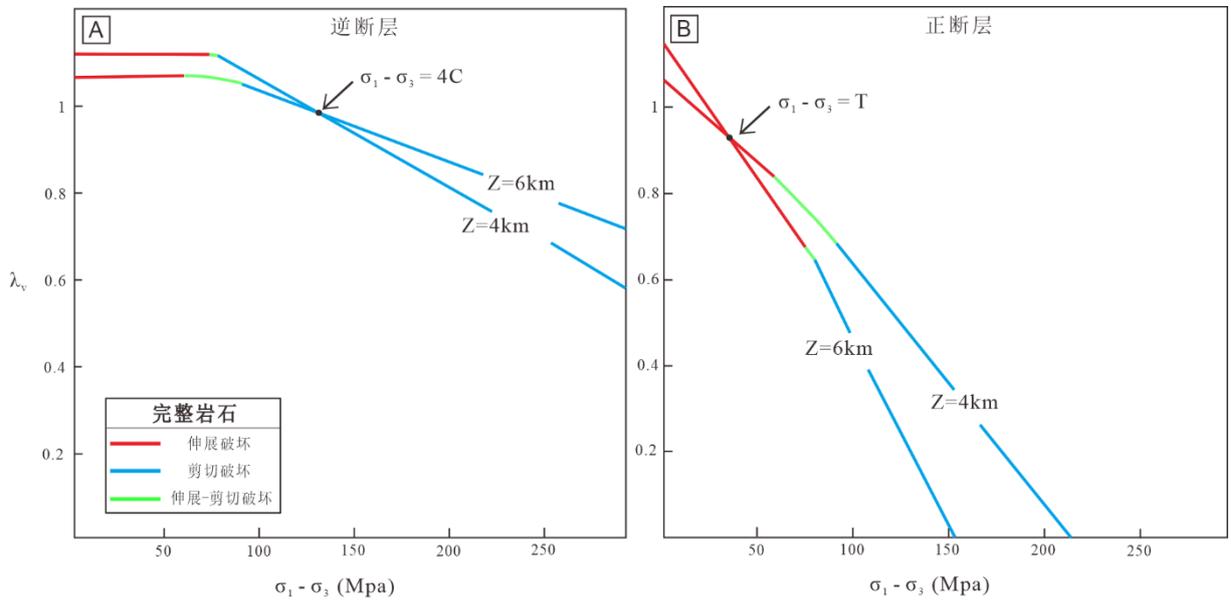


图5 花岗岩逆断层（A）以及正断层（B）深度变化对破裂路径的影响：图中红色线代表完整岩石的伸展破裂，深蓝色线代表完整岩石的剪切破裂。

**Figure 5.** Diagram showing the influence of depth variation on the failure envelope in granite under reverse fault (A) and normal fault (B) conditions; the red line represents extensional fractures in intact rock, and the dark blue line represents shear fractures in intact rock.

图 4, 5 显示不同岩性、相同构造体制下, 其破裂模式呈现近乎相同的趋势: 逆断层的孔隙流体因子 ( $\lambda_v$ ) 在较低差应力下保持不变, 在高差应力下以较快速率降低; 正断层的孔隙流体因子 ( $\lambda_v$ ) 在较低差应力下以较慢速率降低, 在高差应力下以较快速率降低 (例如: 对于板岩在深度为 4 km 以及正断层情况下, 低差应力下包络线斜率为  $-9.1 \times 10^{-4}$ ; 高差应力下包络线斜率为  $-1.2 \times 10^{-3}$ )。同时, 对于同种岩性、不同的构造体制下其破裂模式出现明显不同: 在不同的差应力下, 正断层中孔隙流体因子 ( $\lambda_v$ ) 的降低速率均高于逆断层, 图中表现为斜率更大。

岩石发生破裂后其力学性质会发生明显变化, 此时岩石内聚强度急剧降低, 此时沿先前断裂可能会发生再活化的过程, 基于  $\lambda_v - (\sigma_1 - \sigma_3)$  图解, 绘制出花岗岩与板岩在不同深度、不同构造体制下岩石破裂再活化过程图解 (图 6, 7):

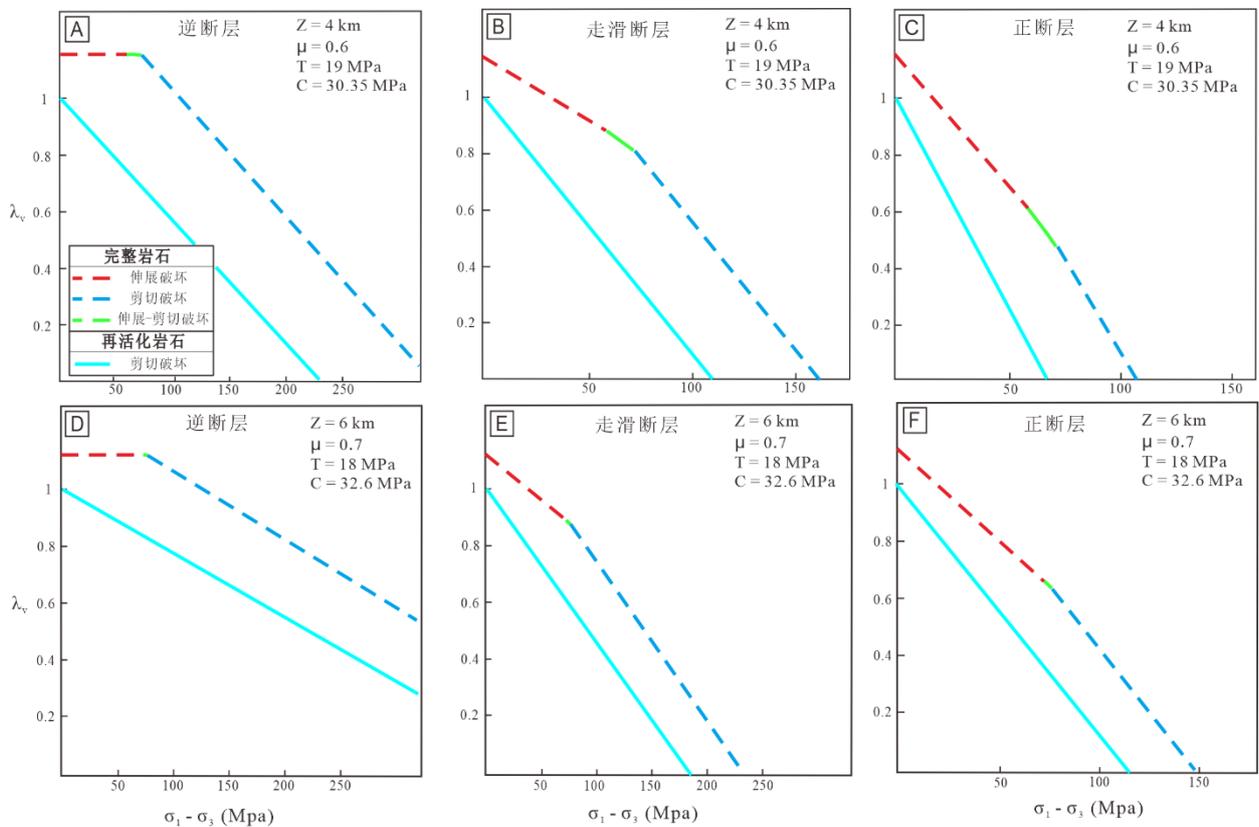


图 6 花岗岩破裂再活化过程:  $z$  表示深度,  $\mu$  表示岩石内摩擦系数,  $T$  表示岩石抗拉强度,  $C$  表示岩石内聚强度; 图中红色线代表完整岩石的伸展破裂, 绿色线代表完整岩石的伸展-剪切破裂, 深蓝色线代表完整岩石的剪切破裂, 淡蓝色线代表断层愈合后岩石再活化过程中的剪切破裂; 图 A 至图 F 的实线部分表示不同构造体制下花岗岩再活化过程的破裂路径。

**Figure 6.** Reactivation process of granite fractures: where  $z$  is depth,  $\mu$  is the internal friction coefficient,  $T$  is tensile strength, and  $C$  is cohesive strength. The red, green, and dark blue lines correspond to extensional, extensional-shear, and shear fractures in intact rock. The light blue line represents shear fractures during rock reactivation after fault healing. The solid lines in Figures A to F

indicate the fracture paths of the reactivation process in granite under different tectonic regimes.

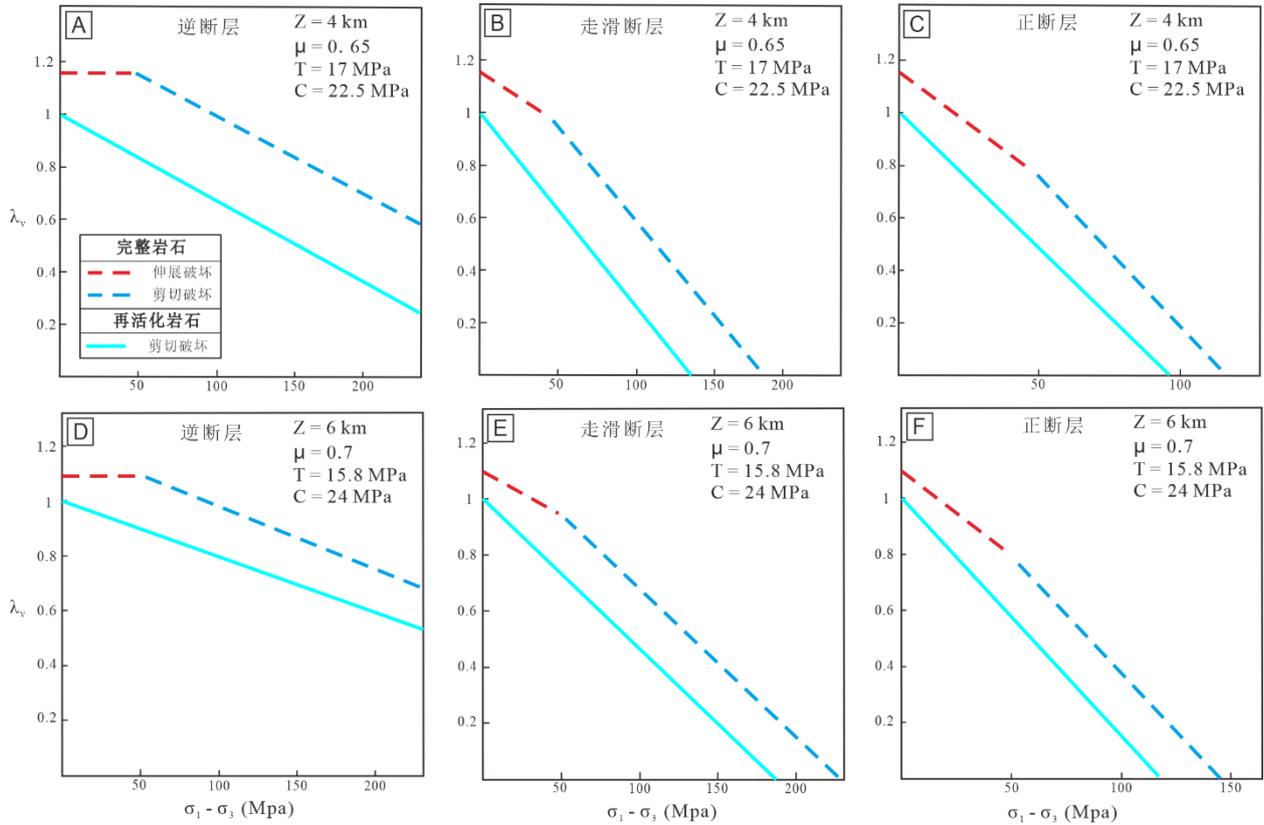


图 7 板岩断裂再活化过程:  $z$  表示深度,  $\mu$  表示岩石内摩擦因数,  $T$  表示岩石抗拉强度,  $C$  表示岩石内聚强度; 红色线代表原先完整岩石的伸展断裂, 深蓝色线代表原先完整岩石的剪切断裂, 淡蓝色线代表岩石再活化过程中的剪切断裂; 图 A 至图 F 的实线部分表示不同构造体制下板岩再活化过程的断裂路径。

**Figure 7.** Reactivation process of slate fractures: where  $z$  is depth,  $\mu$  is the internal friction coefficient,  $T$  is tensile strength, and  $C$  is cohesive strength. The red line represents extensional fractures in the originally intact rock; the dark blue line represents shear fractures in the originally intact rock; the light blue line represents shear fractures during the rock reactivation process. The solid lines in Figures A to F indicate the fracture paths of the reactivation process in slate under different tectonic regimes.

岩石发生断裂后, 岩石内聚强度迅速降低导致岩石断裂再活化过程 (图 6, 7)。虚线部分代表完整岩石的断裂包络线, 实线部分代表岩石断裂再活化断裂包络线。再活化过程中的断裂包络线均低于完整岩石的断裂包络线, 即在更低的差应力条件下即可发生岩石断裂的再活化, 且均为剪切破坏。

在活跃的断层带中, 通常有后期的流体注入, 这些流体使得断层愈合, 内聚强度 ( $C_f$ ) 不断增大, 再活化剪切破坏包络线向孔隙流体因子较高的方向移动, 当  $C_f < \mu T$  时, 其再活化过程均为剪切破坏; 当  $C \geq C_f \geq \mu T$  时, 再活化过程出现伸展破坏, 根据花岗岩和板岩的  $\mu$  与  $T$  的取值可以计算出, 当  $C_f > 12 \text{ MPa}$  时均出现伸展破坏, 所以此处对于花岗岩与板岩采用  $C_f = 12 \text{ MPa}$  来模拟这一过程 (图 8, 9):

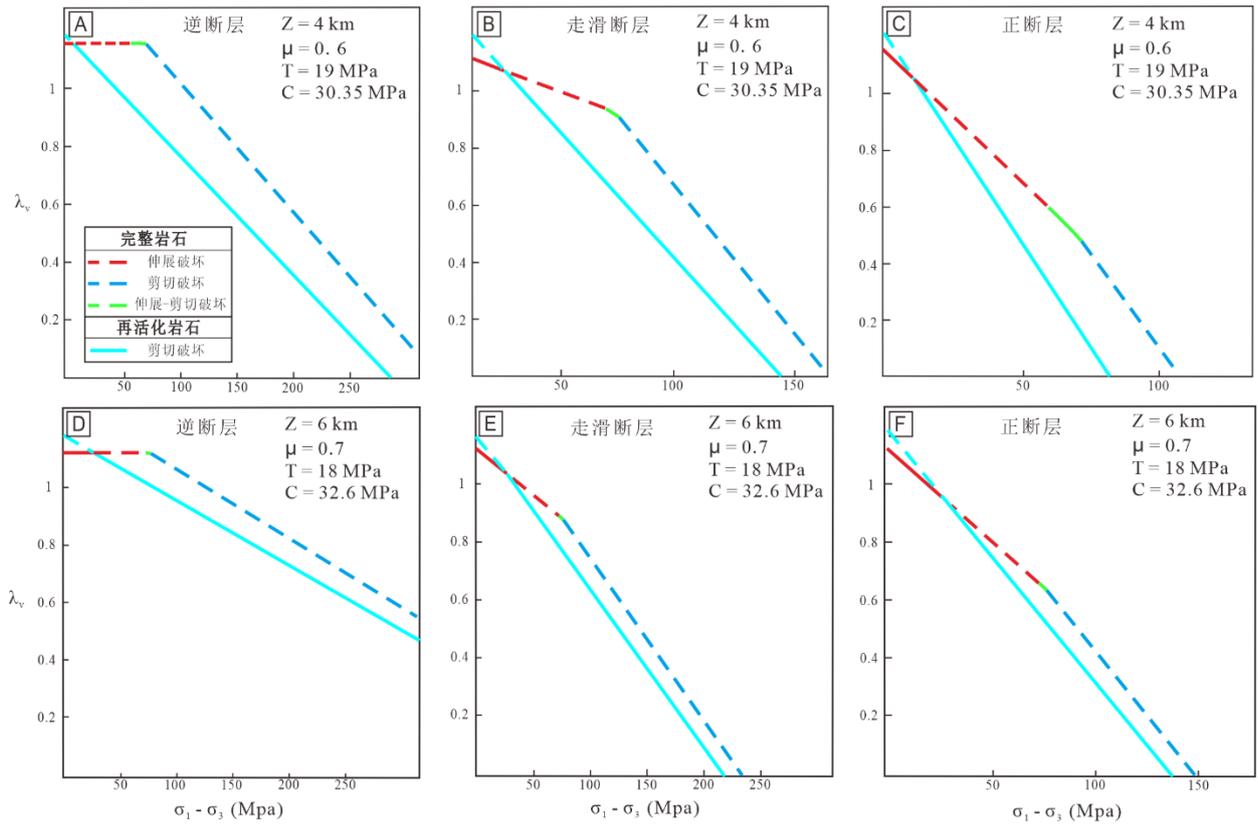


图 8 断层愈合后花岗岩破裂再活化过程： $z$  表示深度， $\mu$  表示岩石内摩擦因数， $T$  表示岩石抗拉强度， $C$  表示岩石内聚强度；红色线代表原先完整岩石的伸展破裂，绿色线代表原先完整岩石的伸展-剪切破裂，深蓝色线代表原先完整岩石的剪切破裂，淡蓝色线代表岩石再活化过程中的剪切破裂；图 A 至图 F 的实线部分表示岩石断层愈合后，在不同构造体制下花岗岩再活化过程的破裂路径。

**Figure 8.** Reactivation of granite fractures after the fault has healed: where  $z$  is depth,  $\mu$  is the internal friction coefficient,  $T$  is tensile strength, and  $C$  is cohesive strength. The red line represents extensional fractures in the originally intact rock; the dark blue line represents shear fractures in the originally intact rock; the light blue line represents shear fractures during the rock reactivation process. The solid lines in Figures A to F indicate the fracture paths of the reactivation process in slate under different tectonic regimes.

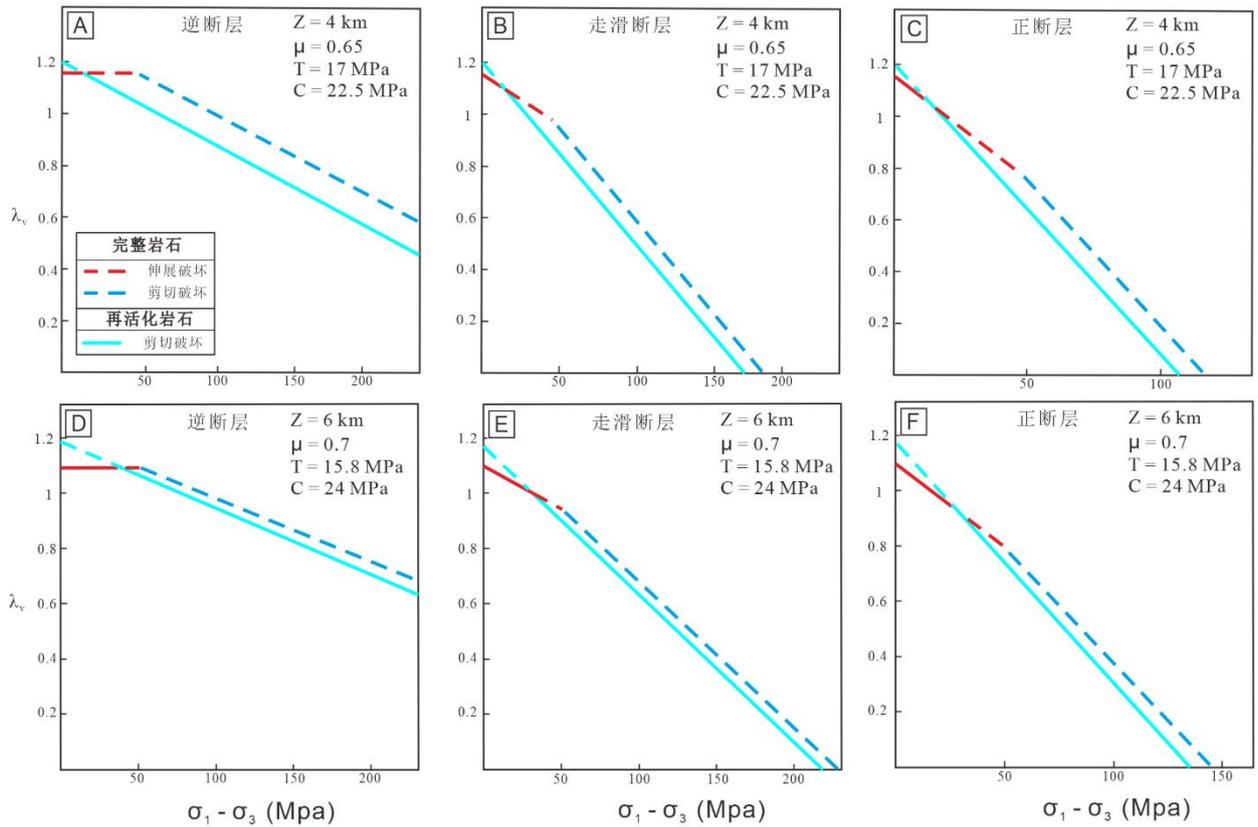


图 9 断层愈合后板岩断裂再活化过程： $z$  表示深度， $\mu$  表示岩石内摩擦系数， $T$  表示岩石抗拉强度， $C$  表示岩石内聚强度；红色线代表原先完整岩石的伸展破裂，深蓝色线代表原先完整岩石的剪切破裂，淡蓝色线代表岩石再活化过程中的剪切破裂；图 A 至图 F 的实线部分表示岩石断层愈合后，在不同构造体制下板岩再活化过程的破裂路径。

**Figure 9.** Reactivation of slate fractures after the fault has healed: where  $z$  is depth,  $\mu$  is the internal friction coefficient,  $T$  is tensile strength, and  $C$  is cohesive strength. The red line represents extensional fractures in the originally intact rock; the dark blue line represents shear fractures in the originally intact rock; the light blue line represents shear fractures during the rock reactivation process. The solid lines in Figures A to F indicate the fracture paths of the reactivation process in slate under different tectonic regimes.

在断层愈合后，岩石内聚强度升高，导致岩石发生断裂再活化过程，其破裂路径如图所示（图 8，9）。虚线部分代表完整岩石的破裂包络线，实线部分代表岩石断裂再活化破裂包络线。在高差应力条件下流体加压会导致完整岩石发生剪切破坏；在极低差应力条件下流体加压则会导致完整岩石发生伸展破坏。

## 4. 讨论

### 4.1 破裂模式差异成因

在相同深度与构造体制下，花岗岩与板岩的破裂行为存在系统性差异（图 3，4）。其根本原因在于两类岩石的强度参数组合（ $T, C$ ）不同，从而导致其破裂包络线在  $\lambda_v - (\sigma_1 - \sigma_3)$  空间中的形态与相对位

置发生变化。

花岗岩具有较低的岩石抗拉强度与较高的岩石内聚强度 ( $T/C \approx 0.55-0.62$ )，表现出完整的三阶段破裂序列 (伸展破裂→伸展-剪切破裂→剪切破裂)。如图 3 所示，其伸展破裂包络线伸展-剪切包络线和剪切破裂包络线在  $\sigma_1-\sigma_3 = 4T$  及  $\sigma_1-\sigma_3 = 4T/\sin 2\theta$  处良好衔接，形成了一个连续的复合包络线。

板岩由于高的岩石抗拉强度与岩石内聚强度的比值 ( $T/C \approx 0.66-0.75$ )，显著缺失了伸展-剪切破裂过渡区，这可能与其微观结构特征，如矿物组成和孔隙结构密切相关 (Hou et al., 2024)。但这种差异的根本原因为，满足判别式  $4T > \frac{2T-2C\tan 2\theta}{1-\cos 2\theta}$  时剪切破裂包络线将直接与伸展破裂相交 (图 2)，致使伸展-剪切破裂无法实现。这一结果表明，在固定深度条件下，岩性差异是控制破裂模式发育与缺失的主要因素，构造体制的差异对其影响较小。

在摩洛哥东部 Ougnat 地块的埃迪卡拉纪萨赫罗群 (Saghro group) 变质单元、中寒武世 Paradoxides 页岩以及下奥陶世 Fezouata 与 Tachilla 页岩地层中，页岩因其较高的泥质含量和片理化程度，通常表现出较低的内聚强度和相对较高的  $T/C$  比值，在此地层中重晶石矿化分布零散且保存较差；而在此地层中侵入的石英闪长岩，因其晶体结构特征，具有较高的内聚强度，重晶石矿化的形态呈透镜状且相对规则 (Samaoui et al., 2023)。摩洛哥东部 Ougnat 地块的实例与本研究的数值模拟结果相互印证：高  $T/C$  比值的岩石，由于其较低的抗剪强度和易于形成张性破裂的特性，在构造应力作用下难以形成连通性良好的伸展-剪切破裂系统，从而导致矿化呈现零散分布的特征。相反，低  $T/C$  比值的岩石，更易于发育完整的破裂序列，为流体提供了良好的通道，促使矿化形成规则的透镜状或脉状矿体。

#### 4.2 构造体制与深度的耦合效应

当构造体制固定时，深度变化通过调控地应力场的绝对大小 (垂向应力  $\sigma_v$ ) 和相对大小 (差应力  $\sigma_1-\sigma_3$ )，主导控制岩石破裂行为与演化路径，而岩性差异的影响则相对微弱；不同构造体制之间，破裂模式随深度的演化路径呈现出明显差异 (图 4, 5)。

正断层体制下，垂向应力 ( $\sigma_v$ ) 作为最大主应力，水平构造应力相对较弱，差应力随深度的增长较为缓慢。在浅部低围压与低差应力环境下，以伸展破裂为主；随着深度增加，垂向应力 ( $\sigma_v$ ) 增大导致差应力升高，破裂包络线向高差应力区迁移，使得剪切破裂在深部逐渐成为更易发生的模式，纳米比亚达马拉造山带 Twin Hills 地区的实例为此提供了佐证。此处早期  $D_1$  变形为弱伸展环境 (类正断层体制，深度约 9 km 以浅，压力约 3 KPa)，浅部变砂岩中发育顺层伸展的石英脉，脉体未受强烈剪切改造；而深部因垂向应力 ( $\sigma_v$ ) 增加 (深度约 10 km - 25 km，压力约 3 - 8 KPa)，差应力升高，脉体被  $D_2$  挤压剪切改造 (Shilunga et al., 2022)。

逆断层体制下，水平挤压力占主导地位，差应力与垂向应力间存在正相关关系，即随深度增加差应

力可较快速增大。此时,  $\lambda_v$  大于 1, 表现为超压状态, 需持续流体超压作用维持裂隙导流能力(Cox, 2010), 但这种状态较难维持, 因此伸展破裂仅在较低差应力下可能出现。随着差应力的增大, 剪切破裂在所有深度下均占据主导地位, 且形成密集剪切带。同样在纳米比亚达马拉造山带中央区双山(Twin Hills)地区, 在区域  $D_2$  挤压背景下, 差应力随深度快速增长, 伸展破裂仅局部发育, 例如 Qtz-S1 伸展脉的形成需流体压力接近静岩压力 ( $\lambda_v \approx 1$ ; Sibson, 2004), 且主要发育于较浅深度(约 9 km 以浅, 对应约 3 KPa 压力条件)(Shilunga and Kisters, 2022); 而剪切破裂主导所有深度, 从浅部变砂岩的剪切裂隙, 到深部变泥岩的剪切带, 再到区域逆冲断层(如 Mon Repos 逆冲带)相关的剪切矿化, 剪切破裂在约 10 - 25 km(对应角闪岩相变质条件, 压力约 3 - 8 KPa)深度范围内占比 > 80%(Shilunga and Kisters, 2022), 印证了逆断层体制“剪切主导、伸展需超压且难维持”的特点。

对比不同构造体制, 伸展破裂模式的出现主要得益于正断层体制下, 浅部  $\lambda_v$  以较低值即可维持伸展破裂, 不必用持续流体超压作用维持; 对比不同岩性(花岗岩与板岩)在相同构造体制下, 其破裂路径相似。所以在固定构造体制下, 深度变化成为控制破裂模式的主导因素, 岩性差异的影响相对减弱, 而不同构造体制之间的破裂模式差异则更为显著。

有模拟研究表明, 以 Seljadalur 玄武岩为研究对象, 在低围压(模拟深度约 4 km,  $C < 30$  MPa)条件下, 裂缝交点以伸展型扩容为主, 对应伸展破裂; 在高围压(模拟深度约 6 km,  $C > 60$  MPa)条件下, 裂缝闭合度增加, 交点处剪切变形主导, 剪切破裂成为主要模式(Stanton-Yonge et al., 2023), 说明深度变化的本质是通过改变围压, 进而影响裂隙的有效应力, 直接控制破裂从伸展向剪切的转换。

#### 4.3 岩石破裂再活化过程的力学机制

岩石发生破裂后, 其力学性质发生根本性改变, 表现为内聚强度( $C$ )显著降低(若无后期断层愈合  $C \approx 0$ ; Cox, 2020; 杨林等, 2023)。基于  $\lambda_v - (\sigma_1 - \sigma_3)$  破裂模式图说明(图 6, 7), 在此状态下, 由于还是沿原先的取向破裂, 故再活化过程表示岩石破裂的包络线的斜率与原先一致, 但内聚强度降为 0, 使得截距  $\frac{2C \tan 2\theta + 2\sigma_v}{2\sigma_v} = 1$ , 均表现为单一的剪切破坏模式, 不再出现伸展破裂与伸展-剪切破裂(图 6、图 7)。由于伸展破裂的发生依赖于岩石自身的抗拉强度以抵消最小有效主应力, 当  $T$  趋近于 0 时, 便无法发生伸展破裂; 而伸展-剪切破裂作为一种过渡类型, 其存在同样依赖于  $T$  与  $C$  的特定比值, 在两者均趋近于 0 时, 这种破裂模式在此过程中消失。再活化过程临界条件简化为  $\tau = \mu(\sigma_n - P_f)$ , 其中  $\tau$  为剪应力,  $\mu$  为内摩擦因数,  $\sigma_n$  为正应力。该临界条件仅取决于摩擦系数和正应力(Cox, 2010), 这导致再活化所需的流体压力显著低于完整岩石的剪切破裂阈值。并且在再活化阶段, 花岗岩与板岩表现出相似的破裂路径, 表明岩性差异对破裂模式的影响减弱, 说明断裂本身的属性主导再活化, 而非围岩岩性(杨林等, 2023)。以剪切滑移为主导的再活化过程, 能有效激活先前形成的角砾岩带或断层滑动面, 为

成矿流体提供周期性输运通道和就位场所，是维持热液系统长期活动性与矿质多期次沉淀的关键因素（Cox, 2016; Li et al., 2025）。例如 Hutti 金矿中，在逆冲剪切带的作用下，由于循环流体压力和区域差应力作用从而发生周期性水力破裂，进而形成层压式石英脉矿化（Kolb et al., 2001; Kolb et al., 2008; 杨林等, 2023）。

在活跃的断层带中，流体的持续活动会促进断层物质的胶结与愈合，导致断层内聚强度（ $C_f$ ）随时间动态演化（Cox, 2005; 2016; Qiu et al., 2024a; Gülyüz et al., 2023）。若假定再活化过程仍沿最优破裂角发生，且恢复的内聚强度大于内摩擦因数与完整岩石抗拉强度的乘积（ $C_f > \mu T$ ），使得原本在低内聚强度状态下难以形成的伸展破裂，在愈合后的断层中重新成为可能的破裂模式（图 8, 9）。虽然此时出现伸展破裂，但整体上仍以剪切破裂为主。

焦家断裂带作为郯庐断裂带重要的次级构造，整体呈现复杂的剪切-拉张复合构造体制，其多期次的活动（包括挤压、走滑和伸展）为金矿化提供了动态的构造-流体成矿环境（Deng et al., 2023; Qiu et al., 2023a; Qiu et al., 2023b; Deng et al., 2020a; Deng et al., 2020b; Qiu et al., 2023a; Qiu et al., 2023b; Deng et al., 2020b; Goldfarb et al., 2019; Qiu et al., 2020; Qiu et al., 2024b）。寺庄金矿床位于焦家断裂带内，其成矿过程清晰地记录了断层愈合与再活化对破裂模式及矿化样式的控制。该矿床早期发育伸展破裂，为初始流体贯入提供了通道；随后在区域剪切应力场作用下，先存裂隙发生以剪切破坏为主的再活化，形成了以剪切脉为主的矿化样式（李瑞红等, 2014; Qiu et al., 2024c）。后期含矿流体的持续活动可能导致断层物质的胶结和愈合，使断层内聚强度得以恢复甚至增强。当  $C_f$  增大至一定范围（ $C_f > \mu T$ ）时，在低差应力条件下，愈合后的断层有可能再次诱发伸展破裂，为新一轮的流体注入和矿质沉淀创造条件。当断层内聚强度（ $C_f$ ）持续增大，再活化阶段的剪切破裂包络线将整体位于完整岩石的失稳包络线之上，此时便不再活化。这与焦家断裂带整体上矿体常赋存于断裂下盘蚀变岩及网脉系统中，且矿化具有多期次、脉动性特征的地质事实相符。

土耳其西北部 Kestanelik 浅成热液金-银矿床的实例进一步揭示了不同破裂模式再活化与矿化品位的关系。该矿床再活化过程主要与剪切破坏相关，而伸展脉的出现可能受低差应力下的伸展破坏驱动，但整体上再活化以剪切破裂为主导，其剪切再活化脉金品位（4.106 g/t）显著高于伸展脉（2.736 g/t）（Gülyüz et al., 2023）。该机制说明，剪切再活化因其低活化门槛和与压力骤降事件的紧密耦合，更易于形成高品位矿化。

## 5. 结论

在本文模拟条件下，基于安德森断层理论与修正格里菲斯准则，通过定量化分析，揭示了岩性、构造体制与深度对热液成矿系统中岩石破裂模式及其成矿潜力的联合控制机制。

(1) 岩性差异是控制裂隙系统完整性的关键因素：在相同深度下，花岗岩因岩石抗拉强度与内聚强度比值较低 ( $T/C \approx 0.55-0.62$ )，发育完整的三阶段破裂序列(伸展破裂→伸展-剪切破裂→剪切破裂)，形成连通性好的裂隙网络，利于成矿；而板岩因  $T/C$  比值较高 ( $T/C \approx 0.66-0.75$ )，满足  $4T > \frac{2T-2C\tan 2\theta}{1-\frac{1}{\cos 2\theta}}$  判别式，则普遍缺失伸展-剪切破裂，导裂隙连通性差，矿化分散。

(2) 深度变化影响破裂模式演化：正断层体制下，浅部以高渗透性的伸展破裂为主，利于浅成热液矿化；随深度增加，差应力增加，伸展破裂仅在局部短暂出现，破裂模式转变为剪切破裂，且在所有深度下均占主导，控制深成热液矿床的形成。

(3) 构造体制对破裂模式影响显著：相比于岩性差异，构造体制的转换对破裂模式的影响更为显著。正断层体制利于浅部伸展破裂发育，逆断层则全深度以剪切破裂为主，影响热液系统的渗透结构和矿化样式。

(4) 破裂再活化与断层愈合调控持续性成矿：破裂再活化主要表现为低门槛的剪切破坏，为成矿流体提供了周期性输运通道，是维持热液系统长期活性的关键。若后期发生断层愈合 ( $C_f > \mu T$ )，则在低差应力条件下可重新诱发伸展破裂。

#### 作者贡献度说明

**王张弛**：数据分析，调查，撰写初稿，撰写（审阅及修订）；**许洛源**：调查，撰写初稿，撰写（审阅及修订）；**周荣志**：概念化，调查，撰写初稿；**徐其来**：调查，撰写初稿；**蔡哲鑫**：调查，撰写初稿；**张鹏聪**：撰写初稿，撰写（审阅及修订）；**于皓丞**：概念化，获得资助，调查，项目管理，监督，撰写（审阅及修订）

## 参考文献

- Alcalde, J., Carbonell, R., Pospiech, S., et al., 2022. Preface: State of the art in mineral exploration. *Solid Earth*, 13(7): 1161-1168, <https://doi.org/10.5194/se-13-1161-2022>.
- Audétat, A., 2019. The metal content of magmatic-hydrothermal fluids and its relationship to mineralization potential. *Economic Geology*, 114(6): 1033-1056, <https://doi.org/10.5382/econgeo.4673>.
- Brace, W. F., 1960. An extension of the Griffith theory of fracture to rocks. *Journal of Geophysical Research*, 65(10): 3477-3480, <https://doi.org/10.1029/JZ065i010p03477>.
- Chi, G., Xu, D., Xue, C., et al., 2022. Hydrodynamic Links between Shallow and Deep Mineralization Systems and Implications for Deep Mineral Exploration. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 96(1): 1-25, <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14903Digital>
- Cox, S. F., 2005. Coupling between Deformation, Fluid Pressures, and Fluid Flow in Ore-Producing Hydrothermal Systems at Depth in the Crust. *One Hundredth Anniversary Volume*: 0, <https://doi.org/10.5382/av100.04>.
- Cox, S. F., 2010. The application of failure mode diagrams for exploring the roles of fluid pressure and stress states in controlling styles of fracture-controlled permeability enhancement in faults and shear zones. *Geofluids*, 10(1-2): 217-233, <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00281.x>.
- Cox, S. F., 2016. Injection-Driven Swarm Seismicity and Permeability Enhancement: Implications for the Dynamics of Hydrothermal Ore Systems in High Fluid-Flux, Overpressured Faulting Regimes—An Invited Paper. *Economic Geology*, 111(3): 559-587, <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.3.559>.
- Cox, S. F., 2020. Chapter 2: The Dynamics of Permeability Enhancement and Fluid Flow in Overpressured, Fracture-Controlled Hydrothermal Systems. *Applied Structural Geology of Ore-Forming Hydrothermal Systems*, 21: 0, <https://doi.org/10.5382/rev.21.02>.
- Damasceno, D. R., Spross, J., Johansson, F., 2023. Rock mass response for lined rock caverns subjected to high internal gas pressure. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(1): 119-129, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.03.006>.
- Deng, J., Qiu, K.F., Wang, Q.F., et al., 2020a. In situ dating of hydrothermal monazite and implications for the geodynamic controls on ore formation in the Jiaodong gold province, eastern China. *Economic Geology*, 115(3): 671-685, <https://doi.org/10.5382/econgeo.4711>.
- Deng, J., Yang, L.Q., Groves, D. I., et al., 2020b. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. *Earth-Science Reviews*, 208: 103274, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103274>.
- Deng, J., Wang, Q., Zhang, L., et al., 2023. Metallogenic model of Jiaodong-type gold deposits, eastern China. *Science China. Earth Sciences*, 66(10): 2287-2310, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1136-4>.
- Goldfarb, R., Qiu, K., Deng, J., et al., 2019. Orogenic gold deposits of China. *SEG Special Publications*, 22: 263–324, <https://doi.org/10.5382/SP.22.08>.
- Griffith, A. A., 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 221(582-593): 163-198, <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.
- Gülyüz, N., Shipton, Z. K., Kuşçu, İ., 2023. Multiphase deformation, fluid flow and mineralization in epithermal systems: Inferences from structures, vein textures and breccias of the Kestanelik epithermal Au-Ag deposit, NW Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 32(1): 75-95, <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1828>.
- Hancock, P. L., 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 7(3-4): 437-457, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3).
- Hickey, K. A., Ahmed, A. D., Barker, S. L., et al., 2014. Fault-controlled lateral fluid flow underneath and into a Carlin-type gold deposit: Isotopic and geochemical footprints. *Economic Geology*, 109(5): 1431-1460,

- <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.5.1431>.
- Hou, Z., Qiu, K., Zhou, T., et al., 2024. An advanced image processing technique for backscatter-electron data by scanning electron microscopy for microscale rock exploration. *Journal of Earth Science*, 35(1): 301-305, <https://doi.org/10.1007/s12583-024-1969-9>.
- Huang, B., Li, H., Zhao, X., et al., 2023. Fracturing criterion of rock hydrofracturing considering pore pressure effect. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1111206, <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1111206>.
- Jones, O. T., 1942. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation: with Applications to Britain. *Nature*, 149(3789): 651-652, <https://doi.org/10.1038/149651b0>.
- Kolb, J., Rogers, A., Meyer, F. M., 2001. Alteration characteristics of the world-class Archean orogenic Hutti gold deposit, southern India: Institute of Mineralogy and Economic Geology, RWTH Aachen, Wuellnerstr. 2, D-52066 Aachen, <https://doi.org/10.1201/9781003077503-196>.
- Kolb, J., Meyer, F. M., 2008. Balanced mineral reactions for alteration zones developed in auriferous shear zones of the Hutti Mine, Dharwar Craton, India. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 159(2): 331, <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2008/0159-0331>.
- Li, P., Cai, M., 2021. Challenges and new insights for exploitation of deep underground metal mineral resources. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(11): 3478-3505, [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(21\)65744-8](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(21)65744-8).
- Li, S., Zhang, H., Hou, Z., 2025. Mineralization at Different Structural Levels in the Crust. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 99(4): 1042-1058, <https://doi.org/10.1111/1755-6724.15319>.
- Lin, P., Wei, P., Wang, C., et al., 2021. Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation mechanism of rock fracturing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4): 798-810, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.001>.
- Liu, Z., Yan, D., Niu, X., 2020. Insights into pore structure and fractal characteristics of the Lower Cambrian Niutitang Formation Shale on the Yangtze Platform, South China. *Journal of Earth Science*, 31(1): 169-180, <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1259-0>.
- Lu, H., Li, Q., Yue, D., et al., 2024. Multi-scale pore structure heterogeneity in tuff reservoirs investigated with multi-experimental method and fractal dimensions in Chang 7 Formation, Southern Ordos Basin. *Journal of Earth Science*, 35(2): 666-686, <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1857-8>.
- Lucier, A., Zoback, M., 2008. Assessing the economic feasibility of regional deep saline aquifer CO<sub>2</sub> injection and storage: A geomechanics-based workflow applied to the Rose Run sandstone in Eastern Ohio, USA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(2): 230-247, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2007.12.002>.
- Qiu, K.F., Goldfarb, R. J., Deng, J., et al., 2020. Gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern China. *Society of Economic Geologists Special Publications*, 23: 753-773, <https://doi.org/10.5382/SP.23.35>.
- Qiu, K.F., Deng, J., Laflamme, C., et al., 2023a. Giant Mesozoic gold ores derived from subducted oceanic slab and overlying sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 343: 133-141, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.01.002>.
- Qiu, K.F., Deng, J., Sai, S.X., et al., 2023b. Low-Temperature Thermochronology for Defining the Tectonic Controls on Heterogeneous Gold Endowment Across the Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Tectonics*, 42(1): e2022TC007669, <https://doi.org/10.1029/2022tc007669>.
- Qiu, K.F., Deng, J., Yu, H.C., et al., 2024a. The Zaozigou orogenic gold-antimony deposit, West Qinling Orogen, China: Structural controls on multiple mineralization events. *Geological Society of America Bulletin*, 136(9-10): 4218-4232, <https://doi.org/10.1130/B37029.1>.
- Qiu, K.F., Romer, R. L., Long, Z.Y., et al., 2024b. Potassium isotopes as a tracer of hydrothermal alteration in ore

- systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 368(0): 185-196, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.01.005>.
- Qiu, K. F., Deng, J., Yu, H.C., et al., 2021. Identifying hydrothermal quartz vein generations in the Taiyangshan porphyry Cu-Mo deposit (West Qinling, China) using cathodoluminescence, trace element geochemistry, and fluid inclusions. *Ore Geology Reviews*, 128: 103882, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103882>.
- Qiu, K. F., Romer, R. L., Long, Z.Y., et al., 2024c. The role of an oxidized lithospheric mantle in gold mobilization. *Science Advances*, 10(41): eado6262, <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado6262>.
- Ren, F., Chang, Y., He, M., 2020. A systematic analysis method for rock failure mechanism under stress unloading conditions: a case of rock burst. *Environmental Earth Sciences*, 79(15): 1-16, <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09111-2>.
- Rubey, W. W., King Hubbert, M., 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: II. Overthrust belt in geosynclinal area of western Wyoming in light of fluid-pressure hypothesis. *Geological Society of America Bulletin*, 70(2): 167-206, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[167:Rofpim\]2.0.Co](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[167:Rofpim]2.0.Co).
- Samaoui, S., Aabi, A., Nguidi, M. A., et al., 2023. Fault-controlled barite veins of the eastern Anti-Atlas (Ougnat, Morocco), a far-field effect of the Central Atlantic opening? Structural analysis and metallogenic implications. *Journal of African Earth Sciences*, 204: 104970, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.104970>.
- Shilunga, J., Kisters, A., 2022. Lithological and structural controls of disseminated-type orogenic gold mineralization in high-grade metamorphic turbidites from the Central Zone of the Damara Belt, Namibia. *Ore Geology Reviews*, 151: 105205, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105205>.
- Shirani Faradonbeh, R., Shah, M. I., Bahadori, M., et al., 2025. Toward Sustainable Mining: Exploring Alternative Mineral Resources and Innovative Extraction Techniques. *Mining*, 5(4): 66, <https://doi.org/10.3390/mining5040066>.
- Sibson, R. H., 2004. Controls on maximum fluid overpressure defining conditions for mesozonal mineralisation. *Journal of structural geology*, 26(6-7): 1127-1136, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.11.003>.
- Stanton-Yonge, A., Mitchell, T. M., Meredith, P. G., 2023. The Hydro-Mechanical Properties of Fracture Intersections: Pressure-Dependant Permeability and Effective Stress Law. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(2): e2022JB025516, <https://doi.org/10.1029/2022jb025516>.
- Sun, Z., Liu, Y., Qi, Q., et al., 2025. Study on ductile–brittle transition law and micro–fracture evolution mechanism of rock under dry–wet cycle. *Physics of Fluids*, 37(7): 077149, <https://doi.org/10.1063/5.0271203>.
- Wang, W., Meng, F., Yue, Z., et al., 2025. Influence of orientation of the intermediate principal stress on fracture reactivation in granite. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(2): 859-876, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.013>.
- Yu, H.C., Qiu, K.F., Wang, J., et al., 2025. Competency contrast-driven extension veining and sequential orogenic Au-Sb mineralization: Insights from the Zaorendao deposit, China. *Geological Society of America Bulletin*, <https://doi.org/10.1130/B38420.1>.
- Zhang, Y., Gao, G., Yan, S., et al., 2022. The Meso-Structural Characteristics of Crack Generation and Propagation during Rock Fracturing. *Minerals*, 12(1): 94, <https://doi.org/10.3390/min12010094>.
- 杨林, 王庆飞, 赵世宇, 等. 造山型金矿构造控矿作用. *岩石学报*, 2023, 39(2): 277-292, <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2023.02.01>.
- 杨立强, 杨伟, 张良, 等. 热液成矿系统构造控矿理论. *地学前缘*, 2024, 31(1): 239-266, <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.1.40>.
- 徐颖, 姚伟, 夏开文. 花岗岩动态断裂能各向异性试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(A01): 3231-3238, <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2016.1588>.
- 马超, 刘建锋, 张良泉, 等. 三向应力下板岩力学特性试验研究. *地下空间与工程学报*, 2024, 20(A2): 654-663,

<https://doi.org/10.20174/j.JUSE.2024.S2.17>.

林天瑞, 朱慧娟. 四川盆地前白垩系岩石物理性质的研究. 地层学杂志, 1993, 17(4): 256-265,

<https://doi.org/10.19839/j.cnki.dcxzz.1993.04.002>.

李振宇, 何碧竹, 贡晓瑞, 等. 共和盆地东北部花岗岩型干热岩井下裂缝系统及其构造成因. 岩石学报, 2024, 40(12): 3964-3983, <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2024.12.16>.

李瑞红, 刘育, 李海林, 等. 胶东新城金矿床控矿构造变形环境: 显微构造和 EBSD 组构约束. 岩石学报, 2014, (9): 2546-2558,

黄正均, 任奋华, 李远, 等. 不同试验方法下岩石抗拉强度及破裂特性. 实验技术与管理, 2020, 37(10),

<https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2020.10.013>.

曾庆有. 花岗岩风化层填料抗剪强度特性试验研究. 福建交通科技, 2018, (1): 1-4,