

先存断层对地应力演化及微震分布的影响：以广东凡口铅锌矿为例
The Effect of Pre-existing Faults on the Spatio-temporal Evolution of In-situ Stress and
Microseismic Distribution: A Case Study of the Fankou Lead-Zinc Mine, Guangdong Province
武成飞¹, 廖杰^{1,2,3*}, 原桂强⁴, 李伦^{1,2,3}, 文奥佳¹, 夏彩雨¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东珠海 519080;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519080;

3. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 珠海 519080;

4. 深圳市中金岭南有色金属股份有限公司凡口铅锌矿, 韶关 512325

摘要: 金属矿山微震的发生与地应力场及微裂隙的时空演化密切相关。广东韶关凡口铅锌矿记录的微震存在一个显著特点, 即微震多发生于矿区先存断层的周缘, 而非集中于断层带上。这可能是由于先存断层影响周缘应力累积, 进而诱发微裂隙并导致微震发生。为了检验这一想法, 本文创新性地应用了米级尺度的高分辨率热-力学耦合三维地球动力学数值模拟, 考虑地下的温度结构, 系统探讨正向演化过程中先存断层对周缘应力场分布的控制作用, 并进而探讨微震发生的可能性。模拟结果显示, 先存断层会扰动应力场分布, 在其周缘形成高应力带, 进而可能会诱发微裂隙并导致微震发生。先存断层的宽度、数量、几何形态、倾角等都会影响其周缘应力场的分布, 但是不会改变在先存断层周缘形成高应力带的特点。基于模拟结果, 本文认为先存断层扰动应力场在其周缘形成高应力带是广东韶关凡口铅锌矿微震触发的一个可能原因, 合理解释了凡口矿区微震多发生于断层面之外的特征, 建议在断层 F3 与地层交汇处加强微震监测, 为矿山微震灾害预测提供参考。

中图分类号: TD76

收稿日期: 2025-06-29

0. 引言

金属矿山的微震往往呈现出数量多、震级小的特点 (Ma et al., 2018; 孟上九等, 2024), 其发生也受到背景地应力场的时空演化影响 (刘建坡, 2012; 张月征, 2016)。广东韶关凡口铅锌矿的微震检测系统记录了自 2017 年以来的微震数据, 这些数据的空间分布呈现了一个显著特点, 即微震多发生于矿区主控断层 (F3 高角度逆冲断层, 图 1) 的周缘, 在其上盘和下盘均有分布, 并且与断层面有一定距离。该主控断层的断层带宽度较小, 局部最宽处仅二十余米 (张新社, 2010; 王晶, 2012; 汪礼明等, 2022), 周缘微震与断层带的距离往往在几十米到上百米, 显著偏离断层带。该微震监测系统所记录的微震事件点定位误差在 10 米以内 (郭玉豹等, 2015)。因此, 凡口铅锌矿的部分微震事件没有发生在主控断层带上, 而是位于断层周缘 (图 2)。先存断层是否会扰动地应力场进而诱发微裂隙并导致微震发生? 目前, 对于这一想法依然缺少系统、定量的认识。

基金项目: 本研究受到项目《凡口矿震害机制及测控预警技术研究》资助。

作者简介: 武成飞 (2000-), 男, 博士研究生, 从事地应力测量与动力学数值模拟相关研究。E-mail: wuchf23@mail2.sysu.edu.cn。ORCID: 0009-0005-9510-763X。

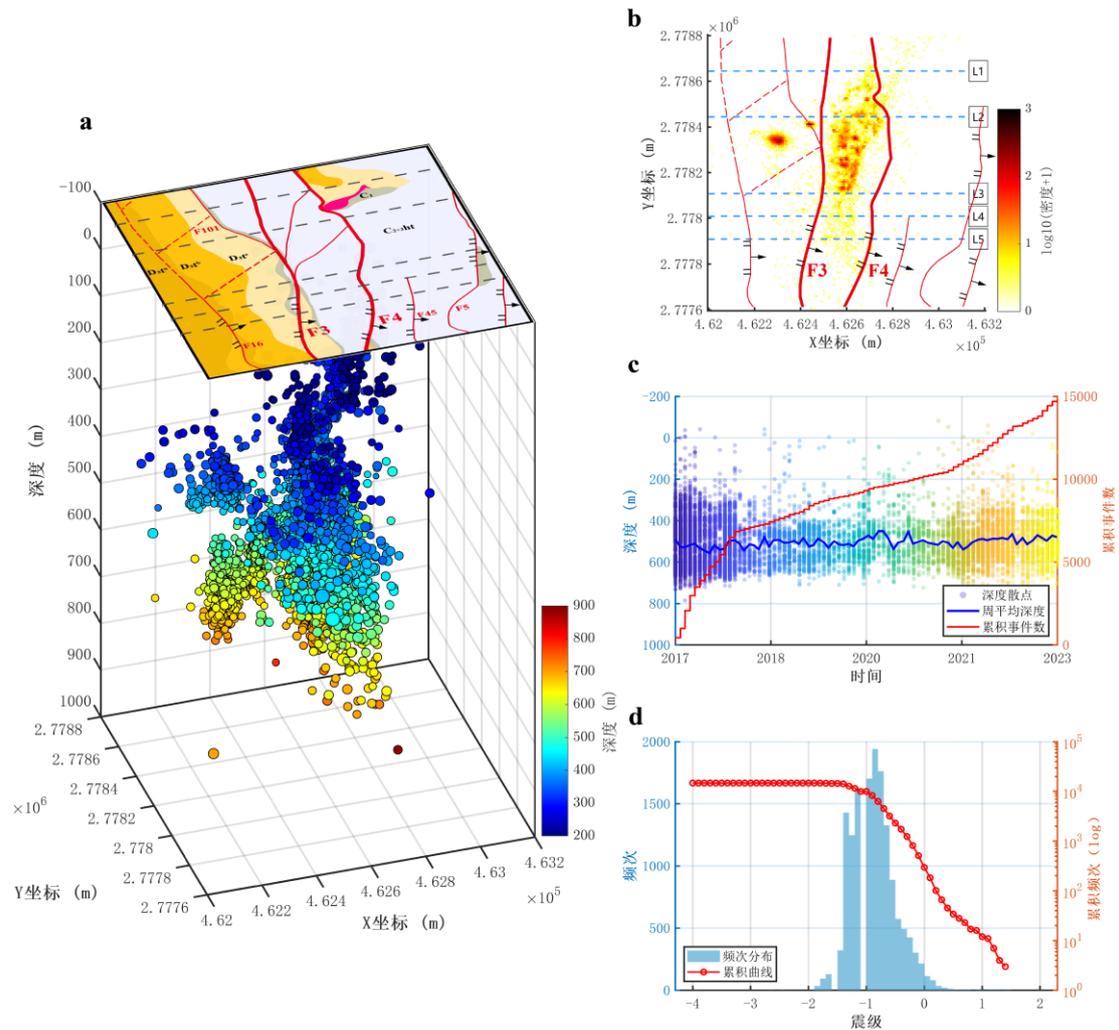


图 1 凡口矿区微震事件总览图。(a) 凡口矿区外围地质简图及 2017 年 1 月至 2023 年 6 月 14899 个微震事件空间位置分布图、(b) 凡口矿区微震事件平面密度投影图、(c) 微震事件深度-累积频次及周平均深度分布图、(d) 微震事件震级-累积频次分布图

金属矿微震事件的发生常与矿区应力场的变化有关 (Feng et al., 2017; Shen et al., 2020; Du et al., 2023; Foulger et al., 2018)。影响金属矿应力场变化的原因主要有两种, 一种是由采矿活动诱发的局部应力再分配, 一种是由先存地质构造主导的区域构造应力场动态调整 (李泽宇, 2024; 王涛等, 2014; 陆振裕等, 2012; 李永靖等, 2004; 齐庆新等, 2003)。在地质构造因素中, 先存断层可能会影响应力场的时空演化, 是影响微震发生的一个重要因素 (Cai et al., 2021; Yang et al., 2024; He et al., 2017; 赵毅鑫等, 2018)。南非和加拿大的金属矿微震数据显示 (Glazer, 2018; Morissette et al., 2017), 部分微震事件多发生于先存断层的交汇区域, 而非均匀分布于工程开采区域或单一断层上, 这一观测现象指出了应力在断层间的迁移与聚集作用可能与先存断层存在着紧密的联系。断层在长期演化过程中在其周缘产生复杂的先存应力状态、不同产状及规模的先存断层对区域应力的影响程度亦不相同 (Zhang et al., 2015; Castellanos et al., 2015; Snelling et al., 2013)。先存断层周缘可能会累积应力、改变应力场 (林远东等, 2012; Zhang et al., 2021),

近断层采矿活动引起的应力扰动可能会触发断层系统的动态响应、导致构造应力的变化和构造应变能的释放，从而引发矿震或岩爆（Mgumbwa et al., 2017; Li et al., 2016; Sainoki et al., 2014; Islam et al., 2009）。

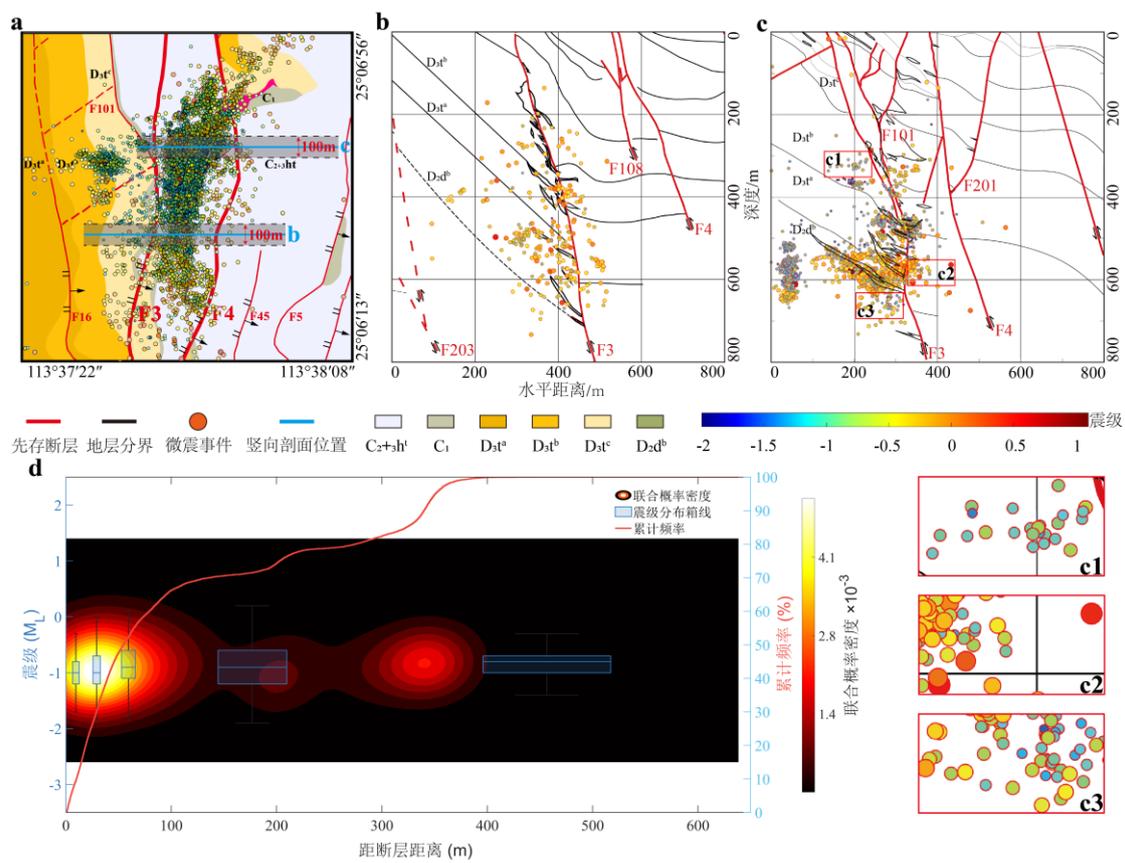


图 2 广东韶关凡口铅锌矿微震事件点的投影图及统计分析图。（a）矿区微震事件平面投影图。（b-c）竖向地质剖面微震事件点位置投影图（微震事件点空间范围为前后各 50m）。（d）微震事件点距断层 F3 距离统计图（共 14899 个微震事件）

断层动态触发机制受几何参数（如倾角、宽度）的定量调控：逆断层在高水平应力下更易形成局部应力集中条带，导致微震偏离断层带（Kong et al., 2022）；断裂的多尺度几何属性（如宽度 ≤ 20 米）则通过分形控制应力渗透性，形成微裂隙优势发育区（De Jossineau, 2023）。流体-断层耦合研究表明孔隙压力（ P_f ）升高可降低有效应力，触发慢滑移与微震互响应（Maghsoudi et al., 2018）。大尺度的三维地质力学模型通过整合原位应力与震源机制数据，能更精确量化断层倾角与宽度对区域应力分布的影响。然而，目前仍缺乏针对金属矿山小尺度断层的系统性建模，特别是在高角度逆断层（如凡口铅锌矿区 F3 断层）的影响下，几何参数如何影响周缘应力场再分配，进而诱发微震，尚未有研究解决这一关键工程问题。

本文应用前沿的、热-力学耦合的三维地球动力学模拟程序 I3ELVIS（Gerya, 2013），构建了高精度的三维数值模型，系统探讨随时间正向演化过程中先存断层对周缘地应力场分布的影响作用。模拟结果揭示了先存断层会影响周缘应力场，并形成高应力条带。模拟结果为理解凡口铅锌矿微震分布规律提供了重要理论依据。

1. 广东凡口矿地质与微震背景

广东韶关凡口铅锌矿构造位置处于南岭成矿带上,地处华夏板块内部,受印支-燕山期逆冲推覆构造控制(汪礼明等,2022)。是中国最为典型的“一大二富、三集中、四隐伏”的超大型金属矿(刘德利等,2006;张术根等,2009)矿区所在区域构造应力背景场的主要优势方向为NW~NWW向,超声波井下电视扫描显示最大主应力优势方位为N77°W,这一应力场源于印度-欧亚板块碰撞的远程效应(Du et al., 2023)。凡口铅锌矿是多因富成矿床(王力等,2003;祝新友等,2013)。矿区经历了加里东期、燕山期和印支期多阶段的构造演化运动,地质构造复杂,褶皱构造强烈,断裂构造发育,主要构造以北北东向逆断层的断裂构造为主,该断层规模大、南东倾向,延长十多公里,为本区铅锌矿、铜矿、钨钼矿等多金属矿床的主要控矿构造。按断裂走向大致可将矿区内的断裂分为北北东向、北北西向、北东向、北东东向4组断裂;主要发育有3组断裂:北北西向的F203断裂为区内规模最大的断裂,F203断裂发育于凡口复式向斜南西翼的次级褶皱狮岭背斜与田庄向斜交接部位,延长2000米,延深800米以上,破碎带宽最大达数十米,倾斜错距最大达到近800米,为本矿区最大规模的断裂带;F3、F4、F5、F6等为区内主要的控矿断层,其中F3的断距平均73m、最大100m,倾角约为65°~85°、断层破碎带常见(汪礼明等,2022;原桂强等,2019;姚翠霞,2015;蔡锦辉等,2011;韩英等,2011)。

区段内出露寒武系、泥盆系、石炭系、第四系地层(何俊飞,2013)。岩层整体走向为北北西向,倾向为北东(见图2-4)。地层序列从老到新依次为:寒武系八村群(Єbc)、中下泥盆统桂头群(D1-2gt)、中泥盆统东岗岭组(D2d)上泥盆统天子岭组(D3t)上泥盆统帽子峰组(D3m):下石炭统孟公坳组(C1ym):中上石炭统壶天群(C2+3ht)第四系(Q)。矿体赋存于中泥盆统东岗岭组(D2d)、上泥盆统天子岭组(D3t)、下石炭统(C1)、中上石炭统壶天群(C2+3ht)等含矿地层中,主要含矿层位为中泥盆统东岗岭组上亚组(D2db)和上泥盆统天子岭组(D3t)(卢焕章,1984;赖应箴,1988;邱小平,1991;林绍标,1998;梁新权等,2009;原桂强,2016)。

凡口矿区2017年1月至2023年6月期间共记录到微震14899次。微震事件在空间上呈现出明显的聚集性,主要聚集在断层F3、F4周围(图1a)。在水平方向上,微震分布呈现出沿东北-西南走向的条带状展布,与矿区主控断裂F3和F4的走向高度一致(图1b;图2a)。微震事件的震级主要集中在较低的范围,震级大于等于0.2的仅有110次,占总事件数的0.74%。从2017年到2023年,微震事件的累积次数呈现出明显的增长趋势,大部分微震集中在400m至600m深度范围内,图中蓝色曲线表示的周平均深度总体保持稳定在地下500m-600m深度范围内(图1c)。频次分布呈现出典型的Gutenberg-Richter定律特征,即低震级事件数量众多,高震级事件数量较少,且两者之间遵循一定的幂律关系(图1d)。2017年至2023年,微震事件的主要深度范围为400m至600m。微震事件的竖向剖面投影显示大部分微震依附在断层F3两侧(图2b、c),断层F3可能对微震活动起到控制作用。对14899个微震事件与断层F3的距离统计分析,65%以上的微震集中在断层F3两侧100m空间范围内(图2d)。

微震时空分布显示,主控断层F3和F4,尤其是F3断层,对微震活动起着关键的控

制作用。微震的平面投影沿断层带呈明显的条带状分布、竖向剖面投影中也与断层 F3 存在空间依附关系，主控断层 F3 周围必然是微震活动的主要源区。然而，断裂构造会如何扰动应力场进而影响微震的时空分布，亟待进一步的应力模拟研究来解答。

2. 三维热-力学耦合模型

2.1 控制方程

本文开展的三维地球动力学数值模拟是建立在三组控制方程基础上，即质量守恒、动量守恒、和能量守恒方程（公式 1-3）。模型应用有限差分算法来求解偏微分方程，同时使用网格粒子法来实现物质的变形和运移。

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

式中 x 、 y 、 z 指示模型水平与垂直坐标方向； v_x 、 v_y 和 v_z 分别对应 x 、 y 和 z 方向的速度；

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial P_i}{\partial x_i} = -\rho g_i$$

式中 P 为压力； g 为重力加速度； σ 为偏应力张量； ρ 表示物质的密度；

(3) 能量守恒方程

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + H_r + H_s + H_a + H_L$$

C_p 代表热容， T 为温度， k 为热导率， H_r 表示放射性生热率， $H_s = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ 表示剪切生热率， $H_a = T_\alpha D_p / D_t$ 表示绝热生热率， H_L 表示潜热生热率。

2.2 黏-塑性流变学性质

本文采用粘-塑性耦合的数值模型。模型中黏性流变模型表达为：

$$\eta_{ductile} = \dot{\epsilon}_{II}^{\frac{1-n}{n}} A^{-\frac{1}{n}} \exp\left(\frac{E_a + PV_a}{nRT}\right)$$

上述方程式中， $\eta_{ductile}$ 为韧性黏滞系数， $\dot{\epsilon}_{II}$ 为应变速率的第二不变量， n 为应力指数常数； A 为物质常数， E_a 为活化能， V_a 为活化体积， R 为气体常数， T 为温度，参数取值均由岩石学实验测得。

模拟程序通过采用 Druck-Prager 屈服准则将韧性流变与塑性流变结合实现岩石的脆性-塑性变形，表达式如下：

$$\sigma_{yield} = C_0 + P \sin(\varphi_{eff})$$

$$\sin(\varphi_{eff}) = \sin(\varphi)(1 - \lambda)$$

$$\eta_{plastic} = \frac{\sigma_{yield}}{2\dot{\epsilon}_{II}}$$

上述方程式中， σ_{yield} 为屈服应力， C_0 为初始条件压力为零（ $P = 0$ ）时的岩石剩余强度， P 为压力， φ_{eff} 为有效内摩擦角， φ 为内摩擦角， λ 为孔隙流体系数。

取韧性黏滞系数 $\eta_{ductile}$ 和塑性黏滞系数 $\eta_{plastic}$ 中的较小值确定为黏塑性流变关系中的最终黏滞性系数，即

$$\eta_{eff} = \min(\eta_{ductile}, \eta_{plastic})$$

模拟程序中物质的变形与运移通过采用网格粒子法实现，各个圈层的岩石变形受控于不同岩性的流变学性质。

2.3 初始模型和边界条件

基于广东韶关凡口铅锌矿的实际采矿范围（平面范围 3 km×3 km，深度范围 1 km），本文构建了小尺度、高精度的三维模型（图 3），物理尺寸为 4.24 km（X）×4.24 km（Y）×4.24 km（Z），数值分辨率为 212×212×212（X、Y、Z 轴节点数），网格尺寸为 20 m×20 m×20 m。每个网格内部设置粒子数共 27 个（3×3×3）。

模型 X 轴代表东西向，Z 轴代表南北向，Y 轴代表深度（图 3a）。在垂向上，模型包含多个成分层（表 1），从上到下依次为空气层（1240 m 厚）、沉积岩层（1000 m 厚）、地壳层（2000 m 厚）。先存断层贯穿沉积岩层及地壳层。在参考模型中，断层宽度为 60m（图 3a）；对不同的断层宽度进行了系统测试。模型温度场的初始设置为从沉积岩层顶部（Y=1.24 km，对应地表 0 km 处）至模型底部（Y=4.24 km，对应地表以下 3 km 处）温度由 0 °C 线性增温至 60 °C，相当于 20 °C/km 的地温梯度，与这一区域的地温梯度一致（卢海珠等, 2023）。模型考虑了板块运动下的构造作用：广东凡口铅锌矿属于南岭成矿带，位于华夏板块内部，现今大陆地壳运动以 SEE 向（110° - 120°）水平滑移为主，速率约 8mm/a，其构造推挤分量约为 3.6mm/yr（Zhu et al., 2006; 詹松辉, 2022），因此设置模型的推挤速率为 3 mm/yr。模型中的断层密度、内聚力强度选取参照了凡口矿区的地质勘探报告及前人研究，选取先存断层密度为 1800kg/m³，内聚力强度为 1MPa（Li et al., 2022; 汪礼明等, 2022）。模型的顶部、左侧及前后界面均采用了自由滑动的速度边界条件、物质在界面上无侧向剪切力作用、可自由滑动；与之不同，模型的右侧及底部边界采用了渗透性边界条件，满足粒子的流入和流出条件，保证计算区域内部整体的物质守恒。

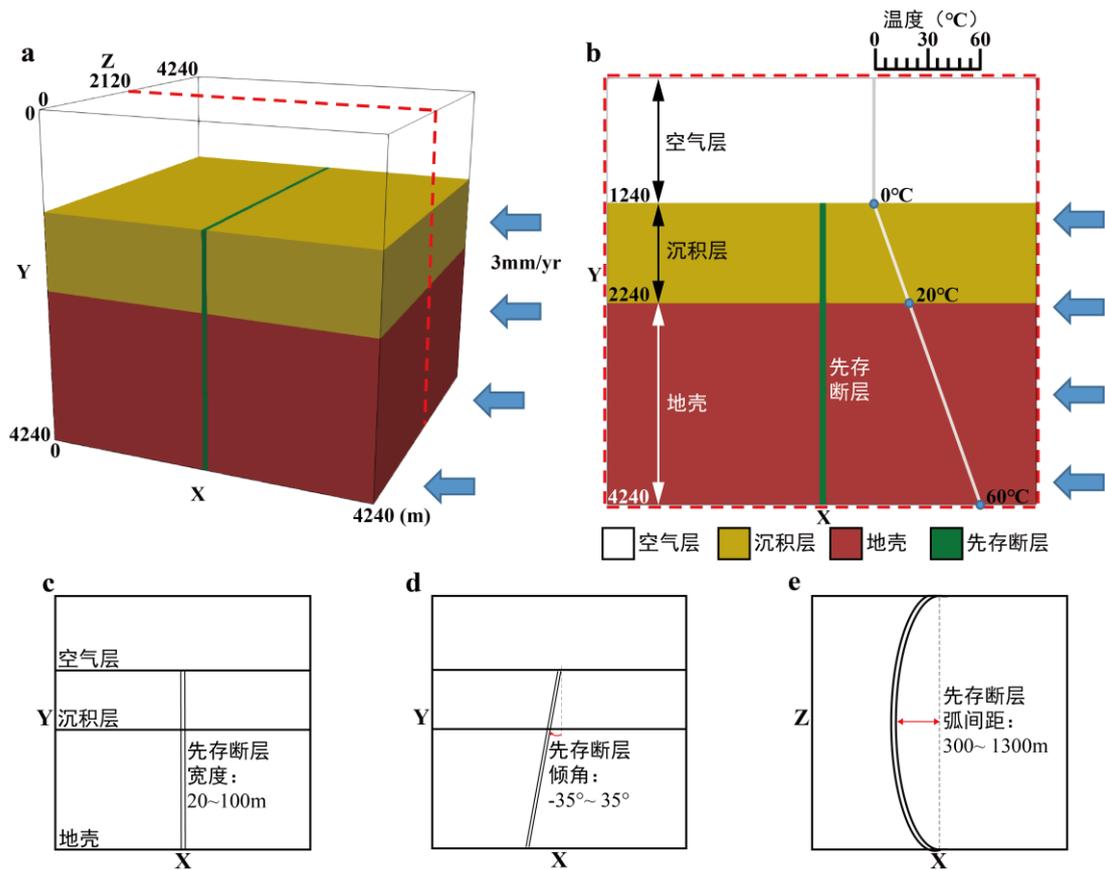


图 3 初始模型设置图。(a) 初始三维模型设置、(b) 模型二维垂直切片（位置见图 a）、(c-e) 不同模型参数的系统实验，包括先存断层宽度，断层倾角和断层平面形态

表 1 数值模型基本参数

成分	分布深度 Y/(km)	密度 $\rho/(kg/m^3)$	内聚力 C/(pa)	内摩擦系数 ϕ
空气	0-1.24	1	0	0.0/0.0
沉积岩	1.24-2.24	2600	1e+6	0.1/0.1
地壳	2.24-4.24	2750	2e+7	0.2/0.1
先存断层	1.24-4.24	1800	1e+6	0.1/0.1

3. 参考模型演化结果

参考模型是设置最简化的一组模型（e.g., 一条垂直断层，宽度 60m，单一沉积岩层），其演化结果如图 4 所示（分别展示了黏度场、应变速率场和第二不变偏应力场）。在黏度场（图 4b）中，形成了共轭状的低黏度条带，其交点为先存断层、沉积岩层与地壳层的交汇点。低黏度条带周围存在明显的高黏度区域。这种分布特征表明，先存断层对地层内的黏度分布有显著影响。应变速率场（图 4c）同样呈现出相似的共轭状高应变速率条带，在这些高应变速率条带的边缘，存在低应变速率区域（图 4c 中深蓝色）。这表明应变速率在先存断层附近的分布具有明显的空间差异性。应力场（图 4d）的分布则显示了沉积岩层与地壳层之间的应力差异。沉积岩层内的应力值总体上低于地壳层，在先存断层、沉积岩层及地壳三

者的交汇处，形成了共轭状的高应力条带。

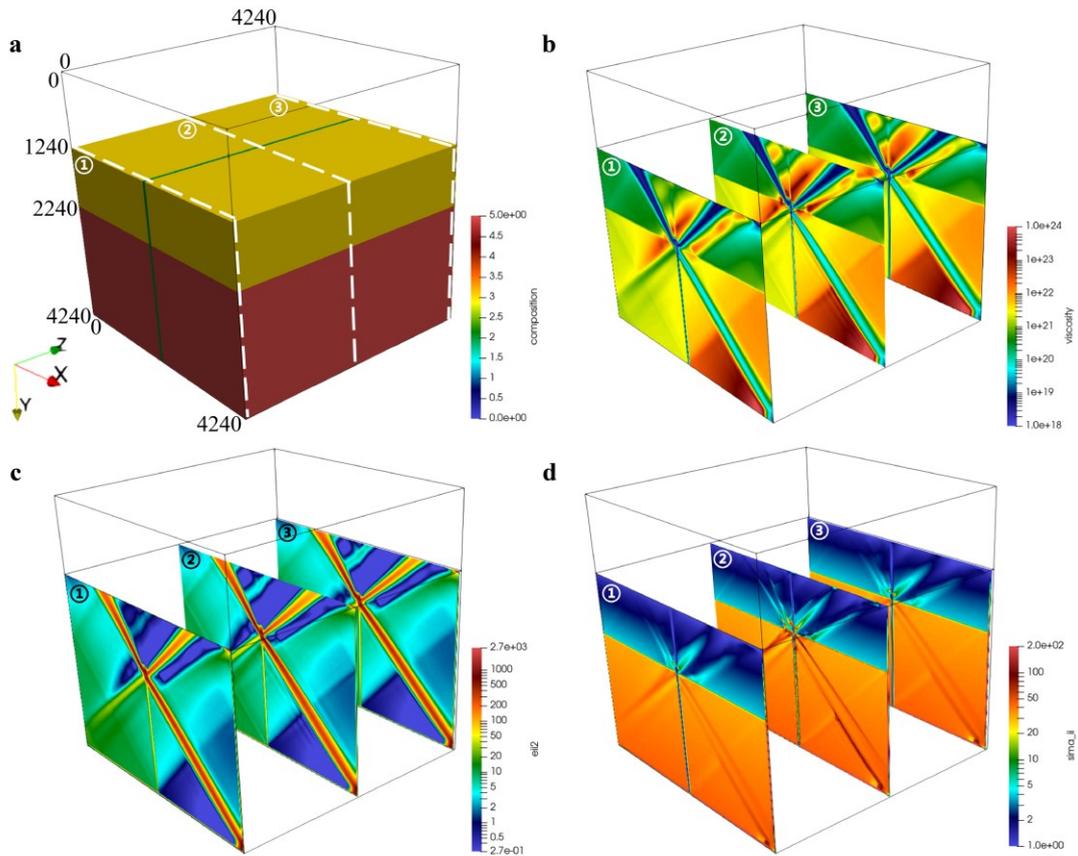


图 4 参考模型的演化结果图（模型运行至 500 yr）。（a）模型成分场、（b）模型粘度场切片、（c）模型应变速率场切片、（d）模型第二不变偏应力场切片

模型的动态演化结果如图 5 所示（应变速率场和应力场的不同演化时刻：5yr、100yr、200yr 和 500yr）。共轭状的高应力条带特征随时间演化变的更加明显。在应变速率场中，以先存断层和岩性分界面交汇处为中心，形成类 X 形的高应变速率条带。模型随时间正向演化至 500yr 时，高应变速率条带的范围显著增大，应变速率在模型中的分布随时间的演化而趋于集中。应力场的分布特征显示，断层内部总体呈现低应力状态（以蓝色表示），而在断层边缘则存在部分高应力区域。应力的竖向剖面图揭示了随时间演化，以先存断层和岩性分界面交汇处为中心的一类共轭状高应力条带上高应力逐渐累积的现象。随着时间正向演化，高应力区域主要沿先存断层和岩性分界面交汇处向外扩展，后一时刻高应力累积的范围明显大于前一时刻，表明应力在模型中的累积效应。

当模型正向推挤演化时，低黏度的先存断层表现为弱化带，导致应力在断层边界处集中，而沉积岩层与地壳层界面处内聚力强度差异大，进而在断层-沉积岩-地壳三相交汇区，多重刚度差异叠加导致以该交汇点为中心产生应力集中带，随时间正向演化过程中，应力集中带的规模不断扩大，表现出类 X 形共轭状形态。

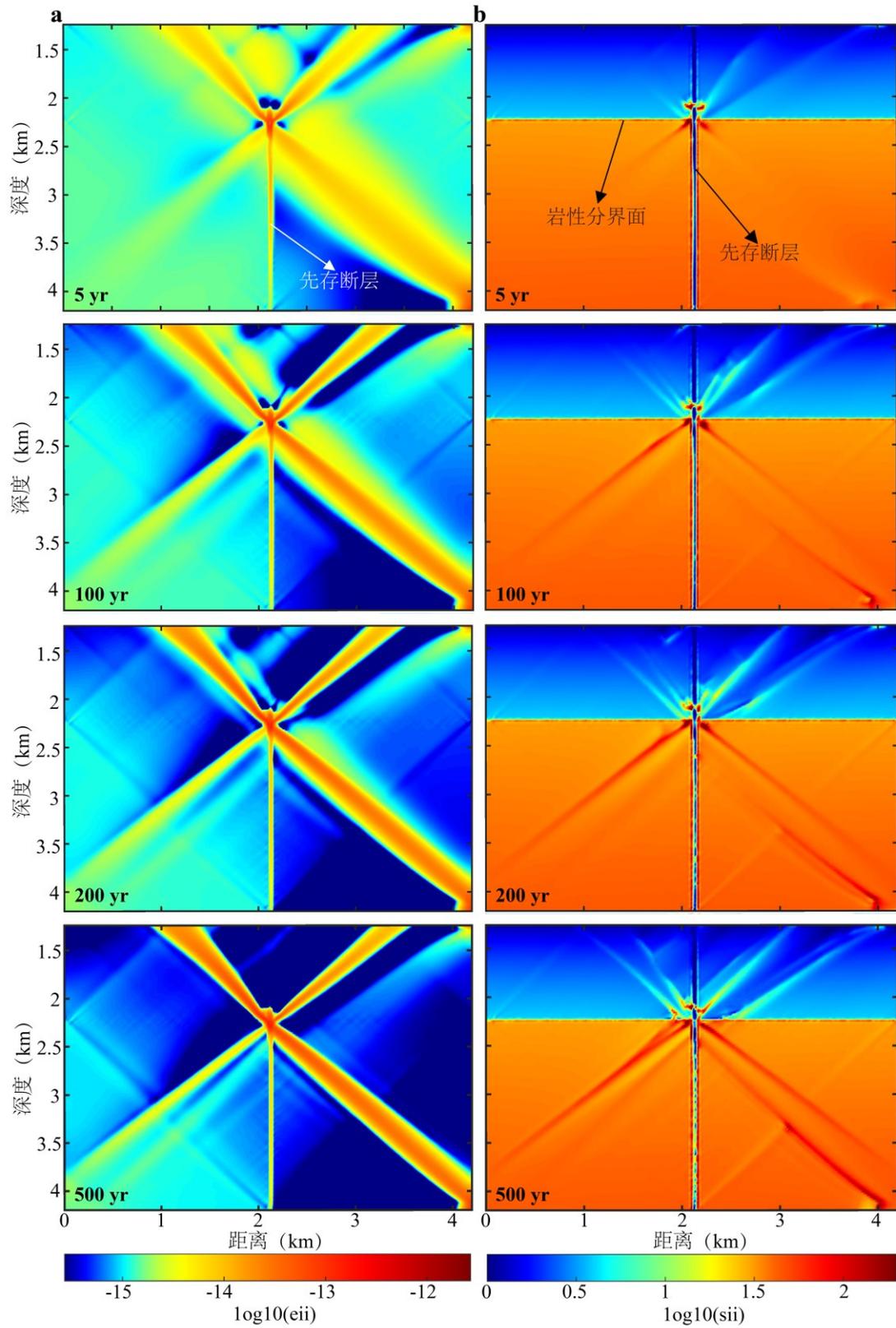


图 5 参考模型不同时刻下应力演化结果图 ($Z=2.12\text{km}$ 处竖向切片)。(a) 应变速率演化结果。(b) 应力演化结果

4. 模型参数的影响作用

在参考模型的基础上，结合广东凡口铅锌矿的地质背景（原桂强等, 2019），我们系统分析了先存断层的宽度、数量、倾角、平面形态，以及模型分辨率和尺寸对演化结果的影响作用。

4.1 先存断层宽度对应力分布的影响

通过改变先存断层的宽度，我们模拟研究不同宽度的断层对周围应力分布的影响。系统模拟的断层宽度分别为 20、40、60（参考模型）、80 和 100 米（图 3c），其他参数保持不变。模型总体特征是在先存断层与岩层分界交汇处产生类共轭状高应力带。随着先存断层宽度增加，高应力带的应力累积程度和范围均有所扩大。在模型的竖向截面上，以先存断层、沉积岩层及地壳三者交汇处为中心的类共轭状高应力条带数量增多，影响范围更广。

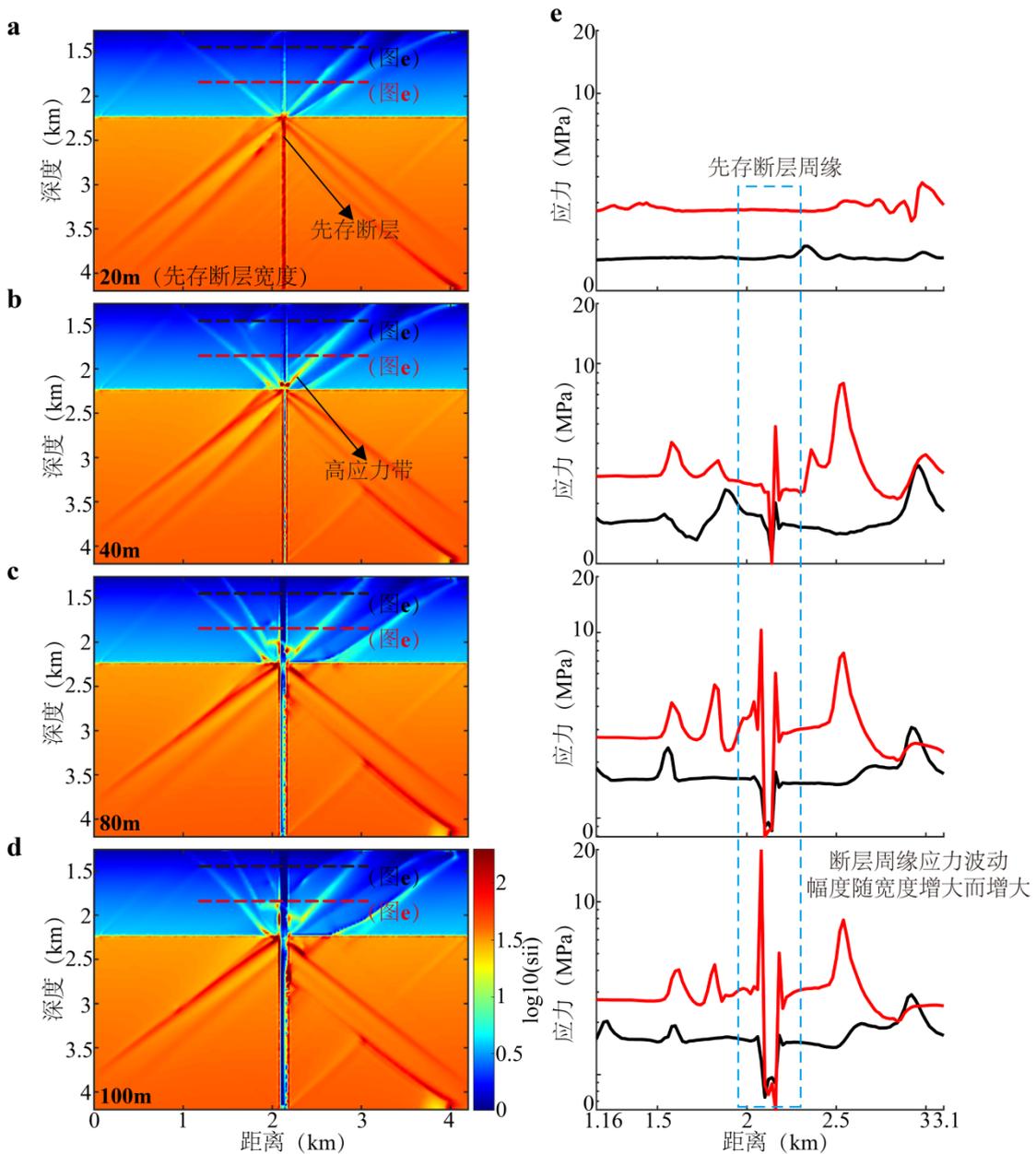


图 6 先存断层宽度的影响作用（模型均演化至 500yr）。（a-d）分别为先存断层宽度 20m、40m、80m 和 100m 的模型竖向应力截面、（e）图 a-d 中虚线位置处的应力曲线

4.2 先存断层数量对应力分布的影响

为了探究先存断层数量对应力分布的影响，本文模拟了含有 1 条、2 条和 3 条先存断层的情况，模拟得到的应力场如图 7 所示。模拟结果表明，先存断层的数量对应力场的分布有显著影响。每一条先存断层都会在断层与岩层分界交汇形成共轭的高应力带。在含有两条或更多先存断层的模型中（图 7b 和 7c 所示），由不同断层产生的高应力条带在先存断裂之间交汇，导致该区域的应力条件更加复杂。随着断层带数量的增加，模型中应力曲线的波动显著加剧，且大多数波动集中在相邻断层之间（图 7 右侧线图）。这种应力数值的显著波动表明，断层数量的增加会导致模型体内应力条件的复杂性增加，局部应力条件变得更加不稳定。

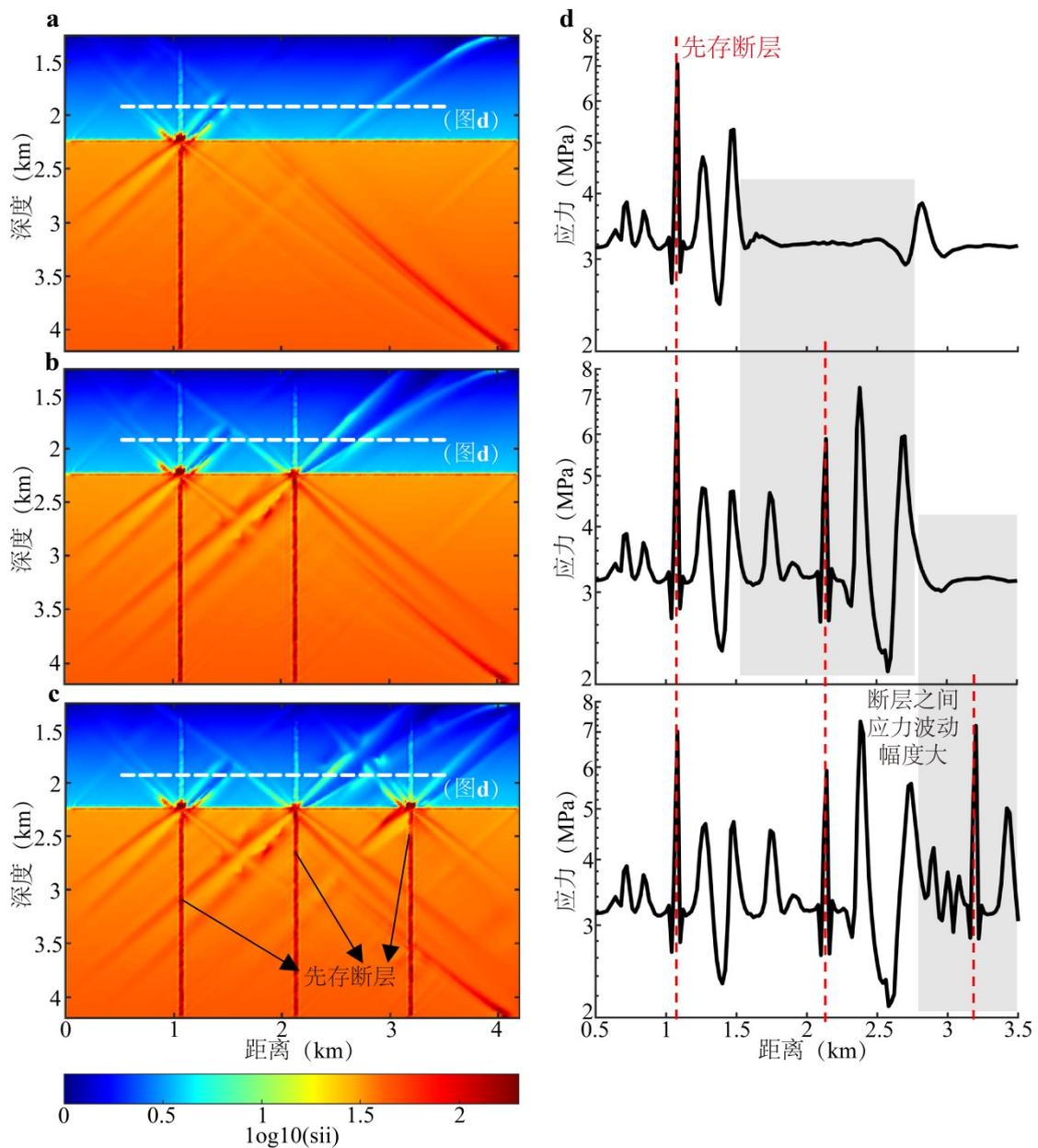


图 7 先存断层数量的影响作用（模型经历了相同的演化时间）。（a-c）分别设置 1、2、3 条先存断裂的三组模型应力场竖向截面、（d）图 a-d 中白色虚线位置处的应力曲线

4.3 先存断层平面形态对应力分布的影响

为了探究断层平面形态对应力场的影响，本文设置了三组模型，分别对应弧间距 L 为 300 米、800 米和 1300 米（图 3f），其他参数与参考模型保持一致。模拟结果如图 8 所示。首先，先存断层区域外也产生了高应力带，但应力集中程度小于图 6a 中的垂直断层周围的应力集中情况，即垂直断层周围相比弧形断层更易累积高应力。在断裂带上，应力则主要集中在弧顶点附近。沿虚线方向的竖向截面分析显示，靠近先存断层弧端的截面中，先存断层上的应力普遍大于远离弧端的截面，表明弧顶点周围的应力集中更为显著。总之，先存断层的弧间距变化对模型应力分布的影响相对较小，主要影响集中在先存断层区域，而对模型内其他区域的影响有限。

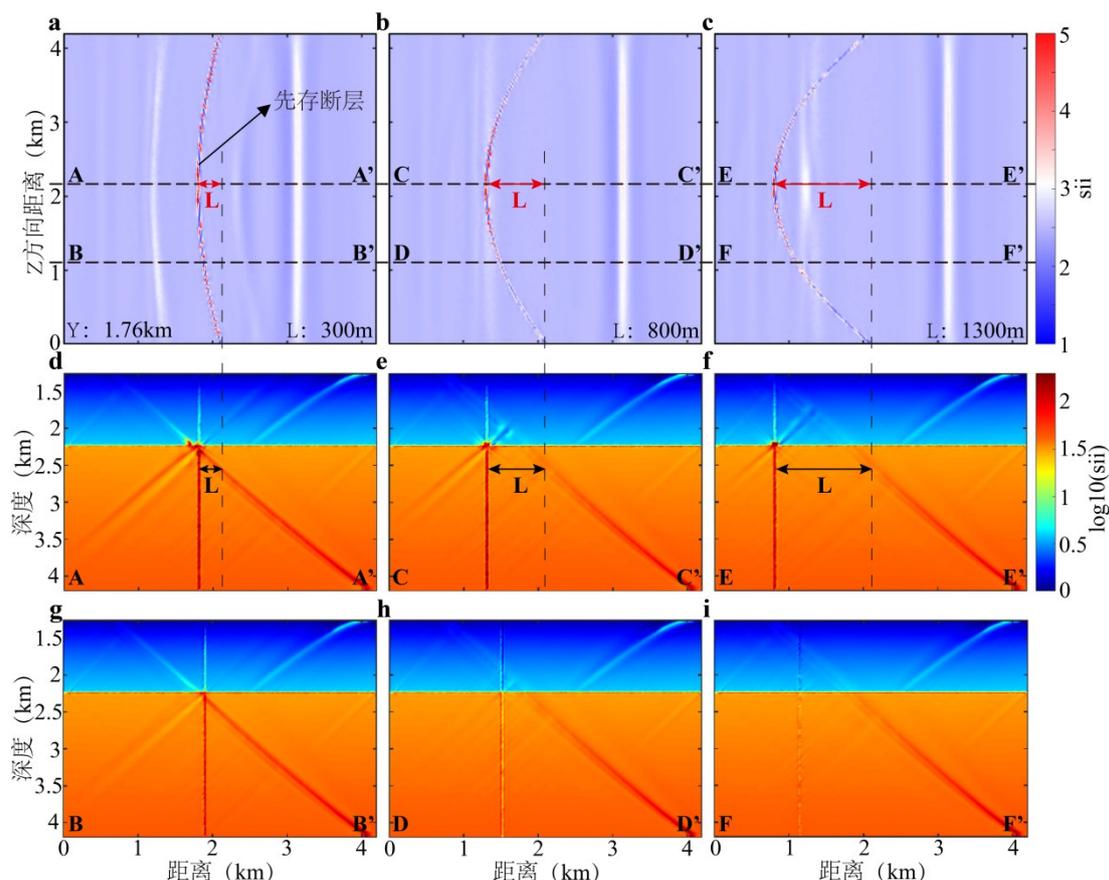


图 8 先存断层平面形态的影响作用（模型均演化至 500yr）。（a-c）分别为弧间距 300m、800m、1300m 的三组模型（上图为 $Y=1.76\text{km}$ 处的应力场水平切片、中下图为 AA' 及 BB' 位置处的应力场垂向切片、弧间距： L ）

4.4 断层倾角对应力分布的影响

在参考模型（即垂直断层）基础上，进一步分析断层倾角的影响作用。通过改变先存断层与垂直方向的夹角，设置了八组模型（图 9），涵盖了从左倾 35° 至右倾 -35° 的八个不同角度的断层。模拟结果如图 9 所示。在左倾模型中（图 9a-d），断层附近的应力集中区域随着倾角的减小而逐渐向模型中心区域扩展。在 10° 倾角模型中，断层周缘形成了明显的波纹状高应力带，这些高应力带随着倾角的减小而逐渐向模型中心区域扩展。在右倾模型中

(图 9e-h)，断层对应力场的影响更为显著，尤其是在 -10° 倾角时，断层附近的应力值达到最高，且影响范围更广。模型中右倾断层更易诱发应力集中和产生更多应力条带，可能原因是矿区所在区域构造应力背景场的主要优势方向为 NW~NWW 向，超声波井下电视扫描显示最大主应力优势方位为 $N77^\circ W$ 。在此应力场作用下，右倾断层（倾向 SE）与主压应力方向呈高角度相交，依据库仑破裂准则，此类夹角使得断面有效正应力减小、显著提升剪应力分量（Mohamed et al., 2025）。数值模型中“右侧边界推挤速度”实质为模拟区域 NW-SE 向挤压，当断层右倾时，断层面法向与主应力方向的夹角增大，应力传递路径缩短，有利于应力集中。与此相反，左倾断层受到的挤压作用较小，应力的传递路径相对较长，因此其应力集中效应较弱。

图 9k 中的应力曲线进一步揭示了不同倾角下沿断层中心线的应力变化特征。正向倾角的断层（如 35° 和 30° ）引起的应力波动相对较小，而负向倾角的断层则引起了较大的应力波动，尤其是在断层附近。值得注意的是，随着断层不断接近直立，黑线和红线之间的差异逐渐增大，表明正倾角和负倾角对应力场的影响程度差异逐渐加剧，负倾角（右倾）的断层会在局部区域引发更为剧烈的应力波动，且波动范围更广。这进一步说明了断层倾角在控制应力集中与分布方面的重要性。

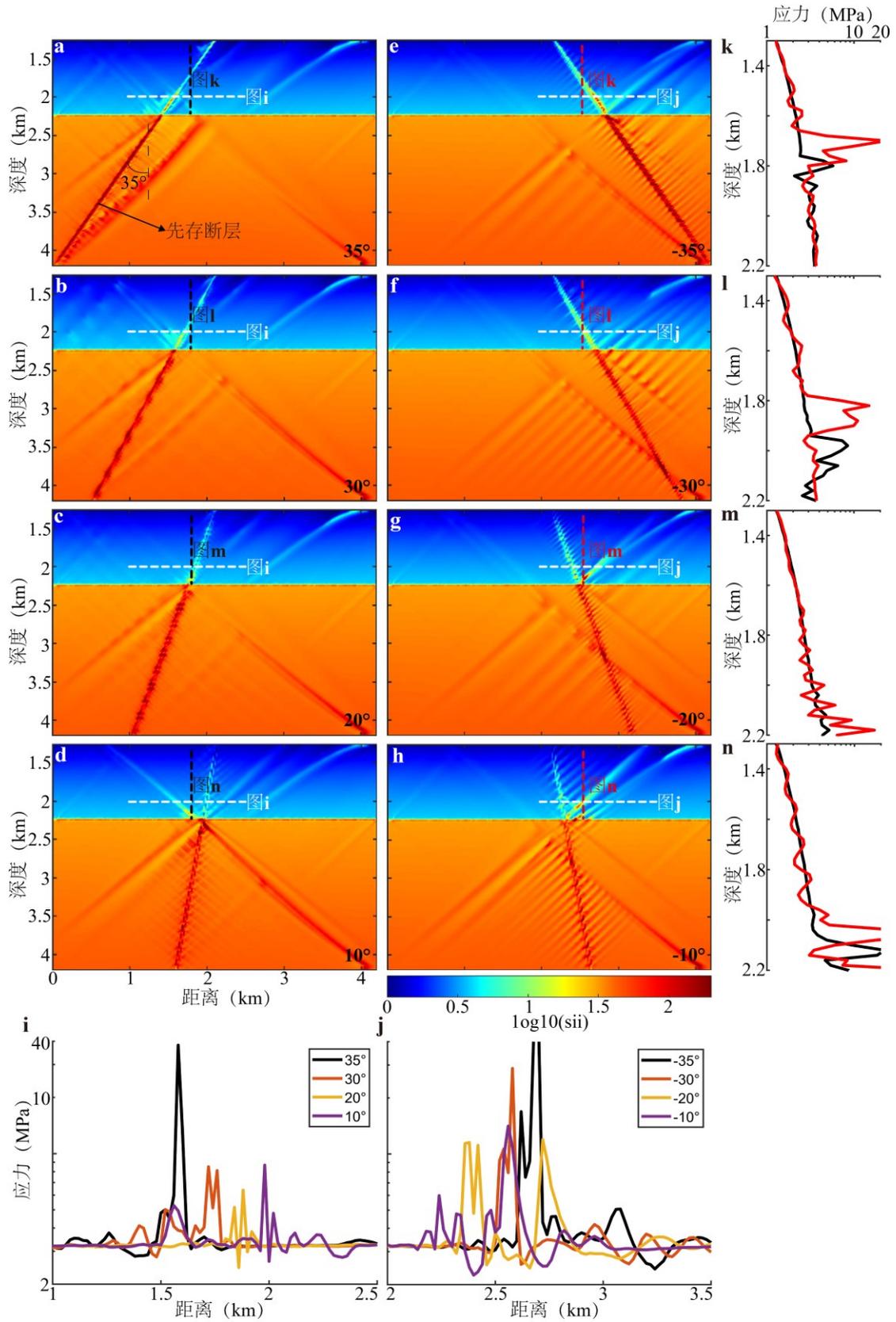


图9 先存断层倾角的影响作用（模型演化至500yr）。（a-h）系统改变断层倾角的8组模型（应力垂向切片）、（i-j）一维随横向距离变化的应力线图，位置见a和e图的白色虚线、（k-n）一维随深度变化的应力线图，位置见黑色及红色虚线

5. 讨论

5.1 先存断层对应力场的影响作用

动力学数值模拟结果揭示,在挤压构造背景下,先存断层的存在显著扰动地应力场的空间分布格局。在先存断层的两侧会形成共轭状的高应力带。共轭高应力带的交点往往是岩层界面与断层的交汇处。这一特点在所有模型中都有体现。

广东凡口铅锌矿经历了多期次的构造活动,形成了复杂多样的断层结构。凡口铅锌矿的地质资料显示,主控断层 F3 的宽度在不同区域有一定差异,较小处为数米、较大处数十米(汪礼明等,2022);凡口铅锌矿的成矿构造由多组断层共同控制(梁新权等,2009;姚翠霞,2015;蔡锦辉等,2011;韩英等,2011)。广东凡口铅锌矿的主控断层的平面形态呈现出一定的弯曲度(图 2a)。

断层的几何参数会对应力分布特征起到控制作用,系统的模拟实验揭示了先存断层结构的影响作用:增加断层宽度会导致应力集中区域的扩展和应力值的显著升高,应力集中区范围与宽度呈正相关;增加断层数量会形成更多的高应力条带,多断层系统(2-3 条)中相邻断层间的应力叠加(图 7d)使应力波动幅度提升;与垂直断层相比,倾斜断层周围会产生更多的高应力带,且左倾和右倾的断层应力分布情况也会有不同;断层的平面展布形态(如弧形弯曲)对应力分布影响较小;这些模拟结果表明,在金属矿开采活动中,需要特别关注较大、较宽的断层(如凡口铅锌矿的 F3 断层)和多条大断层之间的区域(如凡口铅锌矿 F3 与 F4 断层之间区域),因为这些区域更容易累积高应力,在工程等外力扰动下更易达到破裂极限。

5.2 模拟结果与自然观测实例的对比

我们的模拟结果可以与广东凡口铅锌矿过去数年间(2017 年 1 月至 2023 年 6 月)的微震观测现象进行对比,并能解释微震的分布规律(图 10)。

在高角度、近垂直展布的断层周缘,微震主要以两个团簇的形式分布(图 10a、b)。图 10b 中两个团簇的中心(红心三角形标注处)均为断层与地层界面的交汇处。通过我们的模拟结果显示,在高角度、近垂直断层与地层界面的交汇处会形成明显的共轭状高应力带(图 10d)。这种共轭状高应力带的存在使得该区域应力背景值更高、更易形成微裂隙,进而诱发了微震事件的聚集,最终呈现出以断层与地层界面交汇处为中心的微震团簇聚集的分布现象。

对于倾斜断层周缘的微震分布情况,从实际观测来看,其微震事件随深度较为均匀的分布,未见明显团簇现象(图 10e、f)。我们的模拟结果显示,在倾斜断层周缘形成多条与之斜交的高应力带(图 10h),但与高角度、近垂直断层模型相比,其应力集中程度较低,未形成明显的微震团簇。另外,在倾斜断层模型中,地层界面对应力分布的影响作用降低,使得微震事件不会像在高角度、近垂直断层周缘那样因地层界面与断层的交汇而呈现出明显的集中团簇分布,而是相对较为均匀地分布在倾斜断层周缘。

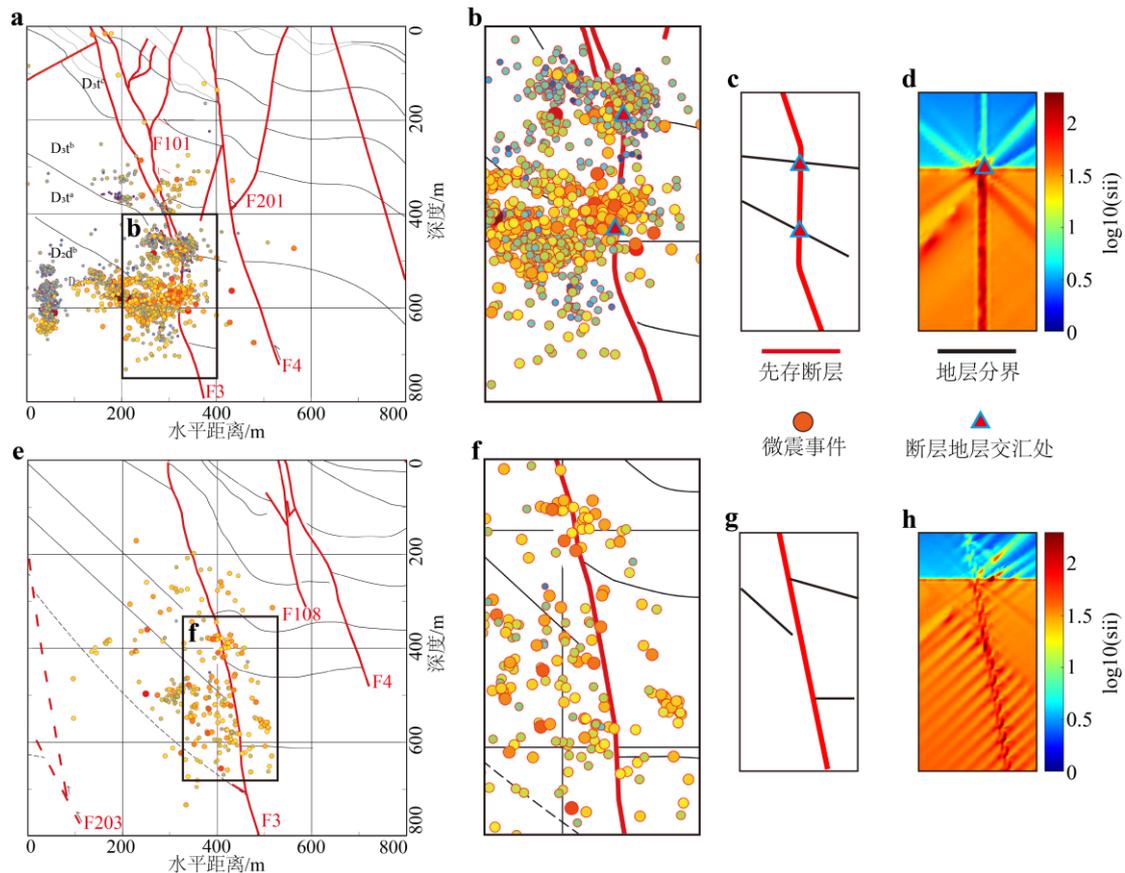


图 10 观测现象与模拟结果的对比。(a-d) 高角度、近垂直断层周缘的微震分布和模拟结果、(e-h) 倾斜断层周缘的微震分布和模拟结果

5.3 模拟结果对理解应力场演化的启发

金属矿微震的触发往往由采矿活动（如爆破、开采、回填等）和地质构造（如断层、地层等扰动应力场）两种因素引起，两种因素的影响作用往往难以区分。广东凡口铅锌矿的大部分微震事件可能是由采矿活动引起的，比如微震事件与爆破事件之间存在很强的关联性。但是，地质构造对诱发微震有什么影响，我们依然不是十分清楚。本文应用数值模拟的方法，验证了长期地质演化过程中在先存断层周缘会形成高应力带，进而可能在岩体内部形成微裂隙并引发微震。

广东凡口铅锌矿于 2017 年 7 月 26 日及 2020 年 5 月 25 日发生了两次较大的矿震（震级分别为 1.4 级和 0.4 级），经井下排查发现，这两次矿震并非直接发生在工程表面、并未导致巷道、硐室、采场等工程的破坏，其能量释放主要区域均位于 F3 断层周缘（距断层 F3 岩体内部未揭露的断层结构面，显示矿震为应力释放的次生效应、是由于应力场变化引起的，而非采矿活动直接诱发的工程结构失稳。矿震本质为岩体内部高应力区在长期演化中因能量累积突破临界阈值后的释放，当外部扰动（如爆破震动、机械振动）打破高应力岩体内部的力学平衡时，岩体通过破裂或滑移释放能量，形成矿震。工程活动仅作为外部扰动加速了应力释放的触发过程，而非根本原因。

凡口矿区这两次较大的矿震事件揭示了先存断层系统对深部应力场演化的控制作

用。断层周边岩体因长期应力积累形成高应力区域，在微小外部扰动下易触发突发性能量释放。这一机制表明，矿区安全生产需重点关注大断层周缘及隐伏构造区域的应力监测与防控，优化采掘布局以降低扰动对高应力岩体的激活风险，从而有效规避矿震灾害。

综上，矿区微震的直接触发原因是应力的显著作用或变化（McGarr et al., 1975; Marsan et al., 1999），而矿震的动态触发条件首先需要有利的先存应力状态：例如在长期的地质构造演化中所形成的先存断层、高地温等，还需要有额外的外部扰动力，例如开采、爆破、回填等工程因素。凡口矿区微震事件总体集中在大断层周缘，且大部分微震事件以团簇状分布在断层与地层交汇处附近。即在以大断层和地层交汇为中心的高应力条带上，容易产生微震。结合模拟结果，可能是长期地质演化过程中，以大断层周缘及大断层与地层的交汇为中心产生高应力累积带，使得断层周围的地下岩体长期处于高应力环境中，在长期时空演化中易在岩体内部诱发丰富的微裂隙，可能为矿震的触发提供了有利的先存应力条件，易在微小的开采等动态扰动下促使微裂隙进一步发育贯通，最终在岩体内部产生较大的破裂，即矿震。

6. 结论

本文创新性地应用了米级尺度的高分辨率热-力学耦合三维地球动力学数值模拟，系统分析了先存断层对周缘岩石应力场演化的影响作用，并从应力变化的角度讨论了先存断层与微震发生位置的可能关系，主要取得了以下几点结论：

（1）先存断层会显著影响其周缘岩石应力场的演化，在先存断层两侧易形成共轭状应力条带，这些应力累积条带易形成微裂隙，成为岩体损伤的有利位置。先存断层的几何形状会影响应力场演化。先存断层数量和倾角对应力分布的影响最大，表现为在更大的空间范围内产生多条高低应力条带；先存断层宽度对应力的影响主要集中在断裂附近区域；断层弧度对应力的影响最小，且弧形断裂上不易累积应力。

（2）结合模拟结果与微震观测，长期地质演化中，凡口矿区大断层周缘及断层-地层交汇处易形成高应力累积区，导致周缘地下岩体长期处于高应力环境，诱发内部微裂隙发育，为矿震触发提供先存应力条件；微小开采扰动下微裂隙进一步贯通，最终引发矿震。建议在断层 F3 与地层交汇处加强微震监测，优化采掘布局以降低扰动对高应力岩体的激活风险，从而有效规避矿震灾害。

参考文献

- 蔡锦辉, 罗俊华, 徐遂勤, 等, 2011. 广东凡口铅锌矿成因探讨[J]. 华南地质与矿产, 27(1): 1-7.
- 郭玉豹, 李京濂, 冀虎, 等, 2015. 基于 IMS 的岭南金矿微震监测系统的应用研究[J]. 有色金属(矿山部分), 67(2): 4-9+26.
- 韩英, 王京彬, 祝新友, 等, 2011. 广东凡口铅锌矿碳、氧同位素地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 47(4): 642-648.
- 何俊飞, 2013. 可控源音频大地电磁法在凡口铅锌矿中的应用[J]. 工程地球物理学报, 10(6): 763-770.
- 赖应箴, 1988. 凡口铅-锌矿床的成因[J]. 地质论评(3): 220-230.
- 李永靖, 张向东, 袁世君, 等, 2004. 抚顺老虎台矿矿震活动趋势研究[J]. 中

国矿业(11): 65-67.

李泽宇, 2024. 凡口铅锌矿矿震发生机制与控制措施研究[D]. 长沙: 中南大学.

梁新权, 温淑女, 2009. 广东凡口铅锌矿床的走滑构造及成矿模式[J]. 大地构造与成矿学, 33(4): 556-566.

林绍标, 1998. 凡口超大型铅锌矿床地质特征[J]. 有色金属(S1): 3-12.

林远东, 涂敏, 刘文震, 等, 2012. 基于梯度塑性理论的断层活化机理[J]. 煤炭学报, 37(12): 2060-2064.

刘德利, 刘继顺, 郭军, 等, 2006. 广东凡口铅锌矿床控矿构造型式[J]. 矿床地质(2): 183-190.

刘建坡, 2012. 深井矿山地压活动与微震时空演化关系研究[D]. 沈阳: 东北大学.

卢海珠, 史秀志, 陈新, 等, 2023. 凡口铅锌矿深部热害调查分析与防治措施[J]. 采矿技术, 23(3): 126-129.

卢焕章, 1984. 广东凡口铅锌矿的成因研究[J]. 地球化学(4): 357-365+406-407.

陆振裕, 窦林名, 刘宝田, 等, 2012. 断层处的矿震机理及震动信号特征研究[J]. 煤矿安全, 43(11): 51-53.

孟上九, 秦艺峰, 王淼, 等, 2024. 矿震机理及其次生灾害监测技术研究进展[J]. 世界地震工程, 40(3): 103-118.

齐庆新, 陈尚本, 王怀新, 等, 2003. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报(11): 1852-1858.

邱小平, 1991. 广东凡口铅锌矿床成矿构造动力研究[J]. 中国地质科学院院报(2): 57-72.

汪礼明, 郭兰萱, 王涌泉, 等, 2022. 广东凡口铅锌矿床逆冲推覆构造体系:地质特征、演化序列及控矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 46(6): 1218-1228.

王晶, 2012. 广东凡口铅锌矿床成因矿相学及成因矿物学研究[D]. 长沙: 中南大学.

王力, 彭省临, 龙永珍, 等, 2003. 广东凡口铅锌矿多因复成成矿作用[J]. 桂林工学院学报(2): 149-153.

王涛, 王墨华, 姜耀东, 等, 2014. 开采扰动下断层滑移过程围岩应力分布及演化规律的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 43(4): 588-592+683.

姚翠霞, 2015. 曲仁盆地北缘凡口式 MVT 铅锌矿床关键成矿控制系统[D]. 中南大学.

原桂强, 2016. 凡口铅锌矿深部岩爆地质因素分析及防范[J]. 冶金丛刊(3): 37-42.

原桂强, 贾会业, 宋玉伟, 等, 2019. 凡口铅锌矿狮岭南深部矿床地质特征及找矿方向[J]. 地质学刊, 43(1): 1-7.

詹松辉, 2022. 基于长期 GPS 观测的中国大陆地壳形变[D]. 广东工业大学.

张术根, 丁存根, 李明高, 等, 2009. 凡口铅锌矿区闪锌矿的成因矿物学特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 28(4): 364-374.

张新社, 2010. 广东省凡口铅锌矿矿区地下水害防治方案研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

张月征, 2016. 开采动力灾害与区域应力场之间的协同机制与响应特征研究[D]. 北京: 北京科技大学.

赵毅鑫, 王浩, 卢志国, 等, 2018. 开采扰动下断层面库仑应力及诱发矿震时空演化特征[J]. 煤炭学报, 43(2): 340-347.

祝新友, 王京彬, 刘慎波, 等, 2013. 广东凡口 MVT 铅锌矿床成矿年代——来自

- 辉绿岩锆石 SHRIMP 定年证据[J]. 地质学报, 87(2): 167-177.
- Cai W, Dou L, Si G, et al., 2021. Fault-Induced Coal Burst Mechanism under Mining-Induced Static and Dynamic Stresses[J]. Engineering, 7(5): 687-700.
- Castellanos F, Van der Baan M, 2015. Dynamic triggering of microseismicity in a mine setting[J]. Geophysical Journal International, 202(2): 728-737.
- De Joussineau G, 2023. The geometrical properties of fracture corridors[J]. Tectonophysics, 846: 229637.
- Du Y, Wu C, Wang C, et al., 2023. Stress background and rock fractures revealed by ultrasonic borehole television in the fankou lead-zinc mine[J]. Frontiers in Earth Science, 11.
- Feng X T, Liu J, Chen B, et al., 2017. Monitoring, Warning, and Control of Rockburst in Deep Metal Mines[J]. Engineering, 3(4): 538-545.
- Foulger G R, Wilson M P, Gluyas J G, et al., 2018. Global review of human-induced earthquakes[J]. Earth-Science Reviews, 178: 438-514.
- Gerya T V, 2013. Three-dimensional thermomechanical modeling of oceanic spreading initiation and evolution[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 214: 35-52.
- Glazer S N, 2018. Mine Seismology: Seismic Warning Concept[M]. Cham: Springer International Publishing.
- He J, Dou L, Gong S, et al., 2017. Rock burst assessment and prediction by dynamic and static stress analysis based on micro-seismic monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 93: 46-53.
- Islam Md R, Shinjo R, 2009. Mining-induced fault reactivation associated with the main conveyor belt roadway and safety of the Barapukuria Coal Mine in Bangladesh: Constraints from BEM simulations[J]. International Journal of Coal Geology, 79(4): 115-130.
- Kong P, Yuan A, Liu Y, et al., 2022. Study on fault slip dynamic response and rock burst potential under the influence of different horizontal stresses[J]. Geomatics, Natural Hazards And Risk, 13(1): 1321-1341.
- Li T, Mu Z, Liu G, et al., 2016. Stress spatial evolution law and rockburst danger induced by coal mining in fault zone[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 26(3): 409-415.
- Li Y, Deng H, Wen L, et al., 2022. Method for identifying and forecasting mining-induced earthquakes based on spatiotemporal characteristics of microseismic activities in fankou lead/zinc mine[J]. Minerals, 12(3): 318.
- Ma T H, Tang C A, Tang S B, et al., 2018. Rockburst mechanism and prediction based on microseismic monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 110: 177-188.
- Maghsoudi S, Baró J, Kent A, et al., 2018. Interevent triggering in microseismicity induced by hydraulic fracturing[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 108(3A): 1133-1146.
- Marsan D, Bean C J, Steacy S, et al., 1999. Spatio-temporal analysis of stress diffusion in a mining-induced seismicity system[J]. Geophysical Research Letters, 26(24): 3697-3700.
- McGarr A, Green R W E, 1975. Measurement of Tilt in a Deep-Level Gold Mine and

its Relationship to Mining and Seismicity[J]. *Geophysical Journal International*, 43(2): 327-345.

Mgumbwa J, Page A, Human L, et al., 2017. Managing a change in rock mass response to mining at the Frog's Leg underground mine[R]. Australian Centre for Geomechanics: 917-936.

Mohamed T, Alhadj Chehade H, 2025. Influence of spatially variable fault friction on tunnel-induced fault stability[J]. *Results in Engineering*, 27: 105898.

Morissette P, Hadjigeorgiou J, Punkkinen A, 2017. Characterisation of burst-prone grounds at Vale's Creighton Mine[J]. *Mining Technology*, 126(3): 123-138.

Sainoki A, Mitri H S, 2014. Methodology for the interpretation of fault-slip seismicity in a weak shear zone[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 110: 126-134.

Shen B, Duan Y, Luo X, et al., 2020. Monitoring and modelling stress state near major geological structures in an underground coal mine for coal burst assessment[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 129: 104294.

Snelling P E, Godin L, McKinnon S D, 2013. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58: 166-179.

Yang S, Wei X, Chen L, et al., 2024. Analysis of Rock Burst Mechanism in Extra-Thick Coal Seam Controlled by Thrust Fault under Mining Disturbance[J]. *Processes*, 12(2): 320.

Zhang P, Yang T, Yu Q, et al., 2015. Microseismicity Induced by Fault Activation During the Fracture Process of a Crown Pillar[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4): 1673-1682.

Zhang Y, Wong L N Y, Meng F, 2021. Brittle fracturing in low-porosity rock and implications to fault nucleation[J]. *Engineering Geology*, 285: 106025.

Zhu S, Cai Y, Shi Y, 2006. The contemporary tectonic strain rate field of continental China predicted from GPS measurements and its geodynamic implications[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 163(8): 1477-1493.