引用格式：黄晓盼，王成虎，杨承伟，等，2026. 盘龙铅锌矿结构面稳定性分析及其工程意义研究[J]. 地质力学学报，32（2）：439−451. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025083

Citation: HUANG X P，WANG C H，YANG C W，et al.，2026. Analysis of structural plane stability in the Panlong lead–zinc mine, Guangxi, China and its engineering implications[J]. Journal of Geomechanics，32（2）：439−451. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025083

盘龙铅锌矿结构面稳定性分析及其工程意义研究

黄晓盼[1]，王成虎[1]，杨承伟[1]，刘冀昆[1,2]，肖海帆[1]

HUANG Xiaopan[1]，WANG Chenghu[1]，YANG Chengwei[1]，LIU Jikun[1,2]，XIAO Haifan[1]

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京 100085；
2. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083

1. *National Institute of Natural Hazards*, *Ministry of Emergency Management*, *Beijing* 100085, *China*;
2. *School of Engineering and Technology*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*

Analysis of structural plane stability in the Panlong lead–zinc mine, Guangxi, China and its engineering implications

Abstract: ［**Objective**］The Panlong lead–zinc mine, an important polymetallic mine in central Guangxi, faces increasing challenges related to high in-situ stress and structurally complex rock masses as mining progresses to greater depths. Instabilities along structural planes have become a major geotechnical hazard. However, current understanding of the interplay between fracture geometry and the stress field remains limited. This study aims to evaluate the stability of structural planes at depth and their implications for safe mine development. ［**Methods**］High-resolution data on fracture orientation and spacing were obtained through ultrasonic borehole television imaging in boreholes SK1 and SK2. Hydraulic fracturing tests were used to determine the magnitude and orientation of in-situ stresses. Stress tensor transformation and the Coulomb friction criterion were applied to estimate shear and normal stresses on structural planes and to assess their slip tendency under current stress conditions. ［**Results**］The rock mass in the Panlong mine contains steeply dipping structural planes predominantly oriented NW–NNW and NE–NEE. Cluster analysis revealed three dominant fracture sets, reflecting tectonic control from nearby faults. Furthermore, in-situ stress measurements between 500 and 850 m depth show S_H = 28.29−44.69 MPa, S_h = 19.46−27.09 MPa, and S_v = 14.50−22.68 MPa. The average values of the maximum and minimum horizontal lateral pressure coefficients are k_H=2.07 and k_h=1.28, respectively, indicating a horizontal compressive regime with S_H oriented NW–NNW. Analysis of borehole breakouts and drilling-induced fractures supports the NW–NNW orientation of maximum horizontal stress. Subsequently, a total of 2,948 structural planes were analyzed. Slip tendency evaluation based on slip tendency (T_s = 0.2−0.4) shows that fractures with T_s > 0.20 are primarily distributed at depths less than 550 m. Steeper fracture planes (40°−75°) exhibit a high slip potential, indicating a higher likelihood of shear slip. NW–NNW-oriented planes exhibit both high density and high slip potential, especially when fracture aperture exceeds 10 mm. ［**Conclusions**］The structural planes in the Panlong mine are characterized by steep dips and strong orientation clustering, primarily NW–NNW and NE–NEE, reflecting significant tectonic control. The in-situ stress regime is governed by horizontal compression, which favors the activation of reverse faults. This aligns with observed fracture development and supports the role of tectonic faults in stress field evolution. NW–NNW-oriented fractures, particularly those with low slip tendency and wide apertures, pose the highest risk for shear reactivation under current conditions and require targeted

基金项目：国家自然科学基金面上项目（42174118）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42174118).

第一作者：黄晓盼（2000—），女，在读硕士，研究方向为地质力学与岩土工程。Email：xiaopanhuuug@163.com

通信作者：王成虎（1978—），男，博士，研究员，研究方向为地质力学与岩土工程。Email：huchengwang@163.com

收稿日期：2025−07−08；**修回日期**：2025−09−07；**录用日期**：2025−09−10；**网络出版日期**：2026−03−18；**责任编辑**：王婧

Received：2025−07−08；Revised：2025−09−07；Accepted：2025−09−10；Available Online：2026−03−18；Handling Editor：WANG Jing

monitoring and support. Furthermore, structural planes in shallow zones (<550 m) present a higher slip potential than those in deeper zones, emphasizing the need for depth-specific design strategies. [**Significance**] These findings provide a detailed understanding of structural plane behavior under deep mining conditions and offer scientific support for roadway layout optimization, support system design, and hazard mitigation.

Keywords: Panlong lead-zinc mine; borehole TV; hydraulic fracturing; rock structural plane; stress field; structural plane stability

摘　要：广西盘龙铅锌矿是桂中地区重要的多金属矿产资源，其深部开采受岩体结构面和地应力场控制显著。为系统评估该矿深部结构面的稳定性，揭示高地应力与构造裂隙耦合作用下的滑动机制，保障深部矿山开采安全，综合采用超声波钻孔电视与水压致裂技术，获取SK1与SK2钻孔的结构面与地应力数据。结合Sheorey模型与应力张量变换方法，计算结构面上的剪应力与正应力，并基于摩擦滑动准则对2948组结构面进行稳定性评价。结果表明：矿区岩体结构面以陡倾角为主，优势倾向为北西—北北西向和北东—北东东向。在500～850 m深度范围内，三向主应力值分别为最大水平主应力S_H=28.29～44.69 MPa、最小水平主应力S_h=19.46～27.09 MPa、垂向主应力S_v=14.50～22.68 MPa；S_H方向为北西—北北西向，S_h方向为北东—北东东向。最大、最小水平侧压力系数平均值分别为k_H = 2.07、k_h = 1.28，表明三向主应力关系为S_H>S_h>S_v，水平应力占主导地位，现今构造应力场以北西向挤压为主，与区域构造应力场方向一致。北西—北北西向结构面群在当前高应力环境下具有较高的剪切再活化风险，尤其是滑动潜势T_s>0.20且裂隙宽度>10 mm的结构面，应作为重点监测与加固对象。研究成果可为深部开采巷道布设优化、支护设计及灾害防控提供科学依据。

关键词：盘龙铅锌矿；钻孔电视；水压致裂；岩体结构面；地应力场；结构面稳定性

中图分类号：P313.5; P642.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)02−0439−13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025083

0　引言

随着浅部矿产资源逐渐枯竭，深部开采已成为全球矿业发展的必然趋势。国际矿业发达国家在深部开采技术与管理方面积累了丰富经验，部分矿山开采深度已超过4 km，形成了较为成熟的理论与技术体系(Wagner, 2019)。相比之下，中国矿产资源开发正逐步向深部延伸，预计至2030年，超过1/3的金属矿山将进入千米级的深部作业阶段。深部高地应力环境与复杂地质构造的耦合作用，显著加剧了岩体结构面失稳滑动的风险，进而诱发冒顶片帮(刘家胜等, 2024)、岩爆(付俊等, 2024)、突水等一系列工程灾害，严重影响矿山安全生产。已有研究表明，结构面在剪应力作用下可能发生滑移，导致围岩失稳甚至大规模垮塌(Brown and Hoek, 1980; Barton et al., 1985)。特别是在高地应力条件下，结构面的几何特征(如倾角、倾向)和摩擦性能(如摩擦系数)对滑动潜势具有显著影响(Jaeger et al., 2009)。例如，陡倾角结构面在水平应力主导的环境中更易发生剪切破坏，而低摩擦系数的结构面(如充填断层泥的裂隙)则在应力扰动下可能迅速失稳(Barton, 1973)。但在复杂构造区，结构面与地应力的耦合机制尚未得到充分揭示，相关研究多局限于单一尺度或理论模拟，缺乏系统的现场数据支撑和综合分析。

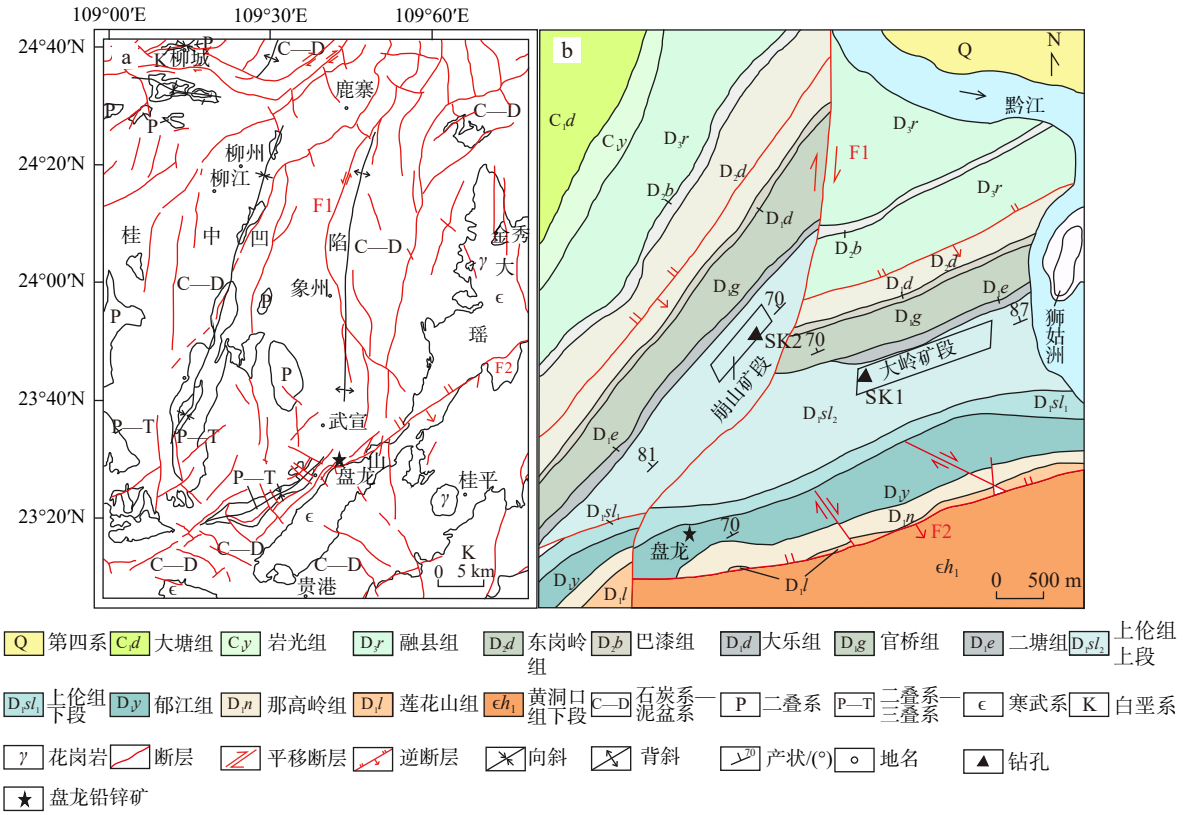
广西盘龙铅锌矿是近年来发现的桂中地区重要的多金属矿床之一，处于南华活动带大瑶山隆起与桂中凹陷的构造交汇地带。矿区断裂系统发育，主要受东乡−永福断裂(F1)与凭祥−大黎断裂(F2)控制。现有研究显示，广西及其邻区的构造应力场特征复杂，受区域构造运动、多期次变形叠加等因素影响，地应力方向具有较强的分带性和时空变化性(蒋维强等, 1992; 李细光等, 2007; 郑礼洋和万永革, 2025)。尽管区内地应力场特征已被初步揭示，针对矿区深部结构面空间分布、力学特性及其与地应力相互作用的系统研究依然不足，限制了深部开采中灾害风险的科学评估与有效控制。随着开采深度增加，高地应力引发的结构面滑动再激活频率显著上升，且不同结构面群的响应差异复杂，亟需建立结合现场测量与理论分析的稳定性评价体系。

针对以上不足，文章以盘龙铅锌矿区为研究区，以盘龙铅锌矿SK1和SK2钻孔为研究对象，综合运用超声波电视技术(邹先坚等, 2017; 孙志勇等,

2023）和水压致裂法，（李彬等，2022；乔二伟等，2025）系统测量地应力数据；通过修正的 Sheorey 模型应力数据拟合法与张量变换方法（Zoback，2010），量化了该区域结构面剪应力与正应力的分布；结合摩擦滑动准则，系统评估了优势结构面群的滑动潜势及其对深部开采安全的影响，突破了传统单一方法的局限。研究不仅丰富了复杂构造区岩体结构面稳定性理论体系，也为矿区巷道布置优化、支护设计及灾害防控提供了科学依据，具有重要的工程应用价值和推广意义。

1　区域构造地质背景和钻孔地质特征

广西盘龙铅锌矿区地处华南板块桂中凹陷与大瑶山隆起的交汇部位，位于广西山字型构造体系前缘东翼褶皱带内，隶属寒武系复式背斜构造的北西翼（图 1a）。地层整体呈北西向单斜构造，倾角多大于 80°，区域构造复杂（图 1b）。加里东期构造活动奠定了区域基底框架，构造格局以北东和近南北向褶皱断裂为主（许浩天，2019）；印支期受近东西向挤压导致早期断裂普遍发生构造反转；燕山期挤压方向转为近南北向，叠加作用形成大量北东、北西向的走滑断裂，使断裂带附近结构面密集发育；喜马拉雅期北西—南东向挤压进一步重塑应力场，加剧了区域构造的复杂性。受上述多期构造活动叠加影响，形成了以北东、北西和近南北向为主的褶皱与断裂系统，对岩体结构面分布及地应力场演化具有深远影响。矿区内发育 2 条主要深大断裂：东乡−永福断裂（F1），近南北向延伸、倾向北西；凭祥−大黎断裂（F2），北东向展布、倾向南东。



F1—东乡−永福断裂（平移断层）；F2—凭祥−大黎断裂（区域性逆断层）

a—构造纲要图；b—矿区地质图

图 1　盘龙铅锌矿区周边构造纲要图及矿区地质图（据安鹏鑫，2019；覃佳肖，2023 修改）

Fig. 1　Peripheral tectonic outline map and geological map of the Panlong lead-zinc mine area (modified after An, 2019; Qin, 2023)

(a) Peripheral tectonic outline map; (b) Geological map

F1—strike-slip fault (Dongxiang–Yongfu Fault); F2—regional thrust fault (Pingxiang–Dali Fault)

矿区总面积 2.36 km^2，包括崩山矿段和大岭矿段，其中崩山矿段因地面塌陷已闭坑。区域出露地层以沉积岩为主，由老至新依次为寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系及第四系，其中中—下泥盆统是

主要的铅锌矿赋矿层位；石炭系以海相碳酸盐岩及海陆交互相碎屑岩为主，局部发育硅质岩；第四系为河流相沉积。受早古生代广西运动影响，后续沉积盖层与寒武系基底之间形成角度不整合接触，并造成奥陶系与志留系地层的缺失。远离区内铅锌多金属成矿带仅见少量岩浆岩体、煌斑岩脉及辉绿岩脉出露，与区内金属成矿无直接关系。

为揭示深部岩体结构面特征与地应力状态，在矿区内部核心位置布施了2口深部钻孔SK1与SK2(孔径均为75 mm，设计深度分别为960.90 m和961.19 m，孔间直线距离约1 km)。两孔均处于南华活动带构造应力集中区，受区域构造显著改造，裂隙及结构面发育，与矿区总体调查结果一致。SK1钻孔位于矿区中部偏北，靠近北东向展布的F1断裂以东，钻孔揭露地层主要为下泥盆系统上伦组灰岩与白云岩，局部见矿化蚀变带；SK2钻孔位于矿区南部偏中，距F1断裂约200 m，紧邻一条次级北东向断裂带东侧，岩性以下泥盆统上伦组白云质灰岩为主，伴生硅质岩及矿化蚀变岩带。

2 岩体结构面分布特征

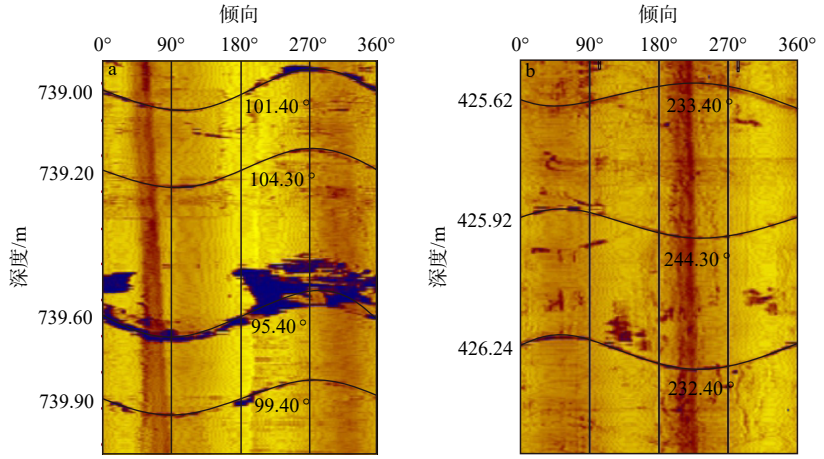
基于超声波钻孔电视资料，对SK1与SK2钻孔中揭露的岩体结构面进行系统分析。利用WellCAD软件对测试获得的高质量超声波成像数据进行解译，精确测定了裂隙的埋深、倾向、倾角、宽度等一系列参数，结合录井资料共获得2948个结构面的产状数据。经WellCAD软件处理的超声波录井图像，直观反映了孔壁结构面的分布特征(图2)。

为揭示岩体结构面的几何特征与分布规律，文章重点分析SK1和SK2钻孔中结构面的倾角与倾向。采用走向玫瑰花图与极点密度图来识别优势组的产状(图3)。其中，走向玫瑰花图半径代表结构面数量；极点密度图中圆心代表0°倾角，向外依次增大，至外圆代表90°倾角，点分布的象限代表倾向，颜色越深代表该方向结构面数量越多。结果显示，结构面主要走向集中于北东东和北西方向，表明岩体在该方向受构造作用影响显著。极点密度图进一步揭示，结构面的主要倾向为北西—北北西向和北东—北东东向；倾角以陡倾角为主(α>45°)，且集中于300～850 m深度范围内。

3 地应力测量及矿区地应力场分析

3.1 地应力测量方法

在矿区深孔SK1和SK2中开展水压致裂原位应力测量，测试流程严格按照国际岩石力学学会推荐的方法(Haimson and Cornet, 2003)进行。水压致裂法是一种通过向岩体孔隙内注入高压流体，诱发岩石局部破裂，进而测量破裂压力和闭合压力，推算原地应力状态的现场测量方法。该技术具有测量深度大、无需依赖岩石力学参数、可直接获得应力大小与方向等优势，已广泛应用于深部地应力测量。根据测试规范及岩芯完整性，分别在SK1和SK2钻孔中获取7个和9个测段的应力大小数据，以及6个和4个测段的应力方向信息。应力反演过

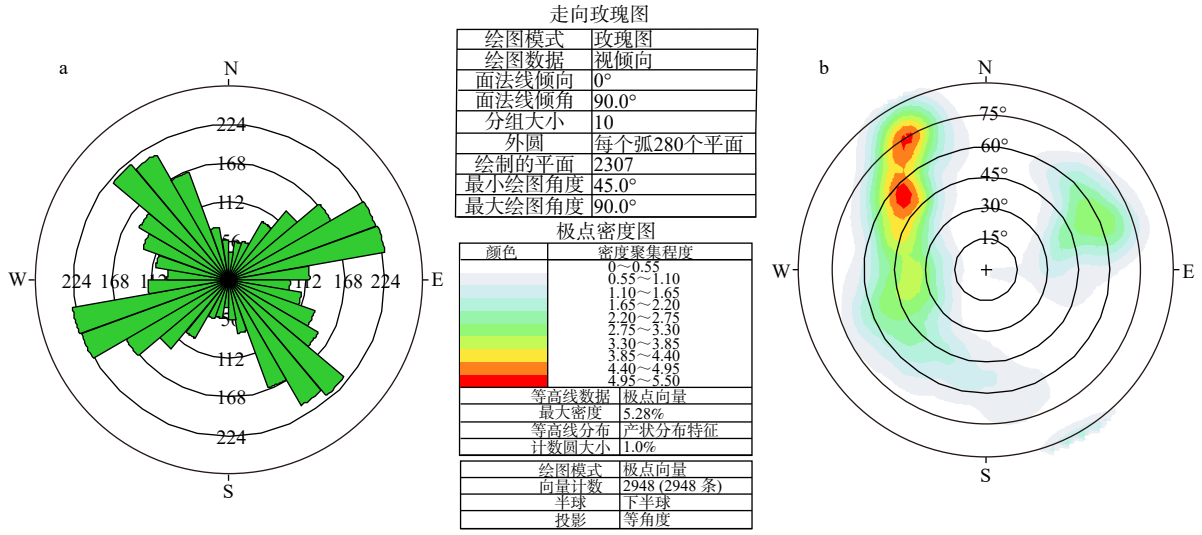


a—SK1钻孔典型部位；b—SK2钻孔典型部位

图2 两个钻孔典型部位超声波钻孔图像

Fig. 2 Typical acoustic borehole images from two boreholes

(a) Typical section in borehole SK1; (b) Typical section in borehole SK2



a—走向玫瑰图；b—极点密度图

图 3　结构面走向玫瑰花图和极点密度图

Fig. 3　Strike rose diagram of structural plane and pole density plot

(a) Strike rose diagram; (b) Pole density plot

程中，闭合压力 P_s 的准确判定尤为关键，其数据质量直接影响到测试结果的准确度。然而，由于测量设备性能的不同及方法差异，目前 P_s 的确定通常依赖多种数学判别方法，如单切法、dp/dt 法及 dT/dp 法（Feng et al., 2012）等，不同方法所得结果可能存在一定偏差。为进一步优化 P_s 的判定精度，结合原始的 P–t 曲线形态变化特征，采用多种方法（单切法、双切法、渐变法等）进行联合分析，取其平均值得到 P_s。在此基础上，计算得到更具代表性的最大水平主应力 S_H、最小水平主应力 S_h 和估算的垂向应力 S_v。

3.2　地应力测量结果

根据校正后的最大水平主应力 S_H、最小水平主应力 S_h 和估算的垂向应力 S_v，计算最大、最小水平侧压力系数 k_H、k_h（表 1）。测量数据显示，测试深度在 500～850 m范围内，S_H=28.29～44.69 MPa; S_h=18.09～27.09 MPa; S_v=14.50～22.68 MPa。与各深度段按岩层厚度计算的重力应力相比，水平应力普遍较高，呈现出 S_H>S_h>S_v 的关系，表明测孔区域应力场以水平挤压为主。根据安德森断层理论，该应力状态有利于逆断层的活动。测试深度范围的最大、最小水平侧压力系数分别为 k_H = 1.64～2.63、k_h = 1.09～1.60，平均值分别为 2.07 和 1.28。

3.3　地应力测量结果分析

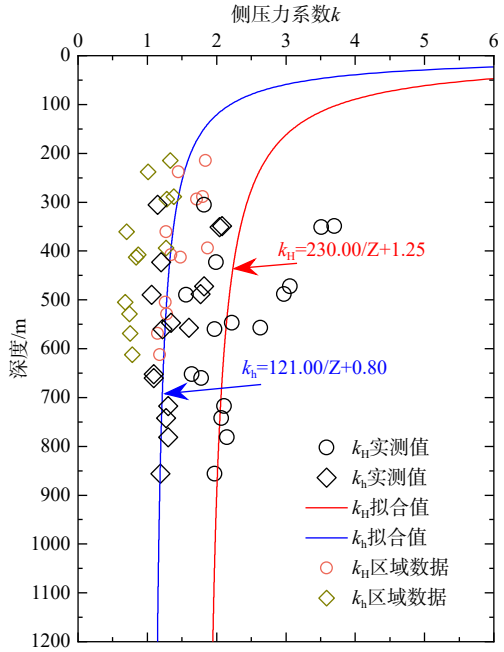
从表 1 可以看出，SK1 和 SK2 钻孔的测值存在一定离散性，且随深度变化不明显。由于不同深度段数据离散性较大、应力增长趋势非线性等问题，拟合曲线与实测数据偏差显著，表现出归一化效果较差，即难以通过单一回归模型统一反映整体的应力–深度演化规律。为更真实地拟合地应力随深度的变化趋势，采用王成虎等（2014）提出的修正 Sheorey 模型对数据进行拟合分析（图 4）。Sheorey 模型（Sheorey, 1994）又称为静态黏弹热应力模型，是一种基于地球球形壳体假设的地应力预测模型。该模型将地球视为由不同物态物质分层构成的球形壳体，包括地壳、地幔和地核，其综合考虑了地壳和地幔中岩体弹性模量、泊松比、地温梯度、岩体热膨胀系数及岩体密度随深度的变化。然而原始模型采用的是完整岩石的弹性模量 E，实际工程中遇到的多是含有节理、裂隙、层理、断层等结构面的岩体，其整体变形特性显著弱于完整岩石。为此，需要将完整岩石模量 E 修正为原位岩体模量 E_m，以提高预测的工程适用性和可靠性。将 Sheorey 模型中的理论值和水压致裂法实测的地应力值通过修正部分参数来建立关系，进而拟合和预测原位地应力分布随深度和位置变化的趋势。结果表明，550 m 以下深部应力随深度的变化趋势与 Sheorey 模型计算结果基本一致，说明研究区地应力场总体处于构造稳定状态，模型具有较好的适用性。因此，Sheorey 模型不仅为实测结果提供了理论参照，也为矿区深部结构面稳定性评价提供了区域应力场背景支撑。

表 1 水压致裂地应力测量结果

Table 1 Test results of hydraulic fracturing in-situ stress

钻孔编号	深度/m	压裂参数/MPa				主应力值/MPa			k_H	k_h	S_H方位/(°)
		P_b	P_r	P_s	P_0	S_H	S_h	S_v			
SK1	305.10	14.59	10.13	9.27	2.99	14.69	9.27	8.09	1.82	1.15	N73°E
	422.80	17.13	13.84	13.44	4.14	22.35	13.44	11.20	1.99	1.20	N45°W
	488.00	—	25.41	22.88	4.78	38.45	22.28	12.93	2.97	1.77	N43°W
	547.00	23.18	20.86	19.46	5.36	32.16	19.46	14.50	2.22	1.34	N16°W
	660.00	25.33	19.67	19.12	6.47	31.22	19.12	17.49	1.78	1.09	—
	717.50	29.19	26.83	24.63	7.03	40.03	24.63	19.01	2.11	1.30	N73°W
	856.00	—	28.19	27.09	8.39	44.69	27.09	22.68	1.97	1.19	N26°W
SK2	349.00	—	20.02	19.22	3.42	34.22	19.22	9.25	3.70	2.08	—
	351.00	25.24	20.74	18.94	3.44	32.64	18.94	9.30	3.51	2.04	—
	472.00	29.43	25.26	22.73	4.63	38.30	22.73	12.51	3.06	1.82	N58°W
	490.00	—	16.30	13.80	4.80	20.30	13.80	12.99	1.56	1.06	N51°W
	557.00	30.66	26.46	23.56	5.46	38.76	23.56	14.76	2.63	1.60	—
	560.00	27.65	19.59	18.09	5.49	29.19	18.09	14.84	1.97	1.22	N30°W
	652.00	25.39	21.69	18.79	6.39	28.29	18.79	17.28	1.64	1.09	N32°W
	742.46	31.88	26.88	24.98	7.28	40.78	24.98	19.68	2.07	1.27	—
	781.04	32.65	28.65	26.95	7.65	44.55	26.95	20.70	2.15	1.30	—

注: P_b—岩石原始破裂压力; P_r—破裂面重张压力; P_s—破裂面瞬时关闭压力; P_0—孔隙压力; S_H—最大水平主应力; S_h—最小水平主应力; S_v—垂向应力, 按照等于上覆岩层重度计算, 岩石平均密度取2.65g·cm^{-3}; k_H—最大水平侧压力系数; k_h—最小水平侧压力系数



k_H—最大水平侧压力系数; k_h—最小水平侧压力系数

图 4 侧向应力系数拟合结果(区域数据引自李兵等, 2017)

Fig. 4 Fitting results of lateral stress coefficient (regional data from Li et al., 2017)

k_H—maximum horizontal lateral pressure coefficient; k_h—minimum horizontal lateral pressure coefficient

区域数据拟合曲线选自李兵等(2017)对广西盆地东北部 8 个钻孔中 12 组水压致裂实测数据的非线性回归结果(图 4), 测点分布于龙胜、阳朔、恭城和钟山等地。该区域与盘龙铅锌矿同属南华活动带构造体系, 地质背景和应力机制具有一致性, 均表现为最大水平主应力主导型应力场。该区域拟合曲线在文中作为参考背景, 仅用于对比验证盘龙矿区地应力变化趋势的合理性与区域一致性, 为趋势性作支撑。区域拟合结果显示不同深度段的应力分布特征: 500～700 m 深度范围内, S_H = 22.66～29.31 MPa、S_h = 13.78～17.99 MPa, k_H = 1.58～1.71、k_h = 0.97～1.04; 当深度达到 800～1000 m 范围时, S_H = 32.65～39.22 MPa、S_h = 20.14～24.38 MPa, k_H = 1.48～1.54、k_h = 0.92～0.95。

钻孔崩落与钻进诱发裂缝现象是判定水平主应力方向的重要依据, 分别指示 S_h 和 S_H 的方位。全球应力图(WSM)数据库中约有 19% 的地应力场方向数据来源于此类方法, 体现该方法在应力场识别中的直观性、可靠性与数据丰富性。基于超声波钻孔成像与 WellCAD 软件解析, 识别出 2 个钻孔内的典型诱发破坏特征: 诱发裂缝呈 2 道近直立、对称分布的暗色不规则线纹; 钻孔崩落区表现为 2 条对

称、直立的暗色带(图 5)。进一步统计 2 个钻孔的诱发裂隙和钻孔崩落的空间分布特征及其方位，结果如图 6 所示，为分析区域内裂隙与崩落发育的总体趋势提供了宏观视角。

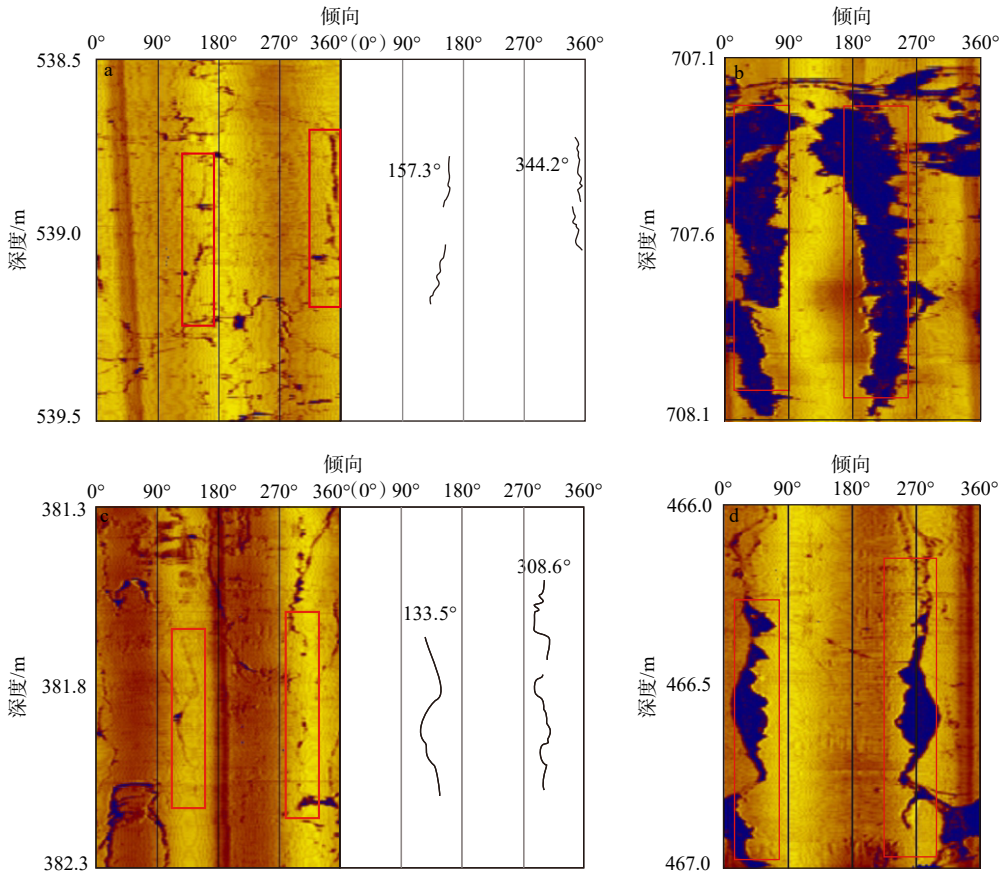
诱发裂隙主要集中在 300～550 m 与 750～900 m 深度区间，分布方位相隔约 180°，平均方位角为 136.58°(318.35°；图 6a)，由此推断 S_H 的方向为北西—北北西向。玫瑰图进一步验证了该方向的优势特征(图 6b)。钻孔崩落现象主要集中于 350～720 m 及 780～800 m 深度范围，平均方位角为 56.96°(239.75°；图 6c)，其玫瑰图显示崩落现象以北东—北东东向为主(图 6d)。该方向与诱发裂隙方位角相差 90°，表明 S_h 的方向为北东—北东东向，符合钻孔崩落现象和诱发裂隙产生的机理。

综合诱发裂隙与钻孔崩落的分布规律，研究区 S_H 的优势方向为北西—北北西向，指示现今构造应力场以北西—北北西向挤压作用为主。结合表 1 数据，部分测点(如 SK1 钻孔 660 m，SK2 钻孔 349 m、351 m)岩体在应力致裂过程中受到高压水作用，局部产生新的贯通裂隙并诱发岩体破碎，导致测量信号中断或异常，相关数据段已予以剔除。尽管各测点的 S_H 方向不完全相同，但从大区域来看，其方位变化范围为 N16°W—N73°W，平均方向为 N42°W。

4　结构面滑动与稳定性分析

4.1　摩擦滑动准则

断裂面是否发生剪切滑动主要取决于其剪应



黄色区域代表岩体完整部分；蓝黑色区域代表钻孔的破碎状况；红色矩形框标明诱发裂隙与钻孔崩落的具体位置

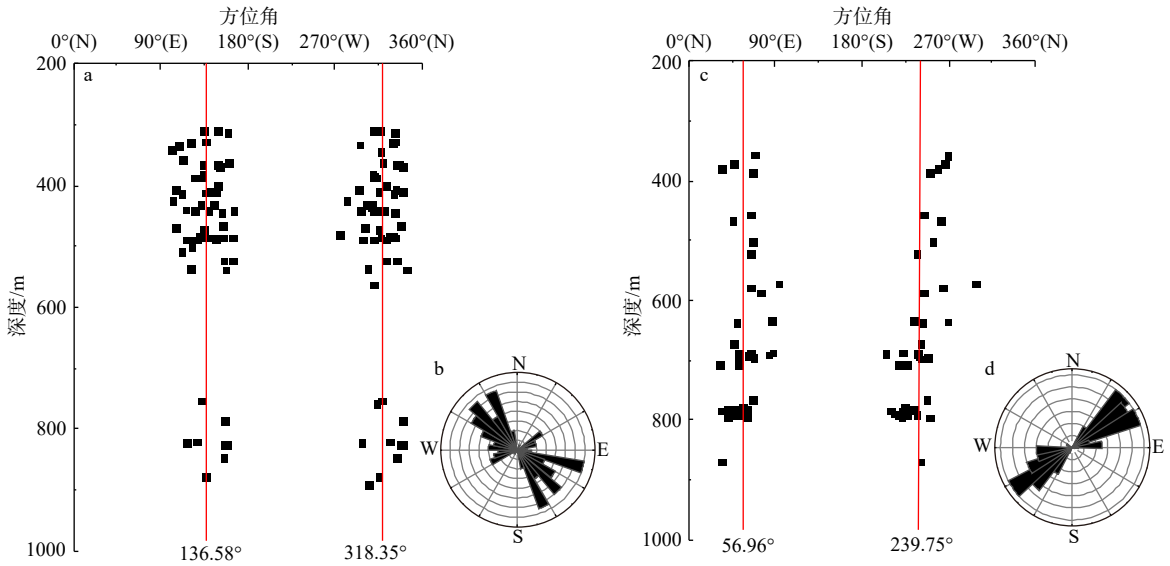
a—SK1 钻孔诱发裂隙；b—SK1 钻孔崩落；c—SK2 钻孔诱发裂隙；d—SK2 钻孔崩落

图 5　SK1、SK2 钻孔典型诱发裂隙和钻孔崩落图

Fig. 5　Typical images of drilling-induced tensile fractures and borehole breakouts in borehole SK1 and SK2

(a) Drilling-induced tensile fractures in borehole SK1; (b) Borehole breakouts in borehole SK1; (c) Drilling-induced tensile fractures in borehole SK2; (d) Borehole breakouts in borehole SK2

Yellow areas: intact rock mass; Blue-black areas: fractured zone in the borehole; Red rectangular boxes: locations of drilling-induced tensile fractures and borehole breakouts



散点代表各深度与方位上的裂隙及崩落位置；红色竖线代表诱发裂隙的平均方位角

a—诱发裂隙分布散点图；b—诱发裂隙方位玫瑰图；c—钻孔崩落分布散点图；d—钻孔崩落方位玫瑰图

图 6 钻孔诱发裂隙及钻孔崩落分布散点、玫瑰图

Fig. 6 Scatter and rose diagram of the drilling-induced tensile fractures and borehole breakout azimuths

(a) Scatter of the drilling-induced tensile fractures; (b) Rose diagram of the drilling-induced tensile fractures; (c) Scatter of the borehole breakout azimuths; (d) Rose diagram of the borehole breakout azimuths

Scatter points: locations of fractures and breakouts at various depths and orientations; Red vertical line: average azimuth of drilling-induced tensile fractures

力与正应力的关系。库仑摩擦准则是岩体力学中描述剪切破坏行为的经典理论，其表达式如下：

$$\tau = C + \mu\sigma_{\mathrm{n}} \tag{1}$$

式中，τ—断裂面上的剪应力，MPa；μ—摩擦系数，无量纲；σ_{n}—断裂面上的正应力，MPa；C—内聚力，MPa。在断裂面分析中，通常假定其内聚力 C 可忽略不计，故当剪应力满足 $\tau \geqslant \mu\sigma_{\mathrm{n}}$ 时，断裂面极有可能发生滑动失稳。

为定量评估任意产状结构面上所承受的剪应力与正应力，文中采用基于应力张量变换的分析方法（Zoback, 2010）。该变换方法已被广泛应用于相关研究（Townend and Zoback, 2000; Zhang et al., 2023）。首先，将主应力在主应力坐标系下表示为对角张量 $\boldsymbol{S} = \mathrm{diag}(S_1, S_2, S_3)$，其中 S_1、S_2 和 S_3 分别为最大、中间和最小主应力。通过欧拉角旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_1$ 将该主应力张量投影至地理坐标系中，获得地理坐标系下的应力张量 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{g}}$，其变换关系见公式（2）。在此基础上，根据结构面的走向和倾角构建局部坐标系的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_2$，并将应力张量进一步转换至结构面坐标系中，得到结构面坐标系下的应力张量 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}$［公式（3）］。在结构面坐标系中，正应力与剪应力可分别由公式（4）和（5）求得

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{g}} = \boldsymbol{R}_1^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S} \boldsymbol{R}_1 \tag{2}$$

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{R}_2 \boldsymbol{S}_{\mathrm{g}} \boldsymbol{R}_2^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$\sigma_{\mathrm{n}} = \boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}(3,3) \tag{4}$$

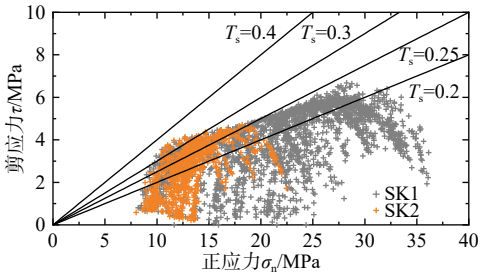
$$\tau = \sqrt{\boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}(3,3)^2 + \boldsymbol{S}_{\mathrm{f}}(3,2)^2} \tag{5}$$

式中变量符号含义同上。

4.2 结构面稳定性分析

基于钻孔电视成像获得的 2948 个结构面产状数据，结合修正 Sheorey 模型拟合的最大、最小水平侧压力系数（k_{H}、k_{h}），在均一应力场条件下推算出各深度下的三向主应力值。Zoback and Townend,（2001）通过多种岩石的室内试验资料得出，岩石的摩擦系数 μ 通常介于 0.6～1.0。但当结构面内存在断层泥或弱交接充填物时，摩擦系数可能更低，已有研究报道其取值范围分别为 0.2～0.22（Zhang and He, 2013）、0.2～1.0（秦向辉等，2014）和 0.465～0.697（丰成君等，2014）。考虑矿区岩性主要为白云岩，参考秦向辉等（2014）、李鹏等（2017），文中分别取 μ=0.2、0.25、0.3、0.4 作为结构面滑动失稳的评价标准。利用张

量变换方法计算各结构面上对应的剪应力与正应力，并据此进行稳定性评价，结果如图 7 所示。



T_s—滑动潜势

图 7　SK1、SK2 钻孔结构面剪应力与正应力关系图

Fig. 7　Relationship between shear stress and normal stress of structural planes in boreholes SK1 and SK2

T_s—Slip tendency

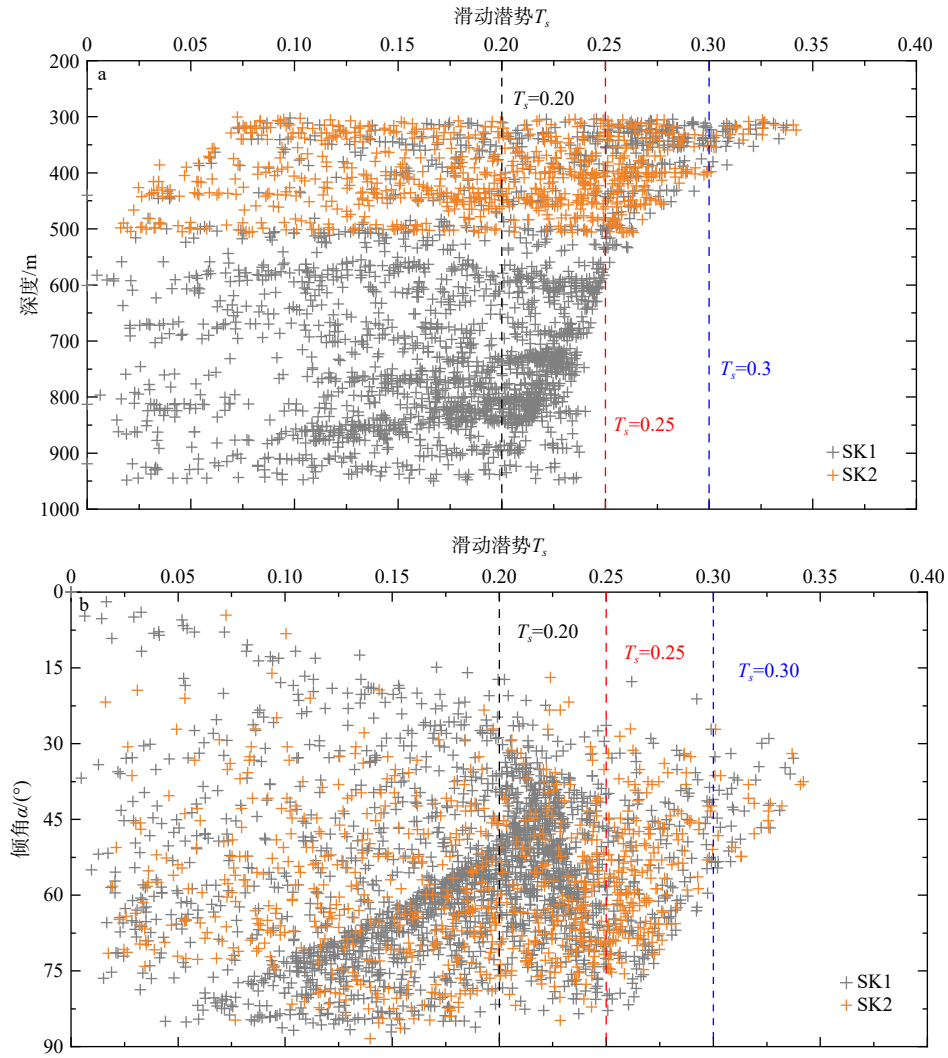
文中所采用的摩擦系数是基于岩体所受应力状态拟合得出，并不直接代表结构面岩石材料的真实摩擦特性，且在实际情况下结构面并未发生滑动。为更准确体现其物理意义，该参数被称为滑动潜势（T_s）。滑动潜势为结构面上的剪应力（τ）与法向应力（σ_n）的比值，用于衡量结构面在既有地应力场中发生剪切滑动的可能性。其核心意义在于反映剪切作用相对于法向约束的强弱关系：当 T_s 值较大时，剪切应力在相对较小的法向约束下更容易引发结构面失稳滑动，说明该结构面具有较高的滑动潜势。与岩石材料固有的摩擦系数 μ 不同，T_s 属于应力状态依赖参数，由地应力方向、大小及结构面几何产状共同控制，能够直观表征外部应力环境下结构面稳定性的影响。

分析结果显示，SK1 钻孔结构面的正应力范围约为 10～38 MPa，剪应力约为 1～8 MPa，大部分结构面的滑动潜势 T_s = 0.20～0.30，少量>0.30，个别接近 0.40。在低正应力区间（σ_n<15 MPa），部分结构面 T_s 值达到 0.25～0.30，表明在法向约束较弱时滑动趋势显著增强；在高正应力区间（σ_n>25 MPa），虽然多数结构面 T_s 值集中于 0.20～0.25 附近，但仍存在零星 T_s>0.30 的高风险结构面。SK2 钻孔结构面的正应力主要集中在 8～20 MPa，剪应力约为 1～5 MPa，结构面数据分布特征与 SK1 钻孔类似，大部分结构面的 T_s 值范围为 0.20～0.30。在低正应力段（σ_n<12 MPa），T_s>0.25 的结构面明显增多，反映出其滑动失稳的敏感性；在较高正应力段（σ_n=15～20 MPa），多数 T_s 值介于 0.20～0.25，但亦存在 T_s>0.30 的高风险结构面。总体而言，SK1 与 SK2 钻孔均有大部分的结构面的 T_s 值处于 0.20 及以上水平，其中高剪应力−低正应力组合尤易诱发失稳。

进一步对结构面 T_s 随深度的变化规律进行分析（图 8a）。结果表明，其分布呈现出显著的深度分界特征。在 SK1 钻孔中，所有 T_s>0.25 的结构面均分布在 550 m 以浅，其中 T_s>0.30 的结构面则仅出现在 400 m 以浅的范围；在 SK2 钻孔中，T_s>0.25 的结构面同样集中于 500 m 以浅，且 T_s>0.30 的结构面主要分布在 400 m 以浅。结合表 1 中数据可知，部分浅部测段（如 SK1 钻孔 488 m，SK2 钻孔 349 m、351 m 和 472 m）在水压致裂过程中出现闭合平台不稳或疑似新生裂缝，导致 P_s 判定存在不确定性，从而放大了 S_H 的计算值，使得钻孔 500 m 以浅的应力数据误差较大。相比之下，500～850 m 范围内的应力−深度变化与区域构造应力背景一致，因此研究主要关注该深度范围内结构面的滑动稳定性。结果显示，深部结构面数量较多，其 T_s 值主要集中于 0.20～0.25，属于低—中等潜势区。 若以滑动潜势阈值 0.25 进行划分，约在 550 m 深度处出现明显分界：浅于 550 m 的样点总体表现出较高的滑动潜势，而深于 550 m 的样点滑动潜势较浅部相对降低。因此，深度应作为结构面稳定性评估中的重要判据之一，在工程评价与监测中应对浅部（<550 m）与深部（>550 m）采取差异化的风险控制措施。

滑动潜势是衡量结构面滑动稳定性的关键参数，而倾角是控制其剪切易发性的几何因子之一，其效应受深度、结构面走向与主应力位向等条件的共同控制。由图 8b 可见，当结构面倾角处于 40°～75°区间时，其 T_s 值普遍高于 0.20，其中相当部分超过 0.25，进入低—中等潜势区，并在局部情况下突破 0.30，达到高潜势区。这表明陡倾角结构面在当前地应力场作用下更易接近或跨越临界剪切破坏条件，表现出较高的失稳敏感性。相反，当倾角低于 40°或高于 75°时，T_s 值整体趋于较低，未达到低等滑动潜势区。综合来看，倾角处于 40°～75°区间的结构面群在深部开采过程中具有潜在不稳定性，应结合深度、走向与地应力方向等因素进行多维度的风险评估。

Wulff 网下半球投影结果揭示了结构面倾向的空间分布特征。通过聚类分析识别出 3 个主要的结构面聚类中心，分别为 236.40°∠44.21°（n = 1104）、317.10°∠25.51°（n = 1113）和 68.51°∠36.79°（n = 731）。分析表明，研究区岩体结构面普遍具有较大的倾



a—结构面滑动潜势 T_s 随深度变化；b—结构面滑动潜势与倾角关系

图 8 SK1、SK2 结构面深度、倾角与滑动潜势 T_s 关系图

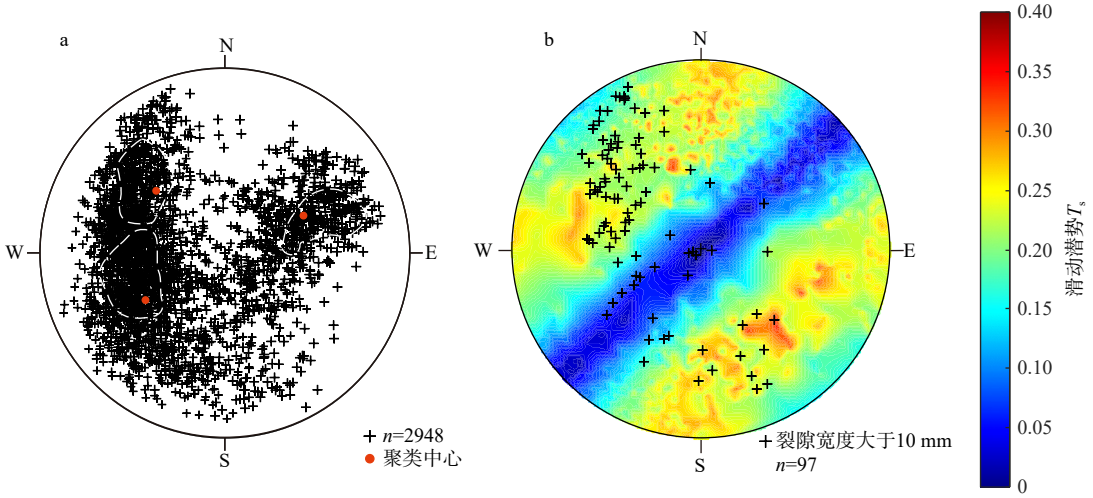
Fig. 8 Relationship between depth, dip, and slip tendency T_s of structural planes in boreholes SK1 and SK2

(a) Slip tendency T_s vs. depth; (b) Slip tendency T_s vs. dip

角，并呈现明显的聚集分布趋势。聚类结果与极点密度图和走向玫瑰图所反映的统计特征基本一致，显示出北西—北北西和北东—北东东 2 组优势倾向。滑动趋势分析（Jo et al., 2019）表明，北西—北北西向结构面群体不仅是高密度发育区域，其对应结构面亦表现出较高的滑动潜势 T_s（≥0.2）。其中，裂隙宽度大于 10 mm 的结构面约占总结构面数的 14.8%。尤其在 720～850 m 深部高应力集中段，北西—北北西向且宽度 >10 mm 的结构面占高风险面的 41.5%（图 7，图 9）。该类结构面常伴随充填物松散或缺失，受剪应力作用时易发生再活化，导致局部围岩破碎与失稳。从可操作性角度看，可利用掘进过程中的激光断面扫描，在围岩显露阶段快速识别该类结构面，并结合规范化的风险分区，对主要运输巷道、深部采场邻近区段等重点部位优先实施加密锚索、注浆封闭或喷射混凝土封闭等成熟支护技术。综上，北西—北北西向结构面群应作为滑移控制与工程支护设计中的重点关注对象，特别需加强对裂隙宽度超过 10 mm 的结构面的稳定性评价与加固措施。

5 讨论

地应力测量结果显示，矿区应力场整体以水平主应力占主导（$S_H > S_h > S_v$），最大水平主应力值高达 44.69 MPa，平均侧压力系数 k_H 约为 2.07，明显高



a—结构面聚类分析；b—裂隙宽度大于 10 mm 结构面滑动趋势分析

图 9　结构面 Wulff 网投影及部分结构面滑动趋势分析图

Fig. 9　Wulff net projection and slip tendency analysis of selected structural planes

(a) Cluster analysis of structural planes; (b) Slip tendency analysis of structural planes with fracture width greater than 10 mm

于岩体自重应力。这种应力状态有利于逆冲断层的活动，亦与区域内断层类型以逆断层为主的特征相符。特别是，F2 断裂控制了铅锌矿体的赋存边界（覃佳肖等，2022），其走向与北东—南西向的区域褶皱轴向一致，强化了其作为控矿断裂和应力调节通道的双重功能。结构面统计分析进一步验证了应力场对岩体结构面的控制作用。钻孔电视资料与 Wulff 网聚类显示，结构面在北东—北东东和北西—北北西 2 个方向上高度集中，且以陡倾为主，其中倾角 40°～75°区间的结构面群中的北西—北北西向结构面因与最大水平应力方向一致，表现出最强的再活化倾向。

滑动潜势 T_s 的分布揭示出显著的深度分界性：500 m 以浅结构面滑动风险较高，而 500～850 m 深度段整体处于低—中等潜势区，但局部仍可能在应力集中或采动扰动作用下发生失稳。尤其是北西—北北西向结构面群，裂隙宽度普遍较大，部分超过 10 mm，在当前高应力背景下极易发生剪切再活化，成为深部开采过程中最具风险的结构体。随着开采深度超过 720 m，应力集中与采动扰动效应叠加，其失稳敏感性进一步增强。因此，在深部开采过程中，特别是 720 m 以下的高应力区，应对北西—北北西向结构面群保持高度关注。在工程设计上应尽量避免在这些区域布设巷道，优先选择与最大主应力方向成大角度的布置方式，以降低剪切驱动力。同时，应对高风险区采取加强型锚杆、锚索联合支护及喷射混凝土、裂隙注浆等措施，以确保围岩稳定。在北西—北北西和北东—北东东向的结构面高发区域，采取加强型锚杆支护和长期稳定性监测，在支护设计时，应全面评估岩体结构面的发育程度和地应力的大小；对于 720 m 以下深部断裂带，开展水压响应观测，即通过监测岩体对流体压力变化的动态响应来评估结构面渗透性、连通性及应力敏感性，以识别可能的应力集中与裂隙激活行为；对于结构面密集和地应力较高的区域，建议采用加强型支护措施，如增加锚杆、锚索的密度和强度，以提高巷道的稳定性。

6　结论

（1）矿区岩体结构面以陡倾角为主，优势倾向集中于北西—北北西与北东—北东东方向，尤其在 300～850 m 深度范围内发育最为密集。该类结构面主要受凭祥−大黎断裂（F2）等区域性深大断裂控制，具有明显的构造主控特征。

（2）根据水压致裂法的测量结果，该区域受到明显的构造应力影响。测试深度在 500～850 m 范围内，研究区实测三向主应力值范围分别为：S_H=28.29～44.69 MPa、S_h=19.46～27.09 MPa、S_v=14.50～22.68 MPa。最大、最小水平侧压力系数平均值分别为：k_H = 2.07、k_h = 1.28。三向主应力关系表现为 S_H>S_h>S_v，显示出水平应力占据主导地位，有利于逆断层活动的发生。

(3)结构面滑动潜势受其几何特征与所处应力状态共同控制。统计结果显示,以滑动潜势阈值0.25进行划分时,约在550 m深度处出现明显分界:浅于550 m的样点总体表现出较高的滑动潜势,而深于550 m的样点滑动潜势较浅部相对降低,因此,在工程评价与监测中应对浅部(<550 m)与深部(>550 m)采取差异化的风险控制措施。与此同时,倾角处于40°～75°的北西—北北西向结构面与现今主应力方向基本一致,在当前高水平应力背景下,易发生剪切再活化,应作为深部潜在失稳的重点关注对象。

(4)综合结构面分布、地应力方向与滑动趋势分析,建议深部巷道尽量避开与北西—北北西及北东—北东东结构面平行的布设方向。针对高应力区段和潜在不稳定结构面密集区,优先采用加强型支护设计,并结合水力响应测试,动态评估应力演化风险。

作者贡献声明:黄晓盼、王成虎、杨承伟参与论文构思、研究方法和论文修改;黄晓盼、刘冀昆参与数据处理及分析;黄晓盼、肖海帆参与绘图;黄晓盼参与论文写作。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: HUANG Xiaopan, WANG Chenghu and YANG Chengwei contributed to the conception of the study, the design of research methods and the revision of the paper; HUANG Xiaopan and LIU Jikun participated in data analysis; HUANG Xiaopan and XIAO Haifan were involved in figure drawing; HUANG Xiaopan took charge of the paper writing. All authors have read and approved the submission and publication of this manuscript.

利益冲突声明:本人所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

AN P X, 2019. Study of Panlong lead-zinc deposit organic mineralization in Guangxi[D]. Guilin: Guilin University of Technology. (in Chinese with English abstract)

BARTON N, 1973. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 7(4): 287-332.

BARTON N, BANDIS S, Bakhtar K, 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 22(3): 121-140.

BROWN E T, HOEK E, 1980. Underground excavations in rock[M]. London: CRC Press.

FENG C J, CHEN Q C, WU M L, et al., 2012. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data—discussion of methods frequently used to determine instantaneous shut-in pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 33(7): 2149-2159. (in Chinese with English abstract)

FENG C J, CHEN Q C, LI G Q, et al., 2014. In-situ stress measurement in Lijiang-Jianchuan area and tentative discussion on the seismic hazards on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 33(4): 524-534. (in Chinese with English abstract)

FU J, CAI J, ZHOU H, et al., 2024. Characteristics of in-situ stress field and prediction of rock burst in deep area of Luodang in Lala copper mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 76(2): 53-59. (in Chinese with English abstract)

HAIMSON B C, CORNET F H, 2003. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation: Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1011-1020.

JAEGER J C, COOK N G, ZIMMERMAN R, 2009. Fundamentals of rock mechanics[M]. Newyork: John Wiley & Sons.

JIANG W Q, LIN J Z, ZHAO Y, et al., 1992. Focal mechanism of small earthquakes and characteristics of tectonic stress field in South China[J]. Earthquake Research in China, 8(1): 36-42. (in Chinese with English abstract)

JO Y, CHANG C D, JI S H, et al., 2019. In situ stress states at KURT, an underground research laboratory in South Korea for the study of high-level radioactive waste disposal[J]. Engineering Geology, 259: 105198.

LI B, LI B Y, ZHANG C, et al., 2017. Distribution characteristics of the crustal stress in the northeast of Guangxi Basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(S1): 3475-3484. (in Chinese with English abstract)

LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: engineering geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 191-202. (in Chinese with English abstract)

LI P, GUO Q F, MIAO S J, et al., 2017. Comparisons of in-situ stress fields and stability of faults in shallow and deep engineering areas[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 49(9): 10-16. (in Chinese with English abstract)

LI X G, SHI S P, HUANG Y, et al., 2007. Current tectonic stress field in Guangxi and vicinity[J]. Journal of Seismological Research, 30(3): 235-240. (in Chinese with English abstract)

LIU J S, ZHONG X Y, ZENG G T, et al., 2024. Research on microseismic monitoring in deep mining of a tungsten mine in Jiangxi Province[J]. China Tungsten Industry, 39(2): 33-37. (in Chinese with English abstract)

QIAO E W, MA X M, GUO H L, et al., 2025. Characteristics of in-situ stresses and engineering stability analysis on the south section of the Bohai Strait Cross-Sea Corridor project[J]. Journal of Geomechanics, 31(2): 197-210. (in Chinese with English abstract)

QIN J X, HUANG Z L, JIANG Y P, et al., 2022. Permeability and water control of F_2 Fault in Panlong lead-zinc mine area, Guangxi[J]. Safety and Environmental Engineering, 29(6): 54-61. (in Chinese with English abstract)

QIN J X, 2023. Study on the characteristics and water control effect of F_2 fault in Panlong lead-zinc mining area in Guangxi[D]. Guilin: Guilin University of Technology. (in Chinese with English abstract)

QIN X H, ZHANG P, FENG C J, et al., 2014. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(7): 2165-2180. (in Chinese with English abstract)

SHEOREY P R, 1994. A theory for *In Situ* stresses in isotropic and transverseley isotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 31(1): 23-34.

SUN Z Y, LI X F, WANG Y, et al., 2023. Correlation between structural surface parameters and strength of drilling holes based on DIP technology[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 5(2): 023028. (in Chinese with English abstract)

TOWNEND J, ZOBACK M D, 2000. How faulting keeps the crust strong[J]. Geology, 28(5): 399-402.

WAGNER H, 2019. Deep mining: a rock engineering challenge[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(5): 1417-1446.

WANG C H, XING B R, CHEN Y Q, 2014. Prediction of stress field of super-long deep-buried tunnel area and case analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 36(5): 955-960. (in Chinese with English abstract)

XU H T, 2019. The genesis of dolomite and its relations to the deposits in Panlong Pb-Zn Mine Area, Guangxi Province[D]. Guilin: Guilin University of Technology. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L, HE C R, 2013. Frictional properties of natural gouges from Longmenshan fault zone ruptured during the Wenchuan Mw7.9 earthquake[J]. Tectonophysics, 594: 149-164.

ZHANG S H, MA X D, ZOBACK M, 2023. Determination of the crustal friction and state of stress in deep boreholes using hydrologic indicators[J]. Rock Mechanics Bulletin, 2(1): 100024.

ZHENG L Y, WAN Y G, 2025. Tectonic stress field in Guangxi and surrounding areas[J]. Science Technology and Engineering, 25(6): 2227-2236. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, TOWNEND J, 2001. Implications of hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate lithosphere[J]. Tectonophysics, 336(1-4): 19-30.

ZOBACK M D, 2010. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

ZOU X J, WANG C Y, HAN Z Q, et al., 2017. Fully automatic identifying the structural planes with panoramic images of boreholes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(8): 1910-1920. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

安鹏鑫，2019. 广西盘龙铅锌矿床有机质成矿作用研究[D]. 桂林：桂林理工大学.

丰成君，陈群策，吴满路，等，2012. 水压致裂应力测量数据分析—对瞬时关闭压力 P_s 的常用判读方法讨论[J]. 岩土力学，33(7)：2149-2159.

丰成君，陈群策，李国歧，等，2014. 青藏高原东南缘丽江—剑川地区地应力测量与地震危险性[J]. 地质通报，33(4)：524-534.

付俊，蔡君，周罕，等，2024. 拉拉铜矿落卤矿区深部地应力场特征及岩爆预测分析[J]. 有色金属(矿山部分)，76(2)：53-59.

蒋维强，林纪曾，赵毅，等，1992. 华南地区的小震震源机制与构造应力场[J]. 中国地震，8(1)：36-42.

李彬，张文，文冉，2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析[J]. 地质力学学报，28(2)：191-202.

李兵，李兵岩，张策，等，2017. 广西盆地东北部的地应力分布特征[J]. 岩石力学与工程学报，36(S1)：3475-3484.

李鹏，郭奇峰，苗胜军，等，2017. 浅部和深部工程区地应力场及断裂稳定性比较[J]. 哈尔滨工业大学学报，49(9)：10-16.

李细光，史水平，黄洋，等，2007. 广西及其邻区现今构造应力场研究[J]. 地震研究，30(3)：235-240.

刘家胜，钟晓阳，曾贵庭，等，2024. 江西某钨矿深部开采微震监测研究[J]. 中国钨业，39(2)：33-37.

乔二伟，马秀敏，郭华林，等，2025. 渤海海峡跨海通道工程南段地应力特征与工程稳定性分析[J]. 地质力学学报，31(2)：197-210.

覃佳肖，黄泽霖，蒋亚萍，等，2022. 广西盘龙铅锌矿区 F_2 断层透水性及控水作用分析[J]. 安全与环境工程，29(6)：54-61.

覃佳肖，2023. 广西盘龙铅锌矿区 F_2 断层特征及控水作用研究[D]. 桂林：桂林理工大学.

秦向辉，张鹏，丰成君，等，2014. 北京地区地应力测量与主要断裂稳定性分析[J]. 地球物理学报，57(7)：2165-2180.

孙志勇，李小菲，王洋，等，2023. 基于DIP技术钻孔结构面参数与强度相关性研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报，5(2)：023028.

王成虎，邢博瑞，陈永前，2014. 长大深埋隧道工程区地应力状态预测与实例分析[J]. 岩土工程学报，36(5)：955-960.

许浩天，2019. 广西盘龙铅锌矿区白云岩的成因机制及其与成矿关系研究[D]. 桂林：桂林理工大学.

郑礼洋，万永革，2025. 广西及邻区构造应力场分区研究[J]. 科学技术与工程，25(6)：2227-2236.

邹先坚，王川婴，韩增强，等，2017. 全景钻孔图像中结构面全自动识别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报，36(8)：1910-1920.