引用格式：张晓飞，王继明，张鹏，等，2026. 新疆某抽蓄电站深部岩体地应力赋存规律及地下硐室稳定性分析[J]. 地质力学学报，32（2）：367−382. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025076

Citation: ZHANG X F，WANG J M，ZHANG P，et al.，2026. Analysis of the three-dimensional in-situ stress state and underground cavern stability of a pumped storage hydropower station in Xinjiang, China[J]. Journal of Geomechanics，32（2）：367−382. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025076

新疆某抽蓄电站深部岩体地应力赋存规律及地下硐室稳定性分析

张晓飞[1,2]，王继明[3]，张　鹏[1]，李征征[4]，李常虎[4]，欧阳江泉[1,2]
ZHANG Xiaofei[1,2]，WANG Jiming[3]，ZHANG Peng[1]，LI Zhengzheng[4]，LI Changhu[4]，OUYANG Jiangquan[1,2]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 中国矿业大学（北京）地球科学与测绘工程学院，北京 100083；
3. 中国联合工程有限公司，浙江 杭州 310051；
4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065

1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *College of Geosciences and Surveying Engineering*, *China University of Mining and Technology*, *Beijing* 100083, *China*;
3. *China United Engineering Corporation Limited*, *Hangzhou* 310051, *Zhejiang*, *China*;
4. *Northwest Engineering Corporation Limited*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*

Analysis of the three-dimensional in-situ stress state and underground cavern stability of a pumped storage hydropower station in Xinjiang, China

Abstract: ［**Objective**］This study investigates the in-situ stress field and stability of the surrounding rock in the underground caverns of a large-scale, deeply buried pumped storage power station located on the southern margin of the Tianshan Orogenic Belt. It aims to ensure the geological safety of the underground powerhouse and water diversion tunnels.［**Methods**］First, two sets of three-dimensional hydraulic fracturing stress measurements were carried out in the underground powerhouse to obtain fundamental data on the in-situ stress field. Subsequently, a 3D geological model of the project area was established, and the 3D in-situ stress field was inverted using finite element numerical simulation. Finally, the stability of the underground caverns was evaluated based on the distribution of the 3D stress field from two aspects: the rationality of the cavern axis layout and the risk of rockburst in the surrounding rock of the underground powerhouse and water diversion tunnels.［**Results**］(1) The 3D in-situ stress measurements in the underground powerhouse revealed the following: The maximum principal stress (σ_1) ranges from 16.19 to 16.23 MPa, with an azimuth of N43.98°E–N54.44°E and a dip angle of −4.81° to 6.93°; the intermediate principal stress (σ_2) ranges from 9.82 to 12.23 MPa, with an approximate SE orientation and a dip angle of −18.89° to −14.52°; and the minimum principal stress (σ_3) ranges from 6.90 to 10.41 MPa, with a near-vertical dip. (2) The 3D stress field inversion shows that the maximum principal stress (σ_1) in the underground powerhouse ranges from 16.54 to 17.21 MPa, with an azimuth of N47.88°E–N56.32°E; Along the axis of the water diversion tunnel, σ_1 ranges from 14.86 to 24.32 MPa.［**Conclusions**］The angles between the axes of the underground powerhouse and water diversion tunnels and the measured maximum horizontal principal stress (S_H) deviate

基金项目：国家自然科学基金地质联合基金项目（U2244226）；中国地质调查局地质调查项目（DD20230538）
This research was financially supported be the Key Program of the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2244226) and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20230538).

第一作者：张晓飞（2000—），男，在读硕士，主要从事地应力测量、构造应力场、岩体稳定性评价等研究。Email：2571108943@qq.com
通信作者：张鹏（1986—），男，博士，副研究员，主要从事地应力测量与长期监测、构造应力场、岩体稳定性评价等研究。Email: zhangpeng0713@sina.com

收稿日期：2025−06−23；**修回日期**：2025−08−29；**录用日期**：2025−09−04；**网络出版日期**：2025−09−09；**责任编辑**：吴芳
Received：2025−06−23；Revised：2025−08−29；Accepted：2025−09−04；Available Online：2025−09−09；Handling Editor：WU Fang

by ⩽10° from the optimal angle (62.84°) for an S_{HV}-type stress field, which is favorable for cavern stability. Based on multiple criteria, including the rock strength–stress ratio method and Tao Zhenyu's criterion, the surrounding rock of the underground powerhouse and water diversion tunnels is generally classified as having a slight rockburst risk. [**Significance**] The findings provide a scientific basis for the design and construction of the underground powerhouse and water diversion tunnels of this pumped storage power station. They also fill a gap in 3D in-situ stress measurement data for the southern margin of the Tianshan Orogenic Belt in Xinjiang.

Keywords: southern margin of the Tianshan Orogenic Belt; pumped storage hydropower station; hydraulic fracturing method; in-situ stress field inversion; rockburst

摘　要：为揭示天山造山带南缘某大型深埋抽水蓄能电站地下硐室地应力场特征及其围岩稳定性，保障地下厂房及引水隧洞地质安全，首先在地下厂房内开展2组三维水压致裂法地应力测量，获取工程区地应力场基础数据；随后建立工程区的三维地质模型，并利用有限元数值模拟方法反演该区域的三维地应力场；最后结合三维应力场的分布特征，从地下硐室轴线布置的合理性及地下厂房与引水隧硐围岩岩爆风险2个方面，综合评估抽蓄电站工程区地下硐室的稳定性。研究结果表明：抽蓄电站地下厂房三维地应力测量显示，最大主应力（σ_1）为16.19～16.23 MPa、方向为N43.98°E～N54.44°E、倾角为−4.81°～6.93°，中间主应力值（σ_2）为9.82～12.23 MPa、方向近南东、倾角为−18.89°～−14.52°，最小主应力（σ_3）为6.90～10.41 MPa、倾角近垂直；三维应力场反演得到地下厂房最大主应力值（σ_1）为16.54～17.21 MPa、方位角为N47.88°E～N56.32°E，引水洞轴线方向的最大主应力值（σ_1）为14.86～24.32 MPa；地下厂房和引水隧洞轴线方向与实测最大水平主应力（S_H）夹角，与S_{HV}型应力场最优夹角（62.84°）偏差均⩽10°，有利于地下硐室稳定性；采用强度应力比法、陶振宇判据等多准则判据分析，地下厂房及引水隧洞围岩总体为轻微岩爆等级。研究结果为该抽蓄电站地下厂房和引水隧洞设计与施工提供科学依据，同时填补了天山造山带南缘深部岩体三维地应力实测数据的空白。

关键词：天山造山带南缘；抽蓄电站；水压致裂法；地应力场反演；岩爆

中图分类号：P313.5; P554　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)02−0367−16

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025076

0　引言

随着中国新型能源的大规模开发和利用，抽蓄电站作为绿色低碳、灵活调节的成熟储能方式，正得到大力推广建设（马健等，2024）。中国水电站选址多位于西部山区高差相对大、岩体完整坚硬的地区，且厂房硐室及隧洞埋深较大。在高地应力环境下，硬岩岩爆是一种以突发性、连锁性为显著特征的围岩脆性破坏动力灾害，已成为困扰水电站安全高效建设的主要工程地质挑战（Liu et al., 2020; 彭建兵等，2020; 王栋等，2021）。因此，在西部抽水蓄能电站建设中，查明地应力状态、开展岩爆风险预测对于其地下硐室稳定性分析至关重要。

地应力，即岩体中天然状态下赋存的内在应力状态，是地球岩石圈最基础的力学属性之一，更是控制深部地下工程硬岩岩爆、软岩大变形等岩体稳定性的主导因素（李四光，1977; 杨树新等，2025）。随着深部地下工程的不断实践，工程引发的原始地应力场平衡的扰动及应力重分布等现象越来越普遍（Brown and Hoek, 1980; Martin et al., 1999; 王斌等，2024; 姜浩等，2025; 潘军海，2025）。若工程设计与施工未能充分掌握工程区地应力场分布特征，极易导致严重的工程地质灾害：在高应力硬岩区主要表现为岩爆，在软岩或节理发育岩体中则可能导致围岩大变形甚至失稳坍塌。此外，地应力方向对于地下硐室最优轴线选择及其围岩稳定性评价具有决定作用（孟静等，2024; 尹升华等，2025）。由此可见，工程区地应力场研究是保障深埋地下工程安全、高效建设与长期稳定性的先决条件。

鉴于地应力诱发岩爆对于地下工程稳定性的威胁，深入开展地应力诱发岩爆机制研究与预测防控工作至关重要（邵晨超等，2020; 赵春雷等，2025; 赵晖和张浩然，2025; 祝雨杭等，2025）。国内已有研究成果为岩爆机理探究、岩爆预防实践及深埋工程建设提供了重要科学指引（Hoek and Brown, 1980; 孙

飞跃等, 2025; 王钧荣等, 2025; 姚囝等, 2025)。需要强调的是, 由高应力引发的岩爆等地质灾害, 在中国西部隧道及水电站地下硐室建设中尤为显著。针对这一挑战, 不少学者围绕高地应力环境下硐室围岩稳定性展开了系统研究: 吕爱钟(1997)通过优化硐室断面形状, 提出弹性假定条件下的最优断面形状理论; 戚蓝和马启超(2000)基于地应力场与力学原理, 构建硐室长轴方向选取的力学模型, 为工程实践提供了理论依据; 张镜剑和傅冰骏(2008)系统综述国际高应力环境岩爆研究, 对岩爆的判据、预测及防治提出关键建议。

目前, 地应力实测与数据模拟相结合的方法已成为地下硐室地应力场研究、岩爆分析预测以及围岩稳定性评价的核心手段之一。许博等(2007)在瀑布沟水电站开展地应力测量和三维地应力场数值反演分析, 查明了工程区地应力场特征, 并研究了水电站地下硐室岩爆问题; 刘宇等(2024)针对木匪岭隧道滞后性岩爆, 基于现场统计资料、地应力测试及有限差分计算, 分析其机制及规律。综上所述, 解决岩爆诱发围岩稳定性问题的关键在于查明工程区地应力环境, 开展岩爆机理和预测分析, 评价工程区硐室围岩稳定性, 进而为工程建设提供科学依据。

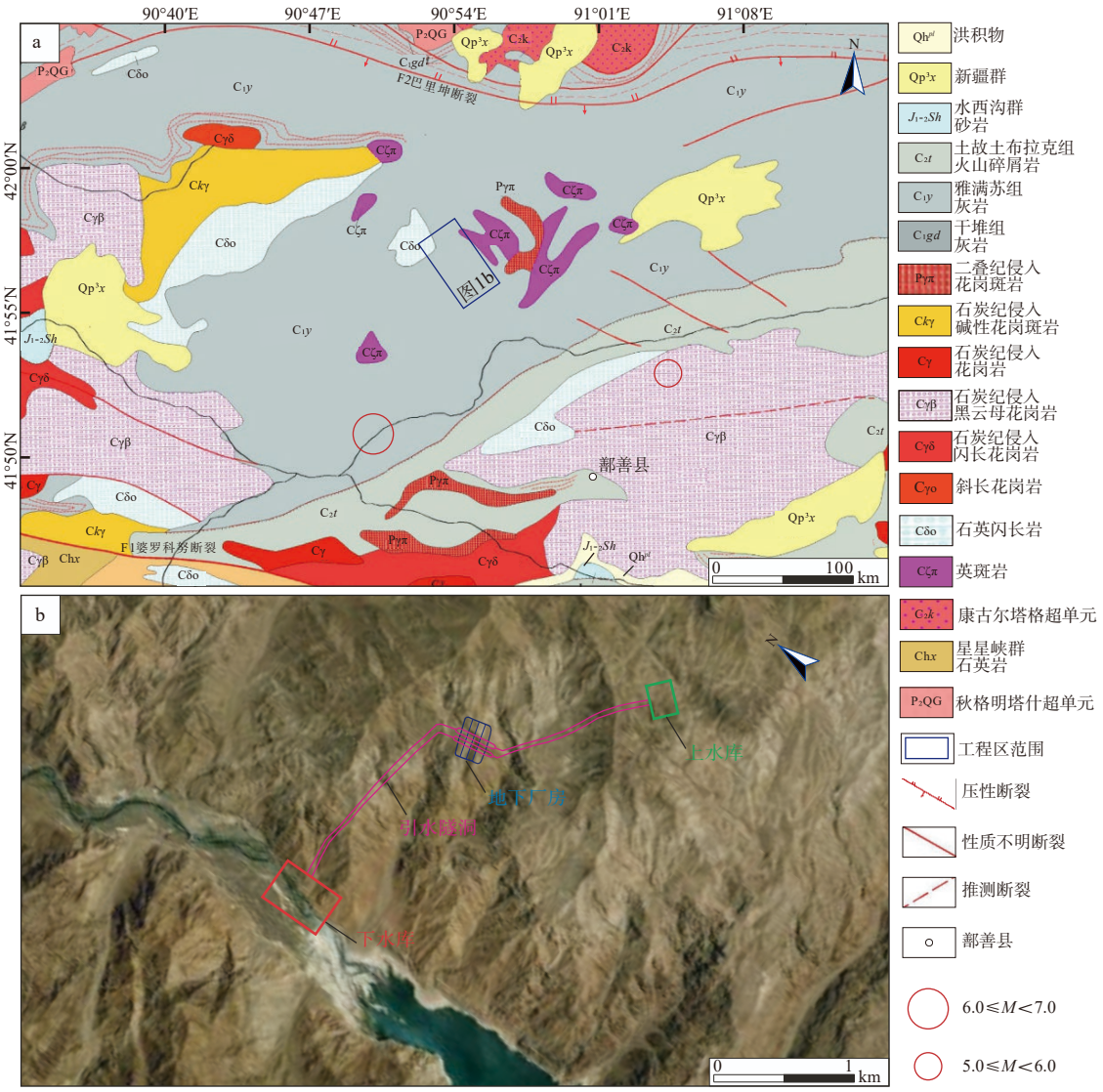
新疆天山造山带南缘某大型深埋抽蓄电站周边区域已有诸多学者开展地下工程地应力特征及硐室稳定性研究。蒋健等(2025)在新疆某抽蓄电站, 结合地应力测试与数值模拟方法, 查明了 S_H>S_V>S_h 型地应力场特征(最大水平主应力 S_H 方向为 N40°E～N65°E), 并评价了地下硐室轴线布设及围岩稳定性。

新疆某抽蓄电站坐落于天山造山带南缘的坚硬完整灰岩山区, 该工程区呈现出地形陡峻、硐室群埋深大、围岩强度高、厂房与引水隧洞埋深变化大及地应力实测数据匮乏等问题。针对上述工程特性, 文章聚焦以下科学问题展开研究: 如何定量表征工程区深埋地下硐室(灰岩)三维地应力场、如何优化深埋地下硐室轴线布设以降低围岩失稳风险、如何科学预测高地应力环境下硬岩岩爆风险等级、地形地貌对深部地应力分布有何控制作用。为此, 首先开展天山造山带南缘深埋灰岩区硐室三维水压致裂地应力测量, 获取实测三维地应力场数据; 其次构建实测约束—地形耦合的高精度地应力场反演模型, 开展工程区三维地应力场反演分析; 然后结合三维地应力场特征, 分析地下厂房及引水隧洞轴线布设合理性; 最后基于多准则岩爆判据, 评价地下厂房及引水隧洞岩爆风险等级, 并实现抽蓄电站硐室分区段岩爆风险量化评估和稳定性分析。研究成果不仅可为水电站工程设计施工提供科学依据, 同时也填补了该区域地应力实测数据空白, 为周边工程建设提供重要参考。

1　工程区构造地质概况

新疆某抽蓄电站枢纽工程位于天山−兴蒙造山系与塔里木陆块区交接带, 其主体隶属于天山−兴蒙造山系准噶尔−吐哈地块次级构造单元中的依连哈比尔尕−博格达裂谷盆地(图 1a)。工程区场址属构造侵蚀高山沟谷地貌: 上水库所在的二塘沟左岸山顶发育宽缓“V”型冲沟, 下水库位于“U”型河谷(图 1b)。F1 婆罗科努活动断裂位于工程区南西向约 150 km 处, 该断裂是一条全新世活动断裂, 具有长期性、多期性等特点; F2 巴里坤活动断裂是新疆东天山活动构造带的重要组成部分, 位于工程区正北向约 70 km 处, 历史地震记载的 2 次 7.5 级地震均发生在该断裂上(黄帅堂等, 2020; 徐良鑫等, 2020)。需指出的是, 工程区上下水库、厂房及引水隧洞等部位暂未发现活动断裂发育, 坝址区出露岩性主要以雅满苏组(C_1y)微风化灰岩为主, 灰岩呈灰色—灰白色、质地坚硬。

研究表明新疆地区现今地壳垂直运动差异显著, 天山持续保持抬升隆起的趋势, 且地震多发于垂直速率局部显著上升带的一端或转折部位, 这些局部相对强烈上升区范围可能蓄积一定的位能, 从而孕育地震(郭宏辉等, 2024; 袁海洋等, 2025)。自 1950 年至今, 新疆发生 $M_S \geqslant 6$ 的地震共计 34 次, 其中 17 次发生在天山地区与昆仑山地区, 如 1985 年 8 月 23 日乌恰 7.4 级地震(王晓强等, 2009)。断裂活动及历史地震均表明该抽蓄电站所在区域构造活动较为强烈(谢富仁等, 2004), 并且有关学者依据工程区附近天山某隧道地应力测试结果, 认为在 800～1200 m 深度范围内, 3 个主应力关系为 S_H>S_V>S_h, 为“走滑型”应力状态, 区域地壳应力场持续积累弹性应变能, 具备发生地震的应力条件(池建军等, 2023)。



a—工程区域构造地质图; b—工程场址部署示意图

图 1 工程区域构造地质背景与工程场址部署示意图

Fig. 1 Schematic diagrams illustrating the regional tectonic setting and engineering site layout of the project area

(a) Regional tectonic map of the project area; (b) Schematic layout of the engineering site

2 三维地应力测量与分析

2.1 测点部署原则

为确保该抽蓄电站建设的安全性和运行阶段地下硐室的稳定性，亟待查明地下厂房及引水隧洞区地应力场特征。为此，在地下厂房（海拔 1398 m）区域布设了 2 组三维水压致裂地应力测量（测点编号 ZK309-1、ZK309-3），每组有 3 个钻孔（1 个垂直钻孔与 2 个水平钻孔）。钻孔揭露的岩芯显示，岩性灰白色灰岩为主，岩体结构较完整，局部节理裂隙发育。

2.2 地应力测试方法

此次地应力测量采用国际岩石力学学会推荐的水压致裂法，该技术凭借操作简便、数据可靠、可重复测试及测量深度大等优势，已在水电工程地应力勘察中广泛应用（Zoback and Healy, 1992; 陈群策等, 2019; 刘阳阳等, 2025; 陶文斌等, 2025; 王成虎和李尉, 2025）。为确保测量程序的可靠性和质量，测试程序严格遵循相关技术规范（Amadei and Stephansson, 1997）。水压致裂参数计算采用 ISRM 建议方法，关闭压力（P_s）综合采用单切线法、dt/dP—P 法和 dP/dt—P 法，以提升结果准确性（丰成君等, 2012; 肖海帆等,

2025）。

当钻孔垂直时，通过压裂试验与印模试验可以获取最大、最小水平主应力大小（S_H、S_h）和最大水平主应力方向以及由上覆岩体自重计算的垂直主应力（S_V）；而当钻孔非垂直时，通过压裂试验与印模试验可以获取垂直钻孔轴线平面的最大、最小次主应力大小（σ_A、σ_B）和最大次主应力（σ_A）方向（孟文等，2022）。

2.3　三维地应力测量

根据钻孔岩芯完整情况，随深度选取岩体完整性较好测段开展压裂试验，2 组三维水压致裂地应力测量共成功完成 30 段有效压裂试验，各钻孔二维水压致裂实测数据见表 1。各测段压裂曲线清晰、标准，显示出钻孔测试深度段岩体随压力的持续增

表 1　水压致裂地应力测量结果

Table 1　Results of in-situ stress measurements using the hydraulic fracturing method

钻孔编号	孔深/m	试验编号	中心深度/m	压裂特征参数/MPa			主应力值/MPa			σ_A方位	钻孔信息
				P_b	P_r	P_s	T	σ_A	σ_B		
ZK309-1-1	140	1	20.50	18.30	16.00	10.11	2.30	14.52	10.31		方位角：/ 倾角：90°
		2	46.50	16.18	14.58	9.75	1.60	15.12	10.21	N60°E	
		3	94.50	17.66	15.96	10.29	1.70	15.84	11.23	N64°E	
		4	110.50	18.45	16.15	10.47	2.30	16.35	11.57		
		5	129.50	20.30	18.80	10.95	1.50	15.34	12.24		
ZK309-1-2	20	1	7.60	13.46	12.06	9.20	1.40	15.54	9.20	7°	方位角：36° 倾角：−2°
		2	9.60	12.13	11.01	8.46	1.12	14.37	8.46		
		3	14.50	11.50	10.30	8.13	1.20	14.09	8.13		
		4	16.50	11.27	10.13	8.64	1.14	15.79	8.64	5°	
		5	18.60	11.42	10.21	7.90	1.21	13.49	7.90		
ZK309-1-3	20	1	9.50	22.19	20.69	11.30	1.50	13.21	11.30	12°	方位角：306° 倾角：−2°
		2	11.50	24.32	22.22	12.15	2.10	14.24	12.15	11°	
		3	13.20	17.41	15.79	10.52	1.62	15.77	10.52		
		4	16.50	21.38	19.28	11.31	2.10	14.65	11.31		
		5	18.50	17.41	16.07	10.09	1.34	14.21	10.09		
ZK309-3-1	138	1	20.50	12.22	10.54	9.42	1.68	17.71	9.42		方位角：/ 倾角：90°
		2	40.50	11.86	9.75	8.51	2.11	15.77	8.51	N61°E	
		3	90.50	14.02	12.24	11.12	1.78	20.21	11.12	N63°E	
		4	110.50	13.21	11.55	9.33	1.66	15.33	9.33		
		5	130.50	10.11	9.03	7.52	1.68	18.77	9.68		
ZK309-3-2	20	1	7.50	11.35	8.61	7.31	2.74	13.32	7.31	4°	方位角：305° 倾角：−2°
		2	11.50	12.35	10.25	8.57	2.10	15.46	8.57		
		3	14.50	11.24	9.75	8.13	1.49	14.64	8.13		
		4	15.50	14.33	12.55	10.38	1.78	18.59	10.38	5°	
		5	17.50	13.59	10.11	8.37	3.48	15.00	8.37		
ZK309-3-3	20	1	5.50	11.27	10.13	8.64	1.14	15.79	8.64	12°	方位角：306° 倾角：−2°
		2	7.50	11.42	9.32	7.46	2.10	13.06	7.46	11°	
		3	9.50	13.46	11.57	9.58	1.89	17.17	9.58		
		4	12.00	9.13	7.50	5.52	1.63	9.06	5.52		
		5	16.00	12.55	10.22	9.20	2.33	17.38	9.20		

注：P_b—破裂压力；P_r—重张压力；P_s—关闭压力；T—抗拉强度；σ_A—最大次主应力；σ_B—最小次主应力

大产生的脆性破裂、破裂重张和闭合拐点，鉴于试验数据量较大，每个钻孔仅选取1个最深试验段压裂曲线(图2)。

各钻孔压裂试验完成后，选取合适试验段开展最大次主应力方向印模试验，共完成12段印模试验(相应测段有σ_A方位)，从而获取各钻孔垂直于钻孔轴线平面的最大次主应力方向。每组仅选取垂直钻孔中代表性印模试验结果(图3)。

2.4 三维地应力测量结果分析

基于三维地应力测量获取的2组共6个钻孔的二维地应力实测数据(表1)，建立每组测试包含6个独立应力分量的观测方程组，采用最小二乘反

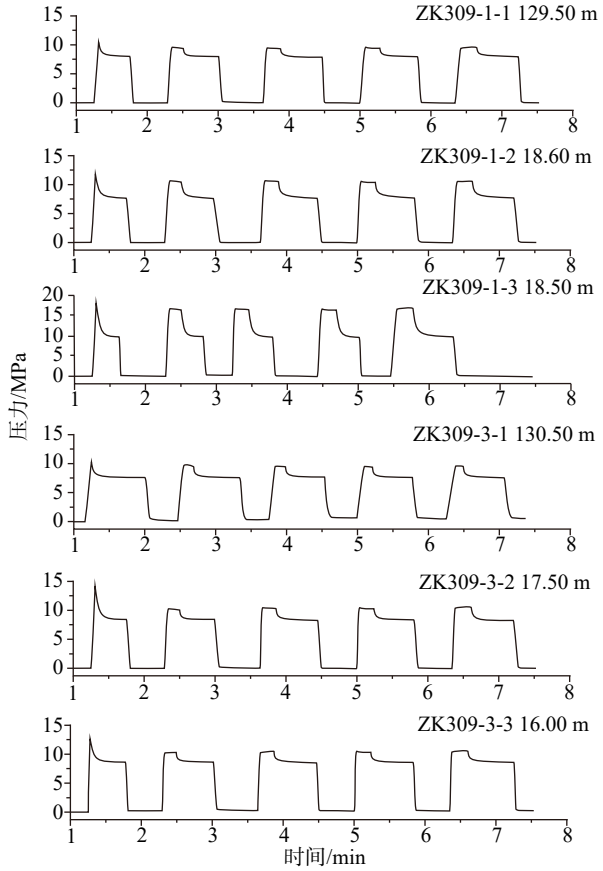


图2 ZK309-1、ZK309-3测点代表性地应力测量压裂曲线

Fig. 2 Fracturing curves for representative in-situ stress measurements at boreholes ZK309-1 and ZK309-3

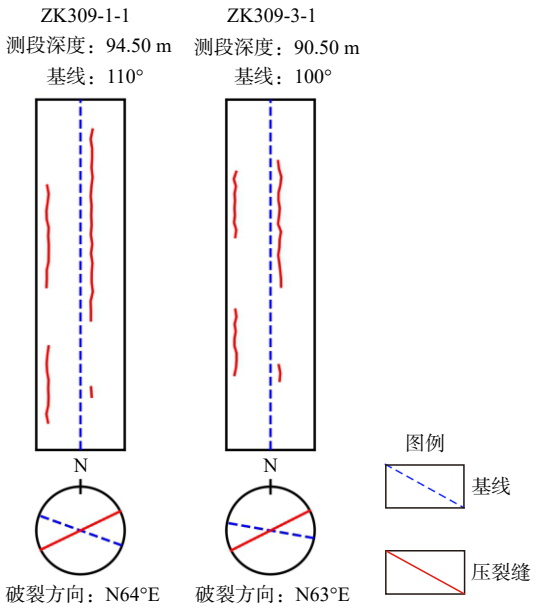


图3 代表性钻孔最大次主应力方向印模示意图

Fig. 3 Schematic diagram of impression results for the maximum sub-principal stress direction in representative boreholes

演算法，借助数值计算工具拟合求解应力分量矩阵。通过特征值分解三维应力状态方程，最终获得3个主应力的大小、空间方位及倾角3个参数。ZK309-1、ZK309-3 2组及地下厂房综合三维地应力计算结果见表2。

工程区在测试深度范围内三维地应力测量结果表明：最大主应力(σ_1)方位总体近水平、北东向，其空间方位与倾角参数反映现今地壳应力场由构造应力场与重力场共同作用。该结论与区域现代构造应力场分区成果一致，反映了现今北东向区域构造应力对工程区挤压作用(谢富仁等，2007)。

3 工程区三维地应力场反演分析

为全面掌握拟建抽蓄电站工程区三维地应力场特征，基于三维地应力实测资料，结合已有地形测绘结果，采用ANSYS有限元软件构建工程区三维地质模型，开展三维地应力场反演分析，以掌握工程区的三维地应力分布特征，为后续工程设计提

表2 ZK309-1、ZK309-3三维地应力测量结果

Table 2 Three-dimensional in-situ stress measurement results for boreholes ZK309-1 and ZK309-3

测点编号	最大主应力(σ_1)			中间主应力(σ_2)			最小主应力(σ_3)		
	量值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)	量值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)	量值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)
ZK309-1	16.19	54.44	−4.81	12.23	144.89	−18.89	10.41	129.52	70.46
ZK309-3	16.23	43.98	6.93	9.82	132.17	−14.52	6.90	158.80	73.85

供基础应力数据(范玉璐等, 2023; 李征征等, 2023)。

模型构建过程中, 充分考虑区域构造应力场与岩体自重效应的耦合作用, 将其作为初始荷载边界条件, 开展有限元正演计算, 获取模型在不同条件下的应力响应特征。

在反演计算中, 以现场实测三维地应力数据作为约束, 依据应力反演理论, 采用迭代优化算法对模型边界条件进行动态调整。通过系统分析各测点三维应力状态随边界条件变化的响应规律, 建立实测数据与模拟计算结果的定量关联。经多轮优化迭代, 最终确定与实测数据及区域构造背景高度契合的边界条件, 进而反演获取工程区地应力场的三维空间分布特征, 为后续工程设计与围岩稳定性评估提供关键地应力参数。

3.1　计算范围选取与模型建立

在构建工程区有限元模型时, 需综合考虑地形地貌、地质构造及岩体介质非均质性, 合理界定应力场反演的模型范围, 从而实现现今三维地应力分布特征的精准模拟。针对河谷地貌的特殊性, 为有效削弱边界效应, 模型几何边界不仅完整覆盖工程影响区域, 还进行适度外延扩展; 同时, 以分水岭作为模型边界, 确保两侧地形的几何对称性, 提升模型计算可靠性。

模型采用笛卡尔坐标系, X 轴取正东方向, Y 轴指向正北, Z 轴垂直向上; 根据地下厂房 2 组三维地应力测量结果(表 1), 基于水平面分别进行空间投影平均综合得到最大水平主应力(S_H)方位角为 N56°E, 故确定模型完整涵盖主厂房、引水隧洞和上、下水库等全部工程, 平面呈长方形, 尺寸为 3800 m(N56°E)×7000 m(N34°W); 底面高程设为海拔 0 m, 顶面为实际海拔高程; 模型长轴方向 7000 m (N34°W)与区域最大水平主应力方向(N56°E)垂直; 模型共划分 1895067 个计算单元, 包含 341016 个节点(图 4), 经误差验证可充分满足工程分析的精度需求。

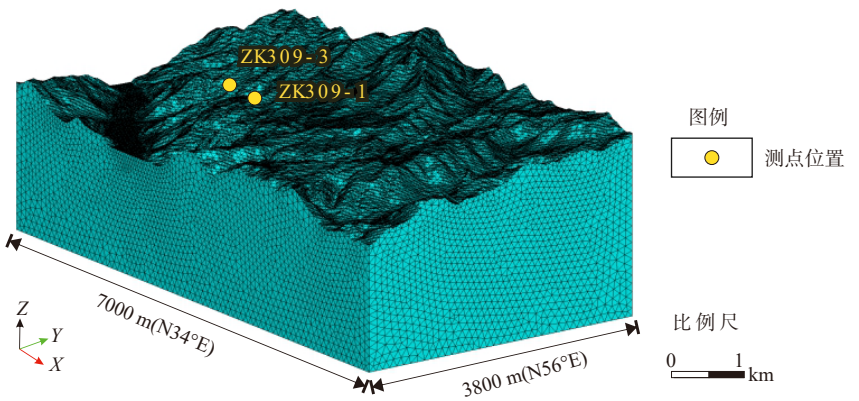


图 4　工程区有限元计算模型

Fig. 4　Finite element model of the project area

3.2　模型参数选取

工程区的灰岩岩石较坚硬, 裂隙发育较少, 岩体相对完整, 局部呈碎块状。此次模型参数基于岩石物理力学试验数据选择如下: 岩性以灰岩为主, 岩石密度 2.70 g/cm^3、岩体弹性模量 22.38 GPa、泊松比 0.25。

3.3　地应力场模拟结果分析

考虑位移边界条件在有限元计算中具备更好的连续性与均匀性优势, 此次研究采用位移边界调整策略开展应力场反演, 边界条件设定依据工程区地形地貌特征与地应力场分布规律。

依据区域构造活动特点, 反演过程中模型南西和南东 2 个侧面的施加位移边界条件, 北东和北西侧面及底面法向位移约束, 表面自由, 通过迭代优化模型参数, 直至测点位置的主应力反演值与实测值达到最优拟合, 且计算主应力方位与区域地应力场趋势一致。

选取 ZK309-1 测点与 ZK309-3 测点的三维地应力实测数据, 对比分析主地应力反演值与实测值(表 3)。结果显示, 二者数值吻合度良好, 主应力量值与方位相对误差控制在 10% 以内。

工程区的 3 个主应力——最大主应力(σ_1)、中间主应力(σ_2)、最小主应力(σ_3)分布特征如图 5 所示, 可以看出: 地表及浅部地应力场因受地形因素影响, 在地形凸起部位应力值较低, 而在沟谷部位

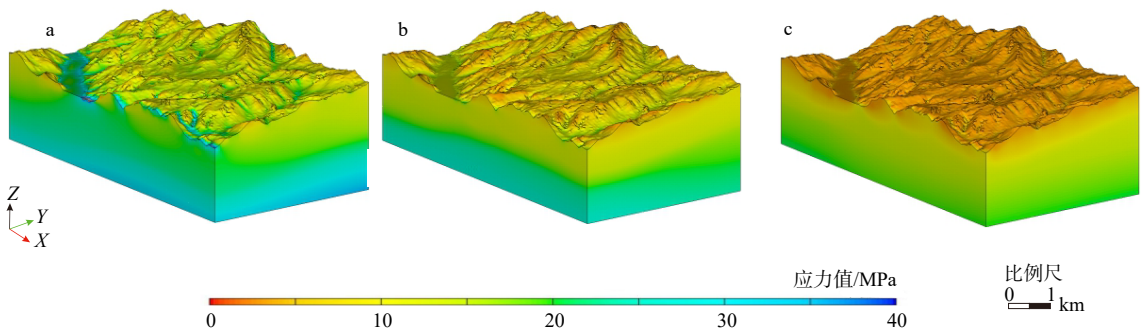
存在明显应力集中现象。

抽蓄电站地下厂房主洞室位于1398 m高程，其应力状态可通过该高程水平面的最大主应力(σ_1)、中间主应力(σ_2)、最小主应力(σ_3)云图(图6)和σ_1、σ_2方向(图7)进行表示。该高程处最大主应力(σ_1)应力值范围为12.31～27.83 MPa，整体上高值区沿沟谷展布，表现出较明显的沟谷应力集中现象；除沟谷高值区外，其余区域应力值范围为12.31～24.79 MPa，其中厂房区域的应力值范围为16.21～17.33 MPa，应力方向总体呈北东向。该高程处中间主应力(σ_2)应

表3 地应力实测数据与反演结果对比分析

Table 3 Comparison of measured iand modeled n situ stress data

测点编号	方法	最大主应力/σ_1			中间主应力/σ_2			最小主应力/σ_3		
		量值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)	量值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)	量值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)
ZK309-1	实测	16.19	54.44	−4.81	12.23	144.89	−18.89	10.41	129.52	70.46
	反演	17.21	56.32	−3.92	13.21	142.22	−16.54	11.13	129.30	73.67
ZK309-3	实测	16.23	43.98	6.93	9.82	132.17	−14.52	6.90	158.80	73.85
	反演	16.54	47.88	5.62	10.45	136.77	−13.98	7.30	154.30	71.44

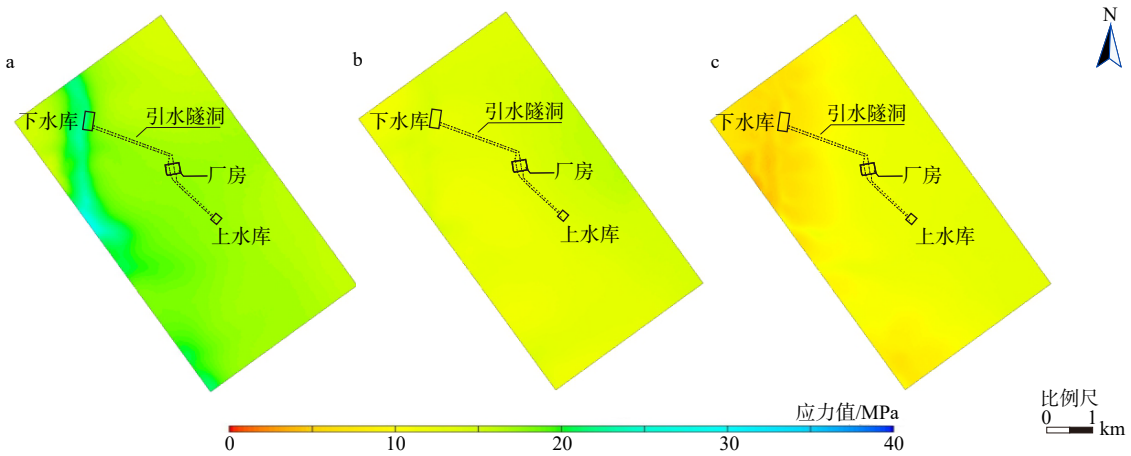


a—最大主应力(σ_1)；b—中间主应力(σ_2)；c—最小主应力(σ_3)

图5 工程区主应力云图

Fig. 5 Principal stress contour maps of the project area

(a) Maximum principal stress (σ_1); (b) Intermediate principal stress (σ_2); (c) Minimum principal stress (σ_3)

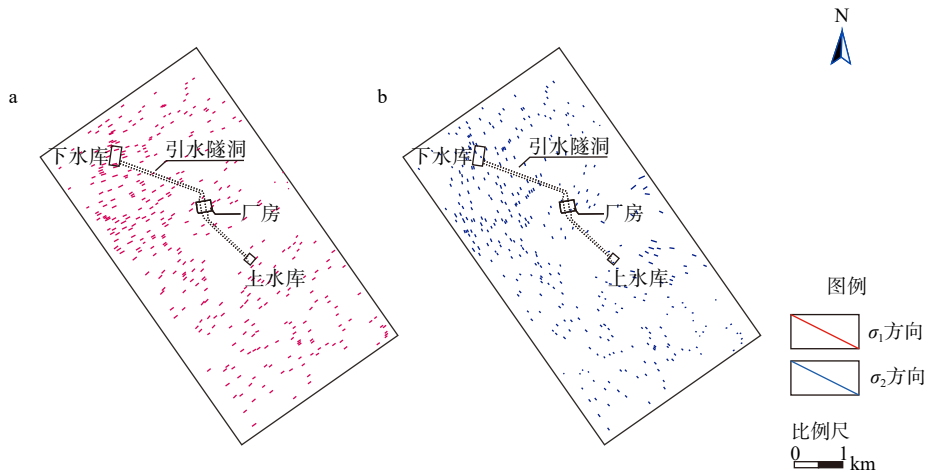


a—最大主应力(σ_1)；b—中间主应力(σ_2)；c—最小主应力(σ_3)

图6 地下厂房所在1398 m高程水平面主应力云图

Fig. 6 Principal stress contour maps on the horizontal plane at an elevation of 1398 m within the underground powerhouse

(a) Maximum principal stress (σ_1); (b) Intermediate principal stress (σ_2); (c) Minimum principal stress (σ_3)



a—最大主应力(σ_1)；b—中间主应力(σ_2)

图 7　地下厂房所在 1398 m 高程水平面主应力方位矢量图

Fig. 7　Vector map of the principal stress orientation on the horizontal plane at an elevation of 1398 m within the underground powerhouse

(a) Maximum principal stress (σ_1); (b) Intermediate principal stress (σ_2)

力值范围为 9.32～18.07 MPa，其中厂房区域应力值范围为 10.12～13.46 MPa，应力方向总体呈南东向。该高程处最小主应力(σ_3)应力分布云图，应力值范围为 3.11～12.46 MPa，并随着埋深的增加而增大，受重力作用控制显著，其中厂房区域应力值为 7.21～11.42 MPa；厂房最大埋深 520 m 处，反演结果利用坐标投影得到垂直应力为 13.42 MPa，与密度估算的垂直应力理论值 13.78 MPa 相近；最小主应力(σ_3)应力方向受复杂地形影响，总体呈近垂向分布，尤其山脊深处接近垂直。

沿引水隧洞主要轴线 S70°E 方向剖面主应力分布特征见图 8。结果表明引水隧洞沿线最大主应力(σ_1)为 14.86～24.32 MPa(图 8a)，中间主应力(σ_2)为 7.31～13.51 MPa(图 8b)，最小主应力(σ_3)为 1.46～11.13 MPa (图 8c)。

4　地下硐室稳定性分析

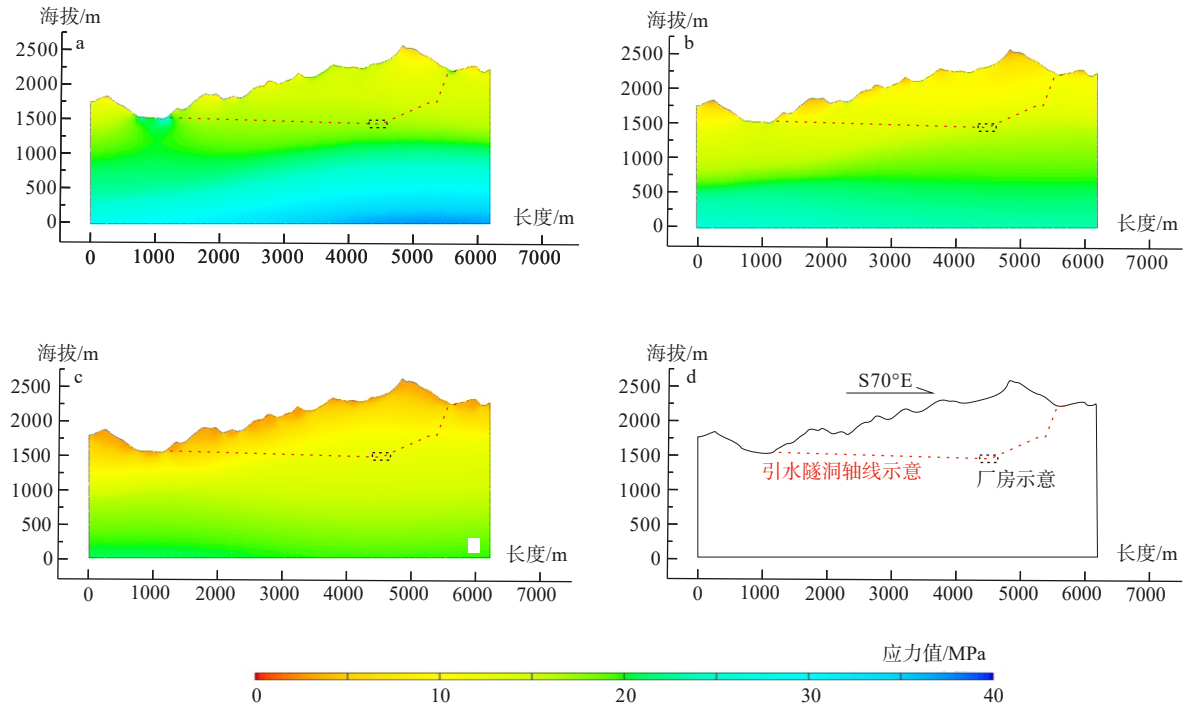
4.1　引水隧洞轴线布设合理性分析

目前，针对如何预防或降低岩爆风险等级和强度，结合地应力场特征调整硐室横截面形状和硐室长轴走向是常采用的工程手段。廖椿庭和施兆贤(1983)分析了地应力的大小、方向及分布规律，统筹考虑选择硐室最佳轴线布设方案，以减少地下硐室围岩失稳风险；余莉等(2015)研究不同应力类型条件下最大水平主应力方向与洞轴线夹角对地下硐室稳定性的影响，总结出了 S_H 型、S_{HV} 型和 S_V 型 3 种不同应力类型，进而确定最优洞轴线与最大水平主应力的夹角 α；孟文等(2021)依据隧道横截面受两向正应力影响模型，利用线弹性理论厘定了 S_V 型硐室走向与最大主应力方向最优夹角的理论公式。

基于上述分类体系，3 种应力场的最优夹角规律如下：对于 S_H 型($S_H>S_h>S_V$)，α= 0°最有利于地下硐室围岩的稳定；对于 S_V 型($S_V>S_H>S_h$)，α= 90°最有利于地下硐室围岩的稳定；对于 S_{HV} 型($S_H>S_V>S_h$)，最大水平主应力与地下硐室轴线最优夹角 α 关系为

$$\alpha=\frac{1}{2}\arccos\frac{S_H+S_h-2S_V}{S_H-S_h} \tag{1}$$

根据地下厂房 2 组三维地应力测量确定的应力椭球空间展布(表 1)，基于水平面及铅垂直面分别进行空间投影平均综合得到：最大水平主应力(S_H)为 14.51 MPa、方位角为 N56°E，最小水平主应力(S_h)为 9.72 MPa，垂直主应力(S_V)为 13.52 MPa。由此，运用公式(1)可计算最大水平主应力(S_H)与地下硐室轴线最优夹角 α 为 62.84°。而该抽蓄电站地下厂房轴线(N10°W)与最大水平主应力(S_H)方向夹角 α 为 66°；引水隧洞轴线(N10°W 和 N70°W)与最大水平主应力(S_H)方向夹角 α 分别为 54°和 66°。地下厂房和引水隧洞轴线与最大水平主应力的夹角，同地下硐室最优夹角 α 偏差≤10°。综上所述，在区域现今应力场特征条件下，该水电站地下硐室轴线设计有利于硐室围岩稳定性。



a—最大主应力 (σ_1); b—中间主应力 (σ_2); c—最小主应力 (σ_3); d—引水隧洞轴线 S70°E 方向投影

图 8 引水隧洞轴线 S70°E 沿线主应力分布云图

Fig. 8 Distribution of principal stresses along the water diversion tunnel axis (S70°E)

(a) Maximum principal stress (σ_1); (b) Intermediate principal stress (σ_2); (c) Minimum principal stress (σ_3); (d) Projection along the water diversion tunnel axis (S70°E)

4.2 地下厂房和引水隧洞围岩岩爆危险性分析

岩爆作为地下硐室开挖过程中围岩卸荷引发的典型脆性破坏现象，其发生受岩体性质与应力状态双重控制；岩爆多出现于完整性好、强度高的岩体，且强应力集中与大应力差是诱发岩爆的关键因素（王成虎等，2012）；在地下硐室形状和开挖方式相同的情况下，岩爆危险程度的主要影响因素取决于掌子面范围内初始应力场特征和岩体力学特征（刘宁等，2013）；围岩的岩体力学特征作为岩爆发生的基本条件，岩体的峰值强度和脆性特征对岩爆的发生具有显著影响（冯夏庭等，2019）。已有研究成果均表明，高地应力环境下硬质岩区是岩爆高风险区，为判断地下硐室发生岩爆的可能性及其发生时严重程度，国内外学者提出多种岩爆判据准则，现今水电工程岩爆预测评价主要以岩石强度应力比法、陶振宇判据、Russenes 判据和岩石应力强度比法为主（Russenes，1974；陶振宇，1987；徐林生和王兰生，1999）。此次研究基于实测地应力数据与岩石力学参数，结合三维应力场反演分析结果，综合采用强度应力比法、陶振宇判据、Russenes 判据和应力强度比法，对地下厂房及引水隧洞围岩岩爆风险开展多准则评估（表 4）。

该抽蓄电站工程区岩石单轴饱和抗压强度 R_c 为 97 MPa，最大主应力 σ_{max} 为 16.23 MPa，可计算出：$4 < R_c/\sigma_{max} < 7$，且 $10 \leqslant \sigma_{max} < 20$ MPa，根据现行《水力发电工程地质勘察规范》（GB 50287-2016）中利用岩石强度应力比法 R_c/σ_{max} 来判断岩体初始地应力分级，该工程区地应力分级为中等地应力区。

通过对岩石强度应力比法、陶振宇判据等多准则判据的相关参数进行计算，厘定工程区地下厂房岩爆风险（表 5）。综合 4 种不同的岩爆判别方式，除 Russenes 判据判别阈值处在 0.083～0.150 属于中等岩爆等级外，其他 3 种岩爆判别均为轻微岩爆。虽然上述 4 种判据方法在预测深度岩爆等级存在差异，但均表明预测深度不具备发生强烈岩爆及以上等级的可能。

依据上述工程区三维应力场数值模拟分析，引水隧洞沿线主应力大小变化如图 9a 所示，运用强度应力比法（R_c/σ_{max}）分析引水隧洞自下水库到上水库沿线总体位于轻微岩爆范围（图 9b），其中 3 个关键

表 4　岩爆风险判别和分级

Table 4　Rockburst risk identification and classification

判据方法	判别公式	判据阈值	分级情况	判据特点
岩石强度应力比法	R_c/σ_{max}	4 ～ 7	轻微岩爆	
		2 ～ 4	中等岩爆	
		1 ～ 2	强烈岩爆	
		< 1	极强岩爆	未考虑硐室开挖过程和初始应力场的应力重分布影响
陶振宇判据	R_c/σ_{max}	5.5 ～ 14.5	轻微岩爆	
		2.5 ～ 5.5	中等岩爆	
		< 2.5	强烈岩爆	
岩石应力强度比法	$\sigma_{\theta max}/R_c$	0.3 ～ 0.5	轻微岩爆	
		0.5 ～ 0.7	中等岩爆	
		0.7 ～ 0.9	强烈岩爆	
		> 0.9	极强岩爆	考虑硐室开挖过程和初始应力场的应力重分布影响
Russenes判据	$Is(50)/\sigma_{\theta max}$	0.150 ～ 0.200	轻微岩爆	
		0.083 ～ 0.150	中等岩爆	
		< 0.083	强烈岩爆	

注：R_c为岩石饱和单轴抗压强度，MPa；σ_{max}为最大主应力，在文章中$\sigma_{max}=\sigma_1$，MPa；$\sigma_{\theta max}$为隧道开挖面最大切向应力，MPa；Is(50)为岩石修正点荷载强度，MPa

表 5　地下厂房岩爆风险预测结果

Table 5　Predicted rockburst risk in the underground powerhouse

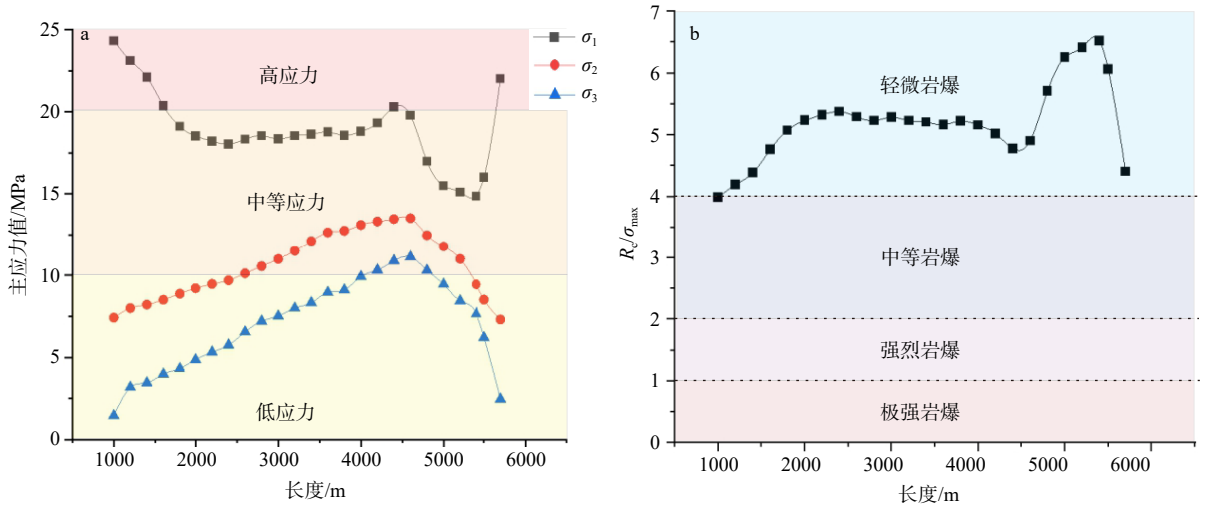
判据方法	埋深 / m	判别值	岩爆等级
岩石强度应力比法	520	5.98	轻微岩爆
陶振宇判据	520	5.98	轻微岩爆
岩石应力强度比法	520	0.38	轻微岩爆
Russenes判据	520	0.12	中等岩爆

位置即引水隧洞与下水库区域连接处（1000 m 位置）、地下厂房（4300 m 位置）和引水隧洞与上水库区域连接处（5700 m 位置）最大主应力（σ_1）相对较高、围岩岩爆危险性相对较大。特别是引水隧洞与下水库区域连接处位于沟谷范围，由于构造和地形耦合作用导致的应力集中效应，该处最大主应力值（σ_1）最大，可能具备发育中等岩爆的可能性。

5　讨论

此次研究通过三维地应力实测、工程区三维地应力场反演以及多准则岩爆分析，基本揭示了新疆天山造山带南缘某大型深埋抽蓄电站工程区的地应力赋存规律以及地下硐室（厂房及引水隧洞）稳定性。由于工程区地应力测量数量的有限性、区域构造应力场和区域构造地质的复杂性、三维地应力场反演的可靠性、岩爆风险评价不同方法的差异性和局限性等因素影响，相关研究成果仍需要不断完善和丰富。

关于工程区地应力场特征与区域构造背景的响应关系方面：地下厂房三维水压致裂实测数据为最大主应力 σ_1 近水平、北东向分布，中间主应力 σ_2 近水平，最小主应力 σ_3 近垂直，应力椭球空间展布反映了构造应力场与重力场的叠加效应。该主应力状态表明工程区深部岩体以北东向近水平构造挤压作用主导，该结果与区域现代构造应力场分区吻合，即天山造山带南缘地区主压应力方向为北北东向到北东向（谢富仁等，2004）。该研究结果虽然反映了印度板块相对于欧亚板块产生北北东向推挤作用的区域远场效应，初步揭示了新疆天山造山带南缘现今地应力状态，但仍需要更多的实测地应力数据去完善和佐证该地区的区域构造应力场



a—引水隧洞轴线主应力变化曲线；b—基于岩石强度应力比法的岩爆等级分布

图 9 引水隧洞主应力变化与岩爆等级评估

Fig. 9 Principal stress variation and rockburst risk assessment along the water diversion tunnel

(a) Variation of the principal stresses along the water diversion tunnel axis; (b) Distribution of rockburst risk levels based on the strength–stress ratio criterion

特征。

关于三维地应力场反演的可靠性与应用价值方面：基于实测数据约束的三维有限元反演分析，复现了工程区复杂地形条件下的地应力分布规律。反演结果与实测值在主应力量值、方位角和倾角上基本一致，为地下厂房和引水隧洞的精细化设计、施工方案优化以及长期稳定性评估提供了重要的基础应力数据支撑，但地应力实测点仅位于地下厂房，虽通过反演推及引水隧洞，但对深部特定地质结构局部的应力扰动刻画可能不足，并且由于区域构造地质的各向异性，目前三维地应力场反演地质模型和数学模型均有一定程度的概化，随着工程勘察的不断深入，地质体结构构造、岩体物理力学性质等认知的提升，三维地应力场空间分布特征也有待完善。此外，目前反演模型基于线弹性假定，未考虑岩体的流变特性和开挖卸荷过程的时效变形，对长期稳定性评估需结合更深入的流变力学分析。

6 结论

此次研究通过现场三维地应力测量、三维应力场有限元反演分析及岩爆风险评估等多手段结合，构建了适用于复杂深埋工程的综合地应力分析与稳定性评价体系，并取得以下核心认识。

(1)地下厂房硐室三维地应力测量结果表明最大主应力(σ_1)大小为 16.19～16.23 MPa、方位总体为北东向，三维反演结果(σ_1 大小为 16.54～17.21 MPa、方位总体为北东向)与实测值吻合较好(误差≤10%)，不仅相互印证了模型的可靠性，更明确了工程区深部岩体受北东向近水平构造挤压作用(S_{HV} 型应力场)的主导，其成因与区域构造应力场及印度板块远程推挤效应直接关联。

(2)依据工程区地下厂房实测三维应力椭球计算最大水平主应力方向为(N56°E)，该方向与 S_{HV} 型应力场理论最优夹角(62.84°)为工程布设提供了理论基准。实测表明，地下厂房(N10°W)和引水隧洞(N10°W、N70°W)与最大水平主应力的实际夹角分别为 66°、54°和66°，与最优夹角 62.84°的偏差均≤10°。这一较小的偏差意味着硐室长轴方向避开了最不利的应力方向，使得硐室开挖后围岩承受的应力差相对较小，有利于围岩应力重分布后的稳定，降低了发生大规模剪切破坏或严重应力集中导致的失稳风险。

然而，最优夹角计算基于二维平面下应力特征及硐室轴线关系，受地下硐室界面形状等因素制，目前尚无法从三维应力状态全面考虑；此外，地应力测量和反演分析均存在一定的误差，在后续工程建设过程中，仍需结合施工现场情况关注围岩失稳风险，这些问题有待未来进一步创新和完善。

（3）综合运用岩石强度应力比法、陶振宇判据、岩石应力强度比法和 Russenes 判据对地下硐室围岩岩爆风险进行评估，结论总体一致但略有差异：地下厂房硐室内基于实测三维最大主应力和岩石饱和单轴抗压强度，岩石强度应力比法、陶振宇判据、岩石应力强度比法均判定为轻微岩爆，仅 Russenes 判据判定为中等岩爆。鉴于灰岩岩体完整性高、强度大的特性，且 Russenes 判据本身对点荷载强度测试和 $\sigma_{\theta\max}$ 估算较为敏感，结合其他 3 种判据结果，综合判定地下厂房区域发生中等及以上岩爆可能性较低，总体风险等级为轻微岩爆；引水隧洞全线总体评估亦显示轻微岩爆等级，然而针对反演结果中引水隧洞与下水库连接处位于沟谷应力集中区，其 $\sigma_{\max}$ 显著升高，导致 $R_c/\sigma_{\max}$ 比值降低。该位置存在发育中等岩爆的可能性，需在设计与施工中予以重点关注。

此次研究成果不仅精确刻画了特定工程区的地应力场特征与岩爆风险分布，更在于通过“测量−反演−验证”的系统方法，成功验证了基于实测应力场的硐室轴线优化设计理论在复杂深埋工程中的适用性，并示范了多准则融合在岩爆风险精细化分级评估中的有效应用，为类似深埋地下工程的稳定性分析与风险控制提供了可复制的理论−实践范式。

作者贡献声明：张晓飞和王继明负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；张鹏和李征征参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；李常虎和欧阳江泉参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: ZHANG Xiaofei and WANG Jiming conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; ZHANG Peng and LI Zhengzheng participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; LI Changhu and OUYANG Jiangquan were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文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

AMADEI B, STEPHANSSON O, 1997. Rock stress and its measurement[M]. London: Chapman & Hall.

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

CHEN Q C, SUN D S, CUI J J, et al., 2019. Hydraulic fracturing stress measurements in Xuefengshan deep borehole and its significance[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 853-865. (in Chinese with English abstract)

CHI J J, TENG J, SHANG Y J, et al., 2023. Comparative analysis of the ground stress changes in a deep buried tunnel in Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 41(3): 431-435. (in Chinese with English abstract)

FAN Y L, CAO J W, YU S, et al., 2023. Prediction and analysis on large deformation of surrounding rocks in the Muzhailing Tunnel of the Weiyuan–Wudu Expressway under high in-situ stress[J]. Journal of Geomechanics, 29(6): 786-800. (in Chinese with English abstract)

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 X T, XIAO Y X, FENG G L, et al., 2019. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(4): 649-673. (in Chinese with English abstract)

GUO H H, HE X M, ZHU L T, et al., 2024. Evolution of structural characteristics with multistage stress fields in the Sikeshu Sag, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 43(5): 146-160. (in Chinese with English abstract)

HOEK E, BROWN E T, 1980. Underground excavations in rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy.

HUANG S T, HU W H, YANG P X, et al., 2020. Late quaternary activity characteristics of the Tangbal-Tasdun fault zone in the eastern Tianshan area[J]. Seismology and Geology, 42(5): 1058-1071. (in Chinese with English abstract)

JIANG H, YAN J, WEI Y Z, et al., 2025. Analysis of ground stress characteristics of long and deep buried high-speed railway tunnel in near active fault zone[J]. Railway Investigation and Surveying, 51(1): 112-119. (in Chinese with English abstract)

JIANG J, DONG Z H, ZHOU C H, et al., 2025. Comprehensive measurement of geostress and analysis of initial stress field inversion in a high-head pumped storage power station in Xinjiang[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 36(2): 144-152. (in Chinese with English abstract)

LEE J S, 1997. The earthquake[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

LI Z Z, YANG W C, ZHANG P, et al., 2023. In-situ stress measurement and inversion analysis of a large hydropower project in southeast Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 442-452. (in Chinese with English abstract)

LIAO C T, SHI Z X, 1983. In-situ stress measurements and their application to engineering design in the Jinchuan mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2(1): 103-112. (in Chinese with English abstract)

LIU N, ZHANG C S, CHU W J, et al. , 2013. Influence of mechanical characteristics of deep-buried marble on rockburst occurrence conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 34(9): 2638-2642, 2648. (in Chinese with English abstract)

LIU Y, ZHANG J Q, LUO C, et al., 2024. Influencing factors of time-space characteristics of delayed rockburst in tunnel under high in-situ stress[J]. Railway Engineering, 64(10): 94-99. (in Chinese with English abstract)

LIU Y Y, SU Y H, FANG Y B, et al., 2025. Model test of loose failure mechanism and stability coefficient analysis of tunnel surrounding rock[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 22(7): 3134-3147. (in Chinese with English abstract)

LIU Z Z, CAO P, LIN H, et al., 2020. Three-dimensional upper bound limit analysis of underground cavities using nonlinear Baker failure criterion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 30(7): 1916-1927.

LV A Z, 1997. Selection method of section configration of underground chamber in high strata stress zone[J]. Journal of China Coal Society, 22(5): 49-52. (in Chinese with English abstract)

MA J, YAN S H, DONG Z H, et al. , 2024. In-situ stress measurement and in-situ stress field inversion analysis by hydraulic fracturing in large-scale underground plants[J]. China Rural Water and Hydropower, (6): 252-258. (in Chinese with English abstract)

MARTIN C D, KAISER P K, MCCREATH D R, 1999. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 36(1): 136-151.

MENG J, ZHANG P, WANG J M, et al., 2024. Study on regional stress background and prevention of the rock burst accident on October 20th, 2018 in the Longyun Coal Industry area, Shandong, China[J]. Journal of Geomechanics, 30(3): 473-486. (in Chinese with English abstract)

MENG W, GUO C B, MAO B Y, et al., 2021. Tectonic stress field and engineering influence of China-Nepal railway corridor[J]. Geoscience, 35(1): 167-179. (in Chinese with English abstract)

MENG W, TIAN T, SUN D S, et al., 2022. Research on stress state in deep shale reservoirs based on in-situ stress measurement and rheological model[J]. Journal of Geomechanics, 28(4): 537-549. (in Chinese with English abstract)

PAN J H, 2025. Stress distribution of surrounding rock during excavation of water diversion tunnel project and optimization of safety technology for support structure construction[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 31(4): 78-83. (in Chinese with English abstract)

PENG J B, CUI P, ZHUANG J Q, 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(12): 2377-2389. (in Chinese with English abstract)

QI L, MA Q C, 2000. On the selection of longitudinal direction and stability of underground opening based on the analysis of in-situ stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 19(S1): 1120-1123. (in Chinese with English abstract)

RUSSENES B F, 1974. Analysis of rock spalling for tunnels in steep valley sides[D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology: 9-17.

SHAO C C, LI Y F, ZOU X, et al., 2020. Research on CBR-based decision-making model of rock burst prevention in railway engineering[J]. Railway Standard Design, 64(5): 132-136. (in Chinese with English abstract)

SUN F Y, GUO J Q, ZHANG X B, et al., 2025. Research on the radial stress gradient effect of rockburst characteristics in tunnel under true triaxial condition with single-side unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 44(2): 373-390. (in Chinese with English abstract)

TAO W B, ZHANG Z F, WANG F, et al. , 2025. Inverse analysis of initial ground stress field in Maoyushan extra-long soft rock highway tunnel[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 48(7): 983-988, 995. (in Chinese with English abstract)

TAO Z Y, 1987. Rock burst and its judgment in high-ground stress region[J]. Yangtze River, 18(5): 25-32. (in Chinese)

WANG B, SUN D S, LI A W, et al., 2024. In situ stress state of deep basement in the Songliao Basin: evidence from in situ stress measurement in SK-2 borehole[J]. Earth Science Frontiers, 31(2): 377-390. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, SONG C K, LIU L P, 2012. Study of stress characteristics of brittle failures of rock around underground openings[J]. Rock and Soil Mechanics, 33(S1): 1-7. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, LI W, 2025. Major advances and prospects in in-situ stress measurement and estimation methods over the past 10 years (2014-2025)[J]. Journal of Geomechanics, 31(6): 1188-1209. (in Chinese with English abstract)

WANG D, WANG J F, LI T B, et al., 2021. Analysis of three-dimensional movement characteristics of rockfall: a case study at a railway tunnel entrance in the southwestern mountainous area, China[J]. Journal of Geomechanics, 27(1): 96-104. (in Chinese with English abstract)

WANG J R, PU S, YAO Z G, et al., 2025. Rock burst initiation mechanism of horizontal layered hard rock tunnel under high geostress[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 42(5): 173-183. (in Chinese with English abstract)

WANG X Q, LU X, LIU B, et al. , 2009. Study on present-day vertical crust movement and seismic activity in Xinjiang area[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 29(6): 22-27, 31. (in Chinese with English abstract)

XIAO H F, WU N Y, GAO G Y, et al., 2025. A method for determining characteristic pressure parameters during hydraulic fracturing based on linearized fitting[J]. Journal of Geomechanics, 31(6): 1282-1295. (in Chinese with English abstract)

XIE F R, CUI X F, ZHAO J T, et al., 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(4): 654-662. (in Chinese with English abstract)

XIE F R, CHEN Q C, CUI X F, et al., 2007. Fundamental database of crustal stress environment in continental China[J]. Progress in Geophysics, 22(1): 131-136. (in Chinese with English abstract)

XU B, XIE H P, TU Y J, 2007. Numerical simulation of rockburst stress state during excavation of underground powerhouse of Pubugou Hydropower

Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(S1): 2894-2900. (in Chinese with English abstract)

XU L S, WANG L S, 1999. Study on the laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang Mountain road[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 21(5): 569-572. (in Chinese with English abstract)

XU L X, RAN Y K, LIANG M J, et al., 2020. Geometric distribution and characteristics of the surface rupture of two historical earthquakes in the Barkol Basin, Xinjiang[J]. Seismology and Geology, 42(1): 1-17. (in Chinese with English abstract)

YANG S X, YAO R, LI Y J, et al., 2025. Progress and perspectives in research on crustal stress and earthquakes[J]. Journal of Geomechanics, 31(6): 1127-1145. (in Chinese with English abstract)

YAO N, ZHANG Y L, LIU Y, et al., 2025. Rock burst intensity grading prediction based on the combination of PCA, CBLOF and SVMSMOTE algorithms[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 44(5): 1230-1241. (in Chinese with English abstract)

YIN S H, KOU Y Y, ZHOU Y, et al., 2025. Optimized layout and excavation sequence of deep chambers[J]. Chinese Journal of Engineering, 47(4): 628-641. (in Chinese with English abstract)

YU L, YOU Z M, CHEN J P, et al., 2015. Rock classification for tunnels in high geostress areas[J]. Modern Tunnelling Technology, 52(3): 23-30. (in Chinese with English abstract)

YUAN H Y, WU C Y, YU X H, et al., 2025. Late Quaternary activity characteristics of the eastern segment of the Bogda northern margin fault, Eastern Tianshan[J]. China Earthquake Engineering Journal, 47(5): 1243-1250. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J J, FU B J, 2008. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(10): 2034-2042. (in Chinese with English abstract)

ZHAO C L, ZHANG Y X, LI Z S, et al., 2025. Comparative study of excavation schemes for underground plant caverns based on in-situ stress field inversion[J]. Journal of Geomechanics, 31(6): 1255-1267. (in Chinese with English abstract)

ZHAO H, ZHANG H R, 2025. Rock burst assessment and numerical simulation of deep-buried long tunnel based on energy criterion[J]. Drilling Engineering, 52(3): 55-62. (in Chinese with English abstract)

ZHU Y H, CHEN S W, RUAN L, et al., 2025. The rockburst tendency evaluation in Jigongling phosphate mine[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 56(6): 227-240. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, HEALY J H, 1992. In situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass scientific research borehole: implications for the mechanics of crustal faulting[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B4): 5039-5057.

附中文参考文献

陈群策，孙东生，崔建军，等，2019. 雪峰山深孔水压致裂地应力测量及其意义[J]. 地质力学学报，25(5)：853-865.

池建军，滕杰，尚彦军，等，2023. 天山某深埋隧道地应力变化对比分析[J]. 新疆地质，41(3)：431-435.

范玉璐，曹佳文，余顺，等，2023. 高地应力作用下渭武高速木寨岭隧道围岩大变形灾变预测分析研究[J]. 地质力学学报，29(6)：786-800.

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.

冯夏庭，肖亚勋，丰光亮，等，2019. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报，38(4)：649-673.

郭宏辉，何新明，朱林涛，等，2024. 准噶尔盆地四棵树凹陷多期应力场作用下的构造演化特征[J]. 地质科技通报，43(5)：146-160.

黄帅堂，胡伟华，杨攀新，等，2020. 东天山唐巴勒-塔斯墩断裂带晚第四纪活动特征[J]. 地震地质，42(5)：1058-1071.

姜浩，严健，韦远圳，等，2025. 近活动断裂带长大深埋高铁隧道地应力特征分析[J]. 铁道勘察，51(1)：112-119.

蒋健，董志宏，周春华，等，2025. 新疆某高水头抽蓄电站地应力综合测量及应力场反演分析[J]. 水资源与水工程学报，36(2)：144-152.

李四光，1977. 论地震[M]. 北京：地质出版社.

李征征，杨文超，张鹏，等，2023. 藏东南某大型水电站工程区地应力状态及反演分析[J]. 地质力学学报，29(3)：442-452.

廖椿庭，施兆贤，1983. 金川矿区原岩应力实测及在矿山设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，2(1)：103-112.

刘宁，张春生，褚卫江，等，2013. 深埋大理岩力学特性对岩爆发生条件的影响分析[J]. 岩土力学，34(9)：2638-2642, 2648.

刘阳阳，苏永华，方砚兵，等，2025. 隧道围岩松动破坏机制模型实验及稳定性系数分析[J]. 铁道科学与工程学报，22(7)：3134-3147.

刘宇，张均清，罗驰，等，2024. 高地应力隧道滞后型岩爆时空特征影响因素[J]. 铁道建筑，64(10)：94-99.

吕爱钟，1997. 高地应力区地下硐室断面形状的选择方法[J]. 煤炭学报，22(5)：49-52.

马健，鄢双红，董志宏，等，2024. 大型地下厂房水压致裂法地应力测量及地应力场反演分析[J]. 中国农村水利水电(6)：252-258.

孟静，张鹏，王继明，等，2024. 山东龙郓煤业 10·20 冲击地压事故区域应力背景与防控研究[J]. 地质力学学报，30(3)：473-486.

孟文，郭长宝，毛邦燕，等，2021. 中尼铁路交通廊道现今构造应力场及其工程影响[J]. 现代地质，35(1)：167-179.

孟文，田涛，孙东生，等，2022. 基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究[J]. 地质力学学报，28(4)：537-549.

潘军海，2025. 引水隧洞工程开挖围岩应力分布与支护结构施工安全技术优化[J]. 水利科技与经济，31(4)：78-83.

彭建兵，崔鹏，庄建琦，2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报，39(12)：2377-2389.

戚蓝，马启超，2000. 在地应力场分析的基础上探讨地下洞室长轴向选取和围岩稳定性[J]. 岩石力学与工程学报，19(S1)：1120-1123.

邵晨超，李远富，邹鑫，等，2020. 基于 CBR 的铁路工程岩爆预防措施决策模型研究[J]. 铁道标准设计，64(5)：132-136.

孙飞跃，郭佳奇，张小兵，等，2025. 真三轴单面卸荷条件下隧道岩

爆特征的径向应力梯度效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 44(2): 373-390.

陶文斌, 张志峰, 王飞, 等, 2025. 毛羽山特长公路软岩隧道初始地应力反演分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 48(7): 983-988, 995.

陶振宇, 1987. 高地应力区的岩爆及其判别[J]. 人民长江, 18(5): 25-32.

王斌, 孙东生, 李阿伟, 等, 2024. 松辽盆地深部基底地应力状态: 来自松科2井地应力实测数据的证据[J]. 地学前缘, 31(2): 377-390.

王成虎, 宋成科, 刘立鹏, 2012. 地下洞室围岩脆性破坏时的应力特征研究[J]. 岩土力学, 33(S1): 1-7.

王成虎, 李尉, 2025. 近10年(2014—2025年)地应力测试与估算方法的主要进展及展望[J]. 地质力学学报, 31(6): 1188-1209.

王栋, 王剑锋, 李天斌, 等, 2021. 西南山区某铁路隧道口高位落石三维运动特征分析[J]. 地质力学学报, 27(1): 96-104.

王钧荣, 蒲松, 姚志刚, 等, 2025. 高地应力水平层状硬岩隧道岩爆孕育机理[J]. 公路交通科技, 42(5): 173-183.

王晓强, 路星, 刘斌, 等, 2009. 新疆地区现今地壳垂直运动及地震活动研究[J]. 大地测量与地球动力学, 29(6): 22-27, 31.

肖海帆, 武凝雨, 高桂云, 等, 2025. 基于线性化拟合的水压致裂特征压力参数判定方法[J]. 地质力学学报, 31(6): 1282-1295.

谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等, 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 47(4): 654-662.

谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等, 2007. 中国大陆地壳应力环境基础数据库[J]. 地球物理学进展, 22(1): 131-136.

许博, 谢和平, 涂扬举, 2007. 瀑布沟水电站地下厂房开挖过程中岩爆应力状态的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 26(S1): 2894-2900.

徐良鑫, 冉勇康, 梁明剑, 等, 2020. 新疆巴里坤1842年和1914年2次$M7\frac{1}{2}$历史地震地表破裂的几何展布及特征[J]. 地震地质, 42(1): 1-17.

徐林生, 王兰生, 1999. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 21(5): 569-572.

杨树新, 姚瑞, 李玉江, 等, 2025. 地应力与地震研究进展及展望[J]. 地质力学学报, 31(6): 1127-1145.

姚囝, 张义礼, 刘洋, 等, 2025. 基于PCA, CBLOF和SVMSMOTE算法组合的岩爆烈度等级分级预测[J]. 岩石力学与工程学报, 44(5): 1230-1241.

尹升华, 寇永渊, 周昀, 等, 2025. 深部硐室群布置方式及开挖顺序优化研究[J]. 工程科学学报, 47(4): 628-641.

余莉, 尤哲敏, 陈建平, 等, 2015. 高地应力地区隧道围岩分级研究[J]. 现代隧道技术, 52(3): 23-30.

袁海洋, 吴传勇, 于晓辉, 等, 2025. 东天山博格达北缘断裂东段晚第四纪活动特征[J]. 地震工程学报, 47(5): 1243-1250.

张镜剑, 傅冰骏, 2008. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 27(10): 2034-2042.

赵春雷, 张延新, 李自硕, 等, 2025. 基于地应力场反演的地下厂房开挖方案比选研究[J]. 地质力学学报, 31(6): 1255-1267.

赵晖, 张浩然, 2025. 基于能量准则的深埋长隧洞岩爆评价及数值模拟分析[J]. 钻探工程, 52(3): 55-62.

祝雨杭, 陈世万, 阮亮, 等, 2025. 鸡公岭磷矿岩爆倾向性评价研究[J]. 水利水电技术(中英文), 56(6): 227-240.