

高原山区高地应力铁路隧道岩爆与大变形超前地质预报研究

冯涛¹, 周航^{1,2*}, 袁东¹, 申玉生³, 李杨⁴, 刘利⁴, 刘锦良⁴, 赵家兴⁵,

于振江¹

1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都, 610031
2. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 四川成都, 611756
3. 西南交通大学交通 隧道工程教育部重点实验室, 四川成都, 610031
4. 中铁十八局集团有限公司, 天津, 300222
5. 中国铁路青藏集团有限公司, 青海西宁, 810000

摘要: 高原山区高地应力铁路隧道施工通常面临岩爆和大变形等地质风险, 严重制约国家重大铁路工程建设的顺利实施。本文在剖析高原山区铁路隧道高地应力岩爆和大变形特征的基础上, 构建了一套以“物钻结合、长短结合、靶向钻探、精准预报”为核心理念的综合超前地质预报理论与方法体系。通过系统研究环青藏高原等高原山区典型岩爆和大变形隧道工程案例, 明确了高地应力是岩爆和大变形灾害的核心能量来源, 阐明了岩性与地质结构对灾害类型的控制作用, 总结了脆性剥落、碎块弹射及柔性挤压、钢架扭曲等典型破坏特征。遵循“定性定量相结合、初判详判两步骤”的预报理念, 创建了基于表观特征、地应力、岩体强度、TSP 参数的多指标岩爆和大变形超前地质预报标准, 形成了“辨性-观形-察孔-听声”掌子面岩爆风险现场快速确认方法和“敲岩质-估层厚-看节理-识构造-观缩径”掌子面大变形风险现场快速确认方法。经现场实例验证, 该超前地质预报技术体系对高地应力区岩爆和大变形的空间位置、规模及风险等级的预测结果与工程实际吻合度高, 预报准确率均超过了 90%, 实现了高地应力隧道重大地质风险的快速准确判识, 大幅减少了岩爆地段安全隐患和大变形地段钢拱架拆坏率。该超前地质预报技术体系可为类似复杂地质条件下的山区铁路高地应力隧道施工安全提供重要的技术支撑与决策依据。

关键词: 高原山区; 铁路隧道; 高地应力; 岩爆; 大变形; 超前地质预报

中图分类号: TU45

收稿日期: 2026-04-21

Advanced Geological Prediction of Rockburst and Large Deformation of High-geo Stress Railway Tunnel in Plateau Mountain Area

Feng Tao¹, Zhou Hang^{1,2*}, Yuan Dong¹, Shen Yusheng³, Li Yang⁴, Liu Li⁴, Liu Jinliang⁴, Zhao Jiaking⁵, Yu Zhenjiang¹

1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China
2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China
3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China
4. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China
5. China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining 810000, China

Abstract: Under the background of high-geo stress, the construction of railway tunnels in plateau mountainous areas usually faces geological risks such as rockburst and large deformation, which seriously restricts the smooth implementation of major national railway

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.42572379); 深地国家科技重大专项 (No.2024ZD1000705); 西藏自治区重点自然科学基金项目 (Nos.XZ202401ZR0083; XZ202601ZY0243); 中铁二院科研项目 (No.KSNQ232025)

作者简介: 冯涛(1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事铁路地质勘察方面的研究. E-mail: 88994680@qq.com

***通讯作者:** 周航(1995—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事隧道重大地质灾害危险性评价与控制方面的研究. ORCID: 0000-0002-9205-8634. E-mail: zhouhangcreec@163.com

projects. Based on the analysis of the characteristics of high-geo stress rockburst and large deformation of railway tunnels in plateau mountainous areas, this paper constructs a set of comprehensive advanced geological prediction theory and method system with the core concept of 'combination of material drilling, long and short combination, targeted drilling and accurate prediction'. Through the systematic study of typical rockburst and large deformation tunnel engineering cases around the Qinghai-Tibet Plateau, it is clear that high ground stress is the core energy source of rockburst and large deformation disasters, and the control effect of lithology and geological structure on disaster types is clarified. Typical failure characteristics such as brittle spalling, fragment ejection and flexible extrusion, and steel frame distortion are summarized. Following the prediction concept of "combination of qualitative and quantitative, preliminary judgment and detailed judgment," the multi-index rockburst and large deformation advance geological prediction standards based on apparent characteristics, in-situ stress, rock mass strength and TSP parameters are established. The rapid on-site confirmation method of rockburst risk on the working face of "distinguishing-observation-observation-listening" and the rapid on-site confirmation method of large deformation risk on the working face of "knocking rock-estimating layer thickness-looking joints-understanding structure-looking necking" are formed. It is verified by field examples that the prediction results of the spatial location, scale and risk level of rockburst and large deformation in high ground stress area by the advanced geological prediction technology system are in good agreement with the actual engineering, and the prediction accuracy is more than 90 %. It realizes the rapid and accurate identification of major geological risks in high ground stress tunnels, and greatly reduces the safety hazards in rockburst areas and the demolition rate of steel arches in large deformation areas. The advanced geological prediction technology system can provide important technical support and decision-making basis for the construction safety of railway high ground stress tunnels in similar complex geological mountainous areas.

Key words: plateau mountainous areas; railway tunnel; high-geo stress; rockburst; large deformation; advanced geological prediction

随着我国“交通强国”战略的深入实施与西部大开发新格局的加快构建，环青藏高原等高原山区铁路建设已成为打通区域发展动脉、促进国土空间均衡开发的关键工程。然而，环青藏高原地质环境之复杂、构造作用之强烈、工程挑战之艰巨世所罕见，加之地形起伏大，隧道工程建设过程直面活动断裂、高地应力等极端地质条件的多重考验（郭长宝等，2012；张永双等，2016；强新刚等，2025）。环青藏高原高地应力隧道岩爆和大变形等地质风险极高，往往导致工期严重延误、投资大幅攀升，甚至造成重大生命财产损失（何满潮，2014；冯夏庭等，2019；彭建兵等，2020；张广泽等，2021；张永双等，2021；冯涛等，2024；周航等，2024a；张永双等，2025）。因此，高地应力隧道重大地质风险的精准预报与有效防控，已成为制约环青藏高原铁路隧道安全高效建设的核心技术瓶颈。

国内外学者针对岩爆、大变形等隧道施工重大不良地质的超前地质预报与探测技术开展了大量研究。Richard *et al.*（2002）探讨分析了地质波反射法（TSP）在隧道超前地质预报中的应用；Luo *et al.*（2025）提出了 TSP 全过程处理方法，基于震源-接收器对的椭圆等时面原理，在成像阶段采用自动叠加法生成不连续性概率图，能准确判识掌子面前方围岩破碎程度，为隧道超前地质预报提供高效数据处理流程；赵永贵等（2003）总结分析了地质雷达法、TSP 等方法在隧道超前地质预报中的应用及存在的问题，为后续超前地质预报方法组合提供了理论基础；李术才等（2014）在归纳分析国内外超前地质预报资料的基础上，总结了钻爆法和 TBM 法隧道施工中有效的超前地质预报方法；刘建国等（2023）针对硬质岩隧道岩爆案例，提出了基于 TSP 物性参数预测岩爆的方法，并采用地质调查法、TSP、微震监测等方法构建了一套岩爆预测技术体系；许广春等（2025）聚焦高地应力区岩爆、大变形等不良地质，提出了铁路隧道各类不良地质的风险判识方法。上述学者基于 TSP、地质雷达、瞬变电磁、钻探等一种或多种方法，形成了一套相对成熟的超前地质预报技术体系，为高地应力岩爆和大变形隧道施工提供了参考，但面对环青藏高原等高原山区铁路隧道“深、长、大、群”的建设趋势，以及高地应力、活跃构造等复杂地质环境，超前地质预报技术仍面临严峻挑战。具体而言，现行规范与常规预报方法多侧重于高地应力岩爆与大变形灾害发生后的现象描述与等级确认，而缺少面向施工的超前地质预报具体标准与风险现场快速确认原则，致使对高地应力区岩爆倾向性与大变形潜势的预判往往滞后于开挖揭示，预警时效性较差，主动防控能力较薄弱。

本文以环青藏高原高地应力铁路隧道为工程依托，针对“高地应力岩爆和大变形”等典型工程地质风险，

总结分析了高原山区铁路高地应力区岩爆与大变形特征，重点研究建立以地应力、岩体强度、岩性组合及TSP等参数为核心的岩爆与大变形量化预报指标体系与现场快速判别准则，准确辨识高地应力区岩爆和大变形的空间位置、规模及风险等级，以期为环青藏高原等高原山区铁路高地应力隧道重大地质风险防控、安全施工及运营提供技术支撑。

1 高地应力区岩爆与大变形特征

由于印度洋板块对欧亚板块的强烈碰撞挤压作用，导致青藏高原及周边铁路沿线地质构造运动强烈，该区域水平应力值相对较高，且应力方向具有显著的空间差异性（徐正宣等，2021；张永双等，2025）。在此构造应力场下，深埋隧道围岩的应力演化可分为缓慢积累期、应力调整期以及应力突变期。环青藏高原区域的高地应力场主要集中在青藏高原东缘和内部板块缝合带、断层密集区（杨树新等，2012），地应力测试钻孔处的岩芯多呈饼芯状。此外，环青藏高原多座铁路隧道最大埋深超过1000m，加之区域构造作用异常强烈，深埋长大隧道工程的实测地应力值常常超过岩石单轴抗压强度的30%~40%，使得岩爆和大变形问题从“可能风险”转变为“必然挑战”（严健等，2019；陈仕阔等，2021；Zhou *et al.*, 2021；周航等，2022；张永双等，2022；周航等，2024b；周航等，2025）。

1.1 高地应力区岩爆特征

高地应力背景下隧道穿越花岗岩、闪长岩、片麻岩等硬质岩层时，当硬质岩层所受差应力超过其储能极限，且卸荷速率足够快，导致弹性应变能瞬间猛烈释放，发生岩爆灾害（图1）。本文通过归纳总结川青铁路、成康铁路、拉林铁路、雅康公路、锦屏二级水电站等环青藏高原典型隧道岩爆案例（表1），发现岩爆一般具有以下主要特征：①岩爆主要与围岩性质、岩石力学性质和高地应力环境等有关。②高地应力是岩爆的主要能量来源，隧址区最大主应力多介于30~60 MPa，应力卸荷易引发中等至强烈岩爆；③岩爆多发生于坚硬、脆性大、强度高的岩体中，且掌子面多为干燥无水，如花岗岩、闪长岩等典型硬脆岩石；④围岩单轴抗压强度高且各向异性显著，弹性能积聚与突然释放是岩爆发生的直接原因；⑤断层带本身岩爆少见，但其影响带易形成应力集中与局部异常应力场，同样具有中等至强烈岩爆风险；⑥岩爆等级越高，破坏特征越明显，弹射前常伴有炸裂声及清脆响声，主要表现形式包括大片剥落、岩石劈裂及碎块弹射等。

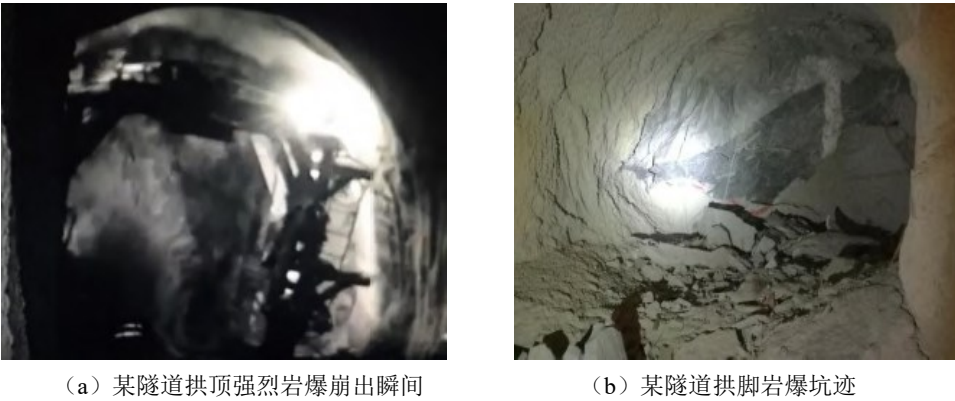


图 1 环青藏高原某铁路隧道岩爆破坏特征

Fig.1 Rockburst failure characteristics of a railway tunnel around Qinghai-Tibet Plateau

表 1 环青藏高原典型隧道岩爆案例

Table 1 Typical tunnel rockburst cases around Qinghai-Tibet Plateau

隧道名称	隧道长度/km	最大埋深/m	地层岩性	最大主应力/MPa	岩石单轴抗压强度/MPa	地下水	地质构造	岩爆等级及破坏特征
川青铁路平安隧道	28.426	1720	灰岩夹砂岩	48.2	133	干燥	穿越西秦岭地震带、龙门山地震带，隧道处于岷江活动断裂带下盘	轻微~中等~强烈岩爆，围岩爆裂松脱、剥落、弹射等现象
成康铁路折多山隧道	19.763	1124	花岗岩、石英砂岩	48	90~140	干燥	穿越玉龙希断裂带	轻微~中等~强烈岩爆

拉林铁路岗木拉隧道	11.66	1827	闪长岩、片麻岩	48.4	95.3~110.9	干燥	穿越森波断层和里龙断裂带	轻微~中等~强烈岩爆
拉林铁路巴玉隧道	13.047	2073	花岗岩	44.5	150~170	干燥	穿越藏木断层	轻微~中等~强烈岩爆
拉林铁路桑珠岭隧道	16.449	1347	花岗岩、闪长岩	38.2	150~160	干燥	发育一系列近东西向和近南北向的断裂构造	轻微~中等~强烈岩爆，多发生在边墙和拱脚
雅康公路二郎山隧道	13.4	1469	花岗岩、闪长岩、灰岩、砂岩	46.17	62.29	干燥	位于扬子准地台与潘松一甘孜造山带的衔接过渡部位，包括沪定断裂等	先后发生 200 多次轻微~中等~强烈岩爆
锦屏二级水电站深埋隧道群	16.7	2525	大理岩等	70.1	110~120	干燥~滴水	发育一系列近南北向展布的紧密复式褶皱和高倾角的压性或压扭性走向断裂	轻微~中等~强烈岩爆

1.2 高地应力区大变形特征

高地应力背景下隧道穿越千枚岩、页岩、板岩、泥岩等软弱岩层时，当围岩中软弱夹层或破碎带在高构造应力驱动下，发生持续的剪切蠕变与塑性流动，当支护抗力不足以约束其变形速率时，即触发失稳产生具有时间效应的挤压性大变形（图2）。本文通过归纳总结川青铁路、青藏铁路、滇藏铁路、拉林铁路、都汶公路等环青藏高原典型隧道大变形案例（表2），发现大变形一般具有以下主要特征：①千枚岩、片岩、板岩等软弱围岩抗压强度低、各向异性显著，为变形提供物质基础，开挖卸荷后围岩产生强烈流变；②构造应力是大变形的主要能量来源，高至极高地应力环境下，开挖卸荷导致构造应力逐步释放、松动圈缓慢扩大，诱发轻微至强烈挤压大变形；③节理密集带、褶皱核部、断层影响带、断层破碎带等地质构造越发育，围岩完整性越差，加之地下水与风化作用，大变形的可能性和危害性越大；④变形时效性明显，初期速率快、变形量大且持续时间长，围岩与支护结构挤压破坏特征突出，主要破坏方式包括混凝土严重开裂、隧道坍塌、钢架扭曲及边墙挤压变形等。

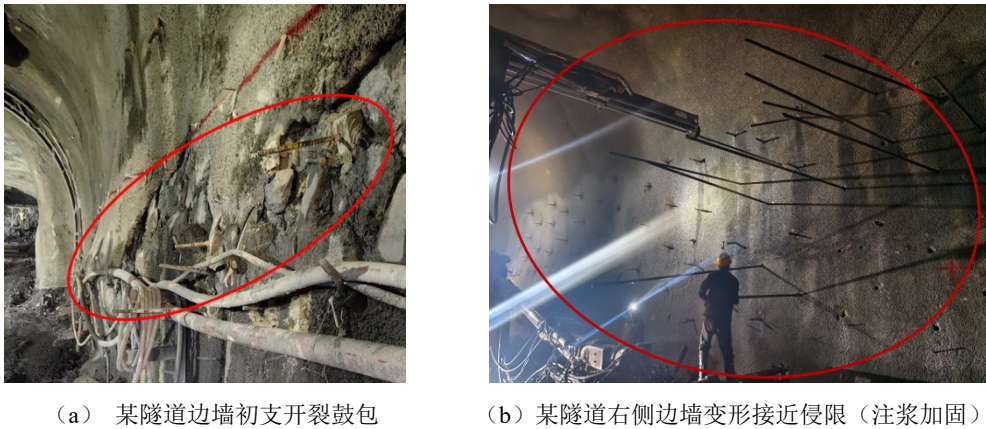


图2 环青藏高原某铁路隧道大变形破坏特征

Fig.2 Large deformation and failure characteristics of a railway tunnel around Qinghai-Tibet Plateau

表2 环青藏高原典型隧道大变形案例

Table 2 Large deformation case of typical tunnel around Qinghai-Tibet Plateau

隧道名称	隧道长度/km	最大埋深/m	地层岩性	最大主应力/MPa	围岩单轴抗压强度/MPa	最大拱顶沉降/mm	最大水平收敛/mm	地质构造	大变形等级及破坏特征
川青铁路杨家坪隧道	10.01	1656	千枚岩、页岩	27.5	1.95	510	810	位于龙门山后山断裂带，区域性大断裂、活动断裂发育	轻微~中等大变形，岩层陡倾导致隧道水平收敛大于拱顶沉降
川青铁路茂县隧道	9.913	1650	千枚岩等	44.7	3.4	950.5	462.4	穿越龙门山后山活动断裂带核心部位	轻微~中等~强烈大变形
青藏铁路新关角隧道	32.645	1100	泥质片岩、灰岩	25.29	5	505	460	隧道区断裂构造发育，穿越 11	隧道底部隆起和两侧边墙挤出，且变形持

				等				条大断裂层	续时间长
滇藏铁路中义隧道	14.745	1240	凝灰岩、玄武岩	25.1	0.573 (片理化玄武岩)	100	868	青藏高原东南缘之川滇断块的西部边界断裂带	轻微~中等~强烈大变形, 初期支护严重损坏, 多个地段需换拱
拉林铁路令达拿隧道	2.51	322	炭质千枚岩、砂岩等	10.2	3.3~3.9	/	/	受区域雅鲁藏布江断裂带(F1-5-3)影响严重, 节理发育	轻微~中等~强烈大变形, 围岩与支护结构破坏特征明显
都汶公路龙溪隧道	3.691	840	含碎石或块石的粉质黏土	25~27	9.5 (岩石强度)	1471	432	隧址区穿越龙门山构造带中段	轻微~中等大变形, 混凝土开裂、剥落, 钢拱架扭曲变形, 局部出现鼓出等

2 超前地质预报理论与方法体系

针对环青藏高原铁路隧道高地应力岩爆与大变形等重大不良地质灾害的发育特征, 构建了“物钻结合、长短结合、靶向钻探、精准预报”的超前地质预报工作流程(图3)。可简要概述为: 基于相同地应力、地形、岩性和埋深条件, 采用超前导坑预报法预测后行洞岩爆与大变形的宏观区段。通过地质调查法获取围岩表观特征, 基于 TSP 预报参数初步判定岩爆和大变形风险段落。针对掌子面前方地质条件, 利用钻探获取岩石强度与地应力数据, 采用强度应力比法详细判定岩爆与大变形风险等级。综合上述成果, 实现对掌子面前方岩爆与大变形区段及风险等级的综合预报。该方法融合多种预报手段, 形成从宏观到细部的逐级预测体系, 有效提升环青藏高原高地应力铁路隧道工程岩爆和大变形灾害风险预报的可靠性与精度。

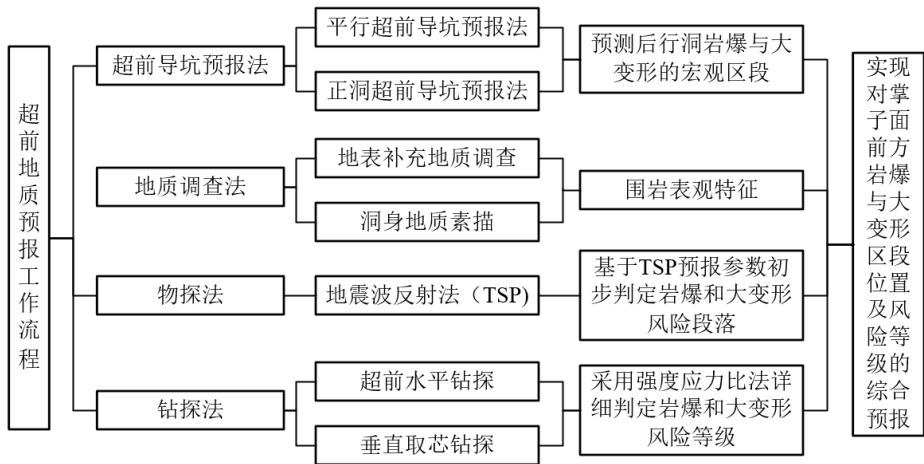


图3 超前地质预报工作流程

Fig.3 Working process of advanced geological prediction

2.1 高地应力区岩爆超前地质预报

根据《铁路工程不良地质勘察规程》TB 10027-2022 附录 H.0.2, 岩爆确认根据最大初始地应力值和岩石强度, 判识岩石强度应力比 $R/\sigma_{\max}$, 在岩爆发生后根据岩爆声响、岩石爆裂特征、影响深度等方面判识岩爆等级。岩爆当前没有预报标准且规范内定性、定量等指标混杂, 施工过程中往往以岩爆发生特征作为岩爆确认依据, 现场实际工作可操作性差, 存在安全隐患。因此, 针对当前规范中相关岩爆指标进行分类分项分级, 建立岩爆超前地质预报标准, 减少钢拱架拆换率, 降低安全风险和工期影响。

2.1.1 岩爆超前地质预报标准

岩爆发生具有突发性, 严重时会产生岩块的弹射、喷射, 严重危及施工人员安全, 影响现场施工效率, 为减少岩爆施工风险, 通过总结岩爆发生规律, 采用“定性与定量相结合, 初判与详判两步骤”总体原则, 创建了基于表观特征、地应力、岩体强度、TSP 参数的多指标岩爆超前地质预报标准(图4)。根据定性判据和定量初判原则, 初步确认岩爆可能性和等级。以施工岩爆里程 TSP 预报参数为基础, 分析掌子面前方一定范围内 TSP 纵横波波速、泊松比、密度、动态杨氏模量的变化趋势及变化幅度, 综合确定前方围岩

完整性及地下水分段发育情况，结合岩爆发生环境，预测岩爆风险段落。根据地应力测试和取样强度试验数据，定量详判岩爆等级。做好支护后，执行《铁路工程不良地质勘察规程》（TB10027-2022）岩爆确认标准，根据围岩支护变形破坏特征，必要时补强支护措施；若补强后仍无法有效控制，应提高岩爆等级，实施上一级支护措施，必要时需拆换支护。

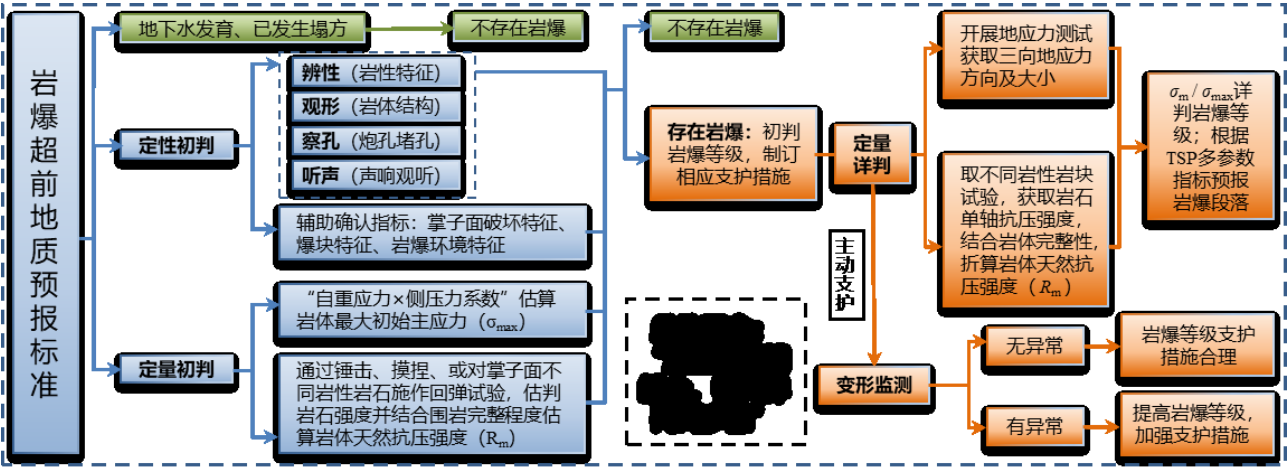


图 4 岩爆超前地质预报标准

Fig.4 Advanced geological prediction standard of rockburst

2.1.2 岩爆现场快速确认定性判据

岩爆预报定性初判采用“辨性-观形-察孔-听声”，结合岩体特性、宏观表象与声学信号，为现场快速识别岩爆风险提供快速确认定性判据（表 3）。

表 3 岩爆现场快速确认定性判据

Table 3 Qualitative criterion for rapid confirmation of rock burst site

岩爆等级	辨性	观形	察孔	听声
轻微	硬质矿物为主、粗中～细粒致密状	结构面紧闭，少量片板化，结构面平直新鲜	炮孔个别轻微有堵孔现象	人耳偶尔可听到围岩表层噼啪、撕裂声
中等	硬质矿物为主、中-细粒致密状	结构面紧闭，大量片板化，结构面新鲜	炮孔个别有堵孔现象	人耳偶尔可听到围岩表层有似雷管爆破的清脆爆裂声，围岩浅部岩体撕裂声
强烈	硬质矿物、细粒致密状	结构面与洞轴小角度相交，结构面紧闭，大量板块化，结构面新鲜	炮孔钻进缓慢，少量有堵孔现象	人耳偶尔可听到围岩表层有似爆破的爆裂声，声响强烈且持续时间长，围岩深部岩体撕裂闷响声
极强	硬质矿物、细粒致密状	结构面与洞轴小角度相交，结构面紧闭，大量板块化，结构面新鲜	炮孔钻进明显缓慢，少量有堵孔现象	人耳偶尔可听到围岩表层有似炮弹的爆裂声，声响剧烈且持续时间长，围岩深部岩体撕裂闷雷声

在隧道施工过程中，通过“辨性-观形-察孔-听声”快速捕捉岩爆孕育前兆特征信息，预报掌子面附近岩爆发生的等级和部位。4 项指标中须满足 3 项指标方可预报岩爆；当 3 项指标中有 2 项满足某等级岩爆特征时，可预报为该等级岩爆；当 4 项指标中同时有 2 项分别满足不同等级岩爆特征时，取较高等级作为岩爆预报等级。

2.1.3 岩爆预报定量判据

(1) 初判

根据“自重应力×侧压力系数”估算岩体最大初始主应力（ σ_{max} ）。其中，自重应力根据 γ_h 估算，侧压力系数借鉴勘察期间成果，多为 1.1~1.2，部分地段可达 1.3~1.4。通过锤击、摸捏，或对掌子面不同岩性岩石施作回弹试验，估判岩石强度并结合围岩完整程度估算岩体天然抗压强度（ R ）。采用强度应力比法计算，初判岩爆可能性和危险性等级。

(2) 详判

开展地应力测试获取三向地应力方向及大小按照 500~1000m 间距向洞周施钻定向钻孔，实施应力解除法等地应力测试，获取地应力参数。取不同岩性岩块作单轴抗压强度试验，或者对掌子面不同岩性岩石施作回弹试验，折算岩体天然抗压强度。采用最大主应力和强度应力比双指标判据，详判岩爆等级，高地

应力岩爆双指标分级判据及标准如表 4 所示。

表 4 高地应力岩爆双指标分级判据及标准（据《铁路工程不良地质勘察规程》（TB10027-2022））

Table 4 Double index classification criterion and standard of high-geo stress rockburst (According to the ' Railway Engineering Bad Geological Survey Regulations ' (TB10027-2022))

岩爆分级	最大初始地应力值 σ_{max} (MPa)	岩石强度应力比 R/σ_{max}	分级描述
轻微	$20 \leq \sigma_{max} \leq 60$	$3 < R/\sigma_{max} \leq 4$	隧道围岩为硬岩或极硬岩，较完整或完整。开挖后围岩表层有爆裂、剥离现象，内部有噼啪、撕裂声，人耳偶然可听到，无弹射现象；主要表现为洞顶的劈裂~松脱破坏和侧壁的劈裂~松脱、隆起等；岩爆零星间隔发生，影响深度小于 0.5 m；对施工影响小
中等		$2 < R/\sigma_{max} \leq 3$	隧道围岩为硬岩或极硬岩，较完整或完整，地下水活动弱，岩心有饼化现象。开挖后围岩爆裂、剥离现象较严重，有少量弹射，破坏范围明显；有似雷管爆破的清脆爆裂声，人耳常可听到围岩内的岩石撕裂声；有一定持续时间，影响深度 0.5 m~1 m；对施工影响较大
强烈	$30 \leq \sigma_{max} \leq 80$	$1 < R/\sigma_{max} \leq 2$	隧道围岩为极硬岩，较完整或完整，地下水活动微弱，岩心饼化现象明显。开挖后围岩大片爆裂脱落，出现强烈弹射，发生岩块的抛射及岩粉喷射现象；有似爆破的爆裂声，声响强烈；持续时间长，并向围岩深部发展，破坏范围和块度大，影响深度 1m~3m；对施工影响大
极强	$\sigma_{max} \geq 60$	$R/\sigma_{max} \leq 1$	隧道围岩为极硬岩，较完整或完整，地下水活动微弱，岩心饼化现象明显。开挖后围岩大片严重爆裂，大块岩片出现剧烈弹射，震动强烈，有似炮弹、闷雷声，声响剧烈；迅速向围岩深部发展，破坏范围和块度大，影响深度大于 3 m；对施工影响极大

注：当最大初始地应力值 S_{max} 和岩石强度应力比 R_c/S_{max} 的判别结果不一致或仅相差一级，选择较高岩爆分级。

2.2 高地应力大变形超前地质预报

根据《铁路工程不良地质勘察规程》TB 10027-2022 附录 H.0.3，软岩大变形确认根据最大初始地应力值，判识岩体强度应力比 R_m/σ_{max} ，在大变形发生后根据相对变形量、围岩变形特征等方面判识大变形等级。当前国内规范针对大变形的确认指标基本相同，均为表观特征、强度应力比、相对变形量、变形速率等几项，但在分级阈值上存在一定差异，各类规范中均将定性特征、定量特征、监控量测数据、初支变形破坏情况综合在一起考虑，且缺少对掌子面前方大变形段落的判定依据。在以往工程实际操作中往往把监控量测数据、初支变形破坏情况作为判据来判定掌子面大变形等级，造成大变形措施施作滞后，难免会造成钢拱架拆换和断面扩挖，导致投资浪费、换拱安全风险和工期影响，因此针对当前规范中相关指标进行分类分项分级，建立软岩大变形预报标准，减少钢拱架拆换率，降低安全风险和工期影响。

2.2.1 大变形超前地质预报标准

通过研究分析高地应力大变形规律，采用“定性与定量相结合，初判与详判两步骤”总体原则，创建了基于表观特征、地应力、岩体强度、TSP 参数的多指标大变形超前地质预报标准（图 5）。根据定性判据和定量初判原则，初步确认大变形可能性和等级。基于 TSP 探测获取的纵横波波速、泊松比、密度、杨氏模量等多参数的变化趋势，判识掌子面前方围岩节理发育程度和岩体完整性，分析岩体蓄能特征，预测软岩大变形段落。根据地应力测试和点荷载试验数据，定量详判大变形等级。做好支护后，根据位移监控量测结果校核预报成果。若位移沉降值超过监控量测管理办法阈值，应及时采取长短锚杆补强；若补强后仍无法收敛，应提高软岩大变形等级，实施上一级支护措施，必要时需拆换支护。

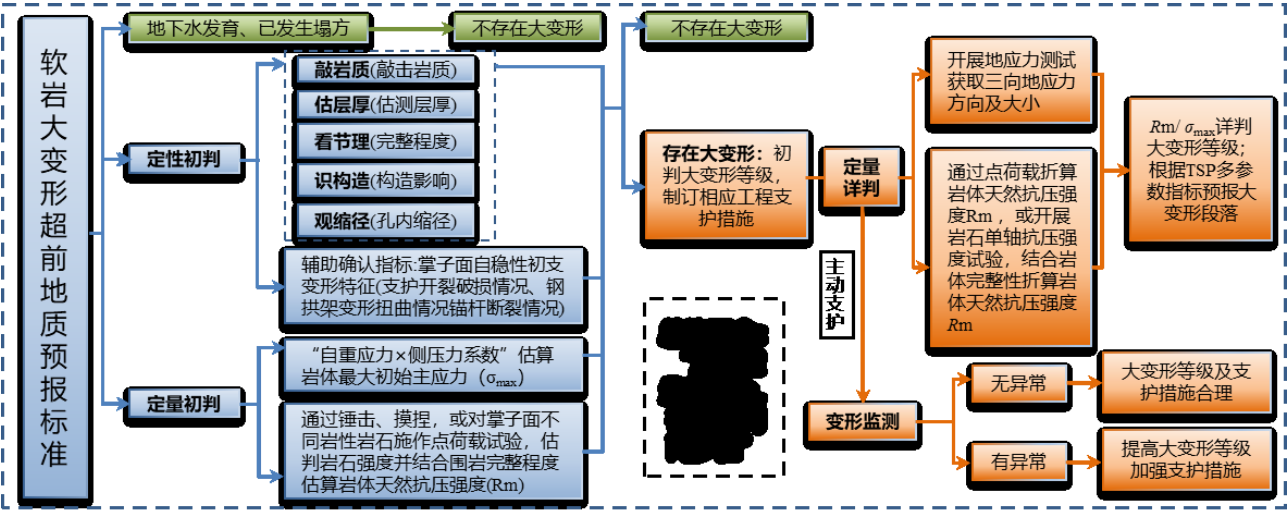


图 5 软岩大变形超前地质预报标准流程

Fig.5 Standard flow chart of advanced geological prediction for large deformation of soft rock

2.2.2 大变形现场快速确认定性判据

大变形预报定性初判 15 字方针“敲岩质-估层厚-看节理-识构造-观缩径”，该方针从岩性、结构到表观特征实时现象，系统指导隧道施工中的大变形风险初步判断，大变形现场快速确认定性判据如表 5 所示。

表 5 大变形现场快速确认定性判据一览表

Table 5 List of qualitative criteria for rapid confirmation of large deformation site

大变形等级	敲岩质	估层厚	看节理	识构造	观缩径
轻微（I）	围岩以较软岩为主	中厚层～较薄层	较破碎～破碎	揉曲、褶皱较少	无明显缩径现象
中等（II）	围岩以软岩为主或为断层影响带	多为较薄层	破碎	揉曲、褶皱较多	有缩径现象
强烈（III）	围岩以极软岩为主或为断层角砾	多为中薄～极薄层	破碎～极破碎	揉曲、褶皱多	缩径现象较明显
极强（IV）	围岩为极软岩或断层泥砾带	多为极薄层	极破碎	揉曲、褶皱极多	钻孔缩径现象明显

2.2.3 大变形预报定量判据

（1）初判原则

根据“自重应力×侧压力系数”估算岩体最大初始主应力（ σ_{max} ）。其中，自重应力根据 γ_h 估算，侧压力系数借鉴勘察期间成果。通过锤击、摸捏，或对掌子面不同岩性岩石施作点荷载试验，估判岩石强度并结合围岩完整程度估算岩体天然抗压强度（ R_m ）。采用强度应力比法计算，初判大变形可能性和危险性等级。

（2）详判原则

开展地应力测试获取三向地应力方向及大小。可在调车洞、避车洞、横通道等不干扰掌子面施工的地段，按照 500m 间距施钻竖向取芯孔，实施水压致裂法、滞弹性应变恢复法等地应力测试。但环青藏高原等高原山区铁路隧道活动断裂发育，受构造夹持小区域应力变化快，如出现岩性变化、地表沟谷段落等特殊状况，应加密点荷载及地应力测试频次。取不同岩性岩块作点荷载试验（每类试样不少于 12 个）或岩石单轴抗压强度试验，结合岩体完整程度，折算岩体天然抗压强度（ R_m ）。采用最大主应力和强度应力比双指标判据，详判大变形等级，高地应力大变形双指标分级判据及标准如表 6 所示。

表 6 高地应力大变形双指标分级判据及标准（据《铁路工程不良地质勘察规程》（TB10027-2022））

Table 6 Double index classification criterion and standard of high-geo stress and large deformation (According to the ' Railway Engineering Bad Geological Survey Regulations ' (TB10027-2022))

大变形等级	最大初始地应力值 σ_{max} (MPa)	岩体强度应力比 R_m/σ_{max}	围岩变形特征
轻微（I）	$\sigma_{max} \geq 10$	$0.25 < R_m/\sigma_{max} \leq 0.5$	隧道围岩以较软岩为主，中厚层～较薄层，岩体较破碎～破碎，岩心有饼化现象，围岩分级IV～V级。开挖后围岩位移较大，持续时间较长；一般支护开裂或破损较严重，喷混开裂，钢拱架局部与喷层脱离，相对变形量 1%～2.5%，围岩自稳时间短，以塑流型、弯曲型、滑移型变形模式为主，兼有剪切型变形
中等（II）		$0.15 < R_m/\sigma_{max} \leq 0.25$	隧道围岩以软岩为主或为断层影响带，岩层多为较薄层，岩体破碎，钻孔有缩径现象，围岩分级IV～

大变形等级	最大初始地应力值 σ_{max} (MPa)	岩体强度应力比 R_m/σ_{max}	围岩变形特征
			V级。开挖后围岩位移大,持续时间长;一般支护开裂或破损严重,喷混严重开裂,钢拱架局部变形,锚杆垫板变形,相对变形量 2.5 %~5%,洞底有隆起现象,围岩自稳时间很短,以塑流型、弯曲型变形模式为主
强烈(III)		$0.05 < R_m/\sigma_{max} \leq 0.15$	隧道围岩以极软岩为主或为断层角砾、蚀变带,岩层多为中薄~极薄层,岩体破碎~极破碎,钻孔缩径现象较明显,围岩分级V~VI级。开挖后围岩有剥离现象,围岩位移很大,持续时间长;一般支护开裂或破损严重,喷混大面积严重开裂,钢拱架变形扭曲,甚至折断,锚杆拉断,相对变形量大于 5 %~10 %,洞底有明显隆起现象,流变特征很明显,围岩自稳时间很短,以塑流型为主
极强(IV)		$R_m/\sigma_{max} \leq 0.05$	隧道围岩为极软岩或断层泥砾带,岩层多为极薄层,岩体极破碎,钻孔缩径现象明显,围岩分级V~VI级。开挖后围岩剥离现象明显,围岩位移很大,持续时间长;支护开裂或破损极严重,喷混大面积严重开裂,钢拱架变形扭曲严重,甚至折断,锚杆拉断,相对变形量大于 10 %,洞底显著隆起,流变特征很明显,围岩自稳时间很短,以塑流型为主

注: 1.相对变形量为变形量与隧道当量半径之比。2.大变形分级判别采用岩体天然抗压强度。3.当地应力在 8~10MPa 之间,按强度应力比判定存在大变形时,将大变形等级降低一级进行判定。4.IV 级围岩不考虑强烈、极强大变形,当预判为强烈、极强大变形时,按中等大变形处理。

3 工程应用与验证

3.1 高地应力岩爆超前预报

环青藏高原铁路某隧道全长 26.47km,为单洞双线隧道,最大埋深 1810m。洞身地层岩性主要为英云闪长岩、奥长花岗岩及角闪岩与变粒岩,均为硬质脆性围岩。在隧道勘察期间,16 个深孔地应力测试表明以水平应力为主,最大主应力方向为 N28.2°~85°W,断裂带处可能会发生局部偏转,但整体为 NW 向,与隧道轴向呈小角度相交,实测最大水平主应力 53.06MPa(埋深 2032m),推测隧道洞身最大主应力 51.2MPa。施工期间完成 14 次地应力测试,最大值为 43.63MPa(埋深 1809m)。隧道建设过程中面临的高地应力环境和硬质脆性围岩,为岩爆的发生提供了充足的能量和物质来源。预设计正洞轻微岩爆段落 6140m,中等岩爆 5736m,强烈岩爆 1445m,极强烈岩爆 200m,岩爆段落落在隧道中占比 51.1%。在隧道施工过程中,发生大范围、多点位的轻微岩爆和中等岩爆,强烈岩爆和极强岩爆占比较少(图 6)。



(a) 强烈岩爆



(b) 强烈岩爆导致处置开裂剥落掉块

图 6 环青藏高原铁路某隧道岩爆破破坏特征

Fig.6 Rockburst failure characteristics of a tunnel on the Qinghai-Tibet Plateau railway

3.1.1 岩爆现场快速确认定

环青藏高原铁路某隧道开挖至 D2K257+750(图 7),掌子面开挖揭示为闪长岩,III级围岩,多为粗中粒致密状,结构面紧闭,少量片板化,结构面平直新鲜,在施作加深炮孔过程中存在轻微堵孔现象,围岩表层存在噼啪、撕裂声。根据岩爆现场快速确认定性判据,快速定性判识为轻微岩爆。

3.1.2 岩爆现场定量判断

环青藏高原铁路某隧道 D2K252+295 埋深约 1100m,该区域侧压力系数为 1.13,估算岩体最大初始主应力为 32.3MPa。在掌子面均匀选取 6 块岩块开展岩石单轴抗压强度,估判岩石强度为 86.5MPa,计算强度应力比为 2.67,初步判定为中等岩爆。后续,在隧道 D2K252+150 右侧横通道开展地应力测试,该处理深 1130m,采用水压致裂法实测最大水平主应力为 34.1MPa,计算强度应力比为 2.54,根据高地应力岩爆

双指标分级判据及标准，综合详判为中等岩爆。

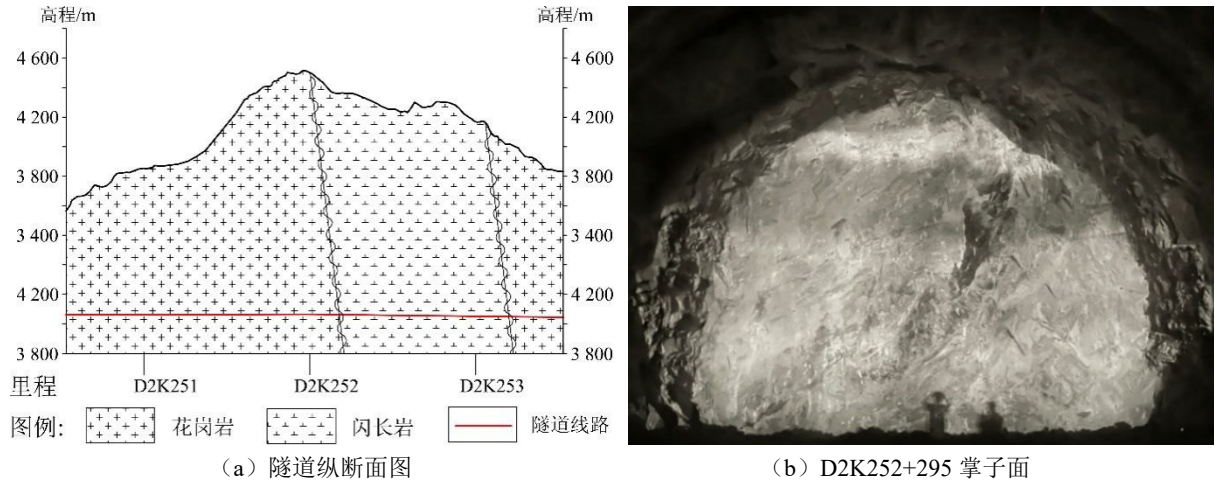


图 7 环青藏高原铁路某隧道纵断面图及 D2K252+295 掌子面

Fig.7 Longitudinal section and D2K257+750 working face of a tunnel on the Qinghai-Tibet Plateau Railway

3.1.3 基于 TSP 多参数指标的岩爆预报

基于 TSP 探测获取的纵横波波速、泊松比、密度、杨氏模量等多参数的变化趋势，判识掌子面前方围岩节理发育程度和岩体完整性，分析岩体蓄能特征，定性预报 D2K252+295~+315 段为岩爆段落，TSP 探测成果图如图 8 所示。

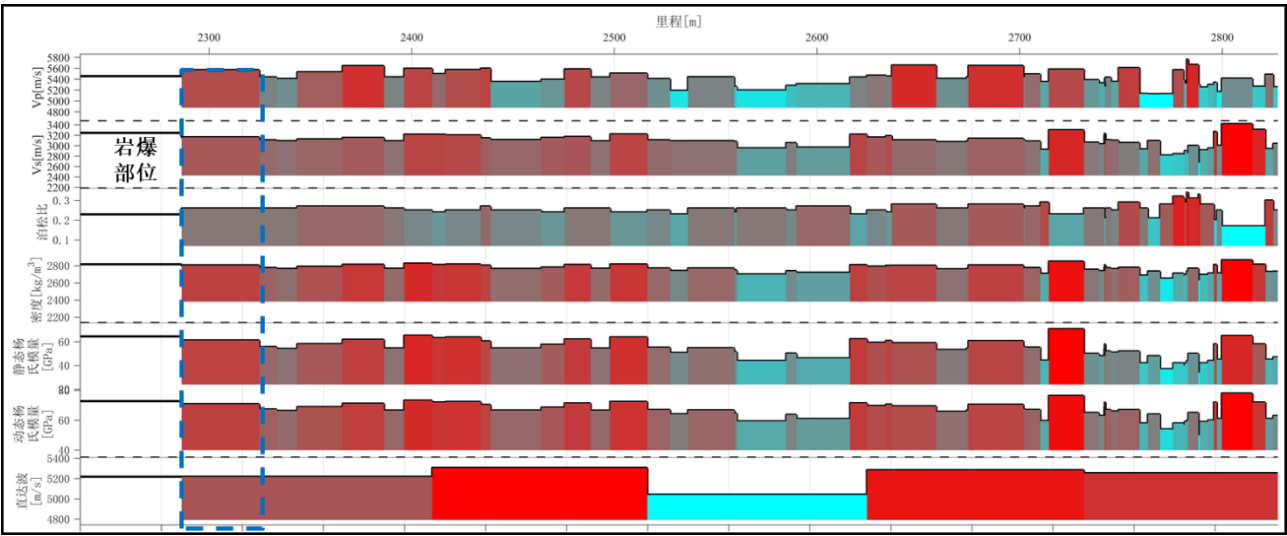


图 8 基于 TSP 多参数指标的岩爆预报成果图

Fig.8 Rockburst prediction result map based on TSP multi-parameter index

3.1.4 工程处置措施与效果

针对环青藏高原铁路某隧道 D2K257+750~+770 段中等岩爆风险，该段拱墙设置钢筋网和锚杆，初喷钢纤维混凝土，初支采用 HW150 钢架，间距 1.2m，二衬采用钢筋混凝土。初支及二衬完成后，无明显异常，表明中等岩爆等级及工程措施合理。

以环青藏高原铁路某隧道 4 号横洞为例，共开展 TSP、微震监测共计 4765m，出具报告 498 份，其中预测无岩爆 109 份，轻微岩爆 279 份，中等岩爆 103 份，中等~强烈岩爆 2 份，强烈岩爆 2 份。预测岩爆等级与开挖揭示一致 449 份，不一致 49 份，预报准确率为 90.1%；预测岩爆等级的长度与开挖揭示一致有 4306m，预报准确率为 90.4%，大幅降低了岩爆地段安全隐患。

3.2 高地应力隧道大变形超前预报

环青藏高原铁路某隧道全长 30.75km，为单洞双线隧道，最大埋深 1100m。洞身地层岩性主要为三叠

系泥岩、砂岩夹页岩，侏罗系泥岩、砂岩为主，整体岩质软。在隧道勘察期间，17 个深孔地应力测试表明以最大水平主应力为主，最大主应力方向为 N53.6°E~N67°W 左右，与隧道纵断面夹角为 20°~40°，实测最大水平主应力 31.5MPa（埋深 806.3m）。隧道建设过程中面临的高地应力环境和软弱破碎围岩，为大变形的发生提供了充足的能量和物质来源。预设计正洞大变形总长 14330m，占比 46.6%，其中轻微大变形段落长 11120m，占 36%；中等大变形段落长 2620m，占 8.5%；强烈大变形段落长 590m，占 2%。在隧道施工过程中，发生大范围、多点位的轻微大变形和中等大变形，环青藏高原铁路某隧道大变形破坏特征如图 9 所示。

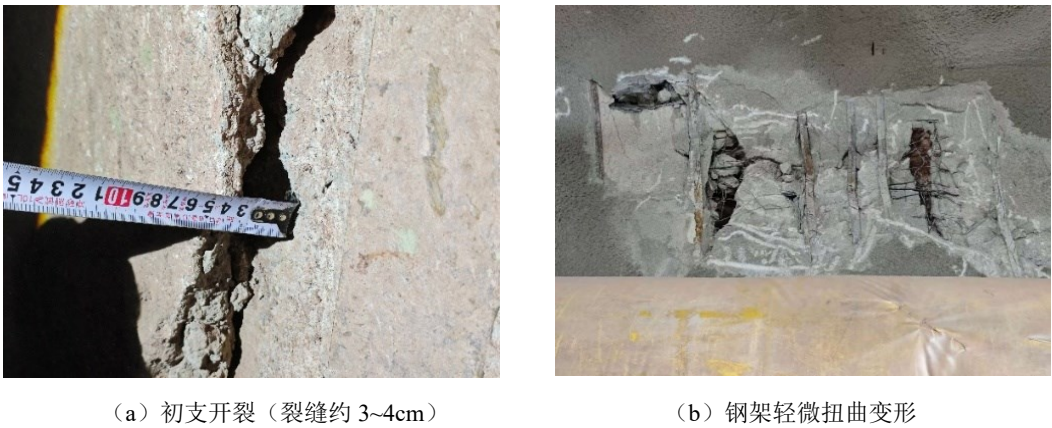


图 9 环青藏高原某铁路隧道大变形破坏特征

Fig.9 Large deformation and failure characteristics of a railway tunnel around Qinghai-Tibet Plateau

3.2.1 大变形现场快速确认

环青藏高原铁路某隧道开挖至 D2K13+260（图 10），掌子面开挖揭示为泥岩、炭质页岩，V级围岩，薄层状夹中厚层状，节理裂隙发育，掩体破碎，岩层轻微扭曲，钻孔内有轻微缩孔现象。根据大变形预报道定性初判 15 字方针“敲岩质-估层厚-看节理-识构造-观缩径”，快速定性判识为中等大变形。

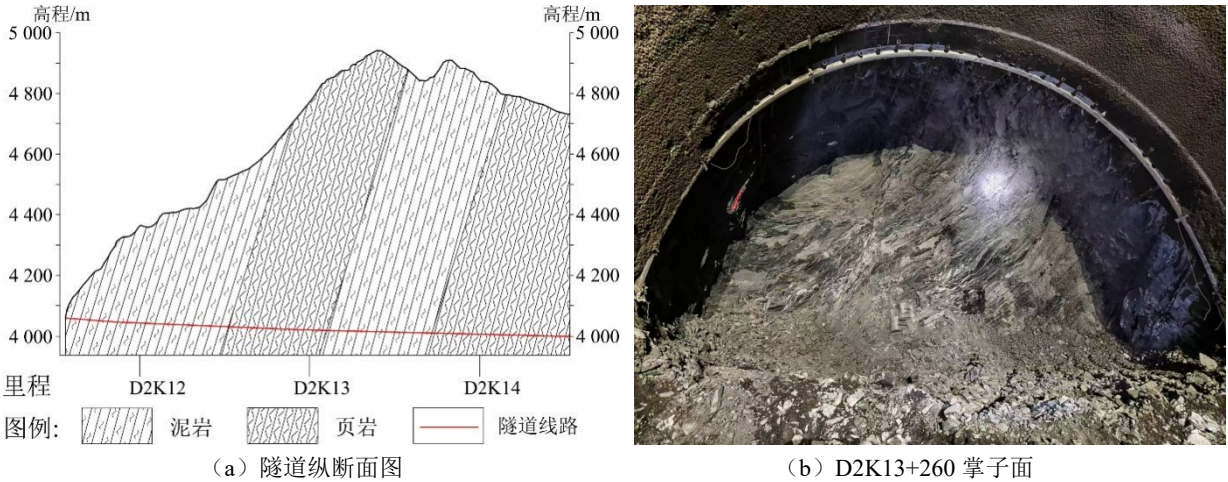


图 10 环青藏高原铁路某隧道纵断面图及 D2K13+260 掌子面

Fig.10 Longitudinal section and D2K13 + 260 working face of a tunnel on the Qinghai-Tibet Plateau Railway

3.2.2 大变形现场定量判断

环青藏高原铁路某隧道掌子面 D2K13+260 处埋深约 850m，该区域侧压力系数为 1.26，估算岩体最大初始主应力为 26.5MPa。在掌子面均匀选取 12 块岩块开展点荷载试验，估判岩石强度为 9.7MPa，岩体完整性系数取 0.45，计算强度应力比为 0.16，初步判定为中等大变形。后续在隧道 D2K856+550 右侧横通道开展地应力测试，该处埋深 832m，采用水压致裂法实测最大水平主应力为 25.6MPa，计算强度应力比为 0.17，根据高地应力大变形双指标分级判据及标准，综合详判为中等大变形。

3.2.3 基于 TSP 多参数指标的大变形预报

基于 TSP 探测获取的纵横波波速、泊松比、密度、杨氏模量等多参数的变化趋势，判识掌子面前方围岩节理发育程度和岩体完整性，分析岩体蓄能特征，定性预报 D2K13+260~+240 段为软岩大变形段落，TSP 探测成果图如图 11 所示。

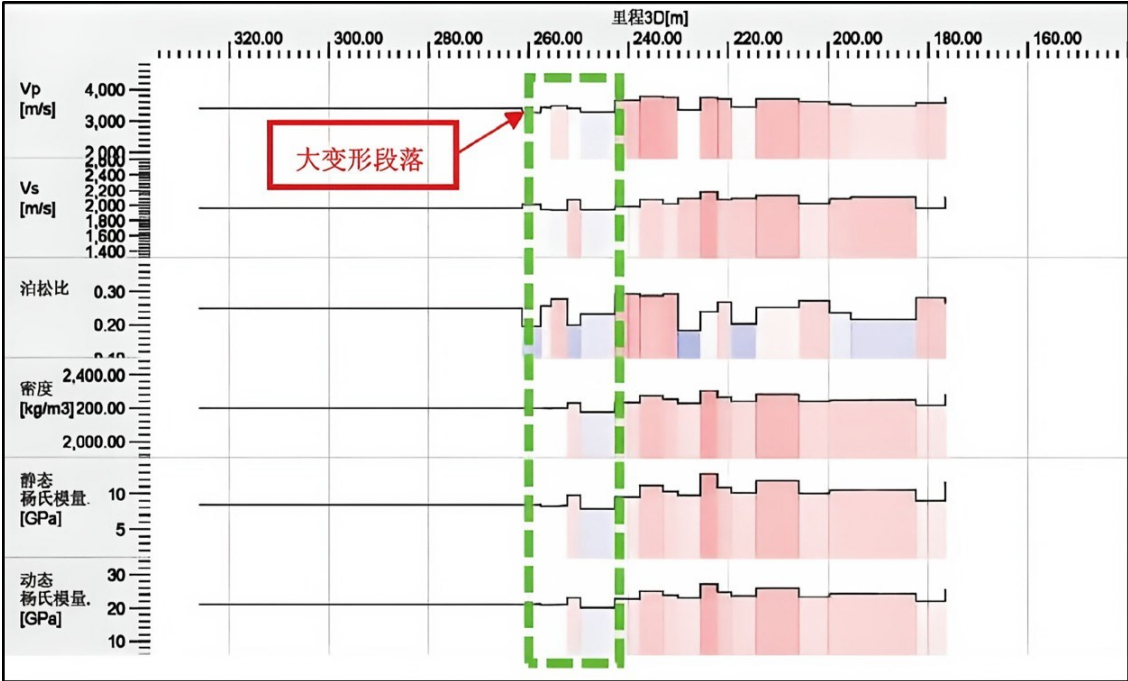


图 11 基于 TSP 多参数指标的大变形预报成果图

Fig.11 Large deformation prediction result map based on TSP multi-parameter index

3.2.4 工程处置措施与效果

针对环青藏高原铁路某隧道 D2K13+260~+240 段中大变形风险，该段采用全环 HW175 型钢，0.8m/榀，拱墙采用低预应力树脂卷锚杆(4.0m)，间距 1.2x0.8(环 x 纵)。初支完成后 7d，变形速率为 12.1~32.6mm/d，两侧边墙累计最大收敛变形变量为 289mm，初支无明显异常，表明中大变形等级及工程措施合理。

以环青藏高原铁路某隧道为例，共开展 TSP 共计 6210m，出具报告 650 份，其中预测无大变形 312 份，轻微大变形 313 份，中大变形 25 份。预测大变形等级与开挖揭示一致 632 份，不一致 49 份，预报准确率为 94.1%；预测大变形等级的长度与开挖揭示一致有 5832m，预报准确率为 93.9%，大幅降低了大变形地段钢拱架拆坏率，取得了良好的经济效益和社会效益。

4 讨 论

4.1 面临的难题

环青藏高原高地应力隧道复杂的地质条件与极端施工环境给超前地质预报工作带来显著难点，主要体现在三维精细建模与物探的多解性、随钻检测参数单一与实时反演难、掌子面素描的复杂光照与特征弱监督难三方面。

4.1.1 三维精细建模与物探的多解性

隧道地下空间有限，地质体各向异性显著，导致 TSP、地质雷达等物探数据存在天然多解性与体积效应（高树全等，2024）。核心难点在于如何从有限的二维剖面数据中，克服波场与电磁场传播的复杂性，精确重构掌子面前方百米内的三维地质界面。对于断层破碎带等不规则异常体，现有算法难以在缺乏足够先验约束条件下实现唯一性成像，定位与形态解释误差较大，直接影响岩爆与大变形区段的识别精度。

4.1.2 随钻检测参数单一与实时反演难

当前随钻测量多局限于机械钻速、钻压等宏观参数，缺乏对岩体强度、结构面产状等地质信息的直接感知能力（岳中文等，2022）。难点在于多源异构参数（振动、扭矩、声波、岩屑光谱）的融合算法尚不成

熟，且钻机-围岩相互作用机理复杂，难以建立普适的物理-数据驱动模型。这导致实时反演前方岩体特征时，易出现数据噪声大、特征解耦困难、响应滞后等问题，难以满足高地应力环境下灾害前兆捕捉的时效性要求。

4.1.3 掌子面素描的复杂光照与特征弱监督难

隧道掌子面环境恶劣（光照不均、粉尘、渗水、岩性多变），结构面形态复杂且存在大量模糊边缘与干扰节理（朱合华等，2023）。核心难点在于缺乏大规模、高质量的标注数据集用于深度学习模型训练。同时，不同地质条件下（硬岩节理与软岩流变）图像特征差异巨大，模型泛化能力差，难以实现从二维图像到三维结构面网络的自动重建与产状解算，智能化分析精度远低于人工经验，制约了岩体结构信息向灾害预警指标的高效转化。

综上所述，环青藏高原高应力隧道超前地质预报面临物探多解性、随钻反演滞后性、图像分析弱监督性三大技术瓶颈，亟需发展多源数据融合与智能解释方法，以提升灾害区段识别与预警能力。

4.2 未来研究展望

面向高原隧道复杂地质与高应力环境，传统单一手段已难以满足岩爆、大变形等动力灾害的预报需求，超前地质预报方法应朝精准化、智能化、多源融合方向深入发展。未来研究可从以下三个方面重点突破。

4.2.1 高精度三维地质建模与多参数联合反演

针对当前物探方法存在的多解性与探测精度不足问题，应着力构建融合地质、地球物理与钻孔数据的高精度三维地质模型。通过发展多尺度、多参数联合反演算法，克服波场与电磁场在复杂各向异性介质中的传播难题，实现断层破碎带、软弱夹层等异常体的三维定位与定量解释。特别是在高地应力背景下，需将地应力场分布特征纳入反演框架，提升岩爆与大变形区段的空间识别能力。

4.2.2 智能随钻感知与钻测一体化预报

针对现有随钻检测信息利用率低、参数单一等问题，应研发智能随钻感知系统，集成振动、钻速、扭矩、岩屑光谱等多源随钻参数。结合机器学习算法建立钻机-围岩相互作用的数据驱动模型，实时反演掌子面前方岩体力学参数与结构特征，实现钻进与探测的一体化智能预报。该技术有望解决传统随钻测量响应滞后、特征解耦困难等瓶颈，满足高地应力环境下灾害前兆捕捉的时效性要求。

4.2.3 掌子面素描智能化与多源数据协同分析

针对掌子面素描依赖人工经验、效率低且主观性强的问题，应发展基于深度学习的岩体结构面智能识别与分类方法。利用图像分割、点云重建等技术自动提取产状、密度、充填物等关键信息，克服复杂光照与粉尘环境对图像质量的干扰。同时，推动地质编录与物探、钻探数据的协同分析，建立统一的数据融合框架，实现结构面信息向灾害预警指标的高效转化。

综上所述，通过上述技术融合与智能化升级，构建“随钻—物探—图像”三位一体的动态预报体系，显著提升高原隧道高地应力环境下岩爆与大变形灾害的探测可靠性与超前预警能力，为隧道安全施工提供关键技术支撑。

5 结 论

针对环青藏高原等高原山区高地应力隧道岩爆与大变形等重大地质风险防控面临的挑战，结合现场工作实践，构建了以“物钻结合、长短结合、靶向钻探、精准预报”为核心的综合超前地质预报技术体系，指导现场安全快速施工。取得的主要认识和结论如下：

（1）针对高地应力区岩爆和大变形风险，构建了“辨性-观形-察孔-听声”掌子面岩爆风险现场快速确认的定性判据，建立了“敲岩质-估层厚-看节理-识构造-观缩径”掌子面大变形风险现场快速确认的定性判据，实现了岩爆、大变形的掌子面风险现场快速辨识。

（2）提出了“定性定量相结合、初判详判两步骤”的超前地质预报理念，构建了“表观特征+强度应力比+TSP 多参数”的岩爆和大变形超前地质预报标准，实现了岩爆、大变形风险等级及段落的定量预报。

(3) 工程实践验证表明,该超前地质预报技术体系对高地应力隧道和大变形的空间位置、规模及风险等级的预报结果与开挖揭示情况高度吻合,预报准确率均超过了 90%,大幅减少了岩爆地段安全隐患和大变形地段钢拱架拆坏率。

(4) 环青藏高原高地应力隧道岩爆与挤压性大变形灾害突出,其超前地质预报面临物探多解性、随钻反演滞后性与图像分析弱监督性三大技术瓶颈。未来应重点发展高精度三维建模、智能随钻感知与掌子面素描智能化技术,构建“随钻—物探—图像”三位一体动态预报体系,显著提升岩爆与大变形灾害的超前预警能力。

References

- Chen, S. K., Li, H. R., Zhou, H., et al. 2021. Route Selection of Deep Lying and Hard Rock Tunnel in Sichuan-Tibet Railway Based on Rockburst Risk Assessment. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 48(5):81-90. (in Chinese with English abstract).
- Feng, T., Jiang, L. W., Yuan, D., et al. 2024. Analysis of Rockburst Characteristics in High Stress Zone of Xianshui River Structural Belt Tunnel. *Journal of Railway Engineering Society*, 41(8):74-78+85. (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. T., Xiao, Y. X., Feng, G. L., et al. 2019. Study on the Development Process of Rockbursts. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(4):649-673. (in Chinese with English abstract).
- Gao, S. Q., Jiang, L. W., Mu, Y. C., et al. 2024. Advanced Geological Forecasting Techniques for Railway Tunnels in the Complex and Treacherous Mountainous Areas of Southwest China. *Modern Tunnelling Technology*, 61(2):52-59. (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Zhang, Y. S., Jiang, L. W., et al. 2012. Research on Rockburst Mechanism and Profile Suitability of Deep-buried Tunnel in Fold Structure Body. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 31(S1):2758-2766. (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Zhang, Y. S., Jiang, L. W., et al. 2017. Discussion on the Environmental and Engineering Geological Problems Along the Sichuan-Tibet Railway and its Adjacent Area. *Geoscience*, 31(05):877-889. (in Chinese with English abstract).
- He, M. C.. 2014. Progress and Challenges of Soft Rock Engineering in Depth. *Journal of China Coal Society*, 39(8):1409-1417. (in Chinese with English abstract).
- Li, S. C., Liu, B., Sun, H. F., et al. State of Art and Trends of Advanced Geological Prediction in Tunnel Construction. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(06):1090-1113. (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. G., Lin, Z., H., Yuan, D., et al. 2023. Discussion on Advance Geological Prediction Method of Rock Burst in Deep-buried Tunnel Period. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 50(04):445-453. (in Chinese with English abstract).
- Luo, D. L., Gao, Z. Y., Chen, F. F., et al. 2025. Revised Understanding of Permafrost Shape: Inclusion of the Transition Zone and Its Climatic and Environmental Significances. *Journal of Earth Science*, 36(1): 339–346. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-0111-3>
- Meng, L. B., Li, H. Y., Li, T. B., et al. 2024. Study on Explosive Rockburst Mechanism Based on Two-Dimensional Meso-Fracture Model. *Earth Science*, 49(8): 2789-2798. (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. B., Cui, P., Zhuang, J. Q., et al. 2020. Challenges to Engineering Geology of Sichuan-Tibet Railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377-2389. (in Chinese with English abstract).
- Qiang, X. G., Guo, C. B., Sun, D. X., et al. Study on the Activity of the Cuona-Woka Fault Zone, Qinghai-Tibet Plateau, and Geological Safety Risks and Prevention Methods. *Journal of Geomechanics*, 31(2):301-312. (in Chinese with English abstract).
- Richard Otto, Edward Button, Helfried Bretterebner, et al. 2002. The Application of TRT-Ture Reflection Tomography-at the Unterwald Tunnel. *Geophysics*, 2:51~56.
- Xu, G. C., Liu, W., Zhang, F. K., et al. Research on Identification Method of Adverse Geology in Railway Tunnels. *Journal of Railway Engineering Society*, 2025,42(07):19-25. (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. X., Meng, W., Guo, C. B., et al. In-situ Stress Measurement and Its Application of a Deep-buried Tunnel in Zheduo Mountain, West Sichuan. *Geoscience*, 35(1):114-125. (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Zhang, P. Z., Wen, X. Z., et al. 2005. Features of Active Tectonics and Recurrence Behaviors of Strong Earthquakes in the Western Sichuan Province and its Adjacent Regions. *Seismology and Geology*, 27(3):446-461. (in Chinese with English abstract).

- Zhang, G. Z., Deng, J. H., Wang, D., et al. 2021. Mechanism and Classification of Tectonic-induced Large Deformation of Soft Rock Tunnels. *Advanced Engineering Science*, 53(1):1-12. (in Chinese with English abstract).
- Yan, J., He, C., Wang, B., et al. 2019. Inoculation and Characters of Rockbursts in Extra-long and Deep Lying Tunnels Located on Yarlung Zangbo Suture. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(4):769-781. (in Chinese with English abstract).
- Yue, Z. W., Yue, X. L., Yang, R. S., et al. 2022. Progress of Lithology Identification Technology while Drilling. *Journal of Mining Science and Technology*, 7(4):389-402. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., Shen, Z., Wang, M., et al. 2004. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau From Global Positioning System Data. *Geology*, 32:809-812.
- Zhang, Y. S., Guo, C. B., Yao, X., et al. 2016. Research on the Geohazard Effect of Active Fault on the Eastern Margin of the Xizang Plateau. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(3): 277-286. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Guo, C. B., Li, X., Q., et al. 2021. Key Problems on Hydro-engineering-environmental Geology Along the Sichuan—Tibet Railway Corridor: Current Status and Development Direction. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 48(5):1-12. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Wu R. A., Guo, C. B., et al. 2022. Geological Safety Evaluation of Railway Engineering Construction in Plateau Mountainous Region: Ideas and Methods. *Acta Geologica Sinica*, 96(5):1736-1751. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Ren, S. S., Guo, C. B., et al. 2025. Application of geomechanics in risk prevention and control for the geosafety of major projects on the Tibetan Plateau. *Journal of Geomechanics*, 31(5):926–939. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., Wang S. S. T., Wang, L. S. 2005. *Principles of Engineering Geological Analysis*. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese).
- Zhou, H., Chen, S. K., Li, H. R., et al. 2021. Rockburst Prediction for Hard Rock and Deep-lying Long Tunnels Based on the Entropy Weight Ideal Point Method and Geostress Field Inversion: A Case Study of Sangzhuling Tunnel. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(5): 3885-3902. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02175-9>.
- Zhou, H., Chen, S. K., Liu, T., et al., 2022. Large Deformation Mechanism of Soft Rock Surrounding Tunnel Deep Buried in Complex Mountainous: A Case Study of Yangjiaping Tunnel. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 852-862 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Zhang, G.Z., Zhao, X. Y., et al. 2024a. Rockburst failure characteristics and formation mechanism of deep granite tunnel with extremely high geostress. *Journal of Engineering Geology*, 32(3): 1098-1111. (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H, Xie, R., Q., Song, Z., et al. 2024b. Large Deformation Characteristics and Genetic Analysis of High Geostress Altered Granite Tunnel. *Railway Technical Standard(Chinese and English)*, 6(1):29-35. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, H., Zhao, X., Y., Feng, T., et al. 2025. Rockburst Risk Assessment of High Geo-stress Tunnel in Yarlung Zangbo River Suture Zone. *Journal of Railway Engineering Society*, 42(12):65-70. (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Zhao, X., Y., Jiang, H. G., et al. 2026. Unascertained Measure Evaluation Method for Large Deformation Hazard Analysis of Squeezing Tunnel. *Earth Science*, 51(4):1325-1344. (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. H., Pan, B. Y., Wu, W., et al. 2023. Research Poggess on Acauistion and Identification Methods of Rock Mass Structural Plane Information. *Journal of Basic Science and Engineering*, 31(6):1339-1360. (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈仕阔, 李涵睿, 周航, 等. 2021. 基于岩爆危险性评价的川藏铁路某深埋硬岩隧道线路方案比选研究. *水文地质工程地质*, 48(5):81-90.
- 冯涛, 蒋良文, 袁东, 等. 2024. 鲜水河构造带隧道高地应力区岩爆特性分析. *铁道工程学报*, 41(8): 74-78+85.
- 冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 等. 2019. 岩爆孕育过程研究. *岩石力学与工程学报*, 38(4):649-673.
- 高树全, 蒋良文, 牟元存, 等. 2024. 西南复杂艰险山区铁路隧道超前地质预报技术. *现代隧道技术*, 61(2):52-59.
- 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 2012. 褶皱构造体中深埋隧道岩爆机制与隧道断面适宜性研究. *岩石力学与工程学报*, 31(S1): 2758-2766.
- 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 2017. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论. *现代地质*, 31(5):877-889.
- 何满潮. 2014. 深部软岩工程的研究进展与挑战. *煤炭学报*, 39(8):1409-1417.
- 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 2014. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势. *岩石力学与工程学报*, 33(06):1090-1113.

- 刘建国, 林之恒, 袁东, 等. 2023. 隧道施工期岩爆超前地质预报方法探讨. 成都理工大学学报(自然科学版), 50(04):445-453.
- 孟陆波, 李昊禹, 李天斌, 等. 2024. 基于二维细观裂隙模型的爆喷型岩爆机制. 地球科学, 49(8): 2789-2798.
- 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战. 岩石力学与工程学报, 39(12): 2377-2389.
- 强新刚, 郭长宝, 孙东霞, 等. 2025. 青藏高原错那-沃卡断裂带活动性与地质安全风险防控对策研究. 地质力学学报, 31(2): 301-312.
- 许广春, 刘伟, 张凤凯, 等. 2025. 铁路隧道不良地质判别方法研究. 铁道工程学报, 42(7):19-25.
- 徐正宣, 孟文, 郭长宝, 等. 2021. 川西折多山某深埋隧道地应力测量及其应用研究. 现代地质, 35(1):114-125.
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型. 地震地质, 27(3):446-461.
- 严健, 何川, 汪波, 等. 2019. 雅鲁藏布江缝合带深埋长大隧道群岩爆孕育及特征. 岩石力学与工程学报, 38(4):769-781.
- 岳中文, 岳小磊, 杨仁树, 等. 2022. 随钻岩性识别技术研究进展. 矿业科学学报, 7(4):389-402.
- 张广泽, 邓建辉, 王栋, 等. 2021. 隧道围岩构造软岩大变形发生机理及分级方法. 工程科学与技术, 53(1): 1-12.
- 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究. 地球学报, 37(3):277-286.
- 张永双, 郭长宝, 李向全, 等. 2021. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向. 水文地质工程地质, 48(5):1-12.
- 张永双, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 2022. 高原山区铁路工程建设地质安全评价: 思路与方法. 地质学报, 96(5): 1736-1751.
- 张永双, 任三绍, 郭长宝, 等. 2025. 地质力学在青藏高原重大工程地质安全风险防控中的应用. 地质力学学报, 31(5):926-939.
- 张倬元, 王士天, 王兰生. 2005. 工程地质分析原理. 北京:地质出版社.
- 周航, 陈仕阔, 刘彤, 等. 2022. 复杂山区深埋隧道软岩大变形机理研究——以杨家坪隧道为例. 工程地质学报, 30(3):852-862.
- 周航, 张广泽, 赵晓彦, 等. 2024a. 深部极高地应力花岗岩隧道岩爆破坏特征及成因机理研究. 工程地质学报, 32(3): 1098-1111.
- 周航, 谢荣强, 宋章, 等. 2024b. 高地应力蚀变花岗岩隧道大变形特征及成因分析. 铁道技术标准(中英文), 6(1):29-35.
- 周航, 赵晓彦, 冯涛, 等. 2025. 雅鲁藏布江缝合带高地应力隧道岩爆风险评估. 铁道工程学报, 42(12):65-70.
- 周航, 赵晓彦, 蒋晖光, 等. 2026. 挤压性隧道大变形危险性评价的未确知测度评价法研究. 地球科学, 51(4):1325-1344.
- 朱合华, 潘柄屹, 武威, 等. 2023. 岩体结构面信息采集及识别方法研究进展. 应用基础与工程科学学报, 31(6):1339-1360.