

高地应力硬脆性围岩隧道失稳机理及处置措施^{*}

李建兴¹, 张睿², 黄磊³, 邹逸伦³, 方勇⁴

(1. 四川省铁路产业投资集团有限责任公司, 成都 610041; 2. 四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300;
3. 西南交通大学 土木工程学院 成都 610031; 4. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要:为探究高地应力硬脆性裂隙围岩区隧道失稳及结构破坏机理, 并提出系统的处置措施, 笔者通过对在建米仓山隧道进行现场调查, 分析了高地应力破碎围岩区隧道开挖引发的围岩失稳破坏的特点, 并结合特定的地质条件, 利用能量理论对隧道施工过程进行数值模拟, 分析模拟结果得到: 米仓山隧道掌子面失稳主要原因是高地应力引起的能量超过岩体的最大承受能力, 而岩体破碎是导致支护破坏的直接因素。基于此, 文中提出了以下处置措施: (1) 降低隧道围岩体内的能量; (2) 采用“短进尺、弱爆破”的方式掘进; (3) 初期支护结构采用双重支护, 并加强监控量测; (4) 将径向锚杆更换成兼起应力释放、锚杆、注浆填充作用的径向小导管。

关键词: 高地应力; 硬脆性岩体; 隧道失稳; 处置措施

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1345-07

Study on Instability Mechanism and Disposal Measures of Brittle Fractured Surrounding Rock Area in High Geo-stress Tunnel

Li Jianxing¹, Zhang Rui², Huang Lei³, Zou Yilun³, Fang Yong⁴

(1. Sichuan Railway Investment Group Co. Ltd., Chengdu 610041, P.R. China; 2. Sichuan Chuanjiao Cross Road & Bridge Co. Ltd., Guanghan, Sichuan 618300, P.R. China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China; 4. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China)

Abstract: In order to explore the instability and structural failure mechanism of brittle fractured surrounding rock area in high geo-stress tunnel, and to propose system disposal measures, this paper has analyzed the characteristics of surrounding rock instability caused by excavation in high geo-stress tunnel and has carried on the numerical simulation to the construction process combined with specific geological conditions and energy theory. Simulation results showed: The main reason of instability of heading face in Micangshan tunnel was that the energy caused by high geo-stress exceeds the maximum bearing capacity of surrounding rock, and rock fragmentation directly led to the destruction of support. Based on this, the following disposal measures are proposed: (1) reducing energy in the surrounding rock; (2) using “short footage, weak blasting” method to excavate; (3) initial support structure adopts double support and strengthen monitoring and measurement; (4) replacing radial bolts with radial ducts which have a role of stress relief, bolt and grouting filling.

Keywords: high geo-stress; brittle surrounding rock; tunnel instability; disposal measures

^{*} 收稿日期: 2018-04-01 (修改稿)

作者简介: 李建兴(1972-), 男, 山西原平人, 博士, 高级工程师, 主要从事工程建设管理等工作。

E-mail: Ljx918@126.com

通讯作者: 方勇(1981-), 男, 四川达州人, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事隧道施工力学行为等方面的教学与研究
工作。E-mail: fy980220@swjtu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578461)

0 引言

随着我国西部大开发策略的持续推进,近年来我国在西部建设了一大批公路和铁路工程,由于西部地区多山的地理特征,在建设工程中随之出现了一大批长大隧道。这些隧道工程在修建过程中往往会遇到高地应力^[1]、高地下水压^[2]、采空区^[3]等多种地质灾害,而在高地应力条件下,软弱岩层会引发大变形^[4],而在硬岩地区往往会引发岩爆,许多学者对此进行了大量研究,并得出了一系列重要的结论。刘泉声等^[4]针对高地应力破碎软岩巷道底臃问题,提出了以底板超挖、高强度预应力锚索、深孔注浆、底脚、拱角锚杆和回填为技术支撑的综合治理对策,并通过数值模拟和实际工程应用验证了该方法的有效性;谭以安^[5]、徐林生等^[6]描述了岩爆破坏的几何形态特征,并对岩爆形成的力学机制进行了研究;冯夏庭等^[7]、陈炳瑞等^[8]将岩爆分为即时型岩爆和时滞型岩爆,并分析了两种岩爆的规律和孕育机制;侯哲生等^[9]以锦屏二级水电站工程为背景,针对深埋完整大理岩提出了4种基本破坏方式:拉张型板裂化岩爆、拉张型板裂化片帮、剪切型岩爆和剪切型片帮,并对其发生机制进行了详细分析,对深入认识深埋完整硬岩的力学行为具有重要的工程实际意义。

综上所述,高地应力往往会导致隧道出现不同程度的破坏,造成严重的后果,现有的研究主要集

中在高地应力条件下隧道失稳破坏类型、岩爆类型划分及软岩地层大变形等,而对脆性硬岩破碎区高地应力导致的突发性塌方及支护结构破坏,相关研究及成果仍较少,因而正确认识这种破坏形式及其失稳机理,并采取对应的处置措施,对于保障隧道建设具有重要意义。

1 工程背景

在建米仓山隧道为特长公路隧道,横跨陕川两省,进口位于陕西省汉中市南郑县喜神坝小坝,出口位于四川省巴中市南江县关坝乡,设计为双线分离式隧道,左线长13 833 m,右线长13 792 m,其中,四川境内的出口段左线起止桩号ZK45+800~ZK53+532,长7 732 m,右线起止桩号K45+800~K53+526,长7 726 m,左、右线间距为40 m,隧道最大埋深约为1 000 m。

隧址区处于中深切割的侵蚀-构造剥蚀地貌区域,主要发育断层一条,局部地区还发育五处隐伏断裂,在隧道中部出露两个向斜构造和一个背斜构造。隧道地形和地质纵断面如图1所示,隧道轴线贯穿了沉积岩与岩浆岩,岩层主体为岩浆岩及可溶性碳酸盐岩,其中以石英闪长岩为主。隧道新构造运动以大面积间歇性整体抬升为主,隧道主应力为最大水平主应力,与区域应力一致,方向为N14°E-N58°W,与隧道轴线方向基本一致。

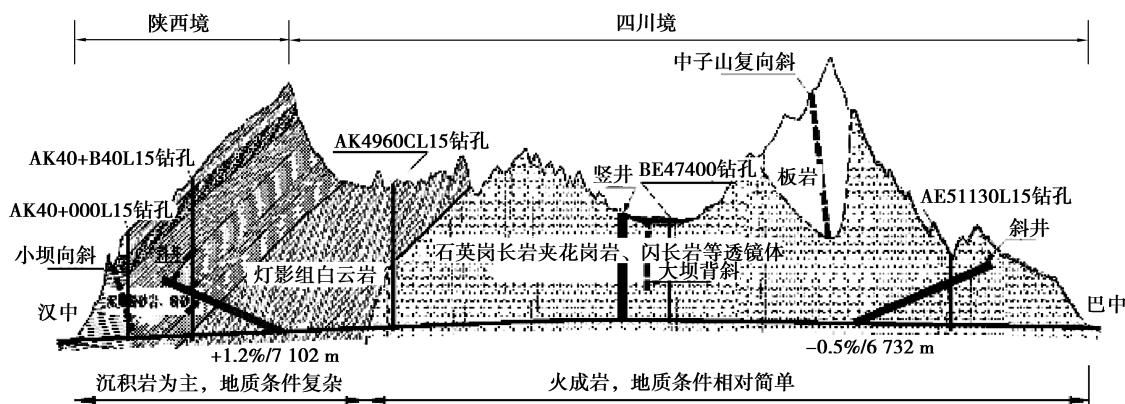


图1 米仓山隧道地形和地质纵断面图

Fig. 1 Terrain and geological profile of Micangshan tunnel

在隧道中部K45+900~K46+200区段内,围岩以花岗岩、闪长岩和石英闪长岩为主,且具有脆硬性,区段内最大水平主应力 σ_1 为15.876 MPa,单轴饱和抗压强度 R_c 为65.7 MPa, $3 < R_c/\sigma_1 = 4.1 < 6$,由

《公路隧道设计规范》可知此区段属于高地应力区段。同时,根据物探勘测,在此区段内存在连续的构造破碎带,带内岩体呈碎裂状结构或裂隙块状结构,爆破开挖应及时支护,且减少扰动,以避免隧道

内垮塌的发生。

2 隧道应力结构性破坏概述

米仓山隧道施工过程中到构造破碎带区段时,期间掌子面发生过多塌落及应力结构性破坏,限于篇幅本文只介绍其中较为典型的一次。

隧道右线施工至 K46+135.5 里程处时,在爆破后 1 min 又发生一声巨响,同时发生掌子面失稳塌落;10 min 后左洞进行爆破,在响炮后也发生一声巨响,同时掌子面发生塌落,这两次破坏均伴有强烈的振动。如图 2 所示,从现场情况来看,右洞塌落岩体为石英闪长岩和变质岩,岩体非常破碎,而左洞塌落的石英闪长岩完整性略好于右洞,左、右洞塌腔均位于右侧拱肩位置,且洞塌腔最大深度均为 3 m 左右。



(a) 右洞掌子面情况



(b) 左洞掌子面情况

图 2 掌子面坍塌情况

Fig.2 The collapse of heading face

2.1 初支破坏类型

本次破坏不仅造成了掌子面坍塌,还导致掌子面后方 0~20 m 范围内的初支出现不同程度的破坏,如图 3 所示,根据现场情况来看,初期支护破坏主要可以分为 3 类:

(1) 掌子面后方 0~3 m 内初期支护完全破坏并垮塌,钢拱架扭曲破坏,该范围内的衬砌完全失去了支撑能力。

(2) 掌子面后方 3~10 m 范围内的衬砌出现局部破坏,主要为右侧拱部的挤入变形,具体表现为钢拱架右侧拱肩位置的剪切错动,拱顶位置出现挤出变形,同时喷射混凝土开裂、掉落。

(3) 掌子面后方 10~20 m 范围内的破坏主要表现为右侧边墙位置的挤入变形和扭曲变形。

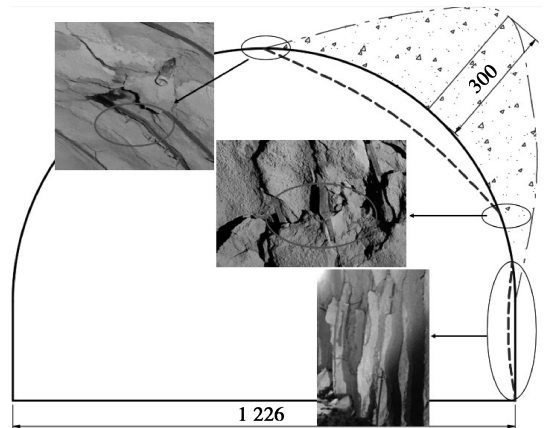


图 3 支护结构破坏

Fig. 3 Destruction of supporting structure

2.2 破坏的特征

在构造破碎带区段的施工过程中,通过现场记录及分析,将米仓山隧道施工过程中出现的破坏特征总结为以下 4 点:

(1) 突发性:无明显的宏观预兆,一般在爆破后或受到其他扰动时突然发生,过程短暂,整个破坏过程持续时间为几秒至几十秒。

(2) 冲击性:强烈时伴随着巨大的震动和类似于打雷的闷响,隧道底板隆起,重型设备被移动,附近人员甚至会被弹起。

(3) 破坏性:破坏主要发生在爆破后且范围较广,有时会造成掌子面后方数十米范围内的初支均发生破坏,严重时甚至会诱发邻洞发生破坏。

(4) 难以预测性:难以准确预报发生时间、地点和强度。

3 破坏原因和机理分析

3.1 破坏原因分析

对比类似工程经验及现场记录总结,笔者认为

本次破坏可能是由于以下几方面原因导致的:

3.1.1 围岩破碎

地勘资料显示在该范围内为V级围岩,受构造破碎带影响,岩体呈碎裂状结构或裂隙块状结构,围岩开挖无支护状态下可能发生中-大塌方;地表起伏不明显,埋深约为620 m,地下水主要以股状及线状产出;同时从施工揭露的围岩来看(图4),掌子面围岩以石英闪长岩为主,部分围岩出现不同程度的变质,变质岩主要为云英岩化花岗质碎粒岩;掌子面存在两组较为明显的节理,产状分别为 $107^{\circ} \angle 71^{\circ}$ 和 $193^{\circ} \angle 56^{\circ}$ 。

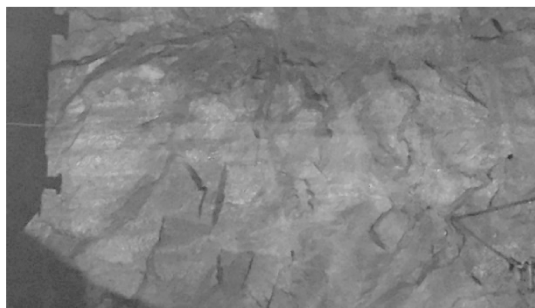


图4 掌子面围岩情况

Fig. 4 Surrounding rock condition of heading face

3.1.2 高地应力

根据地应力测量结果,该区域存在高地应力影响,其中最大水平主应力为25.32 MPa,最小水平主应力为16.17 MPa,其中最大主应力与洞轴呈 38° 夹角,对隧道开挖存在不利影响。

3.1.3 施工扰动

两次破坏均出现在隧道开挖爆破后,表明隧道爆破等会对围岩稳定性造成比较明显的影响,诱发围岩发生破坏。

3.2 破坏机理分析

在高地应力情况下隧道结构性破坏的研究方面,能量理论在岩体稳定性评价方面得到了广泛的应用。谢和平等^[10-11]通过分析岩体单元变形破坏过程中的能量变化,讨论了能量耗散与强度、能量释放与整体破坏的物理实质和内在联系,并将其应用到隧洞稳定性评价中;蔡美峰等^[12]将能量理论引入隧道岩爆预测领域,研究了能量与岩爆的关系。本文为了揭示隧道施工开挖过程中能量变化规律,采用数值模拟手段对米仓山隧道施工过程进行了模拟。

本次模拟采用Hoke-Brown本构模型,如图5所示,具体参数根据现场测试、本工程地勘报告及相关力学试验进行确定。

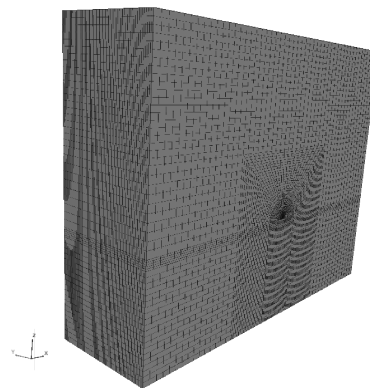


图5 计算模型图

Fig. 5 Numerical simulation model

模型总共295 800个单元,307 318个节点,除底部采用位移边界外,其余面均采用应力边界,应力值按照地勘报告提供的地应力进行施加。

在能量理论中,外力对围岩做功转换为总输入能量 U ,总输入能量 U 在围岩中以耗散能 U^d 、弹性应变能 U^e 的形式表现,三者之间的关系满足式(1):

$$U = U^d + U^e \quad (1)$$

耗散能 U^d 是造成围岩损伤与塑性变形的主要能量,同时使岩石强度降低;弹性应变能 U^e 是发生岩爆的动力源,当其大于破坏状态临界面能时,围岩发生破坏,这部分能量在加、卸载过程中可逆,如式(2),弹性应变能 U^e 可通过岩体3个主应力表示:

$$U^e = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)}{2E} \quad (2)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为岩体的3个主应力, E, ν 代表岩体的弹性模量与泊松比。

隧道开挖后掌子面周边以及掌子面前方弹性应变能分布如图6所示,其中图6(b)~(f)分别代表隧道前方1 m、2 m、3 m、4 m和5 m处隧道围岩弹性应变能分布情况。可以看出,在隧道开挖会导致隧道周边弹性应变能分布发生明显的变化,由于受到地应力影响,隧道拱顶至右侧边墙范围内的弹性应变能会出现明显的增大,最大弹性应变能达到160 kJ,对应的左侧最大弹性应变能为90 kJ。同

时,隧道开挖还会引起掌子面前方未开挖段岩体内的能量转移与重分布,从模拟结果来看,掌子面前方 1~3 m 内最大能量均超过了 100 kJ,也主要集中在隧道右侧。

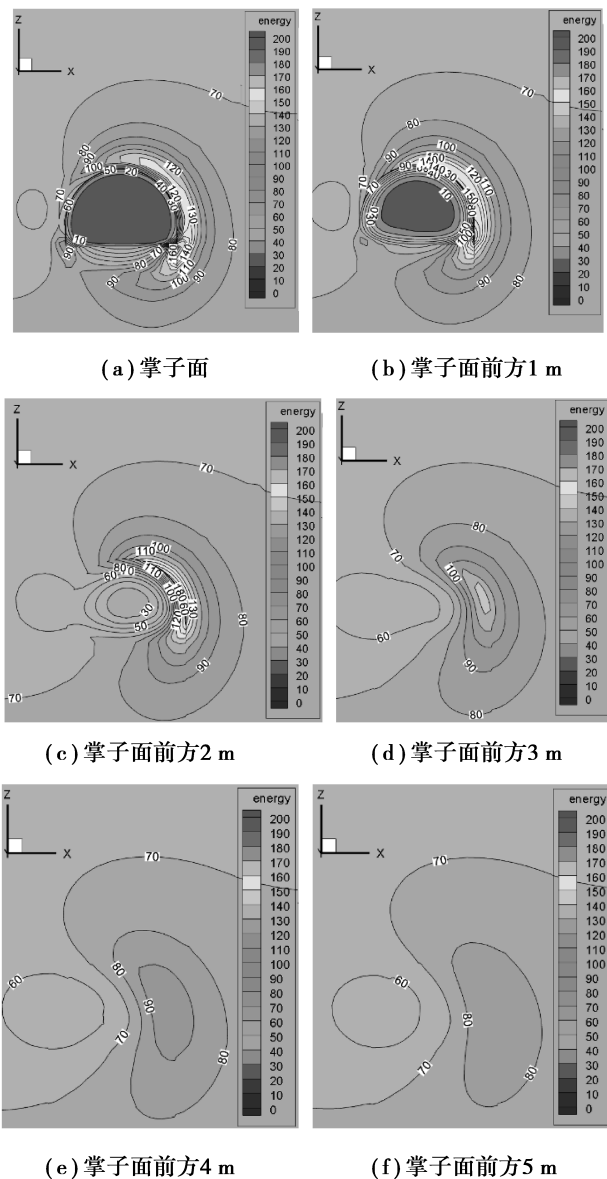


图 6 弹性应变能分布图

Fig. 6 Elastic strain energy distribution

4 防治措施

通过对施工现场破坏情况及其力学机理进行分析,认为米仓山隧道硬脆性裂隙围岩区段掌子面失稳塌落及结构性破坏的主要原因为:高地应力引起的能量超过岩体的最大承受能力,而岩体破碎是导致支护破坏的直接因素。因此,为了降低此类破坏的程度,需要从以下两方面采取措施。

4.1 降低隧道围岩体内的能量

目前针对国内外深部高地应力出现的问题,国际上已广泛采用主动卸压方法。研究表明,主动卸压能够有效降低隧洞周边的应力,避免出现弹性应变能过度集中的情况。在米仓山隧道施工过程中,综合考虑设备及施工条件,在掌子面和隧洞侧壁进行主动卸压,其中掌子面前方采用卸压爆破,而侧壁采用钻应力释放孔的方式,如图 7 所示。



图 7 掌子面进行卸压爆破

Fig. 7 Pressure relief blasting on the heading face

4.2 改善开挖及支护方式

由于施工扰动对于围岩稳定性造成比较明显的影响,诱发围岩发生破坏,因此,需要对隧道开挖爆破及支护方式进行一定的改善。

(1)采用“短进尺、弱爆破”的方式掘进,循环进尺控制在 2 m 以内,拱部有效支护适当加长至 4.5 m,避免爆破后发生塌方;

(2)初期支护结构采用双重支护,即 2~3 次复喷混凝土的形式。适当加大预留变形量,即在架立钢拱架后,喷射 1/2~1/3 的混凝土,在掌子面掘进至几十米后再视监控量测情况分 2~3 次复喷至设计厚度,期间加强断面净空测量,对局部侵限处或钢拱架损坏处进行拆换处治。

(3)将径向锚杆更换成径向小导管,长 4.5 m,采用喷混凝土后再施做的方式,兼起应力释放、锚杆、注浆填充等作用。

5 工程应用实例

对于隧道高地应力区段防治措施提出及其在实际工程中的应用,许多学者已经做过相应研究并取得了与本文类似的结论。胡威东等^[13]以锦屏辅

助洞埋深大、地应力高等特点为背景,在总结其岩爆发生规律的基础上,制定了应力释放孔、超前应力解除爆破、水胀式锚杆和高性能喷射混凝土为基础的岩爆综合防治措施;赵佃锦等^[14]结合兰渝铁路某隧道高地应力区段实际施工方法,利用数值模拟得出的应力情况提出超前支护、加密锁脚锚管等支护措施,并根据实际监测数据验证了数值模拟的正确性和合理性;王忠福等^[15]以室内模型试验对高地应力区喷射混凝土配合比及厚度、锚杆间距及倾角等关键参数进行了调整,使得加固方案最优。以上实例对于隧道高地应力区段采用了主动卸压、加强并及时支护、监控量测等措施来保障隧道施工安全,并得到了良好的效果。同样,在米仓山隧道高地应力区段,采用降低围岩体能量、改善开挖和加强支护三重措施,来保障施工及人员安全,具体措施有以下4点:

(1)在掌子面和隧道侧壁钻取应力释放孔,钻孔孔径 $\phi 110\text{ mm}$,孔深 10 m ,外插角呈 10° ;

(2)进行松动圈测试获取围岩损伤范围,确定高地应力区段锚杆支护有效长度为 4.5 m ;

(3)分两次进行喷射混凝土支护,第一次喷射 $1/2$ 厚混凝土,待隧道掘进至 10 m 后再次复喷至设计厚度;

(4)将部分径向锚杆换成径向小导管,打孔后进行注浆,起到加强支护的作用。

在经过以上措施处理过的米仓山隧道高地应力区段,虽有时仍发生喷射混凝土开裂及爆破后的闷响声,但未发生掌子面及其后方大规模垮塌的现象,说明对于此高地应力区段的支护措施取得了良好的效果。

6 结论

在高地应力区,隧道爆破开挖过程会造成隧道支护结构开裂、掉块,甚至在围岩破碎区域发生掌子面及其后方的垮塌的现象。在对米仓山隧道高地应力区段进行现场分析、数值模拟、加强防治后,本文得到以下结论:

(1)隧道开挖后容易导致隧道洞周能量集中,硬脆性裂隙围岩在爆破冲击波与高地应力耦合作用下,积蓄在岩体内的弹性能量在瞬间急剧释放会

诱发围岩的拉伸和拉剪混合破坏,导致掌子面附近的松动圈增大,底板隆起,以及初期支护松弛荷载陡增引起的初期支护开裂、变形、侵限甚至垮塌,这就是高地应力硬脆性裂隙围岩区隧道失稳机理。

(2)高地应力硬脆性裂隙围岩区隧道防治措施应当从降低围岩体能量、改善开挖和加强支护三个方面出发,同时加强隧道施工期间的监控量测,来保证施工和人员安全。

(3)米仓山隧道在采取钻应力释放孔、加长锚杆长度、径向小导管支护和双重初期支护的措施后,隧道整体趋于稳定,未发生掌子面及其后方大规模垮塌的现象,说明这些措施对高地应力区段的支护取得了良好的效果,对类似工程有一定的借鉴作用。

参考文献(References)

- [1] 崔戈,方勇,徐晨,等.公路隧道下穿3层采空区施工模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(增2):257-266. (Cui Ge, Fang Yong, Xu Chen, et al. Model test of highway tunnel construction underlying triple-decker mined-out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Supp.2): 257-266. (in Chinese))
- [2] 方勇,徐晨,陈先国,等.外水压下大断面公路隧道衬砌结构受力特性模型试验[J].土木工程学报,2016,49(8):111-119. (Fang Yong, Xu Chen, Chen Xianguo, et al. Scaled model test on mechanical characteristics of large cross-section highway tunnel lining under water pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(8): 111-119. (in Chinese))
- [3] 方勇,符亚鹏,杨志浩,等.公路隧道下穿煤层采空区开挖过程相似模型试验[J].土木工程学报,2015,48(2):125-134. (Fang Yong, Fu Yapeng, Yang Zhihao, et al. Similarity model test of highway tunnel excavation beneath mined-out area[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 125-134. (in Chinese))
- [4] 刘泉声,肖虎,卢兴利,等.高地应力破碎软岩巷道底臃特性及综合控制对策研究[J].岩土力学,2012,33(6):1703-1710. (Liu Quansheng, Xiao Hu, Lu Lixing, et al. Research on floor heave characteristics of broken soft rocks with high geostress and its comprehensive control measures[J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2012, 33(6):1703-1710. (in Chinese))
- [5] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质工程地质, 1989(1): 34-38, 54. (Tan Yi'an. Study on the formation mechanism of rockburst[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1989(1): 34-38, 54. (in Chinese))
- [6] 徐林生, 王兰生, 李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 300-303. (Xu Linsheng, Wang Lansheng, Li Yonglin. Rock burst formation mechanism and criterion study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 300-303. (in Chinese))
- [7] 冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 433-444. (Feng Xiating, Chen Bingrui, Ming Huajun et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 433-444. (in Chinese))
- [8] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561-569. (Chen Bingrui, Feng Xiating, Ming Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 561-569. (in Chinese))
- [9] 侯哲生, 龚秋明, 孙卓恒. 锦屏二级水电站深埋完整大理岩基本破坏方式及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 727-732. (Hou Zhesheng, Gong Qiuming, Sun Zhuoheng. Primary failure types and their failure mechanisms of deep buried and intact marble at Jinping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 727-732. (in Chinese))
- [10] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010. (Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010. (in Chinese))
- [11] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565-3570. (Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565-3570. (in Chinese))
- [12] 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 34(10): 1973-1980. (Cai Mingfeng, Ji Dong, Guo Qifeng. Study of rockburst prediction based on in-situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 34(10): 1973-1980. (in Chinese))
- [13] 胡威东, 杨家松, 陈寿根. 锦屏辅助洞(西端)岩爆分析及其防治措施[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 834-840. [J]. (Hu Weidong, Yang Jiasong, Chen Shougen. Rockburst analysis and prevention measures at Jinping auxiliary tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 834-840. (in Chinese))
- [14] 赵佃锦, 梁庆国, 鲁得文, 等. 高地应力隧道台阶法施工过程数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 441-448. (Zhao Dianjin, Liang Qingdong, Lu Dewen, et al. Numerical simulation on construction process of high ground stress tunnel by bench method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 441-448. (in Chinese))
- [15] 王忠福, 刘汉东, 王四巍, 等. 深部高地应力区软岩巷道模型试验及数值优化[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 710-715. (Wang Zhongfu, Liu Handong, Wang Siwei, et al. Deep soft rock roadway model experiment and numerical optimization of support in high geo-stress area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 710-715. (in Chinese))