

文章编号: 1674—8247(2021)03—0028—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.03.006

成昆铁路保安营隧道大变形岩爆共生特征及成因分析

邹远华 张广泽 丁文富 邓 睿

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:在高地应力环境下,成昆铁路保安营隧道硬质岩间夹软质岩地层中出现了大变形和岩爆共生问题,严重威胁了施工安全。本文在分析隧址区高地应力环境特征、岩性组合、岩体强度及岩体刚度特性等因素的基础上,对大变形和岩爆共生的特征及成因进行了研究,得出主要结论如下:(1)隧址区的极高应力环境是产生大变形和岩爆的内动力地质条件;(2)薄-中厚层硬质砂岩夹页岩开挖变形主要表现为隧底隆起、拱顶下沉及类似软质岩的岩体松动、水平挤出,厚-巨厚层硬质砂岩夹页岩开挖变形主要表现为岩爆;(3)层间小间距刚度低的页岩岩体以隧底隆起变形及边墙挤压变形破坏为主,厚层状刚度高的砂岩岩体以岩爆变形为主;不同层厚组合模式的硬质砂岩和软质页岩在高地应力条件下兼具大变形和岩爆共生的变形特性。

关键词:高地应力;大变形;岩爆;隧底隆起;共生;稳定性

中图分类号:U451+.2 **文献标志码:**A

28

On the Characteristics and Genesis of the Coexistence of Large Deformation and Rockburst in Baoanying Tunnel of Chengdu-Kunming Railway

ZOU Yuanhua ZHANG Guangze DING Wenfu DENG Rui

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Under the environment of high in-situ stress, the coexistence of large deformation and rockburst occurred in the weak rock stratum sandwiched between hard rocks in Baoanying Tunnel of Chengdu-Kunming Railway, which seriously threatened the construction safety. On the basis of analyzing the characteristics of high in-situ stress environment, lithologic association, rock mass strength, and rock mass stiffness in the tunnel site area, this paper studies the characteristics and causes of the coexistence of large deformation and rockburst, and draws the main conclusions as follows: (1) The extremely high in-situ stress environment in the tunnel area is the internal dynamic geological condition that produces large deformation and rockburst. (2) The excavation deformation of thin-medium-thick hard sandstone with shale is mainly characterized by tunnel floor upheaval, vault subsidence, rock mass loosening and horizontal extrusion like weak rock, while the excavation deformation of thick-huge thick hard sandstone with shale is mainly characterized by rockburst. (3) Shale rock mass with small interlayer spacing and low stiffness is mainly caused by tunnel floor upheaval deformation and sidewall extrusion deformation, while sandstone rock mass with high thick stiffness is mainly caused by rockburst deformation. Hard sandstone and soft shale with different thickness combination modes have the deformation characteristics of coexistence of large deformation and rockburst under high in-situ stress.

Key words: high in-situ stress; large deformation; rockburst; tunnel floor upheaval; coexistence; stability

收稿日期:2021-01-11

作者简介:邹远华(1973-),男,高级工程师。

引文格式:邹远华,张广泽,丁文富,等.成昆铁路保安营隧道大变形岩爆共生特征及成因分析[J].高速铁路技术,2021,12(3):28-32.

ZOU Yuanhua, ZHANG Guangze, DING Wenfu, et al. On the Characteristics and Genesis of the Coexistence of Large Deformation and Rockburst in Baoanying Tunnel of Chengdu-Kunming Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 28-32.

随着我国铁路建设由东部向西部扩展,由平原丘陵区向西部高原复杂艰险山区延伸,特别是进入青藏高原腹地,大量深埋、长大隧道不断涌现,铁路建设面对越来越艰巨的挑战。深埋长大隧道特有的高地应力环境引发的大变形和岩破坏等工程灾害是导致施工困难、安全风险增加、工期迟滞、工程投资急剧增加的主要地质问题^[1-3]。目前,国内隧道施工中出现大变形和岩爆灾害的事例屡见不鲜,如成兰铁路多个隧道(龙门山隧道、茂县隧道、松潘隧道等)出现了Ⅱ、Ⅲ级大变形,拉林铁路巴玉隧道中等至强烈岩爆段落占隧道总长(13 037 m)的94%。在以往的工程实例中,大变形和岩爆的发生往往都是相对独立的,而在高地应力环境下,成昆铁路保安营隧道以硬质岩为主的地层中出现了大变形和岩爆共生的情况,这是铁路、水电、公路工程建设中少见的特殊地质现象。分析大变形岩爆的共生特征及成因,对探索合理有效的防治与控制措施,以及对后续类似地质环境下的隧道建设具有重要意义。

1 工程基本概况

成昆铁路保安营隧道位于攀枝花市境内,地处金沙江深切峡谷向云贵高原过渡的地形急变形带,地形起伏大,高差悬殊,为连接既有成昆线和改建成昆铁路的联络线单线隧道,全长 13 326 m,最大埋深约

887 m;隧道进口 LXD4K 4 + 800 处设一号斜井,中后部 LXD4K 9 + 500 处设二号斜井,出口 LXD4K 12 + 650 处设三号斜井。高地应力引起的大变形和岩爆是重要控制节点,是制约隧道顺利掘进的主控因素之一。隧道施工过程中,占隧道总长 33.7% (4 487 m) 的长大缓倾砂页岩段正洞及一号斜井隧底产生了开裂、隆起变形,变形一般 0.2 ~ 0.5 m,最大值 1.0 m,隧道开挖断面高 6.2 m,最大相对变形量达 16.1%。在大变形地段中,部分段落掌子面及拱部围岩施工中有爆裂、剥离及岩块弹射等现象,出现了大变形与岩爆共生的特殊施工地质灾害。

2 大变形岩爆孕育的特殊工程地质环境

2.1 软硬相间的缓倾地层岩性特征

保安营隧道主要岩性构造特征是由晋宁期花岗闪长岩岩基构成核部,以康定群混合岩为两翼之基底背斜。隧道洞身通过次级褶皱之保安营宽缓“碗”状向斜“碗”底部位,核部地层为三叠系宝鼎组(T₃bd)砂页岩夹煤,两翼地层为晋宁期花岗闪长岩和康定群混合岩,局部见多期次岩浆侵入。岩性复杂多样,沉积岩、变质岩及岩浆岩均有出露,地层岩性纵断面如图 1 所示。

隧道洞身通过地段为三叠系宝鼎组(T₃bd)地层

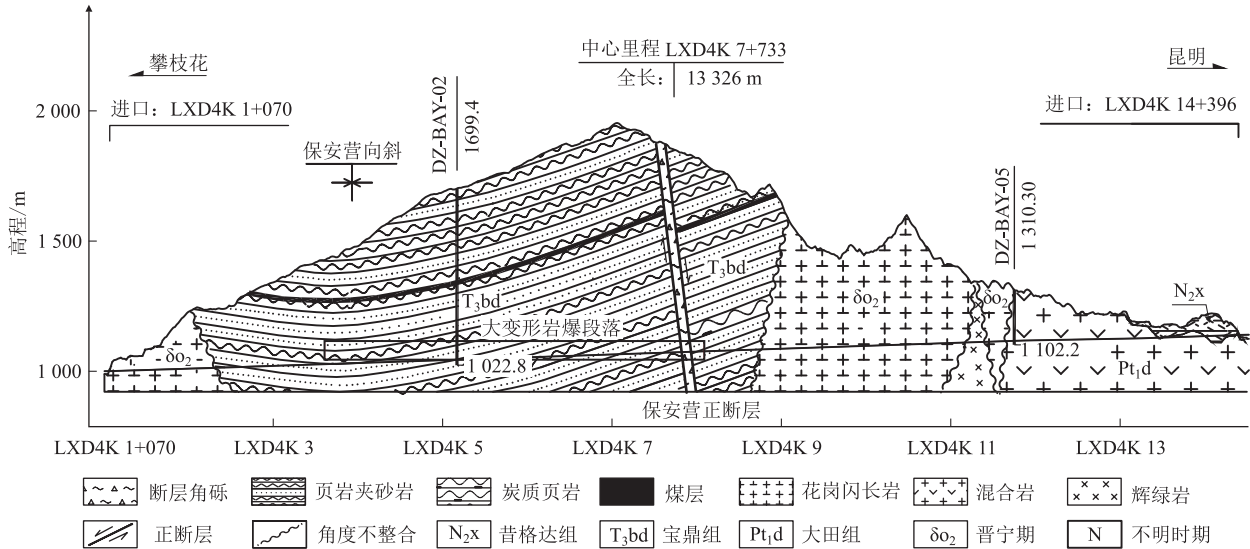


图1 保安营隧道洞身地层岩性纵断面示意图

超覆于古生界及老基底之接触带附近,古地形起伏较大。出现大变形和岩爆地段的岩性为砂岩、页岩夹炭质页岩及煤线,其中砂岩为硬质岩,页岩为软质岩,具软硬相间特征。岩性组合形式主要为互层、夹层,具有

明显的由粗至细、由厚至薄、由硬至软的动荡沉积韵律特征。具体表现为自下而上由灰白色厚层状含砾砂岩、砂岩开始(间夹页岩,硬质砂岩比重占 86% ~ 94%),向上颗粒逐步变细,粉砂岩和页岩占比增多,

层厚为薄-中厚层状砂岩、页岩互层,上部以页岩夹煤薄层煤为主。

2.2 复杂强烈的构造地质环境特征

隧道所处区域地处扬子准台地西缘康滇地轴中段,在青藏高原强烈隆升和中上地壳物质向东挤出、侧向滑移的作用下,区内构造格局受到强烈的改造和变形,地质构造复杂,褶皱及断裂构造发育。断裂构造主要为近SN向、NE-NEE向和少量NW向断裂。隧道位于著名的全新世元谋-绿汁江活动断裂和攀枝花深大断裂夹持地带、强地震带内,以挤压构造运动为主,经历了从晋宁期至中生代三个复杂的演化过程,并伴有种类繁多的多期次岩浆活动,表现出继承性、多期性和新生性,断裂多为构造单元的分界线,其分布和活动与大地构造和新构造分区有关^[4]。隧址区发育保安营舒缓“碗”状向斜,岩层倾角缓(真倾角一般3°~8°,局部可达15°),西翼被保安营正断层切割。

2.3 高地应力环境特征

场区位于青藏高原东缘地带,新构造运动特征显

著,区域构造应力场复杂。利用震源机制解反演(隧址区震源机制解反演构造应力场特征如图2所示)、勘察期间深孔水压致裂测量、施工期间洞内应力解除原地应力测量资料(隧道洞身地应力测量结果及状态评价如表1所示),以及有限元数值模拟技术,综合分析了保安营隧道区域构造应力场分布特征。

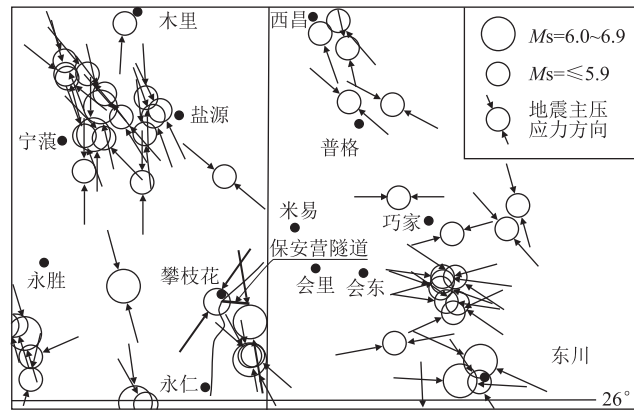


图2 隧址区震源机制解反演构造应力场特征示意图

表1 隧道洞身地应力测量结果及状态评价表

测试方法	测点	测试深度 /m	岩石饱和抗压强度 /MPa		最大水平主应力 S_H /MPa	S_H 优势方向	R_c/δ_{max}	评价基准 R_c/δ_{max}	评价
洞内应力解除法	1	684	砂岩	52.4	21.69	N11°E	2.4	<4	极高地应力
	2				19.75	N30°E	2.7		
	3				20.45	N19°E	2.6		
深孔水压致裂法	DZ-BAY-02	632.4	页岩	12.13	18.61	N32°E	0.7		
	DZ-BAY-03	824.2	砂岩	54.7	25.66	N36°E	2.1		
	DZ-BAY-04	579.3	页岩	14.89	16.43	N25°E	0.9		

注:隧道洞轴线方向:N85°W

由图3和表1可以得出,隧道址区地应力环境特征如下:①定性的震源机制解反演与定量的水压致裂法和应力解除原位地应力测量数据基本吻合;②隧址区地应力以水平构造应力为主导,NWW向和NEE-NE向为优势方向,与隧道洞轴线呈大角度相交,区域整体处于极高地应力环境;③隧道开挖后产生二次应力场的平衡调整,复杂化了洞内应力环境;④地应力大小和方向对隧道开挖后的围岩稳定不利,具备产生软岩大变形和硬岩岩爆的内动力地质条件。

3 大变形岩爆共生的地质成因机制分析

3.1 大变形岩爆共生病害特征

大变形病害主要位于缓倾薄-中厚层状砂岩、页岩段落,层间结合较差,砂页岩层面间易剥离,随着软质岩比例的增大,大变形加剧趋势明显。保安营隧道以Ⅰ级大变形为主,表现为拱部及边墙收敛、初支喷混

凝土剥落、钢架扭曲变形,隧底仰拱充填层开裂、隆起变形。其中隧底隆起最大值达1.0 m,仰拱充填层裂纹最大宽47.8 mm,拱部及边墙收敛变形值为0.1~0.4 m。

在拱部发生收敛、隧底上鼓大变形地段,掌子面及边墙部位为缓倾厚-巨厚层砂岩夹页岩,砂岩层间结合性较好,岩质坚硬性脆,节理裂隙不发育,岩体干燥无水,围岩完整或较完整,围岩整体稳定性较好,为Ⅲ级围岩。在高地应力条件下,发生了岩爆病害,以轻微岩爆为主,特征表现为岩块爆裂、剥离现象,部分出现岩块弹射,其中LXD4K 7+990~LXD4K 8+175段连续砂岩层厚大,岩爆病害突出。

根据高地应力环境下围岩变形破坏的地质力学模式^[5],保安营隧道大变形岩爆共生破坏的地质模式主要为:①薄-中厚层硬质砂岩、页岩开挖变形为隧底隆起、拱顶下沉及类似软质岩的岩体松动、水平挤出;②厚-巨厚层硬质砂岩开挖变形为掌子面的岩爆。在

隧道底及拱顶部位为薄-中厚层岩层、起拱线至拱腰段为厚-巨厚层硬质砂岩时,施工过程中同时兼具软岩变形和岩爆的变形特点,对隧道施工带来较大影响,其特征如表2所示。

表2 保安营隧道岩爆及大变形病害特征

段落	长度/m	岩性特征	埋深/m	岩爆发生部位及特征	大变形发生部位及特征
LXD4K 4 + 123 ~ LXD4K 4 + 750	627	薄-中厚层状砂岩、页岩	475 ~ 620	-	隧底上拱变形,沿隧道中心线填充层裂纹纵向发展,呈微张-宽张状,裂纹宽度最大值约47.8 mm,隧底隆起最大值约41 mm;拱部及边墙收敛变形值为0.1 ~ 0.4 m
LXD4K 4 + 810 ~ LXD4K 8 + 230	3 420	薄-中厚层状砂岩、页岩,部分为厚-巨厚层状砂岩	620 ~ 885	掌子面为主;微弱岩块爆裂声和似雷鸣闷响,围岩开裂,呈板状、鳞片状剥离崩落,块径2 ~ 10 cm,偶有岩块弹射	
X1DK 1 + 235 ~ X1DK 1 + 675	440	薄层状页岩、炭质页岩夹粉砂岩	185 ~ 290	-	隧底上拱变形,隆起值0.2 ~ 0.5 m,最大隆起值约1 m;边墙开裂变形值0.05 ~ 0.15 m,最大变形值约0.3 m

3.2 大变形岩爆共生成因分析

大变形及岩爆是高地应力作用、地层岩性、开挖后二次应力场调整、岩体力学特性等因素综合作用下的产物^[6]。保安营隧道大变形岩爆共生过程复杂,主要是由高地应力、岩体力学强度和结构特征、岩层缓倾特征等综合因素决定的,特殊的岩性及岩体结构特征是其共生的必要条件。

3.2.1 岩体力学强度特性

岩体抵抗外力而不破坏的能力称为岩体强度。岩体抗压强度越小,发生大变形的可能性越高,岩体储存应变能的能力越高,发生岩爆的可能性也越高。保安营隧道主要岩性抗压强度如表3所示。

表3 保安营隧道主要岩性抗压强度表

岩性	试验样品数	单轴饱和抗压强度/MPa	
		范围值	平均值
砂岩	15	36.9 ~ 76.1	50.9
页岩	12	24.3 ~ 33.4	27.8

由表3可知,隧址区页岩属于较软岩,砂岩虽属于硬质岩,但其饱和抗压强度下限接近与软质岩的分界值,具备大变形和岩爆发生的基础条件。

缓倾地层在隧道开挖后易沿层理面的法线方向发生变形,临空面岩体向隧道内位移,在自重应力下,缓倾地层各层之间处于离层状态。由于抗拉强度低,易发生弯曲变形,相同地层岩性条件下缓倾岩层更易失稳^[7-8]。保安营隧道缓倾薄-中厚层砂岩、页岩地层只能承受很小的拉应力,隧道开挖后发生了大变形破坏,且随着软质岩比例增大,变形量增大趋势明显。

3.2.2 缓倾岩体刚度特性

岩体刚度是指引起岩体单位位移所需的力。岩体结构面黏聚力及结构面间距特征对岩体刚度有较大影响。软硬相间的层状岩层在层间低黏聚力作用下,缓倾斜结构面的岩体易沿结构面发生剪切滑移及向垂直结构面的临空面发生弯曲变形,从而引起开挖岩体刚

度降低。反之,层间黏聚力增大时,岩体的强度也随之增大^[9]。层间小间距(薄-中厚层)结构面抵抗变形能力弱,间距增大时,在荷载作用下主要以岩体内部的张拉或剪切破坏为主,与结构面相关的破坏较少,整体刚度增大。

保安营隧道缓倾薄-中厚层状页岩或砂岩夹页岩黏聚力弱,单层厚5 ~ 40 cm,刚度较低。在开挖后岩体刚度进一步降低,沿结构面发生张拉及剪切破坏,从而发生变形破坏;厚层-巨厚层状砂岩黏聚力提高,黏聚力影响减弱,单层厚一般大于50 cm,岩体刚度增高,破坏时应变能释放较高,从而发生岩爆。岩体刚度特征与隧道开挖后页岩变形最大,砂岩、页岩互层变形次之,厚层砂岩主要发生岩爆的情况符合。

3.2.3 围岩应力条件的复杂性

保安营隧道软硬相间岩层的层厚差异及缓倾构造使隧道开挖后围岩应力分布更为复杂。应力在缓倾岩层中的传播表现为垂直层面的传播深度大于平行层面方向^[10],层状岩层在垂直于层面方向上传递压应力,但一般不能传递拉应力,仅当层面结合良好时才能传递较低的拉应力。隧道开挖后部分应力释放,周围应力进行调整和重新分布,隧底及拱顶形成应力集中区,压力和应变最大,引起岩石向洞室中心径向变形病害。层理平行临空面情况的砂岩发生应变岩爆时应力水平最低,即这种情况下产生应变岩爆的应力水平要求不高,容易产生破坏,但破坏的剧烈程度比较微弱。

因此,在地应力状态下,受岩体强度、层间岩体刚度等因素影响,隧道开挖卸荷后,层厚5 ~ 50 cm砂岩发生了较微弱的岩爆现象(岩体开裂),但受其层厚影响又不足以发生剥离崩落、弹射的典型岩爆现象,而是在复杂受力情况影响下发生弯曲、张裂,表现出软质岩具有的大变形特点,导致隧底隆起、边墙开裂、仰拱开裂上拱及拱部剥落等;层厚大于50 cm的砂岩则具有较典型的岩爆特点。因此,保安营隧道缓倾地层在

施工中整体体现出大变形、岩爆共生的特征,如图3所示。

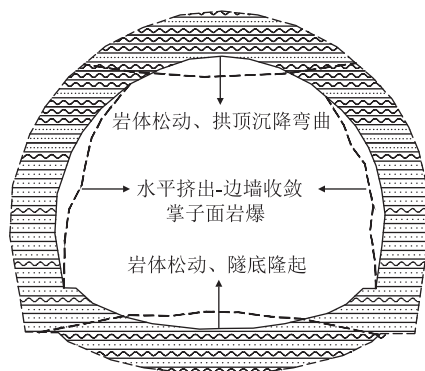


图3 缓倾砂岩夹页岩地层大变形岩爆共生示意图

4 结论

(1) 保安营隧道区域地应力以水平构造应力为主,方向与隧道洞轴线呈大角度相交,处于极高地应力环境;地应力大小和方向对隧道开挖后的围岩稳定不利,是产生大变形和岩爆的内动力地质条件。

(2) 保安营隧道的缓倾、软硬相间岩层具备产生大变形和岩爆共生的基础地质条件,破坏模式及特征主要为:薄-中厚层硬质砂岩、页岩开挖变形为隧底隆起、拱顶下沉及类似软质岩的岩体松动、水平挤出,随着软质岩比例增大,大变形加剧趋势明显;厚-巨厚层硬质砂岩夹页岩开挖变形为岩爆。

(3) 岩体刚度是隧道发生大变形及岩爆的重要影响因素,层间薄层状刚度低的岩体以大变形破坏为主,厚层状刚度高砂岩以岩爆病害为主;不同层厚组合模式的硬质砂岩和软质页岩在极高地应力条件下兼具大变形及岩爆共生的条件。

(4) 保安营隧道大变形岩爆共生地质灾害是在复杂地质环境下高地应力场、特殊的岩性组合、不同的强度及刚度特征等因素共同作用下产生的。通过分析共生的特征及影响因素,评判隧道施工的风险性,对优化隧道结构设计,确定合理有效的防治和控制措施,规避施工和后期运营风险具有重要意义。

参考文献:

[1] 王子江,王科,王崇良,等. 兰渝铁路玄真观隧道变形破坏原因分析及处理对策探讨[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(6): 26-31.
WANG Zijiang, WANG Ke, WANG Chonggen, et al. Treatment and Countermeasures for Tunnel Deformation and Failure Mechanism in Subhorizontal Red Bed under Local High Geostress[J]. High Speed

Railway Technology, 2014, 5(6): 26-31.

[2] 侯国强. 成兰铁路茂县隧道大变形特征及施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(5): 868-875.

HOU Guoqiang. Large Deformation Characteristics and Construction Technology of Maoxian Tunnel on Chengdu-Lanzhou Railway[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 868-875.

[3] 何娘者. 板块缝合带地区的选线理念与实践[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(3): 8-11.

HE Niangzhe. Idea and Practice of Route Selection in the Area of Plate Suture Zone[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(3): 8-11.

[4] 丁文富,蒋良文,宋章,等. 汤郎一易门深大活动断裂对秀宁隧道围岩改造作用分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(2): 109-114.

DING Wenfu, JIANG Liangwen, SONG Zhang, et al. Effects of TangLang-Yimen Large Active Faults on Xiuning Tunnel Surrounding Rock Alteration[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(2): 109-114.

[5] 王孝健,苏生瑞,施怡,等. 高地应力环境下地下工程围岩变形破坏的地质力学模式分析[J]. 公路, 2014, 59(4): 244-250.

WANG Xiaojian, SU Shengrui, SHI Yi, et al. Geomechanical Mode Analysis of Deformation and Failure of Surrounding Rock in Underground Engineering under High Geostress Environment[J]. Highway, 2014, 59(4): 244-250.

[6] 吴逸. 大巴山隧道岩爆及大变形的综合集成预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.

WU Yi. Study of Meta-synthesis Prediction Methods on the Rock Burst and Large Deformation in the Da-Ba-Shan Tunnel. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.

[7] 陈德健. 铁路隧道缓倾岩层围岩变形机理及应对措施的探讨[J]. 铁道建筑技术, 2012(S2): 119-121.

CHEN Dejian. Discussion on Deformation Mechanism and Countermeasures of Surrounding Rock in Gently Inclined Strata of Railway Tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2012(S2): 119-121.

[8] 郭波前. 极高地应力区隧道地质特征及围岩变形机制研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 586-592.

GUO Boqian. Geological Characteristics of Tunnels with Extremely High Geostress and Study of Surrounding Rock Deformation Mechanism[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(5): 586-592.

[9] 程骋. 应变岩爆的岩体刚度效应研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.

CHENG Cheng. Rock Mass Stiffness Effect Study on Strain Burst[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.

[10] 孟召平,陆鹏庆,贺小黑. 沉积结构面及其对岩体力学性质的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(1): 33-37.

MENG Zhaoping, LU Pengqing, HE Xiaohai. Depositinonal Structure Planes and Their Influence on the Mechanical Properties of Sedimentary Rock Mass[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(1): 33-37.