DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2019. 02. 23

圭嘎拉高速公路隧道地应力特征及岩爆预测

邢 军¹² 汪建斌¹² 蒋 蕾³ 董小波¹²

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 陕西 西安 710078;2. 西安中交公路岩土工程 有限责任公司 陕西 西安 710075;3. 西安市地质环境监测站 陕西 西安 710021)

摘要:依托在建的圭嘎拉隧道工程,综合采用水压致裂法、数值分析法获得地应力实测数据、隧道与洞身应力分布 特征,明确最大主应力的方向,并利用岩石的单轴加载、卸载应力-应变曲线计算该隧道围岩的弹性应变能指数,分 析岩石力学指标与发生岩爆的关系,结合深孔钻探成果、岩石力学试验、水文试验成果综合分析该隧道发生岩爆 的强度。结果表明:圭嘎拉隧道最大主应力为水平应力,方向为 NE40.9°,实测最大主应力值为23.81 MPa,数值 计算对应值为24.68 MPa,数值计算与实测地应力分布规律基本一致;岩石弹性应变能指数试验表明黑云母二长 花岗岩、板岩分别具备发生中等-强岩爆、低岩爆的储能和释能条件;该隧道发生中等-强岩爆段落长度为3.0 km, 发生低岩爆段落长度为3.3 km。

关键词: 深埋公路隧道; 地应力; 数值模拟; 岩爆; 水压致裂法 中图分类号: U459.2; U451.1⁺2 文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019) 02-0170-09

In-situ stress characteristics and rock burst prediction of the Guigala Expressway tunnel

XING Jun^{1,2}, WANG Jianbin^{1,2}, JIANG Lei³, DONG Xiaobo^{1,2}

(1. CCCC First Highway Consultants Co. , Ltd. Xi' an , Shaanxi 710078 , China;

2. The Xi' an China Highway Geotechnical Engineering Co., Ltd., Xi' an, Shaanxi 710075, China;

3. Xi' an Geological Environmental Monitoring Station Xi' an , Shaanxi 710021 , China)

Abstract: Based on the currently-building Guigala Expressway tunnel engineering , the authors use the hydraulic fracturing method and numerical analysis method to obtain in-situ stress measurement data and the stress distribution characteristics of the tunnel and the hole body. The direction of the maximum principal stress is figured out. The uniaxial loading and unloading of the rock stress-strain curve is used to calculate the elastic strain energy indices of the surrounding rock. Rock mechanics index and the relationship between rock burst occurrence are analyzed. Data of deep hole drilling , rock mechanics test , hydrological test are used to comprehensively analyzes the tunnel rock burst occurrence. The results show that the maximum principal stress is the horizontal stress with the direction of NE40.9°. The measured maximum principal stress value is 23.81 MPa and the corresponding value of numerical calculation is 24.68 MPa , indicating that the numerical calculations are consistent with the measured in-situ stress distribution law. The elastic strain energy index test of rock shows that the two long granite and SLATE of black mica have energy storage and energy release conditions for medium-strong rock burst and low-strength rock burst , respectively. The length of the medium-strong rock burst section of the tunnel is 3.0 km , and the length of the low-intensity rock burst section is 3.3 km.

收稿日期: 2018-07-11; 修订日期: 2018-10-19

基金项目:中交一公院高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室自主创新基金项目(ZC20170511) 第一作者:邢军(1980-),男,高级工程师,主要从事高速公路勘察设计及科研工作。E-mail: 57496139@qq.com 通讯作者:王建斌(1987-),男,硕士,工程师,主要从事高速公路勘察设计工作。E-mail:799919005@qq.com

Keywords: deep highway tunnel; ground stress; numerical simulation; rock burst; hydraulic fracturing

圭嘎拉隧道是我国青藏高原地区最长的深埋特长 公路隧道 隧址区南侧靠近雅鲁藏布江北界断裂带 高 地应力、高地温热害等特殊工程地质问题突出。在高 地应力条件下硬质岩掘进过程中极易产生岩爆,严重 威胁着建设者的生命财产安全^[1]。如 2010 年 11 月 28 日发生于中国锦屏二级水电站 2 500 m 埋深的引水 隧洞中的岩爆,导致了7人死亡和掘进机的严重损坏。 由此可见 对隧道地应力分析及岩爆预测的准确性是 决定工程设计成败的关键。国内外学者对岩爆的发生 机理、形成机制等进行了大量研究,何满朝等^[2]认为 岩爆的发生次数、强度和规模与埋深呈正相关; Jianchao Wang 等^[3]认为剪切作用达到一定程度时,采 场附近容易发生岩爆 而这种剪切作用是由岩石裂隙 带原有的非均匀应力与采煤工作面超前应力共同组 成; Yanbo Zhang 等^[4] 对岩爆的产生条件和表现形式 进行了归纳和分类 认为今后应采用多场耦合的方法 对岩爆预测进行研究; Zengqiang Yang 等^[5] 认为在强 采矿扰动的影响下、采空区超前段易受动、静联合荷载 的影响而发生冲击地压。对于岩爆的预测也进行了大 量的工程实践 杜世回^[6] 对秦岭翠华山特长隧道的高 地应力岩爆预测问题进行了探讨,认为基于地应力参 数和岩石参数计算得出的岩爆可能性结论具有片面 性;邓小鹏等^[7]基于地应力测试、数值模拟、多种岩爆 应力判据等方法对宝塔山特长隧道地应力场与岩爆进 行了分析预测;王庆武等^[8]采用工程类比、数值反演 等方法对巴玉隧道地应力场进行了分析 ,并利用修改 后的谷—陶岩爆判据对岩爆进行了预测; 刘造宝等^[9] 提出了一种基于属性权重的方法来量化各岩爆指标的 岩爆预测模型,并应用于164个样本进行了验证。

以上研究成果颇丰,但对岩爆的发生机理、形成机制仍未形成统一认识,对岩爆的预测仍未形成系统的理论。鉴于此,本文依托在建的圭嘎拉隧道工程,在综合分析区域地质构造和地应力测试成果的基础上,选取典型断面构建二维隧道数值计算模型,并将实测地应力值输入模型研究地应力场的分布规律,在此基础上进行岩爆倾向性试验,探讨划分该隧道可能发生岩爆的强度等级。以期为本工程设计提供依据,也为邻区类似工程提供借鉴。

1 工程地质概况

圭嘎拉隧道位于拉萨达孜县与山南市扎囊县之

间^[10],穿越圭嘎拉主峰,沿隧道轴线山脊及沟槽相间 分布 隧道进口地面高程4350 m,出口地面高程4110 m,洞身最高点海拔5350 m,设计行车速度80 km/h, 为分离式双洞隧道。总体轴向133°,总长12890 m, 最大埋深1200 m,属于深埋特长公路隧道。隧道范围 内岩性有第四系残坡积层(Q_4^{el+dl})、上侏罗系-下白垩 系林布宗组(J_3K_1l)、白垩系($\eta\gamma\beta K_2$)、寒武系($\gamma g \in$), 基岩主要为强-微风化板岩夹变质砂岩、炭质板岩夹变 质砂岩、黑云母二长花岗岩、片麻花岗岩等。板岩产状 较为紊乱,局部小型褶皱发育。

隧道地处雅鲁藏布江断裂带的北侧(图1),穿越 地段无大型断裂构造,以小规模压扭性断裂与褶皱构 造为主。隧址区地下水类型主要为松散岩类孔隙潜 水、基岩裂隙水、构造裂隙水和风化带裂隙水,赋存于 第四系覆盖层、风化节理裂隙与构造裂隙中,主要接受 冰雪消融与大气降水补给,季节性变化明显。钻孔揭 示的地下水埋深0~130 m,抽水试验揭示的流量 Q 为 12.8~26.1 m³/(h•m),渗透系数 K 为 0.008~ 0.014 m/d,属于强富水区。

2 隧道地应力测试

2.1 钻孔地应力测试

本文采用水压致裂法^[11]对圭嘎拉隧道进行地应 力测试,该方法的优势有如下几点:①测量深度深;② 资料整理时不需要岩石弹性参数参与计算,可避免因 岩石弹性参数取值不准引起的误差;③岩壁受力范围 广,可以避免"点"应力状态的局限性和岩体各向异性 影响;④操作简单,测试周期短。鉴于上述优点,该方 法广泛应用于水电、交通、矿山等工程领域。

本次地应力测试在 4#、5#钻孔内进行,其中 4#钻孔 位于测设里程 K19 + 091.5 处,孔口高程5 014.5 m,钻 孔深度 759.1 m,地层岩性为板岩,微风化 岩体完整性 好 较坚硬,呈脆性; 5#钻孔位于测设里程 K21 + 940 处, 孔口高程 4 772.7 m,钻孔深度 572.3 m,地层岩性为黑 云母二长花岗岩,微风化,岩体完整性好,呈坚硬状态。 地应力测试段分布在钻孔的中、下部 *A*#钻孔测试深度 为 164.0 ~ 740.3 m,5 # 钻孔测试 深度为 146.0~ 560.3 m,分别在 4#、5#钻孔进行了 12 段、10 段地应力测 试与 5 段定向印模测试,压裂段长 0.8 m,地应力测试结 果^[12] 见表 1,工作区工程地质纵面如图 2 所示。



图 1 研究区构造简图 Fig. 1 Simplified structural map of the study area

Table 1 Test results of borehole stress										
钻孔编号	测试段编号	深度/m	$\sigma_{ m H}/{ m MPa}$	$\sigma_{ m h}$ / MPa	$\sigma_{ m v}$ / MPa	$\sigma_{ m p}/{ m MPa}$	$\sigma_{ m H}/\sigma_{ m v}$	$\sigma_{ m h}/\sigma_{ m v}$	$(\sigma_{\rm H} + \sigma_{\rm h})/2a$	$\sigma_v \sigma_{\rm H}$ 方向
	1	164. 5 ~ 165. 3	8.34	5.32	4.28	1.95	1.57	0.80	1.19	
	2	227. 5 ~ 228. 3	9.68	6.68	5.92	1.64	1.45	0.89	1.17	
	3	272. 5 ~ 273. 3	10.33	7.17	7.09	1.46	1.44	0.99	1.21	
	4	326. 3 ~ 327. 1	10.90	8.24	8.48	1.29	1.32	1.03	1.18	
4#	5	389. 5 ~ 390. 3	12.25	10.25	10.13	1.21	1.20	0.99	1.09	NE 41°
	6	443.3 ~444.1	14.41	11.10	11.53	1.25	1.30	1.04	1.17	
	7	497. 5 ~498. 3	15.97	12.33	12.94	1.23	1.30	1.05	1.17	NE 43°
	8	551. 3 ~ 552. 1	18.06	13.26	14.33	1.26	1.36	1.08	1.22	
	9	617. 5 ~ 618. 3	19.85	15.30	16.06	1.24	1.30	1.05	1.17	NE 38°
	10	677.3~678.1	22.29	16.88	17.61	1.27	1.32	1.04	1.18	
	11	722. 5 ~ 723. 3	23.30	17.48	18.79	1.24	1.33	1.07	1.20	NE 39°
	12	740.3~741.1	23.81	18.06	19.25	1.24	1.32	1.07	1.19	NE 40°
平均值						1.35	1.35	1.01	1.18	NE 40. 2°
	1	146. 5 ~ 147. 3	10.43	6.89	3.88	2.69	1.51	0.56	1.04	
	2	200.3 ~201.1	11.77	7.75	5.31	2.22	1.52	0.69	1.10	
	3	254. 5 ~ 255. 3	12.61	8.76	6.74	1.87	1.44	0.77	1.10	
	4	308.3 ~309.1	15.34	10.60	8.17	1.88	1.45	0.77	1.11	NE 43°
5#	5	362. 5 ~ 363. 3	16.43	11.88	9.61	1.71	1.38	0.81	1.10	
	6	410.3 ~411.1	18.39	13.15	10.87	1.69	1.40	0.83	1.11	NE 39°
	7	461. 5 ~462. 3	19.33	13.95	12.23	1.58	1.39	0.88	1.13	
	8	506.3 ~ 507.1	20.77	14.64	13.42	1.55	1.42	0.92	1.17	NE 42°
	9	542. 5 ~ 543. 3	21.55	15.32	14.38	1.50	1.41	0.94	1.17	NE 40°
	10	560. 3 ~ 561. 1	21.78	15.65	14.85	1.47	1.39	0.95	1.17	NE 44°
平均值						1.81	1.43	0.81	1.12	NE 41.6°

表1 钻孔地应力测试成果

注: σ_{H} 、 σ_{h} 、 σ_{v} 分别为最大、最小水平主应力和根据上覆岩体埋深计算的垂向主应力。



Fig. 2 Geological profile of the tunnel engineering

在 4#钻孔测试深度(741.1 m) 范围内,最大水平 主应力最大值为 23.81 MPa,最小水平主应力最大值 为 18.06 MPa; 5#钻孔测试深度(561.1 m) 范围内,最 大水平主应力最大值为 21.78 MPa,最小水平主应力 最大值为 15.65 MPa。从图 3 可知,侧压系数在浅部 较大,测点达到一定深度后,其侧压系数变化相对稳 定; 各测试孔侧压系数均大于 1,主应力大小关系均为 $\sigma_{\rm H} > \sigma_{\rm h} > \sigma_{\rm v}$,说明隧道埋深处地应力特征以水平构造 应力为主。





表1中分析了2个钻孔的最大水平主应力与最小 水平主应力的比值、最大水平主应力与垂直应力比值、 最小水平主应力与垂直应力比值、水平主应力平均值 与垂直应力比值。最大水平主应力方向约为 NE40.9°隧道洞轴线方向为133°,两者呈正交关系, 不利于隧道围岩的稳定性。当水平主应力平均值与垂 直应力比值为1.0时,围岩的应力分布会比较均匀,对 围岩稳定性有利,但测试结果表明两者比值的平均值 为1.12,围岩应力分布不均。同时,由于 $\sigma_{\rm H}/\sigma_{\rm v}$ 的比 值较大(1.20~1.57,均值1.39),最大水平主应力绝 对值也较大(23.81 MPa),具备产生岩爆的条件。 2.2 地应力与埋深关系

将所得水平最大主应力、最小主应力进行线性拟 合,得图4。可知,地应力随深度增加而增大,呈近似 线性关系。





3 地应力特征数值分析

本隧道涉及的地层岩性可概化为黑云母二长花岗 岩、板岩、变质砂岩三种岩性,其中黑云母二长花岗岩 的饱和抗压强度最大,普遍埋深也较大,高-极高应力 段落长度最长,发生岩爆的可能性最大。进行地应力 测试的两个钻孔中,5#钻孔的地层岩性为黑云母二长 花岗岩。由于篇幅有限,这里以5#钻孔所在里程断面 为例,通过建立隧道二维数值计算模型,将岩石物理力 学试验、地应力测试结果输入计算模型 对隧道开挖前 后地应力场及开挖后的净空位移场的分布规律进行分 析,进而预测岩爆等级。

3.1 数值模型的建立

该断面位于测设里程 K21 + 940 隧道埋深 560 m, 地层岩性以黑云母二长花岗岩为主,洞身为微风化,局 部夹少量变质砂岩俘虏体,地表覆盖层厚度小于 5 m, 建立二维数值计算模型如图 5。



Fig. 5 2D computation model

为了更加真实地反映隧道地应力分布情况,根 据实测断面确定模型范围:水平方向(x 轴)长度取 160 m,垂直方向(y 轴)两侧取值均为600 m。根据 钻孔实测资料,地层可概化为中-微风化黑云母二 长花岗岩。模型类型为二维平面应变模型,网格的 划分采用四边形 + 三边形相结合的形式,共划分网 格 592 个,节点 627 个,屈服准则选取 Mohr-Coulomb 准则,本构模型采用弹塑性莫尔一库伦模 型,该模型参数包括弹性模量 E_x 泊松比 λ_x 黏聚力 C和内摩擦角 φ 。边界条件定义为:左右边界均施 加法向约束,底部边界施加固定约束,地表为自由 边界。荷载采用自重、地应力实测值与拟合函数 (图6),由于最大水平主应力方向与隧道呈90°交 角,地应力荷载可施加于左侧边界。



Fig. 6 Geostress load function curve

在结合现场勘探、地应力测试与室内岩石物理力 学试验的基础上,综合确定计算参数(表2)。

表2 地层计算参数

Table (tratic	ranh	ic n	aramı	ter
I able 4	4 D	เกลเเย	гарп	IC D	arame	eter

地层岩性	重度/ (kN•m ⁻³)	弹性模量 E/MPa	泊松比 λ	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 <i>φ</i> /(°)	
黑云母 二长花岗岩	27.2	19 820	0.13	11.05	46. 1	

3.2 计算结果

从图 7 可知,主应力分布呈椭圆状不均匀分布,这 是由水平应力与自重应力叠加后的应力不均导致的, 而地应力测试结果表明隧道以水平构造应力为主,数 值分析与地应力测试所得规律一致。隧道开挖后易在 洞室周边形成应力集中(图 7b),由于围岩属于脆性坚 硬岩类,自身及周边围岩储存的能量需要迅速释放,这 就导致岩体获得了动能,以应力波的形式释放,进而产 生岩爆。





从图 8(a)、(c)可知,在水平地应力下,隧道净空 位移、等效应变均呈不对称分布。由于受力不均匀 隧 道施工可能产生左侧边墙、仰拱及拱脚的严重变形、破 坏,施工中应引起足够的重视。

从图9可知,开挖后隧道洞身3~5倍洞径范围内 的剪应力变化较大,开挖后应力较开挖前增大了 14%,可见这部分增加的应力与净空条件是产生岩爆 的主要原因。



图 8 净空位移、应力应变等值线图 Fig. 8 Contour map of displacement and stress strain

3.3 数值计算与实测结果对比

从整体上看,围岩应力大小与隧道埋深呈正相关。 根据数值计算结果,对比深孔实测结果(表3),隧址区 存在水平构造应力,4 # 孔为 23.81 MPa,5 # 孔为 21.78 MPa,水平构造应力与隧道轴向呈正交关系,隧 道开挖会导致洞室围岩应力状态的二次调整,边墙、仰 拱及拱脚部位有明显的应力集中,开挖过程中可能产 生较严重的岩爆。

表 3 数值计算与地应力实测结果对比 Table 3 Comparison between the simulated and

und anound atm

	measured ground stress									
우리 仲드	涩 亩 /	$\sigma_{ m H}$	/MPa	$\sigma_{ m h}/{ m MPa}$						
切び病ち	休反/Ⅲ	实测	数值计算	实测	数值计算					
	164. 5 ~ 165. 3	8.34	7.95	5.32	3.84					
	227. 5 ~ 228. 3	9.68	8.86	6.68	5.52					
	272. 5 ~ 273. 3	10.33	9.82	7.17	6.26					
	326. 3 ~ 327. 1	10.90	10.3	8.24	8.48					
	389. 5 ~ 390. 3	12.25	12.01	10. 25	11.36					
4#	443.3 ~444.1	14.41	13.92	11.10	12.52					
	497. 5 ~498. 3	15.97	16.13	12.33	13.81					
	551.3 ~552.1	18.06	18.39	13.26	14.67					
	617. 5 ~ 618. 3	19.85	20.17	15.30	17.34					
	677.3 ~678.1	22. 29	23.05	16.88	18.28					
	722. 5 ~723. 3	23.30	23.84	17.48	19.94					
	740. 3 ~741. 1	23.81	24.68	18.06	20.36					
	146. 5 ~147. 3	10.43	9.61	6.89	5.28					
	200. 3 ~201. 1	11.77	10.84	7.75	6.96					
	254. 5 ~255. 3	12.61	11.92	8.76	8.48					
	308.3 ~309.1	15.34	14.95	10.60	9.93					
<i>с</i>	362. 5 ~ 363. 3	16.43	16.04	11.88	11.95					
5#	410.3 ~411.1	18.39	18.43	13.15	13.72					
	461. 5 ~462. 3	19.33	19.89	13.95	14.86					
	506. 3 ~ 507. 1	20.77	21.04	14.64	15.38					
	542. 5 ~ 543. 3	21.55	22.63	15.32	16.77					
	560. 3 ~ 561. 1	21.78	22.96	15.65	17.29					



图9 最大剪应力随深度变化曲线



4 弹性应变能指数法测试

该方法由波兰学者 A Q Kidybin-shi 提出,该方法 认为岩爆是由于开挖卸荷后原本在初始应力场下聚集 的弹性应变能突然释放的结果,而弹性应变能的大小 通常与初始地应力状态、岩体的物理力学性质有关。 因此,可通过岩石的应力-应变曲线计算弹性应变能指 数来评价岩爆发生的可能。弹性应变能指数计算的示 意图见图 10,计算公式为:

$$W_{\rm et} = \frac{\varphi_{\rm sp}}{\varphi_{\rm st}} \tag{1}$$

式中: W_{et} — 弹性应变能指数;

- φ_{sp}——卸载后释放的弹性应变能,对应图中
 ABC 所围面积;
- φ_{st} 开挖卸荷后围岩发生的破裂与塑性变形
 耗散的应变能,对应图中 AOB 所围面积;
- ε_{p} ——塑性应变;
- ε_{s} ——弹性应变;
- *σ*₀-----0.7~0.9 倍岩石单轴抗压强度 ,一般取 0.8 倍。



图 10 岩石试样弹性应变能计算示意图



国内外大量现场试验与研究表明^[13-16],弹性应变 能指数越大,开挖时围岩释放的冲击能量就越大,可代 表发生岩爆的可能。波兰国家标准建议的能量预测判 据如下^[17]:

W_{et} < 2.0 不会产生岩爆

W_{et}≥5.0 形成严重岩爆

本次试验选取了10组能够代表隧道围岩特征 的试样进行试验,岩性包括板岩、变质砂岩、黑云母 二长花岗岩,得到的弹性应变能指数表4。三种岩 性的代表性试验单轴加载、卸载应力-应变曲线见 图11。



图 11 岩石单轴加载、卸载应力 – 应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve of rock under uniaxial

loading and unloading

表4	岩石物理力学性质与弹性应变能指数测试汇总

Table 4	Summary of	f physical	and me	chanical	properties of	f rock and	d elastic	strain ene	rgy ind	lex test	t
---------	------------	------------	--------	----------	---------------	------------	-----------	------------	---------	----------	---

钻孔	取样涩度	半卅七炮早	天然密度	天然抗压	饱和抗压	黏聚力	内摩擦角	卸载值/破	弹性应变能	判定
编号	软件/ 木皮	石注ラ编写	$\rho/({\rm g}^{\bullet}{\rm cm}^{-3})$	强度 R/MPa	强度 R _c / MPa	C/kPa	φ/(°)	坏值	指数 W _{et}	结果
4#	733.4 ~734.0	板岩1	2.65	43.1	35.2	6.97	42.9	0.67	1.93	无岩爆
4#	740. 2 ~740. 8	板岩2	2.60	46.6	38.7	4.90	41.7	0.62	2.45	低岩爆
4#	743.6~35.9	板岩3	2.59	38.0	29.7	6.42	43.3	0.58	1.42	无岩爆
4#	749. 2 ~749. 8	板岩4	2.56	46.3	38.4	6.13	42.6	0.66	2.38	低岩爆
3#	151. 2 ~ 151. 8	变质砂岩1	2.58	43.7	35.6	7.17	43.5	0.55	2.68	低岩爆
3#	176.0 ~176.6	变质砂岩2	2.46	46.1	38.3	6.46	43.3	0.52	4.41	中等岩爆
3#	520. 2 ~ 520. 8	变质砂岩3	2.45	45.0	37.3	6.05	42.9	0.46	3.89	中等岩爆
5#	543.4 ~ 544.0	二长花岗岩1	2.74	86.4	79.5	11.58	47.5	0.49	7.45	严重岩爆
5#	553.0 ~ 553.6	二长花岗岩2	2.73	77.3	70.3	10.97	45.8	0.62	4.98	中等岩爆
5#	561. 2 ~ 561. 8	二长花岗岩3	2.71	85.7	78.1	11.35	46.7	0.47	6.38	严重岩爆
5#	570.4 ~ 571.0	二长花岗岩4	2.72	83.1	75.4	11.05	46.1	0.73	5.96	严重岩爆

根据以上分析,该隧道黑云母二长花岗岩段落长度3 km,且埋深均大于500 m,处于高-极高地应力水平,具备发生中等-严重岩爆的储能与释放条件;板岩段仅局部可能发生低岩爆

5 岩爆预测综合分析与处治建议

5.1 地应力条件

隧道位于雅鲁藏布江断裂带附近,区域地质构造 显著,该区具备了高地应力条件。隧道穿越圭嘎拉主 峰,最大埋深1200m,埋深500m以上区段长度达 6.3 km,占整个隧道长度的48.8%,自重应力与构造 应力共同形成了复杂的高地应力场。现场地应力测试 结果表明:测试段(埋深大于 500 m)应力绝对值处于 高水平,为15.97~23.81 MPa,且水平主应力与垂直 应力比值均值为1.35~1.43,反应了应力分布极不均 匀。综上,圭嘎拉隧道具备了形成岩爆的地应力条件。 5.2 岩性与结构特征

圭嘎拉隧道以新鲜的板岩夹砂岩、黑云母二长花 岗岩、片麻花岗岩等脆性硬质岩类为主 岩体风化程度 弱 岩质新鲜,现场钻探揭示岩芯的 *RQD* > 83%,岩芯 采取率 >95%,多为长柱状,岩芯完整性好,节理裂隙 不发育,具备了较好的储能条件。弹性应变能指数试 验表明,黑云母二长花岗岩的 *W*_{et}基本上大于5,可能 产生严重岩爆;片麻花岗岩与黑云母二长花岗岩的岩 性特征类似,同样具备产生强岩爆的可能;板岩夹变质 砂岩段因岩性不稳定,节理裂隙较发育,岩爆等级以低 岩爆为主。

5.3 地下水影响

圭嘎拉隧道洞身段地下水主要以基岩裂隙水为 主,但由于洞身段岩体完整性好,裂隙发育很微弱,基 岩裂隙水主要在隧道进口、出口段发育较为丰富,洞身 段地下水的存在对围岩起到一定的软化作用,降低围 岩的脆性,在一定程度上能够减弱岩爆,但由于洞身段 围岩完整性好,原生节理裂隙不发育,因此地下水对隧 道岩爆的减弱效果很有限。

5.4 岩爆综合分析结果

通过地质环境的分析、数值模拟、岩体弹性应变能 以及地应力场特征的综合判断,圭嘎拉隧道埋深大于 500 m时,板岩夹变质砂岩段以低岩爆为主(长度约 3.3 km),黑云母二长花岗岩与片麻花岗岩段以中等-严重岩爆为主(长度约3.0 km)。

5.5 处治措施建议

建议隧道断面采用圆顺的低边墙断面,尽可能使 洞室周边处于应力均匀状态。

低岩爆段落,建议在开挖面上洒水,软化表层。初 期支护采用网喷混凝土、超前锚杆的联合加固措施。

中等-严重岩爆段落,建议采用超前应力解除法、 高压注水等主动防护措施降低洞壁切向应力,初期支 护采用喷钢纤维混凝土、格栅拱架等加固措施。

6 结论及建议

(1) 圭嘎拉隧道所处的地应力状态总体上为
 σ_H > σ_v,地应力状态以水平构造应力为主。实测
 地应力最大值为 23.81 MPa,数值计算对应值为 24.68
 MPa,二者分布规律基本一致。

(2)最大水平主应力方向约为 NE40.9°,隧道洞 轴线方向为133°,两者呈正交关系,隧道施工中边墙、 仰拱与拱脚可能产生严重变形、破坏。

(3)从岩石的应变能指数测试可知,黑云母二长花岗岩储释能性质具备发生中等-严重岩爆,板岩的储释能性质具备发生低岩爆。

(4) 圭嘎拉隧道具备产生中等-严重岩爆的条件, 工程设计与施工中应采取相应的防治措施。

参考文献:

[1] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定 量预测模型[J]. 岩土力学, 2014,35(1):1-6. [QIAN Q H. Definition , mechanism , classification and quantitative forecast model for rock burst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics , 2014 , 35(1):1-6. (in Chinese)]

- [2] 何满朝,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803
 2813. [HE M C,XIE H P, PENG S P, et al. Study on mechanics of deep mining rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24 (16):2803-2813. (in Chinese)]
- [3] WANG Jianchao , JIANG Fuxing , MENG Xiangjun , et al. Mechanism of rock burst occurrence in specially thick coal seam with rock parting [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering , 2016 , 49 (5): 1953 – 1965.
- [4] ZHANG Yanbo, YU Guangyuan, TIAN Baozhu, et al. Review of the research progress of rock burst [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015 (716/717): 410-413.
- [5] YANG Zengqiang, LIU Chang, TANG Shichuan, et al. Rock burst mechanism analysis in an advanced segment of gob-side entry under different dip angles of the seam and prevention technology [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017,11 (1): 1016-1025.
- [6] 杜世回. 秦岭翠华山特长隧道高地应力问题研究 [J]. 铁道工程学报, 2012 29(2):55 - 58. [DU S H. Study on high stress of cuihuashan super long tunnel in Qinling Mountain Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012,29(2):55 - 58. (in Chinese)]
- [7] 邓小鹏 相建华. 宝塔山特长隧道地应力场研究及 岩爆预测[J]. 水文地质工程地质, 2013 40(1):
 83-88. [DENG X P,XIANG J H. A study of the geostress field of the surrounding rocks of the Baota mountain tunnel and rock burst forecast [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013 40(1):
 83-88. (in Chinese)]
- [8] 王庆武,巨能攀 杜玲丽,等. 深埋长大隧道岩爆预测与工程防治研究[J]. 水文地质工程地质, 2016,43(6):88-94. [WANG Q W, JU N P, DU L L, et al. Research on rock burst prediction and engineering measures of long and deep-lying tunnels
 [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016,43 (6): 88-94. (in Chinese)]
- [9] LIU Zaobao, SHAO Jianfu, XU Weiya, et al. Prediction of rock burst classification using the technique of cloud models with attribution weight [J]. Natural Hazards, 2013, 68 (2): 549 - 568.
- [10] 中交第一公路勘察设计研究院. 西藏 S5 线圭嘎拉

隧道详细工程地质勘察报告[R]. 西安,2016. [CCCC First Highway Consultants Co, Ltd. The detailed engineering geological survey report of Guigala tunnel in S5 Tibet [R]. Xi' an,2016. (in Chinese)]

- [11] 中交第一公路勘察设计研究院. 西藏 S5 线圭嘎拉 隧道地应力测试报告 [R]. 西安, 2016. [CCCC First Highway Consultants Co, Ltd. The report of fracturing stress about Guigala tunnel in S5 Tibet [R]. Xi' an, 2016. (in Chinese)]
- [12] 景锋 盛谦 张勇慧 等. 我国原位地应力测量与地应力场分析研究进展 [J]. 岩土力学, 2011 32(增刊2): 51-58. [JING F, SHENG Q, ZHANG Y H, et al. Progress in in-situ geo-stress measurement and geo-stress field analysis in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011 32(Sup2): 51-58. (in Chinese)]
- [13] ATSUSHI SAINOKI, HANI S MITRI. Quantitative analysis with plastic strain indicators to estimate damage induced by fault-slip [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10 (1):1-10.
- [14] XU Jie, JIANG Jingdong, XU Ning, et al. A new energy index for evaluating the tendency of rockburst and its engineering application [J]. Engineering

(上接第169页)

生过程 [J]. 现代隧道技术 2009 A6(5):66-72. [XIAO X C, YUAN J R ZHU Y F. Causation analysis of the collapse on singapore MRT Circle Line Lot C824 (part i) — project background and process of collapse [J]. Modern Tunnelling Technology 2009 A6(5):66 -72. (in Chinese)]

[13] 朱瑶宏,叶俊能,刘晓虎,等.宁波轨道交通地下 连续墙深基坑工程变形特性及控制研究[J].水文 地质工程地质,2012,39(4):66-74.[ZHUYH, YEJN,LIUXH,et al. Deformation characteristics and control of foundation pits supporting with diaphgram wall in the Ningbo urban rail transit [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2012,39(4): Geology, 2017 230(29): 46-54.

- [15] 严鹏,谢良涛,范勇,等.不同开挖方式下深部岩体 应变能的释放机制[J].煤炭学报,2015,40(增 刊):60-68.[YAN P,XIE L T,FAN Y,et al. Release mechanism of strain energy in deep rock mass under different excavation modes [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(Sup):60-68.(in Chinese)]
- [16] 杨建华,卢文波,严鹏.基于瞬态卸荷动力效应控制的岩爆防治方法研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(1):68-75. [YANG J H,LU W B,YAN P. Research on rockburst prevention and control method based on transient unloading dynamic effect control [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(1):68-75. (in Chinese)]
- [17] 吕庆 孙红月 李德建,等. 深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005 24 (16): 2982 2988. [LYV Q SUN H Y, LI D J, et al. Comprehensive study on prediction of rock burst in deep and over-length highway tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005 24 (16): 2982 2988. (in Chinese)]

编辑: 汪美华

66 – 74. (in Chinese)]

- [14] 郑刚,程雪松,张雁. 基坑环梁支撑结构的连续破 坏模拟及冗余度研究[J]. 岩土工程学报 2014,36
 (1):105 - 117. [ZHENG G,CHENG X S,ZHANG Y. Simulation of progressive collapse and redundancy of ring-beam supporting structures of excavations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014, 36(1):105 - 117. (in Chinese)]
- [15] DAN M F, CURLEY J P. Effects of damage and redundancy on structural reliability [J]. Journal of Structural Engineering ,1987, 113(7):1533-1549.

编辑: 汪美华