

文章编号:1672-6561(2013)02-0115-05

雅鲁藏布江峡谷段盆因拉隧道岩爆预测

王喜华¹, 赵志明², 尹建勋³, 黄 秦³

(1. 西南石油大学 资源与环境学院, 四川 成都 610500; 2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031; 3. 中铁二十一局集团有限公司, 甘肃 兰州 730015)

摘 要: 盆因拉隧道地处雅鲁藏布江峡谷段高地应力地区。为了保证施工安全, 采用水压致裂法在盆因拉隧道内进行了地应力测量。基于测试数据, 通过线性回归方法分析了围岩应力场分布特征, 采用 Russenes 判据和侯发亮临界埋深判据分析了隧道中发生岩爆的临界深度, 并对不同埋深段的岩爆趋势进行了预测。结果表明: 隧址区最大水平主应力为 24.7~27.4 MPa, 方位为近北东向 35°, 具有极高地应力水平, 侧压系数平均值为 1.7; 隧道埋深在 200 m 以下发生岩爆的可能性较小, 但局部会有弱岩爆发生, 200~400 m 埋深处有发生弱—中等岩爆的可能, 大于 400 m 埋深处有发生强烈岩爆的可能; 发生岩爆的理论临界深度为 325 m, 而实际发生岩爆的最小深度为 300 m。因此, 在施工过程中应采取合理的开挖方式及必要的工程应对措施降低岩爆灾害的影响。

关键词: 岩爆预测; 地应力; 水压致裂法; Russenes 判据; 临界埋深; 盆因拉隧道; 雅鲁藏布江
中图分类号: P642; P694 **文献标志码:** A

Rockburst Prediction of Penyinla Tunnel in Brahmaputra Valley Section

WANG Xi-hua¹, ZHAO Zhi-ming², YIN Jian-xun³, HUANG Qin³

(1. School of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;
2. School of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 3. China Railway 21st Bureau Group Co., Ltd., Lanzhou 730015, Gansu, China)

Abstract: Penyinla tunnel is located in Brahmaputra valley section with high ground stress. In order to ensure construction safety, ground stress was measured in Penyinla tunnel by hydro-fracturing method; distribution characteristics of stress field of the surrounding rock were analyzed by linear regression method; the critical depth of tunnel rockburst was calculated by Russenes criterion and HOU Fa-liang critical depth criterion, and the rockburst tendency in different depths of section was predicted. The results showed that the maximum horizontal principal stress was 24.7-27.4 MPa, the direction was about NE 35°, the ground stress was extremely high, and the average of lateral pressure coefficient was 1.7; the possibility of rockburst was low when the depth of tunnel was less than 200 m, but weak rockburst happened partly, weak-medium rockburst happened possibly when the depth was 200-400 m, and strong rockburst happened possibly when the depth was more than 400 m; the theoretical critical depth of rockburst was 325 m, but the actual minimum depth of rockburst was 300 m. Therefore, reasonable excavation and necessary engineering measures should be adopted for the tunnel construction to avoid rockburst disaster.

Key words: rockburst prediction; ground stress; hydro-fracturing method; Russenes criterion;

收稿日期: 2013-04-15

基金项目: 铁道部重大课题项目(2011G027-B)

作者简介: 王喜华(1978-), 女, 河北行唐人, 讲师, 工学博士研究生, E-mail: xhwang@swpu.edu.cn.

critical depth; Penyinla tunnel; Brahmaputra

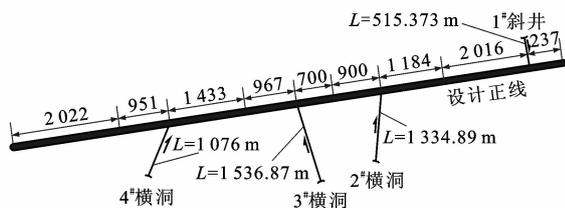
0 引言

岩爆,也称冲击地压,是埋藏深度较大以及在地应力较高状况下的地下工程在开挖过程中或者在开挖之后,储存于围岩体中的弹性应变能突然释放并且产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛射现象的一种动力失稳现象,也是一种经常遇到的地质灾害^[1-6],尤其是在坚硬的脆性岩层中,其发生的几率更大。因此,岩爆往往直接造成开挖工作面的严重破坏、设备的损坏、施工人员的伤亡,并影响施工进度,已成为岩石工程和岩石力学领域中的难题之一。

雅鲁藏布江峡谷段在建的盆因拉隧道2[#]横洞在施工初期多次发生岩爆。为了保证施工安全,采用水压致裂法进行现场地应力测试,采用 Russenes 判据对不同埋深处发生岩爆的可能性进行预测,最后对隧道岩爆临界埋深进行分析,为后续隧道的开挖提供理论依据。

1 工程概况

盆因拉隧道进口位于泽朗曲右岸冲洪积台地,出口位于雅鲁藏布江左岸至宗嘎村后的山坡处。隧道最大埋深1 080 m,全长10 410 m。盆因拉隧道共设1个斜井,3个横洞,其中2[#]横洞全长1 335 m,与隧道正洞夹角82°,最大埋深为965 m,洞径为7 m(图1)。2[#]横洞按无轨运输设计,采用双车道内轮廓,其净空尺寸为7 m(宽)×6 m(高)。隧道围岩主要为燕山期黑云母花岗岩和闪长岩,以青灰色、浅灰色为主,局部呈灰绿色或灰黑色,中粗粒结构,块状或碎块状构造,矿物主要成分为角闪石、石英、长石、黑云母等,岩石普遍具有蚀变特征,岩体致密、坚硬,局部夹石英岩脉,节理、裂隙较发育,岩体较完整,以Ⅱ、Ⅲ级围岩为主。盆因拉隧道局部构造岩为断层角砾,断层破碎带主要由碎裂岩、断层角砾组成,局



L 为斜井和横洞的长度;箭头为掘进方向

图1 盆因拉隧道位置(单位:m)

Fig.1 Location of Penyinla Tunnel (Unit:m)

部夹少量断层泥砾。

2 地应力测试

2.1 水压致裂法测试原理

水压致裂法测试地应力的原理^[7-8]是利用一对可以膨胀的橡胶封隔器,在预定的测试深度封隔一段钻孔,然后泵入液体对该段钻孔进行施压,再根据压裂过程曲线的压力特征值计算地应力。

2.2 测试孔概况

为了研究盆因拉隧道和横洞在施工开挖过程中发生岩爆的原因,并为后续隧道和横洞开挖提供岩爆防护措施以及提供隧道岩爆治理的技术参数,地应力测试工作在盆因拉隧道2[#]横洞地应力钻孔内进行。钻孔部位山顶的高程约4 340 m,孔口高程约3 790 m,测孔部位埋深约550 m,孔深30 m,钻孔内岩芯为闪长岩,全孔岩芯较完整,局部略显破碎。

2.3 测试结果分析

2.3.1 应力量值与地应力方位

水压致裂法地应力测试结果见表1,其中 σ_H 为最大水平主应力, σ_h 为最小水平主应力, σ_z 为测点上覆岩石的自重应力, λ 为最大水平主应力方向的侧压系数(σ_H/σ_z)。测试时的水位在孔口,孔口上覆岩体深度按550 m计算,岩石重度取 $27.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。现场地应力测试共成功获得3个测试段压裂资料和相应的围岩压裂印模资料。从图2可以看出,测试曲线形态符合水压致裂法测试的一般规律,各压力特征值比较明显。

表1 水压致裂法地应力测试结果

Tab.1 Results of Ground Stress Measured by Hydra-fracturing Method

序号	孔深/m	σ_H/MPa	σ_h/MPa	σ_z/MPa	λ	σ_H 方位
1	21.93	27.4	15.4	15.4	1.7	北东向 35°
2	25.18	24.9	14.7	15.5	1.6	
3	27.13	24.7	14.6	15.6	1.8	

根据地应力测试结果得出, σ_H 为24.7~27.4 MPa,平均为25.6 MPa; σ_h 为14.6~15.4 MPa,平均为14.9 MPa; σ_z 平均为15.5 MPa。测试部位最大水平主应力方向为近北东向35°,按照峡谷区地应力重分布的一般规律,岩体内重分布应力的最大主应力为近南北向或北北东向,二者所得出的结论接近(表1中去除了3倍隧道直径应力释放区的数据),即以北北东向的挤压为主。

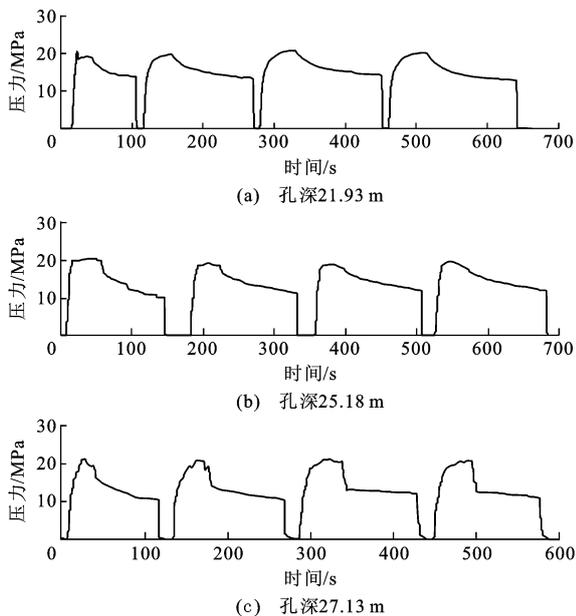


图 2 水压致裂法压力记录曲线

Fig. 2 Recording Curves of Pressure by Hydra-fracturing Method

2.3.2 侧压系数

测试点最大水平主应力方向的侧压系数为 1.6~1.8,平均为 1.7。与地应力分布一般规律相比较,测试孔部位水平主应力偏大;结合测试孔所在部位地形地貌和地质构造情况,隧址区地应力受地质构造和河谷地形造成的应力集中影响。

2.3.3 地应力量值与深度的关系

地应力量值的大小往往直接影响地下工程的稳定性;因此,为了探讨地应力随深度变化的关系,便于为盆因拉隧道和横洞后续的施工作参考,将测试范围内 σ_H 、 σ_h 与 σ_z 进行比较。地应力量值拟合公式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= 1.7\gamma H \\ \sigma_h &= 1.0\gamma H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: H 为岩石埋深; γ 为岩石重度,取值为 $27 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3 隧道内地应力评估

通过地应力实地测试及结果分析,对 2# 横洞测试孔部位围岩地应力状况有了一定认识。盆因拉隧道和 2# 横洞全长将近 12 km,最大埋深处约 1 080 m,远远大于测试深度;因此,采用埋深与地应力的拟合关系分析和推测盆因拉隧道和 2# 横洞围岩地应力情况。

测试孔部位隧道埋深约 550 m,围岩为完整闪长岩,测试部位 σ_H 为 25.6 MPa, σ_h 为 14.9 MPa, σ_z

为 15.5 MPa。取闪长岩单轴饱和抗压强度 R_b 为 80 MPa,则 $R_b/\sigma_{\max} = 3.9 < 4$,其中 σ_{\max} 为隧道横断面内的最大初始应力,2# 横洞隧道轴线为北西向 10° ,最大水平主应力方向为北东向 35° ,最大水平主应力和 2# 横洞隧道轴线夹角为 45° 。依据文献[9],岩体应力量级为极高应力水平。

4 2# 横洞岩爆预测

在岩爆的预测研究中,国内外学者根据经验制定了许多岩爆的判据准则。笔者应用 Russeness 判据[4]对 2# 横洞在不同埋深处是否发生岩爆进行预测,同时应用侯发亮临界埋深判据[10]预测发生岩爆的最小埋深,为后续隧道开挖提供理论依据。

4.1 Russeness 判据

挪威学者 Russeness 应用有限元和 Kirsch 方程计算洞壁最大切向应力 $\sigma_{\theta\max}$,用 $\sigma_{\theta\max}/R_b$ 值来预测岩爆和判定岩爆等级。其判别标准[11-12]为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\theta\max}/R_b < 0.20 & \quad \text{无岩爆} \\ 0.20 \leq \sigma_{\theta\max}/R_b < 0.30 & \quad \text{弱岩爆} \\ 0.30 \leq \sigma_{\theta\max}/R_b < 0.55 & \quad \text{中岩爆} \\ \sigma_{\theta\max}/R_b \geq 0.55 & \quad \text{强岩爆} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

4.1.1 隧道开挖洞壁切向应力计算

采用数值模拟方法计算隧道开挖洞壁切向应力值 σ_θ ,数值模拟模型见图 3。根据现场地应力测量数据,将 σ_H 施加在水平方向,并在模型上部加载上覆岩体 σ_z ; σ_z 主要根据隧道埋深确定,模型底部垂向位移约束。

4.1.2 Russeness 判据预测结果

根据 Russeness 判据对盆因拉深埋隧道进行岩爆预测。预测结果见表 2。

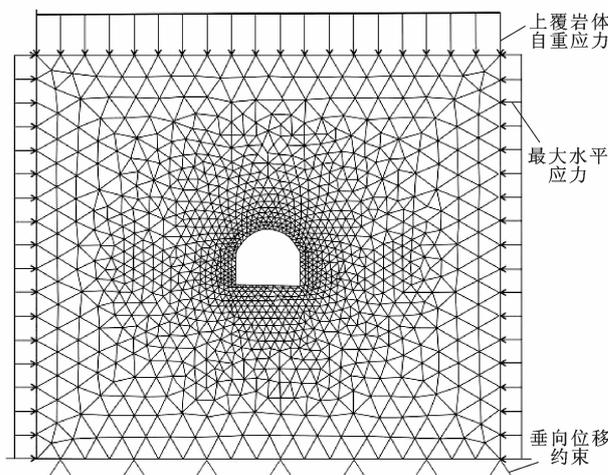


图 3 隧道开挖数值模拟模型

Fig. 3 Numerical Simulation Model in Tunnel Excavation

表2 不同埋深 Russeness 判据岩爆预测结果

Tab. 2 Prediction Results of Rockbursts with Different Depths by Russeness Criterion

埋深/m	σ_H /MPa	$\sigma_{\theta\max}$ /MPa	Russeness 判据	岩爆级别
<200	$\sigma_H < 7.08$	$\sigma_{\theta\max} < 18.18$	$\sigma_{\theta\max}/R_b < 0.22$	无一弱岩爆
200~400	$7.08 < \sigma_H < 14.16$	$11.68 < \sigma_{\theta\max} < 35.26$	$0.14 < \sigma_{\theta\max}/R_b < 0.42$	弱一中等岩爆
400~600	$14.16 < \sigma_H < 21.24$	$17.87 < \sigma_{\theta\max} < 52.34$	$0.21 < \sigma_{\theta\max}/R_b < 0.63$	弱一强岩爆
600~800	$21.24 < \sigma_H < 28.32$	$24.06 < \sigma_{\theta\max} < 69.42$	$0.29 < \sigma_{\theta\max}/R_b < 0.83$	弱一强岩爆

4.2 侯发亮临界埋深判据

侯发亮等在1989年首先提出了侯发亮临界埋深判据,认为岩爆虽多发生在水平构造应力较大的区域,但如果洞室埋深较大,即使没有构造应力,但由于上覆岩体效应的存在,洞室也可能发生岩爆^[10]。根据弹性力学求解,推导出仅考虑上覆岩体自重情况下岩爆发生的临界深度^[12-17] H_{cr} 计算公式

$$H_{cr} = \frac{0.318R_b(1-\mu)}{(3-4\mu)\gamma} \quad (3)$$

式中: μ 为岩石泊松比。

根据式(3)以及盆因拉隧道岩石物理力学参数,计算得出盆因拉隧道发生岩爆的理论临界深度为325 m,而实际上2#横洞发生岩爆的最小埋深是300 m(表3)。因此,应密切观察施工过程中出现的异常现象。

表3 侯发亮临界埋深判据计算结果

Tab. 3 Results of HOU Fa-liang Critical Depth Criterion

岩性	R_b /MPa	μ	γ ($\text{kN} \cdot \text{cm}^{-3}$)	H_{cr} /m	实际发生岩爆 的最小深度/m
闪长岩	80	0.12	27.3	325	300

4.3 2#横洞岩爆预测

对于2#横洞中闪长岩地段,隧道埋深小于200 m一般不会产生岩爆,局部可能会产生弱岩爆;埋深在200~400 m之间往往是发生岩爆的临界深度,一般会出现弱一中等岩爆;埋深在400~800 m范围时,一般会以中一强岩爆为主。

5 结 语

(1)雅鲁藏布江峡谷段盆因拉隧道洞身段属于极高地应力区,最大水平主应力为24.7~27.4 MPa,最小水平主应力为14.6~15.4 MPa。

(2)最大水平主应力方位总体为近北东向35°,测压系数平均值为1.7,测试区地应力场主要受峡谷区地应力重分布及区域地质构造影响。

(3)地应力量值与深度拟合得到具有一定实践价值的拟合公式,可用来估算围岩应力场,但应注意考虑区域差异性造成的影响。

(4)根据 Russeness 判据预测分析,该区埋深在200 m以下发生岩爆的可能性较小,局部会有弱岩爆发生;200~400 m埋深为岩爆发生的临界深度范围,主要发生弱一中等岩爆;埋深大于400 m会有强烈的岩爆发生。

(5)根据侯发亮临界埋深判据得到的临界深度为325 m,而实际发生岩爆的最小深度为300 m,相对于理论值偏小,因此更应时刻注意岩爆危害。

(6)盆因拉隧道2#横洞处于极高地应力区,横洞围岩在开挖过程中发生岩爆的可能性比较大,同时影响岩爆发生的因素众多。岩爆发生具有很强的随机性,施工中应提高警惕,对于岩体完整、干燥地段应加强监测,采取必要、合适的工程措施以降低岩爆危害。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 许梦国,杜子健,姚高辉,等.程潮铁矿深部开采岩爆预测[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增1):2921-2928.
XU Meng-guo, DU Zi-jian, YAO Gao-hui, et al. Rockburst Prediction of Chengchao Iron Mine During Deep Mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2921-2928.
- [2] 吕庆,孙红月,尚岳全,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.
LU Qing, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Comprehensive Study on Prediction of Rockburst in Deep and Over-length Highway Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2982-2988.
- [3] 郭长宝,张永双,邓宏科,等.基于岩爆倾向性的高黎贡山深埋隧道岩爆预测研究[J].工程勘察,2011(10):8-13.
GUO Chang-bao, ZHANG Yong-shuang, DENG Hong-ke, et al. Study on Rock Burst Prediction in the Deep-buried Tunnel at Gaoligong Mountain Based on the Rock Proneness [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2011(10): 8-13.

- [4] 徐林生,王兰生,李天斌.国内外岩爆研究现状综述[J].长江科学院院报,1999,16(4):24-27.
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Tian-bin. Present Situation of Rockburst Research at Home and Abroad [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 24-27.
- [5] 陈建勋,杨忠,袁雪勤.秦岭终南山特长公路隧道大埋深段施工监测及分析[J].建筑科学与工程学报,2006,23(3):71-75.
CHEN Jian-xun, YANG Zhong, YUAN Xue-kan. Construction Monitoring and Measuring in Segments of Large Embedded Depth in Qinling Zhongnanshan Super-long Highway Tunnel [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 71-75.
- [6] 夏彬伟,胡科,卢义玉,等.深埋隧道层状岩体破坏过程特征模型试验[J].中国公路学报,2012,25(1):107-114.
XIA Bin-wei, HU Ke, LU Yi-yu, et al. Model Test for Characteristics of Failure Process of Layered Rock Mass in Deep Buried Tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 107-114.
- [7] 李方全.地应力测量[J].岩石力学与工程学报,1985,4(1):95-111.
LI Fang-quan. Geostress Measurement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1985, 4(1): 95-111.
- [8] 李宗长,唐宏路,张志奇.龙潭隧道高地应力炭质页岩大变形整治施工技术[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(2):60-62.
LI Zong-chang, TANG Hong-lu, ZHANG Zhi-qi. High Geostress Carbonaceous Shale Large Deformation Control Technique of Longtan Tunnel [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2010, 27(2): 60-62.
- [9] GB 50218—94,工程岩体分级标准[S].
GB 50218—94, Standard for Engineering Classification of Rock Masses [S].
- [10] 侯发亮,王敏强.圆形隧洞中岩爆的判据及防治措施[C]//中国岩石力学与工程学会.岩石力学在工程中的应用——第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集.北京:中国岩石力学与工程学会,1989:195-201.
HOU Fa-liang, WANG Min-qiang. Rockburst Criteria and Control in the Circular Tunnel [C] // Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Application of Rock Mechanics in Engineering—Proceedings of the 2nd National Conference of Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 1989: 195-201.
- [11] 肖本职,罗超文,刘元坤.鄂西地应力测量与隧道岩爆预测分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(24):4472-4477.
XIAO Ben-zhi, LUO Chao-wen, LIU Yuan-kun. In-situ Stress Measurement and Prediction Analysis of Tunnel Rockburst in West Hubei [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4472-4477.
- [12] 张镜剑,傅冰骏.岩爆及其判据和防治[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):2034-2042.
ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and Its Criteria and Control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034-2042.
- [13] 徐林生,王兰生.二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施研究[J].中国公路学报,2003,16(1):74-76.
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng. Research on Rockburst Character and Prevention Measure of Erlang Mountain Highway Tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 74-76.
- [14] 姜跃东,王玉来.山区特长公路隧道高地应力问题分析评价及防治措施[J].公路,2013(1):278-283.
JIANG Yue-dong, WANG Yu-lai. Analysis and Prevention Measures of High Ground Stress of Long Highway Tunnel in Mountain Areas [J]. Highway, 2013(1): 278-283.
- [15] 来弘鹏,林永贵,谢永利,等.不同应力场下软弱围岩公路隧道的力学特征试验[J].中国公路学报,2008,21(4):81-87.
LAI Hong-peng, LIN Yong-gui, XIE Yong-li, et al. Mechanical Characteristic Tests of Soft-weak Surrounding Rock Highway Tunnel Under Different Stress Fields [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 81-87.
- [16] 来弘鹏,谢永利,杨晓华.不同应力场软弱围岩公路连拱隧道力学特征试验[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(6):60-64.
LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Model Tests for Soft-weak Surrounding Rocks Highway Multiple-arch Tunnel Stress Characteristics in Different Stress Fields [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 60-64.
- [17] 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 Xiao-peng, XIANG Jian-hua. A Study of the Geostress Field of the Surrounding Rocks of the Baota Mountain Tunnel and Rock Burst Forecast [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(1): 83-88.