

# 鄂西地应力测量与隧道岩爆预测分析

肖本职, 罗超文, 刘元坤

(长江科学院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**国家重点工程宜昌—万州(以下简称宜万)铁路穿越鄂西灰岩山区,形成了大量深埋隧道。为了对设计进行优化并指导施工,在宜万铁路沿线进行了多个钻孔的水压致裂法地应力测量,并通过地应力实测资料进行岩爆及塑性大变形分析预测。测试结果表明:鄂西灰岩山区具有中等偏高应力水平,最大水平主应力方向主要为近EW向。基于实测应力结果,通过工程岩体分级标准判别法、Russenes判别法、Turchaninov判别法、Hoek判别法等4种判别方法进行预测,埋深较深的坚硬岩石隧道有岩爆发生的可能,而软岩隧道也有可能发生塑性大变形。在施工过程中应采取合理的开挖方式及防爆安全措施,防止灾害发生。

**关键词:**岩石力学;水压致裂法;岩爆;大变形;铁路隧道;鄂西地区

**中图分类号:**TD 311; TU 459<sup>+</sup>.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-6915(2005)24-4472-06

## IN-SITU STRESS MEASUREMENT AND PREDICTION ANALYSIS OF TUNNEL ROCKBURST IN WEST HUBEI

XIAO Ben-zhi, LUO Chao-wen, LIU Yuan-kun

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The national key project, Yichang—Wanzhou Railway, passes through the limestone mountainous area in west Hubei; and many deep-seated tunnels are needed to construct. In order to optimize the design and guide construction, hydro-fracturing stress measurements have been conducted for many boreholes along Yichang—Wanzhou Railway tunnel line in west limestone mountainous area of Hubei Province. It can be concluded that the in-situ stress magnitude in this area is classified as middle to high level; and the direction of the maximal horizontal stress is near to East-West. Based on the in-situ stress results and four distinguish methods, which are engineering rock quality classification standard, Russenes method, Turchaninov method and Hoek method; rockbursts are predicted during tunnel construction in deep-seated and hard rock tunnel conditions; and large deformation are predicted during tunnel construction in deep-seated and soft rock tunnel condition. In order to avoid the disadvantage conditions, reasonable excavation method and safety precautions should be adopted during tunnel construction.

**Key words:** rock mechanics; hydro-fracturing method; rockburst; large deformation; railway tunnel; west area of Hubei Province

## 1 引言

我国地形东高西低,西部多为山区、高原;东部多为平原、丘陵。东部地区与西部地区的地应力

状态大不相同,东部地区地应力值较低,而西部地区地应力值较高,是我国的高地应力地区<sup>[1,2]</sup>。在低地应力地区,岩爆发生频率很低,而在高地应力地区,岩爆发生的频率很高,如果是软弱岩层,在地下洞室成洞期间极易发生塑性大变形,甚至发

**收稿日期:**2004-07-23; **修回日期:**2004-09-21

**作者简介:**肖本职(1966-),男,1987年毕业于重庆大学矿山工程物理专业,现任长江科学院岩基研究所高级工程师,主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: xiaobenzhi1@sina.com, xiaobz@mail.crsri.cn.

生洞室坍塌、无法成洞等现象。

随着国家对西部地区投资的增加,许多国家重点工程将穿越广大中原地区,如西气东输、西电东送、交通干线建设等。那么,在中部及中西部接合地区,尤其是中西结合部的山地区域的地应力状态如何,这些地区有无岩爆问题,洞室施工过程中是否会发生塑性大变形现象,这些问题便自然地成为了工程设计人员关心的问题。

宜万铁路东起湖北宜昌,西接重庆万州,中间穿越湖北恩施,是我国连接东西部地区的重要交通干线——沿江铁路的最重要也是施工难度最大的一段。宜万线在穿过鄂西山区时形成了大量隧道,其中很多隧道的埋设都较深。

宜万铁路鄂西段有大量深埋隧道,埋深较深的有堡镇隧道、八字岭隧道、野山关隧道、齐岳山隧道等,这些隧道基本都位于湖北省恩施与宜昌境内。本文以距离相对集中的堡镇隧道、八字岭隧道、野山关隧道 3 个隧道的地应力实测资料为例进行分析。

堡镇隧道位于湖北省长阳县贺家坪镇和榔坪镇之间,东起陈家新屋,西至青岩沟,中间穿越堡镇,全长 11 608 m。进口路肩高程 835.87 m,地面高程 845 m;出口路肩高程 801.15 m,地面高程 810 m,隧道最大埋深 630 m<sup>[3]</sup>。八字岭隧道东起榔坪镇的救古坪河,西至巴东县木龙河,隧道全长 5 867 m。进口路肩高程 617 m;出口路肩高程 690 m,隧道所经地形最大高程 1 360 m,路肩高程 665 m,最大埋深 695 m<sup>[4]</sup>。野三关隧道位于巴东县野三关镇碗口河和支井河之间,全长 13 846 m,为宜万铁路全线最长的隧道。进口位于白家坡二溪河一小溪沟陡崖,路肩高程为 757.54 m,出口位于支井河,路肩高程为 815.12 m,为宜万铁路的重要控制工程<sup>[5]</sup>。

水压致裂法地应力测量原理<sup>[6]</sup>是利用一对可膨胀的橡胶封隔器,在预定的测试深度封隔一段钻孔,然后泵入液体对这段钻孔施压,根据压裂过程曲线的压力特征值计算地应力。鄂西山区地层岩性主要为灰岩,岩溶发育强烈,水文地质条件复杂,钻孔中长期水位一般都很低。由于钻孔内无水或水位很低,橡胶封隔器的静水压力使封隔器无法正常回缩,试验将无法进行。本次测试通过一种专门研制的卸压装置,保证了试验的顺利完成。

## 2 区域地质概况及测孔情况

### 2.1 区域地质概况

#### 2.1.1 地形地貌

工程区属构造剥蚀、侵蚀及溶蚀山区。基本地形为台原山地和深切峡谷。地势北高南低,山顶高程 1 100~1 600 m,地势相对高差 200~1 000 m。受区域内 NE 向和 EW 向构造影响,山脉一般沿 NE 向和 EW 向延伸。地形条件对区内岩溶发育起明显的控制作用,岩溶发育总体呈深切峡谷型特征。

早第三纪以来,地壳整体间歇缓慢抬升,在相对稳定的停滞期塑造了三级剥夷面,高程分别为 1 500~1 300 m,1 100~1 000 m 和 850~800 m。晚更新世以来,地壳抬升的速率和幅度加快、加大,导致河流深切,溶蚀作用在垂向加强,地貌塑造和岩溶水排泄基准滞后于侵蚀基准的下移速度,使得测区内广大地带基本保持了高原形貌格局,而岩溶暗河和大泉则普遍具有悬挂性质。

#### 2.1.2 区域地质构造

工程区域外围主要发育有天阳坪、仙女山等区域性大断裂或地区性断层,这些断裂均为 NNW 和 NW 向;同时在工程区域还存在着长阳复式背斜,其轴线方位为近 EW 向。

### 2.2 测孔情况

在堡镇隧道、八字岭隧道、野山关隧道各布置了一个水压致裂法测孔,对应测孔编号分别为:JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-堡 1、JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3、JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-野 7。3 个测孔间的距离分别为:JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-堡 1 孔至 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3 孔约 2.8 km,JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3 孔至 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-野 7 孔约 18.1 km,3 个测孔均为  $\phi 91$  mm 孔。其他情况各不相同:JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3 孔的长期水位在孔深 469.00 m 处,JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-野 7 孔的长期水位在孔深 205.68 m 处,而 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-堡 1 孔基本为满孔水,各孔详细资料详见表 1。

## 3 地应力测试成果及分析

### 3.1 测试成果

由于八字岭隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3 孔、野山关隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-野 7 孔 2 个孔的水位很低,测试难度较大,测试成功率较低。经过努力,堡镇隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-堡 1 孔、八字岭隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3 孔、野山关隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-野 7 孔分别于 2003 年 4 月、2003 年 10~11 月及 2003 年 11 月完成现场测试工作,3 个测孔分别获得了 16 段、12 段和 10 段实测资料,其地应力实测值见表 2。

### 3.2 测试成果分析

表 1 3 个测试孔基本资料统计表  
Table 1 Basic information of three test boreholes

测孔编号	隧道名称	孔径/mm	孔深/m	长期水位(孔深)/m	孔口高程/m	隧道(路肩)高程/m	测试最大深度/m	完成测段数	破裂方向印模段数	隧道走向/(°)	钻孔里程桩号	现场测试时间	孔内岩性
JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -堡 1	堡镇隧道	91	497.80	0.00	1 302.70	865.50	479.58	16	3	90	DK103+297 右 8.0 m	2003 年 4 月	主要为叶岩、粉砂岩和灰岩。孔深 455.52 m 以上主要为叶岩和粉砂岩,孔深 455.52 m 以下至孔底为灰岩,呈灰~深
JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -八 3	八字岭隧道	91	561.37	469.00	1 212.13	661.04	545.80	12	3	309	DK106+120.8 左 19.6 m	2003 年 10~11 月	灰色或灰~灰白色,中厚层状,隐晶质结构,含方解石脉上部为灰岩、炭质灰岩或白云质灰岩,447 m 以下至孔底为泥岩
JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -野 7	野山关隧道	91	468.80	205.68	1 298.00	838.42	458.15	10	3	279	DK124+225 左 14.0 m	2003 年 11 月	

(1) 区域应力场特征

应力量值：从表 1 可知，JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-堡 1、JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3、JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-野 7 三个测孔处隧道洞身段所对应的孔深分别为 437, 551 及 460 m，其对应的测点深度分别为 435.98, 545.8 和 458.15 m。3 个隧道对应洞身段的最大水平主应力分别为 15.96, 14.95 及 18.88 MPa，最小水平主应力分别为 10.56, 8.06 及 10.68 MPa。按岩石的容重为 26.5 kN/m<sup>3</sup> 所计算出的自重应力分别为 11.55, 14.46 及 12.15 MPa。

3 个测孔实测资料一致表明，洞身段的最大水平主应力基本都在 15 MPa 以上，洞身段区域属于中等偏高应力水平。

应力方位：3 个测孔所获得的最大水平主应力方位分别为 N113 E~N123 E, N68 E~N81 E, N79 E~N91 E，总体来讲，属于近 EW 向。由于受长江、清江等河流的纵向切割作用，该工程区域的最大水平主应力方位主要由工程区域地质构造所决定，局部受地形地貌及小型地质构造影响。3 个测孔对应于洞身段的实测最大水平主应力方位分别为(或最接近于)N123 E, N78 E 及 N91 E。

(2) 地应力场与隧道轴线布置

隧道轴线方向的设计选择主要受整个工程布置情况及地质条件决定，但地应力方向对其有重要影响。对应表 1 及上述成果，3 个测孔对应洞身段最大水平主应力方向与隧道轴线走向之间的关系见

表 3。

根据表 3，堡镇隧道洞身段最大水平主应力方向与隧道走向的夹角较小，地应力场对隧道稳定较为有利。八字岭隧道洞身段最大水平主应力方向与隧道走向的夹角偏大，地应力场对隧道稳定稍有不。野山关隧道洞身段最大水平主应力方向与隧道走向的夹角很小，地应力场对隧道稳定很有利。

4 隧道施工期岩爆及大变形分析

4.1 岩爆分析

岩爆是高地应力地区岩石地下工程中的一种常见灾害，常常表现为片状剥落、严重片帮，有时伴有声响及岩片弹射，能量猛烈释放，洞室突然破坏，往往给人员、设备等带来巨大损失<sup>[7, 8]</sup>。

目前有关岩爆发生机理的研究方法很多，总结起来，主要有强度理论、刚度理论、能量理论、失稳理论等<sup>[9]</sup>。

强度理论是从岩石强度的角度来探讨岩爆发生的机制。研究者认为，岩爆是应力达到岩石一定强度时产生的破坏<sup>[10]</sup>。

岩爆一般是坚硬岩体在高应力状态下应力突然释放所发生的脆性破裂现象，因此根据地应力评估来预测岩爆是可能的。

强度理论中普遍应用的有工程岩体分级标准判别法、Russenes 判别法、Turchaninov 判别法、Hoek

表 2 3 个测孔水压致裂法地应力实测值  
Table 2 In-situ stress values of hydro-fracturing tests for three test boreholes

隧道名称/测孔编号	测段序号	测段深度/m	最大水平主应力 $\sigma_H$ / MPa	最小水平主应力 $\sigma_h$ / MPa	最大水平主应力方位角/(°)
堡镇隧道/ JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -堡 1	1	150.31	7.10	5.10	
	2	167.58	8.88	5.88	
	3	193.27	9.63	6.43	
	4	219.27	8.99	5.79	
	5	289.20	11.69	7.69	113
	6	315.08	10.55	6.95	
	7	341.70	11.22	8.42	
	8	359.06	14.19	8.99	
	9	376.24	15.36	9.76	
	10	384.74	14.05	9.25	
	11	401.90	13.22	9.22	
	12	418.78	14.99	9.79	123
	13	435.98	15.96	10.56	
	14	461.03	20.41	12.81	
	15	469.03	21.09	13.09	120
	16	479.58	21.70	13.30	
八字岭隧道/ JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -八 3	1	59.20	1.48	0.99	
	2	73.00	1.86	1.33	
	3	86.10	2.32	1.26	
	4	100.40	4.21	2.80	68
	5	302.80	10.16	5.53	
	6	446.30	13.43	7.06	81
	7	460.90	12.72	6.71	
	8	528.80	12.98	6.99	
	9	533.20	14.32	8.33	
	10	537.90	13.37	7.18	
	11	541.60	13.91	7.72	78
	12	545.80	14.95	8.06	
野山关隧道/ JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -野 7	1	156.00	8.32	5.06	
	2	168.17	10.26	5.78	79
	3	223.00	11.09	5.83	
	4	251.57	12.58	7.12	
	5	307.54	12.84	7.58	83
	6	365.13	15.41	8.75	
	7	379.35	15.45	8.99	
	8	438.04	15.94	9.68	
	9	449.35	17.05	9.99	91
	10	458.15	18.88	10.68	

**表3 最大水平主应力方向与隧道轴线走向对应关系表**  
**Table 3 Relationship between direction of maximum horizontal principal stress and tunnel axes direction**

隧道名称	测孔编号	洞身段最大水平主应力方向/(°)	隧道走向/(°)	隧道走向与最大水平主应力方向夹角/(°)
堡镇隧道	JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -堡1	123	90	33
八字岭隧道	JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -八3	78	309	51
野山关隧道	JZ-III <sup>7</sup> <sub>03</sub> -野7	91	279	8

判别法等4种判别方法。当然，国内外研究者也还提出了很多其他的方法<sup>[11-13]</sup>，但应用尚不普遍。

4.1.1 岩爆判别准则

(1) 工程岩体分级标准判别法

文[14]相对完整地考虑了这些地应力因素对地下洞室的成洞性及影响，并评价地下洞室开挖过程中发生岩爆的可能性。

(2) Russenes 岩爆判别法

Russenes 岩爆判别法是根据洞室的最大切向应力  $\sigma_\theta$  与岩石点荷载强度  $I_s$  的关系，建立了岩爆烈度关系图。把点荷载  $I_s$  换算成岩石的单轴抗压强度  $\sigma_c$ ，并根据岩爆烈度关系图判别是否有无岩爆发生。其判别关系如下：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta / \sigma_c < 0.20 & \quad (\text{无岩爆}) \\ 0.20 < \sigma_\theta / \sigma_c < 0.30 & \quad (\text{弱岩爆}) \\ 0.30 < \sigma_\theta / \sigma_c < 0.55 & \quad (\text{中岩爆}) \\ \sigma_\theta / \sigma_c > 0.55 & \quad (\text{强岩爆}) \end{aligned} \right\} (1)$$

(3) Turchaninov 岩爆判别法

Turchaninov 岩爆判别法是根据科拉岛希宾地块的矿井建设经验，提出了岩爆活动性由洞室切向应力  $\sigma_\theta$  和轴向应力  $\sigma_L$  之和与岩石单轴抗压强度  $\sigma_c$  之比值确定：

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_\theta + \sigma_L) / \sigma_c < 0.3 & \quad (\text{无岩爆}) \\ 0.3 < (\sigma_\theta + \sigma_L) / \sigma_c < 0.5 & \quad (\text{有岩爆可能}) \\ 0.5 < (\sigma_\theta + \sigma_L) / \sigma_c < 0.8 & \quad (\text{肯定发生岩爆}) \\ (\sigma_\theta + \sigma_L) / \sigma_c > 0.8 & \quad (\text{有严重岩爆}) \end{aligned} \right\} (2)$$

(4) Hoek 岩爆判别法

Hoek 等总结了南非采矿巷道围岩破坏的观测结果，提出了对岩爆分级的判别式：

$$\sigma_\theta / \sigma_c = \begin{cases} 0.34 & (\text{少量片帮}) \\ 0.42 & (\text{严重片帮}) \\ 0.56 & (\text{需重型支护}) \\ 0.70 & (\text{有严重岩爆}) \end{cases} (3)$$

4.1.2 判别条件

岩爆分析以圆形隧道为基础，以八字岭隧道

JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八3孔(隧道洞室轴线方向为309°)为例进行分析，该隧道高程的地应力实测资料和岩石室内力学试验获得的力学参数见表4。

**表4 岩爆预测使用的应力参数**  
**Table 4 Parameters for the rock-burst prediction**

岩石类别	最大埋深/m	岩石单轴抗压强度 $R_c$ /MPa	轴向应力 $\sigma_L$ /MPa	横截面最大切向应力 $\sigma_\theta$ /MPa	横截面最大初始应力 $\sigma_{max}$ /MPa	洞室轴线方位/(°)
灰岩	545.8	64.6	10.8	31.2	14.46	309

4.1.3 岩爆预测结果

根据上述岩爆判别准则及上述有关参数，八字岭隧道岩爆预测结果见表5。

**表5 岩爆预测分析结果**  
**Table 5 Prediction results of rockburst**

洞室轴线方位/(°)	判别方法			
	岩体分级标准判别法	Russenes 岩爆判别法	Turchaninov 岩爆判别法	Hoek 岩爆判别法
309	4.00 < 4.47 < 7.00	0.30 < 0.48 < 0.55	0.50 < 0.65 < 0.80	0.42 < 0.48 < 0.56
	可能出现岩爆	有中岩爆	肯定有岩爆	严重片帮

从表5可知，无论采用哪种判别方法，预测均有岩爆发生。

4.2 软弱岩石区大变形分析

通常，岩爆都是发生在高应力状态下的坚硬脆性岩体中，而对于高应力状态下的软弱岩体，发生岩爆的可能性不大，但发生大变形的可能性极大。堡镇隧道和野山关隧道将穿越页岩和粉砂岩、泥岩区。根据文[3, 5, 14]，其预测结果如表6所示。

**表6 隧道施工期发生塑性大变形预测结果**  
**Table 6 Prediction results of large deformation during construction period of the tunneling**

隧道名称	岩石类别	隧道埋深/m	横断面内最大初始应力 $\sigma_{max}$ /MPa	单轴饱和抗压强度 $R_c$ /MPa	$R_c / \sigma_{max}$	分析结果
野山关隧道	泥岩	460	12.15	8.84 ~ 40.30	< 4	可能发生大变形
堡镇隧道	页岩	437	14.75	6.50 ~ 13.10	< 4	可能发生大变形

从表6可知，堡镇隧道和野山关隧道开挖通过软弱岩体时，有可能发生大变形现象。

5 结 论

影响岩爆的因素很多，除地应力影响因素外，

还有岩石性状、地质结构及开挖方式等其他因素。在应用岩爆预测结论时应应对多种影响因素加以考虑, 应进行综合分析。通过对宜万铁路堡镇隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-堡 1 孔、八字岭隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3 孔、野山关隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-野 7 孔 3 个测孔的水压致裂法地应力实测资料分析, 以及通过地应力实测资料进行的岩爆及软弱岩体大变形预测分析, 可以得出以下基本结论:

(1) 该工程区域隧道洞身段属于中等偏高地应力区, 最大水平主应力为 15~19 MPa, 最小水平主应力为 8~11 MPa。

(2) 最大水平主应力方位总体为近 EW 向。3 个测孔对应洞身段的最大水平主应力方位分别为(或最接近于)N123 E, N78 E, N91 E。测试区地应力场主要受区域地质构造影响。

(3) 地应力场对隧道围岩稳定性的影响分别为: 堡镇隧道较有利; 八字岭隧道稍有不和; 野山关隧道很有利。

(4) 3 个隧道都将穿过较坚硬的灰岩地区, 洞室处于较高地应力水平区。根据预测分析, 该区域埋深在 400 m 以上灰岩区隧道发生岩爆的可能性较大, 而堡镇隧道和野山关隧道还将穿过软弱岩层, 隧道在穿过软弱岩层区时存在发生大变形的可能。

(5) 在隧道施工中需要强化围岩、改造岩性, 选择合理的开挖方式, 并加强支护和对围岩进行监测, 防止岩爆等灾害的发生。

## 参考文献(References):

- [1] 刘允芳, 尹健民, 刘元坤. 新疆下阪地水利枢纽地应力测量与研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 242-246.(Liu Yunfang, Yin Jianmin, Liu Yuankun. Measurement and study on in-situ stress for Xiabandi hydraulic project, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 242-246.(in Chinese))
- [2] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.(Liu Yunfang. Geostress of Rock Mass and Engineering Construction[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [3] 刘元坤. 万宜铁路榔段隧道堡 1<sup>#</sup>孔水压致裂法地应力测量报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2003. (Liu Yuankun. Report of hydraulic fracturing stress measurement for Yichang—Wanzhou railway in borehole Bao-#1 of Langhe Tunnel[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2003. (in Chinese))
- [4] 肖本职, 刘元坤. 宜万铁路八字岭隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-八 3 孔水压致裂法地应力测量报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2004. (Xiao Benzhi, Liu Yuankun. Report of hydraulic fracturing stress measurement for Yichang—Wanzhou railway in JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-Ba3 borehole of Baziling Tunnel[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2004. (in Chinese))
- [5] 罗超文, 艾凯. 宜万铁路野山关隧道 JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-野 7 孔水压致裂法地应力测量报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2004.(Luo Chaowen, Ai Kai. Report of hydraulic fracturing stress measurement for Yichang—Wanzhou railway in JZ-III<sup>7</sup><sub>03</sub>-Ye7 borehole of Yeshanguan Tunnel[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2004. (in Chinese))
- [6] 李方全. 地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 95-111.(Li Fangquan. Geostress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1985, 4(1): 95-111.(in Chinese))
- [7] 尹健民, 罗超文, 艾凯. 某隧道区地应力测量与岩爆分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增 1): 28-30.(Yin Jianmin, Luo Chaowen, Ai Kai. Geostress determination and rockburst analysis of an expressway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.1): 28-30.(in Chinese))
- [8] 刘元坤, 罗超文, 尹健民. 西部地应力测量与岩爆分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增 1): 94-95.(Liu Yuankun, Luo Chaowen, Yin Jianmin. Geostress measurement and rockburst analysis in West China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.1): 94-95.(in Chinese))
- [9] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493-501.(Wang Yuanhan, Li Wodong, Li Qiguang, et al. The fuzzy method of colligate evaluation for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493-501.(in Chinese))
- [10] 李燕辉. 对岩爆问题的探讨[J]. 四川水力发电, 1990, (3): 24-29.(Li Yanhui. Discussion of the rockburst problems[J]. Sichuan Hydraulic Power, 1990, (3): 24-29.(in Chinese))
- [11] 肖尚斌, 张艳君. 蒲石河抽水蓄能电站地下厂房地应力特征及岩爆判别[J]. 东北水利水电, 1996, 14(7): 14-16.(Xiao Shangbin, Zhang Yanjun. Geostress characteristic and rockburst distinguish for the underground house of Pushihe pumped-storage power station[J]. Water Resources and Hydropower of Northeast China, 1996, 14(7): 14-16.(in Chinese))
- [12] 王敏强, 侯发亮. 板状破坏的岩体岩爆判别的一种方法[J]. 岩土力学, 1993, 14(3): 53-60.(Wang Minqiang, Hou Faliang. A method of rockburst distinguish for rockmass which are destroyed as plate[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(3): 53-60.(in Chinese))
- [13] 宋岳. 岩爆问题[J]. 天津地质学会志, 1991, 9(3): 50-55.(Song Yue. Question of rockburst[J]. Tianjin Geological Institute, 1991, 9(3): 50-55.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体分级标准(GB50218-94)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for Engineering Classification of Rock Masses(GB50218-94)[S]. Beijing: China Planning Press, 1994.(in Chinese))