

文章编号: 1674—8247(2019)04—0076—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.04.016

深埋隧道岩爆倾向性评估方法

吴春成¹ 朱志辉² 张 伟³

(1. 中国铁路青藏集团有限公司, 西宁 810007;

2. 西藏铁路建设有限公司, 拉萨 850000; 3. 东北大学, 沈阳 110819)

摘 要:深埋硬岩隧道开挖过程中岩爆风险较高,开展岩爆倾向性评估方法研究具有重要意义。文章以某隧道工程为研究背景,统计分析了岩爆发生情况;将岩爆倾向性单指标评估方法按能否反映洞室开挖过程的影响和初始应力场的偏应力特征分为两类,并分别利用 Barton 判据、陶振宇判据、Hoek 判据、二郎山隧道判据对该隧道岩爆倾向性进行了评估分析;对比分析了两类评估方法在该隧道应用的适用性,研究结果表明:反映洞室开挖过程影响和初始应力场偏应力特征的判据方法对岩爆倾向性判别的准确率较低,但能够判断岩爆可能发生位置,且在大尺度上采用 Barton 判据、陶振宇判据能较为准确评价岩爆风险等级。研究结果可为深埋隧道岩爆倾向性判别提供科学依据与参考。

关键词:深埋隧道;岩爆倾向性;经验;判据;适用性

中图分类号:U455.6 **文献标志码:**A

76

Assessment Method of Rockburst Tendency in Deep Tunnels

WU Chuncheng¹ ZHU Zhihui² ZHANG Wei³

(1. China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd, Xining 810007, China;

2. Tibet Railway Construction Co., Ltd., Lhasa 850000, China;

3. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Rockburst occurs frequently during excavation of deep hard rock tunnels. It has great significance to study the evaluation method of rockburst tendency. The occurrence of rockburst is analyzed statistically associated with the project of one tunnel. According to the influence of chamber excavation process and the deviatoric stress characteristics of initial stress field, the single index evaluation method of rockburst tendency can be divided into two types. Using Barton criterion, Tao Zhenyu criterion, Hoek criterion and Erlang Mountain Tunnel criterion, the rockburst tendency of the tunnel is evaluated. The applicability of two kinds of assessment methods to rockburst tendency discrimination is compared and analyzed. Through the analysis, it is found that the criterion method, which reflects the influence of the excavation process and the initial stress field, can judge the location of the rockburst, although the accuracy rate of the rock burst tendency is low. The Barton criterion and Tao Zhenyu criterion can be used to evaluate the rockburst risk grade accurately on a large scale. The research results can provide scientific basis and reference for distinguishing the rockburst tendency of deep tunnels.

收稿日期:2018-10-10

作者简介:吴春成(1969-),男,高级工程师。

引文格式:吴春成,朱志辉,张伟. 深埋隧道岩爆倾向性评估方法[J]. 高速铁路技术,2019,10(4):76-80.

WU Chuncheng, ZHU Zhihui, ZHANG Wei. Assessment Method of Rockburst Tendency in Deep Tunnels [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 76-80.

Key words: deep tunnel; rockburst tendency; experience; criterion; applicability

某隧道位于我国西南部,埋深达 2 000 m,岩爆风险极高^[1]。迄今已发生上百次岩爆,中等及以上岩爆次数较多。岩爆倾向性判别是深埋高应力隧道开挖过程中的重要内容,因此,开展深埋隧道岩爆倾向性判别方法研究具有重要意义。

关于岩爆倾向性判别方法,国内外学者在强度、刚度、突变、分形和能量等诸多方面提出了众多岩爆风险和倾向性估计判据。代表性的有岩爆变量公式预测、经验判据评判、人工神经网络预测、模糊数学综合评判、模糊概率风险预测、可拓物元评判、距离判别分析方法等。岩爆倾向性判别方法可概括性地化分为单指标经验判据和多因素经验评价指标或系统两大类。单指标经验判据方法多以强度、能量和刚度等理论为基础,典型性的判别方法有 Hoek 判据^[2]、Russenes 判据^[3]、Turchaninov 判据^[4]、二郎山隧道判据^[5]、陶振宇判据^[6]、Barton 判据^[7]等。面对不同工程概况,各类岩爆倾向性判据方法的适用性不同。为准确判定深埋隧道开挖过程中的岩爆倾向性,有必要针对各类岩爆倾向性经验判据方法,开展适用性对比分析研究。

因此,本文基于某隧道工程,以岩爆倾向性单指标判别方法为对象,开展岩爆倾向性评估方法适用性对比分析研究,为深埋高应力隧道开挖岩爆倾向性判别方法选取,隧道开挖和支护方案设计提供科学依据。

1 隧道概况及其初始地应力特征

1.1 工程概况

某隧道位于我国西南部,隧道走向 104°。隧道大部分为中粒角闪黑云花岗岩(E_2R),部分区段夹有极少量的伟晶岩脉(ρ),构造发育轻微。隧道沿线发育有断层破碎带,宽 30 ~ 50 m。隧道最大埋深处 2 080 m。根据已有的岩爆风险评估,有岩爆危害的洞段长为 12 242 m,占全长的 94%,其中轻微岩爆等级洞段为 4 106 m,中等岩爆等级洞段为 5 922 m,强烈岩爆等级洞段为 2 214 m。

1.2 隧道进口工区岩爆发生情况

将该隧道 2017 年 4 月 20 日至次年 2 月 25 日期间施工的 1 197 m 进口平导,每隔 200 m 进行 1 次统计,共统计 6 次。以统计范围内所发生过的最强岩爆等级作为此 200 m 范围的岩爆风险等级,并以 0 代表无岩爆,1 代表轻微岩爆,2 代表中等岩爆,3 代表强烈岩爆,绘制某隧道进口平导 DK 194 + 450 ~ DK 195 + 647 段沿线岩爆等级分布,如图 1 所示。

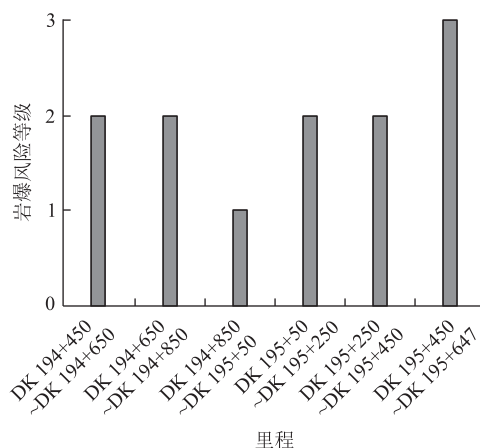


图1 隧道进口岩爆风险等级变化图

由图 1 可知,轻微岩爆里程段为 1 个,占比为 16.7%,中等岩爆里程段则有 4 个,占比为 66.7%;发生强烈岩爆的里程段为 1 个,占比为 16.7%。因此,隧道进口工区该洞段开挖过程中以中等岩爆风险为主,截止到统计时期,最强岩爆等级为强烈岩爆,且岩爆主要发生在隧道拱肩至拱顶位置处。

2 岩爆倾向性经验判据方法

单指标经验判据方法多以强度、能量和刚度等理论为基础。根据岩爆倾向性评估的单指标能否反映洞室开挖过程的影响和初始应力场的偏应力特征,可分为两类:一是不能反映上述两因素;二是能反映上述两因素。这里,偏应力定义为 $\sigma_1 - \sigma_3$,即初始应力场最大主应力与最小主应力的差。这里主要介绍基于应力与强度的单指标经验判据。

2.1 不反映洞室开挖过程影响和初始应力场偏应力特征的判别方法

(1) Barton 判据

基于应力强度比或强度应力比理论,Barton 等在挪威工程实践中建立的 Q 系统分类,考虑岩石强度与地应力的比值,作为一个评价脆性破坏的指标,该指标判别公式为:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \begin{cases} < 2.5 & \text{严重岩爆} \\ 2.5 \sim 5 & \text{中等岩爆} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 陶振宇判据

我国学者陶振宇在 Barton 判据、Russense 判据基础上,结合国内岩爆实际情况,制定了如式(2)所列岩爆判据。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \begin{cases} > 14.5 & \text{无岩爆} \\ 14.5 \sim 5.5 & \text{低岩爆活动} \\ 5.5 \sim 2.5 & \text{中等岩爆活动} \\ < 2.5 & \text{严重岩爆活动} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_c ——岩石单轴抗压强度,该隧道花岗岩单轴抗压强度为160 MPa;
 σ_1 ——洞室围岩的最大主应力。

2.2 反映洞室开挖过程影响和初始应力场的偏应力特征的判别方法

(1)Hoek 判据

Hoek 和 Brown 总结了发生在南非石英岩中长方形开挖隧道边墙脆性破坏(包括岩爆、片帮和剥落)的案例,通过远场最大主应力与岩石短期单轴抗压强度之比作为脆性破坏评价指标进行了脆性岩体破坏模型分类,划分公式为:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} = \begin{cases} < 0.34 & \text{少量片帮} \\ 0.34 \sim 0.4 & \text{严重片帮} \\ 0.42 \sim 0.56 & \text{中等岩爆} \\ > 0.7 & \text{严重岩爆} \end{cases} \quad (3)$$

(2)二郎山隧道判据

根据二郎山隧道施工过程的岩爆事件,徐林生和王兰生对应力强度比判据进行了总结,如式(4)所列:

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_c} = \begin{cases} < 0.3 & \text{无岩爆} \\ 0.3 \sim 0.5 & \text{可能发生岩爆} \\ 0.5 \sim 0.7 & \text{一定有岩爆} \\ > 0.7 & \text{严重岩爆} \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_{\max} ——围岩最大切向应力;
 σ_{θ} ——围岩切向应力。

3 岩爆倾向性经验判据方法对比分析

3.1 地应力及开挖扰动应力反演

公式表明,围岩地应力及开挖扰动应力是岩爆倾向性判别的重要依据。为获取某隧道原始应力场及开挖后围岩扰动应力分布特征,建立该隧道三维地质反演模型及局部洞段开挖模型,所得结果与已有资料及地应力测试保持较好的一致性,这里不再介绍反演的具体过程。该隧道正洞沿线主应力分布特征,如图2所示(该隧道正洞与平导间距30 m,认为二者主应力基本一致)。以此主应力作为局部洞段开挖模型的边界条件,即可获得隧道开挖扰动应力。该隧道开挖后围岩切向应力状态,如表1所示。

3.2 岩爆倾向性评估分析

分别利用 Barton 判据、陶振宇判据、Hoek 判据、二郎山隧道判据对该隧道岩爆倾向性进行评估分析,结

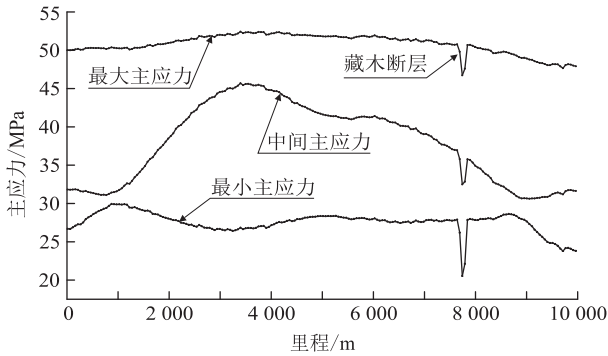


图2 隧道正洞轴线主应力分布特征

果如图3~图6所示。

表1 隧道开挖过程中的切向应力状态表

里程	桩号	埋深 /m	切向应力	
			竖直	水平
DK 190	408 ~ 600	105.0	8.95	22.33
	600 ~ 800	278.0	18.50	46.14
	800 ~ 1 000	398.0	23.37	69.93
DK 191	0 ~ 200	521.0	25.91	88.40
	200 ~ 400	704.5	32.56	102.57
	400 ~ 600	791.5	36.02	108.82
	600 ~ 800	786.5	35.67	109.60
DK 192	800 ~ 1 000	862.5	38.92	112.14
	0 ~ 200	923.5	44.73	119.80
	200 ~ 400	946.0	46.07	120.44
	400 ~ 600	910.5	48.04	121.65
	600 ~ 800	856.0	49.44	122.05
DK 193	800 ~ 1 000	918.0	51.24	122.55
	0 ~ 200	1 060.0	53.05	122.86
	200 ~ 400	1 186.0	54.57	123.15
	400 ~ 600	1 294.5	57.02	124.01
	600 ~ 800	1 404.0	59.22	124.87
DK 194	800 ~ 1 000	1 459.0	60.96	125.79
	0 ~ 200	1 476.5	63.07	126.80
	200 ~ 400	1 511.5	64.87	127.48
	400 ~ 600	1 556.0	66.24	128.02
	600 ~ 800	1 619.5	67.46	128.99
DK 195	800 ~ 1 000	1 738.0	68.38	129.18
	0 ~ 200	1 863.5	69.41	129.92
	200 ~ 400	1 983.0	69.78	130.20
	400 ~ 600	2 048.5	70.04	130.67
	600 ~ 800	2 029.0	69.83	130.42
DK 196	800 ~ 1 000	1 886.5	69.49	130.32
	0 ~ 200	1 677.5	69.36	130.56
	200 ~ 400	1 547.0	68.68	130.35
	400 ~ 600	1 461.5	67.67	129.92
	600 ~ 800	1 447.0	67.44	129.87
DK 197	800 ~ 1 000	1 573.5	67.18	129.83
	0 ~ 200	1 620.5	66.64	129.78
	200 ~ 400	1 507.5	65.99	129.70
	400 ~ 600	1 462.5	66.24	129.52
	600 ~ 800	1 493.5	66.27	129.96
	800 ~ 1 000	1 529.5	66.25	129.95

里程	桩号	埋深 /m	切向应力	
			竖直	水平
DK 198	0 ~ 200	1 605.5	66.32	129.94
	200 ~ 400	1 744.0	65.94	129.67
	400 ~ 600	1 780.5	65.61	129.41
	600 ~ 800	1 659.0	65.09	129.46
	800 ~ 1 000	1 510.5	64.64	129.20
DK 199	0 ~ 200	1 445.0	64.24	129.17
	200 ~ 400	1 417.5	63.12	128.50
	400 ~ 600	1 416.5	62.18	128.13
	600 ~ 800	1 436.0	53.92	122.34
	800 ~ 1 000	1 519.5	60.47	127.67
DK 200	0 ~ 200	1 519.5	59.17	126.78
	200 ~ 400	1 391.0	57.74	126.30
	400 ~ 600	1 372.5	56.15	125.54
	600 ~ 800	1 463.5	54.26	124.70
	800 ~ 1 000	1 461.0	51.85	124.15
DK 201	0 ~ 200	1 326.0	49.78	122.95
	200 ~ 400	1 216.5	47.80	122.45
	400 ~ 600	1 139.0	45.90	121.75
	600 ~ 800	1 086.0	44.37	120.66
	800 ~ 1 000	981.5	44.07	121.14
DK 202	0 ~ 200	820.5	36.94	111.82
	200 ~ 400	702.0	33.19	94.41
	400 ~ 600	595.5	30.79	81.96
	600 ~ 800	397.0	23.51	67.13
	800 ~ 1 000	183.0	13.40	37.39
DK 203	0 ~ 200	133.5	10.51	24.74
	200 ~ 400	105.5	8.95	18.59
	400 ~ 455	21.0	4.31	8.10

利用 Barton 判据评价的该隧道岩爆风险,如图 3 所示。

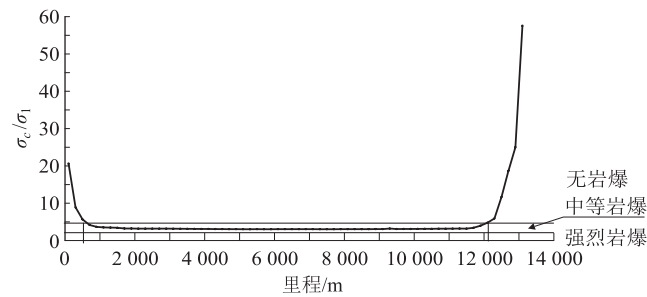


图 3 由 Barton 判据确定的隧道开挖岩爆风险

由图 3 可知,由 Barton 判据确定的该隧道岩爆风险分为无岩爆、中等岩爆及强烈岩爆,其中,进口 DK 190 + 408 ~ DK 190 + 950 长 542 m,出口 DK 202 + 558 ~ DK 203 + 455 长 897 m,共 1 439 m 为无岩爆区域,从 DK 190 + 950 ~ DK 202 + 558 长 11 614 m 为中等岩爆区域,占全部里程的 88.98%。由于最大主应力与单轴抗压强度比值大于 2.5,所以全长以中等岩爆为主。但 Barton 判据缺乏对强度应力比大于 5 时的分级,对于这个范围的岩爆风险分级不够精确。

利用陶振宇判据评价的该隧道开挖岩爆风险,如

图 4 所示。

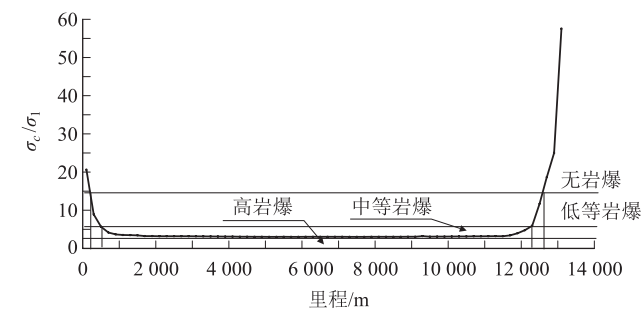


图 4 由陶振宇判据确定的隧道开挖岩爆风险

由图 4 可知,由陶振宇判据确定的该隧道岩爆风险分为无岩爆、低等岩爆、中等岩爆及高岩爆。其中,进口 DK 190 + 403 ~ DK 190 + 603,出口 DK 203 + 142 ~ DK 203 + 455 共 513m 为无岩爆风险,即有岩爆风险的区段为 12 540 m,占全隧的 96.1%,其中低等岩爆风险的区域为 DK 190 + 603 ~ DK 190 + 878,DK 202 + 658 ~ DK 203 + 142,共 759m。其余里程即 DK 190 + 878 ~ DK 202 + 658 共 11 781 m 为中等岩爆风险。

受地应力影响,该隧道开挖过程中围岩最大切向应力 σ_{\max} 为 γ 向水平应力,其作用于拱顶及拱肩,引起拱顶及拱肩的片帮及岩爆。隧道垂向作用应力 σ_v 为垂直应力,作用于拱腰,引起拱腰的片帮及岩爆。由于拱顶岩爆风险远大于拱腰岩爆风险,本文利用 Hoek 判据分析了拱顶的岩爆风险,如图 5 所示。

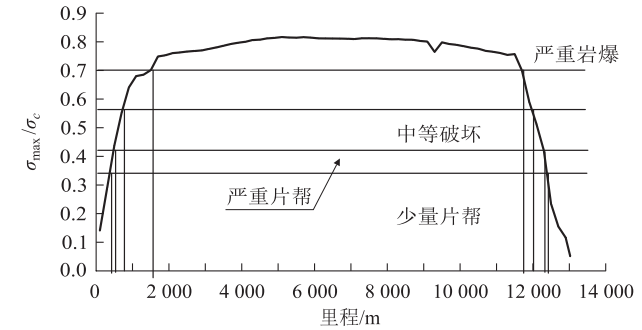


图 5 由 Hoek 判据确定的隧道拱顶岩爆风险

由图 5 可知,DK 191 + 908 ~ DK 202 + 58 共 10 150 m,拱顶有严重岩爆风险,其他进出口共 2 903 m 为片帮至中等破坏。拱腰部分多表现为剥落与片帮破坏,DK 191 + 288 ~ DK 202 + 408 共 11 120 m,其他进出口共 1 933 m 无或支护后稳定。当然也有拱顶或拱肩岩爆发育延伸至拱腰,引起拱腰岩爆或片帮等现象。

利用二郎山隧道判据评价的隧道岩爆风险,如图 6 所示。

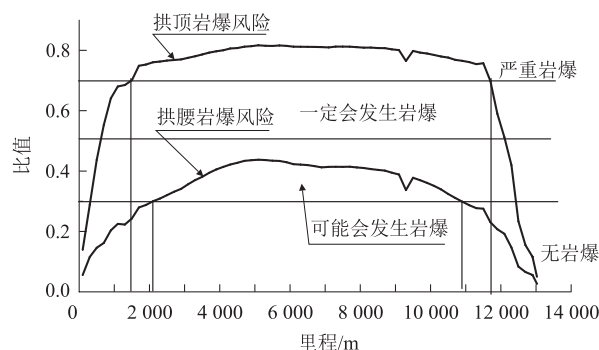


图6 由二郎山隧道判据确定的隧道岩爆风险

由图6可知,采用二郎山隧道判据能较准确的评价该隧道岩爆风险,其中,拱顶有岩爆风险的区段为DK 190 + 708 ~ DK 203 共 12 292 m,占全隧的94.2%,其中有严重岩爆风险的为DK 191 + 908 ~ DK 202 + 58 共 10 150 m,占全隧的77.8%。拱腰有岩爆风险的区段为DK 192 + 408 ~ DK 201 + 308 共 8 800 m,占全隧的67.4%。

3.3 岩爆倾向性经验判据方法适用性分析

该隧道进口各分析单元岩爆风险评估与实际发生的对比结果,如表2所示。

表2 隧道DK 194 + 450 ~ DK 195 + 647 段岩爆风险等级不同判据方法判定结果对比表

岩爆判据	低估率/%	高估率/%	正确率/%	误判率/%
Hoek 判据	0	83.3	16.7	83.3
二郎山隧道判据	0	83.3	16.7	83.3
Barton 判据	16.7	16.7	66.7	33.4
陶振宇判据	16.7	16.7	66.7	33.4

由表2可以看出:

(1)反映洞室开挖过程影响和初始应力场的偏应力特征的二个判据准确率均较低,普遍为高估岩爆风险(评估为强烈,实际以中等岩爆为主)。

(2)不反映洞室开挖过程影响和初始应力场的偏应力特征的判据中:Barton 判据、陶振宇判据准确率均达到了66.7%,适宜于该尺度(200 m 为单元)的某隧道岩爆风险评估,但少量洞段(占比16.7%)存在低估的情况。

(3)总体来说,在大尺度(200 m 为一单元)上,采用 Barton 判据、陶振宇判据能较为准确评价岩爆风险等级。

(4)在岩爆潜在发生位置上,反映洞室开挖过程影响和初始应力场的偏应力特征的二个判据均给出了较为准确的判断。

3.4 深埋隧道岩爆倾向性评估建议

(1)由图1可知,该隧道曾发生强烈岩爆,而大多洞段在开挖过程中发生中等岩爆。运用上述4个岩爆风险判据可以在大尺度上给出较为正确的岩爆风险等

级,尤其是 Barton 判据、陶振宇判据,为隧道掘进前的选址选线、工程设计等提供依据,适用于隧道开挖前的岩爆风险评估。

(2)隧道施工过程中,除地应力及岩石强度外,岩爆风险更与水文地质条件、洞型尺寸、施工速率等因素相关,应开展隧道施工过程中的岩爆风险多指标评估。通过微震等岩爆实时监测预警手段,为深埋隧道的安全快速施工提供有效帮助。

4 结论

(1)深埋硬岩隧道岩爆灾害频繁,如某隧道DK 194 + 450 ~ DK 195 + 647 段,该洞段大部分区域发生了岩爆,以中等-强烈岩爆风险为主,且主要发生在拱肩至拱顶部位。

(2)岩爆倾向性单指标经验评估方法应用分析表明:采用 Barton 判据、陶振宇判据能较为准确评价岩爆风险等级,反映洞室开挖过程影响和初始应力场偏应力特征的判据方法(Hoek 判据、二郎山隧道判据)对岩爆倾向性判别的准确率较低,但能够较为准确判断岩爆可能发生位置。

(3)深埋隧道岩爆倾向性评估应采用综合多类经验指标的评估方法。开挖过程中,还应开展微震监测,为深埋隧道的安全快速施工提供有效帮助。

参考文献:

- [1] 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 Qingwu, JU Nengpan, DU Lingli, et al. Research on Rockburst Prediction and Engineering Measures of Long and Deep-lying Tunnels [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(6): 88-94.
- [2] HOEK E., BROWN E. T. Practical Estimates of Rock Mass Strength [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1165-1186.
- [3] Russnes B F. Analyses of Rockburst in Tunnels in Valley Sides M Sc. Thesis [D]. Trondheim: Norwegian Inst. of Technology, 1974.
- [4] Tezuka K, Niitsuma H. Stress Estimated Using Microseismic Clusters and Its Relationship to the Fracture System of the Hijiori Hot Dry Rock Reservoir[J]. Engineering Geology, 2000, 56(1/2): 47-62.
- [5] 王兰生,李天斌,徐进,等. 二郎山公路隧道岩爆及岩爆烈度分级[J]. 公路,1999,44(2):41-45.
WANG Lansheng, LI Tianbin, XU Jin, et al. Classification of Rockburst and Rockburst Intensity in Erlang Mountain Highway Tunnel [J]. Highway, 1999, 44(2): 41-45.
- [6] 陶振宇. 高地应力区的岩爆及其判别[J]. 人民长江, 1987, 33(5):27-34.
TAO Zhenyu. Rockburst and Its Discrimination at High Stress Zone [J]. People of Yangtze River, 1987, 33(5): 27-34.
- [7] Barton N, Lien R and Lunde J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support [J]. Rock Mechanics, 1974, 6: 189-236.

(编辑:车晓娟 白雪)