

二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究

Study on the laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang Mountain road

徐林生 王兰生

(成都理工学院工程地质研究所, 成都, 610059)

文 摘 岩爆是地下工程中经常遇到的一种地质灾害, 根据二郎山公路隧道在施工中记录的 200 多次岩爆资料, 总结了该隧道岩爆发生的基本规律; 并采用“地质超前预报法”、“ σ_0/R_b 判据法”和“岩爆临界深度预测法”三种方法, 对其岩爆预测问题作了有益的探讨。

关键词 二郎山, 公路隧道, 岩爆, 预测

中图法分类号 TD 713

作者简介 徐林生, 男, 1964 年生, 同济大学定向培养博士后。研究方向为岩(土)力学与岩体稳定。

Xu Linsheng Wang Lansheng

(Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059)

Abstract As one of the geological hazards, rockburst is often met in underground engineering. In this paper, the basic laws of rockburst in the tunnel of Erlang Mountain road are summarized with more than 200 rockburst incidents recorded during tunnelling. Three effective methods for forecasting rockburst are also discussed. They are geology supertime forecasting, σ_0/R_b judging and rockburst critical depth forecasting.

Key words Erlang Mountain, road tunnel, rockburst, forecast

1 前 言*

岩爆是高地应力条件下地下洞室开挖过程中, 因围岩开挖卸荷而发生脆性破坏, 储存于岩体中的弹性应变能突然释放且产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象的一种动力失稳地质灾害, 它直接威胁人员、设备安全, 影响工程进度, 已成为世界性的地下工程难题之一。

川藏公路二郎山越岭隧道是“九·五”期间国家投资正在施工的我国最长公路隧道之一。其主隧道全长 4 176 m, 别托短隧道 94 m, 最大埋深达 770 m; 断面净宽 9 m, 净高 5 m, 为单洞双车道。隧道采用钻爆法施工, 先期施工平导, 目前已完成掘进任务。二郎山隧道穿越泥盆系、志留系砂岩、砂质泥岩、泥岩、灰岩等地层和 11 条断层, 地质条件较为复杂。据钻孔水压致裂法地应力实测资料, 隧址区局部范围内的最大水平主应力最高达 53.7 MPa, 方向 $N78^\circ W$, 与洞轴线 255° 方向的夹角为 27° 。在本区复杂的高地应力条件下施工过程中, 隧道洞壁常产生极高的切向应力, 围岩岩爆问题较为突出。

2 二郎山公路隧道岩爆发生的基本规律

自 1996 年 6 月开工以来, 二郎山隧道施工中先后共发生 200 多次岩爆现象。连续发生岩爆的洞段共有 8 段, 每段长 60~ 355 m 不等, 累计总长度达 1 095 m(其中主洞 410 m, 平导 685 m)。以王兰生教授为首的“二郎山隧道高地应力与围岩稳定性课题组”将岩爆烈度划分为

轻微、中等、强烈、剧烈 4 级(RMS 方案^[1])。从总体上看, 二郎山隧道中发生的岩爆属于轻微、中等岩爆级别。岩爆发生时, 虽伴有不同程度的声响, 但弹射微弱。根据现场施工跟踪观察、调研和大量统计资料分析, 总结出该隧道岩爆发生的基本规律有以下几点:

(1) 岩爆活动主要集中发生在距东、西两侧洞口平距 1.0~ 1.5 km 的洞段, 其中隧道东段岩爆区埋深为 410~ 570 m, 隧道西段岩爆区埋深为 270~ 490 m; 隧道其余洞段岩爆活动不发育或仅零星发育。

(2) 岩爆段岩性主要为砂岩、砂质泥岩、石英砂岩和泥岩软质岩层内的泥灰岩、砂岩、粉砂岩夹层。值得指出的是, 岩爆段的砂质泥岩经现场调研和室内薄片鉴定分析, 发现其砂质含量最高可达 45%, 且局部呈团斑、团块状出现; X 射线粉晶衍射测试结果表明, 其主要矿物成分: 伊利石占 35%~ 49%, 绿泥石占 24%~ 25%, 石英占 26%~ 39%; 岩样点荷载强度 $I_{s(50)}$ 值为 1.71~ 3.95 MPa, 即单轴抗压强度 37.62~ 86.9 MPa (平均值为 62.29 MPa), 基本上与泥灰岩强度相当, 并非传统概念上的软岩类岩石。砂质泥岩中发生岩爆活动, 这在国内外还是第一次发现。

(3) 岩爆区掘进过程中, 掌子面至 3 倍洞径的范围内岩爆活动最为频繁(图 1), 随后逐渐减少。但也有距掌子面 200 多 m 处滞后发生岩爆的情况。

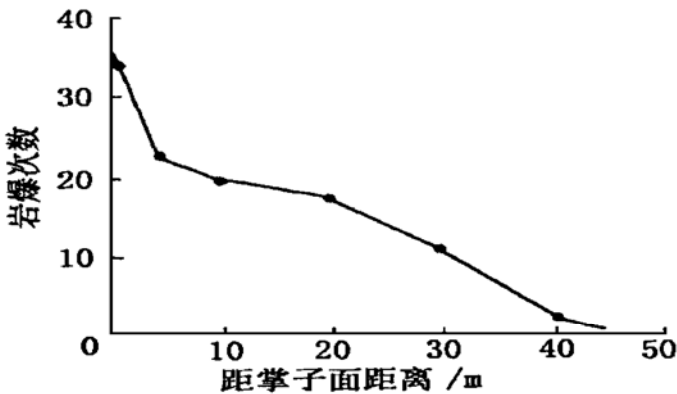


图1 岩爆与距离关系图

Fig. 1 The relationship of rockburst and distance

(4) 隧道东段岩爆活动多发生在两侧洞壁和南侧或北侧拱肩部位;隧道西段洞壁周边虽然均有岩爆活动,但拱顶最为强烈,其危害性也较大。

(5) 按公路隧道围岩分类规范(JTJ026—090),岩爆段围岩类别均为IV、V类。这就是说岩爆活动既不发生在很完整的VI类围岩中,也不发生在节理很发育的II、III类围岩中,具有明显的岩体结构效应^[2]。

(6) 岩爆段岩体表面十分干燥,并具有似烘干样光泽。有地下水存在或断裂部位不发生岩爆活动。

(7) 当围岩内部发出清脆的爆裂撕裂声时,岩爆力学机制表现为压致拉裂型破坏^[3],多平行洞壁发生且仅涉及表层岩体,岩石以薄片状、透镜状、板状形式爆裂剥离(落)下来,无弹射现象,断口多呈新鲜贝壳状;当围岩内部发出沉闷爆裂声,声响较小时,岩爆力学机制主要表现为压致剪切拉裂型破坏^[3],它持续时间较长且有随时间累进性向深部发展的特征,爆裂岩石多呈透镜状、棱板状、块状或片状等,可有弹射现象,断口多呈楔形或弧形凹腔。

(8) 在隧道二次衬砌作永久支护之前,岩爆可分为严重期、延续期、基本稳定期3个活动阶段(表1)。

表1 二郎山公路隧道岩爆活动分期表

Table 1 The rockburst active periods in the tunnel of Erlang Mountain road

岩爆活动分期	时 间	说 明
岩爆严重期	爆破后 4h 内	掌子面附近洞段岩爆十分频繁,为岩爆活动最危险时期
	爆破 4h 后至开挖一星期内	洞周应力调整频繁,为岩爆活动危险时期,应及时采取挂网喷锚支护
岩爆延续期	开挖一星期后至 4 个月内	洞周应力调整活动渐趋减少,不定期发生岩爆,并伴有大量剥落掉块现象。此期对洞室破坏性也较大,应及时采取补充加固围岩措施
岩爆基本稳定期	开挖 4 个月 后	洞周应力基本趋于稳定,但一旦强烈扰动仍会触发岩爆

3 二郎山公路隧道岩爆预测研究

岩爆预测问题极为复杂,目前国内外还没有一套成熟的理论和方法。我们在二郎山隧道岩爆预测中,采用以下3种方法对这一问题作了有益的探讨。

3.1 地质超前预报法

从二郎山隧道岩爆发生的基本规律可知,岩爆的发生不仅取决于地应力条件,还与岩性及其分布特征、岩体结构、断裂和地下水状况及其它扰动因素有关。这里要着重强调的是,该隧道岩爆的发生与NW向延伸的陡倾断裂和岩性条件关系甚为密切。

现场调研表明,二郎山隧道发育产状为N40°~60°W/NE∠60°~85°的张扭性次级断裂,其中多见有线状或股状地下水,显示断裂处岩体因张扭性活动而有所松弛,氦气α卡仪测试也显示其氦气值明显高于两侧岩体;洞壁二次应力场测试结果表明,该组断裂的存在造成了局部应力降低带,其应力则向两侧围岩中转移,从而导致NW向陡倾断裂两侧形成局部应力增高带。东段主洞已有的岩爆活动大多发生在距该组断裂10~20m距离以外的地段(图2),究其原因就与这种应力局部调整有很大关系。因此,在掘进过程中如遇有NW向出水的陡倾断裂时可作为预测前进方向可能产生岩爆的一个重要宏观预测标志。例如,当主洞开挖至桩号K260+470时,我们就根据K260+450~+464洞段发育NW向陡倾断裂且普遍股状出水的现象,预测掌子面前方在K260+474或+484以西洞段可能发生岩爆活动;随后施工中果然在K260+490拱顶部位起发生了岩爆活动,由于事先采取了有效的工程防治措施,从而保证了施工的顺利进行。

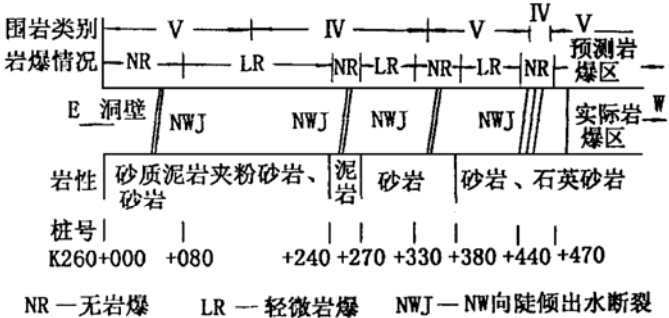


图2 隧道东段主洞部分岩爆发生规律及其预测示意图

Fig. 2 The sketch showing the law of rockburst and its forecasting in the east main tunnel

该隧道某些洞段岩爆发生在泥岩软质岩层内的泥灰岩夹层(如西段平导K261+920~+940甘溪组下段(Dig¹)泥岩层内的泥灰岩夹层)和砂岩、粉砂岩夹层(如东段平导K260+100~+250洞段)中。综合分析表明,这是因为邻近泥岩软质岩的这些硬脆性夹层由

于前者应力调整也出现了局部应力增高现象,因而当开挖至岩性硬软变化部位时,岩爆则往往发生在硬脆性夹层侧。这一规律性的认识也可作为高地应力区施工掘进过程中对岩爆进行预测的一个重要地质依据。

3.2 α_0/Rb 判据现场测定预测法

国内外学者多将有限元计算的断面洞壁切向应力 α_0 和岩石单轴抗压强度 Rb 之比值作为岩爆判据,然而在该判据临界值的取值上却有较强的争议^[4]。我们在实际工作中,现场采用点荷载仪来测定岩石的点荷载强度 $I_{s(50)}$,然后利用公式 $Rb = 22 I_{s(50)}$ 求得岩石单轴抗压强度 Rb ; α_0 的测定则采用了实用性和可操作性均较好的改进型现场应力恢复测试法:首先利用便携式轻型钻机和 YJ-25 型静态电阻应变仪、P20R-25 型预调平衡箱等仪器设备,测定洞壁浅表层钻孔岩芯

应力解除前后所贴应变片的应变差值 $\Delta\varepsilon$;然后籍此在现场对点荷载仪进行适当的改装,安上特制的加载装置对所取岩芯侧向加载,进行应力恢复测试,从而求得 α_0 ,计算公式为

$$\alpha_0 = \frac{F \cdot S_p \cdot \alpha}{L \cdot H}$$

式中 F 为应变恢复时点荷载仪压力表读数,MPa; S_p 为点荷载仪千斤顶活塞面积(常数 15.5 cm^2); α 为等效系数(常数 1.324); L 为受力垫片的弦长(常数 3.3 cm); H 为岩芯试样长度,cm。

施工过程中,在隧道西段平导典型岩爆段和非岩爆段及掌子面附近系统地布置 9 个测点。其测试结果与围岩实际变形破裂状况作对比分析,力图从中找出预测岩爆及其级别应力量化的依据,测试结果如表 2 所列。

表 2 隧道西段平导 α_0 , Rb 现场测试和围岩变形破裂状况对比分析表

Table 2 The measured results of α_0 , Rb and their comparison with deformation and break in the western tunnel

测点编号	位 置	岩 性	$I_{s(50)}$ / MPa	Rb / MPa	α_0 / MPa	α_0/Rb	围岩变形破裂状况	备 注
BS0	平导 K262+ 740 北壁 1.5 m 高处	灰岩 (D_{2y}^1)	3.37	74.14	8.29	0.11		
BS1	平导 K262+ 461 北壁 1.5 m 高处	砂质泥岩 (D_{1g}^2)	2.75	60.50	7.34	0.12	围岩稳定性较好	K262+ 295~+ 740 为无岩爆活动段
BS2	平导 K262+ 444 北壁 1.5 m 高处	砂岩 (D_{1g}^2)	3.96	87.12	8.90	0.10		
BS2'	平导 K262+ 445.5 北壁 1.5 m 高处	砂岩 (D_{1g}^2)	3.96	87.12	7.26	0.08		
BS3	平导 K262+ 298 北壁 1.5 m 高处	砂质泥岩 (D_{1g}^2)	2.58	56.76	14.84	0.26	该测点无岩爆。但其东侧 K262+ 295 起洞段有爆裂松脱、剥落现象,岩体结构渐趋紧密镶嵌,硐体干燥,地应力量级宏观判断渐趋增高	K261+ 940~K262+ 295 为轻微岩爆段
BS4	平导 K261+ 939 北壁 1.5 m 高处	泥灰岩 (D_{1g}^1)	3.50	77.00	40.12	0.52	围岩爆裂松脱、剥落现象严重,有轻微弹射,硐段应力尚处于调整状态	K261+ 820~+ 940 为中等岩爆段
BS5	平导 K261+ 905 北壁 1.5 m 高处	砂质泥岩 (D_{1g}^1)	2.95	64.90	41.46	0.64	围岩爆裂松脱、剥落现象严重,有轻微弹射。测试钻孔中岩芯有饼裂现象,这是高地应力的重要标志	
BS6	平导 K261+ 761 北壁 1.5 m 高处	砂质泥岩 (D_{1g}^1)	2.73	60.06	28.59	0.48	南侧拱肩至拱腰部位有爆裂松脱、剥落现象	K261+ 760~+ 820 为轻微岩爆段
BS7	平导 K261+ 701 北壁 1.5 m 高处(距当时掌子面约 10 m)	石英砂岩 (D_{1p}^3)	8.45	185.90	20.62	0.11	施工中围岩稳定性好,无岩爆现象	该测点位于原设计 K261+ 428~+ 751 的中等和强烈岩爆段内

从表 2 知, 无岩爆活动洞段, $\alpha_0/Rb < 0.3$; 轻微岩爆活动洞段, α_0/Rb 介于 0.3~0.5 之间; 中等岩爆洞段, α_0/Rb 介于 0.5~0.7 之间。籍此分析, 发生强烈岩爆活动时, α_0/Rb 比值至少应大于 0.7。

表 2 中 BS7 测点当时距掌子面约 10 m, 位于原设计单位圈定的 K261+428~+751 中等和强烈岩爆区内。但我们实测得到该处 α_0 仅为 20.62 MPa, α_0/Rb 为 0.11; 因此, 当时通过实测应力条件和宏观地质现象综合分析, 我们预测原设计单位圈定的这一中等和强烈岩爆区实际上并不具备发生岩爆的必要条件, 应予纠正。随后的施工情况证实了这一正确判断。

3.3 岩爆临界深度预测法

这一方法为侯发亮教授在 1989 年首先提出^[5]。他认为, 岩爆虽然多发生在水平构造应力较大的地区, 但如果洞室埋深较大, 即使没有构造应力, 由于上覆岩体效应, 洞室也可能发生岩爆。根据弹性力学求解, 侯发亮教授推导出仅考虑上覆岩体自重情况下岩爆发生最小埋深 H_{cr} (即岩爆临界深度) 的计算公式为

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

式中 Rb 为岩石单轴抗压强度; μ 为岩石泊松比, γ 为容重。

根据上述公式和隧道岩石物理力学参数测试资料, 我们计算出二郎山隧道东段可能发生岩爆的临界深度为 389 m (实际发生岩爆部位最小埋深为 410 m), 西段可能发生岩爆的临界深度为 257 m (实际发生岩爆部位最小埋深为 270 m)。

4 结 语

综上所述, 二郎山公路隧道岩爆的发生基本上都有规律可循, 这说明岩爆虽然是一种较为复杂的动力失稳地质灾害, 但只要认真观察和分析研究, 是能够认识其特征和发生规律, 从而找到有效的预测方法。我们认为, “地质超前预报法”和改进的“ α_0/Rb 判据法”是隧道掘进施工过程中两种较为实用、有效的岩爆预测方法; 对于深埋隧道来说, “岩爆临界深度预测法”也具有一定的实用性。

参加本项研究的人员还有李天斌、徐进、靳晓光等同志。工作过程中得到了四川省交通厅高管局、二郎山隧道工程总监办、监理组、协调办和施工单位铁十六局五处、铁道部隧道局、武警交通一总队隧道指挥部的大力协助, 在此一并致谢!

参 考 文 献

- 1 王兰生等. 川藏公路二郎山隧道围岩变形破裂的调研与监测. 四川省公路学会隧道专业委员会学术讨论会. 四川省华莹山市, 1998
- 2 谭以安. 岩爆特征及岩体结构效应. 中国科学, 1991, B 辑 (9): 985~991
- 3 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理. 北京: 地质出版社, 1981. 79~84
- 4 贾愚如等. 水工洞室中岩爆机制与判据. 见: 岩石力学在工程中的应用. 北京: 知识出版社, 1989. 254~260
- 5 侯发亮等. 圆形隧道中岩爆的判据及防治措施. 见: 岩石力学在工程中的应用. 北京: 知识出版社, 1989. 195~201