

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.09

基于地应力和岩体强度的岩爆预判

徐俊帅¹, 徐金明^{1,2}, 涂齐亮³

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海大学文化遗产保护基础科学研究院, 上海 200444;
3. 中铁十七局集团有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 工程中预判岩爆传统方法以岩石强度为基础, 但实际岩爆发生更多取决于岩体结构及岩体强度。本研究以我国西部某铁路隧道工程岩爆为背景, 岩体强度使用广义 Hoek - Brown 准则来计算, 根据岩爆发生实际情况提出了基于岩体强度 - 最大地应力比的岩爆预判改进方法, 将实际岩爆发生情况、传统方法预判结果与改进方法预判结果进行了对比。结果表明, 使用广义 Hoek - Brown 准则计算的岩体强度, 可以很好考虑岩石类型和强度、施工情况、岩体结构特征; 基于岩石强度 - 最大地应力比的岩爆预判结果与实际情况有较大差别, 但基于岩体强度 - 最大地应力比的岩爆预判结果与岩爆发生实际情况基本一致; 使用最大地应力和岩体强度预判岩爆时, 轻微、中等、强烈、剧烈岩爆对应的岩体强度 - 最大地应力比范围分别为 >0.15 、 $0.07 \sim 0.15$ 、 $0.02 \sim 0.07$ 、 <0.02 。研究结果对高地应力区隧道工程施工、岩爆防治措施确定都具有重要的参考价值。

关键词: 岩爆; 预判; 地应力; 岩石强度; 岩体强度

中图分类号: TU456

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)05-0052-07

Prediction of rock burst based on field geostress and rock mass strength

XU Junshuai¹, XU Jinming^{1,2}, TU Qiliang³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Basic Scientific Research Institute of Cultural Heritage Protection, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
3. China Railway 17 Bureau Group Co. Ltd., Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: The traditional method to predict the rock burst is based on the rock strength in practice, while as an actual rock burst depends more on the structure and strength of the rock mass. In the study, using the actual rock bursts occurred in a railway tunnel project in West China, the rock mass strength (RMS) was calculated from the generalized Hoek-Brown criterion. A modified rock burst estimation criterion was proposed according to the actual rock bursts and the ratio of RMS to maximum geostress (MG). The estimation results respectively based on the traditional and modified methods were furthermore compared with those of the actual rock bursts. The results show that the type and strength of a rock, construction situation, and structural features of rock mass may be well considered if RMS was determined by using the generalized Hoek-Brown criterion; the estimation results based on the ratio of the rock-strength to MG did not coincide with the actual rock bursts, while those based on the ratio of the RMS to MG coincided relatively with the actual rock bursts. The ratios of RMS to MG of greater than 0.15, 0.07 to 0.15, 0.02 to 0.07, and less than 0.02, were responded the slight, medium, strong and violent grades of the rock bursts. The results presented herein are

收稿日期: 2018-01-30; 修订日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472254)

第一作者: 徐俊帅(1992-), 男, 河南驻马店人, 硕士, 主要从事岩土工程的科研工作。E-mail: xujunshuai01@163.com

通讯作者: 徐金明(1963-), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质与岩土工程的教学与科研工作。E-mail: xjming@163.com

important in the great geostress areas both for the construction of a tunnel and for the prevention of a rock burst.

Keywords: rock burst; estimation; field geostress; rock strength; rock mass strength

岩爆是高地应力条件下储存于硬脆性围岩中的弹性应变能突然释放且产生爆裂脱落、剥离、弹射甚至抛掷性等破坏现象的一种地质灾害。岩爆预判工作,是高地应力区进行隧道工程设计和施工的重要基础。

目前,实际工程通常以岩石单轴抗压强度为基础来预判岩爆,并且取得了很多成果。BARTON 等^[1]以岩石强度与地应力的比值作为岩爆等级的判别指标;陶振宇^[2]提出了基于岩石单轴抗压强度和最大地应力之比的岩爆判据;RUSSENEs^[3]以隧洞最大切向应力与岩石单轴抗压强度之比作为岩爆等级的判别基础;谷明成等^[4]提出了岩爆发生的综合判据;张镜剑等^[5]移除了陶振宇和谷明成判据中的不合理部分,提出了修改的谷明成-陶振宇岩爆判据;蔡美峰等^[6]采用多种岩爆判断准则分析了玲珑金矿发生岩爆的可能性;吕庆等^[7]结合不同岩爆判别准则对苍岭隧道进行了岩爆预判;蔡美峰等^[8]采用多种准则与数值模拟对三山岛金矿进行了岩爆预判;康勇等^[9]采用多种岩爆判据和有限元数值模拟对笔架山隧道进行了岩爆判定;刘军强等^[10]采用 Russenes 判据和 Turchaninov 判据对西周岭隧道进行了岩爆综合预判;徐士良等^[11]结合陶振宇判据对秦岭公路隧道2号竖井进行岩爆预判;王庆武等^[12]利用修改后的谷明成-陶振宇判据进行了隧道岩爆的预判;吴德兴等^[13]认为,Russenes 判据比较符合隧道岩爆的实际情况。

但是,岩爆的发生,不仅取决于岩石强度,与岩体结构和岩体强度更是密切相关。目前,根据岩体结构计算岩体强度的 Hoek-Brown 强度准则,得到了广泛认可。HOEK 等^[14]给出了岩体类型、岩体质量指标和岩体强度的非线性经验关系;HOEK 等^[15]通过岩石三轴试验资料和岩体试验成果的统计分析,得到了岩块和岩体破坏时极限主应力之间的关系式;HOEK 等^[16]提出了广义 Hoek-Brown 强度准则;EBERHARDT^[17]认为,Hoek-Brown 强度准则对于大多数岩体都可使用、是直接估算岩体性质的一种方法;刘宁等^[18]认为,地质强度指数(Geological Strength Index, GSI)对岩爆形成具有比较明显的影响;朱合华等^[19]总结了 Hoek-Brown 强度准则的工程应用成果。

以岩石强度-最大地应力之比为基础进行岩爆预判,结果与实际情况往往存在一定差别;而实际岩爆不

仅取决于地应力状态和岩石强度,与岩体结构、施工扰动情况也密切相关。本次研究中,地应力状态使用空心包体应力解除法测定,岩石强度采用室内单轴抗压强度试验获得,岩体结构根据实际情况、采用 GSI 来表征,岩体强度使用广义 Hoek-Brown 强度准则进行计算,根据实际施工情况和岩爆情况研究基于地应力和岩体强度的岩爆预判准则,这对隧道工程施工和岩爆防治措施确定都具有重要的参考价值。

1 地应力的测定

1.1 工程背景

地应力测定位置为我国西部某铁路隧道施工现场。工程所处地区气候极端恶劣,山脉呈南北向纵贯延展、地势起伏较大,区域性大断裂和活动断裂较发育,地震活动频繁,构造地应力较高,节理较发育。隧道附近岩质坚硬,岩体较为完整,地应力水平较高,存在发生岩爆的可能性。

1.2 地应力测试

地应力测试采用空心包体应力解除法。测试时,用地质钻机钻取直径为 130 mm 的大孔,大孔上倾 3°~5°,从大孔孔底钻打直径为 36 mm 的同心小孔,小孔成形后用干毛巾把小孔擦干擦净并配置黏结剂,黏结剂搅拌均匀后,把黄油均匀涂抹在定向仪上,用砂纸打磨空心包体应力计外表,向应力计内腔倒入黏结剂,用安装杆将应力计送入钻孔之中。安装过程要控制在 20 分钟以内、以免影响胶体的流动性。

胶体完全凝固后,测量钻孔的倾角和方位、孔口的位置(大地坐标)和安装角。解除应力计时,用 YJZ-16⁺型智能数字应变仪采集数据,用 KJ327-F 型矿山压力监测系统接收数据,将带有应力计的完整岩芯放进围压率定仪,给岩芯逐步施加围压、采集应变、求出有效弹性模量和泊松比。

本文以 14 个现场地应力测点作为分析对象,使用其中 10 个测点资料进行实际岩爆情况、传统方法预判结果与改进方法预判结果的对比,以其余 4 个测点资料来验证本文改进方法的正确性。10 个测点最大地应力的测试结果见表 1。表 1 还列出了岩石单轴抗压强度的室内试验结果。

表 1 不同测点的最大地应力和岩石单轴抗压强度
Table 1 The maximum geostress and uniaxial compression strength at different measuring locations

测点编号	$\sigma_{\max}$ /MPa	σ_{ci} /MPa	测点编号	$\sigma_{\max}$ /MPa	σ_{ci} /MPa
1	49.7	40.62	6	43.3	21.08
2	23.5	35.63	7	31.8	26.51
3	22.2	84.54	8	28.6	43.49
4	34.8	30.43	9	31.0	101.27
5	19.9	22.15	10	33.3	62.88

表中, $\sigma_{\max}$ 为最大地应力, σ_{ci} 为岩石单轴抗压强度。

2 岩爆倾向性预测

2.1 岩爆发生的实际情况

10 个测点发生岩爆后的外观情况如图 1 所示。
下面以测点 1 为例,对现场岩爆情况进行分析。
测点 1 所处区域岩质比较坚硬,岩体较为完整,地温和构造地应力较高,处于区域性大断裂和活动断裂发育地带,构造裂隙和卸荷风化裂隙发育,节理间距多在 2~4 m。隧道施工时有较大的岩块迅猛飞出,岩块的尺寸较大、数量较多,岩爆坑穴呈连续分布、影响深度达 2 m 以上,围岩出现大面积的开裂失稳,现场施工时听到强烈的爆裂声音。测点 1 岩爆为强烈等级。
根据岩爆发生的实际情况确定了 10 个测点的岩爆等级,确定结果如表 2 所示。

表 2 不同测点岩爆等级的现场判定结果
Table 2 Field rock burst grades at different measuring locations

测点编号	岩爆等级	测点编号	岩爆等级
1	强烈	6	强烈
2	中等	7	强烈
3	轻微	8	中等
4	强烈	9	中等
5	中等	10	中等

2.2 使用传统方法的岩爆预测结果

工程实践多使用传统方法进行岩爆预测。传统方法通常以岩石强度 - 最大地应力之比为基础,对应的岩爆预测准则如表 3 所示。

表 3 传统方法中基于岩石强度 - 地应力比的岩爆等级预测
Table 3 Rock burst grades using strength-geostress ratio of rock in traditional estimation method

判别指标	轻微岩爆	中等岩爆	强烈岩爆	剧烈岩爆
$R_c/\sigma_{\max}$	4~7	2~4	1~2	<1

表中,岩爆判别适用于完整~较完整的中硬和坚硬岩体、无地下水活动的地段; R_c 为岩石饱和单轴抗压强度/MPa, $\sigma_{\max}$ 为最大地应力/MPa。

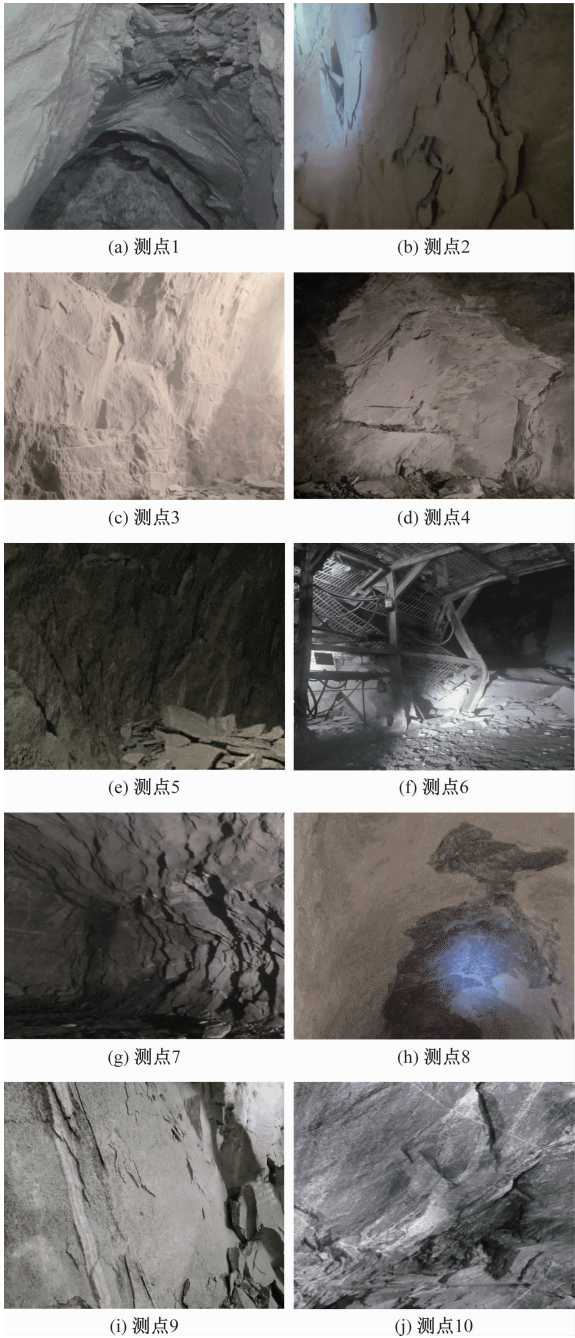


图 1 不同测点发生岩爆后的外观情况
Fig. 1 Appearances after rock bursts at different measuring locations

根据空心包体应力解除法得到的最大地应力、室内单轴抗压强度试验得到的岩石强度,使用岩石强度 - 最大地应力之比得到了不同测点的岩爆分级结果(表 4)。为便于对比,表 4 还列出了现场岩爆的观测结果。
从表 4 可以看出,使用岩爆预测的传统方法、基于岩石强度 - 最大地应力比来预测岩爆,预测结果与现

场情况相差较大。

表 4 基于岩石强度-地应力比的不同测点岩爆等级预判结果

Table 4 Rock burst grades at different measuring locations using strength-geostress ratio of rock			
测点编号	σ_{ci}/σ_{max}	传统方法预判结果	现场岩爆判定结果
1	0.82	剧烈	强烈
2	1.51	强烈	中等
3	3.80	中等	轻微
4	0.87	剧烈	强烈
5	1.11	强烈	中等
6	0.48	剧烈	强烈
7	0.83	剧烈	强烈
8	1.52	强烈	中等
9	3.26	轻微	中等
10	1.88	强烈	中等

2.3 岩爆预判方法的改进

传统岩爆等级分类标准中,强度应力比法中的强度通常指岩石饱和单轴抗压强度;但实际工程中岩爆出现与否和岩体结构及相应岩体强度有很大关系。因此,下面对传统方法进行改进,将岩体结构特点和相应岩体强度大小用于岩爆预判之中。

研究时,岩体结构特点使用地质强度指标 GSI 来表征。在确定其它相关参数(如岩体扰动程度系数、岩石单轴抗压强度)基础上,使用广义 Hoek-Brown 强度准则来计算岩体强度,进而使用岩体强度-最大地应力比作为岩爆预判指标、提出基于岩体强度的岩爆预判方法。

2.3.1 地质强度指标 GSI 的确定

Marinos-Hoek^[20]法确定地质强度指标 GSI(表 5),可以充分考虑岩体结构特征、岩体风化状况和岩体节理表面特征,较好地反映了实际情况。

表 5 中,在岩体结构特征方面,完整或大块结构表示完整岩样或大块原岩,几乎没有不连续面;块状结构表示很好的镶嵌状未扰动岩体,有三组相互正交的不连续面切割,岩块呈立方体状;碎块状结构表示镶嵌状部分扰动岩体,有四组或更多组不连续面切割形成棱角状岩块;块状或扰动结构表示有多组不连续面相互切割,形成棱角状岩块,且经历了褶曲和(或)断层活动;离散结构表示岩块间相互镶嵌作用很差,岩体极度破碎,呈混合状,或由棱角状和浑圆状岩块组成;剪切状或层状结构表示没有块体,由薄弱的褶曲层或剪断面相互叠合。在岩体风化状况和岩体节理表面特征方面,很好表示表面非常粗糙、新鲜、未风化;好表示粗糙、轻微风化、表面有铁锈;一般表示光滑、弱风化或蚀变;差表示有镜面擦痕、强风化,有密实的膜覆盖或有

棱角状碎屑填充;很差表示有镜面擦痕、强风化,有软黏土膜或黏土填充。

表 5 地质强度指标的估算 (Marinos 和 Hoek^[20])

Table 5 The estimation of geological strength index (from Marinos and Hoek ^[20])					
岩体结构特征	岩体风化状况和岩体节理表面特征				
	很好	好	一般	差	很差
完整/大块结构	90	80	70	N/A	N/A
块状结构	80	70	60	50	40
碎块状结构	70	60	50	40	30
块状/扰动结构	60	50	40	30	20
离散结构	50	40	30	20	10
剪切状/层状结构	N/A	N/A	10		

表中,“N/A”表示在这个范围内不适用。

本次研究使用 Marinos-Hoek 法来计算 GSI。下面以测点 1 为例,简要说明使用 Marinos-Hoek 法确定 GSI 的过程。测点 1 所处区域构造裂隙和卸荷风化裂隙发育,构造裂隙组合常呈“X”型分布,节理一般延伸不远,裂隙宽 1~10 mm,最大宽度为 15 mm,多呈微张及半张开状,局部可见充填物,节理间距多在 2~4 m。据此,将测点 1 的 GSI 取为 58。

10 个测点 GSI 的确定结果见表 6。

表 6 不同测点地质强度指标的确定结果

Table 6 Geological strength index at different measuring locations			
测点编号	GSI	测点编号	GSI
1	58	6	55
2	58	7	54
3	55	8	55
4	58	9	51
5	60	10	53

2.3.2 其他相关参数的确定

其它相关参数主要包括与岩体扰动程度、岩石单轴抗压强度有关的参数。

岩体扰动程度系数 D 的确定:D 与岩体遭受的扰动(如爆破、岩体开挖、岩体卸荷等)有关。考虑到本工程爆破和开挖对隧道岩体扰动的实际情况,将所有测点的 D 统一取为 0.5。

岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 的确定:各测点岩石的单轴抗压强度由室内单轴压缩试验确定(结果见前述表 1)。

2.3.3 基于 Hoek-Brown 准则的岩体强度计算

Hoek 和 Brown(2002)在分析 Griffith 理论的基础上,根据岩石三轴试验和岩体试验成果的统计分析,研究了岩块和岩体破坏时极限主应力之间的关系,得到了广义 Hoek-Brown 强度准则。在广义 Hoek-Brown 强度准则中,岩体强度采用下式计算:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} [m_b(\sigma_3/\sigma_{ci}) + s]^\alpha \quad (1)$$

$$m_b = m_i + \exp[(GSI - 100)/(28 - 14D)] \quad (2)$$

$$s = \exp[(GSI - 100)/(9 - 3D)] \quad (3)$$

$$\alpha = 0.5 + [\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3)]/6 \quad (4)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^\alpha \quad (5)$$

式中, σ_1, σ_3 ——是岩体破坏时的最大、最小有效主应力(压应力为正)/MPa;

σ_{ci} ——完整岩块单轴抗压强度/MPa;

m_b ——考虑岩体结构的 m_i 折减值;

m_i ——反映岩石软硬程度的经验参数;

s ——反映岩体破碎程度的经验参数,取值范围为 0~1,对完全破碎岩体 s 取 0,对完整岩体 s 取 1;

α ——反映岩体特征的经验参数;GSI 为岩体的地质强度指标;

D ——反映外界因素对原位岩体扰动程度的参数,取值范围为 0~1,对未扰动岩体 D 取 0,对完全扰动岩体 D 取 1;

σ_{cm} ——岩体单轴抗压强度/MPa。

10 个测点岩体强度 σ_{cm} 的计算结果见表 7。

表 7 不同测点岩体强度的计算结果

Table 7 Rock mass strength at different measuring locations

测点编号	σ_{cm}/MPa	测点编号	σ_{cm}/MPa
1	2.42	6	1.02
2	2.12	7	1.20
3	4.10	8	2.11
4	1.47	9	3.72
5	1.51	10	2.66

2.3.4 基于岩体强度的岩爆预测

不同测点岩体强度 - 最大地应力之比的计算结果见表 8。表 8 还列出了现场岩爆等级的实际观测情况。

根据表 8,轻微岩爆对应的岩体强度和最大地应

力比值为 0.185 0,中等岩爆对应的比值分别为 0.073 8、0.076 2、0.090 5、0.106 8、0.149 7,强烈岩爆对应的比值分别为 0.023 6、0.037 8、0.042 4、0.049 9,由这些数据可得岩体强度 - 最大地应力比与岩爆等级的对应关系(图 2)。

表 8 不同测点岩体强度 - 最大地应力比的计算结果

Table 8 Calculation results of ratios of rock-mass-strength to maximum field geostress at different measuring locations

测点编号	σ_{cm}/σ_{max}	现场岩爆判定结果	测点编号	σ_{cm}/σ_{max}	现场岩爆判定结果
1	0.049 9	强烈	6	0.023 6	强烈
2	0.090 5	中等	7	0.037 8	强烈
3	0.185 0	轻微	8	0.073 8	中等
4	0.042 4	强烈	9	0.149 7	中等
5	0.076 2	中等	10	0.106 8	中等

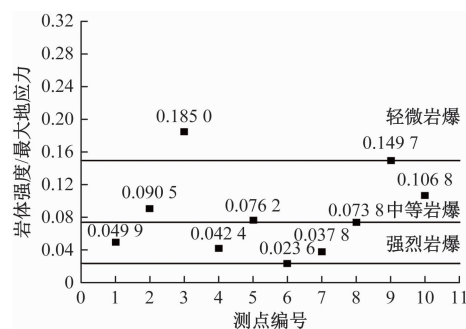


图 2 岩体强度 - 最大地应力比与岩爆等级的关系

Fig. 2 The relation between rock burst grade and ratio of rock-mass-strength to maximum field geostress

由图 2 可知,岩体强度 - 最大地应力比值较大时岩爆情况较轻,较小时岩爆情况较重。可以使用三条水平线 $y = 0.149 7$ 、 $y = 0.073 8$ 、 $y = 0.023 6$ 将岩体强度 - 最大地应力比值大小分成 4 个区域、分别为 $> 0.149 7$ 、 $0.073 8 \sim 0.149 7$ 、 $0.023 6 \sim 0.073 8$ 、 $< 0.023 6$,对应岩爆等级分别为轻微岩爆、中等岩爆、强烈岩爆、剧烈岩爆。为方便工程应用,界限值只保留两位小数,4 个区域分别变为 > 0.15 、 $[0.07, 0.15]$ 、 $[0.02, 0.07]$ 、 < 0.02 。据此得到基于岩体强度 - 最大地应力比的岩爆预判方法(表 9)。表 9 中, R_{cm} 为岩体强度,单位为 MPa; σ_{max} 为最大地应力,单位为 MPa。

表 9 基于岩体强度 - 最大地应力之比的岩爆预判指标

Table 9 The rock burst estimation index based on ratio of rock-mass-strength to maximum field geostress

判别指标	轻微岩爆	中等岩爆	强烈岩爆	剧烈岩爆
R_{cm}/σ_{max}	> 0.15	$0.07 \sim 0.15$	$0.02 \sim 0.07$	< 0.02

2.3.5 岩爆预判指标准确性的验证

为说明上述岩爆预判指标的可靠性,取另 4 个现场实测点进行验证。4 个验证点发生岩爆后的外观情况如图 3 所示。

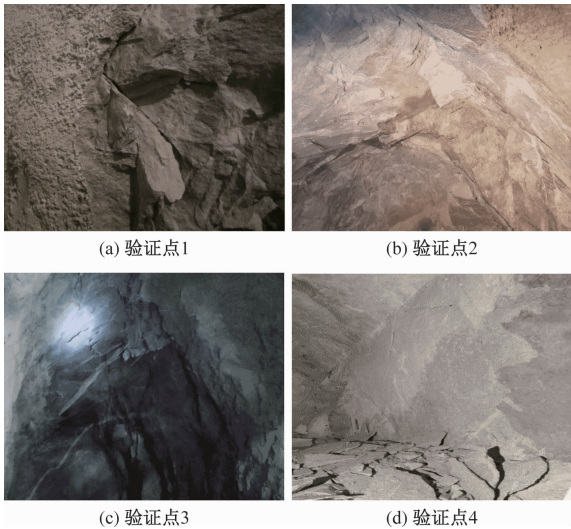


图 3 4 个验证点发生岩爆后的外观情况
Fig. 3 Appearances at 4 verification locations
after rock bursts

使用传统方法,得到基于岩石强度 - 最大地应力比的 4 个验证点岩爆分级预判结果(表 10)。

表 10 基于岩石强度 - 地应力比的 4 个验证点
岩爆等级预判结果

Table 10 Estimations of rock burst grades at 4 verification locations using ratio of rock-strength to geostress				
验证点 编号	σ_{ci}/MPa	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$\sigma_{ci}/\sigma_{\max}$	传统方法 预判结果
1	63.97	78.7	0.81	剧烈
2	50.37	25.4	1.98	强烈
3	55.39	36.9	1.50	强烈
4	42.54	46.3	0.91	剧烈

使用本文方法,得到 4 个验证点的岩体强度 - 最大地应力比(表 11)。

表 11 岩体强度 - 最大地应力比的计算结果
Table 11 Calculation results of ratios of
rock-mass-strength to maximum field
geostress at 4 verification locations

验证点编号	GSI	D	σ_{cm}/MPa	$\sigma_{cm}/\sigma_{\max}$
1	56	0.5	3.32	0.042 3
2	57	0.5	2.80	0.110 5
3	57	0.5	3.08	0.083 6
4	56	0.5	2.21	0.047 8

根据表 11 和表 9,得到 4 个验证点的岩爆预判结果(表 12)。表 12 也列出了 4 个验证点的现场观测结果和传统方法预判结果。

表 12 基于岩体强度 - 地应力比的 4 个验证点岩爆等级预判结果

Table 12 Estimations of rock burst grades at 4 verification locations using ratio of rock-mass-strength to geostress			
验证点 编号	本文方法 预判结果	现场岩爆 判定结果	传统方法 预判结果
1	强烈	强烈	剧烈
2	中等	中等	强烈
3	中等	中等	强烈
4	强烈	强烈	剧烈

由表 12 可以看出,使用基于岩石强度 - 最大地应力比的传统方法来预判岩爆,预判结果与现场情况有较大差别;使用本文提出的基于岩体强度 - 最大地应力之比的岩爆预判方法,预判结果与现场观测结果一致。这说明,岩爆预判时仅仅考虑岩石强度而不考虑岩体结构,不符合实际情况,不能有效地进行岩爆预判;基于岩体强度 - 最大地应力之比的岩爆预判方法,能够较好地反映岩体结构,预判结果与实际情况一致,可以用于岩爆预判。

3 结论

本文使用空心包体应力解除法测定地应力,使用广义 Hoek-Brown 强度准则计算岩体强度,提出了基于岩体强度 - 最大地应力之比的岩爆预判准则,将本文方法预判结果与基于岩石强度 - 最大地应力比的传统方法预判结果进行了对比,结果表明:

(1)使用广义 Hoek-Brown 准则计算岩体强度,不仅可以反映岩体结构特征,还能较好反映开挖扰动、岩体风化和节理外观等方面的实际情况;

(2)使用岩石强度 - 最大地应力比的岩爆预判传统方法、预判结果与实际情况差别较大,使用本文提出的岩体强度 - 最大地应力比岩爆预判方法、预判结果与实际情况一致;

(3)使用岩体强度 - 最大地应力比进行岩爆预判时,轻微、中等、强烈、剧烈岩爆对应的岩体强度 - 最大地应力比分别为 > 0.15 、 $0.07 \sim 0.15$ 、 $0.02 \sim 0.07$ 、 < 0.02 。

参考文献:

[1] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. Rock Mechanics, 1974, 6 (4): 189

- 236.
- [2] 陶振宇. 高地应力区的岩爆及其判别[J]. 人民长江, 1987, 18(5): 25-32.
TAO Zhenyu. Rock burst and evaluation method in high ground stress field[J]. Yangtze River, 1987, 18(5): 25-32.
- [3] RUSSENESE B F. Analyses of rock burst in tunnels in valley sides (in Norwegian) [M. S. Thesis][D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1974.
- [4] 谷明成, 何发亮, 陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1324-1329.
GU Mingcheng, HE Faliang, CHEN Chengzong. Study on rock burst in Qinling Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1324-1329.
- [5] 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 Jingjian, FU Bingjun. Rock burst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034-2042.
- [6] 蔡美峰, 王金安, 王双红. 玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 38-42.
CAI Meifeng, WANG Jinan, WANG Shuanghong. Analysis on energy distribution and prediction of rock burst during deep mining excavation in Linglong Gold Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 38-42.
- [7] 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.
LYV Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, 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.
- [8] 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1973-1980.
CAI Meifeng, JI Dong, GUO Qifeng. Study of rock burst prediction based on in-situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1973-1980.
- [9] 康勇, 李晓红, 王青海, 等. 隧道地应力测试及岩爆预测研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 959-963.
KANG Yong, LI Xiaohong, WANG Qinghai, et al. Research on in-situ stress measurement and rock burst forecast in tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 959-963.
- [10] 刘军强, 施建仁, 王水晶, 等. 地应力测量在深埋长大隧道岩爆预测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 776-781.
LIU Junqiang, SHI Jianren, WANG Shuijing, et al. Application of geostress measurement for rock burst forecast in deep-buried long and large tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 776-781.
- [11] 徐士良, 崔振东. 秦岭公路隧道2号竖井地应力与岩爆分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 407-412.
XU Shiliang, CUI Zhendong. Analysis of in-situ geo-stress and rock burst at no.2 ventilation shaft tunnel of Qinling highway tunnel[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 407-412.
- [12] 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): 88-95.
WANG Qingwu, JU Nengpan, DU Lingli, et al. Research on rock burst prediction and engineering measures of long and deep-lying tunnels[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(6): 88-95.
- [13] 吴德兴, 杨健. 苍岭特长公路隧道岩爆预测和工程对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3965-3971.
WU Dexing, YANG Jian. Prediction and countermeasure for rock burst in Cangling mountain highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3965-3971.
- [14] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1980, 106(9): 1013-1035.
- [15] 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.