

使用声发射测试结果预判岩爆等级

王亚磊 徐金明 吴述宽

(上海大学力学与工程科学学院,上海 200444)

摘 要 岩爆等级预判是进行岩爆灾害预警的重要基础,而岩爆本身的复杂性给岩爆预判带来了很大困难,为实现岩爆等级快速、准确地预判,采用声发射测试技术获取不同方向(纵向、斜向和横向)岩石的标准试样(直径为 50 mm、高度为 100 mm)在室内单轴压缩加载过程中的声发射特征,基于不同方向试件主破裂前的累积声发射能量 E_q 与最终破裂后的累积声发射能量 E 之比分别提出相应的岩爆等级预判新方法,并将预判结果与实际岩爆等级、传统方法的岩爆预判结果进行了对比。结果表明:基于不同方向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判结果准确率均达到 80%,与实际岩爆等级吻合性较好;与传统岩爆预判方法相比,基于 E_q/E 值的岩爆等级预判结果更为可靠;使用不同方向试件 E_q/E 值进行岩爆等级预判时,预判结果的准确率从高到低依次为纵向、斜向和横向。研究结果对于岩爆灾害防治具有一定的参考价值。

关键词 声发射 岩爆 测试 预判 E_q/E

中图分类号 TD853, TU456

文献标志码 A

文章编号 1001-1250(2022)-01-170-08

DOI 10.19614/j.cnki.jsks.202201025

Estimation of Rockburst Grade Using Acoustic Emission Test Results

WANG Yalei XU Jinming WU Shukuan

(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract Estimation of rockburst grade is an important basis for the early warning of rockburst disaster, but the complexity of rockburst itself brings great difficulties to the estimation of rockburst. In order to realize the rapid and accurate estimation of rockburst grade, the AE (acoustic emission) testing technology was adopted to obtain the AE features of standard rock samples (50 mm in diameter and 100 mm in height) in different directions (longitudinal, oblique and transverse) during the indoor uniaxial compression loading process. Using the ratio of the cumulative AE energy E_q before the main fracture to the cumulative AE energy E after the final fracture of samples in different directions, the corresponding new criteria for estimating the rockburst grade was proposed respectively, and the estimation results were compared with the actual rockburst grade and the estimation results of the traditional rockburst estimation criteria. It shows that the estimation accuracy of the criterion based on E_q/E of samples from different directions reaches 80%, which is in good agreement with the actual rockburst grade. Compared with the traditional rockburst estimation criterion, the estimation results of E_q/E -based rockburst estimation criterion are more reliable. When E_q/E of samples with different directions is used to estimate the rockburst grade, the reliability of the estimated results from high to low is longitudinal, oblique and transverse. The results presented herein have certain reference value for the prevention and control of rockburst disaster.

Keywords acoustic emission, rockburst, test, estimation, E_q/E

在易发生岩爆的地区进行隧道开挖时,必须对岩爆等级进行预判,以便提前采取适当的防治措施。岩爆灾害准确、快速地预判对于隧道工程的设计和施工具有重要意义。

岩爆灾害防治是目前亟需解决的问题,而岩爆机理的复杂性给岩爆等级快速准确地预判带来很大困

难^[1-2]。近年来,许多学者采用声发射测试技术对岩石声发射特征与岩爆活动的关系进行了研究。例如,杨健等^[3]利用声发射试验技术研究岩爆机理,依据声发射特征划分了岩性与岩爆类型的对应关系;CHO 等^[4]进行了岩石加载破坏过程声发射模拟试验;赵兴东等^[5]应用声发射定位技术研究了单轴加载条件下含不同预制裂纹的花岗岩样破裂失稳过程中内部

收稿日期 2021-03-22

基金项目 国家自然科学基金项目(编号:41472254)。

作者简介 王亚磊(1987—),男,博士研究生。通信作者 徐金明(1963—),男,教授,博士,博士研究生导师。

• 170 •

裂纹孕育、萌生、扩展、成核和贯通的三维空间演化过程,并分析了岩石声发射活动特性;李廷芥等^[6]根据花岗岩及大理岩单轴压缩电镜扫描试验结果,分析了岩石岩爆过程机理;苗金丽等^[7]根据三亚花岗岩岩爆试验前后样品 SEM(扫描电子显微镜)微观结构照片及岩爆过程中的声发射参数特征值的不同,得出岩爆过程中产生的高频低幅特征波对应张裂纹,低频高幅特征波对应剪切裂纹;HE 等^[8]、谭云亮等^[9]分别研究了岩石破裂过程中的声发射特性,并提出了基于声发射监测预警的岩爆灾变理论;赵毅鑫等^[10]、陆莱平等^[11]分别从微震信号频谱演化规律、能级与频次关系等方面讨论了岩爆机理及前兆信号特征;马天辉等^[12]应用地震学上的“3S”(应力集聚、应力弱化和应力转移)原理,采用微震监测技术进行了锦屏二级引水隧洞群的岩爆监测与预警工作,取得了比较理想的岩爆预测准确率;张子健等^[13]发现中等岩爆岩石的累积声发射能量远大于低等岩爆倾向值;刘亚运等^[14]认为岩石在单轴和三轴压缩试验过程中的声发射规律基本一致,并提出可将声发射累积振铃计数应用于岩爆等级预判;张艳博等^[15]利用岩爆声发射试验数据和 BP(误差反向传播算法)神经网络提出了一种岩爆实时预判方法;WANG 等^[16]基于声发射主频分布特征和信息熵理论建立了主频熵演化模型,提出将主频熵最大点作为岩爆预判关键点。

然而,利用岩石声发射特征参数提出一种定量指标并对不同岩爆等级(无、轻微、中等、强烈和剧烈)进行预判的研究鲜有报道,且以往研究在岩爆分析过程中通常忽略了原岩岩芯在切割加工时不同的切割方向(纵向、斜向和横向)对岩爆等级预判的影响。考虑到岩石声发射特征与岩爆等级高低密切相关,具有高岩爆等级倾向性的岩石在单轴受压时往往也释放更多的能量。并且岩爆等级较高的岩石在加载破坏前释放较少量甚至没有声发射信号释放,而在加载应力接近峰值应力时,声发射信号出现较多,此后岩石发生猛烈破坏^[17-18]。因此,本研究选用岩石的累积声发射能量作为岩爆等级预判的关键参数,并以我国西部某隧道为研究背景,在 22 个不同岩爆等级的岩爆区,使用钻孔取芯法获取岩体原岩试样,根据岩石单轴压缩试验和声发射试验结果,提出基于不同方向试样在主破裂前的累积声发射能量 E_q 与最终破裂后的累积声发射能量 E 之比的岩爆等级预判新方法,并将该方法的预判结果与实际岩爆等级、传统岩爆等级预判方法的预判结果进行对比分析。

1 声发射试验过程

1.1 试样制备

岩样取自于我国西部某隧道 22 个不同的岩爆等级区域,如图 1 所示。

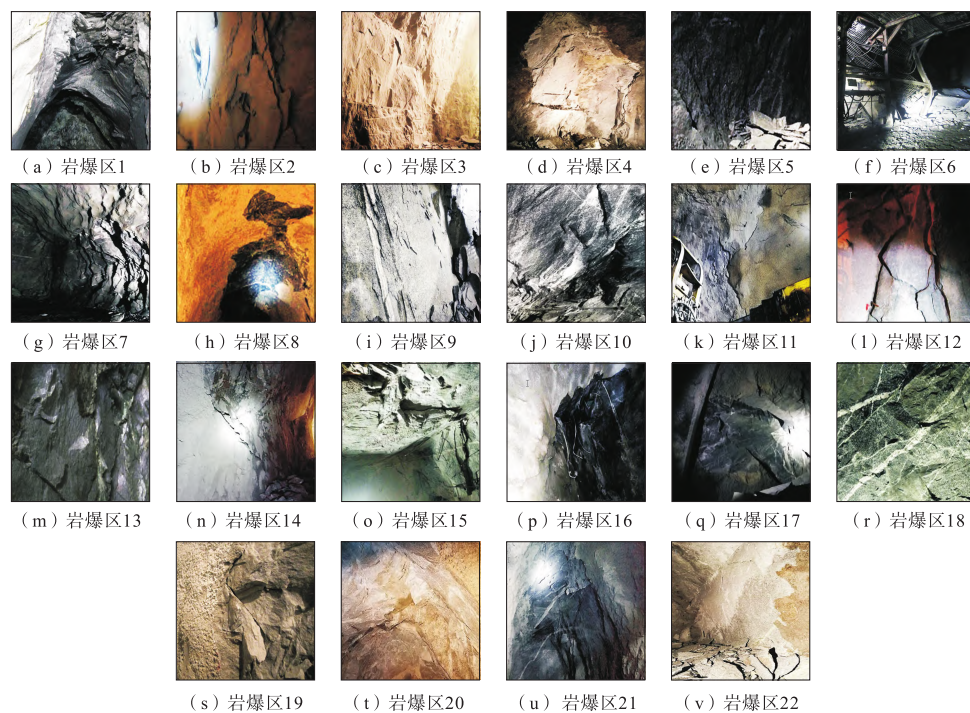


图 1 不同岩爆等级区域

Fig. 1 Areas with different rockburst grades

试件制备如图 2 所示,从现场取回的原始试块为外径 130 mm、圆柱形的岩芯。由于现场取芯条件限

制及运输中损坏,所得岩芯通常不足以加工成足够数量的试件。实际操作中,在室内将原始试块沿 3 个方

向加工成 3 件高×直径为 100 mm×50 mm 的圆柱体试件。3 个方向分别为试件轴线与原始岩芯轴线成 0°(纵向)、45°(斜向)、90°(横向)。为保证试件端面平整,对其表面进行磨滑处理,使试件不平度与不垂直度控制在 0.02 mm 以内,且试件端面与其轴线垂直(最大偏差不超过 0.2°),并保证试件没有明显裂缝。

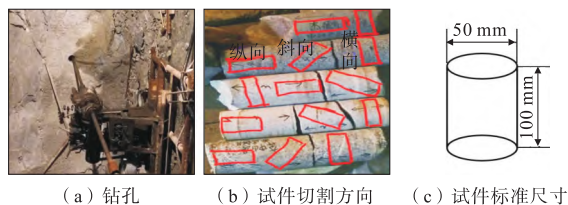


图 2 试件制备

Fig. 2 Sample preparation

1.2 试件加载

对加工后的试件进行单轴压缩和声发射试验。试验时,采用位移控制方式进行单轴分级加载:一级加载速率为 0.1 mm/s(加载至 20 kN),二级加载速率为 0.15 mm/s(加载至 150 kN),三级加载速率为 0.05 mm/s(加载至 250 kN),四级加载速率为 0.05 mm/s(加载至破坏)。每级加载后均保持 45 s,加载方式如图 3 所示。

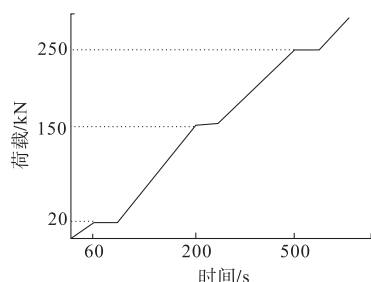


图 3 试件加载方式

Fig. 3 Loading mode of samples

试验所用设备为岩石液压伺服试验机与 PX-DAQ1672G 声发射测试系统,如图 4 所示。



图 4 声发射实验设备

Fig. 4 Acoustic emission test equipment

2 岩爆等级预判

2.1 岩爆等级预判指标确定

整理声发射试验数据,统计岩石试件在单轴压缩

过程中的 AE 能量。本研究以岩爆区 1(强烈岩爆)为例,分析岩爆等级预判指标 E_q/E 的确定过程。岩爆区 1 中横向试件、斜向试件和纵向试件的 AE 能量与加载时间的关系曲线如图 5 所示。

由图 5 可知:在荷载达到最大值前,不同方向试件表现均比较平静,试件释放能量非常少;在荷载达到最大值后,主裂缝开始产生,声发射事件比较活跃,试件能量开始快速释放。据此,将荷载达到最大值时对应的时间点作为试件主裂缝开始产生的时刻,计算得到横向、斜向和纵向试件主裂缝开始前累积 AE 能量 E_q 与试件最终破裂后累积 AE 能量 E 的比值分别为 0.050 8、0.103 4 和 0.169 4。参照上述方法可得其他岩爆区的 E_q/E 值,见表 1。

表 1 不同岩爆区的 E_q/E 值Table 1 E_q/E values in different rockburst areas

岩爆区编号	E_q/E			实际岩爆等级
	横向	斜向	纵向	
1	0.050 8	0.103 4	0.169 4	强烈
2	0.769 2	0.424 1	0.726 7	中等
3	0.857 1	0.877 4	0.935 5	轻微
4	0.042 8	0.088 2	0.195 6	强烈
5	0.583 3	0.468 8	0.518 5	中等
6	0.142 8	0.148 1	0.260 7	强烈
7	0.090 9	0.190 5	0.315 8	强烈
8	0.684 4	0.476 2	0.625 0	中等
9	0.538 5	0.417 8	0.656 7	中等
10	0.775 6	0.680 9	0.704 5	中等
11	0.410 2	0.562 5	0.543 5	中等
12	0.048 4	0.155 5	0.078 1	强烈
13	0.656 7	0.467 1	0.838 7	中等
14	0.760 9	0.518 5	0.441 2	中等
15	0.551 7	0.407 4	0.714 3	中等
16	0.722 2	0.718 8	0.447 3	中等
17	0.816 2	0.607 1	0.757 6	中等
18	0.585 4	0.673 9	0.525 0	中等
19	0.337 5	0.216 6	0.184 2	强烈
20	0.680 0	0.789 5	0.657 9	中等
21	0.794 8	0.441 2	0.731 7	中等
22	0.322 5	0.205 8	0.154 7	强烈

根据表 1 中 22 个不同岩爆区不同方向试件 E_q/E 值的计算结果,任意选择其中 14 个匹配实际的岩爆情况。按照上述方法,分别基于横向试件、斜向试件和纵向试件的 E_q/E 值提出相应的岩爆等级预判方法,并使用剩余 8 个岩爆区的 E_q/E 值分别对岩爆预判方法的准确率进行验证分析。本研究以横向试件为例分析不同方向试件的岩爆等级预判过程。从表 1 中任意选择 14 个岩爆区数据并进行重新编号,结果如表 2 所示。

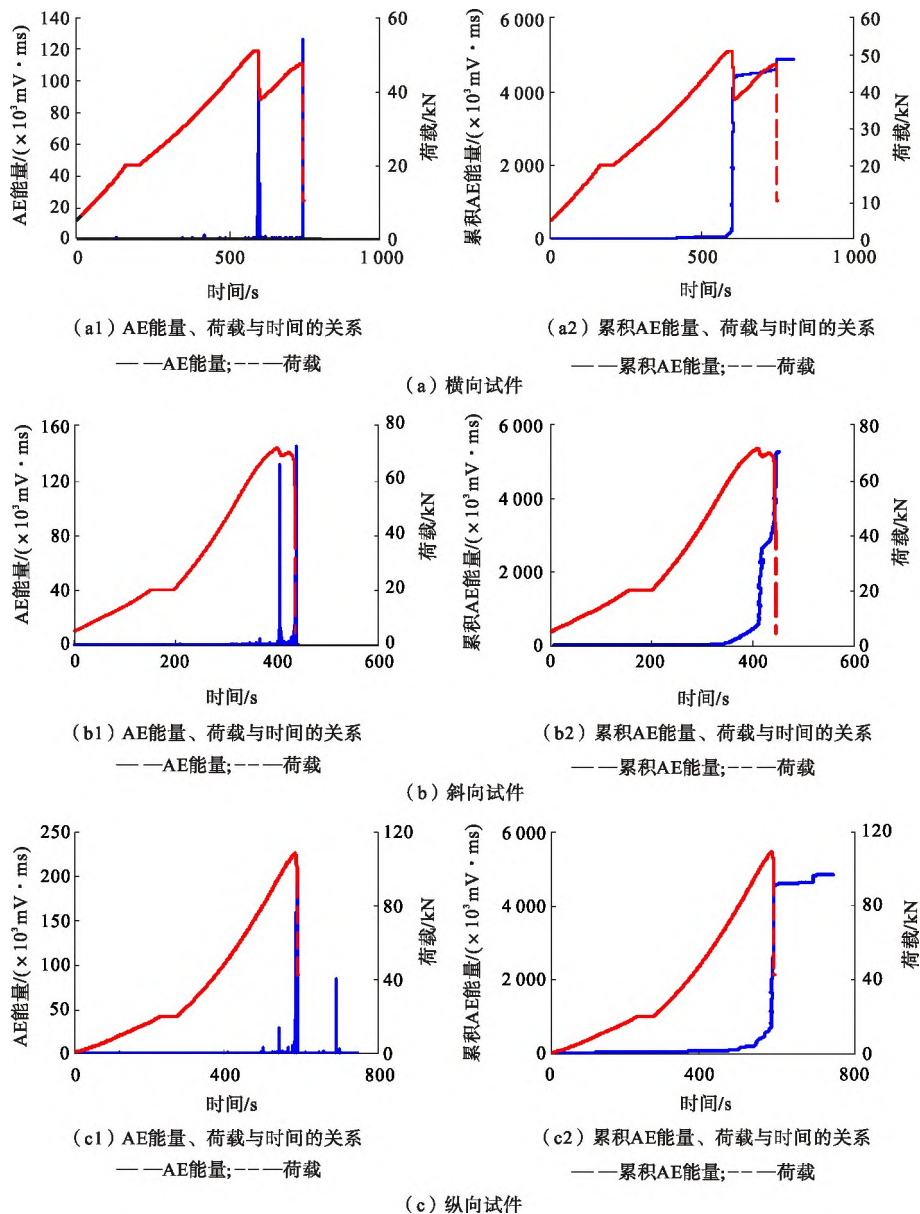


图 5 不同方向试件的 AE 能量

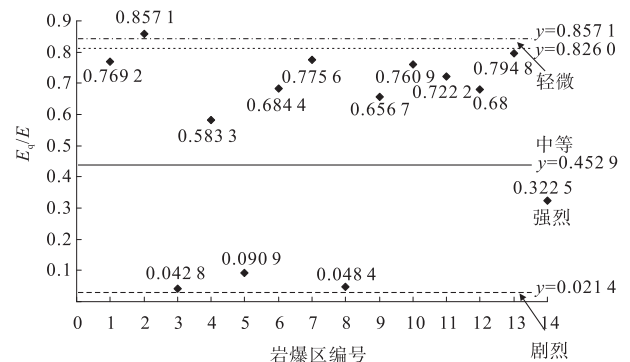
Fig. 5 AE energy of samples various at different directions

表 2 横向试件中不同岩爆区 E_q/E 值Table 2 E_q/E values of transverse samples various at different rockburst zones

编号	E_q/E	实际岩爆等级	编号	E_q/E	实际岩爆等级
1	0.769 2	中等	8	0.048 4	强烈
2	0.857 1	轻微	9	0.656 7	中等
3	0.042 8	强烈	10	0.760 9	中等
4	0.583 3	中等	11	0.722 2	中等
5	0.090 9	强烈	12	0.680 0	中等
6	0.684 4	中等	13	0.794 8	中等
7	0.775 6	中等	14	0.322 5	强烈

如表 2 所示,任意选取的 14 个岩爆区中,轻微岩爆、中等岩爆、强烈岩爆以及剧烈岩爆的个数分别为 1,9,4 和 0。由于剧烈岩爆个数为 0,这给准确确定剧烈岩爆的范围带来了困难。为方便划分岩爆的区

域,将 E_q 与 E 的比值取 0,暂作为一个剧烈岩爆的测点值。将表 2 中横向试件的 E_q/E 值与相应的岩爆等级进行匹配,得到岩爆等级预判标准,如图 6 所示。

图 6 不同岩爆区 E_q/E 值的变化Fig. 6 E_q/E values various at different rockburst areas

由图 6 可知: E_q/E 值较大时岩爆等级较轻,较小时岩爆较重。据此可使用 4 条水平线按 E_q/E 值大小分成 5 个区域,并且这 5 个区域对应的岩爆等级分别为无岩爆、轻微岩爆、中等岩爆、强烈岩爆、剧烈岩爆。这 4 条水平分界线的确定过程如下:

(1) 无岩爆与轻微岩爆的分界线。属于轻微岩爆的测点只有 1 个,且无岩爆的个数为 0,取岩爆区 2 的值 $y_2(0.8571)$ 作为无岩爆与轻微岩爆的分界值,即分界线 $y=0.8571$ 。

(2) 轻微岩爆与中等岩爆的分界线。属于轻微岩爆的测点只有 1 个,属于中等岩爆的测点有 9 个。岩爆区 2 的值表示轻微岩爆区域的最小值 $y_3(0.8571)$,岩爆区 13 的值代表中等岩爆区域中测点的最大值 $y_{13}(0.7948)$ 。取 y_3 与 y_{13} 之和的 $1/2$ 作为两种岩爆范围的分界值,即分界线 $y=0.8260$ 。

(3) 中等岩爆与强烈岩爆的分界线。岩爆区 4 的值表示中等岩爆区域的最小值 $y_4(0.5833)$,岩爆区 14 的值代表这强烈岩爆区域中测点的最大值 $y_{14}(0.3225)$ 。取 y_4 与 y_{14} 之和的 $1/2$ 作为两种岩爆范围的分界值,即分界线 $y=0.4529$ 。

(4) 中等岩爆与强烈岩爆的分界线。岩爆区 3 的值表示中等岩爆区域的最小值 $y_3(0.0428)$,剧烈岩爆区域中测点的最大值取 0。取 y_3 与 0 之和的 $1/2$ 作为两种岩爆范围的分界值,即分界线 $y=0.0214$ 。

按照从无岩爆到剧烈岩爆的次序,5 个被划分的区域分别为 >0.8571 , $(0.8260, 0.8571]$, $(0.4529, 0.8260]$, $(0.0214, 0.4529]$ 和 ≤ 0.0214 。为方便工程应用,保留两位小数可得岩爆等级划分标准为 >0.86 , $(0.83, 0.86]$, $(0.45, 0.83]$, $(0.02, 0.45]$ 和 ≤ 0.02 。参照上述方法可得到基于不同方向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法,如表 3 所示。

表 3 基于不同方向试样 E_q/E 值的岩爆等级预判方法

Table 3 Estimation criteria of rockburst grade based on E_q/E values of samples from different directions

岩爆等级	岩爆等级预判方法		
	横向	斜向	纵向
无	>0.86	>0.88	>0.94
轻微	$0.83 \sim 0.86$	$0.84 \sim 0.88$	$0.88 \sim 0.94$
中等	$0.45 \sim 0.83$	$0.32 \sim 0.84$	$0.38 \sim 0.88$
强烈	$0.02 \sim 0.45$	$0.04 \sim 0.32$	$0.07 \sim 0.38$
剧烈	≤ 0.02	≤ 0.04	≤ 0.07

为验证上述岩爆等级预判方法的准确率,取相应方向上剩余 8 个岩爆区的 E_q/E 值分别进行验证,结果见表 4。

表 4 岩爆等级预判结果

Table 4 Estimation results of rockburst grade

验证 编号	岩爆等级预判标准及其预判结果						实际 岩爆 等级
	横向试件		斜向试件		纵向试件		
	E_q/E	预判结果	E_q/E	预判结果	E_q/E	预判结果	
1	0.050 8	强烈	0.103 4	强烈	0.169 4	强烈	强烈
2	0.142 8	强烈	0.148 1	强烈	0.260 7	强烈	强烈
3	0.538 5	中等	0.417 8	中等	0.656 7	中等	中等
4	0.410 2	强烈	0.562 5	中等	0.543 5	中等	中等
5	0.551 7	中等	0.407 4	中等	0.714 3	中等	中等
6	0.816 2	中等	0.607 1	中等	0.757 6	中等	中等
7	0.585 4	中等	0.673 9	中等	0.525 0	中等	中等
8	0.337 5	强烈	0.216 6	强烈	0.184 2	强烈	强烈

将表 4 中列出的基于不同试件 E_q/E 值的岩爆等级预判结果与实际岩爆等级进行详细的对比分析,结果见表 5。

表 5 岩爆等级预判结果与实际岩爆等级对比

Table 5 Comparison of the estimated results of rockburst grade and actual rockburst grade

岩爆等级预判方法	过高估计率	过低估计率	准确率	错估率
横向	12.5	0	87.5	12.5
斜向	0	0	100.0	0
纵向	0	0	100.0	0

由表 5 可知:基于横向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法的准确率超过 80%,错估率为 12.5%,岩爆等级预判结果与实际基本一致;基于横向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判结果存在过高估计情况,岩爆等级过高估计一个等级,过高估计率为 12.5%,不存在过低估计情况;基于斜向和纵向 E_q/E 值的岩爆等级预判的准确率达到 100%,错估率为 0%,岩爆等级预判结果与实际一致;与横向试件相比,基于斜向试件或纵向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法的准确率较高。

2.2 岩爆等级预判标准的适用性

为进一步分析基于不同方向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法的适用性,将 22 个岩爆测区 3 个方向上所有的 E_q/E 值全部作为测试数据。以基于横向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法为例,分析岩爆等级预判过程,结果见表 6 和表 7。

参照上述方法可得基于斜向和纵向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判结果,将其与实际岩爆等级进行对比,结果见表 7。

由表 7 可知:基于不同方向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法的准确率较高,均达到了 80%,预判结果准确率从高到低依次为纵向、斜向和横向;基于横

表 6 基于横向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判结果Table 6 Estimated results of rockburst grades based on transverse sample E_q/E values

编号	岩爆等级预判标准及其预判结果						实际 岩爆 等级
	横向试样		斜向试样		纵向试样		
	E_q/E	预判结果	E_q/E	预判结果	E_q/E	预判结果	
1	0.050 8	强烈	0.103 4	强烈	0.169 4	强烈	强烈
2	0.769 2	中等	0.424 1	强烈	0.726 7	中等	中等
3	0.857 1	轻微	0.877 4	无	0.935 5	无	轻微
4	0.042 8	强烈	0.088 2	强烈	0.195 6	强烈	强烈
5	0.583 3	中等	0.468 8	中等	0.518 5	中等	中等
6	0.142 8	强烈	0.148 1	强烈	0.260 7	强烈	强烈
7	0.090 9	强烈	0.190 5	强烈	0.315 8	强烈	强烈
8	0.684 4	中等	0.476 2	中等	0.625 0	中等	中等
9	0.538 5	中等	0.417 8	强烈	0.656 7	中等	中等
10	0.775 6	中等	0.680 9	中等	0.704 5	中等	中等
11	0.410 2	强烈	0.562 5	中等	0.543 5	中等	中等
12	0.048 4	强烈	0.155 5	强烈	0.078 1	强烈	强烈
13	0.656 7	中等	0.467 1	中等	0.838 7	轻微	中等
14	0.760 9	中等	0.518 5	中等	0.441 2	强烈	中等
15	0.551 7	中等	0.407 4	强烈	0.714 3	中等	中等
16	0.722 2	中等	0.718 8	中等	0.447 3	强烈	中等
17	0.816 2	中等	0.607 1	中等	0.757 6	中等	中等
18	0.585 4	中等	0.673 9	中等	0.525 0	中等	中等
19	0.337 5	强烈	0.216 6	强烈	0.184 2	强烈	强烈
20	0.680 0	中等	0.789 5	中等	0.657 9	中等	中等
21	0.794 8	中等	0.441 2	强烈	0.731 7	中等	中等
22	0.322 5	强烈	0.205 8	强烈	0.154 7	强烈	强烈

向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法的过高估计率较高,超过了 10%,工程应用时适当注意;基于纵向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法不存在过低估计率。综上所述,基于纵向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法对不同方向 E_q/E 值的适用性均较好,进行岩

表 8 不同方法的岩爆等级判据

Table 8 Rockburst grade criterias for different methods

Barton 判据			Rehman 判据		陶振宇判据		规范法		本研究方法					
$\sigma_c/\sigma_{\max}$	SRF	岩爆等级	SRF_Q	岩爆等级	$\sigma_c/\sigma_{\max}$	岩爆等级	$\sigma_c/\sigma_{\max}$	岩爆等级	横向		斜向		纵向	
									E_q/E	岩爆等级	E_q/E	岩爆等级	E_q/E	岩爆等级
2.5~5.0	5~10	中等	5~10	中等	5.5~14.5	轻微	4~7	轻微	>0.86	无	>0.88	无	>0.94	无
									0.83~0.86	轻微	0.84~0.88	轻微	0.88~0.94	轻微
<2.5	10~20	严重	10~20	严重	<2.5	严重	1~2	强烈	0.45~0.83	中等	0.32~0.84	中等	0.38~0.88	中等
									0.02~0.45	强烈	0.04~0.32	强烈	0.07~0.38	强烈
							<1	剧烈	≤ 0.02	剧烈	≤ 0.04	剧烈	≤ 0.07	剧烈

使用上述岩爆等级预判方法对 8 个验证点分别进行了岩爆等级预判,结果见表 9。

将不同方法的岩爆等级预判结果与实际岩爆等级进行了详细的对比分析,结果见表 10。

由表 10 可知:不同方法的预判结果中均存在岩

表 7 不同方向岩爆等级预判结果与实际岩爆等级对比

Table 7 Comparison of the estimated results of rockburst grade and actual rockburst grade for different directions

岩爆等级预判方法	过高估计率	过低估计率	准确率	错误率
横向	10.6	4.5	84.9	15.1
斜向	3.0	7.6	89.4	10.6
纵向	6.0	0	94.0	6.0

爆等级预判时,可优先考虑选用基于纵向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法。

2.3 不同岩爆等级预判方法对比

为分析本研究所提岩爆等级预判方法的可靠性,分别使用 Barton 判据^[19]、Rehman 判据^[20]、Hoek 判据^[21]、陶振宇判据^[22]、规范法^[23]与本研究方法对文中 8 个验证测点进行岩爆等级估算。不同方法的岩爆判据如表 8 所示,表中 SRF 和 SRF_Q 分别代表应力折减系数和改进的应力折减系数, σ_c 和 $\sigma_{\max}$ 分别代表单轴抗压强度和最大地应力。Barton 判据将岩爆等级简单地分为中等岩爆和严重岩爆,且缺少对强度应力比大于 5 的分级,岩爆等级分级不够精确;文献[20]认为 SRF 仅考虑了完整岩石与主应力的比值,忽略了岩体的节理,从而提出了 SRF_Q ,但同样存在分类不精确的问题;陶振宇等^[22]以 Barton 判据为基础,将中等岩爆分为轻微岩爆和中等岩爆,未对严重岩爆进一步细分;规范法^[23]将严重岩爆进一步划分为强烈岩爆和剧烈岩爆两个等级,并将岩爆等级划分为轻微岩爆、中等岩爆、强烈岩爆和剧烈岩爆,但是忽略了无岩爆的情况;本研究方法考虑了声发射特征与岩爆倾向性强弱的关系,使用 E_q/E 值将岩爆划分为无岩爆、轻微岩爆、中等岩爆、强烈岩爆和剧烈岩爆。

爆等级被高估的情况,规范法预判结果过高估计率最高,达到了 50%;Barton 判据、Rehman 判据、陶振宇判据和规范法预判结果的准确率不高,均未达到 80%;Barton 判据、Rehman 判据、陶振宇判据和规范法预判结果不存在过低估计的情况,而本研究方法的预判结

表 9 不同判据的岩爆预等级判结果

Table 9 Estimation results of rockburst grades based on different rockburst criteria

验证 编号	$\sigma_c/\sigma_{\max}$	SRF	SRF _Q	Barton 判据	Rehman 判据	陶振宇 判据	规范 法	本研究方法						实际 岩爆 等级
								横向		斜向		纵向		
								E_q/E	岩爆等级	E_q/E	岩爆等级	E_q/E	岩爆等级	
1	0.82	18.54	14.55	严重	严重	严重	剧烈	0.050 8	强烈	0.103 4	强烈	0.169 4	强烈	强烈
2	0.48	17.48	15.12	严重	严重	严重	剧烈	0.142 8	强烈	0.148 1	强烈	0.260 7	强烈	强烈
3	3.26	5.27	8.47	中等	中等	中等	中等	0.538 5	中等	0.417 8	中等	0.656 7	中等	中等
4	2.22	5.41	8.78	严重	中等	严重	中等	0.410 2	强烈	0.562 5	中等	0.543 5	中等	中等
5	2.99	5.97	16.96	中等	严重	中等	中等	0.551 7	中等	0.407 4	中等	0.714 3	中等	中等
6	3.00	5.54	17.72	中等	严重	中等	中等	0.816 2	中等	0.607 1	中等	0.757 6	中等	中等
7	1.35	18.23	17.32	严重	严重	严重	强烈	0.585 4	中等	0.673 9	中等	0.525 0	中等	中等
8	0.92	18.93	12.55	严重	严重	严重	剧烈	0.337 5	强烈	0.216 6	强烈	0.184 2	强烈	强烈

表 10 5 种方法的岩爆等级预判结果与实际岩爆等级对比

Table 10 Comparison of the estimated results of rockburst grade and actual rockburst grade of five methods

%				
岩爆等级预判方法	过高估计率	过低估计率	准确率	错估率
Barton 判据	25.0	0	75.0	25.0
Rehman 判据	37.5	0	62.5	37.5
陶振宇判据	25.0	0	75.0	25.0
规范法	50.0	0	50.0	50.0
横向	12.5	0	87.5	12.5
斜向	0	0	100.0	0
纵向	0	0	100.0	0

果存在过低估计岩爆等级的现象,但是过低估计率较小。综上所述,与其他岩爆等级预判方法相比,本研究方法的预判结果与实际岩爆等级更为接近。

3 结 论

本研究以我国西部某隧道为例,使用声发射测试技术获取了不同岩爆等级区、不同方向(横向、斜向和纵向)标准岩石试件在单轴压缩荷载作用下的声发射特征,提出了基于试件主破裂前的累积声发射能量 E_q 与最终破裂后的累积声发射能量 E 之比的岩爆等级预判方法,得到如下结论:

(1)使用不同方向试件的 E_q/E 值将岩爆等级细分为无、轻微、中等、强烈和剧烈岩爆,并分别得到了基于横向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法(>0.86 、 $0.83\sim 0.86$ 、 $0.45\sim 0.83$ 、 $0.02\sim 0.45$ 和 ≤ 0.02),基于斜向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法(>0.88 、 $0.84\sim 0.88$ 、 $0.32\sim 0.84$ 、 $0.04\sim 0.32$ 和 ≤ 0.04)和基于纵向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判方法(>0.94 、 $0.88\sim 0.94$ 、 $0.38\sim 0.88$ 、 $0.07\sim 0.38$ 和 ≤ 0.07)。

(2)基于不同方向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判结果准确率均达到了 80%,该方法相对于传统岩爆等级预判方法而言,其预判结果与实际岩爆等级更为接近。

(3)基于不同方向试件 E_q/E 值的岩爆等级预判准确率由高到低依次为纵向、斜向和横向。

参 考 文 献

- [1] 张晓君. 高应力硬岩卸荷岩爆模式及损伤演化分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3554-3560.
ZHANG Xiaojun. Pattern and damage evolution of unloading rockburst for high-stress hard rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3554-3560.
- [2] 李桂云, 李金良, 赵晓举, 等. 深部巷道岩爆预测及防治技术[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2006, 25(4): 266-269.
LI Guiyun, LI Jinliang, ZHAO Xiaojun, et al. Forecasting and prevention technology of rockburst in deep tunnel[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2006, 25(4): 266-269.
- [3] 杨健, 王连俊. 岩爆机理声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3796-3802.
YANG Jian, WANG Lianjun. Study on mechanism of rockburst by acoustic emission testing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3796-3802.
- [4] CHO S H, OGATA Y, KANEKO K. A method for estimating the strength properties of a granitic rock subjected to dynamic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42: 561-568.
- [5] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 基于微震监测及应力场分析的冲击地压预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 4745-4749.
ZHAO Xingdong, TANG Chun'an, LI Yuanhui, et al. Prediction method of rockburst based on microseismic monitoring and stress field analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 4745-4749.
- [6] 李廷芥, 王耀辉, 张梅英, 等. 岩石裂纹的分形特性及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 6-10.
LI Tingjie, WANG Yaohui, ZHANG Meiyong, et al. Study on fractal characteristics of rock cracks and rockburst mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 6-10.
- [7] 苗金丽, 何满潮, 李德建, 等. 花岗岩应变岩爆声发射特征及微观测断裂机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1593-1603.
MIAO Jinli, HE Maochao, LI Dejian. Acoustic emission characteris-

- tics of granite under strain rockburst test and its micro-fracture mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1593-1603.
- [8] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rockburst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47: 286-298.
- [9] 谭云亮, 李芳成, 周辉, 等. 冲击地压声发射前兆模式初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 425-428.
TAN Yunliang, LI Fangcheng, ZHOU Hui, et al. Preliminary study on acoustic emission precursor model of rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 425-428.
- [10] 赵毅鑫, 姜耀东, 王涛, 等. “两硬”条件下冲击地压微震信号特征及前兆识别[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1960-1966.
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, WANG Tao, et al. Features of micro-seismic events and precursors of rockburst in underground coal mining with hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1960-1966.
- [11] 陆莱平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 28(3): 519-525.
LU Caiping, DOU Linming, WU Xingrong, et al. Experimental and empirical research on frequency-spectrum evolvement rule of rockburst precursory microseismic signal of coal-rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 28(3): 519-525.
- [12] 马天辉, 唐春安, 蔡明. 岩爆分析、监测与控制[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2014.
MA Tianhui, TANG Chun'an, CAI Ming. Rockburst: Modeling and Monitoring[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2014.
- [13] 张子健, 纪红广, 张月征, 等. 基于声发射试验与线弹性能判据的岭南金矿岩爆研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3249-3255.
ZHANG Zijian, JI Hongguang, ZHANG Yuezheng, et al. Rockburst research of Lingnan Gold Mine based on acoustic emission test and linear elastic energy criterions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3249-3255.
- [14] 刘亚运, 苗胜军, 郝欣, 等. 不同加载条件下花岗岩声发射特征及其岩爆倾向性研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(S1): 397-401.
LIU Yayun, MIAO Shengjun, HAO Xin, et al. Research into the acoustic emission characteristics of granite under different load conditions and rockburst proneness[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(S1): 397-401.
- [15] 张艳博, 杨震, 姚旭龙, 等. 基于声发射信号聚类分析和神经网络识别的岩爆预警方法实验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 89-98.
ZHANG Yanbo, YANG Zhen, YAO Xulong, et al. Experimental study of rockburst early warning method based on acoustic emission cluster analysis and neural network identification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2): 89-98.
- [16] WANG C L, CHEN Z, LIAO Z F, et al. Experimental investigation on predicting precursory changes in entropy for dominant frequency of rockburst[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 2834-2848.
- [17] 尚晓吉, 张志镇, 田智立, 等. 基于声发射测试的岩爆倾向性预测研究[J]. 金属矿山, 2011(8): 56-59.
SHANG Xiaoj, ZHANG Zhizhen, TIAN Zhili, et al. Prediction research of rockburst tendency based on the acoustic emission test[J]. Metal Mine, 2011(8): 56-59.
- [18] 朱元萌, 胡传宇, 陆愈实. 基于声发射技术的隧道岩爆倾向性判别[J]. 河南科学, 2020, 38(4): 654-659.
ZHUN Yuanmeng, HU Chuanyu, LU Yushi. Discrimination of rockburst tendency of tunnel based on acoustic emission technology[J]. Henan Science, 2020, 38(4): 654-659.
- [19] BARTON N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39: 185-216.
- [20] REHMAN H, NAJI AM, KIM J J, et al. Extension of tunneling quality index and rock mass rating systems for tunnel support design through back calculations in highly stressed jointed rock mass: an empirical approach based on tunneling data from Himalaya[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 85: 29-42.
- [21] HOEK E, BROWN E. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(3): 445-463.
- [22] 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. Rockburst in high in-situ stress area and its discrimination[J]. Yangtze River, 1987(5): 25-32.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB 50287—2016 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50287—2016 Code for Hydropower Engineering Geological Investigation[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2016.