

深埋隧洞应变型岩爆倾向性评估的新数值指标研究

邱士利, 冯夏庭, 江 权, 张传庆

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 应变型岩爆是深埋隧洞常见且频发的岩爆类型, 严重威胁深埋隧洞施工安全, 其破坏位置和程度的准确评估对该类岩爆的防治具有极为重要的工程意义。在系统总结和分析国内外岩爆倾向性数值指标评估方法优势和不足的基础上, 从局部能量释放率基本理论出发, 提出新的岩爆倾向性评估数值指标, 即相对能量释放指数(*RERI*)。全面地阐述该指标的构建思想和基本原理及其物理意义, 并将该指标成功应用于锦屏二级水电站引水隧洞应变型岩爆和加拿大 Rm415 试验洞脆性破坏等问题分析, 验证新指标的合理性和适用性。研究表明, *RERI* 指标能够较为准确地指出高应变型岩爆风险区域和位置, 并能相对准确地指出深埋隧洞岩体开挖损伤区的范围, 为深埋隧洞应变型岩爆灾害和脆性破坏的评估与防治提供新理论和分析工具。

关键词: 岩石力学; 应变型岩爆; 数值指标; 倾向性评估; 深埋隧洞

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2014)10-2007-11

A NOVEL NUMERICAL INDEX FOR ESTIMATING STRAINBURST VULNERABILITY IN DEEP TUNNELS

QIU Shili, FENG Xiating, JIANG Quan, ZHANG Chuanqing

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The strainburst is a common type of rockburst, which frequently occurs in deep tunnels and may evoke severe threats to safe tunnelling. From the engineering viewpoint, it is essential to obtain a relatively accurate assessment on the location and the damage effect of rockburst. A comprehensive review and comparison was presented regarding the advantages and disadvantages of the proposed numerical indexes assessing the strainburst vulnerability. Based on an improvement on the theory of local energy released rate (*LERR*), a novel numerical index, namely the relative energy release index (*RERI*), was proposed. The establishment and the physical meaning of the method were described in detail. The rationality and applicability of *RERI* were studied and verified against the strainburst cases occurred in tunnels at Jinping II power station and a brittle failure case occurred in Canadian Rm415 test tunnel. *RERI* not only accurately indicates the potential failure location and the high risk region, but also quantifies the damage zone of rock mass excavation induced by high stresses. *RERI* can be utilized as a new theory and an analysis tool to assess the strainburst vulnerability and the brittle failures.

Key words: rock mechanics; strainburst; numerical indexes; vulnerability estimating; deep tunnels

收稿日期: 2014-01-10; **修回日期:** 2014-05-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732006); 国家自然科学基金资助项目(51309218, 51279201)

作者简介: 邱士利(1980-), 男, 博士, 2003年毕业于吉林大学水文地质与工程地质专业, 现任助理研究员, 主要从事深埋硬岩卸荷脆性破坏机制与灾害评估方面的研究工作。E-mail: slqiu@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.10.007

1 引言

E. Hoek 和 P. G. Marinos^[1]对岩土工程数值分析方法的应用价值和前景给予了高度评价,并指出“在隧洞稳定性评价和围岩加固及支护设计领域,数值分析方法正逐步发挥其重要的作用。计算机软硬件的快速更新换代,使得校准设计者长期依赖的经验设计方法成为可能”。数值理论的进步为岩爆等脆性破坏发生机制的正确认知,破坏程度的准确预测与评估提供了有效的分析工具。然而,数值指标方法能够评估岩爆倾向性需建立在必要的假设条件之下,即岩爆发生与破坏机制和数值指标间能够建立某种量化关系和规律性。因而,基于数值分析方法来评价岩爆倾向性的问题将转化为寻找一种或多种合适的数值指标来与岩爆事件某种参量(如岩爆频次、岩爆能量或烈度等)建立定量关系。在与岩爆灾害斗争的过程中,学者们研究发现,上述前提假设是成立的,即数值指标与岩爆参量间的定量关系是客观存在的,如南非矿区岩爆研究发现能量释放率(energy release rate, *ERR*)与岩爆事件存在紧密关联。可见,关键问题在于如何构建数值指标以及构建何种指标更适用于上述量化关系的建立,尤其是在世界范围内(超)大埋深隧洞工程的积极建设的背景下,岩爆灾害严重制约和威胁了深埋隧洞工程的建设 and 工程安全,因而适合于深埋隧洞工程岩爆问题的数值指标方法的提出具有非常重要的工程价值和理论意义。

本文在系统总结和分析岩爆倾向性评估数值指标的国内外研究进展和存在问题基础上,基于局部能量释放率理论,突出围岩失稳后能量释放对围岩稳定性的控制作用,提出了一个适合于深埋隧洞工程应变型岩爆倾向性评估的新数值指标——相对能量释放指数(relative energy release index, *RERI*),详细探讨了该指标的物理意义,并成功将该指标应用于锦屏二级水电站引水隧洞工程岩爆灾害评估和加拿大地下试验场 Rm415 试验洞围岩脆性破坏评估,验证了该指标的正确性和适用性。

2 岩爆倾向性数值指标总结与分析

2.1 已有岩爆倾向性数值指标总结

需要强调的是,因本文的研究对象是深埋隧洞应变型岩爆,故这里重点总结国内外学者提出的适

合应变型岩爆倾向性评估的数值指标。在以往研究中,国内外学者从强度和能量角度提出了多种数值指标,用于评估深部岩体岩爆倾向性和破坏程度。J. C. Jaeger 和 N. G. W. Cook^[2]研究发现基于应力状态的破坏准则无法反映岩体破坏后是否发生剧烈破坏还是逐步破坏,他们认为在评估地下工程结构稳定性时还必须考虑因开挖活动诱发的岩体能量变化过程。N. G. W. Cook^[3]研究了南非金矿采矿过程中岩爆问题后指出,矿体开采过程中释放能量是诱发岩爆的重要原因,并提出了能量释放率(*ERR*)的概念,能量释放率指标提出后得到了广泛应用,如 H. E. F. Van Antwerpen 等^[4-5]将能量释放率方法应用到 East Rand Proprietary Mines(ERPM)的矿柱岩爆分析中,发现震动数量与研究区弹性收敛体积呈正比,意味着 *ERR* 与震动数量必然存在一定量化关系。基于能量释放率理论,H. S. Mitri 等^[6]提出了采矿诱发能量密度(mining-induced strain energy density)和能量储存率(energy storage rate, *ESR*) 2 个数值指标。为了评估开挖面形成后岩体岩爆倾向性,H. S. Mitri 等^[7]进一步提出了岩爆潜能指标(burst potential index, *BPI*),理论上该指标表征了当岩体能量储存率达到其最大储能极限时,岩爆发生的可能性极大。T. D. Wiles^[8]在研究矿柱岩爆问题时提出了局部能量释放密度(local energy release density, *LERD*),用于表征矿柱破坏前后围岩系统释放的有效动能,其能量来源于加载系统(如矿柱顶底板)和破坏岩体(如矿柱)因刚度差异而产生的能量释放。局部能量释放密度(*LERD*)是岩体单元围岩水平的函数,随着围岩水平的增加,*LERD* 也相应增加,这会在评价岩爆倾向性时会产生迷惑。T. D. Wiles^[8]指出在用 *LERD* 评价岩爆倾向性时需要补充应力条件,即先判断应力条件是否已达到岩体强度水平,只有达到破坏水平的岩体才能用 *LERD* 判别岩爆倾向性大小。D. A. Beck 和 B. H. G. Brady^[9]扩展了 *LERD* 的概念,提出了模拟地层功(modeled ground work, *MGW*)的概念,与 *LERD* 不同的是 *MGW* 表征的是岩体破坏前后完全的能量变化。D. A. Beck 和 B. H. G. Brady^[9]将 *MGW* 联合强度指标共同评价了采矿震动事件的可能性。苏国韶^[10]吸取 *ERR* 能量指标的优点并考虑岩体破坏后释放能量的特征后,提出了局部能量释放率(local energy release rate, *LERR*),该指标是单位岩体脆性破坏时释放能量大小的近似表示。

2.2 已有岩爆倾向性数值指标对比分析

根据上述国内外岩爆倾向性数值指标研究的成

果和经验,岩爆倾向性评估过程必须面对 3 个问题:(1) 岩体是否达到了破坏失稳条件;(2) 破坏前后过程中能量如何演化;(3) 岩体破坏失稳后是否具有冲击性或者破坏过程是否为剧烈破坏过程。本文将上述 3 个问题称为岩爆倾向性评估过程的三要素(简称岩爆三要素),岩爆三要素是应变型岩爆发生的充分必要条件判断标准。一个岩爆倾向性评价指标或方法的优劣最应从能否较好地反映这岩爆三要素的能力和工程实用性(是否方便应用) 2 个角度加以评价。因而,下面从上述 2 个角度对比分析现有岩爆倾向性数值指标的优势和不足。

深入对比分析能量释放率(ERR)、能量储存率(ESR)、局部能量释放率($LERR$)、局部能量释放密度($LERD$)和模拟地层功(MGW)的理论基础和计算方法可发现:

(1) 能量释放率(ERR)、能量储存率(ESR)、局部能量释放密度($LERD$)和模拟地层功(MGW) 4 个指标均以弹性理论计算为基础,这意味着从指标本身和计算过程来看,此 4 个指标均无法表征岩爆岩体的破坏,原因正是弹性计算方法中只考虑破坏前和破坏后 2 个状态点,而忽略了状态之间的转化过程。因而,通过这 4 个指标评价岩爆倾向性时需辅助以强度分析来判断岩石是否达到破坏条件,只有达到破坏条件后的 4 个能量分析才表征岩爆倾向性,再或采用 H. S. Mitri 等^[7]建立 BPI 指标的思想,通过试验或其他手段选定一个破坏时的能量标准,建立相对比值来确定破坏可能性大小。换句话说,能量释放率(ERR)、能量储存率(ESR)、局部能量释放密度($LERD$)和模拟地层功(MGW) 4 个指标自身仅满足岩爆三要素的要素(2)。但上述 4 个指标的理论基础和计算过程简单且意义明确,所以上述指标在工程中仍被广泛应用,仍具有极强的活力。

(2) 与能量释放率(ERR)、能量储存率(ESR)、局部能量释放密度($LERD$)和模拟地层功(MGW) 4 个指标计算方法上有所不同,局部能量释放率($LERR$)指标以弹-脆-塑性模型为理论基础,能较好地反映岩体力学性质,能够较真实地追踪能量转移过程,考虑应力路径对能量释放过程的影响。同时,弹-脆-塑性分析本身已通过屈服准则来判断岩体是否达到屈服,局部能量释放率正是表征屈服后的能量的释放过程。换句话说,局部能量释放率指标满足岩爆三要素中的 2 个要素(1)和(2),故理论上局部能量释放率指标要优于能量释放率、能量储存率、局部能量释放密度和模拟地层功。此外,局部能量释

放率可指示围岩破坏后能量释放量值的分布状态,从而能指示岩爆相对风险较高的区域和位置,工程意义更为重要。

(3) 能量释放率(ERR)、能量储存率(ESR)、局部能量释放密度($LERD$)、模拟地层功(MGW)和局部能量释放率($LERR$)均不满足岩爆三要素的要素(3),原因在于要素(3)要求对岩爆破坏岩体的动能进行准确评估,或者说要对是否具备多余能量转化为动能给予判断。这一评估判断需要建立岩爆震源机制准确描述和岩爆过程中能量组分的准确计算基础,包括岩爆前岩体破裂结构的描述、破裂过程中和岩爆发生瞬时能量分配与转化的描述,现有的数值指标均无法满足这类要求。

3 岩爆倾向性新数值指标基本原理

3.1 局部能量释放率($LERR$)

局部能量释放率以弹-脆-塑性本构模型为基础,通过追踪每个单元弹性能量密度变化的全过程,记录下单元发生破坏前后的弹性能密度差值,即为该单元的局部能量释放率,记录时忽略上述差值较小的单元,即忽略在某些复杂应力状态下可能发生延性破坏的单元释放能量,保证得到的是脆性破坏单元的能量释放率,计算公式如下:

$$LERR_i = U_{i\max} - U_{i\min} \quad (1)$$

式中: $LERR_i$ 为第 i 个单元的局部能量释放率, $U_{i\max}$ 为第 i 个单元脆性破坏前的弹性应变能密度峰值, $U_{i\min}$ 为第 i 个单元脆性破坏后的弹性应变能密度谷值。 $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 的计算式分别为

$$U_{i\max} = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] / (2E) \quad (2)$$

$$U_{i\min} = [\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2 + \sigma_3'^2 - 2\nu(\sigma_1'\sigma_2' + \sigma_2'\sigma_3' + \sigma_1'\sigma_3')] / (2E) \quad (3)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为单元应变能峰值对应的 3 个主应力; $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$ 为单元应变能谷值对应的 3 个主应力; ν 为泊松比; E 为变形模量。需要指出的是,本文所计算的 $LERR$ 以及后文提出的 $RERI$ 和 FAI 指标均采用 ITASCA 公司软件 $FLAC^{3D}$ 来实现。具体方法是,通过 FISH 语言编写计算函数,并在特定计算时步加以调用。如本文采用每 5 个时间步调用能量计算式(2)和(3),用以计算每个岩体单元的应变能密度的峰值与谷值。最后,在分析平衡后采

用式(1)计算 $LERR$ 量值。

根据式(1)可知,局部能量释放率($LERR$)是岩体单元屈服到破坏过程中最大弹性应变能释放的近似估计,它揭示了岩体单元能量释放大小,因而可表征围岩可能发生失稳的区域和范围。Q. Jiang 等^[11]采用硬岩劣化模型(可归类为弹-脆-塑性模型)和 $LERR$ 模拟了锦屏二级水电站辅助洞 BK9+512 和 BK9+538 洞段岩爆现象, $LERR$ 模拟结果^[11]如图 1 所示。由图 1 可知,岩体能量释放较大的区域与现场实际破坏的位置具有较好的一致性。但是,局部能量释放率表征了能量释放的绝对量值,理论上局部能量释放率与岩体原岩应力条件和变形特征等密切相关,故该指标在评价岩爆倾向性时更应作为危险程度和位置的指标。作为破坏程度估计指标时缺少能量释放阈值依据,该阈值因不同工程条件而不同(包括在同一工程区),掌子面位置(见图 1(a))和北侧边墙位置(见图 1(b))局部能量释放率量值相差近一个数量级,但均表现出强烈的岩爆破坏。

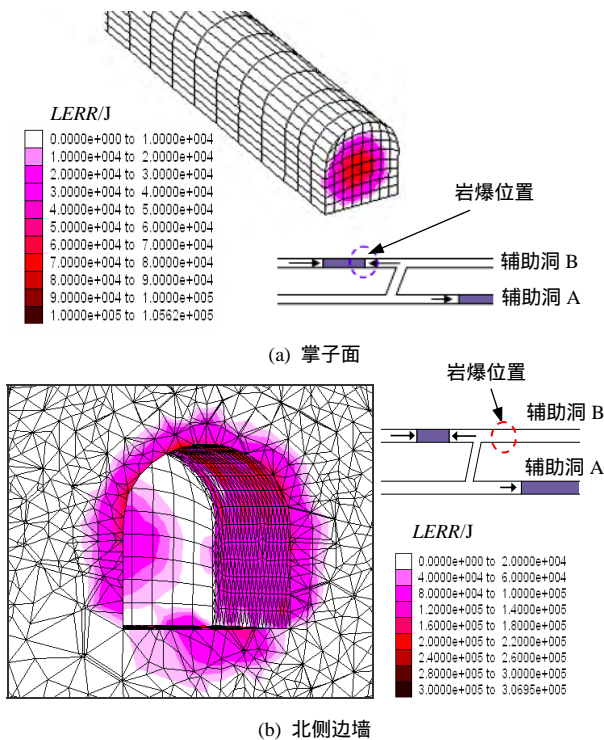


图 1 锦屏二级水电站辅助洞 BK9+512 ~ 9+538 洞段岩爆 $LERR$ 模拟结果^[11]

Fig.1 $LERR$ simulated rockbursts result of auxiliary tunnel at stake BK9+512 - 9+538 in Jinping II power station^[11]

深埋隧洞围岩开挖后局部能量释放率量值通常会表现出对岩体单元应力状态和围岩破坏模式的依赖性,以锦屏 II 引水隧洞 2 500 m 埋深 T_{2b} 岩层中 2#引水隧洞上台阶开挖过程的 $LERR$ 分析为例说明

此问题。图 2 为 2#引水隧洞 2 500 m 埋深条件下采用 Q. Jiang 等^[11-12]中的弹-脆-塑性模型计算上台阶开挖后得到的 $LERR$ 分布图,图 2 中给出了原岩应力场量值。表 1 为锦屏二级引水隧洞 T_{2b} 大理岩的弹-脆-塑性模型力学参数,表中各参数的确定是基于大量的锦屏二级引水隧洞岩爆洞段脆性破坏程度和监测信息反演分析^[13-14]。由于开挖边界附近岩体单元内围岩压力(径向应力)较小,通常破坏以拉破坏为主,故该区域内岩体单元局部能量释放率相对较低,围岩内部围岩应力不断提高,岩体破坏时多以剪切屈服为主,岩体单元释放能量会高于表层岩体的局部能量释放率,因而隧洞开挖后最大局部能量释放的区域在围岩一定深度处。可见,隧洞开挖面附近围岩的局部能量释放率具有一定的“围压效应”,是应力状态的函数。 $LERR$ 尽管可以很好地指示围岩失稳的位置,但在评估破坏深度时需要评估不同应力状态下围岩局部释放能量绝对阈值,这要相对困难得多。

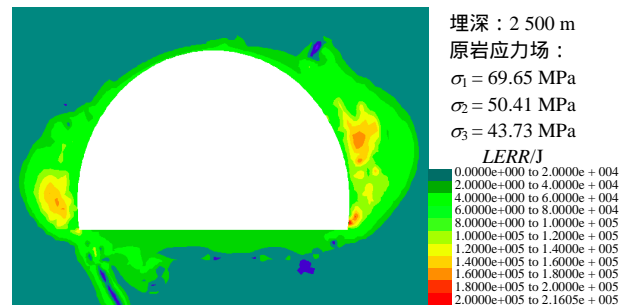


图 2 锦屏二级水电站 2#引水隧洞上台阶开挖后 $LERR$ 分布图
Fig.2 $LERR$ distribution of diversion tunnel #2 in Jinping II power station after the upper bench is excavated

表 1 锦屏二级引水隧洞 T_{2b} 大理岩弹-脆-塑性模型力学参数

Table 1 Elastic-brittle-plastic model parameters of T_{2b} marble in Jinping II diversion tunnels

层组	围岩类别	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	初始黏聚力 c_0/MPa	残余黏聚力 c_r/MPa	初始摩擦角 $\varphi_0/(^\circ)$	残余摩擦角 $\varphi_r/(^\circ)$	残余黏聚力对应的极限塑性剪应变/%	残余摩擦角对应的极限塑性剪应变/%
T_{2b}	II 类	25.3	0.22	23.9	3.1	22.4	46	0.2	0.91

3.2 相对能量释放指数($RERI$)

局部能量释放率($LERR$)对应力状态和破坏模式的依赖性的根本原因在于式(1)中采用应变能的绝对量值,而没考虑应力状态和破坏模式对能量释放的影响。如果能将该绝对量值表述意义转换为相对概念,则能消除指标对应力状态和破坏模式的依赖性。基于该思想本文提出用单元弹性能密度演化

过程中的峰值弹性能密度将局部能量释放率标准化，与室内试验获得的释放能量比值关系进行比值计算，提出了相对能量释放指数(RERI)，其计算式为

$$RERI = \frac{RERR}{f(p)} \tag{4}$$

其中，

$$RERR = \frac{LERR}{U_{i\max}} = \frac{U_{i\max} - U_{i\min}}{U_{i\max}} \tag{5}$$

$$f(p) = RERR_{\text{试验}}(p) = \frac{LERR_{\text{试验}}(p)}{U_{\text{峰值}}(p)} = \frac{U_{\text{峰值}}(p) - U_{\text{残余值}}(p)}{U_{\text{峰值}}(p)} \tag{6}$$

式中： $RERR$ 为单元相对能量释放率， p 为静水压力。通过式(5)可以发现， $RERI$ 指标是 $LERR$ 指标的能量理论基础，故在数值实现上 $RERI$ 指标的计算过程与 $LERR$ 指标是类似的，采用 ITASCA 的 FLAC^{3D} 3.1 进行计算。力学模型仍采用 Q. Jiang 等^[11]提出的表征硬岩脆性破坏特征的硬岩劣化模型。数值分析中仍以 FISH 语言编写 $RERI$ 计算函数，其中 $LERR$ 的计算过程与节 3.1 论述过程一致，所不同的是需要依据试验成果结合式(6)引入 $f(p)$ 计算函数。注意， $RERI$ 仍是以数值模型中的岩体单元(FLAC^{3D} 中称为 Zone)为计算单位，因而它既可表征隧洞断面上的破坏程度，也可表征三维空间上破坏可能性分布，这取决于对所研究问题的数值概化，即三维模型还是简化的平面应变模型。

此外， $f(p)$ 由室内试验获得，指在岩石破坏过程中，由峰值应力状态到残余应力状态而释放的弹性能密度与峰值最大弹性能密度的比值($RERR_{\text{试验}}$ ，见式(6))与弹性峰值时试样被施加的静水压力 p 间的函数关系式，该关系式可由三轴压缩试验确定，邱士利等^[12]给出了锦屏二级引水隧洞大理岩试验结果。图 3 为锦屏大理岩室内试验结果，给出了 3 种锦屏二级引水隧洞大理岩的 $f(p)$ 关系式。由图 3 可知，3 种锦屏大理岩的 $RERR_{\text{试验}}$ 与静水压力 p 存在显著的线性关系。另外，根据 C. D. Martin^[13]对加拿大 URL 地下试验场 Mine-by 试验洞 Lac du Bonnet 花岗岩的三轴压缩试验结果，获得如图 4 所示的 Lac du Bonnet 花岗岩室内试验结果。由图 4 可见，Lac du Bonnet 花岗岩的试验结果也显示 $RERR_{\text{试验}}$ 与静水压力 p 存在显著的线性关系。然而，本文未对其他岩石类型展开分析，因而暂未证实这种线性关系的普

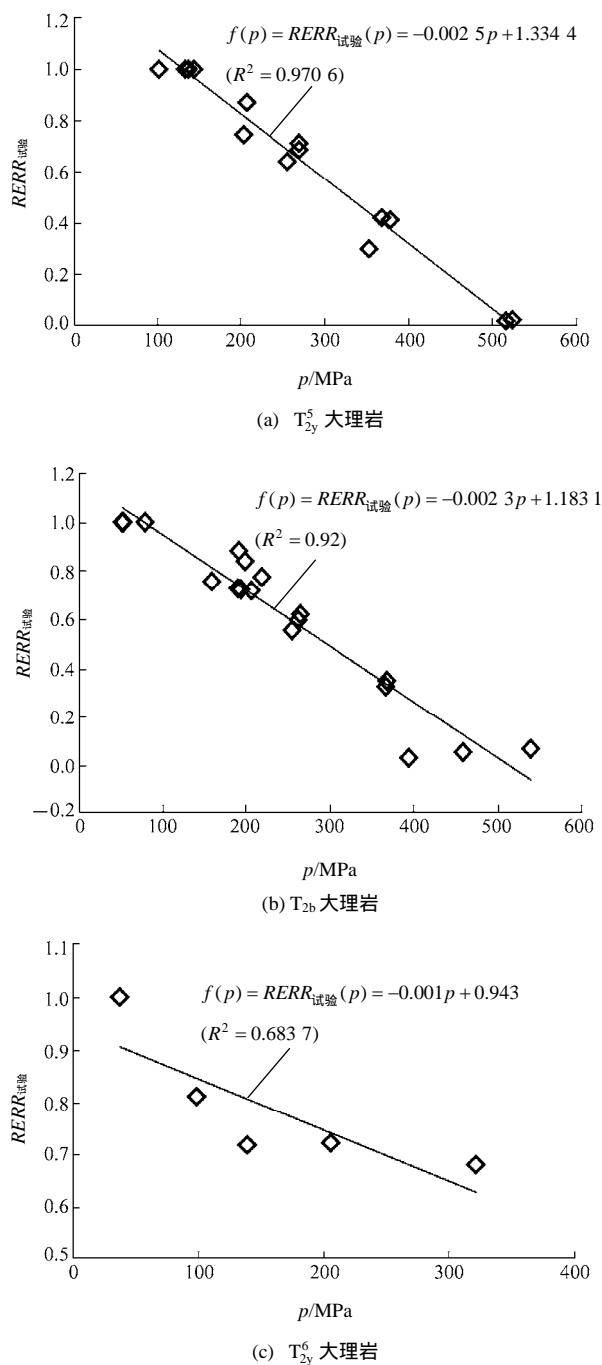


图 3 锦屏大理岩室内试验结果

Fig.3 Laboratory test results of Jinping II marbles

遍性，故该线性关系的结论目前仅适用于锦屏大理岩和 Lac du Bonnet 花岗岩，这将作为后文中应用研究的基础。事实上，式(6)中的 $f(p)$ 是何种函数形式并不重要，重要的是 $RERR_{\text{试验}}$ 可表示为静水压力 p 的函数。

4 相对能量释放指数的物理意义

相对能量释放指数(RERI)是表征岩体单元发生

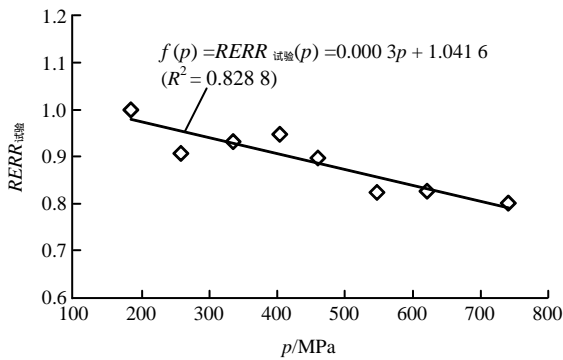


图 4 Lac du Bonnet 花岗岩室内试验结果^[13]

Fig.4 Laboratory test results of Lac du Bonnet granite^[13]

破坏可能性的一种指标。它将室内试验结果引入到指标中，即式(6)，其目的在于建立一个评价基准，同时也是为了消除 $LERR$ 的应力状态和破坏模式的依赖性。岩石试验达到峰值后将发生能量释放过程，岩石宏观破裂面的形成(或者说是岩块断裂过程)与这部分能量释放直接相关。因此，可将岩石断裂时能量释放相对量值作为岩石完整性丧失的标准。需要指出的是，岩石峰后释放能量的量值与岩石应力状态、路径和加载边界条件以及破坏模式直接相关，例如三轴压缩试验和真三轴压缩试验中岩石破坏时单位体积岩石释放的能量可能不同，所以采用不同试验方法得到的岩石断裂时释放能量可能是不同的，这将导致 $RERI$ 量值可能存在差异，但本文并不探究 $RERI$ 绝对量值本身的意义，而是为岩体单元弹性应变能释放量的对比找到一个统一的标准。本文采用三轴压缩试验建立该标准，原因在于三轴压缩试验易于实施，试验成果相对容易获取，同时三轴试验结果可以反映岩石破坏后能量释放的应力状态和破坏模式差异引起能量释放的差异。这种标准建立的思想借鉴了 BPI 指标建立方法^[7]和强度应力比方法，如在评估岩爆倾向性程度时通常通过应力分析估计岩体开挖后最大集中应力水平。然而即便知道该集中应力水平的量值很高且超过了岩石单轴抗压强度，该集中应力水平自身也仅能表征岩体已经破坏或已经达到峰后区，仍然不能表征岩爆可能性，因此将该应力集中水平与岩石强度相除，再通过大量岩爆案例反分析确定岩爆发生时的比值范围，就能够用于判断岩爆倾向性。强度应力比中的岩石强度参数就是一种统一标准，去除了岩石性质的影响。

相对能量释放指数($RERI$)通过释放能量的对比来反映岩体破坏的可能性，本质上类似于强度应力比指标，但它比强度应力比优越之处在于相对能量

释放指数($RERI$)隐含地考虑了变形特性对破坏的影响，构建思想上又与 H. S. Mitri 等^[7]提出的 BPI 指标的构建思想类似，但相对能量释放指数($RERI$)所考虑的是释放能量量值， BPI 指标则仅考虑弹性储能密度，而岩体破坏的剧烈与否直接和释放能量量值直接相关。相对能量释放指数($RERI$)揭示了不同深度处岩体单元破坏的可能性和倾向性的大小，但由于 $RERI$ 的理论基础是局部能量释放率 $LERR$ ， $LERR$ 来源于岩体单元发生屈服破坏后的能量释放过程，理论上只要存在能量释放就表示单元已经发生屈服，因而不同深度岩体只要 $RERI > 0$ 就意味着该区域已经处于开挖扰动区或者开挖损伤区范围内，因此 $RERI = 0$ 可以作为开挖损伤区的一种指示，这点与张传庆^[14]提出的屈服接近度指标(YAI)所指示的塑性区范围是相当的。开挖后围岩破坏正是发生在开挖损伤区范围内，破坏的可能性随着 $RERI$ 指标的量值增大而提高，这一点下文应用研究中将给予详细阐述。对于高应力下硬岩而言，岩体的破坏可表现为岩爆、片帮和剥落等，因而 $RERI$ 指标可评价岩爆等脆性破坏的倾向性。破坏深度与 $RERI$ 的关系可能因工程的不同而不同，但对于特定工程，比如锦屏二级水电站引水隧洞工程，破坏深度与 $RERI$ 指标的关系可从破坏案例的反分析中获得，这为准确评估岩爆倾向性提供了一种新手段和新方法。

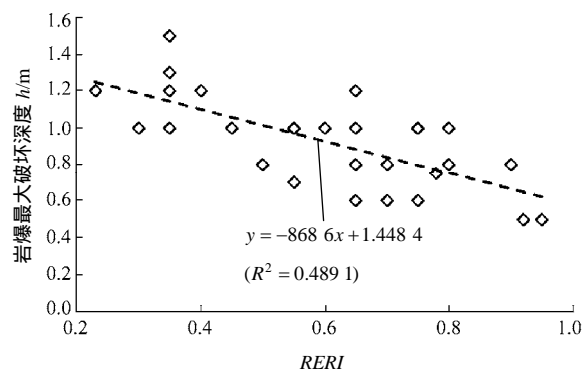
5 相对能量释放指数($RERI$)验证与工程应用

5.1 锦屏二级水电站引水隧洞岩爆倾向性评估

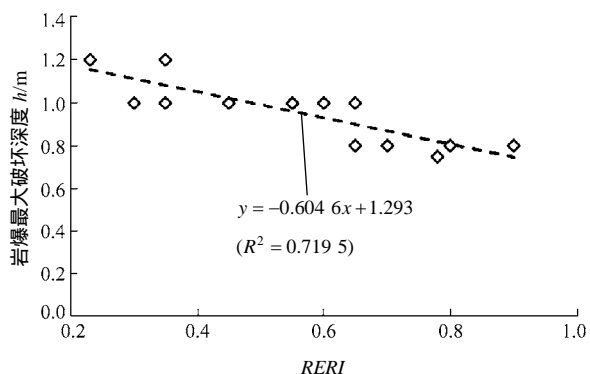
邱士利等^[15]系统总结和研究了锦屏二级水电站隧洞群施工期岩爆案例，所收集的岩爆案例作为本文研究的案例基础，选用现场调研未直接揭露地质非连续结构的应变型岩爆案例为主要研究对象。基于此，开展了岩爆案例反分析研究，反分析时岩爆破坏位置的原岩应力水平采用中科院岩土力学所锦屏项目组获得各洞段地应力反演成果，地应力的确定方法可参见 C. Zhang 等^[16]的研究。为了简化反分析过程，均采用平面应变模型和均质岩体条件进行初步计算。

对于无明显地质构造控制(指破坏现场无揭露地质结构，不排除存在隐性结构面的可能)的应变型岩爆案例而言， $RERI$ 与此类岩爆破坏深度存在一定的相关性，图 5 给出了锦屏二级水电站引水隧洞

施工岩爆案例破坏区未揭露地质结构的应变型岩爆最大破坏深度 h 与 $RERI$ 关系。在总体趋势上, $RERI$ 与 h 之间存在线性函数关系, 这种线性关系的存在验证了 $RERI$ 指标可以用于应变型岩爆倾向性评估。但需要指出的是, 图 5(a)中拟合曲线的确定系数为 0.489 1, 意味着反分析案例存在一定拟合误差, 原因在于反分析计算时不考虑隐性结构面存在, 隐性地质结构面产生的局部应力可能加大了应变型岩爆的破坏程度。为了评估这种影响, 去除图 5(a)中不确定是否含有隐性结构面的岩爆案例, 仅留下地质条件相对明确且岩体相对完整的岩爆案例, 如图 5(b)所示。可见, $RERI$ 与完整岩体的应变型岩爆的破坏深度间的确定系数显著提高。此外, 造成图 5(a)拟合差异性的另一个原因在于提取 $RERI$ 值的方法存在不足, 研究中采用垂直开挖面相应最大破坏深度来确定 $RERI$ 值, 这与破坏深度测量方法是相符的, 但是测量起点可能会略有差异, 因为图 5(a)中有些案例点, 在案例收集的时候并未明确到破坏位置的方位和相对开挖面的角度, 故取 $RERI$ 值时略带有主观性。



(a) 不确定是否存在隐形结构面



(b) 完整岩体

图 5 锦屏二级水电站引水隧洞中应变型岩爆最大破坏深度 h 与 $RERI$ 关系

Fig.5 Relationships between maximal rockburst depths and $RERI$ in strainburst cases of Jinping II diversion tunnels

然而, 本文更关注破坏深度与 $RERI$ 的趋势, 图 5(a)和 5(b)均肯定了变化趋势的存在。从趋势上来看, 锦屏二级水电站引水隧洞应变型岩爆的破坏深度随着 $RERI$ 的增大而降低, 因为 $RERI$ 表征的是破坏的可能性, 可以理解为 $RERI$ 值高时岩爆发生可能性将相对较高, 但岩爆烈度等级可表现为不高, 这种高可能性的应变型岩爆表现为轻微~中等级别, 相对频发, 而强烈~极高等级的应变型岩爆的发生可能性不大。锦屏二级水电站隧洞群施工期岩爆案例发生时的埋深条件一般在 1 900 m 以上, 由图 5(a)趋势可知, 在该埋深以上原岩应力条件下发生岩爆破坏深度小于 0.5 m 的 $RERI$ 值普遍大于 0.8, 这与锦屏二级引水隧洞现场高埋深洞段普遍发育 0.5 m 以下的脆性破坏现象是相符的, 在一定程度上再次肯定了图 5 中所获得趋势关系的正确性。

进一步, 采用相对能量释放指数($RERI$)分析锦屏二级引水隧洞 2 500 m 埋深条件 2[#]和 4[#]隧洞上台阶开挖过程中岩爆问题, $f(p)$ 取图 3(b)中 T_{2b} 大理岩参数线性拟合形式, 即 $f(p)=1.183 1-0.002 3p$, 分析结果如图 6 所示。图 6 中 $RERI$ 等值线表示岩爆倾向性程度, 数值越大反映该区域发生岩爆破坏的可能性越大。由图 6 可知, 上台阶开挖后两侧变强至拱肩区域发生岩爆破坏的可能性最大, 可能性随着深度的增加而减小。由此可见, $RERI$ 指标可有效地揭示隧洞开挖断面上应变型岩爆可能发生的位置以及各种破坏深度级别岩爆发生的可能性。图 7 给出了 2011 年 2 月 4 日 2[#]引水隧洞引(2)11+023 洞段发生的应变型岩爆现场及围岩破坏情况。对比图 6 和 7 可知, 图 6 中 $RERI$ 所指示的可能发生岩爆区域与 2[#]引水隧洞上台阶开挖过程中实际岩爆破坏情况具有很好的一致性。

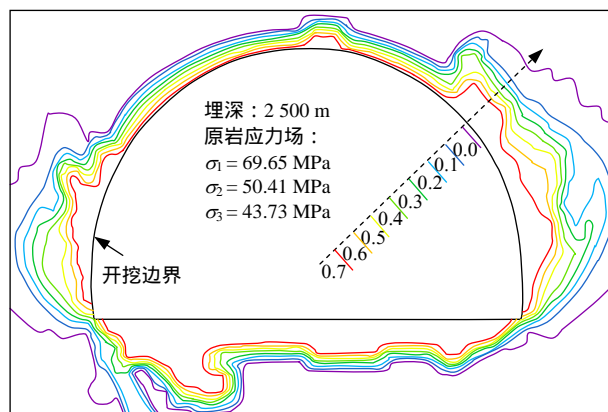


图 6 锦屏二级水电站 2[#]和 4[#]引水隧洞上台阶开挖后 $RERI$ 分析结果

Fig.6 $RERI$ distribution of #2 and #4 diversion tunnels in Jinping II power station after the upper bench is excavated

不仅如此，图 6 中显示出隧洞底板存在较高的岩爆风险，这与 2#和 4#引水隧洞实际岩爆情况也是一致的。图 7(b)的岩爆案例中岩爆破坏导致在隧洞底板处产生一条宽 10 cm，深约 1 m 贯穿至南北边墙的断裂，并且还可发现南侧拱脚底板围岩显著向上隆起。这一岩爆破坏现象与图 6 中 *RERI* 所指示的底板存在岩爆高倾向性且南侧底板岩爆可能破坏程度大于北侧底板的规律是非常一致的。事实上，对于锦屏二级 2#和 4#引水隧洞中大埋深高岩爆风险洞段，开挖过程中在隧洞横断面上南北两侧边墙至拱肩区域内发生岩爆破坏现象非常普遍，图 7 中的岩爆破坏案例是其中一个典型案例。



(a) 两侧边墙岩爆破坏



(b) 上台阶底板岩爆裂缝

图 7 2#引水隧洞应变型岩爆现场及围岩破坏

Fig.7 The rockburst field and failure characteristics in a strainburst case occurred in diversion tunnel #2

对于引水隧洞底板岩爆，2011 年 4 月 16 日 4#引水隧洞引(4)6+010 ~ 6+025 洞段底板岩爆是一个非常典型的案例，图 8 给出了该岩爆破坏后的现场情况，可见该岩爆导致 4#引水隧洞底板围岩整体向上抬升，更为突出的是，隧洞南北两侧抬升的高度存在较大差异，南侧边墙底板区抬升近 1.7 m，中部近 1.5 m，而北侧边墙区约 1 m，这说明两侧边墙

岩爆破坏的程度存在显著差异，并且岩爆的震动能量源更集中在南侧边墙底板以下岩体区域，这一事实与图 6 中 *RERI* 所揭示的南侧底板以下高岩爆倾向区的结论是非常一致的。这进一步验证了本文提出的 *RERI* 指标方法能够较好地揭示应变型岩爆的破坏区域和位置以及破坏程度的差异。

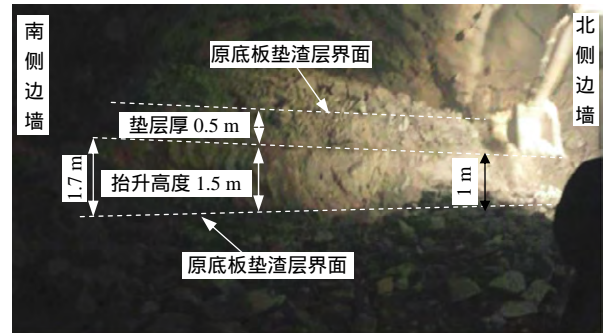


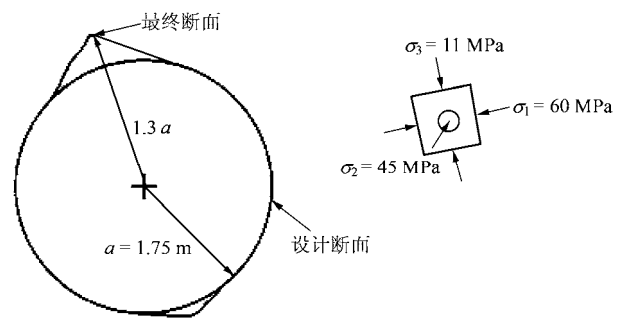
图 8 4#引水隧洞引(4)K6+010 ~ 6+025 洞段底板岩爆破坏

Fig.8 A floor rockburst case at stake K6+010 - 6+025 in diversion tunnel #4

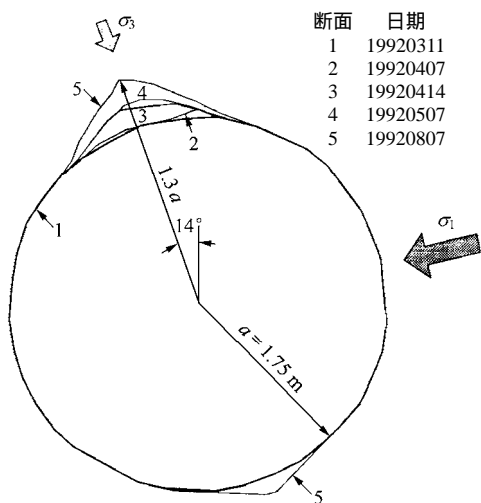
5.2 加拿大地下试验场 Rm415 试验洞围岩脆性破坏评估

为了更深入理解 *RERI* 指标的工程意义并验证其工程适用性，将本文提出的 *RERI* 指标、局部能量释放率 *LERR*^[10]和破坏接近度 *FAI*^[14]三个数值指标应用于加拿大地下试验场 Rm415 试验洞围岩脆性破坏问题的分析中。

Rm415 试验洞脆性破坏信息可参见 R. S. Read 和 V. Hajiabdolmajid^[17-18]的研究，这里仅对脆性破坏情况给予简单说明。位于加拿大马尼托巴省东南部的地下实验室是加拿大原子能有限公司为研究核废料地下处置长期安全性而在花岗岩中开挖的试验洞室群^[17]。其中，隧洞 Rm415 位于 -420 m 水平，直径 3.5 m，采用人工挖掘方法尽量避免开挖方法造成的扰动，开挖进尺为 1 m。隧洞按设计断面开挖后，高应力诱发顶拱和底拱发生脆性破坏，形成 2 个 V-Notch 破坏区，脆性破坏区及其演化过程^[13, 17]如图 9 所示。



(a) V-Notch 最终破坏区



(b) V-Notch 破坏区演化过程

图 9 加拿大试验洞 Rm415 脆性破坏区及其演化过程^[13, 17]

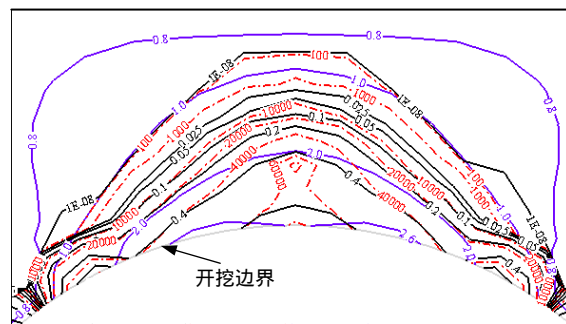
Fig.9 Brittle failure and geostress condition of test tunnel Rm415 in Canadian underground laboratory^[13, 17]

该试验洞岩体弹-脆-塑性模型力学参数^[14]列于表 2，作为本文分析 Rm415 试验洞脆性破坏的基础。基于该力学参数和弹-脆-塑性模型(V. Hajiabdolmajid^[18]的研究工作已论证了该模型能够较准确地模拟 V-Notch 的破坏现象)，分别采用 *RERI*、*LERR* 和 *FAI* 三个指标分布规律与 V-Notch 破坏范围的关系，计算结果如图 10 所示，这里仅对顶拱部位 V-Notch 破坏区的计算结果进行分析。由图 10(a)可知，3 个指标均能表示出顶拱 V-Notch 破坏区，其中 *LERR* 显示在 V-Notch 破坏区内出现了显著的能量释放，最大释放能量达到 $6.5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ 。然而，*LERR* 等值线确实显示对应力状态(如径向压力)的依赖性，最大能量释放位置集中在开挖面一定深度内。相反，基于强度理论的破坏接近度指标 *FAI* 和本文提出的 *RERI* 指标的计算结果均是从开挖面向围岩深部发展的单调等值线，并不存在 *LERR* 指标所存在的对应力状态依赖性而导致成果解译上的困难。

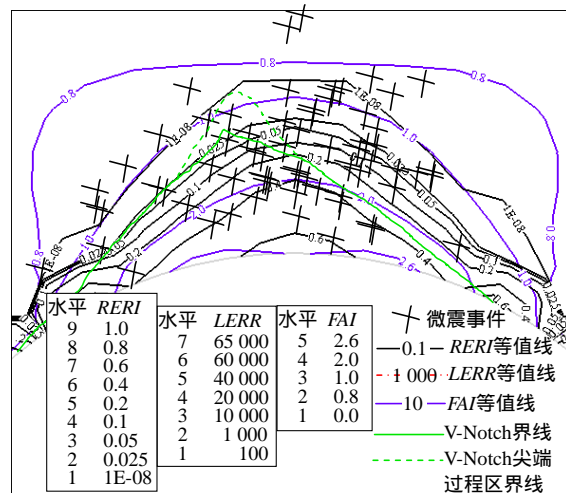
表 2 加拿大 Rm415 试验洞花岗岩弹-脆-塑性模型力学参数^[14]

Table 2 Elastic-brittle-plastic model parameters of granite in Canadian test tunnel Rm415^[14]

弹性模量	泊松比	初始黏聚力 c_0 /MPa	残余黏聚力 c_r /MPa	初始摩擦角 φ_0 (°)	残余摩擦角 φ_r (°)	残余黏聚力对应的极限塑性剪应变/%	残余摩擦角对应的极限塑性剪应变/%
60	0.2	50.0	15.0	0.0	48.0	0.161	0.447



(a) *RERI*、*LERR* 和 *FAI* 曲线对比



(b) 微震事件范围与 *RERI* 关系

图 10 Rm415 试验洞脆性破坏数值指标分析

Fig.10 Brittle failure analysis of Canadian test tunnel Rm415 based on numerical indexes

此外，虽然 *RERI* 指标以 *LERR* 理论为基础，但从图 10(a)可以发现，两指标的等值线在开挖面表层一定深度内存在显著差异，尤其是在 V-Notch 中部区域。从图 10(a)中 *RERI* 与 *FAI* 等值线对比还可发现，*RERI* 显示最开始破坏的区域应该在边缘 V-Notch 破坏区的两侧，这与图 9(b)记录的 V-Notch 破坏过程是一致的，实际的破坏先发生在 V-Notch 破坏区的两侧(据 1992 年 4 月 7 日的断面记录)，之后是 V-Notch 破坏区的中部区域(据 1992 年 4 月 14 日断面记录)。对于破坏过程的指示，*FAI* 指标未给予明确的指示，这是 *RERI* 指标的优势之一，即相对准确地指示了破坏区发展演化的部位。图 10(b)进一步展示了 V-Notch 破坏区内微震事件的分布规律(见图 10(b))，微震事件发生的位置和范围能够有效指示 V-Notch 区域岩体的应力诱发损伤的范围。由图 10(b)可知，微震事件的分布范围要大于 V-Notch 破坏区范围，V-Notch 破坏区发育在岩体损伤区内部。根据节 3.2 中 *RERI* 理论的论述可知，*RERI* 是以 *LERR* 为基础，能量释放代表岩体单元已

达到了屈服状态,也就意味着 $RERI > 0$ 表征了岩体的已发生了损伤,因而, $RERI > 0$ 的等值线所圈定的区域可以指示岩体损伤区域的范围。基于此,对比图 10(b)中微震事件的分布范围与 $RERI > 0$ 的等值线区域可以发现, $RERI$ 所指示的岩体开挖损伤区域与微震事件所表征的损伤区域基本一致, $RERI > 0$ 的等值线基本上刻画了微震事件的分布范围,仅有少数几个事件位于该条等值线所圈定的损伤区之外。对比 FAI 所指示的损伤区范围($FAI = 1$ 的区域), $RERI$ 更加准确,这是 $RERI$ 指标的优势之二,即相对准确地指示岩体开挖损伤区或微震事件分布和发育的范围。

6 讨 论

(1) 根据节 3.2 中 $RERI$ 指标理论的阐述可知, $RERI$ 指标并不是建立在概率意义上的岩爆破坏可能性的指标。但是,从图 5 应变型岩爆破坏深度与 $RERI$ 的关系可知,从岩爆支护设计角度,我们完全可以将其实抽象为概率意义上的可能性,即 $RERI$ 越大其破坏的可能性越大。对应图 5 则意味着, $RERI$ 越大其低等级破坏的可能性越大。此时,图 5 拟合曲线在纵坐标轴上的截距即代表了岩体最可能出现的最大等级应变型岩爆的破坏深度为 1.30 ~ 1.45 m,这一数值仅代表无显著地质结构控制的应变型岩爆的破坏深度,与规范^[19]所规定的中等岩爆等级的破坏深度非常接近。这意味着对于锦屏二级引水隧洞而言,严格意义上的应变型岩爆的等级为中等岩爆等级。

(2) 对 $RERI$ 指标概率抽象化后,图 5 与 6 所展示的 $RERI$ 结果可以与岩爆支护参数设计相结合,可以有效地指导锚杆参数的确定。吴文平等^[20]提出了高岩爆风险隧洞围岩吸能锚杆长度设计方法,即吸能锚杆的最低要求长度 L_{ab} 为

$$L_{ab} = D_f + L_c \quad (7)$$

式中: D_f 为预测岩爆爆坑深度, L_c 为有效锚固长度。以最常用的吸能锚杆水胀式锚杆为例,其抗拔力与有效锚固长度关系不大。有效锚固长度 $L_c > 1.2$ m 时,锚杆的抗拔力就能得到保证;但现场工作条件下,要保证水胀式锚杆的延性与抗拔力,有效锚固长度应为 $L_c = 2.0 \sim 2.5$ m。根据图 5 所示的锦屏二级引水隧洞应变型岩爆最大破坏深度为 1.30 ~ 1.45 m,则可根据式(7),取有效锚固长度为 2 m,

则计算获得吸能锚杆的设计长度建议值为 3.30 ~ 3.45 m。在锦屏二级引水隧洞吸能锚杆设计长度为 4.5 ~ 6.0 m(根据埋深差异不同而选择不同的设计值),这一锚杆设计长度大于计算获得设计长度建议值,在施工质量和支护时机得到保证的前提下,锦屏二级引水隧洞应变型岩爆能够得到有效控制,这与引水隧洞应变型岩爆支护的较好的控制效果是一致的^[21]。

(3) $RERI$ 也可用作估计应力诱发脆性破坏最大深度的指标。如图 10(b)中,将 V-Notch 破坏边界与尖端破损区边界(见图 10(b))与 $RERI$ 等值线绘制在一个图上时,可发现 V-Notch 尖端破损区正好位于 $RERI = 0$ 的等值线上。这说明, $RERI = 0$ 的等值线不仅代表了区域损伤的区域,也表征了应力诱发脆性破坏的最大程度。

7 结 论

本文在系统总结和对比分析国内外现有应变型岩爆倾向性评估数值指标的优势和不足的基础上,对局部能量释放率理论进行改进,提出了适合于深埋隧洞应变型岩爆倾向性评估的新数值指标,即相对能量释放指数($RERI$)。研究中取得的新认识概括如下:

(1) $RERI$ 指标修正了局部能量释放率($LERR$)对应力状态和破坏模式的依赖性,是表征岩体单元发生破坏可能性的新指标。该指标以能量理论为基础,既满足了岩体是否达到破坏条件的判定要求,又追踪了失稳过程的能量演化,还隐含地考虑了变形特性对破坏的影响。

(2) 对于锦屏大理岩和加拿大地下实验室花岗岩,实验室测定相对能量释放率($RERR_{\text{试验}}$)与三轴试验峰值时静水压力 p 存在显著的线性关系,可用静水压力 p 的线性函数表征。而其他类别岩石是否存在线性关系有待进一步研究验证。

(3) 锦屏二级引水隧洞应变型岩爆案例反分析揭示, $RERI$ 与应变型岩爆爆坑深度存在显著的线性关系,岩爆爆坑深度随着 $RERI$ 的增大而线性降低。引水隧洞岩爆案例验证了 $RERI$ 指标在评估应变型岩爆倾向性的适用性,它可评估岩爆可能发生的位置和最大破坏深度,也可应用于岩爆支护参数的设计。

(4) 加拿大 Rm415 试验洞脆性破坏分析揭示, $RERI$ 既可相对准确指示脆性破坏区发展演化的部

位，也可相对准确地指示岩体开挖损伤区或微震事件分布和发育的范围，也可表征应力诱发脆性破坏的最大程度。

以上验证研究是基于锦屏二级引水隧洞应变型岩爆案例和加拿大地下试验洞的试验测试成果开展的，*RERI* 的有效性和适用性仍需要更多的工程案例加以检验和论证。

参考文献(References)：

- [1] HOEK E, MARINOS P G. Tunnelling in overstressed rock[C]// Proceedings of Rock Engineering in Difficult Ground Conditions-Soft Rocks and Karst-Vrkljan. London : Taylor and Francis Group , 2010 : 49 – 60.
- [2] JAGER J C , COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. London : Chapman and Hall , 1996 : 37 – 39.
- [3] COOK N G W. The design of underground excavations[C]// Proceedings of Eighth Rock Mechanics Symposium. Minnesota : American Rock Mechanics Association , 1966 : 45 – 52.
- [4] VAN ANTWERPEN H E F , SPENGLER M G. The effect of mining-related seismicity on excavations at east Rand proprietary mines , limited[C]// Proceedings of the First International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Johannesburg : SAIMM , 1982 : 235 – 243.
- [5] MCGARR A , SPOTTISWOODE S M , GAY N C. Relationship of mines tremors to induced stress and to rock properties in the focal region[J]. Bulletin of the Seismological Society of America ,1975 ,65 : 981 – 993.
- [6] MITRI H S , HASSAN F P , KEBBE R. A strain energy approach for the prediction of rockburst potential in underground hard rock mines[C]// Proceedings of the 1st Canadian Symposium on Numerical Modelling Applications in Mining and Geomechanics. Montreal , Canada : McGill University , 1993 : 228 – 239.
- [7] MITRI H S , TANG B , SIMON R. FE modelling of mining-induced energy release and storage rates[J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy , 1999 , 99(2) : 103 – 110.
- [8] WILES T D. Correlation between local energy release density observed bursting conditions at Creighton mine[R]. Sudbury ,Canada : [s. n.] , 1998.
- [9] BECK D A ,BRADY B H G. Evaluation and application of controlling parameters for seismic events in hard-rock mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,2002 ,39(5) :633 – 642.
- [10] 苏国韶. 高地应力下大型地下洞室群稳定性分析与智能优化研究 [博士学位论文][D]. 武汉：中国科学院研究生院，2006.(SU Guoshao. Study on stability analysis and intelligent optimization for large underground caverns under high geostress condition[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan : Graduate University of Chinese Academy of Sciences , 2006.(in Chinese))
- [11] JIANG Q , FENG X T , XIANG T B , et al. Rockburst characteristics and numerical simulation based on a new energy index : a case study of a tunnel at 2 500 m depth[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment , 2010 , 69 : 381 – 388.
- [12] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸围力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8) : 1 807 – 1 817.(QIU Shili , FENG Xiating , ZHANG Chuanqing , et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(8) : 1 807 – 1 817.(in Chinese))
- [13] MARTIN C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium : the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Canadian Geotechnical Journal , 1997 , 34(5) : 698 – 725.
- [14] 张传庆. 基于破坏接近度的岩石工程安全性评价方法的研究[博士学位论文][D]. 武汉：中国科学院研究生院，2006.(ZHANG Chuanqing. Study on method of safety evaluation for rock engineering based on failure approach index[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan : Graduate University of Chinese Academy of Sciences , 2006.(in Chinese))
- [15] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞岩爆倾向性指标 RVI 的建立及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6) : 1 126 – 1 141. (QIU Shili , FENG Xiating , ZHANG Chuanqing , et.al. Development and validation of rockburst vulnerability index(RVI) in deep-buried and hard rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 , 30(6) : 1 126 – 1 141.(in Chinese))
- [16] ZHANG C , FENG X T , ZHOU H , et al. Estimation of in situ stress along deep tunnels buried in complex geological conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2012 , 52 : 139 – 162.
- [17] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2004 , 41 : 1 251 – 1 275.
- [18] HAJIABDOLMAJID V. Mobilization of strength in brittle failure of rock[Ph. D. Thesis][D]. Kingston , Canada : Department of Mining Engineering , Queen's University , 2001.
- [19] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50287—2006 中国水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京：中国计划出版社，2008.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50287 — 2006 Code for hydropower engineering geological investigation[S]. Beijing : China Planning Press , 2008.(in Chinese))
- [20] 吴文平, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞围岩的破坏模式分类与调控策略[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9) : 1 782 – 1 803. (WU Wenping , FENG Xiating , ZHANG Chuanqing , QIU Shili. Classification of failure modes and controlling measures for surrounding rock of deep tunnel in hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011 , 30(9) : 1 782 – 1 803.(in Chinese))
- [21] GONG Q M , YIN L J , WU S Y , et al. Rock burst and slabbing failure and its influence on TBM excavation at headrace tunnels in Jinping II hydropower station[J]. Engineering Geology , 2012 , 124(4) : 98 – 108.