

静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区预测研究

徐士良, 何怀虎

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 针对地下工程岩爆不良地质现象的勘察评价和防治, 鉴于地质环境条件的复杂性, 本文提出了静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区理论分析和数值模拟预测方法。采用工程岩体岩爆判据和考虑最不利荷载组合情况, 得到静动荷载共同作用下应变型岩爆破坏区深度理论公式, 可以作为预测岩爆脆性破坏区深度的实用公式, 并采用 DISL 脆塑性本构模型较好地模拟了岩爆脆性破坏区范围。根据影响因素理论分析, 静动荷载作用下应变型岩爆破坏区深度随着水平地应力比值和裂纹起裂应力的增大而减小, 随着岩体剪切波波速和地震动峰值振动速度增大而增大。

关键词: 应变型岩爆; 脆性破坏区; 静动荷载; 理论分析; 数值模拟

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2021) 04-022-06

Prediction of Brittle Failure Zone of Strain Rockburst under Static and Dynamic Loads

XU Shiliang, HE Huaihu

(School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In view of the investigation evaluation and prevention of the adverse geological phenomena of rockburst in underground engineering, a prediction method of theoretical analysis and numerical simulation for the brittle failure zone of strain rockburst under static and dynamic loads are proposed considering complexity of geological environment conditions. Based on the rockburst criterion of engineering rock mass and the most unfavorable composition of load, the theoretical formula of brittle failure zone depth of strain rockburst under static and dynamic loads is obtained, which can be used as a practical formula to apply, and the brittle failure zone of strain rockburst is also accurately simulated by using the DISL brittle plastic constitutive model. According to theoretical analysis of influencing factors, the brittle failure zone depth of strain rockburst under static and dynamic loads decreases with the increasing of horizontal in-situ stress ratio and crack initiation stress, and increases with the increasing of shear wave velocity and seismic Peak Ground Velocity of rock mass.

Keywords: Strain rockburst; brittle failure zone; static and dynamic loads; theoretical analysis; numerical simulation

随着我国地下工程建设的蓬勃发展, 水利水电、交通隧道和核废料处置等工程的岩体破坏力学行为越来越复杂, 特别是在高地应力、高地震烈度、强卸荷等复杂地质环境中, 地下工程硬脆性岩体极

易发生岩爆^[1-2]等由应力主导的脆性破坏。影响岩爆发生的因素包括内因、外因和诱因, 内因是指坚硬岩体本身具有岩爆倾向性; 外因是指地下工程处于高地应力环境之中; 诱因是指地下工程受到开

收稿日期: 2020-10-26

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金项目 (KJ2019A0739)

作者简介: 徐士良 (1972-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩体力学及隧道工程研究。

挖卸荷和地震等外界扰动作用。因此,根据岩爆的动力来源,冯涛等^[3]把岩爆分为静力本源型岩爆和动力激励型岩爆;Kaiser等^[4]把岩爆分为破裂溃曲型、地力弹射型和动力塌方型,如图1所示。钱七虎^[5]根据结构面分布情况把岩爆分为应变型、地质构造型以及应变与构造杂交型。岩爆严重时会造成工作面设备损坏和危害施工工人生命安全,给地下工程施工和岩爆防治带来极大的挑战。

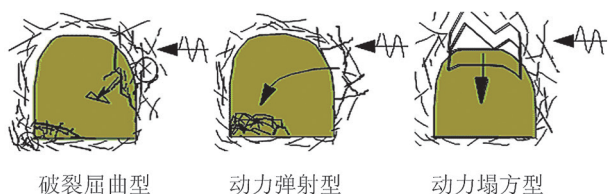


图1 岩爆类型示意图

岩爆是由静力荷载与动力荷载共同作用而诱发的地质灾害^[6]。岩爆预测是岩爆研究的重要内容,包括岩爆发生位置预测、岩爆等级预测和岩爆破坏区范围预测等,其中岩爆脆性破坏区范围是岩爆支护设计的关键技术参数,也是地下工程围岩稳定性分析的重要内容。根据Kaiser等^[4]的研究,当岩爆脆性破坏区深度小于0.25 m,属于轻微岩爆;当岩爆脆性破坏区深度达到0.25~0.75 m时,属于中等岩爆;当岩爆脆性破坏区深度达到0.75~1.5 m时,属于严重岩爆。

地下工程完整或较完整围岩中,发生最多的岩爆是应变型岩爆,国内外学者对应变型岩爆脆性破坏区预测开展了广泛的研究,其中本构模型是岩爆脆性破坏区预测的关键,包括Hoek-Brown脆性参数模型^[7]、粘聚力弱化摩擦强化CWFS模型^[8]、岩体劣化RDM模型^[9]和损伤剥落DISL模型等^[10],都能很好模拟岩爆脆性破坏区分布。其中Hoek-Brown脆性参数模型采用弹性分析,使得岩爆脆性破坏区厚度偏大;RDM模型是改进的CWFS模型,同CWFS模型一样,计算参数多且不容易确定;DISL模型为脆塑性本构模型,比较方便进行岩爆脆性破坏区计算。

目前对静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区预测研究较少,本文以秦岭终南山公路隧道2号通风竖井为例,根据混合片麻岩^[11]物理力学性质,采用理论分析和数值模拟相结合的研究方法,开展

静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区预测,为完善岩爆不良地质灾害现象勘察评价和提高岩爆防治效果提供参考。

1 静动荷载作用下应变型岩爆破坏过程分析

根据李春林^[12]的岩爆概念模型,静动荷载作用下应变型岩爆概念模型,如图2所示,此时,应变型岩爆的能量来源分别是高地应力开挖卸荷作用下岩体中积聚的静力应变能和地震等荷载作用下岩体中积聚的动力应变能。地下工程开挖卸荷后,围岩的应力状态由三向转变为二向,硬脆性围岩的二次应力进一步集中并聚集大量的弹性应变能,使得岩体中的随机分布裂纹发生起裂和非稳定扩展而形成岩片,岩片向临空面发生剥落、弹射等破坏现象,最终导致岩爆的发生;当遭遇地震等动力荷载作用时,在应力波的反复受迫振动下,静动力叠加作用会进一步加大岩爆脆性破坏区范围。

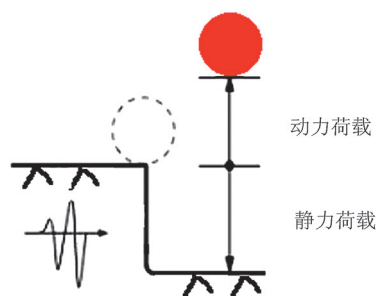


图2 静动荷载作用下应变型岩爆概念模型

2 岩爆脆性破坏区深度计算及影响因素分析

2.1 岩爆脆性破坏区深度理论计算

秦岭终南山公路隧道2号通风竖井开挖直径为12.12 m,深度为661.1 m,具有地应力大和混合片麻岩岩爆倾向性大等特点,在施工过程中发生多次岩爆。本文以竖井-200 m水平断面为研究对象,静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区计算模型,如图3所示。竖井最大水平地应力为 σ_H ,最小水平地应力为 σ_h ,并且 $\sigma_h = \lambda \sigma_H$, λ 为水平地应力比值;在高位地应力荷载和动力荷载作用下,阴影部分为岩爆破坏区范围。

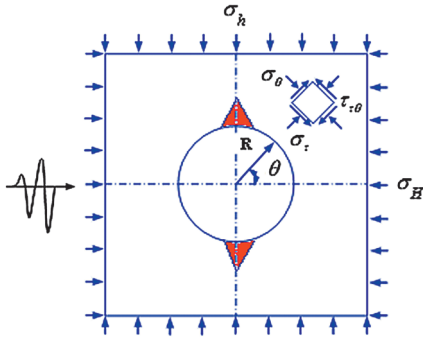


图 3 静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区深度计算

根据岩体力学,竖井开挖卸荷后,围岩应力出现重新分布,切向应力增大而径向应力减小。在极坐标系中,围岩切向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r 和剪应力 $\tau_{r\theta}$ 的计算公式分别为:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}\sigma_H[(1+\lambda)(1+\frac{R^2}{r^2}) + \sigma_H(1-\lambda)(1+3\frac{R^4}{r^4})\cos 2\theta] \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma_H[(1+\lambda)(1-\frac{R^2}{r^2}) - \sigma_H(1-\lambda)(1-4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\cos 2\theta)] \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}\sigma_H[(1-\lambda)(1+2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4})\sin 2\theta] \quad (3)$$

式中: R 竖井开挖半径, r 、 θ 分别为应力计算单元的半径和夹角。

在竖井围岩压应力集中区,当 $\theta=\pi/2$ 和 $\theta=3\pi/2$ 时,剪应力 $\tau_{r\theta}=0$,岩爆破区深度达到最大。此时,围岩切向应力转化为最大主应力 σ_1^j ,径向应力转化为最小主应力 σ_3^j ,计算公式分别为:

$$\sigma_1^j = \frac{1}{2}\sigma_H[(1+\lambda)(1+\frac{R^2}{r^2}) + \sigma_H(1-\lambda)(1+3\frac{R^4}{r^4})] \quad (4)$$

$$D_f = (\sqrt{\frac{(3\lambda-1)\sigma_H + \sqrt{(3\lambda-1)^2\sigma_H^2 + 12(\sigma_{ci} - 4c_s\rho PGV_s)(1-\lambda)\sigma_H - 12(1-\lambda)^2\sigma_H^2}}{2(\sigma_{ci} - 4c_s\rho PGV_s) - 2(1-\lambda)\sigma_H}} - 1)R \quad (10)$$

根据 Diederich^[15] 的研究,通过收集不同形状地下工程岩爆脆性破坏区的实测深度,经回归分析得到岩爆脆性破坏区半径 r_f 的经验公式为:

$$r_f = 0.5(\frac{\sigma_{\theta\max}}{\sigma_{ci}} + 1)R \quad (11)$$

$$\sigma_3^j = \frac{1}{2}\sigma_H[(1+\lambda)(1-\frac{R^2}{r^2}) - \sigma_H(1-\lambda)(1-4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4})] \quad (5)$$

当地震发生时,震源中心会向四周发射弹性地震波,根据传播方式分为纵波(压缩波)和横波(剪切波)等,地震波入射方向不同,对地下工程围岩的影响也不同^[13]。地震剪切波引起的地震动峰值速度(PGV)大于压缩波引起的地震动峰值速度,根据 Kaiser 等^[13] 的研究,当仅考虑地震剪切波作用时,地震剪切波以 45° 方向入射,在圆形隧道围岩中产生的最大应力增量为:

$$\Delta\sigma_{d\max} = 4c_s\rho PGV_s \quad (6)$$

式中: ρ 为岩体密度; PGV_s 为剪切波地震动峰值速度; c_s 为岩体剪切波的波速,公式为:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)\rho}} \quad (7)$$

式中: E 为岩体弹性模量; μ 为岩体泊松比。

硬脆性岩石的脆性破坏过程是渐进的,不同的应力临界值标志着不同的裂纹扩展阶段。其中裂纹起裂应力^[11]是表征岩石力学性质的重要特征值,标志着岩石内部裂纹开始起裂并逐渐稳定扩展,岩爆脆性破坏区开始形成,所以裂纹起裂应力是预测应变型岩爆破坏区范围的重要参数,结合 Martin 等^[6] 提出的 Hoek-Brown 脆性参数模型,徐士良^[14] 提出了工程岩体的岩爆起裂判据:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{ci} \quad (8)$$

式中: σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主应力; σ_{ci} 为岩石裂纹起裂应力。

高地应力卸荷作用下产生的围岩二次应力与地震剪切波作用引起的最大应力增量进行相加代入公式(8),公式为:

$$\sigma_1^j - \sigma_3^j + \Delta\sigma_d^{\max} = \sigma_{ci} \quad (9)$$

求解公式(9),得到静动荷载作用下应变型岩爆破区半径,则岩爆破区深度,计算公式为:

式中: $\sigma_{\max}$ 为隧洞周边最大切向应力。

根据公式(11),得到岩爆脆性破坏区深度的经验公式为:

$$d_f = 0.5(\frac{\sigma_{\theta\max}}{\sigma_{ci}} - 1)R \quad (12)$$

在地应力和地震剪切波荷载共同作用下,根据公式(1)和(6),得到竖井围岩最大切向应力 $\sigma_{\max}$ 的计算公式为:

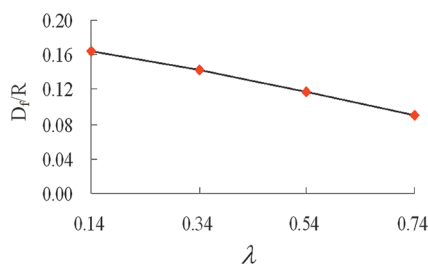
$$\sigma_{\theta \max} = (3 - \lambda) \sigma_H + 4c_s \rho P G V_s \quad (13)$$

在竖井-200 m水平断面处,最大水平地应力 σ_H 为21.9 MPa,水平地应力比值系数 λ 为0.54;混合片麻岩的弹性模量 E 为40.7 GPa,泊松比 μ 为0.22,密度 ρ 为2 650 kg/m³,裂纹起裂应力 σ_{ci} 为45.6 MPa,剪切波波速 c_s 为2 508 m/s。当地震动峰值速度 $P G V_s$ 等于0.2 m/s时,根据经验公式(12)和理论公式(10),得到竖井静动荷载作用下应变型岩爆破坏区深度分别为0.91 m和0.72 m。经验公式计算结果稍大于理论公式计算结果,主要因为经验公式是采用竖井井壁处的应力进行计算的,而理论公式是采用竖井岩爆脆性破坏区深度处的应力进行计算的,更符合围岩二次应力分布规律,表明岩爆脆性破坏区深度理论计算公式比较合理。

2.1 岩爆脆性破坏区深度影响因素分析

静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区深度是岩爆支护设计的重要参数,根据理论计算公式,其影响因素主要为水平地应力比值 λ 、裂纹起裂应力 σ_{ci} 、地震动峰值速度 $P G V_s$ 和岩体剪切波波速 c_s 。

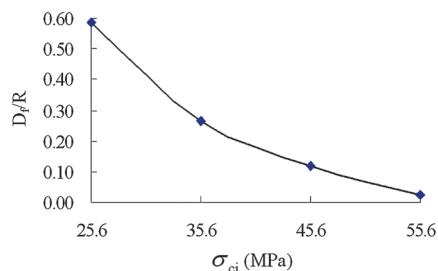
图4为水平地应力比值 λ 对岩爆脆性破坏区 D_f/R 深度的影响曲线,表明岩爆脆性破坏区深度与水平地应力比值大致成线性函数关系,并随着水平地应力比值增大而减小;图5为岩石裂纹起裂应力 σ_{ci} 对岩爆脆性破坏区 D_f/R 深度的影响曲线,表明岩爆脆性破坏区深度与裂纹起裂应力大致成指数函数关系,并随着裂纹起裂应力增大而减小。主要是因为当水平地应力比值增大,围岩中的偏应力相应减小,使得岩体内部裂纹起裂扩展的驱动力降



$\sigma_H=21.9$ MPa; $\sigma_{ci}=45.6$ MPa; $c_s=2\ 508$ m/s; $P G V_s=0.2$ m/s

图4 水平地应力比值对岩爆脆性破坏区深度影响曲线

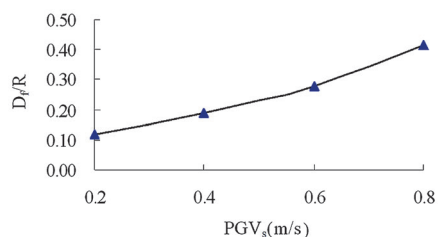
低;同样当裂纹起裂应力增大,也会抑制岩体内部裂纹的起裂扩展,两者都会使岩爆脆性破坏区深度减小。



$\sigma_H=21.9$ MPa; $\lambda=0.54$; $c_s=2\ 508$ m/s; $P G V_s=0.2$ m/s

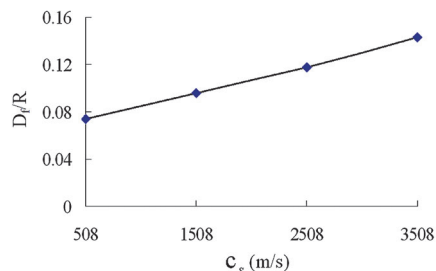
图5 裂纹起裂应力对岩爆脆性破坏区深度影响曲线

图6为地震动峰值速度对岩爆脆性破坏区深度的影响曲线,可见岩爆脆性破坏区深度与裂纹起裂应力大致成指数函数关系,并随着地震动峰值速度增大而增大。图7为岩体剪切波波速对岩爆脆性破坏区深度的影响曲线,表明岩爆脆性破坏区深度与剪切波波速大致成线性函数关系,并随着剪切波波速增大而增大。主要是因为当地震动峰值速度和剪切波波速增大,围岩中的动应力相应增大,从而驱动岩体内部裂纹的起裂扩展,使得岩爆脆性破坏区深度增大。



$\sigma_H=21.9$ MPa; $\sigma_{ci}=45.6$ MPa; $\lambda=0.54$; $P G V_s=0.2$ m/s

图6 地震动峰值速度对岩爆脆性破坏区深度影响曲线



$\sigma_H=21.9$ MPa; $\sigma_{ci}=45.6$ MPa; $\lambda=0.54$; $P G V_s=0.2$ m/s

图7 剪切波波速对岩爆脆性破坏区深度影响曲线

3 应变型岩爆脆性破坏区数值模拟

理论公式能够非常有效的预测出静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区深度,工程应用时也比较方便,不足之处是不能较好预测岩爆脆性破坏区范围。脆性破坏区范围越大,岩爆的危害性越大。一般把岩爆脆性破坏区范围近似为 V 型分布,如图 8 所示,公式为:

$$A = R \sin \frac{\beta}{2} (D_f + (R - R \cos \frac{\beta}{2})) - \frac{1}{2} R^2 (\beta - \sin \beta) \\ = \frac{1}{2} R (2(R + D_f) \sin \frac{\beta}{2} - R \beta) \quad (14)$$

式中: β 为岩爆脆性破坏区角度。

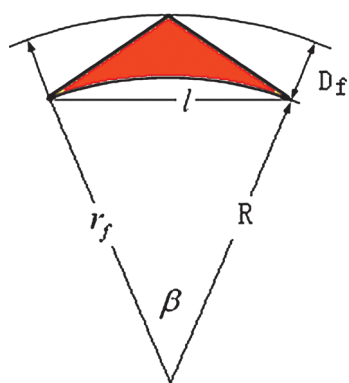


图 8 岩爆脆性破坏区范围计算

为了能进一步预测出岩爆破坏区范围,本文采用 DISL 脆塑性本构模型和 FLAC3D 有限差分软件相结合进行数值模拟。DISL 本构模型为损伤起始-剥落极限模型,用塑性区表示岩爆脆性破坏区,符合应变型岩爆破坏机制,并较好地模拟了加拿大 URL 试验隧洞脆性破坏区^[10]。采用的强度准则为 Hoek-Brown 准则,公式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s)^a \quad (15)$$

式中: σ_1 和 σ_3 同前; σ_c 为岩石单轴抗压强度; m 和 s 分别是反映摩擦强度和粘结强度的经验参数。

根据 Diederichs 的研究^[10],对于岩爆脆塑性本构模型,破坏后的残余强度主要为摩擦强度,粘结强度几乎等于 0,所以建议 $m_r=6-9$, $a_r=0.75$, $s_r=0$;而破坏前的峰值强度主要为粘结强度,并建议 $a_p=0.25$, s_p 和 m_p 的计算公式如下:

$$s_p = (\sigma_{ci} / \sigma_c)^{1/a_p} \quad (16)$$

$$m_p = s_p (\sigma_c / \sigma_t) \quad (17)$$

式中: σ_t 为岩石抗拉强度。

根据混合片麻岩实验结果^[11], σ_c 和 σ_t 分别取 120 MPa 和 7.3 MPa,经过分析和计算,得到混合片麻岩力学参数,如表 1 所示。

表 1 混合片麻岩力学参数

岩体状态	a	s	m	σ_c/MPa
峰值强度	0.25	0.02	0.34	120
残余强度	0.75	10-6	8	

-200 m 水平竖井岩爆脆性破坏区二维数值模拟模型如图 9,为了减少边界对计算结果的影响,计算模型尺寸取 10 倍开挖直径,并采用黏滞边界条件。同理论计算一致,考虑最不利荷载情况,把地应力方向旋转 45° 施加到模型边界上,地震动力荷载从底部输入。地震剪切波采用正弦波进行模拟,并把速度时程变化为应力时程。

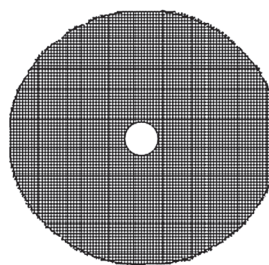


图 9 静动荷载作用下竖井应变型岩爆脆性破坏区数值模型

在静动荷载作用下,竖井岩爆脆性破坏区数值模拟分为静力和动力计算两个过程。在静力过程,先施加地应力并模拟竖井开挖;在静力计算结束后施加剪切波动力时程。当地震动峰值速度 PGV_s 分别为 0.2m/s 和 0.8m/s 时,竖井岩爆脆性破坏区范围数值模拟如图 10 所示,岩爆脆性破坏区主要分布在竖井压应力集中区,随着地震动峰值速度的增大,破坏区形状由锅底型变为 V 型。当 $PGV_s=0.2$ m/s 和 $PGV_s=0.8$ m/s 时,岩爆脆性破坏区深度分别为 0.6 m 和 1.8 m,岩爆等级由中等岩爆变为严重岩爆,破坏区范围分别为 5.7m² 和 14.2 m²。当 PGV_s 等于 0.2 m/s 时,数值模拟得到的岩爆脆性破坏区深度为 0.6 m,小于理论计算深度 0.72 m,主要是因为数值模拟考虑了塑性应力重分布,二者变化趋势基本一致。

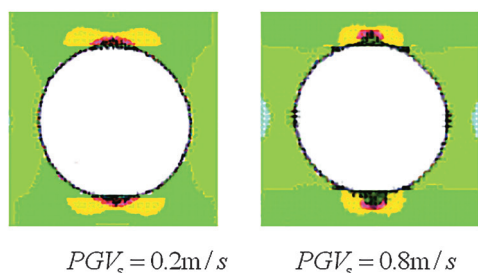


图10 静动荷载作用下竖井应变型岩爆脆性破坏区数值模拟结果

4 结论

随着地下隧道工程逐渐朝“长、深、大、多”等方向发展,复杂的地质环境条件往往难以避开,再加上地震等外界动力荷载的介入与影响,使得岩爆不良地质灾害现象逐渐增多。因此,本文提出了一种静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区理论分析和数值模拟的预测方法。该方法首先根据岩体力学二次应力计算理论和岩爆判据,导出静动荷载作用下岩爆脆性破坏区深度弹性计算公式,比经验公式更合理。采用 DISL 脆塑性本构模型,较好地模拟了岩爆脆性破坏区范围。根据影响因素理论分析,静动荷载作用下应变型岩爆破坏区深度随着水平地应力比值和裂纹起裂应力的增大而减小,随着岩体剪切波波速和地震动峰值振动速度增大而增大。

本文仅分析了地下工程圆形断面静动荷载作用下应变型岩爆脆性破坏区范围,对于马蹄型等断面,可以采用等代圆型断面的方法进行岩爆脆性破坏区深度理论计算,并可以采用数值模拟进行精准预测。考虑到岩爆机理的复杂性、岩体的非均质特性和地下水分布等情况,该方法仍需工程应用验证并进一步完善。

参考文献:

- [1] 谭展,范柱国,严飞,等.九顶山隧道地应力特征及岩爆预测[J].工程勘察,2017,45(9):21-25.
- [2] 郭长宝,张永双,邓宏科,等.基于岩爆倾向性的高黎贡山深埋隧道岩爆预测研究[J].工程勘察,2011,39(10):8-13.
- [3] 冯涛,王文星,潘长良.岩石应力松弛试验及两类岩爆研究[J].湘潭矿业学院学报,2000,15(1):25-29.
- [4] Kaiser PK, Dwayne DT, McCreath DR. Drift support in burst-prone ground[J]. CIM bulletin, 1996, 89(998): 131-138.
- [5] 钱七虎.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945-1956.
- [6] 殷志强,李夕兵,董陇军,等.动静组合加载条件岩爆特性及倾向性指标[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3249-3256.
- [7] Martin C D, Kaiser P K, McCreath D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 136-151.
- [8] Hajiabdomajid V, Kaiser P K, Martin C D. Modelling brittle failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6): 731-741.
- [9] 江权,冯夏庭,陈国庆.考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):144-152.
- [10] Diederichs M S. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(9): 1082-1116.
- [11] 徐士良,邵艳.单轴压缩下混合片麻岩脆性破坏特征分析[J].工程勘察,2012,40(1):8-11,27.
- [12] 李春林.岩爆条件和岩爆支护[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):674-682.
- [13] 徐华,李天斌,王栋,等.山岭隧道地震动力响应规律的三维振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1762-1771.
- [14] 徐士良.基于工程岩体起裂判据的岩爆破坏区研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(5):1407-1413.
- [15] Kaiser PK, McCreath DR, Tannant DD. Canadian Rockburst Support Handbook [M]. Canadian Rock-burst Research Program, Vol. II, Book I, CAMIRO Mining Division, 1996.