

深埋隧道岩爆影响因素及其预测研究

唐登志¹, 白根铭¹, 陈爽¹, 曲宏略^{2,3}, 李博文², 蔡永灵²

(1. 云南建设基础设施投资股份有限公司, 云南 昆明 650217; 2. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500;
3. 诺比侃 西南交大产学研联合实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 受自重应力影响, 深埋隧道往往存在高地应力, 岩爆是其开挖过程中常见的地质五灾害之一。影响岩爆的因素众多, 一般认为与地质构造、地应力大小、围岩岩性、隧道埋深及施工条件等有关, 需要综合多种因素共同考虑。总结已有研究, 可将岩爆影响因素分为两类: 一是岩石内部影响因素, 二是岩石外部影响因素。结合岩爆案例及文献资料, 本文归纳分析了影响岩爆的主要因素和特征, 提出了相应的防治措施, 为深入开展深埋隧道的岩爆孕灾机理、预测预警和防治措施研究提供了参考。

关键词: 深埋隧道; 岩爆; 影响因素; 倾向性参数; 防治措施

中图分类号: U459; U445.53; A715

文献标识码: A

文章编号: 1001-2184(2023)02-0011-07

Research on Influencing Factors and Prediction of Rockburst in Deep-buried Tunnel

TANG Dengzhi¹, BAI Genming¹, CHEN Shuang¹, QU Honglue^{2,3}, LI Bowen², CAI Yongling²

(1. Yunnan Infrastructure Investment Co., Ltd., Kunming Yunnan 650217;

2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500;

3. Nuobikan-Southwest Jiaotong University Industry-University-Research Joint Laboratory, Chengdu Sichuan 610031)

Abstract: Affected by self-weight stress, deep-buried tunnels often have high in-situ stress, and rockburst is one of the five common geological disasters in the excavation process. There are many factors affecting rockburst, which are generally considered to be related to geological structure, in-situ stress, surrounding rock lithology, tunnel burial depth and construction conditions, etc., and multiple factors need to be considered together. Summarizing the existing researches, rockburst influencing factors can be divided into two categories: one is the internal influence factors of the rock, and the other is the external influence factors of the rock. Based on rockburst cases and literature data, the main factors and characteristics of influencing rockburst are summarized and analyzed in this paper, corresponding prevention measures are put forward, which can provide reference for in-depth research on the mechanism of rockburst disaster, prediction and early warning and prevention measures in deep buried tunnels.

Key words: deep buried tunnel; rockburst; influencing factors; tendency parameters; prevention and control measures

0 引言

深埋长隧道以其延伸长、埋藏深、工期长、工程地质问题较多而成为众多工程建设中的控制性工程^[1]。特别是受自重应力影响, 深埋隧道往往存在高地应力, 岩爆是其开挖过程中常见的地质

灾害之一。如川藏铁路上的巴玉隧道中, 94%的里程位于岩爆区, 被称为“岩爆火药库”, 威胁到施工人员的生命安全, 使工程施工进度受到严重制约^[2]。

岩爆的发生通常是突然的, 受围岩条件、应力条件、开挖条件等多重因素的影响^[3-6], 其发生机制具有复杂性、耦合性。总结已有研究成果, 可将岩爆的影响因素划分内部因素和外部因素两大

收稿日期: 2022-10-17
基金项目: 曼耗至金平高速公路项目草果山隧道岩爆预测与防控关键技术研究 (JTSZ-MJGS-2019-042); 国家自然科学基金 (51809221); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金 (SKLGDUEK1910)

类,其中内部因素主要是指岩石本身的性质,可以通过各岩爆倾向性指标进行定量分析;外部因素主要是宏观地质条件以及施工对围岩的扰动等。本文列举了影响岩爆发生的相关因素,讨论了各参数的适用性和选用标准,选取了合理的评价参数,探讨了不同因素的特点,可为工程施工中岩爆影响因素的选择提供参考。

1 岩石内部岩爆影响因素

1.1 围岩岩性

已有的研究表明^[7],岩爆大多发生在坚硬、完整、干燥的脆性岩体中,这是由岩体的力学性质决定的。

根据岩石微观结构分析:微观结构具有随机排列特征的岩石比具有定向排列特征的岩石中的岩爆烈度强^[8],如围岩为花岗岩、闪长岩时的岩爆烈度比片麻岩、花岗片麻岩、糜棱岩等更强;具有硅质胶结的岩石比具有钙质胶结的岩石的岩爆烈度弱,如灰岩白云岩中的岩爆烈度比硅质灰岩更强^[9]。

1.2 岩爆倾向性参数

岩爆倾向性是指岩石本身所具有的在某种条件下发生岩爆的活跃性和剧烈性^[10]。

1.2.1 岩石脆性指数 B

岩石脆性越高,塑性就越小。从变形过程来看,变形一定伴随着岩体内部储能大小的变化,储存的变形能中分为两部分能量,弹性变形能越大,塑性变形能就越小,故岩石脆性被认为与岩爆倾向密切相关。

冯涛等^[11]提出,岩石在表征破裂之前内部就已经发生了脆性破坏,虽然未出现宏观的破裂状态,但是永久变形破裂之前的岩石形态一定伴随有非弹性破坏。在微弱的非弹性应变之后发生的破坏可称为脆性破裂。脆性系数 B 可以用公式(1)表示:

$$B = \alpha \frac{\sigma_c \epsilon_f}{\sigma_t \epsilon_b} \quad (1)$$

式中 B 为岩石的脆性指数; α 为调节参数,一般取 0.1; σ_c 为岩石的单轴抗压强度; σ_t 为岩石抗拉强度; ϵ_b 为单轴压缩条件下的峰值前应变; ϵ_f 为单轴压缩条件下的峰值后应变。

B 值越大,表示岩石越脆。

李庶林等^[12]认为脆性指数 B 表示为:

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (2)$$

$B \leq 10$ 无岩爆, $10 < B \leq 14$ 有轻微岩爆, $14 < B \leq 18$ 有中等岩爆, $B > 18$ 有严重岩爆。

周健等^[13]认为脆性系数 B 表示为与式(2)相同, $B \leq 15$ 无岩爆, $15 < B \leq 18$ 有轻微岩爆, $18 < B \leq 22$ 有中等岩爆, $B > 22$ 有严重岩爆。

1.2.2 弹性应变能储存指数 W_{et}

岩石弹性应变能的储存能力越大,在隧道开挖后就越容易通过临空面发生能量释放,导致岩爆发生。

Kidybiński^[14]提出的通过岩石单轴压缩加卸载试验,然后在应力与单轴抗压强度之比为 0.8~0.9 之间卸载应力。通过应力应变曲线(图 1),可以计算出岩石的弹性应变能和相应卸载耗散的应变能。

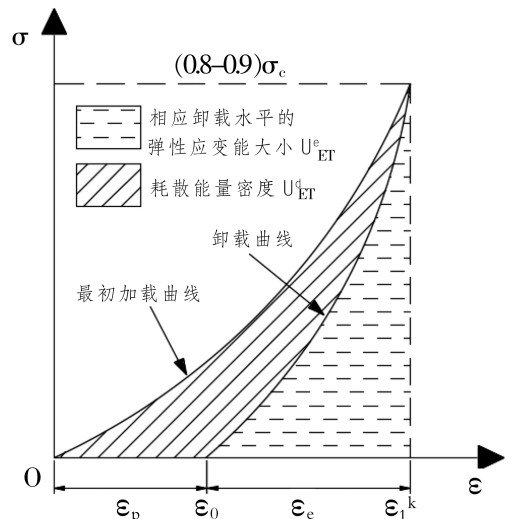


图 1 应力应变曲线

计算公式如下:

$$W_{et} = \frac{U_{ET}^e}{U_{ET}^d} \quad (3)$$

式中 U_{ET}^e 、 U_{ET}^d 为相应卸载水平的弹性应变能大小和耗散能大小。

Kidybiński 认为, $W_{et} < 2.0$ 无岩爆, $2.0 < W_{et} \leq 4.99$ 轻微岩爆, $W_{et} > 5.0$ 严重岩爆。

此后,周健等^[15]又在岩石力学试验基础上重新划分了弹性应变能储存指数的岩爆倾向等级,分别为 $W_{et} < 2.0$ 的无岩爆, $2.0 \leq W_{et} < 3.5$

的轻微岩爆, $3.5 \leq W_{et} < 5.0$ 的中等岩爆, $W_{et} \geq 5.0$ 的严重岩爆。

1.2.3 弹性应变势能 PES

弹性应变势能是指利用岩石中储存的弹性应变能来判断岩石材料的爆破倾向, 在单次循环加载卸载单轴压缩试验中, 应力先加载到峰值强度的 80%~90%, 待卸载到 0 后再加载, 直到岩样完全破坏, 其弹性应变势能应力应变曲线见图 2。

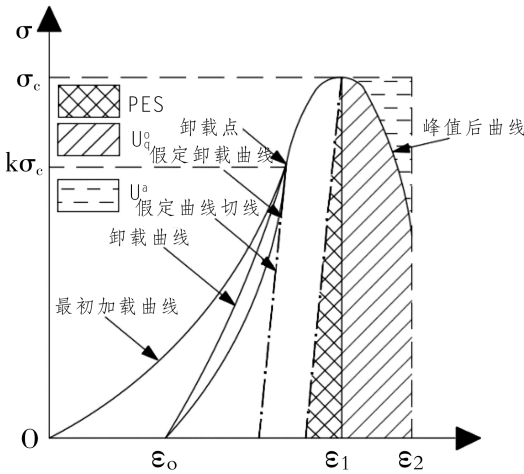


图 2 弹性应变势能应力应变曲线

图 2 标出了卸载曲线和其切线, 在峰值强度点处做卸载曲线切线的平行线为假定的卸载曲线, 在假定卸载曲线下的面积被认为是峰值弹性应变能的大小, 即定义的弹性应变势能。

计算公式如下:

$$PES = \frac{\sigma_c^2}{2E_s} \quad (4)$$

式中 E_s 为卸载切向模量。

其分级标准为: $PSE \leq 50$ 极轻微岩爆, $50 < PSE \leq 100$ 轻微岩爆, $100 < PSE \leq 150$ 中等岩爆, $150 < PSE \leq 200$ 严重岩爆, $200 < PSE$ 极严重岩爆。

1.2.4 能量冲击指数 ACF

单轴压缩试验获得的完整应力-应变曲线中, 在峰值前总输入能量大小与峰值后破坏能量大小的比例可定义为能量冲击指数, 应力应变曲线见图 3。

在图 3 中, 应力到达峰值时所输入的能量假定为 U^0 , 到达峰值后岩石破坏卸载能量大小定义为 U^a , 能量冲击指数 A_{CF} 计算公式为:

$$A_{CF} = \frac{U^0}{U^a} \quad (5)$$

$$U^0 = \int_0^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon \quad (6)$$

$$U^a = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma d\epsilon \quad (7)$$

式中 ϵ_1 为峰值强度下的应变; ϵ_2 为岩样的最大应变。

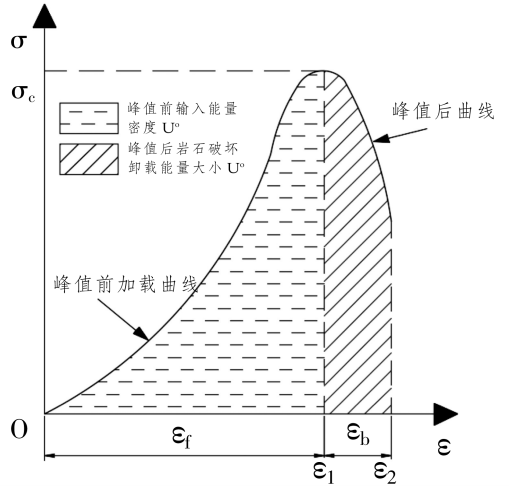


图 3 能量冲击指数应力应变曲线

其分级标准为: $A_{CF} \leq 1$ 无冲击危险存在, $1 < A_{CF} \leq 2$ 有冲击危险存在, $2 < A_{CF}$ 有严重冲击危险存在, 但具有一定的局限性, 因为岩爆并非一定是压裂破坏, 也可能有剪切破坏, 张拉破坏等^[16]。

1.2.5 变形脆性系数 K_u

李庶林等^[17]从岩石变形脆性角度评价了凡口铅锌矿岩石和矿石的岩爆倾向性。根据试验确定峰值前的总变形量和永久变形量, 采用式(8)和岩爆判别分级标准确定岩爆倾向。变形脆性系数应力应变曲线见图 4。

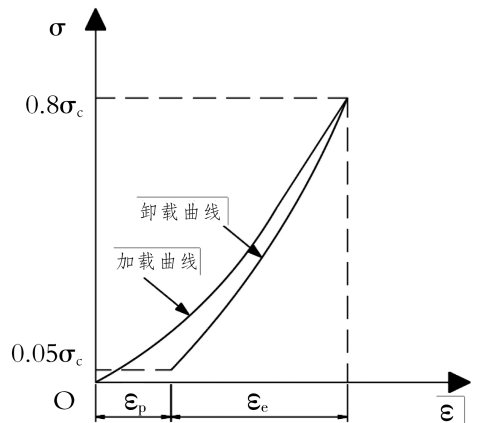


图 4 变形脆性系数应力应变曲线

K_u 等于总变形和永久变形的比值。

计算公式如下:

$$K_u = \frac{u}{u_1} = \frac{\epsilon_p + \epsilon_e}{\epsilon_p} \quad (8)$$

式中 u 为岩石峰值荷载前的总变形量; u_1 为峰值荷载前的永久变形量; ϵ_p 为塑性变形; ϵ_e 为弹性变形。

其分级标准为, $K_u < 2.0$ 无岩爆, $2.0 \leq K_u < 6.0$ 弱岩爆, $6.0 \leq K_u < 9$ 中等岩爆, $9.0 \leq K_u$ 强岩爆。

1.2.6 岩爆能量指数(B_q)

邓林等^[18]认为岩爆的发生一定伴随着能量转移,通过分析岩石在变形和破坏过程中能量变化,应力应变全过程曲线在峰值强度后区为 F 密度分布曲线的岩石往往会产生岩爆,岩爆能量指数应力应变曲线见图 5。

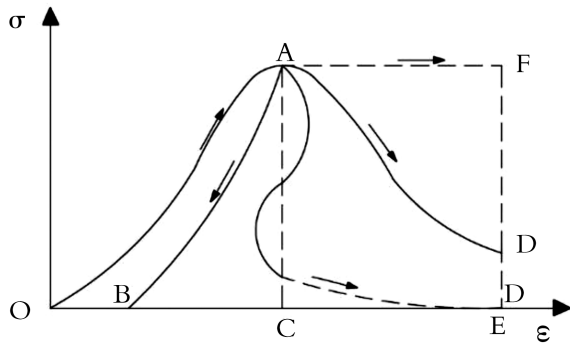


图 5 岩爆能量指数应力应变曲线

计算公式如下:

$$B_q = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \quad (9)$$

式中 B_q 为岩石岩爆能量指标; A_1 为 ADF 的面积; A_2 为 CADE 或 CAD'E 围成的面积。

其分级标准为: $0 < B_q \leq 0.2$ 无岩爆, $0 < B_q \leq 0.5$ 弱岩爆, $0.5 < B_q \leq 0.8$ 中等岩爆, $0.8 < B_q$ 强岩爆。

1.2.7 滞后时间指数 T_R

印象初等^[19]认为加卸载响应比(LURR)可以反映出岩石损伤前兆及失稳,甚至可以反映出十多年后岩石破坏和地震的可能性。通过 LURR 理论,宫凤强等^[20]基于单轴阶跃加卸载试验的岩石材料加卸载响应比特性与岩爆倾向性的关系提出了滞后时间指数 T_R ,定义为从 LURR 的 S-R 点(开始上升)到峰值强度点的时间与整

个加载周期的时间之比,滞后时间指数应力时间曲线见图 6。

计算公式如下:

$$T_R = T_1 / T_b \quad (10)$$

式中 T_1 为定义为滞后时间,是峰值强度点和 S-R 点之间的间隔时间; T_b 为整个加载期的时间。

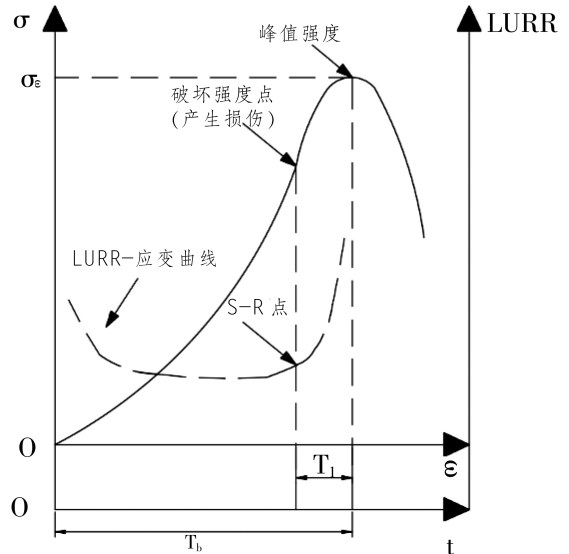


图 6 滞后时间指数应力时间曲线

其分级标准为: $0.25 < T_R$ 无岩爆, $0.2 < T_R \leq 0.25$ 弱岩爆, $0.15 < T_R \leq 0.2$ 中等岩爆, $T_R \leq 0.15$ 强烈岩爆。

综上所述,在考虑岩爆倾向性判据选择时,应综合考虑该判据实际获取的难易度、时效性、经济性。难易度指获取该判据指标的实验复杂程度及实验所需仪器是否具有普遍性,时效性指在进行实验后能否快速计算得到岩爆倾向性指标,经济性指进行该实验的岩样制取、运输以及实验费用是否经济低廉。

统计上述的 7 个岩爆倾向性判据,基于难易度、时效性、经济性三个指标进行筛选,岩爆倾向性参数选择评价结果见表 1。在对于不同岩爆倾向性判据进行选择时,可根据实际项目需求进行筛选。

1.3 围岩完整性

岩石完整性是储存弹性应变能的前提条件。一般来说,岩爆被认为是能量的快速释放,在隧道开挖过程中,如果岩体是完整的,岩爆发生的机率和烈度将会提高。因此,岩体的完整性直接影响

岩爆发生与否,也可以阶段性知道施工组织设计,保障隧道施工人员和机械的安全。

岩体完整性越好,存储应变能的能力就越高,也就更容易在开挖后短时间释放能量,产生岩爆现象。根据《工程岩体分级标准》(GBT50218—2014)^[21],对围岩完整性有定量描述如下表 2 所示:

表 1 岩爆倾向性参数选择评价

岩爆倾向性指数	实验类型	难易度	时效性	经济性
岩石脆性指数	单轴压缩实验	易	快	好
弹性应变能储存指数	单轴压缩实验	易	快	好
弹性应变势能	单轴压缩实验	易	快	好
能量冲击指数	单轴压缩试验	较难	快	好
变形脆性系数	单轴压缩试验	较难	较快	好
岩爆能量指数	单轴压缩试验 (刚性试验机)	难	较快	较好
滞后时间指数	单轴阶跃加 卸载试验	难	慢	较好

表 2 围岩完整性定量描述表

J_v (条/ m^3)	<3	3~10	10~20	20~35	≥35
完整程度	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎

注: J_v 为岩体体积节理数。

2 岩石外部岩爆影响因素

2.1 初始地应力

地应力的高低,是判断岩爆是否发生以及岩爆发生剧烈程度的主要因素之一。

从岩爆发生机理出发,高地应力隧道的开挖,是发生岩爆的先决条件。开挖使岩体从初始的三向应力状态变为二向应力状态,即应力重分布。刚完成隧道开挖的数小时内,围岩内部发生应力重分布,围岩外部产生临空面,这段时间也是岩爆发生的活跃期。因此,地应力是围岩内部岩爆影响因素之一,它反映了岩石位于围岩整体中的受力情况,通过应力判据是研究预测岩爆的最主要方法之一。

2.2 现场施工状况

隧道开挖对围岩有直接扰动作用,开挖后,围岩进行应力重分布,支护质量和支护时机对岩爆发生也有控制作用,在支护良好的隧道中,岩爆发生的几率和频率都将大幅降低。

2.2.1 开挖方式

目前我国绝大多数隧道均普遍采用爆破开

挖,爆破开挖具有效率高、成本低等优点,但也存在对围岩扰动过大、诱发岩爆等缺点,故有台阶法开挖、双侧壁导坑法等爆破方案来降低扰动效应。在隧道施工中,良好的爆破效果可以减少对岩体的扰动,降低岩爆的危险性。

2.2.2 支护时机

隧道开挖前后,及时、准确地对隧道工作面及围岩进行支护,可以改变隧道周围的应力状态,防止岩爆的发生。开挖前支护可以保证开挖工作面的稳定,减少爆破开挖对围岩的扰动,爆破排险后的及时支护可以延缓围岩应力重分布的速率,降低岩爆发生的等级和频率。

2.2.3 支护质量

常见的隧道支护设计包括超前辅助支护、喷射混凝土、锚杆、钢网、钢拱和其他支护隧道的方法。岩体的承载力可以通过良好的支护质量和支护方案来提高,降低岩爆发生的几率和规模大小。

2.2.4 开挖状态

隧道开挖过程中岩爆防治措施较多,开挖断面的形式直接影响开挖后围岩应力分布特征,改善开挖断面形状能减少应力集中现象,从而降低岩爆发生风险。

隧道断面尺寸越大,初次应力重分布圈越大,岩石,松动范围随之增大,岩爆产生的爆坑就越深。根据国际隧道协会(ITA)断面设计大小分级标准(表 3),开挖速率的不同对围岩扰动情况也不一样,应力重分布结果也不一样,开挖速率快,对围岩扰动也会更多,会加速应力重分布的速率,从而增加岩爆发生速率。

随着开挖深度的加深,初始地应力也越来越高,高地应力是诱发岩爆的主要因素之一。开挖越深,越应该预防岩爆的发生,并采取相应的支护措施。

表 3 断面设计大小分级标准表

断面类型	断面设计大小 D/m^2
极小断面	$D < 3$
小断面	$3 \leq D < 10$
中等断面	$10 \leq D < 50$
大断面	$50 \leq D < 100$
特大断面	$100 \leq D$

2.2.5 超前地质预报和监控量测

超前地质预报和现场监测量控可以在开挖前

及开挖后监测围岩状况,并做好地质记录工作,分析岩体的地质条件,动态指导施工,以降低岩爆的危害性和发生几率。

2.3 地下水状况

因为地下水渗漏对岩石的作用,在潮湿的岩体中不容易发生岩爆。地下水对岩石的影响主要包括以下三个方面:

(1)它软化了岩石,降低了储存弹性变形能的能力;

(2)浸水可以消散岩石中储存的弹性变形能,降低节理的抗剪强度,因此,岩体破坏的强度将减小;

(3)地下水的存在往往代表岩体之间存在断层或节理,岩体的地应力可能已经提前释放。

根据《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)^[22],可以确定地下水状态分级的判别标准(表4)。

表4 地下水状态分级判别标准表

围岩级别	状态	渗水量 /L·(min·m) ⁻¹
I	干燥或湿润	<1
II	偶有渗水	1.0~2.5
III	经常渗水	2.5~12.5
IV	严重渗水	>12.5

3 岩爆的影响因素和防治措施

3.1 综合评判内外部影响因素

岩爆不是单一因素引起的,而是多因素耦合作用的典型结果。

要想准确地评判岩爆发生的容易程度,不能片面地看内部影响因素或外部影响因素。大多数时候,要综合评判内外部影响因素,再根据岩性条件选择相适应的判据,以求得一个更加准确的结果。

3.2 岩爆防治措施

深埋隧道开挖后,根据岩爆的影响因素采取相应的防治措施以降低岩爆发生几率。常见的措施有洞壁喷水、打应力释放孔、高压钻孔注水、以及其他围岩加固措施。

洞壁喷水是通过增加围岩含水率,从而使围岩强度降低,塑性增加,脆性降低,泊松比增大,促进围岩软化,达到降低岩爆发生的可能性或降低岩爆发生烈度的目的。

打应力释放孔可改善岩体应力状态,提前释

放围岩应力,从而达到降低岩爆发生可能性或者降低岩爆发生烈度的目的。

高压钻孔注水结合了喷水和打应力释放孔,改善围岩应力状态的同时软化围岩,岩爆防治效果较好,但操作相对复杂。

在地应力较为集中的隧道段落,适当调整开挖速率、开挖方式、以及开挖断面形式,通过减少围岩扰动、减缓应力重分布速率的方式来降低岩爆发生的几率。

岩爆防治还可通过加固围岩的方式,如喷射混凝土、钢拱架以及锚杆支,均对岩爆防治有较好效果。

4 结论

岩爆是深埋隧道施工过程中常见的一种地质灾害,其爆发的突然性以及其强大的破坏性,严重影响了施工进度、现场施工人员的安全以及施工设备等财产安全。本文通过总结目前已有研究的岩爆影响因素以及防治措施,得出以下结论:

(1)岩爆不是单一因素引起的,而是多因素耦合作用的典型结果。围岩岩性和初始地应力条件是岩爆的首要考虑因素,但对同一岩石类型,不同的判据也会产生不同的判断结果,其准确性值得评价和比较。

(2)在深埋隧道的开挖中,由于对围岩的扰动导致应力重分布引发岩爆,应及时采取相应的支护措施来降低岩爆的风险,并根据发生岩爆的可能性,在不同深度采取更为合适的开挖速率、开挖方式。

(3)岩石外部因素受施工影响较大,且施工的质量对岩爆发生有直接关系,应做好地质记录工作,对开挖后隧道进行监测,必要时采取喷水、打应力释放孔等方式降低岩爆发生几率。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [2] 李桐,冯夏庭,王睿,等.深埋隧道岩爆位置偏转及其微震活动特征[J].岩土力学,2019,40(7):2847-2854.
- [3] 冯夏庭,赵洪波.岩爆预测的支持向量机[J].东北大学学报(自然科学版),2002,23(1):57-59.
- [4] 冯夏庭,陈炳瑞,明华军,等.深埋隧洞岩爆孕育规律与机制:即时型岩爆[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):433-444.

[5] Gong Fengqiang, Wang Yunliang, Luo Song. Rockburst proneness criteria for rock materials: Review and new insights [J]. Journal of Central South University, 2020, 27 (10): 2793-2821.

[6] 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. . .

[7] 魏新江, 陈涛涛, 王霄, 等. 岩爆灾害研究与进展 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 1-12. . .

[8] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865-876. . .

[9] 黄润秋, 王贤能. 深埋隧道工程主要灾害地质问题分析 [J]. 水文地质工程地质, 1998, (4): 23-26. . .

[10] 谢杰辉. 岩石破裂过程的自组织临界特性及岩爆倾向性 [D]. 南华大学, 2018: 18-24. . .

[11] 冯涛, 谢学斌, 王文星, 等. 岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性系数 [J]. 矿冶工程, 2000, 20(4): 18-19. . .

[12] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, 22(1): 60-64.

[13] ZHOU Jian, SHI Xiuzhi, HUANG Rendong, et al. Feasibility of stochastic gradient boosting approach for predicting rockburst damage in burst-prone mines [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (7): 1938-1945.

[14] Kidybiński A. Bursting liability indices of coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18 (4): 295-304.

[15] Zhou Jian, Li Xibing, Mitri Hani S, et al. Classification of rockburst in underground projects: comparison of ten supervised learning methods [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(5).

[16] 谢和平, 陈至达. 岩石断裂的微观机理分析 [J]. 煤炭学报, 1989, (2): 57-67.

[17] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, (1): 60-64. . .

[18] 邓林, 武君, 吕燕. 基于岩石应力应变过程曲线的岩爆能量指数法 [J]. 铁道标准设计, 2012, (7): 108-111.

[19] Yin Xiangchu, Wang Yucang, Peng Keyin, et al. Development of a New Approach to Earthquake Prediction: Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157 (11-12): 2365-2383.

[20] Gong Fengqiang, Wu Chen, Luo Song, et al. Load - unload response ratio characteristics of rock materials and their application in prediction of rockburst proneness [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2019, 78 (7): 5445-5466.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准 GB/T 50218-2014 [S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2014.

[22] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范. TB 10003-2016 [S]. 北京: 国家铁路局, 2016.

作者简介:

唐登志(1977-), 男, 四川华蓥人, 本科, 高级工程师, 主要从事高速公路项目管理工;

白根铭(1992-), 男, 云南昆明人, 硕士, 工程师, 主要从事高速公路项目管理工;

陈爽(1993-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 工程师, 主要从事高速公路项目管理工;

曲宏略(1984-), 男, 山东青州人, 博士, 副教授, 主要从事岩土与地下工程方面的教学和研究工作;

李博文(1990-), 男, 四川达州人, 硕士, 主要从事岩土方面的研究工作;

蔡永灵(1998-), 男, 四川广安人, 硕士, 主要从事岩土方面的研究工作.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 6 页)

[8] HINTON D, HOTCHKISS R, AMES D P. Comprehensive and Quality - Controlled Bedload Transport Database [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(2), 89-93.

[9] RYAN S E, PORTH L S, TROENDLE C A. Defining phases of bedload transport using piecewise regression [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(9): 71-

75.

作者简介:

江雨润(1995-), 男, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要从事泥沙输移方面的研究;

黄尔(1972-), 男, 四川营山人, 研究员、博导, 主要从事泥沙输移及河道演变规律等方面的研究.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 10 页)

姚强(1987-), 男, 陕西宝鸡人, 副教授, 博导, 主要从事工程爆破、水电水利工程施工技术方面的研究;

吴钰(1996-)男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事三维激光技术在堆石坝施工中的应用研究;

王千(1992-)男, 四川达州人, 本科工学学士, 工程师, 主要从事

水利水电工程施工;

陈星艮(2000-)男, 四川乐山人, 硕士研究生, 主要从事水工结构工程研究;

李洪涛(1979-), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博导, 主要从事工程爆破、水电水利工程施工技术方面的研究.

(责任编辑:卓政昌)