

基于超剪应力控制的岩爆防治措施研究

严 鹏, 陈祥荣, 单治钢, 周 永

(中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

摘 要: 简要介绍了断裂型岩爆的超剪应力理论, 初步讨论了爆破开挖扰动对超剪应力的影响, 并从控制超剪应力的角度建议了相应的岩爆防治方法, 给出了工程实例。研究表明, 开挖动态扰动将使断裂两侧岩体在较低的超剪应力条件下就产生滑动, 另外, 高地应力条件下爆破开挖过程中地应力动态卸载扰动可以引起围岩中动态剪应力的增大, 直接增大超剪应力, 这两种情况都可能导致岩爆的发生。因此, 可从控制爆破扰动的角度来控制岩爆的发生, 具体措施有炮孔合理布置、起爆网络的优化和加强支护。

关 键 词: 岩爆; 岩体结构; 超剪应力

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Study of rock-burst prevention measures based on controlling the super shear stress

YAN Peng, CHEN Xiang-rong, SHAN Zhi-gang, ZHOU Yong

(East China Investigation and Design Institute, CHECC, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The theory of super shear stress is briefly introduced, and the influence of the blasting excavation disturbance on the super shear stress is studied, and then, the rock-burst prevention method based on controlling the super shear stress is advised. Then engineering practices are given. The result shows that the sliding of both sides of fractures can be induced by dynamic excavation disturbance under low super shear stress condition and the super shear stress can also be strengthened by dynamic unloading stress wave during blasting excavation. The two conditions can both lead to rock-burst. So the rock-burst prevention can be carried out based on controlling the excavation disturbance. The measurements include the boreholes arrangement, optimization of initiation network and strengthening the supporting.

Key words: rock-burst; structure of rock mass; super shear stress

1 引 言

国家产业政策调整和西部大开发战略的实施, 使我国水电建设进入发展的时期。与已建成的水利水电工程相比, 当前开发的水电工程多处于我国西部地区的崇山峻岭中, 巨型的地下工程大量出现, 关键施工技术问题突出。岩爆是地应力较高的地下工程开挖过程中常遇到的工程地质问题, 是一种人类活动诱发的围岩的动力破坏现象, 其表现形式有岩石弹射、大量岩石坍塌或矿震等, 常常造成开挖工作面的严重破坏、设备损坏和人员伤亡。

由于岩爆对深埋洞室开挖和深部开采具有很

大的危害性, 引起了很多学者的关注。张悼元等^[1]认为岩爆的产生需要具备如下两方面的条件: 高储能体的存在, 且其应力接近岩体强度是岩爆产生的内因, 某些附加荷载的触发是其产生的外因; 谭以安^[2]利用扫描电镜对天生桥引水隧洞灰岩岩爆碎片进行观察研究后对岩爆的解释与此基本一致; 侯发亮等^[3]认为影响岩爆的最为主要的因素有两个, 即岩石的性质和围岩的应力条件。岩爆的成因主要取决于岩性, 它是岩爆的内因, 是岩爆的充分条件; 其次, 取决于围岩应力条件, 它是岩爆的外因, 是岩爆的必要条件。只有在具有发生岩爆固有属性的岩体中, 同时又具备使该岩体发生的岩爆的外部必

要条件, 岩爆才能发生。

随着对岩爆认识的深入, 人们逐渐意识到岩体结构对岩爆的重要影响。欧阳孝忠^[4]通过天生桥二级水电站引水隧洞开挖过程中岩爆发生特性和规律的总结, 提出了岩爆发生的影响因素: 岩性、结构面和地应力。其中地应力不仅指原始地应力, 而且包括地应力的重分布。而地应力的重分布可能由开挖施工、原始地貌和软弱结构面引起。图 1、2 给出了天生桥引水隧洞施工过程中受岩体结构面的影响而发生的一次强烈岩爆的情况。当 II 号主洞开挖至 3+200 m 桩号时, 在 3+183 m~3+200 m 洞段左上拱及顶部发生了岩爆, 前后历经 20 多天, 在洞的左上方及顶部形成一个高 5~6 m, 长 7 m, 宽 10 余米的岩爆坑。

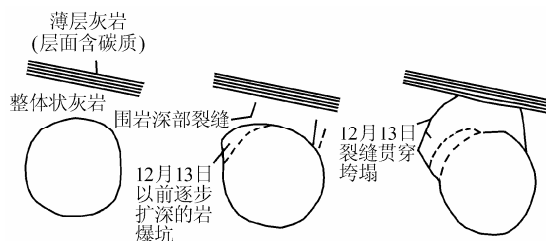


图 1 天生桥引水隧洞 II 号主洞 3+191 桩号受弱面影响而发生的岩爆示意图

Fig.1 The rock-burst at 3+191 in tunnel II of Tianshengqiao Hydropower Station caused by faults

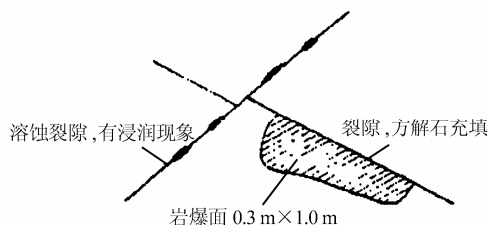


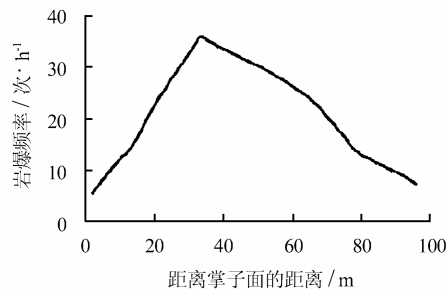
图 2 天生桥引水洞 II 号主洞 3+191 桩号岩爆地质素描

Fig.2 The geological sketch of rock-burst at 3+191 in tunnel II of Tianshengqiao Hydropower Station

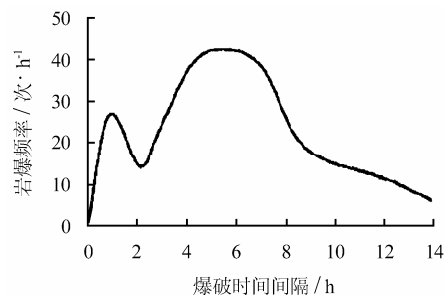
锦屏辅助洞施工中也遭遇到的一系列强岩爆, 根据现场观察, 这些岩爆大多与一组中等倾角 (现场估计 40° 左右) 节理有关。该组节理的特点也是表面新鲜呈刚性特征, 无软弱物质充填, 走向与隧洞轴线的角度相交^[5]。

除了岩体的结构面条件外, 开挖扰动也是影响岩爆的重要因素。工程实践证明, 绝大多数岩爆都发生在掌子面附近一定范围内。天生桥引水隧洞岩爆主要发生距离掌子面 5~10 m 的地方; 太平驿电站岩爆主要发生在距离掌子面 2~30 m 的区段, 二滩水电站左导流洞岩爆一般发生在距离掌子面 2~

10 m 的范围内; 秦岭隧道施工过程中岩爆发生次数和发生的时间及距掌子面距离的关系如图 3 所示^[6]。



(a) 岩爆次数与距掌子面距离的关系



(b) 岩爆次数与开挖时间的关系

图 3 秦岭隧道岩爆频率与距离和滞后爆破时间的关系^[6]

Fig.3 The relationship between rock-burst and distance & delay time in Qingling Tunnel^[6]

这些工程实例足以表明开挖扰动对岩爆发生的控制作用。关宝树教授在总结国内外许多地下工程岩爆的发生条件后曾指出, 地质条件相同时, 采用 TBM 施工的隧道可能不发生岩爆, 而用钻爆法施工的隧道就可能发生岩爆^[7]。因此可以认为, 爆破固然是岩爆的一种诱发或激发性因素, 但更重要的是, 在某种条件下它还是一种重要的控制性因素。王贤能^[8]的研究认为, 爆破动力扰动不仅仅是触发岩爆, 还使岩爆的规模发生变化。

在这些工作的基础上, 徐林生^[9]比较全面地总结了岩爆的条件, 包括地应力条件、岩性条件、岩体结构条件、地质构造条件、水文地质条件和开挖施工因素等。但岩爆发生的这些条件并不是孤立存在的, 比如, 岩体的结构和地应力构造就可以显著地影响地应力, 而开挖扰动也对岩体结构条件有较大影响。1982 年, 南非在对岩爆进行微地震监测的基础上形成岩爆的概念, 认为岩爆是微地震的一种表现形式, 是一种导致了人员伤亡、工作面或设备发生破坏的微震, 其基本特性是突然和剧烈。岩爆的微震定义实质上也强调了开挖动态扰动对岩体中裂纹非稳定扩展的影响。然而, 目前有关开挖扰动对可能诱发岩爆断裂影响的研究还不多见。本文简要

介绍了断裂型岩爆的超剪应力理论，初步讨论了爆破开挖扰动对超剪应力的影响，并从控制超剪应力的角度建议了相应的岩爆防治方法，最后给出了工程实例。

2 超剪应力的基本理论

到目前为止获得的断裂型岩爆机理的一般性认识可以简要地描述如下^[5]：

(1) 在自然条件下，刚性断裂的起伏特征部位可能为岩体沿断裂的错动变形提供了“阻滑”作用，在地质历史上的构造运动过程中，这种起伏部位可能更容易积聚高的地应力，形成局部高地应力场，在这种局部高地应力场部位的开挖可能使这些部位岩体具有更强烈的应力变化，并可能导致起伏体的破坏和断裂两侧岩体的错动趋势，使得原来积累的能量突然地大量释放，产生微震；

(2) 或者，即便这些起伏部位不存在局部应力场，在工程开挖过程中，当应力集中作用在断裂的某些起伏或交叉部位时，这种局部不利几何形态也可以有利与围岩二次应力出现局部集中，从而导致起伏体的破坏，产生微震；

(3) 在深埋高围压条件下，即便断裂的起伏特征不明显，断裂也可以具备良好的强度（断裂强度的围压效应），一旦断裂的受力状态可以克服这种强度时，断裂的破坏和潜在滑动趋势可能使断裂强度很快发生显著降低（获得残余强度），峰值强度和残余强度之间的显著差别导致了大量的能量释放，形成微震。

不论实际情形是上述的哪种可能情况，其共同特征都是断裂发生破坏，破坏前的峰值能量和破坏后的残余能量之间可以存在显著差别，这种能量差是微震的动力来源，能量以动力波在岩体中的传播即构成了微震现象。

鉴于这一共同特征，Ryder 在 1986 年提出了超剪应力的概念，在断裂的潜在滑动部位，断裂的峰值强度可以定义为^[5]

$$\tau_s = c_s + f_s \sigma_n \quad (1)$$

式中：下标 s 表示静态参数； c 和 f 分别是断裂面的黏结力和摩擦系数； σ_n 为该部位的法向应力大小。

一旦滑移破坏开始发生，断裂的这一部位处于一种动态环境下，通常情况下，此时断裂的黏结强度降低为 0。这种动态条件下断裂的强度为

$$\tau_d = f_d \sigma_n \quad (2)$$

式中的下标 d 表示动态。

式 (1) 和式 (2) 之差描述了滑动破坏发生前后的剪应力差别，即超剪应力（这两种条件下的法向应力大小可以不同）。

根据 Ryder 对南非矿山的研 究，当断裂上的超剪应力大小达到 5~10 MPa 的量级水平，或者在岩体中超过 20 MPa 时，微震现象即可能发生。

3 开挖扰动对超剪应力的影响

3.1 扰动对超剪应力阈值的影响

张倬元等^[1]的研究表明，应力波在穿过某些地质界面（结构面或断裂）时，由于两侧介质特性的差异，将产生反射波。界面处的反射应力波（ σ_f ）和透射应力波（ σ_t ）与入射应力波（ σ_u ）之间有如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_f &= \frac{\sigma_u (1-n)}{n+1} \\ \sigma_t &= \frac{2\sigma_u}{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $n = \sqrt{\rho_1 E_1 / \rho_2 E_2}$ ， ρ_1 、 ρ_2 和 E_1 、 E_2 分别为界面两侧岩体的密度和弹性模量。

当应力波从相对坚硬的岩体传入较软弱的岩层中，即 $E_1 > E_2$ 时，由于 $n > 1$ ，产生的反射波为拉伸波，则在界面处产生拉应力，并且，两侧介质的弹模相差越大，拉应力值就越高。这种性质的拉应力对岩体的稳定极为不利。岩体中的裂隙面，尤其是具有一定张开度或被充填时，其就是介质特性突变的部位，也将产生反射拉应力波，促使其被拉裂。卢文波和陶振宇^[10]的研究则进一步表明，当入射应力波的波幅和入射角度满足一定关系时，扰动应力波将导致界面两侧的岩体发生滑动。

另外，外界扰动作用下岩块系的超低摩擦效应也被认为是断裂型岩爆的可能机制之一^[11]。首先当动力冲量作用于岩块系统时，由于岩体（岩块系）的振动，岩石间的相对压紧程度会随时间变化。可以设想，在某些时刻，当岩块间相对疏松时，岩石间的摩擦力和摩擦系数会大大降低（降低达数倍），这就是所谓的岩块系中的超低摩擦效应。由于超低摩擦效应，岩块系中岩石的运动（转动和平动）更加容易实现。由于摩擦系数的降低，平衡的约束条件被破坏，岩块系的临界平衡条件变化导致岩块的运动；其次是岩块系中准共振现象，由于超低摩擦效应是与岩块系的振动同时产生的现象，所以其大小应是随时间而变化的，即具有频率特性，当激发

动力冲量的频率与其相应时,可以预期岩块的运动(振动)会加剧,这种岩块系中所谓的准共振现象在实验室和野外测试中都已经观察到。

综上所述,开挖动态扰动将使断裂两侧岩体在较低的超剪应力条件下就产生滑动,诱发微地震或者岩爆,这就是开挖扰动对断裂型岩爆影响的微观机制。

3.2 地应力瞬态卸载对超剪应力的影响

开挖扰动除了因为降低断裂表面的滑动超剪应力门槛值和岩块系的超低摩擦效应而具备诱发微地震和岩爆的作用外,其中的某些成分也可直接引起超剪应力的增大。

卢文波等^[12]通过理论分析证实隧洞钻爆开挖时初始地应力的卸载是一个动态卸载过程,它将在围岩中激起动态卸载波,并认为岩体初始应力场的瞬态卸载理论能较好解释不同结构面条件下岩体开挖过程的动态松动机理;卢文波、严鹏等^[13, 14]进一步证实,在一定的地应力水平下(如图4中所示的20 MPa),距离卸载边界一定深度的围岩中,初始地应力的动态卸载所引起动态卸载振动有可能超过爆炸荷载所诱发的振动而成为围岩总体振动的主要成分(图中VIS表示地应力动态卸载所诱发的振动峰值,后面的括号中为不同的地应力水平,VBL表示爆炸荷载所诱发的振动峰值)。

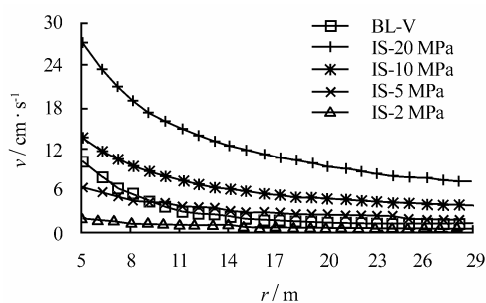


图4 静水应力场中爆炸荷载和初始应力动态卸载所分别诱发的围岩峰值振速与距离的关系^[9]

Fig.4 Peak particle velocity induced by initial stress dynamic unloading and blast load respectively^[9]

图5给出了圆形洞室开挖过程中距离开挖边界 $r = 2a_0$ 和 $r = 5a_0$ 处初始地应力动态卸荷(钻爆开挖)、准静态卸荷(TBM开挖)的情况时主应力差值($\sigma_1 - \sigma_3$)的时程曲线。可以看出,和准静态卸载相比,初始应力动态卸载产生较大的主应力差值,而且有十分明显的波动过程,因此,地应力动态卸载扰动可以引起围岩中动态剪应力的增大,直接增大超剪应力。

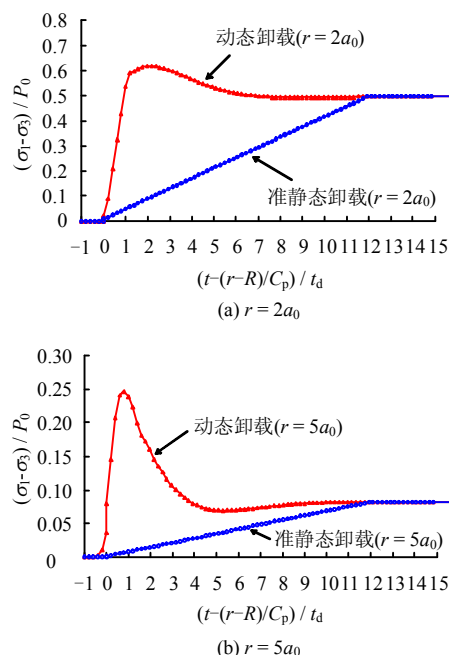


图5 初始应力准静态、动态卸载时主应力差值时程曲线^[15]
Fig.5 Differences between maximum and minimum principle stresses during quasi-static and dynamic unloading^[15]

4 基于超剪应力理论的岩爆防治

根据岩爆的超剪应力理论,地下工程开挖过程中的开挖扰动可能使断裂两侧岩体在较低的超剪应力条件下就产生滑动,另外,在高地应力条件下进行钻爆开挖时,地应力的瞬态卸载扰动甚至可以超过爆炸荷载扰动而成为开挖扰动的主要部分,而这一扰动可直接使裂隙面上的超剪应力增大。

基于这些认识,工程中岩爆控制主要从两个方面着手,一是以防为主的措施,降低爆破开挖扰动对不利结构部位岩体的影响,或者控制爆破强度,采用“短进尺,弱爆破”的开挖方法;或者采用合理起爆网络和起爆顺序,以减小最大主地应力方向上的地应力动态卸载;二是以治为主的措施,对岩体施加足够的支护,改善围岩应力状态和其物理力学特性,提高岩体结构面的抗剪能力,即使是在围岩中出现能量释放和波动荷载条件下,围岩不至于出现剧烈型破坏(即岩爆),而表现成其他不对工程造成严重危害的缓和形式(如变形)。

4.1 爆破开挖扰动的控制

隧洞施工中常用的控制爆破扰动的方法是“短进尺,弱爆破”,而且这一方法在天生桥二级电站引水隧洞、二郎山公路隧道、秦岭铁路隧洞等诸多工程实践中被证明是十分有效岩爆控制措施^[14, 15]。根据本文的分析结果,控制高地应力条件下的爆破开挖扰动要从控制爆炸荷载扰动和地应力瞬态卸载扰动两方面入手,而“短进尺,弱爆破”的方法正好

符合了这两方面的要求，缩短进尺、减少装药量控制了爆炸荷载扰动，另外缩短进尺减小了地应力的卸载面从而降低了地应力的卸载扰动，因此，此方法在实际工程应用中取得了很好的岩爆防治效果。但是缩短进尺意味这掘进效率的降低，同时缩短进尺、减小装药未能从根本上改变隧道围岩中地应力集中的状况，是一种单纯以牺牲掘进效率为代价的岩爆防治方法。因此采用合理的炮孔布置、起爆网络来降低地应力瞬态卸载效应、最终控制爆破开挖扰动才是真正的出路。

为加快开挖进度，目前大型地下厂房开挖均采用三大洞室上部开挖和底板以下尾水洞开挖同时进行、最后底板一次贯通的开挖程序。由于开挖卸荷和围岩应力重分布的影响，底板岩体在贯通前水平向应力高度集中，并积累了很大的弹性应变能。大规模的底板爆破贯通，必然引起底板岩体应力（地应力）的快速释放，导致围岩瞬态卸荷回弹、突发大变形，并进一步诱发围岩剧烈岩爆。

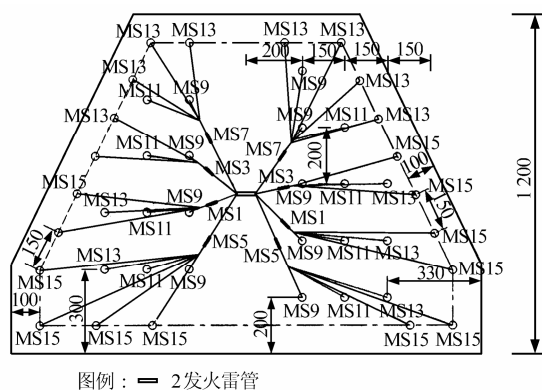


图6 瀑布沟电站地下厂房底板与尾水连接洞贯通爆破设计
Fig.6 Blasting design for connection and run-through of the bottom plate and tailrace tunnel in Pubugou underground powerhouse

二滩水电站地下厂房开挖过程中，曾出现了两次大范围围岩变形突变并伴随剧烈岩爆^[16]：第一次由2号尾调室南端台阶开挖高程1010~989 m一次性贯穿所引起，造成了2号尾调室上游边墙上部岩体变形量一次性增加30~60 mm，同时诱发了附近岩体大范围开裂及岩爆，特别是1和2号尾水管之间，岩柱中段因严重岩爆而抛射的方量达150 m³；第二次大范围围岩变形突变及岩爆由2号机窝从高程998.0~979.8 m一次性贯穿引起，诱发了厂房桩号0+60~0+130 m段中下部台阶岩体大变形，最大变形增加量达24~41.5 mm；造成邻近衬砌钢筋混凝土开裂、厂房吊顶上抬及4根175 t级锚索拉断。

瀑布沟水电站地下厂房底板与尾水连接洞贯

通时，汲取了二滩工程的经验教训，采取了分层贯通的方式，同时对于每一分层尽量分多段起爆（如下图6所示），这样就极大地减小了贯通时的地应力卸载面，同时较小了爆破扰动和地应力动态卸载扰动，从而从主动控制的角度保证了开挖安全。

另外，瀑布沟水电站主厂房中部深孔拉槽过程中，为减小地应力动态卸载扰动的影响，对起爆网络进行了优化，如图7所示。经过优化，先期起爆的爆破为后续炮孔创造了良好的临空面条件，同时先一步释放了地应力。有效地控制了总体爆破振动。

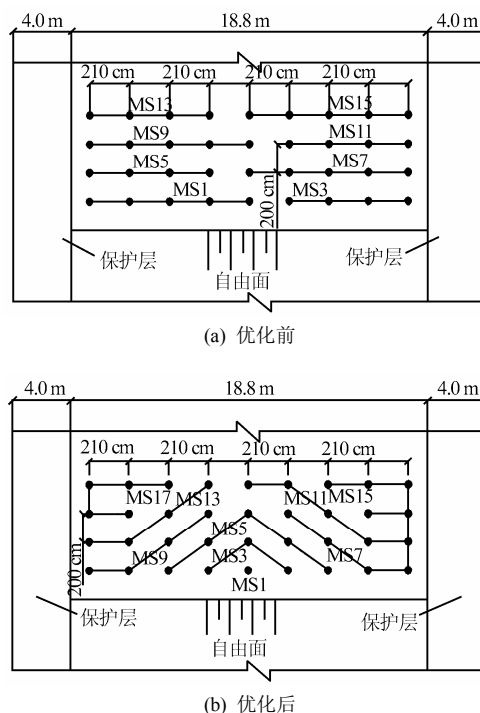


图7 瀑布沟水电站地下厂房主厂房拉槽起爆顺序优化
Fig.7 Optimization of initiation network in Pubugou underground powerhouse

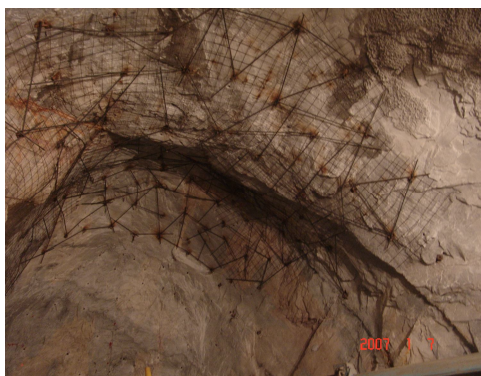
4.2 加强支护

国内某水电工程深埋特长交通隧洞长约17.5 km，一般埋深为1500~2000 m，最大埋深达2375 m，实测地应力值达到44 MPa，地应力场反演的辅助洞沿线最大主应力值达到70 MPa左右，施工过程中遇到强烈的岩爆，而且这些岩爆均与一组断裂密切相关，见照片1。

对岩爆洞段，广泛地采用了锚喷支护的方法对围岩进行了加固，取得了很好的效果。在岩爆较频繁、中等强度的情况下，通常作法是在相邻锚杆之间焊接连接筋，这样不但可以允许岩体有适当的位移，还可将岩体破裂面两侧的锚杆联系起来，最大限度的增加其抗剪和自稳能力，取得了良好的效果，具体见照片2。



照片1 与断裂相关的岩爆
Pic.1 The rock-burst caused by faults



照片2 岩爆后的喷锚支护
Pic.2 The support for controlling rock-burst

5 结 论

经过分析和讨论,可以得到如下结论:

(1) 岩体结构和开挖扰动均对岩爆的发生具有重要影响。

(2) 开挖动态扰动将使断裂两侧岩体在较低的超剪应力条件下就产生滑动,产生微震,并可能最终诱发岩爆。

(3) 高地应力条件下爆破开挖过程中地应力动态卸载扰动可以引起围岩中动态剪应力的增大,直接增大超剪应力,增大断裂型岩爆发生的风险。

(3) 根据断裂面上的超剪应力论,岩爆的防治措施大体分为两类:一是以防为主的措施,降低爆破开挖扰动对不利结构部位岩体的影响,或者控制爆破强度;或者采用合理起爆网络和起爆顺序以减小地应力动态卸载;二是以治为主的措施,对岩体施加足够的支护,提高岩体结构面的抗剪能力。

(4) 本文所建议的方法在实际工程的岩爆防治过程中取得了十分明显的效果,这从另一个侧面证明了本文对岩爆机理把握的正确性。

(5) 开挖动态扰动的两种成分(爆破扰动和初始地应力动态卸载扰动)各自对岩体断裂面上超剪应力的影响还需要进行进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [2] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质工程地质, 1989, (1): 34—38.
- [3] 侯发亮, 刘小明. 岩爆成因再分析及烈度划分探讨[C]//第三届全国岩石动力学会议论文集. 桂林: [s. n.], 1992.
- [4] 欧阳孝忠. 深埋隧洞岩爆特征及规律成因浅析[J]. 贵州水力发电, 1996, (27): 16—21.
- [5] 朱焕春. 锦屏二级水电站辅助洞岩爆控制研究和实践成果报告[R]. 上海: 华东勘测设计研究院, 2007.
- [6] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春, 等. 静荷载理论在岩爆研究中的局限性及岩爆岩石动力学机理的初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 255—1 262.
- [7] 关宝树, 张志强. 隧道发生岩爆的基本条件研究[J]. 铁道工程学报, 1998, (增刊): 326—330.
- [8] 王贤能, 黄润秋. 岩石卸荷破坏特征与岩爆效应[J]. 山地研究, 1998, 16(4): 281—285.
- [9] 徐林生. 川藏公路二郎山隧道高地应力与岩爆问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 577.
- [10] 卢文波, 陶振宇. 界面滑动引起的透反射波幅瞬变研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(6): 35—39.
- [11] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(3): 1—5.
- [12] 卢文波, 金李, 陈明, 等. 节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 653—4 657.
- [13] 卢文波, 陈明, 严鹏, 等. 高地应力条件下隧洞开挖诱发围岩震动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 329—3 334.
- [14] 易长平, 卢文波, 许红涛, 等. 岩体开挖过程初始应力的动态卸荷效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 750—4 754.
- [15] 严鹏. 岩体开挖动态卸载效应研究[博士学位论文 D]. 武汉: 武汉大学, 2008.
- [16] 李正刚. 二滩水电站地下厂房系统洞室围岩变形研究[J]. 四川水力发电, 2004, 23(1): 43—47.