DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0343-07

深埋地下洞室断裂型岩爆机理的数值模拟*

赵红亮[1,2],周又和[1,2]

(1.兰州大学土木工程与力学学院,甘肃 兰州 730000;
2.兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:针对深部岩体中由断层、节理等不连续性结构面引发的岩爆地质灾害,根据深埋地下隧洞中潜在发震断裂的分布特征和几何形态建立数值分析模型,采用离散元单元法模拟存在刚性平直断裂的深部围岩的开挖响应,并分别考察开挖接近并通过断裂附近时围岩应力状态的变化特征。通过探讨断裂的存在对围岩应力状态改变的作用机理,揭示出断裂型岩爆是开挖面附近一定范围内存在的断裂构造在高应力作用下发生错动,导致能量突然释放,对围岩造成强烈冲击作用的结果,基本与地震的断层"粘滑"机制相类似。

关键词:爆炸力学;岩爆机理;离散单元法;地下洞室

中图分类号:O383.2 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

随着西部大开发战略的实施,相应带动我国基础设施建设、资源与能源开发正以前所未有的速度蓬勃发展。受地形、地质条件限制,我国水能资源的开发主要分布于西部高山峡谷地区。在西部复杂地形和地质条件下建设大型地下工程,不可避免地会出现高应力问题[1-2]。深部地下隧洞的开挖过程一般处于高地应力状态下,由于开挖卸荷和复杂地质构造作用,围岩中的集中应力会突然释放,使坚硬脆性岩体发生爆裂、松脱、剥离、弹射乃至抛射性破坏等岩爆现象,给隧洞围岩的稳定性和人员设备安全造成严重威胁[3-4]。以 R. E. Goodman[5]、S. C. Bandis 等[6]、谷德振[7]为代表的一大批岩石力学与工程地质学家发现岩体结构对岩体力学有着重要的影响,认为岩体结构是岩体不同于其他材料的本质特点,并控制着岩体的应力场分布状态,进而控制着岩体的稳定性。随着人类岩体工程活动逐渐由浅表向深部扩展,进一步发现浅表与深部岩体赋存的地质环境迥异,前者长期处于一种低围压、低地温状态,而后者长期处于一种高围压、高地温状态。浅表岩体受风化卸荷等表生改造强烈,Ⅳ级结构面多处于显性状态,Ⅲ级结构面都有明显地表出露,较容易探查,而深部岩体结构面高度隐蔽,Ⅱ级和Ⅲ级结构面长期处于高围压状态且呈隐性。但在开挖卸荷状态下,深部岩体的Ⅱ级、Ⅲ级结构面的力学效应可能会发生显著恶化,引发岩爆的可能性不断增大。大量的工程实践也证明,当深埋地下工程开挖到某些断裂附近时往往会诱发剧烈的岩爆破坏。对于与断裂(地质间断面)活动有关的岩爆作用,往往不易认定其直接原因。虽然岩爆也是开挖活动触发的,但在时间上往往与掌子面(坑道施工中的一个术语,即坑道开挖中不断向前推进的工作面)的推进不存在确定的关系,其一般发生在地质间断面的附近,往往反映了整个影响区域范围内的应力变化,具有区域性。

当前,我国西部地区众多大型深埋地下工程场地或其附近往往都存在一定尺度的断裂,广泛发育的活动性断裂对高地应力的产生和岩爆灾害的发生起着显著的控制作用。虽然人们很早就已经认识到岩爆的存在,在岩爆相关领域的作了许多研究,但由于岩爆诱发因素的复杂性和岩爆显现的突发性及随机性,更加之地下工程埋深的逐渐增大和极端复杂地形地质条件的出现导致地应力显著增高,岩体结构愈加复杂,使得人们至今仍不了解深部岩体断裂结构与岩爆的内在关系[8-14]。

* **收稿日期**:2013-11-14;**修回日期**:2014-03-28
基金项目:国家自然科学基金项目(41272326);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100211120030);
中央高校基本科研业务费专项基金项目(lzujbky-2015-174);
兰州大学博士后基金项目(870870)
第一作者:赵红亮(1975—),男,博士,讲师,zhhl@lzu.edu.cn。

本文中通过离散元单元法模拟存在刚性平直断裂的深部围岩开挖响应,探讨断裂的存在对围岩应力状态改变的作用机理,揭示出断裂型岩爆是开挖面附近一定范围内存在的断裂构造在高应力作用下发生错动,导致能量突然释放,对围岩造成强烈冲击作用的结果,基本与地震的断层"粘滑"机制相类似。

1 断裂型岩爆及其认识

岩爆的分类是岩爆预测和岩爆防治的基本依据之一[15]。目前,学术界对岩爆分类尚未达成一致。张倬元等[16]按岩爆发生部位及释放的能量大小,将岩爆分为 3 大类,即洞室围岩表部岩石突然破裂引起的岩爆、矿柱或大范围围岩突然破坏引起的岩爆、断层错动引起的岩爆。古德生等[17]、李夕兵等[18]将金属矿床地下开采中深井岩爆划分为:应变型岩爆、弯曲破坏型岩爆、矿柱型岩爆、剪切型岩爆、断层滑移型岩爆等类型。不同类型的岩爆具有不同的发生条件和不同的危害程度。应变型岩爆主要发生在围岩结构完整,无贯穿性结构面的岩层中,岩石的主应力达到 40%岩石单轴抗压强度以上,岩爆表现形式以片状剥落为主,并伴有声响及岩片弹射,一般破坏性不大。断层滑移型岩爆主要发生在岩石结构完整,并伴有贯穿性结构面或断层的岩体中,岩体的应力主要集中在贯穿性结构面附近,岩体内的最大主应力往往大于或接近岩石单轴抗压强度,主要表现形式为突发性的震动,并伴有强烈的响声,在有相交结构面的围岩中往往还因岩爆震动引起大规模的坍塌,破坏性较大。

岩爆的发生与地质构造条件关系较为密切,在褶曲轴部、断裂带附近、岩层产状突变处,由于地应力集中或残存着较大的构造应力,是岩爆发生的密集地带。在地下工程实践中,通常将与断裂构造相关的一些强烈微震和深部岩爆统称为断裂型岩爆。在对深埋地下工程的剧烈型岩爆或微震进行研究时发现,大多岩爆的产生除具备应力条件以外,还经常与断裂有关。断裂破坏过程中普遍伴随有不同程度的震动,岩爆就是开挖面附近的围岩在震动冲击荷载下发生破坏的动力失稳现象。大量地应力测量结果表明,断裂构造,不论规模大小,都能对其附近的应力状态产生一定程度的影响,而且影响十分复杂。在各种尺度的断裂附近,地应力的大小和方向都发生了一定程度的变化。地应力是在地质构造运动和岩体重力等作用下形成的,地应力形成后,许多局部因素又使其发生变化使得局部应力和区域应力之间有相当大的差别,引起差别的主要原因之一就在于不同尺度的断裂构造的广泛发育。当应力集中区存在断裂构造时,断裂构造可以显著地改变其附近的应力分布:既可以降低应力集中程度,减低岩爆可能性;也可以恶化局部岩体的应力状态,导致岩爆风险增加。但到底出现哪一种情况,则与断裂的基本特征(断裂的性质、断裂产状及与围岩二次应力场的方位等)密切相关,同时还显著地受到施工方式的影响。

2 断裂型岩爆机理的数值分析

岩爆机理的研究旨在揭示岩爆发生的内在规律,确定其物理力学机制。尽管人们已经认识到断裂型岩爆的存在,但由于断裂型岩爆是极为复杂的动力失稳现象,人们对深部断裂触发岩爆的内在机理还没有统一的认识。当前,电子计算机的飞速发展使得人们可以对一些复杂系统进行计算机仿真试验,探求系统的内在规律。借助专门针对岩体中断层、层面、节理等结构面引起的非连续性问题开发的离散单元法数值分析程序,可以研究深埋条件下存在刚性平直断裂围岩的开挖响应,探讨断裂的存在对周边岩体应力状态改变的作用机理。

2.1 工程概况

锦屏二级水电站地处四川省凉山彝族自治州的木里、盐源、冕宁三县交界的雅砻江干流锦屏大河湾上,其辅助洞工程区位于川滇菱形断块,洞室上覆岩体一般埋深在 1 500～2 000 m,最大埋深约为 2 525 m,处于高地应力区,岩爆现象是其最具体的体现。锦屏辅助洞沿线发育有很多不同方位、不同规模、不同状态的断裂构造,在辅助洞的现场工作过程中观察到一些强烈的岩爆现象基本都与断裂有关,属于断裂型岩爆。根据现场勘查工作获得的认识,辅助洞的断裂型岩爆主要与 2 组断裂有关。一组是北东向的陡倾节理,与隧洞走向基本垂直。另一组是北东向中等偏缓倾节理。现场观察到的多处断裂型岩爆呈现出以下特征:

(1)锦屏辅助洞西端 B 洞施工中遭遇到一系列的强岩爆，且大多与一组 40°左右中等倾角的节理有关，该组节理表面新鲜呈刚性特征，无软弱物质充填，走向与隧洞轴线大角度相交。

(2)辅助洞西端 B 洞 4～5.5 km 段，岩爆基本上都与一组北东向断裂有关，该组断裂规模不大，表面呈刚性。另外，该组断裂以一定的间距间隔出现，岩爆产生的破坏坑基本上都位于相邻两条断裂之间，呈一定的韵律出现。

(3)辅助洞东端 B 洞 12.5～13 km 段，岩爆的破坏形式主要表现为顶拱一带的片状剥落，但在逐渐接近一条与隧洞轴线大角度相交的陡倾横向断层时，破坏程度不断增加。在临近断层的部位，隧洞断面形态发生显著变化，顶拱一带出现尖锐的鳞状岩爆坑，最大深达 1.5 m 左右。但是，当开挖穿过断层进入另一盘后，岩爆现象出现明显减弱。

2.2　数值模型

根据锦屏辅助洞潜在发震断裂的分布特征和几何形态，数值计算以辅助洞白山组埋深 2 000 m 的Ⅱ类大理岩为对象，Ⅱ类大理岩的弹性模量为31.6 GPa，泊松比为 0.22，内摩擦角为 35.04°，内聚力为 9.89 MPa。采用离散元程序建立数值分析的概化模型，分别考察开挖接近并通过断裂附近时深部地下围岩受力状态的变化，揭示相应的工程意义。计算模型取隧洞纵剖面，将陡倾节理简化成刚性垂直断裂，结合对工程开挖进尺的考虑，节理间距取为 3 m，缓倾节理的倾角取 45°。计算分析过程不考虑结构面的起伏特性，但考虑先期开挖的影响。模型包括开挖洞段和未开挖洞段，对应着分别考察掌子面前方存在陡倾节理、缓倾节理和不存在断裂 3 种不同工况。当开挖掌子面通过全部断裂发育区后，掌子面前方的岩体完整，不再受断裂影响。图 1 表示了断裂型岩爆机理数值论证分析的概化模型。

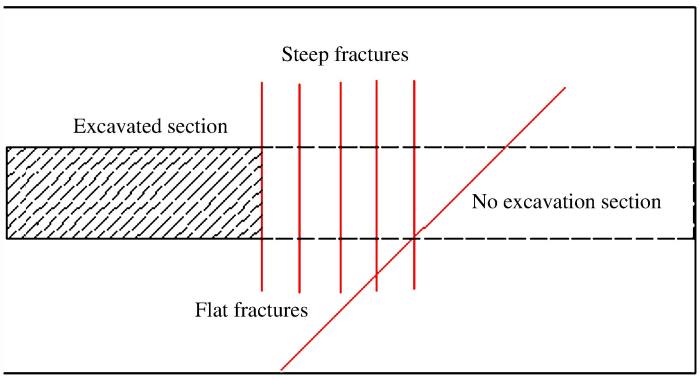

图 1　断裂型岩爆机理数值论证的概化模型

Fig. 1　The generalization model for mechanism demonstration to rock burst induced by fault

2.3　结果分析

在深部地下隧洞的开挖施工过程中，当掌子面前方存在缓倾或中等倾角的断裂构造时，尽管不存在明显的局部原始应力场异常，断裂构造也不存在起伏、交叉等现象，仅就断裂影响二次应力场的分布特征而言，深部断裂的存在可以显著地影响岩爆产生的可能性和岩爆的剧烈程度。图 2～4 分别表示了掌子面前方存在陡倾断裂和不同程度逼近缓倾断裂时掌子面前方的围岩应力分布特征，比较 3 种条件下的围岩应力分布可以看出：

(1)当开挖面逼近陡倾断裂时，掌子面前方可以形成较高的应力集中区，相应的最大主应力水平达到 120 MPa，对比与岩爆产生的应力条件是比较高的。

(2)当开挖面距离缓倾节理 6 m 左右时，掌子面前方的应力集中区逼近缓倾结构面，应力集中区形态明显受到缓倾断裂的影响，应力集中水平进一步增高，最大主应力水平达到 140 MPa 以上，并在断裂上盘岩体中产生强烈的应力集中区，构成强烈岩爆的动力来源。

(3)当开挖面通过垂直断裂，进一步逼近缓倾断裂时，应力集中部位进入到断裂的下盘岩体，出现了显著的应力衰减现象，应力集中水平显著降低，缺乏诱发岩爆的应力条件。

考虑应力集中区是潜在岩爆的动力来源，数值分析工作主要考察应力集中区部位在开挖过程中的应力变化特征和最终的应力状态。针对 3 种不同工况，数值分析中沿洞室中心线在掌子面前方 2、3、4、5、6 和 7 m 的部位分别布置 1 个应力监测点，监测其在隧洞开挖过程中应力的调整变化。记录 6 个布置在应力集中区内监测点的应力值，将围岩的应力变化过程曲线以最大主应力(σ_1)和最小主应力(σ_3)

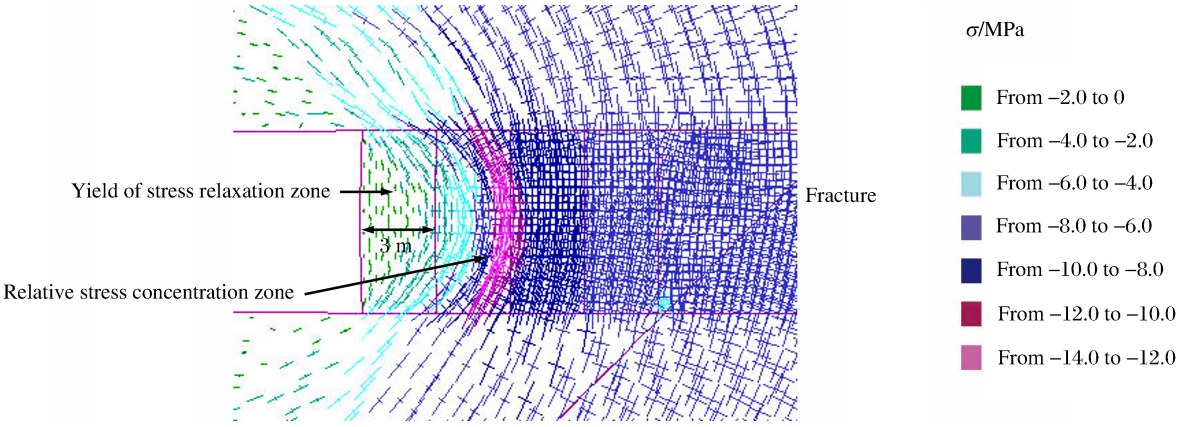

图 2 掌子面前方存在陡倾断裂时的应力分布

Fig. 2 Stress distribution with steeply inclined faults at front of heading face

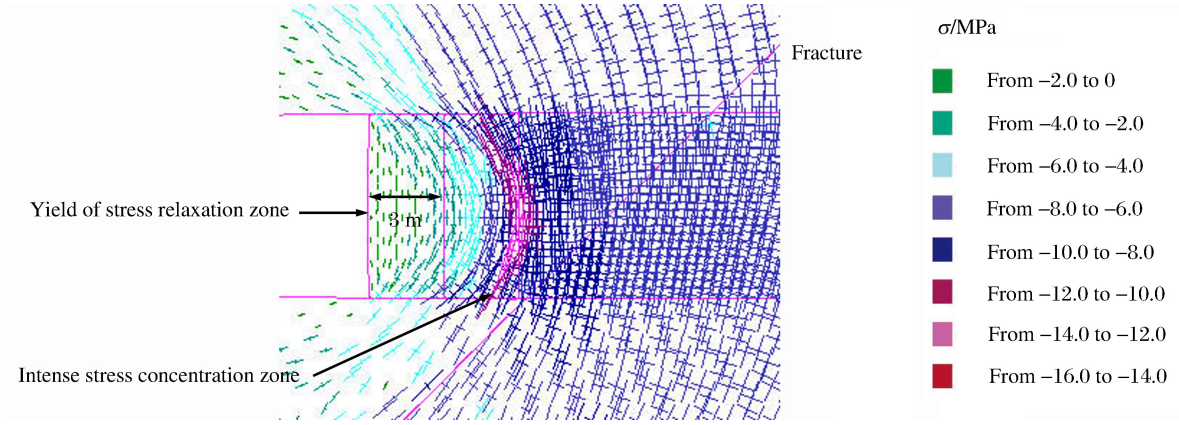

图 3 掌子面逐渐接近缓倾断裂时的应力分布

Fig. 3 Stress distribution with slow inclined faults nearby heading face

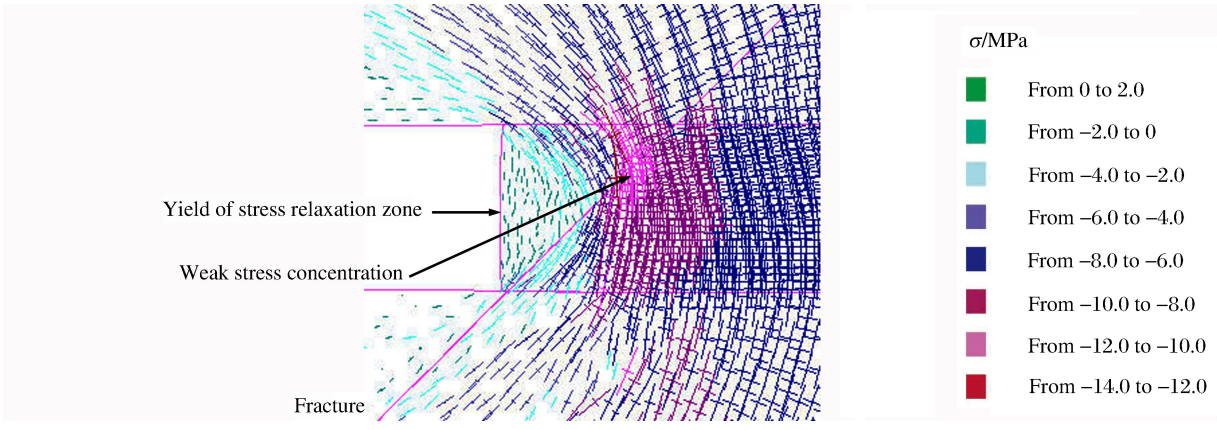

图 4 应力集中区跨过断层后的应力分布

Fig. 4 Stress distribution with stress concentration zone past fault

曲线的方式分别绘制在图 5～7 中，同时将岩体的峰值强度和残余强度包络线表示在对应图中。

在距离掌子面 2～7 m 范围内，采用不同颜色区分各应力监测曲线。第 1 种工况：开挖掌子面前方存在缓倾断裂，应力集中区最大主应力迅速上升并与强度包络线相交，表明掌子面前方 3～5 m 范围内围岩都可以在高应力水平下进入屈服状态，应力变化特征对应于潜在的岩爆可能性。第 2 种工况：随着开挖掌子面逐渐逼近缓倾断裂，掌子面前方偏下部位的应力水平显然更高，主应力水平高达 140 MPa，

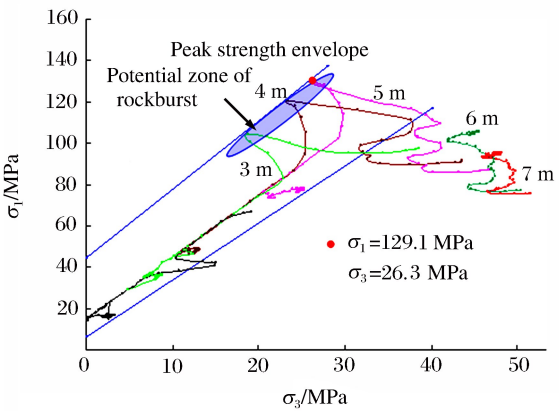

图 5　掌子面前方存在陡倾断裂时隧洞不同部位的应力变化

Fig. 5　The stress variation at significant location in front tunnel heading while presenting steep dipping fault

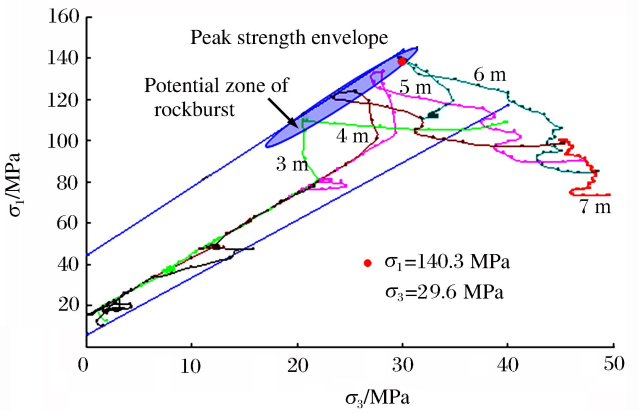

图 6　掌子面逐渐接近缓倾断裂时隧洞不同部位的应力变化

Fig. 6　The stress variation at significant location in front tunnel heading while closing slow dipping fault

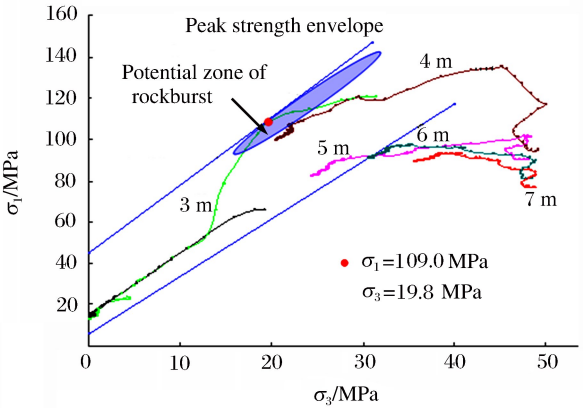

图 7　掌子面跨过断层后隧洞不同部位的应力变化

Fig. 7　The stress variation at significant location in front tunnel heading while passing slow dipping fault

应力差($\sigma_1-\sigma_3$)显著增加，在中心线上掌子面前方 3～6 m 的范围内岩体都在高应力条件下达到屈服状态，且屈服时的最高应力相应增加。更大范围和更高应力条件下的岩体屈服，明确预示着更强烈一些的掌子面岩爆风险。第 3 种工况：开挖掌子面穿过缓倾断裂后，计算结果表明只有掌子面前方3 m处的岩体在较高应力条件下屈服，主应力水平仅在 110 MPa，应力差明显下降。距离开挖掌子面更深部位，岩体应力状态受断裂的影响明显减弱，4 m 深度处的围岩最大主应力尽管也经历了一个上升过程，但没有与强度包线相交，仍然处于弹性状态。相比而言，对应条件下掌子面前方的围岩，不论是形成岩爆条件的范围和能量水平，都显著要小得多，潜在岩爆可能性显著降低，甚至缺少强岩爆的总能量水平。总体上，当掌子面前方的应力集中区接近断裂时，可以导致较大范围内应力更强烈的集中，岩爆几率更高。当应力集中区穿过断裂以后，出现显著的应力衰减现象。当断裂以一定的间距成组出现时，也造成了岩爆按相应的间距有韵律地产生，并且岩爆往往发生在掌子面接近断裂时、但和断裂存在一定距离的部位。现场强岩爆出现的规律与数值计算的分析结果也基本是一致的，证实了锦屏辅助洞现场岩爆的断裂型特性。

3　结　论

深部坚硬岩体地质条件复杂，地应力储能水平高，开挖扰动过程中围岩应力梯度和状态变化剧烈，能量发生快速聚集与释放，岩体结构分区碎裂化。深部地下开挖过程中既可能导致原有断裂的重新活动，又有可能产生新的断裂，其结果如同自然地震一样，会导致岩爆的发生，呈现与浅部工程岩体截然不同的动力响应和破坏机制：

(1)锦屏辅助洞开挖掌子面前方存在缓倾或中等倾角的断裂构造时，刚性平直的断裂构造可以因为改变二次应力场的分布而导致岩爆，断裂的存在也可以增加岩爆发生的可能性和岩爆的剧烈程度。

(2)锦屏辅助洞断裂型岩爆的发生并不是洞周高应力直接作用的结果，而是开挖面附近某一范围内存在的断裂构造在高应力作用下发生错动导致能量突然释放，对围岩造成强烈冲击作用的结果。

(3)锦屏辅助洞开挖掌子面逐渐接近潜在发震断裂时，断裂附近的主应力值发生程度不同的变化，

容易诱发断裂型岩爆。但开挖掌子面充分接近或穿过断裂以后,主应力值逐渐趋于与区域应力场一致,缺乏产生断裂型岩爆的条件。

(4)断裂型岩爆的机制可认为与地震的断层"粘滑"机制相类似。由于围压效应,深埋条件下断裂可以具备良好的强度,开挖扰动形成应力集中区时,断裂的潜在滑动趋势可能使断裂强度很快发生降低,峰值强度和残余强度之间的显著差异导致巨大的能量释放,形成岩爆。

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.
He Man-chao, Xie He-ping, Peng Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(16):2803-2813.

[2] 徐林生,王兰生,李永林.岩爆形成机制与判据研究[J].岩土力学,2002,23(3):300-302.
Xu Lin-sheng, Wang Lan-sheng, Li Yong-lin. Study on mechanism and judgement of rockburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(3):300-302.

[3] 王明洋,周泽平,钱七虎.深部岩体的构造和变形与破坏问题[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):448-455.
Wang Ming-yang, Zhou Ze-ping, Qian Qi-hu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass[J], Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(3):448-455.

[4] 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.
He Man-chao, Miao Jin-li, Li De-jian, et al. Experimental study on rockburst progresses of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(5):865-876.

[5] Goodman R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[M]. West Publishing Company, 1976.

[6] Bandis S C, Lumsden A C, Barton N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983,20(6):249-268.

[7] 谷德振.岩体工程地质力学基础[M].北京:科学出版社,1979.

[8] 徐林生,王兰生.岩爆形成机理研究[J].重庆大学学报:自然科学版,2001,24(2):115-117.
Xu Lin-sheng, Wang Lan-sheng. Study on the mechanics of rockburst[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2001,24(2):115-117.

[9] 黄峰,徐则民.用动光弹方法研究隧道岩爆的爆破扰动机理[J].爆炸与冲击,2009,29(6):632-636.
Huang Feng, Xu Ze-min. On blasting perturbation mechanism of rockburst in tunnel by dynamic photo-elasticity [J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(6):632-636.

[10] 冯涛,谢学斌,潘长良,等.岩爆岩石断裂机理的电镜分析[J].中南工业大学学报:自然科学版,1999,30(1):14-17.
Feng Tao, Xie Xue-bin, Pan Chang-liang. Fracture mechanics analysis for burst rock with electron scanning microscope[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 1999,30(1):14-17.

[11] 邹成杰.地下工程中岩爆灾害发生规律与岩爆预测问题的研究[J].中国地质灾害与防治学报,1992,3(4):48-53.
Zhou Cheng-jie. Study on the law of occurring rockburst hazard in underground engineering and its forcasting[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1992,3(4):48-53.

[12] 周瑞忠.岩爆发生的规律和断裂力学机理分折[J].岩土工程学报,1995,17(6):111-117.
Zhou Rui-zhong. Regularity of rockburst and its analysis based on fracture mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Eengineering, 1995,17(6):111-117.

[13] Kimura F, Okabayashi N, Kawamoto T. Tunneling through squeezing rock in two large fault zone of Enasan tunnel Ⅱ[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1987(20):151-166.

[14] Wang Wen-xing, Pan Chang-liang, Feng tao. Fountain rock-burst and inductive rockburst[J]. Journal of Central South University of Technology, 2000,7(3):130-132.

[15] 谭以安.岩爆类型及其防治[J].现代地质,1991,5(4):450-456.
Tan Yi-an. Types and treatments of rockburst[J]. Journal of Geoscience, 1991,5(4):450-456.

[16] 张倬元,王士天.工程地质分析原理[M].2 版.北京:中国地质出版社,1994.

[17] 古德生,李夕兵.现代金属矿床采矿科学技术[M].北京:冶金工业出版,2006.

[18] 李夕兵，古德生等. 深井坚硬矿床开采中高应力的灾害控制与破碎诱变[C]// 香山第 175 次科学会议：科学前沿与未来：第 6 集. 北京：中国环境科学出版社，2002：101-108.

Numerical simulation on mechanism of fractured rock burst in deep underground tunnels

Zhao Hong-liang[1,2], Zhou You-he[1,2]

(1. *School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*;
2. *Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Ministry of Education of China, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: Aiming at rockburst geological disaster induced by discontinuity such as faults or joints in deep lay rock mass, numerical model is presented according to distributional characteristics and geometrical aspects of potential seismic faults in underground tunnel. Subsequently, excavation response of deep lay surrounding rock with rigid flat faults is simulated via distinct element codes, and varied features of stress state in surrounding rock are examined while excavation process approaches and then passes through fault zones. Finally, Mechanism of action is discussed on the base of stress state change induced by available faults. Energy releases sharply via rockburst under high stress, and it is revealed that faulted structure occur movement within a certain region of excavation section. Rockburst impacts on surrounding rock intensely, and the mechanism is similar to fault stick slip in earthquake process.

Key words: mechanics of explosion; rockburst mechanism; discrete element method; underground tunnel

（责任编辑　王易难）