

深埋硬岩隧洞岩爆的结构面作用机制分析

周 辉, 孟凡震, 张传庆, 卢景景, 徐荣超

(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: 岩爆是深埋硬岩隧洞开挖过程中常遇到的动力地质灾害, 从锦屏二级水电站深埋隧洞施工中发现结构面对岩爆具有重要控制作用。在总结国内外结构面型岩爆研究现状、列举典型结构面型岩爆案例的基础上, 分析不同结构面类型、产状、不同生产环境、施工方法等条件下结构面对岩爆的作用机制; 提出依据不同作用机制的结构面型岩爆分类方法。分析认为: 结构面型岩爆可分为滑移型、剪切破裂型和张拉板裂型; 边墙垂直产状的结构面易使围岩压制拉裂而诱发张拉板裂型岩爆, 倾斜产状的结构面则会诱发滑移型或剪切破裂型岩爆; 未揭露的倾斜产状的结构面诱发的剪切破裂型岩爆强度可能要大于相同条件下揭露出的结构面诱发的滑移型岩爆; 采矿工程中容易发生大尺度的滑移型岩爆, 而水电交通隧洞更容易发生小尺度的滑移型岩爆, 且结构面控制爆坑深度和边界; 对剪破坏主导的结构面型岩爆, 结构面的力学性质、强度特征因控制所诱发岩爆的能量来源, 因而影响岩爆的强度等级。研究成果将对深埋硬岩隧洞结构面型岩爆的发生机制、控制方法等具有一定指导意义。

关键词: 岩石力学; 结构面型岩爆; 岩爆机制; 分类; 防治

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)04-0720-08

EFFECT OF STRUCTURAL PLANE ON ROCKBURST IN DEEP HARD ROCK TUNNELS

ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, LU Jingjing, XU Rongchao

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

Abstract: Rockburst is a dynamic geological disaster often encountered during the excavation of tunnels in deep and hard rock, and structural plane plays an important role in affecting the rockburst in deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station. On the basis of the review regarding the rockburst and the typical cases of structural type of rockburst, the roles of different types of structural plane, occurrence, and different production environment, construction methods and other conditions on rockburst were analyzed and a classification method for structural type of rockburst was proposed based on the different mechanisms. The structural type of rockburst was classified into the slip burst, the shear rupture burst and the extensile spalling burst. The extensile spalling burst was easily induced by the vertical structural plane in sidewall which makes surrounding rock suppress to tensile crack. The slip burst or shear rupture burst can be induced by the structural plane of inclined occurrence. The intensity of shear rupture burst evoked by unexposed inclined structural plane may be higher than that of slip

收稿日期: 2014-06-11; **修回日期:** 2014-09-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046902); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN115); 国家自然科学基金资助项目(41172288)

作者简介: 周 辉(1972-), 男, 博士, 1994年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.04.008

burst induced by exposed plane under the same condition. The large scale slip bursts mainly occur in mining engineering. While the small scale slip bursts are more prone to take place in hydropower and traffic tunnels, and the structural planes control the depth and boundary of the crater as well as the dimension of ejecting blocks. For the structural type of rockburst dominated by shear failure, the energy released from the burst is partly determined by the mechanical properties and the strength characteristics of the structure plane, which affects the intensity of the burst.

Key words : rock mechanics ; structure-type rockburst ; rockburst mechanism ; classification ; prevention method

1 引言

我国国民经济的快速发展对能源、交通、水电等提出了重大需求,国家适时提出西电东输、南水北调等重大战略工程,随之出现大量复杂地质条件下的深埋长大隧洞(隧道、巷道)工程。水电工程中最具代表性的锦屏二级水电站引水隧洞最大埋深达到 2 525 m,最大地应力达 60 MPa;在采矿工程领域,随着我国浅部矿产资源逐渐枯竭,大规模开采丰富的深部矿产资源已成为我国采矿工业发展的大势所趋和必然;在核废料处置、国防建设、交通等领域同样面临诸多深部岩石工程问题。可以预见,随着我国基础工程建设和资源开发的逐步深化,将会出现越来越多的深埋长大隧洞工程。

随着埋深的增大,岩体赋存的地质环境更为复杂,存在高地应力、高温、高渗透压等不同于浅埋岩石工程的现象,而开挖诱导的岩爆灾害在发生频率和破坏程度上都随深度增加,对施工安全造成重大威胁。为此,W. D. Ortlepp 等^[1-9]从岩爆发生机制、预测预报、风险预警及防控措施等方面进行了诸多研究,并将研究成果应用于工程实践中,取得了一定效果。W. D. Ortlepp 和 T. R. Stacey^[1]将岩爆分为应变型、屈曲板裂型、工作面挤出型、剪切断裂型和断层滑移型。P. K. Kaiser 和 M. Cai^[10]在此基础上将岩爆分为应变型、矿柱型、断层滑移型。朱焕春和朱永生^[11]将锦屏深埋隧洞岩爆分为应变型、岩柱型和断裂型,断裂型岩爆又包括断裂尖端型岩爆、断裂应变型岩爆和断裂滑移型岩爆。冯夏庭等^[4]从发生机制和条件上将岩爆分为应变型、应变-结构面滑移型和断裂滑移型岩爆。J. A. Ryder 等^[12-13]认为,岩爆分为工作面上应力集中造成的应变型岩爆和沿弱面的剪切破坏型岩爆 2 种类型。W. D. Ortlepp 等^[1, 14-16]从南非深埋矿山的实践中总结出剪切破坏型岩爆(包括在已存在的结构面如断层、节理上发生的断层滑移型岩爆和在完整岩体中剪切断裂型岩爆)占很大比例。当今对岩爆的分类还没有形成统一的

共识,本文关注的对象是这种与结构面(断层、层面、硬性结构面等不连续面)有关的岩爆,统称之为结构面型岩爆。

J. A. Ryder^[12]首次提出以超剪应力(*ESS*)评价和解释断层滑移型岩爆,并利用 *ESS* 通过数值方法计算震源参数(震级、地震矩、应力降、滑动长度等)。M. P. Board^[17]在 *ESS* 基础上,针对矿山中大断层性质可以完全知道、而小的结构面无法详细获得的情况,提出用精确方法描述主要断层,而用随机的统计学方法表示其他小结构面的性质(间距、长度、方位等)的评价断层滑移型岩爆的数值方法。B. G. White 和 J. K. Whyatt^[18]认为,Lucky Friday Mine 的岩爆主要是因为岩体沿层面的滑动使采场尺寸减小,导致压应力增加导致岩爆发生。T. O. Hagan 等^[19-20]通过在采矿巷道中离边墙 5 m 远处用引爆炸药来模拟岩爆,研究了地质构造(层面、裂隙)对岩爆的影响,认为弹射块体的形状一定程度上由已存在的层面决定、厚度由隧道开挖时形成的爆轰裂隙决定、宽度由层面间距决定。冯夏庭等^[4, 11-21]通过在锦屏二级水电站、天生桥二级水电站引水隧洞也发现地质构造对岩爆具有一定的影响。周 辉^[22]认为,围岩板裂面(+结构面)切割围岩形成围岩破裂结构,成为岩爆的潜在结构。C. Q. Zhang 等^[23]对锦屏二级水电站引水隧洞 4 个典型的极强岩爆实例的时空特征、支护响应等进行了详细分析,这些岩爆发生后都不同程度的揭露出了结构面。同时,C. Q. Zhang 等^[24]通过数值模拟研究发现,结构面的存在阻碍了围岩应力向深部岩体调整的过程,导致开挖边界至结构面之间的岩体应力集中和能量不断积聚。

从锦屏二级水电站深埋隧洞施工过程中岩爆发生后揭露的现场特征发现,很大部分岩爆发生区域存在规模不等的结构面(节理、硬性结构面等),且含结构面围岩发生的岩爆往往规模大、破坏力强,且可能在该洞段连续发生强岩爆。而现阶段对于这种由于结构面的存在诱导发生的强烈岩爆研究较少,结构面诱导强烈岩爆机制不清。因此,本文结

合锦屏二级水电站深埋隧洞施工过程中发生的典型结构面型岩爆案例，从不同方面分析这些结构面型岩爆的发生机制，并提出了一种结构面型岩爆的分类方法和相应的防治策略。

2 结构面对岩爆的作用机制

结构面通常具有不同的规模、产状、位置和力学性质，不同的结构面在不同的围岩应力环境、不同的开挖方法条件下对岩爆的作用机制不同，下面将结合结构面型岩爆的案例对不同条件下结构面对岩爆的作用机制做详细分析。

2.1 不同产状、位置的结构面对岩爆的作用机制

深埋岩石工程开挖过程中，遇到的结构面产状及相对于开挖空间位置各异，不同产状和位置的结构面对岩爆的诱发机制不同，并且结构面的产状和位置对岩爆的影响往往是相互关联的。

对处于隧洞边墙、与洞轴线垂直的竖直产状的结构面或节理(见图 1)，在切向应力集中作用下，结构面会进一步向最大主应力方向扩展，被结构面切割的岩板在此集中应力作用下压致拉裂，发生张拉破坏，裂纹不断萌生、扩展，最终劈裂成板、弯折鼓裂，在自身不断的应力调整或外界扰动下以一定速度弹射出来发生岩爆，形成“平底锅形”爆坑，结构面一般会作为爆坑的底部边界，爆出岩块多呈薄板状或片状。2010 年 2 月 4 日，锦屏二级水电站 2[#]引水隧洞，掌子面(桩号 K11+006)后方桩号 K11+023 南侧边墙和拱脚处发生极强岩爆，并伴随巨大声响，岩爆过后揭露出一条 NWW 走向的隐性结构面，如图 2 所示。

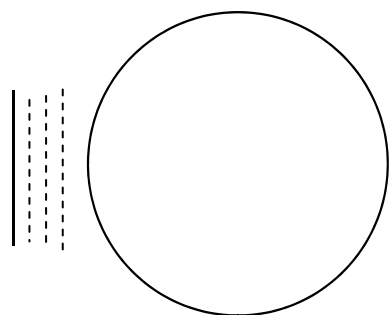


图 1 隧洞边墙竖直产状的结构面示意图

Fig.1 Sketch of the vertical structural plane in the sidewall of tunnel

位置相同但产状倾斜的结构面(见图 3)，在切向集中应力作用下还可能发生剪切破坏，形成不同机

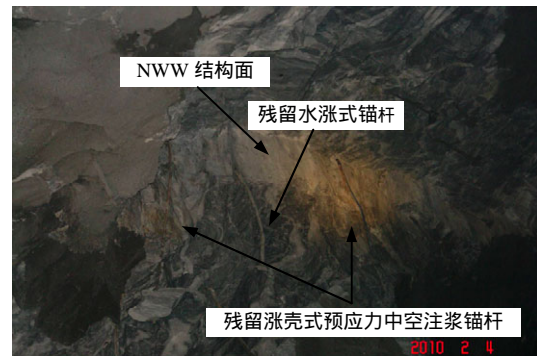


图 2 “2·4” 极强岩爆揭露出的结构面和残留的锚杆

Fig.2 Structural plane and retained bolts exposed after “2·4” extremely intense rockburst

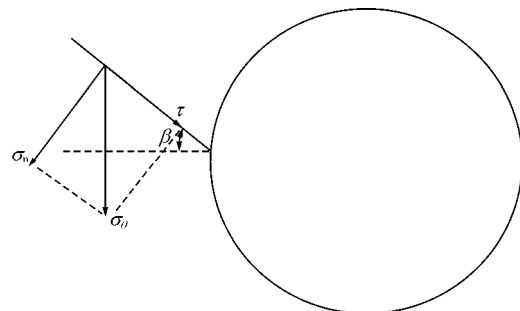


图 3 隧洞边墙倾斜产状的结构面及受力示意图

Fig.3 Sketch of the inclined structural plane and its stress analysis in the sidewall of tunnel

制的岩爆。在此条件下，竖直方向的集中切应力可分解为沿结构面方向的剪应力和垂直于结构面的正应力， $\overline{\sigma}_\theta = \overline{\sigma}_n + \tau$ ， $\sigma_n = \sigma_\theta \cos \beta$ ， $\tau = \sigma_\theta \sin \beta$ 。结构面的抗剪强度为 $\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi$ ，当夹角 β 使 $\tau > \tau_f$ 得到满足时，结构面发生相对滑动，结构面上强度较高的凸台被剪断，产生震动并释放能量，诱发岩爆，结构面上盘被爆出。

同样是产状倾斜的结构面，当位于隧洞上部时，由于下部岩体的开挖卸荷作用，使作用在结构面上的法向应力降低，抗剪强度降低，在集中切应力下最终发生剪切滑移和错动，产生剧烈震动，结构面以下岩体在冲击荷载和重力作用下发生拉破坏，诱发岩爆，造成结构面以下岩体全部爆出，形成 V 型爆坑。2009 年 11 月 28 日，锦屏二级水电站排水洞桩号 SK9+283 ~ SK9+322 段，发生极强岩爆，造成了人员伤亡和近亿元 TBM 机被埋 30 m。该洞段埋深 2 330 m，岩石为 T_{2b} 大理岩，围岩中存在一些平直的硬性结构面，且表面有明显擦痕。一条 NWW 走向、倾角 40°~50° 的硬性结构面在此次极强岩爆发生后暴露出来，该结构面平直、光滑、无填充，岩爆发生时结构面以下、隧洞以上岩体全部爆出，在

结构面顶端形成 V 字型爆坑，深度约 7 m。结构面形态和爆坑照片如图 4，5 所示。

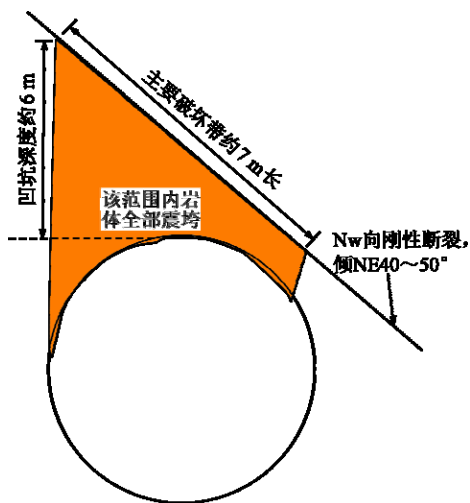


图 4 “11·28” 极强岩爆结构面示意图

Fig.4 Sketch of the structural plane inducing “11·28” extremely intense rockburst



图 5 “11·28” 极强岩爆爆坑和揭露的结构面

Fig.5 Failure zone and exposed structural plane after “11·28” extremely intense rockburst

对于位于隧洞上部并与轴线垂直的结构面，如图 6 所示，由于高应力下开挖使隧洞周边形成板状的层裂结构，结构面的切割作用破坏了其完整性，不容易积聚能量，因此不会诱发高强度的岩爆，在

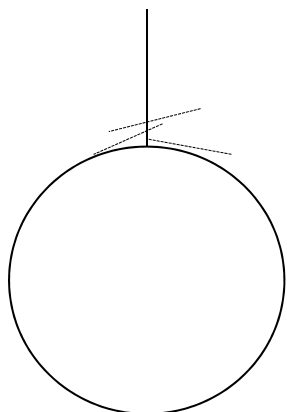


图 6 隧洞顶部竖直产状的结构面示意图

Fig.6 Sketch of vertical structural plane on the top of tunnel

外界扰动下可能更容易发生小范围掉块或塌方等应力型静力破坏。

2.2 不同规模的结构面对岩爆的作用机制

深部地下矿山开采中经常遭遇大断层，而水电交通硬岩隧洞中常见小规模的节理、结构面，不同规模的结构面对岩爆的诱发机制不同。

当离开挖面较远区域有大断层存在时，由于开挖扰动作用，使原来处于静力平衡状态的断层活化，具有向临空面滑动的趋势，这主要由于开挖使得作用断层上的法向压力降低导致断层两盘之间抗剪强度降低，断层在剪应力作用下滑动过程中由于断层面并不是绝对的平面，层面之间的凸台或刚性填充物强度较高，被剪断时，释放出巨大能量经岩体传播到围岩，这种冲击荷载与由于开挖形成的集中应力叠加导致岩爆的发生，此过程震源位置与岩爆发生位置存在一定距离。当在开挖面附近存在断层时，开挖作用使原来处于三向压缩、稳定状态的断层揭露出来，开挖作用使断层上的法向压力降低，再加上在自身重力作用下靠近临空面一侧产生拉破坏，由于抗剪强度的降低，当断层发生滑动时使整个靠近临空面区域的围岩全部爆出，发生较大规模的岩爆，此过程震源位置与岩爆发生在同一区域内。1984 年在加拿大的 Falconbridge Mine，发生了一系列断层滑移型冲击地压，震级达 3.5 级，对 4025 水平到 4200 水平的巷道造成严重破坏并造成 4 人死亡，该矿也在随后关闭^[17]。济三煤矿在 2004 年 11 月 30 日，当 6303 工作面推进到 1 310 m 时，在工作面前方 66 m 的断层以外，6303 工作面辅顺 1 376 ~ 1 406 m 共 30 m 段发生煤体突出，实体煤帮瞬间突出 1.5 ~ 2.0 m，同时伴有剧大的声响，掀翻该范围内的电机设备列车。

当围岩中存在规模相对较小的原生结构面或由于开挖导致的次生结构面时，在开挖产生的切向集中应力作用下结构面尖端应力积聚，裂隙继续扩展、贯通，最后在自身进一步的集中应力或外界扰动作用下发生岩爆。此过程中结构面的存在一方面导致该区域岩体应力异常、容易在结构面尖端出现很强的应力集中，并且结构面会使爆破应力波对围岩的作用由压缩到在结构面处反射变为拉伸，加剧了裂纹的扩展。2011 年 2 月 23 日锦屏 1-2-E 桩号 K8+805 ~ K8+815 洞段发生中等时滞型岩爆，滞后该区域开挖 62 d，爆坑深度约 0.6 m，呈平底锅形，爆坑底部可见明显的结构面铁锰质渲染痕迹，如图 7 所示。



图7 “2·23”岩爆爆坑和揭露的结构面

Fig.7 Failure zone and exposed structural plane after “2·23” rockburst

对于隧洞周边小的结构面，根据规模大小可分为揭露出和未揭露出2种形式，如图8所示，对岩爆也可能具有不同的诱发机制。对于开挖揭露出的如图8(a)所示结构面，其岩爆的诱发机制上文已有表述。对于未揭露出的结构面，如图8(b)所示，结构面与隧洞边墙还没有连通，仍然是完整岩体，而开挖后应力重分布产生较高剪应力作用于结构面，使得沿着结构面继续发生剪切破裂，最终结构面与边墙中间的完整岩体发生剪切破坏，结构面与隧洞边墙连接，此过程中既涉及未贯通前接触面间刚性填充物或凸台剪断，又涉及在完整岩体中发生剪切破坏，根据 J. A. Ryder^[12]的研究，在结构面等弱面中发生剪切破坏时产生的应力降(峰值强度与残余强度之差)为5~10 MPa，而完整岩体中的剪切破裂则在20 MPa左右，因此不难推断此过程释放的能量应大于完全揭露出的结构面小于完整岩石剪断释放的能量。

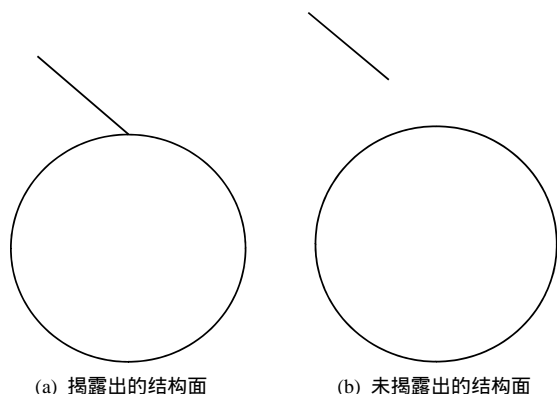


图8 隧洞周边揭露出和未揭露出的结构面示意图

Fig.8 Sketch of the exposed and unexposed structural planes around tunnel

2.3 不同力学性质的结构面对岩爆的作用机制

地下岩体中的结构面存在张开、挤压和滑动等

状态，面壁之间可能有软弱夹层、刚性填充物或无填充(硬性结构面)等，这些具有不同性质的结构面对岩爆的控制机制差异很大。

对于如图1所示的竖直产状的结构面，当结构面的2个壁面不接触而处于张开状态时，其抗剪强度不起作用，发生劈裂张拉破坏，形成薄板状结构；当结构面面壁受压力时，还可能发生剪切滑移破坏，因此属于压剪破坏机制。

对于如图4所示的结构面，如果内部有软弱夹层，结构面的剪切强度较低，发生剪切滑动时应力降很小不会产生大震动荷载，结构面以下岩体主要在重力作用下发生拉破坏，对应产生塌方；若结构面为刚性结构面或内部有强度较高的填充物，壁面上的凸台或填充物被剪断前积聚了很大的能量，被剪断时这些能量突然释放形成冲击荷载，使结构面以下的岩体以一定初速度爆出。因此，结构面的力学性质因控制所诱发岩爆的能量来源而影响岩爆的强度等级。

2.4 不同生产环境下结构面对岩爆的作用机制

由于施工环境的差异，大的断层滑移诱发的岩爆在地下矿山开采中往往比在水电、交通隧洞中严重的多。主要原因在于无论煤矿还是金属矿，采场均布置在地下，埋深基本一致，且地面多布置有建筑物，开采完成后存在较大区域的采空区，因此容易使原本处于稳定状态的断层受到较大扰动，且更容易揭露出来，与采场斜交，一旦断层发生大规模的滑移诱发岩爆，会使顶板折断、采空区垮塌等，摧毁工作面 and 巷道，甚至诱发地震，造成地面建筑物破坏；而水电交通隧洞一般都布置在山体中，往往两边埋深浅中间地方埋深大，且大部分处于地上，隧洞开挖的直径和范围相对较小，对大断层的扰动也相对较小，更容易揭露小的结构面，当掌子面爆破时，爆破应力波的动力扰动或应力转移加重了围岩应力集中程度而诱发岩爆，且由于采掘工人和设备都集中在在掌子面附近，往往会造成人员伤亡或设备损失，因此对水电交通隧洞，洞周规模较小的结构面(节理、层面、硬性结构面等)是防控结构面型岩爆的重点。

南非作为全球采矿业最为发达的地区，最大的采矿深度已达到4 000多米，在开采中经常遇到大的断层滑移型岩爆，而在我国不论是煤矿还是金属矿，开采深度最深为1 000~2 000 m，可以预见在不久的将来大的断层滑移型岩爆会越来越突出，因此如果能及时学习南非在应对断层滑移型岩爆的先

进经验，将有助于提高生产效率、减少财产损失。

2.5 不同开挖方式下结构面对岩爆的作用机制

TBM 开挖和钻爆法开挖是深埋硬岩隧洞主要采用的 2 种开挖方式，对岩爆的作用机制也不同。TBM 开挖的围岩完整性相对较好，强度较高，容易积聚较高的弹性变形能，因此，无论是靠本身的应力集中或者靠外界扰动提供的动力作用都需要相当高的应力集中水平和能量积聚程度才能诱发岩爆，但因为积聚的能量较高，岩爆一旦发生，等级一般较高，具有很高的弹射速度，破坏力较大，具有低频率、高强度的特征。锦屏二级水电站施工排水洞 TBM 开挖洞段所发生的“11·28”岩爆是最强的一次岩爆。钻爆法开挖对围岩扰动大，洞周形成很多次生裂隙面，应力集中水平相对较低、很难积聚较高的能量，但相对较小的外界扰动就可以诱发围岩失稳，发生岩爆或塌方，具有高频率、低强度特征。

3 结构面型岩爆的分类及防治策略

科学地进行岩爆分类将有助于岩爆的准确预测、预防和有效治理，通过判断某一区域或某一地质条件下更容易发生何种类型岩爆，从而有针对性的进行岩爆的支护设计。总结节 2 中不同条件下结构面型岩爆的发生机制，可将结构面型岩爆分为滑移型、剪切破裂型和张拉板裂型 3 种岩爆类型。

可能诱发小滑移型岩爆的结构面产状如图 3，8(a)所示，这种在集中应力作用下具有向开挖空间滑动趋势、释放能量的揭露出的结构面，此过程是通过结构面间刚性填充物或凸台剪断，产生应力降并释放能量，此种类型岩爆多发生在隧洞边墙或洞顶，容易形成深 V 型爆坑，爆坑侧边界有擦痕；另外离开挖边界较远的大断层经开挖扰动后也可能发生滑动，释放出巨大能量经岩体传播到围岩，这种动荷载与由于开挖形成的二次集中应力叠加导致岩爆的发生。为避免滑移型岩爆的发生，首先在采掘过程中应尽可能避开大断层区域或减少断层的揭露面积，对于揭露出的结构面应及时喷混凝土和施作预应力锚杆提高围压增加结构面抗剪强度。

对于可能诱发剪切破裂型岩爆的结构面产状如图 8(b)所示，这种具有向开挖空间滑动趋势、释放能量的未揭露出的结构面，其剪切破坏过程中既涉及接触面间高强度刚性填充物或凸台剪断，又涉及在完整岩体中发生剪切破坏。因此会产生更大的应力降、释放更多能量，造成更大的破坏。对防治该

类型的岩爆，首先通过打高强锚杆阻止结构面继续向完整岩体中扩展，另外需提高混凝土喷层厚度，必要时加钢拱架支撑围岩，以提高结构面的抗剪强度。

诱发张拉板裂型岩爆的结构面产状如图 1 所示，这种类型结构面主要在集中应力作用下发生张拉破坏，微裂纹不断衍生、扩展、贯通，使围岩劈裂成板、弯曲鼓折、断裂成块，在自身不断调整或外界扰动下弹射向开挖面，往往形成平底锅状的爆坑，爆出岩块多为板状和薄片状。锦屏二级深埋隧洞发生的结构面型岩爆多为张拉板裂型。防止裂纹的进一步扩展、贯通，减少开挖对结构面的动力扰动是防治这种板裂化岩爆或减小岩爆的灾害的主要措施，通过及时施加加长、加强的锚杆将板裂岩体与深部完整岩体串为一体，提高围岩整体性，减小其碎胀性。图 9 为 2010 年 12 月 1 日锦屏 1-1-E 洞段结构面诱发的岩爆，爆坑边缘主要为层裂折断，爆坑底部边界可见残留在岩体中的锚杆和由于地下水溶蚀和铁锰质渲染导致的颜色发黄的结构面内壁。



图 9 锦屏二级水电站张拉板裂型岩爆实例

Fig.9 Example of extensile spalling burst in Jinping II hydropower station

4 讨 论

上述分析绝大部分是从锦屏二级水电站引水隧洞现场获得的关于结构面对岩爆作用机制的一些初步认识，接下来还需要通过数值模拟、室内试验和物理模型试验等方法进行定量分析和验证。

从锦屏二级水电站深埋隧洞发生的岩爆来看，发生岩爆的区域可能存在露头的或隐性结构面，可能是原生结构面也可能是开挖导致的次生结构面，

这部分结构面作为岩爆发生后的边界,这种岩爆强度有时会较高;但有的岩爆区域未见明显的结构面存在,因此结构面和岩爆之间不是充分必要条件。现阶段虽然对规模较大的断层等不连续面可以完全探测到,但对隧洞围岩结构面立体分布的详细探测还无法实现。但从以上分析可知,高应力区或应力分布异常区(向斜、背斜),具有滑动倾向的无充填的硬性结构面或具有强度较高的刚性充填物的结构面,以及高切应力作用下竖直产状的、容易加剧围岩劈裂扩展、鼓折、弹射的结构面,是探测的重点。掘进中遇到这样结构面时及时采取措施加强支护,将结构面与完整围岩串为一体,抑制结构面继续扩展;加大混凝土喷层厚度、提高锚杆预应力,增大围压提高结构面抗剪强度等。

锦屏二级水电站深埋隧洞最大埋深 2 525 m,沿线以大理岩为主,尤其是核部的白山组大理岩长度数公里,单轴抗压强度超过 100 MPa,大埋深意味着高地应力,强硬岩使岩体具备了极高的储能条件,正是在这种外因+内因同时满足的前提下才可能发生结构面型岩爆。对于浅埋的岩石工程,岩爆发生的频率很低,而结构面多发生静力形式破坏(塌方、滑落、蠕变等常规的剪切破坏),而对于软岩,由于岩性差,应力都用来发生变形而无法积聚,因此也不能发生岩爆。除了上述的应力条件和岩性条件外,结构面面壁的力学特性和结构面的几何特性也需要满足一定条件结构面型岩爆才可能发生。

5 结 论

当前结构面型岩爆在国内研究还较少,而随着地下岩石工程埋深的逐年增加,将会遇到越来越多此类岩爆灾害。因此本文主要结合锦屏二级水电站深埋硬岩隧洞现场实例分析了结构面型岩爆发生的机制,并根据发生机制的不同提出了结构面型岩爆的分类方法,得到如下几点有益结论:

(1) 根据作用机制,结构面型岩爆可分为滑移型、剪切破裂型和张拉板裂型 3 种岩爆类型。对于剪切破坏导致的岩爆以加强支护、抑制结构面滑移作为防控手段;张拉板裂型岩爆则通过优化支护参数以提高围岩整体性、减小其碎胀性。

(2) 处于不同位置和产状的结构面对岩爆的影响机制不同,边墙竖直产状的结构面使洞周围岩压致拉裂最终弯曲、鼓折、弹射,极易诱发张拉板裂型岩爆,倾斜产状的结构面则会发生剪切或剪切-

张拉复合型破坏,从而诱发滑移型或剪切破裂型岩爆。

(3) 洞周倾斜产状的结构面,内部无充填或有强度较高的充填物时,开挖未揭露出的结构面诱发的剪切破裂型岩爆,因既涉及结构面未贯通前内部高强度填充物或凸台剪断,又涉及在完整岩体中发生剪断破坏,强度可能要高于揭露出的结构面所诱发的滑移型岩爆。

(4) 采矿工程中由于大量采空区的存在更容易诱发大尺度的滑移型岩爆,而水电交通隧洞由于开挖面积相对较小更容易发生小尺度的滑移型岩爆,且结构面往往控制爆坑的深度和边界。

(5) 钻爆法开挖对围岩扰动较大,形成众多次生结构面,且易导致原生结构面的进一步扩展,而 TBM 开挖的围岩完整性好,更容易积蓄高的能量,因此理论上钻爆法开挖岩爆的发生具有低强度、高频率特征,TBM 开挖则具有高强度、低频率特点。

参考文献(References):

- [1] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, 9(1): 59-65.
- [2] 徐林生,王兰生. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5): 569-572.(XU Linsheng, WANG Lansheng. Study on the laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang mountain road[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 569-572.(in Chinese))
- [3] 谷明成,何发亮,陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(9): 1 324-1 329.(GU Mingcheng, HE Faliang, CHEN Chengzong. Study on rockburst in Qinling tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9): 1 324-1 329.(in Chinese))
- [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.(FENG Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3): 433-444.(in Chinese))
- [5] 陈炳瑞,冯夏庭,明华军,等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制:时滞型岩爆[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(3): 561-569.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnel: time delayed rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3):

- 561 – 569.(in Chinese)
- [6] LI S J , FENG X T , LI Z H , et al. In situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station[J]. *Engineering Geology* , 2012 , 137 – 138 : 85 – 96.
- [7] TANG B Y. Rockburst control using distress blasting[Ph. D. Thesis][D]. Montreal , Canada : McGill University , 2000.
- [8] ZHANG C Q , FENG X T , HUI Z H , et al. A top pilot tunnel preconditioning method for the prevention of extremely intense rockbursts in deep tunnels excavated by TBMs[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* , 2012 , 45(3) : 289 – 309.
- [9] BOARD M , RORKE T , WILLIAMS G , et al. Fluid injection for rockburst control in deep mining , in rock mechanics[C]// *Proceedings of the 33th U.S. Symposium on Rock Mechanics*. [S.l.] : [s.n.] , 1992 : 111 – 120.
- [10] KAISER P K , CAI M. Design for rock support system under rockburst condition[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* , 2012 , 4 (3) : 215 – 227.
- [11] 朱焕春,朱永生. 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.(ZHU Huanchun, ZHU Yongsheng. Report on rockburst control and practice of Jinping II Hydropower Station auxiliary tunnel[R]. Shanghai : East China Investigation and Design Institute , 2007.(in Chinese))
- [12] RYDER J A. Excess shear stress in the assessment of geologically hazardous situations[J]. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* , 1988 , 88(1) : 27 – 39.
- [13] HEDLEY D G F. Rockburst handbook for ontario hardrock mines[R]. Ottawa : Canada Communication Group , 1992.
- [14] ORTLEPP W D. Rock fracture and rockbursts : an illustrative study[M]. Johannesburg : The South African Institute of Mining and Metallurgy , 1997.
- [15] ORTLEPP W D. Note on fault-slip motion inferred from a study of micro-cataclastic particles from an underground shear rupture[J]. *Pure and Applied Geophysics* , 1992 , 139(3/4) : 677 – 695.
- [16] ORTLEPP W D. Observation of mining-induced faults in an intact rock mass at depth[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* , 2000 , 37(1/2) : 423 – 436.
- [17] BOARD M P. Numerical examination of mining-induced seismicity. PhD thesis[Ph. D. Thesis][D]. Minneapolis , MN , USA :University of Minnesota , 1994.
- [18] WHITE B G , WHYATT J K. Role of fault slip on mechanisms of rock burst damage , Lucky Friday Mine , Idaho , USA[C]// HAGAN T O ed. *SARES 99 : 2nd Southern African Rock Engineering Symposium , Implementing Rock Engineering Knowledge*. [S. l.] : [s. n.] , 1999 : 169 – 178.
- [19] HAGAN T O , MILEV A M , SPOTTISWOODE S M , et al. Simulated rockburst experiment-An overview[J]. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* , 2001 , 101(5) : 217 – 222.
- [20] REDDY N , SPOTTISWOODE S M. The influence of geology on a simulated rockburst[J]. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* , 2001 , 101(5) : 267 – 272.
- [21] 汪泽斌. 天生桥二级水电站隧洞岩爆规律及预测方法的探索[J]. *人民珠江* , 1994 , (3) : 11 – 13.(WANG Zebin. On the law of rock burst in tunnels of Tianshengqiao II Hydropower Station and its prediction[J]. *Pearl River* , 1994 , (3) : 11 – 13.(in Chinese))
- [22] 周 辉. 深埋隧洞围岩破裂结构特征及其与岩爆的关系[C]// *新观点新学说学术沙龙文集 51 : 岩爆机制探索*. 北京 : 中国科学技术出版社 , 2011 : 106 – 114.(ZHOU Hui. Fracture characteristic of surrounding rock and its relationship with rockburst in deep tunnels[C]// *Proceedings of New Ideas and New Theories in the 51st Academic Salon : Discussion on Rockburst Mechanism*. Beijing : China Science and Technology Press , 2011 : 106 – 114.(in Chinese))
- [23] ZHANG C Q , FENG X T , ZHOU H , et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* , 2012 , 45(3) : 289 – 309.
- [24] ZHANG C Q , FENG X T , ZHOU H , et al. Rockmass damage development following two extremely intense rockbursts in deep tunnels at Jinping II hydropower station , southwestern China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* , 2013 , 72(2) : 237 – 247.