

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.01.044

# 深埋隧洞岩爆成因机理分析与防治研究

陈云, 阮怀宁, 朱珍德

(河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 岩爆是围岩处在高应力场条件下产生岩片飞射抛撒以及洞壁出现片状剥落的现象。岩爆是地下工程的一种特殊现象,但是国内外对岩爆的研究还尚需深入了解。通过对锦屏二级水电站深埋隧洞的研究,了解高地应力条件下隧道在施工开挖过程中的岩爆机理、岩爆治理措施,通过FLAC<sup>[3D]</sup>软件模拟出隧洞的主应力,进而通过数值分析判断是否发生岩爆。

**关键词:** 高地应力;岩爆;防治措施;隧洞

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)01-0209-04

## Formation Mechanism Analysis and Prevention Research of Rockburst in Deep Tunnels

CHEN Yun, RUAN Huai-ning, ZHU Zhen-de

(Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** The rockburst is the throwing and peeling damage phenomenon for surrounding rock under high ground stress. It is a kind of special phenomenon in underground engineering, which needs to be deeply studied at home and abroad. Here, through the study on the deep-laying tunnel in Jinping II Hydropower Station, the rockburst mechanism and its prevention and control measures in the excavation process of the tunnel under high ground stress are understood, and through the FLAC software, the principal stress of the tunnel is simulated, still further, through the numerical analysis, it is judged whether the rockburst would occur.

**Keywords:** high ground stress; rockburst; prevention measures; tunnel

岩爆是高地应力区的地下工程在开挖过程中或开挖完成后,围岩因开挖产生卸荷现象发生了脆性破坏,从而导致了储存在岩体中的应变能突然释放出来,引起岩片飞射抛撒,以及洞壁出现片状剥落,动力失稳地质灾害现象。由于它的突发性,直接威胁了施工人员和施工现场设备的安全,进而影响了工程的进度,严重时甚至有可能诱发地震,因而岩爆已经成为了世界性的地下工程难题之一,引起了国内外学者的普遍关注。但是,由于高地应力区岩体情况的复杂性,工程地质条件的多样性,给岩爆的研究带来了许多的困难,从而使进展较为缓慢,制约着高地应力区等地下工程的建设,因此对岩爆的防治研究就显得尤为重要。

## 1 岩爆成因机理分析

### 1.1 工程概况<sup>[1]</sup>

锦屏二级水电站位于青藏高原向四川盆地过渡的地貌斜坡地带。锦屏隧洞群从西向东分别穿过了三迭系下统绿泥石片岩和变质中细砂岩,三迭系上统砂板岩和杂谷脑组大理岩,白山组大理岩,盐塘组大理岩等地层。锦屏二级水电站4条引水隧洞和2条辅助洞及1条施工排水隧洞组成7条平行的大型深埋隧洞群,隧洞群总长118 km,自南向北依次为辅助洞A洞、B洞,施工排水洞,1#~4#引水隧洞。辅助洞最大埋深2375 m,引水隧洞最大埋深为2525 m,引水隧洞工程是整个电站的核心。

收稿日期:2013-10-01

修稿日期:2013-12-30

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB013504);国家自然科学基金资助项目(41272329)

作者简介:陈云(1988—),女,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为岩石力学工程。

## 1.2 机理分析

对于锦屏二级水电站引水隧洞的研究,高地应力是开挖引起岩爆发生的主要原因。由于隧洞的埋深比较大,因而山体产生了较大的自重应力。影响岩爆发生的原因有很多,一般主要由以下几种情况:

### (1) 岩性条件

岩石的质地越坚硬、抗压强度越大,蓄积在岩石中的弹性应变能可能就越大。锦屏引水隧洞的岩石大多新鲜完整、质地坚硬,同时结构密度好和强度高,因而具有了较好的弹性和脆性。高脆性岩石易产生微裂隙,常发生脆性断裂破坏。锦屏二级水电站埋深约 1 800 m 处发生的一次岩爆,岩性为大理岩。在隧洞开挖后,洞壁附近围岩内径向应力减小,切向应力增大,处于二向受力状态,随着切向力的逐渐增大,围岩不断积聚弹性应变能,当应变能积聚到一定程度时,受到轻微的扰动而产生了动力失稳,积聚的应变能就会瞬间释放出来,从而产生岩爆现象。

### (2) 地应力条件

构造应力与埋深产生的自重应力是影响岩爆发生的主要因素。隧洞开挖后,应力受到开挖扰动的影响随之重新分布,从而达到新的平衡。重新分布后形成的应力称为二次应力,在二次应力分布是,局部区域可能产生应力集中现象,围岩应力有时会达到岩块的单轴抗压强度,甚至会超过它几倍。当应力超过围岩承受的极限强度,围岩就会发生破坏,产生岩爆<sup>[2]</sup>。锦屏二级水电站引水隧洞埋深在 800 m ~ 1 200 m 时,地应力场由局部地应力转变为以垂直应力为主的自重应力场;随着埋深的增加地应力也呈现非直线关系; $\sigma_1/\sigma_3$  地应力的比值也随着埋深的增加而逐渐的减少。

### (3) 外力条件

引水隧洞钻爆开挖断面形状不规则易发生岩爆,通过分析可以发现圆形洞室周边部位不易产生应力集中现象,而非圆形洞室周边部位易产生应力集中现象,特别是在拐角点处应力集中的程度相当高,产生的应力值往往达到或超过发生岩爆的临界应力值,因而会发生岩爆现象。

## 2 岩爆的表现特征

岩爆的表现形式可以总体上分为两种<sup>[3]</sup>,一是开挖面一定深度范围内破裂发展引起的突帮破坏,也称应变型岩爆。二是在开挖面以内一定深度的岩体中,在高应力集中区产生了能量释放,通过动力波的方式传递到开挖面附近,导致岩体的破坏,这就是

冲击型岩爆。

对锦屏辅助洞的现场观察,应变型岩爆和冲击型岩爆都已经发生,其中以应变型岩爆比较普遍。洞段进入绕行洞以后的洞段中可以普遍地观察到顶拱附近的片状剥落(片帮)现象,成为应变型岩爆的典型代表。

辅助洞可能的冲击型岩爆类型出现在东端盐塘组和西端白山组地层中,对应的埋深都在 2 000 m 以下,表现为局部地段(20 m ~ 60 m 长度范围)内的岩爆非常地不同于其他部位的应变型破坏,可以产生很强和大范围的爆裂破坏。

一般地,应变型岩爆并不对围岩稳定和施工安全造成显著影响,常规的支护手段也可以有效地控制这种岩爆造成的危害。工程中真正关心的是冲击型岩爆,其危害主要体现在对施工安全的威胁上。对冲击型岩爆的发生需要具备一定的条件,因此每相似深埋工程中的冲击型岩爆可能会很不一样,需要针对具体工程进行鉴别和建立认识,甚至某种程度上的短期预测。对于一般性的冲击性岩爆,目前已有的工程实践经验可以帮助控制其造成的危害。一般地,一旦岩爆发生以后,过度积累的能量也就随之释放,再发生岩爆的可能性大大降低。

冲击型岩爆发生时通常可以接收或甚至感觉到震动的发生,即埋深地下工程中的微震现象。微震对工程造成的影响和地震对地表建筑物造成的影响非常类似,如果围岩条件较好且加固措施得当,微震可能并不造成直接的工程安全问题,即潜在的冲击型岩爆得到了有效控制,即实现了岩爆控制。但是,如果微震震级超过里氏 2 级时,由于对应的冲击荷载过大,常规的加固手段很难实现对岩爆的控制。

图 1 表示某深埋隧道开挖过程中出现的高应力微震现象,其中的圆球表示里氏震级超过 1 级、点表示震级小于 1.0 的监测结果。该隧道掘进方向与最大主应力方向垂直,开挖过程遇到过多次剧烈的岩爆现象,其中出现的最大一次震级达到 2.7 级的微震在隧洞顶拱诱发了严重的岩爆破坏。

## 3 岩爆的防治措施

对于锦屏二级水电站,控制岩爆的措施有多个方面,如开挖顺序、开挖方式、锚固、挂网、和喷护等。

(1)合理的开挖顺序<sup>[4]</sup>可以通过控制和改变围岩中应力变化路径的方式来减轻甚至消除高应力破坏,目前这种工程措施在深埋矿山工程实践中应用非常广泛。

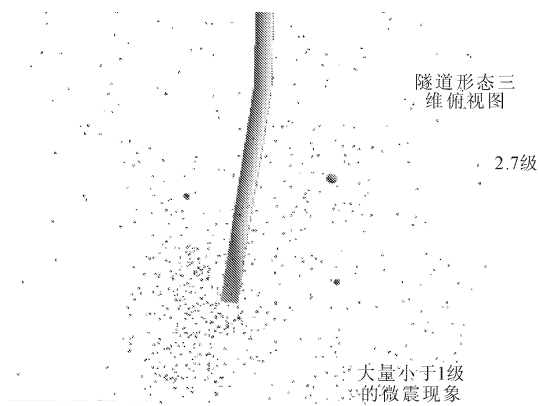


图1 某深埋花岗岩体隧道开挖过程中监测到的微震现象(埋深 2 330 m,断面尺寸 5 m×5 m)

(2)开挖方式(钻爆、TBM、预裂爆破)。在围岩高应力破坏不是很突出的情况下选择显得尤为重要,这是因为高应力条件下围岩的变形和支护要求基本都是围绕着围岩屈服圈进行的,控制爆破、特别是TBM施工在控制围岩屈服松弛圈程度和深度方面具有明显的优势。

(3)在高应力脆性破坏趋势条件下的锚固、挂网、喷浆<sup>[5]</sup>加固措施是深埋高应力条件下地下工程开挖时常常采用的措施。高应力条件下岩体越完整坚硬,其储存应力的能力越强,一旦发生高应力破坏,产生很大影响和剧烈程度,因此不能用常规条件下的岩体质量来衡量加固的需要。在高应力条件下,紧跟掌子面的支护是非常必要的,只有这样才可能创造一个安全的施工环境。

紧跟掌子面的加固主要采用两种方式,一是挂网和锚固组成的快速临时支护系统;二是喷层加锚固组成的快速支护系统。锦屏引水洞采用了中空注浆锚杆,与普通使用的普通螺纹钢锚杆类似,属于刚性锚杆,锚杆的特点是强度高、刚性大,支护力强,缺点是承受变形能力和吸收能量的能力不足。在使用这类锚杆时应充分考虑到其不足之处,避免使用不当导致锚固体破坏。

(4)通过对掌子面和洞壁喷撒水,在一定情况下可以达到降低表层围岩强度的效果<sup>[6]</sup>。采用超前钻孔向煤等非坚硬岩体高压均匀注水,这样可以湿润、减缓和消除非坚硬岩体的冲击能力。对局部应力集中带进行高压注水,就可以达到减缓应力集中现象。高压注水可以软化降低岩体的强度,同时能够降低岩体储存应变能的能力,减少岩爆的发生。

(5)采用层次分析法——模糊数学综合评价法和人工智能神经网络综合预测法,对隧道未开挖段

进行了岩爆概率预测,对具有岩爆倾向性的岩石进行岩爆倾向性指标测定和计算,以便于可以针对性的对岩体工程岩爆倾向性预测和布置网点进行岩爆监测和预报,进而采取一定的措施以防治岩爆的发生。

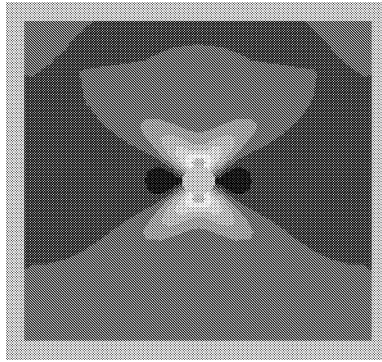
## 4 围岩应力分析

岩性条件和初始应力条件是岩爆形成的必要条件。采用FLAC<sup>3D</sup>软件<sup>[7]</sup>模拟深埋工程的主应力。在FLAC<sup>3D</sup>模拟中需要的力学参数有粘聚力 $c$ ,内摩擦角 $\varphi$ ,体积模量 $K$ ,剪切模量 $G$ 。模型尺寸沿引水隧洞水平方向垂直于隧洞轴线为120 m,铅垂隧洞轴线方向取100 m,隧洞轴线方向取100 m。所建初始模型共分26 400个单元和28 520个节点。通过数值计算得到最大主应力和最小主应力的应力分布。

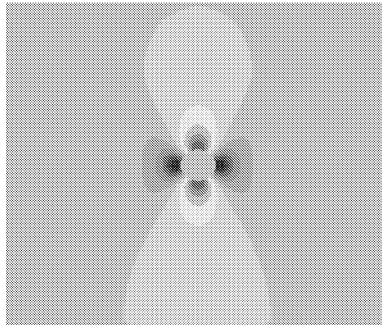
计算结果表明:在隧道开挖断面的围岩全部处于受压应力状态。随着隧道埋深的不同,在隧道开挖断面的不同部位有不同的应力集中,随着埋深的增加发生岩爆的可能性增大。埋深为500 m隧洞的最大主应力( $\sigma_1$ )为5 MPa,最小主应力( $\sigma_3$ )为1.5 MPa(见图2)。埋深为1 000 m隧洞的最大主应力( $\sigma_1$ )为10 MPa,最小主应力( $\sigma_3$ )为2 MPa(见图3)。根据 $3\sigma_1 - \sigma_3$ 得出最大切向应力,岩爆的形成就是这个最大切向应力的作用,即当切向应力达到岩体的极限强度时,岩体就会发生岩爆或其他形式的失稳破坏。通过分析计算的最大切向应力与极限强度进行比较,预测岩爆的发生,对可能发生岩爆的地方提前采取有效地防治措施,从而降低岩爆的发生。

## 5 结 语

对于深埋隧洞,岩爆一直是主要的地质灾害之一。根据锦屏二级水电站岩爆成因机理的分析,了解到冲击型岩爆在施工中对人员、机器设备等产生很大的威胁,因此对冲击型岩爆要特别注意。文中通过岩爆机理的分析和表现特征,对岩爆有了更加具体的认识。在岩爆防治措施中锚固、挂网、喷浆加固措施在当今工程中普遍使用,对于岩爆的防治起到了一定的作用,使用效果较好。文中通过采用FLAC<sup>3D</sup>软件模拟出深埋隧洞的主应力,进而对其分析出产生岩爆的原因。对于岩爆的研究虽然取得了较好的成果,但是要做到及时的防治还存在着很大的困难,因此,对于岩爆的防治研究,学者应加以关注和重视,以便对其更深入、更系统的研究和探索。

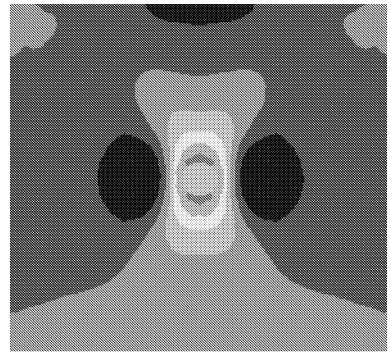


(a) 最大主应力

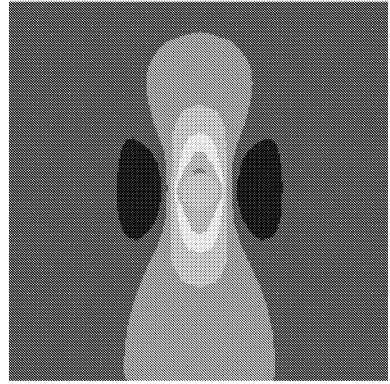


(b) 最小主应力

图 2 埋深 500 m 处隧洞主应力分布图



(a) 最大主应力



(b) 最小主应力

图 3 埋深 1 000 m 处隧洞主应力分布图

## 参考文献:

- [1] 吴世勇,王 鸽,王 坚.锦屏二级水电站深埋长隧洞岩爆治理对策研究[J].山东大学学报(工学报),2009,39(s2):57-63.
- [2] 谢国权,曾新华.某特长隧道极强岩爆成因机理分析与防治[J].人民长江,2007,38(8):127-129.
- [3] 汪 琦,唐义彬,李 忠.浙江苍岭隧道岩爆工程地质特征分析与防治措施研究[J].工程地质学报,2006,14(2):276-280.
- [4] 林金洪.地下硐室岩爆的预测及处理研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(3):159-163.
- [5] 张 鹏,曾新华,李现臣,等.锦屏二级水电站引水隧洞工程强岩爆综合防治措施研究[J].水利水电技术,2011,42(3):61-65.
- [6] 武选正,李名川,伍宇腾.锦屏水电枢纽辅助洞工程岩爆现象分析及防治措施[J].山东大学学报(工学报),2008,38(3):28-33.
- [7] 吕 庆,孙红月,尚岳全,等.深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2982-2988.
- [7] 徐 伟,李 智,张肖宁.子模型法在大跨径斜拉桥桥面结构分析中的应用[J].土木工程学报,2004,37(6):30-34.
- [8] 高耀东,杨建鸣,汪建新.ANSYS 子模型技术的应用[J].包头钢铁学院学报,2002,21(4):340-342.
- [9] 蒋友琼.非线性有限元法[M].北京:北京工业学院出版社,1988.
- [10] 王 磊,李家宝.结构分析的有限差分法[M].北京:人民交通出版社,1982:10-23.
- [11] 朱合华,陈清军,杨林德.边界元法及其在岩土工程中的应用[M].上海:同济大学出版社,1997.
- [12] 杨德全,赵忠生.边界元理论及应用[M].北京:北京理工大学出版社,2001.
- [13] 过镇海.混凝土的强度和本构关系—原理与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [14] 苏礼邦.用子模型方法进行高拱坝预应力闸墩结构有限元分析[D].西安:西安理工大学,2007:40-68.
- [15] 李 瓚,陈兴华,郑建波,等.混凝土拱坝设计[M].北京:中国电力出版社,2000:620-621.

(上接第 208 页)