

# 锦屏二级水电站 TBM 施工中的岩爆问题分析及对策

罗志虎 杨鹏飞

(中国水电顾问集团北京勘测设计研究院, 北京 100024)

**【摘要】** 锦屏二级水电站施工排水洞在施工前的 101 d 内, 仅掘进 1 027 m。这期间共发生 3 次岩爆, 直接影响到掘进的进程。按照岩爆发生的时间顺序, 依次描述这 3 次岩爆的危害程度, 影响范围。岩爆的发生具有一定的规律性, 不仅与高地应力有关, 而且与岩体的结构特征、赋水条件等有一定的关系。同时, TBM 施工的特点也是加剧岩爆发生的因素之一。最后, 通过对岩爆发生规律的分析, 提出了相应的对策。

**【关键词】** TBM 施工, 岩爆, 防治对策

**【中图分类号】** TU 457

## Rock-burst and Its Countermeasure of TBM Construction in Drainage Tunnel of a Hydropower station

Luo Zhihu Yang Pengfei

(Beijing Hydropower Investigation Design & Research Institute, CHECC, Beijing 100024, China)

**【Abstract】** It had only been tunneled 1 027 m in previous 101 d in construction drainage tunnel of the Jinping Second cascade hydropower state. It had occurred 3 times rock-burst altogether in this period which immediately influence the tunneling process. The harm degree and the influence area of these rock-burst according to the time sequence which rock-burst occurred are discribed. The occurrence of rock-burst has certain regularity, which is not only related to high in-situ stress, but also related to the structural features of rock mass and the water conditions, etc. Simultaneity, the construction characteristic of TBM is also one of the factors which intensifying the occurrence of rock-burst. Utimately, it proposes the corresponding countermeasures by analysis for the occurrence regularity of rock-burst.

**【Key Words】** TBM construction; rock-burst; prevention countermeasures

### 0 引言

由于 TBM 掘进技术相对于传统钻爆法具有明显的快速、优质、安全、环保等优点<sup>[1]</sup>, 20 世纪 50 年代以来, 在国外得到了广泛的推广与应用。近几年的隧道工程建设中, 有 30%~40% 是采用 TBM 进行开挖的<sup>[2]</sup>。然而, 由于 TBM 设备庞大, 对地质条件适应性没有钻爆法那样灵活, 在没有预警的情况下遇到不良地质条件时, TBM 掘进受到的影响远大于钻爆法开挖, 往往导致掘进速度缓慢、效率低下、工期拖延。如果处理不当, 甚至会带来灾难性后果<sup>[3]</sup>。以往人们对 TBM 施工中的工程地质问题的研究, 主要侧重于施工中遇到的软岩及破碎带等不良地质体引起的工程地质问题<sup>[4-9]</sup>。对完整岩体中 TBM 施工遇到的工程地质问题研究甚少。锦屏二级水电站施工排水洞东端围岩状况相对比较完整, 绝大部分为 II、III 类围岩, 地下水不丰富。然而, 在进行 TBM 施工过程中遇到

了高地应力引起的岩爆问题, 至今尚未得到有效的解决。笔者对现场施工中所遇到的岩爆问题及所采取的处理措施进行描述分析, 抛砖引玉, 以期引起对该方面工作的研究, 提出有效的解决方案。

锦屏二级水电站施工排水洞位于在 4\* 引水隧洞和辅助洞 B 线之间, 平行于 B 辅助洞与引水隧洞, 与辅助洞的洞轴线间距为 35 m, 与 4\* 引水隧洞的洞轴线间距为 45 m。全长约 17.10 km。开始 2008 年 6 月 18 日施工排水洞开始试掘进以来, 截止至 2008 年 10 月 9 日, 共掘进 1 027 m, 其中总计施工天数为 101 d (包括试掘进 60 d, 由于处理强烈岩爆问题停机 20 d), 其中平均每天掘进 10.2 m, 扣除强烈岩爆的影响后每天的平均进度为 12.7 m。围岩状况相对比较完整, 均为 II、III 类围岩, 地下水不丰富。但在此洞段掘进过程中一直受到岩爆的影响, 其中受各等级岩爆影响长度为 214 m, 其中中等以上岩爆长度为 36 m。

## 1 岩爆现象

锦屏工程区地应力相对集中,有较充沛的弹性能储备。锦屏二级水电站引水隧洞将穿越锦屏山主峰山体,最大埋深达 2 525 m 左右。自施工排水洞 TBM 开始掘进以来,共遭遇了三次强烈岩爆。

### 1.1 第一次岩爆

2008 年 8 月 17 日晚上,施工排水洞 SK14+415 左侧(面向掌子面)8 点至 10 点位置,发生强烈岩爆(见图 1)。岩爆形成轴线方向塌坑纵向长度约 4 m,环向方向宽度约为 5 m,塌腔最大深度达 1.8 m。约 2 秒钟后,在 SK14+410~SK14+390 洞段右侧及顶拱再次发生岩爆,暴露出的岩体在强大地应力作用下,瞬时弹出,该洞段顶拱和右侧壁全部崩塌(见图 2 和图 3)。塌腔最大位置位于顶拱中心位置,深度达 2.1 m,环向宽度为 4.0 m。

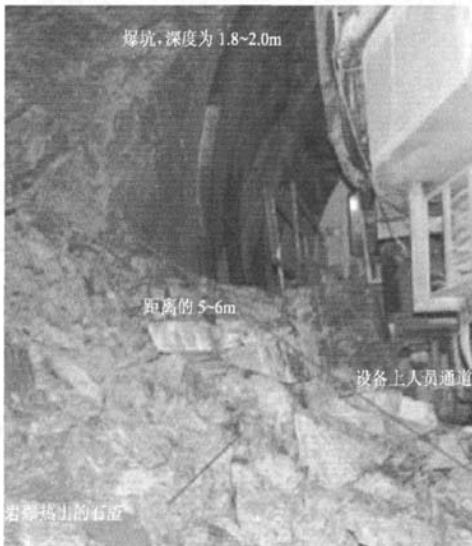


图 1 岩爆产生的塌坑



图 2 塌坑附近边墙下部破坏情况



图 3 右侧拱顶位置塌方情况

本段的岩性为三叠系中统岩塘组灰色-灰白色粗晶大理岩。厚层,新鲜,岩体较完整,裂隙不甚发育,岩石单轴饱和抗压强度为 60~80 MPa,少量渗水,属 II 类围岩。

岩爆发生后,4 榀拱架有 2 榀拱架被砸断,2 榀拱架出现变形,岩爆发生处的钢筋网部分脱落、部分被破坏,已经施作的锚杆未发现有脱落现象(见图 3)。

### 1.2 第二次岩爆

2008 年 9 月 12 日深夜,在 SK14+241~SK14+273 段(总长 32 m)发生强烈岩爆。本次岩爆产生的塌坑主要分布于两侧边墙腰线上下,岩爆破坏深度为 0.5~2.0 m,其中 SK14+241~SK14+251 段,10 m 范围内顶拱及边墙围岩破坏相对严重,拱顶及边墙围岩全部碎裂,6 榀钢拱架严重扭曲、断裂(见图 4)。在 SK14+241 位置右侧拱顶 2 点钟位置,有一块重约 3 t 的岩石脱落,并压住锚杆转机,其塌坑深度达 2 m(见图 5)。



图 4 第二次岩爆塌方左侧拱架破坏情况



图5 塌方落下的石块卡住了锚杆钻机

### 1.3 第三次岩爆情况

2008年9月22~23日在SK14+230.1~SK14+227.5段发生强烈岩爆。本次岩爆的位置为7点至9点钟。本次岩爆共发生了三次,第一次为9月22日0:17,在SK14+230.1~SK14+227.5段7点至10点位置发生第一次岩爆,9月23日7:20,在此位置发生第二次岩爆,8:05,第三次发生岩爆。这3次岩爆声响巨大,并造成施工排水洞SK14+230~SK14+222段左侧边墙较大范围塌方,塌腔深度为2.5m,总塌方量约为20m<sup>3</sup>(见图6)。



图6 SK14+230~SK14+222段岩爆塌方产生的塌腔

由于未能及时对该处塌腔进行封闭,该处塌腔在22日晚至23日早上这段时间内,内部裂缝进一步扩展,并在23日早上脱落、掉块,塌腔深度扩展到2.5m左右,塌方量达到30m<sup>3</sup>左右。

## 2 岩爆发生的规律

### 2.1 岩爆发生地段的围岩特征

岩爆发生洞段围岩,一般为岩性相对较好的Ⅱ~Ⅲ类围岩(上述3处岩爆发生洞段的围岩均为Ⅱ类围岩),岩体完整,强度较高,无渗水或渗水较少。岩爆引起的塌方,前期征兆现象不明显,破坏为瞬间发生,属于典型的脆性破坏。

### 2.2 岩爆发生具有滞后性

在进行TBM开挖时并不会立即发生岩爆,而是常常间隔较长时间后才发生。TBM施工具有对围岩扰动较小,掘进速度快,洞型为圆形等特点,因而在成洞过程中及成洞以后,围岩应力释放缓慢,在一段时间内保持稳定,给人一种围岩能够自稳的假象。然而,经过一段时间的应力重分布后可能就会发生岩爆,导致岩爆的滞后性,一般可滞后20~50h,有的甚至滞后70h,如2008年8月17日岩爆,滞后时间约为70h。

### 2.3 岩爆级别高

由于TBM设备掘进,对围岩扰动较小,掘进过程中产生的破坏松动圈小,不利于围岩的应力释放。据此推测,TBM设备掘进如果发生岩爆,其岩爆等级与在同地段采用钻爆法开挖时产生的岩爆等级相比应高出一个或半个等级。2008年8月17日岩爆也证明了此事,根据相邻B辅助洞经验(相距35m),采用钻爆法开挖此段时,该处发生了轻微岩爆,而在施工排水洞却发生了强烈岩爆,岩爆爆坑明显,破坏力较强,并引起岩爆侧边墙大面积深度破坏。同时在开挖B辅助洞时,也未发生如施工排水洞如此高频率的岩爆。

### 2.4 沿结构面塌落

TBM设备掘进开挖,可能会出现围岩因高地应力作用而出现沿结构面塌落的现象,而在钻爆法施工时基本无此种现象发生。因为在爆破开挖时,构造破碎带在受到爆破震动时,直接会出现震动垮塌,并自然形成塌落拱,应力重分布后多能自稳。而采用TBM设备掘进施工,扰动较小,构造破碎带不会出现如钻爆法产生的松动圈,致使影响带围岩塌落;TBM施工时围岩应力较大,裂隙为密闭式,瞬时或短时间内不会出现垮塌。随着节理裂隙的逐渐张开或出现较强震动(如临洞的爆破震动或洞内岩爆产生的震动),构造破碎带会出现关键块体脱落(如果此时未进行喷射混凝土封闭),并引起较大范围的塌落。

## 3 岩爆防治对策

锦屏二级排水洞埋深较大,岩体结构致密、坚硬且完整性好,脆性强,具备在高地应力作用下诱发突出型岩爆的基本条件,该隧洞内的岩爆是典型的高能量释放型岩爆。根据这类岩爆的特征,应该采取岩爆危险性分级、微震实时观测及支护技术等相结合的综合治理对策。

### 3.1 超前预报

岩爆的发生不仅取决于地应力条件,还与岩性

及其分布特征、岩体结构、断裂和地下水状况及其它扰动因素有关。根据已开挖完成的洞内地质资料,包括岩爆类型、规模、分布里程与岩爆具体位置,对排水洞的地质情况进行分析,初步确定施工区域地应力的数量级以及施工过程中哪些部位及桩号容易出现岩爆现象及岩爆的等级,优化施工支护顺序,为施工中岩爆的防治提供初步的理论依据,作到事先预报,提前做好岩爆防治的技术准备和施工准备工作。

在施工过程中,可加强超前地质探测,预报岩爆发生的可能性及地应力的的大小。可采用超前钻探、声反射等方法,同时利用隧道内地质编录观察岩石特性,综合判断可能发生岩爆高地应力的范围。

### 3.2 提前释放岩体中的应力

针对岩爆类型及大小,在掌子面上利用地质钻机打设超前钻孔,部分释放掌子面上的高地应力。必要时也可以打设部分径向应力释放孔,钻孔方向应垂直岩面。若预测到的地应力较高,可在超前探孔中进行松动爆破或将完整岩体用小炮震裂,或向孔内压水,使围岩内部形成破碎带,降低洞壁和掌子面的应力,将高应力转移至围岩深部,以避免应力集中现象的出现。

在岩爆地段,通过向掌子面和开挖后的洞壁喷洒高压水,降温除尘,润湿岩面,提高围岩的塑性,以减轻岩爆的强烈程度。

### 3.3 岩爆发生时的处理措施

岩爆发生时,针对不同的岩爆类型,采取相应的支护方式。

发生轻微岩爆时,采用喷射混凝土和局部挂网相结合的支护方式。发生中等岩爆时,系统架立钢拱架,喷射混凝土,设置系统锚杆。发生强岩爆时,系统架立钢拱架,采用工字钢、钢筋等纵向连接加固,与喷锚网形成联合支护体系,边顶拱喷射混凝土。强烈岩爆对施工人员及施工设备的威胁最大,必要时进行避让,等岩爆强度基本平静下来再进行支护。

当发生岩爆产生爆坑时,首先清理危石,并用高压水冲洗,然后喷混凝土对爆坑进行封闭,架立钢拱架,在爆坑周边打设加密锚杆。

## 4 结论

TBM 施工中,不良地质体的存在可能导致软岩大变形和突水等工程地质问题。在完整性较好,且不存在不良地质体的条件下,TBM 施工并非一定顺利。由于高地应力的存在,岩爆成为 TBM 施工中不得不面对的问题。通过分析可知,岩爆的发生,有其自身的规律,不仅与高地应力有关,还与地下水的活动、岩体结构特征等都有关系。在 TBM 施工中,所遇到的岩爆问题,应根据其程度采取相应的方案进行处理。

## 参考文献

- [1] 张镜剑. TBM 的应用及其有关问题和展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 363-367.
- [2] 吴世勇, 王 鸽, 徐劲松, 等. 锦屏二级水电站 TBM 选型及施工关键技术研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2000-2009.
- [3] A Boniface. Some Technical Lessons Learnt from Construction of the Lesotho Highlands Water Transfer Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(1): 29-35.
- [4] 尚彦军, 王思敏, 薛继洪, 等. 万家寨引黄工程泥灰岩段隧洞岩石掘进机(TBM)事故工程地质分析和事故处理[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 293-298.
- [5] 尚彦军, 史永跃, 曾庆利, 等. 昆明上公山隧道复杂地质条件下软弱围岩中 TBM 卡机及护盾变形问题分析和对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3858-3863.
- [6] 尚彦军, 史永跃, 曾庆利, 等. 岩石掘进机(TBM)穿越板岩和碳酸盐岩接触带引发的环境工程地质问题分析[J]. 地球与环境, 2005, 33(3): 155-158.
- [7] Wallis S, 邓应详. 台湾坪林隧道施工近况[J]. 隧道及地下工程, 1999(2): 5-15.
- [8] Winter T, Binquet J, Szendroi A, et al. From plate tectonics to the design of the Dul Hasfi hydroelectric project in Kashmir (India)[J]. Engineering Geology, 1994, 36(3/4): 211-241.
- [9] 尹俊涛, 尚彦军, 傅冰骏, 等. TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 389-397.