

锦屏二级水电站长引水隧洞高地应力下开敞式硬岩隧道掘进机安全快速掘进技术研究

吴世勇, 周济芳

(二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610051)

摘要: 对开敞式硬岩掘进机在锦屏二级引水隧洞群中的应用经验进行总结和梳理, 首先针对锦屏二级水电站高地应力下开敞式硬岩隧道掘进机(TBM)设备选型及掘进参数的优化进行研究, 合理确定设备结构及掘进参数; 采用BEAM, TSP, 地质雷达等手段综合开展掌子面前方超前地质预报, 取得良好的预报效果, 并制定相应的预处理措施。首次在国内水电工程中开展微震监测系统试验及应用, 进行高地应力下岩爆风险预测预警研究, 较为准确地预测了岩爆发生的大致范围, 并开展一系列防岩爆支护措施的试验研究工作, 取得较好的效果, 有效降低岩爆风险和危害。最后, 对如何实现TBM安全快速掘进进行综合分析研究, 对今后开敞式TBM的选型和使用提供参考意见。

关键词: 隧道工程; 高地应力; 开敞式隧道掘进机(TBM); 安全快速掘进技术

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)08 - 1657 - 09

RESEARCH ON SAFE AND FAST TUNNELING TECHNOLOGY BY OPEN-TYPE HARD ROCK TBM UNDER HIGH GEOSTRESS OF LONG DIVERSION TUNNELS OF JINPING II HYDROPOWER STATION

WU Shiyong, ZHOU Jifang

(Ertan Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract: Application experiences of open-type hard rock tunnel boring machine(TBM) to diversion tunnel group of Jinping II hydropower station are summarized. Firstly, in order to determine the suitable equipment structure and boring parameters, selection of facilities and optimization of boring parameters for open-type hard rock TBM of Jinping II hydropower station under high geostresses are studied. Advanced geological prediction in front of tunnel face is carried out by adopting combined means such as BEAM, TSP and geology radar; and good prediction results are achieved; so that corresponding preparing handling measures can be established. Furthermore, the prediction and pre-warning measures of rockburst under high geostresses are investigated by firstly importing microseism monitoring system to the hydropower project in China; and the relative accurately occurrence range of rockburst have been predicted. The investigation has developed a series of experimental works on the supporting measures to prevent rockburst, which have effectively lowered the risk and harm of rockburst. Finally, a comprehensive research on how to realize safe and fast construction of TBM are also carried out, so as to provide references and suggestions to the facility selection and applications of open-type TBM in future.

Key words: tunnelling engineering; high geostresses; open-type tunnel boring machine(TBM); safe and fast tunneling technology

收稿日期: 2012 - 02 - 05; **修回日期:** 2012 - 05 - 31

基金项目: 国家自然科学基金、雅砻江水电开发联合研究基金资助项目(50539090)

作者简介: 吴世勇(1965 -), 男, 博士, 1987年毕业于清华大学水利工程系水力机械专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事水电工程技术与管理方面的工作。E-mail: wushiyong@ehdc.com.cn

1 引言

锦屏二级水电站引水隧洞是我国目前规模最大的水工隧洞群,由4条引水隧洞组成,单洞全长16.67 km,间距60 m,呈平行布置。引水隧洞沿线上覆岩体一般埋深1 500~2 000 m,最大埋深约为2 525 m,具有埋深大、洞线长、洞径大的特点,为超深埋长隧洞特大型地下水工程。4条引水隧洞组成的水工洞群采用钻爆法(2[#], 4[#]引水隧洞和1[#], 3[#]引水隧洞东西端洞段)和TBM法(1[#], 3[#]引水隧洞中部洞段)相结合的施工方案。隧洞沿线水文地质条件较为复杂,施工中存在的主要工程、水文地质问题为岩溶地下水和岩爆^[1-2]。

为了论证TBM的可行性及合理开展设备选型,邀请了国内外知名专家组织了多次技术研讨、招标设计咨询、招标文件修改等,最终通过国际招标确定采用美国罗宾斯公司和德国海瑞克公司生产的2台直径12.4 m的大型硬岩掘进机进行施工。合同签订后又多次召开设计联络会,对主机和后配套选型和结构布置再次进行了讨论和完善。2台TBM设备分别于2008年11和10月完成组装并开始试掘进,在掘进施工过程中遭遇了一系列技术难题,包括超前预报和预处理、岩爆风险预测与防治、高地应力下围岩稳定性及支护等。随着这些问题的暴露,进行了相应的研究和方案调整,包括开展综合地质预报手段研究、岩爆综合防治措施研究、TBM半导洞掘进方案、快速有效的支护新材料、新工艺的应用研究等,使得这些问题逐步得到解决,实现了4条引水隧洞的尽早贯通,并积累了大量的技术和工程应用经验。这些经验的获得对于国内外其他项目TBM的选型和施工均具有较大的参考价值。

2 高地应力下开敞式TBM设备选型研究

由于锦屏二级4条引水隧洞具有“长、大、深、群”等特点,使得选择适合于高地应力下施工的掘进机尤为重要。TBM分为开敞式、扩孔式、单护盾、双护盾等多种类型。开敞式、护盾式(单护盾、双护盾)等各种类型的TBM都具有其最适应的地质范围,同时对其他地层都有不同程度的局限性^[3-7]。就开敞式TBM而言,随着TBM和辅助功能的完善与发展,如拱架安装机、锚杆安装设备、挂网机构、

高效的喷混凝土系统等快速初期支护能力,超前预报及超前注浆功能等系统的采用,使开敞式TBM具有了十分完善的功能和先进的技术性能,而发展成为一定意义上的复合式TBM,对围岩的适应性需进一步加强。

综合锦屏二级水电站工程实际情况以及国内外已有的设计施工经验等,经过多方面的分析、比较和论证,认为本工程绝大部分洞段适合开敞式TBM施工。当局部洞段遇到高压地下水、破碎带等不良地质情况时,需考虑加强TBM的防护,如刀盘上方配置护盾。经研究,对锦屏二级水电站TBM设备及后配套的具体选型要求如下:

(1) 掘进机设备是全新的、定制的大功率硬岩掘进机,主机部件在合同工程的掘进中不出现影响正常施工的损伤,在掘进机刀盘设计上,充分考虑换刀时间、开挖效率、经济性、可靠性及耐久性。

(2) 掘进机应对本工程不同的地质情况都具有良好的破岩开挖能力,能够应对锦屏二级引水隧洞的高压大流量涌水、大变形、高地应力岩爆、断层等主要地质问题。具有良好的设备安全性能,在各种工况下能保证人员和设备的安全。

(3) TBM设备须具备脱困能力,脱困扭矩为正常掘进的2倍以上;另外,设备应具备扩挖功能。

(4) 刀盘和刀具设计应能够使掘进机高效安全地通过洞线上的各类地层,刀盘设计有足够的强度、刚度、耐磨性,有足够的耐久性。考虑到岩爆风险,刀盘后部配置短护盾,可根据开挖直径的变化调整,以使TBM具有在护盾防护下安装刚性支撑构件的条件和能力。

(5) 主机的润滑系统和冷却系统均采用闭式回路设计,能承受本工程高压水;为了在突涌水喷淋下可进行施工作业,必须遮挡外水;掘进机上应有移动式防水棚;配备具有伸缩功能的机械手引排水装置。

(6) 后配套系统设计中主要考虑以下设施:供给设备,移动设备,围岩支护设备,地质勘探设备,排水处理设备,隧洞运输设备,掘进机基本设备,用于工作人员的安全设备和应急救生设备等。后配套设计还应考虑在掘进机跨越断层或其他特殊地质需要采用常规法开挖旁洞的必要。

(7) TBM皮带机运输能力至少要满足掘进机最高掘进速度要求。

实践证明,锦屏二级引水隧洞群采用经详细论证和选型的开敞式TBM进行施工后,施工工效得到

较大提高, 全断面最大月进尺达600余米, 远远超过钻爆法施工月进尺。同时, TBM在抵御中等以下岩爆和局部塌落时有一定的优势, 在预测强岩爆风险洞段, 通过半导洞预处理、降低掘进速率和推进力等方法, 可有效降低TBM遭遇强岩爆的风险。

为加快引水隧洞施工进度, 确保按期实现发电目标, 在引水隧洞中部增设了辅引1[#], 2[#], 3[#]支洞及排引1[#], 2[#], 3[#]支洞, 使得引水隧洞中段具备了采用钻爆法进行“长洞短打”的条件, 考虑到TBM和轨道拆卸工期等原因, 现场停止了TBM施工。虽然如此, TBM仍然发挥了其快速掘进的优势, 为实现2012年发电目标创造了有利条件。

在今后拟采用TBM施工时, 建议充分查清隧洞沿线的工程、水文地质条件, 详细开展工程适应性论证, 合理开展TBM主机和后配套选型, 实现TBM开挖、支护、出渣、通风等工序的快速协同作业, 以充分发挥TBM的掘进优势。

3 高地应力开敞式TBM超前预报及预处理研究

3.1 超前地质预报方法研究

为安全施工提供可靠的资料是地质预报的首要任务^[8]。考虑到 TBM 掘进速率较快, 选择随 TBM 移动的实时地质预报系统尤为重要, 为此现场开展了大量的调研、分析论证和试验研究工作。目前, 在隧道施工期间采用的超前地质预报方法大致可分为地质法和物探法两大类, 而地质法主要包括超前导坑、常规地质素描法、超前探孔等方法, 其中常规地质素描法在隧洞施工中普遍得以采用, 并作为设计和施工地质人员的日常工作方法之一。另外, 锦屏二级 TBM 设备配备有超前钻机, 可从护盾位置向前进行钻孔探测, 但由于受到超前钻左右两侧的拱架运输平台的限制, 实际施工中钻机环向施工范围受限。考虑超前钻孔钻进时间较长, 超前钻孔在 TBM 快速施工中不常应用, 但在不良地质条件下根据需要进行超前钻孔; 考虑到 TBM 设备遭遇地下水的风险, 有必要进行超前钻孔, 尤其针对前方出水点的探测。

目前物探方法常用的方法有地震反射法、声波测试、红外探水、电磁波法等。BEAM 方法是德国 Geohydraulik Data 公司研发的一种新型隧道超前预报方法, 其可视化界面如图 1 所示。该方法基本原理属电磁学理论范畴, 即应用电流的频域诱导极化特征来探测掌子面前方存在的异常。实施过程是依

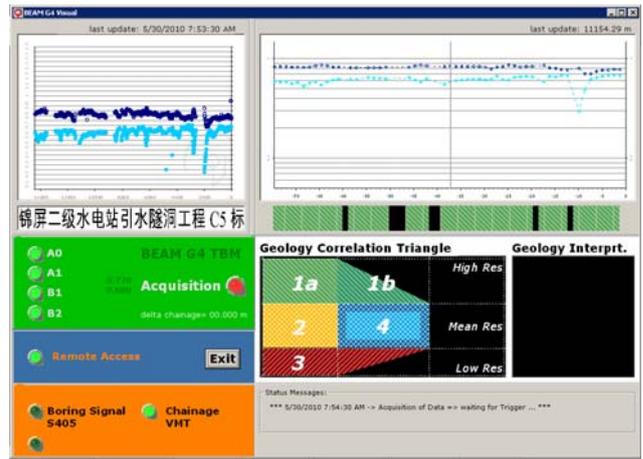


图 1 BEAM 系统的可视化界面
Fig.1 Visual interface of BEAM system

据在掌子面四周布置一圈 A1 极发射互斥的电流, 在 A1 的内部布置 A0 电极用来接收监测电流。通过频率效应百分比(percentage of frequency effect, PFE)与电阻率 R 值的不规则组合情况来描述掌子面前方的地质和水文地质情况, 即岩体类型和含水情况。该方法主要是应对 TBM 开挖而设计的, 应用于 TBM 上可以不占掘进时间, 预测数据是连续采集, 然后分别用红、黄、绿色显示前方的地质情况, 该方法在大伙房输水隧洞等工程中的应用效果较好。该方法在掘进机施工中能最大限度地发挥其快速、简捷、对地下水敏感的优势。在数据采集阶段, A1 极安装大约需 10 min, 而 A0 极不需安装, 数据采集过程可以与掘进机超前钻孔同步进行, 不需要占用施工时间。整个过程需 15 min 左右, 在掘进过程中完成。通过 BEAM 系统曲线分析与实际开挖情况对比, 可以得出, BEAM 系统对 TBM 前方围岩完整性预测效果不明显, 但对前方围岩是否含水(出水点)的预测效果较好。

通过对上述地质预报方法进行大量的分析研究认为, 采用常规地质素描法、超前探孔是比较成熟并简单、有效的方法, 但在 TBM 上采用超前钻孔存在耗时长、角度受限的问题, 使得探测效果受到限制, 在实际施工中可根据需要采用; BEAM 系统应用于 TBM 上可以不占掘进时间, 预测数据是连续采集的, 且之前在大伙房等工程具有较好的应用效果, 因此在锦屏二级 TBM 设计时预留了空间和接口, 并安装了 BEAM 系统, 便于实时的超前地质预报。同时, 在条件具备的前提下, 通过临近的钻爆法开挖洞中采用的“超前钻孔+地质雷达+TSP 系统”进行超前地质预报, 与 BEAM 方法可进行比较和验证。

通过上述综合地质预报方法基本解决了 TBM 掘进中的超前地质预报问题,同时通过对已开挖洞段进行宏观地质判断和预测,对掌子面前方反馈到中控室的相关掘进参数包括掘进速率、扭矩、推进力等分析查出端倪,综合理论和经验方法分析前方可能遭遇的地质条件并做出预判,及时调整掘进机参数以适用围岩地质条件的变化。这几年来 TBM 的掘进情况也证实了采用上述综合地质预报方法的科学性和有效性。

3.2 不良地质处理措施研究

3.2.1 对不良地质体的处理方法研究

根据地质资料,引水隧洞沿线主要为碳酸盐岩及少量砂岩、板岩、绿泥石片岩,成洞条件较好的碳酸盐岩约占洞长的 92%。在引水隧洞施工过程中,需穿越 F5, F6, F25 等断层破碎带,由于破碎带宽一般在 5 m 以内,并与锦屏特有的水文地质相组合,将会带来较为严重的地质问题。为保证 TBM 安全顺利通过,必须采取各种临时和永久支护措施进行处理。在处理不良地质时,须遵循“先治水、短进尺、紧跟支护、稳步前进”的指导原则,并通过洞内或其他洞室进行预处理。

在不具备其他工作面超前处理或已经揭露不良地质体时,一般采用洞内处理。由于辅助洞先于引水隧洞施工,在辅助洞的施工过程中,研究不同围岩情况与不同支护措施的相互对应关系,并结合施工过程中对围岩的原位观测,验证设计的支护参数,归纳出合适的支护参数,指导引水隧洞的支护;通过辅助洞查明的沿线断层破碎带分布情况及其性状,通过地质推测其与引水隧洞的相交情况,尽可能利用辅助洞对其进行超前处理,以便为引水隧洞的顺利施工创造有利条件。

具体来说,即根据已经开挖的地质条件分析推测或通过掌子面超前地质预报预测前方地质条件。如果判断需作超前处理,应立即通过已开挖的隧洞(辅助洞或已超前开挖的相邻洞室)开挖支洞,进行预处理,可以在 TBM 未开挖到不良地质体时,对不良地质体进行灌浆、加固或者将地下水排出(引流)。

3.2.2 对高压大流量地下水的应对措施研究

根据工程地质、岩溶水文地质条件及 5 km 长探洞、2 条 17.5 km 长辅助洞开挖、堵水的施工经验,结合工程区社会环境要求,确定施工期地下水处理采用“先探后掘、以堵为主、可控排放、择机封堵”的设计原则。

对于一般的渗滴水及线状渗水,在 TBM 设计时已充分考虑其防护措施。当出现高压射流溶蚀裂隙管道水, TBM 进行施工,由于在 TBM 设备的设计和制造阶段已考虑防护措施,人员伤亡和设备损坏基本能得到控制,掘进可以照常进行,后处理工作也能及时跟进。

当出现大流量管道突涌水时,将直接威胁人员安全。因此在开展 TBM 前期论证时,已要求将电气设备等主要设备布置于后配套上的较高平台,并采用钢护盾进行防护,以降低人员伤害、设备受损的风险;将 TBM 操作室布置在后部,并要求密封性良好,以确保人员安全。另外在 TBM 后配套设计时考虑配备机械手等辅助设备,当出现出现大流量管道突涌水时,对出水点进行顶压、遮蔽及引排,以保障 TBM 正常施工。

而当 TBM 掘进前方出现高压大流量涌水时,一方面由于 TBM 本身具有较重的机身,可以基本阻挡高压水流,对水流消能,从而避免对施工人员和设备安全产生直接影响。一方面,若在发生前已预计到可能发生高压大流量涌水的地方,可以在 TBM 通过后立即对该处进行加固支护,如钢支撑、预应力锚杆等。为了避免 TBM 通过时遭遇高压大流量涌水的影响,在 TBM 采购时针对主要设备和工作人员的操作区域设计并增设了一套钢护盾,这样既可以确保设备和人员的基本安全,又可以在涌水的情况下采用钢瓦片支护涌水段。当发生 7~8 m³/s 大流量突涌水时,经计算会在已掘进洞段产生 1 m 左右的水深,但不会严重影响 TBM 的施工。从锦屏二级水电站 2 台 TBM 几年来的掘进情况来看,也验证了上述措施和计算成果的有效性, TBM 在施工中虽然多次遭遇地下突涌水,但均未对 TBM 操作人员和设备产生大的影响。

4 高地应力下岩爆风险预测与防治措施研究

随着隧洞埋深的增大,岩爆发生的风险将不可避免增加^[9]。根据对前期已贯通的辅助洞岩爆统计分析结果来看,发生岩爆洞段总长 2 981 m,而中部白山组大理岩(T_{2b})洞段就有 1 945 m,占了岩爆洞长的 65%以上。锦屏二级引水隧洞一般埋深达 1 500~2 000 m,最大埋深 2 525 m,具备岩爆发生的基本条件,对于高地应力下的 TBM 掘进,更应充分考虑和提前应对强岩爆带来的风险。为此,应充分研究强岩爆风险段 TBM 掘进的各项应对措施

和预案，确保 TBM 安全快速通过。

4.1 岩爆洞段 TBM 掘进方案的优化

在 TBM 开挖掘进条件下，受 TBM 设备结构方面的限制，现场难以对掌子面前方 3 m 和掌子面后方 5 m 的微震源主要分布区域和岩爆高风险区实施任何人工干预措施，也难以对这一范围的围岩实施有效支护。相对于钻爆法下可以对潜在岩爆区域实施“控制”，即避免围岩出现破坏而言，单纯 TBM 掘进条件下一般只限于对岩爆发生后的事故处理。

为应对引水隧洞 TBM 掘进到锦屏山核部强岩爆风险段的岩爆问题，提出了强岩爆条件下 TBM 安全掘进岩爆控制预案。该预案的核心思想就是在强岩爆风险段(引水隧洞中部 8~11 km 洞段)采取先导洞预先解除高地应力，再由 TBM 掘进通过的开挖方案；更重要的是先导洞彻底解决了 TBM 针对强岩爆“束手无策”的被动局面，同时先导洞可作为一个地质超前探洞以及超前预处理与微震监测工作面，提供一个良好的预先揭示地质条件、监测、分析、处理强烈与极强岩爆的现实条件。该先导洞方案已经在 1[#]、3[#] 引水隧洞部分洞段成功应用。

1[#]和 3[#]引水隧洞采用钻爆法先期开挖上半部分变截面半导洞开挖方案，方案设计如图 2 所示。开挖段位于引(1)K11+976~K12+127(共 151 m)和引(3)K9+897~668(共 229 m)，施工机首先面临 50 m 长的底部预留 1 m 断面，经过 52 m 长斜坡，底部预留断面高度逐渐增大至 7 m 高断面，开挖断面如图 3 所示。考虑到现场实际条件，实际开挖过程中 1[#]洞 K12+127 处开始断面形式从全断面经过一个短斜坡转为预留 1 m 的断面，而预留 7 m 断面的实际开挖长度约 40 m，在该段后预留有一个较陡的斜坡，TBM 开挖断面再次转入底部预留 1 m 断面，该断面持续约 6 m，半导

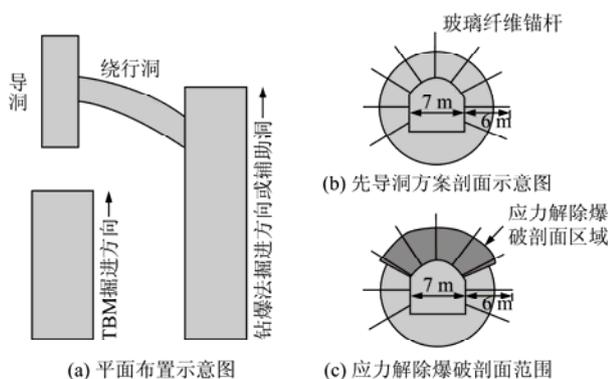


图 2 TBM 导洞方案示意图(钻爆法)

Fig.2 Sketch of pilot tunnel by TBM advancing(drilling and blasting method)

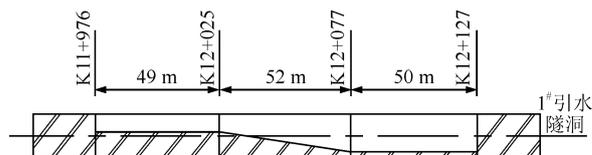


图 3 引水隧洞半导洞开挖后 TBM 施工方案纵剖面图
Fig.3 Longitudinal section of diversion tunnel by TBM advancing after pilot tunnel driven by drilling and blasting method

洞段实际总长约为 157 m。试验段支护采取永久支护和临时支护相结合的方案，顶部采用 $\phi 32$ mm 中空式预应力锚杆结合间距为 15 cm 的钢筋网，并喷射厚度 15 cm 的纳米仿钢纤维混凝土的永久支护形式，边墙采用临时支护，选用 $\phi 28$ mm 玻璃纤维锚杆加 15 cm 厚纳米仿钢纤维混凝土的方案，具体断面设计如图 4 所示。

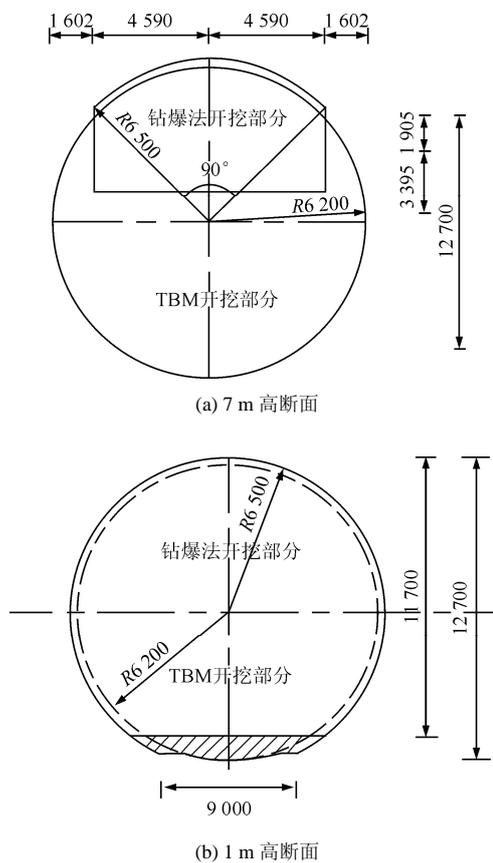


图 4 半导洞开挖断面(单位: mm)

Fig.4 Cross sections of pilot tunnel(unit: mm)

3[#]引水隧洞导洞断面与 1[#]引水隧洞相似，3[#]引水隧洞钻爆法导洞开挖时间为 2010 年 9 月 1 日~11 月 30 日(如图 5 所示)，共计耗时 90 d，累计开挖 224 m，平均日进尺为 2.5 m。钻爆法开挖过程中累计发生中等以上岩爆 14 次，其中较强等级岩爆 5 次。TBM 掘



图5 TBM掘进通过半导洞
Fig.5 TBM passing through pilot tunnel

进通过导洞的时间从2010年12月22日开始,至2011年2月6日结束,总计耗时47d,共计掘进长度为228.7m,平均掘进速度为4.87m/d,其中最大日进尺为11.34m;若扣除节日放假及外部停水、停电等影响因素,平均日进尺为6.25m。TBM在导洞预处理段掘进期间,仅发生2次轻微岩爆,主要表现为局部边墙垮塌和剥落,对TBM设备无损坏。

3#引水隧洞TBM半导洞掘进试验过程中采用微震监测系统实时监控,钻爆法导洞开挖与TBM导洞开挖期间微震监测结果对比如表1所示。

表1 微震监测和实际发生岩爆情况对比

Table 1 Comparison between microseism affairs monitoring and actually occurred substantial rockburst

开挖情况	微震事件数/次	微震事件震级	微震事件及能量情况	岩爆情况
钻爆法开挖先导洞	≈1 600	-2.5~2.0	能量较大,事件较多	14次中等及以上岩爆,其中5次为中等偏强岩爆
TBM掘进通过导洞	≈1 100	-2.0~0.8	能量较大,事件很少	2次轻微塌落

从表1及现场监测结果表明,通过采用半导洞开挖方案,有效地解决了强岩爆风险洞段的TBM掘进风险,避免了TBM遭遇强岩爆的施工风险,降低了人员和设备的损失和风险。另一方面,从工效计算上也可以看出,采用半导洞开挖的方式也降低了TBM掘进的工效,对TBM刀盘、主轴承及主梁受力也将产生一定程度的偏压。虽然实际施工中通过降低掘进速率和推进力,基本未对TBM主轴承及主梁造成影响。因此,采用必须在充分论证的前提下,认为确实有必要时才采用半导洞方法通过的方式。

4.2 岩爆监测及预测预警研究

岩爆发生机制与防治一直是工程界的难题,岩石力学与工程界的一些传统观点认为岩爆是不可监测预警的,自微震监测系统在冬瓜山铜矿中应用以来,近年来该系统已在国内矿山中得到应用,主要用于矿震定位、突水、瓦斯监测等方面^[10-12]。在国内水电工程隧洞施工中上并无现成的应用实例,而

随隧道施工实时跟进的移动微震监测系统更无先例。为贯彻“以人为本”及安全文明施工的理念,最大程度地保证现场人员和设备安全,锦屏二级水电站在国内首次将微震监测技术用于大型水电站工程,进口加拿大ESG公司和南非ISS公司开发的全套微震监测系统和专用数据采集设备及处理软件,用来监测开挖面前方的微震事件和微破裂情况,以判断前方岩爆发生的风险和等级。自2009年3月以来,以施工中的锦屏二级水电站施工排水洞、1#~4#引水隧洞为监测对象,首次构建了随TBM掘进和钻爆法掘进而移动监测设备的移动式微震监测系统,对掌子面前、后的岩体微震活动进行实时连续监测和分析预报。2009年10月7日首次预报施工排水洞可能发生岩爆,2d后即10月9日上午发生较强岩爆,由于此次预报较为及时,未对人员和设备造成伤害,在之后监测过程中又多次预报到岩爆发生的大致范围。通过2a多的应用实践,采用微震监测预报岩爆取得了较大成效。经初步统计,大多数岩爆发生的大致范围得到准确预测,部分岩爆的等级也得到准确预测,而岩爆发生时间难以预测。

图6为在2#引水隧洞靠近1#引水隧洞洞边墙内布置传感器监测1#引水隧洞洞TBM掌子面的监测情况,图中显示的是2010年5月6日至6月17日监测到的298个微震事件。图7为现场实际发生的岩爆情况。

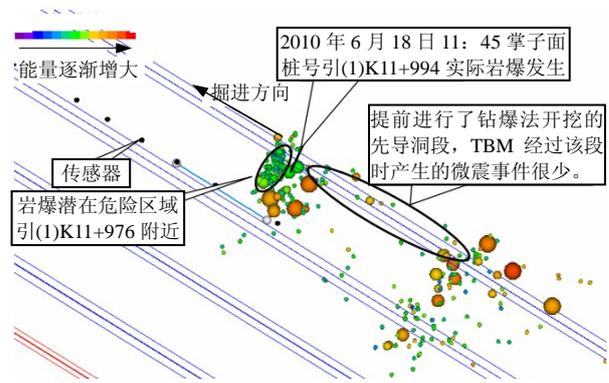


图6 微震事件三维显示图

Fig.6 Three-dimensional display image of microseism affairs



图7 现场实际发生的中等岩爆情况

Fig.7 Actual substantial medium rockburst at site

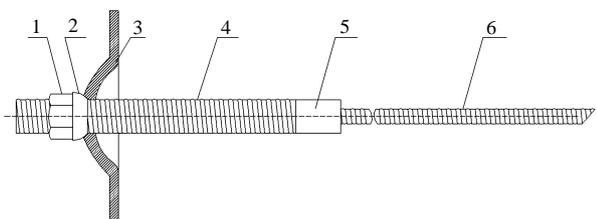
从较强岩爆发生前的特征来看，有一个明显的类似于地震前平静期的安静期，但是时间不定，如 2010 年 10 月 9 日约 4 h、11 月 15 日约 6 h、11 月 21 日约 8 h，而且之前的其他时段也出现没有微震事件发生的安静期，因此目前还无法准确判断岩爆前的平静期。影响岩爆发生时间的因素很多，如岩体结构和力学特性、围岩应力状态、TBM 掘进速度、卸荷速率等，所以，对于岩爆发生时间的准确预测，对于开挖隧道来说仍难以实现，但是对于有针对性采取岩爆工程对策、危险区域的准确划定、确保隧道安全施工方面仍具有重要的指导意义。

4.3 TBM 抗岩爆快速支护新材料研究

锦屏二级引水隧洞工程特殊的地应力环境及围岩特性造成了围岩破坏型式的多样化，因而对隧洞支护提出了更高的要求，隧洞开挖后必须及时实施足够的系统支护，以尽可能避免具有硬脆性特征的表层岩体，在高应力下围岩破裂损伤不断发展并最终形成失稳破裂。同时，需防止岩爆给 TBM 掘进时的人员和设备造成伤害。为此，有必要开展快速有效的支护方式，以确保 TBM 安全、快速掘进。

4.3.1 防冲抗爆新型锚杆试验研究

为了探索高地应力强岩爆洞段合适的锚杆类型，在国内知名专家院士的建议下，现场选择若干洞段进行了防冲抗爆恒阻大变形锚杆(可伸缩锚杆)的支护试验工作。恒阻大变形锚杆如图 8 所示，试验锚杆杆体直径 22 mm，恒阻装置直径 33 mm，长度为 6.0 m，恒阻值 130 kN，平均拉伸变形量不小于 50 cm，分别采用树脂锚固剂和水泥砂浆锚固。恒阻大变形锚杆试验设计断面图如图 9 所示。



1—螺母；2—球垫；3—托盘；4—恒阻装置；5—连接套；6—杆体

图 8 恒阻大变形锚杆结构图

Fig.8 Structural drawing of constant resistive and large deformation anchor bar

由于该锚杆试验洞段为随机选取，在防冲抗爆恒阻大变形锚杆施作之后，无岩爆情况发生，该锚杆防止岩爆的功能还需进一步观察；该锚杆在施工工效方面与涨壳式中空预应力锚杆基本一样，较预应力锚杆时间长，主要与施工人员的熟练程度有关。

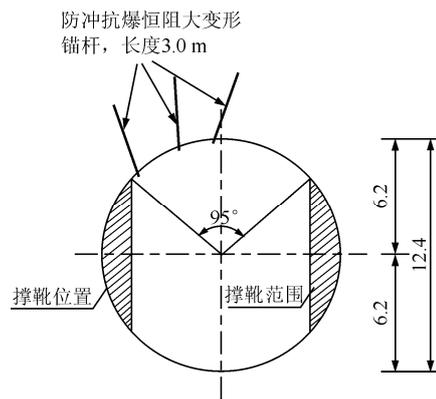


图 9 恒阻大变形锚杆试验设计断面图(单位：m)

Fig.9 Design of section of experiment on constant resistive and large deformation anchor bar(unit: m)

通过现场试验表明(如图 10 所示)，锚杆在 14 kN 拉力下拉拔可伸长 50 cm，如发生岩爆可起到一定缓冲作用。现场还试验了楔形锚杆、中空涨壳式预应力锚杆、水胀式锚杆、横阻大变形锚杆等锚杆的抗岩爆效果，试验结果如表 2 所示。



(a) 锚杆加工



(b) 试验检测

图 10 恒阻大变形锚杆加工及试验检测图

Fig.10 Machining and detective test views of constant resistive and large deformational anchor bar

从目前已经进行的预应力锚杆试验结果来看，涨壳式预应力中空注浆锚杆、水胀式锚杆、楔缝式普通预应力锚杆及涨壳式普通预应力锚杆都可实现设计预期目的，但水胀式锚杆、涨壳式预应力中空注浆锚杆施工效率更高，使用更加方便，可靠度更高。

表2 防岩爆锚杆试验结果对比

Table 2 Comparison of test results of resisting rockburst of different anchor bars

锚杆类型	施工工效	现场试验效果
楔形锚杆	单孔钻孔平均用时2~3 min, 安装用时2~3 min, 总计用时4~6 min	能快速形成支护力, 由于试件加工等方面的原因, 试验过程中发现其力学性能不足、施工复杂、锚杆加工要求精度高, 难以满足快速支护和防岩爆的要求
中空涨壳式预应力锚杆	单孔钻孔时间为2~3 min; 单根安装用时2~3 min; 注浆时间2 min, 但不占用直线时间	强度起效快、施工速度快, 注浆工序不占直线工期, 对抑制围岩塌方、片帮、掉块有很好效果, 对加快TBM施工有较好的促进作用。缺点是TBM撑靴通过时易将中空涨壳式锚杆端部压坏, 使锚杆丧失锚固力
水胀式锚杆	单根锚杆施工时间和涨壳式中空预应力锚杆基本相同	施工速度较快, 不进行注浆, 可施加一定的预应力, 能快速形成支护力, 撑靴通过不易压坏。缺点是只能作为临时支护
横阻大变形锚杆	单孔钻孔平均所用时间为6 min, 锚固剂安装时间为5 min, 杆安装时间为2 min, 总计13 min/根	安装试件相对较长, 主要是锚固剂安装试件较长。由于该锚杆试验洞段为随机选取, 在防冲抗爆恒阻大变形锚杆施作之后, 现场无岩爆情况发生, 该锚杆防止岩爆的功能还需进一步观察

其使用效果则与施工人员技术水平、熟练程度、工效比等因素有很大关系。对于具体预应力锚杆的选型, 只要性能指标符合设计要求, 且能够达到开挖完成后快速施加预应力的锚杆型式, 均可用于工程现场。

4.3.2 TBM 新型喷护材料研究

由于锦屏二级引水隧洞开挖后应力重分布造成表层岩体破裂损伤现象, 导致喷射混凝土与围岩之间黏聚力相对较差, 频繁发生喷层脱落, 初喷采用常规喷射混凝土实际支护效果不明显。这些现象将导致围岩与喷层、衬砌之间不能有效传力, 围岩、支护破坏的可能性增加。受TBM设备限制, 喷射钢纤维混凝土存在很大困难, 需考虑掺加聚丙烯微纤维和有机仿钢纤维材料的可能性。

为此, 根据现场情况选择了不同初选配合比方案开展室内混凝土性能试验。试验结果表明:

(1) 纳米+钢纤维、纳米+有机仿钢纤维的力学性能相对较好, 不同厂家外加剂品种、不同厂家有机仿钢纤维品种对混凝土强度及其他性能影响较小, 硅粉+钢纤维、硅粉+有机仿钢纤维性能略差于纳米+钢纤维、纳米+有机仿钢纤维, 但均符合设计要求的最低标准。

(2) 通过不同纳米外加剂掺量的混凝土强度试验可知, 混凝土强度随着纳米外加剂掺量的增加而提高, 且4种纳米外加剂掺量的混凝土强度均满足设计要求。

(3) 掺加有机仿钢纤维或钢纤维的混凝土力学

性能优于C30强度等级纳米混凝土、C25强度等级混凝土, 符合一般认识。根据初选配合比室内试验成果, 并考虑施工现场喷射混凝土的特点和实际情况, 进一步选取各项原材料进行现场喷射混凝土拌和物性能检验(大板试验), 在开展现场大板试验的同时, 也进行了部分项目的室内成型检测, 以便进行比较。对比结果表明:

① 现场喷射质量对混凝土强度结果影响较大, 喷射不密实时混凝土抗压强度和抗拉强度偏小, 现场个别试件未达到设计要求。

② 掺加速凝剂后混凝土的力学性能总体上有所降低。

③ 掺无机纳米材料喷射混凝土性能总体上优于掺硅粉喷射混凝土, 可能与掺无机纳米材料喷射混凝土密实程度及纤维分布均匀性较好有关。

④ CF30双掺无机纳米材料+钢纤维喷射混凝土初度指标试验结果较优。

经过大量的试验工作, TBM在岩爆段施工过程中采用了无机纳米材料和有机仿钢纤维材料的喷射混凝土进行围岩支护。现场实践表明, 掺加无机纳米材料和有机仿钢纤维材料后, 可部分替代钢筋网和钢纤维, 实现强度起效快、增强、防裂的效果, 并具有改善和易性、抑制裂缝、提高抗冻融能力、抗疲劳、抗渗、抗磨、抗碎裂、抗冲击、抗弯增强和辅助增强功能, 减少回弹量等。而且更加经济、省时方便。采用新型喷射材料, 不仅大大提高了TBM施工工效, 并能较为有效地抑制岩爆的发生, 为TBM安全快速掘进起到非常积极的作用。

5 结 论

锦屏二级水电站地处高山峡谷地区, 经过多次论证后选用开敞式全断面硬岩隧道掘进机(TBM)进行施工, 为确保开敞式TBM安全快速掘进, 围绕TBM设备选型、超前地质预报方法及预处理措施、岩爆风险预测预警、防岩爆快速支护新材料等方面进行了综合分析研究。经研究认为, 得到以下几个主要结论:

(1) 采用开敞式TBM掘进机施工前应对施工过程中对可能会遇到的问题进行充分研究, 包括岩石强度、可钻性、不良地质预测(地下水、地应力、软岩、溶蚀、结构面、有害气体等)、通风排烟系统、出渣系统、刀盘结构、后配套选型、设备防护要求以及工程总进度等进行综合分析, 合理开展设备选型。

(2) 通过TBM试掘进, 及时发现设备方面存在的问题, 并与厂家积极沟通, 必要时进行设备改造

和调整, 以适应复杂多变的现场环境。

(3) 根据现场实际情况, 在施工过程中根据围岩情况及地质预报成果及时调整掘进参数和策略, 保证 TBM 的掘进能力得到最大程度的发挥。

(4) 当遇到岩爆、高压突涌水等不利情况, 采取有效实时的地质预报系统进行掌子面超前预报, 提前进行掌子面预处理, 必要时通过钻爆法预处理导洞、微震监测、应力解除爆破、能快速形成支护力的锚杆和新材料等措施, 确保 TBM 安全通过, 尽量规避 TBM 掘进风险。对于溶蚀溶腔、断层等, 则采取必要的预处理措施, 以确保 TBM 安全通过。

(5) 采取强有力的管理措施, 加强现场施工管理, 建立健全分级决策体系和各参建单位之间的充分沟通机制, 如 TBM 工作组制度、岩爆工作组制度、地下水处理工作组制度、岩爆风险预测与现场支护措施落实反馈机制等; 并采取必要的激励措施, 如开展劳动竞赛等, 从精神和物质层面进行激励。

(6) 加强现场人员的安全教育和培训, 加强操作人员的技能培训, 保证现场人员和设备安全的前提下, 提高 TBM 掘进工效, 实现 TBM 安全快速掘进。

本文对开敞式硬岩掘进机在锦屏二级引水隧洞群中的应用经验进行总结和梳理, 希望能对今后开敞式掘进机的选型和使用提供一些有益的参考。

参考文献(References):

- [1] 吴世勇, 王 鹤, 徐劲松, 等. 锦屏二级水电站 TBM 选型及施工关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 000 - 2 009.(WU Shiyong, WANG Ge, XU Jinsong, et al. Study on TBM type-selection and key construction technology in Jinping II hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 000 - 2 009.(in Chinese))
- [2] 吴世勇, 王 鹤. 锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设 and 工程中的挑战性问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2 161 - 2 171.(WU Shiyong, WANG Ge. Challenge issues in construction and project of large-scale deep-buried tunnel group of Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2 161 - 2 171.(in Chinese))
- [3] 水利部科技推广中心. 全断面岩石掘进机[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 8.(Extension Center for Science and Technology of Ministry of Water Resources, People's Republic of China. Full-face TBM for hard rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 8.(in Chinese))
- [4] 安伯格工程咨询公司. 锦屏二级长引水隧洞采用TBM施工可行性咨询报告[R]. 瑞士: 安伯格工程咨询公司, 2006.(AmBerg Engineering Consulting Company. Feasibility consultation report on TBM working for Jinping II hydropower station with long diversion tunnel[R]. Switzerland: AmBerg Engineering Consulting Company, 2006.(in Chinese))
- [5] 钱七虎, 李朝甫, 傅德明. 全断面掘进机在中国地下工程中的应用现状及前景展望[J]. 建筑机械, 2002, (5): 28 - 35.(QIAN Qihu, LI Chaofu, FU Deming. Application situation and outlook of TBM to underground project in China[J]. Construction Machine, 2002, (5): 28 - 35.(in Chinese))
- [6] 张镜剑, 李典璜, 薛继洪, 等. 长大隧道掘进机的应用及其主要岩石力学问题的处理[C]// 王思敬, 杨志法, 傅冰骏编. 中国岩石力学与工程世纪成就. 南京: 河海大学出版社, 2004: 582 - 597.(ZHANG Jingjian, LI Dianhuang, XUE Jihong, et al. Application of TBM to long distance tunnels and measurement of main rock mechanical problems[C]// WANG Sijing, YANG Zhifa, FU Bingjun ed. Century Achievements in Rock Mechanics and Engineering of China. Nanjing: Hohai University Press, 2004: 582 - 597.(in Chinese))
- [7] 张镜剑, 傅冰骏. 隧道掘进机在我国应用的进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 226 - 238.(ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Advances in tunnel boring machine application in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 226 - 238.(in Chinese))
- [8] 王洪勇. 综合超前地质预报在圆梁山隧道中的应用[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(3): 55 - 61.(WANG Hongyong. Comprehensive advance geology prediction adopted in Yuanliangshan tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2004, 41(3): 55 - 61.(in Chinese))
- [9] HIRATA A, KAMEOKA Y, HIRANO T. Safety management based on detection of possible rock burst by AE monitoring during tunnel excavation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(6): 563 - 576.
- [10] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 932 - 1 938.(JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2008, 27(9): 1 932 - 1 938.(in Chinese))
- [11] 唐礼忠, 潘长良, 杨承祥, 等. 冬瓜山铜矿微震监测系统建立及应用研究[J]. 采矿技术, 2006, 6(3): 272 - 277.(TANG Lizhong, PAN Changliang, YANG Chengxiang, et al. Microseismic monitoring system establishment and apply research in Donggua mountain copper mine[J]. Mining Technology, 2006, 6(3): 272 - 277.(in Chinese))
- [12] 潘一山, 赵扬锋, 官福海, 等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1 002 - 1 011.(PAN Yishan, ZHAO Yangfeng, GUAN Fuhai, et al. Study on rockburst monitoring and orientation system and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 002 - 1 011.(in Chinese))