

锦屏二级水电站引水隧洞工程 TBM 施工

李卫国, 孔凡彬

(四川二滩国际工程咨询有限责任公司, 四川 成都 611130)

摘要:锦屏二级水电站1#、3#引水隧洞具有埋深大、洞线长、洞径大、地质条件复杂、岩爆、突涌水问题突出的特点。介绍了TBM设备选型、TBM组装和拆卸洞室的设计、TBM施工进度及支护施工、TBM在大流量突涌水、岩爆洞段的掘进施工技术,可为今后TBM的施工提供参考。

关键词:TBM;设备选型;掘进施工;岩爆;锦屏二级水电站

中图分类号:TV7;TV52;TV554;TV554+.2

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2015)增2-0005-04

1 工程概述

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁三县交界处的雅砻江干流锦屏大河弯上,是雅砻江干流上的重要梯级电站。其引水系统采用4洞8机布置形式,引水隧洞长16.67 km,电站总装机容量为4 800 MW,单机容量600 MW。引水隧洞洞群沿线上覆岩体一般埋深为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,为世界上规模最大的水工隧洞工程。隧洞区实测最大主应力值达到42.11 MPa。全洞段有长达8 km的高地应力区,特别是在引水隧洞中部的地应力在60 MPa以上。

东端1#、3#引水隧洞采用TBM法施工,其开挖直径为12.4 m,初期采用喷锚支护,系统布置中空注浆锚杆,混凝土衬砌厚度为60 cm,衬后隧洞洞径为11.2 m,洞内流速为4.72 m/s。

2 TBM 设备选型及其主要性能

TBM设备由业主负责采购,承包商使用后负责进行恢复性修理,验收合格后移交业主。在设备选型阶段,经过多方面的分析、比较和论证,最终选用开敞式TBM设备,其具体选型要求如下:

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

(2)掘进机应对本工程的高压大流量涌水、

大变形、高地应力岩爆、断层等地质情况都具有良好的破岩开挖能力和防护功能,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,脱困扭矩应为正常掘进的2倍以上;另外,设备应具备扩挖功能。

(4)刀盘应有足够的强度、刚度、耐磨性,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。刀盘后部配置可调整开挖直径的短护盾,以安装刚性支撑构件。

(5)主机的润滑系统和冷却系统均采用封闭式回路设计,能承受本工程所遇到的高压水;掘进机上应有移动式防水棚,以遮挡突涌水喷淋并具有自动引排水装置。

(6)后配套系统设计中主要有: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情况需要采用常规法开挖旁洞的情况。

(7)后配套台车轨道架高1.5 m,以满足洞内大流量、突涌水的过水要求。

(8)TBM皮带机的运输能力至少要满足掘进机最高掘进速度要求。

经过招投标,1#、3#引水隧洞分别采购了由美国ROBBINS公司和德国海瑞克公司生产的敞开式硬岩掘进机(简称TBM)。

3 TBM 组装洞、出发洞、步进洞及拆卸洞的设计

3.1 1#引水隧洞 TBM 组装洞、出发洞、步进洞

收稿日期:2015-07-14

及拆卸洞的设计

1#引水隧洞 TBM 主机组装洞室断面尺寸为 $17.6\text{ m} \times 25.2\text{ m}$ (宽 \times 高), 长度为 75 m ; TBM 后配套组装洞室断面尺寸为 $17.6\text{ m} \times 21.8\text{ m}$ (宽 \times 高), 长度为 90 m 。

出发洞长度为 20 m , C25 钢筋混凝土底板厚 30 cm , 预埋 4 根 H250 型钢。出发洞边顶拱范围进行二次混凝土衬砌, 厚度为 34.3 cm 。

步进洞长度为 195 m 。开挖断面为马蹄形, 半径为 6.8 m , 高 \times 宽 = $13.3\text{ m} \times 13.6\text{ m}$, 底部净宽 10 m , C25 钢筋混凝土底板厚 30 cm , 预埋 4 根 H250 型钢。

拆卸洞断面尺寸为 $15.6\text{ m} \times 25.2\text{ m}$ (宽 \times 高), 长度为 53 m 。

3.2 3#引水隧洞 TBM 组装洞、出发洞、步进洞及拆卸洞的设计

3#引水隧洞 TBM 主机组装洞室断面尺寸为 $17.6\text{ m} \times 27$ (宽 \times 高), 长度为 83 m ; TBM 后配套组装洞断面尺寸为 $15.2\text{ m} \times (19.8 \sim 27)\text{ m}$ (宽 \times 高), 长度为 165 m 。该组装洞是国内开挖高度最大、长度最长、施工量最大的 TBM 组装洞室, 配置 4 台桥机。

出发洞和步进洞合计总长度为 49.5 m 。高 \times 宽 = $11.5\text{ m} \times 14.025\text{ m}$, C25 钢筋混凝土底板厚 60 cm , 预埋 4 根 H300 型钢, 边顶拱范围二次混凝土衬砌厚度为 53 cm 。

拆卸洞断面尺寸为 $(15 \sim 17.6)\text{ m} \times (26.4 \sim 27)\text{ m}$ (宽 \times 高), 长度为 60 cm 。

4 施工进度情况

4.1 1#引水隧洞

1#引水隧洞 TBM 于 2008 年 4 月 1 日完成组装前的准备工作(组装洞施工及其桥机的安装和验收), 具备组装条件, 2008 年 4 月 9 日主轴承运抵现场, 4 月 16 日正式进入组装, 历经近 5 个半月的时间, 至 2008 年 9 月 18 日 TBM 组装工作完成, 具备连续掘进的条件。

1#TBM 于 2008 年 11 月 16 日开始试掘进, 2009 年 12 月 11 日完成 2 km 试掘进。其中 2009 年 8 月 11 日至 2009 年 9 月 27 日为设备改造期。试掘进平均日进尺为 5.17 m (含设备改造时间, 下同), 平均月进尺为 155 m , 最高日进尺为 26 m , 最高月进尺为 324 m 。

2009 年 12 月 12 日 TBM 进入正常掘进段, 至 2010 年 12 月 11 日 1#TBM 完成掘进里程 $3\ 860\text{ m}$, 最高月进尺为 537 m 。但 2010 年 3 月由于突发大涌水, 导致月进尺只有 118 m 。2010 年 5 月, 由于岩体破碎、塌方频发造成刀牙大量损坏、超前喷混凝土频繁, 致使 5 月份的进尺只有 79 m , 6 月份的进尺只有 168 m 外, 其余各月平均进尺达 388.33 m 。2012 年 12 月 11 日掘进结束。

4.2 3#引水隧洞

3#引水隧洞 TBM 的现场组装工作自 2008 年 5 月 26 日开始, 至 2008 年 11 月 15 日结束。

TBM 于 2008 年 11 月 16 日正式开始试掘进工作, 至 2009 年 9 月 27 日掘进长度为 $2\ 002.28\text{ m}$, 试掘进期最高日进尺为 30.03 m (2009 年 7 月 20 日), 平均月进尺为 199.74 m 。

3#引水隧洞自 2008 年 11 月 17 日开始试掘进, 至 2011 年 2 月 21 日掘进结束, 共掘进进尺 $6\ 295.19\text{ m}$, 平均月进尺为 228.10 m 。其中在 2010 年 1 月 19 日完成单日进尺 33.67 m , 2010 年 1 月完成进尺 682.92 m , 均创造了国内同等直径 TBM 施工的最好成绩。在掘进期间, 屡屡遭受设备故障、岩爆、涌水、架高等因素的影响, 其中 293 天日进尺小于 3 m (该时间段进尺 151.14 m), 除此之外, 平均日进尺为 11.48 m , 在地质条件允许的情况下, TBM 可以达到相对较好的施工进度。

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, 从而使得引水隧洞中段具备采用钻爆法进行“长洞短打”的条件。

5 TBM 支护施工

为确保施工人员和设备的安全, L1 区需完成临时锚杆(尽可能采用“永久 + 临时”结合)和必要的喷混凝土、挂网以及钢拱架安装施工; L2 区在完成挂网和喷混凝土施工后, 优先进行了边墙系统锚杆施工, 并尽可能地完成了其他部位系统锚杆。系统(长)锚杆则由后备台车完成。

L1 区锚杆钻机纵向行程取决于推进油缸, 掘进时推进油缸全张开, 锚杆钻机最大行程为 1.8 m 。一般可施工边顶拱 220° 范围内的系统锚杆。考虑到撑靴通过时可能会压坏锚杆, 故在实际施工时, 一般施工顶拱 110° 左右范围的系统锚杆。

L2区锚杆钻机距离掌子面40~46 m,理论纵向行程为6 m,实际为5 m。可施工锚杆范围为顶拱110°~顶顶拱270°范围的系统锚杆,实际施工时,L2区域的钻机不能进行顶拱部位的锚杆孔施工(钻机距顶拱有一定的距离),其钻孔有效深度达不到3.8 m,因此,将撑靴顶部以下的所有锚杆孔均放在L2区进行,其施工角度为顶拱110°至270°范围。

L1区左右两侧各配备一台手动喷混凝土机,环向喷护范围可覆盖顶拱270°,实际工作能力一般为6~9 m³/h,纵向覆盖范围为撑靴以前的顶拱和拱腰部位。

L2区配备2台机械喷混凝土机,混凝土喷射范围为边顶拱270°,理论行程为12 m,实际纵向行程为10 m,喷射混凝土能力控制在14~16 m³/h,同时,在后配套台车上备用一台同样的混凝土泵。

根据设计要求,引水隧洞需要施工长度为6 m/9 m的系统锚杆。而TBM设备自身所配置的钻机不具备施工长锚杆的能力。为了不影响TBM的掘进速度,在增加的台车上施工长度为6 m/9 m的系统锚杆。

6 TBM通过不良地质洞段的处理及应对措施

6.1 大流量突涌水洞段

TBM掘进过程中,突发大涌水对施工产生了较大影响。涌水压力过大会造成TBM润滑系统进水,因此,需多次更换润滑油以避免主轴承受损。同时,大涌水会导致排水系统无法满足排水要求,掘进需缓慢进行。所采用的相应的涌水处理措施为:

(1)出水点孔径较小的情况下,使用导引管将水引至洞底排出;

(2)出水点较大、不规则、水压大的情况下,可使用注浆封堵或化学封堵,但这两种方式均与TBM掘进相互干扰,封堵期间,掘进施工将停止。合理的处理方式是在后配套尾部铺设挡水墙,在主机区增加抽水泵,将水抽至后配套尾部排出,降低主机区的水位,以保证轨道延伸正常进行;

(3)保证底拱水路通畅是最为关键的措施。由于1#引水隧洞为反坡掘进,在坡度的影响下,水流自流将极大地缓解抽排水的工作量,从而有效降低了主机区水位;

(4)大涌水在刀盘前方和主机区域时,对TBM掘进施工影响最大。当出水点到达连接桥后部时,立即在钢枕设置围堰,以减少返流量,再配合大功率水泵抽排水,即可进行正常的掘进施工。轨道铺设区域使用沙袋砌筑水坝,钢枕铺设分为左右两部分分别进行。

6.2 高地应力及岩爆洞段

锦屏二级水电站引水隧洞的典型岩爆主要发生在隧洞的两侧边墙部位,在局部洞段掌子面也会发生岩爆或大面积的应力型坍塌。

6.2.1 岩爆或大面积应力型坍塌造成的后果

(1)大量的岩石坍塌并堆积在护盾至主梁之间,且部分岩石块体较大,坍塌的岩石占据了后配套轨道的敷设空间。受制于TBM设备空间的限制,大块石解小及石渣清理只能采用人工和小型机械进行,清理效率低,花费的时间长,使得TBM不得不因清渣而停止掘进。

(2)TBM的护盾被卡,撑靴油缸被砸坏。

(3)护盾油缸因护盾受到岩爆的冲击而遭受损坏。

(4)撑靴部位塌方严重,撑靴无法直接撑到岩壁。

(5)掌子面的岩石直接剥落,使得刀盘与掌子面部分接触,刀盘荷载不均,若所设置的掘进参数不合适,滚刀的轴承将会受到损坏,严重时甚至可能会使主轴承受到损坏。

(6)刀具因掌子面岩石的剥落而被大量砸坏。

(7)撑靴撑过后,引起岩石的二次坍塌。

6.2.2 岩爆洞段实现顺利掘进所采取的措施

(1)充分利用微震监测手段提前预测并及时将监测结果进行沟通,根据监测结果指导现场施工,按照“安全第一、防治结合、科学操作”的原则组织施工。

(2)TBM采取短循环掘进,充分利用现有设备,加强支护,岩石在护盾出露后,立即对顶拱范围采取早强、快速的锚网支护和喷射混凝土支护。锚杆采用能够立即发挥作用的中空涨壳式预应力锚杆,掘进一个循环,支护一个循环。

(3)为减少撑靴撑过后引起的岩石二次坍塌,利用L1区的锚杆钻机和平台在撑靴部位施工水涨式锚杆进行临时支护。

(4)锦屏二级水电站引水隧洞岩爆洞段开挖

采取的具体处理方法见表 1。

(5) 岩爆后采取的主要处理措施。

表 1 岩爆洞段开挖采取的主要处理措施表

序号	岩爆程度及其发生情况	处理措施	备注
1	顶拱和腰部塌方	顶拱和腰部及时施工 3.8 m/6 m 长涨壳式中空预应力锚杆,停机喷射混凝土后(厚度 5~8 cm)再行掘进	/
2	撑靴部位塌方	为避免撑靴塌方,应在围岩出露后及时跟进喷射 CF30 纳米仿钢纤维混凝土,喷射混凝土厚度为 5~8 cm。撑靴扰动后出现塌腔时可采用喷混凝土回填,待混凝土强度达到撑靴压力时再恢复掘进	/
3	轻微至中等岩爆	顶拱和腰部及时施工 3.8 m/6 m 长涨壳式中空预应力锚杆。现场塌方严重不能施工锚杆时,TBM 停机,先喷射混凝土后(厚度 5~8 cm),再施工锚杆和挂网,然后再行掘进	同 1
4	强烈岩爆	减慢 TBM 掘进速度,开挖一个循环支护一个循环,顶拱和腰部及时施工 6 m 长涨壳式中空预应力锚杆,喷射混凝土后(厚度 10~15 cm)再行掘进。必要时对于顶拱 270°进行围岩封闭并准备几部手风钻,待混凝土强度满足施工要求后,采用手风钻在 L1 区系统施工顶拱 120°以外的 6 m 长涨壳式锚杆	/
5	极强岩爆、刀盘卡机	顶拱和腰部及时施工 6 m 长涨壳式中空预应力锚杆,停机进行顶拱 270°喷射混凝土(厚度 10~15 cm)和锚网后再行恢复掘进。对于因岩爆导致围岩卡机的情况,可根据具体情况采取调整护盾伸缩量等确保刀盘能够启动	/

对于岩爆产生的大量石渣,主要采取人工和小型机械出渣。石渣清理完成后再采取支护措施。岩爆的整体处理原则为:排险→清渣→再排险→再清渣→初喷混凝土→支护(以回填混凝土、锚杆、挂网为主)。

(6) 岩爆造成卡机后采取的处理措施。

在 TBM 通过强岩爆洞段难免会发生刀盘和护盾被卡的情况。因岩爆大多发生在刀盘前部并随之诱发护盾附近围岩塌方或岩爆。但根据导洞开挖试验,若发生掌子面岩爆情况,可适当调整掘进参数,先将前部塌方的石渣清除后再恢复掘进。

(7) 对于长距离潜在的强和极强岩爆洞段,直接利用相邻洞室先进行的导洞开挖释放应力,然后采用 TBM 部分断面掘进的方式予以通过。锦屏二级水电站现场在强岩爆洞段选取了 3 个导洞试验段,先采用钻爆法半导洞开挖进行预处理,然后采用 TBM 设备扩挖下半断面,整个施工过程利用微震监测手段实时监测围岩体能量的释放规律,最后与 TBM 全断面开挖围岩能量释放与岩爆情况进行对比,其结果显示微震事件数量明显减少,震级和能量明显降低,岩爆风险明显降低。钻爆法开挖过程中,曾产生多次轻微、中等甚至强烈

岩爆,而 TBM 开挖通过此段时主要表现为边墙局部塌方,对 TBM 的正常掘进影响较小。

(8) 掘进过程中,应加强对石渣块度大小及均匀程度的观察,同时,利用换步的时间加强对掌子面的观察,及时掌握掌子面的坍塌范围并结合刀盘抖动情况适当的调整掘进参数。

(9) 对于岩爆洞段,应勤检查刀具、刀盘、铲齿,如有损坏或磨损立即进行更换。每个行程检查一次,掘进超过 10 m 后,每三个行程检查一次。

7 结 语

笔者对 TBM 在锦屏二级水电站引水隧洞中的施工经验进行了总结和梳理,介绍了 TBM 设备选型要求、TBM 组装洞及其拆卸洞的设计、TBM 施工进尺、TBM 在岩爆、突涌水不良地质洞段的施工掘进技术,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。

作者简介:

李卫国(1972-),男,四川宣汉人,副总经理,高级工程师,学士,从事水利水电工程建设监理工作;

孔凡彬(1969-),男,四川隆昌人,技术委员会主任,高级工程师,学士,从事水利水电工程建设监理工作。

(责任编辑:李燕辉)

溪洛渡水电站累计发电量突破 800 亿千瓦时

截至 6 月 29 日 23 时 5 分,全国第二、世界第三大水电站——溪洛渡水电站累计发电量突破 800 亿千瓦时,相当于减少原煤消耗 3 900 多万吨、二氧化碳排放 8 000 万吨。溪洛渡水电站共安装有 18 台单机容量 77 万千瓦的大型水轮发电机组,总装机容量 1 386 万千瓦。电站于 2005 年 12 月开工建设;2013 年 7 月首批机组并网发电;2014 年 6 月底 18 台机组全面投运。在溪洛渡电厂“精益运行、精心维护、精细管理”的管理模式下,所有投产机组均实现“首稳百日”,且所有机组投产至今均达到了“零非停”目标。溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省永善县接壤的金沙江溪洛渡峡谷,以发电为主,兼有防洪、拦沙和改善下游航运条件等巨大综合效益,是“西电东送”的骨干电源点,满足华东、华南经济发展用电需求。