

锦屏二级水电站 TBM 选型及施工关键技术研究

吴世勇, 王 鸽, 徐劲松, 王 坚

(二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610051)

摘要: 锦屏二级水电站引水隧洞属于深埋特长隧洞, 其中 2 条引水隧洞施工采用敞开式硬岩掘进机(TBM)进行施工。引水隧洞 TBM 开挖直径 12.4 m, 位列世界第二。引水隧洞穿越区域水文地质条件复杂, 开挖中面临地下水预报及处理、通风、岩爆防治等三大关键技术问题。通过对大量文献资料和工程实例的研究, 概述 TBM 近半个世纪的发展及其在隧道建设中的应用现状和主要问题。对锦屏二级水电站区域地质条件以及主要的工程地质问题进行分析, 结合国内外已有的 TBM 施工经验, 对锦屏二级 TBM 选型以及在施工中面临的超前地质预报、围岩稳定、高地应力及岩爆、突涌水、溶洞、有害气体、断层破碎带等不良地质条件所采用的施工方法进行分析研究, 针对性地提出在各种不良地质条件的下的 TBM 施工对策, 对锦屏二级水电站 TBM 施工提出建议, 研究成果可供类似工程参考。

关键词: 水利工程; 锦屏二级水电站; 引水隧洞; 施工; 隧洞掘进机

中图分类号: TV 61

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)10-2000-10

RESEARCH ON TBM TYPE-SELECTION AND KEY CONSTRUCTION TECHNOLOGY FOR JINPING II HYDROPOWER STATION

WU Shiyong, WANG Ge, XU Jinsong, WANG Jian

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

Abstract: Jinping II Hydropower Station is characterized by the four diversion tunnels which are very long and deep-buried. Two of the tunnels are excavated with open-type hard rock tunnel boring machine(TBM) which has an excavation diameter of 12.4 m, the 2nd largest of the same type in the world. The hydrogeological conditions at the tunnel site are very complicated. Three key problems might be met during tunneling, including the forecast and treatment of the groundwater, the ventilation, and the prevention of rockburst. Based on the study of a large amount of data and project case studies of the TBM development, the development of TBM over the past 50 years, its use in tunneling and the encountered problems, are summarized. Based on the research and analysis of the regional geological conditions, main engineering geological problems, and TBM construction experiences at home and abroad, the TBM type selection and tunneling method in case of rock instability, high geostress and rockburst, water gushing, karst cavity, harmful gas, fractural zones, etc., are studied. Construction strategies are suggested for TBM tunneling in Jinping II Hydropower Station in case of different unfavourable geological conditions; which hopefully would also benefit similar future projects.

Key words: hydraulic engineering; Jinping II Hydropower Station; diversion tunnel; construction; tunnel boring machine(TBM)

收稿日期: 2008-05-26; **修回日期:** 2008-07-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目雅砻江水电开发联合基金项目(50639090)

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, 主要从事水电工程方面的研究工作。E-mail: wushiyong@ehdc.com.cn

1 引言

锦屏二级水电站位于雅砻江下游四川省凉山州境内, 装机容量 4 800 MW, 库容 $1.92 \times 10^7 \text{ m}^3$, 调节库容 $4.96 \times 10^6 \text{ m}^3$, 电站最大引用流量 $465 \text{ m}^3/\text{s}$ 。电站利用雅砻江下游河段 150 km 长大河湾的天然落差, 通过长约 16.7 km 的 4 条引水隧洞, 截弯取直, 获得水头约 310 m。引水系统由进水口、引水隧洞、上游调压室、高压管道、尾水事故闸门室以及尾水隧洞等建筑物组成, 为一低闸、长隧洞、高水头、大容量引水式电站。由于本工程引水隧洞属于深埋特长隧洞, 经过可行性研究及招标设计阶段对采用 TBM 进行施工的可行性进行的研究与论证, 决定其中 2 条引水隧洞将采用 TBM 进行施工。在同一工程中 TBM 和钻爆法的协调施工既可充分发挥 TBM 的高速掘进优势, 又可利用钻爆法的灵活性特点, 规避特殊地质条件下施工重大风险, 从而优化整体施工方案, 保证安全可靠、经济合理和快速施工。

锦屏二级水电站引水隧洞处于高山峡谷的岩溶地区, 地质条件复杂, 具有埋深大、洞线长的特点。主要工程地质问题有高地应力和岩爆、涌(突)水、有害气体、围岩稳定及隧洞所穿越的断层破碎带等。在即将完工的 2 条平行的锦屏辅助洞施工过程中, 已遭遇到系列高压大流量突涌水、岩爆等问题, 对施工造成了一定的影响。鉴于锦屏二级水电站引水隧洞施工所面临的难度, 如何结合锦屏二级水电站引水隧洞特点确定 TBM 型式并量身进行设计制造成为一个关键性问题。同时, 由于 TBM 在面对高地应力、岩爆、高压力水头及大流量涌水条件下的施工, 目前世界上还缺乏经验可循。因此, 尽早开展对 TBM 开挖穿越不良地质条件下的施工控制措施及对策研究, 具有十分重要的现实意义。

2 引水隧洞区域工程地质与水文地质条件

2.1 工程地质与水文地质条件

锦屏二级水电站地处青藏高原向四川盆地过渡的地貌斜坡地带。锦屏山以近 SN 向展布于河湾范围内, 山势雄厚、重峰叠嶂、沟谷深切, 主体山峰

高程 4 000 m 以上, 最高峰 4 488 m, 最大高差达 3 000 m 以上。引水隧洞从东到西分别穿越盐塘组大理岩(T_{2y})、白山组大理岩(T_{2b})、三迭系上统砂板岩(T_3)、杂谷脑组大理岩(T_{2z})、三迭系下统绿泥石片岩和变质中细砂岩(T_1)等地层。根据引水隧洞的地质围岩分类预测, 隧洞大部分洞段以 II~III 类围岩为主, 约占 82.8%, 岩石坚硬完整致密, 单轴湿抗压强度为 55~114 MPa, 弹性模量为 $(25 \sim 40) \times 10^3 \text{ MPa}$, 变形模量为 $(8 \sim 16) \times 10^3 \text{ MPa}$ 。围岩的自稳承载能力强, 成洞条件较好。

断层破碎带穿越洞段所属的 IV~V 类围岩约 4.6%。区内断层构造按其形迹和展布方位分为 4 个构造组: NNE, NNW, NE~NEE 以及 NW~NNW 向(均以陡倾角为主)。其中, 以 NNE 和近 EW(NNW 和 NEE)向的张扭性节理较为发育, 前者多呈闭合状, 后者多呈张开, 两者组成了本区的构造骨架。

受区域构造影响, 区内褶皱发育, 多表现为近 SN 向紧密褶皱, 结构面主要表现为 NNE 向顺层挤压和 NNW 向张扭性结构面, 由此构成锦屏山地下水的集水和导水网络。根据岩体储水的孔隙类型, 引水隧洞工程区存在裂隙水和岩溶水类型, 并以岩溶水为主, 岩溶形态以溶蚀裂隙为主。

2.2 主要工程地质问题

2.2.1 岩溶地下水

引水洞线全长约 16.7 km, 所在高程为 1 568~1 618 m, 穿越锦屏山“河间地块”, 一般埋深为 1 500~2 000 m, 最大埋深为 2 525 m。其中包气带厚达数百米, 饱水带厚达近千米。如此大埋深、长距离的可溶岩地区越岭输水隧洞为国内外所罕见。引水隧洞洞线处于高山峡谷型岩溶区, 工程部位总体岩溶发育微弱。岩溶发育程度以中部相对较强, 两侧比中部较弱; 上部较强, 下部微弱。

根据工程区岩溶含水层组、岩溶水的补给、运移、富集和排泄特点, 工程区不同地带(地段)的水文地质条件有明显差异, 其规律性受地形地貌、地质构造、含水介质类型、岩溶发育及气候条件的控制或影响, 据此将大河湾内对隧洞涌水条件有影响的地区划分为以下 4 个水文地质条件有所差异的岩溶水文地质单元:

(1) 中部管道 - 裂隙汇流型水文地质单元(包括 I, V 岩溶区);

(2) 东南部管道 - 裂隙畅流型水文地质单元(等

同 II 岩溶区);

(3) 东部溶隙 - 裂隙散流型水文地质单元(等同 III 岩溶区);

(4) 西部溶隙 - 裂隙散流型水文地质单元(等同 IV 岩溶区)。

工程区岩溶发育总体微弱, 不存在层状岩溶系统, 高程 2 000 m 以下岩溶发育较弱并以垂直系统为主。引水隧洞穿越地层岩溶形态以溶蚀裂隙为主, 溶洞少, 且规模不大。采用水文地质比拟法、水均衡法和三维渗流场计算综合分析, 预测引水隧洞在不进行灌浆封堵情况下稳定涌水流量为 8.48 m³/s。根据长探洞和辅助洞涌水情况并结合渗流计算, 预测引水隧洞掘进过程中单点最大突水量为 5~7 m³/s。隧洞最大外水压力值为 10 MPa 左右。

根据大水沟长探洞揭露的情况及目前辅助洞东、西两端所揭露的涌水情况, 在岩溶水文地质条件分析研究的基础上进行隧洞涌水预测, 在不设防渗条件下, 单条引水隧洞的稳定涌水量预测采用单位面积稳定流量方法获得。枯季~雨季时的稳定流量为 6.91~8.48 m³/s, 年平均稳定流量为 7.52 m³/s; 雨季时的稳定流量为 8.48 m³/s。施工中按 5~7 m³/s 作为单点最大突水量的量级。

2.2.2 高地应力及岩爆

引水隧洞线路区处于我国西南高地应力区, 实测地应力成果显示, 地应力值随埋深增加而增加, 且自洞深 600~3 000 m 最大主应力由平行岸坡转变成近垂直向, 即地应力从水平应力状态转变为以垂直应力为主的状态, 实测最大应力值为 42.11 MPa。因此, 随着埋深的进一步增加, 地应力值也将有所增加, 经回归分析, 隧洞洞线高程的最大主应力值可达 63 MPa, 属高地应力区。预测今后累计发生岩爆的长度为 8.0 km 左右。其中, 发生轻微量级、中等量级的岩爆长度约 6.0 km; 发生强烈量级的岩爆长度约 2.0 km; 发生极强量级的岩爆长度约 0.3 km; 无岩爆段长度约 8.4 km。

3 TBM 在国内外的的发展、应用及存在的主要问题

3.1 TBM 在国外的的发展与应用

从 20 世纪 50 年代以来, TBM 掘进技术在世界各国得到了广泛应用。经过半个世纪的发展, TBM

掘进技术已相当成熟, 被广泛应用于世界各国能源、交通、水利以及国防等部门的地下工程建设。

采用 TBM 掘进技术建成的世界著名大型隧道有英吉利海峡隧道、东京湾海底隧道、荷兰生态绿心隧道等。目前, 国外拟建和在建的大型隧道项目包括日韩海底隧道(连接日本和韩国, 长约 120 km)、白令海峡隧道(连接亚洲和美洲, 长约 74.8 km)、阿尔卑斯山铁路隧道(从 Rosenheim 到 Verona, 总长大于 500 km)等, 其中绝大部分将优先采用 TBM 施工。

据不完全统计, 截止到 2007 年年底, 世界上长度大于 10 km 的隧道已超过 100 条, 世界隧道总长度已远远超过 10 000 km。近几年的隧道工程建设中, 有 30%~40%是采用 TBM 进行开挖的。

3.2 TBM 在国内的发展与应用

国内全断面岩石 TBM 制造始于 20 世纪 60 年代中期, 目前共生产了 14 台, 直径为 2.5~5.8 m, 但国内生产的 TBM 在机械性能、配套设备、设计制造、施工操作、机械设备维修保养以及隧道施工适应性等方面均不能同国外引进的 TBM 相比, 掘进速度缓慢, 最高月进尺不超过 300 m。但 TBM 制造技术已列入我国国家高技术研究发展计划(863 计划)。

在引进全断面岩石 TBM 施工方面, 已取得了长足的进展, 广泛地运用于铁路、水利、水电等工程中, 如贵州天生桥二级水电站引水隧道、西康铁路秦岭隧洞、西合铁路磨沟岭隧洞、辽宁大伙房水库输水工程、甘肃引大入秦工程、广州地铁、北京地铁以及成都地铁工程等。其中, 天生桥二级水电站引水隧洞较早引进美国罗宾斯生产的直径 10.8 m 的全断面岩石 TBM 施工, 取得了一定的经验。目前我国的大伙房引水工程正在使用 TBM 进行施工, 工程采用敞开式 TBM 施工, 连续皮带机运输, 施工效果良好。

3.3 TBM 施工的优点及主要问题

由于 TBM 广泛利用监测、遥控以及电子信息技术等对施工过程进行全面制导和监控, 使掘进过程始终处于最佳状态, 因此相对于传统钻爆法具有高效、快速、优质和安全等优点。具体体现在施工速度远远超过其他施工方法, 且施工质量好, 围岩始终处于稳定状态; 采用 TBM 施工, 长隧道施工综合造价低; 此外, 由于 TBM 机械化程度高, 施

工方便, 有利于环境保护和节省劳动力, 减轻工人劳动强度, 便于施工管理。

采用 TBM 施工的不足之处在于: 对不良工程地质条件的适应性较差, 不如传统钻爆法灵活, 特别是在遭遇溶洞、地下水等不良地质条件时; 前期的一次性投入费用较大, 设备的投资占工程投资的比重很大; 由于一体化作业, 工序衔接紧密, 对施工人员的素质要求较高。

4 锦屏二级水电站 TBM 选型

4.1 影响 TBM 选择的因素

由于 TBM 施工过程是连续的, 具有隧道施工“工厂化”的特点, 而且具有机械化程度高、快速、安全、劳动强度小、对地层扰动小、通风条件好、衬砌支护质量好以及减少隧道开挖中辅助工程等优点。但是, TBM 也有对地质条件的依赖性大、设备的型号一经确定后开挖断面尺寸较难更改以及一次性投资较大等劣势, 在单位成本上, 随掘进长度的增加而降低, 地质资料直接影响到 TBM 的选型和施工造价。因此, TBM 选型应该注意适应地质因素, 要求质量可靠、功能齐配, 并选择一支能力强、经验丰富的施工队伍^[1~6]。

4.1.1 地质因素

TBM 选型必须同时考虑到如下地质因素:

(1) 隧洞沿线地形、地貌条件和地质现象, 进出口边坡的稳定条件; 隧洞地质的岩性, 包括软弱、膨胀、易溶和岩溶的分布, 以及可能存在的有害气体及放射性元素。

(2) 隧洞岩层的性状, 主要断层、破碎带和节理裂隙密集带的位置、规模和形状。

(3) 地下水位、水温和水的化学成分特别是涌水量丰富的含水层、汇水构造等, 以预测掘进时突然涌水的可能性并估算最大涌水量。

(4) 提供的围岩工程地质分类, 以及各类岩体的物理力学性质、参数, 和对不同围岩的稳定性给出的评价。

TBM 性能的发挥在很大程度上依赖于工程地质和水文地质条件, 如岩体的裂隙等级、岩石的单轴抗压强度和韧性将决定 TBM 掘进速率和工程成本; 隧洞埋深、围岩的等级、涌水大小等涉及掘进后的支护方法、形式及种类。例如, 硬岩的隧洞掘

进应首选敞开式 TBM, 但是地质上的非同一性, 需要敞开式 TBM 还具备通过软弱围岩的能力。因为软弱地层岩体胶结性能差, 开挖面自稳时间短, 此时 TBM 上的支护设备就显得十分重要, 如锚杆设备、临时喷射混凝土设备和架设圈梁设备等。若通过的软弱地层洞段多或较长时, 应考虑是否加大上述设备的数量或能力; 当通过断层或特殊困难地段时, 应使用超前支护设备, 对刀盘前部地层进行预加固处理。若隧洞工程中常遇瓦斯, 当瓦斯浓度为 5%~16% 时, 遇到火源具有随时发生爆炸的可能性。为此, 需要在 TBM 上安装瓦斯测量和警示系统, 当瓦斯体积浓度达到 55% 时, 它发出声响或警示灯光, 如果瓦斯体积浓度达到 0.7% 时应通知操作人员停止 TBM 掘进或立即启动通风设备, 以保证安全^[6~8]。

4.1.2 设备保障因素

每台 TBM 都要根据地质条件、支护要求、工程进度和开挖洞径而制造。即使是同类型主机, 尚需自主确认驱动型式、控制系统、测量系统、记录系统等规格和关键参数, 特别是与之配合的后配套系统更是关系到 TBM 技术性能和效率的发挥。

4.1.3 科学管理因素

隧洞工程本身带有一定的不确定性, 这方面取决于预测地质资料 and 实际地质状况的一致性; 也取决于面对地质条件的变化, 施工管理和施工组织的应变能力。有经验的、善于管理的施工承包商, 可以降低由于地质条件的变化带来的风险。

TBM 是由数十台设备组成的一个联动体, 任何一台设备出现故障, 都将影响 TBM 的正常工作, 并直接影响掘进效率。每道工序、每个岗位的管理都是保证整机连续作业的关键。随时掌握地质变化, 调整掘进参数和不同的支护要求, 需要有合理判断。充分发挥管理上的优势并不断进行创新, 配合项目设计单位、合格的 TBM 制造商以及有经验的施工承包商的共同研究和决策, 是 TBM 施工成功的保证。

4.2 TBM 选型

直径为 1.5~15.0 m 的圆型隧道都适合 TBM 施工, 特别是水工隧道、铁路隧道等, 它们在断面积上得到充分利用, 圆形断面非常适用输水隧洞, 特别是 TBM 掘进成型的光滑岩面, 使得输水隧洞在输水中减少了水头损失, 同样原因也有利于隧道的通风要求。TBM 可以开挖较大坡度变化范围的隧道,

以满足工程设计需要。隧洞的坡度受到所选择运输方式的限制,轨道运输时坡度不能大于 1:6,采用无轨运输时的坡度受牵引车辆能力的限制,近年来国外广泛使用的连续皮带输送机可完成较大坡度条件下的渣料运输。

根据勘测设计成果及先期施工辅助工程揭露的地质情况,锦屏二级水电站引水隧洞工程的地质及水文地质条件较适合 TBM 施工,但采用何种型式的 TBM,需要考虑岩石条件,并重点考虑高压大流量涌水段及破碎带的需要。

在 TBM 主机型式选择上,对敞开式、护盾式(单护盾、双护盾、三护盾)等各种类型的 TBM 进行了分析,不同的型式分别具有最适应的地质范围,同时对其他地层都有不同程度的局限性。就敞开式 TBM 而言,对于岩爆、高压水及十分破碎的岩体如断层、破碎带、局部软岩、高压水流或溶洞等可能难以应对。随着 TBM 辅助功能不断完善,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,敞开式 TBM 具有了十分完善的功能和先进的技术性能,而将其发展成为一定意义上的复合式 TBM,对围岩的适应性进一步加强。

例如,秦岭隧道是典型的 TBM 施工的硬岩铁路隧道,磨沟岭是以软岩为代表的铁路隧道,大伙房是以中硬岩为主的长大输水隧洞,以上都采用了敞开式 TBM 施工。由于支护技术和支护手段的进

步,使得敞开式 TBM 施工的适应能力得到了很大的拓展。

对于护盾式 TBM 掘进,可以采用单护盾和双护盾和三护盾 3 种模式,在围岩较好时,可以采用只有顶护盾的敞开式 TBM 掘进。若果遇到局部围岩不稳,可以在 TBM 刀盘后进行临时支护,如锚杆、喷混凝土、加钢筋网、钢支撑等即可以确保围岩稳定;必要时采用超前灌浆加固前方围岩后再掘进。如遇高压大流量地下水,可以利用护盾阻挡地下水,不致伤害人员和设备。敞开式、双护盾及三护盾掘进机对比见表 1。

锦屏二级水电站引水隧道洞身大部分埋深为 2 000 m 左右,最大埋深 2 525 m,洞身大部分地下水水头 700~800 m,最大水头 1 000 m,最大地应力 63 MPa,岩石单轴饱和抗压强度 55~114 MPa。水压力和地应力是影响成洞后隧道质量的主要因素。如果采用管片衬砌的双护盾 TBM,可能在围岩尚未完全收敛前,管片已经安装和回填完毕,管片将抵抗围岩应力调整及收敛变形产生的荷载,可能导致管片的破损。隧道建成后,地下水的处理采取“以堵为主,以排为辅”的原则,这也意味着地下水位将可能恢复到开挖前的水平,较大的外水压力将作用于管片,对管片的结构受力也提出了较高的要求。

经过多方面的分析和比较,综合工程的实际情况以及国内已有的施工经验等,结合锦屏二级水电

表 1 敞开式、双护盾及三护盾掘进机对比表
Table 1 Comparison among open-type, bishield-type, trishield-type TBMs

掘进机类型	掘进性能	支护速度	掘进速度	衬砌方式	管片预制	设备费用	工程成本
敞开式掘进机	可根据不同地质,采用不同的掘进参数,随时调整	地质情况好时只需要进行锚网喷,支护工作量小,速度快。地质差时需要超前加固,支护工作量大,速度慢	根据地质情况调整掘进速度。受地质和设备性能影响	根据情况,可进行二次混凝土衬砌	无	低	低
双护盾掘进机	刀盘结构同敞开式 TBM,可根据不同地质,采用不同的掘进参数,随时调整	采用管片支护,支护速度快	与敞开式相同,根据地质情况调整掘进速度。受地质和设备性能影响	采用管片支护,可以不进行二次衬砌	必须	高	高
三护盾掘进机	刀盘结构同敞开式 TBM,可根据不同地质,采用不同的掘进参数,随时调整	采用管片支护,支护速度快	采用 3 个护盾、2 套撑靴系统,2 套液压推进油缸,3 套稳定撑靴,2 套支撑推进系统交替使用,没有换步,可以连续掘进,掘进速度快	采用管片支护,可以不进行二次衬砌	必须	高	高

站引水隧洞的地质条件分析, 对锦屏二级水电站所适用的 TBM 型式进行了深入细致的研究, 决定采用顶护盾适当加长的敞开式硬岩 TBM。同时, 要求刀盘具有扩挖功能, 以便应对围岩变形卡盾的情况, 并根据工程地质特点及水工隧洞要求, 结合锦屏二级水电站引水隧洞地质情况及岩爆、涌水等特点, 配置了具有相应功能的后配套。采用了超前钻灌、支护锚杆、喷混凝土以及钢拱架等支护措施。

本工程的 TBM 还在主机及后配套的设计上进行了特殊的改进, 主机部位的刀盘底部设置了液压控制的大流量防水门, L1 区设置了开闭可控的防岩爆顶棚及防止高压喷射地下水的钢瓦片安装器。为了预留足够的排水通道, 将后配套及交通运输轨道进行架空布置, 并在后配上设置紧急救助站等措施解决高压大流量地下水突涌对人员和设备的影响。为使支护锚杆能够尽量适应岩层产状的变化, 要求锚杆钻机能够旋转 180° 反向施钻。对电器设备的保护采取了提高防护等级、防水棚等措施, 并在喷混凝土区域设置防护顶棚, 防止回弹浆液对电器设备及工作平台造成污染。

5 不良地质洞段 TBM 施工方法

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、效率低下以及工期拖延。如果处理不当, 甚至会带来灾难性的后果。我国昆明掌鸠河引水供水工程、山西万家寨引黄工程、台湾坪林公路隧道以及荷兰南部的西斯凯尔特河隧道等, 在 TBM 通过不良地质地段时均发生了诸如突水、塌方和卡机等工程事故, 威胁着施工人员和机械设备的安全, 并造成长时间停机。为此, 为确保锦屏二级水电站引水隧洞的顺利施工, 必须根据 TBM 自身特点和工程地质条件采取相应的施工步骤及处理措施, 以保证 TBM 安全、顺利地通过不良地质地段^[8, 9]。

5.1 超前地质探测

根据对锦屏二级水电站引水隧洞的前期勘探以及结合辅助洞的开挖分析表明, 隧洞工程区存在地下水、高地应力和岩爆、有害气体、断层破碎带等

不良地质问题, 特别是地下岩溶裂隙水引起的涌、突水是引水隧洞的主要地质问题。TBM 施工是一种机械化程度很高的全断面施工技术, 若在施工中遭遇地质灾害, 在无支护之前产生大量塌方、涌水、掉块, 使机器被埋、被淹、被卡, 将会出现进退两难, 难以处理的局面。为避免事故的发生, 除提高勘察精度外, 在隧道施工过程中, 运用各种先进技术、手段和方法对隧道掌子面前方地质条件进行及时准确地预测, 可以提前采取预防措施, 避免灾害的发生, 保证隧道施工的安全。

根据国内外相关工程施工经验, 做好地质超前预报对与 TBM 顺利施工意义重大。地质超前预报是勘测设计阶段工程地质工作的延续, 结合实际地质状况与设计不一致的部分进行对比, 有助于提高地下工程勘测质量, 提高勘测设计资料的准确性。超前预报提供有关隧道前方地质条件的变化信息, 从而能够及时指导 TBM 施工, 采取有效措施, 安全通过不良区域。近年来一些出现了一些最新的技术, 如空间技术(3S 技术)、地球物理勘探技术(三维地震 CT 成像)、隧道地震预报(TSP 探测技术)、地质雷达法(GPR 法)、常规地质钻探技术等。本工程结合国内外 TBM 施工预报经验, 决定采用 beam 系统实时探测的方法作为 TBM 掘进探测主要手段, 重点查明掌子面前方的地质构造。在隧洞施工的不同阶段, 可充分利用上述不同的方法, 查明隧洞的地质情况以指导 TBM 的掘进^[10, 11]。

5.2 不良地质段超前处理

根据国内以往工程的实践经验, 在 TBM 施工中对于不良地质洞段采取超前处理, 避免揭露之后在后期处理, 工程效果明显。锦屏二级水电站引水隧洞所在区域地质条件复杂, 采取单一的超前处理措施不能满足工程需要, 需要采取多种处理方法进行综合处理。

在锦屏二级水电站引水隧洞的施工中, TBM 施工主要遇到的不良地质洞段的类型有溶蚀裂隙带、高压大流量涌水、高地应力引发的岩爆以及岩石流变等。根据超前预报判断可能遭遇的不良地质洞段, 充分利用超前支护来确保施工安全, 包括超前锚杆、超前灌浆等措施进行超前处理。遭遇特殊不良地质时, 可采取钻爆法绕前处理。

(1) 超前锚杆支护

超前锚杆主要用于节理裂隙发育,但岩石较完整的洞段。在 TBM 护盾外侧,采用设备 L1 区配置的钻进设备,向掌子面前方钻设超前锚杆,形成对前方围岩掌子面外围的围岩支护,并对前方围岩进行灌浆固结,形成锚固圈保护下的掘进作业。超前锚杆与钢支撑形成牢固连接;超前锚杆胶凝材料使用早强水泥砂浆或快速锚固剂。

在断层破碎带等洞段,由于围岩易产生塌方,故施工前应采用超前小导管注浆进行预支护。超前小导管采用热轧无缝钢管加工制成,前端加工成锥形,尾部焊接加劲箍,管壁同边钻注浆孔,施工时钢管沿隧洞开挖外轮廓线布置,环向间距视围岩情况进行布置。

(2) 超前灌浆

当超前预报及勘探判断地质条件较差或可能存在大量涌水的情况下,需进行超前灌浆处理。位置一般情况宜在 TBM 护盾外侧,采用设备 L1 区配置的钻进设备施钻,孔深需根据地质条件进行布设。超前灌浆施工时可采用纯压式灌浆,孔深可达 30~50 m,灌浆压力依据测定的地下水压力确定。灌浆材料水泥浆为主,根据实际情况添加环保型的速凝剂。

5.3 地下突涌水处理

引水隧洞施工中对于施工突涌水的处理是隧洞在掘进过程中需要解决的关键技术问题。引水隧洞岩溶总体虽不发育,但其地下突涌水具有压力高、稳定流量大等特点,地下水涌水的处理将是工程安全、快速施工的关键。

如何应对地下突涌水问题是锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 施工过程中必须解决的关键技术问题,也是锦屏二级水电站 TBM 施工成败的关键。在国内一些工程中曾有 TBM 施工中出现地下水的工程实例,但是其出水量和压力远小于锦屏二级水电站引水隧洞所在区域。针对锦屏二级水电站的地下水处理,必须针对性地提出处理和应对措施。

根据已经开挖的锦屏二级水电站辅助洞岩溶水文地质特征及类比分析,涌水量大于 20 L/s 的涌水点除个别地段为密集线状渗水外,一般为高压集中涌水。引水隧洞地下水处理思路为:根据地质超前预报成果,立足于超前注浆封堵,争取在开挖前封闭地下水通道;对意外揭露的突发性涌水,根据涌

水量大小采取合适的施工方法将动水变成静水后再实施注浆封堵。

对于渗滴水型出水,因其量少、水压力低,可以不考虑注浆处理或在引水隧洞开挖过后再进行后注浆处理,不影响引水隧洞掘进进度。线状渗水一般出现在断层、破碎带或节理裂隙发育洞段,虽其涌水压力不高,但涌水量大,对引水隧洞施工也有一定的影响,宜作一般性处理。而高压集中涌水段涌水量大、压力高、突发性强、危害性大,一旦揭露后再行封堵难度加大。对高压集中涌水,原则上必须在涌水点未揭露前进行注浆封堵,即采用超前预注浆的施工措施,在静水条件下将其封堵。

当出现流量小于 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的低压大流量管道突涌水时,由于 TBM 设备的设计、制造已考虑应对措施,能够保证人员和设备是的安全,掘进可以照常进行,后处理工作及时跟进。当出现高压射流溶蚀裂隙管道水,将直接威胁人员、设备的安全。此时应充分利用 TBM 护盾后方安装的钢护盾进行导水、防护,降低人员及设备的风险。

当 TBM 掘进前方出现大于 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的大流量涌水时,由于 TBM 刀盘下部预留了可控制排水孔,为防止水流将岩渣带出刀盘,需适时控制液压防水门。以免设备 L1 区堆集较多岩渣,增大清理难度。

在辅助洞开挖过程中取得了宝贵的超前预报相关资料和预报经验的基础上,结合 TBM 设备配置的超前预报设备,可更加准确地判断引水隧洞前方的地下水情况,判断出水位置,特殊情况下,可通过辅助导坑进行掌子面前方的超前处理,确保 TBM 设备顺利通过该洞段^[12~14]。

5.4 高地应力及岩爆处理

依据三维初始应力场反演回归分析,在锦屏二级水电站引水隧洞线高程 1 600 m 处最大主应力值为 63 MPa、最小主应力值为 26 MPa,属高地应力区。其主应力值基本上是从上到下逐渐增大,断层穿过的岩体周围主应力值有明显的减小,等值线分布规律变化较大,说明断层对初始应力场分布有很明显的影响。因此,引水隧洞在施工开挖过程中,将产生轻微~中等强度的岩爆,部分洞段为强岩爆。

针对锦屏二级水电站引水隧洞的工程地质条

件, TBM 在设计阶段就已经充分考虑到岩爆对施工的影响, 在设备制造中已经采取了相应的措施, 增加了顶护盾。但面临如此高的地应力, 在国内外 TBM 施工都没有现存的经验可遵循, 需针对性的采取有效地预防措施。

(1) 改变围岩的物理性能

喷雾洒水卸压法: 在干燥围岩的表面上洒水, 或用高压水冲洗隧洞拱顶、掌子面和侧壁, 目的是增强岩石湿度, 一定程度上可以降低表层围岩的强度, 松弛岩体中积累的高构造应力。

超前钻孔卸压法: 在可能发生岩爆的掌子面上方, 钻数个孔径 60~80 mm、孔深 10 m 的钻孔, 释放岩体中的高构造应力, 同时向岩体高压均匀注水。其目的有三: 一是可以释放应变能, 并将最大切向应力向围岩深部转移; 二是高压注水的楔劈作用可以软化、降低岩体的强度; 三是高压注水产生了新的张裂隙, 并使原有裂隙继续扩展, 从而降低了岩体储存应变能的能力。

(2) 改变围岩应力条件: 采取超前钻孔应力解除等方法, 使岩体应力降低。

(3) 加固围岩: 对不同程度的岩爆一般采取不同的加固处理措施: 主要措施于 TBM 护盾后方实施, 对轻微岩爆段, 采用快速锚杆加固, 必要时局部挂网喷混凝土; 中等岩爆段, 采用合适的锚杆、钢筋网及网喷混凝土措施。锚杆均要求带垫板, 呈梅花型布置, 钢筋网多采用长钢筋帮扎, 要求锚杆垫板可靠压连、紧贴洞壁围岩布置, 喷射混凝土或纳米混凝土, 必要时增设钢架支撑; 强岩爆段, 常在掘进时发生, 容易砸坏机件, 掌子面中部易出现爆塌坑, 掌子面凹凸不平损坏滚刀严重, 将对 TBM 设备造成损伤。该工程辅助洞西端钻爆掘进过程中遇到了少量类似情况, 及时采用了快速锚杆、挂网、钢筋及喷混凝土支护。

5.5 溶洞的处理

溶洞是 TBM 施工中较为复杂的工程问题之一。溶洞处理与其分布位置、规模大小、充填物性质与充填程度、岩溶水等有关。因此, 在隧洞掘进过程中必须加强超前钻探, 以便尽早了解将遇到的溶洞特性, 制订合理的处理措施。根据掘进机的施工特点和结合国内外对于溶洞处理的类似经验, 采取如下具有针对性的施工对策^[15~17]:

(1) 对无充填或少量充填的溶洞, 进行基础回填和支顶处理。

(2) 对较大的已充填溶洞或充填物含水量高、物理力学指标较差的溶洞, 需进行全洞周超前注浆, 同时紧跟工作面进行回填灌浆, 以便 TBM 通过时减少或防止下沉。此外, 为了避免洞底沉陷, 也可采用纵向槽钢将若干环管片连接起来。

(3) 若溶洞过大难以回填, 可在 TBM 后盾附近开挖一个通向前方溶洞的旁洞, 采用现浇桥、拱或桩基渡槽、箱涵结构进行跨越处理。

(4) 只有在隧洞前方条件极端复杂难以穿越的情况下, 必要时才进行 TBM 局部改线施工。

5.6 高温、有害气体的处理

鉴于隧洞埋深较大, 即将贯通的辅助洞施工过程中, 测试温度均较预计的温度, 平均温度小于 11 °C。引水隧洞 TBM 设备仍然配置了喷淋、通风系统等措施以备解决可能遇到的地温升高问题。

根据辅助洞施工经验, 引水隧洞即将穿越的地层中未发现有害人体的高浓度有害气体, 依据岩性成分判断, 岩体中可能存在分散和零星的有毒或易燃气体, 但其缓慢积聚仍将会对工程施工造成不良影响。因此, 在凝灰岩、侵入岩及断层等易发部位应进行超前探测、有害气体引排和气体含量监测, 并保证通风情况良好, 确保施工安全。

5.7 断层破碎带洞段处理

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, 将会通过 F5, F6, F25 等断层破碎带, 虽其与初选的引水隧洞洞线呈大角度相交, 但由于破碎带宽一般在 5 m 以内, 其与锦屏二级水电站特有的水文地质相组合, 必定会带来较为严重的地质问题, 在 TBM 施工中必须引起高度重视。根据已有的断层破碎带处理经验, 结合锦屏二级水电站的特点, 需采取各种临时支护措施进行处理。

对于规模较小且破碎不很强烈的断层, 当断层面产状与隧洞轴线大角度相交时, 不必进行超前钻探; 当断层面产状与隧洞轴线小角度相交或近乎平行时, 应进行超前钻探; 若断层陡倾或虽平缓但位于隧道顶时, 要进行必要的超前固结灌浆。

对于规模较大的断层带, 要视其产状和掘进机

所处的构造部位不同具体处理:

(1) 对于陡倾断层, 无论断层与洞线的关系如何, 当掘进到断层强烈影响带时都应进行超前钻探, 并通过不同部位的钻孔进行超前固结灌浆。

(2) 对于缓倾断层, 若断层面走向与洞线轴线交角较小, 当进入断层影响带时就应该进行超前钻探, 并对破碎带及强影响带固结灌浆。若交角较大, 则分为两种情况, 当断层倾向与掘进方向相同时, 掘进至断层影响带时, 就应该进行超前钻探, 并对破碎带及强影响带固结灌浆; 当断层倾向与掘进方向相反时, 要注意围岩的变化情况, 进入强影响带时要进行超前钻探, 并对不同方向的钻孔固结灌浆^[18]。

若断层破碎规模大, 且围岩破碎强烈, 则需要多次钻孔和灌浆, 以确保 TBM 顺利施工。

6 结论与建议

锦屏二级水电站引水隧洞处于高山峡谷的岩溶地区, 地质条件复杂, 具有埋深大、洞线长的特点, 主要工程地质问题有高地应力和岩爆、突涌水、有害气体、围岩稳定及隧洞所穿越的断层破碎带等。由于选用技术先进、质量可靠、量身定制的 TBM 设备, 采取有序的施工组织, 利用 TBM 施工是完全可行的。通过对锦屏二级水电站 TBM 选型及施工关键技术研究可知:

(1) TBM 集地质、施工、电气、机械、液压于一身, 属于知识密集型生产项目施工, 具有快速、高效、优质、经济、安全、环保的优势和特点。结合锦屏二级水电站的实际情况, 量身进行设计制造的 TBM, 在遇突涌水的情况下人员、设备的安全性大大高于钻爆法。通过 TBM 配备的支护和超前处理设备对围岩稳定性较差的洞段或赋存大量地下水的洞段进行处理, 可有效地规避施工风险。全断面 TBM 施工对锦屏二级水电站引水隧洞围岩的适应性和解决不良工程地质问题的能力, 均优于其他施工方式。因此, 采用 TBM 进行施工是合适的。

(2) 锦屏二级水电站引水隧洞线路区的地质条件复杂, 施工时将不可避免地遇到地质灾害性问题, 主要是突涌水和岩爆, 施工中需遵循“先探后

掘”的原则, 及时准确地进行超前地质预报, 并采用多种地质预报手段相结合的综合方法, 提高信息解译精度。对于不良地质洞段, 做出相应的应对措施, 以保证 TBM 在深埋特长隧洞施工中的高效、安全, 确保引水隧洞的安全施工。

(3) TBM 施工是世界上最先进的地下洞室施工方法, 锦屏二级水电站 TBM 施工是国内乃至世界上施工难度最大、不确定因素最多的世界级工程, 对 TBM 施工关键技术问题的研究以及对策分析具有重要的现实意义。

参考文献(References):

- [1] 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.(YIN Juntao, SHANG Yanjun, FU Bingjun, et al. Development of TBM-excavation technology and analyses and countermeasures of related engineering geological problems[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 389 - 397.(in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 王淑新. TBM 掘进技术的发展与展望[J]. 中国工程咨询, 2003, (9): 46 - 48.(WANG Shuxin. Development and prospect of TBM excavation technology[J]. Chinese Consulting Engineers, 2003, (9): 46 - 48.(in Chinese))
- [4] 徐书林, 傅冰骏. 推广应用隧道掘进机促进我国地下空间开发[J]. 建筑机械, 2002, (5): 36 - 39.(XU Shulin, FU Bingjun. Spreading the use of TBM, promoting development of underground space in China[J]. Construction Machinery, 2002, (5): 36 - 39.(in Chinese))
- [5] 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.(ZHANG Jingjian. Application and some problems of TBM and its prospects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 363 - 367.(in Chinese))
- [6] 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 in underground project in China[J]. Construction Machinery, 2002, (5): 28 - 35.(in Chinese))

- [7] 樊安顺. 浅谈 TBM 施工输水长隧洞的关键技术[J]. 水利水电技术, 2006, 37(8): 37 - 44.(FAN Anshun. Key techniques for long water conveyance tunnel constructed with TBM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(8): 37 - 44.(in Chinese))
- [8] 刘冀山, 肖晓春, 杨洪杰, 等. 超长隧洞 TBM 施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(4): 37 - 43.(LIU Jishan, XIAO Xiaochun, YANG Hongjie, et al. A study on key construction techniques for tunnel boring machines adopted in super-long tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(4): 37 - 43.(in Chinese))
- [9] 肖晓春, 陈光存. 全断面隧洞掘进机在引黄工程南干线国际 II, III 标中的应用[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(1): 46 - 50.(XIAO Xiaochun, CHEN Guangcun. Application of full-face TBM on the international tender sections II and III of the southern artery in the Yellow River diversion project[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(1): 46 - 50.(in Chinese))
- [10] 刘志刚, 赵勇. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001: 207 - 271.(LIU Zhigang, ZHAO Yong. Tunnel construction geology technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001: 207 - 271.(in Chinese))
- [11] 成保才, 苏枢, 孙文安, 等. 双护盾 TBM 施工中处理不良地质和设置止浆环的初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 408 - 411.(CHENG Baocai, SU Shu, SUN Wen'an, et al. Preliminary design for treatment of fault and improvement of grouting quality in TBM tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 408 - 411.(in Chinese))
- [12] 苏华友, 张继春, 史丽华. TBM 通过不良地质地段的施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 635 - 1 638.(SU Huayou ZHANG Jichun, SHI Lihua. Construction technology of TBM excavating through section of unfavorable geological condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1 635 - 1 638.(in Chinese))
- [13] 王梦恕, 李典璜, 张镜剑, 等. 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.(WANG Mengshu, LI Dianhuang, ZHANG Jingjian, et al. Tunneling with rock TBM and related case histories[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.(in Chinese))
- [14] 苏枢, 杜长青. 万家寨引黄工程 TBM 施工段的地质问题及施工对策[J]. 水利水电技术, 2001, 32(4): 15 - 17.(SU Shu, DU Changqing. The main problems of engineering geology and the construction strategies of TBM excavating tunnel section of Wanjiatai[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(4): 15 - 17.(in Chinese))
- [15] 黄锦波, 帖军锋, 范双柱. 长隧洞施工关键技术[J]. 水利水电技术, 2006, 37(7): 23 - 27.(HUANG Jinbo, TIE Junfeng, FAN Shuangzhu. Key techniques for construction of long tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(7): 23 - 27.(in Chinese))
- [16] 王忠诚, 王晓全. 深埋长隧洞不良地质洞段 TBM 施工对策[J]. 海河水利, 2003, (4): 51 - 52.(WANG Zhongcheng, WANG Xiaoquan. Construction countermeasures for TBM working in poor geological section in deep-buried and long tunnel[J]. Haihe Water Resources, 2003, (4): 51 - 52.(in Chinese))
- [17] 彭道富, 李忠献. 特长隧道 TBM 掘进施工技术研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 179 - 183.(PENG Dao-fu, LI Zhongxian. Study on TBM technique for construction of super-long tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 179 - 183. (in Chinese))
- [18] 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 in 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))