

锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 施工工法研究

周济芳^{1,2}, 曾雄辉², 周春宏³, 陈炳瑞⁴, 龚秋明⁵

(1. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610051; 3. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 5. 北京工业大学 城市防灾与减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 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, 特点是洞线长、埋深大、技术难度大, 且沿线突水、岩爆、塌方各种地质灾害十分突出, 为确保工程施工的安全与按期顺利发电, 有必要选择安全快速的掘进方式, 为此针对 TBM 工法, 进行大量的调查研究与分析论证, 研究结果表明: 无论是从岩石的可钻性、耐磨性, 还是从岩石的变形、破坏特性, TBM 施工都是可行的, 对可能遇到的地下水、岩爆、围岩大变形等不良地质条件的处理, 较传统的钻爆法有一定的优势, 对人员设备的安全具有更好的保护作用。结合地质超前预报和施工中不断改进的施工工艺和支护手段, 可以较好地解决施工过程中可能遇到的一些工程难题。

关键词: 水利工程; 锦屏二级水电站; 引水隧洞; TBM; 适应性

中图分类号: TV 61

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2011)01-0149-06

STUDY OF TBM CONSTRUCTION OF DIVERSION TUNNEL FOR JINPING II HYDROPOWER STATION

ZHOU Jifang^{1,2}, ZENG Xionghui², ZHOU Chunhong³, CHEN Bingrui⁴, GONG Qiuming⁵

(1. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. Ertan Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China; 3. East China Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 5. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The diversion tunnel for Jinping II Hydropower Station is currently the largest group of hydropower tunnels in China. The surrounding rock masses of the tunnel are of long length, deep embedded depth and technical difficulties of construction, which is a variety of geological hazards such as water bursting, rockburst, collapse and so on. It is necessary to choose the safe and rapid excavation technology for ensuring construction safety and power generation schedule, so a large number of studies and analysis of the technology of TBM construction is conducted; and the results are as follows: TBM construction method is feasible not only in the view of rock drillability and cutter wear but also from rock deformation and fracture; but it is some advantage for the traditional drill and blast method to deal with issues such as groundwater, rockburst, large deformation and so on, and which has a better protective effect in the personnel safety. It can do better in solving a series of engineering problems on the construction process if using the continuous improvement of construction technology and

收稿日期: 2010-06-25; 修回日期: 2010-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909092); 湖北省自然科学基金项目(2009CDB120)

作者简介: 周济芳(1980-), 男, 2002年毕业于武汉水利电力大学土木工程专业, 现为工程师、博士研究生, 主要从事地下工程与工程建设管理方面的研究工作。E-mail: zhoujifang@ehdc.com.cn; zjfl980@126.com

supporting tools which come from between geological prediction and construction.

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

1 引言

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湾上，是雅砻江干流上水头最高、装机规模最大的一座水电站，也是雅砻江干流上的重要梯级电站。它利用锦屏大河湾 150 km 的天然落差，开挖隧洞截弯取直，引水发电，装机容量 4 800 MW，额定水头 288 m，保证出力 1 972 MW，多年平均发电量 242.3×10^8 kW·h。电站枢纽主要由首部拦河闸、引水系统、尾部地下厂房 3 大部分组成，引水隧洞是控制电站发电的关键工程。

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，其特点是洞线长、埋深大、技术难度大，沿线水文地质条件十分复杂，突水、岩爆、塌方各种地质灾害非常突出。如何快速安全地施工，传统的钻爆法施工面临着严重的挑战，有必要引入新的施工工艺。

由于施工速度快、效率高、隧道成型好、对周边环境影响小以及作业安全等优点，目前 TBM 施工技术在世界各国得到了广泛的应用^[1]。据不完全统计，截止到 2000 年年底，TBM 施工长度大于 10 km 的隧道已超过 100 条，累计长度已超过 10 000 km。国外已经建成的采用 TBM 掘进技术施工的著名大型隧道工程有英吉利海峡隧道、日本东京湾海底隧道、荷兰生态绿心隧道等^[2-3]。目前 TBM 法施工在国内发展较为迅速，在终南山秦岭铁路隧道，昆明掌鸠河引水工程，辽宁大伙房引水工程以及万家寨引黄工程得到应用^[4-7]。这些项目均为锦屏二级水电站采用 TBM 施工提供了有力的参考。

但 TBM 施工也有其局限性，比如对于高地应力下的塑性软弱岩层、高地应力条件下致密脆性岩石，如强岩爆发地段、岩石单轴抗压强度超过 350 MPa 的极高硬度岩石以及耐磨岩石等不适宜 TBM 施工。锦屏二级水电站 TBM 施工是否可行有必要进行深入研究，以便为锦屏二级水电站及同类工程 TBM 的选取提供参考依据。

2 TBM 施工锦屏围岩适应性研究

对于硬岩 TBM 技术施工，一般通过可钻性、耐磨性、变形特性和岩体裂隙发育程度等岩体自身的属性来评价 TBM 施工的适应性。

2.1 岩石的可钻性

根据挪威科技大学的研究成果^[8]，岩石的可钻性用岩石可钻性指数 *DRI*(drilling rate index)来衡量。可钻性指数 *DRI* 反映了完整岩石的可钻性，由岩石的表面硬度和脆性值共同决定，是岩石脆性与小钻试验结果的综合反应，也是岩石抗切割与形成岩石碎片能力的间接表达。通过不同种类岩石的多次试验对比，岩石可钻性与抗压强度具有负相关关系。不同洞段砂岩和大理岩单轴抗压强度见表 1，锦屏砂岩的单轴抗压强度为 80~180 MPa，*DRI* = 45~65；大理岩单轴抗压强度为 70~160 MPa，*DRI* = 60~80，根据 TBM 施工经验属可钻性好~较好的岩石^[2, 9]，适于 TBM 施工。

表 1 不同洞段砂岩和大理岩单轴抗压强度
Table 1 Uniaxial compressive strength of sandstone and marble in different tunnel zones

介质	单轴抗压强度/MPa				
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
砂岩	80	95	180	146	167
大理岩	96	160	126	144	70

注：S_i(i = 1~5)表示不同洞段的砂岩和大理岩。

2.2 岩石的耐磨性

岩石的耐磨性是评价是否适于 TBM 施工的另一种重要指标，主要由刀具的寿命指数(*CLI*)和硬矿物含量 *CAI* 值来表示，*CLI* 值越大或 *CAI* 值越小表示越适宜应用 TBM 掘进，一般 *CLI* > 50 表示该岩石对刀具的磨损性较小，适于 TBM 掘进。*CLI* 评价模型采用挪威科技大学发展的 NTNU 预测模型^[8]，其模型的理论基础基于刀具寿命与 *CLI* 关系曲线(见图 1，*D* 为滚刀直径)。

根据实验结果，锦屏大理岩的 *CLI* = 70~100，砂岩的 *CLI* = 62~95，适于 TBM 施工。

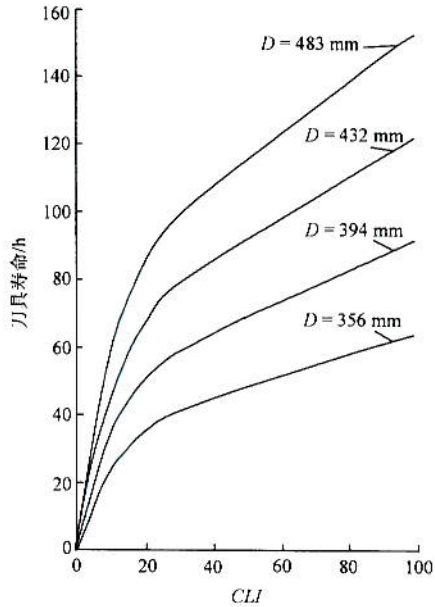


图1 刀具寿命与 CLI 关系曲线
Fig.1 Relationship curves of cutter life and CLI

2.3 围岩变形适应性

在深埋隧洞施工中, 随着新开挖面的出现, 在高地应力作用下围岩都会发生不同程度的变形, 包括初期的卸荷回弹、塑性变形, 甚至会出现围岩流变, 表现出底板鼓胀、边墙缩径及岩爆等现象, 其程度将直接对 TBM 掘进产生影响。TBM 刀盘、护盾与岩壁之间一般有 5 cm 的间隙, 特殊情况可以扩大至 20 cm, 如果围岩变形过大、过快, 将卡住 TBM 设备, 影响 TBM 掘进。

相同洞段辅助洞的围岩性质和地应力水平与引水隧洞基本一致, 围岩变形程度也大体相当, 因此辅助洞施工中的变形观测资料能较好地反映引水隧洞的变形量。

为此, 在辅助洞 TBM 施工相应洞段多个断面安装了收敛位移计(代表性洞段测线布置见图 2), 对大理岩和砂岩洞段围岩变形进行监测。收敛监测结果表明围岩变形趋于稳定时, 其测线 DE 的收敛变形累计量一般为 15~30 mm, 部分断面最大值为 58.09 mm^[10]。

另外通过数值分析的方法对辅助洞大理岩和砂岩洞段围岩进行长期变形分析, 典型洞段模型为 Kelvin-Voigt-CWFS 组合模型见图 3^[11]; 参数设置: 泊松比 0.25, 抗拉强度 1.5 MPa, 内摩擦角临界塑性应变 7.73×10^{-3} , 黏聚力临界塑性应变 1.7×10^{-3} , 起始内摩擦角 28.97° , 弹性模量 10.50 GPa, 最终内

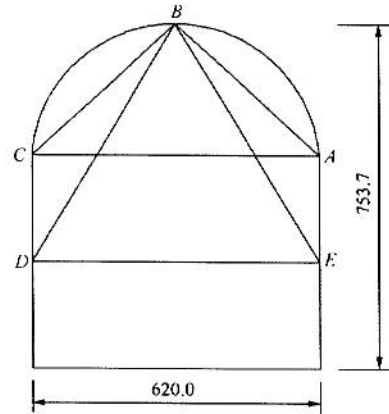


图2 收敛位移计测线布置(单位: mm)
Fig.2 Layout of survey lines of monitoring profiles (unit: mm)

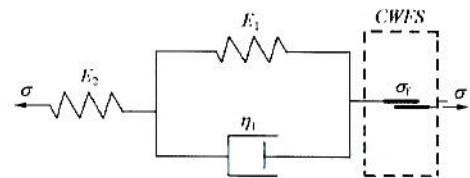


图3 Kelvin-Voigt-CWFS 模型^[11]
Fig.3 Kelvin-Voigt-CWFS model^[11]

摩擦角 50.10° , 起始黏聚力 7.43 MPa, 残余黏聚力 1.31 MPa, 弹性模量 $E_1 = 44.31$ GPa, $E_2 = 102.30$ GPa, 黏性系数 $\eta_1 = 91.60$ GPa·d; 应力场 $\sigma_1 = 44.7$ MPa, $\sigma_2 = 36.1$ MPa, $\sigma_3 = 28.3$ MPa; 分析模拟过程同现场开挖过程一致, 具体如下: 6.2 m×7.6 m 的辅助洞一次开挖成洞, 布置监测点, 监测 42 d, 然后将数值分析结果和监测结果进行对比, 进而通过大量的数值分析, 了解全洞段围岩的变形状况, 考察 TBM 的适应性。

如图 4, 5 所示, 现有的辅助洞围岩变形观测成

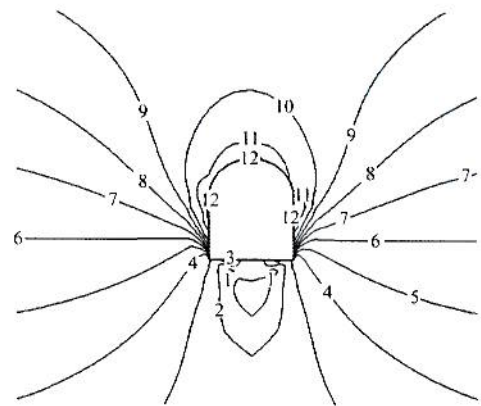


图4 KA8+750 断面开挖后 42 d 位移等值线图(单位: mm)
Fig.4 Contour map of displacement on No. 42 d after excavation at section KA8+750(unit: mm)

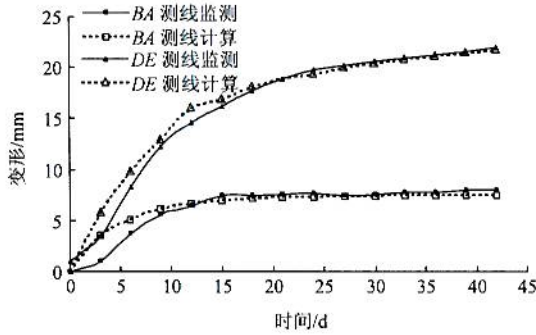


图5 KA8+750断面数值计算位移与监测位移对比图
Fig.5 Comparison of calculated displacement with the monitored at section KA8+750

果及数值分析结果表明：在洞壁 15 m 以外围岩无明显变形，变形主要出现在距洞壁 6 m 以内的范围，42 d 累计变形小于 25 mm。加上开挖瞬时变形，最大收敛变形约为 80 mm，远小于 100 mm 的 TBM 径向间隙，进行 TBM 施工不足以造成卡住 TBM 刀盘从而影响正常掘进的情况，因此大理岩和砂岩洞段用 TBM 施工是可行的。

2.4 围岩条件及分类

引水隧洞沿线主要为三迭系中、上统的大理岩、灰岩、结晶灰岩及砂岩、板岩，从东到西分别经过盐塘组(T_{2y})、白山组(T_{2b})、三迭系上统(T₃)、杂谷脑组(T_{2z})、三迭系下统(T₁)等地层，其中以三迭系中统的碳酸盐岩(盐塘组 T_{2y}、白山组 T_{2b}、杂谷脑组 T_{2z})为主，次为三迭系上统 T₃ 的砂岩、板岩等。引水隧洞岩层陡倾，其走向与主构造线方向一致，总体走向以 NNE 向为主。

引水隧洞围岩以 III, II 类为主，占 82.8%，IV, V 类围岩占 17.2%；其中因岩爆引起围岩类别降级 II_b, III_b, IV_b, V_b 所占的比例分别为 18.5%，17.8%，11.0%和 1.7%，说明引水隧洞总体成洞条件良好，围岩稳定性较好，有利于 TBM 施工。

围岩体破碎程度通过岩体结构面的发育程度来评价，包括结构面的产状、间距及洞轴线的夹角等来确定，破碎度共 5 类，划分为 0~4 级^[1, 2]。根据锦屏辅助洞所揭示的围岩特征，引水隧洞围岩的破碎程度类别总体为 1~2 级，属中等，较适应 TBM 开挖。

总之，无论是岩石可钻性、耐磨性、岩体的破碎程度、还是围岩表现出的变形特征，锦屏二级水电站大理岩和砂岩自身特性都是比较适合 TBM 法施工。

3 不良地质条件段 TBM 施工适应性

3.1 高地应力

工程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，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，最大实测主应力值可达 46.1 MPa(埋深 1 895 m)，据三维地应力回归分析最大主应力为 70.1 MPa；在引水隧洞施工过程中将产生岩爆，辅助洞施工过程也证明了这一点。这必将对施工安全和围岩稳定造成重大影响。

前期地质勘测和辅助洞施工表明：引水隧洞 85% 以上的洞段以弱~中等岩爆为主，局部地段为强~极强岩爆洞段。较传统的钻爆法施工，采用 TBM 施工来解决岩爆造成的施工安全和围岩稳定问题，有如下优势：

(1) TBM 无需爆破作业，减小了爆破产生触发效应的作用，使岩爆发生的频次及规模相应降低；同时对围岩的扰动大大降低，保护了围岩原有的自稳能力。

(2) TBM 坚硬机身对岩爆具有较好的防护性能，特别是护盾式 TBM。

(3) TBM 可保证后续锚喷支护或钢拱架的速度和质量，能真正起到围岩初期支护的作用；即便选用双护盾 TBM，开挖后 10 h 即可以开始初期支护，并在 6 h 内完成支护工作，这是钻爆法施工无法实现的。

(4) TBM 机身与洞壁间隙较少，缩小了岩爆击发和能量释放空间，一定程度上降低了岩爆的危害，特别是岩爆弹射造成的危害。

3.2 断层

引水隧洞沿线所穿越的主要断层有：(1) F28 断层：产状 N20°E, SE∠70°，挤压破碎带宽 1~2 m，岩石挤压呈片状；(2) F6 断层(锦屏山断层)：N20°~50°E, NW 或 SE∠60°~87°，断层带宽 1.0~4.2 m；(3) F5 断层：产状为 N10°~30°E, NW∠70°，主带内见有一定宽度的角砾岩，影响带宽 5 m 左右；(4) F27 断层：走向 N30°~40°W，倾向 NE，位于干海子中部，分布在白山组 T_{2b} 岩层中，带宽小于 5 m。这些断层均属非活动断层，充填比较密实，破碎带宽度均小于 5 m，对 TBM 施工影响不大，选择 TBM 施工是可行的。

3.3 岩溶地下水

地下水是锦屏引水隧洞的重大工程地质问题之一。锦屏山属裸露型深切河间高山峡谷岩溶区,主要接受大气降水补给。辅助洞主要出水点揭示的岩溶水文地质情况表明,东端辅助洞 A、B 两洞出水段岩溶主要沿 NEE~NWW, NNE~NNW 向 2 组陡倾角的结构面发育,以垂直向的岩溶小管道发育为主,不存在如地下暗河及厅堂式溶洞等典型的岩溶形态。从辅助洞及引水隧洞已开挖揭露情况表明,工程区岩溶发育总体微弱,洞线高程的深部岩溶形态为溶蚀裂隙和岩溶管道,不存在地下暗河及厅堂式大型岩溶形态;锦屏山两侧近岸坡地带岩溶相对发育,且西端的杂谷脑组大理岩较东端盐塘组大理岩岩溶相对发育。

据辅助洞揭示的地下水特征,地下水主要有 2 种形式,一是高压射流溶蚀裂隙管道水,沿溶蚀裂隙、空隙射出,距离主通道有一定的距离,最大射距可达 50 m,压力 3~5 MPa 甚至更高,可出现在掌子面、边墙、底板等位置;二是大流量管道突涌水,发育于岩溶的主通道附近,辅助洞开挖暴露的最大突涌水点,初始涌水量约 $7.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

当出现岩溶突水时,若采用传统的钻爆法,施工将受到很大的影响,严重时甚至被迫停工;而采取 TBM 施工,根据安伯格公司的咨询报告^[1],即使是出现 $7 \text{ m}^3/\text{s}$ 的大流量岩溶突水,掘进机也不会瘫痪,且只需要安装特殊的设施,收集和控制水势,TBM 即可继续工作。因此,从岩溶地下水的角度考虑,锦屏二级水电站引水隧洞较适于 TBM 施工。

4 TBM 施工不良地质条件处理方法

引水隧洞沿线 92% 洞段为成洞条件较好的碳酸盐岩^[10],适于 TBM 施工,但大突水和岩爆仍是引水隧洞 TBM 施工过程中不可避免的问题,必须采取各种措施进行及时处理。

4.1 高应力下岩爆防护措施

针对 TBM 施工方法的实际特点,根据不同的岩爆烈度分级采用不同的防治措施,包括相应的设计参数、支护类型和支护时机。

轻微岩爆防治方法:以岩石剥落或岩片轻微弹射为主,能量冲击较小。因此,可采用刚性锚杆,即普通砂浆系统锚杆支护,加设锚杆垫板,再喷一定厚度的钢纤维混凝土。

中等岩爆防治方法:打超前应力释放孔,在 TBM 掘进过程中,反复对掌子面及洞周喷(洒)冷水(或特定的化学溶液),湿润围岩,对围岩进行软化;

采用能够迅速起作用且吸水能力较强的水胀式锚杆,挂钢筋网,采用锚杆垫板扣于洞壁,喷一定厚度的钢纤维混凝土。

强~极强岩爆防治方法:打超前应力释放孔,进行松动爆破,对岩爆比较强烈的位置在应力释放孔内进行高压注水(或特定的化学溶液),压力的选取达到围岩出现爆裂为止。采用水胀式锚杆或预应力中空锚杆,垫板采用橡胶垫板,挂钢筋网紧贴洞壁布置,与锚杆焊接,初喷一定厚度的钢纤维混凝土,随机布置可缩式钢拱架。

4.2 高压大流量地下水的应对措施

根据辅助洞类比分析,引水隧洞施工期洞壁围岩出水形式将主要有:渗滴水、线状渗水和高压集中涌水 3 种形式。对于渗滴水型和线状渗水对引水隧洞施工也有一定的影响,但涌水压力不高,涌水量不是很大,作一般性注浆处理即可。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费时较多,因此对高压集中涌水,可采用超前预注浆的施工措施,在静水条件下将其封堵,另外,将电气设备等主要设备布置于后配套较高平台上,并采取刚性板状结构进行防护,降低人员伤害、设备受损的风险;并将 TBM 操作室置于后部,设计时要求密封性良好,就基本上可以确保人员安全;在 TBM 后配套上配置必要的辅助设备对出水点进行顶压、遮蔽等处理措施,可以保障施工正常进行。

5 TBM 掘进试验

为验证 TBM 在高地应力条件下的适用性,TBM 组装并开始掘进后,为对 TBM 开挖进行优化研究,在现场开展了 TBM 掘进试验工作。在 3# 引水隧洞进行的 TBM 掘进试验中单滚刀推力与掘进速度的变化如图 6 所示。此点掌子面岩石新鲜,发育有一组节理,节理间距为 1.5m 左右,节理产状为 $N75^\circ W$, $SW \angle 80^\circ$,与隧道轴向夹角为 10° 。此处为层状岩体,层面产状 $N40^\circ E$, $SE \angle 80^\circ$,层厚 10~20 cm,与隧道轴夹角为 80° 左右。回归后 X, Y, Z 方向地应力分别为 20.5, 23.0, 31.0 MPa。在单滚刀推力达到 200 MPa 左右时,每转进尺能过 20 mm 左右,具有很好的破岩效果。以上结果表明在高地应力条件下,掌子面不发生岩爆的情况下,高强度岩石在掌子面前方可能产生板裂,岩体可掘性指数有所降低,有助于岩石破碎。通过试验可得出 TBM 在本工程非强烈岩爆地段具有良好的适应性。

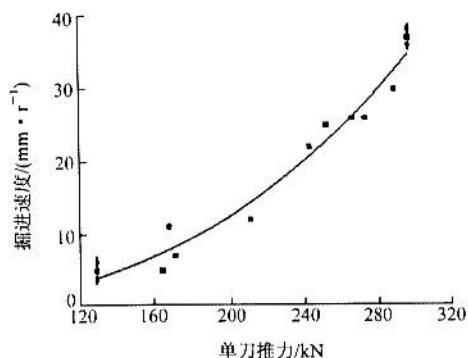


图 6 TBM 掘进试验中单刀推力与掘进速度的变化
Fig.6 Penetration rate variations with thrust force acting on the single cutter in penetration test

6 结 论

通过对锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 施工是否安全可行进行了大量的调查研究与分析论证,其结果表明:

(1) TBM 施工段围岩,砂岩的单轴抗压强度为 80~180 MPa, $DRI = 45 \sim 65$, $CLI = 62 \sim 95$; 大理岩单轴抗压强度为 70~160 MPa, $DRI = 60 \sim 80$, $CLI = 70 \sim 100$; 沿线砂岩和大理岩洞段,最大收敛变形约为 80 mm,远小于 100 mm 的 TBM 径向间隙; 82.8%洞段的围岩以 III, II 类为主,无论是岩石可钻性、耐磨性、岩体的破碎程度、还是围岩表现出的变形特征,锦屏二级水电站大理岩和砂岩自身特性都是比较适合 TBM 法施工。

(2) 地下水、高地应力、断层对 TBM 的影响可以进行有效控制,锦屏二级水电站引水隧洞围岩的地质条件适于 TBM 施工。

(3) 利用 TBM 施工,应对不良地质的地质灾害的能力优于钻爆法,对于施工进度、人员及设备安全也优于传统的施工工艺;特别是对于开挖后遇到的涌水, TBM 可以利用其配置钻孔设备和灌浆设备,施工较钻爆法方便、安全。

(4) 基于目前的地质预报方法和处理措施,基本能解决 TBM 施工过程可能遇到的一些工程难题。

参考文献(References):

[1] 瑞士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.(Am Berg Technologis Ltd. Feasibility consultation report on TBM working for Jinping Cascade-II Hydropower Station with long diversion tunnel[R]. Switzerland: Am Berg Technologies Ltd., 2006.(in Chinese))

[2] 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 Ministry of Water Resources, PRC. Full face TBM for hard rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 8.(in Chinese))

[3] 隆 威, 尹俊涛, 刘永正, 等. TBM 掘进技术的发展应用及相关工程地质问题探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, 32(2): 55 - 59.(LONG Wei, YIN Juntao, LIU Yongzheng, et al. The development and application of TBM, and discussion of correlated engineering geological problems[J]. Exploration Engineering(Rock and Soil Drilling and Tunnelling), 2005, 32(2): 55 - 59.(in Chinese))

[4] 张可诚, 曾金富, 张 杰, 等. 秦岭隧道掘进机通过岩爆地段的对策[J]. 世界隧道技术, 2000, 21(4): 34 - 38.(ZHANG Kecheng, ZENG Jinfu, ZHANG Jie, et al. Countermeasures for TBM passing through rock-blasting section in Qinling tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2000, 21(4): 34 - 38.(in Chinese))

[5] 梁晋平, 李文全, 史国珍. 双护盾全断面掘进机在万家寨引黄工程中的应用[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(4): 27 - 36.(LIANG Jinping, LI Wenquan, SHI Guozhen. Application of double shield TBM in Wanjiakai diversion works[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(4): 27 - 36.(in Chinese))

[6] 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))

[7] 姜 曦, 王成端. TBM 隧道掘进法出渣系统优化配置分析[J]. 矿山机械, 2005, (6): 8 - 9.(JIANG Xi, WANG Chengrui. Analysis of optimization configuration for slag-tapping system of TBM[J]. Mining and Processing Equipment, 2005, (6): 8 - 9.(in Chinese))

[8] BRULAND A. Hard rock tunnel boring[Ph.D.Thesis][D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.

[9] 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. Tunnelling with rock TBM and related case studies[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.(in Chinese))

[10] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 锦屏二级电站可行性研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2005.(East China Investigation and Design Institute under CHECC. Feasibility study report on Jinping II Hydropower Station[R]. Hangzhou: East China Investigation and Design Institute under CHECC, 2005.(in Chinese))

[11] 陈炳瑞. 岩石工程长期稳定性智能反馈分析方法及应用研究[博士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 2007.(CHEN Bingrui. Study on intelligent back analysis method for long-term stability of rock engineering and its applications[Ph. D. Thesis][D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.(in Chinese))