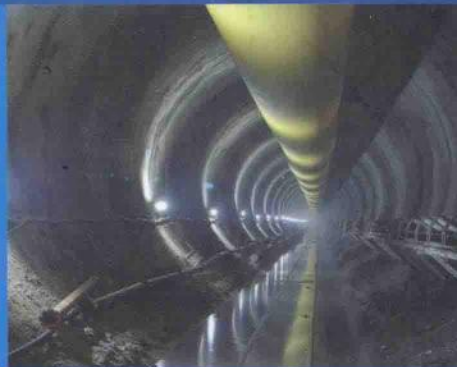


大伙房水库输水工程 特长水工隧洞修建技术

主 编 马 岚
副主编 李光波 穆国华



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大伙房水库输水工程 特长水工隧洞修建技术

主 编 马 岚
副主编 李光波 穆国华



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

大伙房水库输水工程隧洞是当今世界上已经建成的最长连续输水隧洞,使用3台TBM掘进;建设中取得了一批实用性强、技术含量高、有创新意义的配套成果。本书包括该工程技术论文共39篇,内容涉及设计方案、工程地质、TBM施工技术、隧洞施工技术、灌浆技术、建设管理、投资控制等方面最新研究成果,反映了水工隧洞建设的技术水平和发展趋势,集中代表了21世纪初长大隧洞工程建设的世界先进水平,对我国水工隧洞(道)及地下工程建设具有较强的指导意义。

本书可为广大水利工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

大伙房水库输水工程特长水工隧洞修建技术 / 马岚
主编. — 北京:中国水利水电出版社,2013.4
ISBN 978-7-5170-0741-8

I. ①大… II. ①马… III. ①长距离—过水隧洞—抚顺市—文集 IV. ①TV672-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第063931号

书 名	大伙房水库输水工程特长水工隧洞修建技术
作 者	主 编 马 岚 副主编 李光波 穆国华
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.25印张 362千字
版 次	2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	76.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

本书编委会

主 编 马 岚

副主编 李光波 穆国华

编 委 朱玉峰 杜士斌

前 言

大伙房水库输水工程是辽宁省“十五”、“十一五”期间重点基础设施建设项目，是惠及辽宁中南部7市、受益城市人口超千万的大型水资源配置工程，也是保障辽宁未来经济社会发展的生命线工程。在辽宁省委省政府的正确领导下，在水利部和国家有关部委的大力支持下，在工程沿线各级党委政府的积极配合下，输水工程经过8年的艰苦努力，终于顺利完工了！这是辽宁水利史上的一大盛事，也是全省基础设施建设取得的又一重大成果。

工程顺利完工，成绩来之不易。超长隧洞、复杂地质条件、多台TBM施工组织管理、隧洞贯通精度控制等诸多技术难题，是工程参建各方需要面对和必须解决的问题。我们的全体建设者团结协作，迎难而上，以坚忍不拔的毅力，克坚攻难，不仅安全、保质、按期完工，而且创造了诸多全国乃至世界第一：当今世界上已经建成的最长的连续输水隧洞；一条隧洞同时使用3台TBM掘进；8m直径隧洞月进尺1111m的全国最高纪录；超长距离皮带机连续出碴技术；TBM洞内组装和转场；20kV洞内供电等。科学技术是第一生产力，通过全方位、大规模的科技攻关，取得了一批实用性强、技术含量高、有创新意义的配套成果。大伙房水库输水工程参建各方，精心组织，精心施工，高质量、高效益地完成了整个工程的建设任务，展现了艰苦奋斗、精益求精、一丝不苟、勇于创新的行业精神，体现了以科技促质量抓管理的水利建设新模式。

为了加强科技交流，促进科技创新和进步，加快科技成果转化，大伙房水库输水工程建设单位辽宁润中供水有限责任公司集合了工程参建各方的经验和力量，组织编写了本书。这本书内容既是对大伙房水库输水工程建设运用科技取得胜利的集中展示，也是对目前国内外水资源配置工程建设阶段性成果的总结，凝聚了广大工程技术人员和全体工程建设者的心血和智慧。

本书技术论文共39篇，内容涉及设计方案、工程地质、TBM施工技术、隧洞施工技术、灌浆技术、建设管理、投资控制等方面，基本涵盖了隧洞工程建设的各项最新研究成果，总体反映了水工隧洞建设的技术水平和发展趋势。

势，集中代表了 21 世纪初长大隧洞工程建设的世界先进水平，对我国水工隧洞（道）及地下工程建设具有较强的指导意义。

由于文稿数量多，编辑工作量大、时间紧，且编者水平有限，本书的不当之处，敬请广大读者指正。

编 者

2013.1.10

目 录

前言

特长水工隧洞修建技术综述	马 岚	(1)
TBM 施工支护衬砌的优化设计	黄柏洪 赵一兵 邵文东 王怀斌	(8)
输水长隧洞 TBM 类型选择	张晓伟 黄柏洪 王怀斌 黄 兵	(18)
TBM 主机安装间设计	黄柏洪 林聪俐 王 哲	(23)
特长隧洞 TBM 施工通风方案设计	李新功 李 楠 孙树成 李 瀚	(29)
大型输水工程隧洞结构应力仿真分析研究	李文富 林长杰 周 红 路广平	(37)
大伙房水库输水工程信息化系统设计	马 凌 仇延林 周林虎 段少杰	(42)
水工隧洞现浇混凝土衬砌环缝预埋式灌浆止水系统的设计	金兆辉 路广平 赵玉辉	(46)
钢纤维喷射混凝土在水工隧洞中的应用	黄柏洪 吴子平 王怀斌	(51)
特长隧洞安全监测系统的分析与设计	宋 放 胡颖姝 张芳婕	(56)
大理岩区喀斯特发育规律及其对隧洞施工的影响	李久平 仇延林 黄建华	(61)
综合超前地质预报技术在大伙房水库输水工程中的应用	李久平 朱玉峰 姚志国 韩志远 刘 亮	(67)
特长水工隧洞 TBM 施工组织管理	穆国华 刘 芸 李 飞 施春生	(74)
大伙房水库输水隧洞施工中 TBM 作业方案论证与实践	杜士斌 杜业彦 王俊达	(80)
TBM 采用大直径滚刀掘进的优越性	杜士斌 李 强 卜丽华	(84)
TBM 掘进速度及影响因素浅析	李文富 袁兴泽 赵玉辉	(89)
浅议隧洞开挖过程中 TBM 卡机原因及脱困处理措施	李久平 张 洋 刘桂文	(94)
特长水工隧洞 TBM 施工出碴方案选择	李文富 黄 兵 孙继会 韩广友 张乐诗	(99)
PPS 导向系统在 TBM 中的应用	王世霏 孙永浩 朱玉峰	(105)
全环内通式衬砌模板台车安装方案设计	李文富 施建军 唐德瑄	(108)
TBM 在超长隧洞工程施工中的转场	姚志国 杜士斌 揣连成	(114)
开敞式 TBM 在塑性变形洞段的施工	杜士斌 徐利芬 卜丽华	(120)
TBM 施工隧洞富水地段湿喷混凝土施工技术	王树勋 张晓伟 赵志强 王晓宇	(127)
浅埋偏压隧洞的进洞方案与施工技术	苏奕文 吴安和 巩 南	(132)

钻爆设计在石英砂岩开挖施工中的应用	韩志远	杨 胜	陈 霞	(137)
隧洞衬砌混凝土测强曲线的建立与应用	班树春	郭秀峰	马 凌	(143)
围岩变形监控量测在隧洞施工中的应用	揣连成	杨 能	王梓晗	(150)
刚性自防水衬砌混凝土在深埋隧洞中研究与应用	韩志远	肇 忠	谷风涛	(155)
特长隧洞贯通误差控制研究	施春生	班树春	栗 佳	(160)
特长隧洞复合式衬砌防排水系统技术应用	周林虎	姜明秀	张军伟	李光波 (167)
隧洞工程涌水处理的对策和措施	卜丽华	揣连成	杜士斌	(174)
固结灌浆技术在大伙房输水工程六河不良地质段的应用	路广平	赵丽丽	韩靓靓	(179)
“盖帽法灌浆技术”在洞室被淹处理中的应用.....	邹本东	杜业彦	杜士斌	(183)
采用超前灌浆和超前管棚对接技术通过突水突沙地质灾害洞段	邹本东	冀红伟	杜士斌	马振兴 (190)
“全孔一次高压注 (HSC) 浆技术”的研究与应用	杜士斌	杜业彦	张亚峰	白玉杰 (196)
大伙房水库输水工程质量控制与安全管理	董秋艳	杨 胜	高 荃	李光波 (206)
大伙房水库输水工程融资方案研究	魏永庆	张淑祥	李兴文	(211)
TBM 在不同地质条件下掘进定额的研究	冯云晓	曾庆国	刘 博	刘 芸 (218)
长大隧洞施工中有轨运输与无轨运输的联合使用及机械配套	朱玉峰	纪 鹏	方 亮	班树春 (223)

特长水工隧洞修建技术综述

马 岚

(辽宁润中供水有限责任公司 沈阳 110166)

【摘 要】 大伙房水库输水工程隧洞是目前世界上已经建成的同类型最长的全封闭、自流式节能输水隧洞。采用综合地质勘察和设计新技术,通过复杂山区调水工程合理选线,实现了自流输水,且占用土地及拆迁极少,有利于环境保护。施工采用开敞式 TBM 和钻爆法联合施工方案,单台 TBM 实现了安全、快速掘进 15km 以上,能用于软、硬围岩地层。选择锚喷永久支护代替管片衬砌,洞内出渣采用了连续皮带机技术,施工效率大大提高;TBM 独头掘进施工单管单机通风距离超过 10km,实现了隧洞施工通风技术的重大突破;成功采用了 GPS 控制网精密定位技术以及 PPS 导向系统,实现了长距离高精度控制测量和特长隧洞高精度贯通。本文重点介绍其主要研究内容和成果,供参考。

【关键词】 水利工程;水工隧洞;TBM;钻爆法;锚喷支护;施工机械;衬砌

1 工程概况

大伙房水库输水工程是辽宁省“十五”、“十一五”期间重点基础设施建设项目,是为解决辽宁省中部地区的抚顺、沈阳、鞍山、营口等 6 城市工业和居民生活用水问题而修建的大型跨流域调水工程。工程自辽宁省凤鸣水库库区,经 85.32km 输水隧洞,将水引至新宾县境内穆家电站拦河坝下游,进入苏子河汇入大伙房水库,经大伙房水库反调节后,向辽宁省中部地区城市输水。设计输水流量 $70\text{m}^3/\text{s}$,多年平均输水量 17.88 亿 m^3 。总投资 52.18 亿元。

大伙房输水隧洞长 85.32km,进口底板高程 229.85m,出口底板高程 194.00m,隧洞纵坡 1/2380,洞线总体走向为 $\text{NWN}50^\circ$ 左右。钻爆法施工段采用马蹄形断面,成洞尺寸为 $R=3.5\text{m}$;TBM 施工段采用圆形断面,开挖洞径为 8.0m。模筑混凝土段成洞洞径为 7.16m,锚喷段成洞洞径为 7.8m。

隧洞施工采用以 TBM 为主、钻爆法施工为辅的联合作业方法,TBM 施工段设计控制长度在 18~20km 左右,整个洞线共布置施工支洞 14 条,总长 15.4km。

工程于 2003 年 6 月开工,2009 年 4 月 12 日 85.32km 隧洞全线高精度贯通,2009 年 9 月基本建成。

2 工程特点

(1) 本工程是目前世界上已经建成的最长的连续输水隧洞。隧洞全长 85.32km (支洞长 15.4km,总长 100.72km),开挖洞径 8m,属大断面特长隧洞。

(2) 洞线的工程地质条件复杂。本工程的施工区域古老的基底地层广泛出露。主要出

露五大岩组：①太古界变质岩系混合岩、混合花岗岩；②下元古界辽河群大石桥组大理岩；③上元古界青白口系永宁组铁质、硅质石英砂岩夹板岩；④中生界白垩系小岭组沉积岩及火山碎屑岩；⑤中生代燕山期侵入的正常斑岩等。洞线穿越两大向斜构造、29条断层、50座山峰和51条河谷地。河谷洞段总长约10km，河流大部分为季节性河流，其中六河为工程区内最大的常年性河流，多年平均径流量为1.89亿 m^3 。围岩主要为中硬岩，饱和抗压强度一般为19~60MPa，石英砂岩的饱和抗压强度为85~115MPa。洞室埋深52~600m，其中埋深不大于100m洞段长度约7km、100~300m洞段长度约46.5km、大于300m洞段长度约31.5km。

(3) 本工程同时采用三台开敞式TBM进行施工。本工程主洞采用以TBM掘进为主、钻爆法为辅的施工方式，优化选用了三台TBM同时施工，其工程规模目前在国内外建成的地下隧洞工程中尚无先例。工程实践表明：TBM的总体设计、主要技术参数的确定、支护设备的配置是科学合理的。对我国TBM的技术引进和消化吸收再创新具有重要的借鉴和推动作用。

(4) 大伙房水库输水隧洞工程TBM单机连续掘进长度超过15km。考察国内外的隧洞工程，迄今为止，大洞径隧洞TBM单机连续掘进长度超过15km的记录较少。

(5) 在国内首次设计、使用大功率、长距离、可延伸、可控启动的连续皮带机出碴技术。大伙房隧洞工程敢于创新，在国内率先采用长距离皮带机运输出碴工艺，打破了国内皮带机最长运输距离为3.5km的记录，成功采用10km以上连续皮带机实现大容量高速度出碴，实现了与TBM施工的连续配套。连续皮带运输机的成功应用大大提高了TBM的工作效率和利用率。

(6) 本工程TBM施工独头通风距离超过10km，采用大风量进口风机风管，创造了科学的通风管理体系，这在国内外隧洞施工史上是前所未有的。

(7) TBM施工管理技术有所创新。依靠自己的力量承担多台TBM同时施工并主持全部施工管理，TBM平均工时利用率达到0.4以上，居国际先进水平，并创造了TBM日掘进最高63.5m、月掘进最高1111m的同类规模最高纪录。

(8) 大伙房特长隧洞集中代表了21世纪初长大隧洞工程建设的世界先进水平。

3 特长隧洞修建技术

3.1 复杂山区调水工程选线及勘察设计技术

3.1.1 大范围加深地质勘察工作，提高调水方案决策的科学性

考虑到本隧洞穿越长白山脉地区，选线范围大，可选方案多，地形、地质复杂，为避免选线的盲目性及方案决策的失误，对调水工程选线及勘测技术进行了创新。本工程规划选线工作由十条初选方案中筛选出三条引水线路进行比较。经反复研究确定方案1（Ⅰ洞线）为输水线路的代表性方案，同时比较方案还有方案2（Ⅱ洞线）和方案3（Ⅲ洞线）。针对一主二副方案进行大范围加深地质勘察工作，先后六次进行了地质测绘、地质遥感、钻探、物探、山地工程、料场勘察、构造调查、水文地质调查、室内试验及区域地壳应力场研究、输水隧洞地应力与岩爆问题分析、输水隧洞地下水及施工涌水分析、输水隧洞涌水处理的对策和措施等专题研究工作。这项举措冲破了以往带状区域选线的局限性，加大

了调水方案研究的广度及深度,提高了方案决策的科学性。经工程验证,确定的本隧洞调水方案合理、隧洞走向定位正确,工程地质条件良好。表明大范围加深地质工作达到了预期目的。

3.1.2 开展大面积、多方案兴利调度研究,确定最优调水方案

本工程兴利调度研究是一个复杂的大系统多目标决策问题,系统的主要特点是随机性大、目标众多、保证率不同,而且是水库群联合调度。对此,依据大系统的分解—协调原理并结合本工程的具体情况,将兴利调度研究分解为调入区兴利调度研究和调出区兴利调度研究两个部分,而后进行协调。调入区的优化调度方案采用了两种数学手段:一是采用自优化模拟模型;二是采用多目标动态规划模型。通过对动态规划方法与自优化模拟方法进行比较可以看出,按动态规划确定的调度图运行时,调水利用率高,满足相同的供水保证率需调的水量少。同时,供水与实际需水过程吻合得较好,从而使弃水和缺水都小。

3.1.3 综合地质勘察设计技术研究与应用

3.1.3.1 采用综合勘察技术

在传统勘察方法的基础上,应用多项先进的勘察技术,包括地质遥感、土壤吸附汞构造地球化学勘察技术、高密度电法、跨孔 CT 层析成像、多道瞬态面波勘探、CSAMT 大地音频电磁法与 TEM 瞬变电磁法、地质计算机制图开发应用、深孔绳索取芯钻探技术、偏心跟管钻探工艺、气囊双塞压水试验方法、放射性测量等。

根据不同地质问题采用相应勘察手段,合理布置,在重点部位投入了大量勘察工作量,不同方法互相利用,互相验证,开展了“点、线、面结合,多层次、多参数”立体化综合物探。传统技术与多种先进勘察技术的综合利用,取得了较为详尽的地质特性原始资料,为工程地质条件分析与评价提供了丰富可靠的地质基础资料,大大提高了勘察效率和成果质量,节省了勘察费用和勘察周期。不同勘察手段勘察成果后期都得到较好的验证,吻合性较好。同时,对全线围岩进行了分类和区段划分,为不同地段选择不同施工方法、TBM 选型和设备参数选择、工期费用确定及工程设计提供了重要依据和合理化建议。

3.1.3.2 区域地应力测量与研究

通过对本工程周边构造应力场的研究及对不同部位采用钻孔水压致裂法实测本工程地应力,综合分析了区域地应力场特征,为工程设计提供了重要依据,提出了涌水突泥、岩溶坍塌、岩爆等地质灾害防治预案。

3.1.4 辅助支洞优化设计

根据工期目标,同时考虑到环境保护,以及减少人员通行的时间,通风、供电、排水和出碴的费用投入,结合实际情况,通过优化设计研究,整个特长隧洞共布置 14 条施工支洞,TBM 和钻爆法段各 7 条,施工支洞总长 15.411km,占主洞总长 18%左右。尤其在每个 TBM 施工段,科学合理地布置辅助支洞,对保证每台 TBM 发挥最大效能起到重要的作用。

(1) 鉴于 3 台 TBM 的单机掘进长度均按 20km 左右控制,通过支洞为 TBM 的中途检修、维护与保养创造条件。

(2) 缩短供电距离,减少电压降,确保供电的可靠性。设置支洞,使采用常规的 10kV 线路供电成为可能,且电缆数量减少一半。

(3) 缩短出碴皮带长度和料物运输距离,降低工程造价。

(4) 缩短通风距离,减少风量损失,保证通风效果。同时,支洞作为永久支洞有选择保留,以满足输水隧洞运行期补气需要。

(5) 合理设置支洞,有利于衬砌施工工期安排,并且保证衬砌的施工质量。

3.1.5 锚喷+模筑混凝土复合衬砌结构设计

本隧洞选用锚喷复合衬砌结构代替管片结构,主要考虑了以下因素:

(1) 锚喷支护+二次模筑混凝土复合衬砌是基于 NATM 理论的一种支护形式,与 TBM 配合施工,对围岩扰动小,分期施作支护,更加符合 NATM 的基本原则。

(2) 在锚喷支护的基础上,增设二次模筑混凝土,主要是提高结构的安全系数,起到了安全储备的作用。施工时采用全圆式模板台车,使Ⅲ~Ⅴ类围岩的衬砌内径保持一致,更能减少水流的局部水头损失。

(3) 采用锚喷支护与二次模筑混凝土衬砌,其止水与排水设计技术比较成熟。

(4) 采用锚喷及模筑混凝土衬砌,只需在支洞口设置普通的混凝土拌和站即可,无需大面积占地,费用比管片衬砌低许多,并且有利于生态保护。

3.2 开敞式 TBM 施工技术

3.2.1 选择开敞式 TBM 与钻爆法联合施工

针对本隧洞特点,通过研究和比较,选用了三台开敞式 TBM,其中两台为罗宾斯 MB264-310,一台为威尔特 TB803E。实践表明:采用敞式 TBM 是十分智慧的,既能够充分发挥 TBM 的开挖高效性和临时支护的灵活性,又能够保证 TBM 迅速通过不良地质洞段。采用开敞式 TBM,与钻爆法联合作业,施工方法互相转换更加灵活。TBM 法与钻爆法的锚喷支护和模筑混凝土衬砌实现了统一,衬砌与开挖互不干扰。TBM 施工段设有中间支洞,在第一段开挖完成并转场后,就可以进行永久衬砌施工,根据工期的要求,只要在与 TBM 配套的施工设备上改进、创新,大力推广使用仰拱模板台车和全环内通式模板台车,合理布置衬砌台车数量,就能够保证衬砌施工的连续性。

3.2.2 TBM 施工及组织管理

为保证工程顺利进行,根据特长隧洞施工的特殊技术和工期要求,通过对引进 TBM 的消化吸收再创新,建立了符合我国国情的 TBM 施工管理模式。通过对工程地质条件适应性和 TBM 掘进各种状况工作参数的研究,提出了 TBM 在不同围岩情况下的经济、稳定、快速掘进的技术方案,成功穿越了多条不良地质和施工困难地段,确保了隧洞的安全贯通。通过对 TBM 状态监测及故障诊断、TBM 刀具以及科学保养等技术的应用研究和创新,充分发挥了 TBM 的工作效率,有效地降低了 TBM 的施工成本。科学合理地运用了 TBM 施工组织管理技术,创造了 TBM 掘进最高月进尺 1111m、最高日进尺 63.5m、平均月掘进作业利用率 40.2%的记录,其中,TBM1 标段平均月进尺 566.8m,最高月进尺达 932.4m;TBM2 标段平均月进尺 522m,最高月进尺达 750m;TBM3 标段平均月进尺 575m,最高月进尺达 1111m,取得了良好的工程效果。

3.2.3 TBM 洞内组装及中间转场检修

本隧洞三台开敞式 TBM,其中两台在主支洞交叉段的扩大洞室内组装。扩大洞室是 TBM 组装的地下厂房,是 TBM 施工的重要组成部分,由 TBM 主机安装间、过渡段、通

过段和始发洞等组成,担负着 TBM 主机、后配套的安装、调试和 TBM 始发,以及布置主洞连续皮带机、各种施工材料及人员、TBM 配件的有轨转场等任务。本隧洞 TBM 安装操作所需场地为宽 10m、高 10m、长 65m,起重重量约为 151t,经比较选择 A4 级双电动葫芦吊钩桥式起重机,确定断面形式为“蘑菇”形,开挖跨度为 11.50m、拱冠最大跨度为 12.9m、最大高度为 14.48m、最大长度为 80.00m。安装间内主要布置 TBM 组装、起吊设备,用于材料运输、工具备品备件库,以及布置主洞连续皮带机、材料堆放场和风、水、电管路等。

3.2.4 连续皮带机出碴

本隧洞采用 10km 以上连续皮带机,实现大容量高速度出碴,实现了与 TBM 施工的连续配套。连续皮带机的 PLC 控制,动态分析、可控启动、自动张紧、高速托辊、指针硫化延伸等新技术都在本工程中得到成功应用,确保皮带出碴运输系统始终处于良好的工作状态,满足 TBM 施工要求。成功地解决了主洞连续皮带机弯道段的正常运行及与支洞固定皮带机转碴、匹配运行的问题,提高了 TBM 的工作效率。

3.2.5 TBM 独头掘进施工 10km 以上长距离通风

结合工程的特点,研究了特长隧洞施工通风的总体方案;对施工通风相关参数进行了模拟试验与计算分析;确定了施工通风系统布置与设备选型配套,实现了单机压入 10km 和单机压入管道送风、竖井排烟 15km 的独头通风两套模式,解决了独头 10km 以上的通风问题。选用进口大风量优质高效的轴流式隧洞风机,型号为 152-109-1470,功率 150kW。选用进口大直径($\phi 2.2\text{m}$)的通风软管,节距 300m,摩擦阻力系数 0.0024,每节漏风率 $0.13\text{m}^3/\text{s}$ 。提出了长管路系统漏风规律的基本结论,并推荐了漏风系数的计算公式、气锤压强工程应用的计算公式及附壁射流区长度的计算公式。提出并实施了以“防漏降阻”为核心内容,改善机制、强化管理的一整套管理技术和管理制度。实现了长管路软管通风百米漏风率低于 1%,管路摩阻系数低于 0.02。

3.2.6 全环衬砌模板台车与开敞式 TBM 联合作业

针对本隧洞的特殊工期要求,展开了包括 TBM 掘进与全环衬砌联合作业模式研究、全环衬砌施工工艺研究、全环衬砌施工机械化研究和全环衬砌模板台车研制等,实现了 TBM 掘进与衬砌的联合作业模式和衬砌的机械化全环整体一次浇筑,满足了特长隧洞的快速和高质量混凝土的施工要求。通过研究试验,成功解决了其内部通过连续皮带运输机、高压电缆、大直径风管、运输车辆及其他各种管线等关键性技术难题,既能与开敞式 TBM 联合作业又能实现隧道(洞)衬砌的全环整体一次浇筑。全环衬砌模板台车采用液压、电气控制执行机构的动作与机械锁紧定位相结合的方式来实现台车各种功能,自动化程度高,安全可靠性好,现场使用可靠。

3.3 特长隧洞贯通控制

隧洞越长地球曲率变化对贯通影响越大,现行的《水利工程施工测量规范》中仅有长度 10km 以内隧洞贯通测量的技术要求。在既无书本可查又无规范可循的情况下,本工程研究制定了特长隧洞横向贯通中误差分配表,测量精度指标、精度匹配关系、高斯二级逆向投影变换法和洞内交叉双导线布网法等,并应用于特长隧洞的贯通测量中。应用先进的 GPS 测量技术,建立了 GPS 施工测量控制网,使工程施工处于科学合理的测量精度控制

中。开挖结束后,隧洞贯通误差均达到了规定限差,最好贯通偏差(横向 22mm、纵向 28mm、高程 11mm),贯通误差分别仅为允许误差的 0.01%、0.11%和 0.11%。完全符合测量误差分布规律,符合工程要求,没有出现纠偏和贯通误差处理现象,确保了国内外最长隧洞的高精度贯通。

3.4 防止地下水流失的衬砌结构防水技术

针对本隧洞二次衬砌施工表现出集中、量大、工期紧、质量要求高、混凝土运输不中断等特点,研究采取了不同的先进的衬砌施工方法、工艺和材料,包括单线轨道配合移动式浮放道岔的混凝土运输方式、196m 深的混凝土投料孔技术,以及混凝土施工质量控制技术,满足工程进度、施工质量和环境保护的要求,并取得了良好的经济效益。

以减少和防止地下水流失为目标,对隧洞防水提出了高标准,“以堵为主、限量排放”,甚至零排放。结合工程材料的实际条件,对防水工艺以保证质量和降低成本为目标进行优化,从新型 HW 防排水板、自防水混凝土技术、混凝土预埋式接缝防水体系三大方面下工夫,提出了相适应的施工技术要求。

对衬砌防水混凝土人为地从材料和施工两方面采取措施提高混凝土本身的密实性,抑制和减少混凝土内部空隙生成,改变空隙的特征,堵塞渗水的通路,从而达到防水的目的。本工程选用多种防水混凝土添加剂,通过室内试验确定最适宜的混凝土配合比和外掺剂种类及掺量,试验项目包括混凝土的抗渗性、抗裂性、抗压强度、抗折强度等。

防水板本身的抗渗透能力足以能够满足防水的要求,地下水之所以能够通过防水板进入到隧洞衬砌结构中,是由于防水板在施工过程中受到破坏和防水板接缝处理不密实等所致。因此,本工程主要解决的关键问题为:选择新型 HW 防排水板;研究防水板铺设工艺,以使防水板最大程度地与初支密贴;研究防水板的接缝工艺和接缝效果的检查方法。

在防水板与初支之间预留注浆系统进行注浆,以充填其间的空隙阻断出水通路。本预留注浆系统的注浆管路需要穿透防水板,因此,如何保证预留注浆管路与防水板连接处的防水性能是问题的关键。

3.5 六河不良地质段复合式衬砌防水结构施工技术

大伙房隧洞工程六河标段地质构造复杂,地下洞室埋深浅,隧洞洞线穿越六河河谷,地表为年径流量平均约为 1.89 亿 m^3 。受地质构造影响,六河标段地下水与地表水联系密切,围岩溶蚀发育较为严重,局部洞段穿越原位大理岩砂地层,由于洞室开挖过程中改变了原来的水文地质条件,地下水出现了新的排泄通道,洞室开挖过程中发生多次大量涌沙、涌水现象,对洞室稳定极其不利。洞室开挖过程中虽然采用了超前预注浆和超前管棚对接等施工技术实现了隧洞顺利贯通,但由于特殊的不良地质条件,洞室开挖后,地下水出现了新的排泄通道,地下水状态仍然十分活跃,整个标段的洞室仍存在大面积的渗漏水现象,虽经严格的初期支护处理后,洞室渗漏水仍较大,严重地影响了后续洞室衬砌工作及工程质量。针对这一工程难题进行了“复合式衬砌防水结构”的研究。此种技术包括防排水系统技术研究、混凝土自防水技术研究、预埋式接缝防水系统技术研究等。实践证明:通过此种技术的研究取得了可喜的成果,洞室渗漏水得到了有效的控制,衬砌混凝土工作得以保质保量顺利进行。衬砌混凝土表面几乎无裂缝,无渗漏水现象,表面光洁,施

工缝处无渗漏水现象。这一科研成果,对于那些工程水文地质条件复杂、地下水极其活跃而又难以治理的类似隧洞工程的施工,在简化隧洞防水施工的繁琐程序、加快施工进度、增强防水效果、减少和防止地下水流失、有效保护生态环境和维持生态平衡等方面,具有广泛的推广应用价值。

4 结语

(1) 工程实践表明:本隧洞提出的 TBM 和钻爆法联合施工方案、选择采用的开敞式 TBM 和连续皮带机出碴技术、按照 NATM 理论采用锚喷复合衬砌结构代替管片衬砌等重大技术措施是科学合理的,产生了明显的经济效益,对大伙房隧洞工程特长隧洞高速度、高标准、高质量的建成起到了重要的保证作用,对我国 TBM 的技术引进和消化吸收再创新具有重要的借鉴和推动作用。

(2) 本隧洞的成功修建,极大地推动了我国隧洞和地下工程建设事业的发展。TBM 施工技术将更加广泛地应用于隧洞及水利工程,如引黄入晋水利工程、南水北调工程、今后拟规划建设的琼州海峡隧道、台湾海峡隧道等。

(3) 在铁路、公路及水利等重大工程建设中,更多的特长隧洞(隧道)将成为首选方案。推广采用 TBM 和钻爆法联合施工方案也将成为可能。

(4) 在工程实施过程中,国内许多拟建工程的建设、设计和施工单位均到工地现场进行考察调研,为这些工程最终采用 TBM 施工提供了借鉴。如若本文介绍的内容和成果对同行也有所帮助,笔者将十分欣慰。

参考文献

- [1] 梅志荣,高菊茹,唐与等.大伙房输水工程特长隧道 TBM 施工关键技术研究 [R]. 成都:中铁西南科学研究院,2009.
- [2] 梅志荣,张军伟,章元爱等.大伙房输水工程特长隧道施工方法优化与 TBM 选型研究 [C]. 第五届中日盾构隧道技术交流会.成都:西南交通大学,2009:204-313.
- [3] 周佳媚,李志业,高波.TBM 施工隧道仰拱预制块的受力分析 [J]. 中国铁道科学,2004,25 (3): 32-35.
- [4] 王梦恕,李典璜,张镜剑等.岩石隧道掘进机 (TBM) 施工及工程 [M]. 北京:中国铁道科学出版社,2004.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

TBM 施工支护衬砌的优化设计

黄柏洪¹ 赵一兵¹ 邵文东² 王怀斌¹

(1. 辽宁省水利水电设计研究院 沈阳 110003;

2. 辽宁西北供水有限责任公司 沈阳 110006)

【摘要】 当前地下工程建设日益成为全球普遍关注的热点,在地下工程中采用全断面掘进机(TBM)进行快速开挖将成为必然的发展趋势。为适应 TBM 快速开挖这一特点,TBM 开挖后的围岩支护技术将是影响 TBM 开挖速度的关键因素。本文针对适应 TBM 开挖所采取的支护技术进行探讨,并对大伙房水库输水工程 TBM 施工段的隧洞支护衬砌设计,提出了优化方案,并且实际应用到工程中。

【关键词】 TBM; 支护; 隧洞施工

1 概述

当前地下工程建设日益成为全球普遍关注的热点,TBM 掘进技术经过近半个世纪的发展完善,目前已日臻成熟,在地下工程中采用全断面掘进机(TBM)进行快速开挖将成为必然的发展趋势。

采用 TBM 进行地下工程施工,开挖作业能够连续进行,施工速度快,工期得以缩短,特别是在稳定的围岩中长距离施工时,此特征尤其明显。但要保证 TBM 连续快速的开挖,洞室围岩的支护是尤为关键的因素。如果不能及时、安全地对开挖后的洞室围岩进行有效的支护,TBM 开挖的速度优势也将是空谈。本文主要对适应硬岩 TBM 开挖的支护设计进行探讨。

2 TBM 施工的支护设计

2.1 支护形式

在钻爆法开挖的隧洞中,除极小断面的隧洞外,支护形式多为以喷混凝土、锚杆、钢支撑为支护主体,在大多隧洞中被广泛采用。

在公路和铁路隧洞(道)中,是基于围岩弹性波速度、岩类、地质时代来划分围岩类别的,适应各种围岩类别的支护形式大多已模式化了。在采用 TBM 进行施工时,支护与 NATM 法一样,多采用喷混凝土、锚杆、钢支撑以及木背板、钢背板等,有的还采用管片,也是基于地质条件进行设计的,但其设计和施工方法问题还没有完全解决,其理由如下:

(1) 掌子面被 TBM 机体所堵塞,很难基于掌子面直接观察,进行状况判断。

(2) 拱顶下沉和净空位移等隧道动态量测,在开挖后立即进行是困难的。因此,要采用量测以外的手段来判断围岩的稳定性和支护是否妥当。

(3) 施设支护的位置, 要离开掌子面一定距离, 支护设置时间较迟。

(4) 支护设置位置, 因 TBM 的形式而定。

(5) TBM 的直径、用途是多种多样的, 同样条件下的工程实践较少。因此, TBM 法的支护要在积累实践经验的基础上逐步完善。

表 1 为 TBM 开挖隧道的支护要素。

表 1 TBM 开挖隧道支护要素

要素		支护特征
隧道用途	隧道完成断面=TBM 开挖断面	在公路、铁路隧道中有采用 RC 管片作为永久衬砌的, 在水工隧道中采用喷混凝土、锚杆、钢支撑等组合支护
	TBM 导坑	采用爆破扩大时, 事前要拆除管片支护; 采用 TBM 扩大时, 使用可拆除和可切削的材料
隧道直径	2~5m	多采用无支护钢支撑管片
	>5m	多采用无支护、喷混凝土、锚杆、钢支撑等
TBM 形式	开敞式	不使用管片支护
	护盾式	围岩不良处, 采用仰拱管片、全闭合管片
隧道坡度	水平	导坑时, 可采用纤维喷浆等特殊配比的材料
	斜井	

2.2 支护设计

TBM 的支护设计, 通常与新奥法施工的原理相同, 应基于事前调查进行预设计, 设定支护模式, 并在掘进中根据对围岩状况的判断, 修正支护形式。不论采用何种形式的施工方法, 其支护的原则仍然是现代支护的理论, 采用 TBM 施工也是如此。

在 TBM 的支护设计中, 应特别注意以下几点:

- (1) 为确保高速掘进, 应在尽可能短的时间内进行施设, 或能够与掘进平行施工。
- (2) TBM 开挖后的洞壁是光滑、松弛的, 比爆破法小, 支护可以采用轻型的。
- (3) 支护的施工位置 (与掌子面的距离)。
- (4) 开挖后到构筑的时间较迟。
- (5) 是永久的或是暂时的。
- (6) 构筑支护时对 TBM 装置的影响。
- (7) 支撑靴挤压对洞壁的影响。

与爆破法相比, TBM 法对周边围岩的震动小, 而且应力释放也是均匀的, 对洞室稳定有利。因此, 支护也比爆破法要轻型一些。

与爆破法比较, 松弛范围要小些。表 2 为一测试结果。根据弹性波测试和孔内加载试验, 松弛区域内的弹性波系数约降低 40%~60%。

表 2 TBM 施工松弛区域实测示例

施工方法	松弛厚度 (m)	弹性波速度降低比例 (%)
TBM (直径 5.8m)	<0.3	83~59
NATM (直径 5.1m)	0.3~0.7	22~15