

# 水利工程

# 隧洞开挖施工技术

---

马志登 朱群燕 赵余红 编著  
叶利伟 金正平 陈太星



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 水利工程 隧洞开挖施工技术

---

马志登 朱群燕 赵余红  
叶利伟 金正平 陈太星 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书系依据相关技术规范标准，结合水利工程隧洞开挖施工经验编撰而成。全书共 8 章，包括：概述，钻孔爆破法施工技术，TBM 法施工技术，盾构法施工技术，顶管法施工技术，施工安全监测，施工过程质量控制，工程案例。书中阐述了水利工程隧洞开挖几种常见施工方法的发展历程、施工工艺、施工流程、施工质量控制要点和施工安全监测等内容，并选取具体工程案例进行分析。

本书可供从事水利工程隧洞开挖、监理等工作的技术人员阅读，亦可供工程建设管理人员参考。

## 图书在版编目（C I P）数据

水利工程隧洞开挖施工技术 / 马志登等编著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2020. 8  
ISBN 978-7-5170-8723-6

I. ①水… II. ①马… III. ①水工隧洞—工程施工  
IV. ①TV554

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第134701号

书 名	水利工程隧洞开挖施工技术 SHUILI GONGCHENG SUIDONG KAIWA SHIGONG JISHU
作 者	马志登 朱群燕 赵余红 叶利伟 金正平 陈太星 编著
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
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 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	清淞永业(天津)印刷有限公司
规 格	145mm×210mm 32 开本 4.625 印张 207 千字
版 次	2020 年 8 月第 1 版 2020 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	30.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 《水利工程隧洞开挖施工技术》

## 编写人员

主    编  马志登  朱群燕

副 主 编  赵余红  叶利伟  金正平  陈太星

参编人员  梁  锋  潘国勇  何展区  胡奇晶

          叶雷震  阳  斌  金文武  付  健

          郝莹莹  王孙龙  尚  锐  胡亚捷

          秦国友  程力群  邵浩杰  杜强强

          朱  涵  蒋志林  郑雄伟  崔国庆

# 前言

本书依据《水工隧洞设计规范》(SL 279—2016)、《水利水电工程锚喷支护技术规范》(SL 377—2007)、《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)、《水工隧洞安全监测技术规范》(SL 764—2018)、《水利水电工程测量规范》(SL 197—2013)、《全断面隧道掘进机 土压平衡盾构机》(GB/T 34651—2017)、《全断面隧道掘进机 泥水平衡盾构机》(GB/T 35019—2018)等相关技术标准,结合水利工程隧洞开挖施工经验编写而成。书中阐述了水利工程隧洞开挖几种常见施工方法的发展历程、施工工艺、施工流程、施工质量控制要点和施工安全监测等内容,并选取具体工程案例进行阐述和分析。有助于提高水利工程隧洞开挖施工管理人员和技术人员的专业水平,对于选取水利工程隧洞开挖施工方法具有一定指导意义,在水利工程隧洞开挖施工质量和安全管理方面具有一定的参考价值,可供水利工程隧洞开挖管理人员和施工技术人员参考。

本书共分8章:第1章概述,第2章钻孔爆破法施工技术,第3章TBM法施工技术,第4章盾构法施工技术,第5章顶管法施工技术,第6章施工安全监测,第7章施工过程质量控制,第8章工程案例。

本书由浙江东洲建设咨询有限公司牵头，浙江省第一水电建设集团股份有限公司、浙江省水电建筑安装有限公司、杭州市林业水利局农村水利服务管理总站等单位相关人员联合编撰完成。

各个工程的施工方法具有独特性和唯一性，水利工程隧洞开挖施工是一项系统工程，工作内容覆盖广泛，专业性强，施工技术复杂。本书编写时间较短，编者专业水平和经验有限，加之在水利工程隧洞开挖施工实践中，相关的国家法律法规、技术标准和规程规范不断推陈出新，书中难免有疏漏、不足之处，在使用过程中敬请广大读者批评指正。

**编者**

2020年7月15日

# 目录

## 前言

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 水工隧洞概念 .....	1
1.2 水工隧洞的发展现状 .....	1
1.3 水工隧洞的发展趋势 .....	3
<b>第 2 章 钻孔爆破法施工技术</b> .....	5
2.1 施工特点及应用范围 .....	5
2.2 施工准备 .....	6
2.2.1 开工前准备 .....	6
2.2.2 技术准备 .....	6
2.2.3 劳动力准备 .....	7
2.2.4 材料准备 .....	7
2.2.5 机械设备准备 .....	7
2.2.6 其他准备 .....	7
2.3 爆破开挖 .....	8
2.3.1 全断面法开挖 .....	8
2.3.2 其他爆破开挖 .....	9
2.4 支护作业 .....	11
2.4.1 支护准备 .....	11
2.4.2 喷射混凝土 .....	13
2.4.3 锚杆施工 .....	15
2.4.4 钢筋网施工 .....	17
2.4.5 钢拱架及格栅拱施工 .....	18
2.4.6 超前支护 .....	18

2.5	不良地质段施工	21
2.5.1	易坍塌地段施工	21
2.5.2	松散地层施工	24
2.5.3	断层地段施工	25
<b>第3章</b>	<b>TBM 法施工技术</b>	<b>27</b>
3.1	TBM 的概念和功能	27
3.1.1	TBM 的概念	27
3.1.2	TBM 的功能	27
3.2	TBM 分类及选型	28
3.2.1	TBM 分类	28
3.2.2	TBM 选型	29
3.3	我国 TBM 法施工技术发展历程	32
3.4	TBM 施工	37
3.4.1	TBM 施工准备	37
3.4.2	TBM 步进	39
3.4.3	TBM 始发	39
3.4.4	TBM 试掘进	40
3.4.5	TBM 掘进	40
3.4.6	TBM 到达和拆机	42
<b>第4章</b>	<b>盾构法施工技术</b>	<b>43</b>
4.1	盾构法的概念及特点	43
4.1.1	盾构法的概念	43
4.1.2	盾构法施工技术发展史	43
4.1.3	盾构法施工的特点	45
4.2	施工准备	46
4.3	开挖与推进	47
4.3.1	土层开挖	47
4.3.2	掘进	47
4.3.3	出渣、进料运输	48

4.3.4	掘进中的方向控制和纠偏	48
4.3.5	注浆	48
4.3.6	防水施工	48
4.4	衬砌施工	49
4.4.1	管片钢模	49
4.4.2	管片钢架制作和入模	49
4.4.3	管片混凝土浇筑	51
4.4.4	混凝土布料、振捣和成型	52
4.4.5	管片脱模、养护	53
4.5	盾构出洞及解体外运	54
<b>第5章</b>	<b>顶管法施工技术</b>	<b>55</b>
5.1	顶管法施工的概念	55
5.2	顶管法施工技术发展史	56
5.3	顶管机分类	56
5.4	顶管法施工方法分类	57
5.5	顶管法施工特点及适用土质	57
5.5.1	顶管法施工特点	57
5.5.2	顶管施工法适用土质	58
5.6	施工准备	59
5.6.1	现场准备	59
5.6.2	技术准备	59
5.6.3	机具准备	59
5.6.4	物资准备	59
5.6.5	人员准备	60
5.6.6	生产准备	60
5.7	顶管法施工	60
5.7.1	施工放线	60
5.7.2	工作坑开挖与支护	61
5.7.3	引入测量轴线及水准点	61
5.7.4	下管	61

5.7.5	安装千斤顶和顶铁	61
5.7.6	顶进施工	62
5.7.7	压注水泥加固浆	64
5.7.8	回填土	64
5.7.9	闭水试验	65
<b>第6章</b>	<b>施工安全监测</b>	<b>66</b>
6.1	安全监测目的及内容	66
6.1.1	安全监测目的	66
6.1.2	安全监测内容	67
6.2	安全监测控制网布设	67
6.2.1	垂直位移监测控制网布设	67
6.2.2	水平位移监测控制网布设	67
6.2.3	监测控制网的测量及维护	68
6.3	边坡表面水平位移与竖向位移监测	71
6.3.1	监测目的	71
6.3.2	测点布设	71
6.3.3	监测技术方法	71
6.3.4	数据处理及分析	74
6.4	深层水平位移监测	75
6.4.1	监测目的	75
6.4.2	测斜管理设	75
6.4.3	监测原理及方法	75
6.4.4	数据处理及分析	76
6.5	收敛变形监测	76
6.5.1	监测目的	76
6.5.2	测点布设	77
6.5.3	监测技术方法	78
6.5.4	数据处理及分析	78
6.6	拱顶下沉监测	79
6.6.1	监测目的	79

6.6.2	测点布设	79
6.6.3	监测技术方法	79
6.6.4	数据处理及分析	80
6.7	围岩松动圈监测	80
6.7.1	监测目的	80
6.7.2	测点布设	80
6.7.3	监测技术方法	81
6.8	钢拱架应变监测	81
6.8.1	监测目的	81
6.8.2	测点布设	81
6.8.3	监测技术方法	81
6.9	锚杆应力监测	82
6.9.1	监测目的	82
6.9.2	测点布设	82
6.9.3	监测技术方法	82
6.10	爆破振动(质点振动速度)监测	83
6.10.1	监测目的	83
6.10.2	测点布设	83
6.10.3	监测技术方法	84
<b>第7章</b>	<b>施工过程质量控制</b>	<b>85</b>
7.1	隧洞开挖质量控制	85
7.1.1	洞口开挖	85
7.1.2	洞室开挖	85
7.1.3	不良地段开挖	86
7.2	支护作业控制要点	86
7.3	超前预支护	87
7.3.1	超前小导管	87
7.3.2	长管棚(适用于洞口段)	90
7.3.3	超前锚杆(适用于Ⅳ以下围岩)	92
7.4	初期支护	93

7.4.1	锚杆	93
7.4.2	钢筋网	95
7.4.3	钢拱架	96
7.5	喷射混凝土	98
<b>第8章</b>	<b>工程案例</b>	<b>100</b>
8.1	工程概况	100
8.2	施工准备	101
8.2.1	隧洞爆破钻爆设计	101
8.2.2	出渣设备选择	101
8.2.3	洞内施工用电	102
8.2.4	洞内通风、排烟	102
8.2.5	排水防水措施	103
8.3	隧洞开挖	104
8.3.1	石方洞挖	104
8.3.2	隧洞出渣	113
8.3.3	支护工程	113
8.4	施工期照明及通风排烟、排水	123
8.4.1	施工照明	123
8.4.2	施工通风	124
8.4.3	辅助降尘措施	127
8.4.4	施工防、排水	128
8.5	附件	131

### 1.1 水工隧洞概念

在山体中或地下开凿的过水洞称为水工隧洞。水工隧洞有别于交通及其他隧洞，主要用途为灌溉、发电、供水、泄水、输水、排砂、施工导流和通航等。按照水流形态分为有压隧洞和无压隧洞，水流在洞内具有自由水面的，称为无压隧洞；充满整个断面，使洞壁承受一定水压力的，称为有压隧洞。

发电隧洞一般是有压的，灌溉、供水和泄水隧洞可以是无压的，也可以是有压的，而渠道和运河上的隧洞则是无压的。

水工隧洞主要由进水口、洞身和出口段组成，发电用的引水隧洞在洞身后接压力水管，渠道上的输水隧洞和通航隧洞只有洞身段。

### 1.2 水工隧洞的发展现状

水工隧洞在水利工程中占据重要地位，过去因为技术经济条件所限，水利工程多是环山而建，工程量大、建设周期长、沿途水头损失大、部分特殊的水利工程无法建设，著名的河南红旗渠就是典型的环山而建的引水工程。

随着我国技术经济水平的提高，中华人民共和国成立后，建设的水工隧洞洞径由小到大，长度从几米、几十米到几十千米，

推动了我国水利工程取得跨越式发展。

我国修建的水工隧洞，20 世纪 50 年代洞径多在 5~6m，20 世纪 60 年代以后不少洞径到达 7m 以上。据不完全统计：至 1992 年，我国已建水工隧洞总长度约 313km，其中大于 1km 的水工隧洞 65 条，总长度约 274km；到 1997 年，大于 1km 的水工隧洞 113 条，总长度约 608.3km。进入 21 世纪很多大而长的水工隧洞更是举世瞩目，雅砻江锦屏二级水电站隧洞平均每条长达 16.6km，直径约 12m，同时也是世界上在地下最深处作业的水工隧洞，埋深达到 2500m，为目前世界第一大水工隧道。

南水北调中线总干渠穿黄工程是南水北调工程中投资较大、施工难度最大、立交规模最大的控制工期建筑物，是人类历史上最宏大的穿越大江大河的工程，其任务是将中线调水从黄河南岸输送到黄河北岸，向黄河以北地区供水。其中，两条引水的穿黄隧洞，每条隧洞长 4250m，单洞直径 7m。隧洞开挖采用的是当时世界上最先进的盾构技术，技术含量高，施工工期长，系国内用盾构方式穿越黄河的首例工程。

目前，我国水工隧洞建设规模和建设水平已接近或达到国际先进水平，从设计理论上改变了原来只把岩体作为荷载的传统观点，视岩体具体特性提出了不同计算理论，对于较破碎的散粒结构仍可把岩体作为荷载，在充分考虑自然坍落拱的作用下，按照结构力学方法计算衬砌结构，对于较完整的岩体则把围岩和衬砌均视为承载结构共同承载。线性、非线性、黏弹性、有限元、边界元、离散元以及块体计算理论和计算技术已在水工隧洞设计施工中广泛应用。隧洞结构的计算比地面建筑物难度大，困难不在于计算方法，在于岩体特性不容易充分掌握，计算参数难以准确选择，对计算结果产生很大影响。因此，水工隧洞的结构计算，不宜过分追求所谓的精确计算方法，也不宜片面强调计算精度，要善于工程类比，着重对围岩情况进行试验和分析，对计算参数合理选择，特别要重视现场观测，以便对设计进行验证、修改和完善，对于软岩隧洞必须加强一次支护参数。

围岩分类已成为人们正确认识岩体特性和指导设计的重要依据。围岩分类从单元素分类发展到多元素综合分类，从定性分析发展到半定量分类，合理开挖程序、及时支护已深入人心，喷锚柔性支护已成为当前主要的支护方式，加强施工监测，利用施工监测数据信息优化设计已在水工隧洞设计中逐步推广。

在水工隧洞施工过程中全断面掘进机已在我国广泛使用。全断面掘进机是当今世界公认的快速开挖隧洞最有效的工具，掘进机具有机型品种多、施工技术完善、对各类地质适应能力强、掘进速度快（掘进机开挖洞径可达 14~15m，最高月进尺超过 2800m）等特点。我国山西万家寨引黄工程是将黄河水东调入山西，工程共有水工隧洞 25 条，总长 191km，最大埋深 400~1600m。其中共有 8 条水工隧洞采用全断面双护盾岩石掘进机（TBM）法施工，掘进长度 125km，TBM 刀头直径 4.82~16.126m 不等。

### 1.3 水工隧洞的发展趋势

我国水资源相对匮乏，而且分布极不均匀，长期以来成为困扰我国经济和社会发展的关键制约因素。战国时秦国因为郑国渠调水工程而强盛，中华人民共和国成立后伟大领袖毛主席说：“南方水多，北方水少，如有可能，借点来是可以的”。所以跨流域调水工程也是我国水利建设者的主要任务。现在我们完成了南水北调中线、东线两条世界级大工程，西线调水工程还在进行中，史诗级的大型调水工程“红旗河”已提上日程。实施跨流域调水战略，水工隧洞是穿越分水岭，山岭、河流及其他障碍物的主要形式。过去，一般水利水电工程中水工隧洞在总投资中占比往往不大于 20%，随着水工隧洞施工技术日益发展成熟，新建的调水工程中水工隧洞投资占比呈明显加大趋势，引黄入晋南干线工程全长 102.4km，其中水工隧洞 98.47km 占总长的 96.16%，工程投资占比 82.79%。

随着我国水利事业的蓬勃发展和跨流域调水战略的持续推进，一些大型跨流域调水工程需要修建更多长距离、条件复杂的水工隧洞，比如红旗河需要修建高海拔、高埋深、高寒地区等施工条件更为复杂的水工隧洞。

本书介绍了我国已施工水工隧洞采用的主要施工技术方法，包括钻爆法、新奥法、全断面掘进机（TBM）、盾构法、顶管法等以及施工过程中的监测、支护方法，旨在总结我国水工隧洞的施工经验，介绍水工隧洞先进的施工技术，为以后从事水工隧洞工程施工的工作人员提供部分参考和指导。

# 钻孔爆破法施工技术

## 2.1 施工特点及应用范围

钻孔爆破法是指通过钻孔、装药、爆破开挖岩石的方法，简称钻爆法，是水利工程隧洞开挖最常用的施工方法，其对岩层地质条件适应性强、开挖成本低，尤其适合岩石坚硬的隧洞施工。

钻孔爆破法最初由人工手把钎、锤击凿孔，用火雷管逐个引爆单个药包，发展到如今用凿岩台车或多臂钻台车钻孔，用毫秒微差爆破、预裂爆破及光面爆破等爆破技术。施工前，必须根据地质条件、隧洞断面大小、支护型式、工期要求以及施工设备、技术参数等相关条件，择优选定隧洞开挖方案。

钻爆参数设计的主要内容是：①确定开挖断面的炮孔布置，包括各类炮孔的位置、深度及方向；②确定各类炮孔的装药量、装药结构及堵孔方式；③确定各类炮孔的起爆方法和起爆顺序。

水工隧洞岩石开挖爆破施工主要有以下特点：

(1) 受通风、照明、噪声及水文地质等因素影响，钻爆作业条件差。

(2) 受施工场地限制，钻爆施工与围岩支护、出渣运输等工序交叉作业，施工难度大。

(3) 爆破自由面少，受围岩的挟制作用，岩石破碎难度大，岩石爆破的单位耗药量高。

(4) 水工隧洞成型断面质量要求高，按水利工程标准隧洞开