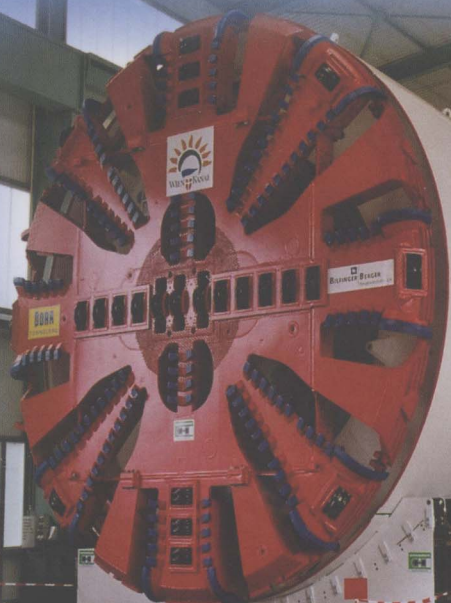
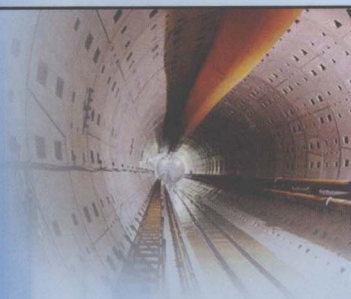


汪雪英 蔡仲银 熊建清 编著

CHANGDA SHENMAI SUIDONG GONGCHENG
SHIGONG JISHU YANJIU

长大深埋隧洞工程

施工技术研究



黄河水利出版社

72
3

-14

长大深埋隧洞工程 施工技术研究

汪雪英 蔡仲银 熊建清 编著

Tv672
w078

黄河水利出版社
· 郑州 ·

内 容 提 要

南水北调西线第一期工程是从青藏高原的雅砻江、大渡河及其支流,通过长大深埋输水隧洞向黄河上游干流调水的大型跨流域调水工程。该书结合西线调水工程,精辟阐述了长大深埋输水隧洞工程的施工方法,隧洞掘进机(TBM)选型,掘进机施工洞内运输系统、施工通风系统及施工排水系统的设计,对类似工程的设计、施工具有重要的指导和借鉴意义。

本书可供水利水电、公路、铁路、城建等部门从事隧道及地下工程专业的设计、施工等技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

长大深埋隧洞工程施工技术研究/汪雪英,蔡仲银,
熊建清编著. —郑州:黄河水利出版社,2009. 12

ISBN 978 - 7 - 80734 - 771 - 2

I. ①长… II. ①汪… ②蔡… ③熊… III. ①水工
隧洞 - 工程施工 - 施工技术 - 研究 IV. ①TV672

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 237986 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwlp@126.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:7.75

字数:180 千字

版次:2009 年 12 月第 1 版

印数:1—1 500

印次:2009 年 12 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

前 言

南水北调西线第一期工程从雅砻江及其支流达曲、泥曲和大渡河支流色曲、杜柯河、玛柯河、克曲等七条河流修建七座水库蓄水,通过长距离大直径输水隧洞将水直接引入黄河上游干流。工程由“七坝、十四洞、六渡槽、二倒虹吸”组成,工程区海拔 3 500 ~ 4 700 m,引水枢纽处河床海拔 3 400 ~ 3 600 m。第一期工程控制流域面积 4.63 万 km²,年设计引水流量 80 亿 m³。诚然,南水北调西线第一期工程深埋长隧洞施工成为南水北调西线工程建设的关键工程,本书为此工程施工的研究成果。

输水隧洞全长 325.60 km,分单洞段和双洞段(A、B 线),单洞段自热巴至珠安达,长度为 155.20 km,双洞段自珠安达至黄河,长度为 2 × 169.68 km。输水隧洞自然分段为九段,最长自然分段隧洞长度为 72.37 km,各洞段之间连接六座渡槽和两座倒虹吸。输水洞起点为四川省热巴,路线经过四川省甘孜县、色达县、壤塘县,青海省班玛县,四川省阿坝县及甘肃省玛曲县境内,终点位于玛曲县南部贾曲河口上游的黄河右岸。输水隧洞沿线海拔 3 500 m 左右,洞线上覆山体厚度一般为 300 ~ 600 m,最大为 1 150 m。输水隧洞工程的施工是制约整个西线工程建设的关键工程,综合分析工程区气候、地形地质条件以及输水隧洞的设计特征后,认为工程存在着隧洞施工环境条件差、隧洞埋深大、洞线长、施工条件复杂、施工支洞和竖井布置困难等特点。因此,输水隧洞施工技术难点主要是掘进施工方法选择及分段布置、出渣及运输、施工通风、排水及不良地质问题的技术处理。通过输水隧洞施工研究得出如下结论:输水隧洞施工方法选择以掘进机施工为主、钻爆法施工为辅的施工方法;掘进机施工洞内出渣运输采用高效、连续的皮带机运输方案;隧洞施工通风方式选择压入式、混合式和巷道式三种方式,通风最大长度约 14 km。此外,对隧洞施工排水和不良地质段施工技术措施也提出了相应的对策。

作 者

2009 年 6 月

目 录

前 言

第1章 概 论	(1)
第2章 环境条件对隧洞施工的影响与隧洞施工技术难点	(4)
2.1 环境条件对隧洞施工的影响	(4)
2.2 输水隧洞施工技术难点	(6)
第3章 隧洞施工方法	(8)
3.1 掘进机施工的发展与应用	(8)
3.2 钻爆法施工的发展与特点	(18)
3.3 钻爆法施工和掘进机施工的比较	(19)
3.4 掘进机施工的工程地质条件适应性分析	(27)
3.5 隧洞围岩变形对掘进机施工的影响	(31)
3.6 工程设计条件及施工布置条件	(37)
3.7 施工环境气候条件	(38)
3.8 掘进机施工经验	(39)
3.9 隧洞施工方法选择	(39)
3.10 隧洞施工掘进机选型	(50)
第4章 掘进机施工隧道运输系统	(63)
4.1 掘进机的掘进与出渣特点	(63)
4.2 隧洞出渣方式	(64)
4.3 隧洞出渣设备选择	(66)
4.4 隧洞施工支洞设计	(67)
第5章 隧洞施工通风设计	(72)
5.1 长隧洞施工通风技术的发展	(72)
5.2 掘进机施工的洞内污染源	(73)
5.3 隧洞施工作业环境的劳动卫生标准	(73)
5.4 掘进机施工工作面污染源的控制	(75)
5.5 掘进机施工的通风要求	(76)
5.6 施工通风设计	(77)
第6章 隧洞施工排水	(91)
6.1 涌水量估算	(91)
6.2 施工排水	(95)
第7章 隧洞不良地质段施工技术	(97)
7.1 岩 爆	(97)

7.2 掘进机通过断层破碎带的技术处理	(104)
7.3 隧洞施工涌水处理	(110)
第8章 隧洞施工研究结论	(113)
参考文献	(115)

第1章 概 论

南水北调西线第一期工程由枢纽建筑物和输水线路组成,枢纽建筑物包括7座水库,输水线路采用隧洞输水,连接7座水库、6座渡槽和2座倒虹吸,线路总长325.60 km,隧洞前段为单洞段,后段为双洞段(A、B线)。单洞段长度为155.20 km,从雅砻江的热巴至杜柯河的珠安达,共分4个自然段,最长自然段长为72.37 km,该段线路共穿越3座渡槽和1座倒虹吸。双洞段长度为2×169.68 km,从杜柯河的珠安达到黄河,A、B线隧洞轴线间距为30 m,共分5个自然段,最长自然段长66.72 km,线路共穿越3座渡槽和2座倒虹吸。隧洞平均埋深500 m,最大埋深达1 150 m,隧洞沿线最高海拔约4 700 m。南水北调西线第一期工程推荐方案输水线路各洞段主要特征指标见表1.1-1,平面布置见图1.1-1。

表 1.1-1 输水线路各洞段主要特征指标

隧洞 编号	洞段	隧洞尺寸(m)			引水流量 Q (m^3/s)	设计洞径 d (m)	底坡 $1/i$
		进口高程	出口高程	洞长			
1	热巴坝下引水口—定曲渡槽	3 643.00	3 641.20	4 805	153.80	9.30	2 667
	定曲渡槽	3 641.20	3 638.20	858	153.80		
2	定曲渡槽—阿安渡槽	3 638.20	3 614.50	63 200	153.80	9.30	2 667
	阿安渡槽	3 614.50	3 614.16	362	153.80		
3	阿安坝下引水口—仁达坝下渡槽	3 614.16	3 607.37	13 301	179.71	9.30	1 960
	仁达渡槽	3 607.37	3 606.87	308	207.04		
4	仁达渡槽—色曲	3 606.87	3 591.60	25 275	207.04	9.50	1 655
	色曲—珠安达坝下渡槽起点	3 591.60	3 557.59	47 092	226.96	9.50	1 385
	珠安达渡槽	3 557.59	3 557.01	725	263.28		
5A	珠安达—亚尔堂倒虹吸	3 557.01	3 537.80	30 080	153.80	8.35	1 500
	亚尔堂倒虹吸	3 537.80	3 534.80	840	153.80		
6A	亚尔堂倒虹吸—克柯渡槽	3 534.80	3 490.32	66 722	153.80	8.35	1 500
	克柯渡槽	3 490.32	3 489.92	449	153.80		

续表 1.1-1

隧洞 编号	洞段	隧洞尺寸(m)			引水流量 Q (m^3/s)	设计洞径 d (m)	底坡 $1/i$
		进口高程	出口高程	洞长			
7A	克柯渡槽—窝央渡槽	3 489.92	3 487.44	3 712	153.80	8.35	1 500
	窝央渡槽	3 487.44	3 487.13	312	153.80		
8A	窝央渡槽—若曲渡槽	3 487.13	3 481.89	7 868	153.80	8.35	1 500
	若曲渡槽	3 481.89	3 481.35	654	153.80		
9A	若曲渡槽—黄河	3 481.35	3 442.00	59 041	153.80	8.35	1 500
合 计				325 604			
5B	珠安达—亚尔堂倒虹吸	3 558.50	3 538.50	29 995	109.48	7.33	1 500
	亚尔堂倒虹吸	3 538.50	3 535.50	885	109.48		
6B-1	亚尔堂倒虹吸—霍纳引水洞岔点	3 535.50	3 527.26	12 361	109.48	7.33	1500
6B-2	霍纳引水洞岔点—克柯引水支洞	3 526.26	3 491.38	53 073	136.91	7.98	1 500
6B-3	克柯支洞—克柯渡槽	3 491.38	3 490.29	1 341	149.54	8.25	1 500
	克柯渡槽	3 490.29	3 489.91	413	149.54		
7B	克柯渡槽—窝央渡槽	3 489.91	3 487.47	3 665	149.54	8.25	1 500
	窝央渡槽	3 487.47	3 487.13	350	149.54		
8B	窝央渡槽—若果朗渡槽	3 487.13	3 481.90	7 855	149.54	8.25	1 500
	若果朗渡槽	3 481.90	3 481.36	652	149.54		
9B	若果朗渡槽—黄河	3 481.36	3 442.00	59 050	149.54	8.25	1 500
合 计				169 640			
10	霍纳引水洞	3 552.01	3 529.83	22 216	27.43	4.05	1 000

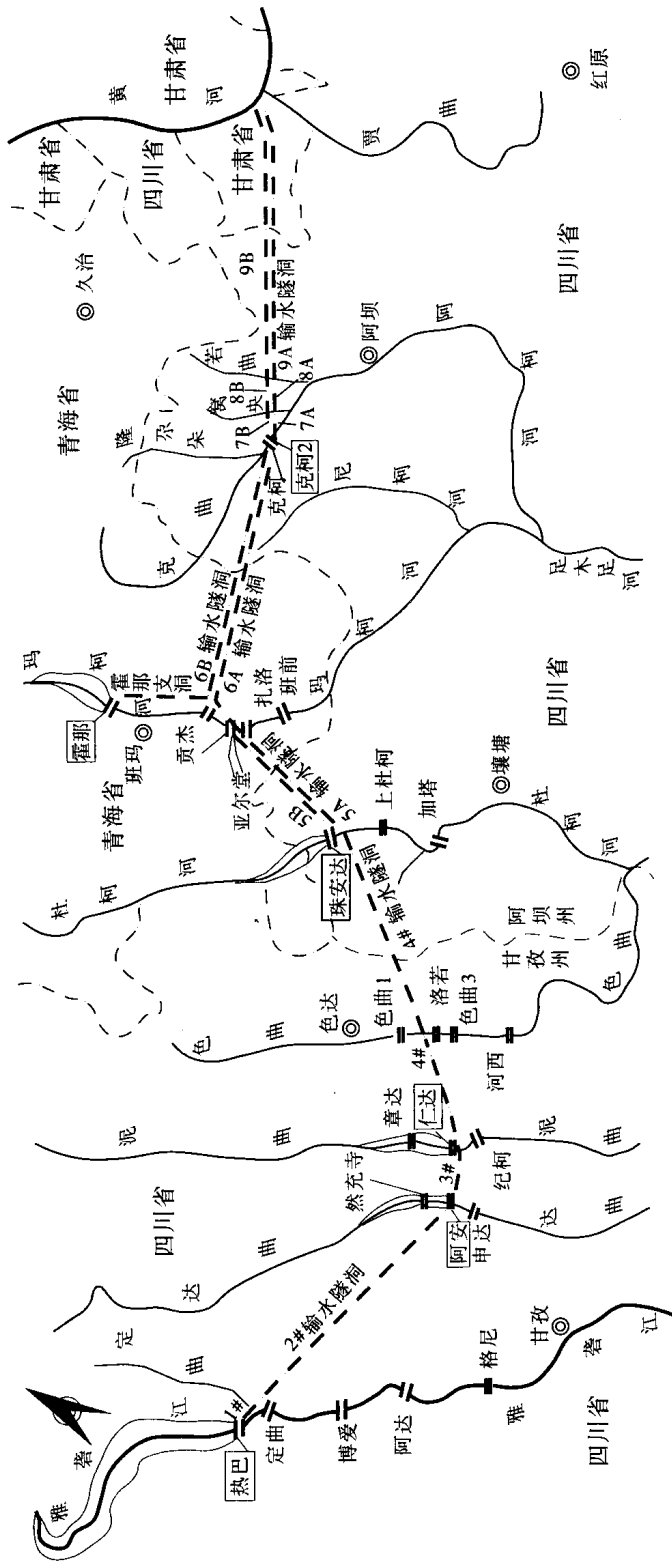


图 1.1-1 南水北调西线第一期工程推荐方案平面布置

第2章 环境条件对隧洞施工的影响与隧洞施工技术难点

2.1 环境条件对隧洞施工的影响

2.1.1 自然条件对人体健康及劳动能力的影响

输水隧洞穿越青海、川西高原,山峦起伏,海拔在3 500 m左右,隧洞沿线最高海拔约4 700 m。海拔对气候条件影响非常显著,气温垂直变化明显、温度低、含氧量少,在海拔3 000 m以上的地区,地面气压都在600~700 hPa,空气中含氧量降低,其空气中的含氧量相当于海平面的60%~72%。该地区属于高原冰雪型气候,寒冷季节较长,每年的9月底到次年的5月为冬季冰雪天气。暖季紫外线强烈,日照时间长,大风、干旱、霜冻、雪灾、冰雹、冰冻等灾害性天气比较频繁,根据一期工程附近班玛、阿坝、色达及炉霍气象站1961~1990年气象统计资料,年平均气温为0~6.4℃,极端最低气温为-34.0~-36.3℃,极端最高气温为23.7~31.0℃。

工区降雨主要受西部季风影响,年降雨量648.7~723.3 mm,全年降雨集中在6~9月,占年雨量的70%,5~10月雨量占年降雨量的90%。其特点是降雨强度小,持续时间长。

根据工区气候条件,隧洞处于高海拔区,其主要特点是空气稀薄、气压低、缺氧等。因此,随着海拔的增加,对人体健康、劳动能力及机械效率影响也增大。

高原自然环境对人的机体影响最大者为低氧环境,人体吸入的氧量与空气中含氧浓度密切相关,若空气中氧浓度降低,人体就处于缺氧状态,出现各种不适应症。当地人员对此环境能较好适应,但是,从平原进入高海拔地区的人员受缺氧的影响,需要有一个适应过程,医学上叫“习服过程”,亦即机体在神经、体液机制调节下引起一系列生理性改变的过程。有资料统计分析认为,海拔3 000 m为反应临界高度,在海拔3 000 m以下为“无症状带”,在此高度内,人体将产生一系列症状,但一般通过代偿机制可以习服;海拔5 000 m称为“障碍临界高度”,海拔5 000~7 000 m为“不完全代偿带”,在此海拔内机体不能完全代偿;海拔7 000 m以上为高山死亡带。

根据我们沿线收集的类似环境条件下的工程资料,曾达电站位于色曲河上,坝型为混凝土砌块石(埋石混凝土),最大坝高18 m,装机容量为2×5 000 kW。坝体防渗采用钢筋混凝土面板,上游面板厚80 cm,下游溢流面厚140 cm。一条引水隧洞,洞长约3 000 m,成洞尺寸为3.8 m×4.0 m,断面为城门洞形,隧洞衬砌厚度20 cm,其中顶拱衬砌厚度30 cm。该工区海拔3 300 m,大坝施工为内地工人,一天三班制。现场资料统计,工人劳动能力降低20%~30%。鹧鸪山隧洞位于川西高原的阿坝州境内的理县与马尔康县交界

处,距离成都约 300 km,隧洞分主隧洞和平导洞两条,主隧洞长约 4.431 km,开挖断面 $80 \sim 140 \text{ m}^2$,净宽 9 m,净高 9 m;平导洞长约 4.447 km,开挖断面 $37 \sim 46 \text{ m}^2$ 。断面均为马蹄形。该工区山峦起伏,地面高程 3 330 ~ 4 415 m,隧洞最大埋深 800 m 左右,属于川西高原高寒气候区,气压低,隧洞出口处气压为 68 kPa,为海平面的 60%,含氧量低,大气含氧量为 13.7%,仅为海平面的 67%。根据施工现场资料统计,由于受高原气候的影响,工人的劳动效率降低 30% ~ 40%。

西线输水隧洞沿线的海拔为 3 500 ~ 4 500 m。据国内外统计资料和现场收集的施工资料,在海拔 3 500 ~ 4 000 m 的地区,人体的劳动能力比平原地区下降 20% ~ 30%,通过现场的适当调整,可以缓解或克服高原的不良反应,对人体健康无大的影响,从而保证工程施工人身安全。

调查研究表明,工人在高强度、恶劣气候、危险环境等条件下施工,不仅效率很低,而且这种施工环境条件对人体身心健康也有较大影响,若有细微心理影响并伴随注意力不集中和记忆力减退,都将增加危险事故的发生。通常的解决办法是在各个方面减少人力,尽可能地实现机械化施工。掘进机掘进施工所用人员和耗费的体力比常用的钻爆法更少,并可提供一个更舒适的工作环境。

2.1.2 自然条件对施工机械的影响

在高海拔地区施工,不仅对人体健康和劳动能力有明显的影响,对工程机械的效率和性能也有改变,对机械产品的影响主要表现在高原气压低,内燃机功率和压缩机的排气量严重下降,排气温度升高。

(1) 对内燃机的影响。由于内燃机额定功率的环境工作条件为标准大气压 760 mmHg,因此随着海拔的增加,气压降低,含氧量减少,内燃机的功率下降,为了弥补功率的下降,操作人员要加大油门,但因氧气不足而燃烧不充分,产生大量积炭,加剧机械的磨损,从而降低机械寿命。另外,内燃机工作时排放的废气量随海拔的增加而增大,使得隧洞的施工通风量增大。

(2) 对空气压缩机的影响。随着海拔的增加,空压机排气量减少和排气温度增高,使得其不能进行长时间的连续运转,而且空压机效率折减较大。

(3) 对电动机械的影响。按国家现行标准规定所生产的电机产品工作条件为海拔不超过 1 000 m,允许环境温度 40°C ,当使用条件改变时,电动机额定功率也随之而变化,对施工机械的生产能力造成直接影响。

2.1.3 环境条件对隧洞通风的影响

隧洞施工通风的任务是供给作业面新鲜空气,冲淡和排除各种有害气体和岩尘,使其含量降低到国家规定标准以内,降低工作面温度,使隧道施工工作面的温度、湿度和风速调配得当,为施工人员和施工机械创造良好的劳动气候条件和工作环境。

良好的通风是安全生产的重要前提,也是保护施工人员身心健康、提高劳动生产率的必要条件,在机械化施工中,良好的通风对加快工程进度、确保工程质量也起着重要作用。

通风机械的机械工况、性能受工作环境条件影响而变化。随着海拔的增加,空气逐渐

稀薄,气温逐渐降低,空气重率和密度降低,其中的含氧量减少,因此高原环境条件下隧洞工作面通风量需要增大,同时,通风机械效率降低,风机的风压随海拔的增加而降低。根据经验,海拔每增高 1 000 m,电动空压机功率折减 10%,内燃空压机功率折减 20%。

2.1.4 地形、地质条件对隧洞施工的影响

西线第一期工程地处青藏、川西高原东部,横穿巴颜喀拉山,其地貌分区可大致以巴颜喀拉山为界,巴山以北都曲至黄河间为浅切割的低山丘陵地貌,河流众多,且以浅谷~宽谷型河道为主;巴山以南雅砻江为中等切割的高山区,地形切割较强烈,呈波状起伏,河流以峡谷型为主。隧洞埋深大、自然分段长,因此施工支洞及竖井布置困难,将直接影响隧洞掘进方案的选择和工程投资。

输水隧洞穿越区出露的地层主要为三叠系、第四系,其次为印支期、燕山期侵入的中酸性岩浆岩体。

三叠系上统地层分布一般呈带状多次重复出露特征。产状为走向 $300^{\circ} \sim 330^{\circ}$,倾向 NE 或 SE,倾角 $50^{\circ} \sim 76^{\circ}$ 。由于受印支期构造运动的影响,原岩普遍遭受不同程度的区域变质作用,形成一套浅变质碎屑岩系,上部为长石石英砂岩、长石砂岩及粉砂质板岩互层;中部为长石砂岩、长石石英砂岩、岩屑砂岩为主夹粉砂质板岩及薄层状灰岩;下部为粉砂质板岩为主,长石石英砂岩、长石砂岩不等厚互层。从隧洞穿越的地层岩性分析,隧洞岩性较均一,岩石抗压强度为 20 ~ 100 MPa,这对于掘进机施工是有利的。

2.1.5 交通条件对隧洞施工的影响

南水北调西线第一期工程输水隧洞穿越的线路为:起点从雅砻江的热巴,经达曲的阿安、泥曲的仁达、杜柯河的珠安达、玛柯河的亚尔堂、克曲的克柯,之后直接进入黄河。根据工程区现有的交通状况,对外主要交通干线有两条,即成都至马尔康、炉霍、甘孜到热巴(输水隧洞进口),另一条为成都至汶川、刷马路口、阿坝县城到若曲(若果朗引水渡槽)。成都至马尔康、炉霍、甘孜为国道,全长约 757 km;成都至汶川、刷马路口、阿坝县也为国道,全长约 506 km。

工程区对外交通主干线均为国道,基本满足大、中型机械设备的运输要求。

2.2 输水隧洞施工技术难点

国内外专家曾多次指出,南水北调西线工程是一项世界级水平的特大型工程,在规模上比西方国家已建的任何工程都要大,这样的评价不仅基于工程的规模,更大程度上是基于南水北调西线工程的高难度、技术复杂性和高科技等综合因素。

经过综合分析,工区气候条件差,地形地质条件复杂,隧洞埋深大、洞线长、施工条件复杂等,这给工程的设计和施工带来了极大的难度。在长隧洞施工方面,如此大规模的输水隧洞必须选择适宜于工区特殊施工环境和地质条件的机械化配套施工设备,以缩短主要施工工序的作业时间和减少非作业时间,保证工期和工程的安全;由于隧洞埋深大,自然分段长,无论采用何种施工设备,均需布置辅助施工支洞、竖井或斜井,以便解决长隧洞

施工中材料运输、施工通风、施工排水及水电供应等问题;隧洞施工中必须解决高地应力下软弱岩的蠕变变形、塑性变形问题以及硬质岩可能出现的岩爆问题;必须解决施工中地下水的处理问题,因隧洞施工中地下水处理不慎有可能出现淹没隧洞和设备的危险;施工中对于极易发生塌方和冒顶的洞段,必须采取严密的技术防范和技术处理措施;隧洞施工中可能遇到断层破碎带、岩溶、膨胀岩、有害气体等,在这些恶劣、复杂的地质条件下组织隧洞施工,必须对隧洞的开挖方案、衬砌形式和防渗措施进行特殊技术处理。西线深埋长隧洞施工中,不仅施工支洞、竖井和斜井的布置受到地形地质条件的限制,同时,竖井或斜井的施工难度也很大。因此,西线深埋长隧洞工程的施工存在一定的技术难度和技术复杂性,深埋长隧洞施工成为南水北调西线工程建设的关键工程。

以南水北调西线第一期工程推荐方案为基础,结合本工程实际情况,对深埋长隧洞工程施工的以下主要技术难点作重点研究:

- (1)不同地质条件下深埋长隧洞开挖和衬砌施工方法;
- (2)深埋长隧洞出渣及运输系统;
- (3)深埋长隧洞施工通风技术;
- (4)深埋长隧洞施工期排水;
- (5)不良地质问题的技术处理措施。

第 3 章 隧洞施工方法

大型隧洞的施工始终伴随着地下工程固有的技术复杂性。所以,在设计、施工大型隧洞时,必须特别注重隧洞工程地质与水文地质条件的预测和隧洞工程各种结构设计、施工工艺的最佳方案,结合工程布置和施工条件,通过研究和分析,选择合理的隧洞开挖施工方法。否则,将会造成施工安全性降低、增加工程投资和延长工期等。南水北调西线输水隧洞的工程特点是隧洞埋深大、自然分段长、地形地质条件复杂,这就带来深埋长隧洞洞室开挖技术复杂、施工支洞及竖井或斜井的布置困难问题,因此长隧洞的洞室开挖、出渣、通风、供电、排水、排烟除尘等成为长隧洞施工的一系列重大技术问题;由于隧洞埋深大,对隧洞开挖方法选择时应充分考虑围岩的挤压变形问题;施工环境条件差,工人劳动能力显著下降,施工机械效率降低,尤其是内燃机械不仅效率降低,而且设备寿命缩短,这就要求长隧洞施工选用的施工机械既要适合地形、工程地质及水文地质条件,又要适合于工程区施工的环境条件,减少人力、降低事故发生率、改善工作条件和取得最大效能。南水北调西线深埋长隧洞施工技术难度较大,应综合考虑各种施工影响因素,选择较合理、可行的隧洞开挖施工技术方案。

隧洞开挖方法主要有两种,即全断面掘进机法(TBM)和传统的钻爆法(D&B)。

正确选择隧洞施工方案,主要考虑的因素有:

- (1)适应隧洞沿线围岩变化情况及隧洞的长度、连续性、断面几何尺寸和外界环境条件。
- (2)充分发挥机械化能力,认真进行施工机械的选型配套,尽量减少内燃设备,减少污染。
- (3)洞室开挖、石渣运输、施工通风、排水等作为一个系统工程,进行施工组织设计的统一安排。
- (4)掌握多种施工方法,采取不同的施工方案,根据隧洞工程沿线的围岩情况,选择灵活多变的施工方法。
- (5)确定合理的循环进尺,保证工期。
- (6)节约成本,以较少的投入争取较大的收益,控制超挖欠挖和预防隧洞塌方等。

3.1 掘进机施工的发展与应用

掘进机是一种以机械能直接破岩来掘进隧洞的大型联合施工设备,始于 20 世纪 50 年代,该技术主要解决长隧洞采用传统钻爆法施工受地形条件限制无法增加开挖工作面,受工作面限制工期得不到保障,出渣、通风排烟困难等问题。在适宜的地质条件下,它具有掘进效率高、对围岩扰动小、超挖量小、开挖面光滑、对施工人员劳动保护好等一系列优点。因此,自掘进机问世以来,一项项掘进机技术难题被破解,掘进机的类型、规格、品种和适应范围等均得到了很大发展,从根本上克服了钻爆法施工的缺点。随着掘进机掘进

技术的发展,隧洞衬砌技术也得到了发展,在围岩稳定条件好的情况下,根据设计要求,可不支护或仅喷锚支护;在围岩稳定条件较差的情况下,根据设计要求,可作预制混凝土管片支护加豆砾石回填灌浆,实现长隧道掘进快速、优质、经济、安全的施工。随着掘进机数量的增多和工程的需要,其制造技术逐渐成熟,使得当今的掘进机性能在以下各方面又有了较大的发展:

(1)掘进机的类型多样化。适应硬岩的掘进机除敞开式外还有单护盾、双护盾、混合型等类型,根据工程需要可选择合适的掘进机类型。

(2)适应范围扩大。只要地质情况大致清楚,可以做到按特定的地质情况作出相应的掘进机设计,以适应特定的地质条件,保证工程顺利施工。

(3)滚刀直径不断加大,效率不断提高,掘进速度加快。大直径滚刀不仅可以提高刀圈的寿命,而且使每掘进延米的换刀次数减少,并能在较坚硬的岩石条件下获得较高的速度。掘进机滚刀直径已经由早期的 304 mm 发展到目前的 483 mm,滚刀的允许承受推力也由 90 kN 增加到 314 kN。洞内换刀普遍由刀盘前换刀改为刀盘背后换刀新技术。

(4)掘进机直径不断增大,第一台能顺利掘进的掘进机直径仅为 2.13 m,1979 年首次达到 9 m,而目前已逾 14 m。

(5)掘进机结构、材料和风、水、电系统的优化组合,使掘进速度不断提高,掘进机月平均进尺由原来的 300 m 左右提高到 800 ~ 1 000 m。

(6)掘进机的使用寿命延长,掘进隧洞的长度增加。在 20 世纪 80 年代初,一台掘进机的使用寿命为掘进隧洞 20 km,到目前已有延长到 40 km 的趋势,如瑞典佳瓦(Jarva)公司生产的一台 MK12 型掘进机,已在奥地利和意大利 6 个工程中使用,累计掘进进尺长达 40 km(运行中进行过一次大修)。

(7)掘进机对复杂地层的适应能力增强。在 20 世纪 70 年代,人们普遍认为掘进机对地质条件十分敏感,地质条件往往是决定是否使用掘进机施工的关键,到 80 年代末,各种使用于挤压变形、断层、破碎带、涌水地区、抗压强度在 200 MPa 以上的硬岩掘进机相继出现。实际施工情况表明,现代的掘进机对复杂地层的适应能力有突破性的提高,地质条件已不再是限制掘进机使用的主要因素,现有的掘进机可采取针对各种复杂地层的技术措施进行快速开挖。目前,掘进机生产厂家也开发了能适用于破碎带和风化带的复杂地层以及承压含水层的复合机型,不断扩大掘进机的适用范围。同时,针对不良地质条件设计的掘进机均考虑与新奥法施工相配合,为满足隧洞施工要求,配备有扩挖边刀、锚杆设施、喷混凝土、注浆、超前钻机等辅助施工设备,能及时处理不良地层,尤其是伴随着计算机和遥感技术的飞速发展,辅助设备也越来越向机械化方向发展。

(8)掘进机的应用日益增多。掘进机现已广泛地应用于输水隧道、地铁隧道、铁路隧道等工程,为掘进机施工积累了丰富的经验。

我国隧道掘进机的研制是从 1965 年开始的,国内一些厂家和设计单位靠自力更生生产出了支撑式掘进机,但国产掘进机的掘进速度、自动化程度、系统配置、可靠性等诸多方面,与国外相比还有很大差距。目前,在我国隧洞开挖中,掘进机的使用率很低,主要依靠引进国外的掘进机进行施工。

掘进机作为一种综合性的高科技产品在长隧洞的快速施工中已充分展示了它的先进

性和高生产力,掘进机掘进技术的应用日益普遍。据资料统计,目前,每年掘进的隧道中,有 30% ~ 40% 是采用掘进机完成的。

世界上生产掘进机的厂家主要有五家,20 世纪 70 年代,主要有美国的罗宾斯(Robbins)公司、瑞典的佳瓦(Jarva)公司、德国的维尔特(Wirth)公司和德马克(Demag)公司。目前,法国海瑞克(Herrenknecht)公司也成为生产硬岩掘进机的厂家。罗宾斯公司共生产掘进机 400 多台,直径为 2.0 ~ 12.2 m,总掘进长度达 3 500 km。瑞士、美、英、法等国较多地采用掘进机施工,并取得了丰富的经验,瑞士近年来完工和在建的 18 座长隧洞中,有一半是采用掘进机施工。国外知名公司生产的掘进机施工应用实例见表 3.1-1 ~ 表 3.1-3。

表 3.1-1 美国罗宾斯公司制造直径 8.0 m 左右掘进机应用实例

掘进机编号	工程名称	直径 (m)	隧道长度 (m)	最快月进尺 (m)	平均月进尺 (m)
开 敞 式					
252-226	Bergen 公路隧道	7.8	3 200 3 800	400	300
332-253	美国 Chicago TARP	9.8	7 250	753	517
354-253	美国 Chicago TARP	10.8	6 650	685	467
单 护 盾 式					
328-256	瑞士 Russclin 公路隧道	11.83	3 460	300	191
381-255	瑞士 Bozberg 公路隧道	11.87	7 100		240
352-128-1	瑞士 Zurichberg 铁路隧道	11.5	4 360		242
352-128	瑞士 Heitccrrsberg 铁路隧道	10.67	2 600		
双 护 盾 式					
274-264	美国 Boston 海底隧道	8.1	15 100	1 719	500
271-244	英法海峡隧道英端	8.36	19 100		850
271-243	英法海峡隧道英端	8.36	18 000		
291-242	英法海峡隧道英端	8.8	18 900		
291-241	英法海峡隧道英端	8.8	20 000		

表 3.1-2 法国海瑞克公司 1987 ~ 1998 年单护盾式掘进机施工实例

工程名称	直径(m)	施工延米(m)	施工时间
博兹贝格(Bozberg)隧道	11.87	2 × 3 700	1990 ~ 1996 年
蒙卢瑟琳(Trusselin)隧道	11.80	2 550	1989 ~ 1994 年
萨赫瑟恩(Sachselsn)隧道	11.7	5 191	1991 ~ 1997 年
Lesvignes 隧道	11.77		
阿德列尔(Adler)隧道	12.53	5 200	1992 ~ 1998 年
Romy 隧道	11.66		
Arrissoules 隧道	10.90		

表 3.1-3 德国维尔特公司 1990 年以来大直径 TBM 施工的工程实例

工程名称	机型	直径 (m)	隧道长度 (m)	岩石 种类	施工时间 (年-月 ~ 年-月)
德国 Lohberg II 隧道	TBSV-650	6.5	1 700	石灰岩	1990-09 ~ 1991-03
瑞士 EKW 输水隧洞	TBV-564H	6.3	2 184	片麻岩	1991-01 ~ 1991-08
瑞士 Mappo-Morettina 隧洞	TBE450/1080H	10.8	4 900	片麻岩	1991-02 ~ 1993-02
瑞士 EKW 输水隧洞	TBS III -520E	6.3	3 000	片麻岩	1991-05 ~ 1991-12
韩国 NAM-SAM 隧道	TBE450/1130H	11.4	2 620	片岩	1991-09 ~ 1992-05
意大利 Aosta 隧道	TBE450/1130H	11.4	2 620	片岩	1991-10 ~ 1993-03
瑞士 EKW 输水隧洞	TBV-564H	6.3	4 000	片麻岩	1991-11 ~ 1993-03
韩国 BUK-AK I 隧道	TB800H	8.0	1 574	花岗岩	1993-06 ~ 1994-06
韩国 BUK-AK II 隧道	TB640/780H	6.5	1 580	花岗岩	1993-06 ~ 1994-06
瑞士 Zugwald 铁路隧洞	TB770/850H	7.7	2 160	石灰岩	1994-01 ~ 1994-11
秦岭铁路隧道	TB880E	8.8	5 243	片麻岩、花岗岩	1998-01 ~ 1998-08
瑞士 Sauges I 隧洞	TBE450/1080H	11.0	1 775	片麻岩、花岗岩	1998-03 ~ 1998-09
瑞士 Sauges II 隧洞	TBE450/1080H	11.2	1 656	石灰岩	1998-12 ~ 1999-06
西班牙 Paracuellos 隧道	TBE450/1140H	12.35	4 000	砂岩、片岩	1999-04 ~ 2000-06

由于隧道掘进机具有施工速度快、隧道成型好、机械化程度高以及对周边环境影响小等优点,近 30 年来,世界上较普遍采用掘进机掘进技术进行长隧洞施工,掘进机的性能日趋完善。在国外,3 km 以上的长隧洞工程施工,很多业主在招标书中就明确规定投标商必须采用掘进机施工。瑞士、美、英、法等国较多地采用掘进机施工,并取得了丰富的经验。以下是国内外部分掘进机施工的实例。

3.1.1 美国伯克斯金引水隧洞

美国伯克斯金引水隧洞长 10.7 km,开挖洞径 7.16 m,衬砌后内径为 6.7 m。隧洞所经过的岩石为致密坚硬质火山岩类,第三纪和第四纪安山熔岩,其间并有凝灰岩和集块岩互层,岩石抗压强度为 70 ~ 280 MPa。采用罗宾斯掘进机施工,日平均进尺为 15 m,最高达 33 m。

3.1.2 危地马拉奇克索依电站输水隧洞

危地马拉奇克索依电站输水隧洞长 26 km,开挖洞径 5.64 m,为 300 MW 水电站的压