

南水北调西线工程长隧洞施工方法研究

李庆中，曹廷立，张继勇

(黄河水利委员会勘测规划设计研究院 河南 郑州 450003)

摘要 南水北调西线工程隧洞具有海拔高、洞径大、单洞长、埋深厚的特点，隧洞施工技术对西线工程的实施具有决定性作用。结合西线工程隧洞的特点和工程区的地质条件，对西线工程隧洞的施工方法进行初步研究。分析认为，西线工程隧洞的开挖应采用全断面掘进机施工方法，辅助坑道要根据地形情况和掘进机的性能布置，隧洞出碴采用带式输送机运输方式，隧洞通风采用混合式通风方式。

关键词 南水北调 西线工程 隧洞开挖 掘进机 出碴 通风

中图分类号 :TV544 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2001)04-0050-03

南水北调西线工程(简称西线工程)是国家南水北调工程的重要组成部分,是从长江上游的通天河、雅砻江、大渡河调水到黄河上游的跨流域调水工程,主要由水库大坝、引水枢纽和引水隧洞组成,其中隧洞施工的技术问题是工程能否实施的关键问题之一。

1 工程概况

1.1 地理位置

西线工程区位于青藏高原东南部,在纬度 31°30′~35°30′,东经 93°00′~103°30′的范围内,海拔高程 3 000~4 600 m,主要经过四川省的甘孜、阿坝州和青海省的玉树、果洛州及甘肃省的甘南州等地。

1.2 调水方式

西线工程从长江上游地区调水到黄河,由于黄河与长江上游之间有高耸的巴颜喀拉山阻隔,长江水系河床高程低于相应黄河河床高程 80~500 m,因此调水工程需采用在调水河流上修建拦河坝工程调蓄水量,并开凿长隧洞穿过巴颜喀拉山分水岭,即西线工程主要由水库大坝、引水枢纽和引水隧洞组成。

1.3 工程方案

西线工程历经 10 多年规划,进行了大量的工程方案比选工作,其中具有代表性的调水方案由以下三部分组成:

a. 从雅砻江、大渡河联合调水的达曲—贾曲自流方案。该方案年调水 40 亿 m³,是在雅砻江支流达曲、泥曲和大渡河支流杜柯河、麻尔曲、阿柯河分别建坝,用隧洞把各库区连通,将水调至黄河支流贾曲,线路全长 260.3 km,其中隧洞总长 244.1 km,全

部为圆型隧洞,洞径 5.00~9.58 m,隧洞最大埋深 1 000 m 左右,平均埋深 400~500 m。

其中的大渡河支流杜柯河至贾曲段,年调水 25 亿 m³,线路长 173.7 km,隧洞长 157.5 km,工程规模较小,可作为起步工程先期实施。

b. 从雅砻江调水的阿达—贾曲自流方案。该方案年调水 50 亿 m³,是在达曲—贾曲自流方案的基础上,把雅砻江阿达库区与达曲—贾曲引水线路连通,将雅砻江的水调入黄河,线路全长 304.0 km,其中隧洞长 287.8 km,为圆型隧洞,洞径 10.40 m。

c. 从通天河调水的侧仿—雅砻江—贾曲自流方案。该方案年调水 80 亿 m³,是从通天河的侧仿库区调水到雅砻江,再从雅砻江调水到黄河,线路全长 508.0 km。其中通天河至雅砻江段线路长 204.0 km,隧洞长 202.1 km,洞径 9.58 m,埋深在 300~500 m 之间,雅砻江至黄河段采用阿达—贾曲引水线路。

2 隧洞特点及施工条件

2.1 隧洞特点

- a. 高程高,隧洞皆位于 3 000 m 以上的青藏高原。
- b. 洞径大,开挖洞径皆在 5.0~11.0 m 之间。
- c. 埋深厚,最大埋深约 1 000 m,平均埋深 500 m 左右。
- d. 隧洞长,调水工程方案中,最长的隧洞长约 489.9 km,最长洞段长达 73 km。

2.2 自然条件

施工区位于青藏高原,海拔高,寒冷缺氧,环境

作者简介:李庆中(1969—),男,山东聊城人,工程师,从事水资源综合规划和南水北调西线工程规划工作。

恶劣,交通不便,人烟稀少.该区太阳辐射强,冬季长而寒冷,大风、大旱、霜冻、雪灾、冰雹等灾害性天气频繁.年平均气温为 $-4.9^{\circ}\text{C}\sim 3.3^{\circ}\text{C}$,极端最低气温为 -37°C ,极端最高气温为 25°C .年降雨多集中在6~9月,降雨强度小,持续时间长,基本无暴雨发生.地面气压600~700 hPa,仅相当于海平面的60%左右.空气中的含氧量仅相当于海平面的60%~72%.

2.3 地质条件

引水隧洞大部分通过地震烈度7~8度区,部分通过9度区.隧洞工程区的地层主要为三叠系、第四系岩层,岩性主要为砂岩、板岩及砂板岩互层,局部为岩浆岩.隧洞方向与区域应力轴方向近于一致或夹角较小.隧洞方向与断层构造线方向呈大角度相交,能以较短距离穿越主要断层破碎带.隧洞埋深大,穿越大断裂多,个别断裂是全新世活动断裂.

3 隧洞施工方法研究

3.1 开挖

3.1.1 开挖方式的选择

目前隧洞的开挖方法主要是钻爆法和掘进机法两种.两种施工方法各有优缺点,在施工中均有一定的适用范围.

钻爆法是传统的隧洞开挖方法,它是以均衡生产、循环流水作业和多工作面长洞短打为基本形式,具有机动灵活、适应地层能力强、易于掌握等特点.其主要缺点是工作环境差,不能连续作业,衬砌工作量大,工作效率低,单段施工长度有限(一般在2 km左右).

全断面掘进机(TBM)是20世纪50年代美国研制的,经过40多年的不断研究和发展,已成为当今世界长大隧道和地下工程中最先进、最有效的施工机械之一.它具有快速优质、安全节约、机械化及自动化程度高的特点,可实现破岩、出碴、运输、衬砌等多种工序联合作业,工作效率高.但掘进机的使用也存在设备复杂、一次性投入大、应变能力差等缺点,因此TBM主要用于长隧洞的施工中.

根据西线工程隧洞的特点,掘进机施工方法是隧洞施工的首选,这主要基于以下考虑:

a. 隧洞施工工期对西线调水工程总工期起控制性作用.西线调水工程隧洞长,采用掘进机可充分发挥其掘进速度快、工效高的特点,有效缩短工期.

b. 掘进机施工实现了全断面机械化作业,自动化程度高,能大大节省劳动力,提高劳动生产率.在高海拔地区,由于空气含氧量较低,不但施工机械效率下降,人的劳动能力也降低.西线隧洞施工宜选

用机械化作业,减少人工劳动量.

c. 西线隧洞埋深较大,自然分段少,需增加辅助坑道(支洞、竖井等).钻爆法是以施工支洞、竖井和公路连接作为长隧洞开挖的基础条件,支洞间距一般控制在3~4 km,而掘进机独头掘进长度可达20 km,能大大减少支洞和竖井的数量.

d. 掘进机施工安全,污染小.由于掘进机施工对围岩扰动较小,且工作人员远离掌子面,因此有较好的安全条件,掘进机施工以电力为动力,避免了钻爆法施工造成的烟尘污染,有利于改善作业环境.

e. 掘进机施工经济合理.据美国、德国等国家掘进机应用的统计资料,当掘进长度达到3 km,则每米隧洞的费用中固定费用较低,因此在长度超过3 km的隧洞开挖施工中,采用掘进机比钻爆法施工更为经济.我国在引大入秦、引黄入晋等调水工程中使用掘进机施工,均取得了良好的效果.

近年来,随着掘进机的广泛应用,其机械性能、适应范围、开挖速度和对不良地质条件的处理能力等都有了提高.由于西线工程引水线路长,地质条件复杂且穿越多条断层,因此在掘进机施工困难的地段采用钻爆法也是必要的辅助措施.

3.1.2 辅助坑道布置

西线工程引水隧洞线路长、埋深大,施工比较困难.为增加工作面,缩短工期,改善通风和运输条件,需要在线路沿线布置一些辅助坑道.辅助坑道的布置形式为支洞和竖井,支洞的布置主要满足隧洞分段施工和出碴的需要,竖井的布置主要满足施工通风的要求.由于西线工程引水隧洞穿越长江和黄河分水岭——巴颜喀拉山,隧洞最大埋深在1000 m左右,支洞长度和竖井深度较大,相应开挖工程量较大,因而辅助坑道不宜设置太多.

施工支洞的布置要根据地形情况和掘进机的独头掘进长度确定.西线工程隧洞低于附近地面高程最大高差达400 m,给支洞布置带来一定困难.支洞纵坡的选择考虑出碴运输要求,坡度不宜过大,考虑缩短支洞长度,坡度又不宜过小.综合分析取支洞最大纵坡为16%.根据目前掘进机施工技术水平,其独头掘进长度可达20 km,依此布置支洞最大间距为40 km.

为保证长隧洞顺利施工,合理布置通风竖井是十分重要的.竖井布置由通风距离确定.我国引大入秦工程和引黄入晋工程的最长通风长度分别为11.65 km和12.40 km,随着施工技术及通风机械的发展,通风距离也在不断增长.参考国内外长隧洞施工通风经验,并考虑高原气候影响,西线工程隧洞施工通风最长距离控制在12 km以内.竖井断面大小

必须满足长隧洞施工的通风机械及风管布置要求。

3.2 出碴

掘进机是一套多环节紧密联系的联合作业系统,掘进机的掘进与出碴同时进行,掘进时将破碎的岩碴通过切头上的铲斗进入皮带输送机,然后装入出碴设备运至洞外。掘进机施工出碴具有连续出碴、运输强度高的特点,出碴方式的正确与否直接影响到隧洞的掘进速度。

隧洞出碴主要分为有轨运输、无轨运输和带式输送机运输等方式。

有轨运输采用电力机车牵引矿车进行运输,运输能力强,适用于各种隧洞断面,但要求运送坡度小于2%。

无轨运输采用轮胎式梭车、自卸汽车等进行运输,具有生产效率高、道路基建和维护工程量少等优点,但柴油机会产生洞内污染,并需为回车、避车等增加辅助洞室工程量,此方式适用于断面较大、洞口距开挖面长度较短的隧洞出碴,运送坡度一般小于10%。

带式输送机运输是长隧洞施工中一种高效的出碴方式,此方式节省了由于出碴列车就位所需的时间,可以保证掘进机的连续工作。与其他运输方式相比,具有构造简单、操作安全、维修容易、使用方便等优点,同时噪音也低。该方式适用于各种断面,要求运送坡度在12°以内。

运输方式的选择主要考虑开挖断面的尺寸、隧洞的长度及坡度、洞内通风条件等。西线工程主洞坡度自流为0.03%,抽水为0.10%,支洞坡度在16%左右,主洞与支洞的开挖洞径均在10m左右。根据各出碴方式的适用条件,可采用有轨运输和带式输送机的运输方法。但由于支洞较长且坡度大,需采用带式输送机出碴,若主洞采用有轨运输法,则两种出碴方式之间需要进行一次倒运,给施工造成不便。因此,主洞与支洞均宜采用带式输送机运输方式。

3.3 通风

西线工程为深埋长隧洞,在掘进机施工时,掘进机切削头碎岩产生的岩粉和围岩释放的有害气体,对隧洞施工工作面造成污染。另外,深埋长隧洞施工时,由于埋深较大,地温较高,且机械破岩和装碴过程中也会释放大量的热量,使工作面温度升高。因此必须采取合理的通风设施,保证洞内空气质量符合标准要求,并降低洞内温度。

3.3.1 通风量

掘进机施工中,通风及除尘设备的尺寸必须满足施工对风量的要求,并能达到空气中粉尘允许含量的标准。通风量计算从三个方面进行比较:①施工

人员所需风量;②洞内最小风速所需风量;③降温排尘风量。取其中最大者作为设计通风量。

3.3.2 通风方式选择

隧洞的通风方式应根据洞井布置特点、施工程序、施工方法、隧洞长度和断面大小等因素来选择。机械通风的主要形式分为压入式、吸出式和混合式三种。

压入式通风是利用装在洞口外面的风机,将新鲜空气由洞外通过风管直接送入开挖面附近,冲淡工作面的有害气体,并经洞身排至洞外。这种方法的优点是施工人员集中的开挖面附近能够很快获得新鲜空气,缺点是散尘时间随洞长增加。

吸出式通风是将风机装在工作面附近,通过风管将开挖面污染空气吸走并排出洞外,新鲜空气则由洞口流入洞内。这种方式的优点是工作面处的有害气体排出较快,避免了在整个洞室的扩散,缺点是新鲜空气流入工作面较慢,且长隧洞内新鲜空气易被污染。

混合式通风是压入式与吸出式相结合的一种方式,具有通风能力强、效果好的特点,是长大隧洞进行快速通风的常用方式,缺点是管路多,设备投资较大。

西线工程隧洞洞线长、洞径大,采用混合式通风较为合适。当开机掘进时采用吸出式将工作面烟尘吸出洞外,当停机检修时采用压入式将洞外新鲜空气通过风压管送至工作面。混合式通风可使用两组风机和两套管路,也可使用一组可转向的风机压吸兼用。当采用两组风机时,一组在洞口将新鲜空气经风管送入洞内工作面,另一组风机装在洞内将开挖面的污浊空气吸走。两组风机以吸出为主,压入为辅。由于西线工程引水线路均为长隧洞,使用两套风管将增加投资,故采用一组可转向的风机压吸兼用。同时为了提高通风效率,采用通风机相串联的方法。

3.3.3 通风设备及布置

风机的选择应根据风量和风压来确定。混合式通风方式可选用可逆转的轴流式风机。轴流式风机结构紧凑、机体尺寸小、重量轻、转速高,可直接与电动机连接,便于串联通风。通风管道可固定于隧洞顶部。

4 结 语

西线工程位于高海拔、寒冷、缺氧地区,而隧洞工程又是超长洞,埋深厚,地质条件复杂,地层结构多样,在施工过程中可能产生多种问题。因此,选择合适的施工机械、较好的施工方法对工程顺利实施具有重要意义。

(收稿日期 2000-05-22 编辑 熊水斌)