



PUTONG GAODENG YUANXIAO
SHIERWU TUMUGONGCHENG LEI GUIHUA XILIE JIAOCAI
普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材

掘进工程概论

JUEJIN GONGCHENG GAILUN

主 编 韦 猛 霍宇翔 谢兰兰



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

JUEJIN GONGCHENG GAILUN



PUTONG GAODENG YUANXIAO
SHIERWU TUMUGONGCHENG LEI GUIHUA XILIE JIAOCAI
普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材

掘进工程概论

JUEJIN GONGCHENG GAILUN

主 编 韦 猛 霍宇翔 谢兰兰

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容提要

掘进工程学是研究隧道掘进技术及工艺的应用技术性学科,已被广泛应用到地质、水电、水利、矿业、交通、建筑等诸多部门。本书主要以巷(隧)道施工工序为主线,简要介绍了钻眼、爆破、通风、装岩与运输、围岩支护等工艺,另外也介绍一些竖井、斜井施工的知识,侧重于施工能力的培养,目的是使学习者能熟悉各道工序,能按图纸施工。书中还介绍了控制爆破等一些新兴技术,主要源自作者在一些工程实践中的亲身体会,期望能对读者有所裨益。

本书主要供高等院校土木工程、勘查技术与工程地质工程等专业教学使用,因此,根据该类专业实践需要,在内容上,主要以平巷设计与施工为主进行系统的阐述;斜井及天井的设计与施工均以平巷掘进方法为基础,加进一些特殊的工艺,供读者拓展学习。

图书在版编目(CIP)数据

掘进工程概论 / 韦猛, 霍宇翔, 谢兰兰主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2014.1
普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材
ISBN 978-7-5643-2142-0

I. ①掘… II. ①韦… ②霍… ③谢… III. ①巷道掘进—高等学校—教材 IV. ①TD263.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 030714 号

普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材

掘进工程概论

主编 韦 猛 霍宇翔 谢兰兰

责任编辑	杨 勇
助理编辑	姜锡伟
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	14.5
字 数	392 千字
版 次	2014 年 1 月第 1 版
印 次	2014 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2142-0
定 价	36.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

作为钻掘工程专业的组成部分，掘进工程的学习与掌握日益重要。从钻掘工程的前身探矿工程来看，钻探、坑探就是最主要的两种工程勘探手段，后因教育部专业目录调整，专业名称及内涵亦随之变化，但钻与掘的关联却愈来愈紧密：钻井的直径增大到一定程度，即与微型隧道类似；而隧道因 TBM 法的引入，使其无论从掘进方法，还是机具设备，更接近于钻探理论。如今，钻探中采用了许多如冲击式钻进、全断面钻进、井内爆破等掘进工程常见理论与方法，使钻探与掘进日益融合、交叉，互为补充，成为技术互为进步的推动力量。因此，钻掘工程专业从业人员学习并掌握掘进工程技术知识十分必要。

本书从 1992 年起，由笔者起草编写，至 1997 年作为讲义在校内印刷。2004 年，经过较大幅度的修编，特别是加入了编者对一些工程实践的亲身体会，同时补充了目前常见的隧道施工的除矿山法外的其他方法。另外，对斜井、竖井的施工工艺也作了简要介绍。

本书的编著，力求通俗易懂，尽量避免复杂的原理推导，着眼于讲清概念，介绍施工工艺与方法，希望读者在学完本书后，除了掌握掘进工程的基本理论与方法外，还能在工艺设计、施工组织、机具研制等方面独立工作，具备隧道专业工程师的基本素养。

本书在编写过程中，参考了中国地质大学张时忠教授《掘进工程学概论》、地质出版社出版的由励美恒主编的《探矿工程学概论》、人民交通出版社出版的由黄成光主编的《公路隧道施工》等书目的相关内容。本书的出版得到了成都理工大学陈礼仪教授的大力支持，笔者在此一并致以诚挚的谢意。

由于笔者理论水平和实践经验有限，书中内容难免会有欠缺、不妥之处，恳请各位专家、学者和广大读者批评指正。

编 者

2013 年 10 月于成都理工大学

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 矿山法施工隧道	1
第二节 盾构法施工隧道	3
第三节 沉管法施工隧道	5
第四节 露天开挖法施工隧道	13
第二章 岩石性质与工程分级	15
第一节 概 述	15
第二节 岩石的物理性质	16
第三节 岩石的力学性质	18
第四节 岩石的工程分级	22
第三章 隧（巷）道断面设计	25
第一节 隧（巷）道断面形状	25
第二节 隧（巷）道断面尺寸	26
第三节 隧（巷）道断面内水沟和管线布置	32
第四章 钻眼工作	35
第一节 钻眼方法	35
第二节 钻眼机械	38
第三节 钻眼工具	51
第五章 巷道爆破	56
第一节 炸药和爆破概论	56
第二节 破岩机理及爆破技术	69
第三节 起 爆	73
第四节 隧（巷）道钻爆法	79
第六章 通风与防尘	92
第一节 通 风	92
第二节 防 尘	95
第七章 平巷掘进中的装运与运输	97
第八章 巷道支护	102
第一节 概 述	102
第二节 支架材料	107

第三节	锚喷支护	114
第四节	其他支护方法	138
第九章	控制爆破	146
第一节	概 述	146
第二节	控制爆破机理	147
第三节	控制爆破施工	151
第十章	隧道施工组织设计与管理	160
第一节	施工组织设计编制前的准备工作	160
第二节	隧道施工组织设计	162
第三节	隧道施工方案和施工方法的选择	166
第四节	隧道施工场地布置	167
第五节	施工进度计划与控制	170
第六节	隧道施工计划管理	180
第七节	隧道施工技术管理	182
第八节	隧道施工质量管理	184
第九节	隧道施工经济管理	186
第十节	隧道施工安全管理	189
第十一章	竖井掘进	195
第一节	概 述	195
第二节	井筒断面形状与尺寸	195
第三节	掘进前的准备工作	197
第四节	钻眼爆破	198
第五节	通风与排水	199
第六节	装岩与提升	201
第七节	竖井支护	205
第八节	竖井掘进施工组织	210
第九节	浅井掘进	210
第十节	特殊的竖井施工方法	214
第十二章	斜井掘进	218
第一节	斜井断面形状与尺寸	218
第二节	井口位置的选择与井口的修筑	219
第三节	斜井掘进中的装岩	219
第四节	斜井掘进中的提升	221
第五节	斜井掘进中的排水	222
第六节	斜井支护	223
第七节	斜井掘进施工组织	225
参考文献		226



第一章 绪论

我国地域辽阔,多山岭重丘,山区公路、铁路、水电建设任务繁重,这些都伴随着大量隧道(洞)与地下工程项目的施工与运营。在矿山的地下探采中,井巷工程是最常见的工程手段。隧洞工程的多样性、复杂性,引领了隧道科学技术的深化。隧道能有效防止滚石、泥石流等地质灾害,具有良好的抗震性能,这些在2008年5月12日“汶川大地震”中得到了验证。截至2009年年底,我国仅建成公路隧道就有5000余处,里程超过270万延米;另外,大批隧道正在规划设计之中(如川藏高速公路、川藏铁路、台湾海峡隧道、滇藏铁路等)。我国的城市地下工程建设也是热火朝天,除了城市地下管线隧道、地下避难所、大型地下商业综合体以外,目前主要的大中城市都正在规划建设地下铁路。可以预见,城市地下空间开发的热潮会逐渐向中小城市扩散,隧道掘进工程学的应用将越来越广泛。

掘进工程学是研究隧道(洞)掘进技术及工艺的应用技术性学科。已被广泛应用到地质、水电、水利、矿业、交通、建筑等诸多部门。随着近年来我国基础设施建设投入的加大,掘进工程技术飞速发展,隧道从传统断面向大跨度、大埋深、水下以及微型化发展,除了传统的矿山法施工外,还涌现出了盾构法、沉管法、露天开挖法等新兴技术,这些技术根据不同现场条件要求使用,很好地满足了建设的需要。

第一节 矿山法施工隧道

矿山法施工隧道是最常见也是传统的施工方法。它大量应用于矿山地下开采中,主要以钻眼、爆破、通风、装岩与运输、围岩支护等工艺工序,在地下开挖出一定形状大小的空间,用于人员设备材料等的通过、采取矿物或安装设备等。掘进巷道类型很多,依据它所服务的行业的不同,其结构、形状、大小会有所不同,但其施工工艺都是类似的,如地质用的勘探巷道、交通用的公路铁路隧道、矿山用的采矿巷道、水利用的引水涵洞等。相对来说,巷道种类较为复杂的是矿山的探矿、采矿巷道,下面我们以勘探巷道为例介绍一下各种巷道。

为圈定和查明矿床或地质构造而挖掘的探槽、浅井、探矿平巷、探矿斜井和探矿竖井等,称为勘探巷道。探槽是在地表挖掘的探矿槽沟,横断面常为倒梯形,其底部深入到矿体或基岩,用来揭露矿体或岩层近地表处的厚度或边界。探槽深度一般不超过3m,槽底宽度以刻槽取样方便为宜,一般不小于0.6m。浅井是沿矿体走向或勘探线布置的垂直探矿巷道,用以追索矿体,其深度一般不超过30m,横断面为矩形或圆形,净断面面积在1.0~2.2m²。

水平巷道,实际上并不是绝对水平的,为了便于运输和排水,都保持3‰~7‰的坡度,其水平断面的形状一般为梯形、矩形和拱形,也有的为圆形。作为探矿的水平巷道,断面面积一般都很小,根据开凿巷道使用的设备或工具的不同,探矿平巷的净断面面积一般为2.16~

5.04 m²。水平探矿巷道包括平硐、石门、沿脉巷道和穿脉巷道。

平硐也叫平窿，是可直接通达地面出口的水平巷道，如图 1.1 中的 9 所示。探矿平硐通常作运输、通风、排水和人员通行之用。平硐掘进方向可能沿着矿体走向，也可能与矿体走向成一定的角度。

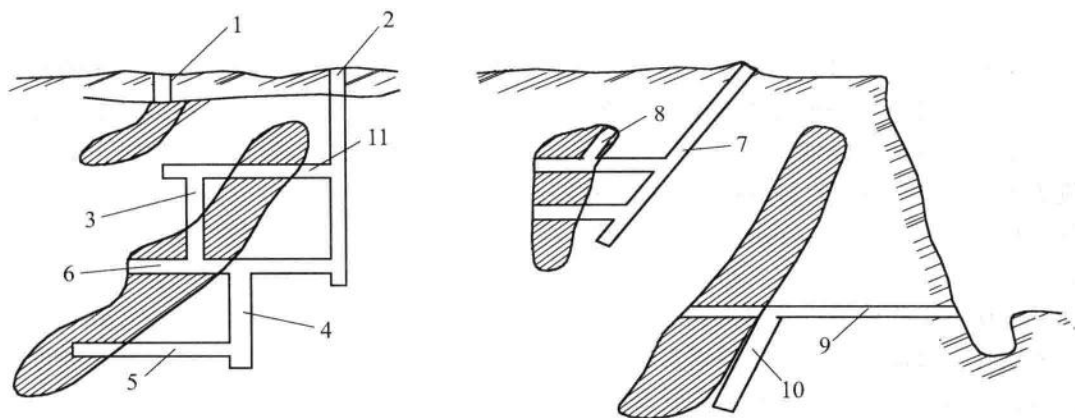


图 1.1 探矿巷道类型图

石门是掘进在岩层中，没有直接通达地面出口且与矿体走向相交的水平巷道，如图 1.1 中的 5 所示。它通常是井筒与平巷或同一水平的平巷之间的通道，作为运输、通风、排水和行人之用。

沿脉巷道和穿脉巷道如图 1.1 中的 11 和 6 所示，没有直接通地面的出口，以探矿为目的。沿脉巷道沿着矿体走向，在矿体内或矿体与围岩的接触带中掘进，以查明矿体在走向方向的变化；穿脉巷道垂直于走向掘进，以查明矿体的厚度和在垂直方向的变化。

与竖井和斜井相比，水平巷道掘进技术简单、设备投资少、掘进速度快、巷道容易维护，平硐更有排水方便之利。

探矿斜井是直接从地面沿矿体或岩层掘进的倾斜巷道，常与矿体或岩层倾角一致。通常情况下，斜井倾角不超过 35°。斜井主要作升降人员，提升矿石、废石，运输设备、材料，以及通风和排水用。当斜井掘进在离矿体不远的下盘岩层中时，要再从斜井掘进石门通达矿体，如图 1.1 中的 7 所示。如果斜井没有直接通达地表的出口，则称为盲斜井，如图 1.1 中的 10 所示。如果天井上部没有与其他巷道相通，则称为盲天井，如图 1.1 中的 8 所示。天井主要用来探矿，同时又是行人、通风和运送材料的通道。

探矿竖井是从地面向下掘进的垂直巷道（实际上，竖井掘进并非全是由上向下的，还有由下向上的掘进方式），主要用来升降人员、提升矿石和废石、运输材料设备，以及通风和排水，如图 1.1 中的 2 所示。如果竖井没有直接通达地面的出口，则称为盲竖井，如图 1.1 中的 4 所示。竖井的断面主要为矩形，它与浅井的划分以 30 m 为限，超过的都称为竖井。我国探矿竖井深度不大，一般不超过 150 m。

从图 1.1 中还可以看出，由平硐、斜井、竖井和石门通达矿体，然后按勘探网的间距，在矿体中或沿矿体接触带掘进沿脉、穿脉和天井等一系列的探矿巷道，则可在矿体的延伸和走



向方向逐段逐块圈定矿体。所以,使用巷道揭露矿体赋存状态、观察地质构造和采取岩样,较之物探、化探和钻探等勘探手段更为详细可靠。对于地质构造复杂的矿床,如稀有金属、有色金属、放射性元素,以及特种非金属矿床和复杂的工程地质构造区域的勘探,巷道勘探常常成为必要的手段。物探、化探和钻探所获得的勘探成果,常进一步用巷道探矿手段进行检验,并由此使所获得的低级储量提高储量级别。

勘探巷道中的平硐、斜井、竖井和石门等,虽然断面小、深度不大,但就开凿位置和所起的作用来看,与采矿巷道中的开拓巷道极为类似;而勘探巷道中按勘探网布置的沿脉、穿脉、天井等巷道与采矿巷道中的采准巷道位置相似。因此,设计勘探网和布置勘探巷道时注意探采结合,应尽可能使探矿巷道能被采矿利用,这将使矿床的开采节省大量的资金和时间,使矿井早日投产。

第二节 盾构法施工隧道

盾构(Tunnel Boring Machine, TBM)法,是指采用专用的隧道开挖机械,在地下全断面开挖形成隧道,而不需要进行传统钻爆施工的方法,适合在软土或沙土层中以及超长深埋岩石隧洞工程中使用。隧道为圆形,则其直径决定盾构机直径。受制作及施工方法的限制,盾构机直径大部分为3~11 m。随着盾构机直径的加大,对大口径轴承的耐久性、土沙密封件的耐久性和耐振性、切削刀头的耐久性以及盾构组装和拆卸、电力供应、出土处理等都提出了更高的要求。从目前盾构机械的制造水平、工艺、材料来看,盾构直径以16 m为限;若综合考虑工程实施的可行性、工程投资、实施和营运阶段风险等,隧道直径应更小。用于荷兰“绿色心脏”高速铁路隧道施工的世界上最大直径的盾构机,直径达14.87 m;我国拟实施的最大盾构机外径达15.2 m,准备用于上海崇明越江通道工程。

在超长深埋的岩石隧洞工程中,采用TBM施工具有其他施工方法无可替代的优越性,代表了当今硬岩隧洞施工技术的主流方向。经工程实践证实,采用TBM进行隧洞施工,其优越性主要体现在如下几个方面:

- (1)掘进速度快,TBM月平均进尺可达600~800 m(最高日进尺可达113 m)。
- (2)工作效率高,实现了TBM开挖、出渣、衬砌、回填、灌浆等工序的循环作业。
- (3)施工安全,TBM施工作业始终在护盾的保护下有效地进行。
- (4)施工环境好,含尘空气由净化器除尘,无爆破烟尘。
- (5)成洞条件好,开挖面光滑平整,无超挖,对围岩基本无扰动。

目前,我国TBM施工尚属起步阶段,其设计、施工技术正在形成过程中。不久前由国际承包商成功完成的“引黄入晋”隧洞工程,已经为我国TBM施工技术的发展提供了契机。

一、TBM适用条件

根据TBM施工作业的特点,拟采用TBM施工的各类隧洞工程均需考虑影响TBM布置的现场地形、排水、围岩、使用寿命等基本条件。TBM机外形如图1.2和图1.3所示。

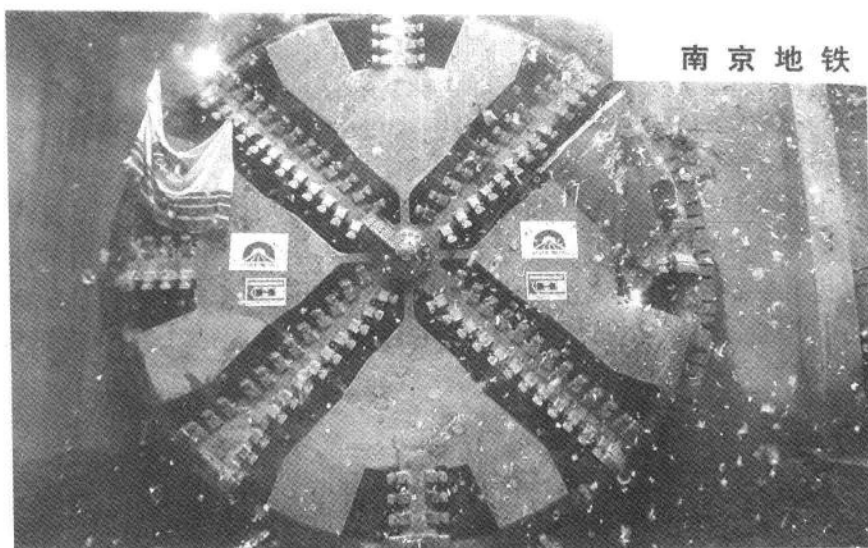


图 1.2 隧道掘进机刀头

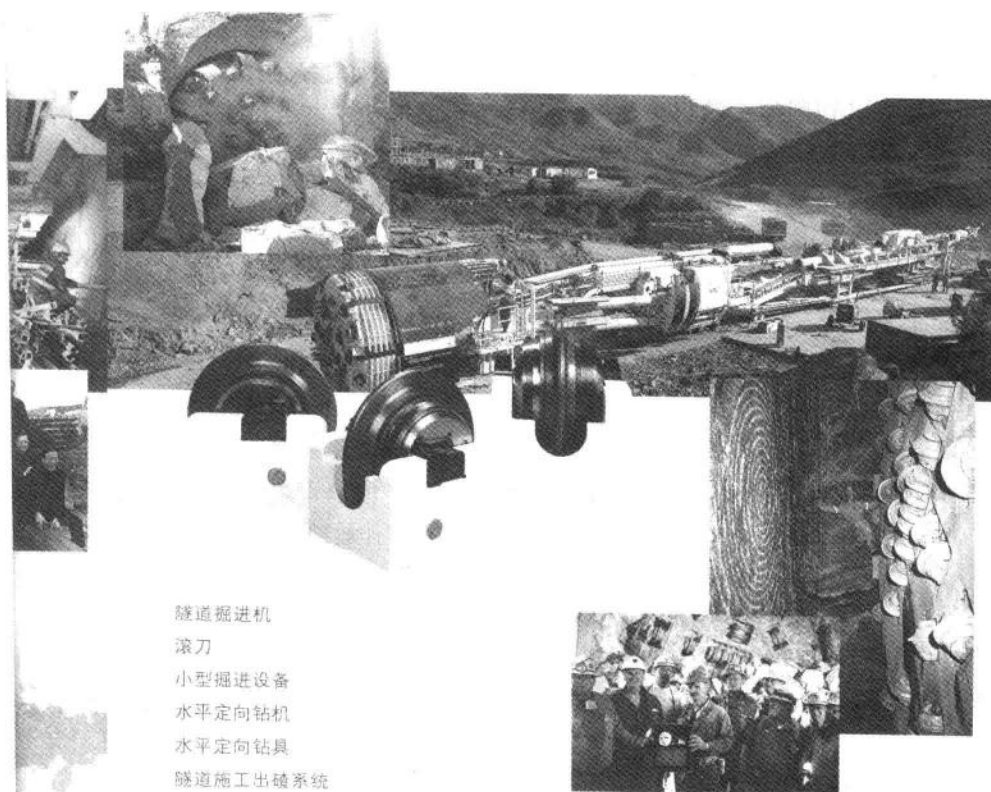


图 1.3 隧道掘进机外观及主要部件

(1) 隧洞进出口的施工场地条件：进出口的施工应尽量开阔和平坦，不仅应满足 TBM 设



备安装、拆卸、进料、出渣和交通需要,还应具备布置生产生活营地和混凝土预制管片厂等条件。

(2) 隧洞纵坡及施工排水条件:在纵坡较大的隧洞中采用 TBM 施工,若存在富水洞段,为便于施工排水自流出洞,需将 TBM 逆坡布置、逆坡掘进,防止出现断电现象时 TBM 设备被淹没和与此有关的其他人身事故。

(3) TBM 围岩适用条件:受 TBM 机型限制,硬岩 TBM 不宜承担软土隧洞的掘进。在特殊围岩隧洞段,如膨胀岩洞段,具有软土充填的岩溶洞穴发育段等,TBM 适应能力也较弱。当某一隧洞确定采用 TBM 方案时,若局部洞段存在上述情况,需采取具有针对性的施工预案或措施。

(4) TBM 使用寿命:在一般情况下,每台 TBM 平均使用寿命约为 20~25 km。因此,在超长隧道中使用 TBM 时,应对其掘进长度留有余地。

(5) 其他因素的影响:包括不可抗拒因素(如地震、火山、洪水)和特殊地质因素(如放射性地层、有害气体、有害水质)等方面,其对 TBM 布置的影响也是不容忽视的。

二、TBM 应用实例及建设条件

已建的“引黄入晋”引水隧洞是一项超大型跨流域调水工程,自黄河干流万家寨水库取水,经本工程将水送至大同、平朔和太原地区,解决华北能源重化工基地的水资源短缺问题。

该工程由总干线、北干线、南干线和连接段组成,路线总长 452 km,主要建筑物包括水隧洞、扬水泵站、渡槽、埋涵、调节水库等。该隧洞工程分别采用 TBM 和新奥法施工,其中采用 TBM 施工的隧洞长度为 124 km。隧洞均为无压输水隧洞、圆形断面,衬砌后内径分别为 5.46 m 和 4.92 m。总干线 21.4 km 隧洞采用 1 台 1811-256 型 TBM(双护盾全断面掘进机,美国罗宾斯公司制造)施工;南干线 89 km 隧洞采用 4 台 TBM 施工,每台 TBM 掘进任务为 20~24 km;连接段 13 km 隧洞采用 1 台 TBM 施工。该工程大规模集中采用 6 台 TBM 施工的壮举,开创了 TBM 施工技术在我国广泛应用的先河。

该 TBM 工程建设条件主要体现在:隧洞埋深为 50~300 m,其中最大深埋隧洞位于南干线的中南部;隧洞较长,最长隧洞位于南干线,其中 5 号、7 号隧洞的单洞长度分别为 26 km、41 km 和 42 km、53 km;地质条件复杂,隧洞穿越地层除大部分为硬岩外,还包括湿陷性黄土、膨胀性黏土、膨胀岩、富水地层、断层以及岩溶等不良地质条件;局部隧洞外水压力较高,位于地下水位之下,采用 TBM 施工的隧洞长度达 33 km,作用于洞室衬砌上的最大外水压力水头为 300 m,该段衬砌施工采取了排水减压措施;穿越煤系地层、有害地下水、有害气体段的隧洞长度达 5 km,在 TBM 掘进期间考虑了相应的应急预案。

第三节 沉管法施工隧道

一、沉管法施工技术

当城市交通需要跨越江河海湾时,常见的方法有轮渡、桥梁、水下隧道。水下隧道不侵

占航道净空,既不影响水路航运和港口船舶的进出,又不受恶劣气候条件、台风、海啸等自然灾害的影响,能可靠保证车辆安全、舒适、经济、畅通运行。水下隧道因能很好地解决水域的跨越问题,同时又降低了对周围环境的影响,解决了大面积水域的航运问题等,使得大江大河上修建的大型水下隧道工程数量逐日增多。但水下隧道方式因为受到技术水平的制约,一直没有得到足够的重视和发展。随着一些关键技术的不断突破,水下隧道已逐渐成为工程界普遍认同的跨越航运繁忙河道的第一选择。包括我国在内的许多国家都已经掌握了建设水下隧道的全部技术,加快发展水下隧道的时机趋于成熟。与桥梁方案相比,采用隧道越江(海)的主要优点有:全天候运营;对航运、航空无干扰;隧道线路短,可快速过江(海),且两岸拆迁少;保持原有生态和自然环境不变;抗地震能力好;防战能力强;多用途,易维护,造价相对降低。

在我国,越江隧道的优越性也逐渐得到认同,在内河航运水道上发展水下隧道建设可能成为一种趋势。以桥梁或隧道跨越江河各有优缺点,在规划跨越江河的通道时,应该对两者进行认真的比选。随着社会的发展,越江隧道的优越性将会突出地表现出来,并必将促进大型水下隧道工程的建设,从而推动中国水下隧道建设技术的大发展。

从系统优化的角度考虑,水下隧道在社会、经济、生态环境等多方面的综合效益要优于桥梁和轮渡,因而成为很多地区尤其是发达地区建设的优选。

目前,修建水下隧道有以下几种施工方法:矿山法、盾构法、围堰明挖法、沉埋管节法(简称沉管法)、气压沉箱法、顶推法等。沉埋管节法,也称预制管节沉放法,是在干船坞内或大型驳船上先预制钢筋混凝土管节或全钢管节,然后浮运到指定的水域,再下水沉埋到设计位置固定,建成需要的过江隧道或大型水下空间。这种修建隧道的技术因其显著的优点而被广泛采用。

在大型的水下隧道工程中,沉管法和盾构法适用范围较广,几乎不受地质条件限制,被世界各国广泛采用。而其他几种施工方法因要受到地质条件限制,难以推广使用。盾构法和沉管法越来越受到工程界的青睐,且沉管法工期最短、隧道延长最短、地质条件制约小,虽然管节沉放时对航道有影响,但总体上优于其他方法。沉管法与盾构法相比存在以下几个方面的优点:

(1) 沉管断面形状选择自由度大,大断面容易制作,断面利用率高,可做到一管多用;而盾构法大截面施工困难,而且以圆形为主。

(2) 沉管有利于缩短工期,防水性能优越。

(3) 沉管隧道埋深浅,总长短。

(4) 因沉管比重小,对基底地质适应性强,不怕流砂。

(5) 沉管隧道抗震性能优越。

(6) 沉管隧道的防水技术比较成熟,而且对施工要求并不高,同时具有良好的自防水功能。

(7) 沉管隧道具有较好的经济性,这主要得益于沉管隧道的回填覆盖层薄、埋深浅,可以有效地缩短路线长度;另外,管节的集中制作可以达到高效、节约资金。

(8) 隧道的施工质量容易保证。沉管结构和防水层的施工质量均比其他施工方法易于做好;隧道接缝极少,漏水机会大为减少,实际施工质量易达到完全防水。

(9) 隧道现场的施工期短。浇制管节的大量工作均不在现场进行,一节 100~120 m 的管



节一个月内可以完成出坞、沉埋连续作业。

(10) 操作条件好。基本上没有地下作业,水下作业也极少,因此施工较为安全,且能保证施工精度。沉管法与盾构法相比,有以下缺点:占用的施工场地多;对通航有一定干扰;施工受气象、水文等自然条件影响较大……

由于沉管隧道在经济、技术上的独特优点,且随着沉管法隧道设计和施工中的关键技术问题,如结构形式、管身防水、水下基槽开挖和地基处理、管节水下对接和接头防水等的逐步解决和日臻完善,并随着沉管法在世界各国的广泛采用和技术之间的经验交流,沉管隧道受到越来越多国家的重视,逐渐成为了水下大型隧道工程的首选施工方法。

沉管法修建隧道的施工方法越来越广泛地得到应用,我国的香港、台湾、广州、宁波和上海已先后建成多座沉管隧道。沉管隧道自 1910 年在美国首次兴建以来,世界各国,特别是美国、荷兰、日本等几个国家在沉管技术领域已有了长足的进展。据统计,目前世界上已建成 130 余座沉管水下隧道,仅美国就有 30 余座,日本和荷兰均已建成 20 余座。根据国际隧协到 1994 年的统计资料,世界各国已建、在建或拟建的沉管隧道共有 93 条,其中,就沉管节制作形式而言,混凝土隧道 59 条,钢壳隧道 34 条;从使用功能上来看,公路隧道 61 条,铁路隧道 26 条(包括地铁隧道),公路、铁路两用隧道 4 条,人行隧道 2 条;就管节横截面形状来说,矩形截面隧道 73 条,圆形(含花篮形、八角形、马蹄形、椭圆形)截面隧道 20 条;从规模上看,早期的沉管隧道多为双车道或 4 车道,从 20 世纪 60 年代中期起,陆续建成了一些 6 车道隧道,到目前世界已建的 6/8 车道隧道共有 20 余条。我国内地修建沉管隧道起步较晚,已建成的有宁波甬江隧道、广州珠江隧道和上海外环越江隧道,其中上海外环越江隧道是一条世界第二、亚洲第一的沉管越江隧道。全世界已建的沉管隧道、沉埋隧道,其最大水深 50 m,最大海水流速 3.0 m/s,最大长度 5 825 m,最长管节 268 m,最多车道 8 车道。

二、沉管隧道的发展

1810 年,Charles Wyatt 首次在伦敦进行了沉管隧道施工试验,直到 19 世纪末期,这种工法才被加以完善实施。1885 年,在西特奈湾建成了自来水管;1894 年,美国在波士顿建成下水管线,虽然它的直径只有 2.70 m,但其原理与如今在沉管隧道施工中采用的一致。从那以后,1910 年,完工的跨越美国与加拿大之间的底特律河铁路隧道是一个全新的起点,这是世界上第一条沉管建造的铁路隧道,之后美国修建了许多的沉管隧道。荷兰的第一座沉管隧道是 1937—1942 年在鹿特丹修建的马斯河隧道,这标志着欧洲开始使用沉管隧道。隧道最初的设计选用美国方案,为近似圆形的断面形状和双层钢壳结构,并设计为两个相邻的管孔。但荷兰承包商 Christani & Nielsen 公司提出了一个替代方案(矩形混凝土结构)后就摒弃了最初的设计方案,因在 2×2 车道交通空间及自行车道和人行道(还有横向通风道)范围内,混凝土结构贴合得比较紧密。从那时起,该施工方法在荷兰得到了进一步的运用和发展,从而也成为许多国家采用的方法。日本于 1944 年在大阪安治川建成了通过立坑电梯而穿越河底的沉埋隧道——安治河隧道。目前,世界上最长的沉管隧道是美国旧金山海湾快速交通隧道,全长 5 825 m,由 58 节管节组成。管节最宽的隧道是比利时压珀尔隧道,宽达 53.1 m,全长 336 m。单节管节最长的隧道是荷兰海姆斯普尔隧道,最长一节管节长 268 m,宽 21.5 m,重 50 000 kN。值得一提的还有:荷兰的德赫特隧道,有 4×2 车道,是迄今为止车道数最多的隧道之一;瑞

典的利尔杰霍尔姆斯维肯隧道的最大水深达 50 m; 美国纽约东 63 街隧道环境条件很差, 海水流速非常急, 达 2.7 m/s; 比利时的斯海尔德隧道, 河水流速 3.0 m/s, 潮位差很大; 我国香港东港跨港隧道, 是建于繁忙海港附近的沉管隧道。沉管隧道在美国、日本、荷兰等国家的成功实例, 沉管隧道结构形式、防水、基层处理、结构抗震等关键技术问题的成功解决, 使隧道成为跨江、海的重要手段, 使得沉管建设隧道的方法日臻完善, 促进了世界各国的沉管隧道建设。

沉管发展史让人注意到沉管技术确实是一种国际性的技术进步。从英国人最初的试验, 到美国人修建许多实际的沉管隧道, 而荷兰人在引入美国技术时自己设计了一种新的方法, 此项技术又由荷兰被介绍到其他国家, 使得沉管隧道技术不断向前进步。应该承认, 各国的设计和施工技术都各具特点, 设计施工的思路也迥然不同。就结构形式而言, 沉管隧道有钢结构和钢筋混凝土结构两大类, 前者一般为圆形断面, 后者一般为矩形断面。日本及美国修建水下隧道时还采用带钢外套的钢筋混凝土管节, 即在管状或者平板状的钢外套内部, 浇筑隧道混凝土的壁及隧道底板。钢外套在岸边制作, 然后放入水中, 运送到干坞, 并在干船坞中进行混凝土浇筑工作。美国海湾修建的隧道较多, 海湾的水深一般深于内河, 用圆形的钢壳或椭圆形钢壳, 从受力角度考虑比矩形有利; 日本采用钢壳沉管则与他们有良好的造船设备有关; 而荷兰等西欧国家则习惯于矩形断面的沉管, 他们认为矩形断面有效空间的利用率优于圆形断面, 矩形断面隧道的高度和覆盖层厚度都比圆形隧道小, 隧道的长度也相应减小。其实选用何种形式的沉管隧道不但与所掌握的施工技术及现有设备有关, 还与习惯和经验有很大关系。在荷兰等西欧国家修建水下隧道时, 一般都采用普通的钢筋混凝土管节, 他们在管节制造技术方面有独到之处, 即在混凝土作业时一贯坚持高标准, 从混凝土原材料的组成、降低温差、收缩补强、模板选择上都采取了相应的措施。然而, 这些不同的技术并不是相互排斥的, 一种好的想法常常被运用于另一种技术中, 沉管隧道工程是一项国际性的技术, 其技术往往由一个国家传播到另一个国家。沉管技术自从问世以来, 就不断地被工程界完善, 荷兰于 20 世纪 60 年代发明了举世闻名的吉那止水带, 使得水力压接法更加简捷有效; 日本在荷兰吉那止水带的基础上研究开发了几种新型的止水带, 还尝试过采用波纹型钢板用作二次止水带。在基础处理技术方面, 丹麦于 20 世纪 40 年代发明了喷砂法, 瑞典于 60 年代首先成功采用灌囊法, 荷兰在 70 年代又发明了更为先进的压砂法, 这都是沉埋技术中的重大革新。日本在 20 世纪 70 年代推出压注混凝土法和压浆法, 在接头抗震方面也取得了不少进展: 过去在地震区修建隧道时, 对地震缺乏特别的预防措施; 而现在设计的接头处可以有相当的挠度和纵向位移, 在允许范围内对沉陷和温度影响也采取了类似的措施。近年来, 随着现代科学技术的发展, 激光测量仪、电子定位系统等先进设备已应用于施工中, 使得沉管隧道质量更加优良, 工期也大大缩短。沉管法的两项最为关键的技术——水力压接法和基础处理的压注法——的成功解决, 水下基础施工工艺过程及铺设管节方法的合理性的不断完善, 使沉管隧道进入了快速发展阶段, 从而拓展了沉管法的应用空间。

三、设计计算的演变

沉管隧道底部埋置于经工程处理后的地基基础之上, 管节之间以及管节与岸边竖井之间用半柔半刚性接头或柔性接头或刚性接头相连。因此, 沉管隧道段系两端搁置于竖井之内,



埋置于回填土与回淤土之中,基底置于弹性地基基础上的水下长大链式结构。这种结构的设计与计算方法,与山岭隧道、盾构隧道相比有很大的差异。

(1) 沉管隧道管节结构计算的规范和结构上的荷载。沉管隧道管节的结构设计,各国尚无专用的设计规范,借鉴本国相近行业的规范,是世界各国的一般做法。作用于沉管隧道的荷载,大体上可分为如下多种:一期恒载、施工荷载、水压力、拖运力、波浪荷载、浮力、水力压接荷载、船舶对管节的吸力、基础对管节的浮托力、土压力、压载水荷载、二期恒载、静活载、动活载、温度作用、混凝土收缩、地基基础沉降、地震作用、沉船荷载、抛锚力与拖锚力等。

(2) 沉管隧道的荷载组合与工况。沉管隧道管节的结构计算主要由横向计算、纵向计算以及局部计算三大部分组成。横向计算是在沉管隧道管节中切取单位长度,将其当成平面应变进行计算;纵向计算是将所有管节连成一个大系统进行计算;局部计算是根据具体情况,检算沉管中局部的应力或变形控制部位。

(3) 接头设计和施工。接头设计与施工是沉管工程质量优劣的关键问题之一,需要综合考虑以下问题:具有非常可靠的水密性问题;除应设置足够而且合理的止水带以外,还应考虑接头处是否存在其他区域渗漏的可能;接头类型与构造的尺寸类型宜少,接头中各部件的品种宜少,同一部件的类型宜少;各部件的设计应简洁、作用明确,应给接头中的各种部件造成良好的或较好的施工条件,由于接头中各部件较多,接头的宽度(隧道纵向)和深度均只有 1 m 左右,施工范围窄,良好的施工条件是保证各部件施工质量的关键问题,而这一关键问题的解决途径往往是由良好的设计提供的;沉管隧道一般需要考虑抗震;浮运沉放时的结构安全性验算;其他有关问题的考虑,如沉管隧道管节本体的外防水设计问题、需考虑众多的钢结构设计、管节在制作阶段的防裂问题。总之,沉管隧道的设计与计算是一个相当复杂的过程,需要考虑的具体情况也较繁多,在设计计算中,应分门别类地进行详细设计和计算。

四、沉管隧道的施工特点

沉埋法是在疏浚好的河床或海床中挖出基槽,将在陆上预先制作的几个沉埋箱涵或管节拖运到敷设现场,沉设在基槽中,在水中与已沉埋的节段接合之后,处理管节接头及基础,最后再进行回填而完成水下隧道修筑的方法。这种普遍采用的施工方法特点鲜明:

(1) 隧道管节是在造船台或者干坞中良好条件下施工制成的,因此可以做成需要的形状和很大尺度的管节。

(2) 全部沉放作业可以在水面上使用重型船舶、机械操作,施工容易也非常安全。

(3) 管节制作和沉放作业是分开在不同地点进行的,因而可以平行作业,缩短工期。

(4) 拖航、沉放、开挖等可采用大型机械设备,即使是非常大的隧道,也能做到安全、准确、迅速地施工。

沉管隧道施工工序简介:

(1) 管节的制造和装配。管节的制作方法,大致可分为船台方案和船坞方案两种,前者主要适用于圆形钢壳管节,后者主要适用于矩形钢筋混凝土管节,管节制作方法要同施工条件和工期等适应。

(2) 基槽开挖。在水底进行水中作业,开挖出一条沟槽,沟底挖至隧道设计标高,开挖

与一般疏浚作业相似。

(3) 基础处理。管节底部可用多种方法进行基础处理, 因为它是深水底下的作业, 施工准确性难免有缺陷, 因此应有针对性地做进一步的探讨和研究。常用施工方式有: 铺面刮平方式、灌砂方式、桩基础方式、管内压砂和压浆方式等。采用何种基础处理方式主要根据地质、水文条件以及施工技术和设备等因素决定, 其关键是要使沉管隧道受力均匀, 尽量减少不均匀沉降以保证隧道安全运行。

(4) 管节浮运、沉放、连接。把在现场附近预制好的、一定长度的隧道管节浮运至隧址, 沉放在沟槽内。沉放的方法主要有三种: 加载悬吊沉放法; 水下锚碇牵引沉放法; 切断附加浮力悬吊沉放法。需要根据地形、航道和设备等施工条件慎重选择。

(5) 回填和保护管节, 完成管节内部和接缝收尾作业。如果管节沉放、连接完后, 采用铺面刮平基础方式, 则可随即进行回填; 而采用灌砂法或临时支承法时, 则要等到管节底部处理完, 并落到基床上以后再回填。沉埋管节的回填方法必须考虑防止流水冲刷及航道疏浚、船舶抛锚、沉船时的防护、地震时的稳定等因素来决定。

五、中国工程技术对世界的贡献

我国早在 20 世纪 60 年代初, 就曾在上海开展过类似沉管法工法的理论研究。1976 年, 在杭州湾的上海金山石化工程中首次用此工法建成了一座排污水下隧道; 香港于 1972 年建成了跨越维多利亚港的城市道路海底隧道; 广州市于 1974 年正式开始了用此工法修建城市道路水下隧道的研究。进入 20 世纪 80 年代, 广州、宁波两市已开始应用沉管法修建城市道路水下隧道项目, 并在此期间相继完成了项目的立项、可行性研究报告的编制及审批、初步设计, 正式动工兴建。与此同时, 我国台湾省于 1984 年亦在高雄市建成了高雄港道路沉管隧道。

到了 20 世纪 90 年代初, 广州、宁波两市的沉管隧道相继建成通车, 竣工多年来行车运营情况良好, 其中, 1992 年年底建成通车的广州黄沙至芳村珠江水下隧道, 成为我国大陆首次用此工法建成的第一座城市道路与地下铁道共管设置的水下隧道。广州珠江、宁波甬江水下隧道的建成, 标志着我国在这一技术领域进入了一个新的发展阶段。由上海隧道工程公司承建的宁波甬江口又一条常洪隧道, 也是国内采用沉管法新建的工程规模更大的水底隧道。上海修建完成的位于吴淞口附近的外环线越江公路隧道, 全长 2 880 m, 其中, 过江用沉管法修建的隧道长 700 多米, 宽 43 m, 设 8 条机动车道。

2010 年已贯通的南京长江隧道(桥隧方案比较中的隧道方案), 全长 6 180 m, 其中江中沉管段为 2 090 m, 由 19 节 110 m 长的管节组成; 地基为细砂层及粉砂层, 流水速度达 1.2 m/s, 其规模和预期的修建难度都超过了珠江和甬江隧道, 这是一项 21 世纪的宏伟工程。还有武汉跨越长江的城市道路与地下铁道共管的水下隧道, 无论在工程规模、技术难度和科技含量等方面都远高于珠江、甬江水下隧道。广州过珠江隧道工程断面为 4 孔箱形钢筋混凝土结构, 其中两孔各为双车道单向运行的机动车道, 一孔为广州地铁双线区间隧道, 另一孔为设备管廊。隧道的断面尺寸为 33 m×7.9 m, 长 1 238.5 m; 沉管节总长为 457 m, 分为 105 m、120 m、120 m、90 m、22 m 五段; 混凝土为 C30、S8, 壁厚 1 m, 底板厚 1.2 m, 最大段重 3 300 t, 施工前沉管在 48 m×150 m 的船坞内预制。与世界上已建成的沉管隧道相比, 该隧道在宽度上



是名列前茅的。广州珠江隧道是我国首次采用沉管法修建的大型水下隧道,为我国大型沉管工程开创了成功的先例。隧道仅用了 4 个多月的时间就完成了全部沉放,通车后情况良好,特别是防水质量达到了“滴水不漏”的程度。位于浙江宁波的甬江隧道全长 1 019.53 m,水中段长 419.56 m,修建在海相沉积、饱和流塑状的黄色淤泥质黏土的软弱地基上。河道淤积严重,实测淤强为 16 cm/d。采用抛石回填基础和专用的清淤设备,顺利地完成了工程,为我国在软弱地基上修建沉管隧道积累了经验。珠江和甬江这 2 座水下隧道的成功建成,标志着我国已具备了用管节沉放法修建水下隧道的能力,并且掌握了相关技术。已完工的上海市外环线越江沉管隧道工程是上海外环线北段的过江咽喉,它位于吴淞口地区,距长江口仅 2 km,东起浦东三岔港,西至浦西吴淞海滨公园附近,全长 2 880 m,其中沉管节长为 736 m,沉管高 9.55 m、宽 43 m,设计时速 80 km/h,为双向 8 车道水下公路交通隧道。该工程 1999 年 12 月 28 日开工,工程总投资近 12 亿元。以隧道的车道数、管节的宽度及重量计,上海外环越江隧道规模居亚洲第一,是上海市首次采用沉管法施工的越江隧道。我国采用沉管隧道法施工的三条隧道——广州珠江公路、铁路合用沉管隧道,宁波甬江公路沉管隧道和上海 8 车道的沉管越江隧道,其质量和防水性能都达到了较高的水平,标志着我国在沉管隧道领域达到了国际先进水平。

用沉管法建设水下隧道虽在世界上已有 100 多年的历史,但在我国大陆开始采用此法修建隧道则始于 20 世纪 80 年代末,建造大型沉管隧道尚属首次。上海外环隧道相关的大型沉管隧道关键技术研究课题在上海通过了专家鉴定,大型沉管隧道关键技术研究针对工程实际进行了包括优化设计、主要工程节点中关键工序的技术难点攻关在内的 11 个关键性课题的研究。例如,通过研究,解决了河口潮汐水位变化剧烈的水文环境下管节局部高出河床的设计难题;深度超过 30 m、宽度达 43 m 的临江暗埋段基坑的干法施工;共计 7 节、单节质量超过 4.5 万吨的大体积自防水混凝土管节制作,确保所有管节没有出现一条裂缝,整个管节完全利用混凝土的自密防水性能而没有采取常规必需的体外防水措施;首创超级计算机在地下工程中的三维仿真试验研究,取得了和运用计算机简化模型分析研究相接近的结论,证明了上海外环线沉管隧道抗震分析中利用简化模型和优选参数进行分析研究这一创新方法的有效性。随着经济的发展和技术的进步,特别是许多已建工程的事实,使得人们的观念发生了变化,人们已经认识到“遇水架桥”不再是唯一选择,在许多情况下,以水底隧道沟通两岸比建桥更为优越。

六、沉管法展望

虽然沉管法自从问世以来,因为施工方式先进、可操作性强,已经逐渐成为修建水下大型隧道的首选,并且无论从设计方法、施工工序,还是配套工程的处理等方面都取得了长足的进步,有利地促成了众多大型工程的顺利完工,但对此法的研究和经验总结一直没有停止过。国内外工程界关心和研究的重点主要表现在以下几个方面:

- (1) 经济性能。
- (2) 制作工艺和施工技术。
- (3) 防水技术。
- (4) 基础的处理工艺。